

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Mykolas DAUGEVIČIUS

ILGALAIKĖS APKROVOS ĮTAKA ANGLIES
PLUOŠTU SUSTIPRINTŲ LENKIAMŲJŲ
GELŽBETONINIŲ ELEMENTŲ ELGSENAI

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
STATYBOS INŽINERIJA (02T)



LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2010

Disertacija rengta 2006–2010 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Mokslinis vadovas

prof. dr. Juozas VALIVONIS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, statybos inžinerija – 02T).

VGTU leidyklos TECHNIKA 1849-M mokslo literatūros knyga
<http://leidykla.vgtu.lt>

ISBN 978-9955-28-766-7

© VGTU leidykla TECHNIKA, 2010
© Mykolas, Daugevičius, 2010
mykolas_d@yahoo.com

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Mykolas DAUGEVIČIUS

**INFLUENCE OF LONG-TERM LOAD
ON THE BEHAVIOUR OF REINFORCED
CONCRETE BEAMS STRENGTHENED
WITH CARBON FIBRE COMPOSITE**

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
CIVIL ENGINEERING (02T)



LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2010

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2006–2010.

Scientific Supervisor

Prof Dr Juozas VALIVONIS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Civil Engineering – 02T).

Reziumė

Disertacijoje nagrinėjama lenkiamųjų gelžbetoninių sijų, tempiamojoje zonoje sustiprintų anglies pluošto kompozitu, elgsena esant ilgalaikiam statinės apkrovos poveikiui. Disertacinio darbo tikslas – atlikti eksperimentinius tyrimus ir nustatyti ilgalaikės apkrovos poveikį sijos laikomajai galiai bei įlinkių vystymuisi; apskaičiuoti sijos įlinkį pagal sudėtinių strypų teoriją įvertinant ilgalaikės statinės apkrovos poveikį bei betono ir anglies pluošto kompozito jungties standumo pokytį dėl šlyties valksnumo deformacijų prieaugio.

Disertaciją sudaro: įvadas, keturi pagrindiniai skyriai, rezultatų apibendrinimas ir išvados, naudotos literatūros sąrašas, autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašas.

Įvadiniamе skyriuje nagrinėjama tiriamoji problema ir darbo aktualumas, nurodytas tyrimų objektas, suformuluoti darbo tikslai ir uždaviniai, pateikta tyrimų metodika, aptarta darbo svarba ir praktinė rezultatų reikšmė, pristatyti gynamieji teiginiai.

Pirmajame skyriuje atlikta literatūros apžvalga. Čia nagrinėjamas ilgalaikės apkrovos ir aplinkos poveikis anglies pluošto kompozitui, kompozito ir betono jungčiai bei gelžbetoninių sijų elgsenai. Pateikiami sustiprintų sijų elgsenos eksperimentinių tyrimų, veikiant trumpalaike ir ilgalaikę apkrovą, rezultatai. Aptariamos skaičiavimo metodikos, vertinančios ilgalaikį apkrovos poveikį.

Antrajame skyriuje pateikiama skaičiavimo metodika, grindžiama sudėtinių strypų teorija. Skaičiavimo metodika skirta sijų, sustiprintų anglies pluošto kompozitu, įlinkiui ir laikomajai galiai skaičiuoti. Metodikoje vertinamas ilgalaikės apkrovos poveikis betono ir anglies pluošto kompozito jungties standumui.

Trečiajame skyriuje pateikiami eksperimentiniai tyrimai, aprašomos bandinių charakteristikos ir jų bandymo metodikos. Nagrinėjamas sijų pleišetumo, sluoksnių deformacijų, poslinkių ir įlinkių vystymosi pobūdis. Analizuojama ilgalaikės apkrovos įtaka sijos laikomajai galiai.

Ketvirtajame skyriuje lyginami eksperimentinių tyrimų, taikant skaičiavimo metodikas, rezultatai. Pasiūlytoji sustiprintų sijų įlinkio skaičiavimo metodika palyginta su *FIB Bulletin 14* projektavimo rekomendacijose siūloma metodika.

Darbo pabaigoje apibendrinami rezultatai ir pateikiamos išvados.

Disertacijos tema išspausdinti septyni moksliniai straipsniai: keturi straipsniai periodiniuose recenzuojamuose leidiniuose, trys straipsniai konferencijų pranešimų medžiagoje. Disertacijoje atlikti tyrimo rezultatai buvo paskelbti trejose respublikinėse ir vienoje tarptautinėje mokslinėje konferencijoje.

Abstract

The influence of long-term load on the reinforced concrete beams strengthened with a carbon fiber composite layer in the tensioned zone is considered in this dissertation. The evolution of deformations in the layers of the beams and the evolution of beam deflection is analyzed. The load carrying capacities after a long-term load action are also determined herein. The built-up-bars theory for calculation of deflections and the load carrying capacity after a long-term load action is presented in this dissertation.

The thesis consists of an introduction, four main chapters, the results and conclusions and a list of used literature.

The introduction describes the major objectives of the dissertation. It presents the aims, the methods of research, the scientific novelty and defended propositions.

The first chapter reviews application of carbon fiber composite polymer in strengthening structures. The influence of a long term load on concrete, polymer matrix, carbon fiber reinforced composite, strengthened concrete beams is also considered. In addition, it considers the calculation methods that evaluate the long term load influence.

The second chapter is dedicated to applying of the built-up-bars theory in calculation of deflections and the load carrying capacity, including long term load action. Also, variation of concrete and carbon fiber composite contact stiffness is presented in this chapter.

Chapter three presents the carried out experiments. It describes the experimental program of three series of strengthened beams. Evolution of deformations, deflections and cracking during a long-term load period is considered. The load carrying capacity after a long-term load action is considered too.

Experimental and theoretical results are presented in chapter four. Deflections of the strengthened beams calculated with the help of the proposed built-up-bars theory are compared with experimental results. Calculated deflections by proposed methodology compared with calculated results by *FIB Bulletin 14*.

At the end presented general results and conclusions.

Seven articles focusing on the subject of the dissertation are published, four of which presented in reviewed scientific periodical publications. The results of dissertation were announced in three republican conferences and one international conference.

Žymėjimai

Simboliai

A_c – gelžbetoninio elemento skerspjūvio plotas;

$A_{c,eff}$ – gelžbetoninio elemento efektyvusis skerspjūvio plotas;

A_{c,eff,t_0} – gelžbetoninio elemento efektyvusis skerspjūvio plotas pradinio laiko momentu;

A_{c,eff,t_1} – gelžbetoninio elemento efektyvusis skerspjūvio plotas nagrinėjamo laiko momentu;

A_{ct} – tempiamosios betono zonos skerspjūvio plotas;

A_f – anglies pluošto kompozitinio elemento skerspjūvio plotas;

A_{fe} – anglies pluošto kompozito skerspjūvio plotas;

$A_{fe,eff}$ – anglies pluošto kompozitinio elemento efektyvusis skerspjūvio plotas;

A_i – i -tojo sluoksnio (elemento) skerspjūvio plotas;

$A_{i,t}$ – i -tojo sluoksnio (elemento) skerspjūvio plotas laiko momentu;

A_{i,t_0} – i -tojo elemento skerspjūvio plotas pradinio laiko momentu;

A_{i,t_1} – i -tojo elemento skerspjūvio plotas nagrinėjamo laiko momentu;

A_{s1} – tempiamosios strypinės plieninės armatūros skerspjūvio plotas;

A_{s2} – gniuždomosios strypinės plieninės armatūros skerspjūvio plotas;

$B_1(t)$ – standumo išraiška;

$B_2(t)$ – standumo išraiška;

$B_3(t)$ – standumo išraiška;

C_{c,t_0} – betono valkšnumo matas pradiniu laiko momentu;

$C_{c,\tau}$ – betono valkšnumo matas laiko periode;

D – sijos sudėtinio ir monolitinio skerspjuvio standumo skirtumas;

E_c – betono tamprumo modulis;

E_{c,t_0} – pradinis betono tamprumo modulis;

$E_{c,eff}$ – gelžbetoninio elemento efektyvusis tamprumo modulis;

E_{c,eff,t_0} – gelžbetoninio elemento efektyvusis tamprumo modulis pradiniu laiko momentu;

E_{c,eff,t_1} – gelžbetoninio elemento efektyvusis tamprumo modulis nagrinėjamu laiko momentu;

$E_{c,\tau}$ – gelžbetoninio elemento tamprumo modulis laiko periode;

E_{eff} – sijos monolitinio skerspjuvio efektyvusis tamprumo modulis;

E_f – anglies pluošto kompozitinio elemento tamprumo modulis;

E_i – i -tojo elemento tamprumo modulis;

$E_{i,t}$ – i -tojo sluoksnio (elemento) tamprumo modulis laiko momentu;

E_{i,t_0} – i -tojo sluoksnio (elemento) tamprumo modulis pradiniu laiko momentu;

$F_1; F_2$ – sutelktosios jėgos;

$G_{c,eff}(t)$ – betono ir anglies pluošto kompozito jungties efektyvusis šlyties modulis;

$I_{c,eff}$ – gelžbetoninio elemento efektyvusis inercijos momentas;

$I_{c,eff}(t)$ – efektyvusis gelžbetoninio elemento inercijos momentas laiko periodu;

I_{c,eff,t_0} – gelžbetoninio elemento efektyvusis inercijos momentas pradiniu laiko momentu;

I_{c,eff,t_1} – gelžbetoninio elemento efektyvusis inercijos momentas nagrinėjamu laiko momentu;

$I_{crc}(t)$ – supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas statmenojo plyšio pjūvyje;
 $I_{eff}(t)$ – sijos monolitinio skerspjūvio efektyvusis inercijos momentas;
 $I_{f,eff}$ – anglies pluošto kompozitinio elemento efektyvusis inercijos momentas;
 $I_{gross}(t)$ – vientiso skerspjūvio inercijos momentas;
 n – i -tojo elemento inercijos momentas;
 $I_{i,t}$ – i -tojo sluoksnio (elemento) inercijos momentas nagrinėjamo laiko momentu;
 I_{i,t_0} – i -tojo sluoksnio (elemento) inercijos momentas pradiniu laiko momentu;
 $I_s(t)$ – sijos skerspjūvio inercijos momentas plyšio atsiradimo vietoje;
 M – bendras sistemos lenkimo momentas;
 $M_{c,eff}$ – gelžbetoninio elemento efektyvusis lenkimo momentas;
 $M_{c,r}$ – gelžbetoninio elemento lenkimo momentas;
 M_{crc} – statmenųjų plyšių atsiradimo momentas;
 M_e – sustiprintą siją veikiantis lenkimo momentas;
 M_i – i -tojo elemento lenkimo momentas;
 M_i^T – i -tojo sluoksnio lenkimo momentas dėl šlyties jėgos poveikio;
 $M_{r,s}$ – nesustiprintos sijos laikomoji galia;
 $N_{c,r}$ – gelžbetoninio elemento ašinė jėga;
 $N_{f,r}$ – anglies pluošto kompozito elemento ašinė jėga;
 $N_{c,eff}$ – gelžbetoninio elemento efektyvi ašinė jėga;
 N_{c,eff,t_0} – gelžbetoninio elemento efektyvioji ašinė jėga pradiniu laiko momentu;
 N_{c,eff,t_1} – gelžbetoninio elemento efektyvioji ašinė jėga nagrinėjamo laiko momentu;
 $N_{f,eff}$ – anglies pluošto kompozitinio elemento efektyvi ašinė jėga;
 N_i – i -tojo sluoksnio (elemento) ašinė jėga;
 $N_{i,t}$ – i -tojo sluoksnio (elemento) ašinė jėga laiko momentu;
 N_{i,t_0} – i -tojo elemento ašinė jėga pradiniu laiko momentu;
 N_{i,t_1} – i -tojo elemento ašinė jėga nagrinėjamo laiko momentu;

R_c – ašies einančios per gelžbetoninio elemento skerspjūvio svorio centrą kreivio spindulys;

R_{crc} – ašies einančios per supleišėjusio gelžbetoninio skerspjūvio svorio centrą kreivio spindulys;

R_f – ašies einančios per kompozitinio sluoksnio skerspjūvio svorio centrą kreivio spindulys;

R_s – ašies einančios per tempiamos plieninės strypinės armatūros svorio centrą kreivio spindulys;

S_{cc} – sijos gniuždomosios skerspjūvio dalies statinis momentas apie neutraliąją ašį;

S_{s1} – tempiamosios plieninės strypinės armatūros statinis momentas apie neutraliąją ašį;

S_{s2} – gniuždomosios armatūros statinis momentas apie neutraliąją ašį;

$T_{c,k}$ – šlyties jėga betono jungtyje su anglies pluošto kompozito sluoksniu;

T_{c,k,t_0} – šlyties jėga betono jungtyje su anglies pluošto kompozitu pradinio laiko momentu;

T_{c,k,t_1} – šlyties jėga betono jungtyje su anglies pluošto kompozitiniu sluoksniu nagrinėjamo laiko momentu;

$T_{f,k}$ – šlyties jėga anglies pluošto kompozito jungtyje su betonu;

a – gelžbetoninio elemento svorio centro atstumas iki betono ir anglies pluošto jungties;

a_{s1} – tempiamosios strypinės plieninės armatūros skerspjūvio centro atstumas iki sijos tempiamojo krašto;

a_{s2} – gniuždomosios strypinės plieninės armatūros skerspjūvio centro atstumas iki sijos gniuždomojo krašto;

a_t – koeficientas;

b – anglies pluošto kompozito skerspjūvio centro atstumas iki betono ir anglies pluošto jungties;

b_s – sijos plotis;

d – gelžbetoninės sijos naudingasis skerspjūvio aukštis;

dt – nagrinėjamo laiko pokyčio koordinatė;

$du_c(t)$ – gelžbetoninio elemento pasislinkimas laiko periodu;

du_{c,el,t_0} – gelžbetoninio elemento pasislinkimas pradinio laiko momentu dėl tampriųjų deformacijų prieaugio;

du_{c,pl,t_0} – gelžbetoninio elemento pasislinkimas pradinio laiko momentu dėl plastinių deformacijų prieaugio;

$du_f(t)$ – anglies pluošto sluoksnio pasislinkimas laiko periodu;

du_{f,el,t_0} – anglies pluošto kompozitinio elemento pasislinkimas pradiniu laiko momentu dėl jungties tampriųjų deformacijų prieaugio;

du_{f,pl,t_0} – anglies pluošto kompozitinio elemento pasislinkimas pradiniu laiko momentu dėl jungties plastinių deformacijų prieaugio;

du_{l,t_0} – pasislinkimas tarp sluoksnių pradiniu laiko momentu;

dx – nykstamai maža sijos ilgio dalis;

$d\tau$ – laiko periodo pokytis;

h – sijos aukštis;

i – sluoksnio (elemento) indeksas;

$y_c(t)$ – sijos svorio centras laiko periodu (vientisame skerspjūvyje);

k_0 – koeficientas;

$k_{i,1}$ – koeficientas;

$k_{i,2}$ – koeficientas;

l – sijos tarpatramio ilgis;

l_p – sutelktosios jėgos atstumas iki sijos atramos;

n – sijos skerspjūvio sluoksnių (elementų) skaičius;

t_f – anglies pluošto kompozito sluoksnio storis;

u_c – gelžbetoninio elemento deformacijos;

u_f – anglies pluošto kompozito sluoksnio deformacijos;

u_l – deformacijų skirtumas tarp betoninio ir anglies pluošto kompozito sluoksnio;

u_l' – betoninio ir anglies pluošto kompozito sluoksnio santykinų deformacijų skirtumas;

z – atstumas tarp gelžbetoninio elemento ir anglies pluošto kompozito svorio centro;

x – išilginė sijos ašis;

x_{crc} – gniuždomosios betono zonos aukštis statmenojo plyšio pjūvyje;

$x_{crc,s}$ – gniuždomosios betono zonos aukštis statmenojo plyšio atsiradimo vietoje;

$x_{eff}(t)$ – gniuždomosios betono zonos aukštis;

$\alpha_s(t)$ – plieninės strypinės armatūros ir betono tamprumo modulių santykis;

$\alpha_f(t)$ – anglies pluošto kompozito ir betono tamprumo modulių santykis;
 β_1 – anglies pluošto kompozito ir plieninės strypinės armatūros ašinių standumų santykis;
 β_2 – anglies pluošto kompozito ir gniuždomosios betono zonos ašinių standumų santykis;
 γ_{t_0} – sluoksnių jungties standumas šlyties jėgų poveikiui pradinio laiko periodu;
 $\Delta \varepsilon_{c,el}$ – tampriųjų deformacijų prieaugis betone;
 $\Delta \varepsilon_{c,pl}$ – plastinių deformacijų prieaugis betone;
 $\Delta \varepsilon_{f,el}$ – tampriųjų deformacijų prieaugis anglies pluošto elemente;
 $\Delta \varepsilon_{f,pl}$ – plastinių deformacijų prieaugis anglies pluošto elemente;
 $\Delta \varepsilon_k$ – deformacijų skirtumas tarp tempiamojo gelžbetoninio elemento ir anglies pluošto kompozito sluoksnio;
 ε_c – betono sluoksnio santykinė deformacija;
 ε_{c,t_0} – betono deformacija pradinio laiko momentu;
 $\varepsilon_c(t)$ – betono deformacijų prieaugis laiko periodu;
 ε_{c,el,t_0} – betono tampriosios deformacijos pradinio laiko momentu;
 $\varepsilon_{c,N}$ – gelžbetoninio elemento santykinė deformacija dėl ašinės jėgos poveikio;
 ε_{c,el,t_n} – betono tampriosios deformacijos pasirinktu laiko momentu;
 $\varepsilon_{c,el,\tau}$ – betono tampriosios deformacijos laiko periodu;
 $\varepsilon_{c,N,t}$ – betono deformacijos dėl ašinių jėgų poveikio laiko periodu;
 ε_{c,pl,t_0} – betono plastinės deformacijos pradinio laiko momentu;
 ε_{c,pl,t_n} – betono plastinės deformacijos pasirinktu laiko momentu;
 $\varepsilon_{c,pl,\tau}$ – betono plastinės deformacijos laiko periodu;
 ε_f – anglies pluošto kompozitinio sluoksnio santykinė deformacija;
 ε_{f,t_0} – anglies pluošto elemento deformacija pradinio laiko momentu;
 $\varepsilon_f(t)$, $\varepsilon_{FRP}(t)$ – anglies pluošto elemento deformacijų prieaugis laiko periode;

ε_{f,el,t_0} – tampriosios deformacijos anglies pluošto kompozitiniame elemente pradiniu laiko momentu;

ε_{f,el,t_n} – tampriosios deformacijos anglies pluošto kompozitiniame elemente pasirinktu laiko momentu;

$\varepsilon_{f,el,\tau}$ – anglies pluošto kompozitinio elemento tampriosios deformacijos laiko periodu;

$\varepsilon_{f,N}$ – anglies pluošto kompozito santykinė deformacija dėl ašinės jėgos poveikio;

ε_{f,pl,t_0} – plastinės deformacijos anglies pluošto kompozitiniame elemente pradiniu laiko momentu;

ε_{f,pl,t_n} – plastinės deformacijos anglies pluošto kompozitiniame elemente pasirinktu laiko momentu;

$\varepsilon_{f,pl,\tau}$ – anglies pluošto kompozitinio elemento plastinės deformacijos laiko periodu;

$\varepsilon_i(t)$ – i -tojo sluoksnio (elemento) deformacijos laiko periodu;

$\varepsilon_{i,M}(t)$ – i -tojo sluoksnio (elemento) deformacijos laiko periodu dėl lenkimo momento poveikio;

$\varepsilon_{i,N}(t)$ – i -tojo sluoksnio (elemento) deformacijos laiko periodu dėl ašinių jėgų poveikio;

$\lambda(t)$ – parametras, apibūdinantis sluoksnių jungties standumą laiko periodu;

μ_d – skerspjūvio naudingojo aukščio vidutinė reikšmė;

μ_{Ec} – betono tamprumo modulio vidutinė reikšmė;

μ_f – anglies pluošto kompozito santykinis kiekio koeficientas;

μ_{fc} – betono stiprio vidutinė reikšmė;

μ_{ff} – anglies pluošto kompozito stiprio vidutinė reikšmė;

μ_{fsc} – gniuždomos plieninės armatūros stiprio vidutinė reikšmė;

μ_{fs} – tempiamos plieninės armatūros stiprio vidutinė reikšmė;

μ_{s1} – tempiamosios plieninės strypinės armatūros santykinio kiekio koeficientas;

μ_{s2} – gniuždomosios plieninės strypinės armatūros santykinio kiekio koeficientas;

$\mu(t)$ – gniuždomąją betono zoną apibūdinantis parametras;

$\xi_k(t)$ – sijos gelžbetoninio ir anglies pluošto elementų tarpusavio sąveikos standumas laiko periodu;

ρ_c – gelžbetoninio elemento kreivis;
 ρ_f – anglies pluošto elemento kreivis;
 ρ_i – i -tojo elemento kreivis;
 σ_{c,t_0} – betono įtempiai pradiniu laiko momentu;
 $\tau_{c,r}$ – betono šlyties įtempiai jungtyje su anglies pluošto kompozito sluoksniu;
 $\tau_{f,r}$ – anglies pluošto kompozito šlyties įtempiai jungtyje su betonu;
 φ_{c,t_0} – betono valkšnumo charakteristika pradiniu laiko momentu;
 $\varphi_{i,t}$ – i -tojo sluoksnio valkšnumo charakteristika;
 φ_{i,t_0} – i -tojo sluoksnio valkšnumo charakteristika pradiniu laiko momentu;
 φ_{i,t_1} – i -tojo sluoksnio valkšnumo charakteristika nagrinėjamu laiko momentu.

Santrumpos

EMM – efektyviojo modulio metodas (effective modulus method);

AEMM – senėjančios medžiagos efektyviojo modulio metodas (adjusted effective modulus method).

Turinys

IVADAS	1
Problemos formulavimas	1
Darbo aktualumas	2
Tyrimų objektas	2
Darbo tikslas	2
Darbo uždaviniai	2
Tyrimų metodika	3
Darbo mokslinis naujumas	3
Darbo rezultatų praktinė reikšmė	3
Ginamieji teiginiai	4
Darbo rezultatų aprobavimas	4
Disertacijos struktūra	4
 1. GELŽBETONINIŲ SIJŲ, TEMPIAMOJOJE ZONOJE SUSTIPRINTŲ ANGLIES PLUOŠTO KOMPOZITU, VEIKIAMŲ ILGALAIKE APKROVA, EKSPERIMENTINIŲ TYRIMŲ IR SKAIČIAVIMO METODŲ APŽVALGA	5
1.1. Anglies pluošto naudojimas statybinėms konstrukcijoms stiprinti	5
1.2. Anglies pluošto kompozitas	8
1.3. Ilgalaikės apkrovos įtaka betono ir anglies pluošto jungčiai	10
1.4. Ilgalaikės apkrovos įtaka betonui	12
1.5. Ilgalaikės apkrovos įtaka gelžbetoninėms sijoms	13
1.6. Gelžbetoninių lenkiamųjų elementų, sustiprintų anglies pluošto kompozitu, elgsenos tyrimai	15

1.7. Lenkiamųjų elementų laikomosios galios skaičiavimas	17
1.8. Lenkiamųjų elementų, sustiprintų anglies pluošto kompozitu, įlinkio skaičiavimas	19
1.9. Betono ir anglies pluošto jungties standumo vertinimas	23
1.10. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas	26
 2. GELŽBETONINIŲ SIJŲ, SUSTIPRINTŲ ANGLIES PLUOŠTO KOMPOZITU, SKAIČIAVIMAS ĮVERTINANT ILGALAIKĮ APKOVOS POVEIKĮ	29
2.1. Jungties standumo vertinimas.....	30
2.2. Gelžbetoninių sijų, sustiprintų anglies pluošto kompozitu, įlinkio skaičiavimas, veikiant ilgalaikiai apkrovai.....	41
2.3. Gelžbetoninių elementų su išorine anglies pluošto armatūra laikomosios galios skaičiavimas po ilgalaikės apkrovos poveikio.....	46
2.4. Antrojo skyriaus išvados	48
 3. ANGLIES PLUOŠTO KOMPOZITU SUSTIPRINTŲ GELŽBETONINIŲ SIJŲ EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI.....	49
3.1. Medžiagos	49
3.2. Bandiniai ir bandymo metodika	52
3.3. Sijų elgsena iki ilgalaikės apkrovos poveikio.....	61
3.4. Sijų elgsena esant ilgalaikės apkrovos poveikiui	68
3.5. Sijų elgsena po ilgalaikės apkrovos poveikio.....	85
3.6. Plyšių vystymosi charakteris ilgalaikių tyrimų ir po jų metu	95
3.7. Trečiojo skyriaus išvados	101
 4. EKSPERIMENTINIŲ IR TEORINIŲ TYRIMŲ VERTINIMAS.....	105
4.1. Eksperimentiniai ir teoriniai sustiprintų sijų įlinkio rezultatai	105
4.2. Eksperimentinės ir apskaičiuotos sijų laikomosios galios palyginimas	110
4.3. Sustiprintų sijų laikomosios galios patikimumo vertinimas.....	112
4.4. Eksperimentinių ir teorinių sijų įlinkių ir laikomosios galios palyginimai.....	114
4.5. Ketvirtojo skyriaus išvados	117
 BENDROSIOS IŠVADOS.....	119
 LITERATŪRA IR ŠALTINIAI	121
 AUTORIAUS PUBLIKACIJOS DISERTACIJOS TEMA	129

Contents

INTRODUCTION.....	1
Topicality of the problem.....	1
Topicality of the work	2
Subject of research	2
Main objective.....	2
Tasks of the Thesis	2
Methodology of research.....	3
Scientific novelty.....	3
Practical value	3
Defended propositions.....	4
Approval of the Results	4
The scope of the scientific work.....	4
 1. REVIEW OF EXPERIMENTAL RESEARCHES AND CALCULATION METHODS OF FERROCONCRETE BEAMS STRENGTHENED WITH CARBON FIBER COMPOSITE IN THE TENSIONED ZONE.....	 5
1.1. Strengthening of elements of structures with carbon fiber composite	5
1.2. Carbon fiber composite	8
1.3. Influence of long-term load for concrete and carbon fiber composite joint	10
1.4. Influence of long-term load for concrete.....	12
1.5. Influence of long-term load for ferroconcrete beams	13
1.6. Experimental research of the behavior of ferroconcrete beams strengthened with carbon fiber composite.....	15
1.7. Calculation of the load carrying capacity	17

1.8. Calculation of beam deflection.....	19
1.9. Evaluation of the stiffness of concrete and carbon fiber composite joint	23
1.10. Conclusions of the first chapter and evaluation of the main objectives	26
 2. EVALUATION OF A LONG-TERM LOAD INFLUENCE ON THE FERROCONCRETE BEAMS	29
2.1. Evaluation of the stiffness of joint.....	30
2.2. Calculation of deflection of a strengthened beam subjected to a long term load action	41
2.3. Calculation of the load carrying capacity of strengthened beams affected with a long-term load	46
2.4 Conclusions of the second chapter	48
 3. EXPERIMENTAL RESEARCH OF FERROCONCRETE BEAMS STRENGTHENED WITH CARBON FIBRE COMPOSITE.....	49
3.1. Materials.....	49
3.2. Specimens and testing methodology	52
3.3. Behaviour of strengthened beams before a long term load intensity is reached	61
3.4. Behaviour of strengthened beams under a long term load action.....	68
3.5. Behaviour of strengthened beams after a long term load action	85
3.6. Character of the evolution of cracks.....	95
3.7. Conclusions of the third chapter.....	101
 4. EVALUATION OF EXPERIMENTAL AND THEORETICAL RESEARCH.	105
4.1. Exsperimental and calculated deflections of strengthened beams.....	105
4.2. Comparison of calculated and experimental load carrying results.....	110
4.3. Reliability assessment of the load carrying capacity of strengthned beams.....	112
4.4. Comparison of calculated and experimental deflections	114
4.5. Conclusions of the fourth chapter.....	117
 GENERAL CONCLUSIONS	119
 REFERENCES	121
 LIST OF THE AUTHOR’S SCIENTIFIC PUBLICATIONS ON THE TOPIC OF DISSERTATION.....	129

Ivadas

Problemos formulavimas

Anglies pluošto kompozitas vis plačiau naudojamas statybinėms konstrukcijoms stiprinti. Apie perspektyvų jo taikymą byloja eksperimentinių tyrimų gausa, efektyvus sustiprintų konstrukcijų darbas bei atsirandančios projektavimo rekomendacijos statybinėms konstrukcijoms stiprinti. Daugelyje šalių tobulinamos konstrukcijų stiprinimo anglies pluošto kompozitu technologijos. Statybinės konstrukcijos šiuo kompozitu dažniausiai stiprinamos sukuriant išorinį kompozito sluoksnį, perimantį papildomas įrašas, kurioms stiprinamoji konstrukcija nesugeba priešintis. Eksperimentiniais tyrimais įrodyta, kad anglies pluošto ir betono jungtis nėra standi, todėl ilgalaikės apkrovos poveikis sumažins jungties standumą ir įtakos sijos elgseną.

Nuo to, koku plieninės armatūros kiekiu anksčiau buvo armuota konstrukcija, priklauso ir sustiprintos sijos laikomosios galios padidėjimas, kuris gali siekti net iki keturių kartų. Sustiprintos konstrukcijos elgsenai didelę įtaką turi apkrovos poveikio trukmė bei apkrovimo intensyvumas. Tokių tyrimų trūksta, todėl svarbu ištirti sijų elgseną esant skirtingam ilgalaikės apkrovos intensyvumui ir skirtingam išorinės anglies pluošto kompozito armatūros inkaravimui.

Darbo aktualumas

Betono ir kompozito jungtyje besivystančios šlyties deformacijos sumažina jungties standumą ir kompozitinis sluoksnis pasislenka stiprinamojo elemento atžvilgiu. Todėl sumažėja sijų laikomoji galia ir padidėja įlinkis. Aktualu ištirti sustiprintų sijų elgseną esant ilgalaikiam apkrovų poveikiui, nes betono ir kompozito jungtyje vystosi šlyties valkšnumo deformacijos, kurios papildomai sumažina laikomąją galią bei padidina įlinkius.

Tyrimų objektas

Tyrimo objektas – veikiant ilgalaikę statinę apkrovą lenkiamųjų gelžbetoninių sijų, tempiamojoje zonoje sustiprintų anglies pluošto kompozitu, elgsenos analizė.

Darbo tikslas

Šio darbo tikslas – atlikti eksperimentinius tyrimus ir nustatyti ilgalaikės statinės apkrovos poveikį sustiprintų gelžbetoninių sijų elgsenai. Pritaikyti sudėtinių strypų teoriją ilgalaikio sijų įlinkio ir laikomosios galios skaičiavimui, įvertinant betono ir anglies pluošto jungties standumo pokytį bėgant laikui.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti keliama šie uždaviniai:

1. Atlikti eksperimentinių tyrimų apžvalgą, susijusią su lenkiamųjų sustiprintų sijų elgsena ir jos sudedamųjų elementų įtaka bendram sijos darbui. Išanalizuoti skaičiavimo metodus, leidžiančius vertinti ilgalaikės apkrovos poveikį sijos įlinkiui.
2. Atlikti eksperimentinius lenkiamųjų sijų tyrimus. Nustatyti sijų elgseną esant ilgalaikiai statinei apkrovai. Išmatuoti sluoksnių deformacijas ir sijų įlinkio kitimą ilgalaikio bandymo metu. Nustatyti kaip sijų laikomoji galia priklauso nuo ilgalaikės apkrovos poveikio.
3. Eksperimentinių tyrimų rezultatus palyginti su pasiūlytos skaičiavimo metodikos, grindžiamos sudėtinių strypų totija, rezultatais.

4. Atlikti tyrimų rezultatų analizę ir pasiūlyti anglies pluošto kompozito papildomo tvirtinimo metodą.

Tyrimų metodika

Ilgalaikie statinė apkrova atliekami eksperimentiniai sustiprintų lenkiamųjų sijų tyrimai. Sijos stiprinamos anglies pluošto kompozitu. Sijų įlinkiai ir laikomoji galia skaičiuojama taikant metodiką, grindžiamą sudėtinių strypų teorija, įvertinant betono ir anglies pluošto kompozito jungties standumo pokytį bėgant laikui.

Darbo mokslinis naujumas

Rengiant disertaciją buvo gauti inžinerijos mokslui nauji rezultatai:

1. Įvertinta anglies pluošto kompozito įtaka sustiprintos sijos standumui, atsižvelgiant į supleišėjusius gelžbetoninės sijos tempiamus ruožus veikiant ilgalaikiai statinei apkrovai.
2. Eksperimentais ištirtas ir teoriškai aprašytas betono ir anglies pluošto kompozito jungties standumo kitimas bėgant laikui.
3. Eksperimentiniais tyrimais įrodyta, kad ilgalaikės apkrovos poveikis sukelia betono ir kompozito jungties šlyties valkšnumo deformacijas. Tai sumažina sustiprintos konstrukcijos standumą ir laikomąją galią.
4. Pasiūlyta gelžbetoninių lenkiamųjų elementų, tempiamojoje zonoje sustiprintų anglies pluošto kompozitu, įlinkių skaičiavimo metodika, įvertinanti betono ir anglies pluošto kompozito jungties standumo pokytį bėgant laikui.
5. Pasiūlyta gelžbetoninių lenkiamųjų elementų, sustiprintų anglies pluošto kompozitu, laikomosios galios skaičiavimo metodika vertinant ilgalaikės apkrovos poveikį.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Atlikta ilgalaikie apkrova veikiamų sustiprintų lenkiamųjų elementų elgsenos analizė. Nustatyta anglies pluošto kompozito ir betono jungties šlyties valkšnumo deformacijų įtaka lenkiamųjų elementų standumui ir laikomajai galiai. Tyrimais įrodyta, kad būtina įvertinti jungties standumą bei betono ir anglies pluošto jungties šlyties valkšnumo deformacijų įtaką lenkiamųjų elementų įlinkiui ir laikomajai galiai. Pasiūlyta skaičiavimo metodika, leidžianti įvertinti betono ir an-

glies pluošto kompozito jungties standumą, pritaikyta skaičiuoti sustiprintų sijų įlinkį ir laikomąją galią. Ištirta papildomo anglies pluošto inkaravimo įtaka lenkiamųjų elementų standumui ir laikomajai galiai. Nustatyta, kad praktiniam naudojimui anglies pluošto kompozito sluoksnį geriausia papildomai inkaruoti anglies pluošto apkabomis.

Ginamieji teiginiai

1. Pasiūlyta lenkiamųjų gelžbetoninių elementų, tempiamojoje zonoje sustiprintų anglies pluošto kompozitu, įlinkių ir laikomosios galios skaičiavimo metodika, įvertintina betono ir anglies pluošto kompozito jungties standumo pokytį veikiant ilgalaikiai apkrovai.
2. Sustiprintų lenkiamųjų elementų anglies pluošto kompozito ir betono jungtyje, veikiant ilgalaikiai apkrovai, papildomai atsiranda šlyties valkšnumo deformacijos, kurios sumažina sijos standumą ir laikomąją galią.
3. Anglies pluošto kompozito papildomas inkaravimas sumažino ilgalaikį sijų įlinkio prieaugį nuo 1,14 iki 1,97 karto.

Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tema išspausdinti septyni moksliniai straipsniai: keturi straipsniai periodiniuose recenzuojamuose leidiniuose, trys straipsniai konferencijų pranešimų medžiagoje. Tyrimų rezultatai disertacijos tema buvo skelbti 11-oje ir 12-oje Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijoje „*Mokslas – Lietuvos ateitis*“, respublikinėje konferencijoje „*Statybinės konstrukcijos*“ ir 10-oje tarptautinėje konferencijoje „*Modern Building Materials, Structures and Techniques*“.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, keturi pagrindiniai skyriai, rezultatų apibendrinimas ir išvados, naudotos literatūros sąrašas, autoriaus publikacijų sąrašas disertacijos tema, 79 paveikslų, 13 lentelių, 115 literatūros šaltinių sąrašas. Iš viso 150 puslapių.

Gelžbetoninių sijų, tempiamojoje zonoje sustiprintų anglies pluošto kompozitu, veikiamų ilgalaikė apkrova, eksperimentinių tyrimų ir skaičiavimo metodų apžvalga

1.1. Anglies pluošto naudojimas statybinėms konstrukcijoms stiprinti

Apkrovų paveiktas ir susilpnintas gelžbetonines, plienines, medines konstrukcijas efektyvu stiprinti anglies pluošto kompozitinėmis juostomis (Hay *et al.* 2006; Hollaway, Cadei 2002; Johnsoon *et al.* 2005). Ypatingos paskirties statinių konstrukcijos, atlaikančios dideles apkrovas, taip pat efektyviai sustiprinamos anglies pluošto kompozitu (Andruini *et al.* 2002; Moy *et al.* 2001; Souponitski *et al.* 1999; Triantafillou 2001; Волъфф, Мисселер 1991). Anglies pluošto kompozito naudojimo perspektyvos konstrukcijų laikomajai galiai ir gamybai pradėtos plačiai tirti praėjusio dešimtmečio pabaigoje (Hanna, Jones 1997; Lees 2001; Neale 2000; Meier 2000; Soudki 1998).

Gelžbetoninių konstrukcijų ilgalaikiškumas agresyviojoje aplinkoje gali sumažėti iki 7–10 kartų, todėl racionalu vietoj plieninės strypinės armatūros naudoti kompozitinę armatūrą: stiklo plastiko, bazalto plastiko, anglies plastiko. Naudojant kompozitinę armatūrą galima sumažinti konstrukcijos skerspjūvį, nes nereikalingi dideli apsauginiai sluoksniai, taip pat nėra aktualūs pleišetumo reikalavimai (Михайлов 1990).

Anglies pluošto skaidulas, išaustas į plačias juostas, patogų klijuoti prie įvairios architektūrinės formos konstrukcijų išorės, nepakeičiant architektūrinės jų išvaizdos. Pats kompozitinis sluoksnis vėliau gali būti padengtas apdailos sluoksniais ir tokiu būdu visiškai paslėptas konstrukcijos sustiprinimo faktas. Taip galima puikiai suderinti konstrukcinius, estetinius reikalavimus.

Stiprinant statybines konstrukcijas, anglies pluošto kompozitas gali būti pritaikytas:

1. Lenkiamosioms sijoms ir plokštėms stiprinti.
2. Gniuždomosioms kolonom stiprinti.
3. Kolonų ir sijos sandūros mazgui stiprinti.
4. Mūrinėms sienoms stiprinti.

Stiprinant lenkiamuosius elementus siekiama, kad pluošto kompozitas perimtų dalį tempimo įtempių. Didesniam stiprinimo efektui pasiekti galima naudoti iš anksto įtemptą anglies pluošto kompozitą ir sumažinti tempiamosios plieninės strypinės armatūros įtempius. Kompozitinis sluoksnis, perimdamas tempimo įtempius, sukelia šlyties deformacijas tempiamame betone. Todėl kyla pavojus, kad kompozitinis sluoksnis gali atplyšti nuo betono paviršiaus, net nepadidinus konstrukcijos laikomosios galios. Norint padidinti konstrukcijos sustiprinimo efektyvumą anglies pluošto kompozitu, kuriami ir tiriami įvairūs pluošto inkaravimo metodai (Skuturna 2009; Skuturna, Valivonis 2009). Papildomai inkaravus anglies pluošto kompozito juostas, padidėja sijų laikomoji galia ir pasikeičia suirimo pobūdis.

Stiprinant gniuždomuosius elementus dažniausiai siekiama suvaržyti skersinės deformacijas sukuriant išorinį anglies pluošto kompozitinį apvaskalą. Stiprumo prieaugis labiausiai priklauso nuo betono stiprio. Esant labai dideliame betono gniuždomajam stipriui šis prieaugis gali siekti iki 50 % (Daugevičius, Apinis 2009; Zile *et al.* 2009).

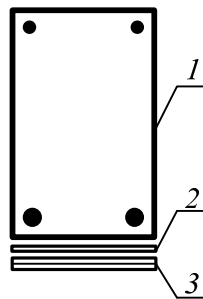
Kolonų ir sijų sandūros stiprinamos dėl sumažėjusio mazgo standumo. Dažniausiai tokių pažeidimų atsiranda seismiškai aktyvioje pasaulio vietoje. Todėl atliekami tyrimai su dinamine apkrova norint iširti anglies pluošto kompozito įtaką konstrukcijos nuovargiui (Triantafillou 2001).

Anglies pluošto juostos lengvai pritaikomos konstrukcijoms stiprinti, nes nereikia daug techninės įrangos. Juostos gali būti nepertraukiamos, dėl to sumažėja sandūrų skaičius (Meier 2000), todėl dažniausiai anglies pluoštu stiprinamos didelio tarpatramio konstrukcijos. JAV, Japonijoje, Kanadoje, Rusijoje, Eu-

ropos Sąjungoje kuriamos projektavimo rekomendacijos, skirtos konstrukcijoms stiprinti anglies pluošto kompozitu. Mokslinių tyrimų centruose „EMPA“, „QuakeWrap“ „PMI“ kuriamos ir tobulinamos techninės pluošto naudojimo priemonės bei projektavimo rekomendacijos. Moksliniame institute NYYŽB (Rusija) jau 1978 m. buvo kuriama skaičiavimo metodika, skirta betoninėms konstrukcijoms, armuotoms kompozitine armatūra (Михайлов 1990).

Kompozitinėmis medžiagomis sustiprintų konstrukcijų elgsenai didelę įtaką turi betono ir kompozito jungtis. Tyrimais nustatyta, kad konstrukcijai suyrant dažniausiai anglies pluošto kompozitas nepasiekia savo ribinės deformacijos. Kompozitas, perimdamas tempimo įtempius, sąlyčio su betonu vietoje sukelia šlyties deformacijas, galinčias pakeisti konstrukcijos elgseną.

Gelžbetoninės sijos, sustiprintos anglies pluošto kompozitu, skerspjūvį pagal sluoksnius galima suskirstyti kaip parodyta 1.1 paveiksle (Marchukaitis *et al.* 2007).



1.1 pav. Sustiprintos gelžbetoninės sijos skerspjūvio skirstymas pagal atskirus elementus: 1 – gelžbetoninis elementas; 2 – epoksidinio glaisto ir klijų sluoksnis; 3 – kompozitinis (anglies pluoštu armuoto polimero) sluoksnis

Fig. 1.1. Division of the cross section of a strengthened reinforced concrete beam into separate elements. 1 – reinforced concrete element; 2 – layer of epoxy filler; 3 – carbon fiber composite element

Kiekvieną iš šių sluoksnių konstrukcijos darbo metu veikia apkrova, temperatūra, drėgmė, agresyvioji aplinka. Sluoksnių reakcija į minėtus poveikius sukelia skirtingo pobūdžio deformacijas ir daro poveikį bendram konstrukcijos darbui. Todėl toliau aptariamas kiekvieno sluoksnio darbas veikiant ilgalaikiai apkrovai, esant skirtingam apkrovos, drėgmės, temperatūros poveikiui. Pagal charakteringus tyrimus, atliekamus tam tikriems veiksniams ir parametrams, darantiems įtaką sijos laikomajai galiai, nustatyti, galima išskirti: anglies pluošto kompozito medžiagų tyrimus, betono ir kompozito kontakto šlyties tyrimus, sustiprintų sijų laikomosios galios ir elgsenos tyrimus.

1.2. Anglies pluošto kompozitas

Anglies pluošto kompozitinis elementas (1.1 pav., 3) sudarytas iš dviejų medžiagų: anglies pluošto ir epoksidinės dervos (matricos). Priklausomai nuo to, kokios statinio konstrukcijos stiprinamos, priklauso ir naudojamas anglies pluošto kompozito tipas. Anglies pluoštas gali būti iš anksto impregnuotas epoksidine derva ir gali būti tik atskiros anglies pluošto juostos, kurios klijuojant atskirai impregnuojamos epoksidine derva. Iš anksto impregnuotos anglies pluošto juostos dažniausiai naudojamos stiprinant didelio tarpatramio sijines, continualias konstrukcijas. Ypač jeigu stiprinama įtemptu anglies pluoštu. Pagrindinė kompozito armuojamoji medžiaga yra anglies pluoštas. Todėl naudojant šį kompozitinį lakštą reikėtų atkreipti dėmesį į armavimo anglies pluoštu procentą, nes nuo jo kiekio priklauso elemento tempiamasis stipris. Atskiromis anglies pluošto juostomis dažniausiai stiprinamos apvalios arba stačiakampės formos konstrukcijos.

Atlikti tyrimai rodo, kad anglies pluošto ribinis santykinis pailgėjimas tempiant siekia iki 1,3–2,3 %. Projektavimo rekomendacijose ACI440 vertinamas ilgalaikis aplinkos poveikis anglies pluoštui, todėl nurodo jo stiprį sumažinti padauginus iš koeficiento C_E , kuris priklauso nuo aplinkos, kurioje eksploatuojama konstrukcija ir kompozito, plaušų matricos tipo. Atitinkamai šis stiprio redukavimo koeficientas C_E kinta nuo 0,5 iki 0,95. Anglies pluošto kompozito matricos (epoksidinių klijų) ilgalaikiai tyrimai rodo, kad esant skirtingam drėgmės poveikiui, sumažėja tamprumo modulis, bei tempiamasis stipris. Drėgmės poveikis epoksidinių medžiagų valkšnumo deformacijas gali padidinti iki penkių kartų (Анискевич 1984; Aniskevich *et al.* 1992; Aniskevich A. N., Aniskevich N. I. 1993).

Projektavimo rekomendacijos FIB 14 nurodo, kad kompozitinio sluoksnio stiprumo ir tamprumo modulio savybės skaičiuojamos pagal santykinį jų tūrį. Tamprumo modulis: $E_f = E_{fib} \cdot V_{fib} + E_m \cdot V_m$ ir tempiamasis stipris: $f_f = f_{fib} \cdot V_{fib} + f_m \cdot V_m$, čia E_{fib} , f_{fib} – anglies pluošto tamprumo modulis ir tempiamasis stipris; E_m , f_m – epoksidinių klijų tamprumo modulis ir tempiamasis stipris; V_{fib} ir V_m – anglies pluošto ir epoksidinių klijų santykinis tūris. Nustatant kompozito tempiamąjį stiprį pagal klijų kiekį, tamprumo modulis gali sumažėti iki 50 %, o tempiamasis stipris gali padidėti iki 2 %. Todėl vertinant ilgalaikės apkrovos ir aplinkos poveikio įtaką kompozito matricai, galima redukuoti jo stiprį. Vertinant, kad anglies pluoštas yra tampri medžiaga, tamprumo modulio dydį galima redukuoti naudojant epoksidinių klijų mechaninių savybių redukavimo koeficientą $E_f = E_{fib} \cdot V_{fib} + E_m \cdot k \cdot V_m$, čia $k < 1$.

Tyrimai rodo (Kawada *et al.* 2005), kad stiklo ir anglies pluošto armatūra drėgmės įtakai nepasiduodavo, bet vertinant betono ir epoksidinių klijų jungtį galima abejoti, ar neverta vertinti drėgmės įtakos. Todėl atliekami betono ir kompozitinio elemento jungties tyrimai įvairios aplinkos sąlygomis (Ferrier *et al.* 2001).

Dauguma tyrėjų skaičiuodami atsižvelgia, kad anglies pluošto kompozitas dirba tampriai su vienuodu tamprumo moduliu. Tačiau atlikti (Ditcher *et al.* 1979, 1981) tyrimai rodo, kad anglies pluošto kompozitas dirba netiesiškai tampriai. Tyrimuose (Ditcher *et al.* 1979, 1981) nustatyta, kad atliekant gniuždymo bandymus tamprumo modulis gali sumažėti iki 39 %, o tempiant tamprumo modulis gali padidėti iki 25 %. Pagrindine tokio netiesiškumo priežastimi nurodo pluošto fibrų kryptį. Taip pat galimas netiesiškumo atvejis dėl skirtingo klijais nepadengtų fibrų darbo. Netiesinis darbas gniuždant gali įvykti dėl pluošto fibrų klumpo, o tempimo atveju dėl fibrų išsitiesinimo tempimo jėgos kryptimi. Puasono koeficientas tempiant mažėja, o gniuždant didėja, tačiau Puasono koeficiento kitimas rodo, kad kompozitas skersine kryptimi dirba tampriai plastiškai, nes po nukrovimo lieka likutinės skersinės deformacijos dėl kompozito matricos pažeidimo. Vidutinis Puasono koeficientas tempimui ir gniuždymui siekia 0,33. Anglies pluoštu armuotų kompozitų tempiamasis stipris būna didesnis negu gniuždomasis.

Netiesiniai reologiniai modeliai kuriami anglies pluošto plastiko darbui analizuoti. Vertinamas ne tik epoksidinių klijų – matricos senėjimas, bet ir anglies pluošto fibros kontakto tarp matricos netiesinis darbas (Li, Weng 1995). Fibroms taikomos tamprios medžiagos savybės, o kontaktui – tampriai plastinės. Tyrimai rodo, kad realybėje kontaktas yra silpnas ir turi būti vertinamas fibros su matrica jungties standumas. Todėl ultragarsiniais prietaisais tiriami anglies pluošto plastikai, siekiant nustatyti tuštumų skaičių ir tinkamą mechaninį modelį.

Cheminiai fibrų paviršiaus tyrimai rodo (Wu, Cheng 2005), kad fibrų sukibimas su matricos medžiaga gana prastas. Cheminis ir plazminis fibrų paviršiaus apdirbimas taikomas siekiant padidinti fibros sukibį su matrica. Nustatyta, kad cheminiu būdu apdirbant paviršių kompozito stiprumą galima padidinti iki 15 %. Pačių fibrų stiprumui cheminis apdirbimas įtakos neturėjo (Wu, Cheng 2005).

Tiriant kompozito stiprumo charakteristikas vandens ir rūgštinių skysčių terpėje nustatyta, kad jų įtaka kompozito stiprio sumažėjimui ir plyšių vystymuisi vienoda (Kawada *et al.* 2005). Energijos kiekis, reikalingas atsirasti plyšiams, yra mažesnis, kai kompozito drėgnis padidėja. Todėl šlyties įtempiai tarp kompozito elementų sluoksnių mažėja esant pastoviems įtempiams.

Kompozito matricos standumas daro įtaką kompozitinio elemento ilgalaikiškumui. Tyrimai rodo, kad mažiau elastinga matrica užtikrina ilgesnį kompozito ilgalaikiškumą, o elastingesnė – mažesnę (Kazanci *et al.* 2001).

Tiriant anglies pluoštu armuotų kompozitinių elementų mechaninių savybių kitimą, esant skirtingam temperatūros ir drėgmės režimui lauko sąlygomis per 10 metų, nustatyta, kad vidinių sluoksnių matricos degradavimas disorientuoja vidinius sluoksnius (Startsev *et al.* 1999), o anksčiau minėta, kad fibrų kryptis turi įtakos valkšnumo intensyvumui. Dėl vidinių sluoksnių rišiklio (matricos) degradavimo sumažėja šlyties modulis tarp sluoksnių. Saulės ultravioletinių spindulių poveikis labiausiai pažeidžia išorinius sluoksnius, bet kompozito mechaninės savybės pakinta per visą kompozito storį. Tyrimais nustatė, kad per metus tempiamsis stipris sumažėjo 16 %. Aplinkos poveikis kompozito tempiamąjį stiprį, tampromo modulį, šlyties modulį ir atsparumą nuovargiui sumažino iki 30 % (Startsev *et al.* 1999).

1.3. Ilgalaikės apkrovos įtaka betono ir anglies pluošto jungčiai

Daugelis tyrėjų (Davis *et al.* 2004; Ferrier, Hamelin 2002; Ferrier *et al.* 2001, 2010; Gao *et al.* 2003) yra atlikę trumpalaikius ir ilgalaikius bandymus siekdami ištirti betono ir anglies pluošto kompozito tarpusavio sąveiką. Kompozitinį sluoksnį dažniausiai sudaro epoksidiniai klijai ir anglies pluoštas. Betono ir kompozito jungtyje neišvengiamai sukeliama tangentiniai įtempiai, kurie sukelia šlyties deformacijas. Todėl būtina tinkamai paruošti betoninį paviršių, kad jis nebūtų silpnas, supleiškęs ir trapus.

Konstrukcijų vienalytiškumui ir sluoksnių tarpusavio sąveikai vertinti siūloma naudoti vienalytiškumo koeficientą, kuris garantuotų sluoksnių jungties vientisumą (Козлов *et al.* 1989):

$$\sigma \geq f_{MON} \cdot M_{MON}, \quad (1.1)$$

čia σ – klijų jungties stipris; σ_{MON} – analogiško vientiso elemento stipris; M_{MON} – vienalytiškumo koeficientas.

Epoksidinių klijų sudėtis – taip pat labai svarbus kriterijus jungties stiprumui nagrinėti, nes ties jungtimi impregnuojasi betonas ir pasikeičia jo fizikinės bei mechaninės savybės. Todėl šio sluoksnio stipris padidėja (Gao *et al.* 2003). Šie tyrėjai atliko jungties stiprio tyrimus vertinant epoksidinių klijų modifikatoriaus kiekį. Padidinus modifikatoriaus kiekį nuo 0 iki 20 % pavyko padidinti kontakto stiprumą iki 10 % ir ribines šlyties deformacijas iki 50 %. Todėl modifikatorius, padidinęs kontakto stiprumą, padidina ir pleišetumo ribą.

Yra pasiūlyta metodika, kuria galima įvertinti įmirkusio sluoksnio įtaką kompozitiniam elementui (Marchukaitis *et al.* 2007). Sijos darbo metu plyšių vystymosi pobūdis rodo (Marchukaitis *et al.* 2007), kad impregnuoto betono

tempiamasis stipris kur kas didesnis už paprasto betono ir horizontalus plyšys susiformuoja virš impregnuotojo sluoksnio (1.2 pav.).



1.2 pav. Plyšių vystymosi charakteris virš kompozitinio sluoksnio
Fig. 1.2. Evolution of horizontal cracks above the composite layer

Padidėjusi aplinkos temperatūra sumažina jungties šlyties modulį. Yra atlikti išsamūs tyrimai, jungties stiprumo priklausomybei tirti nuo aplinkos poveikio (Ferrier, Hamelin 2002; Ferrier *et al.* 2001, 2010). Skirtingų tamprumo charakteristikų klijų naudojimas, esant skirtingam aplinkos temperatūriniam poveikiui, parodo skirtingą kontakto šlyties valkšnumo deformacijų pobūdį. Netgi 10 °C temperatūros pokytis daro poveikį šlyties deformacijų vystymosi greičiui. Kuo mažesnis medžiagų, esančių jungtyje, tamprumo modulis, tuo mažesnis jungties šlyties modulis. Tyrimų rezultatų apžvalgoje (Ferrier, Hamelin 2002; Ferrier *et al.* 2001, 2010) nurodyta, kad jungties stiprumas priklauso nuo polimero rūšies ir aplinkos temperatūros. Tyrimai parodė, kad didesnėje temperatūroje šlyties modulis mažėja sparčiau. Tinkamiausios medžiagos, užtikrinančios gerą sluoksnių jungtį, yra tuo atveju, kai jų tamprumo modulis didesnis negu 10 GPa. Jungtį veikiant apkrova, ne didesne kaip $0,4F_u$ (F_u – ribinė jungties laikomoji galia), pasireiškia tik tiesinis valkšnumas. Tyrėjai (Ferrier *et al.* 2010) pasiūlė analitinę šlyties deformacijų išraišką, kuri įvertina ilgalaikę apkrovą ir temperatūros įtaką:

$$\gamma(t, T) = \gamma_{imt} + \gamma_{creep} = \frac{\tau_{ave}}{G(t_0)} + \tau_{ave} \cdot D(t, T), \quad (1.2)$$

čia $\tau_{ave} = \frac{F}{A_{adh}}$ – vidutiniai tangentiniai įtempiai sąlyčio vietoje; $G = \frac{\tau_{ave}}{\gamma}$ – šlyties modulis. Šlyties deformacijos pagal eksperimentinius duomenis apskai-

čiuojamos pagal formulę $\gamma = \frac{\Delta l_2 - \Delta l_1}{s}$; Δl_2 – atstumo padidėjimas tarp betoninių elementų, sujungtų anglies pluošto kompozitu; Δl_1 – kompozitinio elemento deformacija; $D(t, T)$ – laipsninė funkcija, apibūdinanti reologines kontakto savybes priklausomai nuo aplinkos temperatūros. Atlikę eksperimentinių tyrimų ir skaičiavimų analizę tyrėjai pasiūlė sumažinti ribines pluošto kompozito deformacijas nuo 35 % iki 90 %, priklausomai nuo klijų tipo ir aplinkos temperatūros.

Jungties betono drėgmės pokyčiai rodo, kad 50° C aplinkos temperatūroje jungtis prarasdavo drėgmę ir epoksidiniai klijai toliau kietėdavo. O esant 50 % aplinkos drėgmei ir 18 °C aplinkos temperatūrai, drėgmės kiekis jungtyje nekito (Davis *et al.* 2004).

1.4. Ilgalaikės apkrovos įtaka betonui

Atlikti tyrimai (Серых 1981) parodė, kad paprasto betono ir polimerbetonio valkšnumo deformacijų vystymosi greitis skirtingas. Polimerbetonio valkšnumo deformacijos mažiausios ir intensyviausias vystymasis trunka iki 50 parų, paprasto betono – 100–150 parų. Polimerbetonio valkšnumo deformacijos iki 5–6 kartų mažesnės negu paprasto betono (Серых 1981).

Ilgalaikis apkrovos poveikis sumažina betono stiprį (Карапетян, Котикян 1972). Dėl skirtingo betono apgniuždymo lygio laikomoji galia sumažėja skirtingai. Betoninių bandinių, apkrautų $0,28f_c$, $0,465f_c$, $0,65f_c$ maksimalių gniuždymo įtempių lygiu, betono stipris sumažėjo atitinkamai 17 %, 30 %, 35 %. Esant ilgalaikiams tempimo įtempiams $0,28f_{ct}$, $0,48f_{ct}$, $0,65f_{ct}$, tempiamasis stipris sumažėjo 9 %, 28 %, 53 % (Семенов, Аржановский 1972). Tačiau pagal atliktus tyrimus (Кудзис, Папинигис 1984; Папинигис, Подагелъ 1987) nustatyta, kad ilgalaikė gniuždoma apkrova apkrauto betono gniuždomasis stipris, kai apkrovos intensyvumas sudaro 20 % ir 50 % betono stiprio, padidėjo. Betoninių bandinių, apkrautų ilgalaikė tempimo apkrova, tempiamasis stipris, nukrovus ilgalaikę apkrovą, sumažėjo iki 20 %. Bandant tempiamus bandinius iki suirimo, nepanaikinus ilgalaikės apkrovos poveikio, betono tempiamasis stipris sumažėjo iki 33 %. Kaip esminė priežastis, dėl kurios betonas sustiprėjo, nurodoma, kad paveikus ilgalaikė gniuždomąją apkrovą, pasikeičia betono struktūra. Susiformavusiuose mikroplyšiuose vyksta cemento akmens hidratacija, mikroplyšiai nebesivysto, o nyksta. Vieną iš galimų priežasčių, lėmusių betono tempiamojo stiprio sumažėjimą, nurodo, kad susiformavę mikroplyšiai tarpusavyje susijungia ir gali sukelti pirmalaikę betono suirtį. Todėl atsižvelgiant į apkrauto betono stiprio pokyčius pasiūlyti atitinkami betono darbo sąlygų koeficientai.

Ekspperimentiniai tyrimai rodo, kad polimerbetonio valkšnumo deformacijos mažesnės negu paprasto betono ir stipris sumažėja iki 5 %, palyginus su kontroliniais bandiniais (Баженов 1981). Ilgalaikei polimercementinio betono gniuždymo tyrimai (Кудзис, Глебов 1979) parodė, kad centrifuguoto polimercementinio betono gniuždomasis stipris, jeigu ilgalaikės apkrovos intensyvumas nebuvo didesnis už mikropleišėjimo įtempių lygį, gali padidėti iki 25 %. Bandant bandinius nukrovus ilgalaikę apkrovą, nustatyta, kad polimercementinio betono mikropleišėjimo įtempių dydis irgi padidėjo. Taip pat nustatyta, kad gniuždomo betono su polimerinės dervos priedu stipris po ilgalaikės apkrovos poveikio gali padidėti iki 13–30 % (Квядарас 1979).

Tyrimai rodo, kad neapkrauto betono stiprio prieaugis jo brendimo laikotarpiu priklauso nuo cemento markės, užpildų struktūros (porėtumo), gamybos sąlygų, aplinkos temperatūros ir drėgmės (Серых, Ярмаковский 1992). Betono valkšnumo intensyvumui įtaką turi ir stambių užpildų kiekis, jų tamprumo modulis. Stambesni užpildai perima dalį netiesinių deformacijų, todėl valkšnumo deformacijos gali sumažėti (Гладков 1971).

Kietėjančio betono tamprumo moduliui nustatyti priklausomai nuo jo amžiaus siūloma empirinė formulė (Квирикадзе 1990):

$$E_b(t) = \frac{C}{1 + \frac{42}{(B + 3,8) \lg t}}, \quad (1.3)$$

čia C – koeficientas, priklausantis nuo betono klasės.

Ilgalaike apkrova apkrauto betono tyrimai dažniausiai rodo, kad valkšnumo deformacijos slopsta (Застава 1984; Ахвердов 1970; Каранфилов 1970; Ужахов 1971). Tačiau yra tyrimų, kuriuose netiesinis valkšnumo pobūdis buvo pasireiškęs įtempių lygiui siekiant $0,48 f_c$ (Галустов 1971). Todėl analizuotos skaičiavimo teorijos, kurios vertina netiesinį valkšnumo deformacijų prieaugio pobūdį (Александровский, Колесников 1971; Мельник, Пацула 1973.).

1.5. Ilgalaikės apkrovos įtaka gelžbetoninėms sijoms

Gelžbetonines sijas pagal armavimo kiekį plienine strypine armatūra galima suskirstyti į vidutiniškai armuotas, kurių $\xi < \xi_{\text{lim}}$, ir perarmuotas, kurių $\xi > \xi_{\text{lim}}$. Lenkiamųjų sijų elgsenai ištirti, atlikti trumpalaikiai ir ilgalaikiai bandymai esant statinei apkrovai. Tyrimai rodo, kad perarmuotų sijų pradinės gniuždomojo betono sluoksnio deformacijos, esant pastoviam apkrovos intensyvumui, yra didesnės negu silpnai armuotų, o ilgalaikių deformacijų prieaugis iki dviejų kartų spartesnis, nes perarmuotose sijose labiau išnaudojamas betono darbas, ir suirtis

įvyksta gniuždomo betono sluoksniuose (Гуща 1990). Atlikus tyrimus (Гуща 1990) sijų laikomoji galia po ilgalaikės apkrovos poveikio buvo lygi kontrolinių sijų laikomajai galiai.

Tyrimais nustatyta, kad tempiamojo betono įtempiai ilgalaikės apkrovos metu persiskirsto į tempiamosios armatūros įtempių prieaugį (Яценко 1988). Dėl tokio efekto sijų laikomoji galia po ilgalaikio poveikio padidėjo.

Pašalinus ilgalaikės apkrovos poveikį, sluoksniuose likusių deformacijų dydis ir gniuždomosios zonos aukštis priklauso nuo veikusios ilgalaikės apkrovos lygio. Mažinant apkrovos lygį, maksimalios gniuždomojo betono deformacijos persiskirsto į apatinius gniuždomus sluoksnius ir gniuždomos zonos aukštis didėja. Apkrovos pašalinimo etapas gali pagerinti betono sukibtį su tempiamąja armatūra, todėl kartotinai apkraunant supleišėjusio betono darbas su plienine strypine armatūra pagerėja ir šį efektą vertinantį koeficientą siūlo imti didesnę (Гуща *et al.* 1988).

Tyrimais nustatyta, kad įtempta armatūra sukelia betono apspaudimo efektą sijos sluoksniuose, kurie vėliau dirbs tempimo poveikiui. Atitinkamai nustatyta, kad apspausto betono tempiamasis stipris sumažėja iki 35 % (Макаренко, Фенко 1970). Analogiškai panaudojus įtemptą kompozitą, šis neigiamas efektas dar labiau sumažintų kompozitinio sluoksnio laikomąją galia.

Betoninių sijų paviršių padengus polimeriniais sluoksniais, sluoksnių valkšnumo deformacijų vystymasis sumažino iki 10 kartų, palyginti su paprastomis gelžbetoninėmis sijomis (Солотатов 1964). Analogiškai izoliuotų betoninių prizmių valkšnumo deformacijos bandymo pabaigoje sudarė tik 30–40 % nuo bandinių su neizoliuotais paviršiais (Мельник 1964). Nustatyta, kad aplinkos drėgmės pokytis daro poveikį sijų deformacijų ir įlinkių vystymuisi ilgalaikės apkrovos poveikio metu (Левицкий *et al.* 1967). Drėgmės sumažėjimas nuo 60 % iki 30 % įlinkio prieaugį padidino iki 15 %, o drėgmės padidėjimas nuo 60 % iki 90 % įlinkio prieaugį sumažino iki 15 % (Квицаридзе *et al.* 1965). Eksperimentiniais tyrimais nustatyta, kad įlinkio prieaugio intensyvumo koefi-

cientas: $\theta = \frac{f_{ilg}}{f_{tr}}$ (f_{ilg} – įlinkis veikiant ilgalaikiai apkrovai; f_{tr} – pradinis sijos

įlinkis) nepriklauso nuo armavimo kiekio plienine strypine armatūra ir sijos skerspjūvio formos (stačiakampio ar T formos skerspjūvio).

Sijų, armuotų plieniniais lakštais, surimo pobūdis rodo, kad irimas vyksta ne dėl lakšto pasislinkimo, o dėl pliene pasiektų takumo įtempių (Клименко *et al.* 1972). Jeigu trumpalaikė statinė apkrova apkrautų sudėtinių gelžbetoninių sijų laikomoji galia priklauso nuo betono stiprio, tai ilgalaikė apkrova apkrautų sijų laikomoji galia priklausė nuo sluoksnių jungties valkšnumo (Берген 1965). Eksperimentiniais tyrimais nustatyta, kad ilgalaikės apkrovos poveikio metu tem-

piamojoje sijos zonoje sijos sienutės deformacijos prie sąlyčio su lentyna vietos yra didesnės negu deformacijos tempiamos lentynos išorėje.

1.6. Gelžbetoninių lenkiamųjų elementų, sustiprintų anglies pluošto kompozitu, elgsenos tyrimai

Tyrėjai Chami *et al.* (2009) atliko betoninių ir gelžbetoninių sijų, papildomai armuotų anglies pluošto kompozitu, ilgalaikius tyrimus. Ilgalaikės apkrovos trukmė – vieneri metai. Iš viso išbandytos 26 sijos su skirtingu armavimo kiekiu kompozitu. Sustiprintų sijų ilgalaikės apkrovos intensyvumas sudarė 59 % ir 78 % kontrolinių sijų laikomosios galios. Tyrimo metu siekta nustatyti, ar esant tokiam apkrovos intensyvumui nebus prarasta sijų laikomoji galia dėl valkšnumo deformacijų vystymosi. Prieš ilgalaikį bandymą kontrolinių sijų laikomoji galia patikrinta statine apkrova ir nustatyti du pagrindiniai sijų suirimo pobūdžiai. Sijos, kurios tempiamojoje zonoje buvo armuotos plienine strypine armatūra ir anglies pluošto kompozitu, suirdavo gniuždomojoje zonoje, o sijos, kurios tempiamojoje zonoje armuotos tik anglies pluošto kompozitu, suirdavo kompozitui nuplyšus su betonu. Ilgalaikio tyrimo metu nustatyta, kad sijose, kuriose tempiamoji zona nebuvo armuota plienine strypine armatūra, didžiausi plyšiai būdavo tarpatramio viduryje. Didžiausias valkšnumo deformacijų intensyvumas pasireiškia gniuždomosios zonos betone ir per visą bandymo laikotarpį sudarė 175 % nuo pradinių deformacijų. Tyrėjai Chami *et al.* (2009) teigia, kad kompozito kiekis įlinkio prieaugiui neturi įtakos.

Tyrėjai Wanwei ir Guo (2006) atliko ilgalaikius anglies pluošto kompozitu sustiprintų gelžbetoninių sijų bandymus. Tyrimais nustatė, kad stiprinamų sijų laikomoji galia mažėja, kai gelžbetoninės sijos stiprinamos prie didesnio apkrovos lygio. Sijų laikomoji galia, palyginti su paprasta gelžbetonine sija, padidėjo iki 22,5 % ir 41,2 %.

Tan ir Saha (2006) atliko gelžbetoninių sijų, sustiprintų stiklo pluošto kompozitu, ilgalaikius tyrimus. Tyrimų tikslas – ištirti ilgalaikės apkrovos įtaką sustiprintų sijų elgsenai. Bandinių veikimo ilgalaikė apkrova trukmė – dveji metai. Pagrindiniai įlinkį veikiantys faktoriai buvo: armavimo kompozitu procentas ir ilgalaikės apkrovos intensyvumas. Tyrėjai nustatė, kad armavimo procentą padidinus nuo 0,64 % iki 1,92 %, įlinkis sumažėjo nuo 23 % iki 33 %.

Tyrėjai Diab *et al.* 2009 atliko gelžbetoninių sijų, sustiprintų įtemptu anglies pluoštu, ilgalaikius bandymus lauko sąlygomis. Dvidešimt mėnesių jie tyrė aplinkos poveikio įtaką sijų elgsenai esant skirtingam pluošto įtempimo lygiui ir inkaravimo būdai. Iš viso buvo ištirtos septynios sijos su skirtingu pluošto kiekiu ir jo įtempimo lygiu. Pradinis įtempis siekė 20–30 % ribinės pluošto laikomosios galios, o aplinkos temperatūra svyravo nuo 7 °C iki 30 °C. Atleidžiant pluošto

įtempimo mechanizmą nustatyta, kad mažiausias pasislinkimas fiksuojamas sijoje, kuriose kompozitas yra papildomai inkaruojamas. Tyrėjai atkreipia dėmesį, kad didžiausios šlyties valkšnumo deformacijos pasireiškia tose zonose, kuriose didžiausia šlyties įtempių koncentracija, t. y. pluošto priklįjavimo galuose. Bandiniuose, kurių kompozitas papildomai inkaruotas, pasireiškėdavo mažesnės šlyties deformacijos, kurios didėdavo tiesiškai iki pat sijos nukrovimo, nes šlyties įtempiai pasiskirstydavo tarp betono ir inkaravimo plokštės.

Tyrėjų grupė Avril *et al.* (2003), atlikusi lenkiamųjų sustiprintų gelžbetoninių sijų elgsenos tyrimus, veikiant trumpalaikiai apkrovai, nustatė, kad sustiprintos gelžbetoninės sijos tempiamojoje armatūroje pasiekus įtempių lygį $0,6f_y$, naujų plyšių (palyginti su nesustiprinta sija) neatsiranda, o tik vystosi esamų plyšių plotis. Didinant sustiprintų sijų apkrovos lygį nauji atsiradę plyšiai buvo dviejų kategorijų ir jų vystymasis priklausė nuo kompozitinio sluoksnio pasislinkimo. Tai pasvirieji plyšiai, linkę jungtis su esamais statmenais plyšiais, ir nauji statmenieji plyšiai, atsirandantys tarp dviejų esamų plyšių. Sustiprinimo efektas sumažino plyšių plotį, bet padidino jų skaičių ir jų pločių suma buvo panaši kaip nesustiprintose siose. Vertinant pasvirųjų plyšių vystymąsi galima teigti, kad jų atsiradimo priežastis – šlyties jėgos tempiamojoje betono ir kompozito jungtyje. Tačiau niekur nenurodoma, kad dėl šių plyšių atsivėrimo dalies esamų statmenųjų plyšių plotis sumažėtų. Taip pat teigiama, kad nukrovus gelžbetonines sijas plyšiai galutinai neužsiveria dėl frikcijos tempiamosios armatūros ir betono jungtyje.

Tyrėjai Ferrier *et al.* (2003) atliko lenkiamųjų gelžbetoninių sijų ir sustiprintų gelžbetoninių sijų pleišetumo tyrimus. Tyrimų tikslas – ištirti stiprinamų konstrukcijų pažeidimų įtaką stiprinimo efektyvumui. Elgsenai ištirti jie iš viso išbandė tris gelžbetonines sijas, kurių skerspjūvio matmenys 150×200 mm, lenkimo tarpatramio ilgis – 2000 mm. Pirmoji sija apkrauta iki suirimo be sustiprinimo. Antroji sija apkrauta iki $0,6M_R$ ir nukrovus apkrovą sustiprinta. Po to sija apkrauta iki suirimo. Trečioji sija papildomai armuota pluošto kompozitu ir apkrauta iki suirimo. Stiprinimas kompozitu sijų standumą padidino 45 %, ir kreivis prie suirimo buvo toks pat, kaip sijų sustiprintų anglies pluošto kompozitu be išorinės apkrovos poveikio. Tyrėjai nustatė, kad plieninės tempiamosios armatūros įtempių prieaugis buvo mažesnis, o tai sumažino besivystančių plyšių plotį, palyginti su nesustiprinta sija. Nesustiprintų sijų pleišėjimo apkrova siekė 8,75 kN, o sustiprinus kompozitu ši apkrova padidėjo iki 30 kN. Ši apkrova priklausė nuo plieninės armatūros bei kompozito kiekio. Sustiprinimas kompozitu plyšių tankio pasiskirstymo nepakeitė, tačiau plotį sumažino. Taip pat nustatyta, kad plyšių aukštis nepriklauso nuo to, kada buvo sustiprinta sija. Eksperimentinių tyrimų rezultatams patikrinti atlikti plyšio pločio skaičiavimai pagal EC2 reikalavimus. Plyšio pločio skaičiavimo išraiška:

$$w_k = \beta \cdot s_{rm} \cdot \varepsilon_m. \quad (1.4)$$

Remdamiesi atliktais skaičiavimas tyrėjai teigia, kad nesustiprintos sijos eksperimentiniai plyšių pločiai buvo panašūs į apskaičiuotus pagal EC2, bet sustiprintų sijų plyšių plotis buvo gerokai mažesnis. Todėl skaičiuojant plyšio plotį pagal EC2 reikalavimus, armatūros įtempiai buvo dauginami iš proporcingumo koeficiento α . Koeficientas α nustatytas pagal sąlygą:

$$\sigma_{s,f} = \frac{d - X}{d - X_f} \cdot \frac{I_f}{I} \sigma_s = \alpha \cdot \sigma_s. \quad (1.5)$$

Tada deformacijos tempiamosios armatūros lygyje, nevertinant tempiamo betono standumo, yra:

$$\varepsilon_m = \frac{\alpha \cdot \sigma_s}{E_s} \cdot \left(1 - \beta_{1,m} \cdot \beta_{2,m} \cdot \left(\frac{\sigma_{s,f}}{\alpha \cdot \sigma_s} \right)^2 \right) + \varepsilon_{mo}. \quad (1.6)$$

Atlikti pakeitimai leido sumažinti eksperimentinių ir apskaičiuotųjų reikšmių skirtumus, tačiau pradinių deformacijų reikšmė ε_{mo} turi būti nustatyta eksperimentais, o kiti koeficientai imami iš EC2.

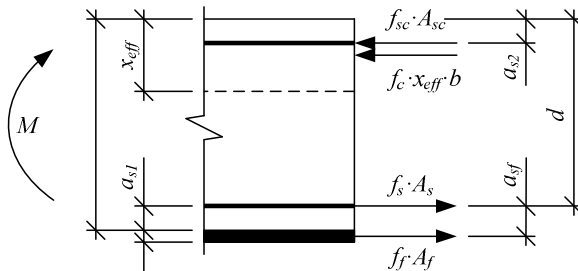
1.7. Lenkiamųjų elementų laikomosios galios skaičiavimas

Anglies pluošto kompozitu sustiprintų sijų laikomojai galiai skaičiuoti dažniausiai taikomas klasikinis statmenojo pjūvio metodas, sudėtinių strypų metodas (Ржаницын 1986), sluoksnių metodas.

Klasikinėse statmenojo pjūvio metodikose skaičiuojant elemento laikomąją galią sudaroma vidinių ir išorinių jėgų (1.3 pav.) pusiausvyros lygtis. Šioje metodikoje vertinama, kad kompozitinio sluoksnio sukibtis su betonu yra standi ir poslinkio tarp sluoksnių nėra.

Momentų pusiausvyros lygtis dažniausiai sudaroma apie sijos gniuždomosios zonos svorio centrą teigiant, kad šis sluoksnis pirmas pasieks ribinį būvį. Tačiau atlikta lenkiamųjų sijų tyrimų apžvalga (Hanna, Jones 1997; Gao *et al.* 2005, 2006; Oehlers *et al.* 2003; Kotynia *et al.* 2008; Kim *et al.* 2008; Kim, Aboutaha 2004; Li *et al.* 2006; Pham, Al-Mahaidi 2004; Teng *et al.* 2003, 2005; Xiong *et al.* 2007) rodo, kad dažniausiai sija suyra horizontaliajame pjūvyje, kompozitiniam sluoksniui atitrūkus nuo betono paviršiaus. Tai rodo, kad betono ir kompozito jungtis nėra standi, todėl pusiausvyros lygtyje kompozitinio sluoksnio laikomoji jėga negali būti vertinama visu dydžiu. Eksperimentiniai tyrimai

rodo, kad pluošto kompozito ribinių deformacijų dydis priklauso nuo armavimo plienine armatūra procento (Valivonis *et al.* 2010). Projektavimo rekomendacijose ACI440 nurodoma kompozitinio elemento tempiamąją jėgą sumažinti dauginant iš koeficiento $\psi = 0,85$.



1.3 pav. Sijos normalinio pjūvio stiprumo skaičiavimas klasikiniu statmenojų pjūvio metodu

Fig. 1.3. Evaluation of internal forces in the cross section of a strengthened beam

Gniuždomojo betono valkšnumo deformacijų prieaugis naudojamas skaičiuojant konstrukcijų laikomąją galią pagal sluoksnių metodą (Bulavs *et al.* 2006; Kaklaustas *et al.* 2006; Marčiukaitis, Balevičius 2009; Raue, Heidolf 2005). Taikant sluoksnių metodą gali būti vertinamos įvairios įtempių stadijos (Байков *et al.* 1987; Bulavs *et al.* 2005), t. y. nuo statmenojų plyšio atsiradimo iki takumo įtempių pasiekimo tempiamojoje armatūroje. Tačiau sluoksnių metodu skaičiuojama naudojant skaičiavimo algoritmus, todėl platus jų taikymas rengiant projektus sukelia keblumų dėl programinės įrangos taikymo.

Tempiamojo betono ir sluoksnių jungties pleišėjimo pobūdis rodo, kad betono ir kompozitinio sluoksnio jungtyje pasireiškia šlyties deformacijos. Dėl šių deformacijų anglies pluošto kompozitas daugeliu atvejų gali būti iki galo neišnaudojamas. Tai reiškia, kad suirimo metu įtempiai kompozite nepasiekia įtempių ribos. Todėl norint įvertinti šlyties įtaką, anglies pluošto kompozitu sustiprintų gelžbetoninių elementų laikomajai galiai taikomas skaičiavimo metodas pagrįstas sudėtinių strypų teorija (Benyoucef *et al.* 2007; Marchukaitis *et al.* 2007; Skuturna *et al.* 2008). Daugiasluoksniams sijoms skaičiuoti vertinant ilgalaikės apkrovos poveikį pasiūlytas sudėtinių strypų metodas (Гинзбург 1969), tačiau šis metodas nevertina kontakto valkšnumo, o tik atskirų strypų valkšnumo deformacijų prieaugį.

Tyrimais nustatyta, kad sustiprintų sijų laikomoji galia priklauso nuo esamos tempiamosios strypinės plieninės armatūros įtempių lygio. Todėl pasiūlyta patikslinta sustiprintų sijų laikomosios galios skaičiavimo metodika, kuri atsižvelgia į pradinį tempiamosios armatūros įtempių ir deformacijų būvį (Šneideris, Marčiukaitis 2000; Skuturna 2009).

1.8. Lenkiamųjų elementų, sustiprintų anglies pluošto kompozitu, įlinkio skaičiavimas

Atlikta gelžbetoninių sijų, sustiprintų anglies pluošto kompozitu, įlinkių skaičiavimo metodikų apžvalga rodo, kad dauguma metodikų nevertina ilgalaikės apkrovos poveikio ir kompozitinio sluoksnio pasislinkimo (Fib Bulletin 14; Tan, Saha 2006; Maji, Orozco 2005).

Daugiasluoksnių sijų įlinkius racionalu skaičiuoti įvertinant įlinkio prieaugį dėl sluoksnių tarpusavio pasislinkimo (Карпенко 1989):

$$\omega = \omega_m + \omega_v, \quad (1.7)$$

čia ω_m – įlinkis nuo lenkimo momento; ω_v – papildomas įlinkis nuo skersinių jėgų poveikio.

Tyrimai rodo, kad didelio stiprumo betonuose esant įtempių lygiui $0,7 - 0,8f_c$ (f_c – gniuždomasis betono stipris) deformacijų modulis mažai skiriasi nuo pradinio tamprumo modulio, o mažo stiprumo betonuose šis skirtumas kur kas didesnis. Todėl skaičiuojant gelžbetonines konstrukcijas, kuriose betono gniuždymo įtempiai sieks $0,7 - 0,8f_c$, geriau naudoti deformacijų modulį, atitinkantį gniuždymo įtempių lygį (Маркаров 1982).

Kintančios apkrovos periodiškumas daro įtaką plastinių deformacijų prieaugiui gniuždomojo betono sluoksniuose, dėl to įvyksta įtempių persiskirstymas statmenajame pjūvyje ir padidėja įtempiai tempiamojoje armatūroje. Todėl siūlomi skaičiavimo metodai, įvertinantys įtempių persiskirstymą ir prieaugį tempiamojoje armatūroje (Кириллов, Мирсаяпов 1986; Крылов *et al.* 1971). Sluoksniuotosiose konstrukcijose tai turi įtakos sluoksnių šlyties valkšnumo deformacijoms.

Atlikta betono valkšnumo metodikų apžvalga (Кудзис, Квядарас 1969) rodo, kad metodikose neatsižvelgiama į betono tamprumo modulio pokytį. Todėl pasiūlyta betono valkšnumo mato kitimo funkcija (Кудзис, Квядарас 1969; Квядарас 1989), kuri geriau atspindi kintančias apkrauto betono mechanines savybes.

Betono valkšniųjų deformacijų prieaugio intensyvumas stebimu laiko periodu priklauso nuo įtempių prieaugio. Esant kintantiems įtempiams, stebimame laiko periode atsiranda įtempių prieaugio pokytis $\Delta\sigma(t)$, kuris sukelia papildomų deformacijų. Tokiu atveju deformacijos bus:

$$\varepsilon_c(t) = \varepsilon_{c,el}(t_0) + \varepsilon_{c,pl}(t_0) + \Delta\varepsilon_{c,el}(t) + \Delta\varepsilon_{c,pl}(t) + \varepsilon_{sh}(t), \quad (1.8)$$

čia $\varepsilon_{c,el}(t_0)$ – tampriosios deformacijos pradiniu apkrovimo momentu; $\varepsilon_{c,pl}(t_0)$ – plastinės deformacijos pradiniu apkrovimo momentu; $\Delta\varepsilon_{c,el}(t)$ – įtempių prieaugio sukeltos tampriosios deformacijos; $\Delta\varepsilon_{c,pl}(t)$ – įtempių prieaugio sukeltos plastinės deformacijos. Analogiškas tamprųjų plastinių deformacijų prieaugis bus taikomas ir šio darbo pateikiamoje sudėtinių strypų teorijos metodikoje.

Ilgalaikę apkrova veikiančių elementų valkšniosioms deformacijoms skaičiuoti gali būti taikomi įvairūs metodai: skaitinio integravimo metodas, valkšniųjų deformacijų augimo metodas, modifikuotas F. Dishingerio metodas, efektyviojo modulio metodas, senėjančios medžiagos efektyviojo modulio metodas (Kaklauskas *et al.* 2006). Dažniausiai taikomi metodai, skaičiuojant vertinantys valkšnumo deformacijų prieaugį, yra efektyviojo modulio (*Effective Modulus Method*, EMM) ir senėjančios medžiagos efektyviojo modulio metodas (*Adjusted Effective Modulus Method*, AEMM). Šie metodai plačiai taikomi skaičiuojant sijų įlinkius pagal klasikinę teoriją (Tan, Saha 2006), taip pat vertinant kompozito pasislinkimą pagal sudėtinę strypų teoriją (Benyoucef *et al.* 2007). Dažnai taikoma ir Maksvelo sudėtinė teorija.

Sustiprintos sijos įlinkį, esant ilgalaikiai tolygiai išskirstytai apkrovai p ir tarptračio ilgiui l , siūloma skaičiuoti pagal formulę (Tan, Saha 2006):

$$\omega_i = \frac{5}{384} \frac{p \cdot l^4}{E_c(t) \cdot I_e}, \quad (1.9)$$

čia $E_c(t)$ – betono tamprumo modulis; I_e – efektyvusis skerspjūvio momentas, kuris vertina supleišėjusius ir nesupleišėjusius sijos ruožus. Šioje formulėje nevertinama kompozitinio sluoksnio pasislinkimo įtaka. Pagrindinis veiksnys, darantis įtaką ilgalaikės apkrovos sukeliams valkšnumo deformacijoms, yra gniuždomosios sijos skerspjūvio zonos betono tamprumo modulis. Jis gali būti aprašytas pagal efektyviojo arba senėjančios medžiagos efektyviojo modulio metodą:

$$E_c(t) = \frac{E_c(t_0)}{1 + \varphi_c(t)}, \quad (1.10)$$

$$E_c(t) = \frac{E_c(t_0)}{1 + \chi \cdot \varphi_c(t)}. \quad (1.11)$$

Formulė (1.10) vertina valkšnumo deformacijų prieaugį betono deformacijų modulio kitimui ilgalaikio apkrovimo metu. Formulė (1.11) papildomai įvertina

medžiagos senėjimą, valkšnumo koeficientą $\phi_c(t)$ dauginant iš koeficiento χ . Šis koeficientas mažesnis už vienetą.

Skaičiuojant sijos įlinkį svarbu tinkamai įvertinti sijos standumą. Elementui, turinčiam plyšių, efektyvusis skerspjūvio inercijos momentas gali būti nustatytas pagal ACI 318 naudojamą formulę:

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M} \right)^3 I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M} \right)^3 \right] I_{cr}, \quad (1.12)$$

čia M_{cr} – statmenųjų plyšių atsiradimo momentas; M – sustiprintą siją veikiantis lenkimo momentas; I_g – vientiso sijos skerspjūvio inercijos momentas; I_{cr} – sijos skerspjūvio ties statmenuoju plyšiu inercijos momentas.

Tyrėjų Ombers, Trovato (2009), skaičiavimo analizė rodo, kad skaičiuojant įlinkius pagal ACI 318 efektyviojo inercijos momento formulę, nepakankamas rezultatų tikslumas dėl per mažų skaičiavimo rezultatų reikšmių. Siekiant padidinti tikslumą naudojama modifikuota efektyviojo inercijos momento formulė, kurioje atsižvelgiama į išorinės kompozitinės armatūros įtaką:

$$I_e = \beta_1^* \left(\frac{M_{cr}}{M} \right)^3 I_g + \left[1 - \beta_2^* \left(\frac{M_{cr}}{M} \right)^3 \right] I_{cr}, \quad (1.13)$$

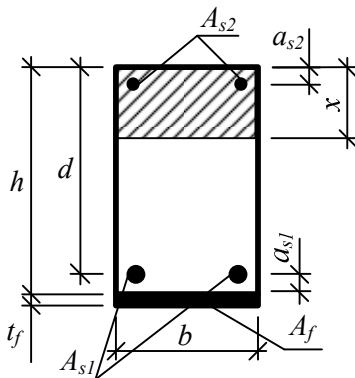
čia β_1^* ir β_2^* priklauso nuo apkrovos lygio ir tempiamųjų armatūrų standumų santykio $\gamma = A_f E_f / A_s E_s = E_f \rho_f / A_s \rho_s$, atitinkamai, kai apkrovos intensyvumas $0,3M_r$; $0,4M_r$; $0,5M_r$ (M_r – sijos laikomoji galia) šie koeficientai: $\beta_1^* = 0,1$ ir $\beta_2^* = 0,1$, kai $\gamma < 1$; $\beta_1^* = 0,6$ ir $\beta_2^* = 0,6$, kai $0,1 < \gamma < 0,5$; $\beta_1^* = 1,2$ ir $\beta_2^* = 1,2$, kai $\gamma > 0,5$. Atlikti skaičiavimai, vertinant trumpalaikį apkrovos poveikį, parodė, kad šis efektyviojo inercijos momento vertinimo metodas geriau tenkina eksperimentinius rezultatus.

Supleišėjusios skerspjūvio dalies inercijos momentas apie neutraliąją ašį nustatomas vertinant tik gniuždomąją sijos skerspjūvio dalį (1.4 pav.):

$$I_{cr} = \frac{b \cdot x^3}{3} + \alpha_{s1} \cdot A_{s1} (d - x)^2 + (\alpha_{s2} - 1) A_{s2} (x - d)^2 + b \cdot t_f (h - x)^2. \quad (1.14)$$

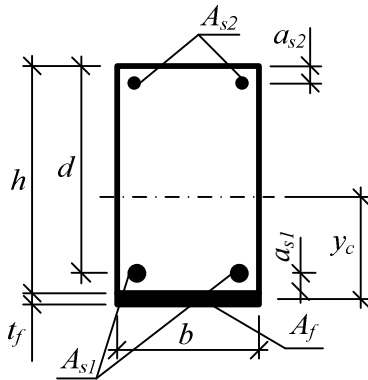
Nesupleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas (1.5 pav.) apskaičiuojamas taip:

$$I_g = \frac{b \cdot h^3}{12} + b \cdot h \left(\frac{h}{2} - y_c \right)^2 + (\alpha_{s2} - 1) A_{s2} (h - y_c - a_{s2})^2 + (\alpha_{s1} - 1) A_{s1} (y_c - a_{s1})^2 + b \cdot t_f (h - y_c)^2. \quad (1.15)$$



1.4 pav. Supleišėjusio sijos skerspjūvio inercijos momento vertinimas

Fig. 1.4. Evaluation of the inertia moment of a cracked beam section



1.5 pav. Nesupleišėjusio sijos skerspjūvio inercijos momento vertinimas

Fig. 1.5. Evaluation of the inertia moment of a non-cracked beam section

Lenkiamosios gelžbetoninės sijos, tempiamojoje zonoje sustiprintos anglies pluošto kompozitu, įlinkis gali būti apskaičiuotas pagal EC2 pateikiamą išraišką.

$$\omega = \omega_1 (1 - \zeta_b) + \omega_2 \zeta_b, \quad (1.16)$$

čia ω_1 ir ω_2 – sijos įlinkis iki supleišėjimo ir po jo. Koeficientas

$$\zeta_b = 1 - \beta_1 \beta_2 \left(\frac{M_{cr}}{M} \right)^2, \text{ čia } \beta_1 \text{ vertina armatūros sukibimo efektą; } \beta_2 = 1 \text{ esant}$$

trumpalaikiai apkrovai ir $\beta_2 = 0,5$ – ilgalaikiai apkrovai.

Taip pat kuriami skaitiniai algoritmai, leidžiantys įvertinti lenkiamojo elemento pleišėtumą konstrukcijos standumui atitinkamame apkrovos lygyje (Неймарк *et al.* 1987). Tempiamojo betono susitraukimo ir valkšnumo deformacijų įtaka gali būti vertinama skaičiuojant sijos įlinkį (Gribniak *et al.* 2008). Ši įtaka gali būti įvertinta ir sijoms, sustiprintoms anglies pluošto kompozitu.

1.9. Betono ir anglies pluošto jungties standumo vertinimas

Veikiant ilgalaikiai apkrovai, šlyties jėga jungtyje tarp sluoksnių gali būti vertinama pritaikius EMM ar AEMM metodikas (bet tik žinant kompozito sluoksnio deformacijas) (Tan *et al.* 2007):

$$T_{FRP} = \varepsilon_{FRP}(t) \cdot \frac{E_{FRP}(t_0)}{1 + \phi_{FRP}(t)} b \cdot t_{FRP}. \quad (1.17)$$

Tyrėjai Wu, Diab (2007) kontakto valkšnumo efektui vertinti pritaikė Maksvelo sudėtinę teoriją. Šiuo atveju jungties tangentiniai įtempiai laiko momentu t apskaičiuojami pagal formulę:

$$\tau(t; t_0) = R(t; t_0) \cdot s(t), \quad (1.18)$$

čia $R(t; t_0)$ – šlyties relaksacijos funkcija išreiškiama taip:

$$R(t; t_0) = k_\infty(t_0) + \sum_{\mu=1}^n k_\mu(t_0) e^{-\frac{t-t_0}{\lambda_\mu}}, \quad (1.19)$$

$s(t)$ – sluoksnių pasislinkimas vienas kito atžvilgiu jungtyje.

Šlyties įtempiai po laiko prieaugio Δt :

$$\tau(t + \Delta t) = \tau(t) + \Delta \tau(\Delta t). \quad (1.20)$$

O šlyties įtempių prieaugis:

$$\Delta\tau(\Delta t) = \sum_{\mu=0}^n \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\lambda \cdot \mu}} \right) \left(\frac{k_{\mu}(t^*) \lambda \cdot \mu}{\Delta t} \Delta s(\Delta t) - \tau_{\mu}(t) \right). \quad (1.21)$$

Poslinkio prieaugis:

$$\Delta s(\Delta t) = \Delta s^e(\Delta t) + \Delta s^c(\Delta t), \quad (1.22)$$

čia $\Delta s^e(\Delta t)$ – tampri poslinkio prieaugio dalis; $\Delta s^c(\Delta t)$ – valkšnumo sukelta poslinkio dalis.

Siūlomas skaičiavimo modelis reikalauja, kad jungties tamprumo koeficientai k_{∞} ir k_{μ} turi būti nustatyti ilgalaikiais eksperimentiniais tyrimais. Norint gauti tikslesnius rezultatus, šlyties įtempių relaksacijos lygtis reikalauja daugiau jungties standumo koeficientų, kitu atveju skaičiavimo rezultatų tikslumas padidės tik esant didesniai laiko tarpui.

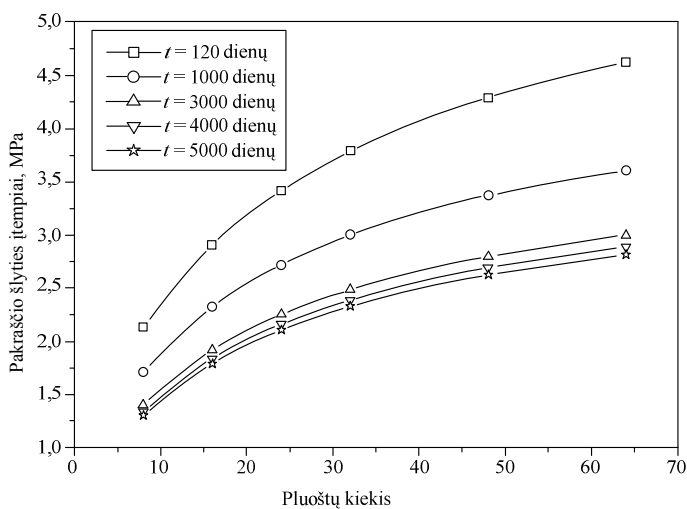
Skaičiavimo teorijų apžvalga rodo, kad sluoksnių sukibties stiprumas, sluoksnių ašinis bei lenkiamasis standumas gali būti vertinami pagal sudėtinių strypų metodiką. Apatinio betoninio sluoksnio deformacijas Benyoucef *et al.* (2007) pasiūlė išreikšti taip:

$$\varepsilon_c(x) = \frac{du_c(x)}{dx} = \frac{e \cdot M_c(x)}{E_c \cdot I_c} - \frac{N_c(x)}{E_c \cdot A_c} + \alpha T_c, \quad (1.23)$$

čia $u_c(x)$ – horizontalus pasislinkimas tarp tempiamųjų sluoksnių (betono ir kompozito); I_c – gelžbetoninio elemento inercijos momentas; A_c – gelžbetoninio elemento skerspjūvio plotas; E_c – gelžbetoninio elemento tamprumo modulis. Dažniausiai tamprumo modulio kitimas laikui bėgant aprašomas pagal efektyviojo modulio arba modifikuoto efektyviojo modulio metodiką; α – betono temperatūrinis plėtimosi koeficientas; T_c – temperatūros piktis.

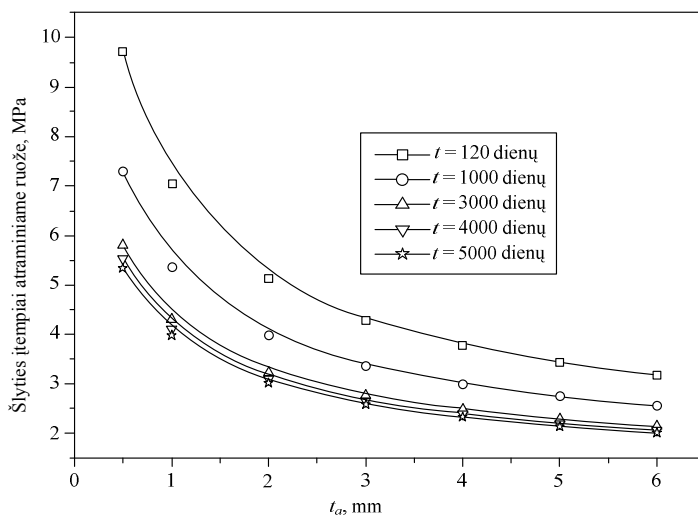
Gauti skaičiavimo rezultatai (Benyoucef *et al.* 2007) rodo, kad kompozitinio sluoksnio ašinis standumas turi įtaką sluoksnių pasislinkimui vienas kito atžvilgiu ir atitinkamai šlyties įtempių intensyvumui. Esant didesniai pluoštų kiekiui, sukeliami didesni šlyties įtempiai, ir ilgalaikės apkrovos atveju jungties standumas mažėja (1.6 pav.) (Benyoucef *et al.* 2007).

Klijų sluoksnio storis daro įtaką šlyties įtempių pasiskirstymui. Didinant klijų storį, šlyties įtempiai mažėja ir gaunamas atitinkamai mažesnis įtempių sumažėjimas veikiant ilgalaikiai apkrovai (1.7 pav.) (Benyoucef *et al.* 2007).



1.6 pav. Šlyties įtempių priklausomybė nuo pluoštų kiekio (Benyoucef *et al.* 2007)

Fig. 1.6. Variation of the maximum adhesive shear stresses depending on the thickness of the CFRP layer (Benyoucef *et al.* 2007)

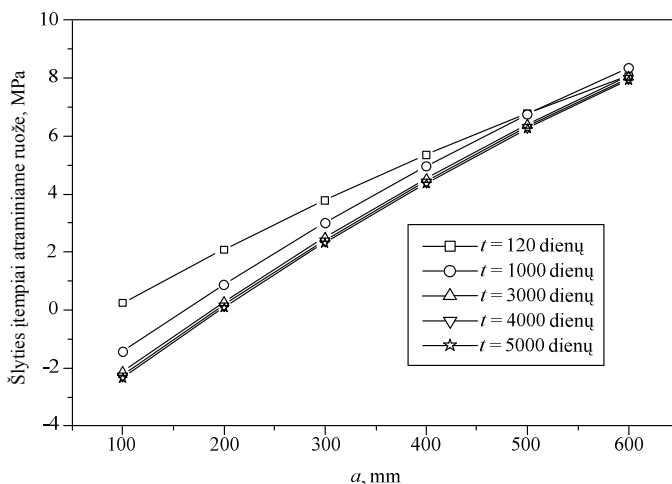


1.7 pav. Šlyties įtempių priklausomybė nuo epoksidinių klijų sluoksnio storio (Benyoucef *et al.* 2007)

Fig. 1.7. Influence of the thickness of an adhesive layer on the edge shear stresses in CFRP – strengthened RC beam (Benyoucef *et al.* 2007)

Toki elgesį galima paaiškinti tuo, kad didelis klijų sluoksnis sukuria tampriai plastiškai lankstų pagrindą, per kurį kompozitas savo tempimo jėga sukelia šlytį betone.

Kompozito priklijavimo ilgis taip pat daro poveikį šlyties deformacijų intensyvumui betono ir anglies pluošto kompozito jungtyje (1.8 pav.) (Benyoucef *et al.* 2007).



1.8 pav. Šlyties įtempių intensyvumo priklausomybė nuo pluošto kompozito laisvojo galo atstumo iki atramos (Benyoucef *et al.* 2007)

Fig. 1.8. Influence of the length of the non-strengthened region on the edge shear stresses for an RC beam with a bonded CFRP plate (Benyoucef *et al.* 2007)

Aplinkos drėgmės pokytis rodo, kad sąlyčio vietoje kinta šlyties įtempių intensyvumas, o normaliniai įtempiai beveik nekinta (Benyoucef *et al.* 2007). Todėl aplinkos poveikis didžiausią įtaką daro kontakto elgsenai, bet ne kompozito elementui.

1.10. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

1. Atlikta literatūros analizė rodo, kad gniuždomojo ir tempiamojo betono stipris, esant ilgalaikės apkrovos poveikiui, mažėja, todėl betono ir kompozito jungties standumas dėl ilgalaikio apkrovos poveikio privalo mažėti.

2. Daugelio autorių atlikti betono ir kompozito jungties elgsenos eksperimentiniai ir teoriniai tyrimai rodo, kad kompozitinis anglies pluošto sluoksnis, veikiant išorinei trumpalaikei apkrovai, pasislenka horizontalia kryptimi. Tai

rodo, kad tokių elementų sluoksnių jungtis nėra standi netgi veikiant trumpalaikę apkrovą. Veikiant ilgalaikę apkrovą jungties šlyties deformacijos turi labai padidėti, tačiau šios jungties šlyties valkšnumo deformacijų tyrimų nėra.

3. Stiprinamas gelžbetonines konstrukcijas veikiantis apkrovos intensyvumas, stiprinant anglies pluošto kompozitu, daro įtaką sustiprintų konstrukcijų laikomajai galiai. Sustiprintų konstrukcijų laikomoji galia gali sumažėti iki 12 %, kai apkrovos intensyvumas stiprinimo metu padidėja nuo 17 % iki 62 %.

4. Gelžbetonines konstrukcijas tempiamojoje zonoje sustiprinus anglies pluošto kompozitu ir padidinus apkrovą, tolesnis statmenųjų plyšių vystymosi pobūdis pasikeičia. Plyšių vystymosi tyrimų, veikiant ilgalaikę apkrovą, nėra.

5. Atlikta skaičiavimo metodų analizė rodo, kad anglies pluoštu sustiprintų sijų įlinkių skaičiavimo tikslumui didelę įtaką turi standumo vertinimo metodas. Siūlomi skaičiavimo metodai neatsižvelgia į ilgalaikės apkrovos įtaką betono ir anglies pluošto kompozito jungties standumui.

Remiantis atliktos apžvalgos rezultatais nustatyta, kad nėra ištirta jungties standumo įtaka gelžbetoninių konstrukcijų, sustiprintų anglies pluošto kompozitu, elgsenai, veikiant ilgalaikę apkrovą. Todėl būtina atlikti ilgalaikius šios jungties tyrimus esant skirtingam ilgalaikės apkrovos lygiui ir papildomam anglies pluošto kompozito sluoksnio inkaravimo metodui. Numatyta atlikti plyšių vystymosi analizę veikiant ilgalaikę apkrovą. Atlikta literatūros analizė parodė, kad šiuo metu nėra skaičiavimo metodo, kuris vertintų šlyties valkšnumo deformacijų įtaką sijos įlinkiui ir laikomajai galiai. Todėl šiame darbe numatoma pritaikyti sudėtinių strypų teoriją lenkiamųjų elementų įlinkiui ir laikomajai galiai skaičiuoti, įvertinant betono ir anglies pluošto kompozito jungties standumo pokytį veikiant ilgalaikę apkrovą bei kompozitinio sluoksnio papildomą inkaravimo metodą.

Gelžbetoninių sijų, sustiprintų anglies pluošto kompozitu, skaičiavimas įvertinant ilgalaikį apkrovos poveikį

Įvairių tyrėjų atlikti eksperimentiniai tyrimai trumpalaikė statine apkrova rodo, kad betono ir anglies pluošto kompozito jungtis nėra standi. Betono ir kompozito jungtyje pasireiškiančios šlyties deformacijos sumažina sijų laikomąją galią ir padidina įlinkį. Esant ilgalaikiam apkrovų poveikiui, betono ir kompozito jungtyje pasireiškia šlyties valkšnumo deformacijos, kurios papildomai sumažina laikomąją galią bei padidina įlinkius. Projektavimo rekomendacijose ACI 440.2R-02 ir *FIB Bulletin* 14 betono ir anglies pluošto jungties šlyties valkšnumo deformacijų poveikis sijų laikomajai galiai ir įlinkio vystymuisi nevertinamas. Kitų autorių siūlomose laikomosios galios ir įlinkio skaičiavimo metodikose dažniausiai vertinamas tik gniuždomosios zonos betono valkšnumas, o kompozito tempiamasis stipris sumažinamas darbo sąlygų koeficientais. Sudėtinių strypų teorija (Ржаницын 1986) leidžia įvertinti sluoksniuotosios konstrukcijos sluoksnių jungties standumą. Ši teorija gali būti pritaikyta gelžbetoninėms konstrukcijoms, sustiprintoms anglies pluoštu, skaičiuoti įvertinant sluoksnių jungties standumą. Šiame darbe pritaikius sudėtinių strypų teoriją pasiūlyta sijų

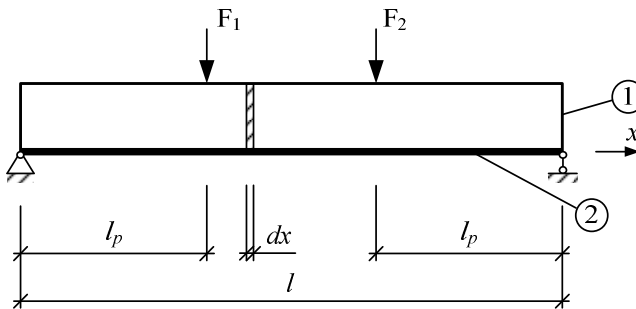
įlinkio ir laikomosios galios skaičiavimo metodika, įvertinanti sluoksnių jungties šlyties valkšnumo deformacijas.

2.1. Jungties standumo vertinimas

Darbe nagrinėjamos sijos bendras vaizdas parodytas 2.1 paveiksle. Charakteringas sijos ruožo sudalijimas į atskirus elementus pateiktas 2.2 paveiksle.

Lenkiama sluoksniuota sija išlinksta, todėl sluoksniai deformuojasi. Tempiami sluoksniai pailgėja ir atsiranda sluoksnių poslinkiai. Gelžbetoninio elemento sluoksnio pailgėjimas yra u_c , o kompozitinio sluoksnio pailgėjimas – u_f . Kadangi jungtis tarp sluoksnių nestandi, tai nagrinėjamų sluoksnių pasislinkimas vienas kito atžvilgiu:

$$u_l = u_f - u_c. \quad (2.1)$$



2.1 pav. Sustiprintos gelžbetoninės sijos apkrovimo schema:

1 – gelžbetoninis elementas; 2 – kompozitinis elementas

Fig. 2.1. Loading scheme of a strengthened reinforced concrete beam.

1 – reinforced concrete element; 2 – CFRP element

Įvertinus deformacijų ir poslinkių ryšį:

$$u_l' = \frac{du_f}{dx} - \frac{du_c}{dx} = \epsilon_f - \epsilon_c. \quad (2.2)$$

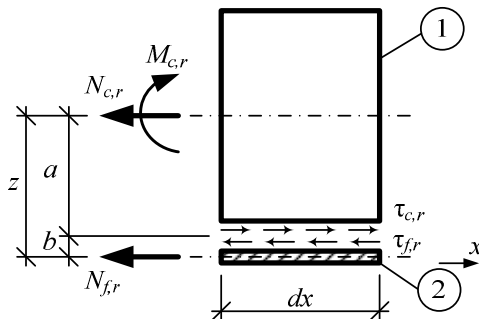
Nagrinėjamame sijos elemente veikia ašinės, šlyties jėgos ir lenkimo momentai. Todėl gelžbetoninio elemento deformacijos (2.3 pav.)

$$\epsilon_c = \epsilon_{c,N} - \rho_c a. \quad (2.3)$$

Kompozitinio sluoksnio deformacijos (2.3 pav.)

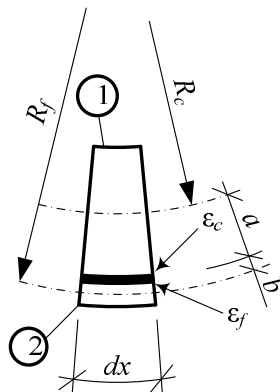
$$\varepsilon_f = \varepsilon_{f,N} + \rho_f b, \quad (2.4)$$

čia $\varepsilon_{c,N}$ ir $\varepsilon_{f,N}$ – atitinkamai pirmame ir antrame elemente ašinių jėgų sukeliamos deformacijos; $\rho_c a$ ir $\rho_f b$ – atitinkamai pirmame ir antrame elemente lenkimo momento sukeliamos deformacijos.



2.2 pav. Sustiprintos gelžbetoninės sijos baigtinio ruožo dx sudalijimas į atskirus elementus, įvertinant šlyties įtempius betono ir anglies pluošto kompozito jungtyje: 1 – gelžbetoninis elementas; 2 – kompozitinis elementas

Fig. 2.2. Reinforced concrete beam section divided into separate elements: 1 – reinforced concrete element; 2 – CFRP element



2.3 pav. Sijos elementų deformacijos betono ir kompozito jungtyje: 1 – gelžbetoninis elementas; 2 – kompozitinis elementas

Fig. 2.3. Deformations of beam elements in concrete and carbon fibre composite joint. 1 – reinforced concrete element; 2 – CFRP element

Gelžbetoninio elemento deformacijos dėl ašinių jėgų poveikio:

$$\varepsilon_{c,N} = \frac{N_{c,r}}{E_c A_c}. \quad (2.5)$$

Kompozitinio elemento deformacijos dėl ašinių jėgų poveikio:

$$\varepsilon_{f,N} = \frac{N_{f,r}}{E_f A_f}, \quad (2.6)$$

čia $E_c A_c$ ir $E_f A_f$ – gelžbetoninio ir kompozitinio elemento ašiniai standumai.

Įvertinus šlyties jėgų įtaką: $N_{c,r} = N_{c,eff} - T_{c,k}$, $N_{f,r} = N_{f,eff} + T_{f,k} \cdot T_{c,k}$ ir $T_{f,k}$ – šlyties jėgos betono ir kompozito jungtyje.

Kiekvieno sluoksnio kreivis priklauso nuo bendro sistemą veikiančio lenkimo momento:

$$\rho_i = -\frac{M_i}{E_i I_i}. \quad (2.7)$$

Kadangi kompozitinis elementas laikomas membraniniu elementu, jam lenkimo momento įtaka nevertinama, bet vertinamas tik ašinių jėgų poveikis. Atsižvelgiant į tai, sluoksnuiotąjį elementą veikiantis lenkimo momentas

$$M = M_{c,r} + \sum_{i=1}^{n+1} M_i^T = M_{c,eff} - T_{c,k} \cdot a - T_{f,k} \cdot b. \quad (2.8)$$

Įvertinus sluoksnių ašinių jėgų išraiškas ir kreivio priklausomybę nuo lenkimo momento, sluoksnių deformacijų (2.3) ir (2.4) išraiškos:

$$\varepsilon_c = \frac{N_{c,r}}{E_c A_c} + \frac{M_{c,r}}{E_c I_c} a = \frac{N_{c,eff}}{E_{c,eff} A_{c,eff}} - \frac{T_{c,k}}{E_{c,eff} A_{c,eff}} + \frac{M_{c,eff} a}{E_{c,eff} I_{c,eff}} - \frac{T_{c,k} a^2}{E_{c,eff} I_{c,eff}}, \quad (2.9)$$

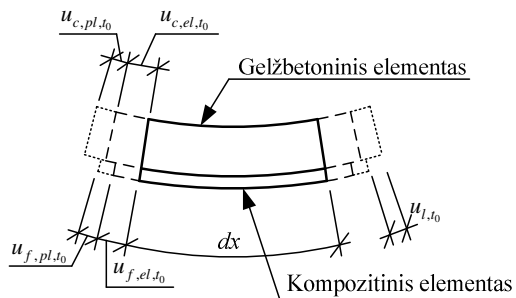
$$\varepsilon_f = \frac{N_{f,r}}{E_f A_f} = \frac{N_{f,eff}}{E_f A_f} + \frac{T_{f,k}}{E_f A_f}. \quad (2.10)$$

Esant ilgalaikės apkrovos poveikiui, dėl valkšnumo deformacijų vystymosi atsiranda sluoksnių pasislinkimo prieaugis. Poslinkių prieaugiai susideda iš tampriosios ir plastinės dalies (2.4 pav.):

$$u_c(t) = u_c(t_0) + du_c(t) = u_{c,el,t_0} + u_{c,pl,t_0} + du_{c,el,t} + du_{c,pl,t}, \quad (2.11)$$

$$u_f(t) = u_f(t_0) + du_f(t) = u_{f,el,t_0} + u_{f,pl,t_0} + du_{f,el,t} + du_{f,pl,t}, \quad (2.12)$$

čia $u_c(t_0)$ ir $u_f(t_0)$ – poslinkiai pradiniu laiko momentu; $du_c(t)$ ir $du_f(t)$ – poslinkiai dėl jungties valkšnumo deformacijų vystymosi; u_{c,el,t_0} ir u_{f,el,t_0} – betono ir kompozitinio sluoksnio pasislinkimai dėl tampriųjų deformacijų pradiniu laiko momentu; u_{c,pl,t_0} ir u_{f,pl,t_0} – betono ir kompozitinio sluoksnio pasislinkimai dėl plastinių deformacijų pradiniu laiko momentu; $du_{c,el,t}$ ir $du_{f,el,t}$ – betono ir kompozitinio sluoksnio pasislinkimo prieaugiai dėl tampriųjų deformacijų nagrinėjamu laiko momentu; $du_{c,pl,t}$ ir $du_{f,pl,t}$ – betono ir kompozitinio sluoksnio pasislinkimo prieaugiai dėl plastinių deformacijų nagrinėjamu laiko momentu.



2.4 pav. Poslinkio tarp sluoksnių prieaugis dėl valkšnumo deformacijų vystymosi jungtyje

Fig. 2.4. Displacement between separate section elements due to the evolution of creep deformations in a bond of CFRP and concrete

Sluoksnių deformacijų prieaugis įvertinus tamprią ir plastinę dalį veikiant ilgalaikei statiniai apkrovai:

$$\begin{aligned} \varepsilon_c(t) &= \varepsilon_{c,el,t_0} + \varepsilon_{c,pl,t_0} + \sum \Delta \varepsilon_{c,el,t_n} + \sum \Delta \varepsilon_{c,pl,t_n} = \\ &\varepsilon_{c,el,t_0} + \varepsilon_{c,pl,t_0} + \int_0^t \frac{\partial \varepsilon_{c,el,\tau}}{\partial \tau} + \frac{\partial \varepsilon_{c,pl,\tau}}{\partial \tau} d\tau, \end{aligned} \quad (2.13)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_f(t) &= \varepsilon_{f,el,t_0} + \varepsilon_{f,pl,t_0} + \sum \Delta \varepsilon_{f,el,t_n} + \sum \Delta \varepsilon_{f,pl,t_n} = \\ &\varepsilon_{f,el,t_0} + \varepsilon_{f,pl,t_0} + \int_0^t \frac{\partial \varepsilon_{f,el,\tau}}{\partial \tau} + \frac{\partial \varepsilon_{f,pl,\tau}}{\partial \tau} d\tau, \end{aligned} \quad (2.14)$$

čia τ – laiko koordinatė.

Statine ilgalaikė apkrova apkrauto gelžbetoninio elemento valkšnumo charakteristika pradiniu laiko momentu:

$$\Phi_{c,t_0} = \frac{\varepsilon_{c,t_0}}{\varepsilon_{c,el,t_0}}. \quad (2.15)$$

Valkšnumo matas pradiniu laiko momentu:

$$C_{c,t_0} = \frac{\varepsilon_{c,t_0}}{\sigma_{c,t_0}} = \frac{\varepsilon_{c,t_0}}{E_{c,t_0} \varepsilon_{c,el,t_0}} = \frac{\Phi_{c,t_0}}{E_{c,t_0}}. \quad (2.16)$$

[vertinus šiuos parametrus, sluoksnių deformacijos esant pastoviai ilgalaikiai apkrovai:

$$\varepsilon_c(t) = \frac{\sigma_{c,t_0}}{E_{c,t_0}} + \sigma_{c,t_0} \cdot C_{c,t_0} + \int_{t_0}^{t_i} \left(\frac{\partial \sigma_{c,\tau}}{E_{c,\tau} \partial \tau} + \frac{\partial \sigma_{c,\tau} \cdot C_{c,\tau}}{\partial \tau} \right) d\tau; \quad (2.17)$$

$$\varepsilon_f(t) = \frac{\sigma_{f,t_0}}{E_{f,t_0}} + \sigma_{f,t_0} \cdot C_{f,t_0} + \int_{t_0}^{t_i} \left(\frac{\partial \sigma_{f,\tau}}{E_{f,\tau} \partial \tau} + \frac{\partial \sigma_{f,\tau} \cdot C_{f,\tau}}{\partial \tau} \right) d\tau. \quad (2.18)$$

Kiekvieno elemento įtempius išreiškus pagal ašinių jėgų ir momentų priklausomybę, sluoksnių deformacijų prieaugis esant pastoviai ilgalaikiai apkrovai:

$$\varepsilon_i(t) = \varepsilon_{i,N}(t) + \varepsilon_{i,M}(t), \quad (2.19)$$

$$\varepsilon_{i,N}(t) = \frac{N_{i,t_0}}{E_{i,t_0} A_{i,t_0}} + \frac{N_{i,t_0}}{A_{i,t_0}} \frac{\Phi_{i,t_0}}{E_{i,t_0}} + \int_{t_0}^{t_i} \frac{\partial}{\partial \tau} \left(\frac{N_{i,\tau}}{A_{i,\tau} E_{i,\tau}} + \frac{N_{i,\tau}}{A_{i,\tau}} \frac{\Phi_{i,\tau}}{E_{i,\tau}} \right) d\tau; \quad (2.20)$$

$$\varepsilon_{i,M}(t) = \frac{M_{i,t_0}}{I_{i,t_0} E_{i,t_0}} \cdot a + \frac{M_{i,t_0}}{I_{i,t_0} E_{i,t_0}} \cdot \frac{\Phi_{i,t_0}}{E_{i,t_0}} \cdot a + \int_{t_0}^{t_i} \frac{\partial}{\partial \tau} \left(\frac{M_{i,\tau}}{I_{i,\tau} E_{i,\tau}} \cdot a + \frac{M_{i,\tau}}{I_{i,\tau}} \frac{\Phi_{i,\tau}}{E_{i,\tau}} \cdot a \right) d\tau. \quad (2.21)$$

Pagal (Лившиц 1976) formulių 2.17 ir 2.18 pasiūlytas integralines išraiškas, deformacijos sluoksniuose gali būti užrašytos taip:

$$\varepsilon_{i,N}(t) = \frac{1}{E_{i,t_0}} \left(\frac{N_i}{A_{i,t_0}} k_{i,1} + \frac{N_{i,t}}{A_{i,t}} k_{i,2} \right), \quad (2.22)$$

$$\varepsilon_{i,M}(t) = \frac{1}{E_{i,t_0}} \left(\frac{M_i}{I_{i,t_0}} \cdot k_{i,1} \cdot \alpha + \frac{M_{i,t}}{I_{i,t}} \cdot k_{i,2} \cdot \alpha \right). \quad (2.23)$$

Čia koeficientai, kurie įvertina betono amžių $k_{i,1}$ ir $k_{i,2}$ (Лившиц 1976):

$$k_{i,1} = \frac{\Phi_{i,t}}{2} (1 - \alpha + k_0), \quad (2.24)$$

$$k_{i,2} = \frac{\Phi_{i,t}}{2} (1 + \alpha - k_0) + 1, \quad (2.25)$$

čia α ir k_0 – koeficientai. Kai apkrovimas vyksta po 28 betono kietėjimo parų, tai $k_0 = 0$ ir sluoksnių deformacijos:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{i,N}(t) = \frac{1}{E_{i,t_0}} \left(\frac{N_i}{A_i} \cdot \frac{\Phi_{i,t}}{2} + \frac{N_{i,t}}{A_{i,t}} \left(\frac{\Phi_{i,t}}{2} + 1 \right) \right) = \\ \frac{N_{i,t_0}}{E_{i,t_0} A_{i,t_0}} + \frac{N_{i,t_0}}{E_{i,t_0} A_{i,t_0}} \cdot \frac{\Phi_{i,t_0}}{2} + \frac{N_{i,t_1}}{E_{i,t_0} A_{i,t_1}} \cdot \frac{\Phi_{i,t_1}}{2}, \end{aligned} \quad (2.26)$$

čia $\frac{N_{i,t_0}}{E_{i,t_0} A_{i,t_0}}$ – elemento tamprųjų darbą vertinantis narys; $\frac{N_{i,t_0}}{E_{i,t_0} A_{i,t_0}} \cdot \frac{\Phi_{i,t_0}}{2}$ – pirminio valkšumo deformacijos vertinantis narys; $\frac{N_{i,t_1}}{E_{i,t_0} A_{i,t_1}} \cdot \frac{\Phi_{i,t_1}}{2}$ – valkšumo deformacijos vertinantis narys.

Įvertinus lygtis (2.9) ir (2.10) deformacijų skirtumas:

$$\begin{aligned} \Delta \varepsilon_k = \varepsilon_f - \varepsilon_c = \frac{N_{f,r}}{E_f \cdot A_f} - \frac{N_{c,r}}{E_c \cdot A_c} - \frac{M_{c,r}}{E_c I_c} = \frac{N_{f,eff}}{E_{f,eff} \cdot A_{f,eff}} + \frac{T_{f,k}}{E_{f,eff} \cdot A_{f,eff}} - \\ \frac{N_{c,eff}}{E_{c,eff} \cdot A_{c,eff}} + \frac{T_{c,k}}{E_{c,eff} \cdot A_{c,eff}} - \frac{M_{c,eff} a}{E_{c,eff} I_{c,eff}} + \frac{T_{c,k} a^2}{E_{c,eff} \cdot A_{c,eff}}. \end{aligned} \quad (2.27)$$

Įvertinus ašinių ir šlyties jėgų įtaką, deformacijų prieaugis gelžbetoniniame elemente ilgalaikės apkrovos veikimo metu:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{c,N,t} = \frac{N_{c,eff,t_0}}{E_{c,eff,t_0} A_{c,eff,t_0}} - \frac{T_{c,k,t_0}}{E_{c,eff,t_0} A_{c,eff,t_0}} + \frac{N_{c,eff}}{A_{c,eff}} \frac{\Phi_{c,t_0}}{E_{c,eff,t_0}} - \frac{T_{c,k}}{A_{c,eff}} \frac{\Phi_{c,t_0}}{E_{c,eff,t_0}} + \\ \int_{t_0}^{t_1} \frac{\partial}{\partial \tau} \left(\frac{N_{c,eff,t_1}}{E_{c,eff,t_1} A_{c,eff,t_1}} - \frac{T_{c,k,t_1}}{E_{c,eff,t_1} A_{c,eff,t_1}} + \frac{N_{c,eff,t_1}}{A_{c,eff,t_1}} \frac{\Phi_{c,t_1}}{E_{c,eff,t_1}} - \frac{T_{c,k,t_1}}{A_{c,eff,t_1}} \frac{\Phi_{c,t_1}}{E_{c,eff,t_1}} \right) d\tau. \end{aligned} \quad (2.28)$$

Įvertinus integralines išraiškas lygtis (2.28) įgauna tokį pavidalą:

$$\varepsilon_{c,N,t} = \frac{N_{c,eff,t_0}}{A_{c,eff,t_0}} \cdot \frac{\varphi_{c,t_0}}{2 \cdot E_{c,eff,t_0}} - \frac{T_{c,k,t_0}}{A_{c,eff,t_0}} \cdot \frac{\varphi_{c,t_0}}{2 \cdot E_{c,eff,t_0}} + \frac{N_{c,eff,t_1}}{A_{c,eff,t_1}} \cdot \frac{\varphi_{c,t_1}}{2 \cdot E_{c,eff,t_0}} - \frac{T_{c,k,t_1}}{A_{c,eff,t_1}} \cdot \frac{\varphi_{c,t_1}}{2 \cdot E_{c,eff,t_0}} + \frac{N_{c,eff,t_1}}{E_{c,eff,t_0} \cdot A_{c,eff,t_1}} - \frac{T_{c,k,t_1}}{E_{c,eff,t_0} \cdot A_{c,eff,t_1}}. \quad (2.29)$$

Deformacijos gelžbetoniniame elemente dėl lenkimo momento ir šlyties jėgų poveikio:

$$\varepsilon_{c,M,t} = \frac{M_{c,eff,t_0} \cdot z_{t_0}}{E_{c,eff,t_0} I_{c,eff,t_0}} - \frac{T_{c,k,t_0} \cdot a \cdot z_{t_0}}{E_{c,eff,t_0} I_{c,eff,t_0}} + \frac{M_{c,eff,t_0} \cdot z_{t_0}}{I_{c,eff,t_0}} \cdot \frac{\varphi_{c,t_0}}{E_{c,eff,t_0}} - \frac{T_{c,k,t_0} \cdot a \cdot z_{t_0}}{I_{c,eff,t_0}} \cdot \frac{\varphi_{c,t_0}}{E_{c,eff,t_0}} + \int_{t_0}^{t_1} \frac{\partial}{\partial \tau} \left(\frac{M_{c,eff,t_1} \cdot z_{t_1}}{E_{c,eff,t_1} I_{c,eff,t_1}} - \frac{T_{c,k,t_1} \cdot a \cdot z_{t_1}}{E_{c,eff,t_1} I_{c,eff,t_1}} + \frac{M_{c,eff,t_1} \cdot z_{t_1}}{I_{c,eff,t_1}} \cdot \frac{\varphi_{c,t_1}}{E_{c,eff,t_1}} - \frac{T_{c,k,t_1} \cdot a \cdot z_{t_1}}{I_{c,eff,t_1}} \cdot \frac{\varphi_{c,t_1}}{E_{c,eff,t_1}} \right) d\tau; \quad (2.30)$$

$$\varepsilon_{c,M,t} = \frac{M_{c,eff,t_0} \cdot z}{I_{c,eff,t_0}} \cdot \frac{\varphi_{c,t_0}}{2 \cdot E_{c,eff,t_0}} - \frac{T_{c,k,t_0} \cdot a \cdot z}{I_{c,eff,t_0}} \cdot \frac{\varphi_{c,t_0}}{2 \cdot E_{c,eff,t_0}} + \frac{M_{c,eff,t_1} \cdot z}{I_{c,eff,t_1}} \cdot \frac{\varphi_{c,t_1}}{2 \cdot E_{c,eff,t_0}} - \frac{T_{c,k,t_1} \cdot a \cdot z}{I_{c,eff,t_1}} \cdot \frac{\varphi_{c,t_1}}{2 \cdot E_{c,eff,t_0}} + \frac{M_{c,eff,t_1} \cdot z}{E_{c,eff,t_0} \cdot A_{c,t_1}} - \frac{T_{c,k,t_1} \cdot a \cdot z}{E_{c,eff,t_0} \cdot I_{c,eff,t_1}}. \quad (2.31)$$

Kompozitinio elemento deformacijos:

$$\varepsilon_{f,N,t} = \frac{N_{f,eff,t_0}}{E_{f,eff,t_0} A_{f,eff,t_0}} + \frac{T_{f,k,t_0}}{E_{f,eff,t_0} A_{f,eff,t_0}} + \frac{N_{f,eff,t_0}}{A_{f,eff,t_0}} \cdot \frac{\varphi_{c,t_0}}{E_{f,eff,t_0}} + \frac{T_{f,k,t_0}}{A_{f,eff,t_0}} \cdot \frac{\varphi_{c,t_0}}{E_{f,eff,t_0}} + \int_{t_0}^{t_1} \frac{\partial}{\partial \tau} \left(\frac{N_{f,eff,t_1}}{E_{f,eff,t_1} A_{f,eff,t_1}} + \frac{T_{f,k,t_1}}{E_{f,eff,t_1} A_{f,eff,t_1}} + \frac{N_{f,eff,t_1}}{A_{f,eff,t_1}} \cdot \frac{\varphi_{c,t_1}}{E_{f,eff,t_1}} + \frac{T_{f,k,t_1}}{A_{f,eff,t_1}} \cdot \frac{\varphi_{c,t_1}}{E_{f,eff,t_1}} \right) d\tau; \quad (2.32)$$

$$\begin{aligned}
\varepsilon_{f,N,t} = & \frac{N_{f,eff,t_0}}{A_{f,eff,t_0}} \cdot \frac{\Phi_{c,t_0}}{2 \cdot E_{f,eff,t_0}} + \frac{T_{f,k,t_0}}{A_{f,eff,t_0}} \cdot \frac{\Phi_{c,t_0}}{2 \cdot E_{f,eff,t_0}} + \\
& \frac{N_{f,eff,t_1}}{A_{f,eff,t_1}} \cdot \frac{\Phi_{c,t_1}}{2 \cdot E_{f,eff,t_0}} + \frac{T_{f,k,t_1}}{A_{f,eff,t_1}} \cdot \frac{\Phi_{c,t_1}}{2 \cdot E_{f,eff,t_0}} + \\
& \frac{N_{f,eff,t_1}}{E_{f,t_0} \cdot A_{f,eff,t_1}} + \frac{T_{f,k,t_1}}{E_{f,t_0} \cdot A_{f,eff,t_1}}.
\end{aligned} \quad (2.33)$$

Sluoksnių deformacijų skirtumas ilgalaikės apkrovos veikimo metu:

$$\Delta \varepsilon_k(t) = \varepsilon_f(t) - \varepsilon_c(t) = \varepsilon_{f,N}(t) - \varepsilon_{c,N}(t) + \varepsilon_{c,M}(t). \quad (2.34)$$

Taikant sudėtinių strypų teoriją, sijos skerspjūvis buvo sudalintas į atskirus sluoksnius. Jungtyje tarp sluoksnių pridėtos vienetinės šlyties jėgos, todėl pagal jėgų metodą galioja sąlyga, kad vienetinių jėgų ir išorinės apkrovos sukeltas poslinkis tarp sluoksnių turi būti lygus nuliui ir jėgų metodo kanoninė lygtis atrodo taip.

$$\Delta_{N,M} + \Delta_k T_k = 0, \quad (2.35)$$

čia $\Delta_{N,M}$ – tikrosios apkrovos sukeltas poslinkis atpalaiduoto ryšio kryptimi;

Δ_k – vienetinių šlyties jėgų sukeltas poslinkis atpalaiduoto ryšio kryptimi.

Įvertinus (2.27), (2.29), (2.31), (2.33) formules, jungties standumą apibūdinantis dydis vertinant ilgalaikės apkrovos poveikį:

$$\begin{aligned}
\Delta_k(t) = \gamma_{t_0,t_1} = & \frac{1}{E_{c,eff,t_0} \cdot A_{c,eff,t_1}} + \frac{\Phi_{c,t_0}}{2 \cdot E_{c,eff,t_0} \cdot A_{c,eff,t_0}} + \\
& \frac{\Phi_{c,t_1}}{2 \cdot E_{c,eff,t_0} \cdot A_{c,eff,t_1}} + \frac{a^2}{E_{c,eff,t_0} \cdot I_{c,eff,t_1}} + \frac{a^2 \cdot \Phi_{c,t_0}}{2 \cdot E_{c,eff,t_0} \cdot I_{c,eff,t_0}} + \\
& \frac{a^2 \cdot \Phi_{c,t_1}}{E_{c,eff,t_0} \cdot I_{c,eff,t_1}} + \frac{1}{E_{f,t_0} \cdot A_{f,t_1}} + \frac{\Phi_{c,t_0}}{2 \cdot E_{f,t_0} \cdot A_{f,t_0}} + \frac{\Phi_{c,t_1}}{2 \cdot E_{f,t_0} \cdot A_{f,t_1}}.
\end{aligned} \quad (2.36)$$

Kai ilgalaikė apkrova nevertinama:

$$\gamma_{t_0} = \frac{\Phi_{c,t_0}}{2 \cdot E_{c,eff,t_0} \cdot A_{c,eff,t_0}} + \frac{a^2 \cdot \Phi_{c,t_0}}{2 \cdot E_{c,eff,t_0} \cdot I_{c,eff,t_0}} + \frac{\Phi_{c,t_0}}{2 \cdot E_{f,t_0} \cdot A_{f,t_0}}. \quad (2.37)$$

Kai sijos apkrovimas vyksta daugiau negu po 28 parų, tai sluoksnių deformacijos (Лившиц 1976):

$$\varepsilon_{i,t} = \frac{1}{E_{i,t_0}} \left(\frac{N_{i,t_0}}{A_{i,t_0}} k_{i,1} + \frac{N_{i,t}}{A_{i,t}} k_{i,2} \right) = \frac{N_{i,t_0}}{E_{i,t_0} A_{i,t_0}} \cdot k_{i,1} + \frac{N_{i,t}}{E_{i,t_0} A_{i,t}} \cdot k_{i,2}. \quad (2.38)$$

Gelžbetoninio elemento deformacijos dėl ašinių jėgų poveikio:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{c,N} = & \left(\frac{N_{c,eff,t_0}}{E_{c,eff,t_0} \cdot A_{c,eff,t_0}} - \frac{T_{c,k,t_0}}{E_{c,eff,t_0} \cdot A_{c,eff,t_0}} \right) k_1 + \\ & \left(\frac{N_{c,eff,t_1}}{E_{c,eff,t_0} \cdot A_{c,eff,t_1}} - \frac{T_{c,k,t_1}}{E_{c,eff,t_0} \cdot A_{c,eff,t_1}} \right) k_2 = \\ & \frac{N_{c,eff,t_0}}{E_{c,eff,t_0} \cdot A_{c,t_0}} k_1 - \frac{T_{c,k,t_0}}{E_{c,eff,t_0} \cdot A_{c,eff,t_0}} k_1 + \\ & \frac{N_{c,eff,t_1}}{E_{c,eff,t_0} \cdot A_{c,eff,t_1}} k_2 - \frac{T_{c,k,t_1}}{E_{c,eff,t_0} \cdot A_{c,eff,t_1}} k_2. \end{aligned} \quad (2.39)$$

Gelžbetoninio elemento deformacijos dėl lenkimo momento poveikio:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{c,M} = & \left(\frac{M_{c,eff,t_0}}{E_{c,eff,t_0} \cdot I_{c,eff,t_0}} \cdot a - \frac{T_{c,k,t_0}}{E_{c,eff,t_0} \cdot I_{c,eff,t_0}} \cdot a^2 \right) k_1 + \\ & \left(\frac{M_{c,eff,t_1}}{E_{c,eff,t_0} \cdot I_{c,eff,t_1}} \cdot a - \frac{T_{c,k,t_1}}{E_{c,eff,t_0} \cdot I_{c,eff,t_1}} \cdot a^2 \right) k_2 = \\ & \frac{M_{c,eff,t_0} \cdot a}{E_{c,eff,t_0} \cdot I_{c,eff,t_0}} k_1 - \frac{T_{c,k,t_0} \cdot a^2}{E_{c,eff,t_0} \cdot I_{c,eff,t_0}} k_1 + \\ & \frac{M_{c,eff,t_1} \cdot a}{E_{c,eff,t_0} \cdot I_{c,eff,t_1}} k_2 - \frac{T_{c,k,t_1} \cdot a^2}{E_{c,eff,t_0} \cdot I_{c,eff,t_1}} k_2. \end{aligned} \quad (2.40)$$

Kompozitinio elemento deformacijos dėl ašinių jėgų poveikio:

$$\begin{aligned}
\varepsilon_{N,f} = & \left(\frac{N_{f,eff,t_0}}{E_{f,eff,t_0} \cdot A_{f,eff,t_0}} + \frac{T_{f,k,t_0}}{E_{f,eff,t_0} \cdot A_{f,eff,t_0}} \right) k_1 + \\
& \left(\frac{N_{f,eff,t_1}}{E_{f,eff,t_0} \cdot A_{f,eff,t_1}} + \frac{T_{f,k,t_1}}{E_{f,eff,t_0} \cdot A_{f,eff,t_1}} \right) k_2 = \\
& \frac{N_{f,eff,t_0}}{E_{f,eff,t_0} \cdot A_{f,eff,t_0}} k_1 + \frac{T_{f,k,t_0}}{E_{f,eff,t_0} \cdot A_{f,eff,t_0}} k_1 + \\
& \frac{N_{f,eff,t_1}}{E_{f,eff,t_0} \cdot A_{f,eff,t_1}} k_2 + \frac{T_{f,k,t_1}}{E_{f,eff,t_0} \cdot A_{f,eff,t_1}} k_2.
\end{aligned} \tag{2.41}$$

Sluoksnių deformacijų skirtumas:

$$\begin{aligned}
\Delta \varepsilon(t) = \varepsilon_f(t) - \varepsilon_c(t) = & \frac{N_{f,eff,t_0}}{E_{f,eff,t_0} \cdot A_{f,t_0}} k_1 + \frac{T_{f,k,t_0}}{E_{f,t_0} \cdot A_{f,t_0}} k_1 + \\
& \frac{N_{f,eff,t_1}}{E_{f,eff,t_0} \cdot A_{f,eff,t_1}} k_2 + \frac{T_{f,k,t_1}}{E_{f,eff,t_0} \cdot A_{f,eff,t_1}} k_2 - \frac{N_{c,eff,t_0}}{E_{c,eff,t_0} \cdot A_{c,eff,t_0}} k_1 \\
& + \frac{T_{f,k,t_0}}{E_{c,eff,t_0} \cdot A_{c,eff,t_0}} k_1 - \frac{N_{c,eff,t_1}}{E_{c,eff,t_0} \cdot A_{c,eff,t_1}} k_2 + \frac{T_{c,k,t_1}}{E_{c,eff,t_0} \cdot A_{c,eff,t_1}} k_2 - \\
& \frac{M_{c,eff,t_0} \cdot a}{E_{c,eff,t_0} \cdot I_{c,eff,t_0}} k_1 + \frac{T_{c,k,t_0} \cdot a^2}{E_{c,eff,t_0} \cdot I_{c,eff,t_0}} k_1 - \frac{M_{c,eff,t_1} \cdot a}{E_{c,eff,t_0} \cdot I_{c,eff,t_1}} k_2 + \\
& \frac{T_{c,k,t_1} \cdot a^2}{E_{c,eff,t_0} \cdot I_{c,eff,t_1}} k_2.
\end{aligned} \tag{2.42}$$

Įvertinus (2.42) jungties standumą, apibūdinantis dydis, esant ilgalaikės apkrovos poveikiui:

$$\begin{aligned}
\gamma_{t_0:t_1} = & \frac{k_1}{E_{c,eff,t_0} \cdot A_{c,eff,t_0}} + \frac{k_2}{E_{c,eff,t_0} \cdot A_{c,eff,t_1}} + \frac{k_1 \cdot a^2}{E_{c,eff,t_0} \cdot I_{c,eff,t_0}} + \\
& \frac{k_2 \cdot a^2}{E_{c,eff,t_0} \cdot I_{c,eff,t_1}} + \frac{k_1}{E_{f,eff,t_0} \cdot A_{f,eff,t_0}} + \frac{k_2}{E_{f,eff,t_0} \cdot A_{f,eff,t_1}}.
\end{aligned} \tag{2.43}$$

Koeficientas, įvertinantis betono tamprumo modulio prieaugį kietėjimo metu (Лившиц 1976):

$$k_0 = \frac{E_{c,t} - E_{c,t_0}}{E_{c,t} \cdot \Phi_{c,t}}. \quad (2.44)$$

Charakteristika, apibūdinanti sluoksnių jungties standumą, esant ilgalaikės apkrovos poveikiui:

$$\lambda(t) = \sqrt{\xi_k(t) \cdot \gamma(t)}, \quad (2.45)$$

čia $\gamma(t)$ vertinamas pagal (2.36), (2.37), (2.43) išraiškas pagal konkretų apkrovimo atvejį.

Bendras strypų tarpusavio sąveikos standumas:

$$\xi_k(t) = \frac{b \cdot G_{c,eff}(t)}{a(t)}. \quad (2.46)$$

čia $G_{c,eff}(t)$ – betono ir anglies pluošto kompozito jungties efektyvusis šlyties modulis.

$$G_{c,eff}(t) = 0,00234 E_c(t) + 8,31 \frac{\mu_{s1}}{\mu_f} + 11,04 \frac{M_e}{k_a \cdot M_s}, [\text{MPa}]. \quad (2.47)$$

Čia μ_{s1} – armavimo strypine plienine armatūra tempiamojoje zonoje procentas; μ_f – armavimo procentas anglies pluošto kompozitu; M_e – anglies pluošto kompozitu sustiprintą gelžbetoninę siją veikiantis lenkimo momentas; M_s – nesustiprintos gelžbetoninės sijos laikomoji galia; k_a – koeficientas, kuris įvertina kompozitinio sluoksnio papildomo inkaravimo būdą ties atramomis. Kai kompozitinis sluoksnis papildomai neinkaruotas, $k_a = 1$; kai papildomai inkaruotas prispaustomis metalinėmis plokštelėmis ar įrengtas už atramų, $k_a = 0,9$; kai papildomai inkaruotas metalinėmis apkabomis, $k_a = 0,7$; kai papildomai inkaruotas anglies pluošto apkabomis, $k_a = 0,65$. Betono tamprumo modulis $E_c(t)$ [GPa], laiko tarpe gali būti apskaičiuojamas pagal modifikuotą senėjančios medžiagos modulio išraišką.

$$E_c(t) = \frac{E_c(t_0)}{1 + \chi \cdot \varphi_c(t)} \quad (2.48)$$

čia $E_c(t_0)$ – betono pradinis tamprumo modulis; koeficientas $\chi = 0,5$; $\varphi_c(t_0)$ – valkšnumo charakteristika, nustatoma pagal EC2 reikalavimus.

2.2. Gelžbetoninių sijų, sustiprintų anglies pluošto kompozitu, įlinkio skaičiavimas, veikiant ilgalaikiai apkrovai

Sijos įlinkio skaičiavimo formulės skirtos vientiso skerspjuvio elementams negali būti taikomos sluoksniuotam elementui. Sluoksnių pasislinkimas padidina sijų įlinkį. Esant ilgalaikiai apkrovai sluoksnių jungtyje pasireiškia šlyties valkšnumo deformacijos ir sijos įlinkio prieaugis padidėja. Šiam efektui įvertinti ankstesniame skyriuje išvestas parametras apibūdinantis sluoksnių jungties standumo pokytį, esant ilgalaikės apkrovos poveikiui. Todėl sustiprintos sijos įlinkiui skaičiuoti taikoma metodika paremta sudėtinių strypų teorijos pagrindu, kai vertinamas jungties standumo pokytis dėl ilgalaikės apkrovos poveikio.

Esant tolygiai išskirstytai apkrovai p sijos įlinkis apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\omega(t) = p \left(\frac{l^4}{32E_{eff}(t) \cdot I_{eff}(t)} + \frac{l^2}{4D(t)} \left(\frac{ch(0,5 \cdot \lambda(t) \cdot l) - 1}{\lambda(t)^2 \cdot ch(0,5 \cdot \lambda(t) \cdot l)} \right) \right). \quad (2.49)$$

Sijos vidurinės dalies įlinkis esant sutelktinėms apkrovoms (2.1 pav.) įvertinant ilgalaikės apkrovos poveikį skaičiuojamas pagal formulę:

$$\omega(t) = M_e \left(\frac{l^2}{8E_{eff}(t) \cdot I_{eff}(t)} + \frac{1}{D(t)} \left(\frac{ch(0,5 \cdot \lambda(t) \cdot l) - 1}{\lambda(t)^2 \cdot ch(0,5 \cdot \lambda(t) \cdot l)} \right) \right). \quad (2.50)$$

Čia $E_{eff}(t) \cdot I_{eff}(t)$ – efektyvusis vientiso skerspjuvio lenkiamasis standumas įvertinus jungties tarp sluoksnių pasislinkimą. Jeigu ilgalaikės apkrovos poveikis nevertinamas:

$$E_{eff} I_{eff} = (E_{c,eff} I_{c,eff} + E_f I_f) \cdot \frac{E_{c,eff} A_{c,eff} \cdot E_f A_f \cdot a^2}{E_{c,eff} A_{c,eff} + E_f A_f}. \quad (2.51)$$

Kai vertinamas ilgalaikės statinės apkrovos poveikis efektyvusis vientiso skerspjuvio standumas dėl šlyties valkšnumo deformacijų prieaugio:

$$E_{eff}(t) I_{eff}(t) = \gamma(t) \cdot E_{c,eff}(t) I_{c,eff}(t) \cdot \frac{E_{c,eff}(t) A_{c,eff}(t) \cdot E_f A_f}{E_{c,eff}(t) A_{c,eff}(t) + E_f A_f}. \quad (2.52)$$

Įvertinus jungties standumą apibūdinančio dydžio 2.36 išraišką ir įvedus papildomus pažymėjimus (2.54–2.57), sijos skerspjūvio standumas dėl šlyties valkšnumo deformacijų poveikio:

$$E_{eff}(t)I_{eff}(t) = \frac{B_1(t) + B_2(t) + B_3(t)}{B_4} \cdot \frac{E_{c,eff,t}^2}{(E_{c,eff,t} \cdot A_{c,eff,t} + E_f \cdot A_f)}. \quad (2.53)$$

Čia:

$$B_1(t) = \varphi_{c,t_0} \left(A_{c,eff,t} \cdot I_{c,eff,t} \left(E_{fe} \cdot A_{fe} \cdot I_{c,eff,t_0} + a^2 \cdot E_{fe} \cdot A_{fe} \cdot A_{c,eff,t_0} + E_{c,eff,t_0} A_{c,eff,t_0} I_{c,eff,t_0} \right) \right); \quad (2.54)$$

$$B_2(t) = \varphi_{c,t} \left(A_{c,eff,t_0} \cdot I_{c,eff,t_0} \left(E_{fe} \cdot A_{fe} \cdot I_{c,eff,t} + a^2 \cdot E_{fe} \cdot A_{fe} \cdot A_{c,eff,t} + E_{c,eff,t_0} A_{c,eff,t} I_{c,eff,t} \right) \right); \quad (2.55)$$

$$B_3(t) = 2 \left(A_{c,eff,t_0} \cdot I_{c,eff,t_0} \left(E_{fe} \cdot A_{fe} \cdot I_{c,eff,t} + a^2 \cdot E_{fe} \cdot A_{fe} \cdot A_{c,eff,t} + E_{c,eff,t_0} A_{c,eff,t} I_{c,eff,t} \right) \right); \quad (2.56)$$

$$B_4 = 2E_{c,eff,t_0} \cdot A_{c,eff,t_0} \cdot I_{c,eff,t_0}. \quad (2.57)$$

Jeigu sija apkraunama daugiau negu po 28 betono kietėjimo parų, tokiu atveju skerspjūvio standumo išraiška

$$E_{eff}(t)I_{eff}(t) = \frac{B_{1,t}(t) + B_{2,t}(t)}{B_3} \cdot \frac{E_{c,eff,t}^2}{(E_{c,eff,t} \cdot A_{c,eff,t} + E_f \cdot A_f)}. \quad (2.58)$$

Čia:

$$B_{1,t}(t) = k_1 \left(A_{c,eff,t} \cdot I_{c,eff,t} \left(E_{fe} \cdot A_{fe} \cdot I_{c,eff,t_0} + a^2 \cdot E_{fe} \cdot A_{fe} \cdot A_{c,eff,t_0} + E_{c,eff,t_0} A_{c,eff,t_0} I_{c,eff,t_0} \right) \right); \quad (2.59)$$

$$B_{2,t}(t) = k_2 \left(A_{c,eff,t} \cdot I_{c,eff,t} \left(E_{fe} \cdot A_{fe} \cdot I_{c,eff,t} + a^2 \cdot E_{fe} \cdot A_{fe} \cdot A_{c,eff,t} + E_{c,eff,t_0} A_{c,eff,t} I_{c,eff,t} \right) \right); \quad (2.60)$$

$$B_3 = E_{c,eff,t_0} \cdot A_{c,eff,t_0} \cdot I_{c,eff,t_0}. \quad (2.61)$$

Dydis

$$\frac{1}{D(t)} = \frac{1}{E_{c,eff}(t)I_{c,eff}(t)} - \frac{1}{E_{eff}(t)I_{eff}(t)}. \quad (2.62)$$

Vertinant sijos lenkiamąjį standumą atsižvelgiama į sijos tempiamos zonos supleišėjusius ruožus ir anglies pluošto šlyjamą tempiamą ruožą kompozitinio sluoksnio ir strypinės plieninės armatūros lygyje. Įvertinus ilgalaikės apkrovos įtaką, efektyvusis skerspjuvio inercijos momentas dėl tempiamos zonos pleišėjimo ir betono su kompozitu jungties standumo sumažėjimo:

$$I_{c,eff} = \frac{A'_{crc}}{A'_f} I_{gros} + \frac{A_{crc}}{A'_f} I_{crc} + \frac{A_{s-f}}{A'_f} I_s. \quad (2.63)$$

Čia santykiai

$$\frac{A'_{crc}}{A'_f} = \frac{\pi \cdot R_{crc}^2}{\pi \cdot R_f^2} \cdot \frac{E_f \cdot A_f}{E_c \cdot A_c} = \frac{R_{crc}^2}{R_f^2} \cdot \frac{E_f \cdot A_f}{E_c \cdot A_c} \rightarrow \frac{M_{crc}^2}{M_f^2} \cdot \beta_2; \quad (2.64)$$

$$\begin{aligned} \frac{A_{crc}}{A'_f} &= \frac{\frac{\pi \cdot R_s^2 \cdot E_s \cdot A_s}{E_s \cdot A_s} - \frac{\pi \cdot R_{crc}^2 \cdot E_f \cdot A_f}{E_c \cdot A_c}}{\pi \cdot R_f^2} = \\ &= \left(\frac{\pi \cdot R_s^2 \cdot E_f \cdot A_f \cdot E_c \cdot A_c}{A_s \cdot E_s \cdot E_c \cdot A_c} - \frac{\pi \cdot R_{crc}^2 \cdot E_f \cdot A_f \cdot E_s \cdot A_s}{E_s \cdot A_s \cdot E_c \cdot A_c} \right) \frac{1}{\pi \cdot R_f^2} \\ &= \frac{R_s^2}{R_f^2} \cdot \beta_1 - \frac{R_{crc}^2}{R_f^2} \beta_2 \rightarrow \frac{M_s^2}{M_f^2} \cdot \beta_1 - \frac{M_{crc}^2}{M_f^2} \cdot \beta_2; \end{aligned} \quad (2.65)$$

$$\frac{A_{s-f}}{A'_f} = \frac{\pi \cdot R_f^2 - \pi \cdot R_s^2 \cdot \frac{E_f \cdot A_f}{E_s \cdot A_s}}{\pi \cdot R_f^2} = 1 - \frac{R_s^2}{R_f^2} \cdot \frac{A_f \cdot E_f}{A_s \cdot E_s} \rightarrow 1 - \frac{M_s^2}{M_f^2} \cdot \beta_1. \quad (2.66)$$

Koeficientai

$$\beta_1 = \frac{E_f \cdot A_f}{E_s \cdot A_{s1}}; \quad (2.67)$$

$$\beta_2 = \frac{E_f \cdot A_f}{E_c(t) \cdot A_c(t)}. \quad (2.68)$$

Ivertinus formules (2.63–2.66) ir ilgalaikės apkrovos įtaką, efektyvūs skerspjūvio inercijos momentas dėl tempiamos zonos pleišėjimo ir betono su kompozitu jungties standumo sumažėjimo:

$$I_{c,eff}(t) = \left(\frac{M_{crc}}{M_e} \right)^3 \cdot \beta_2(t) \cdot I_{gross}(t) + \left(\frac{M_{r,s}}{M_e} \right)^3 \cdot \beta_1 \cdot I_{crc}(t) - \left(\frac{M_{crc}}{M_e} \right)^3 \cdot \beta_2(t) \cdot I_{crc}(t) + I_s(t) - \left(\frac{M_{r,s}}{M_e} \right)^3 \beta_1 \cdot I_s(t). \quad (2.69)$$

Čia M_{crc} – statmenųjų plyšių atsiradimo momentas; $M_{r,s}$ – nesustiprintos gelžbetoninės sijos atlaikomas lenkimo momentas; M_e – veikiantis lenkimo momentas; β_1 – santykinis koeficientas: $\beta_1 = \frac{E_{fe} \cdot A_{fe}}{E_s \cdot A_{s1}}$; $\beta_2(t)$ – santykinis koeficientas: $\beta_2(t) = \frac{A_f \cdot E_f}{x_{eff}(t) \cdot b_s \cdot E_c(t)}$. Inercijos momentas skerspjūvio daliai be plyšių (2.5 pav. pjūvis A-A) nustatomas pagal formulę:

$$I_{gross}(t) = \frac{b_s \cdot h^3}{12} + b_s \cdot h \left(\frac{h}{2} - y_c(t) \right)^2 + \alpha_{s2}(t) A_{s2} (h - y_c(t) - a_{s2})^2 + \alpha_{s1}(t) A_{s1} (y_c(t) - a_{s1})^2 + \alpha_f(t) \cdot A_f \left(y_c(t) - \frac{t_f}{2} \right)^2. \quad (2.70)$$

Čia charakteringi dydžiai: $\alpha_{s1}(t) = \alpha_{s2}(t) = \frac{E_s}{E_c(t)}$; $\alpha_f(t) = \frac{E_f}{E_c(t)}$. Kiti žymėjimai 2.5 paveiksle.

Inercijos momentas skerspjūvio daliai su plyšiais (2.5 pav. pjūvis C-C):

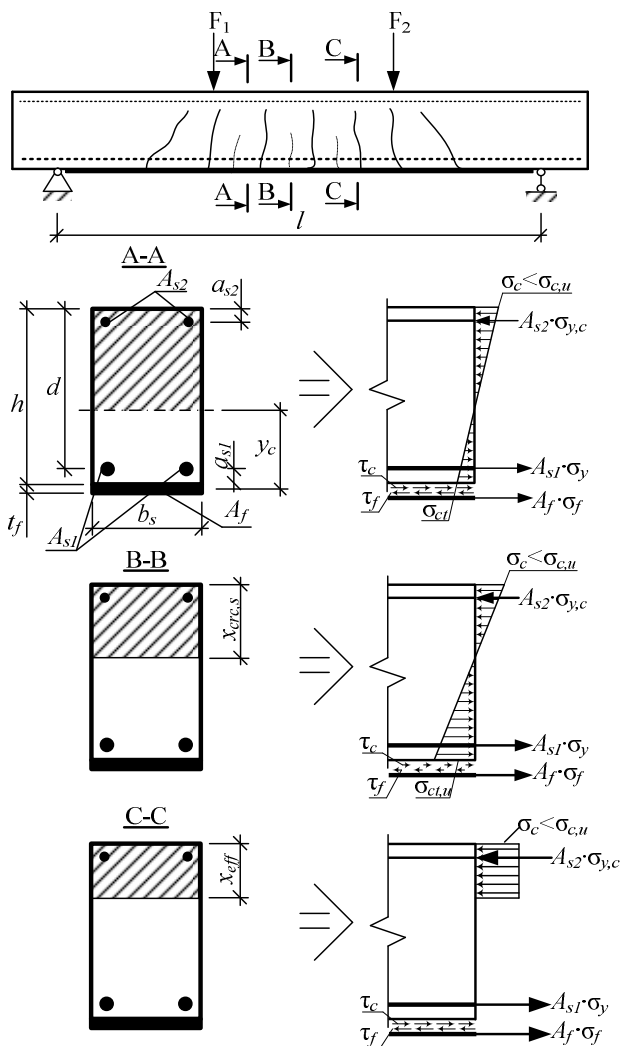
$$I_{crc}(t) = \frac{b_s \cdot x_{eff}(t)^3}{3} + \alpha_{s2}(t) \cdot A_{s2} \cdot (x_{eff}(t) - a_{s2})^2. \quad (2.71)$$

Inercijos momentas skerspjūvio daliai, kurioje atsiranda naujas plyšys (2.5 pav. pjūvis B-B):

$$I_s(t) = \frac{b_s \cdot x_{crc,s}^3}{3} + \alpha_{s2}(t) \cdot A_{s2} \cdot (x_{crc,s} - a_{s2})^2. \quad (2.72)$$

Gniuždomosios zonos aukštis plyšio pjūvyje (2.5 pav. pjūvis C-C) $x_{eff}(t)$ nustatomas pagal formulę:

$$x_{eff}(t) = d \left(\sqrt{\mu(t)^2 + \frac{\mu(t) \cdot h}{d}} - \mu(t) \right). \quad (2.73)$$



2.5 pav. Sijos supleišėjusio ruožo vertinimas

Fig. 2.5. Evaluation of cracked and non-cracked beam sections

Parametrai:

$$\mu(t) = \mu_{s1} \cdot \alpha_{s1}(t) + \mu_{s2} \alpha_{s2}(t) + \mu_f \alpha_f(t). \quad (2.74)$$

$$\mu(t) \cdot h = 2 \left(\mu_{s1} \cdot \alpha_{s1}(t) \cdot d + \mu_{s2} \cdot \alpha_{s2}(t) \cdot d + \mu_f \cdot \alpha_f(t) \cdot (h - t_f/2) \right). \quad (2.75)$$

$$\text{Kur: } \mu_{s1} = \frac{A_{s1}}{b_s \cdot d}; \mu_{s2} = \frac{A_{s2}}{b_s \cdot d}; \mu_f = \frac{A_f}{b_s \cdot (h + t_f/2)}.$$

Gniuždomosios zonos aukštis plyšio atsiradimo vietoje (2.5 pav. pjūvis B-B), sijos ruože tarp statmenųjų plyšių nustatomas pagal formulę:

$$x_{crc,s} = \alpha_1 (0,026 \cdot x_{crc} + 0,0236) + 0,0001 \frac{E_c(t)}{G_{c,eff}(t)}, [\text{m}]. \quad (2.76)$$

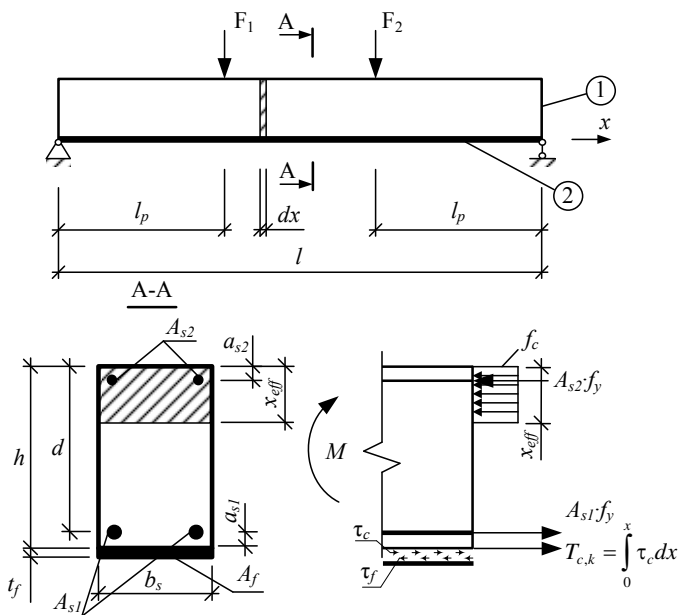
čia koeficientas α_1 – įvertina tempiamos strypinės plieninės armatūros įtempių lygį. Kai sustiprintos sijos veikiantis lenkimo momentas yra didesnis negu analogiškos nesustiprintos sijos, tai plieninė armatūra pasiekusi takumo ribą ir $\alpha_1 = 0,2$, priešingu atveju $\alpha_1 = 1$. Gniuždomos zonos aukštis x_{crc} statmenojo plyšio atsiradimo vietoje, nustatomas priartėjimo keliu pagal sąlygą:

$$\alpha_{s1} \cdot S_{s1} - \alpha_{s2} \cdot S_{s2} - S_{cc} = (h - x_{crc}) (A_f + A_{ct}). \quad (2.77)$$

2.3. Gelžbetoninių elementų su išorine anglies pluošto armatūra laikomosios galios skaičiavimas po ilgalaikės apkrovos poveikio

Sluoksniuotų konstrukcijų sluoksnių jungties standumo mažėjimas esant ilgalaikės apkrovos poveikiui įtakoja sijų laikomąją galią. Sumažėjęs jungties standumas gali pakeisti sijos suirimo pobūdį. Atsižvelgiant į tai, būtina įvertinti ilgalaikės apkrovos poveikį sijos laikomajai galiai dėl šlyties valkšnumo deformacijų sukiamo jungties laikomosios galios mažėjimo.

Sijos apkrovimo schema ir įrašų pasiskirstymas skerspjuvyje pateiktas 2.6 paveiksle.



2.6 pav. Sustiprintos sijos apkrovimo schema ir skerspjūvyje veikiančios įrašos

Fig. 2.6. Evaluation of internal forces in the section of a strengthened beam

Sustiprintos sijos atlaikomasis momentas vertinant gelžbetoninio elemento atlaikomąjį lenkimo momentą ir jungties šlyties jėgos sukeliama momentą:

$$M_R = M_{r,c} + T_{c,k} \cdot a. \quad (2.78)$$

Čia $M_{r,c}$ – gelžbetoninio elemento atlaikomas lenkimo momentas; $T_{c,k}$ – šlyties jėga betono ir anglies pluošto jungtyje.

Betono ir anglies pluošto kompozito jungties standumas mažėja dėl besivystančių šlyties valkšniųjų deformacijų. Ilgalaikis šlyties įtempių poveikis sukelia mikropleišėjimo procesus betono ir kompozito jungtyje, todėl atitinkamai išsivysto didesni plyšiai ir įvyksta kompozitinio sluoksnio pasislinkimas. Veikiant ilgalaikiai statiniai apkrovai kompozitinio sluoksnio pasislinkimas stiprinamojo elemento atžvilgiu:

$$u_l(t) = \frac{\tau_{c,k}(t)}{\xi_k(t)} = \frac{T'_{c,k}(t)}{\xi_k(t)}. \quad (2.79)$$

Čia $\tau_{c,k}(t)$ – jungties šlyties įtempiai. Jeigu standumas ξ_k begalinis, tai kompozitinio sluoksnio poslinkis sustiprinto elemento atžvilgiu lygus nuliui, bet kai

sluoksniai tarpusavyje suklijuoti ir vertinamas jungties standumas šis dydis apskaičiuojamas pagal (2.46) formulę.

Įvertinus ilgalaikį apkrovos poveikį šlyties jėga sluoksniuotųjų konstrukcijų sluoksnių jungtyje:

$$T_{c,k}(t) = \frac{F \cdot a}{\gamma(t) \sum EI} \left[\frac{sh\lambda(t) \cdot l_p \cdot ch\lambda(t) \cdot (0,5l - x)}{\lambda(t) \cdot ch(\lambda(t) \cdot 0,5l)} - l_p \right]. \quad (2.80)$$

Čia $\gamma(t)$ – parametras apibūdinantis jungties standumą esant ilgalaikės apkrovos poveikiui ir vystantis šlyties valkšnumo deformacijoms nustatomas pagal 2.36 2.37 ir 2.43 formules.

Gelžbetoninio elemento lenkimo momento išraiška:

$$M_{r,c} = f_c \cdot b_s \cdot x_{eff} (d - 0,5 \cdot x_{eff}) + f_{sc} \cdot A_{s2} (d - a_{s2}), \quad (2.81)$$

čia f_c – betono gniuždomasis stipris; f_{sc} – gniuždomos armatūros stipris.

2.4 Antrojo skyriaus išvados

1. Šiame darbe pritaikius sudėtinių strypų teoriją įvertintas kompozitinio sluoksnio pasislinkimas dėl šlyties valkšniųjų deformacijų prieaugio betono ir kompozito jungtyje. Eksperimentiniai tyrimai rodo, kad anglies pluošto kompozitinio sluoksnio pasislinkimas padidina sijų įlinkį. Šlyties valkšniųjų deformacijų prieaugis atitinkamai sukelia papildomą kompozitinio sluoksnio pasislinkimą. Būtent pateikta metodika atsižvelgia į minėtą šlyties valkšnumo deformacijų įtaką.

2. Darbe pasiūlyta lenkiamų gelžbetoninių konstrukcijų sustiprintų anglies pluošto kompozitu įlinkių skaičiavimo metodika leidžianti įvertinti gelžbetoninio ir kompozitinio elemento jungties standumą veikiant ilgalaikiai apkrovai. Pasiūlyta metodika leidžia apskaičiuoti jungties standumą atsižvelgiant į jungties šlyties valkšnumo deformacijas. Patikslinta sustiprintos sijos lenkiamojo standumo išraiška atsižvelgiant į supleišėjusius tempiamus sijos ruožus.

3. Pasiūlyta sustiprintos gelžbetoninės sijos laikomosios galios skaičiavimo metodika naujai įvertinanti sluoksnių jungties standumą. Vertinant ilgalaikį apkrovos poveikį sustiprintų sijų laikomajai galiai pasiūlyta įvertinti šlyties valkšniųjų deformacijų įtaką, kas sumažino sijų laikomąją galią.

Anglies pluošto kompozitu sustiprintų gelžbetoninių sijų eksperimentiniai tyrimai

Sustiprintų anglies pluošto kompozitu gelžbetoninių sijų elgsenai ištirti atliktas eksperimentinis tyrimas. Dalis eksperimentinio tyrimo rezultatų paskelbta straipsniuose (Daugevičius 2009; Valivonis, Skuturna, Daugevičius 2010; Marčiukaitis, Daugevičius, Valivonis 2010.).

3.1. Medžiagos

Eksperimentiniams bandymams atlikti, buvo pagamintos 33 gelžbetoninės sijos. Bandiniai buvo betonuojami trim etapais. Kiekvieno betonavimo metu buvo stengiamasi išlaikyti vienodą betono sudėtį, kad būtų užtikrintos vienodos betono mechaninės savybės. Betono mišinio sudėtis vienam kubiniam metrui pateikiama 3.1 lentelėje.

3.1 lentelė. Betono mišinių sudėtys**Table 3.1.** Components of concrete admixture

Medžiagos	I serija	II serija	III serija
Cementas	410	408	408
Vanduo	185	186	193,7
Skalda	950	958	958
Smėlis	760	765	765
V/C	0,451	0,456	0,475
Kūgio nuosėdis (cm)	–	11	11

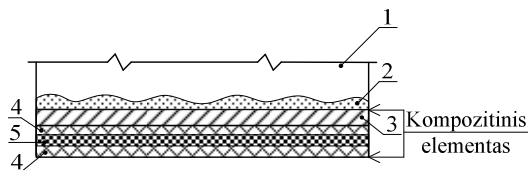
Sijų tempiamosios ir gniuždomosios skerspjūvio zonos armuotos skirtinga strypine plienine armatūra. Pirmosios serijos sijos pagal armavimą plienine armatūra suskirstytos į dvi grupes, kurių viena tempiamojoje zonoje armuota dviem Ø6 armatūros strypais, o kita dviem Ø14 strypais. Gniuždomojoje skerspjūvio zonoje abi sijų grupės armuotos dviem Ø6 plieninės armatūros strypais. Antrosios ir trečiosios serijų sijos tempiamojoje skerspjūvio zonoje armuotos dviem Ø12 armatūros strypais, o gniuždomojoje zonoje dviem Ø8 armatūros strypais. Visų sijų plieninės strypinės armatūros mechaninės charakteristikos pateiktos 3.2 lentelėje.

3.2 lentelė. Strypinės plieninės armatūros charakteristikos**Table. 3.2.** Characteristics of steel bars

	Diametras, mm	$f_{s,y}$, MPa	$f_{s,u}$, MPa	E_s , GPa	A_s , cm ²
I serija	Ø6	358	460	205	0,6784
	Ø14	358	460	205	3,08
II serija ir III serija	Ø12	318	456	204,9	2,26
	Ø8	420	525,6	204,1	1,01

Anglies pluošto kompozito klijavimas atliktas pagal „Mapei“ firmos pateikiamas rekomendacijas. Kompozitas klijuojamas esant 100 parų betono amžiui. Tai buvo atlikta norint sumažinti betono traukumo įtaką kompozito darbui. Anglies pluoštu stiprinimo sistemų gamintojos „Mapei“ pateikiamos klijavimo medžiagos susideda iš: epoksidinio glaisto, epoksidinių klijų ir anglies pluošto juos-

tos. Šių komponentų junginys sudaro kompozitinį anglies pluošto elementą (3.1 pav).



3.1 pav. Betono ir kompozitinio sluoksnio jungtis gelžbetoninės sijos skerspjūvio apačioje. 1 – betoninis sluoksnis; 2 – impregnuoto epoksidiniu gruntu betono sluoksnis; 3 – epoksidinio glaisto sluoksnis; 4 – epoksidiniai klijai; 5 – anglies pluoštas

Fig. 3.1. Joint of concrete and carbon fiber composite layer. 1 – concrete layer; 2 – impregnated concrete layer with epoxy primer; 3 – layer of epoxy lute; 4 – epoxy glue; 5 – tape of carbon fibers

Epoksidinis glaistas Mapewrap 11 sudarytas iš dviejų komponentų: A – epoksidinio dervos mišinio su smulkiu smėliu, B – kietiklio. Komponentų maišymo proporcijos 3:1. Mišinys maišomas iki vienodos masės susiformavimo. Mišinio tinkamumo naudojimas 40 minučių esant 23 °C temperatūrai.

Epoksidiniai klijai Mapewrap 31 irgi susideda iš dviejų komponentų A ir B (epoksidinės dervos ir kietiklio). Mišinio sudedamųjų dalių maišymo proporcijos 4:1. Mišinio tinkamumo naudojimas 40 minučių esant 23 °C temperatūrai.

Kompozitinio elemento armavimui panaudota anglies pluošto juosta MapeWrap C UNI-AX. Juostos plotis 100 mm. Anglies pluošto skaidulų skerspjūvio plotas pagal gamintojo nurodymą 0,167 cm².

Kompozito sudedamųjų dalių: epoksidinio glaisto, epoksidinių klijų ir anglies pluošto mechaninės savybės pagal gamintojo pateikiamus duomenis pateikti 3.3 lentelėje, kur ρ – tankis, f_t – tempiamasis stipris, E_t – tamprumo modulis tempiant, A_f – anglies pluošto juostos skerspjūvio plotas.

3.3 lentelė. Gamintojo pateikiamos charakteristikos kompozito medžiagoms

Table 3.3. Characteristics of carbon fibre composite materials provided by manufacturer

	ρ , kg/m ³	f_t , MPa	E_t , GPa	A_f , cm ²
Mapewrap 11	1,55	30	4	–
Mapewrap31	1,06	30	3,8	–
Mape Wrap C UNI-AX	1,79	4800	230	0,167

Eksperimentiniais bandymais nustatytas kompozito medžiagų charakteristikos pateikiamos 3.4 lentelėje.

3.4 lentelė. Eksperimentais nustatytos kompozito medžiagų charakteristikos
Table 3.4. Characteristics of carbon fibre composite materials determined by experiment

	$f_{t,exp}$, MPa	$E_{t,exp}$, GPa	$A_{f,exp}$, cm ²
Mapewrap 11	16,4	1,5	–
Mapewrap31	32,6	1,8	–
Mape Wrap C UNI-AX	1988	230	0,1837

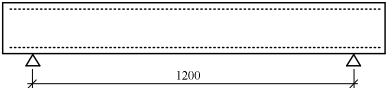
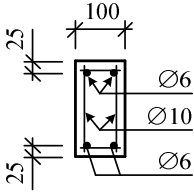
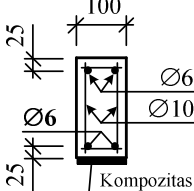
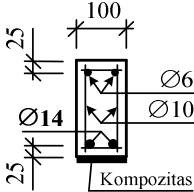
3.2. Bandiniai ir bandymo metodika

Bandymų metu buvo stiprinamos gelžbetoninės sijos armuotos erdviniais plieniniais strypynais. Projektinis sijų dydis 100×200×1500. Bandymams pagamintas gelžbetoninės sijas galima suskirstyti pagal armavimo procentą plienine strypine armatūra tempiamoje skerspjūvio zonoje, pagal išorinės kompozitinės armatūros papildomą inkaravimo būdą ir pagal stiprinimo charakterį. Pagal armavimą plienine strypine armatūra sijos skirstomos į silpnai armuotas $\mu_s = 0,388\%$, ir vidutiniškai armuotas $\mu_s = 1,29\%$, $\mu_s = 1,76\%$, kurios tempiamoje zonoje armuotos atitinkamai po du Ø12 arba Ø14 plieninės armatūros strypus.

Pirmos serijos sijos tempiamoje skerspjūvio zonoje armuotos po du plieninės armatūros strypus diametru Ø6 arba Ø14. Išorinis tempiamas sijų sluoksnis armuotas anglies pluošto kompozitu. Anglies pluošto inkaravimas užtikrinamas priklijuojant jį per visą sijos ilgį (užleidžiant už atramų). Šios serijos sijų šifrai ir skerspjūvio charakteristikos pateiktos 3.5 lentelėje. Gelžbetoninės sijos I.B6.1, I.B6.2_i ir I.B14.1 anglies pluošto kompozitu nestiprintos. Sijos, kurių šifre yra indeksas t buvo paveiktos ilgalaikė statine apkrova.

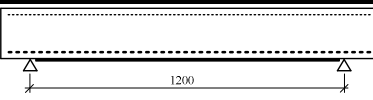
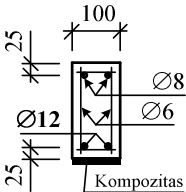
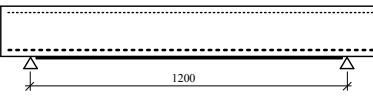
Antros serijos sijų betonavimo metu pagaminta 10 gelžbetoninių sijų. Sijos tempiamoje ir gniuždomoje skerspjūvio zonoje armuotos 2×Ø12 ir 2×Ø8 strypine plienine armatūra. Anglies pluošto kompozito armatūra priklijuojama iki sijos atraminių mazgų. Išorinio anglies pluošto kompozitinio sluoksnio inkaravimas užtikrinamas kompozito klijų jungtimi su betonu. Papildomi išorinės armatūros inkaravimo metodai nenaudoti.

3.5 lentelė. Pirmos serijos sijų šifrai ir charakteristikos**Table 3.5.** Characteristics of first series beams

Sijos šifras	Sijos skerspjūvis $b \times h$	Sijos schema	Sijos skerspjūvis
I.B6.1	100×200		
I.B6.2 _t	100×200		
I.B6.3C	100×200		
I.B6.4C	100×200		
I.B6.5C _t	100×199		
I.B6.6C _t	100×200		
I.B14.1	100×200		
I.B14.2C	100×200		
I.B14.3C	100×200		
I.B14.4C _t	100×200		
I.B14.5C _t	103×198		

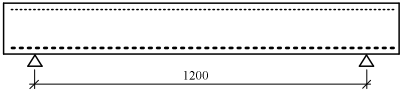
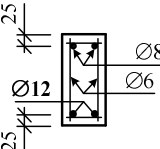
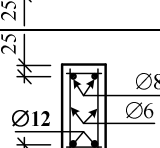
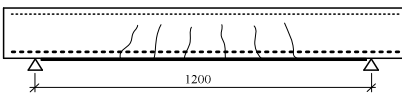
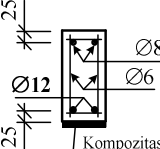
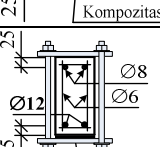
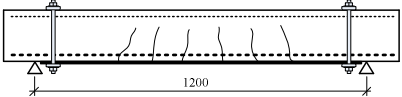
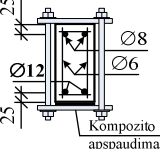
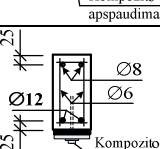
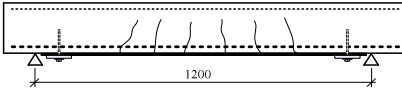
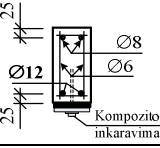
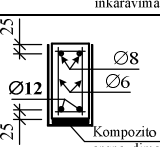
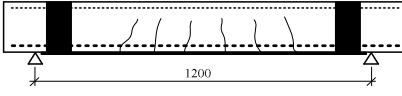
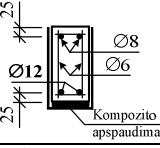
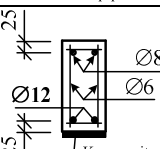
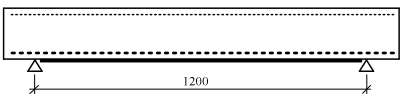
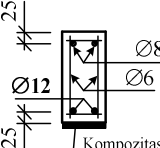
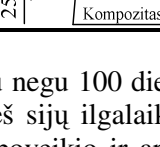
Antrojo betonavimo metu visos gelžbetoninės sijos sustiprintos anglies pluošto kompozitu. Sijos II.B12.9SC_t ir II.B12.10SC_t sustiprintos veikiant lenkimo momentui, kuris atitiko 56 % sustiprintų kontrolinių sijų laikomosios galios. Likusios sijos sustiprintos neveikiant išoriniai apkrovai. Šios serijos sijų armavimo charakteristikos pateikiamos 3.6 lentelėje.

3.6 lentelė. Antros serijos sijų šifrai ir charakteristikos**Table 3.6.** Characteristics of second series beams

Sijos šifras	Sijos skerspjūvis $b \times h$	Sijos armavimo schema	Sijos skerspjūvis	
II.B12.1C	100×203			
II.B12.2C	100×200			
II.B12.3C	100×200			
II.B12.4C _t	100×204			
II.B12.5C _t	100×201			
II.B12.6C _t	100×200			
II.B12.7C _t	100×202			
II.B12.8C _t	100×203			
II.B12.9SC _t	100×199			
II.B12.10SC _t	100×203			

Trečios serijos sijų betonavimo metu pagaminta 14 gelžbetoninių sijų. Sijos tempiamoje ir gniuždomoje skerspjūvio zonoje atitinkamai armuotos $2 \times \varnothing 12$ ir $2 \times \varnothing 8$ strypine plienine armatūra. Aštuonios nesustiprintos sijos apkrautos ilgalaikė statine apkrova. Veikiamos išorinės apkrovos po 50 parų ilgalaikės apkrovos poveikio, sijos tempiamoje zonoje buvo stiprinamos anglies pluošto kompozitu. Stiprinimas atliktas esant skirtingiems ilgalaikės apkrovos intensyvumams. Sijos III.B12.3SC_t, III.B12.4SC_t, III.B12.5SC_t, III.B12.6SC_t sustiprintos anglies pluošto kompozitu veikiant lenkimo momentui, kuris atitiko 60 % nesustiprintų kontrolinių sijų III.B12.1, III.B12.2 laikomosios galios. Sijos III.B12.7SC_t, II.B12.8SC_t, III.B12.9SC_t, III.B12.10SC_t sustiprintos veikiant lenkimo momentui, kuris atitiko 52 % nesustiprintų kontrolinių sijų laikomosios galios. Sijos III.B12.11C_t, III.B12.12C_t anglies pluoštu buvo stiprinamos neveikiant išoriniai apkrovai. Sijose III.B12.5SC_t, III.B12.6SC_t anglies pluošto kompozitas atraminėse zonose buvo papildomai inkaruotas plieninėmis apkabomis. Sijose II.B12.7SC_t, III.B12.8SC_t anglies pluoštas atraminėse zonose buvo papildomai inkaruojamas prispaustomis plieninėmis 100×100 mm. Plokštelės inkaruojamos į sijos betoną. Sijų III.B12.9SC_t, III.B12.10SC_t anglies pluošto kompozitas atraminėse zonose papildomai inkaruotas anglies pluošto apkabomis. Sijų II.B12.3SC_t, III.B12.4SC_t, III.B12.11SC_t, III.B12.12SC_t kompozitinis sluoksnis papildomai neinkaruotas. Visų trečios serijos sijų šifrai ir anglies pluošto kompozitinio sluoksnio papildomi inkaravimo metodai pateikiami 3.7 lentelėje.

3.7 lentelė. Trečios serijos sijų šifrai ir charakteristikos**Table 3.7.** Characteristics of third series beams

Sijos šifras	Sijos skerspjūvis $b \times h$	Sijos armavimo schema	Sijos skerspjūvis
III.B12.1	104×198		
III.B12.2	105×201		
III.B12.3SC _t	100×200		
III.B12.4SC _t	100×198		
III.B12.5SC _t	101×199		
III.B12.6SC _t	99×198		
III.B12.7SC _t	100×198		
III.B12.8SC _t	98×195		
III.B12.9SC _t	100×201		
III.B12.10SC _t	100×199		
III.B12.11C _t	102×199		
III.B12.12C _t	100×197		

Kadangi kompozitinis sluoksnis formuojamas praėjus daugiau negu 100 dienų laikotarpiui, tai betono mechaninės savybės nustatomos prieš sijų ilgalaikį apkrovimo laikotarpį. Sijas nukraunant po ilgalaikės apkrovos poveikio ir apkraunant iki suirimo vėl nustatomos betono mechaninės savybės. Betono gniuždomasis ir tempiamasis stipriai, bei tamprumo modulis prieš ir po ilgalaikio bandymo pateikti 3.8 lentelėje.

3.8 lentelė. Betono mechaninės savybės**Table. 3.8.** Concrete strength of a separate concrete batch

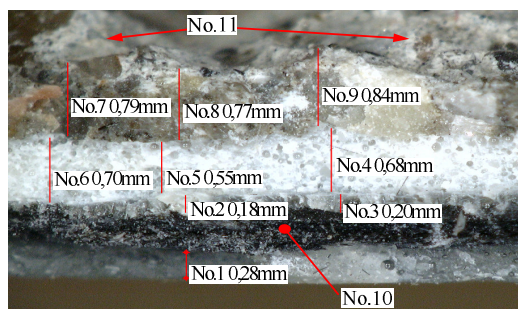
	$f_{c,t0}$, MPa	$f_{ct,t0}$, MPa	$E_{c,t0}$, GPa	$f_{c,t1}$, MPa	$f_{ct,t1}$, MPa	$E_{c,t1}$, GPa
I serija	38,3	4,06	34,1	37,0	3,56	34,53
II serija	34	3,8	32,27	32,63	3,68	32,9
III serija	30,1	3,46	32,38	–	–	–

Stiprinant sijas anglies pluošto kompozitu galima išskirti sekančius etapus:

1. Sijos paviršiaus paruošimas.
2. Paviršiaus išlyginimas.
3. Anglies pluošto klijavimas arba kompozito formavimas.

Sijos paviršius, ant kurio formuojamas kompozitinis sluoksnis, privalo gerai sukibti su kompozitu. Todėl nuo sijos paviršiaus metaliniais šepčiais pašalinamas cementinis sluoksnis iki užpildų paviršiaus. Tokiu būdu atidengiamos stambesnės poros susidariusios betono tankinimo metu. Susikaupusios dulkės susiurbiamos aukšto slėgio siurbliu. Valant betono paviršių, dėl mechaninio poveikio, paviršinių užpildų sukibimas su vidiniais užpildais susilpnėja. Todėl anglies pluošto klijavimo sistemų gamintojai rekomenduoja sustiprinti paviršiaus užpildų sukibimą epoksidinio grunto „Primer 1” pagalba (3.2 pav.).

**3.2 pav.** Sijos tempiamo paviršiaus padengimas epoksidiniu gruntu**Fig. 3.2.** Epoxy primer spread on the tensioned beam surface



3.3 pav. Kompozitinio sluoksnio jungtis su betonu. 1 – epoksidiniai klijai; 2; 3 – epoksidiniai klijai susimaišę su epoksidiniu glaistu; 4; 5; 6 – epoksidinis glaistas; 7; 8; 9 – impregnuotas betonas; 10 – anglies pluoštas; 11 – cementinio akmens ruožai ant impregnuoto betono paviršiaus

Fig. 3.3. Joint of modified concrete and carbon fiber composite layer. 1 – epoxy glue; 2; 3 – epoxy glue mixed with epoxy lute; 4; 5; 6 – epoxy lute; 7; 8; 9 – layer of modified concrete; 10 – layer of carbon fiber; 11 hydrated cement on modified concrete layer

Gruntas įsigeria į betoną ir tokiu būdu pakeičia betono mechanines savybes, sustiprina betono ir anglies pluošto jungtį, kadangi sijos irimo metu kompozitas atplysdavo su betonu, ir matydavosi gruntu impregnuotas betono sluoksnis (3.3 pav.).

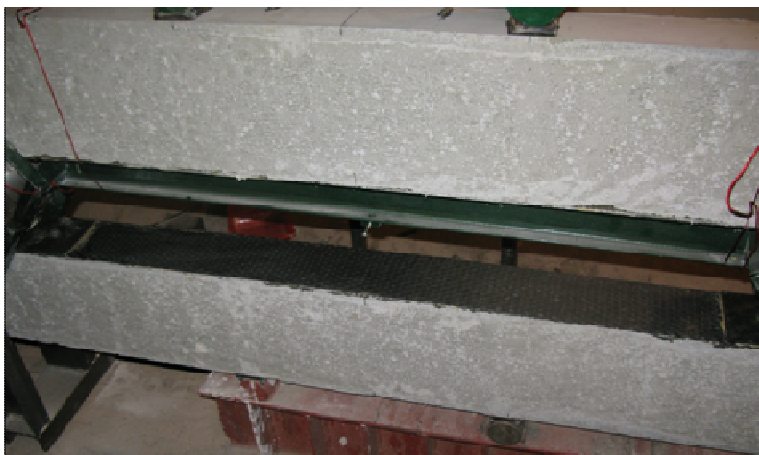
Impregnuotas betono paviršius išlyginamas epoksidiniu glaistu „Mapewrap 11“ (3.4 pav.). Epoksidinis glaisto sluoksnis užtikrina tolygų anglies pluošto juostos prigludimą prie betono paviršiaus, išvengiant juostos įdubimo ties didesėmis poromis.



3.4 pav. Tempiamo paviršiaus išlyginimas epoksidiniu glaistu „Mapewrap 11“

Fig. 3.4. Beam surface coated with epoxy lute „Mapewrap 11“

Sekančiame etape priklijuojamas anglies pluoštas (3.5 pav.). Klijavimo metu pastebėta, kad anglies pluošto juosta permirkdavo klijais, todėl apatinis klijų sluoksnis per anglies pluošto storį sukibdavo su viršutinių klijų sluoksniu ir suformuodavo monolitinį kompozitą.



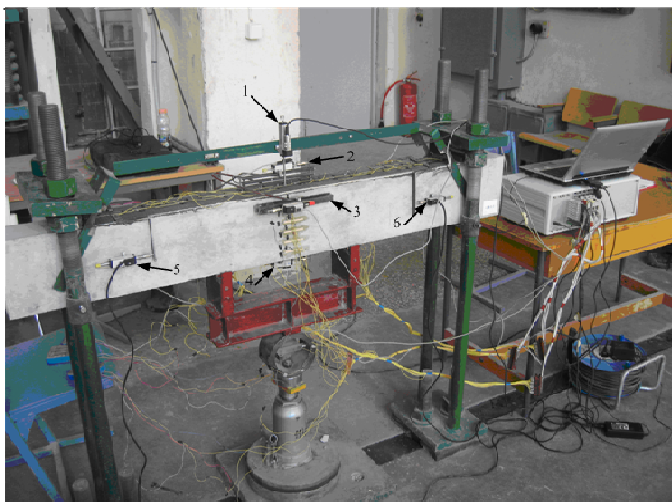
3.5 pav. Sijos išorinės anglies pluošto armatūros kompozitas ir inkaravimas

Fig. 3.5. Carbon fibre composite layer anchored with epoxy glue and additionally anchored with pressed steel plates

Kontrolinių sijų I.B6.1, I.B6.3C, I.B6.4C, I.B14.1, I.B14.2C, I.B14.3C, II.B12.1C, II.B12.2C, III.B12.1, III.B12.2 laikomoji galia nustatyta trumpalaikė statinė apkrova prieš apkraunant sijas ilgalaikė statinė apkrova.

Visos sijos buvo apkrautos dviem sutelktomis jėgomis. Kontrolinių sijų bandymo bendras vaizdas parodytas (3.6 pav.), kuriame nurodytas deformacijų ir poslinkių prietaisų išdėstymas.

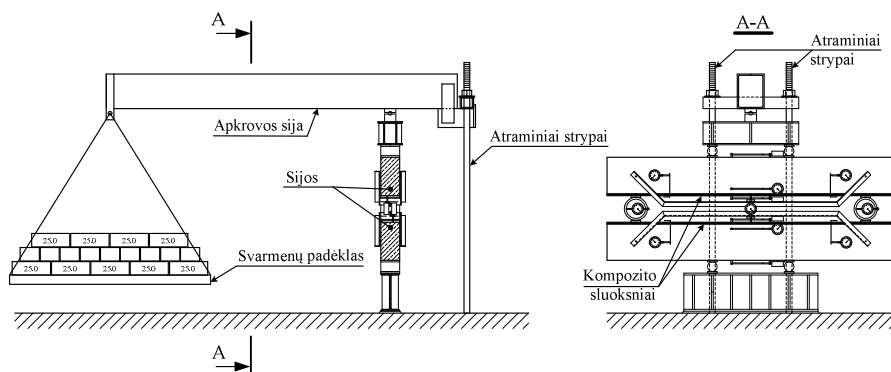
Atliekant sijų bandymus ilgalaikė statinė apkrova, sijos apkraunamos poromis (3.7 pav.). Sluoksnių deformacijų ir sijos įlinkio matavimo prietaisų išdėstymas esant ilgalaikės apkrovos poveikiui pateiktas 3.8 paveiksle. Deformacijos matuotos išoriniame gniuždomame betono sluoksnyje, gniuždomame sluoksnyje su strypine plienine armatūra, tempiamame sluoksnyje su strypine plienine armatūra ir tempiamame sluoksnyje su anglies pluošto kompozitu. Anglies pluošto kompozito šlyčiomačiai pritvirtinti ties kompozito galais. Sijos vertikalūs poslinkis matuotas ties sijos tarpatramio viduriu.



3.6 pav. Kontrolinių sijų bandymo schema ir matavimo prietaisų išdėstymas.

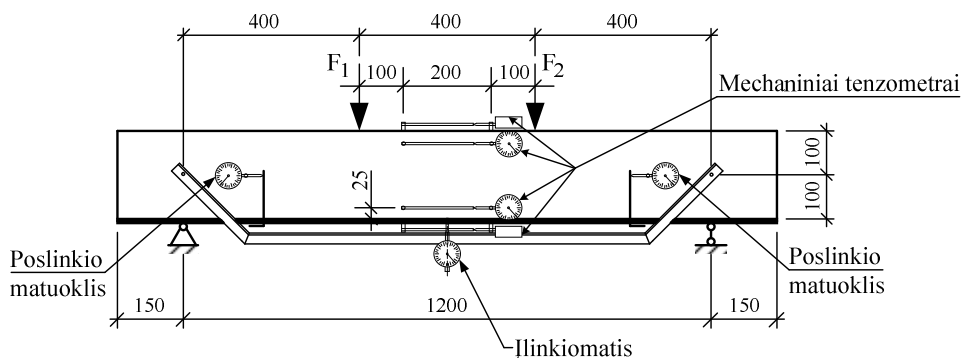
1 – įlinkio matavimo prietaisas; 2 – kompozitinio tempiamo sluoksnio tenzometras; 3 – tempiamo sluoksnio su strypine plienine armatūra tenzometras; 4 – viršutinio gniuždomo betono sluoksnio tenzometras; 5 ir 6 – kompozitinio sluoksnio pasislinkimo indikatoriai

Fig. 3.6. Arrangement of linear transducers and electrical gauges on the experimental beam. 1 – deflection measurement device; 2 – linear transducer on the layer of carbon fiber composite; 3 – linear transducer on the tensioned layer with a steel bar; 4 – linear transducer on the layer of compressed concrete; 5 and 6 displacement indicators of carbon fiber composite layer



3.7 pav. Sijų bandymo schema veikiant ilgalaikiai statiniai apkrovai

Fig. 3.7. Testing scheme of the beams during long-term loading



3.8 pav. Matavimo prietaisų išdėstymo schema sijose, kurios apkraunamos ilgalaikė statine apkrova

Fig. 3.8. Arrangement of deformation measurement devices on the experimental beam during long-term loading

Pašalinus ilgalaikę apkrovą, sijos buvo bandomos iki suirimo pagal kontrolinių sijų bandymo schemą.

Sijas apkraunant ilgalaikė apkrova, atitinkamai ilgalaikė statinė apkrova buvo apkrautos ir betoninės prizmės. Specialiame stende vienu metu buvo apkraunamos trys prizmės (3.9 pav.). Ilgalaikės apkrovos intensyvumas atitinka apytiksliai $0,6f_c$ ardančiosios prizminės apkrovos. Prizmių bandymo schema ir deformacijų matavimo prietaisų išdėstymas pavaizduotas (3.9 pav.).



3.9 pav. Betoninių prizmių apkrovimas ilgalaikė statine apkrova

Fig. 3.9. Concrete prisms under a long-term load action

Ilgalaikė statinė apkrova apkrautų betoninių prizmių deformacijų rezultatai, naudojami betono valkšnumo charakteristikai ir tamprumo moduliui nustatyti.

Aplinkos įtakai vertinti paliekami neapkrauti bandiniai ant kurių atitinkamai sumontuoti tenzometrai betono traukumai matuoti (3.10 pav.).



3.10 pav. Traukumo deformacijų matavimas kontroliniuose bandiniuose
Fig. 3.10. Measurement of shrinkage deformations on control specimens

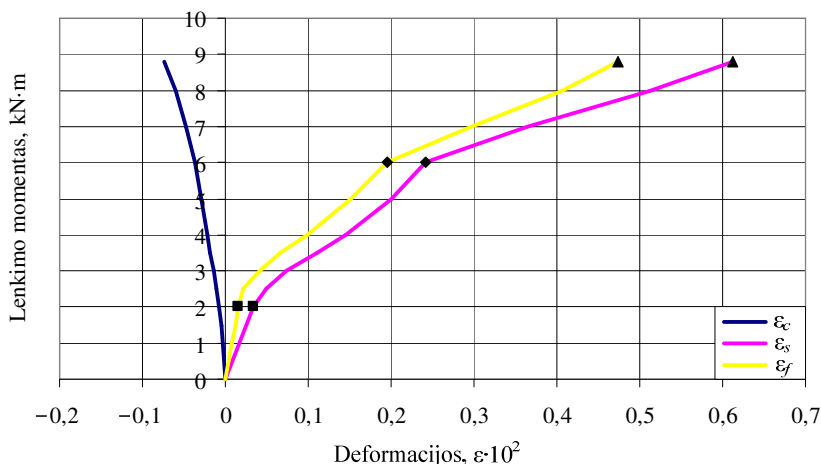
Pirmos serijos sijose ilgalaikės apkrovos intensyvumas sudaro 60 % atitinkamos sustiprintos kontrolinės sijos laikomosios galios. Antros serijos sijų apkrovos intensyvumas skirtingas. Sijų II.B12.4C_t ir II.B12.5C_t apkrovos intensyvumas sudaro 43 % kontrolinių sijų laikomosios galios. Atitinkamai sijų: II.B12.6C_t ir II.B12.7C_t 62 %, II.B12.8C_t 78 %, II.B12.9SC_t ir II.B12.10SC_t 58 % kontrolinių sijų laikomosios galios. Trečios serijos sijų ilgalaikės apkrovos intensyvumas sudarė 60 % sustiprintų sijų laikomosios galios, kuri atitiko 97 % nesustiprintų sijų laikomosios galios. Iki pastovios apkrovos lygio sijų išorinė apkrova didinama pakopomis po 5 kN. Ties kiekviena apkrovos pakopa nuskaitomi matavimo prietaisų rezultatai. Plyšių vystymosi charakteris stebimas trumpalaikio ir ilgalaikio bandymo metu.

3.3. Sijų elgsena iki ilgalaikės apkrovos poveikio

Atlikus atskirų serijų kontrolinių sijų laikomosios galios bandymus nustatytas ilgalaikės apkrovos intensyvumas atitinkamos serijos sijoms. Šiame skyriuje nagrinėjama sijų elgsena apkraunant iki pastovaus ilgalaikės apkrovos intensyvumo.

Atlikus sijų apkrovimą iki statinės ilgalaikės apkrovos pastovaus intensyvumo, nustatyta, kad strypinės plieninės armatūros kiekis tempiamoje sijos zo-

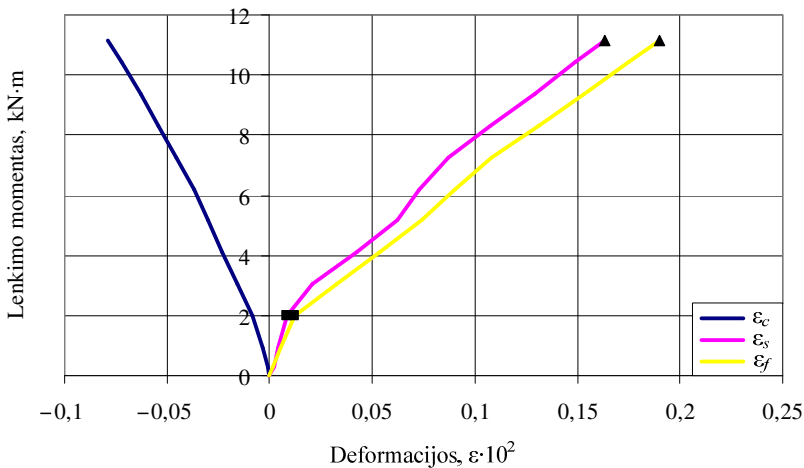
noje sąlygojo charakteringą sijų elgseną. Buvo nustatytos labiausiai gniuždomų betono sluoksnių, tempiamos armatūros ir tempiamo kompozito sluoksnio deformacijos. Silpnai armuotų sijų (1.B6.5C₁ ir 1.B6.6C₁) lenkiamojo momento ir deformacijų grafike galima išskirti tris būdingus taškus (3.11 pav.). Pirmas taškas atitinka statmenųjų plyšių atsiradimą. Antras taškas atitinka tempiamos strypinės plieninės armatūros takumo įtempius, arba šios grupės nesustiprintų sijų laikomąją galią. Trečiame taške pasiekiamas ilgalaikės apkrovos intensyvumas. Vidutiniškai armuotose sijose, kurių armavimo plienine strypine armatūra procentas $\mu_s = 1,29\%$, apkrovos ir deformacijų grafikuose išsiskiria tik du taškai. Jie atitinka statmenųjų plyšių atsiradimą ir ilgalaikės apkrovos intensyvumą (3.12 pav.). Sijų, kurių armavimo plienine strypine armatūra procentas $\mu_s = 1,76\%$, plyšių atsiradimo momentas sijos kreivio nepakeičia ir deformacijų grafike lūžio nėra (3.13 pav.).



3.11 pav. Sijų, kurių tempiamos zonos armavimo plienine strypine armatūra procentas $\mu_s = 0,388\%$, deformacijų pasiskirstymas sluoksniuose iki ilgalaikės apkrovos poveikio. ϵ_c – sijos skerspjūvio gniuždomos zonos betono deformacijos; ϵ_s – sijos tempiamo sluoksnio su plienine strypine armatūra deformacijos; ϵ_f – sijos anglies pluošto kompozito deformacijos

Fig. 3.11. Distribution of deformations in strengthened beams where reinforcement ratio with steel bars $\mu_s = 0,388\%$. ϵ_c – deformations in compressed concrete zone; ϵ_s – deformations of the tensioned layer with a steel bar; ϵ_f – deformations of the carbon fiber composite layer

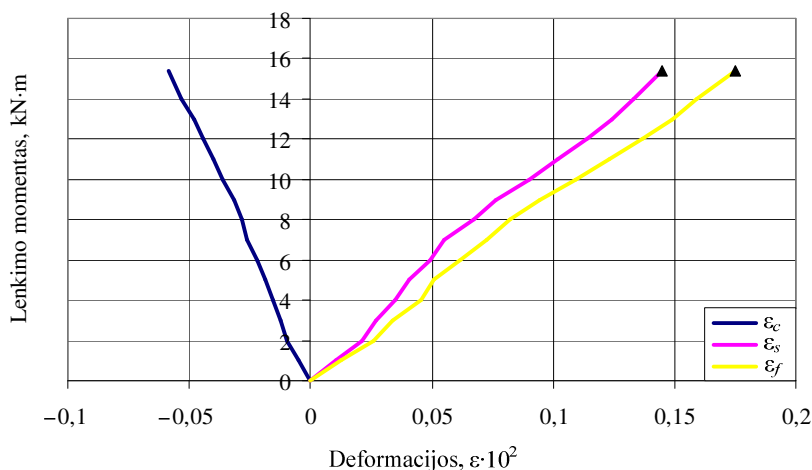
Sijų įlinkių kreivėse taip pat atsispindi statmenųjų plyšių atsiradimo ir tempiamos armatūros takumo įtempio įtaka (3.14 pav.).



3.12 pav. Sijų, kurių tempiamos zonos armavimo plienine strypine armatūra procentas $\mu_s=1,29\%$, deformacijų pasiskirstymas sluoksniuose iki ilgalaikės apkrovos poveikio. ε_c – sijos skerspjūvio gniuždomos zonos betono deformacijos; ε_s – sijos tempiamo sluoksnio su plienine strypine armatūra deformacijos; ε_f – sijos anglies pluošto kompozito deformacijos

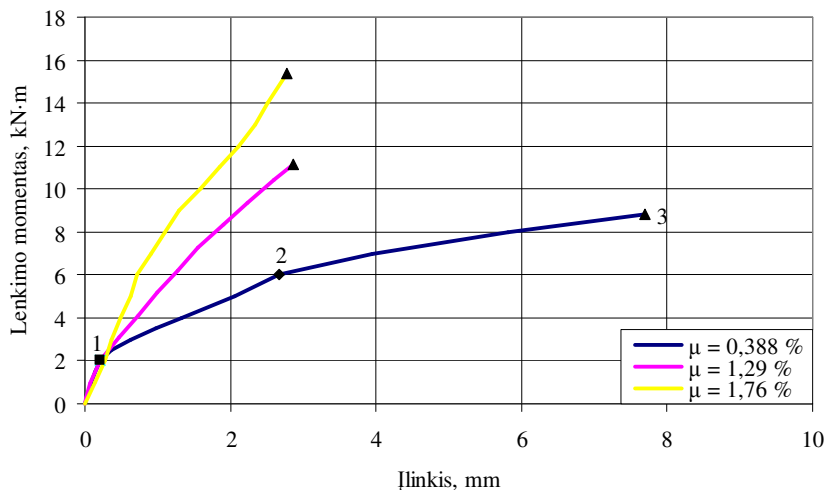
Fig. 3.12. Distribution of deformations in strengthened beams where reinforcement ratio with steel bars $\mu_s=1,29\%$. ε_c – deformations in compressed concrete zone; ε_s – deformations of the tensioned layer with a steel bar; ε_f – deformations of the carbon fiber composite layer

Bandant kontrolines sijas, nustatyta, kad anglies pluošto kompozito poslinkis betono atžvilgiu pasireiškia kai apkrova pasiekia 33–61 % laikomosios galios apkrovos lygį (3.15 pav.). Šiuo atveju horizontalus poslinkis sudaro iki 7 % palyginus su poslinkiu, kuris pasireiškia, kai apkrovos intensyvumas siekia 95 % kontrolinių sijų laikomosios galios. Toks mažas poslinkis gali reikšti, kad esant tokiam apkrovos intensyvumui, kuris dažniausiai būna sijų eksploatacinis, betono ir kompozito jungtyje šlyties įtempių intensyvumas nėra didelis ir jungtis turi didelį laikomosios galios potencialą. Kai apkrovos intensyvumas sudaro 43 %, 62 %, 78 % nuo kontrolinių sijų laikomosios galios, anglies pluošto kompozito poslinkis betono atžvilgiu ilgalaikio bandymo pradžioje sudaro atitinkamai 0,23 %, 6,7 % ir 11,3 % poslinkio, kuris buvo kontrolinėse sijose apkrovai siekiant 95 % laikomosios galios. Analizuojant kontrolinių sijų II.B12.1C, II.B12.2C, II.B12.3C kompozitinio sluoksnio poslinkius betono atžvilgiu rezultatus, galima teigti, kad pasiekus 0,39 mm poslinkį kompozitinis sluoksnis atitrūkdavo nuo betono paviršiaus (3.50 pav.).



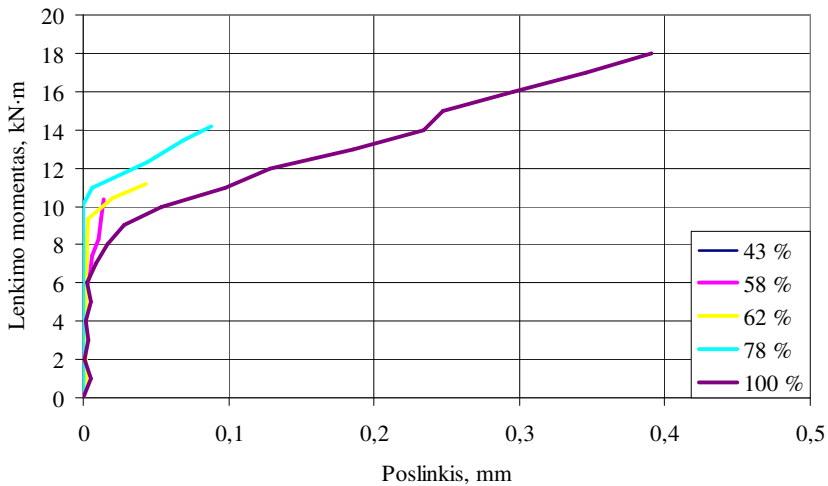
3.13 pav. Sijų, kurių tempiamos zonos armavimo plienine strypine armatūra procentas $\mu_s=1,76$ %, deformacijų pasiskirstymas sluoksniuose iki ilgalaikės apkrovos poveikio. ϵ_c – sijos skerspjūvio gniuždomos zonos betono deformacijos; ϵ_s – sijos tempiamo sluoksnio su plienine strypine armatūra deformacijos; ϵ_f – sijos anglies pluošto kompozito deformacijos

Fig. 3.13. Distribution of deformations in strengthened beams where reinforcement ratio with steel bars $\mu_s=1,76$ %. ϵ_c – deformations in compressed concrete zone; ϵ_s – deformations of the tensioned layer with a steel bar; ϵ_f – deformations of the carbon fiber composite layer



3.14 pav. Trumpalaikė apkrova veikiamų sijų įlinkio prieaugis, pagal sijų tempiamos zonos armavimo plienine strypine armatūra procentą

Fig. 3.14. Evolution of deflections of strengthened beams according to different reinforcement with steel bars ratio



3.15 pav. Anglies pluošto kompozito poslinkis betono atžvilgiu
Fig. 3.15. Displacement of carbon fiber composite layer in respect to concrete layer

Tempiamos plieninės strypinės armatūros kiekis ir išorinio anglies pluošto kompozitinio sluoksnio papildomas inkaravimas sąlygojo skirtingas sluoksnių deformacijas. Sijas apkraunant iki pastovaus ilgalaikės apkrovos intensyvumo, kuris sudarė 60 % sustiprintų kontrolinių sijų laikomosios galios, nustatyta, kad tempiama strypinė plieninė armatūra dažniausiai nepasiekdavo takumo įtempių. Lyginant sijų tempiamos armatūros deformacijas su eksperimentiškai nustatytomis plieninės armatūros takumo deformacijomis, I.B6.xC_t sijose deformacijos tempiamoje strypinėje armatūroje sudarė 409 % plieninės armatūros takumo deformacijų. Sijose II.B12.xC_t, kai apkrovos intensyvumas sudaro 43 %, 62 %, 78 % kontrolinių sijų laikomosios galios tempiamos plieninės armatūros deformacijos atitinkamai sudarė 66 %, 109 % ir 93 % plieninės armatūros takumo deformacijų. Sijose I.B14.xC_t, tempiamos plieninės armatūros deformacijos sudarė 67 %–99 % tempiamos plieninės armatūros takumo deformacijų. Nesustiprintose gelžbetoninėse sijose III.B12.xSC_t, deformacijos sudarė iki 108 % plieninės armatūros takumo deformacijų. Tempiamos išorinės anglies pluošto kompozito deformacijos sijose serijos I.B6.xC_t sudarė 36,5 % nuo ribinės tempiamo anglies pluošto deformacijos. Sijose II.B12.xC_t deformacijos pagal atitinkamą apkrovos intensyvumą sudarė tik 8,8 %, 14,6 % ir 12,6 %, ir sijose I.B14.xC_t tik 13,5 % ribinės anglies pluošto kompozito deformacijos. Gniuždomasis betono sluoksnis palyginus su tempiamo anglies pluošto kompozitiniu sluoksniu išnaudojamas labiau. Sijose serijos I.B6.xC_t gniuždomo betono sluoksnio deformacijos sudaro 29,5 % ribinės gniuždomo betono deformacijos.

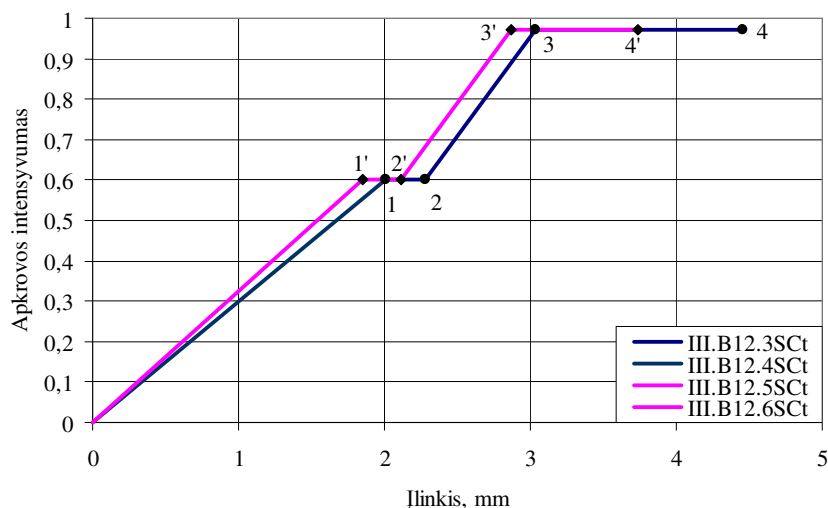
Sijose II.B12.xC_t deformacijos sudaro 18,5 %, 24,6 % ir 23 %, ir sijose I.B14.xC_t 23,4 %.

Palyginus gniuždomų ir tempiamų sluoksnių deformacijas nustatyta, kad silpnai armuotų sustiprintų sijų sluoksnių medžiagų stiprumas išnaudojamas labiausiai. Sijų armavimo procentą plienine strypine armatūra padidinus iki $\mu_s = 1,29$ %, deformacijos labiausiai gniuždomame betono sluoksnyje, tempiamoje armatūroje ir tempiamo kompozito sluoksnyje sumažėjo atitinkamai 1,2, 3,75, 2,5 karto. Armavimo procentą plienine strypine armatūra padidinus iki $\mu_s = 1,76$ %, deformacijos atitinkamuose sluoksniuose 1,26, 4,22, 2,7 karto mažesnės. Esant didesniai armavimo procentui sustiprintų sijų standumas didesnis, įlinkis pasiekus ilgalaikės apkrovos intensyvumą mažesnis, todėl sluoksniai mažiau deformuojasi.

Sijų III.B12.3SC_t, III.B12.4SC_t, III.B12.5SC_t, III.B12.6SC_t, III.B12.7SC_t, III.B12.8SC_t, III.B12.9SC_t, III.B12.10SC_t stiprinimas atliekamas veikiat išoriniai apkrovai. Įlinkių vystymasis prieš stiprinimą ir po stiprinimo pateiktas 3.16 ir 3.17 paveiksluose. Sijos III.B12.3SC_t, III.B12.4SC_t, III.B12.5SC_t, III.B12.6SC_t sustiprintos, kai apkrovos intensyvumas siekė 60 % nesustiprintų sijų laikomosios galios (3.16 pav. taškas 1 ir 1'). Atkarpos 1–2 ir 1'–2' atitinka nesustiprintų sijų įlinkio vystymąsi esant ilgalaikės apkrovos poveikiui. Taške 2 ir 2' atliktas sijų stiprinimas anglies pluošto kompozitu. Atkarpose 2–3 ir 2'–3' sustiprintų sijų apkrovos intensyvumas padidintas iki 98 % nesustiprintų sijų laikomosios galios ir, tai atitinka 60 % sustiprintų sijų laikomosios galios. Paveiksle 3.16 atkarpos 3–4 ir 3'–4' atitinka sustiprintos sijos įlinkio vystymąsi esant ilgalaikės apkrovos poveikiui. Šis atkarpos ilgis sutrumpėja panaudojant išorinės anglies pluošto armatūros papildomą inkaravimą plieninėmis apkabomis sijose II.I.B12.5SC_t ir III.B12.6SC_t (atkarpa 3'–4').

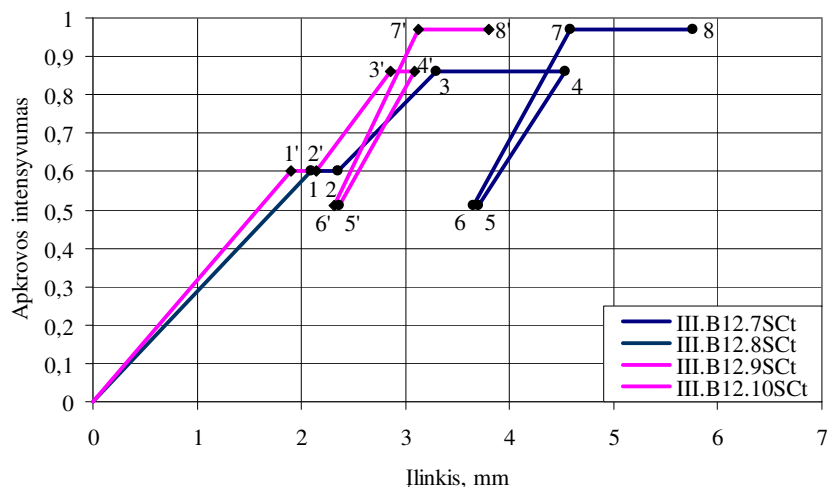
Sijos III.B12.7SC_t, III.B12.8SC_t, III.B12.9SC_t, III.B12.10SC_t sustiprintos, kai apkrovos intensyvumas siekia 52 % nesustiprintų sijų laikomosios galios taškuose 6 ir 6' (3.17 pav.). Taškai 1, 1' ir 3, 3' atitinka skirtingą nesustiprintų gelžbetoninių sijų apkrovos lygį, kuris siekė 60 % ir 86 % nuo nesustiprintų sijų laikomosios galios, o atkarpos 1–2, 1'–2' ir 3–4, 3'–4' įlinkio vystymąsi esant atitinkamam ilgalaikės apkrovos poveikiui. Atkarpos 6–7 ir 6'–7' atitinka sustiprintos sijos įlinkio vystymąsi iki ilgalaikės apkrovos lygio, kuris sudarė 97 % nesustiprintų sijų laikomosios galios ir, tai atitinka 60 % sustiprintų sijų laikomosios galios. Įlinkio prieaugio intensyvumas šiose atkarpose yra mažesnis negu 4–5 ir 4'–5' atkarpose, kurios atspindi įlinkio mažėjimą mažinant apkrovą. Po sijų stiprinimo anglies pluošto kompozitu (taškai 6 ir 6'), didinant apkrovą sijos įlinkis apkrovos lygyje 86 % yra mažesnis, negu paprastos gelžbetoninės sijos tokia pačia apkrovos lygyje. O sustiprintos sijos įlinkis esant 97 % apkrovos lygiui atitinka nesustiprintos sijos įlinkį esant 86 % apkrovos lygiui. Atkarpos 7–8 ir 7'–8' atitinka sustiprintų sijų įlinkio vystymąsi esant ilgalaikės apkro-

vos poveikiui ir sijose (III.B12.9SC_t ir III.B12.10SC_t) su anglies pluošto apka-
bomis įlinkio vystymosi intensyvumas šioje atkarpoje yra mažiausias (atkarpa
7'–8').



3.16 pav. Sijų III.B12.3SC_t, III.B12.4SC_t, III.B12.5SC_t, III.B12.6SC_t įlinkio vystymosi charakteris

Fig. 3.16. Deflection increment in strengthened beams III.B12.3SC_t, III.B12.4SC_t, III.B12.5SC_t, III.B12.6SC_t



3.17 pav. Sijų III.B12.7SC_t, III.B12.8SC_t, III.B12.9SC_t, III.B12.10SC_t įlinkio vystymosi charakteris

Fig. 3.17. Deflection increment in strengthened beams III.B12.7SC_t, III.B12.8SC_t, III.B12.9SC_t, III.B12.10SC_t

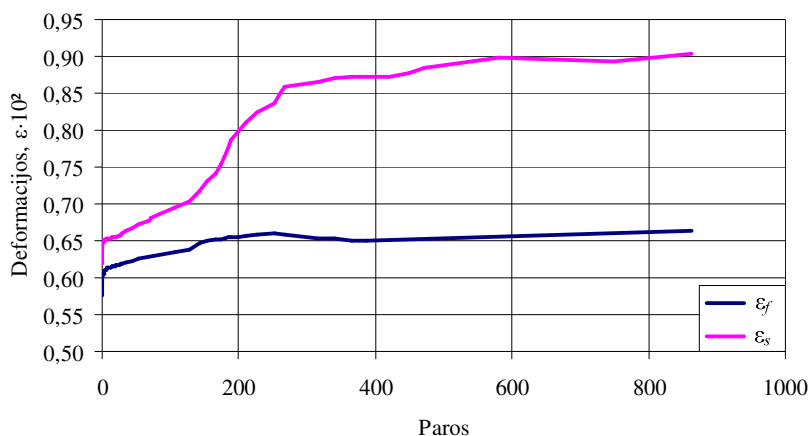
Sijų elgsena rodo, kad sijose III.B12.3SC_t, III.B12.4SC_t, III.B12.5SC_t, II-I.B12.6SC_t po sustiprinimo padidinus apkrovos intensyvumą, įlinkio prieaugis vienodas. Tačiau sijose III.B12.5SC_t, III.B12.6SC_t įlinkio prieaugis ilgalaikės apkrovos poveikio metu 1,4 karto mažesnis. Šių sijų kompozitinis sluoksnis papildomai inkaruotas plieninėmis apkabomis. Tempiamos zonos deformatyvumas labiau suvaržytas, todėl sijos standumas didesnis. Sijose III.B12.9SC_t, III.B12.10SC_t įlinkio prieaugis ilgalaikės apkrovos poveikio metu 1,7 karto mažesnis negu sijose III.B12.7SC_t, III.B12.8SC_t. Šių sijų kompozitinis sluoksnis papildomai inkaruotas anglies pluošto apkabomis. Apkabų plotis 100 mm. Anglies pluošto apkabos priklijuotos prie išorinio sijos paviršiaus papildomai suvaržo įstrižųjų plyšių vystymąsi, taip pat suvaržo šliejamo betono deformacijas betono ir kompozito jungtyje. Sijos standumas dar labiau padidėja ir kompozitinio sluoksnio pasislinkimo įtaka sijos įlinkio prieaugiui sumažėja.

3.4. Sijų elgsena esant ilgalaikės apkrovos poveikiui

Ilgalaikės apkrovos veikimo metu nagrinėjamas sijos sluoksnių ir sluoksnių jungties deformatyvumas. Sijų įlinkis kinta priklausomai nuo santykinio tempiamos plieninės strypinės armatūros kiekio, ilgalaikės apkrovos lygio ir išorinio kompozitinio sluoksnio papildomo inkaravimo.

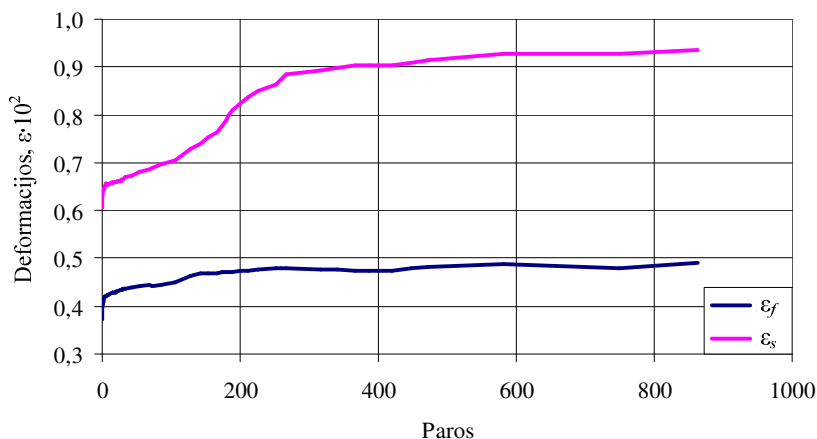
Po 150 parų ilgalaikės apkrovos poveikio sijose I.B6.C_t ir I.B14.C_t pasireiškia staigus deformacijų prieaugis tempiamosios armatūros zonoje (3.18, 3.19, 3.22, 3.23 pav.). Tempiamosios armatūros deformacijos didėja sparčiau negu kompozito sluoksnyje. Staigus deformacijų prieaugis baigiasi maždaug po 125 parų.

Tame laikotarpyje tempiamosios armatūros vidutinis deformacijų greitis sijose I.B6.5C_t ir I.B6.6C_t yra $0,001133\text{--}0,00116 \text{ } \varepsilon_{s,cr}/24h$, o anglies pluošto kompozitinio sluoksnio $0,000108\text{--}0,0005656 \text{ } \varepsilon_{f,cr}/24h$. Taigi tempiamoji armatūra deformuojasi iki 10,5 karto greičiau negu kompozitinis sluoksnis.



3.18 pav. Sijos I.B6.5C₁ tempiamos zonos deformacijų pasiskirstymas veikiant ilgalaikę statinę apkrovą. ϵ_f – tempiamo kompozito deformacijos;
 ϵ_s – tempiamos plieninės strypinės armatūros deformacijos

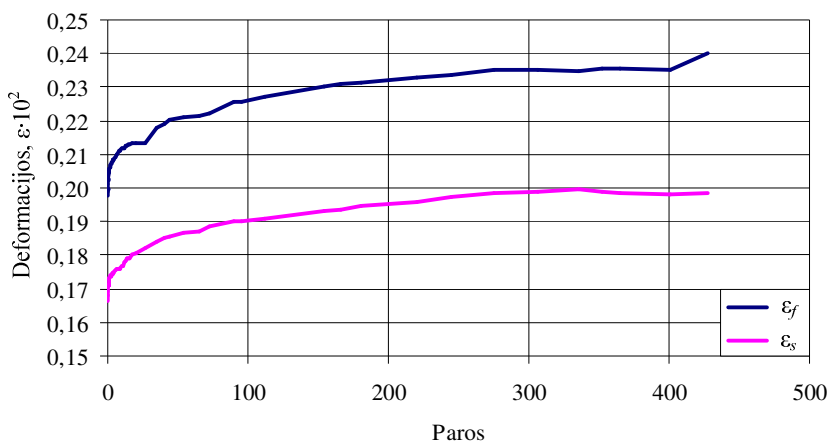
Fig. 3.18. Evolution of deformations in tensioned layers under a long-term loading of the beam I.B6.5C₁. ϵ_f – layer of a tensioned CFRP element;
 ϵ_s – concrete layer with a tensioned steel bar



3.19 pav. Sijos I.B6.6C₁ tempiamos zonos deformacijų pasiskirstymas veikiant ilgalaikę statinę apkrovą. ϵ_f – tempiamo kompozito deformacijos;
 ϵ_s – tempiamos plieninės strypinės armatūros deformacijos

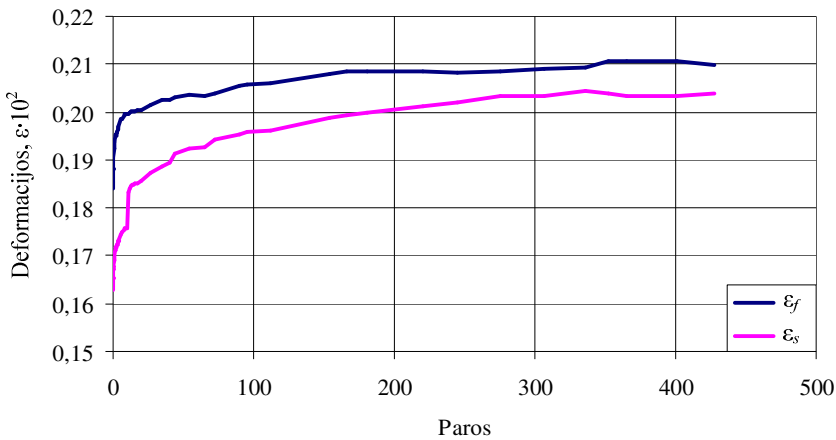
Fig. 3.19. Evolution of deformations in tensioned layers under a long-term loading of the beam I.B6.6C₁. ϵ_f – layer of a tensioned CFRP element;
 ϵ_s – concrete layer with a tensioned steel bar

Sijose II.B12.C_t staigus deformacijų prieaugis tempiamosios armatūros zonoje nepasireiškia, tačiau spartesnė deformacijų prieaugio tendencija išlieka (3.20, 3.21 pav.). Kadangi šių sijų anglies pluošto kompozitas priklijuotas iki sijos atramų, todėl šių sijų laikomoji galia palyginus su sijomis, kurių anglies pluoštas priklijuotas per visą sijos ilgį (užvedant už atramų) yra mažesnė. Atitinkamai gaunama, kad apkrovos intensyvumas siekiantis 60 % kontrolinių sijų laikomosios galios yra santykinai mažesnis. Todėl šiame apkrovos lygyje, sijų II.B12.C_t tempiamos zonos sluoksnių deformacijų vystymesi didelių skirtumų nėra. Tačiau sijos II.B12.7C_t tempiamos zonos sluoksnių deformacijų vystymosi tendencija rodo, kad tempiamame sluoksnyje su plienine armatūra deformacijos vystosi sparčiau. Tyrimais nustatyta, kad praėjus 110 parų nuo ilgalaikės apkrovos veikimo pradžios, tempiamame sluoksnyje su plienine strypine armatūra deformacijos pradeda didėti sparčiau ir pasiekus 340 parų nuo ilgalaikės apkrovos veikimo pradžios, šis prieaugis sulėtėja. Nustatyta, kad šiame laikotarpyje tempiamo anglies pluošto kompozito sluoksnis deformavosi 2,6 karto lėčiau negu sluoksnis su plienine strypine armatūra.



3.20 pav. Sijos II.B12.6C_t tempiamos zonos deformacijų pasiskirstymas veikiant ilgalaikę statinę apkrovą. ε_f – tempiamo kompozito deformacijos; ε_s – tempiamos plieninės strypinės armatūros deformacijos

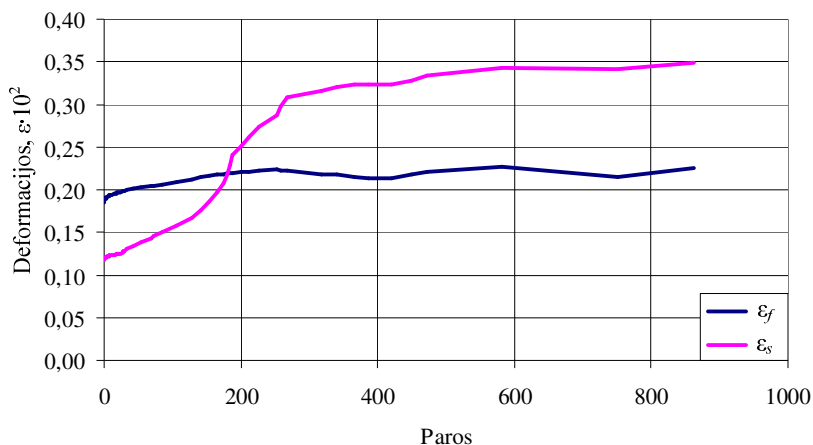
Fig. 3.20. Evolution of deformations in tensioned layers under a long-term loading of the beam II.B12.6C_t. ε_f – layer of a tensioned CFRP element; ε_s – concrete layer with a tensioned steel bar



3.21 pav. Sijos II.B12.7C_t tempiamos zonos deformacijų pasiskirstymas veikiant ilgalaikę statinę apkrovą. ϵ_f – tempiamo kompozito sluoksnis; ϵ_s – tempiamos plieninės strypinės armatūros deformacijos

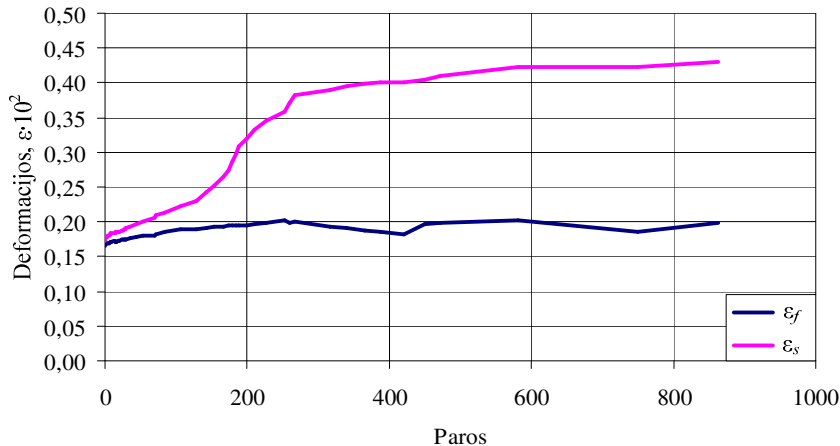
Fig. 3.21. Evolution of deformations in tensioned layers under a long-term loading of the beam II.B12.7C_t. ϵ_f – layer of a tensioned CFRP element; ϵ_s – concrete layer with a tensioned steel bar

Sijose I.B14.4C_t ir I.B14.5C_t ilgalaikio bandymo pradžioje, tempiamos strypinės plieninės armatūros takumo įtempiai nepasiekti. Sijoje I.B14.4C_t tempiamos armatūros deformacijos sudarė 67 % nuo plieninės armatūros takumo deformacijų, o sijos I.B14.5C_t deformacijos atitinkamai sudarė 99 %. Sijose I.B14.4C_t ir I.B14.5C_t spartus deformacijų prieaugis tempiamoje plieninėje armatūroje trunka apie 267 paros ir baigiasi, kai pasiekama ribinė plieninės armatūros takumo deformacija. Skirtingas tempiamosios plieninės armatūros ir anglies pluošto kompozito deformacijas sąlygojo betono ir kompozito jungtyje atsirandančios šlyties valkšnumo deformacijos. Kai nuslopsta valkšnumo intensyvumas, deformacijų prieaugis tempiamoje plieninėje armatūroje sijose I.B14.4C_t ir I.B14.5C_t siekia $0,00071816\text{--}0,00078558 \epsilon_{s,cr}/24h$, o anglies pluošto kompozito sluoksnyje $0,00012925\text{--}0,000144644 \epsilon_{f,cr}/24h$. Tai rodo, kad šiame apkrovimo etape tempiamoji plieninė strypinė armatūra deformuojasi 5–6 kartus greičiau kaip anglies pluošto kompozitas.



3.22 pav. Sijos I.B14.4C_t tempiamos zonos deformacijų pasiskirstymas veikiant ilgalaikę statinę apkrovą. ϵ_f – tempiamo kompozito deformacijos;
 ϵ_s – tempiamos plieninės strypinės armatūros deformacijos

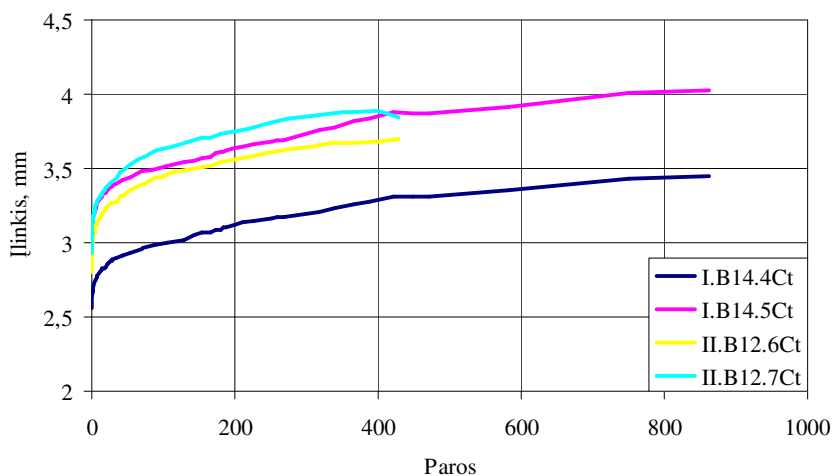
Fig. 3.22. Evolution of deformations in tensioned layers under a long-term loading of the beam I.B14.4C_t. ϵ_f – layer of a tensioned CFRP element;
 ϵ_s – concrete layer with a tensioned steel bar



3.23 pav. Sijos I.B14.5C_t tempiamos zonos deformacijų pasiskirstymas veikiant ilgalaikę statinę apkrovą. ϵ_f – tempiamo kompozito deformacijos;
 ϵ_s – tempiamos plieninės strypinės armatūros deformacijos

Fig. 3.23. Evolution of deformations in tensioned layers under a long-term loading of the beam I.B14.5C_t. ϵ_f – layer of a tensioned CFRP element;
 ϵ_s – concrete layer with a tensioned steel bar

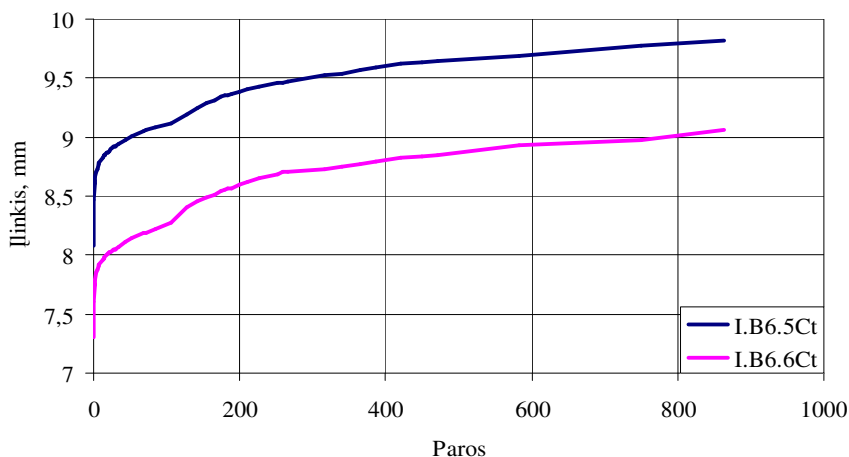
Ekspimentiniais tyrimais nustatyta, kad anglies pluošto kompozitinio sluoksnio poslinkis ilgalaikio bandymo metu įtakoja sijų įlinkio prieaugio intensyvumą. Sijų, kurių tempiamos zonos armavimo plienine strypine armatūra procentas $\mu_s = 1,76\%$ įlinkio prieaugio intensyvumas pastoviausias (3.24 pav.), nuo 106 iki 421 ilgalaikės apkrovos veikimo paros yra 0,00106 mm/24h, laikotarpyje nuo 106 iki 252 paros, įlinkio prieaugio intensyvumas siekia 0,0011 mm/24h, laikotarpyje nuo 252 iki 421 intensyvumas atitinkamai 0,00104 mm/24h. Sijų, kurių tempiamos zonos armavimo plienine strypine armatūra procentas $\mu_s = 1,29\%$ įlinkio prieaugio intensyvumas mažėjantis (3.24 pav.), nuo 112 iki 401 ilgalaikės apkrovos veikimo paros yra 0,000787 mm/24h, laikotarpyje nuo 112 iki 245 paros, įlinkio prieaugio intensyvumas siekia 0,0011 mm/24h, laikotarpyje nuo 245 iki 401 intensyvumas atitinkamai 0,00053 mm/24h. Įlinkio prieaugio intensyvumo pastovumas rodo, kad sijose I.B14.4C_t, I.B14.5C_t kompozitinio sluoksnio poslinkis (pagal 3.22 ir 3.23 pav.) stiprinamojo elemento atžvilgiu, sukelia papildomą įlinkio prieaugio dalį. Sijose II.B12.6C_t, II.B12.7C_t kompozitinio sluoksnio poslinkis palyginus su sijomis I.B14.4C_t, I.B14.5C_t 10,3 karto mažesnis, todėl įlinkio prieaugis sumažėja.



3.24 pav. Sijų I.B14.4C_t, I.B14.5C_t ir II.B12.6C_t, II.B12.7C_t įlinkių pasiskirstymas esant ilgalaikės statinės apkrovos poveikiui

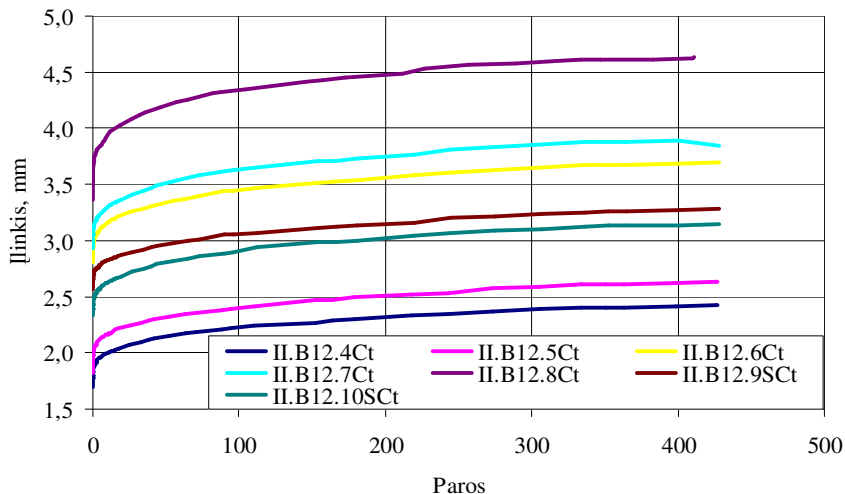
Fig. 3.24. Evolution of deflections under a long-term loading in beams I.B14.4C_t, I.B14.5C_t, II.B12.6C_t, II.B12.7C_t

Silpnai armuotų sijų, kurių tempiamos zonos armavimo plienine strypine armatūra procentas $\mu_s = 0,388\%$ įlinkio prieaugis taip pat padidėja, kai prasideda intensyvus deformacijų prieaugis tempiamos strypinės armatūros sluoksnyje, dėl betono ir kompozito jungties šlyties valkšnumo deformacijų vystymosi (3.25 pav.). Įlinkio prieaugio intensyvumas nuo 106 iki 421 ilgalaikės apkrovos veikimo paros yra $0,00167 \text{ mm}/24\text{h}$, laikotarpyje nuo 106 iki 252 paros, įlinkio prieaugio intensyvumas siekia $0,00257 \text{ mm}/24\text{h}$, laikotarpyje nuo 252 iki 421 intensyvumas atitinkamai $0,000888 \text{ mm}/24\text{h}$.



3.25 pav. Sijų I.B6.5C_t ir I.B6.6C_t įlinkių kreivės, kai veikia ilgalaikė apkrova
Fig. 3.25. Evolution of deflection increment under a long-term loading in beams I.B6.5C_t and I.B6.6C_t

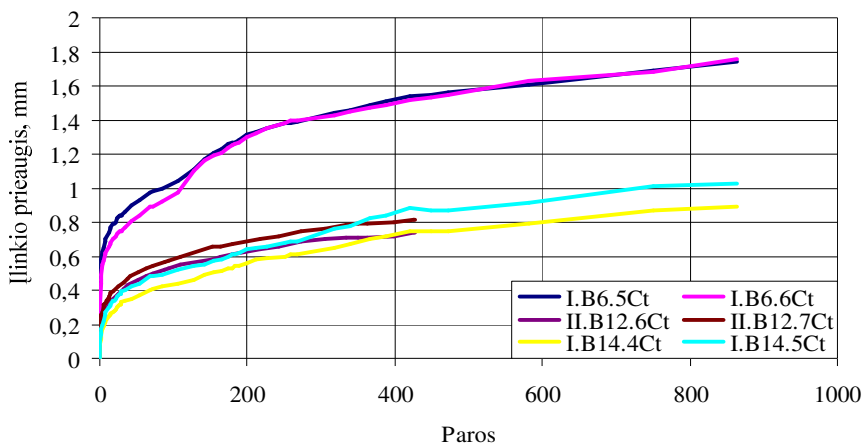
Kai sijų armavimas plienine strypine armatūra vienodas, didesnis ilgalaikės apkrovos intensyvumas įtakojo didesnius pradinius sijų įlinkius ir didesnį įlinkio prieaugio intensyvumą (3.26 pav.). Bandymo pradžioje, kai ilgalaikės apkrovos intensyvumas 62 % ir 78 % kontrolinių sijų laikomosios galios, tai pradinis sijų įlinkis atitinkamai buvo 62 % ir 91,5 % didesnis negu sijų, kurių ilgalaikės apkrovos intensyvumas sudarė 42 % kontrolinių sijų laikomosios galios. Po 100 parų ilgalaikės apkrovos poveikio sijose, kuriose apkrovos intensyvumas siekė 62 % ir 78 % kontrolinių sijų laikomosios galios, įlinkis atitinkamai buvo 53 % ir 87,5 % didesnis, negu sijose, kurių ilgalaikės apkrovos intensyvumas sudarė 42 % kontrolinių sijų laikomosios galios. Ilgalaikio bandymo pabaigoje po 430 parų ilgalaikės apkrovos poveikio, įlinkiai atitinkamai buvo 50 % ir 83 % didesni.



3.26 pav. Sijų, kurių tempiamojo zonoje armavimo plienine strypine armatūra procentas $\mu_s=1,29\%$, įlinkių pasiskirstymas esant ilgalaikės statinės apkrovos poveikiui ir skirtingam apkrovos lygiui (kompozitinis sluoksnis papildomai neinkaruotas)

Fig. 3.26. Evolution of deflections in beams under a long-term load action when reinforcement with steel bars ratio $\mu_s=1,29\%$ (composite layer was not additionally anchored)

Plieninės strypinės armatūros kiekis įtakoja įlinkių prieaugio intensyvumą. Sijų tempiamojo zonoje armuotų Ø12 ir Ø14 plienine armatūra įlinkių prieaugis lėčiausias, o silpnai armuotos sijos įlinkio prieaugis sparčiausias (3.27 pav.). Sparčiausias įlinkio prieaugis buvo pirmųjų 100 parų apkrovimo bėgyje. Silpnai armuotų sijų įlinkio prieaugis šiame laikotarpyje buvo 0,985 mm. Sijose, kurios tempiamojo zonoje armuotos po 2Ø12 arba 2Ø14 plieninės armatūros strypus, įlinkio prieaugis atitinkamai 0,68 mm ir 0,48 mm. Atlikta analizė parodė, kad silpnai armuotų sijų įlinkio prieaugis buvo 1,45 karto didesnis negu sijų, kurios tempiamojo zonoje armuotos dviem Ø12 plieninės armatūros strypais ir 2,05 karto didesnis negu sijų, kurios tempiamojo zonoje armuotos dviem Ø14 plieninės armatūros strypais. Deformacijų pasiskirstymas sluoksniuose (3.41–3.43 pav.) rodo, kad gniuždomo betono sluoksnio aukštis didesnis sijose su didesniu armavimo procentu plienine strypine armatūra. Todėl sijų lenkiamasis standumas didesnis ir įlinkių prieaugio intensyvumas mažesnis.

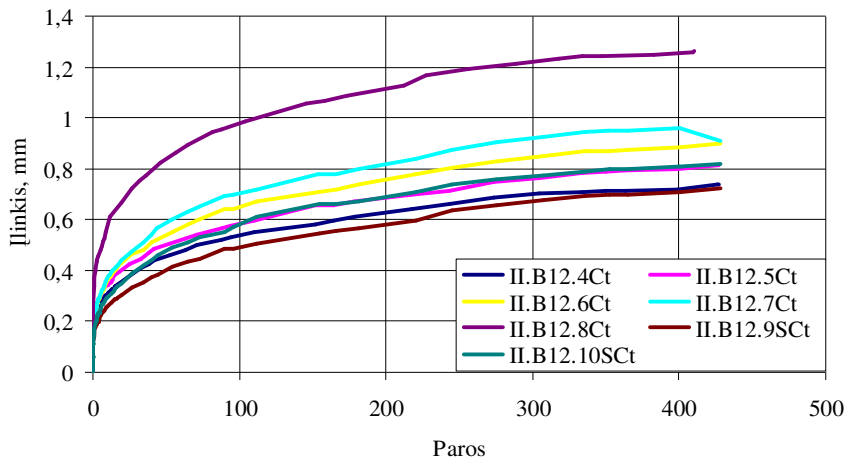


3.27 pav. Sijų I.B6.5C_t, I.B6.6C_t, II.B12.6C_t, II.B12.7C_t, I.B14.4C_t, I.B14.5C_t įlinkių intensyvumas esant ilgalaikės statinės apkrovos poveikiui

Fig. 3.27. Evolution of deflection increment under a long-term loading in beams I.B6.5C_t, I.B6.6C_t, II.B12.6C_t, II.B12.7C_t, I.B14.4C_t, I.B14.5C_t

Atlikti eksperimentiniai tyrimai parodė, kad ilgalaikės apkrovos intensyvumas įtakoja sijų įlinkio prieaugį, bei laikotarpį kuriame įlinkis stabilizuojasi (3.28 pav.). Šimto dienų laikotarpyje nuo apkrovimo pradžios, ilgalaikės apkrovos lygiui esant 43 %, 58 %, 62 %, 78 %, nuo kontrolinių sijų laikomosios galios, įlinkis padidėjo 0,56 mm, 0,54 mm, 0,7 mm, 0,98 mm. Nustatyta, kad po 100 parų ilgalaikės apkrovos poveikio įlinkis atitinkamai padidėjo 32,2 %, 22,5 %, 26,7 % ir 29,3 % nuo pradinių sijų įlinkių. Ilgalaikio bandymo pabaigoje po 430 parų įlinkio prieaugis atitinkamai buvo 0,78 mm, 0,773 mm, 0,965 mm ir 1,265 mm pradinio įlinkio ir, tai sudarė 44,3 %, 31,7 %, 34,4 % ir 37,6 % nuo pradinio sijų įlinkio.

Anglies pluošto kompozitinio sluoksnio papildomas inkaravimas, didina betono ir kompozito jungties standumą, tuo pačiu sumažina pradinį sijų įlinkį. Todėl ilgalaikėje apkrova veikiamų sijų įlinkio prieaugio intensyvumas yra mažesnis kaip sijose su papildomai neinkaruotu kompozitiniu sluoksniu (3.29 pav.).

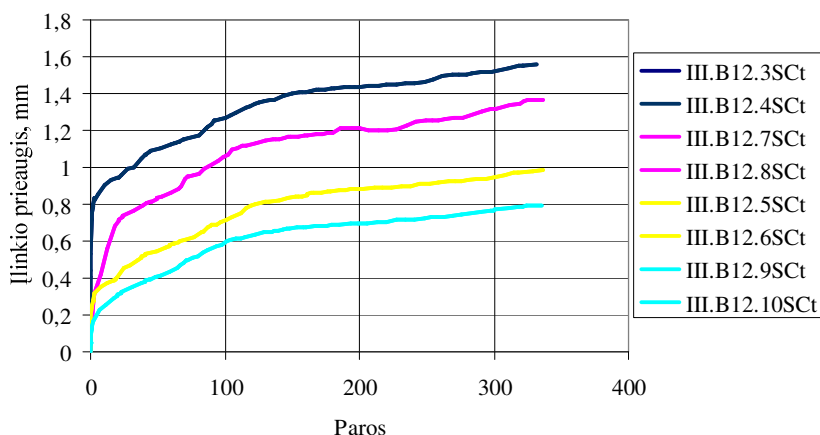


3.28 pav. Sijų, kurių tempiamoje zonoje armavimo plienine strypine armatūra procentas $\mu_s=1,29\%$, įlinkių intensyvumas esant ilgalaikės statinės apkrovos poveikiui ir skirtingam apkrovos lygiui (kompozitinis sluoksnis neinkaruotas)

Fig. 3.28. Evolution of deflection increment in beams under a long-term load action when reinforcement with steel bars ratio $\mu_s=1,29\%$ (composite layer was not additionally anchored)

Sijų, kurių anglies pluoštas nebuvo inkaruotas papildomais inkarais, įlinkio prieaugis 100 parų amžiuje buvo 1,27 mm, papildomai inkaravus apspaustomis metalinėmis plokštelėmis įlinkio prieaugis šiame laikotarpyje buvo 1,07 mm, papildomai inkaravus plieninėmis apkabomis įlinkis buvo 0,719 mm, papildomai inkaravus anglies pluošto apkabomis įlinkis prieaugis buvo 0,597 mm. Tai rodo, kad 100 parų laikotarpyje sijų su anglies pluošto apkabomis įlinkio prieaugis 2,1 karto mažesnis negu sijų su papildomai neinkaruotu anglies pluošto kompozitu. Kompozitinį sluoksnį papildomai inkaravus plieninėmis apkabomis įlinkio prieaugis 1,77 karto mažesnis, o papildomai inkaravus apspaustomis plieninėmis plokštelėmis įlinkio prieaugis 1,19 karto mažesnis negu sijų su papildomai neinkaruotu anglies pluošto kompozitu. Ilgalaikio bandymo pabaigoje po 330 parų ilgalaikės apkrovos veikimo sijų, kurių anglies pluošto kompozitas papildomai neinkaruotas, įlinkio prieaugis buvo 1,562 mm, sijų kurių anglies pluoštas papildomai inkaruotas apspaustomis plokštelėmis įlinkio prieaugis 1,366 mm, sijų su metalinėmis apkabomis įlinkio prieaugis 0,98 mm, o sijų su anglies pluošto apkabomis įlinkio prieaugis 0,795 mm.

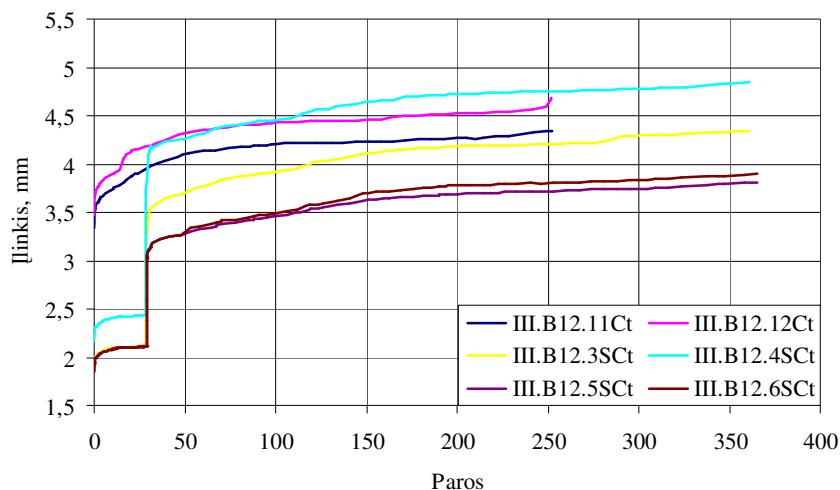
Analizuojant įlinkių eksperimentinius rezultatus nustatyta, kad ilgalaikio bandymo pabaigoje sijų su anglies pluošto apkabomis įlinkio prieaugis 1,97 karto mažesnis, sijų su plieninėmis apkabomis 1,59 karto mažesnis, o sijų su apspausdomis plokštelėmis 1,14 karto mažesnis negu sijų be papildomai inkaruoto kompozitinio sluoksnio.



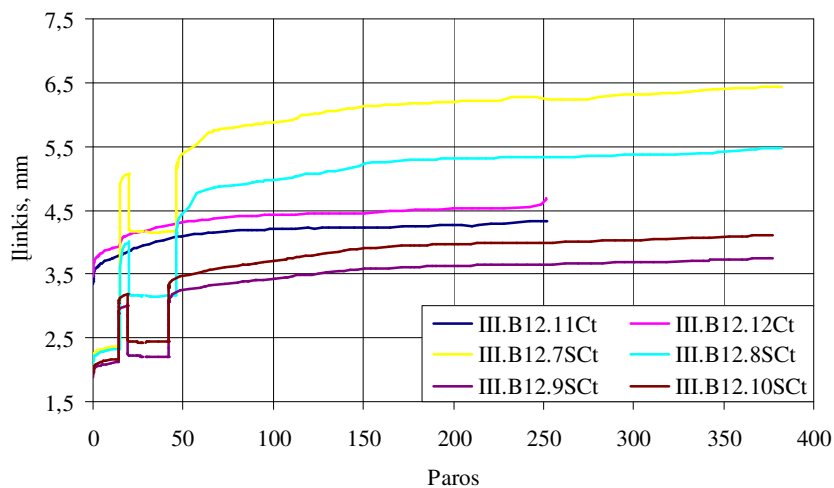
3.29 pav. Sustiprintų sijų įlinkio prieaugio intensyvumas esant skirtingam papildomam kompozitinio sluoksnio inkaravimui

Fig. 3.29. Deflection increment with different additional anchoring of the external carbon fibre composite layer in strengthened reinforced concrete beams

Atlikti tyrimai rodo, kad panaudojus papildomą kompozitinio sluoksnio inkaravimą, betono ir anglies pluošto kompozito jungtyje sumažinamos šlyties valkšnumo deformacijos. Todėl kompozitinio sluoksnio pasislinkimas turi mažesnę įtaką sijų įlinkiui. Analizuojant eksperimentinius rezultatus galima teigti, kad stiprinant konstrukcijas anglies pluošto kompozitu būtina naudoti papildomą kompozitinio sluoksnio inkaravimą. Kompozitinio sluoksnio papildomo inkaravimo įtaka sijų įlinkio vystymuisi ilgalaikio bandymo metu pateikta 3.30 ir 3.31 paveiksluose.



3.30 pav. Sustiprintų sijų lįinkių prieaugis veikiant statine ilgalaikę apkrova
Fig. 3.30. Deflections of strengthened beams under a long-term load action

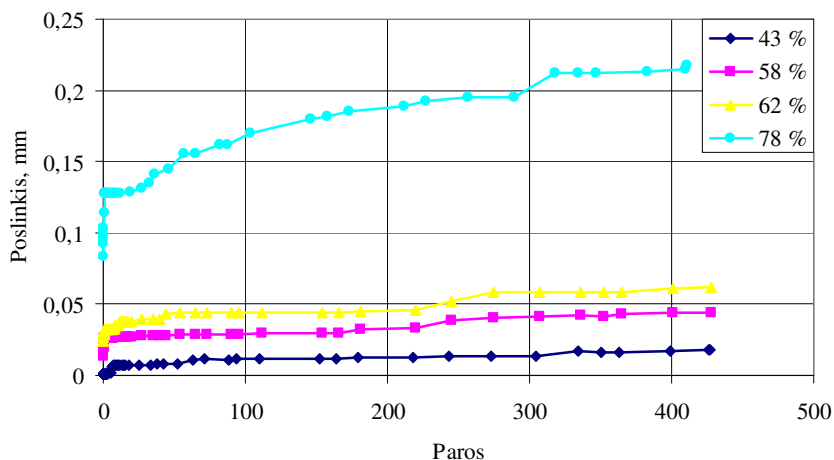


3.31 pav. Sustiprintų sijų lįinkių prieaugis veikiant statine ilgalaikę apkrova
Fig. 3.31. Deflections of strengthened beams under a long-term load action

Atlikti tyrimai parodė, kad anglies pluoštu sustiprintų konstrukcijų trumpalaikius ir ilgalaikius lįinkius įtakoja betono ir kompozito sluoksnio jungties stan-

dumas. Atsižvelgiant į tai buvo atlikta įvairių faktorių įtakos jungties standumui analizė.

Tyrimais nustatyta, kad ilgalaikės apkrovos intensyvumo dydis turi įtaką betono ir anglies pluošto kompozito jungties standumui (3.32 pav.). Sijose, kurių ilgalaikės apkrovos intensyvumas siekia 43 %, 58 % ir 62 % kontrolinių sijų laikomosios galios, intensyviausias kompozitinio sluoksnio pasislinkimo prieaugis vyksta pirmų 50 parų bėgyje. Apkrovos veikimo laikotarpyje nuo 50 iki 150 parų šlyties valkšnumo deformacijos nedidėjo, tačiau ilgiau išlaikant apkrovas ilgalaikė apkrova, jungties šlyties deformacijos vėl pradeda didėti. Tačiau sijose, kurių ilgalaikė apkrova sudaro 43 % kontrolinių sijų laikomosios galios, šlyties valkšnumo deformacijos pradeda didėti tik po 300 parų ilgalaikės apkrovos veikimo. Kai ilgalaikės apkrovos intensyvumas siekia 78 % kontrolinių sijų laikomosios galios, betono ir anglies pluošto šlyties valkšnumo deformacijos pasireiškia visame ilgalaikės apkrovos veikimo laikotarpyje. Tai rodo, kad esant didesniai apkrovos intensyvumui, betono ir anglies pluošto kompozito jungties standumas mažėja sparčiau. Netolygus anglies pluošto kompozito pasislinkimas stiprinamojo elemento atžvilgiu per visą ilgalaikės apkrovos veikimo laikotarpį yra apsprendžiamas stiprinamų sijų tempiamo betono esančio šalia kompozito sluoksnio supleišėjimo lygiu. Eksperimentiniai tyrimai parodė, kad ilgalaikės apkrovos veikimo metu atsiranda nauji statmenieji, bei horizontalieji plyšiai, kurie iš dalies ir apsprendžia kompozito ir betono jungties standumą.

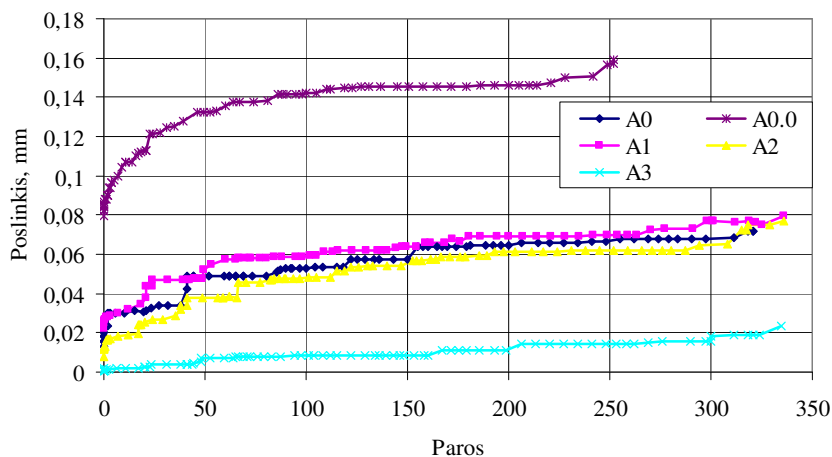


3.32 pav. Anglies pluošto kompozito pasislinkimas esant skirtingam apkrovos intensyvumui

Fig. 3.32. Evolution of a CFRP element slip under different long-term load levels

Sijose, kurių ilgalaikės apkrovos intensyvumas siekia 43 %, 58 %, 62 % ir 78 % kontrolinių sijų laikomosios galios, pasibaigus intensyviausiam šlyties valkšnumo deformacijų vystymuisi po 50 parų pasislinkimas atitinkamai buvo 0,0079 mm, 0,0289 mm, 0,0873 mm ir 0,15 mm. Palyginus su pradiniu pasislinkimu bandymo pradžioje, tai pasislinkimo prieaugiai didėja esant didesniai apkrovos lygiui. Apkrovai siekiant 43 %, 58 %, 62 % ir 78 % kontrolinių sijų laikomosios galios, pasislinkimo prieaugis atitinkamai 0,0069 mm, 0,0149 mm, 0,0445 mm ir 0,062 mm. Ilgalaikės apkrovos veikimo pabaigoje anglies pluošto kompozito pasislinkimas stiprinamojo elemento atžvilgiu atitinkamai buvo 0,0143 mm, 0,0445 mm, 0,1 mm ir 0,152 mm. Pasislinkimo prieaugis ilgalaikio bandymo pabaigoje pagal atitinkamą apkrovos lygį buvo 0,0133 mm, 0,0305 mm, 0,0572 mm ir 0,064 mm. Didžiausia ilgalaikė apkrova veikiamų sijų kompozitinio sluoksnio pasislinkimas po 50 ilgalaikės apkrovos poveikio parų yra 19, 5,2 ir 1,72 karto didesnis už sijų, kurių ilgalaikės apkrovos intensyvumas atitinkamai sudarė 43 %, 58 %, 62 % kontrolinių sijų laikomosios galios. Pasislinkimo prieaugis šiame laikotarpyje atitinkamai 9, 4,2 ir 1,4 karto didesnis. Ilgalaikio bandymo pabaigoje kompozitinio sluoksnio pasislinkimas labiausiai apkrautose sijose atitinkamai 10,6, 3,4 ir 1,5 karto didesnis.

Anglies pluošto kompozitinio sluoksnio papildomas inkaravimas įtakojo kompozitinio sluoksnio horizontalų poslinkį betono atžvilgiu tiek ilgalaikės apkrovos, tiek trumpalaikės apkrovos veikimo metu (3.33 pav.). Ilgalaikio bandymo pradžioje sijose, kurių kompozitinis sluoksnis papildomai neinkaruotas, poslinkis buvo 0,013 mm, kompozitinį sluoksnį papildomai inkaravus apspausdomis metalinėmis plokštelėmis poslinkis 0,022 mm, papildomai inkaravus plieninėmis apkabomis 0,0078 mm, papildomai inkaravus anglies pluošto apkabomis 0,002 mm. Sijų kompozitinio sluoksnio poslinkis po 50 ilgalaikės apkrovos poveikio parų, kai kompozitinis sluoksnis papildomai neinkaruotas 0,049–0,133 mm, kai kompozitinis sluoksnis papildomai inkaruotas prispaustomis plokštelėmis 0,054 mm, kai papildomai inkaruotas plieninėmis apkabomis 0,038 mm, kai papildomai inkaruotas anglies pluošto apkabomis 0,0073 mm. Kompozitinį sluoksnį papildomai inkaravus anglies pluošto apkabomis, kompozitinio sluoksnio poslinkis po 50 ilgalaikės apkrovos poveikio parų, lyginant su papildomai neinkaruotu kompozito sluoksniu sumažėjo 12,5 karto. Lyginant su sijomis, kuriose kompozitinis sluoksnis papildomai inkaruotas apspausdomis plieninėmis plokštelėmis, poslinkis sumažėjo 7,4 karto. Palyginus su sijomis, kuriose kompozitinis sluoksnis papildomai inkaruotas plieninėmis apkabomis, poslinkis sumažėjo 5,2 karto.

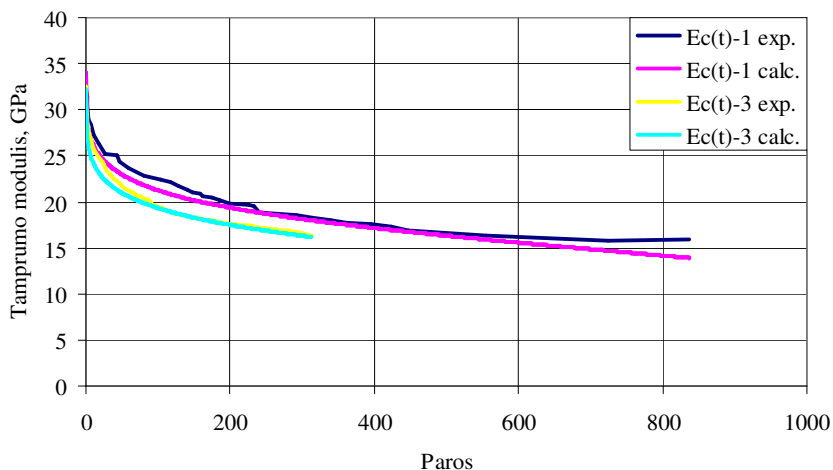


3.33 pav. Anglies pluošto kompozitinio sluoksnio pasislinkimas esant skirtingam papildomam inkaravimui. A0, A0.0 – anglies pluošto kompozitinis sluoksnis papildomai neinkaruotas; A1 – anglies pluošto kompozitinis sluoksnis inkaruotas apspausdomis plieninėmis plokštelėmis; A2 – anglies pluošto kompozitinis sluoksnis papildomai inkaruotas plieninėmis apkabomis; A3 – anglies pluošto kompozitinis sluoksnis papildomai inkaruotas anglies pluošto apkabomis

Fig. 3.33. Evolution of a CFRP element slip according to different additional CFRP layer anchorage methods. A0, A0.0 – CFRP layer without additional anchorage; A1 – CFRP layer additionally anchored with steel plates; A2 – CFRP layer anchored with metal clamps; A3 – CFRP layer additionally anchored with carbon fibre clamps

Ilgalaikio bandymo pabaigoje po 330 parų ilgalaikės apkrovos veikimo kompozitinio sluoksnio pasislinkimas sijose be papildomo inkaravimo buvo 0,072 mm, sijose su papildomu inkaravimu apspausdomis plokštelėmis 0,079 mm, sijose su plieninėmis apkabomis 0,077 mm ir sijose su anglies pluošto apkabomis 0,024 mm. Tyrimai parodė, kad kompozitinio sluoksnio pasislinkimą efektyviausiai sumažina papildomas kompozitinio sluoksnio inkaravimas anglies pluošto apkabomis (3.33 pav. A3 kreivė).

Apkraunant sijas ilgalaikė statinė apkrova atitinkamai apkautos betoninės prizmės. Apkrautų prizmių betono deformacijų modulio mažėjimas esant pastoviai ilgalaikiai statiniai apkrovai pateiktas 3.34 paveiksle. Šalia eksperimentiškai nustatytų kreivių pateiktas apskaičiuotos deformacijų modulio kitimo kreivės pagal 2.48 formulę.

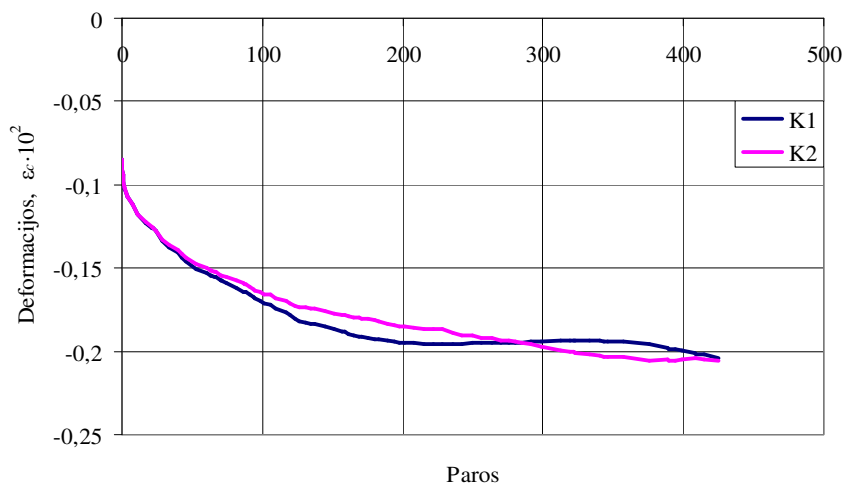


3.34 pav. Ilgalaikio bandymo metu nustatytas betoninių prizmių tamprumo modulio kitimas ir apskaičiuotas teoriškai

Fig. 3.34. Alteration of deformation modulus of concrete prisms under a long-term load action

Kreivių palyginimas rodo, kad skaičiavimuose galima taikyti eksperimentiškai nustatytus deformacijų duomenis arba deformacijų modulį skaičiuoti pagal 2.48 formulę atsižvelgiant į projektavimo normų EC2 nurodymus. Projektavimo normose EC2 galima įvertinti aplinkos drėgmės pokytį gniuždomo betono deformacijų moduliui esant ilgalaikės apkrovos poveikiui.

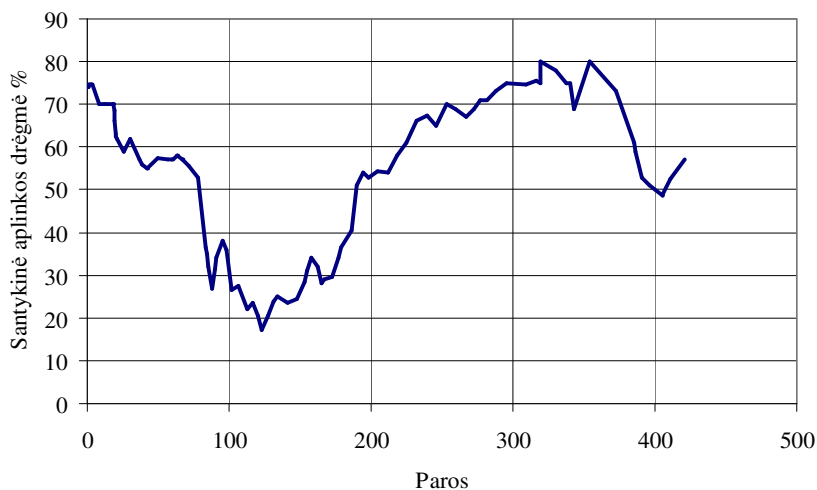
Šio darbo ilgalaikiai eksperimentiniai tyrimai atlikti klimatinėje kameroje. Aplinkos temperatūra kito nuo 12 °C iki 22 °C. Santykinė aplinkos drėgmė kito nuo 22 % iki 80 %. Aplinkos temperatūros ir santykinės drėgmės įtaka betono susitraukimui nustatyta ant papildomų bandinių, kurie neapkraunami ilgalaikę apkrovą. Nustatytos betono traukumo ir plėtimosi deformacijos dėl aplinkos poveikio kompensuojamos ilgalaikę statinę apkrovą apkrautuose bandiniuose. Gniuždomo betono deformacijų palyginimas įvertinus ir neįvertinus aplinkos poveikį, pateikiamas 3.35 paveiksle.



3.35 pav. Gniuždomo betono deformacijos. K1 – nekompensavus aplinkos poveikio deformacijų; K2 – kompensavus aplinkos poveikio deformacijas

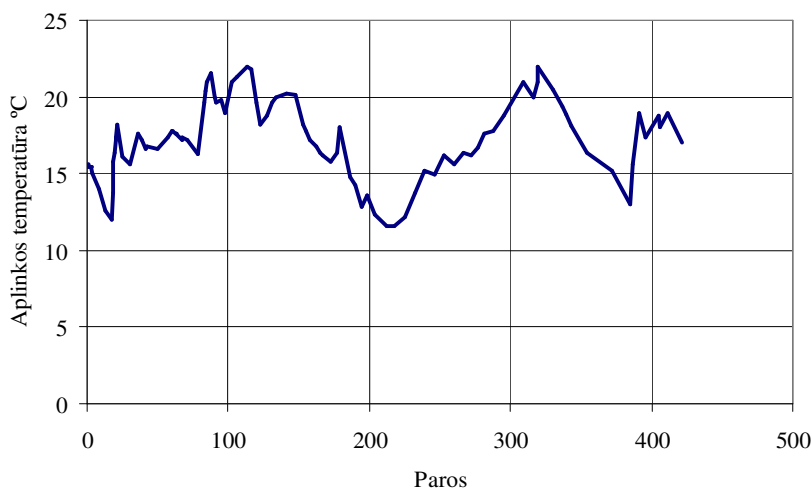
Fig. 3.35. Deformations of compressed concrete. K1 –without compensation of environment influence; K2 – with compensation of environment influence

Aplinkos santykinės drėgmės ir temperatūros kitimas pateiktas 3.36 ir 3.37 paveiksluose.



3.36 pav. Aplinkos santykinės drėgmės kitimas

Fig. 3.36. Variation of environment relative humidity



3.37 pav. Aplinkos temperatūros kitimas
Fig. 3.37. Variation of environment tempreture

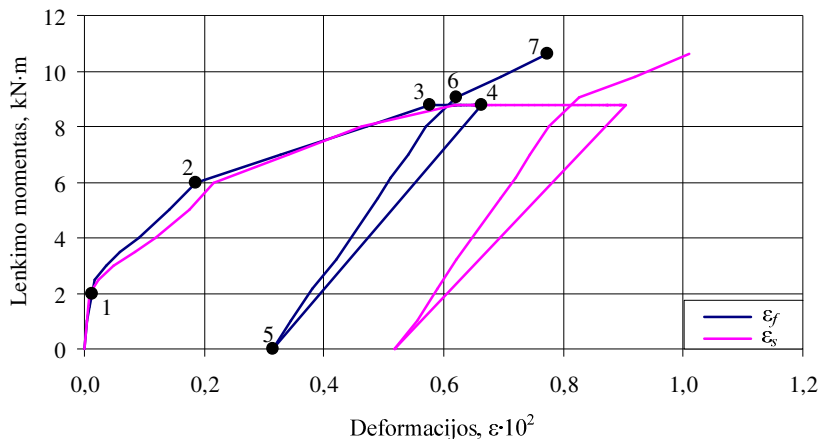
Aplinkos temperatūros ir drėgmės pokyčio kreivės rodo, kad esant 18 °C temperatūrai ir 57 % santykiniai aplinkos drėgmei deformacijų vystymasis atitinka tikrąsias betono deformacijas.

3.5. Sijų elgsena po ilgalaikės apkrovos poveikio

Ilgalaikių tyrimų pabaigoje sijos buvo nukraunamos. Panaikinus išorinę apkrovą 30 parų bėgyje buvo matuojamos sijos sluoksnių deformacijos. Eksperimentiniai tyrimai rodo, kad sijų darbas mažinant išorines apkrovas priklausos nuo veikiosios apkrovos intensyvumo ir pasireiškusių deformacijų ilgalaikio bandymo metu.

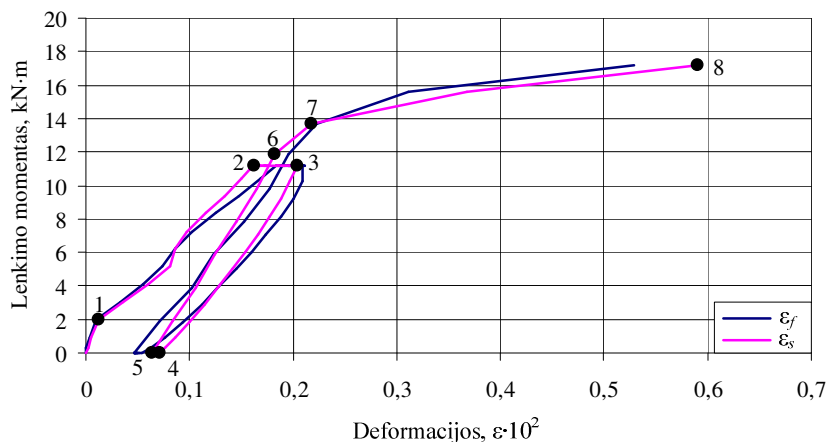
Apkrovos mažinimo metu deformacijos tiek tempiamoje armatūroje, tiek tempiamame kompozite mažėja proporcingai ((3.38 pav.) atkarpa 4–5; (3.39 pav.) atkarpa 3–4; (3.40 pav.) atkarpa 2–3). Silpnai armuotų sijų I.B6.5C_t ir I.B6.6C_t, nukrovus išorinę apkrovą, tempiamuose sluoksniuose grįžtamosios deformacijos nepasireiškia (3.38 pav. taškas 5).

Silpnai armuotose sijose, ilgalaikės apkrovos poveikio metu tempiamoje zonoje, tempiamosios zonos betone įvyksta intensyvus betono pleišėjimas. Šiose sijose, tarp statmenųjų plyšių buvo susiformavę horizontalūs plyšiai, kurie žymiai sumažina betono ir kompozito jungties standumą. Todėl sijose I.B6.5C_t ir I.B6.6C_t nepasireiškia grįžtamosios deformacijos. Tai rodo, kad tempiamosios zonos betono supleišėjimo laipsnis ir charakteris turi didelę įtaką deformacijų vystymuisi po nukrovimo (3.39 pav. atkarpa 4–5 ir 3.40 pav. atkarpa 3–4).



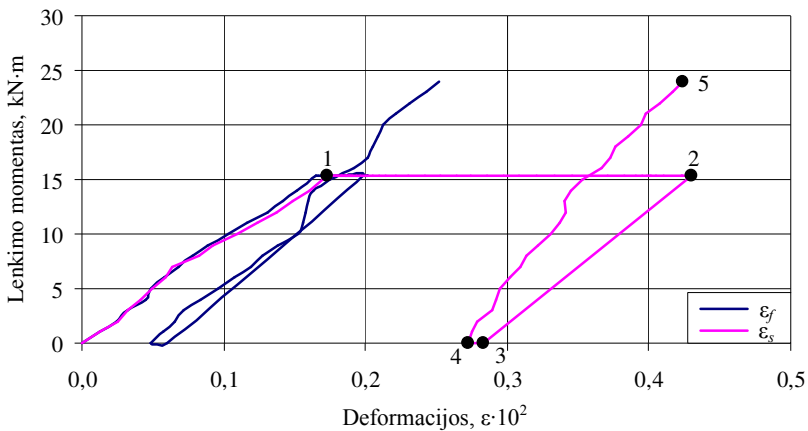
3.38 pav. Sijos I.B6.6C₁ tempiamų sluoksnių deformacijų pasiskirstymas.
 ϵ_f – tempiamo kompozito sluoksnio deformacijos; ϵ_s – tempiamos plieninės
 strypinės armatūros deformacijos

Fig. 3.38. Deformations of tensioned layers of the beam I.B6.6C₁ ϵ_f – layer of a
 tensioned CFRP element; ϵ_s – concrete layer with a tensioned steel bar



3.39 pav. Sijos II.B12.7C₁ tempiamų sluoksnių deformacijų pasiskirstymas.
 ϵ_f – tempiamo kompozito sluoksnio deformacijos; ϵ_s – tempiamos plieninės
 strypinės armatūros deformacijos

Fig. 3.39. Deformations of tensioned layers of the beam II.B12.7C₁ ϵ_f – layer of
 a tensioned CFRP element; ϵ_s – concrete layer with a tensioned steel bar



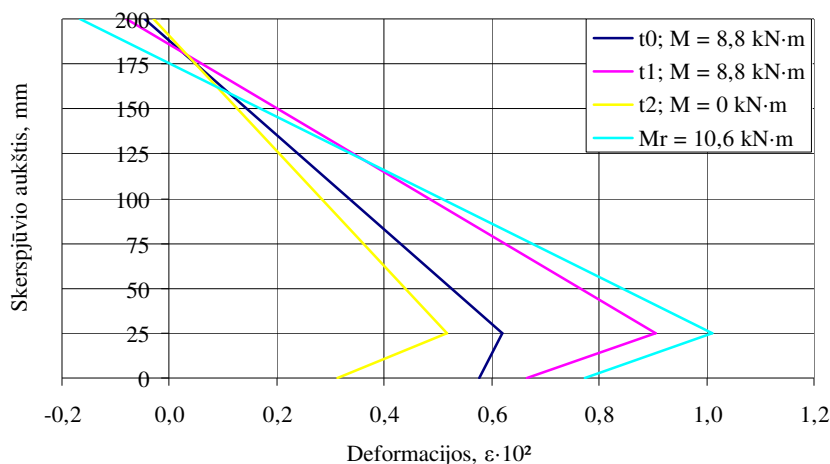
3.40 pav. Sijos I.B14.4C_t tempiamų sluoksnių deformacijų pasiskirstymas.
 ϵ_f – tempiamo kompozito sluoksnis; ϵ_s – tempiamos plieninės strypinės
 armatūros deformacijos

Fig. 3.40. Deformations of tensioned layers of the beam I.B14.4C_t ϵ_f – layer of a tensioned CFRP element; ϵ_s – concrete layer with a tensioned steel bar

Deformacijų pasiskirstymas eksperimentinių sijų skerspjūvyje priklausė nuo betono ir anglies pluošto kompozito jungties standumo (3.41–3.43 pav.).

Tempiamos plieninės strypinės armatūros ir anglies pluošto kompozito deformacijų skirtumas priklausė nuo ilgalaikės apkrovos lygio. Panaikinus ilgalaikę apkrovą pasireiškusios šlyties deformacijos betono ir kompozitinio sluoksnio jungtyje neišnyko (3.44 pav.). Didesnis ilgalaikės apkrovos intensyvumas, sąlygojo didesnes liekamasias šlyties valkšnumo deformacijas. Tai rodo, kad betono ir kompozito jungtis labiau pažeidžiama pasireiškus didesnėms jungties šlyties valkšnumo deformacijoms. Panaikinus ilgalaikės apkrovos poveikį nustatytas kompozitinio sluoksnio poslinkis stiprinamojo elemento atžvilgiu. Sijose, kurių ilgalaikės apkrovos intensyvumas sudarė 43 %, 58 %, 62 % ir 78 % kontrolinių sijų laikomosios galios, pasislinkimas atitinkamai buvo 0,014 mm, 0,045 mm, 0,1 mm ir 0,152 mm. nustatyta, kad labiausiai apkrautų sijų kompozitinio sluoksnio poslinkis 10,9 kartų didesnis už sijų apkrautų 43 % kontrolinių sijų laikomosios galios ir 3,4, 1,5 kartų didesnis negu 58 % ir 62 % apkrovos intensyvumu paveiktų sijų.

Panaikinus ilgalaikės apkrovos poveikį, išorinio anglies pluošto kompozitinio sluoksnio pasislinkimas nevyksta, tai rodo, kad ilgalaikio bandymo metu betono ir anglies pluošto kompozito jungtyje vyko betono pleišėjimas dėl ko negali vykti grįžtamųjų deformacijų procesas.



3.41 pav. Sijos I.B6.5C_t deformacijų pasiskirstymas skerspjūvyje.

t_0 – deformacijų pasiskirstymas pasiekus ilgalaikės apkrovos lygį;

t_1 – deformacijų prieaugis ilgalaikio bandymo pabaigoje; t_2 – deformacijų pasiskirstymas panaikinus ilgalaikę apkrovą; M_r – deformacijų pasiskirstymas prieš pasiekiant sijos laikomąją galią

Fig. 3.41. Distribution of deformations along the section of the beam I.B6.5C_t.

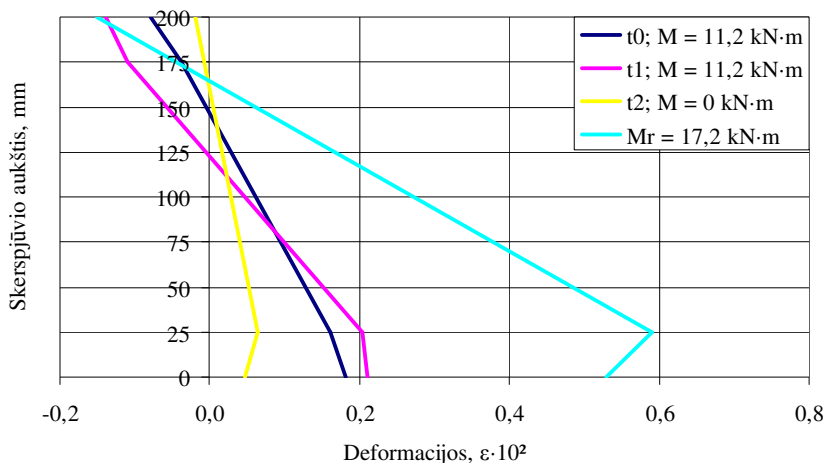
t_0 – istribution of deformations before a long term load intensity is reached;

t_1 – distribution of deformations before the end of a long-term load action;

t_2 – distribution of deformations when beams are unloaded; M_r – distribution of deformations until beam failure

Tyrimai rodo, kad ilgalaikės statinės apkrovos poveikis padidina sijų deformatyvumą ir sumažina sijų laikomąją galią. Sijų įlinkis prieš suirimą yra didesnis negu kontrolinių sijų (3.45–3.47 pav.).

Ilgalaikio bandymo metu nustatyta, kad sijose I.B6.5C_t, I.B6.6C_t per 863 parą įlinkis padidėjo 22,8 %, o sijose I.B14.4C_t, I.B14.5C_t įlinkio prieaugis 1,82 karto mažesnis negu sijose I.B6.5C_t, I.B6.6C_t ir buvo 34,5 %. Sijų I.B6.5C_t, I.B6.6C_t liekamasis įlinkis po išorinės apkrovos panaikinimo sudaro 32,6 % nuo įlinkio, kuris buvo ilgalaikio bandymo pabaigoje. Sijų I.B14.4C_t, I.B14.5C_t liekamasis įlinkis atitinkamai 21,9 %. Nustatyta, kad didesnis ilgalaikės apkrovos intensyvumas sąlygojo didesnius įlinkių prieaugius. Sijose, kuriose ilgalaikės apkrovos intensyvumas siekė 43 % kontrolinių sijų laikomosios galios, įlinkis 427 parų bėgyje padidėjo 44,3 %. Sijose, kuriose ilgalaikės apkrovos intensyvumas siekė 62 % ir 78 % kontrolinių sijų laikomosios galios, įlinkis ilgalaikės apkrovos poveikyje atitinkamai padidėjo 35,3 % ir 37,6 %. Pašalinus išorinę apkrovą, sijų įlinkis pagal atitinkamą apkrovos intensyvumą sudarė 35 %, 27,3 % ir 29,8 % nuo įlinkio ilgalaikio bandymo pabaigoje.



3.42 pav. Sijos II.B12.7C₁ deformacijų pasiskirstymas skerspjūvyje.

t_0 – deformacijų pasiskirstymas pasiekus ilgalaikės apkrovos lygį;

t_1 – deformacijų prieaugis ilgalaikio bandymo pabaigoje; t_2 – deformacijų pasiskirstymas panaikinus ilgalaikę apkrovą; M_r – deformacijų pasiskirstymas prieš pasiekiant sijos laikomąją galią

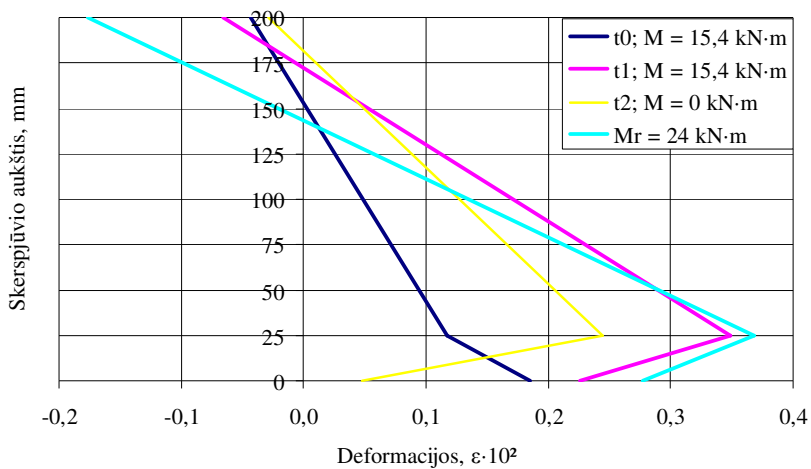
Fig. 3.42. Distribution of deformations along the section of the beam II.B12.7C₁.

t_0 – distribution of deformations before long term load intensity is reached;

t_1 – distribution of deformations before the end of a long-term load action;

t_2 – distribution of deformations when beams are unloaded; M_r – distribution of deformations until beam failure

Sijų I.B6.5C₁, I.B6.6C₁ liekamasis įlinkis didžiausias, kadangi apkrovimo metu šių sijų tempiamoje plieninėje armatūroje buvo viršyti takumo įtempiai. Nustatyta, kad nukrovimo metu įlinkis mažėjo lėčiau, kaip sijas apkraunant. Sijų I.B6.5C₁, I.B6.6C₁ įlinkis mažėjo 0,723 mm/kN·m. Tai buvo 2,48 karto mažesnis įlinkio pokytis, kaip apkrovos didėjimo metu (kreivė tarp 2-3 taškų (3.45 pav.)). Palyginus su įlinkio didėjimo pokyčiu tarp taškų 1-2 ir 0-1 (3.45 pav.), tai įlinkio mažėjimo pokytis atitinkamai buvo 1,12 ir 4,82 karto didesnis. Sijų, kurių armavimo procentas tempiama plienine strypine armatūra $\mu_s = 1,29\%$, įlinkio mažėjimo pokytis 0,246 mm/kN·m. Palyginus su įlinkio didėjimo pokyčiu tarp taškų 1-2 ir 0-1 (3.46 pav.), tai mažėjimo pokytis atitinkamai 1,67 karto mažesnis ir 2,89 karto didesnis. Sijose, kurių armavimo procentas tempiama plienine strypine armatūra $\mu_s = 1,76\%$, įlinkio mažėjimo pokytis 0,19 mm/kN·m. Palyginus su įlinkio didėjimo pokyčiu tarp taškų 0-1 (3.47 pav.), tai mažėjimo pokytis tik 1,05 karto didesnis.



3.43 pav. Sijos I.B14.4C₁ deformacijų pasiskirstymas skerspjūvyje.

t₀ – deformacijų pasiskirstymas pasiekus ilgalaikės apkrovos lygį;

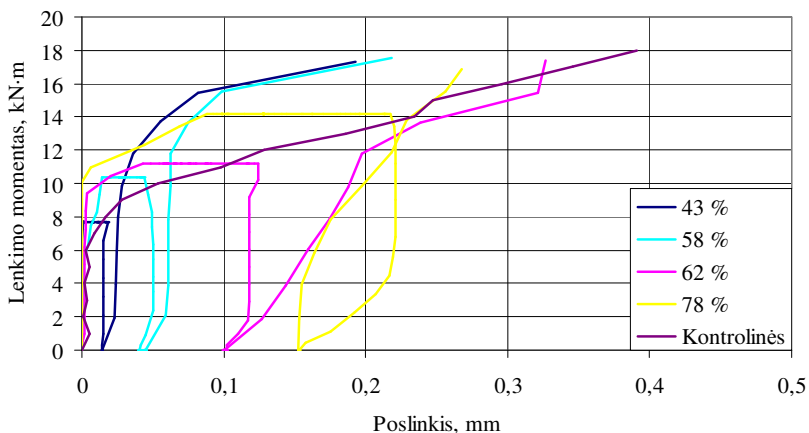
t₁ – deformacijų prieaugis ilgalaikio bandymo pabaigoje; t₂ – deformacijų pasiskirstymas panaikinus ilgalaikę apkrovą; Mr – deformacijų pasiskirstymas prieš pasiekiant sijos laikomąją galią

Fig. 3.43. Distribution of deformations along the section of the beam I.B14.4C₁.

t₀ – distribution of deformations before long term load intensity is reached;

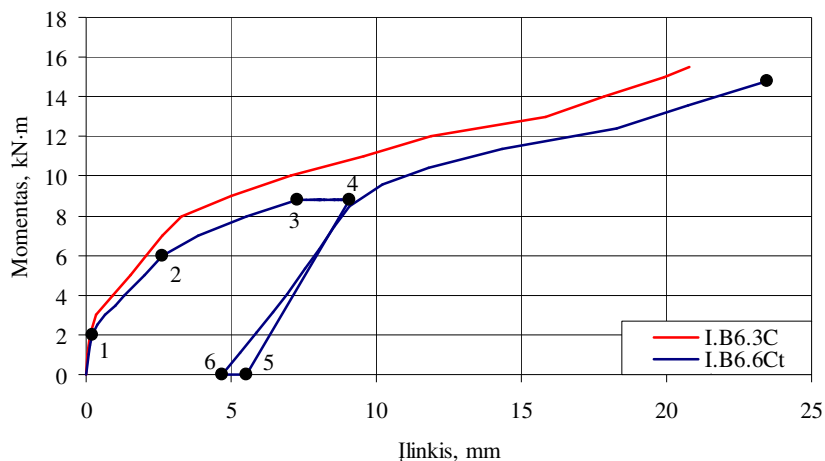
t₁ – distribution of deformations before the end of a long-term load action;

t₂ – distribution of deformations when beams are unloaded; Mr – distribution of deformations until beam failure



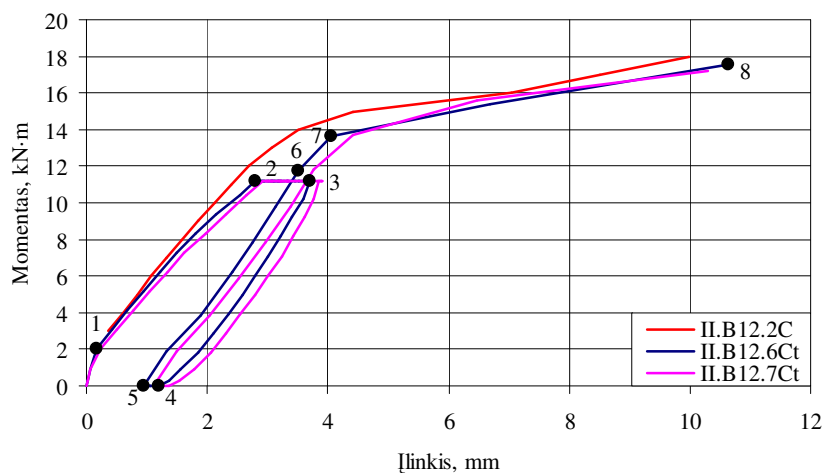
3.44 pav. Horizontalus išorinės armatūros poslinkis iki maksimalios apkrovos, kai buvo panaudotas skirtingas ilgalaikės apkrovos intensyvumas

Fig. 3.44. Evolution of a CFRP element slip according to different long-term load levels until beam failure



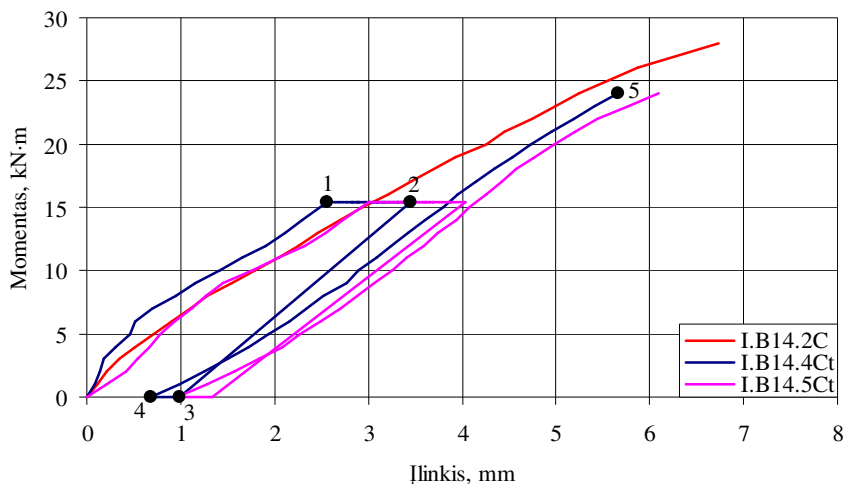
3.45 pav. Sijos I.B6.6C_t įlinkių pasiskirstymas ilgalaikio ir trumpalaikio bandymo metu

Fig. 3.45. Evolution of deflection in a strengthened beam I.B6.6C_t



3.46 pav. Sijų I.B12.6C_t ir I.B12.7C_t įlinkių pasiskirstymas ilgalaikio ir trumpalaikio bandymo metu

Fig. 3.46. Evolution of deflection in strengthened beams II.B12.6C_t and II.B12.7C_t



3.47 pav. Sijų I.B14.4C_t ir I.B14.5C_t įlinkių pasiskirstymas ilgalaikio ir trumpalaikio bandymo metu

Fig. 3.47. Evolution of deflection evolution in strengthened beams I.B14.4C_t and I.B14.5C_t

Eksperimentiniais bandymais nustatyta, kad ilgalaikė apkrova paveiktų sijų suirimo charakteris priklauso nuo santykinio armavimo kiekio plienine strypine armatūra ir anglies pluošto kompozito inkaravimo būdo. Kontrolinių sijų laikomoji galia nustatyta, po to, kai sluoksniuose išmatuotos grįžamosios deformacijos.

Jeigu betono ir kompozito jungtis nepažeista, o anglies pluoštas užleistas už atramų, tai sijos suirimas įvyksta nutrūkus tempiamam kompozitui (sija I.B6.6C_t 3.48 pav.). Sijos I.B6.5C_t betono ir anglies pluošto kompozito jungties standumas nepakankamas, todėl sijos suirimas įvyko anglies pluošto kompozitui praslydus, kai apkrova siekė 72 % sijos I.B6.6C_t laikomosios galios (3.49 pav.).



3.48 pav. Sijos I.B6.6C_t suirimo pobūdis

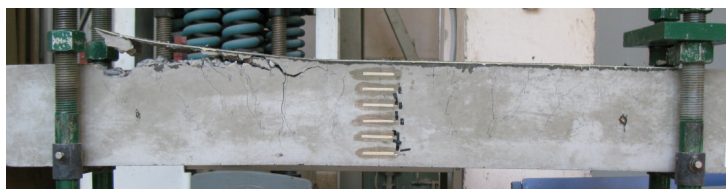
Fig. 3.48. Failure mode of beam I.B6.6C_t



3.49 pav. Sijos I.B6.5C₁ suirimo pobūdis

Fig. 3.49. Failure mode of beam I.B6.5C₁

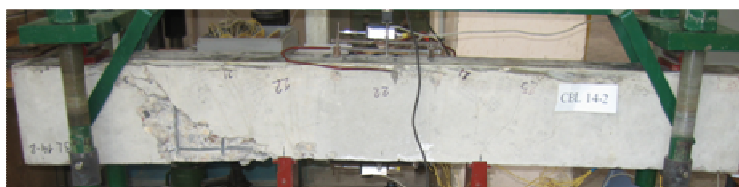
Sijų, kurių kompozitinis sluoksnis priklijuotas iki atramų ir papildomai neinkaruotas suirimo charakteris vienodas. Suirimas įvyksta, kai anglies pluošto kompozito sluoksnis praranda jungtį su betonu ir atitrūksta nuo jo paviršiaus (3.50 pav.).



3.50 pav. Sijos II.B12.2C suirimo pobūdis

Fig. 3.50. Failure mode of beam II.B12.2C

Sijų I.B14.4C₁ ir I.B14.5C₁, kurių tempiama zona armuota dviem Ø14 plieniniais strypais, normalinio pjūvio stiprumas ir betono su anglies pluoštu jungties standumas pilnai neišnaudojamas, todėl suirimas įvyko įstrižajame pjūvyje (3.51 pav.).



3.51 pav. Sijų I.B14.4C₁ ir I.B14.5C₁ suirimo pobūdis

Fig. 3.51. Failure mode of beams I.B14.4C₁ and I.B14.5C₁

Eksperimentiniais bandymais nustatyta, kad silpnai armuotų sijų laikomoji galia po sustiprinimo padidėja iki 2,8 kartų. Šių sustiprintų sijų laikomoji galia po ilgalaikės apkrovos poveikio sumažėjo 14 % palyginus su sustiprintomis sijomis, kurios nebuvo paveiktos ilgalaikės statinės apkrova. Sustiprintų sijų laikomoji galia po ilgalaikės statinės apkrovos poveikio tapo 2,4 karto didesnė negu nesustiprintų sijų laikomoji galia. Sijos I.B6.2_t laikomoji galia po ilgalaikės apkrovos poveikio sumažėjo 23 % palyginus su kontrolinės sijos I.B6.1 laikomąja galia.

Sustiprintų kontrolinių sijų II.B12.1C, II.B12.2C, II.B12.3C laikomoji galia 1,53 karto didesnė negu nesustiprintų sijų. Po ilgalaikių bandymų sustiprintų vidutiniškai armuotų sijų, kurių tempiamoji zona armuota dviem Ø12 plieniniais armatūros strypais, laikomoji galia buvo 1,5 karto didesnė negu nesustiprintų kontrolinių sijų. Ilgalaikės statinės apkrovos poveikis sustiprintų sijų laikomąją galia sumažino nuo 2 % iki 6 %, palyginus su kontrolinėmis sustiprintomis sijomis: II.B12.1C, II.B12.2C, II.B12.3C.

Sustiprintų sijų I.B14.2C ir I.B14.3C laikomoji galia 1,1 karto mažesnė, kaip nesustiprintos kontrolinės sijos. Sijų I.B14.4C_t ir I.B14.5C_t laikomoji galia po ilgalaikės apkrovos poveikio sumažėjo 6 % lyginant su kontrolinėmis sijomis I.B14.2C ir I.B14.3C.

Atlikti ilgalaikiai sustiprintų sijų bandymai rodo, kad betono ir anglies pluošto jungties standumo mažėjimas daro neigiamą įtaką sustiprintų sijų laikomajai galiai.

Sijose, kurių tempiamoje zonoje armavimo procentas plienine strypine armatūra mažiausias, dėl ilgalaikės apkrovos poveikio laikomoji galia sumažėjo daugiausiai. Tai rodo, kad veikianti didelio intensyvumo ilgalaikė apkrova $0,6 M_R$ (M_R – kontrolinių sijų laikomoji galia) labai smarkiai sumažina sustiprintos silpnai armuotos sijos laikomąją galį. Todėl silpnai armuotų sustiprintų sijų apkrovos intensyvumo geriau nedidinti, nes didelis apkrovos intensyvumas sukelia spartesnį betono ir anglies pluošto kompozito jungties standumo mažėjimą. Tempiamoje plieninėje armatūroje pasiekti takumo įtempiai rodo, kad sijos darbas priklauso nuo betono ir anglies pluošto kompozito jungties standumo.

Sustiprintų sijų, kurių tempiamoji zona armuota dviem plieniniais armatūros strypais Ø12 arba Ø14, laikomosios galios sumažėjimas siekia nuo 4 % iki 7 %. Laikomosios galios sumažėjimas gali būti paaiškinamas tuo, kad ilgalaikio bandymo metu tempiamos zonos betono ir kompozito jungtyje vystosi šlyties valkšnumo deformacijos ir anglies pluošto kompozito su betonu jungties standumas mažėja. Kai panaikinamas ilgalaikės apkrovos poveikis, sluoksniuose išlieka liekamosios deformacijos. Pakartotinai apkraunant iki ardančiosios apkrovos, deformacijų prieaugis prasideda nuo liekamųjų reikšmių ir greičiau pasiekiamas deformacijų intensyvumas ties kuriuo įvyksta laikomosios galios praradimas.

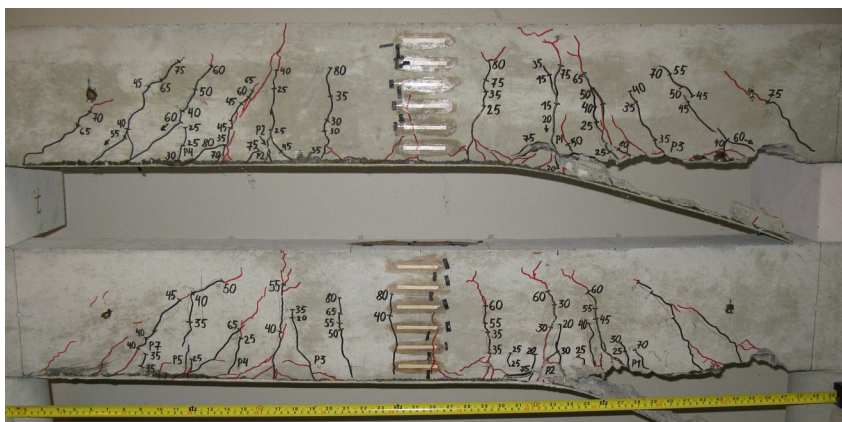
Lyginant su kontrolinėmis sijomis, deformacijos kiekviename pakopos lygyje yra didesnės.

3.6. Plyšių vystymosi charakteris ilgalaikių tyrimų ir po jų metu

Atliekant eksperimentinius bandymus ilgalaikę apkrovą, plyšius galima suskirstyti pagal bandymo etapus:

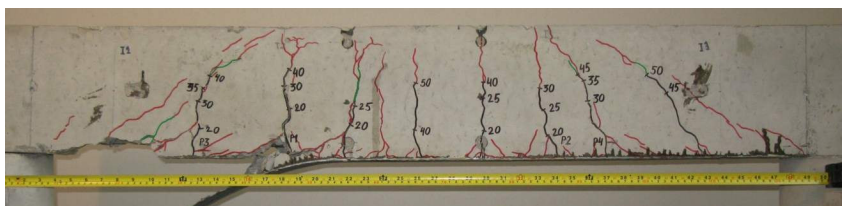
1. Plyšių atsiradimas apkraunant iki pastovios apkrovos lygio.
2. Plyšių vystymasis ilgalaikės apkrovos veikimo laikotarpyje.
3. Plyšių vystymasis ir atsiradimas apkraunant po ilgalaikio bandymo.

Charakteringas plyšių išsidėstymas esant skirtingam ilgalaikės apkrovos lygiui pavaizduotas 3.52–3.58 paveiksluose. Juoda spalva pavaizduoti plyšiai atsiradę iki ilgalaikės apkrovos poveikio. Žalia spalva pažymėti plyšiai, kurie vystėsi veikiant ilgalaikę apkrovą. Raudona spalva pažymėti plyšiai, kurie susidarė siją bandant po ilgalaikio poveikio.



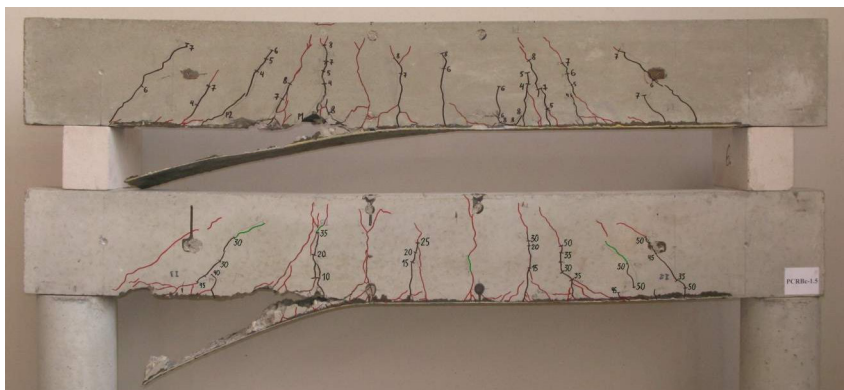
3.52 pav. Sijos II.B12.1C ir II.B12.2C plyšių vystymosi charakteris

Fig. 3.52. Cracked beams II.B12.1C and II.B12.2C after failure



3.53 pav. Sijos II.B12.10SC₁ plyšių vystymosi charakteris

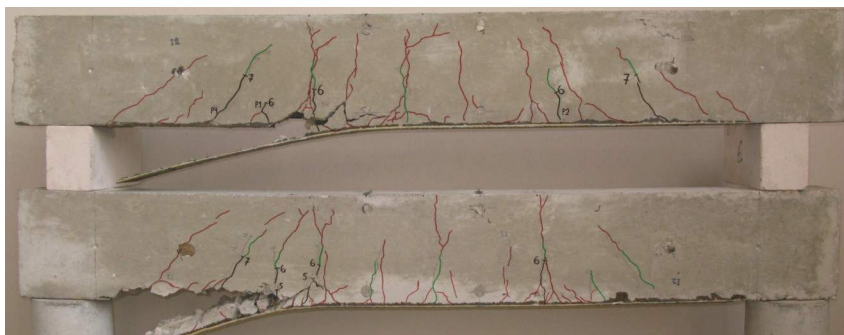
Fig. 3.53. Cracked beam II.B12.10SC₁ after failure



3.54 pav. Sijos II.B12.3C ir II.B12.9SC_t plyšių vystymosi charakteris
Fig. 3.54. Cracked beams II.B12.3C and II.B12.9SC_t after failure

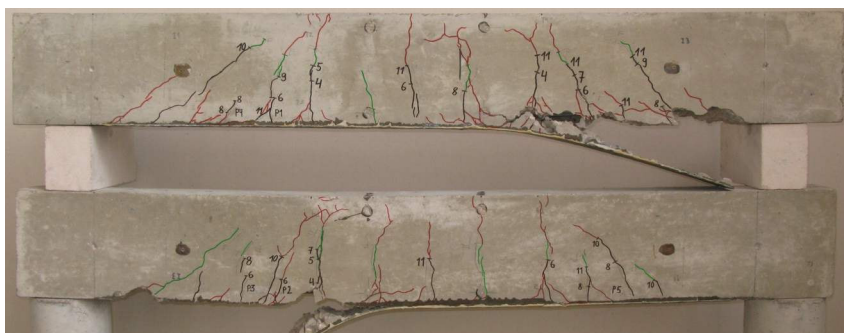
Sustiprinų sijų pleišėjimo charakteris pasižymėjo tuo, kad apkrovas iki pastovios apkrovos lygio vertikalios pobūdžio plyšių vystymasis sustodavo, plyšių vystymasis skersinės jėgos zonoje sulėtėdavo. Ilgalaikio bandymo metu nustatyta, kad plyšių pločio ir ilgio prieaugis didžiausias ties pluošto priklijavimo galais, kadangi vyksta kompozitinio sluoksnio pasislinkimas.

Sijos II.B12.4C_t ilgalaikės apkrovos intensyvumas siekia 43 % nuo kontrolinių sijų laikomosios galios. Plyšiai P1 ir P2 (3.55 pav.) susiformuoja sijos ruožuose, kur veikia skersinės jėgos, kai apkrovos intensyvumas siekia 37 % kontrolinių sijų laikomosios galios. Plyšių plotis atitinkamai buvo 0,05 mm ir 0,025 mm. Įstrižasis plyšys P4 (3.55 pav.) susiformuoja, kai apkrovos intensyvumas pasiekia ilgalaikės apkrovos lygį (7,72 kN·m). Plyšio plotis buvo 0,05 mm. Plyšių P1 ir P2 plotis atitinkamai buvo 0,05 mm ir 0,025 mm. Ilgalaikio bandymo pabaigoje plyšio P1 plotis buvo 0,05 mm, o plyšys P2 užsivėrė. Įstrižo plyšio P4 plotis buvo 0,075 mm. Panaikinus išorinės apkrovos poveikį, matuoti plyšiai užsiveria. Pakartotinai siją apkrovus ir apkrovos intensyvumui siekiant 89 % kontrolinių sijų laikomosios galios, plyšių P1, P2 ir P4 plotis atitinkamai buvo 0,025 mm, 0,05 mm ir 0,15 mm. Apkrovos intensyvumui pasiekus 99,6 % kontrolinių sijų laikomosios galios, kompozitinis sluoksnis atitrūko nuo betono paviršiaus.



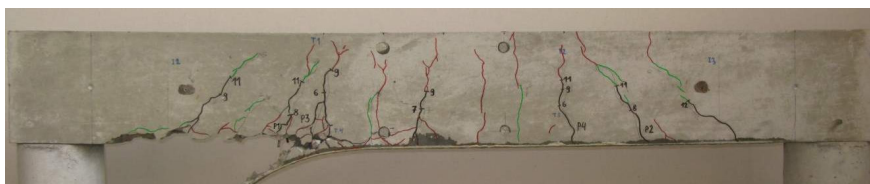
3.55 pav. Sijos II.B12.4C₁ ir II.B12.5C₁ plyšių vystymosi charakteris
Fig. 3.55. Cracked beams II.B12.4C₁ and II.B12.5C₁ after failure

Sijos II.B12.6C₁ ilgalaikės apkrovos intensyvumas siekia 62 % nuo kontrolinių sijų laikomosios galios. Plyšys P1 (3.56 pav.) susiformuoja, kai apkrovos intensyvumas siekia 34,4 % kontrolinių sijų laikomosios galios ir plyšio plotis 0,025 mm. Apkrovos intensyvumui pasiekus 52 % kontrolinių sijų laikomosios galios, plyšio plotis buvo 0,075 mm. Kai apkrovos intensyvumas pasiekia ilgalaikės apkrovos lygį, plyšio plotis sumažėja ir plotis buvo 0,05 mm. Plyšys P4 (3.56 pav.) susiformavo, kai apkrovos intensyvumas siekė 52 % kontrolinių sijų laikomosios galios ir plyšio plotis buvo 0,05 mm. Kai apkrovos intensyvumas siekė 62 % kontrolinių sijų laikomosios galios, plyšio plotis buvo 0,075 mm. Ilgalaikio bandymo metu plyšių pločiai nepasikeičia ir bandymo pabaigoje plyšių P1 ir P4 pločiai atitinkamai buvo 0,05 mm ir 0,075 mm. Panaikinus išorinės apkrovos poveikį plyšių pločiai atitinkamai buvo 0,0125 mm ir 0,0125 mm. Pakartotinai apkrovus plyšių P1 ir P4 plotis, kai apkrovos intensyvumas siekė 89 % kontrolinių sijų laikomosios galios, buvo 0,1 mm. Apkrovos intensyvumui siekiant 97,5 % kontrolinių sijų laikomosios galios, kompozitinis sluoksnis atitrūko nuo betono paviršiaus.

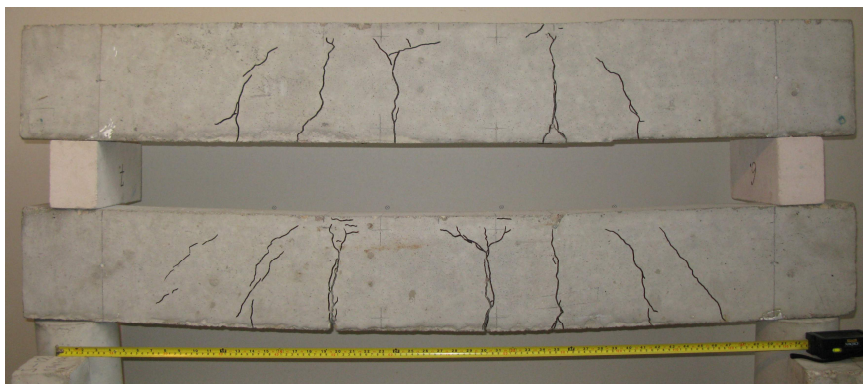


3.56 pav. Sijos II.B12.6C₁ ir II.B12.7C₁ plyšių vystymosi charakteris
Fig. 3.56. Cracked beams II.B12.6C₁ and II.B12.7C₁ after failure

Sijos II.B12.8C_t ilgalaikės apkrovos intensyvumas siekia 78 % nuo kontrolinių sijų laikomosios galios. Plyšiai P3 ir P4 (3.57 pav.) susiformuoja ties sutelktos apkrovos pridėjimo vieta, kai apkrovos intensyvumas siekia 37 % kontrolinių sijų laikomosios galios. Šiame apkrovos lygyje plyšių pločiai mikroskopu neišmatuojami. Apkrovos intensyvumui pasiekus 68 % kontrolinių sijų laikomosios galios, plyšių plotis atitinkamai buvo 0,05 mm ir 0,075 mm. Įstriži plyšiai P1 ir P2 (3.57 pav.) susiformuoja, kai apkrovos intensyvumas siekia 68 % kontrolinių sijų laikomosios galios ir plyšių plotis atitinkamai 0,05 mm ir 0,075 mm. Apkrovos intensyvumui pasiekus ilgalaikės apkrovos lygį, plyšių P3 ir P4 plotis buvo 0,025 mm ir 0,3 mm, o įstrižų plyšių plotis atitinkamai buvo 0,05 mm ir 0,1 mm. Ilgalaikio bandymo pabaigoje plyšių P3 ir P4 pločiai buvo 0,1 mm ir 0,15 mm, įstrižų plyšių P1 ir P2 atitinkamai buvo 0,2 mm ir 0,1 mm. Panaikinus ilgalaikės apkrovos poveikį plyšių P2 ir P3 pločiai mikroskopu neišmatuojami, o plyšių P1 ir P4 pločiai atitinkamai buvo 0,05 mm ir 0,025 mm. Pakartotinai sijas apkrovus iki laikomosios galios praradimo ir apkrovos intensyvumui siekiant 89 % kontrolinių sijų laikomosios galios, statmenųjų plyšių P3 ir P4 pločiai buvo 0,1 mm ir 0,25 mm, o įstrižų plyšių P1 ir P4 pločiai atitinkamai buvo 0,25 mm ir 0,2 mm. Apkrovos intensyvumui pasiekus 93,7 % kontrolinių sijų laikomosios galios, kompozitinis sluoksnis atitrūko nuo betono paviršiaus.

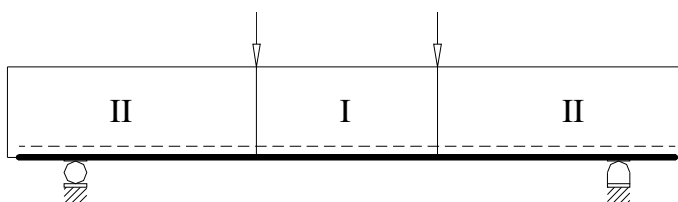


3.57 pav. Sijos II.B12.8C_t plyšių vystymosi charakteris
Fig. 3.57. Cracked beam II.B12.8C_t after failure



3.58 pav. Kontrolinių sijų III.B12.1 ir III.B12.2 plyšių vystymosi charakteris
Fig. 3.58. Cracked beams III.B12.1C_t and III.B12.2C_t after failure

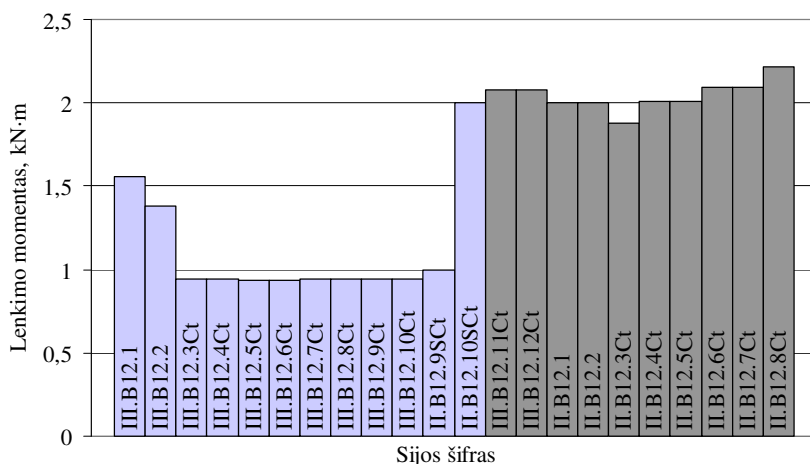
Kiekviename bandymo etape buvo stebimas plyšių vystymosi plotis ties kiekvienos apkrovos pakopa. Ilgalaikio apkrovimo laikotarpyje plyšių pločio vystymasis stebėtas sijose III.B12.C_t. Pagal charakteringą plyšių išsidėstymą ir vystymosi pobūdį siją galima suskirstyti į dvi zonas (3.59 pav.). Pirma zona – gryno lenkimo zona, kur veikia tik svarbiausieji tempimo arba gniuždymo įtempiai. Čia vystosi statmenieji plyšiai. Antra zona – šlyties jėgų veikimo zona, pasižymi tuo, kad čia veikia skersinės jėgos. Šioje zonoje atsiranda įstriži ir statmenieji plyšiai, o apkrovai pasiekus $0,8 M_R$ (M_R – kontrolinių sijų laikomoji galia) atsiranda ir horizontalūs plyšiai. Sijose silpnai armuotose plienine strypine armatūra, horizontalūs plyšiai virš betono ir kompozito jungties atsirasdavo apkrovai siekiant 60 % kontrolinių sijų laikomosios galios.



3.59 pav. Sijos suskirstymas į atskirus ruožus

Fig. 3.59. Beam divided into separate ranges

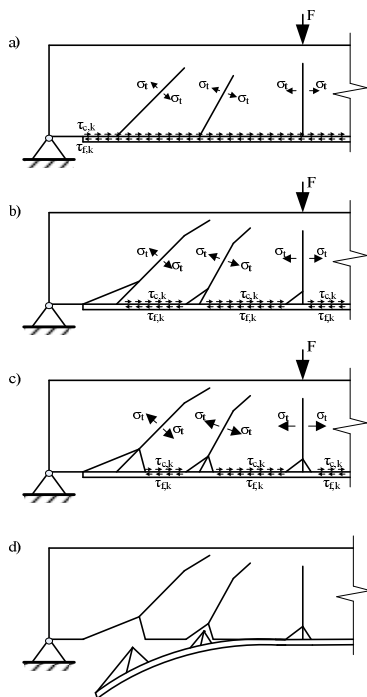
Analizuojant plyšių pasiskirstymo tankį nesustiprintose ir sustiprintose sijose, galima teigti, kad po sustiprinimo pasikeičia įstrižųjų plyšių vystymosi charakteris ties plyšio viršūnėmis. Kompozitinis sluoksnis suvaržo tempiamo betono deformacijas, todėl sijų armuotų kompozitine išorine anglies pluošto armatūra pleišėjimo momentai padidėja iki 100 % (3.60 pav.).



3.60 pav. Sijos pleišėjimo momentų padidėjimas

Fig. 3.60. Cracking moments of experimental beams

Lenkimo zonoje, visose sijose atsirasdavo ne daugiau kaip trys statmenieji plyšiai, tačiau atraminėje zonoje buvo tankesnis įstrižųjų plyšių išsidėstymas. Vidurinėje zonoje plyšių aukščio ir pločio vystymasis labai lėtas palyginus su plyšiais skersinės jėgos zonoje. Dėl suvaržyto tempiamo betono darbo šių plyšių vystymasis stabilizuodavosi ties $0,5\text{--}0,7M_R$ (M_R – kontrolinių sijų laikomoji galia) apkrovos lygiu ir vėl pradėdavo didėti įrašoms esant didesnėms už $0,75M_R$. Daugiausia plyšių ir didžiausio pločio atsiranda atraminėje sustiprintų sijų zonoje. Priežastis, betono ir kompozito jungtyje atsirandančios šlyties jėgos. Todėl pagrindinių tempimo įtempių intensyvumas padidėja ir susiformuoja tankus įstrižųjų plyšių masivas (3.61 pav., b). Šių plyšių ilgio ir pločio prieaugis labai intensyvus ir jis yra žymiai didesnis kaip vidurinėje sijos zonoje. Tempiamame betone šalia kompozitinio sluoksnio ir betono jungties statmenieji plyšiai pereina į horizontalius. Šie plyšiai vystosi į abi puses nuo statmenojo plyšio viršūnės. Tokiu būdu betono ir kompozito jungties standumas sumažėja, toliau vystantis horizontaliems plyšiams pasireiškia žymus kompozitinio sluoksnio pasislinkimas stiprinamojo elemento atžvilgiu. Jeigu kompozitinis sluoksnis papildomai neinkaruotas, tai įvyksta sijos laikomosios galios praradimas, kadangi kompozitinis sluoksnis praradęs jungtį su betonu atplyšta nuo jo (3.61 pav., d).



3.61 pav. Sijos darbas pleišėjimo metu

Fig. 3.61. Evolution of inclined cracks during loading

Dėl kompozitinio sluoksnio sukeliama šlyties deformacijų šis sluoksnis pasislenka sijos horizontalia kryptimi, todėl toks pleišėjimo mechanizmas vystosi link sijos tarpatramio vidurio. Įvykus kompozitinio sluoksnio pasislinkimui vertikalaus plyšio plotis pradeda mažėti ir netgi tam tikrose vietose užsiveria, tačiau įstrižų plyšių plotis pradeda sparčiai vystytis. Tuo galima paaiškinti, mažą statmenųjų plyšių vystymąsi $0,5\text{--}0,7M_R$ (M_R – kontrolinių sijų laikomoji galia) apkrovos veikimo lygyje.

Atlikus plyšių pločio vystymosi analizę, nustatyta, kad plyšiai esantys arčiau gryo lenkimo zonos siaurėja trumpalaikio bandymo metu ir ilgalaikio bandymo metu. Sijos II.B12.4C_t plyšio P2 plotis ilgalaikio bandymo metu sumažėjo ir mikroskopu nebuvo galima nustatyti jo pločio. Sijos II.B12.6C_t plyšio P1 plotis iki buvo pasiektas ilgalaikės apkrovos intensyvumas, sumažėjo 0,025 mm, o ilgalaikio bandymo metu nekito. Sijos II.B12.8C_t plyšio P4 plotis ilgalaikio bandymo metu sumažėjo 0,15 mm. Tokių plyšių siaurėjimo efektą sąlygojo kompozitinio sluoksnio pasislinkimas, kadangi kiekviename apkrovos poveikio etape buvo nustatomas kompozitinio sluoksnio poslinkis stiprinamojo elemento atžvilgiu.

3.7. Trečiojo skyriaus išvados

1. Sijų elgsena ilgalaikio bandymo metu rodo, kad betono ir anglies pluošto kompozito jungtyje vystosi šlyties valksnumo deformacijos, ir mažėja jungties standumas. Todėl kompozitinis sluoksnis slenka stiprinamojo elemento atžvilgiu. Nustatyta, kad sluoksnių pasislinkimas turi įtakos bendram sijos standumui. Atlikus sijų laikomosios galios bandymus nustatyta, kad betono ir anglies pluošto kompozito jungties standumo sumažėjimas turi įtakos sijų laikomosios galios sumažėjimui.

2. Eksperimentiniais bandymais nustatyta, kad anglies pluošto kompozitu sustiprintų silpnai armuotų sijų ($\mu_s = 0,388\%$) laikomoji galia po sustiprinimo padidėja iki 2,8 karto. Šių sustiprintų sijų laikomoji galia po ilgalaikės apkrovos poveikio sumažėjo 14 %. Todėl sustiprintų sijų laikomoji galia po ilgalaikės statinės apkrovos poveikio tapo 2,4 karto didesnė negu nesustiprintų sijų laikomoji galia. Anglies pluošto kompozitu sustiprintų sijų, kurių armavimo plienine strypine armatūra procentas $\mu_s = 1,29\%$, laikomoji galia 1,53 karto didesnė negu analogiškai armuotų nesustiprintų sijų. Po ilgalaikių bandymų šių sijų laikomoji galia buvo 1,5 karto didesnė negu nesustiprintų kontrolinių sijų, nes ilgalaikės statinės apkrovos poveikis sustiprintų sijų laikomąją galia sumažino nuo 2 % iki 6 %, palyginus su kontrolinėmis nesustiprintomis sijomis. Anglies pluošto kompozitu sustiprintų sijų, kurių plienine strypine armatūra armavimo procentas

$\mu_s = 1,76\%$, laikomoji galia po ilgalaikės apkrovos poveikio sumažėjo 6 % palyginus su kontrolinėmis sustiprintomis sijomis.

3. Eksperimentiniai tyrimai rodo, kad sustiprintas sijas veikiant ilgalaikę apkrovą, įlinkio prieaugio intensyvumas priklauso nuo papildomo anglies pluošto kompozitinio sluoksnio inkaravimo metodo. Sustiprintų sijų, kurių kompozitinis sluoksnis papildomai inkaruotas plieninėmis apkabomis įlinkio prieaugis 1,4 karto mažesnis negu sijų kurių kompozitinis sluoksnis papildomai neinkaruotas. Sijų, kurių kompozitinis sluoksnis papildomai inkaruotas anglies pluošto apkabomis, įlinkio prieaugis 1,7 karto mažesnis negu sijų, kurių kompozitinis sluoksnis papildomai inkaruotas prispaustomis plokštelėmis.

4. Nustatyta, kad sustiprintų sijų įlinkio prieaugio intensyvumas priklauso nuo armavimo procento plienine strypine armatūra. Sparčiausias įlinkio prieaugis vyko pirmųjų 100 parų apkrovimo bėgyje. Sustiprintų sijų, kurių tempiamos zonos armavimo procentas strypine plienine armatūra $\mu_s = 1,76\%$, įlinkio prieaugis 2,1 karto mažesnis negu sustiprintų sijų, kurių tempiamos zonos armavimo procentas plienine strypine armatūra $\mu_s = 0,388\%$. Atitinkamai sustiprintų sijų, kurių tempiamos zonos armavimo procentas plienine strypine armatūra $\mu_s = 1,29\%$, sumažėjimas siekia 1,45 karto. Deformacijų pasiskirstymas sluoksniuose rodo, kad gniuždomo betono sluoksnio aukštis didesnis sijose su didesniu armavimo procentu plienine strypine armatūra. Todėl sijų lenkiamasis standumas didesnis ir įlinkių prieaugio intensyvumas mažesnis.

5. Atlikti eksperimentiniai tyrimai parodė, kad ilgalaikės apkrovos intensyvumas įtakoja sijų įlinkio prieaugį. Šimto parų laikotarpyje nuo apkrovimo pradžios, ilgalaikės apkrovos intensyvumui esant 43 %, 58 %, 62 % ir 78 % kontrolinių sijų laikomosios galios, įlinkis padidėjo 32,2 %, 22,5 %, 26,7 % ir 29,3 % nuo pradinių sijų įlinkių. Ilgalaikio bandymo pabaigoje po 430 parų įlinkio prieaugis atitinkamai sudarė 44,3 %, 31,7 %, 34,4 % ir 37,6 % nuo pradinio sijų įlinkio. Sustiprintų sijų, kurių ilgalaikės apkrovos intensyvumas sudarė 78 % kontrolinių sijų laikomosios galios, įlinkio prieaugis pirmų šimto dienų laikotarpyje 1,75 karto didesnis, negu sustiprintų sijų, kurių ilgalaikė apkrova sudarė 43 % kontrolinių sijų laikomosios galios. Sustiprintų sijų, kurių ilgalaikės apkrovos intensyvumas sudarė 62 % kontrolinių sijų laikomosios galios, įlinkio prieaugis 1,25 karto spartesnis.

6. Anglies pluošto kompozito sluoksnio papildomas inkaravimas, didina betono ir kompozito jungties standumą, tuo pačiu sumažina pradinį sijų įlinkį. Todėl ilgalaikę apkrovą veikiamų sijų įlinkio prieaugio intensyvumas yra mažesnis kaip sijose su papildomai neinkaruotu kompozitiniu sluoksniu. Nustatyta, kad efektyviausias anglies pluošto kompozitinio sluoksnio papildomo inkaravimo metodas yra inkaravimas anglies pluošto apkabomis. Esant tokiam inkaravimo metodui sijų įlinkio prieaugis pradiniam šimto parų amžiuje buvo 2,13 karto

mažesnis negu sijų su papildomai neinkaruotu kompozitiniu sluoksniu, 1,79 karto mažesnis palyginus su papildomai inkaruotu prispaustomis plokštelėmis ir 1,2 karto mažesnis palyginus su papildomai inkaruotu plieninėmis apkabomis.

7. Nustatyta, kad intensyviausias kompozitinio sluoksnio pasislinkimas stiprinamojo elemento atžvilgiu vyksta pirmųjų 50 parų laikotarpyje. Didžiausia ilgalaikė apkrova veikiamų sijų kompozitinio sluoksnio pasislinkimas po 50 ilgalaikės apkrovos poveikio parų yra 19, 5,2 ir 1,72 karto didesnis už sijų, kurių ilgalaikės apkrovos intensyvumas atitinkamai sudarė 43 %, 58 %, 62 % kontrolinių sijų laikomosios galios. Tai rodo, kad esant didesniai apkrovos intensyvumui šlyties valkšnumo deformacijos betono ir anglies pluošto kompozito jungtyje vystosi sparčiau.

8. Anglies pluošto kompozitinio sluoksnio papildomas inkaravimas įtakojo kompozitinio sluoksnio horizontalų pasislinkimą tiek ilgalaikės apkrovos, tiek trumpalaikės apkrovos veikimo metu. Kompozitinį sluoksnį papildomai inkaravus anglies pluošto apkabomis, kompozitinio sluoksnio poslinkis po 50 ilgalaikės apkrovos poveikio parų, lyginant su papildomai neinkaruotu kompozito sluoksniu sumažėjo 12,5 karto. Lyginant su sijomis, kuriose kompozitinis sluoksnis papildomai inkaruotas apspaustomis plieninėmis plokštelėmis, poslinkis sumažėjo 7,4 karto. Palyginus su sijomis, kuriose kompozitinis sluoksnis papildomai inkaruotas plieninėmis apkabomis, poslinkis sumažėjo 5,2 karto.

9. Panaikinus ilgalaikės apkrovos poveikį, išorinio anglies pluošto kompozitinio sluoksnio pasislinkimas nevyksta, tai rodo, kad ilgalaikio bandymo metu betono ir anglies pluošto kompozito jungtyje vyko betono pleišėjimas dėl ko negali vykti grįžtamųjų deformacijų procesas. Didesnis ilgalaikės apkrovos intensyvumas, sąlygojo didesnes liekamąsias šlyties valkšnumo deformacijas. Tai rodo, kad betono ir kompozito jungtis labiau pažeidžiama pasireiškus didesnėms jungties šlyties valkšnumo deformacijoms. Nustatyta, kad labiausiai apkrautų sijų kompozitinio sluoksnio liekamasis poslinkis 10,9 karto didesnis už sijų, kurių apkrovos intensyvumas 43 % kontrolinių sijų laikomosios galios ir 3,4, 1,5 kartų didesnis negu sijų, kurių apkrovos intensyvumas 58 % ir 62 % kontrolinių sijų laikomosios galios. Todėl didesnis apkrovos intensyvumas sukelia spartesnę betono ir anglies pluošto kompozito jungties standumo mažėjimą.

Eksperimentinių ir teorinių tyrimų vertinimas

4.1. Eksperimentiniai ir teoriniai sustiprintų sijų įlinkio rezultatai

Pagal antrame skyriuje pasiūlytą sijos įlinkio skaičiavimo metodika atlikti sijos įlinkio skaičiavimai šiuose laiko intervaluose: $t = 0$, $t = 100$, $t = 400$, $t = 800$. Skaičiavimo rezultatai pateikti 4.1 lentelėje, kur nurodytos eksperimentinės įlinkio reikšmės ir eksperimentinio įlinkio santykiai su apskaičiuota įlinkio reikšme.

4.1 lentelė. Eksperimentiniai ir apskaičiuoti sijų įlinkiai laiko intervaluose

Table 4.1. Experimental and calculated values of deflections at different time intervals

	Įlinkis, mm, $t = 0$			Įlinkis, mm, $t = 100$		
Sijos Šifras	$\omega_{v,eksp.}$	$\omega_{v,calc.}$	$\frac{\omega_{v,eksp.}}{\omega_{v,calc.}}$	$\omega_{v,eksp.}$	$\omega_{v,calc.}$	$\frac{\omega_{v,eksp.}}{\omega_{v,calc.}}$
I.B6.5C _t	8,08	8,13	0,994	9,12	9,31	0,980
I.B6.6C _t	7,3		0,898	8,27		0,888
II.B12.4C _t	1,69	1,85	0,914	2,23	2,45	0,910
II.B12.5C _t	1,82		0,984	2,4		0,980
II.B12.6C _t	2,75	2,98	0,922	3,45	3,74	0,922
II.B12.7C _t	2,86		0,960	3,64		0,973
II.B12.8C _t	3,37	3,53	0,955	4,35	4,5	0,967
II.B12.9SC _t	1,87	1,97	0,949	2,36	2,55	0,925
II.B12.10SC _t	1,91		0,970	2,51		0,984
I.B14.4C _t	2,56	3,1	0,826	3,0	3,6	0,833
I.B14.5C _t	3,0		0,968	3,52		0,978
	Įlinkis, mm, $t = 400$			Įlinkis, mm, $t = 800$		
I.B6.5C _t	9,6	9,78	0,982	9,8	10,0	0,980
I.B6.6C _t	8,8		0,900	9		0,900
II.B12.4C _t	2,41	2,72	0,886	–	–	–
II.B12.5C _t	2,62		0,963	–		–
II.B12.6C _t	3,69	3,94	0,937	–	–	–
II.B12.7C _t	3,89		0,987	–		–
II.B12.8C _t	4,62	4,72	0,979	–	–	–
II.B12.9SC _t	2,58	2,81	0,918	–	–	–
II.B12.10SC _t	2,72		0,968	–		–
I.B14.4C _t	3,3	3,96	0,833	3,44	4,18	0,823
I.B14.5C _t	3,87		0,977	4,02		0,962

Sijų įlinkiai, kurios buvo stiprinamos esant apkrovos poveikiui, pateikti 4.2 lentelėje. Pateiktas sijų įlinkių laiko intervalas prasideda nuo sustiprinimo dienos. Sijos III.B12.3SC_t, III.B12.4SC_t, III.B12.5SC_t, III.B12.6SC_t sustiprintos po 30 dienų ilgalaikės apkrovos poveikio laikotarpio. Sijos III.B12.7SC_t, II-I.B12.8SC_t, III.B12.9SC_t, III.B12.10SC_t sustiprintos po 45 dienų ilgalaikės apkrovos poveikio laikotarpio.

4.2 lentelė. Sustiprintų sijų eksperimentiniai ir apskaičiuoti įlinkiai laiko intervale
Table 4.2. Experimental and calculated values at different time intervals

	Įlinkis, mm, $t = 0$			Įlinkis, mm, $t = 100$			Įlinkis, mm, $t = 300$		
Sijos Šifras	$\omega_{v,eksp.}$	$\omega_{v,calc.}$	$\frac{\omega_{v,eksp.}}{\omega_{v,calc.}}$	$\omega_{v,eksp.}$	$\omega_{v,calc.}$	$\frac{\omega_{v,eksp.}}{\omega_{v,calc.}}$	$\omega_{v,eksp.}$	$\omega_{v,calc.}$	$\frac{\omega_{v,eksp.}}{\omega_{v,calc.}}$
III.B12.3SC _t	2,79	3,37	0,881	4,04	4,66	0,867	4,33	5,07	0,854
III.B12.4SC _t	3,28		0,973	4,57		0,981	4,8		0,947
III.B12.5SC _t	2,87	2,97	0,966	3,57	3,86	0,925	3,76	4,0	0,94
III.B12.6SC _t	2,87		0,966	3,61		0,935	3,86		0,965
III.B12.7SC _t	5,09	5,17	0,985	6,12	6,16	0,994	6,4	6,51	0,983
III.B12.8SC _t	4,08		0,789	5,19		0,843	5,4		0,829
III.B12.9SC _t	3,01	3,41	0,883	3,56	4,08	0,873	3,71	4,18	0,888
III.B12.10SC _t	3,25		0,953	3,89		0,953	4,08		0,976
III.B12.11C _t	3,35	3,57	0,938	4,21	4,66	0,903	–	–	–
III.B12.12C _t	3,48		0,975	4,43		0,951	–		–

Remiantis siūloma skaičiavimo metodika atliktas įlinkių skaičiavimo rezultatų palyginimas su kitų tyrėjų atliktų ilgalaikių bandymų tyrimais. Skaičiavimai ir palyginimai pateikti 4.3 lentelėje. Palyginimai atlikti su sijomis, kurios tempiamoje zonoje buvo armuotos skirtingu plieninės armatūros strypų kiekiu, sustiprintos skirtingu kompozito kiekiu ir apkrautos skirtingu ilgalaikės apkrovos lygiu.

Tyrėjų Tan *et al* 2006 gelžbetoninės sijos sustiprintos stiklo pluošto kompozitu. Prie atraminių zonų kompozitinis sluoksnis papildomai inkaruotas stiklo pluošto apkabomis. Lentelėje (4.3) pateiktos sijos GB1-49, GB1-59, GB1-70, GB3-40, GB3-49, GB3-59 tempiamoje zonoje armuotos dviem Ø10 plieninės strypinės armatūros strypais, o gniuždomoje zonoje dviem Ø6 armatūros strypais. Tempiamos ir gniuždomos armatūros takumo įtempiai siekė 525 MPa ir 520 MPa. Sijų, kurių šifras GB1-49, GB1-59, GB1-70, armavimo kompozitu santykinis dydis $\mu_f = 0,64 \%$. Šių sijų ilgalaikės apkrovos intensyvumas sudarė 49 %, 59 %, 70 % kontrolinių sijų laikomosios galios. Sijų, kurių šifras GB3-40, GB3-49, GB3-59, armavimo kompozitu santykinis dydis $\mu_f = 1,92 \%$. Atitinkamai šių sijų ilgalaikės apkrovos intensyvumas sudarė 40 %, 49 %, 59 % kontrolinių sijų laikomosios galios. Kadangi stiklo pluošto kompozitas tempimui

irgi dirba tampriai, todėl skaičiavimo metodika tinkama ir sijoms sustiprintoms stiklo pluošto kompozitu.

Tyrėjų Chami *et al* 2007 gelžbetoninės sijos tempiamoje zonoje sustiprintos vienodu anglies pluošto kompozito kiekiu. Kompozitinis sluoksnis papildomai neinkaruotas. Gniuždomoje zonoje pateiktos sijos armuotos dviem Ø4,7 mm plieninės armatūros strypais, Sija 1M10 tempiamoje zonoje armuota vienu Ø10 plieninės armatūros strypu ir ilgalaikės apkrovos intensyvumas sudarė 63 % kontrolinių sijų laikomosios galios. Sijos 2M10 tempiamoje zonoje armuotos dviem Ø10 plieninės armatūros strypais, o ilgalaikės apkrovos intensyvumas sudarė 65 % ir 73 % kontrolinių sijų laikomosios galios. Sijos 2M15 tempiamoje zonoje armuotos dviem Ø15 plieninės armatūros strypais ir ilgalaikės apkrovos intensyvumas buvo 64 % ir 68 % kontrolinių sijų laikomosios galios.

4.3 lentelė. Sijų įlinkiai tam tikrame laiko intervale

Table 4.3. Calculated deflections of the beams tested by other researchers

		Įlinkis, mm, $t = 0$			Įlinkis, mm, $t = 100$			Įlinkis, mm, $t = 400$		
Tyrėjai ir sijų šifrai		$\omega_{v,eksp.}$	$\omega_{v,calc.}$	$\frac{\omega_{v,eksp.}}{\omega_{v,calc.}}$	$\omega_{v,eksp.}$	$\omega_{v,calc.}$	$\frac{\omega_{v,eksp.}}{\omega_{v,calc.}}$	$\omega_{v,eksp.}$	$\omega_{v,calc.}$	$\frac{\omega_{v,eksp.}}{\omega_{v,calc.}}$
Tan <i>et al</i> 2006	GB1-49	5,5	5,63	0,977	7,6	7,82	0,972	8,1	8,29	0,977
	GB1-59	7,0	7,24	0,967	10,0	10,15	0,985	10,8	12,11	0,892
	GB1-70	8,5	8,7	0,977	11,1	11,8	0,941	12,8	13,38	0,957
	GB3-40	4,5	4,77	0,943	6,1	6,48	0,941	6,9	7,17	0,962
	GB3-49	5,7	5,93	0,961	8,5	8,65	0,983	9,1	9,35	0,973
	GB3-59	7,7	8,02	0,960	10,4	10,6	0,981	11,6	11,94	0,972
Chami <i>et al</i> 2007	1M10	7,9	8,1	0,975	10,5	10,92	0,962	–	–	–
	2M10	7,8	8,12	0,961	10,7	11,05	0,968	12,4	12,81	0,968
	2M10	11,0	11,21	0,981	16,0	16,65	0,961	19,0	19,93	0,953
	2M15	7,1	7,54	0,942	10,4	10,69	0,973	12,3	12,85	0,957
	2M15	8,2	8,4	0,976	12,6	12,89	0,978	15,2	15,89	0,957

Sustiprintų sijų įlinkiai apskaičiuoti pagal Fib bulletin 14 pateikti 4.4 lentelėje. Apskaičiuoti įlinkiai palyginti su eksperimentiniais. Skaičiavimo rezultatai rodo, kad visais atvejais apskaičiuoti įlinkiai pagal Fib bulletin 14 rekomendacijas yra mažesni negu eksperimentiniai. Esant mažiausiam armavimui plienine strypine armatūra, apskaičiuoti rezultatai iki 2,6 karto mažesni negu eksperimentiniai. Sijų, kurių santykinis armavimo dydis plienine strypine armatūra $\mu_s = 1,29\%$ ir $\mu_s = 1,76\%$, apskaičiuoti įlinkiai atitinkamai iki 1,8 ir 1,6 karto mažesni negu eksperimentiniai.

4.4 lentelė. Apskaičiuoti sustiprintų sijų įlinkiai pagal Fib bulletin 14 rekomendacijas
Table 4.4. Calculated deflections according to Fib bulletin 14 design recommendations

	Įlinkis, mm, $t = 0$			Įlinkis, mm, $t = 100$		
Sijos Šifras	$\omega_{v,eksp.}$	$\omega_{v,calc.}$	$\frac{\omega_{v,eksp.}}{\omega_{v,calc.}}$	$\omega_{v,eksp.}$	$\omega_{v,calc.}$	$\frac{\omega_{v,eksp.}}{\omega_{v,calc.}}$
I.B6.5C _t	8,08	3,32	2,43	9,12	3,56	2,56
I.B6.6C _t	7,3		2,2	8,27		2,32
II.B12.4C _t	1,69	1,26	1,34	2,23	1,41	1,58
II.B12.5C _t	1,82		1,44	2,4		1,7
II.B12.6C _t	2,75	1,85	1,49	3,45	2,06	1,67
II.B12.7C _t	2,86		1,55	3,64		1,77
II.B12.8C _t	3,37	2,33	1,45	4,35	2,59	1,7
II.B12.9SC _t	1,87	1,72	1,09	2,36	1,92	1,23
II.B12.10SC _t	1,91		1,11	2,51		1,31
I.B14.4C _t	2,56	2,03	1,26	3,0	2,31	1,3
I.B14.5C _t	3,0		1,48	3,52		1,52
	Įlinkis, mm, $t = 400$			Įlinkis, mm, $t = 800$		
I.B6.5C _t	9,6	3,71	2,59	9,8	3,85	2,55
I.B6.6C _t	8,8		2,37	9		2,34
II.B12.4C _t	2,41	1,52	1,59	–	–	–
II.B12.5C _t	2,62		1,72	–		–
II.B12.6C _t	3,69	2,22	1,66	–	–	–
II.B12.7C _t	3,89		1,75	–		–
II.B12.8C _t	4,62	2,79	1,66	–	–	–
II.B12.9SC _t	2,58	2,06	1,25	–	–	–
II.B12.10SC _t	2,72		1,32	–		–
I.B14.4C _t	3,3	2,5	1,32	3,44	2,67	1,29
I.B14.5C _t	3,87		1,55	4,02		1,51

Nustatyta, kad sustiprintų sijų, kurių armavimo procentas tempiama plienine strypine armatūra $\mu_s = 0,388 \%$, apskaičiuoti įlinkiai pagal FIB bulletin 14 rekomendacijas, nuo 2,4 iki 2,6 karto mažesni negu apskaičiuoti pagal siūlomą sudėtinių strypų metodiką. Sijų, kurių armavimo procentas plienine strypine armatūra $\mu_s = 1,29 \%$ ir $\mu_s = 1,78 \%$, apskaičiuoti įlinkiai pagal FIB bulletin 14 rekomendacijas atitinkamai 1,8 ir 1,6 karto mažesni.

Sijų, kurių ilgalaikės apkrovos intensyvumas siekė 43 %, 58 %, 62 % ir 78 % kontrolinių sijų laikomosios galios, apskaičiuoti įlinkiai pagal FIB bulletin 14 rekomendacijas atitinkamai 1,8, 1,4, 1,8 ir 1,7 karto mažesni negu įlinkiai apskaičiuoti pagal siūlomą sudėtinių strypų metodiką.

4.2. Eksperimentinės ir apskaičiuotos sijų laikomosios galios palyginimas

Pagal siūlomą metodiką atlikti kontrolinių sijų ir sijų paveiktų ilgalaikė apkrova laikomosios galios skaičiavimai. Trumpalaikė apkrova veikiamų sijų skaičiavimas vertina betono ir anglies pluošto kompozito jungties standumo ir papildomo inkaravimo įtaką sijos laikomajai galiai. Skaičiuojant sijos laikomąją galią esant ilgalaikės apkrovos poveikiui, papildomai vertinama betono ir anglies pluošto kompozito jungties šlyties valkšnumo deformacijų įtaka. Taip pat vertinama supleišėjusio tempiamo betono ruožo gryno lenkimo zonoje įtaka, gelžbetoninio ir anglies pluošto elemento tarpusavio sąveikai. Skaičiavimo rezultatai pateikti 4.5 lentelėje. Šioje lentelėje $M_{R,t_0,exp}$ – kontrolinių sijų eksperimentinė laikomoji galia; $M_{R,t_0,calc}$ – apskaičiuota kontrolinių sijų laikomoji galia; $M_{R,t_1,exp}$ – sustiprintų sijų, kurios buvo paveiktos ilgalaikė statine apkrova, laikomoji galia; $M_{R,t_1,calc}$ – apskaičiuota sustiprintų sijų laikomoji galia po ilgalaikės apkrovos poveikio.

Sustiprintų sijų laikomosios galios skaičiavimai rodo, kad mažiausiai tempiamoje zonoje armuotų plienine strypine armatūra sijų apskaičiuotoji laikomoji galia iki 27 % didesnė negu eksperimentinė. Šių sijų laikomoji galia po ilgalaikės apkrovos poveikio sumažėja iki 32 % palyginus su kontrolinių sijų laikomąja galia. Tai yra didžiausias laikomosios galios sumažėjimas palyginus su kitomis sijomis. Ilgalaikės apkrovos intensyvumas 1,7 karto buvo didesnis negu nesustiprintos kontrolinės sijos laikomoji galia. Šlyties įrašos labiau pažeidžia betono ir kompozito jungtį ir jungties dabas tampa nepatikimas. Todėl sustiprintų sijų ilgalaikės apkrovos intensyvumą rekomenduoju nedaryti didesnį, negu nesustiprintos sijos laikomoji galia. Siūloma metodika tikslesnė esant vidutiniam armavimo procentui, kai skirtumas sudaro nuo 1 % iki 12 %.

4.5 lentelė. Eksperimentinės ir apskaičiuotos sijų laikomosios galios palyginimas
Table 4.5. Comparison of the experimental and the calculated load carrying capacity

Šifras	$M_{R,t_0,exp}$, kN·m	$M_{R,t_0,calc}$, kN·m	$M_{R,t_1,exp}$, kN·m	$M_{R,t_1,calc}$, kN·m	$\frac{M_{calc,t_0}}{M_{exp,t_0}}$	$\frac{M_{calc,t_1}}{M_{exp,t_1}}$
I.B6.1	5,20	–	–	–	–	–
I.B6.2t	4,0	–	–	–	–	–
I.B6.3C	15,50	15,40	–	–	0,994	–
I.B6.4C	14	15,40	–	–	1,1	–
I.B6.5C _t	–	–	10,61	14,6	–	1,38
I.B6.6C _t	–	–	14,76	14,6	–	0,990
II.B12.1C	18,0	17,34	–	–	0,963	–
II.B12.2C	18,0	17,34	–	–	0,963	–
II.B12.3C	17,75	17,42	–	–	0,981	–
II.B12.4C _t	–	–	17,92	17,07	–	0,953
II.B12.5C _t	–	–	16,73	17,07	–	1,02
II.B12.6C _t	–	–	17,55	17,07	–	0,973
II.B12.7C _t	–	–	17,22	17,07	–	0,991
II.B12.8C _t	–	–	16,87	17,07	–	1,01
II.B12.9SC _t	–	–	17,49	17,07	–	0,976
II.B12.10SC _t	–	–	17,57	17,07	–	0,972
III.B12.5	11,62	–	–	–	–	–
III.B12.6	11,78	–	–	–	–	–
I.B14.1	28,5	–	–	–	–	–
I.B14.2C	17,5	27,70	–	–	1,58	–
I.B14.3C	28,00	27,70	–	–	0,989	–
I.B14.4C _t	–	–	24,00	26,90	–	1,12
I.B14.5C _t	–	–	24,00	26,90	–	1,12

4.3. Sustiprintų sijų laikomosios galios patikimumo vertinimas

Nagrinėjama gelžbetoninės sijos, sustiprintos anglies pluošto kompozitu, statmenojo pjūvio atsparumo atsarga. Statmenojo pjūvio skaičiavimo metodikoje įvertintas betono ir kompozito jungties standumas. Ilgalaike statine apkrova veikiamų sustiprintų sijų, laikomosios galios skaičiavimo metodikoje vertinamas šlyties valkšnumo deformacijų poveikis betono ir kompozito jungties standumo mažėjimui.

Gelžbetoninės sijos tempiamoje zonoje sustiprintos anglies pluošto kompozitu, atsparumo atsarga:

$$Z = R - E. \quad (4.1)$$

Sijos statmenojo pjūvio stiprumas R , įvertinant kompozitinio sluoksnio pasislinkimą stiprinamojo elemento atžvilgiu, nustatomas pagal išraišką:

$$R = M_R = M_{c,r} + T_{c,k} \cdot a + \Delta R. \quad (4.2)$$

Čia ΔR – stiprinamojo elemento vidinių jėgų paklaidos.

Veikiantis poveikio efektas E , tai sutelktinės apkrovos poveikis. Pagal apkrovimo schemą:

$$E = F \cdot l_1 + \Delta E \quad (4.3)$$

čia ΔE – sijos apkrautos dviem sutelktom apkrovom, apkrovos apskaičiavimo formulės paklaida.

Sijos atlaikomoji galia R , priklauso nuo sijos medžiagų mechaninių charakteristikų ir skerspjūvio parametrų atsiktinių dydžių.

$$R = r(f_c; E_c; f_s; f_{sc}; d; T_{c,k}). \quad (4.4)$$

Atsižvelgiant į minėtus dydžius, stiprumo išraiška įvertinus kompozitinio sluoksnio pasislinkimą stiprinamojo elemento atžvilgiu:

$$\begin{aligned}
 R = M_R = M_{c,r} + T_{c,k} \cdot a + \Delta R = \\
 f_c \cdot b \cdot d \cdot \left(\sqrt{\mu^2 + \frac{\mu_h}{d}} - \mu \right) \left(d - \frac{d \cdot \left(\sqrt{\mu^2 + \frac{\mu_h}{d}} - \mu \right)}{2} \right) + \\
 f_{sc} \cdot A_{s2} (d - a_{s2}) + \left[\frac{F \cdot a \cdot l_1}{\gamma \cdot E_{eff} \cdot I_{eff}} \left(1 - \frac{\sinh(\lambda \cdot l_1)}{\lambda \cdot l_1 \cdot \cosh\left(\lambda \cdot \frac{l_s}{2}\right)} \right) \right] a + \Delta R.
 \end{aligned} \tag{4.5}$$

Sijos statmenojo pjūvio patikimumas:

$$P = 1 - \alpha. \tag{4.6}$$

Čia α – koeficientas nustatomas pagal matavimo kiekių skaičių ir patikimumo indeksą β :

$$\beta = \frac{\mu_z}{\sigma_z}. \tag{4.7}$$

Formulėje 4.7 μ_z – sijos statmenojo pjūvio stiprumas pagal vidutines medžiagų atsparumo charakteristikas:

$$\begin{aligned}
 \mu_z = \mu_{f_c} \cdot b \cdot \mu_d \cdot \left(\sqrt{\mu^2 + \frac{\mu_h}{d}} - \mu \right) \left(d - \frac{d \cdot \left(\sqrt{\mu^2 + \frac{\mu_h}{d}} - \mu \right)}{2} \right) + \\
 f_{sc} \cdot A_{s2} (d - a_{s2}) + \left[\frac{F \cdot a \cdot l_1}{\gamma \cdot E_{eff} \cdot I_{eff}} \left(1 - \frac{\sinh(\lambda \cdot l_1)}{\lambda \cdot l_1 \cdot \cosh\left(\lambda \cdot \frac{l_s}{2}\right)} \right) \right] a + \Delta R.
 \end{aligned} \tag{4.8}$$

Parametras σ_z :

$$\sigma_z = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial z(\mu_X)}{\partial X_i} \sigma_{X_i} \right)^2} =$$

$$\left(\left(\frac{\partial z(\mu_{fs})}{\partial f_s} \sigma_{fs} \right)^2 + \left(\frac{\partial z(\mu_{fsc})}{\partial f_{sc}} \sigma_{fsc} \right)^2 + \left(\frac{\partial z(\mu_d)}{\partial d} \sigma_d \right)^2 + \right. \quad (4.9)$$

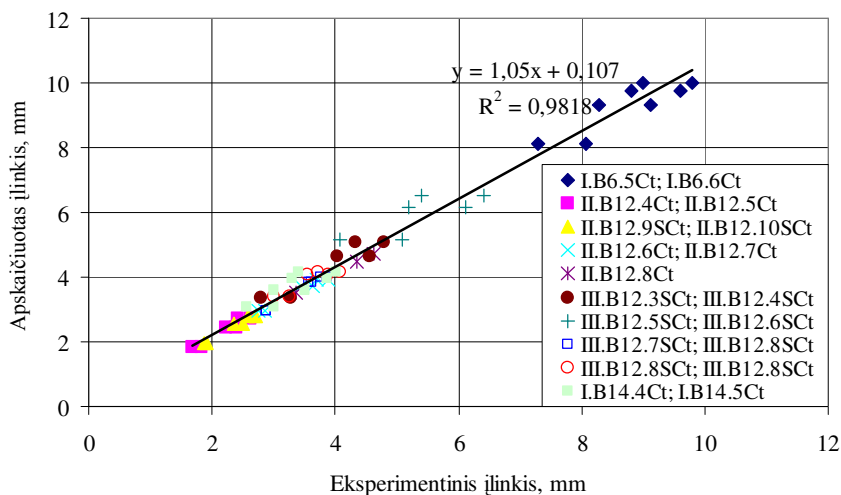
$$\left. \left(\frac{\partial z(\mu_{fc})}{\partial f_c} \sigma_{fc} \right)^2 + \left(\frac{\partial z(\mu_{ff})}{\partial f_f} \sigma_{ff} \right)^2 + \left(\frac{\partial z(\mu_{Ec})}{\partial E_c} \sigma_{Ec} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}}.$$

Atlikus sustiprintų sijų laikomosios galios patikimumo vertinimą, nustatyta patikimumo reikšmė $P = 0,9999$. Todėl per numatytą 800 parų laikotarpį iš 10000 sijų gali įvykti 1 ribinis būvis.

4.4. Eksperimentinių ir teorinių sijų įlinkių ir laikomosios galios palyginimai

Sustiprintų sijų įlinkių analizė rodo, kad sijų be papildomo kompozitinio sluoksnio inkaravimo apskaičiuoti įlinkiai iki 15 % didesni negu eksperimentiniai. Sijose, kuriose kompozitinis sluoksnis papildomai inkaruotas apspausa plokšte apskaičiuoti įlinkiai iki 21 % didesni negu eksperimentiniai. Sijose, kuriose kompozitinis sluoksnis papildomai inkaruotas metalinėmis arba anglies pluošto apkabomis apskaičiuoti įlinkiai atitinkamai apie 8 % ir 13 % didesni negu eksperimentiniai.

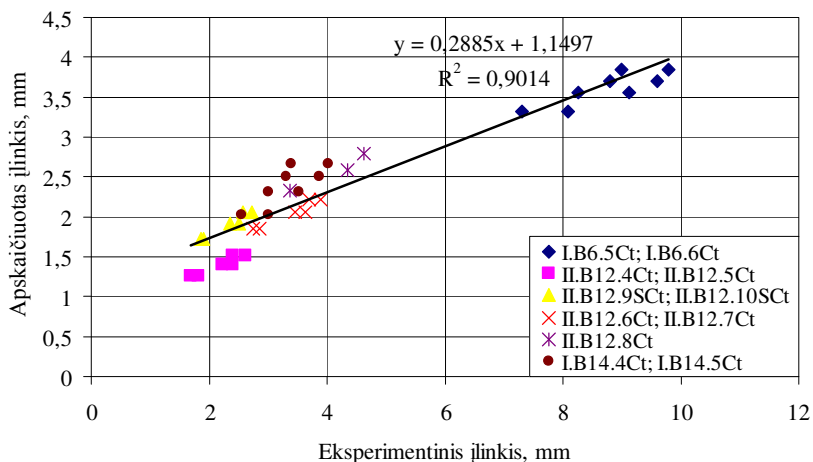
Sustiprintų sijų, kurių santykinis armavimo dydis tempiama plienine strypine armatūra $\mu_s = 0,388 \%$, apskaičiuotas įlinkis, įvairiuose laiko perioduose iki 11 % didesnis negu eksperimentinis. Sijų, kurių santykinis armavimo dydis tempiama plienine strypine armatūra $\mu_s = 1,29 \%$ ir $\mu_s = 1,76 \%$, apskaičiuotas įlinkis atitinkamai iki 14 % ir 18 % didesnis negu eksperimentinis įlinkis. Visų apskaičiuotų ir eksperimentinių sustiprintų sijų įlinkių palyginimas pateiktas 4.1 paveiksle. Pateiktame paveiksle pavaizduota regresijos linija – įlinkių vidurkių linija. Determinacijos koeficientas parodo, kad regresijos lygtis atitinka 98,2 % atvaizduotų sijų įlinkių reikšmių.



4.1 pav. Sustiprintų sijų apskaičiuotų įlinkių, pagal siūlomą skaičiavimo metodiką, palyginimas su eksperimentiniais įlinkiais

Fig. 4.1. Comparison of the calculated deflections values with the experimentally determined value

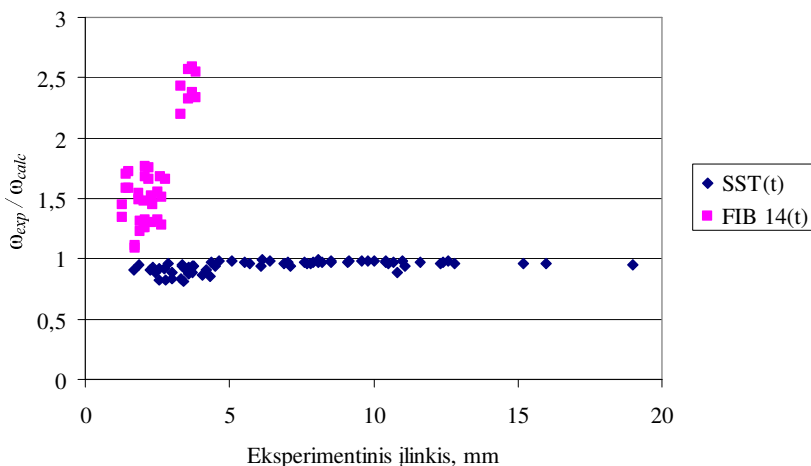
Apskaičiuotų įlinkių pagal Fib bulletin 14 rekomendacijas palyginimas su eksperimentiniais įlinkiais pateiktas 4.2 paveiksle. Determinacijos koeficientas rodo, kad 90,14 % įlinkio reikšmių atitinka regresinę lygtį. Tačiau regresijos kreivės lygties koeficientas rodo, kad apskaičiuoti įlinkiai vidutiniškai 70 % mažesni negu eksperimentiniai įlinkiai.



4.2 pav. Sustiprintų sijų apskaičiuotų įlinkių, pagal Fib bulletin 14, palyginimas su eksperimentiniais įlinkiais

Fig. 4.2. Comparison of the calculated deflections by Fib bulletin 14 design recommendations with the experimentally determined ones

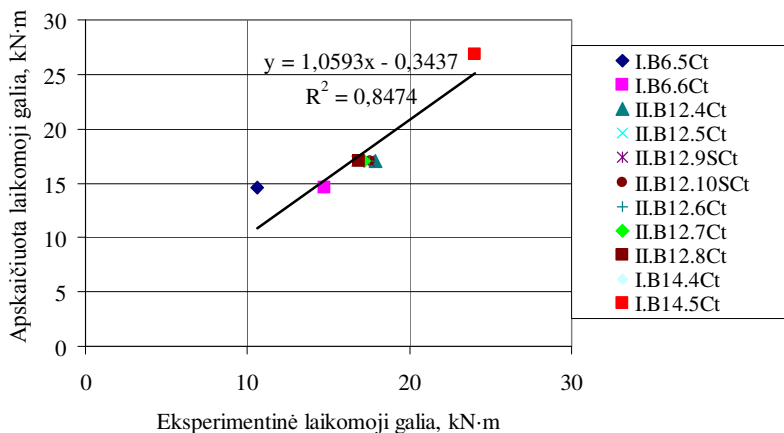
Sustiprintų sijų apskaičiuotų įlinkių pagal siūlomą sudėtinių strypų ir Fib bulletin 14 projektavimo rekomendacijų metodiką palyginimas pateiktas 4.3 pav.



4.3 pav. Sustiprintų sijų apskaičiuotų įlinkių pagal siūlomą sudėtinių strypų teoriją ir pagal projektavimo rekomendacijų *Fib bulletin 14* palyginimas

Fig. 4.3. Comparison of the deflections calculated by the proposed methodology with the calculated values in design recommendations *Fib bulletin 14* calculated values

Sustiprintų sijų apskaičiuotos lenkiamosios galios palyginimas su eksperimentine, pateiktas 4.4 paveiksle



4.4 pav. Sustiprintų sijų apskaičiuotos ir eksperimentinės laikomosios galios palyginimas

Fig. 4.4. Comparison of the calculated and the experimentally determined load carrying capacity

Apskaičiuota laikomoji galia vidutiniškai 6 % didesnė negu nustatyta bandymo metu. Tačiau determinacijos koeficientas rodo, kad regresijos lygtis atitinka tik 85 % atvaizduotų laikomosios galios reikšmių. Silpnai armuotų sustiprintų sijų didelis laikomosios galios sumažėjimas lėmė tokį neatitikimą.

Atlikta sustiprintų sijų apskaičiuotų įlinkių analizė parodė, kad siūloma skaičiavimo metodika paremta sudėtinių strypų teorija tinkama gelžbetoninių sijų sustiprintų anglies pluošto kompozitu įlinkių skaičiavimui.

4.5. Ketvirtojo skyriaus išvados

1. Sustiprintų sijų, kurių santykinis armavimo dydis tempiama plienine strypine armatūra $\mu_s = 0,388 \%$, apskaičiuotas įlinkis įvairiuose laiko perioduose iki 11 % didesnis negu eksperimentinis. Sijų, kurių santykinis armavimo dydis tempiama plienine strypine armatūra $\mu_s = 1,29 \%$ ir $\mu_s = 1,76 \%$, apskaičiuotas įlinkis atitinkamai iki 14 % ir 18 % didesnis negu eksperimentinis įlinkis.

2. Sijų be papildomo kompozitinio sluoksnio inkaravimo apskaičiuoti įlinkiai iki 15 % didesni negu eksperimentiniai. Sijose, kuriose kompozitinis sluoksnis papildomai inkaruotas apspausa plokšte, apskaičiuoti įlinkiai iki 21 % didesni negu eksperimentiniai. Sijose, kuriose kompozitinis sluoksnis papildomai inkaruotas metalinėmis arba anglies pluošto apkabomis, apskaičiuoti įlinkiai atitinkamai apie 8 % ir 13 % didesni negu eksperimentiniai.

3. Sustiprintų sijų laikomosios galios skaičiavimai rodo, kad sijų, kurių santykinis armavimo dydis tempiama plienine strypine armatūra $\mu_s = 0,388 \%$, apskaičiuotoji laikomoji galia iki 27 % didesnė negu eksperimentinė. Siūloma metodika tikslesnė esant vidutiniam armavimo procentui, kai skirtumas sudaro nuo 1 % iki 12 %.

4. Atlikus sustiprintų sijų laikomosios galios patikimumo vertinimą, nustatyta patikimumo reikšmė $P=0,9999$. Todėl per numatytą 800 parų laikotarpį iš 10000 sijų gali įvykti 1 ribinis būvis.

5. Sustiprintų sijų (iš kitų tyrėjų tyrimų) apskaičiuoti įlinkiai pagal siūlomą metodiką nebuvo didesni daugiau kaip 11%. Kai ilgalaikės apkrovos intensyvumas sudarė 49% 70% kontrolinių sijų laikomosios galios, tai apskaičiuotas įlinkis iki 11% didesnis negu eksperimentinis.

Bendrosios išvados

1. Pasiūlyta lenkiamų gelžbetoninių konstrukcijų sustiprintų anglies pluošto kompozitu įlinkių skaičiavimo metodika, kuri įvertina gelžbetoninio ir kompozitinio elemento jungties standumą veikiant ilgalaikiai apkrovai. Pasiūlyta metodika leidžia apskaičiuoti jungties standumą atsižvelgiant į jungties šlyties valkšnumo deformacijas. Įvertinama naujai atsirandančių statmenųjų plyšių įtaka sustiprintos sijos lenkiamajam standumui.

2. Pasiūlyta sustiprintos gelžbetoninės sijos laikomosios galios skaičiavimo metodika naujai įvertinanti sluoksnių jungties standumą. Skaičiuojant sijų laikomąją galią siūloma įvertinti šlyties valkšniųjų deformacijų įtaką.

3. Eksperimentiniais tyrimais patvirtinta, kad betono ir anglies pluošto kompozito jungtyje vystosi šlyties valkšnumo deformacijos, ir mažėja jungties standumas. Atlikus sijų laikomosios galios eksperimentinius tyrimus nustatyta, kad betono ir anglies pluošto kompozito jungties standumo mažėjimas sijų laikomąją galią sumažino iki 32 %.

4. Eksperimentiniai tyrimai rodo, kad įlinkio prieaugio intensyvumas priklauso nuo papildomo anglies pluošto kompozitinio sluoksnio inkaravimo metodo ir apkrovos veikimo intensyvumo. Sustiprintų sijų, kurių ilgalaikės apkrovos intensyvumas sudarė 78 %, 62 % ir 43 % kontrolinių sijų laikomosios galios, įlinkis pirmų šimto parų ilgalaikės apkrovos veikimo laikotarpyje padidėjo atitinkamai 29,3 %, 26,7 % ir 32,2 %.

5. Anglies pluošto kompozito papildomas inkaravimas, didina betono ir kompozito jungties standumą, tuo pačiu sumažina pradinį sijų įlinkį. Nustatyta, kad efektyviausias kompozitinio sluoksnio papildomo inkaravimo metodas yra anglies pluošto apkabos. Kai kompozitinis sluoksnis papildomai inkaruotas anglies pluošto apkabomis, sijų įlinkio prieaugis pradiniame šimto parų ilgalaikės apkrovos veikimo laikotarpyje atitinkamai buvo 2,13; 1,79 ir 1,2 karto mažesnis lyginant su sijomis, kuriose kompozitinis sluoksnis papildomai neinkaruotas arba papildomai inkaruotas plieninėmis plokštelėmis, arba papildomai inkaruotas plieninėmis apkabomis.

6. Anglies pluošto kompozitu sustiprintų sijų teoriniai ilgalaikiai įlinkiai apskaičiuoti pagal siūlomą metodiką 1 % – 18 % didesni už eksperimentinius. Kai anglies pluošto kompozitinis sluoksnis papildomai inkaruotas plieninėmis plokštelėmis, plieninėmis ar anglies pluošto apkabomis, apskaičiuotasis įlinkis 2 % – 21 % didesnis už eksperimentinį. Teoriniai sustiprintų sijų įlinkiai apskaičiuoti pagal FIB bulletin 14 projektavimo rekomendacijas yra 1,4 – 2,6 karto mažesni už eksperimentinius.

7. Siūloma skaičiavimo metodika apskaičiuota anglies pluošto kompozitu sustiprintų sijų laikomoji galia yra 1 % – 12 % mažesnė už sijų eksperimentinę laikomąją galia.

Literatūra ir šaltiniai

ACI-318. *Building code requirements for reinforced concrete*. Detroit: American Concrete Institute, Committee 318. 1989.

American Concrete Institute (ACI). 2008. *Guide for the Design and Construction of Externally bonded FRP systems for Strengthening Concrete Structures (ACI 440.2R-08)*. Farmington Hills, Mich.

Aniskevich, A. N.; Aniskevich, N. I. 1993. Effect of a uniaxial load on moisture absorption by an epoxy binder, *Mechanics of Composite Materials* 29(1): 85–89.

Aniskevich, A. N.; Jansons, J. O.; Aniskevich, N. I. 1992. Creep of epoxy matrix in atmospheric humidity, *Mechanics of Composite Materials* 1: 17–24.

Arduini, A.; Napolitano, P.; Gottardo, R. 2002. Strengthening of casilina bridge with carbon fiber reinforced polymer sheets, *Journal of Materials: Design and Applications* 216(3): 157–165.

Avril, S.; Vautrin, A.; Hamelin, P. 2003. Mechanical behavior of cracked beams strengthened with composites: application of a full-field measurement method, *Materials and Structures* 36: 379–385.

Benyoucef, S.; Tounsi, A.; Adda Bedia, E. A.; Meftah, S. A. 2007. Creep and shrinkage effect on adhesive stresses in RC beams strengthened with composite laminates, *Composites Science and Technology* 67: 933–942.

Benyoucef, S.; Tounsi, A.; Benrahou, K. H.; Adda Bedia, E. A. 2007. Time-dependent behavior of RC beams strengthened with externally bonded FRP plates: interfacial stresses analysis, *Mechanics of Time-depended Materials* 11: 231–248.

Bulavs, F.; Radinsh, I.; Tirans, N. 2006. A method for predicting the deflection of reinforced concrete beams strengthened with carbon plates, *Mechanics of Composite Materials* 42(1): 33–44.

Bulavs, F.; Radinsh, I.; Tirans, N. 2005. Improvement of capacity in bending by the use of FRP layers on RC beams, *Journal of Civil Engineering and Management* XI(3): 169–174.

Chami, G. A.; Theriault, M.; Neale, K. W. 2009. Creep behaviour of CFRP-strengthened reinforced concrete beams, *Construction and Building Materials* 23: 1640–1652.

Davis, G. D.; Rich, M. J.; Drzal, L. T. 2004. Monitoring moisture uptake and delamination in CFRP-reinforced concrete structures with electrochemical impedance sensors, *Journal of Nondestructive Evaluation* 23(1): 1–9.

Diab, H.; Wu, Z.; Iwashita, K. 2009. Short and long-term bond performance of prestressed FRP sheet anchorages, *Engineering Structures* 31: 1241–1249.

Ditcher, A. K.; Rhodes, F. E.; Webber, J. P. H. 1981. Non-linear stress-strain behaviour of carbon fibre reinforced plastic laminates, *Journal of Strain Analysis* 16(1): 43–51.

Ditcher, A. K.; Webber, J. P. H. 1979. Nonlinear mechanical and thermal response of a unidirectional carbon fibre reinforced plastic, *Journal of Strain Analysis* 14(4): 149–156.

European standard, Eurocode 2: Design of concrete structures, EN 1992-1.

Ferrier, E.; Avril, A.; Hamelin, P.; Vautrin, A. 2003. Mechanical behavior of RC beams reinforced by externally bonded CFRP Sheets, *Materials and Structures* 36: 522–529.

Ferrier, E.; Hamelin, P. 2002. Long-time concrete-composite interface characterization for reliability prediction of RC beam strengthened with FRP, *Materials and Structures* 35: 564–572

Ferrier, E.; Lagarde, G.; Hamelin, P. 2001. Concrete beams reinforced by fibre-reinforced plastics: the effect of temperature on the adhesive layer, *Composites Science and Technology* 61: 425–431.

Ferrier, E. *et al.* Creep behavior of adhesives used for external FRP strengthening of RC structures. *Constr Build Mater* (2010), doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.01.002

Fib Task Group 9.3. 2001. Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures. Fib bulletin 14, Lausanne, Switzerland. 130 p.

Gao, B.; Kim, J. K.; Leung, C. K. Y. 2003. Effect of rubber modifier on interlaminar fracture toughness of CFRP-concrete interface, *Composites Science and Technology* 63: 883–892.

Gao, B.; Kim, J. K.; Leung, C. K. Y. 2006. Strengthening efficiency of taper ended FRP strips bonded to RC beams, *Composites Science and Technology* 66: 2257–2264.

Gao, B.; Leung, C. K. Y.; Kim, J. K. 2005. Failure diagrams of FRP strengthened RC beams, *Composites Structures* 77: 493–508.

Gribniak, V.; Kaklauskas, G.; Bačinskas, D. 2008. Shrinkage in reinforced concrete structures: a computational aspect, *Journal of Civil Engineering and Management*, 14(1): 49–60.

Hanna, S.; Jones, R. 1997. Composite wraps for aging infrastructure concrete beams, *Engineering Failure Analysis* 4(3): 215–225.

Hay, S.; Thiessen, K.; Svecova, D.; Bakht, B. 2006. Effectiveness of GFRP sheets for shear strengthening of timber, *Journal of Composites for Construction* 10(6): 483–491.

Hollaway, L. C.; Cadei, J. 2002. Progress in the technique of upgrading metallic structures with advanced polymer composites, *Progress in Structural Engineering and Materials* 4: 131–148.

Johnsson, H.; Blanksvärd, T.; Carolin, A. 2005. Glulam members strengthened by carbon fibre reinforcement, *Materials and Structures* 40(1): 47–56.

Kaklauskas, G.; Bačinskas, D.; Zamblauskaitė, R. 2006. *Gelžbetoninių elementų deformacijos*. Vilniaus Gedimino Technikos Universitetas. Vilnius: Technika. 206 p.

Kawada, H.; Kobiki, A.; Koyanagi, J.; Hosoi, A. 2005. Long-term durability of polymer matrix composites under hostile environments, *Materials Science and Engineering* 412: 159–164.

Kazanci, M.; Schwartz, P.; Phoenix, S. L. 2001. The effect of matrix stiffness on the creep-rupture lifetime of carbon fibre/epoxy composites, *Composite Structures* 54: 221–223.

Kim, S. H.; Aboutaha, R. S. 2004. Ductility of carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) strengthened reinforced concrete beams: Experimental investigation, *Steel and Composite Structures* 4(5): 333–353.

Kim, Y. J.; Wight, R.; Green, M. F. 2008. Flexural strengthening of RC beams with prestressed CFRP sheets: Development of nonmetallic anchor systems, *Journal of Composites for Construction* 12(1): 35–43.

Kim, Y. J.; Wight, R. G.; Green, M. F. 2008. Flexural strengthening of RC beams with prestressed CFRP sheet: Using nonmetallic anchor systems, *Journal of Composites for Construction* 12(1): 44–52.

Kotynia, R.; Baky, H. A.; Neale, K. W.; Ebead, U. A. 2008. Flexural strengthening of RC beams with externally bonded CFRP systems: Test results and 3D nonlinear FE analysis, *Journal of Composites for Construction* 12(2): 190–201.

Lees, J. M. 2001. Fibre-reinforced polymers in reinforced and prestressed concrete applications: moving forward, *Progress in Structural Engineering and Materials* 3: 122–131.

Li, J.; Weng, G. J. 1995. Effect of a viscoelastic interphase on the creep and stress/strain behavior of fibre-reinforced polymer matrix composites, *Composites Part B* 27B: 589–598.

Li, L.; Guo, Y.; Liu, F. 2008. Test analysis for FRC beams strengthened with externally bonded FRP sheets, *Construction and Building Materials* 22(3): 315–323.

Maji, A., Orozco, A. L. 2005. Prediction of bond failure and deflection of carbon fiber-reinforced plastic reinforced concrete beams, *Experimental Mechanics* 45(1): 35–41.

Marchukaitis, G.; Valivonis, Yu.; Bareishis, J. 2007. An analysis of the joint operation of a CFRP concrete in flexural elements, *Mechanics of composite materials* 43(5): 467–478.

Marčiukaitis, G.; Balevičius, R. 2009. Sluoksniuotųjų konstrukcijų įtempių ir deformacijų būvio bei valkšnumo analizė, veikiant ilgalaikiai apkrovai, *Statybinės konstrukcijos ir technologijos* 1(3): 123–134.

Meier, U. 2000. Composite materials in bridge repair, *Composite Materials* 7: 75–94.

Moy, S. S. J.; Hill, P.; Mariarty, J.; Dier, A. F.; Kenchington, A.; Iverson, B. 2001. Strengthening of tunnel supports using carbon fiber composites, *Journal of Materials: Design and Applications* 215(4): 235–243.

Neale, K. W. 2000. FRPs for structural rehabilitation: a survey of recent progress, *Progress in Structural Engineering and Materials* 2: 133–138.

Oehlers, D. J.; Park, S. M.; Mohamed Ali, M. S. 2003. A structural engineering approach to adhesive bonding longitudinal plates to RC beams and slabs, *Composites A*(34): 887–897.

Ombers, L.; Trovato, A. 2009. FRP-strengthened reinforced concrete beams: a review and the assessment of cracking and deflection models, *Mechanics of Composite Materials* 45(6): 619–630.

Pham, H.; Al-Mahaidi, R. 2004. Assessment of available prediction models for the strength of FRP retrofitted RC beams, *Composite Structures* 66: 601–610.

Pham, H.; Al-Mahaidi, R. 2004. Experimental investigation into flexural retrofitting of reinforced concrete bridge beams using FRP composites, *Composite Structures* 66: 617–625.

Raue, E.; Heidolf, T. 2005. Analysis of the time-dependent behaviour of composite cross-section by Laplace-Transform, *Journal of Civil Engineering and Management* XI(3): 203–209.

Skuturna, T. 2009. *Lenkiamųjų gelžbetoninių elementų, sustiprintų anglies pluoštu, tyrimas: daktaro disertacija*. Vilniaus Gedimino Technikos Universitetas. Vilnius: Technika. 124 p.

Skuturna, T.; Valivonis, J. 2009. Jungties tarp betono ir anglies pluošto šlyties deformacijų tyrimas. Iš *Statybinės konstrukcijos. Konferencijos, įvykusios Vilniuje 2009 m. vasario 6 d., straipsnių rinkinys*. Vilnius, Technika, 127–134.

- Soudki, K. A. 1998. FRP reinforcement for prestressed concrete structures, *Progress in Structural Engineering and Materials* 1(2): 135–142.
- Souponitski, S. Z.; Sniatkov, S. V.; Grigoriev, S. E. 1999. Early reinforced concrete constructions in Russia: specific faults and causes of failure, *Engineering Failure Analysis* 8: 201–212.
- Startsev, O. V.; Krotov, A. S.; Startseva, L. T. 1999. Interlayer shear strength of polymer composite materials during long term climatic ageing, *Polymer Degradation and Stability* 63: 183–186.
- Šneideris, A.; Marčiukaitis, G. 2000. Apkrautų gelžbetoninių sijų, stiprinamų papildoma armatūra, įtempių – deformacijų būvio analizė, *Statyba – Civil Engineering* VI(5): 307–314.
- Tan, K. H.; Saha, M. K. 2006. Long-term deflections of reinforced concrete beams externally bonded with FRP system, *Journal of Composites for Construction* 10(6): 474–482.
- Teng, J. G.; Smith, S. T.; Yao, J.; Chen, J. F. 2003. Intermediate crack-induced debonding in RC beams and slabs, *Construction and Building Materials* 17: 447–462.
- Teng, J. G.; Yuan, H.; Chen, J. F. 2005. FRP-to-concrete interfaces between two adjacent cracks: Theoretical model for debonding failure, *International Journal of Solids and Structures* 43: 5750–5778.
- Triantafillou, T. C. 2001. Seismic retrofitting of structures with fibre-reinforced polymers, *Progress in Structural Engineering and Materials* 3: 57–65.
- Wanwei, W.; Guo, L. 2006. Experimental study and analysis of RC beams strengthened with CFRP laminates under sustaining load, *International Journal of Solids and Structures* 43: 1372–1387.
- Wanwei, W.; Guo, L. 2006. Experimental study of RC beams strengthened with CFRP sheets under sustaining loads, *Journal of Wuhan University of Technology* 21(3): 82–85.
- Wu, J.; Cheng, X. H. 2005. The effect of surface treatment of F-12 aramid fibers with rare earths on the interlaminar shear strength of aramid/epoxy composites, *Mechanics of Composite Materials* 41(2): 265–272.
- Wu, Z.; Diab, H. 2007. Constitutive model for time-dependent behavior of FRP-concrete interface, *Journal of Composites for Construction* 11(5): 477–485.
- Xiong, G. J.; Jiang, X.; Liu, J. W.; Chen, L. 2007. A way for preventing tension delamination of concrete cover in midspan of FRP strengthened beams, *Construction and Building Materials* 21: 402–408.
- Александровский, С. В.; Колесников, Н. А. 1971. Нелинейная ползучесть бетона при ступенчато изменяющихся напряжениях, *Бетон Железобетон* 6: 24–27.
- Анискевич, А. Н. 1984. Экспериментальное исследование сорбции влаги в эпоксидном связующем ЭТД-10, *Механика композитных материалов* 6: 969–973.

Ахвердов, А. Н. 1970. Механизм усадки и ползучести бетона в свете современных представлений реологии и физики твердого тела, *Бетон Железобетон* 10: 21–23.

Баженов, Ю. М.; Тян, В. А.; Путляев, И. Е.; Серых, Р. Л. 1981. Ползучесть клеевых соединений бетонополимеров на основе полиэфиракрилатов, *Бетон Железобетон* 2: 9–10.

Байков, В. Н.; Додонов, М. И.; Расторгуев, Б. С.; Фролов, А. К.; Мухамедиев, Т. А.; Кунижев, В. Х. 1987. Общий случай расчета прочности элементов по нормальным сечениям, *Бетон Железобетон* 5: 16–18.

Берген, Р. И. 1965. Выносливость и ползучесть клеевых железобетонных соединений, *Бетон Железобетон* 6: 24–28.

Вольфф, Х.; Мисселер, Х. Й. 1991. Преднапряженные бетонные конструкции с арматурой из стекловолокнистого композиционного материала, *Бетон Железобетон* 2: 5–7.

Галустов, К. З. 1971. О нелинейности деформаций ползучести бетонных элементов при динамических расчетах балочных конструкций, *Бетон Железобетон* 9: 43–44.

Гинзбург, И. И. 1963. К расчету составных железобетонных стержней с податливыми связями, *Бетон Железобетон* 3: 36–38.

Гладков, Д. И. 1971. Влияние крупного заполнителя на продольные деформации ползучести бетона, *Бетон Железобетон* 4: 4–7.

Гуща, Ю. П. 1990. Прочность и деформативность изгибаемых элементов из пластифицированных бетонов при кратковременном и длительном нагружении, *Бетон Железобетон* 7: 17–19.

Гуща, Ю. П.; Ларичева, И. Ю.; Нугужин, Ж. С. 1988. Деформаций и ширина раскрытия трещин изгибаемых элементов на ветви разгрузки, *Бетон Железобетон* 4: 40–42.

Застава, Н. М. 1984. Расчетное определение деформаций ползучести тяжелого бетона при переменной нагрузке, *Бетон Железобетон* 4: 23.

Каранфилов, Т. С. 1970. Влияние характеристики цикла напряжений на развитие деформаций виброползучести бетона, *Бетон Железобетон* 11: 22–24.

Карапстян, К. С.; Котикян, Р. А. 1972. Прочность, деформативность и ползучесть бетона при растяжении с последующим кручением, *Бетон Железобетон* 7: 31–34.

Карпенко, Н. И. 1989. Методика расчета стержневых конструкций с учетом деформаций сдвига, *Бетон Железобетон* 3: 14–16.

Квядарас, А. Б. 1979. Некоторые физико – механические свойства тяжелого и мелкозернистого бетона, в том числе с добавкой смолы № 89, *Железобетонные конструкции* 9: 31–40.

Квядарас, А. Б. 1989. Методика аппроксимации экспериментальных кривых удельных деформаций линейной ползучести упруго – ползучего тела, *Железобетонные конструкции* 16: 28–40.

Квирикадзе, О. П. 1990. Интерполяционные формулы для определения начального модуля упругости бетона, *Бетон Железобетон* 4: 36.

Квицаридзе, О. И.; Сагателова, Е. С.; Гвелесиани, Л. О. 1965. Влияние режима влажности среды на деформативность изгибаемых железобетонных элементов при длительном действии нагрузки, *Бетон Железобетон* 12: 10–14.

Кириллов, А. П.; Мирсаяпов, И. Т. 1986. Влияние виброползучести бетона на выносимость железобетонных конструкций, *Бетон Железобетон* 1: 45–46.

Клименко, Ф. Е.; Барабаш, В. М.; Боднарчук, Б. И. 1972. Прочность и деформативность сталежелезобетонных изгибаемых элементов, *Бетон Железобетон* 8: 4–6.

Кудзис, А. П.; Глебов, В. И. 1979. Влияние длительного сжатия на механические свойства обычного и полимерцементного центрифугированных бетонов, *Железобетонные конструкции* 9: 19–29.

Кудзис, А. П.; Квядарас, А. Б. 1969. О ползучести материала типа бетона, *Железобетонные конструкции* 2: 72–84.

Кудзис, А. П.; Папинигис, В. И. 1984. Усовершенствование расчета плоских железобетонных элементов, в том числе подвергнутых длительному нагружению, *Железобетонные конструкции* (Совершенствование железобетонных конструкций) 13: 5–14.

Козлов, В. В.; Кожемякин, А. П.; Григорьев, В. А. 1989. Коэффициент монолитности как комплексная оценка эффективности клеевых композиций, *Бетон Железобетон* 11: 8–10.

Крылов, С. М.; Казачевский, А. И.; Пекарский, А. Л. 1971. Учет релаксаций усилия в железобетонных конструкциях при длительно нарастающих деформациях воздействия, *Бетон Железобетон* 6: 32–33.

Левицкий, В.; Дерентович, Г.; Кубицкий, Я. 1967. Исследование железобетонных балок при длительном действии нагрузки, *Бетон Железобетон* 6: 42–44.

Лившиц, Я. Д. 1976. *Расчет железобетонных конструкций с учетом влияния усадки и ползучести бетона*. Издание 2-е переработанное и дополненное, издательское объединение “Выща Школа”. Головное издательство Киев – 1976, 280 с.

Макаренко, Л. П.; Фенко, Г. А. 1970. О снижении прочности бетона на растяжение после длительного обжатия, *Бетон Железобетон* 7: 44–45.

Маркаров, М. А. 1982. Определение напряжения в бетоне в момент эго обжатия, *Бетон Железобетон* 4: 23.

Мельник, Р. А. 1964. Исследование деформативности и прочности бетона при длительном сжатии, *Бетон Железобетон* 3: 132–137.

Мельник, Р. А.; Пацула, А. Я. 1973. Исследование нелинейной ползучести высокопрочных бетонов, *Бетон Железобетон* 3: 39–40.

Михайлов, К. В. 1990. Применение неметаллической арматуры в бетоне, *Бетон Железобетон* 4: 5–7.

Неймарк, А. С.; Гуревич, А. Л.; Веремеенко, О. Ю. 1987. Расчет параметров жесткости стержневых элементов с учетом истории нагружения, *Бетон Железобетон* 4: 30–32.

Папинигис, В. Й.; Подагель, Р. С. 1987. Механические характеристики растянутого бетона, ранее подвергнутого длительному растяжению, *Железобетонные конструкции* 15: 90–95.

Ржаницын, А. Р. 1986. *Составные стержни и пластинки*. Москва: Стройиздат. 314 с.

Семенов, А. И.; Аржановский, С. И. 1972. Влияние длительного обжатия бетона на его прочностные и деформативные свойства, *Бетон Железобетон* 2: 34–37.

Серых, Р. Л. 1981. Ползучесть некоторых видов бетонов при сжатии, *Бетон Железобетон* 11: 11.

Серых, Р. Л.; Ярмаковский, В. Н. 1992. Нарастание прочности бетона во времени, *Бетон Железобетон* 3: 19–21.

Солотатов, В. И. 1964. Снижение ползучести и усадки бетонных элементов с помощью полимерных покрытий, *Бетон Железобетон* 3: 116–117.

Ужахов, А. М. 1971. К теории линейной ползучести бетона, *Бетон Железобетон* 1: 12–14.

Яценко, Е. А. 1998. Влияние длительных нагрузок и ползучести бетона на предельные состояния железобетонных конструкций, *Бетон Железобетон* 8: 21–22.

Autoriaus publikacijos disertacijos tema

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Skuturna, T.; Valivonis, J.; Vainiūnas, P.; Marčiukaitis, G.; Daugevičius, M. 2008. Analysis of deflections of bridge girders strengthened by carbon fibre reinforcement, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 3(3): 145–151. ISSN 1822-427X (*ISI Web of Science*).

Daugevičius, M. 2009. Lenkiamos gelžbetoninės sijos su papildoma anglies pluošto kompozito armatūra laikomosios galios sumažėjimas dėl šlyties, *Mokslas – Lietuvos ateitis, Statyba* 1(5): 41–44. ISSN 2029-2341 print.

Zile, E.; Daugevičius, M.; Tamužs, V.; 2009. The effect of pretensioned FRP windings on the behavior of concrete columns in axial compression, *Mechanics of Composite Materials* 45(5): 457–466. ISSN 0191-5665 (*ISI Web of Science*).

Marčiukaitis, G.; Daugevičius, M.; Valivonis, J. 2010. Anglies pluoštu sustiprintų gelžbetoninių sijų tempiamosios zonos irimo pobūdžio analizė, *Statybinės konstrukcijos ir technologijos*, 4(2): 129-137. ISSN 2029-2317.

Straipsniai kituose leidiniuose

Daugevičius, M. 2008. Anglies pluoštu sustiprintų gelžbetoninių sijų skaičiavimas pagal sudėtinių strypų teoriją, iš *Statyba, 11-oji Lietuvos jaunujų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ medžiaga*, Vilnius: Technika, 137–145.

Daugevičius, M.; Apinis, R.; 2009. Gniuždomų elementų sustiprintų įtemptu anglies pluoštu darbo analizė, iš *Respublikinės konferencijos „Statybinės konstrukcijos“, pranešimų medžiaga*, Vilnius: Technika, 51–60.

Valivonis, J.; Skuturna, T.; Daugevičius, M. 2010. The load-carrying capacity of reinforced concrete beams strengthened with carbon fibre composite in the tension zone subjected to temporary or sustained loading, in *The 10th International Conference “Modern Building Materials, Structures and Techniques”*: Selected papers, vol. 2. Ed. by P. Vainiūnas, E. K. Zavadskas. May 19–21, 2010, Vilnius, Lithuania. Vilnius: Technika, 818–825.

Mykolas DAUGEVIČIUS

ILGALAIKĖS APKROVOS ĮTAKA ANGLIES PLUOŠTU SUSTIPRINTŲ LENKIAMŲJŲ
GELŽBETONINIŲ ELEMENTŲ ELGSENAI

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
statybos inžinerija (02T)

Mykolas DAUGEVIČIUS

INFLUENCE OF LONG-TERM LOAD ON THE BEHAVIOUR OF REINFORCED
CONCRETE BEAMS STRENGTHENED WITH CARBON FIBRE COMPOSITE

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Civil Engineering (02T)

2010 12 21. 10,0 sp. l. Tiražas 20 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,
<http://leidykla.vgtu.lt>
Spausdino UAB „Ciklonas“,
J. Jasinskio g. 15, 01111 Vilnius

