



Remigijus ŠALNA

**INFLUENCE OF STEEL FIBERS
ON PUNCHING SHEAR STRENGTH
OF BEAMLESS REINFORCED CONCRETE
SLABS**

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

1527-M

Vilnius  **2008**
LEIDYKLA
TECHNIKA

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Remigijus ŠALNA

**INFLUENCE OF STEEL FIBERS
ON PUNCHING SHEAR STRENGTH
OF BEAMLESS REINFORCED CONCRETE
SLABS**

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

Vilnius  2008
The logo of Vilnius Gediminas Technical University (VGTU) is a square emblem. Inside the square, the letters 'VGTU' are at the top, and 'LEIDYKLA' and 'TECHNIKA' are stacked below them. The emblem is flanked by the word 'Vilnius' on the left and the year '2008' on the right.

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2002–2008.

The dissertation is defended as an external work.

Scientific Consultant

Prof Dr Habil Jonas Gediminas MARČIUKAITIS (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 (Institute of Mathematics and Informatics, Informatics Engineering – 07T),

Prof Dr Habil Gintaris KAKLAUSKAS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Civil Engineering – 02T),

Prof Dr Habil Ipolitas Zenonas KAMAITIS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Civil Engineering – 02T),

Prof Dr Habil Vytautas STANKEVIČIUS (Kaunas University of Technology, Technological Sciences, Civil Engineering – 02T).

Opponents:

Prof Dr Habil Jonas BAREIŠIS (Kaunas University of Technology, Technological Sciences, Mechanical Engineering – 09T),

Assoc Prof Dr Juozas VALIVONIS (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 30 October 2008.

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@adm.vgtu.lt

The summary of the doctoral dissertation was distributed on 29 September 2008.

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).

© Remigijus Šalna, 2008

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Remigijus ŠALNA

**DISPERSINIO ARMAVIMO ĮTAKA
GELŽBETONINIŲ BESIŲ
PERDANGOS PLOKŠČIŲ
PRASPAUDIMUI**

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

Vilnius  2008

Disertacija rengta 2002–2008 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.
Disertacija ginama eksternu.

Mokslinis konsultantas

prof. habil. dr. Jonas Gediminas MARČIUKAITIS (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 (Matematikos ir informatikos institutas, technologijos mokslai, informatikos inžinerija – 07T),

prof. habil. dr. Gintaris KAKLAUSKAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, statybos inžinerija – 02T),

prof. habil. dr. Ipolitas Zenonas KAMAITIS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, statybos inžinerija – 02T),

prof. habil. dr. Vytautas STANKEVIČIUS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, statybos inžinerija – 02T).

Oponentai:

prof. habil. dr. Jonas BAREIŠIS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, mechanikos inžinerija – 09T),

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

Disertacija bus ginama viešame Statybos inžinerijos mokslo krypties tarybos posėdyje 2008 m. spalio 30 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@adm.vgtu.lt

Disertacijos santrauka išsiuntinėta 2008 m. rugsėjo 29 d.

Disertaciją galima peržiūrėti Vilniaus Gedimino technikos universiteto bibliotekoje (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lietuva).

VGTU leidyklos „Technika“ 1527-M mokslo literatūros knyga.

© Remigijus Šalna, 2008

General characteristic of dissertation

Topicality of the problem. Steel fiber reinforced concrete is the type of composite materials belonging to most important technical-economical priorities of the 21st century. That is why the theory of composite materials is one of the most developing studies. These factors determine rapid development of new building structures and materials, higher quality and variety. Furthermore, presently secondary materials are used to produce new composite materials. The usage of steel fiber reinforced concrete in monolithic joints is well known as a good alternative of additional reinforcement because of chaotic distribution of steel fibers in complex stress and strain state. However, the absence of building codes, regulating the usage of steel fibers in bearing structures was the reason why practical use of steel fibers for a time was stopped. Recently, different countries (USA, Japan, Russia, etc.) have prepared additional regulations to building codes for steel fiber reinforced concrete. Therefore, recent scientific articles review clearly underlines the expediency of using steel fibers in monolithic connections, such as column-slab joints: in this case, not only the increase of load capacity is obtained, but also, as brittle failure becomes plastic, it becomes predictable. Unfortunately, the quantity of scientific articles on this topic is very limited.

The analysis of well known design codes and different models even in punching case without steel fibers shows that there is no common theory in calculating punching shear strength. Existing models of punching shear strength with steel fibers are mainly based on empirical coefficients, or require direct tests, what makes the design of such structures more complicated. Besides, the analysis of elastic and plastic characteristics of steel fiber reinforced concrete is incomplete, because there is no unified, well grounded theory to evaluate them. These factors show that punching shear strength with steel fiber reinforced concrete is not fully researched, and requires additional theoretical and experimental investigations. Therefore, the aim of the thesis is to create steel fiber reinforced concrete punching shear strength model and to enrich punching shear with steel fibers experimental data bank.

The dissertation presents steel fiber reinforced concrete punching shear strength model. Also, the empirical method, evaluating the influence of steel fibers calculating the punching shear strength according to Lithuanian and Euro Codes, is proposed.

Aim of the dissertation is to propose the punching shear strength model, estimating type, strength, different anchoring and geometrical characteristics of steel fibers, as well as plastic strains of steel fiber reinforced concrete.

Main tasks

1. To analyze punching shear strength methods and define the main factors, influencing punching shear strength.
2. To analyze the stress and state of existing punching shear strength models.
3. To analyze steel fiber reinforced concrete strength and deformation models.
4. To propose punching shear strength with steel fibers reinforced concrete model, evaluating factual as well as plastic characteristics.
5. To make tests in order to verify the suggested model.
6. To make propositions for the evaluation of steel fibers reinforced concrete characteristics, calculating punching shear strength according to Lithuanian and Euro Codes.

Scientific novelty

1. Proposed model estimates steel fibers volume, steel fibers strength, geometrical and anchorage characteristics, as well as plastic strains of steel fiber reinforced concrete, evaluating punching shear strength.
2. The calculation method, evaluating plastic strains of steel fiber reinforced concrete element, subjected to bending, is proposed.

Main object

The main object of this dissertation is the punching shear strength with steel fibers of reinforced concrete slabs.

Methodology of research

The calculation methods of punching shear strength models and strength-deformation models of composed materials, presented in scientific literature, were used. Experimental research of punching shear strength with steel fiber reinforced concrete, as well as steel fiber reinforced concrete in uniaxial and biaxial stress and strain states, was conducted.

Practical value

1. New experimental data on the anchorage of steel fibers in concrete matrix and its influence on steel fiber reinforced concrete strength were obtained.
2. New experimental data on the behaviour of strength and deformation of steel fiber reinforced concrete, subjected to uniaxial, biaxial and three-axial stress and strain states were obtained.

Defended propositions

1. Steel fibers have influence on punching shear strength and deformation.

2. Suggested punching shear model estimates the type, strength, different anchoring and geometrical characteristics of steel fibers, as well as plastic strains of steel fiber reinforced concrete.

The scope of scientific work

The dissertation consists of: general characteristics, a list of notations, 58 pictures, 11 tables, 5 main chapters, conclusions and recommendations, and finally, a list of references. The total scope of dissertation is 146 pages.

CONTENT OF DISSERTATION

1. Introduction

First chapter introduces the problem and its topicality. Also, the purposes and tasks of the dissertation are formulated. Furthermore, the methods used and the novelty of solutions are described. Also, the author's publications and the structure of the thesis is presented.

2. The analysis of punching shear strength models

Second chapter covers the review and analysis of existing punching shear strength methods and models. They showed that there is no unified theory on calculating punching shear strength. Two main types of punching shear strength models can be distinguished:

- failure occurs when compression zone is cut from shear and compression stress;
- failure occurs when tensile stresses of the concrete in punching cone exceed tensile strength.

The comparison of theoretical models and tests results shows that more accurate results can be obtained by calculating punching shear strength using the first group of models.

The analysis of punching shear test results of other authors also indicates that steel fibers have great influence on punching shear strength. However, such experiments are very limited in scientific literature, and existing methods are mainly based on empirical coefficients. Referring to this analysis, the task of the dissertation was formulated: to create a punching shear strength model, based on the first group of models discussed, and to evaluate the influence of steel fibers on strength and deformations.

3. Theoretical investigation of strength and deformation of steel fiber reinforced concrete and suggested model

The third chapter presents the analysis of well-known strength and deformation models of composed materials and steel fiber reinforced concrete strength and deformation model is proposed. The model is based on general principles of modelling and design of composed materials (additivity law). Also, it evaluates elastic and plastic characteristics of concrete and steel fibers, using idealized stress-strain relations (Fig 1).

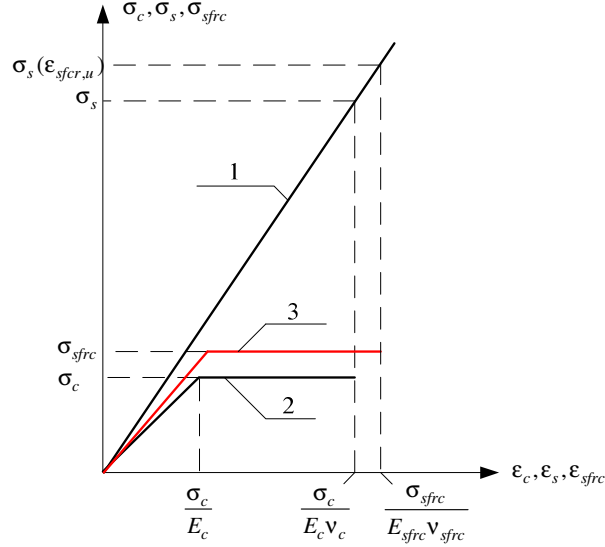


Fig 1. Idealized $\sigma - \varepsilon$ relations: 1 is for steel fibers; 2 is for concrete; 3 is for steel fiber reinforced concrete. Here E_c , E_{sfrc} , ν_c , ν_{sfrc} – elastic modulus and elastic characteristics for concrete and steel fiber reinforced concrete, respectively

The strength of steel fiber reinforced concrete depends on the anchoring of steel fiber in concrete matrix. The strength of anchoring depends on tangential bond stresses τ_1 in half length of fiber, and on bond stresses in the hook of fiber. In this model, the average magnitude of normal stresses σ_f , expressed by tangential bond stresses is used. Tangential stresses in the hook are expressed by tangential bond stresses in half length of fiber, multiplied by the coefficient of anchorage. The coefficient of replacing chaotic fibers displacement to properly oriented reinforcing (suggested by prof. Рабинович, Ф. Н.) was

employed in the formula. Finally, steel fiber reinforced concrete ultimate strength can be defined as:

$$\sigma_{sfrc} = 0,41(1+k_{at})\tau_1 \frac{l_f}{d_f} \left(\frac{E_c(1-\lambda_c)}{E_s} V_c + V_f \right), \quad (1)$$

where k_{at} means anchoring coefficient, observed in test results, l_f , d_f – length and diameter of fiber, E_c , E_s – modulus of elasticity of concrete and steel fibers, $\lambda_c = 1 - \nu_c$ – plasticity characteristic of concrete, V_c , V_f – volume of concrete and steel fibers.

Similarly, all other strength characteristics are expressed in the model suggested. Deformation modulus of steel fiber reinforced concrete (as well as ultimate strains) in the suggested model is characterized by the coefficient of plasticity λ_{sfrc} . Using additivity law in composed materials, equilibrium equation of plain strain, and reduction method of cross-section, the coefficient of plasticity of steel fiber reinforced concrete λ_{sfrc} can be expressed by the following equation:

$$\begin{cases} \nu_{sfrc} = \frac{\left(1 - V_f + \frac{\alpha - V_f(\alpha - 1)}{1 + V_f(\alpha - 1)} V_f \right) \nu_c}{(1 - V_f + \alpha V_f)}, \\ \lambda_{sfrc} = 1 - \nu_{sfrc} \end{cases}, \quad (2)$$

where $\alpha = E_f / E_c$.

Applying suggested steel fiber reinforced concrete strength and deformation characteristics, and using idealized stress-strain distribution curves (Fig 2), the position of neutral axis of flexural element was defined as:

$$x = \frac{-\left(2\omega_{sfrc,t} n_{sfrc} h \right) + \left[\left(2\omega_{sfrc,t} n_{sfrc} h \right)^2 + 4 \left(\omega_{sfrc,t} n_{sfrc} - \omega_{sfrc,c} \right) \times \left(\omega_{sfrc,t} n_{sfrc} h^2 \right) \right]^{0,5}}{2 \left(\omega_{sfrc,t} n_{sfrc} - \omega_{sfrc,c} \right)}, \quad (3)$$

where

$$n_{sfrc} = \frac{E_{sfrc} (1 - \lambda_{sfrc,t})}{E_{sfrc} (1 - \lambda_{sfrc,c})}, \quad \left. \begin{aligned} \omega_{sfrc,t} &= \frac{1 + \lambda_{sfrc,t}}{2} \\ \omega_{sfrc,c} &= \frac{1 + \lambda_{sfrc,c}}{2} \end{aligned} \right\}.$$

The resultant force of tension and compression zones can be expressed as follows:

$$\left. \begin{aligned} F_c &= \omega_{sfrc,c} b x \sigma_{sfrc,c} \\ F_t &= \omega_{sfrc,t} b (h - x) \sigma_{sfrc,t} \end{aligned} \right\}. \quad (4)$$

The arm of resultant forces can be defined as:

$$\left. \begin{aligned} z_c &= h - \frac{1}{3} \left(1 + \lambda_{sfrc,c} - \frac{\lambda_{sfrc,c}}{1 + \lambda_{sfrc,c}} \right) x \\ z_t &= \frac{1}{3} \left(1 + \lambda_{sfrc,t} - \frac{\lambda_{sfrc,t}}{1 + \lambda_{sfrc,t}} \right) (h - x) \end{aligned} \right\}. \quad (5)$$

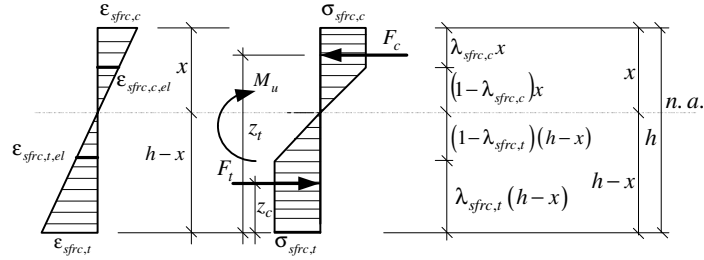


Fig 2. The state of strain and stress of normal section in steel fiber reinforced concrete member, subjected to bending

The cracking and ultimate moment can be calculated by the following equations:

$$\left. \begin{aligned} M_{crc} &= F_t (z_c - z_t) \\ M_u &= F_c (z_c - z_t) \end{aligned} \right\}. \quad (6)$$

4. Experimental investigations of physical-mechanical steel fiber reinforced concrete characteristics and the comparison of experimental results to suggested model in various stress and strain states

The fourth chapter presents experimental program of uniaxial and biaxial stress and strain state of steel fiber reinforced concrete. Steel fiber pull-out tests (5 series) were conducted, and the anchorage coefficients for different types of fibers were explored. The comparison of suggested strength-deformation model to tests results of tensile, compressive strengths and elasticity modulus shows good results: $0,97 \div 1,18$, $0,98 \div 1,03$, and $1,02 \div 1,05$, respectively (total number of specimens is 3×16). In the comparison of plasticity coefficients (16 specimens), good correspondence is also achieved (1,09). Evaluation method of distance to neutral axis, applying idealized (trapezium) stress-strain curves, was compared to tests results and also demonstrates satisfying correspondence ($0,97 \div 1,03$) (4 series, 36 beams in total). According to these results, the suggested theoretical model was applied to punching shear strength model. To verify the model, punching shear tests of reinforced concrete slabs with steel fiber reinforced concrete also were conducted (4 slabs). The punching shear failure character is presented in Fig 3. Tests results are reported in Table 1.

Table 1. Punching shear test results

Specimen code	d , <i>mm</i>	$f_{c,cube}$, <i>MPa</i>	V_f , <i>%</i>	F_{test} , <i>kN</i>
FRC-1	120	37,54	1,0	417,02
FRC-1,5	123	37,54	1,5	457,79
C	120	41,56	0	454,20
FRC-2	120	41,56	2,0	519,76

In the current program, the load capacity increase of 1,15 times was obtained. Test results also demonstrate that steel fibers can change considerably failure character from brittle to plastic failure (slab deflections at ultimate load increase by 3,2 times). Furthermore, tests results show that the critical perimeter of steel fiber reinforced slabs was formed at distance $(2,4-2,6)d$ from column face, while in convention slab the distance was $2d$. Also, the compression zone of steel fiber reinforced slabs was significantly bigger, as compared to conventional slab. All these factors clearly demonstrate that the volume of steel fibers has influence on stress-strain state, which determines the angle of trajectories of principal stresses.

4. The stress distribution of normal stresses in compression zone is trapezium-shaped, and the distribution of tangential stresses is a function from normal stresses.
5. Failure occurs when the principal stresses cut the compression zone by the angle, equal to the angle of principal stresses.

Steel fiber reinforced concrete strength and deformation magnitudes are evaluated according to the method suggested. Estimating plastic strains, the distance to neutral axis is calculated by the following equation:

For reinforced concrete element:

$$x = \frac{-\left[A_{s1}n_{sc} + A_{s2}\frac{n_{sc}}{n_{ss}}\right] + \left[\left(A_{s1}n_{sc} + A_{s2}\frac{n_{sc}}{n_{ss}}\right)^2 + 4\left(\frac{1+\lambda_c}{2}\right)\left(A_{s1}n_{sc}d + A_{s2}\frac{n_{sc}}{n_{ss}}a_2\right)\right]^{0.5}}{(1+\lambda_c)}, \quad (7)$$

where $n_{ss} = E_{s1} / E_{s2}$, $n_{sc} = E_{s1} / E_c (1 - \lambda_c)$.

For steel fiber reinforced concrete element:

$$x = \frac{-\left[A_{s1}n_{sfrc,sc} + A_{s2}\frac{n_{sfrc,sc}}{n_{ss}} + 2dD\right] + \left[\left(A_{s1}n_{sfrc,sc} + A_{s2}\frac{n_{sfrc,sc}}{n_{ss}} + 2dD\right)^2 + 4(\omega_{sfrc,c} - D)\left(A_{s1}n_{sfrc,sc}d + A_{s2}\frac{n_{sfrc,sc}}{n_{ss}}a_2 - d^2D\right)\right]^{0.5}}{2[\omega_{sfrc,c} - D]}, \quad (8)$$

Where

$$\left. \begin{aligned} \omega_{sfrc,t} &= \frac{1 + \lambda_{sfrc,t}}{2} \\ \omega_{sfrc,c} &= \frac{1 + \lambda_{sfrc,c}}{2} \end{aligned} \right\}, \quad \left. \begin{aligned} n_{sfrc,sc} &= \frac{E_{s1}}{E_{sfrc,c}(1 - \lambda_{sfrc,c})} \\ n_{sfrc,st} &= \frac{E_{s1}}{E_{sfrc,t}(1 - \lambda_{sfrc,t})} \end{aligned} \right\}, \quad D = \omega_{sfrc,t} \frac{n_{sfrc,sc}}{n_{sfrc,st}}.$$

The coefficients of shapes of normal and tangential stresses in compression zone for concrete and steel fiber reinforced concrete can be expressed as:

$$\left. \begin{aligned} \omega_{\sigma} &= (1 + \lambda_c) / 2 \\ \omega_{\tau} &= 0,43(1 + \lambda_c) \end{aligned} \right\}, \left. \begin{aligned} \omega_{\sigma} &= (1 + \lambda_{sfr,c}) / 2 \\ \omega_{\tau} &= 0,43(1 + \lambda_{sfr,c}) \end{aligned} \right\}. \quad (9)$$

The principal stresses and angle of their trajectories are calculated according to well-known equations of material resistance:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{1,2} &= -\sigma_u / 2 \pm \sqrt{\sigma_u^2 / 4 + \tau_u^2} \\ \tan 2\alpha &= 2\tau_u / \sigma_u \end{aligned} \right\}. \quad (10)$$

The critical area in the compression zone can be defined in the following way:

For circular columns:

$$A = \pi \left[\left(\frac{1}{2}a + \frac{1}{2}a + x \cot \alpha \right) \frac{x}{\sin \alpha} \right] = \pi \left[(a + x \cot \alpha) \frac{x}{\sin \alpha} \right]. \quad (11)$$

For rectangular columns:

$$A = 4 \left[\frac{1}{2}(2a + 2x \cot \alpha) \frac{x}{\sin \alpha} \right] = 4 \left[(a + x \cot \alpha) \frac{x}{\sin \alpha} \right]. \quad (12)$$

Failure criterion is expressed by the equation below:

$$\min F_u = \sigma_{1,2} A. \quad (13)$$

Fig 5 presents the comparison of suggested model to test results of other authors. The comparison demonstrates good accuracy of suggested model for conventional slabs (mean value $\mu_X = 1,06$, standard deviation $\sigma_X = 0,17$, coefficient of variation $\nu = 16\%$). The results of the model for steel fiber reinforced concrete slabs were less precise ($\mu_X = 1,12$, $\sigma_X = 0,08$, and $\nu = 7\%$, respectively).

Fig 6 presents the comparison of test and theoretical results using the models suggested and the models of other authors. Graphical comparison clearly demonstrates (parallelism of trend lines) good correspondence with tests results.

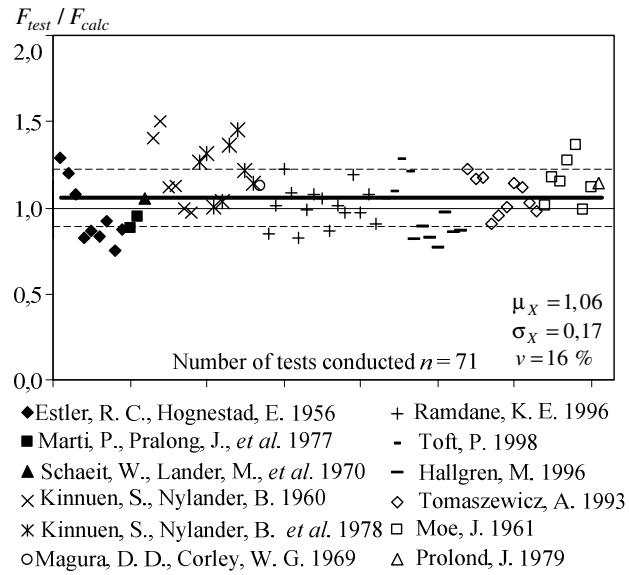


Fig 5. Comparison of suggested model to tests results of other authors (conventional slabs)

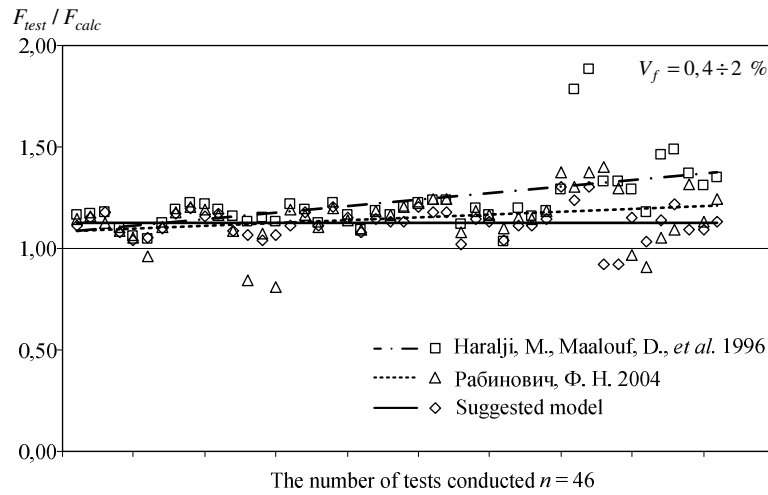


Fig 6. The comparison of test and theoretical results using the model suggested and the models of other authors (steel fiber reinforced slabs)

The possibility to combine the suggested model with Lithuanian and Euro Codes, evaluating the effect of steel fibers on punching shear strength, is also presented in the dissertation. In this case, design shear strength according to Lithuanian standards and EC2 should be increased by functional multiplier $(1 + k_{sfrc} V_f^{1.5})$, obtained from experiments:

$$v_{Rd,sfrc} = \frac{0,18}{\gamma_c} k (100 \rho_l f_{ck})^{1/3} (1 + k_{sfrc} V_f^{1.5}), \quad (14)$$

where k_{sfrc} – the coefficient, estimating type, geometrical and anchoring characteristics of steel fibers, presented in Table 2; V_f – steel fibers volume fraction (expressed in per cents).

Table 2. Empirical coefficient k_{sfrc} for different types of steel fibers

Type of steel fibers	l_f / d_f	f_y, MPa	k_{sfrc}
Hooked fibers	50(60)	1100	0,049(0,045)
Crimped fibers	50	1100	0,060
Wavy fibers	50	1100	0,047
Straight fibers	50	1100	0,019

6. Main conclusions

1. The analysis of existing punching shear strength methods and models showed that there is no common theory and models in calculating punching shear strength. The models are similar in the way that fictitious shear stresses act in fictitious shear area, and they are mainly derived from test results which differ in their values. These facts clearly demonstrate that punching shear is not fully analyzed and requires additional researches.
2. The review of existing punching shear strength revealed that two main model types can be distinguished: first, failure occurs when compression zone is cut from shear and compression stress; second, failure occurs when tensile stresses of concrete in punching cone exceed tensile strength. More accurate results can be obtained by calculating punching shear strength using the first group of models. Therefore, the model suggested is based on the principles of these models.
3. The review of most recent scientific articles clearly underlines the expediency of using steel fibers in monolithic connections, such as

column-slab joints. Besides, such experiments are very few in scientific literature, and existing methods are mainly based on empirical coefficients or require direct tests. Moreover, the analysis of elastic and plastic characteristics of steel fiber reinforced concrete is incomplete, because there is no unified, well grounded theory to evaluate them. Therefore, according to the principles mentioned above, punching shear strength model, estimating the strength and deformation characteristics of steel fiber reinforced concrete, was created.

4. The comparison of suggested strength-deformation model for steel fiber reinforced concrete demonstrates good correspondence with test results (the ratio of experimental and calculated values: for tension and compression strength are $0,97 \div 1,18$, $0,98 \div 1,03$, respectively, for modulus of elasticity is $1,02 \div 1,05$, for the coefficients of plasticity is $1,03 \div 1,09$).
5. To verify the model suggested in biaxial stress-strain state, 36 steel fiber reinforced concrete beams in flexure were tested. Theoretical and tests results for defining the position of neutral axis, as well as ultimate and cracking moment, show good correspondence ($0,97 \div 1,03$). According to experimental tests made by the authors and other researchers, the method to calculate bending with shear, evaluating steel fibers volume fraction and shear span and deep ratio, was also suggested.
6. Original punching shear tests of steel fiber reinforced concrete slabs were conducted. In the current program, load capacity increase of 1,15 times, and plastic midspan deflection increase of 3,2 times was observed. Furthermore, tests results show that the critical perimeter of steel fiber reinforced slabs was formed at a distance of $(2,4 \div 2,6)d$ from column face, while in convention slab the distance was $2d$. Also, the compression zone of steel fiber reinforced slabs was significantly bigger, as compared to the conventional slab. All these factors clearly demonstrate that the volume of steel fibers has significant influence on stress-strain state, which determines the angle of trajectories of principal stresses, and load capacity as well.
7. Suggested steel fibers reinforced concrete punching shear strength model estimates the main factors, such as concrete strength, longitudinal reinforcement, steel fibers volume, type, geometric and anchoring characteristics, and also plastic strains of steel fiber reinforced concrete. The comparison demonstrates good accuracy of the suggested model for conventional slabs (mean value $\mu_X = 1,06$, standard deviation

$\sigma_X = 0,17$, coefficient of variation $v = 16 \%$). The results of the model for steel fiber reinforced concrete slabs are also precise ($\mu_X = 1,12$, $\sigma_X = 0,08$, and $v = 7 \%$, respectively). Also, empirical method, evaluating the influence of steel fibers calculating the punching shear strength according to Lithuanian and Euro Codes, is proposed.

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

1. Šalna, R.; Marčiukaitis, G.; Vainiūnas, P. 2004. Estimation of factors influencing punching shear strength of RC floor slabs, *Journal of Civil Engineering and Management* 10(2): 137–142. ISSN 1392-3730 (EBSCO, ICONDA, CSA, SCOPUS).
2. Šalna, R.; Marčiukaitis, G. 2007. The influence of shear span ratio on load capacity of fiber reinforced concrete elements with various steel fiber volumes. *Journal of Civil Engineering and Management* 13(3): 209–215. ISSN 1392-3730 (EBSCO, ICONDA, CSA, SCOPUS).

In other editions

3. Šalna, R.; Marčiukaitis, G.; Vainiūnas, P. 2004. Analysis of beamless reinforced concrete ceilings resistance to punching shear, in *Selected papers of 8th International conference “Modern building materials, structures and techniques”*, Vilnius, 615–619. ISBN 9986-05-757-4 (Thomson ISI Proceedings).
4. Šalna, R.; Marčiukaitis, G. 2007. Analysis of stress and state of steel fibers reinforced concrete beams subjected to bending and shear, in *Selected papers of 9th International conference “Modern building materials, structures and techniques”*, Vilnius, II: 758–762. ISBN 978-955-28-199-3 (Thomson ISI Proceedings).
5. Šalna, R. 2006. Influence of steel fiber volume fraction on strength of steel fibers reinforced concrete elements, in *Proceedings of the 9th Conference of Young scientists “Science is future of Lithuania”, held in Vilnius on 29–31 March, 2006. Civil Engineering* (Statyba: 9-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“, įvykusios Vilniuje 2006 m. kovo 29–31 d., pranešimų rinkinys). Vilnius: Technika, 241–246. ISBN 9955-28-047-6.
6. Šalna, R. 2004. Analysis of factors influencing the strength of punching shears, in *Proceedings of the 7th Conference of Young scientists*

- “Lithuania without science – Lithuania without future”, held in Vilnius on 25–26 March, 2004. Civil Engineering* (Statyba: 7-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“, įvykusios Vilniuje 2004 m. kovo 25–26 d., medžiaga). Vilnius: Technika, 129–136. ISBN 9986-05-775-2.
7. Šalna, R. 2003. The design singularities of reinforced beamless concrete slabs, in *Proceedings of the 6th Conference of Young scientists “Lithuania without science – Lithuania without future”, held in Vilnius on 27–28 March, 2003. Civil Engineering* (Statyba: 6-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“, įvykusios Vilniuje 2003 m. kovo 27–28 d., medžiaga.) Vilnius: Technika, 132–137. ISBN 9986-05-618-7.
 8. Šalna, R.; Papinigis, V. 2002. Design of monolithic connections of reinforced concrete slabs, in *Proceedings of the 5th Conference of Young scientists “Lithuania without science – Lithuania without future”, held in Vilnius on 27–29 March, 2002. Civil Engineering* (Statyba: 5-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“, įvykusios Vilniuje, 2002 m. kovo 27–29 d., medžiaga) Vilnius: Technika, 152–159. ISBN 9986-05-559-8.

About the author

Remigijus Šalna was born in Vilnius, on 18 of May 1978.

First degree in Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, Vilnius Gediminas Technical University, 2000. Master of Science in Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, Vilnius Gediminas Technical University, 2002. In 2002–2006 – PhD student of Vilnius Gediminas Technical University. From 2006 – Assistant in Reinforced Concrete and Masonry Structures Department of Vilnius Gediminas Technical University.

DISPERSINIO ARMAVIMO ĮTAKA GELŽBETONINIŲ BESIŲ PERDANGOS PLOKŠČIŲ PRASPAUDIMUI

Mokslo problemos aktualumas. Dispersiškai armuotas betonas yra vienas iš kompozitinių medžiagų tipų, priklausančių svarbiausiajai XXI amžiaus techninio ir ekonominio vystimosi prioritetinių krypčių. Todėl kompozitų teorija šiuo metu yra viena iš sparčiausiai besivystančių mokslo šakų. Kompozitinės medžiagos leidžia kurti gerokai tobulesnes statybines konstrukcijas, lemia aukštesnę jų kokybę bei įvairumą. Be to, dėl ekonominių veiksnių šiuo metu įvairios antrinės statybinės žaliavos naudojamos naujoms

kompozitinėms medžiagoms kurti. Dispersinė armatūra (plieniniu plaušu) armuotų betonų taikymas įvairiuose standžiuose gelžbetoninių konstrukcijų mazguose yra seniai žinomas kaip gera papildomo armavimo alternatyva esant sudėtingam įtempimų būviui dėl dispersinės armatūros išsidėstymo chaotiškumo. Tačiau nebuvo dispersinės armatūros taikymo laikančiose konstrukcijose reglamentuojamų skaičiavimo metodų, todėl jos taikymas laikinai buvo sustojęs. Šie veiksniai pastaruoju metu paskatino įvairias šalis (JAV, Japoniją, Rusiją ir kt.) parengti dispersinės armatūros taikymą reglamentuojančius dokumentus, kaip papildomus priedus prie projektavimo normų. Be to, naujausiuose moksliniuose straipsniuose aiškiai pabrėžiama, kad dispersinę armatūrą standžiuose mazguose, tokiuose kaip kolonos plokštės sandūra, tikslinga taikyti. Taip ne tik sustiprinama konstrukcija, bet ir suirimas tampa prognozuojamas – trapus suirimo charakteris pakeičiamas į plastišką. Deja, tokių eksperimentinių tyrimų mokslinėje literatūroje yra labai mažai.

Kaip rodo atlikta projektavimo normų ir įvairių skaičiavimo modelių analizė, skaičiuojant net ir nearmuoto dispersinė armatūra plokščių praspaudimo stiprį, vieningos nuomonės nėra prieita. Literatūroje aprašyti praspaudimo su dispersine armatūra skaičiavimo modeliai daugiausia pagrįsti empiriniais koeficientais arba reikalauja tiesioginių papildomų eksperimentinių tyrimų, o tai sunkina praktines projektavimo galimybes. Be to, literatūros šaltinių analizė rodo, kad betonų, armuotų dispersine armatūra, tampriosios ir plastinės savybės yra nepakankamai išnagrinėtos, nes taip pat nėra sukurta vieningos, gerai pagrįstos teorijos joms nustatyti. Šių veiksmų visuma rodo, kad praspaudimas su dispersine armatūra nėra iki galo ištirtas, tad ši tema reikalauja papildomų teorinių ir eksperimentinių tyrimų. Todėl tikslinga sukurti plokščių, armuotų dispersine armatūra skaičiavimo modelį, apimančią anksčiau išvardytus veiksmus, bei papildyti labai negausią plokščių praspaudimo su dispersine armatūra eksperimentinių duomenų bazę.

Pagal anksčiau pateiktą motyvaciją šiame darbe siūlomas praspaudimo su dispersine armatūra stiprio skaičiavimo modelis. Taip pat pristatomas empirinis metodas, kaip galima įvertinti dispersinės armatūros įtaką skaičiuojant praspaudimo stiprį pagal Lietuvoje galiojančias normas – statybos techninius reglamentus STR 2.05.05:2005 ir EC2.

Tyrimų objektas ir metodai. Svarbiausias šio darbo tyrimo objektas yra gelžbetoninių plokščių praspaudimo su dispersine armatūra, stipris. Tyrimams buvo naudota literatūroje pateikiamų praspaudimo bei kompozitų stiprio ir deformacijų skaičiavimo modelių analizė. Taip pat buvo atlikti plokščių, armuotų skirtingais dispersinės armatūros kiekiais, praspaudimo eksperimentiniai tyrimai, ir betonų, armuotų įvairiais dispersinės armatūros

tipais, vienašio ir dviašio įtempimų-deformacijų būvio eksperimentiniai tyrimai.

Darbo tikslas. Pasiūlyti praspaudimo stiprio skaičiavimo modelį, padedantį įvertinti dispersinės armatūros tipą, jos stiprį, skirtingas inkaravimosi ir geometrines savybes bei plastines deformacijas.

Darbo uždaviniai

1. Atlikti išsamią praspaudimo skaičiavimo metodų analizę ir nustatyti svarbiausius veiksnius, turinčius įtakos praspaudimo laikomajai galiai.
2. Atlikti žinomų praspaudimo skaičiavimo modelių įtempių ir deformacijų būvio analizę.
3. Atlikti dispersiškai armuoto betono stiprio bei deformacijų esamų modelių ir metodų analizę.
4. Pasiūlyti praspaudimo su kompozitinėmis medžiagomis stiprio skaičiavimo modelį, padedantį įvertinti faktiškąsias, taip pat plastines dispersiškai armuoto betono savybes.
5. Atlikti eksperimentinius tyrimus modeliui patikrinti.
6. Pateikti siūlymus, kaip įvertinti dispersiškai armuoto betono savybes skaičiuojant praspaudimą pagal Lietuvos ir Europos Sąjungos normas.

Mokslinis darbo naujumas

1. Pasiūlytas praspaudimo skaičiavimo modelis leidžia įvertinti dispersinės armatūros kiekio, stiprio, inkaravimosi savybes ir dispersiškai armuoto betono plastines deformacijas skaičiuojant praspaudimo stiprį.
2. Pasiūlytas lenkiamų, dispersine armatūra armuotų betoninių elementų skaičiavimo modelis (ribinio ir plyšių atsivėrimo momentų), įvertinant plastines deformacijas.
3. Eksperimentinių tyrimų būdu gauta naujų duomenų apie dispersinės armatūros inkaravimosi betono matricoje įtaką kompozito stipriui.
4. Eksperimentinių tyrimų būdu gauta naujų duomenų dispersine armatūra armuotų betoninių elementų stiprio ir defomatyvumo elgseną esant vienašiam, dviašiam ir triašiam įtempimų būviui.

Ginamieji teiginiai

1. Dispersinė armatūra turi įtakos praspaudimo stipriui ir deformacijoms.
2. Praspaudimo skaičiavimo modelis leidžia įvertinti dispersinės armatūros kiekio, stiprio, inkaravimosi savybes bei dispersiškai armuoto betono plastinės deformacijas, skaičiuojant praspaudimo stiprį.

Darbo aprobavimas ir publikacijos. Darbo rezultatai buvo paskelbti 9 mokslinėse konferencijose. Disertacijos tema išspausdinti 8 moksliniai straipsniai: 2 – Lietuvos recenzuojamuose periodiniuose mokslo leidiniuose,

referuojamuose tarptautinėse duomenų bazėse, 2 – konferencijų medžiagoje, referuotoje *Thomson ISI Proceedings* duomenų bazėje, 4 – mokslinėje konferencijų medžiagoje.

Disertacijos apimtis. Bendra disertacijos apimtis yra 146 puslapiai, joje yra 58 iliustracijos, 11 lentelių, 134 bibliografijų šaltinio sąrašas.

Disertacijos struktūra. Pirmajame (įvadiniam) skyriuje nagrinėjamas problemos aktualumas, formuluojamas darbo tikslas ir uždaviniai, aprašomas mokslinis darbo naujumas, pristatomi autoriaus pranešimai bei publikacijos, disertacijos struktūra.

Antrasis skyrius skirtas praspaudimo skaičiavimo metodų ir modelių analizei. Jo pabaigoje formuluojami disertacijos uždaviniai.

Trečiajame skyriuje teoriškai nagrinėjamos dispersiškai armuoto betono stiprio ir deformacinės savybės. Atlikus analizę pasiūlytas dispersiškai armuoto betono stiprio ir deformacijų skaičiavimo modelis.

Ketvirtajame skyriuje aprašomi atlikti dispersiškai armuoto betono fizinių ir mechaninių savybių eksperimentiniai tyrimai. Rezultatai palyginami su pasiūlytu teoriniu modeliu esant įvairiam įtempimų-deformacijų būviui.

Taip pat skyriuje aprašomi gelžbetoninių plokščių praspaudimo eksperimentinių tyrimų rezultatai.

Penktajame skyriuje pateikiamas siūlomas gelžbetoninių plokščių, armuotų dispersine armatūra apykolonio zonoje, skaičiavimo modelis. Jis palyginimas su eksperimentiniais rezultatais bei kitų autorių skaičiavimo modeliais. Taip pat pateiktas metodas, kaip įvertinti dispersinės armatūros įtaką skaičiuojant praspaudimo stiprį pagal statybos techninius reglamentus STR 2.05.05.2005 ir Europos Sąjungos normas EC 2.

Pagrindinės išvados

1. Atlikta daugelio šalių projektavimo normų ir žinomų skaičiavimo modelių analizė parodė, kad nėra vieningos metodikos ir bendrų modelių skaičiuojant praspaudimo stiprumą. Nustatyta, kad projektavimo normoms bendra yra tai, kad sąlygiškai apibrėžiami tangentiniai įtempiai, veikiantys sąlyginai apibrėžtame kritiniame plote, apskaičiuojami remiantis tik eksperimentinių tyrimų regresine analize, tačiau ir jie yra skirtingi. Tai aiškiai rodo, kad praspaudimo fenomenas nėra iki galo ištirtas ir reikia papildomų tyrimų.
2. Skaičiavimo modelių apžvalga parodė, kad vyrauja du praspaudimo modelių tipai:
 - kai suirimas įvyksta gniuždymo ir tangentiniams įtempimams nukerpant gniuždomą zoną;
 - kai suirimas įvyksta betono tempimo stipriui pasiekus ribinę reikšmę įstrižo pjūvio suformuotoje praspaudimo piramidėje.

- Pirmojo tipo skaičiavimo modeliai yra daug tikslesni ir aiškiau atspindi praspaudimo pobūdį, todėl atliktuose eksperimentiniuose ir teoriniuose tyrimuose buvo naudojami svarbiausi šių modelių principai.
3. Naujausiuose moksliniuose straipsniuose pabrėžiama, kad praspaudimo ir kitų konstrukcijų standžiuose mazguose tikslinga taikyti dispersinę armatūrą. Tačiau tokių eksperimentinių tyrimų atlikta nedaug, o esantys skaičiavimo modeliai daugiausia pagrįsti empiriniais koeficientais, arba reikalauja tiesioginių papildomų eksperimentinių tyrimų. Be to, literatūros šaltinių analizė parodė, kad dispersiškai armuoto betono tampriosios plastinės savybės išnagrinėtos nepakankamai, nes taip pat nėra sukurta vieningos gerai pagrįstos teorijos joms nustatyti. Todėl, remiantis minėtų modelių skaičiavimo principais, bei papildomai vertinant stiprio bei plastiškąsias kompozitų savybes, sukurtas plokščių, armuotų dispersine armatūra, skaičiavimo modelis.
 4. Atlikti eksperimentiniai tyrimai parodė, kad modelyje siūlomos teorinės dispersiškai armuoto betono stiprio, deformacijų ir plastiškumo koeficientų išraiškos gerai sutampa (eksperimentinių ir teorinių reikšmių santykis: $0,97 \div 1,18$, $1,02 \div 1,05$, $1,03 \div 1,09$).
 5. Siekiant patikrinti pasiūlytą metodiką, atlikti 36 sijų dviašio įtempimų būvio eksperimentiniai tyrimai. Lenkiamų sijų plyšio atsivėrimo (M_{cr}), ribinio lenkimo momento (M_u) teorinės reikšmės bei neutraliosios ašies padėtis palyginta su eksperimentiniais duomenimis. Rezultatai gerai sutampa: $0,97 \div 1,03$. Remiantis atliktais bei kitų autorių eksperimentiniais tyrimais pasiūlyta lenkimo su kirpimu skaičiavimo metodika vertinanti dispersinės armatūros kiekį bei jėgos peties ir naudingąjo aukščio santykį.
 6. Atlikti originalūs plokščių su dispersine armatūra apykolonio zonoje praspaudimo eksperimentiniai tyrimai. Nustatyta, kad plokščių, armuotų dispersine armatūra $V_f = 1...2\%$, praspaudimo laikomoji galia padidėja iki 1,15 karto, o plastiškas įlinkis – iki 3,2 karto. Atlikus eksperimentinius tyrimus nustatyta, kad gelžbetoninės plokštės kritinis perimetras susiformuoja $2d$ atstumu nuo kolonos krašto, o dispersiškai armuotų plokščių – $(2,4-2,62)d$. Be to, dispersiškai armuotose plokštėse gniuždoma zona buvo iki 1,23 karto didesnė. Šių veiksmų sugretinimas rodo, kad dispersinės armatūros kiekis turi įtakos įtempimų būviui. Nuo jo priklauso ir svarbiausiųjų įtempimų trajektorijų kampas bei laikomoji galia.
 7. Siūlomas praspaudimo stiprio skaičiavimo modelis leidžia įvertinti betono stiprio, išilginės armatūros kiekio, dispersinės armatūros kiekio, jos stiprio ir inkaravimosi savybių bei dispersiškai armuoto betono plastinių

deformacijų įtaką. Praspaudimo stiprio modelio tikslumas gelžbetoninėms plokštėms – $\mu_X = 1,06$, vidutinė kvadratinė nuokrypa $\sigma_X = 0,17$ ir variacijos koeficientas $\nu = 16\%$. Dispersiškai armuotoms gelžbetoninėms plokštėms – $\mu_X = 1,12$, $\sigma_X = 0,08$, $\nu = 7\%$. Taip pat pateiktas metodas, kaip įvertinti dispersinės armatūros įtaką skaičiuojant praspaudimo stiprį pagal statybos techninius reglamentus STR 2.05.05.2005 ir Europos Sąjungos normas EC 2.

Trumpos žinios apie autorių

Remigijus Šalna gimė 1978 m. gegužės 18 d. Vilniuje.

2000 m. įgijo statybos inžinerijos bakalauro laipsnį Vilniaus Gedimino technikos universiteto Statybos inžinerijos fakultete. 2002 m. įgijo Statybos inžinerijos mokslo magistro laipsnį Vilniaus Gedimino technikos universiteto Statybos inžinerijos fakultete. 2002–2006 m. – Vilniaus Gedimino technikos universiteto doktorantas. Nuo 2006 m. dirba asistentu Vilniaus Gedimino technikos universiteto Gelžbetoninių ir mūrinių konstrukcijų katedroje.

Remigijus Šalna

**INFLUENCE OF STEEL FIBERS ON PUNCHING SHEAR STRENGTH
OF BEEMLESS REINFORCED CONCRETE SLABS**

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

Remigijus Šalna

**DISPERSINIO ARMAVIMO ĮTAKA GELŽBETONINIŲ BESIŲ
PERDANGOS PLOKŠČIŲ PRASPAUDIMUI**

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

2008 09 19. 1,5 sp. l. Tiražas 100 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“, Saulėtekio al. 11,
10223 Vilnius, <http://leidykla.vgtu.lt>
Spausdino UAB „Baltijos kopija“,
Kareivių g. 13B, 09109 Vilnius,
<http://www.kopija.lt>