Donatas SALYS

MODELLING OF TENSILE ZONE BEHAVIOUR OF REINFORCED CONCRETE MEMBERS

SUMMARY OF DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES
CIVIL ENGINEERING (02T)

VGTU
LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2011

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Donatas SALYS

MODELLING OF TENSILE ZONE BEHAVIOUR OF REINFORCED CONCRETE MEMBERS

SUMMARY OF DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES
CIVIL ENGINEERING (02T)

VGTU
LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2011

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2007–2011.
Scientific Supervisor
Prof Dr Habil Gintaris KAKLAUSKAS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Civil Engineering – 02T).
Consultant
Dr Viktor GRIBNIAK (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Civil Engineering – 02T).
The dissertation is being defended at the Council of Scientific Field of Civil Engineering at Vilnius Gediminas Technical University:
Chairman
Prof Dr Habil Juozas ATKOČIŪNAS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Civil Engineering – 02T).
Members:
Prof Dr Habil Gintautas DZEMYDA (Vilnius University, Technological Sciences, Informatics Engineering – 07T),
Prof Dr Habil Vytautas STANKEVIČIUS (Kaunas University of Technology, Technological Sciences, Civil Engineering – 02T),
Prof Dr Povilas VAINIŪNAS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Civil Engineering – 02T),
Prof Dr Juozas VALIVONIS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Civil Engineering – 02T).
Opponents:
Prof Dr Habil Jonas BAREIŠIS (Kaunas University of Technology, Technological Sciences, Mechanical Engineering – 09T),
Prof Dr Romualdas KLIUKAS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Civil Engineering – 02T).

The dissertation will be defended at the public meeting of the Council of Scientific Field of Civil Engineering in the Senate Hall of Vilnius Gediminas Technical University at 9 a. m. on 27 January 2012.
Address: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania.
Tel.: +370 5 274 4952, +370 5 274 4956; fax +370 5 270 0112;
e-mail: doktor@vgtu.lt
The summary of the doctoral dissertation was distributed on 23 December 2011.
A copy of the doctoral dissertation is available for review at the Library of Vilnius Gediminas Technical University (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lithuania).

© Donatas Salys, 2011

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Donatas SALYS

GELŽBETONINIŲ ELEMENTŲ TEMPIAMOSIOS ZONOS ELGSENOS MODELIAVIMAS

DAKTARO DISERTACIJOS SANTRAUKA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI
STATYBOS INŽINERIJA (02T)

VGTU
LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2011

Disertacija rengta 2007–2011 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.
Mokslinis vadovas
prof. habil. dr. Gintaris KAKLAUSKAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, statybos inžinerija – 02T).
Konsultantas
dr. Viktor GRIBNIAK (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, statybos inžinerija – 02T).
Disertacija ginama Vilniaus Gedimino technikos universiteto Statybos inžinerijos mokslo krypties taryboje:
Pirmininkas
prof. habil. dr. Juozas ATKOČIŪNAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, statybos inžinerija – 02T).
Nariai:
prof. habil. dr. Gintautas DZEMYDA (Vilniaus universitetas, technologijos mokslai, informatikos inžinerija – 07T),
prof. habil. dr. Vytautas STANKEVIČIUS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, statybos inžinerija – 02T),
prof. dr. Povilas VAINIŪNAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, statybos inžinerija – 02T),
prof. dr. Juozas VALIVONIS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, statybos inžinerija – 02T).
Oponentai:
prof. habil. dr. Jonas BAREIŠIS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, mechanikos inžinerija – 09T),
prof. dr. Romualdas KLIUKAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, statybos inžinerija – 02T).

Disertacija bus ginama viešame Statybos inžinerijos mokslo krypties tarybos posėdyje 2012 m. sausio 27 d. 9 val. Vilniaus Gedimino technikos universiteto senato posėdžių salėje.
Adresas: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva.
Tel.: (8 5) 274 4952, (8 5) 274 4956; faksas (8 5) 270 0112;
el. paštas doktor@vgtu.lt
Disertacijos santrauka išsiuntinėta 2011 m. gruodžio 23 d.
Disertaciją galima peržiūrėti Vilniaus Gedimino technikos universiteto bibliotekoje (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lietuva).
VGTU leidyklos „Technika“ 1952-M mokslo literatūros knyga.

© Donatas Salys, 2011

Introduction

Formulation of the problem and motivation of research. In spite of the tension-stiffening effect in reinforced concrete (RC) members has been investigated more than seven decades, there are no uniform and approved deformations and crack widths calculation techniques in the world. Such analysis can be performed using not only design codes, but and numerical methods. Numerical methods, with complicated mathematical tool, may perfectly predict deformation response of building structures made from orthotropic materials (e. g. steel). However, using well-known tension-stiffening models, the obtained errors in design of RC structures not much vary from design code methods.

The adequate tension-stiffening modelling is very important, estimating deformations and crack widths of RC members. The following reinforcement and concrete interaction modelling approaches are mostly used in numerical algorithms:

1. Discrete crack models, argued by bond stress-slip laws.
2. The models, in which tension-stiffening is modelling using average stress-strain relationships attributed to tensile concrete.
3. The models, in which tension-stiffening is estimating using stress-strain relationships attributed to tensile reinforcement.

Probably, the complicated methods become a universal tool in reinforced concrete analysis in future. Author thinks that application of complex models, based on different approaches, allow simulating realistic behaviour of cracked RC. In this study the first and the third approaches are combined.

Main objective and tasks. The main objective is to investigate the behaviour of tensile zone of reinforced concrete members applying different tension-stiffening modelling approaches and inverse technique. In order to achieve the objective, the following problems had to be solved:

1. To perform the literature review on deformations of reinforced concrete members and tension-stiffening models.
2. To perform experimental investigation of lightly reinforced RC beams subjected to short term loading.
3. To collect test data of tension and bending reinforced concrete elements published in literature.
4. To develop an inverse technique for modelling of tension-stiffening attributed to tensile reinforcement, using experimental moment-curvature relationships of bending reinforced concrete elements.
5. To derive tension-stiffening relationship using experimental data and proposed algorithm.

6. To perform tension and bending reinforced concrete elements stress-strain state analysis, using discrete crack model.

Scientific novelty

1. New experimental investigation data of RC beams under short-term loading were obtained.
2. Developed inverse technique for modelling of tension-stiffening attributed to tensile reinforcement, using experimental moment-curvature relationships of bending reinforced concrete elements. First time in the world, such relationships were obtained, using test data of flexural RC elements.
3. Proposed a simplified calculation method to eliminate the shrinkage of concrete from moment-curvatures and tension-stiffening diagrams of bending RC members.

Methodology of research. Achieving the objective of the study, research methods such as theoretical analysis, numerical simulation, and experimental investigation were used.

Practical value. The obtained tension-stiffening relationships discover the new nuances of the behaviour of tensile zone of bending reinforced concrete elements, which are important for calculating deformations and cracking. The obtained investigation results extend inverse technique (proposed by G. Kaklauskas) application limits. This algorithm allows precisely determining the effective width of tensile zone.

Defended propositions

1. The proposed algorithm can be applied for developing tension-stiffening models.
2. The tension-stiffening effect increases with decreasing of the reinforcement ratio and increasing of the concrete cover.
3. The proposed method allows determining the effective area of concrete tension zone
4. Elimination of the shrinkage effect from moment-curvature as well as from tension-stiffening diagram becomes algorithmically effective using the proposed approach.
5. The bond stress-slip relationships are required to be verified for discrete cracking modelling.

The scope of the scientific work. The dissertation consists of introduction, four chapters, general conclusion and a list of references. The total scope of the dissertation is 101 pages. It contains 84 expressions, 52 figures, 4 tables and 108 references.

1. Overview of calculation methods and models stress-strain behaviour of reinforced concrete members

This chapter reviews both empirical and numerical methods of deformation analysis of RC members as well as material models with the emphasis on and tension-stiffening effects. It was shown that deformation behaviour of cracked RC members is a complex process including a wide range of effects, such as different strength and deformation properties of steel and concrete, concrete cracking, tension-softening and tension-stiffening, bond slip and time dependents effects in concrete. An adequate modelling of concrete cracking and, particularly, post-cracking behaviour, as one of the major sources of nonlinearity, is the most important task of deformational analysis. Tension-stiffening effects always should to be included in an analysis that uses averaged stresses and strains to predict deformations of RC members.

2. Experimental study of reinforced concrete beams

This chapter presents an experimental investigation of tension-stiffening and short-term deformations of three reinforced concrete beams tested by the author. The beams had the same nominal cross-section parameters and similar material characteristics, but different reinforcement ratio (p = 0.3 and 1 %). They were of a rectangular section, with a nominal length 3280 mm (span 3000 mm), depth 300 mm and width 280 mm. The beams were tested under a four-point bending scheme with the concentrated forces dividing the span into three equal parts. The test where performed with small loading increments, therefore, the obtained moment-curvature diagrams because useful for the tension-stiffening analysis

3. Reinforcement attributed tension-stiffening modelling

This chapter aims at modelling of tension-stiffening attributed to tensile reinforcement. The proposed inverse technique for deriving the tension-stiffening diagram is based on the inverse approach developed by the supervisor of this dissertation work. The analysis is based on the smeared crack approach and the assumption of linear strain distribution within the depth of the

section implying the perfect bond between concrete and reinforcement. A tension-stiffening relationship was derived using moment-curvature diagrams of the experimental RC beams.

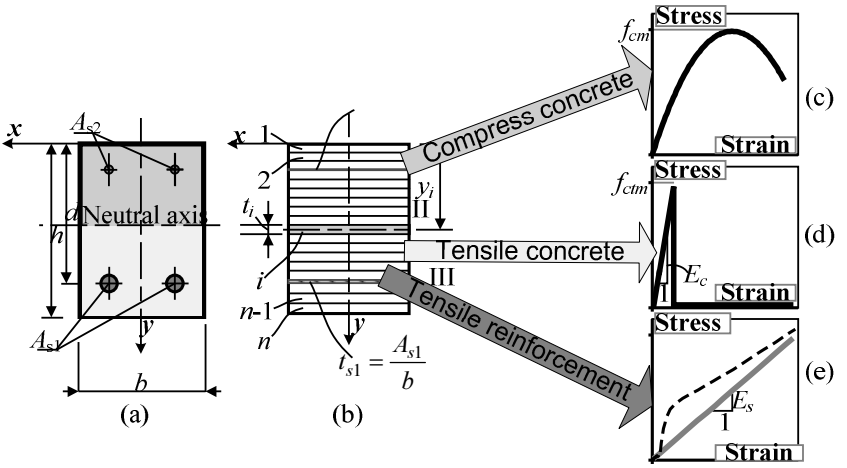

Fig. 1. RC section (a) with layer model (b) and constitutive relationships assumed for compressive (c) and tensile (d) concrete and tensile reinforcement (e)

Let us consider a reinforced section shown in Figure 1a. The cross-section is divided into horizontal layers corresponding to either concrete or reinforcement (Fig. 1a). As shown in Figure 1c, the constitutive relationship recommended by *Eurocode 2* was taken for the compressive concrete, whereas the elastic-brittle behaviour was assumed for the concrete in tension. Tension-stiffening was modelled by the average stress-strain relationship of the tensile reinforcement (see Fig. 1e).

The direct analysis is aimed at the prediction of structural response using the specified constitutive model. Let us consider a doubly reinforced concrete section subjected to pure bending.

Computations are performed iteratively for an incrementally increasing bending moment. For a given load increment, the initial value of the secant deformation modulus of the tensile reinforcement is assumed. The analysis results in the derived reinforcement-related tension-stiffening relationship. For the model assumed, total stresses in the tensile reinforcement consist of genuine stresses corresponding to the average strain of the steel and additional stresses

due to tension-stiffening. It should be noted that the tension-stiffening stresses are initiated at the start of cracking.

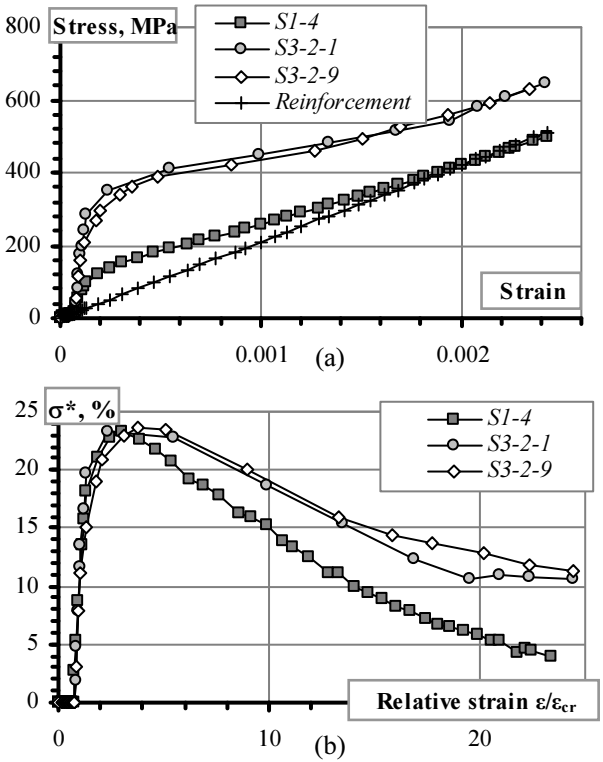

Fig. 2. Derived steel-related average stresses-strain relationships

This chapter also presents a technique for deriving free-of-shrinkage tension-stiffening relations from test data of shrunk flexural members. Based on the proposed inverse procedure, the analysis was performed using three experimental beams. Figure 2a gives free-of-shrinkage average stress-strain obtained for the test beams. Tension-stiffening stresses were different for different beams with larger stresses obtained for the lightly reinforced beam. Due to the differences of the tensile reinforcement area, the tension-stiffening stresses cannot serve as an objective parameter. The calculated free-of-shrinkage steel-related tension-stiffening diagrams are shown in Figure 1e.

Tension-stiffening diagrams shown in Fig. 2b were given by subtracting from total stress in reinforcement real stresses. For the purpose of objectively evaluate influence of cracked tensile concrete on deformation of RC beams. The tension-stiffening diagrams where normalised. The normalised tension-stiffening diagrams have been obtained by multiplying stress with reinforcement ratio and dividing by f_{ctm}, and deformation was dividing by ε_{cr}.

The typical moment-curvature diagram of flexural RC element has been shown in Fig. 3a. Three stages of behaviour of element can be marked out. In the first stage the element deforms elastically. In the second stage, the normal cracks appear and propagate. The third stage begins when cracking processes are stabilize and ends of elements failure. The tension-stiffening diagram with mentioned stages is shown in Fig. 3b. In the first stage of tension-stiffening diagram the stresses equal to zero. The second stage begins when cracking deformation are achieved. This stage corresponds to descending branch. When tension-stiffening diagram achieved maximal value, begins the third stage. This stage corresponds to ascending branch.

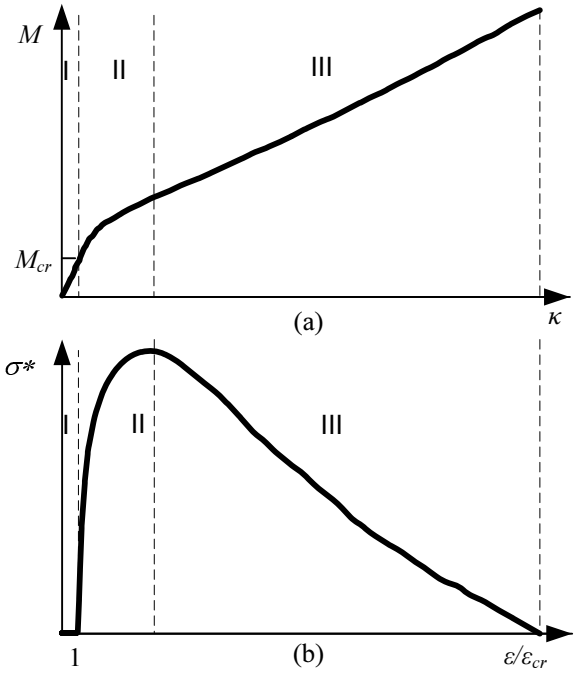

Fig. 3. Moment-curvature and tension-stiffening diagrams

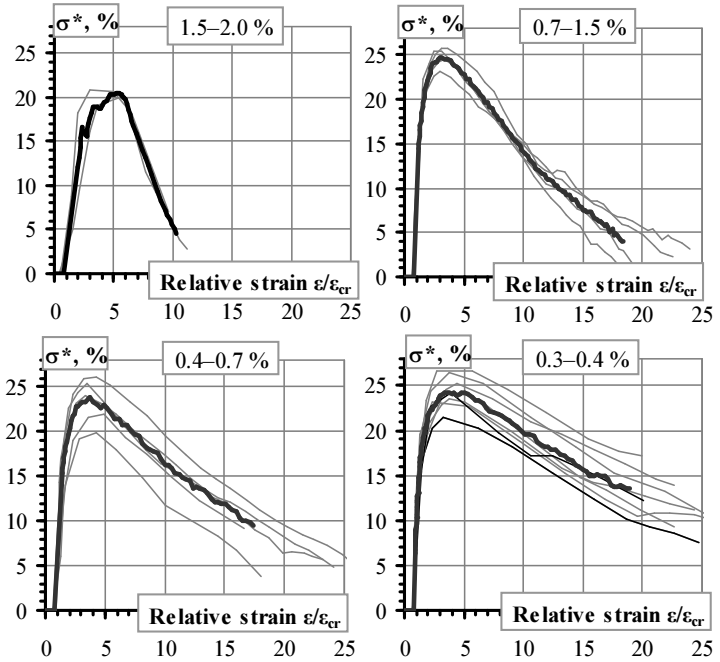

Fig. 4. Tension-stiffening grouped by ρ

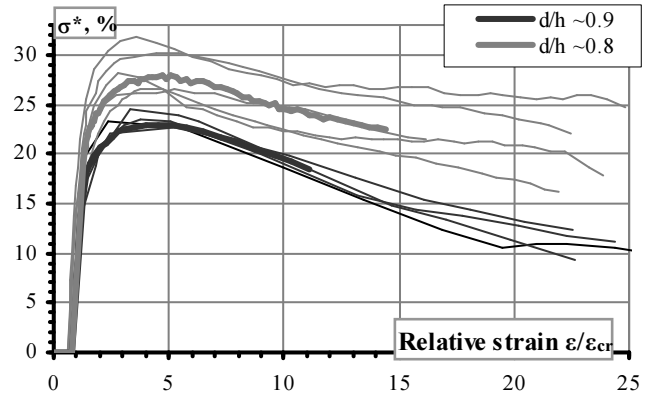

Fig. 5. Tension-stiffening grouped by *d/h*

In Fig. 4 is shown that the tension-stiffening stresses depend on the area of the tensile reinforcement. It should be noted that the tension-stiffening after reaching the maximum was reducing at different rate depending on the reinforcement ratio. Thus, the tension-stiffening stresses were decreasing more rapidly in the members having higher reinforcing ratio.

Observed that the normalized tensile stress and strain hardening of the diagram depends not only on the reinforcement ratio, but also useful and total height (*d/h*) ratio (Fig. 5.). To the lower *d/h* ratio obtained these graphs larger maximum value. Equivalent maximum value depends on the protective layer of concrete, etc. Y. it increases the effective height of the cross section decreases.

However, the resulting internal forces are less dependent on the amount of reinforcement. As it was expected, the calculated internal forces for different beams have approached each other with almost coinciding maximum values.

4. Discrete cracking model of reinforced concrete members

This chapter discusses the discrete cracking model of RC member. This approach is based on bond stress-slip relationship. Such approaches are capable realistically modelling cracking and determining crack widths and deformations. However, accuracy of prediction results depends on the assumed bond stress-slip relationship.

The first part of the chapter was dedicated to the analysis of tensile members. It was shown that in the literature the shear stresses in the contact area and the scroll bars idealization may be inaccurate. It should be noted that the CEB-FIP scroll idealization is not appropriate to conduct a reinforced concrete medium deformation analysis by a representative of discrete crack model. Alvarez is an acceptable alternative to the proposed bond model. However, its settings must be adjusted in subsequent studies.

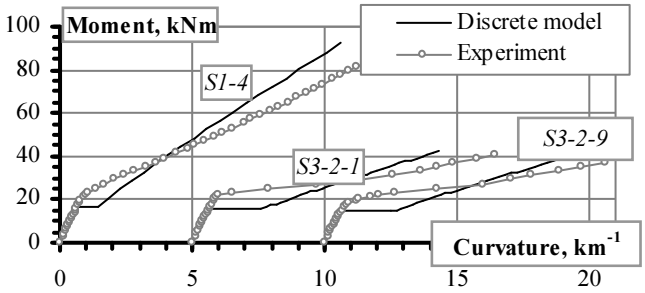

Fig. 6. Moment-curvature of discrete model

The second part considers the flexural members. Figure 6 shows the experimental and calculated moment-curvature diagrams for three experimental RC sections discussed in chapter 2. For all the beams, the modelled curvature response under the assumption of constant bond stress becomes too stiff at higher load levels. Numerous studies have shown that the bond-stresses degrade with increasing load. For all the beams, the modelled curvature response under the assumption of constant bond stress becomes too stiff at higher load levels.

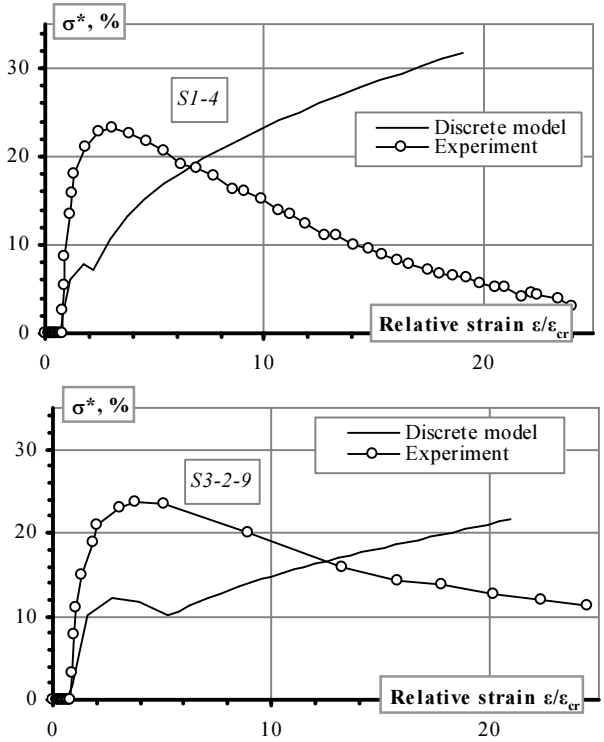

Fig. 7. Tension-stiffening diagrams of discrete model

Experimental maximum tension-stiffening for the strain of the reinforcement is reached at $\varepsilon \approx 3\varepsilon_{cr}$ or scroll value 0.025 mm, while the CEB-FIP proposed maximum shear stress path-consistent value of 0.6 mm. Experimental tension-stiffening marginal deformation (fully degraded concrete

and steel grip) $\varepsilon_{ult} = 25–40\varepsilon_{cr}$ at 0.19 to 0.31 mm, while the CEB-FIP proposed value of 1.0 mm.

General conclusions

1. Tension-stiffening effect in reinforced concrete (RC) members has been investigated more than seven decades, however there are no uniform and approved deformations and crack widths calculation techniques in the world. Numerical methods with complicated mathematical tool may perfectly predict deformation response of building structures made from orthotropic materials (e. g. steel). However, using well-known tension-stiffening models, the obtained errors in design of RC structures slightly vary from design code methods.

2. The adequate tension-stiffening modelling is very important for estimation of deformations and crack widths of RC members. The following reinforcement and concrete interaction modelling approaches are mostly used in numerical algorithms: 1) Discrete crack models, based on shear stress in contact zone and reinforcement slip relationship. 2) The models, in which tension-stiffening is modelled using average stress-average strain relationships. 3) The models, in which tension-stiffening is estimated by stress-strain relationships of reinforcement.

3. The obtained results extend the application range of the inverse algorithm, proposed by the supervisor of this dissertation. Inverse technique for modelling of tension-stiffening attributed to tensile reinforcement, using experimental moment-curvature relationships of bending RC elements is developed and practically implemented.

4. For the first time tension-stiffening relationships for experimental flexural RC elements were calculated using the proposed algorithm. The resultant average stress-average strain diagrams consist of ascending and descending branches. The maximum stress increases 40% with the decreasing 10% effective cross-sectional height. In elements with small reinforcement ratio stresses of descending part decreases more slowly than with high reinforcement ratio: then reinforcement ratio decreases from 2 to 0.3%, relative strain increase 4 times.

5. The obtained tension-stiffening diagrams revealed a new RC flexural tension zone behavioural aspect that is important for the calculation of deformations and cracking. The proposed approach allows the assessment of concrete area of tension zone, which depends on the effective height and cross-sectional height.

6. A simplified calculation method to eliminate the shrinkage of concrete from moment-curvatures and tension-stiffening diagrams of flexural RC

members is proposed. Then tension-stiffening is modelled average tensile strength of concrete stress-strain diagram.

7. The inverse deformation method applied to the analysis of discrete crack model adequacy is proposed. Although these models are theoretically able to adequately assess the reinforced concrete cracking and stress-strain state, the employed shear stresses in the contact area and the scroll bars laws are not accurate. Simulations revealed that after the formation of cracks, tension-stiffening increased with increasing loading. This is fundamentally contrary to the results obtained in this work, using the proposed analytical method of the tension-stiffening and experimental data. For future investigation and development of reinforcement and concrete adhesion models, it is necessary to evaluate the important parameters such as constraint of concrete transverse strain, stress state of reinforcement and concrete, concrete protective layer thickness, bar diameter and location.

List of published works on the topic of the dissertation in the reviewed scientific periodical publications

Kaklauskas, G.; Gribniak, V.; Jakubovskis, R.; Gudonis, E.; Salys, D.; Kupliauskas, R. 2012. Serviceability analysis of flexural reinforced concrete members, *Journal of Civil Engineering and Management*. Vilnius: Technika, doi:10.3846/13923730.2011.643553. (ISI Web of Science)

Kaklauskas, G.; Gribniak, V.; Salys, D.; Sokolov, A.; Meskenas, A. 2011. Tension-stiffening model attributed reinforcement for concrete flexural members, *Procedia Engineering* 14: 1433–1438. ISSN 1877-7058. (Scopus)

Salys, D.; Kaklauskas, G.; Timinskas, E.; Gribniak, V.; Ulbinas, D.; Gudonis, E. 2010. Tempiamųjų gelžbetoninių elementų diskrečiųjų plyšių modelio analizė, *Statybinės konstrukcijos ir technologijos* 2(4): 146–154. ISSN 2029-2317 (print), ISSN 2029-2325 (online). (ICONDA)

Salys, D.; Kaklauskas, G.; Gribniak, V. 2009. Gelžbetoninių sijų tempiamosios zonos elgsenos modeliavimas armatūros diagrama, *Statybinės konstrukcijos ir technologijos* 1(3): 141–147. ISSN 2029-2317 (print), ISSN 20292325 (online). (ICONDA)

In the other editions

Salys, D. 2009. Lenkiamų gelžbetoninių elementų tempiamosios zonos elgsenos modeliavimas. 12-oji Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija „MOKSLAS – LIETUVOS ATEITIS“, 2009 metų teminės konferencijos STATYBA, įvykusios Vilniuje 2009 m. kovo 25–27 d., Vilnius : straipsnių rinkinys [CD]. 60–63.

Salys, D. 2008. Sluoksnių metodo skaitinė realizacija, 11-oji Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „MOKSLAS – LIETUVOS ATEITIS“, 2008 metų teminės konferencijos STATYBA, įvykusios Vilniuje 2008 m. balandžio 2–4 d., straipsnių rinkinys. 217–224.

About the author

Donatas Salys was born in Vilnius, on 25 of November 1982.

Bachelor degree in Engineering Informatics, Faculty of Fundamental Sciences, Vilnius Gediminas Technical University, 2005. Master of Science in Engineering Informatics, Faculty of Fundamental Sciences, Vilnius Gediminas Technical University, 2007. In 2001–2005 – PhD student of Vilnius Gediminas Technical University.

GELŽBETONINIŲ ELEMENTŲ TEMPIAMOSIOS ZONOS ELGSENOS MODELIAVIMAS

Problemos formulavimas ir darbo aktualumas. Supleišėjusio gelžbetonio elgsena tiriama jau daugiau nei septynis dešimtmečius, pasaulyje nėra vieningų ir tarpusavyje suderintų deformacijų ir plyšio pločio skaičiavimo teorijų ir medžiagų modelių. Skaičiavimai gali būti atliekami ne tik projektavimo normų, bet ir skaitiniais metodais. Skaitiniai metodai, turintys sudėtingą matematinį aparatą, puikiai aprašo statybinių konstrukcijų, turinčių idealius modelius (pvz., plienas) elgseną, Deja, pasitelkiant žinomus armatūros ir betono sąveikos modelius, šiais metodais gaunamos gelžbetoninių elementų deformacijų ir plyšių pločio paklaidos nedaug skiriasi nuo gaunamų, taikant projektavimo normų metodus.

Adekvatus betono tempiamojo sustandėjimo modeliavimas yra labai svarbus, įvertinant gelžbetoninių elementų plyšio pločius ir deformacijas. Skaitiniuose algoritmuose dažniausiai taikomos trys armatūros ir betono sąveikos modeliavimo koncepcijos:

- Diskrečiųjų plyšių modeliai, pagrįsti šlyties įtempių kontakto zonoje ir armatūros praslydimo priklausomybėmis.
- Modeliai, kuriuose tempiamojo betono elgsenos tarp plyšių efektas modeliuojamas tempiamojo betono vidutinių įtempių ir deformacijų priklausomybe.

- Modeliai, kuriuose tempiamojo betono elgsenos tarp plyšių efektas įvertinamas armatūros įtempių ir deformacijų priklausomybėmis.

Tikėtina, kad sudėtingieji metodai ateityje gali tapti universaliais gelžbetoninių konstrukcijų analizės įrankiais. Iki šiol pasaulyje nebuvo atlikta tokių tyrimų, kuriuose žinomi armatūros ir betono sąveikos modeliai būtų taikomi kompleksiškai. Autorius mano, kad kompleksinis įvairių modelių, paremtų skirtingomis koncepcijomis, taikymas leistų atskleisti skirtingus nagrinėjamojo reiškinio niuansus bei nustatyti atitinkamus fizikinius parametrus.

Šiame darbe taikomos pirmoji ir trečioji koncepcijos, tempiamąjį sustandėjimą atitinkamai modeliuojant armatūros diagrama ir diskrečiųjų plyšių metodu.

Darbo tikslas ir uždaviniai. Darbo tikslas yra ištirti gelžbetoninių elementų tempiamosios zonos elgseną, taikant skirtingas tempiamojo sustandėjimo modeliavimo koncepcijas bei atvirkštinius algoritmus. Darbo tikslui pasiekti buvo sprendžiami šie uždaviniai:

1. Apžvelgti gelžbetoninių elementų deformacijų nustatymo ir tempiamojo sustandėjimo modelius. Atlikti palyginamąją analizę bei nustatyti skirtingų modelių privalumus ir trūkumus.

2. Atlikti trumpalaike apkrova veikiamų silpnai armuotų gelžbetoninių sijų eksperimentinius tyrimus. Gauti momentų ir kreivių diagramas, tinkamas spręsti sijų deformavimo atvirkštinio uždavinio sprendimui.

3. Surinkti literatūroje paskelbtų tempiamųjų ir lenkiamųjų gelžbetoninių elementų eksperimentinių tyrimų duomenis, kurie tiktų gelžbetonio deformavimo atvirkštinio uždavinio sprendimui.

4. Sukurti atvirkštinio uždavinio algoritmą tempiamajam sustandėjimui modeliuoti armatūros diagrama, naudojant eksperimentines lenkiamųjų elementų momentų ir kreivių diagramas.

5. Taikant gelžbetoninių lenkiamųjų elementų eksperimentų duomenis bei pasiūlytąjį medžiagų modelio kūrimo algoritmą, gauti tempiamojo sustandėjimo įtempių ir deformacijų diagramas.

6. Atlikti tempiamųjų ir lenkiamųjų gelžbetonių elementų įtempių ir deformacijų būvio analizę, taikant diskrečiųjų plyšių modelį.

Mokslinis naujumas

1. Darbe gauti nauji trumpalaike apkrova veikiamų gelžbetonių sijų eksperimentinių tyrimų duomenys.

2. Sukurtas atvirkštinio uždavinio algoritmas tempiamajam sustandėjimui modeliuoti armatūros diagrama, naudojant eksperimentines lenkiamųjų elementų momentų ir kreivių diagramas. Pirmą kartą gautos tokios diagramos, taikant šio darbo ir kitų autorių eksperimentinius duomenis. Gauti rezultatai atskleidė naujus lenkiamųjų gelžbetonių elementų tempiamosios zonos elgsenos aspektus, kurie yra svarbūs apskaičiuojant deformacijas ir pleišėtumą.

3. Pasiūlytas supaprastintas skaičiavimo metodas eliminuoti betono traukimąsi iš lenkiamųjų gelžbetoninių elementų momentų ir kreivių bei tempiamojo sustandėjimo diagramų.

Tyrimų metodika. Darbe taikyti teoriniai, skaitiniai ir eksperimentiniai metodai. Gelžbetoninių elementų (tempiamųjų ir lenkiamųjų), veikiamų trumpalaike apkrova, tempiamasis sustandėjimas modeliavimas armatūros vidutinių įtempių ir deformacijų diagrama bei diskrečiųjų plyšių modeliu.

Praktinė vertė. Pagal eksperimentinius duomenis gautosios tempiamojo sustandėjimo diagramos atskleidė naujus lenkiamųjų gelžbetonių elementų tempiamosios zonos elgsenos aspektus, kurie yra svarbūs apskaičiuojant deformacijas ir pleišėtumą. Gauti tyrimų rezultatai praplečia atvirkštinio uždavinio sprendimo taikymo ribas. Pasiūlytasis tempiamojo sustandėjimo įvertinimo algoritmas leidžia tiksliai įvertinti vidutinę tempiamojo betono įtempių atstojamąją įvairiose apkrovimo stadijose. Šis algoritmas taip pat leis nustatyti efektyviosios betono tempiamosios zonos aukštį.

Ginamieji teiginiai

1. Pasiūlytasis gelžbetoninių sijų deformavimo atvirkštinio uždavinio sprendimo algoritmas gali būti taikomas modeliuojant tempiamąjį sustandėjimą.
2. Tempiamasis sustandėjimas didėja mažinant armavimo koeficientą ir didinant apsauginį betono sluoksnį.
3. Pasiūlytasis tempiamojo sustandėjimo modeliavimo armatūros diagrama būdas leidžia nustatyti efektyviosios betono tempiamosios zonos aukštį.
4. Pasiūlytasis betono traukimosi efekto vertinimo pagal momentų ir kreivių diagramą metodas yra korektiškas matematine prasme, nes visose apkrovimo stadijose įmanomas analizinis sprendimas.
5. Diskretaus pleišėjimo modeliavimas reikalauja patikslintų armatūros ir betono sukibimo išraiškų.

Darbo apimtis. Disertaciją sudaro įvadas, keturi skyriai ir rezultatų apibendrinimas. Darbo apimtis yra 101 puslapis, tekste panaudotos 84 numeruotos formulės, 52 paveikslai ir 4 lentelės. Rašant disertaciją buvo naudota 108 literatūros šaltiniai.

Pirmame disertacijos skyriuje analizuojami gelžbetoninių elementų deformacijų ir tempiamojo sustandėjimo modeliai.

Antrame disertacijos skyriuje atlikti trumpalaike apkrova veikiamų silpnai armuotų gelžbetoninių sijų eksperimentiniai tyrimai.

Trečiame disertacijos skyriuje pasiūlyta metodika, leidžianti pagal gelžbetoninių elementų eksperimentinius duomenis (sprendžiant atvirkštinį deformavimo uždavinį) parinkti tempiamosios zonos skaitinių modelių parametrus.

Ketvirtame disertacijos skyriuje pasiūlytas gelžbetoninių elementų deformacijų skaičiavimo algoritmai, pagrįsti diskretaus pleišėjimo koncepcija.

Bendrosios išvados

1. Tempiamojo betono elgsena tarp plyšių (betono tempiamojo sustandėjimo efektas) tiriama jau daugiau nei septynis dešimtmečius, bet pasaulyje nėra vieningų ir tarpusavyje suderintų deformacijų ir plyšio pločio skaičiavimo teorijų ir medžiagų modelių. Tai, kad skirtingose šalyse taikomi skirtingi projektavimo normų metodai, rodo nagrinėjamos mokslinės problemos sudėtingumą.

2. Adekvatus betono tempiamojo sustandėjimo modeliavimas yra labai svarbus, įvertinant gelžbetoninių elementų deformacijas ir plyšio pločius. Literatūros analizė parodė, kad skaitiniuose algoritmuose dažniausiai taikomi trys armatūros ir betono sąveikos modeliavimo koncepcijos: 1) Diskrečiųjų plyšių modeliai, pagrįsti šlyties įtempių kontakto zonoje ir armatūros slinkties dėsniu. Šie modeliai paremti sudėtingais skaičiavimo mechanizmais, o juose taikomos kontakto zonos šlyties įtempių ir armatūros slinkties dėsniai kol kas nėra tikslūs. 2) Modeliai, kuriuose tempiamasis sustandėjimas aprašomas tempiamojo betono vidutinių įtempių ir vidutinių deformacijų dėsniu. Tai plačiausiai taikoma modeliavimo kryptis, nes jos skaitinė realizacija paprasčiausia. 3) Modeliai, kuriuose tempiamasis sustandėjimas įvertinamas armatūros įtempių ir deformacijų dėsniais. Tai, palyginti, retai taikomas skaitinio modeliavimo būdas.

3. Gauti tyrimų rezultatai praplečia atvirkštinio uždavinio sprendimo algoritmo, taikymo ribas. Sukurtas algoritmas tempiamajam sustandėjimui modeliuoti armatūros įtempių ir deformacijų diagrama, naudojant eksperimentinius lenkiamųjų gelžbetoninių elementų duomenis.

4. Taikant pasiūlytąjį modeliavimo būdą, pirmą kartą pagal eksperimentinių lenkiamųjų gelžbetoninių elementų duomenis gautos tempiamojo sustandėjimo diagramos. Tokios diagramos turi kylančiąją ir krentančiąją dalis. Sumažėjus 10 % skerspjūvio efektyviajam aukščiui, maksimalūs įtempiai padidėja 40 %. Mažai armuotuose elementuose krentančiosios dalies įtempiai mažėja lėčiau nei daug armuotuose elementuose: kai armavimo koeficientas sumažėja nuo 2 iki 0,3 %, ribinė tempiamojo sustandėjimo deformacija padidėja keturis kartus.

5. Gautosios tempiamojo sustandėjimo diagramos atskleidė naujus lenkiamųjų gelžbetonių elementų tempiamosios zonos elgsenos aspektus, kurie yra svarbūs apskaičiuojant deformacijas ir pleišėtumą. Pasiūlytasis metodas leidžia įvertinti efektyviosios betono tempiamosios zonos plotą, kuris priklauso nuo naudingojo aukščio ir skerspjūvio aukščio santykio.

6. Darbe pasiūlytas betono traukimosi įtakos vertinimo pagal eksperimentinių gelžbetoninių sijų momentų ir kreivių bei tempiamojo sustandėjimo diagramų uždavinio sprendimas turi analizę išraišką, nes ieškomas tik vienas nežinomasis – tempiamosios armatūros deformacijos modulis. Tai yra pagrindinis pranašumas lyginant su originaliuoju metodu (turinčiu daug nežinomųjų), kuomet tempiamasis sustandėjimas modeliuojamas tempiamojo betono vidutinių įtempių ir deformacijų diagrama.

7. Pasiūlyta atvirkštinio deformavimo uždavinio sprendimo metodika pritaikyta analizuojant diskrečiųjų plyšių modelio adekvatumą. Nors tokie modeliai teoriškai galėtų adekvačiai įvertinti gelžbetoninių elementų pleišėjimą bei įtempių ir deformacijų būvį, juose taikomi šlyties įtempių kontakto zonoje ir armatūros slinkties dėsniai nėra tikslūs. Modeliuojant gauta, kad supleišėjusio elemento tempiamasis sustandėjimas, didėjant apkrovai, nuolat augo, t. y. tempiamojo sustandėjimo diagramos praktiškai neturėjo krentančiosios dalies ir betonui pasiekus pleišėjimą tempimo įtempiai dar išaugo apie 35 %. Tai iš esmės prieštarauja šiame darbe pagal eksperimentinius duomenis gautoms tempiamojo sustandėjimo diagramoms, kai tempimo įtempiai tolygiai mažėjo pasiekę maksimumą.

Trumpos žinios apie autorių

Donatas Salys gimė 1982 m. lapkričio 25 d. Vilniuje.

2005 m. įgijo inžinerinės informatikos bakalauro laipsnį, o 2007 m. – inžinerinės informatikos mokslo magistro laipsnį Vilniaus Gedimino technikos universiteto Fundamentinių mokslų fakultete. 2007–2011 m. – Vilniaus Gedimino technikos universiteto doktorantas.

Donatas SALYS

MODELLING OF TENSILE ZONE
BEHAVIOUR OF REINFORCED
CONCRETE MEMBERS

Summary of Doctoral Dissertation
Technological Sciences, Civil Engineering (02T)

Donatas SALYS

GELŽBETONINIŲ ELEMENTŲ
TEMPIAMOSIOS ZONOS ELGSENOS
MODELIAVIMAS

Daktaro disertacijos santrauka
Technologijos mokslai, statybos inžinerija (02T)

2011 12 23. 1,25 sp. l. Tiražas 70 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