

GELŽBETONINIŲ SIJŲ TEMPIAMOSIOS ZONOS ELGSENOS
MODELIAVIMAS ARMATŪROS DIAGRAMADonatas Salys¹, Gintaris Kaklauskas², Viktor Gribniak³*Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva*
El. paštas: ¹sdonat@gmail.com; ²gintaris.kaklauskas@st.vgtu.lt; ³viktor.gribniak@st.vgtu.lt

Įteikta 2009 06 08; priimta 2009 10 29

Santrauka. Straipsnyje nagrinėjama supleišėjusios gelžbetoninės sijos tempiamojo betono elgsena. Skaičiavimo modelyje laikoma, kad, atsiradus plyšiams, dėl armatūros ir betono sąveikos atsiradę įtempiai betone priskiriami armatūrai. Sprendžiamas fizikinio modelio kūrimo uždavinys: taikant momentų ir kreivių diagramą, apskaičiuojamos suminių armatūros įtempių ir deformacijų priklausomybės. Suminius armatūros įtempius sudaro tikrieji įtempiai armatūroje ir papildomi įtempiai, sukelti armatūros ir betono sąveikos. Darbe naudojami autorių išbandytų skirtingų armavimo koeficientų sijų duomenys. Iš eksperimentinių momentų ir kreivių priklausomybių gautos tempiamosios armatūros įtempių ir deformacijų diagramos, kuriose įvertinta supleišėjusio betono įtaka. Parodyta, kad papildomų įtempių armatūroje dydis priklauso nuo armatūros skerspjūvio ploto, o papildomų įrašų skirtumai nėra tokie dideli.

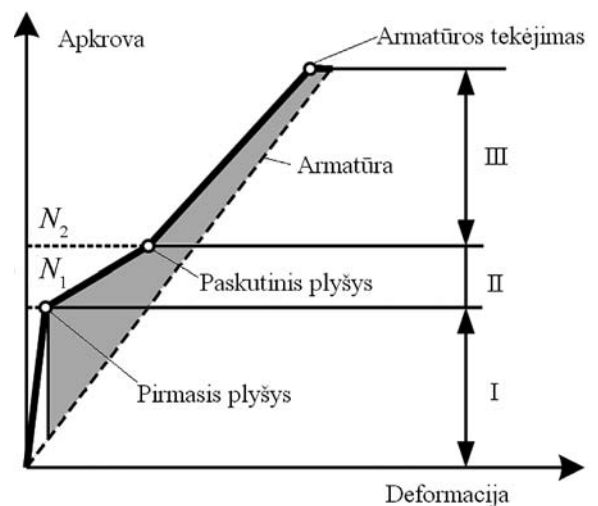
Reikšminiai žodžiai: tempiamasis betonas, atvirkštinis uždavinys, fizikinis modelis, eksperimentiniai tyrimai.

1. Įvadas

Gelžbetonis yra kompozitinė medžiaga, kurią sudaro betonas ir armatūra. Kaip žinoma, betono tempiamasis stipris yra 10–20 kartų mažesnis nei gniuždomasis. Atrodytų, kad tempiamojo betono įtaka yra nedidelė atlaikant įrašas skerspjūvyje. Iš tiesų, skaičiuojant lenkiamųjų elementų stiprumą normaliniame pjūvyje, tempiamojo betono įtempių galima nevertinti. Kita vertus, skaičiuojant įlinkius, neįvertinus tempiamojo betono įtakos, gali būti daroma didesnė nei 100 % paklaida (Gilbert 2007). Adekvatus supleišėjusio tempiamojo betono įtakos įvertinimas yra bene svarbiausia ir sudėtingiausia problema, nustatant trumpalaikę apkrovą veikiamų gelžbetoninių elementų deformacijas (Beeby, Scott 2004).

Kaip pavaizduota 1 pav., tipinė tempiamojo gelžbetoninio elemento apkrovos ir deformacijos kreivė gali būti suskirstyta į tris stadijas. Pirmojoje stadijoje (I, iki apkrovos N_1) elementas deformuojasi tampriai. Antrojoje stadijoje, vadinamoje plyšių vystymosi stadija (II, iki apkrovos N_2), atsiranda ir vystosi normaliniai plyšiai. Kai stabilizuojasi pleišėjimo procesas, prasideda trečioji sta-

dija, kuri baigiasi armatūros tekėjimu, t. y. elemento irimu (Somayaj, Shah 1981).

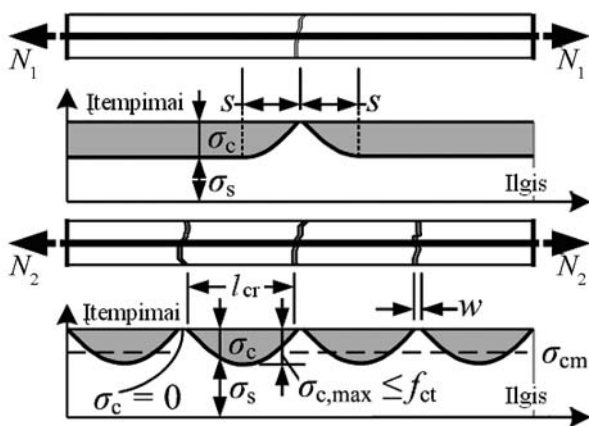


1 pav. Tempiamojo elemento apkrovos ir deformacijos stadijos

Fig. 1. Stages of load-deformation behaviour of tension members

Plyšio vietoje betonas negali atlaikyti tempimo įtempių, todėl visą įrašą atlaiko armatūra. Kadangi plyšyje ir gretimuose pjūviuose armatūra praslysta betono atžvilgiu, kontakto zonoje atsiranda tangentinių įtempių. Šie įtempiai perduodami betonui, todėl jis atlaiko tempimo įtempius. Tolstant nuo plyšio atstumas s vadinamas įtempių perdavimo zonos ilgiu (angl. *transfer length*). Šiame taške betono įtempiai pasiekia maksimalią reikšmę, kuri neviršija betono stiprumo ribos f_{ct} . Pasibaigus plyšių vystymosi stadijai, atstumas tarp plyšių l_{cr} kaip parodyta 2 pav., yra didesnis už s ir mažesnis už $2s$.

Ruožuose tarp plyšių betono sukibimas su armatūra užtikrina jų sąveiką, kuri standina gelžbetoninį elementą. Supleišėjusio betono gebėjimas atlaikyti tempimo įtempius vadinama betono elgsena tarp plyšių (angl. *tension-stiffening*) (Stramandinoli, Rovere 2007).



2 pav. Ašinės jėgos ir įtempiai

Fig. 2. Axial forces and stresses

Lenkiamuosiuose gelžbetoniniuose elementuose apkrovos ir deformacijų stadijos yra analogiškos pavaizduotoms 1 pav., o tempiamosios zonos elgsena rodo anksčiau aptartąją (2 pav.).

Šiame straipsnyje nagrinėjama supleišėjusio gelžbetoninės sijos tempiamojo betono elgsena. Gelžbetoninių elementų deformacijoms skaičiuoti pasiūlyta nemaža metodų, kuriais įvertinama betono elgsena tarp plyšių (Kaklauskas 2000, 2004). Skaitiniuose eksperimentuose šis efektas dažniausiai modeliuojamas dvejopai:

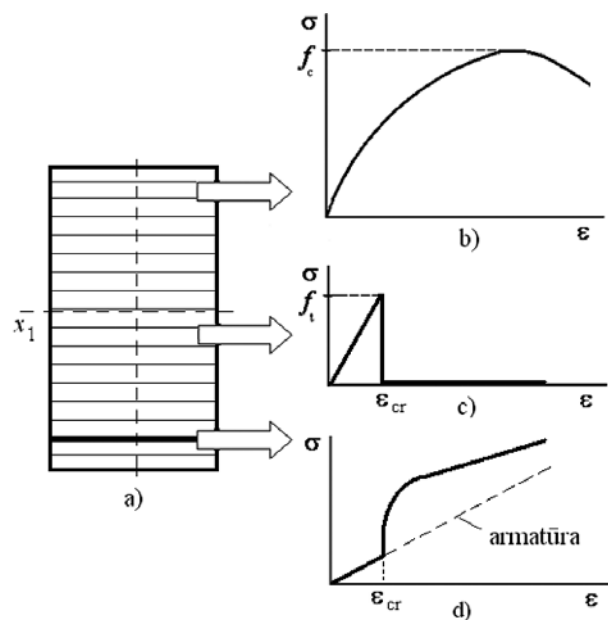
- tempiamojo betono įtempių ir deformacijų diagrama;
- armatūros įtempių ir deformacijų diagrama.

Šiame darbe taikomas antrasis būdas. Juo remiantis laikoma, kad, atsiradus plyšiams, dėl armatūros ir betono sąveikos atsiradę įtempiai betone priskiriami armatūrai. Suminius armatūros įtempius sudaro: 1) tikrieji įtempiai armatūroje; 2) papildomi įtempiai, sukelti armatūros ir betono sąveikos. Straipsnyje naudojami autorių išbandytų skirtingų armavimo koeficientų (0,3; 0,6 ir 1,0%) sijų duomenys. Iš eksperimentinių momentų ir kreivių priklausomybių gautos tempiamosios armatūros įtempių ir deformacijų diagramos, kuriose įvertinta supleišėjusio betono įtaka.

2. Armatūros įtempių ir deformacijų apskaičiavimas iš momentų ir kreivių diagramos (atvirkštinis uždavinys)

Šiame darbe tiriama lenkiamųjų gelžbetoninių elementų tempiamosios zonos elgsena, laikant, kad tempiamųjų įrašų atstojamoji veikia armatūroje. Sprendžiamas fizikinio modelio kūrimo (*atvirkštinis*) uždavinys: taikant eksperimentiškai nustatytą momentų ir kreivių diagramą, apskaičiuojama tempiamosios armatūros įtempių ir deformacijų priklausomybė. Kaip parodyta 3 pav., uždavinys sprendžiamas sluoksnių metodu (Kaklauskas 2000, 2004), taikant šias prielaidas:

- plokščiųjų pjūvių hipotezė;



3 pav. Skaičiavimo modelis: sluoksniuotas skerspjūvis (a); gniuždomojo betono (b), tempiamojo betono (c) ir suminių armatūros (d) įtempių ir deformacijų diagramos

Fig. 3. Model for analysis Layered section (a); stress-strain relationships of compressive concrete (b), tensile concrete (c) and reinforcement (attributing all tension resultant force after cracking) (d)

- idealus sukibimas tarp armatūros ir betono, t. y. armatūros praslydimas betone neįvertinamas;
- gniuždomojo betono elgsena modeliuojama euronormų įtempių ir deformacijų diagrama (Eurocode 2004);
- tempiamojo betono elgsena modeliuojama tampriai trapia įtempių ir deformacijų diagrama (3 pav.);
- atsiradus plyšių, tempiamosios zonos įrašų atstojamoji veikia armatūroje.

Skaičiuojama priartėjimo būdu, apkrovą pridedant pakopomis. Toliau pateikiami skaičiavimo žingsniai:

1. Pirmosios pakopos pirmoje iteracijoje visiems sluoksniams imamos tampriosios medžiagų savybės, o redukuoto skerspjūvio svorio centro atstumas nuo elemento viršaus (y_c) imamas lygus pusei elemento aukščio ($h/2$).
2. Apskaičiuojamos sluoksniuoto skerspjūvio charakteristikos:

$$AE = \sum_{i=1}^n b_i t_i E_p \quad (1)$$

$$S_{x1} E = \sum_{i=1}^n b_i t_i d_i E_p \quad (2)$$

$$I_c E = \sum_{i=1}^n \left(\frac{b_i t_i^3}{12} + b_i t_i y_i \right) E_p \quad (3)$$

čia: b_i – i -tojo sluoksnio plotis; t_i – i -tojo sluoksnio storis; E_i – i -tojo sluoksnio tamprumo modulis; d_i – i -tojo sluoksnio atstumas nuo x_1 ašies; y_c – skerspjūvio svorio centro atstumas nuo x_1 ašies; y_i – i -tojo sluoksnio atstumas nuo svorio centro.

3. Apskaičiuojamas elemento kreivis:

$$\kappa = \frac{M}{I_c E} \quad (4)$$

4. Apskaičiuojama kiekvieno sluoksnio deformacija:

$$\varepsilon_i = \kappa y_i \quad (5)$$

5. Gautai i -tojo sluoksnio deformacijai taikant atitinkamą medžiagos diagramą (3 pav.), apskaičiuojami įtempiai σ_i ir kirstinis deformacijų modulis:

$$E_i = \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i} \quad (6)$$

6. Skirtumas tarp gniuždomosios ir tempiamosios zonos atstojamųjų priskiriamas tempiamajai armatūrai. Apskaičiuojami įtempiai tempiamojoje

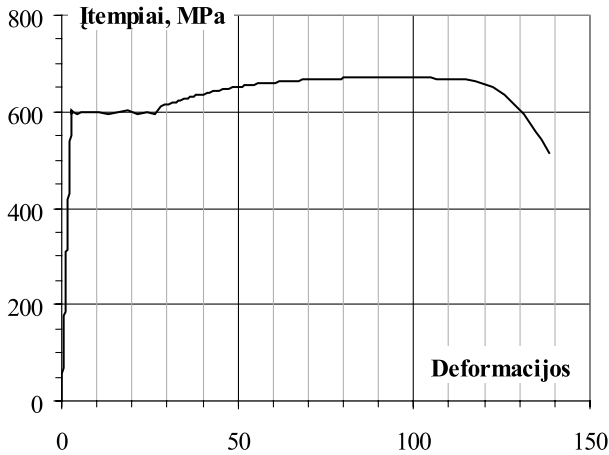
armatūroje ir nustatomas jos deformacijų modulis.

7. Nustatomi šių dydžių santykiniai skirtumai: 1) šioje ir ankstesnėje iteracijoje apskaičiuota kirstinio deformacijų modulio reikšmė (nustatoma kiekvienam sluoksniui); 2) apskaičiuoto ir nustatyto lenkimo momento; 3) apskaičiuoto ir eksperimentinio kreivio. Jeigu santykiniai skirtumai neviršija nustatytos paklaidos, fiksuojama apskaičiuota tempiamosios armatūros įtempių ir deformacijų diagramos dalis, kuri taikoma tolesniuose apkrovos etapuose.
8. Jeigu nors vienam iš trijų minėtų tikrinimų viršijama nustatyta paklaida, keičiama skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis ir skaičiuojama iš naujo nuo 2-ojo žingsnio. Jeigu apskaičiuotasis kreivis yra didesnis už eksperimentinį, svorio centro atstumas nuo elemento viršaus (y_c) yra didinamas, ir atvirkščiai.
9. Pasiekus maksimalią momento reikšmę, gautam atvirkštinio uždavinio rezultatui patikrinti sprendžiamas tiesioginis uždavinys (Salys 2008). Jame, taikant gautą tempiamosios armatūros įtempių ir deformacijų diagramą, apskaičiuojama momentų ir kreivių priklausomybė. Apskaičiuota priklausomybė lyginama su eksperimentine. Momentų ir kreivių priklausomybėms sutapus (skirtumas tarp jų neviršija nustatytos paklaidos), skaičiavimai baigiami.

3. Eksperimentiniai gelžbetoninių sijų tyrimai

Vykdam Lietuvos valstybinio mokslo ir studijų fondo remiamą mokslininkų grupių tyrimų projektą, VGTU Gelžbetoninių ir mūrinių konstrukcijų katedros laboratorijoje buvo išbandyta gelžbetoninių sijų serija, trys iš jų buvo panaudotos šiame darbe. Visų sijų ilgis – 3280 mm. Sijos turėjo vienodus gabaritus ir panašias medžiagų charakteristikas, tačiau skyrėsi jų armavimo koeficientas ($\rho \approx 0,3, 0,6$ ir 1%). Visos sijos gniuždomojoje zonoje buvo armuotos $2\varnothing 6$ mm skersmens strypais. Tempiamojoje zonoje sijos buvo armuotos strypine armatūra S500: sija S3-2-1 – $3\varnothing 10$ mm strypais, S2-3 – $3\varnothing 14$ mm strypais ir S1-3 – $3\varnothing 18$ mm strypais. Armatūros charakteristikoms nustatyti išbandyta po tris kiekvieno skersmens strypus. Eksperimentais gautos armatūros ($\varnothing 10$ mm) įtempių ir deformacijų diagramos parodytos 4 pav. Buvo nustatytos pagrindinės charakteristikos: takumo riba f_{sy} ir tamprumo modulis E_s .

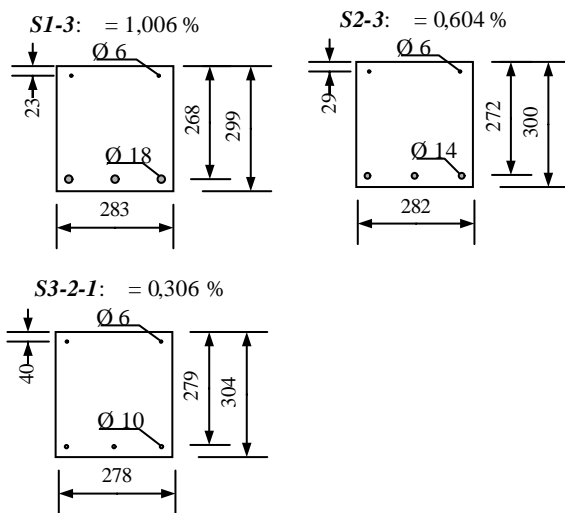
Sijos buvo betonuojamos metaliniuose klojiniuose. Jos kietėjo natūraliomis sąlygomis, esant vidutiniam



4 pav. Armatūros įtempių ir deformacijų diagrama
Fig. 4. Stress-strain relationship of reinforcement

75,3 % drėgniui bei 14,5 °C temperatūrai. Betono fizikinėms ir mechaninėms savybėms nustatyti kartu su sijomis buvo pagaminti kubai, prizmės ir cilindrai. Pagal kubų (150×150×150 mm) ir cilindrų (150 mm skersmens) bandymų duomenis įvairiais laiko momentais nustatyti betono gniuždomasis stipris, o pagal prizmių duomenis – betono tempiamasis stipris (lenkiant prizmes).

Eksperimentinių sijų skerspjūviai ir pagrindinės charakteristikos parodytos 5 pav. ir lentelėje, kur A_{s1} yra tempiamosios zonos armatūros plotas, ρ – armavimo procentas, f_{cyl} – betono cilindrinis gniuždomasis stipris bandymo dieną ir E_s – armatūros tamprumo modulis.

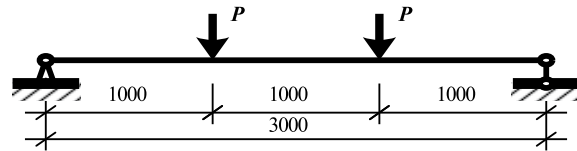


5 pav. Eksperimentinių sijų skerspjūviai
Fig. 5. Sections of experimental beams

Laisvai atremtos sijos buvo apkrautos dviem koncentruotomis tarpatramio trečdaliuose išdėstytomis jėgomis. Visų sijų tarpatramio ilgis $l_0 = 3,0$ m. Sijų atremimo ir apkrovimo schema pateikta 6 pav.

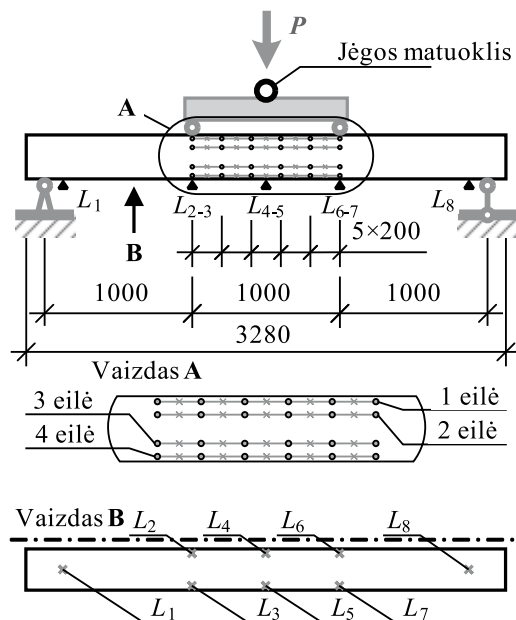
Pagrindinės eksperimentinių sijų charakteristikos
Main characteristics of experimental beams

Sija	A_{s1}, m^2	$\rho, \%$	f_{cyl}, MPa	E_s, MPa
S3-2-1	$2,320 \times 10^{-4}$	0,30	47,75	209,9
S2-3	$4,661 \times 10^{-4}$	0,60	48,13	210,5
S1-3	$7,547 \times 10^{-4}$	1,00	48,20	207,3



6 pav. Sijos apkrovimo schema
Fig. 6. Loading of test beams

Gelžbetoninės sijos išbandytos bandymų stende, naudojant PIP-1000 presą. Apkrova buvo keliami pakopomis po 2 kN ir darant pauzes po maždaug 2 minutes, skirtas rodmenims užrašyti. Apkrovos dydis fiksuotas skaitmeniniu 500 kN dinamometru. Bandymo metu ant sijos uždėtas įrangos svoris sudarė 184,4 kg. Vidutiniškai vienos sijos bandymas truko iki trijų valandų (80 apkrovos žingsnių). 7 pav. pavaizduota apkrovimo ir įlinkių bei deformacijų matavimo schema.

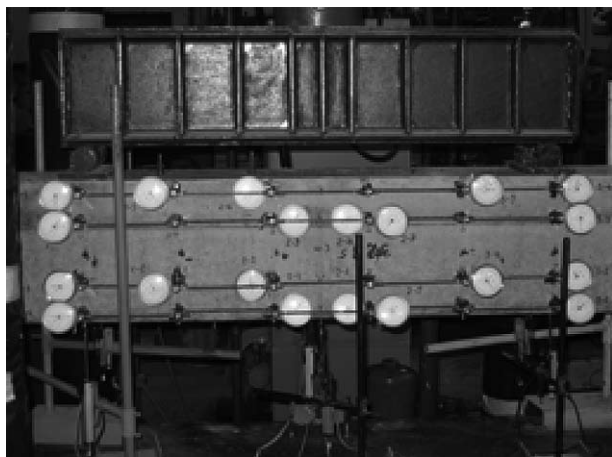


7 pav. Matavimo prietaisų išdėstymo schema
Fig. 7. Location of measurement devices

Sijų įlinkiai buvo matuoti 8 įlinkiomačiais (indukciniais tiesinių poslinkių matuokliais, tikslumas – ±0,15 %), išdėstytais tokia seka: po vieną prie kiekvienos atramos, po du koncentruotų apkrovų pridėjimo taškuose (1,0 m nuo atramų) ir du tarpatramio viduryje, pavaizduotas (7 pav., vaizdas B).

Indukciniai indikatoriai kartu su dinamometru buvo sujungti su asmeniniu kompiuteriu, o jų rodmenys buvo nuskaitomi kas 1 s. Kaip išdėstyta matavimo įranga, matoma 8 pav.

Sijų deformacijoms matuoti panaudoti 20 mechaninių mikrometrų su apskritimine skale (indikatoriai), kurių tikslumas – ±0,003 mm. Matavimų bazė – 200 mm. Apkrautų sijų vidutinės deformacijos matuotos grynojo lenkimo zonoje keturiuose skirtinguose lygiuose bei penkiuose kiekvieno lygio ruožuose (7 ir 8 pav.). Indikatorių rodmenys buvo nuskaitomi kiekvienoje apkrovos pakopoje.



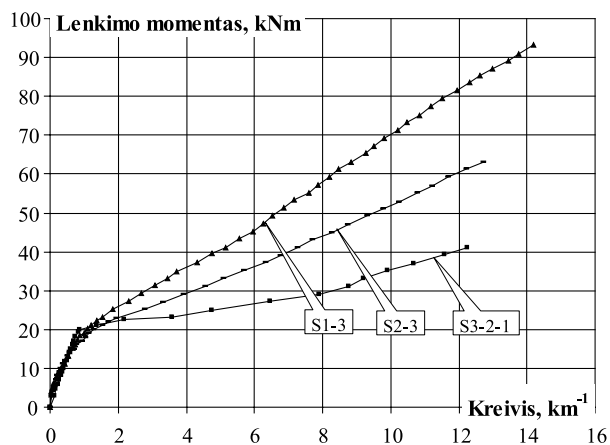
8 pav. Eksperimentinės sijos fragmentas

Fig. 8. A fragment of test beam

4. Modeliavimo rezultatai

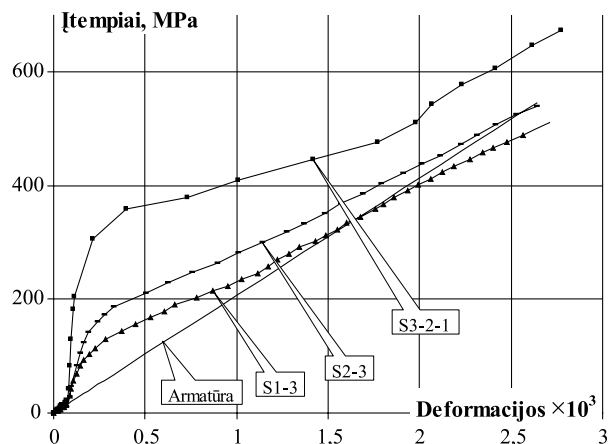
Eksperimentinės sijų momentų ir kreivių diagramos pateiktos 9 pav. Taikant antrame skyriuje aprašytą metodą, gautos *suminių* armatūros įtempių ir deformacijų diagramos, kurios parodytos 10 pav. Kaip minėta, laikoma, kad visą tempimo įrašą po betono pleišėjimo atlaiko armatūra. 10 pav. taip pat parodyta armatūros įtempių ir deformacijų diagrama, atspindinti jos *tikrąją* elgseną. Iš suminių įtempių armatūroje atėmus tikruosius įtempius, gautos *papildomų* įtempių ir deformacijų diagramos, parodytos 11 pav. Skirtingoms eksperimentinėms sijoms gautos kiekybiškai skirtingos diagramos, tačiau jų forma yra panaši. Papildomų įtempių ir deformacijų diagramas sudaro dvi dalys:

kylančioji ir krįnčioji. Kylančioji dalis, prasidedanti nuo betono pleišėjimo deformacijos ($\epsilon_{cr} = f_t/E_c$), yra parabolės formos, o krįnčiąją gana tiksliai galima aprašyti tiesine priklausomybe. Pabrėžtina, kad esant duotai deformacijai mažesnio armavimo koeficiento sijoms gautos didesnės įtempių reikšmės. Taip pat pažymėtina, kad sijai S1-3, kurios armavimo koeficientas yra didžiausias ($\rho = 1\%$), gautos neigiamų įtempių diagramos dalys. Tai galima paaiškinti betono susitraukimo įtaka sijos įtempių ir deformacijų būviui. Kaip žinoma, dėl susitraukimo armatūroje atsiranda nemaži gniuždymo, o betone – tempimo įtempiai. Betono susitraukimo įtaka trumpalaikė apkrova veikiamų sijų įtempių ir deformacijų būviui išsamiai aptariama kitame autorių tyrimo grupės darbe (Gribniak *et al.* 2008, 2009; Kaklauskas *et al.* 2009). Šiame darbe susitraukimo efektas nėra įvertinamas.



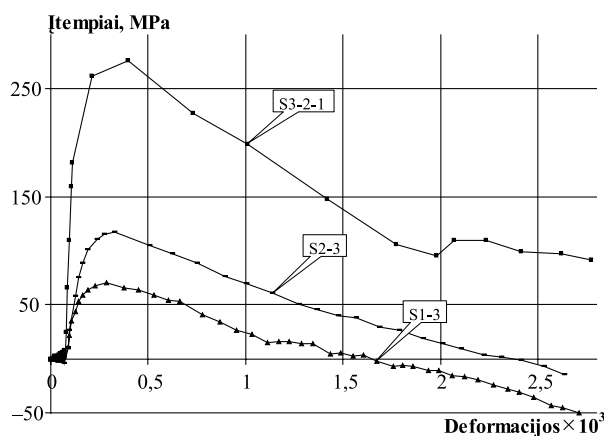
9 pav. Eksperimentiškai išmatuotos momentų ir kreivių diagramos

Fig. 9. Experimental moment-curvature diagrams



10 pav. Suminiai įtempiai tempimojoje zonoje

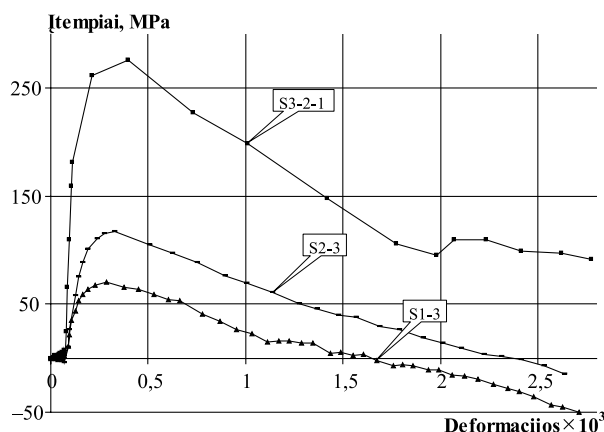
Fig. 10. Total stresses in tensile reinforcement



11 pav. Papildomi įtempiai tempiamojoje zonoje

Fig. 11. Additional stresses in tensile reinforcement (due to tension stiffening)

Papildomų įtempių armatūroje dydis priklauso ne tik nuo vidutinių įrašų, veikiančių tempiamajame betone, bet ir nuo armatūros skerspjūvio ploto: mažesniame plote veikia proporcingai didesni įtempiai. Siekiant objektyviau įvertinti supleišėjusio tempiamojo betono įtaką sijos deformacijoms, 12 pav. parodytos papildomų įrašų ir deformacijų diagramos. Pažymėtina, kad šių diagramų skirtumai nėra tokie dideli kaip papildomų įtempių ir deformacijų diagramų. Tikėtina, kad, eliminavus betono susitraukimo įtaką, papildomų įrašų ir deformacijų kreivės gali sutapti.



12 pav. Papildomos įrašos tempiamojoje zonoje

Fig. 12. Additional internal forces in tensile reinforcement (due to tension stiffening)

5. Darbo rezultatai ir išvados

Straipsnyje nagrinėjama gelžbetoninių sijų tempiamosios zonos elgsena, atsiradus plyšiams. Taikant auto-

rių pasiūlytą metodą, iš eksperimentinių momentų ir kreivių priklausomybių gaunamos suminės armatūros įtempių ir deformacijų diagramos, teigiant, kad, atsiradus plyšiu, tempiamosios zonos įrašų atstojamoji veikia armatūroje.

Pateikti trijų gelžbetoninių sijų ($\rho \approx 0,3, 0,6$ ir 1%), paveiktų trumpalaikė apkrova, eksperimentiniai tyrimai. Iš eksperimentinių momentų ir kreivių priklausomybių gautos suminės armatūros įtempių ir deformacijų diagramos. Iš suminių įtempių atėmus tikruosius armatūros įtempius, gautos papildomos įtempių ir deformacijų diagramos. Pabrėžtina, kad esant duotai deformacijai mažesnio armavimo koeficiento sijoms gautos didesnės įtempių reikšmės. Taip pat pažymėtina, kad sijai S1-3, turinčiai didžiausią armavimo koeficientą ($\rho = 1\%$), gautos neigiamų įtempių diagramos dalys. Tai galima paaiškinti betono susitraukimo įtaka sijos įtempių ir deformacijų būviui.

Tolesni tyrimai galėtų atskleisti įvairių parametų (armatūros skersmens, armavimo koeficiento, armatūros strypų paviršiaus ir kt.) įtaką gelžbetoninių elementų deformacijoms. Pasiūlytasis metodas taip pat gali būti taikomas, kuriant naują tangentinių įtempių – armatūros praslydimo betone priklausomybę.

Padėka

Straipsnio autoriai reiškia padėką Lietuvos valstybiniam mokslo ir studijų fondui už finansinę paramą vykdant mokslo tiriamuosius darbus.

Literatūra

- Beeby, A. W.; Scott, R. H. 2004. Insights into the cracking and tension stiffening behaviour of reinforced concrete tension members revealed by computer modelling, in *Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Magazine of Concrete Research* 56(3): 179–190.
- Eurocode 2: *Design of Concrete Structures - Part 1: General Rules and Rules for Buildings, EN 1992-1-1:2004*. 2004. Brussels: CEN. 230 p.
- Gilbert, R. I. 2007. Tension stiffening in lightly reinforced concrete slabs, *ASCE Journal of Structural Engineering* 133(6): 899–903. doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(2007)133:6(899)
- Gribniak, V.; Kaklauskas, G.; Bačinskas, D. 2009. Experimental investigation of shrinkage influence on tension stiffening of RC Beams, in *Proc. of the Eighth International Conference Creep, Shrinkage and Durability of Concrete and Concrete Structures (ConCreep 8)*, Ise-Shima, Japan, 2008. London: CRC Press/Balkema, Taylor & Francis Group, 1: 571–577.
- Gribniak, V.; Kaklauskas, G.; Bačinskas, D. 2008. Shrinkage in reinforced concrete structures: A computational aspect, *Journal of Civil Engineering and Management* 14(1): 49–60. doi:10.3846/1392-3730.2008.14.49-60
- Kaklauskas, G. 2000. *Integralinis gelžbetoninių elementų deformatyvumo fizinis modelis*: habilitacinio darbo santrauka [In-

- tegral Flexural Constitutive Model for Deformational Analysis of Concrete Structures]. Vilnius: Technika. 87 p.
- Kaklauskas, G.; Gribniak, V.; Bačinskas, D.; Vainiūnas, P. 2009. Shrinkage influence on tension stiffening in concrete members, *Engineering Structures* 31(6): 1305–1312. doi:10.1016/j.engstruct.2008.10.007
- Kaklauskas, G. 2004. Flexural layered deformational model of reinforced concrete members, *Magazine of Concrete Research* 56(10): 575–584. doi:10.1680/macr.56.10.575.53678
- Salys, D. 2008. Sluoksnų metodo skaitinė realizacija [Numerical Realization of Layer Method], iš *Statyba. 11-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“*, įvykusios Vilniuje 2008 m. balandžio 2 d., pranešimų medžiaga. Vilnius: Technika, 217–224.
- Somayaji, S.; Shah, S. P. 1981. Bond stress versus slip relationships and cracking response of tension members, *ACI Journal Proceedings* 78(3): 217–225.
- Stramandinoli, S. B.; Rovere, H. L. 2007. An efficient tension-stiffening model for nonlinear analysis of reinforced concrete members, *Engineering Structures* 30: 2069–2080. doi:10.1016/j.engstruct.2007.12.022

MODELLING DEFORMATION BEHAVIOUR OF RC BEAMS ATTRIBUTING TENSION-STIFFENING TO TENSILE REINFORCEMENT

D. Salys, G. Kaklauskas, V. Gribniak

Summary. After cracking, the stiffness of the member along its length varies, which makes the calculation of deformations complicated. In a cracked member, stiffness is largest in the section within the uncracked region while remains smallest in the cracked section. This is because in the cracked section, tensile concrete does not contribute to the load carrying mechanism. However, at intermediate sections between adjacent cracks, concrete around reinforcement retains some tensile force due to the *bond-action* that effectively stiffens member response and reduces deflections. This effect is known as *tension-stiffening*. This paper discusses the tension-stiffening effect in reinforced concrete (RC) beams. Numerical modelling uses the approach based on tension-stiffening attributed to tensile reinforcement. A material model of reinforced steel has been developed by inverse analysis using the moment-curvature diagrams of RC beams. Total stresses in tensile reinforcement consist of actual stresses corresponding to the average strain of the steel and additional stresses due to tension-stiffening. The carried out analysis employed experimental data on RC beams tested by the authors. The beams had a constant cross section but a different amount of tensile reinforcement. It has been shown that additional (tension-stiffening) stresses in the steel depend on the area of reinforcement. However, the resulting internal forces are less dependent on the amount of reinforcement.

Keywords: tensile concrete, inverse analysis, constitutive model, experimental research.

Donatas SALYS. PhD student at the Department of Bridges and Special Structures of Vilnius Gediminas Technical University, Lithuania. BSc (2005, Engineering Informatics) and MSc (2007, Engineering Informatics) received at VGTU. Research interests: mathematical modelling, nonlinear numerical analysis of reinforced concrete structures.

Gintaris KAKLAUSKAS. A professor and the head of the Department of Bridges and Special Structures of Vilnius Gediminas Technical University, Lithuania. Prof. G. Kaklauskas received PhD and Dr Habil (Dr Sc.) degrees in engineering at Vilnius Gediminas Technical University, was a recipient of Fulbright Fellowship (for research work at the University of Illinois, Urbana-Champaign, 1996) and Marie Curie Fellowship (experienced researchers category, 2002-2003) and is a member of the FIB Task Group 4.1 Serviceability Models. Research interests: various topics of reinforced concrete, particularly constitutive modelling and numerical simulation of reinforced concrete structures.

Viktor GRIBNIAK. Researcher at the Department of Bridges and Special Structures of Vilnius Gediminas Technical University, Lithuania. Received PhD degree in engineering (2009) at Vilnius Gediminas Technical University. A study visit to Politecnico di Torino (2003). The author of a number of papers. Research interests: mathematical modelling, statistical analysis and numerical simulation of concrete structures.