

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Darius ULBINAS

**CRACKING AND STIFFNESS  
ANALYSIS OF STEEL FIBER  
REINFORCED CONCRETE MEMBERS**

**SUMMARY OF DOCTORAL DISSERTATION**

**TECHNOLOGICAL SCIENCES,  
CIVIL ENGINEERING (02T)**



LEIDYKLA  
Vilnius TECHNIKA 2012

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2008–2012.

Scientific Supervisor

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

Members:

**Dr Valentin ANTONOVIČ** (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Materials Engineering – 08T),

**Dr Raimondas BLIŪDŽIUS** (Kaunas University of Technology, Technological Sciences, Civil Engineering – 02T),

**Prof Dr Habil Gintautas DZEMYDA** (Vilnius University, Technological Sciences, Informatics Engineering – 07T),

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

Opponents:

**Prof Dr Vytautas KARGAUDAS** (Kaunas University of Technology, Technological Sciences, Mechanical Engineering – 09T),

**Prof Dr Povilas VAINIŪNAS** (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 10 a. m. on 24 January 2013.

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 21 December 2012. 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).

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Darius ULBINAS

PLIENO PLAUŠU ARMUOTŲ  
GELŽBETONINIŲ ELEMENTŲ  
PLEIŠĖTUMO IR STANDUMO ANALIZĖ

DAKTARO DISERTACIJOS SANTRAUKA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,  
STATYBOS INŽINERIJA (02T)



LEIDYKLA  
Vilnius TECHNICA 2012

Disertacija rengta 2008–2012 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.  
Mokslinis vadovas

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

**Disertacija ginama Vilniaus Gedimino technikos universiteto Statybos inžinerijos mokslo krypties taryboje:**

Pirmininkas

**prof. dr. Romualdas KLIUKAS** (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, statybos inžinerija – 02T).

Nariai:

**dr. Valentin ANTONOVIČ** (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija – 08T),

**dr. Raimondas BLIŪDŽIUS** (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, statybos inžinerija – 02T),

**prof. habil. dr. Gintautas DZEMYDA** (Vilniaus universitetas, technologijos mokslai, informatikos inžinerija – 07T),

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

Oponentai:

**prof. dr. Vytautas KARGAUDAS** (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, mechanikos inžinerija – 09T),

**prof. dr. Povilas VAINIŪNAS** (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, statybos inžinerija – 02T).

Disertacija bus ginama viešame Statybos inžinerijos mokslo krypties tarybos posėdyje 2013 m. sausio 24 d. 10 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 2012 m. gruodžio 21 d.

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

VGTU leidyklos „Technika“ 2093-M mokslo literatūros knyga.

## **Introduction**

### ***Formulation of the problem and topicality of the work***

Well designed and well-constructed reinforced concrete structures should serve the centuries, however the reconstruction work in Europe consumed almost half of the budget of the construction industry. The reason is due to the brittleness of concrete and low tensile strength in constructions often opens unallowable cracks: steel bars extensively corrode and the formed corrosion products continue to erode the concrete structure. If protection or strengthening works are not undertaking, the construction becomes unserviceable. It is not surprising that in the whole world a huge financial investment and scientists and engineers forces allocated to these problems. A large number of modern solutions to ensure the proper working of reinforced concrete structures have been proposed. One of them is application of dispersive reinforcement for constraining of cracking strain of concrete. Steel fiber reinforcement basically changes the failure mode of the tensile concrete – fiber actively constrains the cracks opening, together transmitting tensile stresses in the crack. Significantly increase the plasticity of material and the residual stress increases, depending on the amount and type of fiber. It is an effective solution that allows to optimize the dimensions of the structure and to reduce material costs.

Due to high variety of fiber types and shapes, also due to the difficulty in determining the interaction of fiber and concrete a reliable residual stress-strain relationship of fiber reinforced concrete has not yet been offered. In each case, a specific, relatively complex and expensive tests are performed in which the obtained residual stress and strain relationships rarely reflect the behavior the real structural elements. Due to the different interaction characteristics of steel fibers and concrete, the determination of residual stresses of cracked steel fiber reinforced concrete is one of the most complex modeling tasks. There are currently few analytical models of residual stress are known.

### ***Research object***

The object of present study is stress-strain state and cracking of steel fiber reinforced concrete (SFRC) subjected to short-term static loading. Steel fiber reinforced concrete considering as a homogeneous material, solving physical modelling task of cracked tensile concrete.

### ***Main objective***

The main objectives are to propose a new method for determining residual stresses of steel fiber reinforced tensile concrete and theoretical and experimental investigation of the cracking and stiffness of steel fiber reinforced concrete flexural elements.

### ***Main tasks***

In order to achieve the objectives, the following problems had to be solved:

1. To review test data of bending steel fiber reinforced concrete elements published in literature.
2. Theoretically investigate the cracking and stiffness of the SFRC and reinforced concrete elements.
3. To perform crack width numerical analysis of bending reinforced concrete elements reinforced with and without steel fibers.
4. To determine residual stresses of tensile concrete, arising from the dispersive reinforcement effect, from stress-strain diagrams of steel fiber reinforced tensile concrete.
5. To perform experimental investigation on cracking and stiffness of bending reinforced concrete elements reinforced with and without steel fibers, subjected to short-term loading.
6. To obtain stress-strain diagrams of steel fiber reinforced tensile concrete from test data of bending concrete beams reinforced with steel fiber using inverse technique.
7. To determine residual stresses from stress-strain diagrams of steel fiber reinforced tensile concrete.
8. Using finite element program ATENA, to determine deflections of RC elements, applying stress-strain diagrams, which was obtained from different experimental investigation.
9. To perform numerical analysis on crack width determination, using residual stresses of steel fiber reinforced tensile concrete.
10. To perform comparative statistical analysis on calculated and experimental values of crack widths.

### ***Research methods***

Seeking to achieve the aim of the work the research methods such as theoretical study, numerical research, experimental and statistical analysis were used. The stress-strain diagrams of steel fiber reinforced tensile concrete has been obtained, using inverse technique from experimental moment-curvature diagrams, subjected to short-term loading. The residual stresses were determined from obtained stress-strain diagrams.

Using different physical materials models (stress-strain relationships), the curvatures of steel fiber reinforced concrete elements was determined, applying finite element program ATENA.

Crack widths of steel fiber reinforced concrete elements were determined experimentally and theoretically. Comparative statistical analysis on calculated and experimental values of crack widths has been performed.

### ***Scientific novelty***

1. The proposed methodology of constitutive modelling of steel fiber reinforced concrete allows to determine stress-strain diagrams of tensile concrete from test data of bending concrete beams reinforced with steel fiber and bars reinforcement.
2. As an alternative of constitutive modelling methods applied in practice, a new residual stress determination method of steel fiber reinforced tensile concrete has been proposed. Unlike in traditional methods, the modelling can be performed using test results of different element sizes (including full-scale investigation) and modelling results are characterized by a very small scatter.
3. A new experimental data of steel fiber reinforced concrete beams has been obtained, subjected to short-term loading.
4. The average stress-strain diagrams of tensile concrete has been the first time obtained from experimental moment-curvature relationship of bending reinforced concrete beams reinforced with and without steel fiber, using proposed methodology. The obtained residual stresses were used in calculation of curvature and crack width of experimental beams.

### ***Practical value***

The obtained results extend application limits of the constitutive model approach, based on inverse technique. The deformations and cracks width of steel fiber reinforced concrete elements can be accurately calculated applying the residual stresses obtained by proposed method. The advantage of proposed constitutive modelling method is that models of tensile concrete can be directly applied to the finite element programs.

### ***Defended propositions***

1. The inverse problem solution algorithm can be applied for average stress-strain diagram formation of steel fiber reinforced tensile concrete and determination of residual stresses.
2. The average stresses of cracked tensile concrete consists of stresses due to tension stiffening and residual stresses, arising due to interaction of steel fiber and concrete.
3. The residual stresses are calculated as difference of total and tension stiffening stresses (at the average deformation  $2.0 \cdot 10^{-3}$ ).
4. The curvatures and cracks width of steel fiber reinforced concrete elements can be accurately calculated applying the residual stresses obtained by proposed method, than well-known materials models published in literature.

5. The total stress diagrams should be used in average strain and deflection analysis, while residual stresses should be applied for crack width calculation, which performed in the element cross-section.

### ***The scope of the scientific work***

The dissertation consists of introduction, four chapters, general conclusion and a list of references.

The total scope of dissertation – 98 pages, 38 expressions, 67 figures, 6 tables and 104 references.

## **1. Steel fiber reinforced concrete and reinforced concrete elements**

This chapter discussed steel fiber production methods and types used for dispersive reinforcement and application field of fiber reinforced concrete. The influence of dispersive reinforcement on concrete physical and mechanical properties has been emphasized.

The main focus is attended to the specific ability of fiber reinforced concrete to withstand residual stresses in cracked element. This specific ability is called residual strength of the element. This property of steel fiber reinforced concrete distinguishes it from ordinary concrete.

In this chapter determination of material models of steel fiber reinforced concrete (obtaining of stress-strain diagrams), according to experimental and empirical methods has been overviewed.

## **2. Experimental study of fiber reinforced beams**

In this chapter the influence of dispersive reinforcement on deformability of concrete and reinforced concrete, steel fiber reinforced beams has been experimentally investigated. Stress-strain state has determined by the analysis of the curvatures experimental beams. Experimental test program, test equipment and material characteristics of concrete, steel reinforcement and fiber have been discussed.

Experimental investigation results of lightly reinforced concrete and steel fiber reinforced concrete beams subjected to short-term loading was presented. During the experiment the beam deflection was measured at five different sections (total of 8 observation points). The average strains were measured at four different levels in pure bending zone and five different sections of each zone (total of 20 observation points). The crack widths were measured by microscope. The beams of rectangular cross-section with nominal length 3280 mm (span 3000 mm) were tested under a four-point bending scheme. The experimental programme consisted of eight beams with different contents of fibres: 0%, 0.5%, 1.0% and 1.5% by volume. The beams had the same nominal

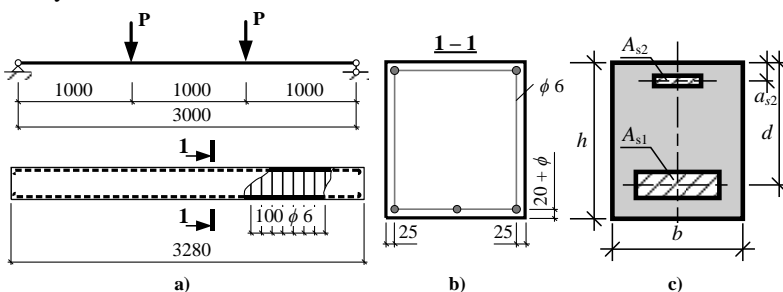


cross-section parameters and similar material characteristics (see Fig. 1 and Table 1).

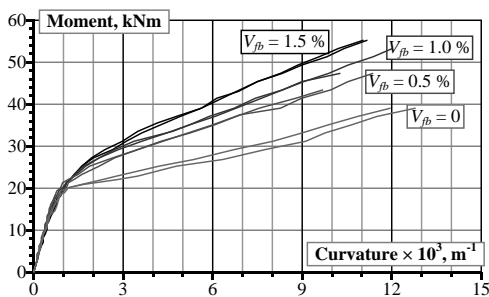
**Table 1.** Main characteristics of experimental beams

Beam	$h$	$b$	$d$	$a_{s2}$	$A_{s1}$	$A_{s2}$	$V_{fb}$	$\rho_l$	$f_c$	$E_c$
	mm				mm <sup>2</sup>		%		MPa	
S3-2-3	298	284	271	32	232	57	-	0.3	50.9	37584
S3-2-6	303	279	277	49	232	57	-	0.3	50.9	37584
S3-1-F05	302	278	278	29	235	56	0.5	0.3	55.6	36516
S3-2-F05	303	283	279	26	235	56	0.5	0.3	55.6	36516
S3-1-F10	300	279	276	23	235	56	1.0	0.3	48.0	34984
S3-2-F10	301	284	275	25	235	56	1.0	0.3	48.0	34984
S3-1-F15	300	279	272	26	235	56	1.5	0.3	52.2	35938
S3-2-F15	299	285	273	23	235	56	1.5	0.3	52.2	35938

In Table 1:  $V_{fb}$  is the volume content of fibres in concrete mixture,  $\rho_l$  is reinforcement ratio,  $f_c$  is compressive cylinder strength at test,  $E_c$  is modulus of elasticity of concrete.



**Fig. 1.** a) loading of the beams; b) scheme of reinforcement and c) cross-section of the beam



**Fig. 2.** Influence of fibre content on deformation response of the test beams

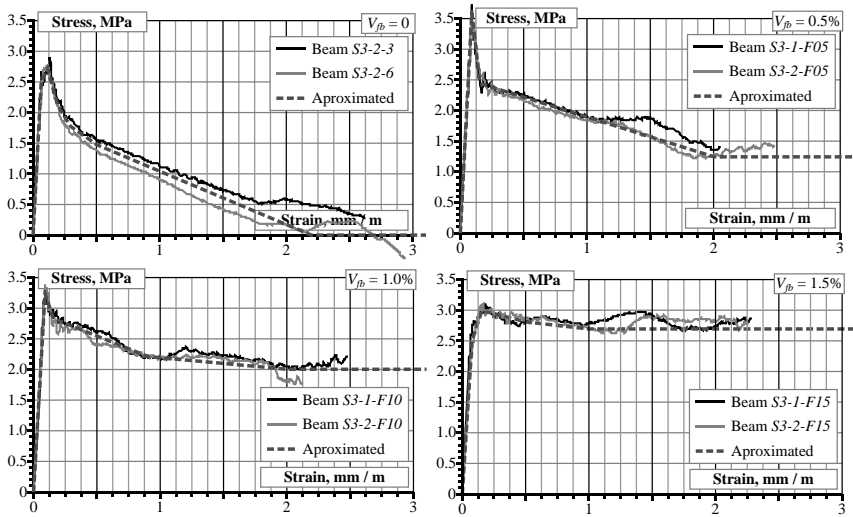
Experimental moment-curvature diagrams were obtained in two ways: from deflections and from concrete surface strains, both recorded in the pure bending zone. Good agreement was achieved between the diagrams obtained from deflection and strain measurements. Present analysis is based on the curvatures obtained from the average strains. In order to illustrate the effect of the amount of fibre reinforcement on stiffness of the beams, the experimental moment-curvature diagrams (derived from average strains) are shown in Fig. 2. The effectiveness is more evident for smaller amounts of fibres: compare the beams with  $V_{fb} = 0\%$  and  $0.5\%$ , from one hand, and beams with  $V_{fb} = 1.0\%$  and  $1.5\%$ , from other hand.

### **3. Derivation of stress-strain relationships of tensile concrete reinforced with steel fiber**

In this chapter, as an alternative to in practice applied physical modelling methods, a new steel fiber reinforced concrete method for residual stress determining has been proposed. The average stress-average strain diagrams of tensile concrete were obtained from experimental moment-curvature relationship of steel fiber reinforced concrete elements according to proposed method.

The equivalent stress-strain relations of SFRC in tension were derived by the inverse technique using the experimental moment-curvature diagrams.

The derived equivalent stress-strain diagrams are shown in Fig. 3, separately for the twin-specimens with uniform content of fibres  $V_{fb}$ . It is relevant to note that the diagrams obtained for twin-specimens have practically coincided. The approximated diagrams with certain extent of idealization are shown by dashed lines. The diagrams consist of two parts: the ascending and the descending branches. The peak stress corresponds to the cracking point in the moment-curvature diagram. As the fibres practically become effective only after cracking, the influence of moderate amounts of fibres (as is the case of present study) on the peak stress is practically negligible. Moreover, due to the limited number of the test specimens and due to the highly stochastic nature of tensile strength of concrete, it is rather difficult to draw any sound conclusion regarding the dependence of the amount of fibres on the peak stress. As can be seen from Fig. 3, the mean stresses in the descending part were clearly different and dependent on the amount of fibres: higher stresses were reached for larger amounts of fibres.



**Fig. 3.** Average stress-average strain relationships of steel fiber reinforced concrete in tension

This chapter also contains two residual stress determination methods of steel fiber reinforced tensile concrete: 1) an empirical method for determining the residual stress, according Naaman and 2) Rilem TC162-TDF method, which is based on experimental data. The comparative analysis has been performed on the obtained residual stress according different methods.

#### 4. Calculation of deflection and crack width of experimental beams

This chapter presents derivation of moments-curvature diagrams according the finite element program ATENA and crack width analysis. Moment-curvature response of the test beams was modeled using commercial finite element (FE) software ATENA. FE model was considered in a plane stress state. Present FE analysis has employed the approximated stress-strain relationships of SFRC in tension shown in Fig. 3 by dashed lines.

As noted above, the stresses in the derived equivalent stress-strain diagrams consist of the tension-stiffening stresses and the residual stresses. In the selection of a SFRC constitutive law in tension, separation should be made between the crack width and deflection analyses. For deformation/deflection analysis based on the smeared crack approach, the total stress model should be employed, whereas for crack width calculation, dealing with a single section analysis, the residual stresses should be used. Earlier investigations of

reinforced concrete bending members have shown that the tension-stiffening effect practically disappears 2.0–2.5 micro-strains.

The experimental and the predicted curvatures of the beams are shown in Fig. 4. Good agreement between the predicted and the test results can be stated. The performed analysis has indicated that the stress-strain relationships derived by the proposed inverse technique can be directly incorporated into the smeared finite element codes (for example ATENA) as a SFRC material model. This is a major advantage of the proposed technique in respect to the commonly accepted approach based on the standard bending tests.

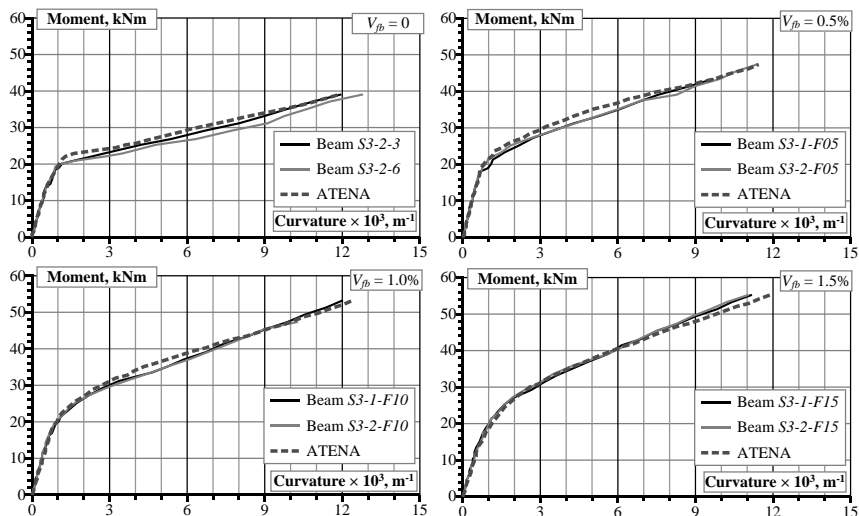


Fig. 4. Predicted curvatures of the test beams

In this section moment and crack width relationships of SRFC elements has been presented. Calculations of crack width are carried out using residual stresses of the cracked steel fiber reinforced tensile concrete, which was obtained by the two different methods: the method proposed by the author and simplified method. Figure 5 shows graphical analysis of the calculated and experimentally obtained crack width values. Crack width values was compared at the service load  $M_{ser}$ .

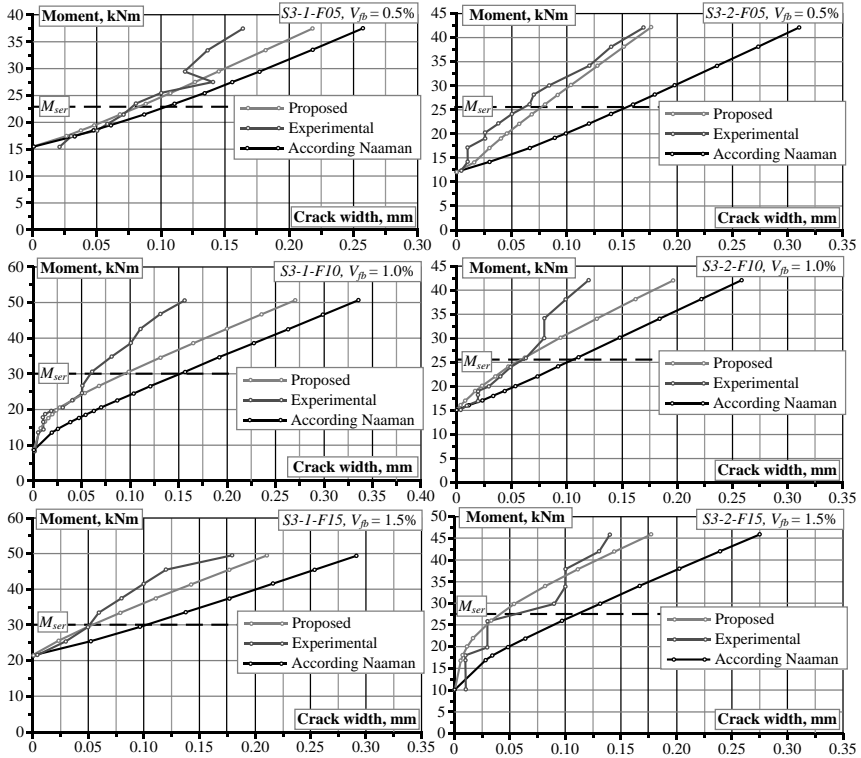


Fig. 5. Comparison of calculated and experimental values of crack widths

Table 2. Comparison of calculated and experimental values of crack widths

Beam	Crack width, mm			Crack widths ratio	
	$w_{obs}$	$w_{prop}$	$w_{Naam}$	$w_{prop}/w_{obs}$	$w_{Naam}/w_{prop}$
S3-1-F05	0.070	0.069	0.087	0.98	1.24
S3-2-F05	0.058	0.074	0.150	1.28	2.59
S3-1-F10	0.060	0.098	0.156	1.64	2.60
S3-2-F10	0.057	0.056	0.102	0.99	1.79
S3-1-F15	0.050	0.050	0.097	1.00	1.94
S3-2-F15	0.060	0.043	0.114	0.72	1.90
				$\Sigma_{ave}=1.10$	$\Sigma_{ave}=2.01$

In Table 2:  $w_{obs}$  – experimental crack width;  $w_{prop}$  – crack width, calculated using residual stress determined according methodology proposed by the

author;  $w_{Naam}$  – crack width, calculated using residual stress determined according Naaman method. The comparison of experimental and calculated crack widths are shown in Table 2. The ratio between calculated and experimental crack width has been determined. Residual stresses have a significant influence on the calculation of crack widths. The crack width calculated at the service load according to the proposed method was approximately 10% greater than the experimental values. Whereas, the residual stress calculated according simplified (Naaman) method the experimental crack width was exceeds 2 times.

### **General conclusions**

1. One of the most critical issues in the theory of steel fiber reinforced concrete (SFRC) is quantifying the residual stresses in tension. Analysis of literature review showed that due to a great diversity in the shape and the aspect ratio of steel fibers and, consequently, varying bond characteristics, there are no reliable constitutive models available until present time.
2. As an alternative of constitutive modelling methods applied in practice, a new residual stress determination method of steel fiber reinforced tensile concrete has been proposed. The proposed methodology of physical modelling of steel fiber reinforced concrete allows to determine stress-strain diagrams of tensile concrete from test data of steel fiber reinforced concrete beams and to evaluate residual stresses.
3. The obtained results extend application limits of inverse technique. The average stress-strain diagrams of tensile concrete has been the first time obtained from experimental moment-curvature relationship of bending reinforced concrete beams reinforced with and without steel fiber, using proposed methodology. It consists of a linear ascending and a non-linear descending branch. The ascending branch reflects the elastic behavior of concrete and descending branch reflects behavior of cracked steel fiber reinforced concrete. It was obtained that descending branch depends on amount of dispersive reinforcement.
4. The total average stresses of cracked tensile concrete consists of stresses due to tension stiffening and residual stresses, arising due to interaction of steel fiber and concrete. In this work was proposed to calculate residual stresses as the difference of total stresses and tension stiffening stresses (at the average strain  $2.0 \cdot 10^{-3}$ ). As the tension stiffening effect in flexural elements practically disappear at average

- strain level  $2.0 \cdot 10^{-3}$ , so the residual stresses was proposed to determine as such strains corresponding to the total tensile stresses of concrete.
5. The total stress diagrams should be used in average strain and deflection analysis, while residual stresses should be applied for crack width calculation, performed in the element cross-section.
  6. Unlike in traditional methods, the modelling can be performed using test results of different element sizes (including full-scale investigation) and modelling results are characterized by a very small scatter.
  7. The residual stresses obtained according to the author's proposed method depend on the fiber amount and concrete grade C35/45 mix with  $40\text{--}120 \text{ kg/m}^3$  equal to 31–83% of tensile strength. The residual stresses determined according simplified (Naaman) method is equal to 15 and 48% of tensile strength. It can be stated that the simplified method underestimates the influence of steel fibers in the calculation of residual stresses of tensile concrete reinforced with steel fiber.
  8. Residual stresses have a significant influence on the calculation of crack widths. The crack width calculated at the service load according to the proposed method was approximately 10% greater than the experimental values. Whereas, the residual stress calculated according simplified (Naaman) method the experimental crack width was exceeds 2 times.

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

Gribniak, V.; Kaklauskas, G.; Kwan, A. K. H.; Bacinskas, D., Ulbinas, D. 2012. Deriving stress-strain relationships for steel fibre concrete in tension from tests of beams with ordinary reinforcement. *Engineering Structures* 42: 387–395. ISSN 0141-0296. (ISI Web of Science)

Gribniak, V.; Kaklauskas, G.; Bacinskas, D.; Sung, W-P.; Sokolov, A.; Ulbinas, D. 2011. Investigation of shrinkage of concrete mixtures used for bridge construction in Lithuania. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 6(2): 77–83. ISSN 1822-427X (print), ISSN 1822-4288 (online). (ISI Web of Science)

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)

Ulbinas, D.; Kaklauskas, G. 2009. Plieno pluoštu armuotų gelžbetoninių elementų pleišėtumo analizė. *Mokslas – Lietuvos ateitis: Statyba* 1(5): 56–62. ISSN 2029-2341. (IndexCopernicus)

### **In the other editions**

Gribniak, V.; Holschemacher, K.; Kaklauskas, G.; Bacinskas, D.; Ulbinas, D.; Sokolov, A.; Meskenas, A. 2011. Experimental Analysis of Reinforced Fibre – Concrete Beams, in *Proc. of the Sixteenth International Conference "Mechanika – 2011"*, Kaunas, Lithuania: 93–97. ISSN 1822-2951.

Meskenas, A.; Ulbinas, D. 2011. Discrete crack model of steel fibre reinforced concrete members subjected to tension, *14-oji Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija „Mokslas – Lietuvos ateitis“*: 1–7 ISSN 2029-7149 (online), ISBN 978-9955-28-929-6.

### **About the author**

Darius Ulbinas was born in Varena, on 26 of September 1983. He began his studies at Vilnius Gediminas Technical University in 2002. The first degree of civil engineering gained in 2006 from the Faculty of Civil Engineering. From the same faculty he gained a diploma of Master of Science of Civil Engineering in 2008. In 2008–2012 was PhD student of Vilnius Gediminas Technical University in Bridges and Special Structures Department. An academic trainee in University of Leuven (Belgium), 2010.

## **PLIENO PLAUŠŲ ARMUOTŲ GELŽBETONINIŲ ELEMENTŲ PLEIŠĖTUMO IR STANDUMO ANALIZĖ**

### ***Problemos formulavimas ir darbo aktualumas***

Gerai suprojektuotos ir tinkamai pagamintos gelžbetoninės konstrukcijos turėtų tarnauti šimtmečius, tačiau dėl betono trapumo ir mažo tempiamojo stiprio eksploatuojamose konstrukcijose neretai atsiveria neleistino pločio plyšiai: plieninė armatūra intensyviai rūdija, o susidarę korozijos produktai toliau ardo betono struktūrą. Nesiimant apsaugos ar stiprinimo veiksmų, konstrukcija greitai tampa netinkama eksploatuoti. Nenuostabu, kad visame pasaulyje didžiulės finansinės investicijos ir mokslininkų bei inžinierių pajėgos skiriamos šių problemų sprendimui. Pasiūlyta daug modernių sprendimų leidžiančių užtikrinti gelžbetoninių konstrukcijų tinkamą eksploataciją. Vienas jų – dispersinio armavimo taikymas betono pleišėjimo deformacijų suvaržymui. Armavimas plieno plaušu iš esmės pakeičia tempiamojo betono suirimo pobūdį – plaušas aktyviai varžo plyšių atsivėrimą, kartu perduodamas tempimo įtempius plyšyje. Labai padidėja medžiagos plastiškumas, o liekamieji įtempiai



didėja, priklausomai nuo plaušo kiekio ir tipo. Tai yra efektyvus sprendimas, leidžiantis optimizuoti konstrukcijų matmenis bei sumažinti medžiagų sąnaudas.

Dėl didelės plaušo tipų ir formų įvairovės, taip pat dėl sunkumų nustatant plaušo ir betono sąveiką, iki šiol nėra pasiūlyta patikimų dispersiškai armuoto betono liekamųjų įtempių ir deformacijų dėsnų. Kiekvienu atveju atliekami specifiniai, pakankamai sudėtingi ir brangūs bandymai, kurių metu gaunamos liekamųjų įtempių ir deformacijų priklausomybės retai atspindi realių matmenų konstrukcinių elementų elgseną. Dėl skirtingų plieno plaušo ir betono sąveikos charakteristikų, supleišėjusio dispersiškai armuoto betono liekamųjų įtempių nustatymas yra vienas sudėtingiausių modeliavimo uždavinių. Šiuo metu yra žinomi vos keli analitiniai liekamųjų įtempių modeliai.

### ***Tyrimo objektas***

Darbe nagrinėtas statine trumpalaike apkrova veikiamų, plieno plaušu armuotų gelžbetoninių elementų įtempių ir deformacijų būvis bei pleišėjimas. Dispersiškai armuotą betoną nagrinėjant kaip homogeninę medžiagą, sprendžiamas supleišėjusio tempiamojo betono fizikinio modeliavimo uždavinys.

### ***Darbo tikslas***

Disertacinio darbo tikslas yra teoriškai ir eksperimentiškai ištirti plieno plaušu armuotų lenkiamųjų gelžbetoninių elementų pleišetumą ir standumą bei pasiūlyti naują dispersiškai armuoto tempiamojo betono liekamųjų įtempių nustatymo metodą.

### ***Darbo uždaviniai***

1. Apžvelgti literatūroje paskelbtų lenkiamųjų dispersiškai armuotų gelžbetoninių elementų eksperimentinių tyrimų duomenis.
2. Teoriškai ištirti plieno plaušu armuotų gelžbetoninių elementų pleišetumą ir standumą.
3. Atlikti plieno plaušu ir strypais armuotų lenkiamųjų gelžbetoninių elementų plyšių pločių skaitinę analizę.
4. Iš dispersiškai armuoto tempiamojo betono įtempių ir deformacijų diagramų nustatyti liekamuosius tempiamojo betono įtempius, susidarančius dėl dispersinio armavimo įtakos.
5. Atlikti trumpalaike apkrova veikiamų, dispersine ir strypine armatūra armuotų lenkiamųjų gelžbetoninių sijų pleišetumo ir standumo eksperimentinius tyrimus.
6. Taikant atvirkštinį uždavinį gauti dispersiškai armuoto tempiamojo betono įtempių ir deformacijų diagramas iš lenkiamųjų plieno plaušu armuotų gelžbetoninių elementų eksperimentinių duomenų.

7. Iš dispersiškai armuoto tempiamojo betono įtempių ir deformacijų diagramų nustatyti liekamuosius įtempius.
8. Taikant baigtinių elementų programą ATENA, iš skirtingų eksperimentinių tyrimų duomenų nustatytas įtempių ir deformacijų diagramas panaudoti elementų įlinkių nustatymui.
9. Taikant dispersiškai armuoto tempiamojo betono liekamuosius įtempius, atlikti plyšių pločių nustatymo skaitinį eksperimentą.
10. Atlikti apskaičiuotų ir eksperimentinių plyšių pločių reikšmių palyginamąją analizę.

### ***Tyrimų metodika***

Darbe taikyti teoriniai, skaitiniai ir eksperimentiniai metodai. Trumpalaikė apkrova veikiama, dispersiškai armuotų lenkiamųjų gelžbetoninių elementų įtempių ir deformacijų diagramos gaunamos taikant atvirkštinį uždavinį, iš eksperimentinių momentų ir kreivių priklausomybių. Iš gautųjų įtempių ir deformacijų priklausomybių nustatomi liekamieji įtempiai.

Taikant skirtingus fizikinius medžiagų modelius (įtempių ir deformacijų priklausomybes), baigtinių elementų programa ATENA nustatyti dispersiškai armuotų gelžbetoninių elementų kreiviai.

Eksperimentiškai ir teoriškai nustatyti dispersiškai armuotų gelžbetoninių elementų betone atsiveriančių plyšių pločiai. Atlikta skaičiuotinių ir eksperimentinių plyšių pločių reikšmių palyginamoji analizė.

### ***Darbo mokslinis naujumas***

1. Sukurta dispersiškai armuoto betono fizikinio modeliavimo metodologija leidžia pagal eksperimentinius plaušu ir strypais armuotų sijų duomenis nustatyti tempiamojo betono įtempių ir deformacijų diagramas.
2. Kaip alternatyva praktikoje taikomiems fizikinio modeliavimo metodams, pasiūlytas naujas tempiamojo dispersiškai armuoto betono liekamųjų įtempių nustatymo būdas. Skirtingai nei tradiciniuose metoduose, modeliavimas gali būti atliekamas pagal skirtingų dydžių elementų (taip pat ir natūrinių) bandymų rezultatus, o modeliavimo rezultatai pasižymi itin maža sklaida.
3. Gauti nauji trumpalaikė apkrova veikiamų dispersiškai armuotų gelžbetoninių sijų eksperimentinių tyrimų duomenys.
4. Taikant pasiūlytą modeliavimo būdą, pirmą kartą pagal eksperimentinių lenkiamųjų plieno plaušu ir strypais armuotų gelžbetoninių elementų momentų ir kreivių diagramas gautos tempiamojo betono vidutinių įtempių ir vidutinių deformacijų diagramos. Nustatyti liekamieji įtempiai panaudoti eksperimentinių sijų kreivių ir plyšių pločių skaičiavimui.

### ***Darbo rezultatų praktinė reikšmė***

Gauti tyrimų rezultatai praplečia fizikinių modelių kūrimo metodo, paremto atvirkštinio gelžbetoninių elementų deformacijų uždavinio sprendimu, taikymo ribas. Taikant pasiūlytuoju būdu nustatytus liekamuosius įtempius, galima tiksliai apskaičiuoti dispersiškai armuotų gelžbetoninių elementų deformacijas ir plyšių pločius. Pasiūlytojo fizikinio modeliavimo būdo privalumas yra tas, kad gauti tempiamojo betono modeliai gali būti tiesiogiai taikomi baigtinių elementų programose.

### ***Ginamieji teiginiai***

1. Atvirkštinio uždavinio sprendimo algoritmas gali būti taikomas dispersiškai armuoto tempiamojo betono vidutinių įtempių ir vidutinių deformacijų diagramų sudarymui bei liekamųjų įtempių nustatymui.
2. Supleišėjusio tempiamojo betono vidutinius įtempius sudaro įtempiai dėl tempiamojo sustandėjimo bei liekamųjų įtempių, atsirandančių dėl plieno plaušo ir betono sąveikos.
3. Liekamieji įtempiai apskaičiuojami kaip suminių ir tempiamojo sustandėjimo įtempių skirtumas, kai vidutinė deformacija pasiekia  $2,0 \cdot 10^{-3}$ .
4. Pasiūlytuoju būdu nustačius tempiamojo dispersiškai armuoto betono liekamuosius įtempius, gelžbetoninių elementų kreiviai bei plyšių pločiai apskaičiuojami tiksliau nei taikant literatūroje žinomus medžiagų modelius.
5. Vidutinių deformacijų ir įlinkių analizei turi būti naudojamos suminių įtempių diagramos, o plyšio pločio skaičiavimams, atliekamiems elemento pjūvyje, naudojami tik liekamieji įtempiai.

### ***Darbo apimtis***

Disertaciją sudaro įvadas, keturi skyriai ir bendrosios išvados.

Darbo apimtis yra 98 puslapiai, tekste panaudota 38 numeruotos formulės, 67 paveikslai ir 6 lentelės. Rašant disertaciją buvo panaudoti 104 literatūros šaltiniai.

Pirmame skyriuje aptariami dispersiniam armavimui naudojamo plieno plaušo gamybos būdai, rūšys bei dispersiškai armuoto betono taikymo sritys. Akcentuojama dispersinio armavimo įtaka betono fizikinėms ir mechaninėms savybėms bei apžvelgiami dispersiškai armuoto betono medžiagų modeliai.

Antrame skyriuje atlikti trumpalaikė apkrova veikiamų dispersiškai armuotų gelžbetoninių ir betoninių sijų eksperimentiniai tyrimai.

Trečiame disertacijos skyriuje pasiūlyta metodika, leidžianti iš vidutinių įtempių ir vidutinių deformacijų diagramų nustatyti dispersiškai armuoto supleišėjusio tempiamojo betono liekamuosius įtempius.

Ketvirtame skyriuje atliekamas dispersiškai armuotų gelžbetoninių sijų modeliavimas, baigtinių elementų programoje taikant autoriaus gautus modelius. Šiame skyriuje taip pat atliekamas skaičiuotinis ir eksperimentinis plyšių pločių tyrimas.

### **Bendrosios išvados**

1. Liekamųjų įtempių įvertinimas – vienas sudėtingiausių uždavinių tempiamojo plieno plaušu armuoto gelžbetoninio analizėje. Atlikta literatūros analizė parodė, kad dėl didelės plieno plaušo geometrinių parametų įvairovės bei dėl to kintančių plieno plaušo ir betono sąveikos sukibimo charakteristikų, kol kas nėra pasiūlyta patikimų ir visuotinai priimtinių tempiamojo plieno plaušu armuoto betono fizikinių modelių.
2. Kaip alternatyva praktikoje taikomiems fizikinio modeliavimo metodams, pasiūlytas naujas tempiamojo dispersiškai armuoto betono liekamųjų įtempių nustatymo būdas. Sukurta fizikinio modeliavimo metodologija leidžia pagal eksperimentinius dispersiškai armuotų gelžbetoninių elementų duomenis nustatyti tempiamojo betono įtempių ir deformacijų diagramas bei įvertinti liekamuosius įtempius.
3. Gauti tyrimo rezultatai praplečia atvirkštinio uždavinio sprendimo algoritmo taikymo ribas. Taikant pasiūlytą modeliavimo būdą, pirmą kartą pagal eksperimentinių lenkiamųjų plieno plaušu ir strypais armuotų gelžbetoninių elementų momentų ir kreivių diagramas, gautos tempiamojo betono vidutinių įtempių ir vidutinių deformacijų diagramos. Tokios diagramos turi kylančiąją ir krentančiąją dalis. Kylančioji dalis atspindi tampriąją, o krentančioji – supleišėjusio dispersiškai armuoto betono elgseną. Nustatyta, kad krentančiosios diagramos dalies forma labiausiai priklauso nuo dispersinio armavimo kiekio.
4. Supleišėjusio tempiamojo betono suminius įtempius sudaro įtempiai dėl tempiamojo sustandėjimo bei liekamųjų įtempių, atsirandančių dėl plieno plaušo ir betono sąveikos. Darbe pasiūlyta liekamuosius įtempius apskaičiuoti kaip suminių ir tempiamojo sustandėjimo įtempių skirtumą. Kadangi tempiamojo sustandėjimo efektas lenkiamuose elementuose praktiškai išnyksta kai vidutinė deformacija pasiekia  $2,0 \cdot 10^{-3}$ , todėl liekamuosius įtempius siūloma nustatyti kaip šią deformaciją atitinkančius suminius betono tempimo įtempius.
5. Vidutinių deformacijų ir įlinkių analizei turi būti naudojamos suminių įtempių diagramos, o plyšio pločio skaičiavimams, atliekamiems elemento pjūvyje, naudojami tik liekamieji įtempiai.

6. Atlikus analizę paaiškėjo, kad skirtingai nei tradiciniuose metoduose, modeliavimas gali būti atliekamas pagal skirtingų dydžių elementų (taip pat ir natūrinių) bandymų rezultatus, o modeliavimo rezultatai pasižymi itin maža sklaida.
7. Pagal autoriaus pasiūlytą metodiką gauti liekamieji įtempiai priklauso nuo plaušo kiekio ir betono klasės C35/45 mišiniui su  $40\text{--}120\text{ kg/m}^3$  plaušo kiekiu, sudaro 31–83 % tempiamojo stiprio. Pagal supaprastintą (Naaman) metodą nustatyti liekamieji įtempiai sudaro 15–48 % tempiamojo stiprio. Tai leidžia teigti, kad supaprastintas metodas nepakankamai įvertina plieno plaušo įtaką, skaičiuojant dispersiškai armuoto tempiamojo betono liekamuosius įtempius.
8. Liekamieji įtempiai turi didelę įtaką apskaičiuojant plyšių pločius. Pagal pasiūlytąjį metodą norminei apkrovai apskaičiuoti plyšių pločiai vidutiniškai 10 % viršija eksperimentines reikšmes. Tuo tarpu liekamuosius įtempius skaičiuojant supaprastintu būdu, eksperimentiniai plyšių pločiai vidutiniškai viršijami 2 kartus.

#### **Trumpos žinios apie autorių**

Darius Ulbinas gimė 1983 m. rugsėjo 26 d. Varėnoje. 2002 m. įstojo į Vilniaus Gedimino technikos universitetą. 2006 m. įgijo statybos inžinerijos bakalauro diplomą, o 2008 m. jam įteiktas statybos inžinerijos magistro diplomas. 2008–2012 m. – Vilniaus Gedimino technikos universiteto Tiltų ir specialiųjų statinių katedros doktorantas. 2010 m. buvo akademinėje stažuotėje Liuvono universitete (Belgija).

Darius ULBINAS

CRACKING AND STIFFNESS ANALYSIS  
OF STEEL FIBER REINFORCED  
CONCRETE MEMBERS

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

Darius ULBINAS

PLIENO PLAUŠŲ ARMUOTŲ  
GELŽBETONINIŲ ELEMENTŲ  
PLEIŠĖTUMO IR STANDUMO ANALIZĖ

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

2012 12 21. 1,5 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