



T A D A S L I S A U S K A S

**LENKIAMŲ
GELŽBETONINIŲ
SIJŲ, SUSTIPRINTŲ
ANGLIES PLAUŠU,
TYRIMAI**

D A K T A R O D I S E R T A C I J A

K a u n a s
2 0 2 1

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

TADAS LISAUSKAS

LENKIAMŲ GELŽBETONINIŲ SIJŲ,
SUSTIPRINTŲ ANGLIES PLAUSŲ, TYRIMAI

Daktaro disertacija
Technologijos mokslai, statybos inžinerija (T 002)

2021, Kaunas

Disertacija rengta 2016–2020 metais Kauno technologijos universiteto Statybos ir architektūros fakultete, Statybos ir architektūros kompetencijų centre.

Mokslinis vadovas:

Doc. dr. Mindaugas AUGONIS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, statybos inžinerija – T 002)

Mokslinis konsultantas:

Dr. Mario Rui Tiago ARRUDA (CERIS, Aukštasis technikos institutas, Lisabonos universitetas, Statybos ir architektūros fakultetas, statybos inžinerija – T 002)

Interneto svetainės, kurioje skelbiama disertacija, adresas:
<http://ktu.edu>

Redagavo:

Prof. dr. Gabija Bankauskaitė (Vilniaus universitetas)

TURINYS

PADĖKA	5
SUTARTINIAI ŽYMĖJIMAI.....	6
ĮVADAS.....	12
1. LITERATŪROS APŽVALGA.....	15
1.1. Lenkiamų gelžbetoninių sijų, sustiprintų anglies plaušu, pritaikymas ir naujausių tyrimų apžvalga.....	15
1.2. Anglies plaušo ir klijų, užtikrinančių sukibimą su paviršiumi, pagrindinės mechaninės savybės bei betono paviršiaus paruošimo įtaka sukibimui	23
1.3. Gelžbetoninių konstrukcijų, sustiprintų anglies plaušu, kontakto zonos tarp anglies plaušo ir betono elgsena	25
1.4. Lenkiamų gelžbetoninių sijų, sustiprintų anglies plaušu, stiprumą ir standumą įvertinančių metodų apžvalga.....	30
1.5. Pirmojo skyriaus išvados.....	44
2. EKSPERIMENTINIAI ANGLIES PLAUSŲ SUSTIPRINTŲ GELŽBETONINIŲ SIJŲ TYRIMAI	45
2.1. Medžiagų savybės ir jų statistinis įvertinimas.....	45
2.2. Eksperimentinė programa.....	48
2.3. Lenkiamų gelžbetoninių sijų, sustiprintų anglies plaušu, pleišetumo, standumo ir stiprumo eksperimentiniai tyrimai	53
2.4. Lenkiamų gelžbetoninių sijų ir ruloninio anglies plaušo kontakto zonos elgsenos eksperimentiniai tyrimai	57
2.5. Antrojo skyriaus išvados	61
3. ANALITINIAI ANGLIES PLAUSŲ SUSTIPRINTŲ GELŽBETONINIŲ SIJŲ TYRIMAI.....	62
3.1. Analitiniai modeliai, leidžiantys įvertinti sluoksnių sukibimo įtaką sluoksniuotų konstrukcijų standumui	62
3.2. Analitinio modelio, leidžiančio įvertinti dviejų sluoksnių kontakto zonos šlyties jėgos ir tangentinių įtempių pasiskirstymą per elemento ilgį, sudarymas. 64	
3.3. Analitiniai metodai, leidžiantys įvertinti sukibimo jėgą tarp anglies plaušo ir betono	77
3.4. Rezultatai ir jų palyginimas.....	78

3.5. Trečiojo skyriaus išvados	82
4. LENKIAMŲ ANGLIES PLAUŠŲ STIPRINTŲ GELŽBETONINIŲ SIJŲ SKAITINIS MODELIAVIMAS	83
4.1. Baigtinių elementų modelio sudarymas.....	83
4.2. Teoriniai medžiagų modeliai	84
4.3. Rezultatai ir jų palyginimas	86
4.4. Ketvirtojo skyriaus išvados	93
BENDROSIOS IŠVADOS.....	94
LITERATŪRA	95
MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS	103

PADĖKA

Autorius dėkoja moksliniam vadovui – Kauno technologijos universiteto Statybos ir architektūros fakulteto docentui dr. Mindaugui Augoniui už visokeriopą pagalbą ir išvalgas rengiant daktaro disertaciją.

Už konsultacijas, skaičiuojant baigtinių elementų metodu, autorius dėkingas moksliniam konsultantui dr. Mario Rui Tiago Arruda, dr. Taduui Zingailai ir doktorantui Deividui Martinavičiui. Autorius taip pat dėkingas dr. Šarūnui Kelpšai už patarimus ir palaikymą planuojant eksperimentą bei Justinui Valeikai už konsultacijas verčiant tekstą į anglų kalbą.

Už moralinį palaikymą ir supratingumą autorius dėkingas savo šeimai, artimiesiems ir draugams.

SUTARTINIAI ŽYMĖJIMAI

a – atstumas tarp atramos ir apkrovos pridėjimo vietos (1.73 formulė); redukuotas gniuždomos zonos aukštis β_{1x} (1.45 formulė); laipsninės funkcijos daugiklis (3.126 formulė)

A_{CFRP} – anglies plaušo skerspjūvio plotas

a_L – tariamas šlyties tarpatramis

a_1 – įlinkiai, apskaičiuoti pagal nesupleišėjusį skerspjūvį

a_2 – įlinkiai, apskaičiuoti pagal supleišėjusį skerspjūvį

A_s – armatūros skerspjūvio plotas

A_{s1} – tempiamos armatūros skerspjūvio plotas

A_{s2} – gniuždomos armatūros skerspjūvio plotas

b – skerspjūvio plotis

c – laipsninės funkcijos konstanta

C_c – betono gniuždomosios zonos atstojamoji

C_e – aplinkos mažinimo koeficientas

c_1 – pataisos koeficientas, gautas iš eksperimentų

c_2 – pataisos koeficientas betono tempiamam stipriui, gautas iš eksperimentų

d – atstumas nuo skerspjūvio labiausiai gniuždomo krašto iki tempiamos armatūros centro

d_2 – gniuždomos armatūros atstumas nuo labiausiai gniuždomo skerspjūvio krašto iki armatūros centro

E_c – kirstinis betono tamprumo modulis

$E_{c,cr}$ – supleišėjusio skerspjūvio betono deformacijų modulis

E_{CFRP} – anglies plaušo tamprumo modulis

$E_{c,ld}(x)$ – betono deformacijų modulis, plyšio įtakos zonoje kintantis per elemento ilgį pagal laipsninės funkcijos lygtį

E_{cm} – vidutinis betono tamprumo modulis

E_{EpoX} – epoksidinių klijų tamprumo modulis

E^i – i-tojo sluoksnio lenkiamasis standumas

E_s – armatūros tamprumo modulis

$[E_{stand.}]$ – standumo matrica

E^* – betono deformacijų modulis

e_1, e_2 – atitinkamai pirmo ir antro sluoksnio ekscentricitetas (atstumas nuo sluoksnio neutraliosios ašies iki sluoksnių kontakto zonos)

f – sijos įlinkis

F – apkrovos jėga

$\{\mathbf{F}\}$ – apkrovų vektorius

f_{CFRP} – anglies plaušo tempiamasis stipris

f_{ck} – betono cilindrinis gniuždomasis stipris

f_{cm} – vidutinis betono cilindrinis gniuždomasis stipris

$f_{cm,cube}$ – betono kubinis vidutinis gniuždomasis stipris

f_{ctm} – vidutinis tempiamasis betono stipris

f_{EpoX} – epoksidinių klijų stipris tempiant

f^i – i-tojo sluoksnio savasis svyravimo dažnis

f_p – pradinis liekamasis įlinkis
 f_r – betono trūkimo stipris
 f_s – įtempiai armatūroje
 f_y – armatūros stipris pagal takumo ribą
 f_{yk} – armatūros charakteristinis stipris pagal takumo ribą
 f_u – armatūros stipris pagal stiprumo ribą
 f_{uk} – armatūros charakteristinis stipris pagal stiprumo ribą
 f_{Σ} – suminis įlinkis įvertinant pradinį liekamąjį įlinkį
 G_{CFRP} – sukibimo tarp anglies plaušo ir betono irimo energija
 G_f – tempiamo betono irimo energija
 h – sijos skerspjūvio aukštis
 I_c – gelžbetoninės sijos inercijos momentas
 I_{cr} – supleišėjusio elemento inercijos momentas
 I_{CFRP} – anglies plaušo inercijos momentas
 I_g – nesupleišėjusio elemento inercijos momentas
 I_o – inercijos momentas, esantis prieš sijos stiprinimą
 I_1 – pirmo sluoksnio (gelžbetoninės sijos) inercijos momentas
 k – koeficientas, įvertinantis skaičiuojamąją schemą (1.75 ir 3.86 formulės); koeficientas, įvertinantis betono įtempių ir deformacijų priklausomybę (4.136 formulė); koeficientas, įvertinantis praslydimą (3.102 formulė)
 k_b – geometrijos faktorius, susietas su plaušo b_{CFRP} ir sijos b pločiu
 k_c – betono sutankinimo koeficientas
 $k_{lbd}(x)$ – koeficientas, įvertinantis praslydimą plyšio įtakos zonoje per elemento ilgį pagal tiesės funkciją
 k_m – sukibimo koeficientas lenkiamiems elementams
 K_{nn} – normalinis standumas
 K_{tt} – šlyties standumas
 k_n – charakteristinis fraktilio koeficientas
 k_p – geometrijos faktorius, susietas su plaušo b_{CFRP} ir sijos b pločiu
 $k_{sukib.}$ – koeficientas, įvertinantis praslydimą tarp anglies plaušo ir betono
 k_0 – apkrovos schemos faktorius
 k_1 – momento pasiskirstymo funkcija
 l – sijos tarpatriamo ilgis
 l_b – plaušo sukibimo ilgis (lenkiamam elementui pusė plaušo juostos ilgio)
 l_{bd} – būtinas atstumas tam, kad anglies plaušas visiškai užsiinkaruotų
 $l_{b,max}$ – maksimalus sukibimo ilgis tarp anglies plaušo ir betono, kurį padidinus, sukibimas nedidėja
 l_{CFRP} – anglies plaušo ilgis
 L_e, L_{e1}, l_e – anglies plaušo efektyvusis sukibimo ilgis
 l_{shear} – atstumas tarp anglies plaušo galo ir atramos
 \mathbf{M} – lenkimo momento vektorius
 M_{cr} – pleišėjimo momentas
 M_{Ed} – skaičiuotinas lenkimo momentas
 $M_{EK}(x)$ – išorinis lenkimo momentas, kintantis per elemento ilgį
 M_{EK} – sijoje veikiantis maksimalus lenkimo momentas

M_n – nominali sijos lenkiamoji galia
 M_o – sijos lenkimo momentas, esantis prieš stiprinimą
 M_{Rd} – sijos lenkiamoji galia
 M_1, M_2 – atitinkamai pirmo ir antro sluoksnio (elemento) lenkimo momentai nuo išorinio poveikio M_{Ed}
 $M_1(x), M_2(x)$ – atitinkamai pirmo ir antro sluoksnio (elemento) lenkimo momentas nuo išorinio momento $M_{Ed}(x)$, kintantis per elemento ilgį
 $M_{1,ld}(x), M_{2,ld}(x)$ – atitinkamai pirmo ir antro sluoksnio (elemento) lenkimo momentai nuo išorinio momento plyšio įtakos zonoje, kintantys per elemento ilgį
 m_x – n imčių rezultatų vidurkis
 n – laipsnio rodiklis (1.77 formulė); bandinių skaičius (2.79 formulė)
 n_{CFRP} – anglies plaušo sluoksnių skaičius
 N_{CFRP} – sukibimo jėga tarp anglies plaušo ir betono
 $N_{CFRP,max}$ – maksimali sukibimo jėga tarp anglies plaušo ir betono, esant visam inkaravimo ilgiui
 P_{max} – maksimali sukibimo jėga tarp anglies plaušo ir betono, esant visam inkaravimo ilgiui
 q – išskirstyta (linijinė) apkrova
 s_x – įvertintoji standartinio nuokrypio reikšmė
 T – sukibimo (kontakto) jėga
 T_{CFRP} – tempiamo anglies plaušo atstojamoji
 t_{CFRP} – anglies plaušo juostos storis
 t_{EpoX} – epoksidinių klijų storis
 $T_{ld}(x)$ – sukibimo jėga tarp betono ir anglies plaušo plyšio įtakos zonoje per elemento ilgį
 T_s – tempiamos armatūros atstojamoji
 t_{vd} – Stjudento koeficientas
 v – laipsnio rodiklis
 V_{Ed} – skaičiuotina skersinė jėga
 V_{Rd} – maksimali skersinė jėga, kurią gali atlaikyti sija plaušo gale
 V_{Rp} – anglies plaušo atsilupimo nuo betono skersinės jėgos atspario reikšmė
 w – plyšio plotis
 w_c – plyšio plotis, kai nelieka betono tempiamojo stiprumo
 w_p – pradinis plyšio plotis
 w_1 – plyšio plotis, kai betono tempiamojo stiprumo liko 20 %
 W_1 – pirmo sluoksnio atsparumo momentas
 W_2 – antro sluoksnio atsparumo momentas
 x – gniuždomos zonos aukštis
 x_{cr} – supleišėjusio skerspjūvio gniuždomos zonos aukštis
 x_i – medžiagos savybė
 X_k – pasikliautinis intervalas
 X_{k95} – betono stiprio arba tamprumo modulio pasikliautinis intervalas, kurio patikimumas 95 %
 $1/r$ – gelžbetoninės konstrukcijos kreivis
 $1/r_{cr}$ – gelžbetoninės sijos kreivis apskaičiuotas visiško supleišėjimo sąlygomis

$1/r_{uc}$ – gelžbetoninės sijos kreivis apskaičiuotas nesupleišėjimo sąlygomis
 $1/r_1, 1/r_2$ – atitinkamai pirmo ir antro sluoksnio kreiviai
 α – kreivės posvyrio kampas tarp tangentinių kontakto šlyties įtempių bei praslydimo (4.2 pav.); kreivės posvyrio kampas tarp įtempių ir santykinų deformacijų (4.3 pav.); mažinimo koeficientas įvertinantis įstrižuosius plyšius (1.67 formulė); laipsnio rodiklis (1.27 formulė); pirmo ir antro sluoksnių standumų santykis (3.92 formulė)
 α_{CFRP} – anglies plaušo ir betono tamprumo modulių santykis
 $\alpha_{lbd}(x)$ – pirmo ir antro sluoksnių standumų santykis plyšio įtakos zonoje per elemento ilgį
 α_s – armatūros ir betono tamprumo modulių santykis
 α_1 – daugiklis padedantis įvertinti betono stiprio intensyvumą gniuždomoje zonoje
 β – koeficientas, kurį taikant atsižvelgiama į apkrovimo trukmės arba kartotinės apkrovos įtaką vidutinei deformacijai; laipsnio rodiklis (1.27 formulė)
 $\beta_L (\beta_l)$ – koeficientas susietas su anglies plaušo sukibimo l_b ir efektyviuoju ilgiu l_{e1} (L_e)
 β_p – koeficientas susietas su plaušo b_{CFRP} ir sijos b pločiu
 β_1 – daugiklis įvertinantis ekvivalentinės stačiakampės formos gniuždomo betono įtempių pasiskirstymą iki neutralios ašies (1.38 formulė); armatūros sukibties koeficientas (1.77 formulė)
 γ – daugiklis padedantis įvertinti betono stiprio intensyvumą gniuždomoje zonoje; laipsnio rodiklis (1.27 formulė); γ – standumo koeficientas (3.110 formulė)
 δ – praslydimas tarp anglies plaušo ir betono
 δ_G – daugiklis įvertinantis ekvivalentinės stačiakampės formos gniuždomo betono įtempių pasiskirstymą iki neutralios ašies
 δ_{pl} – plastinis praslydimas tarp anglies plaušo ir betono
 δ_u – maksimalus praslydimas tarp anglies plaušo ir betono
 Δ_0, Δ_1 – kreivio koeficientas
 $\{\epsilon\}$ – santykinų deformacijų vektorius
 ϵ_{CFRP} – anglies plaušo santykinės deformacijos
 $\epsilon_{CFRP,u}$ – anglies plaušo santykinė ribinė irimo deformacija
 $\epsilon_{CFRP,ud}$ – skaičiuotina anglies plaušo santykinė irimo deformacija
 ϵ_c – gniuždomo betono krašto santykinės deformacijos
 $\epsilon_{c,cr}$ – supleišėjusio elemento gniuždomo betono krašto santykinės deformacijos
 ϵ_{cu} – ribinė gniuždomo betono santykinė deformacija
 ϵ_{c1} – gniuždomo betono santykinė deformacija, esant didžiausiems gniuždymo įtempiams
 ϵ_s – plieno armatūros santykinės deformacijos
 ϵ_{slip} – skerspjuvio sluoksnių praslydimas
 $\epsilon_{slip}(x)$ – skerspjuvio sluoksnių praslydimas kintantis per elemento ilgį
 $\epsilon^*_{slip}(x)$ – skerspjuvio sluoksnių praslydimas įvertinantis trumpesnę anglies plaušo ilgį ir kintantis per elemento ilgį
 $\epsilon^*_{slip,lbd}(x)$ – skerspjuvio sluoksnių praslydimas plyšio veikimo zonoje kintantis per elemento ilgį
 ϵ_{sy} – plieninės armatūros santykinės deformacijos, kurių metu armatūra pasiekia takumo ribą

ε_{s2} – gniuždomos armatūros santykinės deformacijos
 ε_o – esamos tempiamo betono maksimalios santykinės deformacijos, kai yra klįjuojamas anglies plaušas
 ε_u – plieninės armatūros ribinės santykinės deformacijos pagal stiprumo ribą
 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – atitinkamai pirmo ir antro skerspjūvio sluoksnių santykinės deformacijos
 ζ – pasiskirstymo koeficientas (kurį taikant atsižvelgiama į skerspjūvio lenkiamąjį standį)
 ζ_b – lenkiamojo standumo pasiskirstymo koeficientas
 η – santykis gniuždomo betono santykinės deformacijos ε_c ir gniuždomo betono santykinės deformacijos ε_{c1} , esant didžiausiems gniuždymo įtempiams
 $\eta_0(x), \eta_1(x)$ – šlyties jėgos pasiskirstymo funkcija
 $\eta'_0(x), \eta'_1(x)$ – šlyties įtempių pasiskirstymo funkcija
 θ – koeficientas susiejantis kontakto šlyties įtempius ir praslydimą tarp anglies plaušo ir betono
 λ – tikrinė reikšmė (1.1 formulė); efektyvusis kontakto standumas (3.113 formulė)
 ρA – tankis vienetiniam ilgiui
 ρ_{eq} – armatūros ir anglies plaušo armavimo koeficientas
 ρ_s – sijos armavimo procentas
 ρ_{s1} – tempiamos armatūros armavimo koeficientas
 ζ – šlyties modulis
 σ_c – betono gniuždomieji įtempiai
 σ_{ct} – tempiamo betono įtempiai
 σ_s – armatūros įtempiai
 τ_{CFRP} – tangentiniai kontakto šlyties įtempiai tarp anglies plaušo ir betono
 $\tau(x)$ – tangentiniai kontakto įtempiai gaunami diferencijuojant kontakto (šlyties) jėgą išilgai elemento ašiai
 $\tau_{lbd}(x)$ – tangentiniai kontakto įtempiai plyšio įtakos zonoje gaunami diferencijuojant kontakto (šlyties) jėgą išilgai elemento ašiai
 τ_{max} – maksimalūs tangentiniai kontakto šlyties įtempiai tarp anglies plaušo ir betono
 τ_{Rd} – maksimalūs tangentiniai įtempiai, kuriuos gali atlaikyti sija plaušo gale vertikaliame pjūvyje
 τ_{Rp} – tangentinių įtempių atspario reikšmė
 ϕ – stiprumo mažinimo koeficientas
 ϕ_c – betono gniuždomojo stiprio mažinimo koeficientas
 ϕ_{CFRP} – anglies plaušo stiprio mažinimo koeficientas
 ϕ_s – armatūros stiprio mažinimo koeficientas
 Ψ – daugiklis padedantis įvertinti betono stiprio intensyvumą gniuždomoje zonoje
 Ψ_{CFRP} – papildomas anglies plaušo stiprumo mažinimo faktorius
 ω – pataisos koeficientas šlyties įtempiams, kuris įvertiną anglies plaušo medžiagos sukibimą su kita medžiaga

Santrumpos

ACI – American Concrete Institute (Amerikos betono institutas)

BEM – baigtinių elementų metodas

CFRP – carbon fibre reinforced polymer (anglies plaušas)

EBR – externally bonded reinforcement (išorinis klijuojamasis stiprinimas)

EC2 – Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings (Eurokodas 2. Gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas. 1-1 dalis. Bendrosios ir pastatų taisyklės)

fib – International Federation for Structural Concrete (Tarptautinė betoninių konstrukcijų federacija)

ISIS – Intelligent Sensing for Innovative Structures (Pažangus požiūris į inovatyvias konstrukcijas)

NSM – near surface mounted (klijuojamasis stiprinimas įpjovose)

IVADAS

Mokslo problemos aktualumas

Geležbetoninių konstrukcijų stiprinimas yra labai aktualus klausimas nuo pačios geležbetonio atsiradimo pradžios. Stiprinimo priežasčių gali būti įvairių, tačiau pagrindinės yra esamų konstrukcijų stiprumo ir/ar standumo ribinių būvių neatitikimas normoms arba noras / būtinybė padidinti laikomąją galią dėl papildomų apkrovų. Anglies plaušas dėl savo savybių yra tinkama medžiaga padidinti geležbetoninių konstrukcijų laikomąją galią. Anglies plaušo stipris tempiant viršija 2000 MPa, todėl, stiprinant konstrukciją, jos skerspjūvis yra nepadidinamas. Santykinai lengvas paruošimas stiprinti ir atsparumas korozijai šią medžiagą padaro dar geresnę. Anglies plaušas yra naudojamas stiprinti sijų, kolonų, perdangų ir tiltų konstrukcijas, nepaisant gana aukštos jo kainos.

Praktikoje dažnai susiduriama su problema, kad esamos konstrukcijos būna pažeistos, supleišėjusios ir sunku įvertinti, ar sustiprinta konstrukcija atlaikys projektines apkrovas. Todėl disertacijoje atlikta lenkiamų geležbetoninių supleišėjusių ir sustiprintų angies plaušu sijų analizė ir pasiūlytas analitinis modelis, kuriuo remiantis galima įvertinti supleišėjusio (kai mažas pleišėjimo intensyvumas) elemento sukibimo (šlyties) jėgą ir tangentinius (šlyties) įtempius tarp angies plaušo ir betono per elemento ilgį.

Darbo tikslas

Pasiūlyti alternatyvų analitinį metodą, kuriuo remiantis būtų galima apskaičiuoti nesupleišėjusio ir supleišėjusio (kai mažas pleišėjimo intensyvumas) lenkiamo geležbetoninio elemento sukibimo (šlyties) jėgą ir tangentinius (šlyties) įtempius tarp angies plaušo ir betono, įvertinant sluoksnių praslydimą per elemento ilgį.

Darbo uždaviniai

1. Atlikti lenkiamų geležbetoninių sijų, sustiprintų angies plaušu, naujausių tyrimų apžvalgą. Apžvelgti geležbetoninių sijų stiprinimo būdus ir plaušo savybes. Išanalizuoti skaičiavimo metodus, aprašančius geležbetoninių sijų, sustiprintų angies plaušu, stiprumą ir standumą.
2. Atlikti lenkiamų geležbetoninių sijų, sustiprintų angies plaušu, pleišėtumo, standumo ir stiprumo eksperimentinius tyrimus. Išmatuoti parametrus, kurie padėtų nustatyti angies plaušo praslydimą nuo betono.
3. Sudaryti analitinį modelį, kuriuo remiantis būtų galima įvertinti lenkiamo supleišėjusio (kai mažas pleišėjimo intensyvumas) kompozito sukibimo (šlyties) jėgą ir tangentinius (šlyties) įtempius tarp angies plaušo ir betono, įvertinant sluoksnių praslydimą per elemento ilgį. Apskaičiuoti kompozito charakteristikas pagal kitų autorių siūlomas metodikas arba klasikinius skaičiavimo principus. Gautus rezultatus palyginti su eksperimentiniais rezultatais.
4. Atlikti lenkiamų geležbetoninių sijų, sustiprintų angies plaušu, skaičiavimus baigtinių elementų metodu.

Tyrimų metodika

1. Mokslinių publikacijų, knygų ir normų skaitymas, nagrinėjimas bei analizė.
2. Kompozitinės sijos bandomos universalioju presu. Plyšiai matuojami žiūroniniu matuokliu, plyšių liniuote ir mechaniniais (laikrodiniais) poslinkių matuokliais. Betono deformacijos matuojamos mechaniniais (laikrodiniais) poslinkių matuokliais. Kompozitinės sijos anglies plaušo ir betono tarpusavio praslydimas nustatomas matuojant deformacijas elektroniniais jutikliais. Įlinkiai matuojami linijiniais poslinkių matuokliais.
3. Skaičiavimas iteracijų metodu, sudėtinių strypų teorijos principu, ACI, ISIS, *fib*, EC2 ir kitais metodais.
4. Skaitiniai skaičiavimai baigtinių elementų programa „Abaqus“.

Mokslinio darbo naujumas

Sudarytas lenkiamo nesupleišėjusio ir supleišėjusio (kai mažas pleišėjimo intensyvumas) kompozito šlyties jėgos bei įtempių tarp anglies plaušo ir betono analitinis modelis, kurį taikant įvertinamas sluoksnių praslydimas per elemento ilgį ir apskaičiuojami plyšio zonoje ženkliai padidėję šlyties tarp anglies plaušo ir betono įtempiai, lemiantys greitesnę kontakto praradimą šioje zonoje.

Ištirta gelžbetoninių sijų pažaidų mastelio įtaka anglies plaušu sustiprintų sijų laikomajai galiai bei standumui ir nustatyta, kad labiausiai padidėja tų sijų laikomoji galia, kurių pradinių plyšių plotis buvo didžiausias.

Darbo praktinė reikšmė

Pasiūlytas analitinis skaičiavimo metodas lenkiamų supleišėjusių (kai mažas pleišėjimo intensyvumas) kompozitų sukibimo jėgai tarp dviejų sluoksnių nustatyti, įvertinant jų praslydimą. Analitiniu modeliu galima įvertinti sluoksnių sukibties standumą, esant įvairiems apkrovimo atvejams, šį modelį galima taikyti stiprinamų konstrukcijų projektavimui. Pasiūlytas metodas leidžia ne tik santykinai lengviau apskaičiuoti sukibimo įtempius ir šlyties jėgą tarp sluoksnių, išvengiant diferencialinių lygčių sprendimo, palyginti su sudėtinių strypų teorija, tačiau ir įvertinti reikšmingą plyšių įtaką. Taigi, siūlomam metodui, leidžiančiam įvertinti kompozito kontakto elgseną, kai atsiveria plyšys, būdingos platesnės pritaikymo galimybės.

Ginamasis teiginys

Anglies plaušu sustiprintų lenkiamų gelžbetoninių elementų šlyties įtempius, atsivėrus plyšiui tempiamoje betono zonoje, galima pakankamai tiksliai prognozuoti, įvertinus kintantį elemento skerspjūvio standumą plaušo inkaravimo zonoje ties plyšiu.

Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tema paskelbtos keturios mokslinės publikacijos: vienas straipsnis duomenų bazės „Clarivate Analytics Web of Science“ leidinyje, turinčiame citavimo indeksą, vienas straipsnis kitų tarptautinių duomenų bazių leidiniuose, du straipsniai – tarptautinių konferencijų pranešimų medžiagoje.

Disertacijos struktūra

- Daktaro disertaciją sudaro įvadas, keturi skyriai, bendrosios išvados, literatūros šaltinių sąrašas ir autoriaus publikacijų sąrašas disertacijos tema.
- Darbo apimtis – 104 puslapiai.
- Disertacijos tekste pateiktos 136 formulės, 47 paveikslėliai, 14 lentelių ir cituoti 103 literatūros šaltiniai.

1. LITERATŪROS APŽVALGA

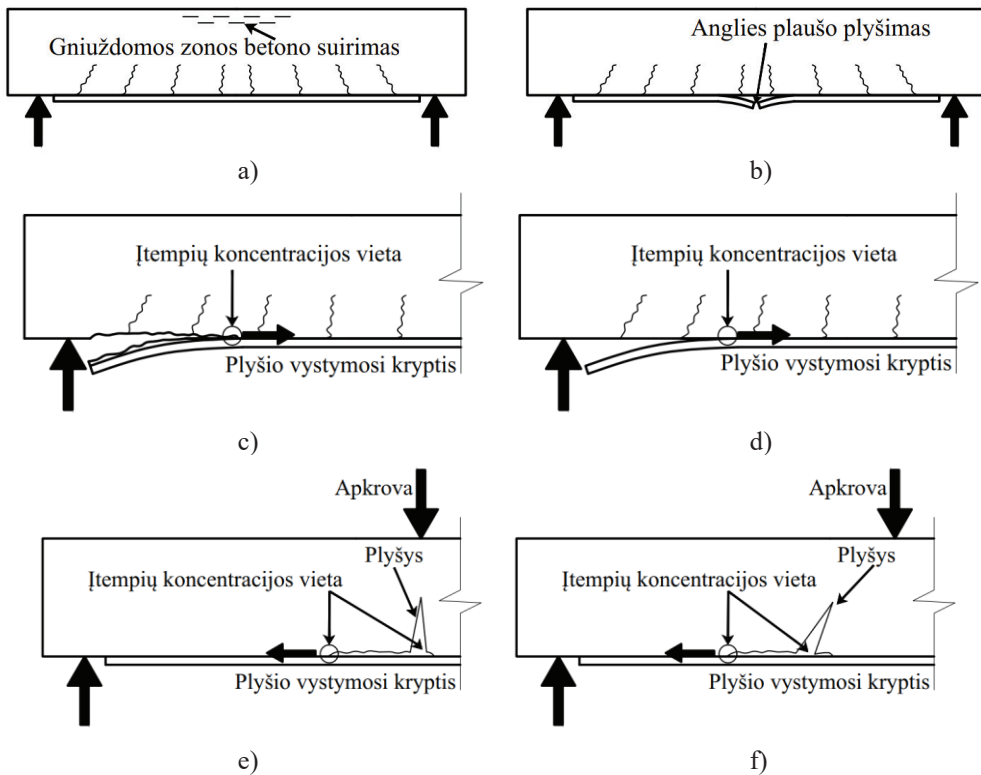
1.1. Lenkiamų gelžbetoninių sijų, sustiprintų anglies plaušu, pritaikymas ir naujausių tyrimų apžvalga

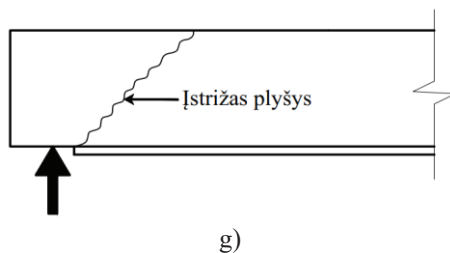
Šiuolaikiniame moderniaame pasaulyje konstrukcijų stiprinimas yra labai svarbi statybų šaka. Pagal Lietuvos Respublikos statybinius techninius reglamentus (Statybos techninis reglamentas STR 2.05.03:2003. Statybinių konstrukcijų projektavimo pagrindai, 2003) ir eurokodus (Eurokodas. Konstrukcijų projektavimo pagrindai, 2004), didžioji dalis konstrukcijų yra statomos 50 metų, o kai kurios – 100 metų. Kartais per eksploatacinį laikotarpį atsiranda poreikis padidinti eksploatacines apkrovas. Iš esmės yra du pagrindiniai gelžbetoninių konstrukcijų stiprinimo būdai: naujų konstrukcijų ir esamų konstrukcijų stiprinimas anglies plaušu. Dažnai pasitaiko antrasis atvejis, kai tam tikrą laiką eksploatuojama konstrukcija pradeda nebetenkinti esminių statinio reikalavimų dėl esamų arba ateityje galimų išorinių veiksnių. Problemos gali būti susijusios su normalinio arba įstrižojo pjūvio stiprumu, neleistiniais plyšio pločiais arba per dideliais įlinkiais. Tinkama statybinė medžiaga (konstrukcija), padedanti išspręsti šias problemas, yra anglies plaušas, kuriam būdingas gana didelis stiprumas (palyginti su kitomis stiprinimo medžiagomis), nesudėtinga stiprinimo technologija, taip pat jis yra atsparus korozijos poveikiui. Technologiško pavyzdys – palyginimas su plienine juosta. Plienine juosta galima sustiprinti gelžbetonines konstrukcijas, tačiau susiduriama su problema, kad plieninė juosta yra santykinai standi, sunki ir sunkiai priglunda prie paviršiaus, todėl yra labai sunku ją kokybiškai priklijuoti. Dar vienas reikšmingas anglies plaušu sustiprintų konstrukcijų privalumas yra tas, kad, sustiprinus konstrukciją, praktiškai nepadidinamas konstrukcijos plotis ir aukštis, o tai yra labai svarbu dėl patalpų erdvumo ir konstrukcijos funkcionalumo. Pavyzdys galėtų būti sijos arba perdangos su papildomu betono sluoksniu gniuždomoje zonoje įrengimas, siekiant padidinti konstrukcijos aukštį, taip sumažinant įtempius tempiamoje armatūroje bei padidinant konstrukcijos standumą.

Konstrukcijos, kurioms būtų galima pritaikyti stiprinimą anglies plaušu: gelžbetoninių sijų, perdangų, kolonų tempiamosios zonos stiprinimas; tiltų konstrukcijos.

Norint suvokti stiprinamų konstrukcijų elgseną, reikia suprasti galimą sustiprintos konstrukcijos suirimo pobūdį. 1.1 pav. pateikti visi galimi gelžbetoninės sijos, stiprintos anglies plaušu, suirimo būdai, kuriuos aprašė Esfahani, Kianoush, ir Tajari, 2007. 1.1 pav. a) pavaizduotas suirimo atvejis, kai silpniausia kompozitinės sijos vieta yra gniuždomasis betonas. Norint šią vietą sustiprinti, reikia naudoti aukštesnės klasės betoną arba didesnę armatūros kiekį gniuždomoje zonoje. 1.1 pav. b) vaizduoja tempiamo plaušo suirimą dėl per mažo tempiamojo stiprio. Norint išvengti šio suirimo, reikia naudoti didesnio stiprio anglies plaušą arba padidinti jo skerspjūvio plotą. 1.1 pav. c, d) pavaizduotas anglies plaušo atplyšimas nuo betono dėl per mažo inkaravimo ilgio. 1.1 pav. c) anglies plaušo galo atplyšimas pasireiškia per betoną (adhezija), 1.1 pav. d) anglies plaušo galo atplyšimas pasireiškia per sukibimo tarp anglies plaušo ir betono kontaktą (kohezija). Norint išvengti šio suirimo atvejo, reikia padidinti inkaravimo ilgį. 1.1 pav. e, f) pavaizduotas

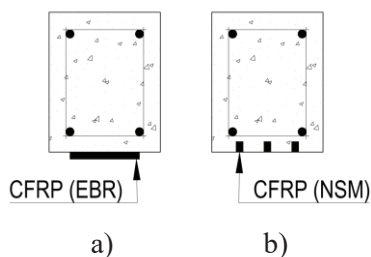
sijos suirimo atvejis, kai susiformavęs normalinis ir įstrižasis plyšys paskatina anglies plaušo sukibimo praradimą ir plaušas atšoka ne galuose, o tam tikru atstumu nuo jo. Susiformavęs plyšys ir kontakto praradimas plečiasi link anglies plaušo galo tol, kol konstrukcija suyra. Šis suirimo atvejis gali įvykti tada, kai armatūros strypuose pasireiškia korozija ir / arba konstrukcijos armavimo koeficientas yra didelis, t. y. atstumai tarp armatūros strypų yra maži. Norint išvengti šio suirimo, reikėtų naudoti aukštesnės klasės betoną ir išlaikyti didesnius atstumus tarp armatūros strypų arba papildomai pagerinti sukibimą / inkaravimą tose vietose, kuriose gali pasireikšti pirminis atplyšimas ir sukibimo praradimas. 1.1 pav. g) pavaizduotas kompozitinės sijos įstrižojo pjūvio suirimas. Reikia atkreipti dėmesį, kad, sustiprinus sijos normalinį pjūvį, įstrižas pjūvis gali tapti silpniausia konstrukcijos vieta. Jeigu yra galimybė, prieš projektuojant gelžbetoninę siją reikėtų numatyti didesnę skersinės armatūros kiekį arba aukštesnės stiprumo klasės betoną. Jeigu galimybės nėra, tada konstrukcijos įstrižajį pjūvį galima sustiprinti panaudojant U formos anglies plaušo stiprinimą. Kai sustiprinamas sijos įstrižasis pjūvis, taip pagerinamas išilginio anglies plaušo užsiinkaravimas.





1.1 pav. Gelžbetoninių sijų, sustiprintų anglies plaušu, suirimo pobūdis: a) dėl betono stiprio praradimo gniuždomoje zonoje; b) dėl anglies plaušo plyšimo; c, d) dėl nepakankamo inkaravimo ilgio; e, f) dėl anglies plaušo sukibimo praradimo su betonu; g) dėl įstrižojo pjūvio laikomosios galios netekimo (Esfahani ir kt., 2007)

Gelžbetoninėms sijoms dažnai reikia sustiprinti normalinį pjūvį. Atlikus literatūros analizę nustatyta, kad dažniausiai išskiriami du šio stiprinimo tipai pagal klijuojamą anglies plaušo būdą: anglies plaušas klijuojamas ant gelžbetoninės sijos paviršiaus (angl. EBR – *externally bonded reinforcement*) (Wei ir kt., 1992; Hosen ir kt., 2019) ir anglies plaušas klijuojamas į įpjovas, kurios būna padarytos betone (angl. NSM – *near surface mounted*) (Barris ir kt., 2020; Dias ir kt., 2018). Šie du stiprinimo būdai yra pateikti 1.2 pav.



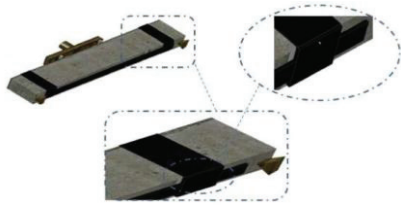
1.2 pav. Gelžbetoninių sijų skerspjūvis, kai anglies plaušas klijuojamas: a) ant sijos paviršiaus (EBR); b) į įpjovas betone (NSM)

Šių skirtingų stiprinimo būdų analizę atliko ir aprašė daug autorių (Bilotta ir kt., 2015; Nurbaiah ir kt., 2010). Pagrindinis anglies plaušo, klijuojamo ant betono paviršiaus (EBR), privalumas yra tas, kad konstrukcijos sustiprinimas yra gana paprastas, tam nereikia papildomų įpjovų betone ir užtenka tiesiog paruošti klijuojamą paviršių. Šiuo būdu stiprinant konstrukciją yra išlaikomas maksimalus anglies plaušo atstumas nuo gniuždomos zonos, o tai reiškia, kad anglies plaušas išnaudojamas efektyviausiai. Pagrindinis klijuojamo anglies plaušo į įpjovas privalumas yra geresnis anglies plaušo inkaravimas. Į įpjovą įklijuoto anglies plaušo / juostos paviršius prisiklijuoja iš trijų pusių – tai padidina kontaktinio paviršiaus plotą. Tai yra labai didelis privalumas, nes dėl plaušo didelio stiprumo, sustiprintos sijos silpniausia vieta yra plaušo sukibimas su betonu.

Bilotta ir kt. (2015) analizavo stiprinimo būdų (EBR ir NSM) efektyvumą, atsižvelgdami į apkrovos pridėjimo pobūdį (išskirstyta apkrova per sijos ilgį arba koncentruota apkrova (4 taškų lenkimo bandymas) ir gautus rezultatus lygino tarpusavyje. Pagal gautus rezultatus buvo padarytos išvados, kad didesnis

efektyvumas (sijos stiprumas) pasiektas naudojant NSM stiprinimo būdą, palyginus su EBR. Sija, stiprinta anglies plaušu, tempiamo betono įpjovoje yra mažiau jautri sukibimo praradimui tarp betono ir anglies plaušo, nes: a) atsivėrus normaliniams-įstrižiams plyšiams, sukibimas tarp plaušo ir betono nebuvo pradingęs; b) praslydimas tarp betono ir anglies plaušo įvyko tada, kai šlyties jėga tapo labai didelė; c) įstrižieji plyšiai formavosi nuo apkrovos pridėjimo vietos link anglies plaušo galo, tačiau suirimas įvyko ne anglies plaušui atsiklijavus nuo betono, o suirus betono apsauginiam sluoksniui. Nepaisant to, EBR stiprinimo būdas pasirodė efektyvesnis už NSM, kai norima pasiekti didesnę standumą. Kita gauta išvada – stiprinant EBR stiprinimo būdu, pavojingesnė apkrovimo schema yra su išskirstytu krūviu per visą elemento ilgį, palyginti su koncentruota apkrova, nes, esant tokiam pačiam lenkimo momentui, gauta didesnė skersinė jėga ties anglies plaušo inkaravimo vieta. Stiprinant NSM būdu nustatyta, kad pavojingesnė skaičiuojamoji schema yra tada, kai konstrukcija veikia išskirstyta apkrova, tačiau čia suirimas pasireiškė ne anglies plaušui prarandant sukibimą su betonu, o per įstrižąjį pjūvį.

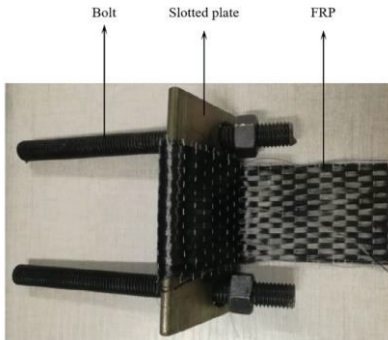
Mokslininkai nuolatos ieško būdų, kaip pagerinti sukibimą tarp anglies plaušo ir betono, kai konstrukcija yra stiprinama EBR. Keli iš šių būdų yra pateikiami 1.3 pav. Vienas iš paprasčiausių inkaravimo būdų, siekiant užtikrinti, kad tempiamasis plaušas normaliniame pjūvyje nepraras sukibimo su betonu, yra U formos plaušo inkaravimas plaušo gale, šis būdas pateiktas 1.3 pav. a) (Mostofinejad ir kt., 2019). Kitas plačiai taikomas anglies plaušo inkaravimo būdas yra anglies plaušo inkaravimas sprausteliais, susuktais iš plaušo vijų. Vienas spraustelio galas yra įkišamas į išgręžtą skylę sijoje ir įkljuojamas. Kito spraustelio galo vijos yra praskleidžiamos ir priklijuojamos prie plaušo galo, kurį reikia užinkaruoti. Praskleidžiamos plaušo vijos užtikrina didesnę sukibimo plotą su inkaruojamu anglies plaušu, dėl to sukibimas tampa efektyvesnis. Šis inkaravimo būdas yra pavaizduotas 1.3 pav. b) (Zaki ir kt., 2019). Dar vienas galimas, tačiau rečiau naudojamas anglies plaušo inkaravimo būdas yra plieninės plokštelės ir varžtų naudojimas. Šis stiprinimo būdas pavaizduotas 1.3 pav. c) (Zhou ir kt., 2020). Stiprinant šiuo būdu, yra išgręžiamos skylės betone ir prisukama speciali plokštelė su varžtais. Pro plokštelėje paliktą skylę yra prakišama anglies plaušo medžiaga, ji užriečiama ir priklijuojama prie savęs pagal pateiktą schemą 1.3 pav. c). Paskutinis literatūros apžvalgoje aptiriamas anglies plaušo inkaravimo būdas yra plaušo inkaravimas priveržiant jį varžtais prie plieninės plokštelės. Šis inkaravimo būdas pavaizduotas 1.3 pav. d) (Bengar, Shahmansouri, 2020). Inkaruojant šiuo būdu, betonavimo metu gelžbetoninėje sijoje įmontuojama plieninė plokštelė su sriegtais strypais. Ant plieninės plokštelės klijuojamas anglies plaušas. Šeši sriegti strypai lieka už plaušo ribų, o per vidurį likęs vienas (septintas) sriegtas strypas perveria anglies plaušą. Ant šių sriegtų strypų užmaunama kita plieninė plokštelė ir su varžlėmis užveržiama taip, kad sriegti strypai turėtų pradinį įtempimą bei anglies plaušo praslydimas būtų suvaržytas per trintį.



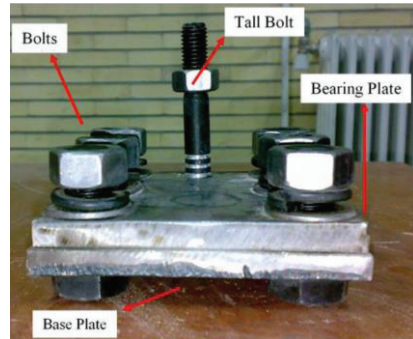
a)



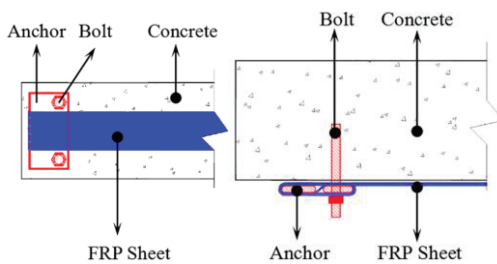
b)



c)



d)



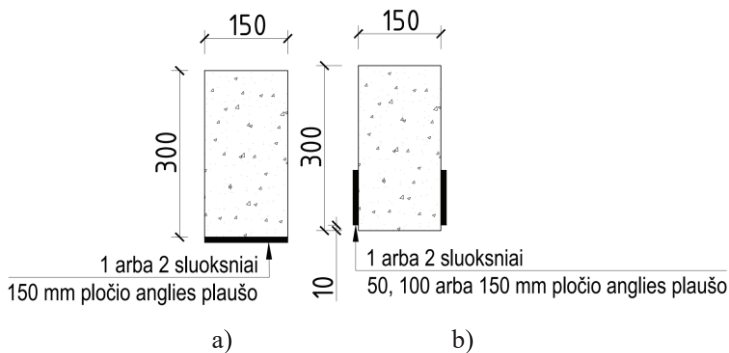
c)



d)

1.3 pav. Gelžbetoninių sijų, sustiprintų anglies plaušu, tempiamojo plaušo inkaravimas: a) U formos anglies plaušo inkaravimas (Mostofinejad ir kt., 2019); b) inkaravimas naudojant anglies plaušo sprausčius (Zaki ir kt., 2019); c) inkaravimas naudojant specialią plieninę plokštelę užriečiant ir priklijuojant plaušą (Zhou ir kt., 2020); d) inkaravimas suspaudžiant anglies plaušą plieninėmis plokštelėmis su varžtais (Bengar, Shahmansouri, 2020)

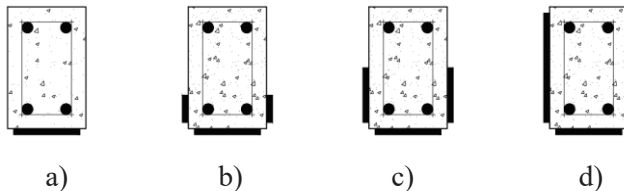
Gelžbetoninių konstrukcijų normalinio pjūvio tempiamos zonos stiprinimą anglies plaušu analizavo daug mokslininkų (Hamed ir kt., 2019; Ism, Rabie, 2019; Rashid ir kt., 2019; Salama ir kt., 2019; Yang ir kt., 2018). Aptariami Salama ir kt. (2019) gauti tyrimo rezultatai. Stiprinimui buvo naudojamas 300 mm aukščio ir 150 mm pločio gelžbetoninės sijos skerspjūvis armuotas $2 \times \varnothing 8$ mm ir $2 \times \varnothing 12$ mm plienine armatūra atitinkamai gniuždomoje ir tempiamoje zonoje. 1,7 m tarpatriamo sija stiprinta $1,02 \times 50$ (100, 150) ir $1,02 \times 100$ (150) anglies plaušu atitinkamai iš sijos šono arba apačios. Kompozitinės sijos skerspjūvio vaizdai pateikti 1.4 pav. Atlikus eksperimentą, buvo nustatyta, kad kompozitinės sijos stiprumas padidėjo nuo 62 % iki 92 %, kai sija stiprinama iš apačios, ir nuo 39,7 % iki 93,4 %, kai stiprinama iš šono, palyginti su nestiprinta (gelžbetonine) sija. Gautas didesnis stiprinimo iš apačios stiprumas, palyginus su tokiu pačiu skerspjūvio plotu, kai stiprinama iš šono dėl to, kad kontakto (šlyties) įtempiai pasiskirsto netolygiai sustiprinime iš šono. Dėl to atsiranda zonų, kuriose įtempiai sparčiai didėja, plaušas praranda sukibimą su betonu, tai lemia viso plaušo atplyšimą. Dėl netolygių kontakto zonos įtempių pasiskirstymo, stiprinant siją iš šono ir anglies plaušo geometrinio centro padėties arčiau neutralios ašies, sijos stiprinimas iš šono nėra toks efektyvus, kaip stiprinant iš apačios. Iš gautų rezultatų matyti, kad gelžbetoninės sijos normalinio pjūvio stiprinimas anglies plaušu yra labai efektyvus būdas gauti didesnę konstrukcijos stiprumą ir standumą.



1.4 pav. Kompozitinės sijos skerspjūvis, kai sija sustiprinta anglies plaušu: a) iš apačios; b) iš šono (Salama ir kt., 2019)

Publikuota nemažai publikacijų, kurių tema – gelžbetoninių sijų įstrižojo pjūvio stiprinimas anglies plaušu (Azam ir kt., 2017; Jin ir kt., 2020; Lee ir kt., 2011; Li ir kt., 2001; Mhanna ir kt., 2019). Li ir kt. (2001) publikavo straipsnį apie gelžbetoninės konstrukcijos normalinio ir įstrižojo pjūvio sustiprinimą anglies plaušu. 200 mm aukščio ir 130 mm pločio gelžbetoninės sijos skerspjūvis armuotas $4 \times \varnothing 8$ mm išilgine plienine armatūra (po du strypus tempiamoje ir gniuždomoje zonoje) ir $\varnothing 6$ mm skersmens skersine armatūra, kurios žingsnis 150 mm. 1,1 m tarpatriamo sija stiprinta 0,5 mm storio anglies plaušu normalinio ir įstrižojo pjūvio tempiamoje zonoje. Kompozitinės sijos skerspjūvio vaizdas ir stiprinimo variantai pateikti 1.5 pav. Atlikus eksperimentą, išsiaiškinta, kad įstrižojo pjūvio sustiprinimas neturėjo reikšmingos įtakos kompozitinės sijos stiprumui. Papildomai sustiprinus įstrižąjį pjūvį, stiprumas padidėjo 11 %, palyginti su gelžbetonine sija, stiprinta anglies plaušu

tik normaliniame pjūvyje. Ši stiprumo padidėjimą lėmė padidėjęs sijos atsparumo momentas, o ne sustiprintas įstrižasis pjūvis. Įstrižojo pjūvio sustiprinimas padėjo atitolinti įstrižojo plyšio atsivėrimą, t. y. pirmasis įstrižasis plyšys atsivėrė prie didesnės apkrovos, palyginus su sija, kurios įstrižasis pjūvis buvo nesustiprintas. Taip pat įstrižojo pjūvio stiprinimo tipas turi įtakos tam, kokio tipo pradiniai plyšiai atsiveria. Jei įstrižas pjūvis stiprinamas per visą sijos ilgį, tai suirus sijai, didžioji dalis plyšių atsiveria įstrižojo pjūvio zonoje. Kompozitinėje sijoje, kurioje įstrižasis pjūvis buvo stiprintas ne per visą ilgį, po suirimo atsivėrė panašus kiekis įstrižųjų ir normalinių plyšių.



1.5 pav. Kompozitinės sijos skerspjūvis, kai sija sustiprinta anglies plaušu: a) iš apačios; b) iš apačios ir šono (siaura juosta); c) iš apačios ir šono (vidutinio siaurumo juosta); d) iš apačios ir šono (plati juosta) (Li ir kt., 2001)

Capozucca ir Cerri (2002) analizavo ir nagrinėjo gelžbetonines konstrukcijas su pažaidomis ir be jų, kurios buvo sustiprintos anglies plaušu bei veikiamos statinėmis arba dinaminėmis apkrovoms. Dinaminės apkrovos buvo sužadamos smūginiu plaktuku ir matuojami savieji svyravimo dažniai, kai sija būdavo pakabinta ant spyruoklinių atramų. Gauti rezultatai lyginti su teoriniais skaičiavimais. Savųjų svyravimų dažnių formulė pateikta 1.1. Šis dinaminis bandymas aktualus dinaminį apkrovų veikiamoms konstrukcijoms, tokioms kaip tiltai.

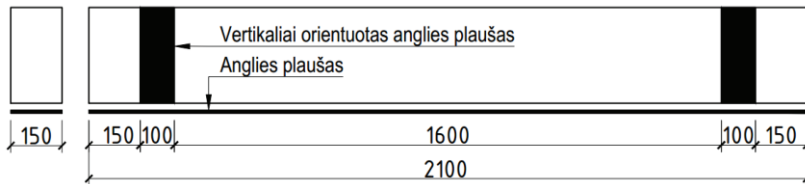
$$f^i = \lambda^2 \left[\frac{EI^i}{\rho A} \right]^{0,5} ; \quad (1.1)$$

čia: λ – tikrinė reikšmė; EI^i – i-tojo sluoksnio lenkiamasis standumas; ρA – tankis vienetiniam ilgiui

Atlikus eksperimentą ir skaičiavimus, buvo padaryta išvada, kad sustiprintos konstrukcijos savasis svyravimo dažnis padidėja, o tai reiškia ir padidėjusį standumą. Taip pat buvo atliekamas lenkimo bandymas, siekiant patikrinti skaičiavimais gautus stiprumo rezultatus. Analitiniu metodu apskaičiuotas kompozitinės konstrukcijos savųjų svyravimų dažnis gautas mažesnis, palyginti su eksperimentu, tačiau prieita prie išvados, kad teorinis modelis atitinka eksperimento rezultatus. Neardomąjį savųjų virpesių modelį galima taikyti užtikrinant ir stebint anglies plaušo kompozitinio darbo su betonu kokybę.

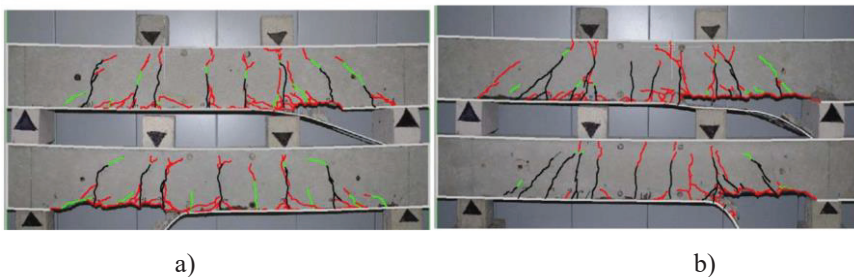
Labai artimi disertacijos temai yra pažeistų gelžbetoninių sijų, sustiprintų anglies plaušu, tyrimai ir pateiktos išvalgos (Ai-hui ir kt., 2006; Daugevičius, Valivonis, 2013; Daugevičius, 2010; Yu ir kt., 2020). Yu ir kt. (2020) atliko eksperimentą, kurio metu buvo bandomos keturių tipų sijos. 1 tipo sijos – gelžbetoninės sijos, nestiprintos anglies plaušu, 2 tipo – gelžbetoninės sijos, stiprintos anglies plaušu, 3 tipo – gelžbetoninės sijos, stiprintos anglies plaušu su pradiniu

pažaidos lygiu, kuris buvo 40 % apkrovos ir, kuriam esant, gelžbetoninės sijos armatūroje pasireiškė takumo įtempiai, 4 tipo – gelžbetoninės sijos, stiprintos anglies plaušu su pradiniu pažaidos lygiu, kuris buvo 80 % apkrovos ir, kuriam esant, gelžbetoninės sijos armatūroje pasireiškė takumo įtempiai. Svarbu paminėti, kad visoms stiprintoms sijoms anglies plaušo inkaravimui buvo naudojamas U formos stiprinimas. Aktualu ir tai, kad išilginio plaušo ilgis buvo per visą sijos ilgį, o tai reiškia, kad, sustiprinus siją, ji per anglies plaušą buvo atremta ant atramos. Sijos stiprinimo schema pateikta 1.6 pav. Atlikus eksperimentą ir išanalizavus duomenis, buvo nustatyta, kad kuo buvo didesnis sijos pažaidos lygis, tuo mažesnė buvo pasiekta laikomoji galia. Ši išvada prieštarauja disertacijoje pateiktoms išvadoms. Detalesnis rezultatų paaiškinimas ir palyginimas su disertacijoje gautomis išvadomis pateiktas 2.3. poskyryje.



1.6 pav. Gelžbetoninės sijos gabaritai ir stiprinimo schema (Yu ir kt., 2020)

Daugevičius ir Valivonis (2013), atlikę eksperimentą, gavo panašius rezultatus į tuos, kurie aptariami disertacijoje. Išanalizavus gautus rezultatus, nustatyta, kad gelžbetoninė sija su pradiniais plyšiais, stiprinta anglies plaušu, atlikė didesnę maksimalią apkrovą ir jos standumas buvo didesnis po pirminių plyšių, palyginti su kompozitine sija be pradinių plyšių. Autorius tai aiškina tuo, kad pirminio apkrovimo metu nesustiprintoje sijoje pasireiškė betono plastinės deformacijos. Nukrovus siją, ją sustiprinus ir dar kartą apkrovus, pasikeičia (padidėja) gniuždomos zonos aukštis, palyginti su sija be išankstinių pažaidų, o sijos tempiama zona dirba tampriai. Padidėjęs gniuždomos juostos aukštis lemia didesnę inercijos momentą, o didesnis inercijos momentas – mažesnius įlinkius. Pagal 1.7 pav. pateiktas plyšių vietas po apkrovimo galima įžvelgti tendenciją, kad su pradiniais plyšiais sustiprintos sijos plyšių skaičius mažesnis, palyginti su kompozitine sija be pradinių plyšių. Čia juoda spalva pažymėti plyšiai apkrovus siją, žalia spalva – po ilgalaikės apkrovos, raudona – po ilgalaikės apkrovos iki tol, kol sija suiro.



1.7 pav. Kompozitinės sijos ir pažymėta atsivėrusių plyšių vieta: a) stiprintos su pradiniais plyšiais; b) stiprintos be pradinių plyšių (Daugevičius, Valivonis, 2013)

1.2. Anglies plaušo ir klijų, užtikrinančių sukibimą su paviršiumi, pagrindinės mechaninės savybės bei betono paviršiaus paruošimo įtaka sukibimui

Anglies plaušo ir ypač klijų, kurie užtikrina sukibimą tarp anglies plaušo ir betono paviršiaus, mechaninės savybės yra labai svarbios sustiprintų konstrukcijų kokybei, t. y. galutinei laikomajai galiai ir standumui. Anglies plaušo pranašumas prieš kitas naudojamas stiprinimo medžiagas yra jos stipris tempiant. Pagal 1.1 lentelėje pateiktas stiprumo vertes, kurios buvo paimtos iš mokslininkų publikacijų, anglies plaušo stipris kinta nuo 2 845 iki 4 950 MPa ruloniniam anglies plaušui ir nuo 1 875 iki 2 742 MPa anglies plaušo juostoms (strypams). Šis stipris apie 3,5–10 kartų didesnis už dažniausiai naudojamos armatūros B500B takumo ribą ir 5–14 kartų daugiau už dažniausiai naudojamo plieno S355 takumo ribą, kuris naudojamas statybinėms konstrukcijoms. Dėl didesnio stiprumo galima naudoti mažesnę stiprinančiosios medžiagos ir tuo pačiu sustiprintos konstrukcijos skerspjūvį. Su šia priežastimi yra susijęs ir technologiskumas, nes, norint pasiekti tokį patį skerspjūvio stiprumą, reikia naudoti daug didesnę skerspjūvį, pavyzdžiui, plieno. Didesnis skerspjūvis susijęs su didesniu standumu. Esant didesniai lenkiamajam standumui, stiprinimo medžiagą sunkiau pritvirtinti, o lenkiamai konstrukcijai padidėja stiprinančiosios medžiagos atplėšimo jėga galuose, dėl to reikia didesnio inkaravimo ilgio arba geresnio sukibimo užtikrinimo. Anglies plaušo tamprumo modulis yra santykinai panašus į plieno tamprumo modulį. Ruloninio anglies plaušo tamprumo modulis yra apie 10–17 % didesnis už plieno, o juostinio / strypinio plaušo yra 16–30 % mažesnis, palyginti su plieno tamprumo moduliu.

Taip pat svarbios yra klijų mechaninės savybės, kurios lemia sukibimą tarp anglies plaušo ir stiprinamo paviršiaus. Kai turime tokią stiprią medžiagą kaip anglies plaušas, dažnai konstrukcijos suirimas įvyksta ne per anglies plaušo suirimą, o per sukibimo praradimą. Klijai turi užtikrinti ne tik stiprumą (sukibimą), tačiau ir kontakto zonos standumą. Jeigu klijų standumas nepakankamas, gali įvykti praslydimas ir anglies plaušas negalės efektyviai įsijungti į darbą. Dėl to gali sumažėti konstrukcijos stiprumas ir standumas. Palyginus klijų tempiamąjį stiprį, kuris yra 20–60 MPa, su betono tempiamuoju stipriu 1,2–5 MPa, matyti, kad jis yra apie 10 kartų didesnis, priklausomai nuo to, kokios klasės betonas ir klijai yra naudojami. Klijų tamprumo modulis yra kelis (keliolika) kartų mažesnis, palyginti su betono, ir dar daugiau kartų mažesnis, palyginti su anglies plaušu, jis kinta nuo 1,5 iki 8,8 GPa, kai betono tamprumo modulis kinta nuo 24 GPa iki 44 GPa.

Apibendrinant išanalizuotus duomenis, galima teigti, kad ruloninio anglies plaušo stipris yra apie du kartus didesnis, palyginti su juostiniu / strypiniu anglies plaušu, o tamprumo modulis didesnis apie pusantrą karto. Nustatyta tendencija, kad ruloniniam anglies plaušui naudojami didesnio tempiamojo stiprio klijai, kurie dažnai būna du kartus stipresni už juostiniam / strypiniam plaušui naudojamus klijus. Apžvelgus klijų tamprumo modulio reikšmes, paaiškėjo priešinga tendencija: didesnio tamprumo modulio klijai naudojami juostiniam / strypiniam anglies plaušui, palyginti su ruloniniu plaušu, o skirtumas siekia apie du kartus.

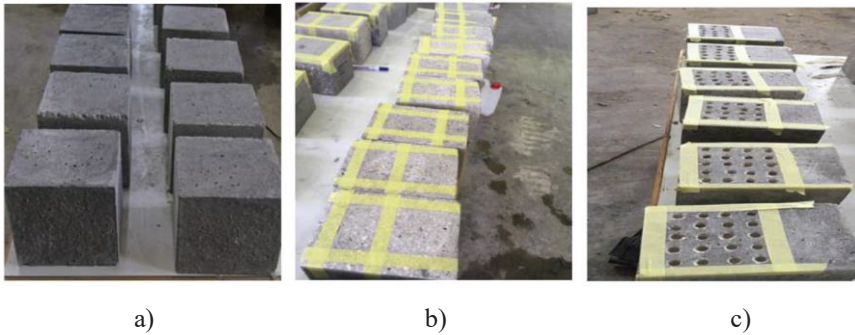
1.1 lentelė. Anglies plaušo ir klijų, skirtų pritvirtinti anglies plaušą prie betono, pagrindinės mechaninės savybės

Autorius	Anglies plaušas (CFRP)		Klijai	
	Mažiausias stipris tempiant f_{CFRP} , MPa	Tamprumo modulis E_{CFRP} , GPa	Mažiausias stipris tempiant f_{Adh} , MPa	Tamprumo modulis E_{Adh} , GPa
(Cheng, Yang, 2017)*	4 300	245	50	3,5
(Esfahani ir kt., 2007)*	2 845	237	–	–
(Nguyen-Minh ir kt., 2018)*	4 900	240	60	3–3,5
(Zhu ir kt., 2020)*	–	235	38,9	6,6
(Taraghi ir kt., 2020)	4 950	240	–	–
(El-Zohairy ir kt., 2017)*	3 450	230	30	4,5
(Yoresta ir kt., 2020)*	2 900	230	>20	–
(Imran, Mahendran, 2020)*	3 800	231	49,3	2,0
(Hemzah ir kt., 2020)*	4 000	230	30	3,8
(DRIZORO)*	3 400	230	29	1,5
(Hanoon ir kt., 2017)*	3 900	230	30	4,5
(Carlos ir kt., 2018)**	2 742	171	17,3	8,8
(Abdallah ir kt., 2020)**	1 875	146	29,5	–
(Hosseini ir kt., 2020)**	2 770	176	20	7,0
(Dias, Barros, 2017)**	3 009	169	20	7,0

* CFRP ruloninis

** CFRP juosta / strypai

Be anglies plaušo ir klijų mechaninių savybių, sukibimui tarp betono ir anglies plaušo didelę įtaką turi betono paviršiaus paruošimas. Al-Rousan (Al-Rousan, AL-Tahat, 2019) gana išsamiai išanalizavo betono paviršiaus įtaką sukibimui. Anglies plaušo išplėtimo eksperimentui buvo panaudoti 108 bandiniai. Eksperimentui naudoti bandiniai be paviršiaus paruošimo, su lygiu paviršiaus paruošimu ir su šiurkščiu paviršiumi, kuriame buvo išgręžtos įvairaus skersmens ir gylio angos. Taip pat buvo dviejų skirtingų stiprumų betono mišiniai (25 MPa ir 50 MPa) ir skirtingų ilgių bei pločių anglies plaušas. Bandiniai, paruošti klijuoti anglies plaušą, pavaizduoti 1.8 pav. Atlikus eksperimentą ir išanalizavus gautus duomenis, buvo padarytos išvados, kad bandinių su lygiu paviršiaus paruošimu sukibimo jėga tarp betono ir anglies plaušo buvo 23 %, o betono su šiurkščiu paviršiumi, kuriuose buvo išgręžtos angos, – 37 % didesnė, palyginti su bandiniais, kurių betono paviršius buvo be paruošimo. Didesnė sukibimo jėga tarp betono ir anglies plaušo, kur betono paviršiuje buvo išgręžtos angos, paaiškinama tuo, kad dalis klijų patenka į angas, kurios padidina sukibimo plotą su betonu bei pagerina inkaravimą. Palyginus sukibimo jėgą tarp bandinių su skirtingais betono mišiniais, nustatyta, kad sukibimo jėga buvo tik 4 % didesnė tų bandinių, kurių betono stipris – 50 MPa, palyginti su bandiniais, kurių betono stipris buvo 25 MPa. Pagal tai galima daryti išvadą, kad betono stipris neturi didelės įtakos sukibimo jėgai tarp betono ir anglies plaušo.



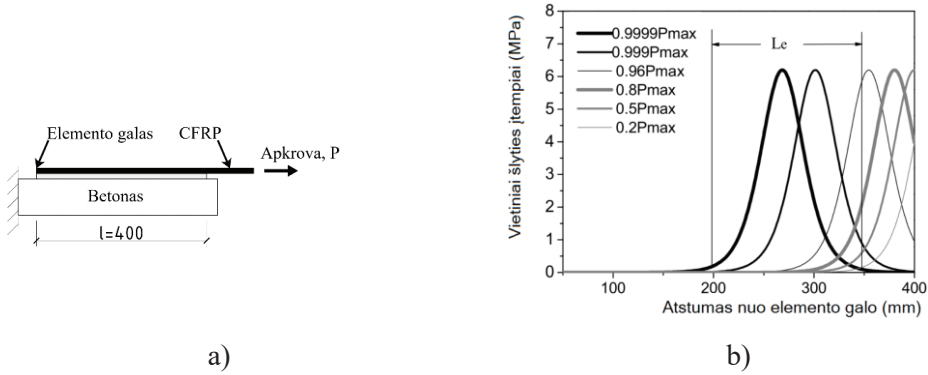
1.8 pav. Betono bandiniai, paruošti klijuoti anglies plaušą: a) be paviršiaus paruošimo; b) su lygiu paviršiaus paruošimu; c) su šiuurkščiu paviršiumi, kuriuose išgręžtos angos (Al-Rousan, AL-Tahat, 2019)

1.3. Gelžbetoninių konstrukcijų, sustiprintų anglies plaušu, kontakto zonos tarp anglies plaušo ir betono elgsena

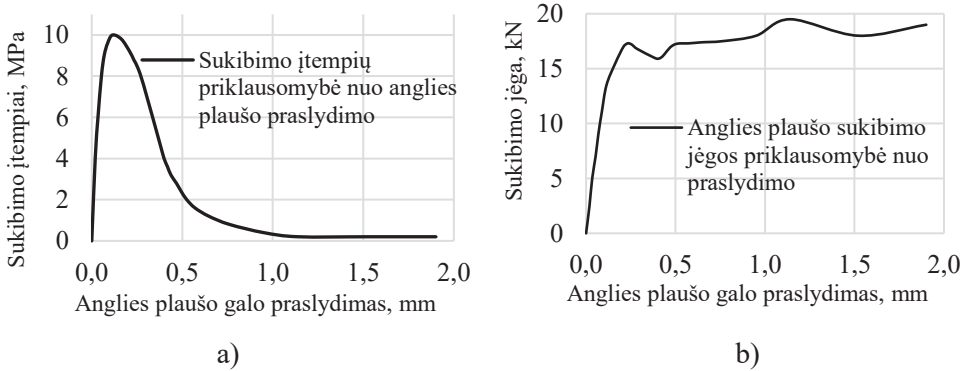
Gelžbetoninių konstrukcijų, sustiprintų anglies plaušu, kontakto zonas tarp anglies plaušo tyrinėjo daug autorių (Alhassan ir kt., 2020; Chen ir kt., 2018; *fib*, 2001; Lisauskas ir kt., 2018; Lorenzis ir kt., 2001). Šiuo atveju labai svarbu ne tik gauti maksimalius kontakto įtempius, tačiau ir jų pasiskirstymą per elemento (kontakto) ilgį.

Galimas sukibimo praradimas tarp anglies plaušo ir betono pavaizduotas 1.1 pav. c–f. Pirmosios dvi suirimo formos (kohezija betone arba anglies plaušo atsiklijavimas nuo betono) dažniausiai įvyksta, kai yra prarandamas sukibimas tarp anglies plaušo ir betono. Čia atsiradusi tempimo jėga anglies plauše yra perduodama betonui tangentiniais (šlyties) įtempiais per klijus. Kai yra pasiekiami maksimalūs tangentiniai įtempiai (sukibimo stiprumo riba), sukibimo praradimas prasideda prieš tai paminėtomis suirimo formomis. Sukibimo praradimo metu yra pastebimas zonos, kurioje veikia maksimalūs tangentiniai įtempiai, pasikeitimas (Guo, 2003; Guo ir kt., 2005). Tai reiškia, kad tik dalis sukibimo ploto yra efektyvi. Kai plyšiai vystosi betone, sukibimas prarandamas plyšio vietoje, tačiau tuo metu aktyvuojama šalia esanti zona (tangentinių įtempių kreivė ir maksimali jos reikšmė pasislenka link atamos). Šis tangentinių įtempių persiskirstymas aiškiai matomas 1.9 pav. b), kai yra pasiekta 99,9 % maksimalios sukibimo jėgos tarp anglies plaušo ir betono ($0,999P_{\max}$). Padidėjus sukibimo jėgai 0,01 % ($0,9999P_{\max}$), tangentiniai sukibties įtempiai ir maksimali jų reikšmė persiskirsto į gretimą zoną. Tai reiškia, kad inkaravimo jėga negali augti, didinant inkaravimo ilgį, ir niekada nebus pasiekta anglies plaušo stiprumo riba, nesvarbu, kiek bus didinamas inkaravimo ilgis. Šios išvados reiškia, kad yra tam tikras efektyvusis inkaravimo ilgis, kurio užtenka, norint pasiekti maksimalų sukibimą. Mechanikos požiūriu tai paaiškinama lokalių šlyties įtempių priklausomybe nuo praslydimo diagrama (Elghazy ir kt., 2018; Mofrad ir kt., 2019; Mukhtar, Faysal, 2018; Wan ir kt., 2018). Ši priklausomybė pavaizduota 1.10 pav. Atkreiptinas dėmesys į tai, kad pradžioje didėjant praslydimui tarp anglies plaušo ir betono, didėja ir šlyties įtempiai. Pasiekus maksimalius įtempius, įtempiai

pradeda kristi, tačiau praslydimas didėja toliau, o sukibimo jėga nemažėja. Tai reiškia, kad maksimalūs tangentiniai įtempiai pasireiškia kitoje vietoje.



1.9 pav. a) Anglies plaušo ištraukimo bandymo schema; b) tangentiniai (kontakto) įtempiai per elemento ilgį esant įvairioms apkrovoms (Guo, 2003)



1.10 pav. a) Kontakto zonos tarp anglies plaušo ir betono vietinių įtempių priklausomybė nuo praslydimo; b) kontakto zonos tarp anglies plaušo ir betono sukibimo jėgos priklausomybė nuo anglies plaušo galo praslydimo (Wan ir kt., 2018)

1.9 pav. pavaizduota anglies plaušo ištraukimo bandymo schema ir rezultatai (Guo, 2003). Bandymo tikslas – ištirti anglies plaušo su betonu sukibimo įtempių pasiskirstymą per elemento ilgį. Pagal gautus rezultatus matyti, kad nuo 0 iki 50 % suirimo jėgos maksimalūs tangentiniai įtempiai gaunami elemento gale. Didėjant apkrovai, maksimalūs įtempiai gaunami toliau nuo krašto, t. y. kuo didesnė apkrova, tuo toliau nuo krašto yra išsidėstę maksimalūs tangentiniai įtempiai. Pažymėtina yra tai, kad tangentiniai įtempiai neviršija gautų maksimalių tangentinių įtempių, esant 50 % suirimo jėgai. Pagal išsidėčiusias kreives galima daryti išvadą, kad, pasiekus maksimalius sukibimo įtempius anglies plaušo gale, įvyksta trapus sukibimo suirimas ir įtempiai persiskirsto į greta esančią zoną. Nėra sukibimo įtempių plastinio pasiskirstymo, kad jie tęstųsi per visą kontakto zoną viso apkrovimo metu.

Žemiau yra pateiktos skirtingų autorių siūlomos ir publikuotos skaičiavimo metodikos, siekiant įvertinti galimą maksimalią sukibimo jėgą tarp anglies plaušo ir betono. Gauti skaičiavimo rezultatai lyginami su gautais ištraukimo bandymo

rezultatais. Kai kurių lygčių narių simbolių žymėjimas pakeistas, palyginus su autorių pateiktais žymėjimais, siekiant išvengti simbolių dubliavimosi ir suteikti aiškumo disertacijoje. Skaičiavimo rezultatai ir tarpusavio metodikų palyginimas yra pateiktas 3.3. poskyryje.

(Van Gemert, 1980):

$$N_{CFRP} = 0,5 \cdot b_{CFRP} \cdot l_b \cdot f_{ctm}; \quad (1.2)$$

(Tanaka, 1996):

$$N_{CFRP} = (6,13 - \ln l_b) \cdot b_{CFRP} \cdot l_b; \quad (1.3)$$

(Yoshizawa, Wu, 1997):

$$N_{CFRP} = 5,88 \cdot l_b^{-0.669} \cdot b_{CFRP} \cdot l_b; \quad (1.4)$$

(Maeda ir kt., 1997):

$$N_{CFRP} = 110,2 \cdot 10^{-6} \cdot E_{CFRP} \cdot t_{CFRP} \cdot b_{CFRP} \cdot L_e; \quad (1.5)$$

(Neubauer, Rostásy, 1997):

$$N_{CFRP} = 0,64 \cdot k_p \cdot b_{CFRP} \cdot \sqrt{f_{ctm} \cdot E_{CFRP} \cdot t_{CFRP}}; \quad (1.6)$$

kai $l_b \geq l_e$

$$N_{CFRP} = 0,64 \cdot k_p \cdot b_{CFRP} \cdot \sqrt{f_{ctm} \cdot E_{CFRP} \cdot t_{CFRP}} \cdot \frac{l_b}{l_e} \cdot \left(2 - \frac{l_b}{l_e}\right); \quad (1.7)$$

kai $l_b < l_e$

(Khalifa ir kt., 1998):

$$N_{CFRP} = 110,2 \cdot 10^{-6} \cdot \left(\frac{f_{ck}}{42}\right)^{\frac{2}{3}} \cdot E_{CFRP} \cdot t_{CFRP} \cdot b_{CFRP} \cdot L_e; \quad (1.8)$$

(Adhikary, Mutsuyoshi, 2001):

$$N_{CFRP} = b_{CFRP} \cdot l_b \cdot \left(0,25 \cdot f_{ck}^{\frac{2}{3}}\right); \quad (1.9)$$

(Chen, Teng, 2001):

$$N_{CFRP} = 0,315 \cdot \beta_P \cdot \beta_L \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot b_{CFRP} \cdot l_{e1}; \quad (1.10)$$

(De Lorenzis ir kt., 2001):

$$N_{CFRP} = b_{CFRP} \cdot \sqrt{2 \cdot E_{CFRP} \cdot t_{CFRP} \cdot G_{CFRP}}; \quad (1.11)$$

(Yang ir kt., 2001):

$$N_{CFRP} = \left(0,5 + 0,08 \cdot \sqrt{\frac{E_{CFRP} \cdot t_{CFRP}}{1000}} \right) \cdot b_{CFRP} \cdot l_e \cdot 0,5 \cdot f_{ctm}; \quad (1.12)$$

(Dai ir kt., 2005):

$$N_{CFRP} = (b_{CFRP} + 7,4) \cdot \sqrt{2 \cdot E_{CFRP} \cdot t_{CFRP} \cdot G_{CFRP}}; \quad (1.13)$$

(Lu ir kt., 2005):

$$N_{CFRP} = \beta_1 \cdot b_{CFRP} \cdot \sqrt{2 \cdot E_{CFRP} \cdot t_{CFRP} \cdot G_{CFRP}}; \quad (1.14)$$

(Camli, Binici, 2007):

$$N_{CFRP} = \sqrt{\tau_{CFRP} \cdot \delta_u} \cdot \sqrt{E_{CFRP} \cdot t_{CFRP}} \cdot b_{CFRP} \cdot \tanh\left(\frac{\theta \cdot l_b}{l_{e1}}\right); \quad (1.15)$$

(Izumo, 2003):

$$N_{CFRP} = \left(3,8 \cdot f_{ck}^{\frac{2}{3}} + 15,2 \right) \cdot L_e \cdot b_{CFRP} \cdot E_{CFRP} \cdot t_{CFRP} \cdot 10^{-3}; \quad (1.16)$$

(Iso, 2003):

$$N_{CFRP} = b_{CFRP} \cdot l_e \cdot 0,93 \cdot f_{ck}^{0,44}; \quad (1.17)$$

(Sato, 2003):

$$N_{CFRP} = (b_{CFRP} + 7,4) \cdot L_e \cdot 2,68 \cdot f_{ck}^{0,2} \cdot E_{CFRP} \cdot t_{CFRP} \cdot 10^{-5}; \quad (1.18)$$

čia: N_{CFRP} – maksimali sukibimo jėga tarp anglies plaušo ir betono; b_{CFRP} – anglies plaušo juostos plotis; l_b – anglies plaušo sukibimo ilgis (lenkiamam elementui pusė plaušo juostos ilgio); f_{ctm} – vidutinis tempiamasis betono stipris; E_{CFRP} – anglies plaušo tamprumo modulis; t_{CFRP} – anglies plaušo juostos storis; l_e – anglies plaušo efektyvusis sukibimo ilgis (1.19); l_{e1} – anglies plaušo efektyvusis sukibimo ilgis (1.20); L_e – anglies plaušo efektyvusis sukibimo ilgis (1.21); k_p – geometrijos faktorius, susietas su plaušo b_{CFRP} ir sijos b pločiu (1.22); β_p – koeficientas, susietas su plaušo b_{CFRP} ir sijos b pločiu (1.23); β_L (β_l) – koeficientas, susietas su anglies plaušo sukibimo l_b ir efektyviuoju ilgiu l_{e1} (L_e) (1.24); G_{CFRP} – sukibimo tarp anglies plaušo ir betono irimo energija (1.25); τ_{CFRP} – tangentiniai kontakto šlyties įtempiai tarp anglies plaušo ir betono (1.26); δ_u – maksimalus praslydimas tarp anglies plaušo ir betono (1.27); θ – koeficientas, susiejantis kontakto šlyties įtempius ir praslydimą tarp anglies plaušo ir betono (1.28)

Anglies plaušo efektyvusis sukibimo ilgis l_e :

$$l_e = \sqrt{\frac{E_{CFRP} \cdot t_{CFRP}}{2 \cdot f_{ctm}}}; \quad (1.19)$$

Anglies plaušo efektyvusis sukibimo ilgis l_{e1} :

$$l_{e1} = \sqrt{\frac{E_{CFRP} \cdot t_{CFRP}}{\sqrt{f_{ck}}}}; \quad (1.20)$$

Anglies plaušo efektyvusis sukibimo ilgis L_e :

$$L_e = e^{6,13-0,58 \ln(E_{CFRP} \cdot t_{CFRP})}; \quad (1.21)$$

Geometrijos faktorius, susietas su plaušo b_{CFRP} ir sijos b pločiu:

$$k_p = \sqrt{\frac{2 - \frac{b}{b_{CFRP}}}{1 + \frac{b}{400}}}; \quad (1.22)$$

Koeficientas, susietas su plaušo b_{CFRP} ir sijos b pločiu:

$$\beta_p = \sqrt{\frac{2 - \frac{b}{b_{CFRP}}}{1 + \frac{b}{400}}}; \quad (1.23)$$

Koeficientas, susietas su anglies plaušo sukibimo l_b ir efektyviuoju ilgiu l_{e1} , kai $l_b > l_{e1}$, tada $\beta_L(\beta_l) = 1,0$, kitu atveju:

$$\beta_L(\beta_l) = \sin\left(\pi \cdot \frac{l_b}{2 \cdot l_{e1}(L_e)}\right); \quad (1.24)$$

Sukibimo tarp anglies plaušo ir betono irimo energija:

$$G_{CFRP} = 0,514 \cdot f_{ck}^{0,236}; \quad (1.25)$$

Tangentiniai kontakto šlyties įtempiai tarp anglies plaušo ir betono:

$$\tau_{CFRP} = \omega \cdot f_{ck}^{0,19}; \quad (1.26)$$

čia: ω – pataisos koeficientas šlyties įtempiams, kuris įvertina anglies plaušo medžiagos sukibimą su kita medžiaga (betonui – $\omega=3,5$)

Maksimalus praslydimas tarp anglies plaušo ir betono:

$$\delta_u = f_{ck}^\alpha \cdot \left(\frac{l_b}{l_{e1}}\right)^\beta \cdot \left(\frac{b_{CFRP}}{b_c}\right)^\gamma; \quad (1.27)$$

čia: α, β, γ – laipsnio rodiklis (betonui – $\alpha = -0,4; \beta = 0,8; \gamma = 0,4$)

Koeficientas, susiejantis kontaktinius šlyties įtempius ir praslydimą tarp anglies plaušo ir betono:

$$\theta = \sqrt{\frac{\tau_{CFRP}}{\delta_u \cdot \sqrt{f_{ck}}}}; \quad (1.28)$$

1.4. Lenkiamų gelžbetoninių sijų, sustiprintų anglies plaušu, stiprumą ir standumą įvertinančių metodų apžvalga

Amerikos normos ACI.

Vieną iš galimų variantų, kaip skaičiuoti gelžbetoninių sijų, sustiprintų anglies plaušu lenkiamąjį stiprumą, siūlo Amerikos normos ACI 440.2R-02 (Rizkalla ir kt., 2002; Singh, 2014). Formuojant šią skaičiavimo metodiką, buvo padarytos tam tikros prielaidos:

- Armatūros ir betono deformacijos yra tiesiogiai proporcingos atstumui nuo neutraliosios ašies centro. Galioja plokščių pjūvių hipotezė.
- Nėra praslydimo tarp anglies plaušo ir betono.
- Klijų sluoksnio šlyties deformacijos nėra vertinamos, nes klijų sluoksnis yra labai plonas.
- Maksimalios naudojamo betono santykinės gniuždomosios deformacijos yra 0,003.
- Tempiamasis betono stipris nevertinamas.
- Anglies plaušas turi tiesinę tamprią įtempių-deformacijų priklausomybę.

Šios prielaidos neatspindi 100 % tikrojo kompozito darbo, tačiau jos yra būtinos supaprastinant ir apskaičiuojant kompozitinių sijų laikomąją galią. Norint, kad kompozitinė sija tenkintų stiprumą, turi atitikti šią sąlygą – 1.29 formulė. Čia stiprumo mažinimo koeficientas ϕ , kuris sumažina skerspjūvio laikomąją galią dėl aukščiau priimtų prielaidų. Žemiau pateikta skaičiavimo metodika, įvertinanti kompozitinės sijos stiprumą. 1.11 pav. parodytas skerspjūvis, jo santykinų deformacijų ir įtempių pasiskirstymas, 1.2 lentelėje aprašytas skaičiavimo algoritmas.

$$M_{Rd} = \phi \cdot M_n \geq M_{Ed}; \quad (1.29)$$

čia: M_n – nominali sijos lenkiamoji galia (1.39); M_{Ed} – sijoje veikiantis maksimalus lenkimo momentas; ϕ – stiprumo mažinimo koeficientas (1.30)

$$\phi = \begin{cases} 0,90 & , \text{ kai } \varepsilon_s \geq 0,005 \\ 0,70 + \frac{0,2 \cdot (\varepsilon_s - \varepsilon_{sy})}{0,005 - \varepsilon_{sy}} & , \text{ kai } \varepsilon_{sy} < \varepsilon_s < 0,005; \\ 0,70 & , \text{ kai } \varepsilon_s \leq \varepsilon_{sy} \end{cases} \quad (1.30)$$

čia: ε_{sy} – plieninės armatūros santykinės deformacijos, kurių metu armatūra pasiekia takumo ribą (1.31); ε_s – plieninės armatūros santykinės deformacijos (1.32)

Plieno armatūros santykinės deformacijos, kurių metu armatūra pasiekia takumo ribą:

$$\varepsilon_{sy} = \frac{f_y}{E_s}; \quad (1.31)$$

čia: f_y – armatūros stipris pagal takumo ribą; E_s – armatūros tamprumo modulis

Plieno armatūros santykinės deformacijos:

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{CFRP} + \varepsilon_o) \cdot \left(\frac{d - x}{h - x} \right); \quad (1.32)$$

čia: ε_{CFRP} – anglies plaušo santykinės deformacijos (1.33); ε_o – esamos tempiamo betono maksimalios santykinės deformacijos, kai yra klijuojamas anglies plaušas; d – atstumas nuo skerspjūvio labiausiai gniuždomo krašto iki tempiamos armatūros centro; x – atstumas nuo skerspjūvio labiausiai gniuždomo krašto iki neutralios ašies (1.37); h – sijos skerspjūvio aukštis

Anglies plaušo santykinės deformacijos:

$$\varepsilon_{CFRP} = \varepsilon_{CFRP,ud} \cdot \left(\frac{h - x}{x} \right) - \varepsilon_o \leq k_m \cdot \varepsilon_{CFRP,ud}; \quad (1.33)$$

čia: $\varepsilon_{CFRP,ud}$ – skaičiuotina anglies plaušo santykinė ribinė irimo deformacija (1.34);

k_m – sukibimo koeficientas lenkiamiems elementams (1.36)

Skaičiuotina anglies plaušo santykinė irimo deformacija:

$$\varepsilon_{CFRP,ud} = C_e \cdot \varepsilon_{CFRP,u}; \quad (1.34)$$

čia: C_e – aplinkos mažinimo koeficientas (kompozitinėms sijoms, stiprintoms anglies plaušu su epoksidiniais klijais $C_e = 0,95$); $\varepsilon_{CFRP,u}$ – anglies plaušo santykinė irimo deformacija (1.35)

Anglies plaušo santykinė irimo deformacija:

$$\varepsilon_{CFRP,u} = \frac{f_{CFRP}}{E_{CFRP}}; \quad (1.35)$$

čia: f_{CFRP} – anglies plaušo tempiamasis stipris; E_{CFRP} – anglies plaušo tamprumo modulis

Sukibimo koeficientas lenkiamiems elementams:

$$k_m = \begin{cases} \frac{1}{60 \cdot \varepsilon_{CFRP,ud}} \cdot \left(1 - \frac{n_1 \cdot E_{CFRP} \cdot t_{CFRP}}{360000} \right) \leq 0,90, \\ \text{kai } n_1 \cdot E_{CFRP} \cdot t_{CFRP} \leq 180000 \\ \frac{1}{60 \cdot \varepsilon_{CFRP,ud}} \cdot \left(\frac{90000}{n_1 \cdot E_{CFRP} \cdot t_{CFRP}} \right) \leq 0,90, \\ \text{kai } n_1 \cdot E_{CFRP} \cdot t_{CFRP} > 180000 \end{cases}; \quad (1.36)$$

Atstumas nuo skerspjūvio labiausiai gniuždomo krašto iki neutralios ašies:

$$x = \frac{A_{s1} \cdot f_s + A_{CFRP} \cdot f_{CFRP,e}}{\gamma \cdot f_{ck} \cdot \beta_1 \cdot b}; \quad (1.37)$$

čia: γ – daugiklis, padedantis įvertinti betono stiprio intensyvumą gniuždomoje zonoje (lenkiamai stačiakampio skerspjūvio sijai $\gamma = 0,85$); β_1 – daugiklis, įvertinantis ekvivalentinės stačiakampės formos gniuždomo betono įtempių pasiskirstymą iki neutralios ašies (1.38)

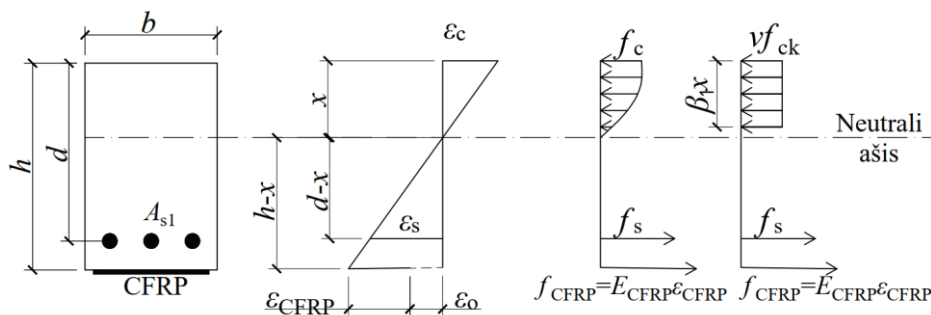
Daugiklis, įvertinantis ekvivalentinės stačiakampės formos gniuždomo betono įtempių pasiskirstymą iki neutralios ašies:

$$\beta_1 = \begin{cases} 0,85 & , \text{kai } f_{ck} \leq 27,6 \text{ MPa} \\ 0,85 - \frac{f_{ck} - 27,6}{6,895} \cdot 0,05, & \text{kai } f_{ck} > 27,6 \text{ MPa} \end{cases}; \quad (1.38)$$

Nominali sijos lenkiamoji galia:

$$M_n = A_{s1} \cdot f_s \left(d - \frac{\beta_1 \cdot x}{2} \right) + \Psi_{CFRP} \cdot A_{CFRP} \cdot f_{CFRP,e} \left(h - \frac{\beta_1 \cdot x}{2} \right); \quad (1.39)$$

čia: Ψ_{CFRP} – papildomas anglies plaušo stiprumo mažinimo faktorius



1.11 pav. Lenkiamos kompozitinės sijos normalinio pjūvio vidinių deformacijų ir įtempių pasiskirstymas

1.2 lentelė. Gelžbetoninės sijos, stiprintos anglies plaušu, normalinio pjūvio skaičiavimo algoritmas pagal Amerikos normas*

Eilės nr.	Skaičiuojamojo veiksmo paaiškinimas	Formulė
1.	Medžiagų skaičiuotinių savybių skaičiavimas	1.31; 1.35
2.	Esamų tempiamo betono maksimalių santykinų deformacijų ε_o skaičiavimas, kai yra klijuojamas anglies plaušas	–
3.	Sukibimo koeficiento k_m lenkiamiesiems elementams skaičiavimas	1.36
4.	Apytikslis atstumo x nuo skerspjūvio labiausiai gniuždomo krašto iki neutralios ašies skaičiavimas	$X = 0,2d$
5.	Anglies plaušo santykinų deformacijų ε_{CFRP} skaičiavimas	1.33

Eilės nr.	Skaičiuojamojo veiksmo paaiškinimas	Formulė
6.	Plieninės armatūros santykinų deformacijų ε_s skaičiavimas	1.32
7.	Anglies plaušo $f_{CFRP,c}$ ir plieninės armatūros f_s stiprių skaičiavimas $f_s \leq f_y$	-
8.	Atstumo x nuo skerspjūvio labiausiai gniuždomo krašto iki neutralios ašies skaičiavimas	1.37; 1.38
9.	Skaičiavimai kartojami nuo 5 punkto penkis – devynis kartus, kol gniuždomos juostos aukštis x nesikeičia	-
10	Kompozitinės sijos nominalios laikomosios galios M_n skaičiavimas	1.39
11.	Kompozitinės sijos laikomosios galios M_{Rd} skaičiavimas	1.29

*Pateikta skaičiavimo metodika skirta apskaičiuoti gelžbetoninės sijos stiprintos anglies plaušu laikomąją galią nevertinant armatūros, esančios gniuždomoje zonoje

Amerikos normose taip pat pateikiamas gelžbetoninių sijų, sustiprintų anglies plaušu, inercijos momento skaičiavimas supleišėjusiam ir nesupleišėjusiam elementui (ACI Committee 318, 1999; Busel ir kt., 2006; Singh, 2014). Žinant šį rodiklį, galima apskaičiuoti kompozitinės sijos įlinkį pagal 3.86 formulę. Čia vietoj kreivio $1/r$ reikėtų naudoti $M_{Ed}/(E_c I_e)$. Bendroji kompozitinės sijos stačiakampio skerspjūvio efektyviojo inercijos momento formulė (1.40):

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_{Ed}}\right)^3 \cdot I_g + \left(1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_{Ed}}\right)^3\right) \cdot I_{cr}; \quad (1.40)$$

čia: M_{cr} – pleišėjimo momentas (1.41); M_{Ed} – skaičiuotinas lenkimo momentas; I_g – nesupleišėjusio elemento inercijos momentas (1.43); I_{cr} – supleišėjusio elemento inercijos momentas (1.44)

Pleišėjimo momentas:

$$M_{cr} = \frac{2 \cdot f_r \cdot I_g}{h}; \quad (1.41)$$

čia: f_r – betono trūkimo stipris (1.42); h – sijos skerspjūvio aukštis

Betono trūkimo stipris:

$$f_r = 0,62 \cdot \sqrt{f_{ck}}; \quad (1.42)$$

čia: f_{ck} – betono charakteristinis cilindrinis gniuždomasis stipris

Nesupleišėjusio elemento inercijos momentas:

$$I_g = \frac{b \cdot h^3}{12}; \quad (1.43)$$

čia: b – skerspjūvio plotis

Supleišėjusio elemento inercijos momentas:

$$I_{cr} = \frac{b \cdot x^3}{3} + \alpha_{CFRP} \cdot A_{CFRP} \cdot \left(h + \frac{t_{CFRP} \cdot n_{CFRP}}{2} - x\right)^2 + \alpha_s \cdot A_s \cdot (d - x)^2; \quad (1.44)$$

čia: x – gniuždomos zonos aukštis; α_{CFRP} – anglies plaušo ir betono tamprumo modulių santykis; α_s – armatūros ir betono tamprumo modulių santykis; t_{CFRP} – anglies plaušo vieno sluoksnio storis; n_{CFRP} – anglies plaušo sluoksnių skaičius; A_{CFRP} – anglies plaušo skerspjūvio plotas; A_s – armatūros skerspjūvio plotas; d – atstumas nuo gniuždomos zonos krašto iki armatūros centro

Kanados normos ISIS.

Dar vienas skaičiavimo būdas, kaip iš galimų variantų skaičiuoti gelžbetoninių konstrukcijų, sustiprintų anglies plaušu, lenkiamąjį stiprumą, siūlomas Kanados normose ISIS (Singh, 2014). Formuojant šią skaičiavimo metodiką, buvo padarytos tam tikros prielaidos:

- Anglies plaušas yra idealiai tampri medžiaga.
- Galioja plokščių pjūvių hipotezė.
- Idealus sukibimas tarp armatūros ir betono, taip pat tarp anglies plaušo ir betono.
- Yra pakankamas plieninės armatūros ir anglies plaušo inkaravimo ilgis.
- Gniuždomo betono įtempių-deformacijų kreivė yra parabolės formos ir skaičiuojamo tempiamo betono stipris lygus nuliui.
- Pradinės deformacijos gelžbetoninėje sijoje prieš stiprinimą yra nevertinamos.

Bendroji gelžbetoninės sijos, stiprintos anglies plaušu, lenkiamojo stiprumo lygtis pagal Kanados normas pateikta žemiau (1.45 formulė). Šios normos leidžia apskaičiuoti gelžbetonines sijas, stiprintas ruloniniu (arba juostiniu) anglies arba stiklo plaušu. Pažymėtina, kad skaičiavimo išraiška 1.45 formulėje ir skaičiavimo algoritmas pateiktas 1.3 lentelėje, nevertina gniuždomos armatūros įtakos. Galima vertinti ir gniuždomą armatūrą pagal pateiktą metodiką, tačiau formulėse reikia pridėti gniuždomos armatūros dedamąją. Kompozitinės sijos lenkiamoji galia:

$$M_{Rd} = T_s \cdot \left(d - \frac{a}{2}\right) + T_{CFRP} \cdot \left(h - \frac{a}{2}\right); \quad (1.45)$$

čia: T_s – tempiamos armatūros atstojamoji (1.48); T_{CFRP} – tempiamo anglies plaušo atstojamoji (1.49); d – atstumas nuo gniuždomos zonos krašto iki armatūros centro; a – redukuotas gniuždomos zonos aukštis $\beta_1 x$; h – sijos skerspjūvio aukštis

Kompozitinės sijo skerspjūvio jėgų pusiausvyros lygtis, nevertinant gniuždomos armatūros:

$$C_c = T_s + T_{CFRP}; \quad (1.46)$$

čia: C_c – betono gniuždomosios zonos atstojamoji (1.47)

Betono gniuždomos zonos atstojamoji:

$$C_c = \phi_c \cdot \alpha_1 \cdot f_{ck} \cdot \beta_1 \cdot b \cdot x; \quad (1.47)$$

čia: ϕ_c – betono gniuždomojo stiprio mažinimo koeficientas (pastatams $\phi_c = 0,60$); α_1 – daugiklis, padedantis įvertinti betono stiprio intensyvumą gniuždomoje zonoje; f_{ck} – betono cilindrinis gniuždomasis stipris; β_1 – daugiklis, įvertinantis ekvivalentinės stačiakampės formos gniuždomo betono įtempių pasiskirstymą iki neutralios ašies; b – skerspjūvio plotis; x – betono gniuždomos zonos aukštis

Tempiamos armatūros atstojamoji:

$$T_s = \phi_s \cdot A_s \cdot f_s; \quad (1.48)$$

čia: ϕ_s – armatūros stiprio mažinimo koeficientas (pastatams $\phi_s = 0,85$); A_s – armatūros skerspjūvio plotas; f_s – įtempiai armatūroje

Tempiamo anglies plaušo atstojamoji:

$$T_{CFRP} = \phi_{CFRP} \cdot A_{CFRP} \cdot E_{CFRP} \cdot \varepsilon_{CFRP}; \quad (1.49)$$

čia: ϕ_{CFRP} – anglies plaušo stiprio mažinimo koeficientas (pastatams $\phi_{CFRP} = 0,75$); A_{CFRP} – anglies plaušo skerspjūvio plotas; E_{CFRP} – anglies plaušo tamprumo modulis; ε_{CFRP} – anglies plaušo santykinės deformacijos

Daugiklis, padedantis įvertinti betono stiprio intensyvumą gniuždomoje zonoje:

$$\alpha_1 = 0,85 - 0,0015 \cdot f_{ck} \geq 0,67; \quad (1.50)$$

Daugiklis, įvertinantis ekvivalentinės stačiakampės formos gniuždomo betono įtempių pasiskirstymą iki neutralios ašies:

$$\beta_1 = 0,97 - 0,0025 \cdot f_{ck} \geq 0,67; \quad (1.51)$$

Santykinės plieninės armatūros deformacijos:

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{cu} \cdot \frac{d - x}{x}; \quad (1.52)$$

čia: ε_{cu} – ribinė gniuždomo betono santykinė deformacija

Santykinės anglies plaušo deformacijos:

$$\varepsilon_{CFRP} = \varepsilon_{cu} \cdot \frac{h - x}{x}; \quad (1.53)$$

Skerspjūvio maksimalios betono santykinės deformacijos:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_{CFRP,u} \cdot \frac{x}{h - x} < \varepsilon_{cu}; \quad (1.54)$$

1.3 lentelė. Gelžbetoninės sijos, stiprintos anglies plaušu, normalinio pjūvio skaičiavimo algoritmas pagal Kanados normas

Eilės nr.	Skaičiuojamojo veiksmo paaiškinimas	Formulė
1.	Traktuojama, kad skerspjūvis suyra dėl gniuždomo betono laikomosios galios netekimo. Tai reiškia, kad vertinamos santykinės betono deformacijos $\varepsilon_{cu} = 0,0035$. Žinant betono deformacijas, rašoma lygtis santykinėms plieninės armatūros ir anglies plaušo deformacijoms. Fiksuojama, kad įtempiai armatūroje pasiekė takumo ribą – $f_s = f_y$	1.52 1.53
2.	Apskaičiuojami daugikliai, kurie padeda aprašyti gniuždomo betono darbą, t. y. daugiklį α_1 , padedantį įvertinti betono stiprio intensyvumą gniuždomoje zonoje, ir daugiklį β_1 , įvertinantį ekvivalentinės stačiakampės formos gniuždomo betono įtempių pasiskirstymą iki neutralios ašies	1.50 1.51

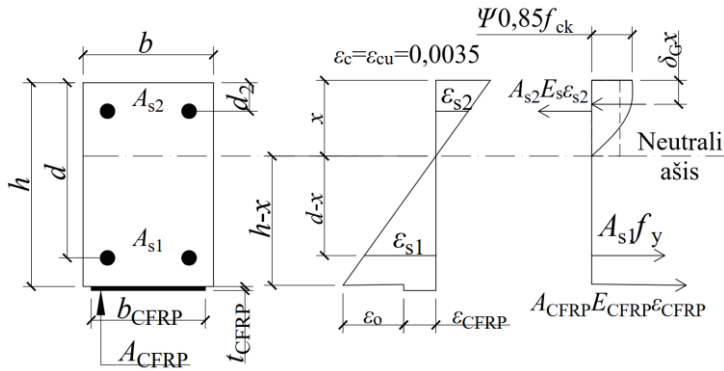
Eilės nr.	Skaičiuojamojo veiksmo paaiškinimas	Formulė
3.	Iš jėgų pusiausvyros lygties apskaičiuojamas gniuždomos zonos aukštis x	1.46
4.	Žinant gniuždomos zonos aukštį, tikrinama, ar anglies plaušo santykinės deformacijos neviršija ribinės deformacijos. Jeigu $\varepsilon_{CFRP} > \varepsilon_{CFRP,u}$ – reikia toliau skaičiavimus tęsti pagal 6 punktą. Jeigu $\varepsilon_{CFRP} \leq \varepsilon_{CFRP,u}$ – reikia toliau skaičiavimus tęsti pagal 5 punktą.	1.53
5.	Apskaičiuojama kompozitinės sijos lenkiamoji galia. Apskaičiavus visus dydžius, reikia patikrinti, ar armatūros santykinės deformacijos viršija takumo deformacijas $\varepsilon_s \geq \varepsilon_{sy}$. Jeigu $\varepsilon_s < \varepsilon_{sy}$ – tada įvyks trapus sijos suirimas.	1.45 1.52
6.	Traktuojama, kad kompozitinė sija suirs dėl anglies plaušo trūkimo. Anglies plaušo santykinės deformacijos fiksuojamos lygios ribinei deformacijai $\varepsilon_{CFRP} = \varepsilon_{CFRP,u}$. Betono maksimalios skerspjuvio santykinės deformacijos yra mažesnės už ribinę deformaciją $\varepsilon_c < \varepsilon_{cu}$.	-
7.	Iš jėgų pusiausvyros lygties apskaičiuojamas gniuždomos zonos aukštis x . Čia anglies plaušo stipris fiksuojamas $f_{CFRP} = E_{CFRP} \varepsilon_{CFRP,u}$. Pagal anglies plaušo deformacijas išreiškiamos skerspjuvio santykinės betono deformacijos.	1.46
8.	Pagal gautus dydžius patikrinama, ar skerspjuvio betono santykinės deformacijos neviršija ribinės deformacijos $\varepsilon_c < \varepsilon_{cu}$.	1.54
9.	Apskaičiuojama kompozitinės sijos lenkiamoji galia.	1.45

Tarptautinės betoninių konstrukcijų federacijos (International Federation for Structural Concrete – fib) normos.

Tarptautinės betoninių konstrukcijų federacijos normos (*fib*, 2001) buvo išleistos kaip alternatyva minėtoms skaičiavimo normoms (Amerikos ir Kanados). Šių normų projektavimo principai, algoritmas ir tikrinimo sąlygos pateiktos žemiau. Reikia pabrėžti, kad nagrinėjamas tik normalinio pjūvio skaičiavimas, t. y. kad stiprinama sija atlaikytų lenkimo momentą. Įstrižojo pjūvio skaičiavimo principas nepateiktas. Stiprumo skaičiavimo atvejai:

1. Kompozitinės sijos stiprumas pagrįstas sąlyga, kad gniuždomo betono suirimo metu tempiamoje armatūroje pasiekiamas takumas, o anglies plaušas nepasiekia stiprio tempiant.

Šiuo suirimo atveju anglies plaušo įtempiai nepasiekia ribinių reikšmių. Laikomoji galia skaičiuojama pagal tuos pačius principus, kaip gelžbetoninės sijos. Pirmiausia skaičiuojamas gniuždomos zonos aukštis iš vidinių jėgų pusiausvyros lygties (1.55), vėliau, žinant gniuždomos zonos aukštį, apskaičiuojama lenkiamoji galia (1.58). Skaičiavimo metodikoje yra sutarta, kad gelžbetoninės sijos apkrova stiprinimo metu nėra pilnai pašalinta, todėl anglies plaušas turi pradines deformacijas (1.12 pav.).



1.12 pav. Lenkiamos kompozitinės sijos normalinio pjūvio vidinių deformacijų ir jėgų pasiskirstymas

Vidinių jėgų pusiausvyros lygtis, pagal kurią suskaičiuojamas gniuždomos zonos aukštis:

$$\begin{aligned} 0,85 \cdot \Psi \cdot f_{ck} \cdot b \cdot x + A_{s2} \cdot E_s \cdot \varepsilon_{s2} &= \\ &= A_{s1} \cdot f_y + A_{CFRP} \cdot E_{CFRP} \cdot \varepsilon_{CFRP}; \end{aligned} \quad (1.55)$$

čia: Ψ – daugiklis, padedantis įvertinti betono stiprio intensyvumą gniuždomoje zonoje ($\Psi = 0,8$); f_{ck} – betono cilindrinis gniuždomasis stipris; b – skerspjūvio plotis; x – gniuždomos zonos aukštis; A_{s2} – gniuždomos armatūros skerspjūvio plotas; E_s – armatūros tamprumo modulis; ε_{s2} – gniuždomos armatūros santykinės deformacijos (1.56); A_{s1} – tempiamos armatūros skerspjūvio plotas; f_y – plieninės armatūros takumo riba; A_{CFRP} – anglies plaušo skerspjūvio plotas; E_{CFRP} – anglies plaušo tamprumo modulis; ε_{CFRP} – anglies plaušos santykinės deformacijos (1.57)

Gniuždomos armatūros santykinės deformacijos, kai $E_s \varepsilon_{s2} \leq f_y$:

$$\varepsilon_{s2} = \varepsilon_{cu} \cdot \frac{x - d_2}{x}; \quad (1.56)$$

čia: ε_{cu} – ribinė gniuždomo betono santykinė deformacija ($\varepsilon_{cu} = 0,0035$); d_2 – gniuždomos armatūros atstumas nuo labiausiai gniuždomo skerspjūvio krašto iki armatūros centro

Anglies plaušo santykinės deformacijos:

$$\varepsilon_{CFRP} = \varepsilon_{cu} \cdot \frac{h - x}{x} - \varepsilon_0; \quad (1.57)$$

čia: ε_0 – esamos tempiamo betono maksimalios santykinės deformacijos, kai yra kljuojamas anglies plaušas

Sijos laikomoji galia:

$$\begin{aligned} M_{Rd} &= A_{s1} \cdot f_y \cdot (d - \delta_G \cdot x) + \\ &+ A_{CFRP} \cdot E_{CFRP} \cdot \varepsilon_{CFRP} \cdot (h - \delta_G \cdot x) + \\ &+ A_{s2} \cdot E_s \cdot \varepsilon_{s2} \cdot (\delta_G \cdot x - d_2); \end{aligned} \quad (1.58)$$

čia: d – atstumas nuo gniuždomos zonos krašto iki armatūros centro; δ_G – daugiklis, įvertinantis ekvivalentinės stačiakampės formos gniuždomo betono įtempių pasiskirstymą iki neutralios ašies ($\delta_G = 0,4$)

2. Kompozitinės sijos stiprumas pagrįstas sąlyga, kad tempiamo anglies plaušo suirimo metu tempiamoje armatūroje pasiekiamas takumas.

Gelžbetoninės sijos, stiprintos anglies plaušu, suirimas, kai dėl armatūros tekėjimo plaušas suyra, yra teoriškai įmanomas, tačiau labiau tikėtina, kad, prieš suyrant anglies plaušui, bus prarastas sukibimas tarp anglies plaušo ir betono. Šiuo atveju skaičiavimo eiga yra tokia pati, kaip skaičiavimo, kai suyra gniuždomos zonos betonas, pasiekus takumo įtempius tempiamoje armatūroje. Pirmiausia yra nustatomas gniuždomos zonos aukštis (1.55), tada apskaičiuojama sijos lenkiamoji galia (1.58). Čia kinta daugiklis Ψ , padedantis įvertinti betono stiprio intensyvumą gniuždomoje zonoje (1.59), ir daugiklis δ_G , įvertinantis ekvivalentinės stačiakampės formos gniuždomo betono įtempių pasiskirstymą iki neutralios ašies (1.60). Skaičiavimuose traktuojama, kad anglies plaušo santykinės deformacijos ε_{CFRP} yra lygios ribinėms deformacijoms f_{CFRP}/E_{CFRP} (1.61), o pagal jas išreiškiamos betono ε_c (1.62) ir gniuždomos armatūros santykinės deformacijos ε_{s2} (1.63).

Daugiklis, padedantis įvertinti betono stiprio intensyvumą gniuždomoje zonoje:

$$\Psi = \begin{cases} 1000 \cdot \varepsilon_c \cdot \left(0,5 - \frac{1000}{12}\right) \varepsilon_c, & \text{kai } \varepsilon_c \leq 0,002 \\ 1 - \frac{2}{3000 \cdot \varepsilon_c}, & \text{kai } 0,002 < \varepsilon_c \leq 0,0035 \end{cases}; \quad (1.59)$$

Daugiklis, įvertinantis ekvivalentinės stačiakampės formos gniuždomo betono įtempių pasiskirstymą iki neutralios ašies:

$$\delta_G = \begin{cases} \frac{8 - 1000 \cdot \varepsilon_c}{4 \cdot (6 - 1000 \cdot \varepsilon_c)}, & \text{kai } \varepsilon_c \leq 0,002 \\ \frac{1000 \cdot \varepsilon_c \cdot (3000 \cdot \varepsilon_c - 4) + 2}{2000 \cdot \varepsilon_c \cdot (3000 \cdot \varepsilon_c - 2)}, & \text{kai } 0,002 < \varepsilon_c \leq 0,0035 \end{cases}; \quad (1.60)$$

Anglies plaušo santykinės deformacijos:

$$\varepsilon_{CFRP} = \frac{f_{CFRP}}{E_{CFRP}}; \quad (1.61)$$

Gniuždomo betono maksimalios santykinės deformacijos:

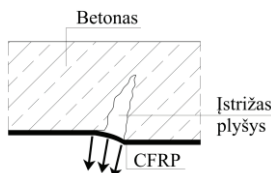
$$\varepsilon_c = (\varepsilon_{CFRP} + \varepsilon_o) \cdot \frac{x}{h - x}; \quad (1.62)$$

Gniuždomos armatūros santykinės deformacijos:

$$\varepsilon_{s2} = (\varepsilon_{CFRP} + \varepsilon_o) \cdot \frac{x - d_2}{h - x}; \quad (1.63)$$

3. Anglies plaušo kompozitinio darbo praradimas su gelžbetonine sija dėl įstrižųjų plyšių.

Kompozitinėje sijoje įstrižieji plyšiai yra pasvirę ir lokaliai sudaro nelygumus sijos paviršiuje dėl poslinkių horizontalia ir vertikalia kryptimis (1.13 pav.). Anglies plaušo sukibimo praradimo priežastis gali būti ne tik horizontalūs poslinkiai, tačiau ir vertikalūs, kurie inicijuoja normalinių įtempių atsiradimą. Dėl normalinių įtempių plaušas atsiklijuoja nuo betono, kadangi atsiranda statmena jėga betono paviršiu. Taip pat plaušas gali atplyšti per betono sluoksnį, kuris yra tarp anglies plaušo ir išilginės armatūros, dėl nepakankamo betono apsauginio sluoksnio storio. Toks suirimo pobūdis priklauso nuo tokių parametų: vietinių vertikalių poslinkių, anglies plaušo lenkiamojo ir išilginio standumo, tempiamo betono stiprio (Triantafillou, Plevris, 1992).



1.13 pav. Anglies plaušo sukibimo praradimas su betonu dėl įstrižųjų plyšių

Anglies plaušo sukibimo praradimas dėl įstrižųjų plyšių dar nėra detaliam išnagrinėtas. Labiausiai išanalizuotas šiuo klausimu Deuring (1993) sukurtas skaičiavimo modelis, tačiau jis sunkiai pritaikomas praktikoje dėl skaičiavimų sudėtingumo. Blaschko (1997) siūlo naudoti tą skersinę jėgą, kuri apskaičiuojama pagal EC2, kaip skersinė jėga gelžbetoninės sijos be skersinės armatūros, įvertinant išilginį stiprinimą. Galutinė skersinės jėgos, siekiant, kad anglies plaušas neprarastų sukibimo su betonu, išraiška, papildyta Matthys (2000) formuluote, turėtų atrodyti taip (1.64):

$$V_{Rp} = \tau_{Rp} \cdot b \cdot d; \quad (1.64)$$

čia: τ_{Rp} – tangentinių įtempių atspario reikšmė (1.65); b – skerspjūvio plotis; d – atstumas nuo gniuždomos zonos krašto iki armatūros centro

Tangentinių įtempių atspario reikšmė:

$$\tau_{Rp} = 0,15 \cdot f_{ck}^{1/3} + 0,151 \cdot \rho_{eq}; \quad (1.65)$$

čia: f_{ck} – betono cilindrinis gniuždomasis stipris; ρ_{eq} – armatūros ir anglies plaušo armavimo koeficientas (1.66)

$$\rho_{eq} = \frac{A_{s1} + A_{CFRP} \cdot \frac{E_{CFRP}}{E_s}}{b \cdot d}; \quad (1.66)$$

čia: A_{s1} – tempiamos armatūros skerspjūvio plotas; A_{CFRP} – anglies plaušo skerspjūvio plotas; E_{CFRP} – anglies plaušo tamprumo modulis; E_s – plieninės armatūros tamprumo modulis

4. Anglies plaušo sukibimo praradimas su betonu dėl normalinių plyšių ties plaušo galu.

Tarptautinė betoninių konstrukcijų federacija (*fib*, 2001) siūlo tris skaičiavimo metodikas, skirtas apskaičiuoti maksimalų galimą anglies plaušo sukibimą su betonu dėl normalinių plyšių atsiradimo. Aptartinas praktiškiausias ir lengviausiai pritaikomas metodas. Šio metodo trūkumas tas, kad neatsižvelgta į tokius parametrus: momentų-skersinių jėgų priklausomybę, armatūros deformacijas ir plyšių pasiskirstymą, o tai turi įtakos anglies plaušo deformacijoms. 1.67 lygtyje pateikta, kokią maksimalią jėgą gali atlaikyti anglies plaušas iki tol, kai prarandamas sukibimas.

$$N_{CFRP,max} = \alpha \cdot c_1 \cdot k_c \cdot k_b \cdot b \cdot \sqrt{E_{CFRP} \cdot t_{CFRP} \cdot f_{ctm}}; \quad (1.67)$$

čia: α – mažinimo koeficientas, įvertinantis įstrižuosius plyšius (dažniausiai naudojamas $\alpha = 0,9$; su pakankamu įstrižojo pjūvio armavimu $\alpha = 1,0$); c_1 – pataisos koeficientas, gautas iš eksperimentų (anglies plaušui $c_1 = 0,64$); k_c – betono sutankinimo koeficientas (paprastai $k_c = 1,0$; kai anglies plaušo sukibimo zona su betonu blogai sutankinta $k_c = 0,67$); k_b – geometrijos faktorius, susietas su plaušo b_{CFRP} ir sijos b pločiu (1.68); E_{CFRP} – anglies plaušo tamprumo modulis; t_{CFRP} – anglies plaušo juostos storis; f_{ctm} – vidutinis tempiamasis betono stipris

Geometrijos faktorius, susietas su plaušo b_{CFRP} ir sijos b pločiu:

$$k_b = 1,06 \sqrt{\frac{2 - \frac{b_{CFRP}}{b}}{1 + \frac{b_{CFRP}}{400}}} \geq 1; \quad (1.68)$$

čia: b_{CFRP} – anglies plaušo plotis

Kai anglies plaušo sukibimo ilgis su betonu mažesnis už maksimalų ilgį, kurio reikia $N_{CFRP,max}$ sukibimo jėgai perimti $l_b < l_{b,max}$, tada sukibimo jėgą reikia pakoreguoti (1.69 formulė):

$$N_{CFRP} = N_{CFRP,max} \cdot \frac{l_b}{l_{b,max}} \cdot \left(2 - \frac{l_b}{l_{b,max}}\right); \quad (1.69)$$

čia: l_b – anglies plaušo sukibo ilgis (lenkiamam elementui pusė plaušo juostos ilgio); $l_{b,max}$ – maksimalus sukibimo ilgis tarp anglies plaušo ir betono, kurį padidinus sukibimas nedidėja (1.70)

$$l_{b,max} = \sqrt{\frac{E_{CFRP} \cdot t_{CFRP}}{c_2 \cdot f_{ctm}}}; \quad (1.70)$$

čia: c_2 – pataisos koeficientas betono tempiamam stipriui, gautas iš eksperimentų (anglies plaušui $c_2 = 2$)

Apskaičiuotą jėgą N_{CFRP} reikia palyginti su fiksuota jėga. Anglies plaušo santykinę deformacijų, tamprumo modulio ir plaušo skerspjuvio ploto sandauga pagal 1 ir 2 punktus turi būti ne didesnė nei N_{CFRP} ($\epsilon_{CFRP} E_{CFRP} A_{CFRP} \leq N_{CFRP}$). Jeigu

$\varepsilon_{CFRP} E_{CFRP} A_{CFRP} > N_{CFRP}$, reikia sukibimo jėgą tarp anglies plaušo ir betono fiksuoti N_{CFRP} ir pakartoti skaičiavimus pagal skaičiavimo algoritmo 2 punktą.

5. Anglies plaušo sukibimo praradimas su betonu dėl įstrižųjų plyšių ties plaušo galu.

Anglies plaušo sukibimo su betonu dėl įstrižųjų plyšių plaušo gale atspario reikšmė gaunama skaičiuojant maksimalią laikančią skersinę jėgą, įvertinant atstumą tarp anglies plaušo galo ir atramos l_{shear} (1.14 pav.). Sąlyga, kurią turi tenkinti kompozitinė sija, pateikta 1.71 formulėje. Yra pateikiama ir kitų skaičiavimų metodų (Malek, Saadatmanesh, Ehsani, 1998; Täljsten, 1994), įvertinant šį suirimo pobūdį, tačiau jie yra daug sunkiau pritaikomi praktikoje dėl sudėtingo sprendimo.

$$V_{Ed} \leq V_{Rd} = \tau_{Rd} \cdot b \cdot d; \quad (1.71)$$

čia: V_{Ed} – skaičiuotina skersinė jėga; V_{Rd} – maksimali skersinė jėga, kurią gali atlaikyti sija plaušo gale; τ_{Rd} – maksimalūs tangentiniai įtempiai, kuriuos gali atlaikyti sija plaušo gale vertikaliame pjūvyje (1.72); b – skerspjūvio plotis; d – atstumas nuo gniuždomos zonos krašto iki armatūros centro

Maksimalūs tangentiniai įtempiai, kuriuos gali atlaikyti sija plaušo gale vertikaliame pjūvyje:

$$\tau_{Rd} = 0,15 \cdot \sqrt[3]{3 \cdot \frac{d}{a_L}} \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}}\right) \cdot \sqrt[3]{100 \cdot \rho_{s1} \cdot f_{ck}}; \quad (1.72)$$

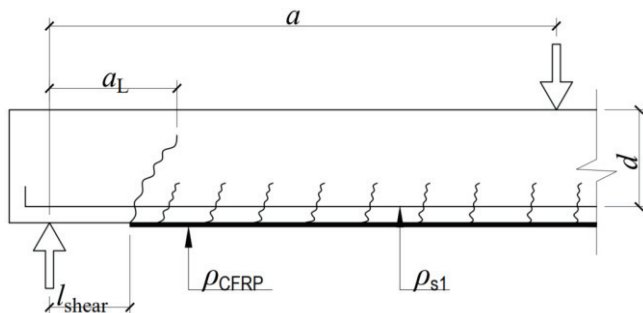
čia: a_L – tariamas šlyties tarpatramis; ρ_{s1} – tempiamos armatūros armavimo koeficientas; f_{ck} – betono cilindrinis gniuždomasis stipris

Tariamas šlyties tarpatramis:

$$a_L = \sqrt[4]{\frac{(1 - \sqrt{\rho_{s1}})^2}{\rho_{s1}} \cdot d \cdot l_{shear}^3}, \text{ bet} \quad (1.73)$$

$$a > l_{shear} + d, \quad a_L < a;$$

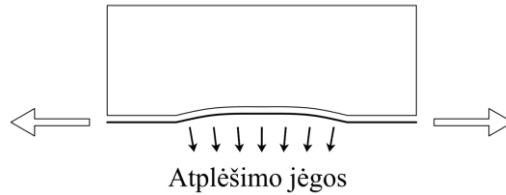
čia: l_{shear} – atstumas tarp anglies plaušo galo ir atramos; a – atstumas tarp atramos ir apkrovos pridėjimo vietos



1.14 pav. Anglies plaušo sukibimo praradimo su betonu dėl įstrižųjų plyšių plaušo gale skaičiuojamoji schema

6. Anglies plaušo sukibimo praradimas su betonu dėl betono paviršiaus nelygumų.

Anglies plaušo sukibimo praradimas su betonu dėl betono paviršiaus nelygumų yra dar vienas galimas sijos suirimo atvejis (1.15 pav.), kuris nėra pakankamai ištirtas. Šio suirimo būdo siekiama išvengti, pritaikant tam tikras betono paviršiaus paruošimo instrukcijas ir maksimaliai ribojant nelygumus. Paviršiaus paruošimas priklauso nuo tokių parametrų kaip anglies plaušo tipas ir storis. Konkrečios informacijos reikėtų ieškoti gamintojų siūlomose specifikacijose ir jomis vadovautis ruošiant betono paviršių.



1.15 pav. Anglies plaušo sukibimo praradimas su betonu dėl betono paviršiaus nelygumų

Įlinkių skaičiavimo apžvalga.

Tarptautinės betoninių konstrukcijų federacijos išleistose normose (*fib*, 2001) aprašomi ne tik gelžbetoninių konstrukcijų, sustiprintų anglies plaušu, stiprumo ribinio būvio skaičiavimo principai, tačiau ir tinkamumo ribiniai būviai. Kompozitinės sijos vidutiniai įlinkiai apskaičiuojami pagal šią 1.74 formulę:

$$f = a_1 \cdot (1 - \zeta_b) + a_2 \cdot \zeta_b; \quad (1.74)$$

čia: a_1 – įlinkiai, apskaičiuoti pagal nesupleišėjusį skerspjūvį (1.75); a_2 – įlinkiai, apskaičiuoti pagal supleišėjusį skerspjūvį (1.76); ζ_b – lenkiamojo standumo pasiskirstymo koeficientas (1.77)

Įlinkiai, apskaičiuoti pagal nesupleišėjusį skerspjūvį:

$$a_1 = k \cdot l^2 \cdot \frac{M_{Ed}}{E_c \cdot I_g}; \quad (1.75)$$

čia: k – koeficientas, įvertinantis skaičiuojamąją schemą; l – sijos tarpatramio ilgis; M_{Ed} – skaičiuojamasis lenkimo momentas; E_c – betono tamprumo modulis; I_g – nesupleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas (1.43)

Įlinkiai, apskaičiuoti pagal supleišėjusį skerspjūvį:

$$a_2 = k \cdot l^2 \cdot \left(\frac{M_o}{E_c \cdot I_o} + \frac{M_{Ed} - M_o}{E_c \cdot I_{cr}} \right), \text{ kai } M_{Ed} > M_o; \quad (1.76)$$

čia: M_o – sijos lenkimo momentas prieš stiprinimą; I_o – inercijos momentas prieš sijos stiprinimą; I_{cr} – supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas (1.44)

Tempiamojo standumo pasiskirstymo koeficientas:

$$\zeta_b = \begin{cases} 0 & , \text{kai } M_{Ed} < M_{cr} \\ 1 - \beta_1 \cdot \beta \cdot \left(\frac{M_{cr}}{M_{Ed}}\right)^{n/2} & , \text{kai } M_{Ed} \geq M_{cr} \end{cases}; \quad (1.77)$$

čia: β_1 – armatūros sukibties koeficientas ($\beta_1 = 0,5$ – lygiai armatūrai; $\beta_1 = 1,0$ – rumbuotai armatūrai); β – koeficientas, kurį taikant atsižvelgiama į apkrovimo trukmės arba kartotinės apkrovos įtaką vidutinei deformacijai ($\beta = 1,0$, kai veikia vieną kartą trumpalaikė apkrova; $\beta = 0,5$, jei apkrovos ilgalaikės arba veikia daug kartotinės apkrovos ciklą); M_{cr} – pleišėjimo momentas (1.41); n – laipsnio rodiklis ($n = 2$, kai betonas $\leq C50/60$; $n = 3$, kai betonas $> C50/60$)

1.5. Pirmojo skyriaus išvados

1. Išanalizavus literatūrą, nustatyta, kad iki šiol atliktuose tyrimuose daug dėmesio skirta anglies plaušo inkaravimo užtikrinimui. Dažna skerspjūvio suirimo forma yra anglies plaušo sukibimo praradimas su betono paviršiumi, tačiau nėra sukurtos išsamios skaičiavimo metodikos, kuri leistų įvertinti pradinių normalinių plyšių, atsivėrusių prieš stiprinimą, įtaką sukibimo jėgai ir kompozitinių sijų standumui.
2. Anglies plaušo stipris kinta nuo 2 845 iki 4 950 MPa ruloniniam anglies plaušui ir nuo 1 875 iki 2 742 MPa anglies plaušo juostoms (strypams). Šis stipris yra apie 3,5–10 kartų didesnis už dažniausiai naudojamos armatūros B500B takumo ribą ir 5–14 kartų didesnis už dažniausiai naudojamo plieno S355 takumo ribą, kuris naudojamas stiprinti statybines konstrukcijas. Kadangi anglies plaušo stiprumas yra didesnis už plieno stiprumą, todėl galima naudoti mažesnę plaušo kiekį (skerspjūvio plotą), norint pasiekti tokį patį stiprumą. Mažesnis anglies plaušo kiekis nulemia ir mažesnę kompozito skerspjūvio plotą. Palyginus klijų tempiamąjį stiprį, kuris yra 20–60 MPa, su betono tempiamuoju stipriu 1,2–5 MPa, konstatuotina, kad jis yra apie 10 kartų didesnis priklausomai nuo to, kokios klasės betonai ir klijai naudojami. Klijų tamprumo modulis yra žymiai mažesnis nei betono, dar daugiau kartų mažesnis nei anglies plaušo ir kinta nuo 1,5 iki 8,8 GPa, kai betono tamprumo modulis kinta nuo 24 iki 44 GPa.
3. Atlikus gelžbetoninių konstrukcijų, sustiprintų anglies plaušu, kontakto zonos tarp anglies plaušo ir betono per elemento ilgį, literatūros analizę, išsiaiškinta, kad sukibimo praradimo metu įvyksta maksimalių šlyties įtempių zonos persistūmimas. Tai reiškia, kad tik dalis sukibimo ploto yra efektyvi. Kai prarandamas sukibimas tarp betono ir anglies plaušo, tuo metu įtempiai labiausiai padidėja šalia esančioje zonoje. Tai reiškia, kad inkaravimo jėga negali didėti, didinant inkaravimo ilgį, ir niekada nebus pasiekta anglies plaušo stiprumo riba, nesvarbu, kiek bus didinamas inkaravimo ilgis. Aprašyta nemažai analitinių modelių, kuriais galima apskaičiuoti maksimalią sukibimo jėgą. Dauguma išvestų formulų tinka tik konkrečioms atvejams pagal tam tikrus sijų matmenis, anglies plaušo ilgį ir storį. Esminiai skirtumai tarp šių modelių: vertinamas arba nevertinamas anglies plaušo storis bei vertinamas efektyvusis arba sukibimo ilgis tarp anglies plaušo ir betono.
4. Atlikus gelžbetoninių konstrukcijų, sustiprintų anglies plaušu, stiprumą ir standumą įvertinančių metodų apžvalgą, pastebėta, kad pagal Amerikos, Kanados ir *fib* siūlomas stiprumo metodikas skaičiavimas yra panašus, kai skaičiuojama, kad silpniausia konstrukcijos vieta – gniuždomasis betonai. Tačiau aprašant ekvivalentinės stačiakampio formos gniuždomo betono įtempių pasiskirstymą iki neutraliosios ašies, betono stiprio intensyvumą gniuždomoje zonoje ir praslydimą tarp anglies plaušo bei betono, naudojami tam tikri skirtingi mažinimo koeficientai. Reikia atkreipti dėmesį, kad yra daugiau galimų suirimo atvejų, kurie gali įvykti betonui nepasiekus ribinių deformacijų, pvz., anglies plaušo ir betono sukibimo praradimas. Kanados normose tai nevertinama ir traktuojama, kad anglies plaušo inkaravimo ilgis yra pakankamas, o sukibimas tarp anglies plaušo ir betono yra idealus. Amerikos normose ribojamos anglies plaušo deformacijos, taip apribojant per didelę šlyties jėgą tarp anglies plaušo ir betono.

2. EKSPERIMENTINIAI ANGLIES PLAUŠU SUSTIPRINTŲ GELŽBETONINIŲ SIJŲ TYRIMAI

Dalis šiame skyriuje pateiktos medžiagos buvo publikuota mokslo žurnale (Lisauskas ir kt., 2020).

2.1. Medžiagų savybės ir jų statistinis įvertinimas

Eksperimentiniai tyrimai buvo atliekami išbandant devynias gelžbetonines sijas, kurios išbetonuotos trimis atskirais betonavimais. Siekiant nustatyti betono stiprumą, buvo atliekami betono $\sim 100 \times 100 \times 100$ kubelių gniuždymo bandymai. 2.1 pav. a) pateiktas betono kubelio vaizdas bandymo metu. Kubeliai buvo išbandomi pagal LST EN 12390-3:2009 (LST EN 12390-3:2009. Sukietėjusio betono bandymai. 3 dalis. Bandinių gniuždomasis stipris, 2009). Betono kubelių bandymo rezultatai pateikti 2.1 lentelėje. Siekiant išvengti didesnių traukumo deformacijų, kurios gali paveikti stiprumo ir standumo rezultatus, bandiniai kietėjimo metu buvo laistomi, o po laistymo uždengti polietilenu plėvele. Kiekvieno betonavimo metu buvo suformuoti 4 vnt. kubelių, likusi dalis gauta supjausčius prizmes į atskiras dalis, kurios buvo naudojamos nustatant tamprumo modulį. Iš viso pirmojo betonavimo metu buvo gauta 12 vnt., antrojo – 20 vnt., trečiojo – 18 vnt. kubelių.

2.1 lentelė. Kubelių gniuždomojo stiprio bandymo rezultatai

Bandinio žymuo	Betono kubelio vidutinis gniuždomasis stipris $f_{cm,cubes}$, MPa		
	1 serija	2 serija	3 serija
A	57,0	62,7	53,5
B	60,3	59,5	52,4
C	58,2	64,0	52,5
D	57,9	63,6	55,1
E	58,7	59,3	53,6
F	55,5	62,3	52,4
G	58,8	63,3	51,0
H	55,6	66,7	53,9
I	55,7	56,3	51,9
J	54,6	58,2	53,0
K	57,0	60,0	51,0
L	54,9	55,9	55,8
M	–	56,8	50,2
N	–	65,3	55,1
O	–	61,0	51,7
P	–	62,6	52,0
R	–	57,1	54,6
S	–	64,6	53,7
T	–	64,8	–
U	–	64,7	–
Vidutinis stipris	57,0	61,4	53,0

Norint nustatyti betono kubelių vidutinį gniuždomąjį stiprį, atlikti statistiniai skaičiavimai. Skaičiuojamas kubelių charakteristinis gniuždomasis stipris teigiant,

kad kubelių gniuždomasis stipris su 95 % patikimumu bus apskaičiuotame intervale. Charakteristinio stiprio pasikliautinis intervalas išreiškiamas 2.78 formule (Kelpša, 2017):

$$X_k = m_x \pm k_n s_x; \quad (2.78)$$

čia: m_x – n imčių rezultatų vidurkis; k_n – charakteristinis fraktilio koeficientas; s_x – įvertintoji standartinio nuokrypio reikšmė

Imties rezultatų vidurkis skaičiuojamas pagal 2.79 formulę:

$$m_x = \frac{\sum x_i}{n}; \quad (2.79)$$

čia: x_i – medžiagos savybė (tiriamuoju atveju kubelio gniuždomasis stipris arba prizmės tamprumo modulis); n – bandinių skaičius

Charakteristinis fraktilio koeficientas gaunamas pagal 2.80 formulę:

$$k_n = t_{vd} \sqrt{1 + \frac{1}{n}}; \quad (2.80)$$

čia: t_{vd} – Stjudento koeficientas

Įvertintoji standartinio nuokrypio reikšmė (2.81):

$$s_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (x_i - m_x)^2} \quad (2.81)$$

Betono tamprumo modulis buvo nustatytas atliekant bandymus pagal LST EN 12390-13:2013 (LST EN 12390-13:2013. Sukietėjusio betono bandymai. 13 dalis. Kirstinio tamprumo modulio nustatymas gniuždant, 2013). 1 serijoje buvo 3 vnt. bandinių, 2 serijoje – 4 vnt., 3 serijoje – 4 vnt. Bandymams buvo naudojamos prizmės, kurių matmenys ~300×100×100 mm. 2.2 lentelėje pateikti tamprumo modulio rezultatai. 2.3 lentelėje pateikti betoninių kubelių vidutiniai stipriai, vidutinis tamprumo modulis, pasikliautinis intervalas ir Stjudento koeficientai – kiekvienam betonavimui atskirai.

2.2 lentelė. Prizmių tamprumo modulio rezultatai

Bandinio žymuo	Betoninių prizmių tamprumo modulio rezultatai E_c , GPa		
	1 serija	2 serija	3 serija
A	41,6	46,1	38,4
B	39,3	43,7	36,8
C	40,4	45,7	36,8
D	–	44,7	38,3

2.3 lentelė. Betono parametrai ir pasikliautinis intervalas su 95 % patikimumu

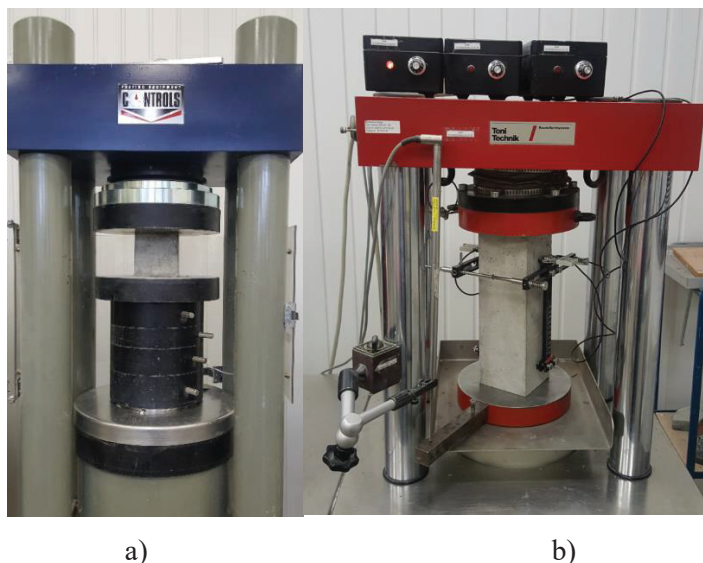
Pavadinimas	1 serija	2 serija	3 serija
Vidutinis gniuždomasis stipris $f_{cm,cube}$, MPa	57,0	61,4	53,0
Pasikliautinis intervalas X_{k95} , MPa	(53,7; 60,3)	(55,6; 67,3)	(50,2; 55,8)
Stjudento koeficientas, t_{vd}	1,782	1,725	1,746

Pavadinimas	1 serija	2 serija	3 serija
Vidutinis tamprumo modulis E_{cm} , GPa	40,5	45,0	37,6
Pasikliautinis intervalas X_{k95} , GPa	(37,3; 43,6)	(42,5; 47,6)	(35,4; 39,8)
Stjudento koeficientas, t_{vd}	2,353	2,132	2,132

Gelžbetoninės sijos buvo armuojamos B500B klasės armatūra. Išilginei sijos armatūrai pasirinkti strypai, kurių skersmuo $\varnothing 12$ mm, skersinei – $\varnothing 6$ mm. Charakteristinis stipris pagal takumo ribą – $f_{yk} = 500$ MPa, charakteristinis stipris pagal stiprumo ribą – $f_{uk} = 540$ MPa (LST EN 1992-1-1. Eurokodas 2. Gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas. 1-1 dalis, 2007). Bandymo metu nustatytas tikrasis armatūros stipris pagal takumo ribą – $f_y = 600$ MPa, stipris pagal stiprumo ribą – $f_u = 708$ MPa. Armatūros tamprumo modulis $E_s = 200$ GPa (LST EN 1992-1-1. Eurokodas 2. Gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas. 1-1 dalis, 2007).

Gelžbetoninė sija stiprinama anglies plaušu, kurio sukibimą su betonu užtikrina epoksidinė derva. Naudojamos gamintojo „DRIZORO“ rekomenduojamos medžiagos. Medžiagų savybės naudojamos pagal gamintojo (DRIZORO) deklaruojamas reikšmes. Anglies plaušo „DRIZORO® WRAP 300“ stiprumo riba – $f_{CFRP} = 3400$ MPa, ribinė santykinė deformacija – $\epsilon_{CFRP,u} = 0,015$, tamprumo modulis – $E_{CFRP} = 230$ GPa, plaušo audeklo storis – $t_{CFRP} = 0,167$ mm. Epoksidinių klijų „MAXEPOX®-CS (S)“ stiprumo riba – $f_{EpoX} = 29$ MPa, tamprumo modulis – $E_{EpoX} = 1,5$ GPa, klijų storis – $t_{EpoX} = 0,727$ mm.

Betoninių kubelių gniuždomojo stiprio ir betoninės prizmės tamprumo modulio nustatymo bandymas pateiktas 2.1 pav. Tiek betono stipriui nustatyti, tiek ir kirstinio tamprumo moduliui gniuždant nustatyti buvo naudojamas universalus presas. Tamprumo moduliui nustatyti buvo naudojamas rėmelis su elektroniniais davikliais, kuriais buvo matuojamos gniuždomos prizmės deformacijos.



2.1 pav. Betono savybių nustatymo vaizdai: a) betono gniuždomojo stiprio bandymas; b) betono kirstinio tamprumo modulio bandymas

2.2. Eksperimentinė programa

Siekiant patikrinti teorinius skaičiavimus, buvo atliekami eksperimentiniai tyrimai. Buvo suformuotos devynios gelžbetoninės sijos, kurios vėliau buvo stiprintos anglies plaušu. Sijos buvo formuojamos etapais po tris sijas kiekvieno betonavimo metu. Sijoms naudotas gamyklinis betonas ir suvirintas B500B klasės armatūros karkasas. Betono ir armatūros savybės aptartos disertacijos 2.1 poskyryje. Išilginė gelžbetoninės sijos rumbuota armatūra buvo $\varnothing 12$ mm skersmens (du strypai viršuje ir du strypai apačioje) ir 1,25 m ilgio. Sijos armavimo procentas $\rho_s = 1,43$ %. Skersinė rumbuota armatūra buvo $\varnothing 6$ mm skersmens, žingsnis – 70 mm. Sijos viduryje skersinės armatūros žingsnis padvigubintas, nes skersinė jėga sijos viduryje lygi nuliui (atliekamas keturių taškų lenkimo bandymas). 2.2 pav. pavaizduotas gelžbetoninės sijos klojinys ir armatūros karkasas. Norint užtikrinti 25 mm apsauginį betono sluoksnį, buvo panaudotos keturios plastikinės kaladėlės.



2.2 pav. Gelžbetoninių sijų klojinys ir armatūros karkasas

Suformuota gelžbetoninė sija buvo tankinama giluminiu vibratoriumi. Pasibaigus cemento rišimuisi, norit išgauti didesnę betono stiprį, sijos buvo laistomos vandeniu, vėliau uždengtos polietileno plėvele, kad vanduo neišgaruotų.

Siekiant gauti pradinius plyšius prieš pradėdant stiprinti, sukietėjusios sijos buvo apkraunamos pradine apkrova. Pasiėkus tam tikrą pradinio plyšio plotį ir apkrovimo lygį, sija buvo nukraunama. 2.4 lentelėje pateikiami sijų bandiniai, kur apibūdinamas sijų pradinio plyšio plotis ir anglies plaušo kiekis. Buvo trijų rūšių sijos pažaidos lygiai. A tipo sijos buvo be pradinių plyšių (nebuvo pradinės apkrovos), B tipo sijos pasiekė 0,4 mm plyšį (apkrova šio plyšio momentu buvo 60 kN), C tipo buvo apkraunamos tol, kol armatūra pasiekė takumo ribą (apkrova siekė apie 95 kN).

2.4 lentelė. Sijų anglies plaušo kiekis ir pradinis plyšio plotis

Sija	Anglies plaušo sluoksnių skaičius, vnt.	Anglies plaušo ilgis l , m	Pradinio plyšio plotis w_p , mm
A1	1	0,7	Nebuvo pradinių plyšių
B1	1	0,7	0,4 mm
C1	1	0,7	Armatūra pasiekė takumo ribą (0,9 mm)
A2	3	1,0	Nebuvo pradinių plyšių

Sija	Anglies plaušo sluoksnių skaičius, vnt.	Anglies plaušo ilgis l , m	Pradinio plyšio plotis w_p , mm
B2	3	1,0	0,4 mm
C2	3	1,0	Armatūra pasiekė takumo ribą (1,0 mm)
A3	1	1,0	Nebuvo pradinių plyšių
B3	1	1,0	0,4 mm
C3	1	1,0	Armatūra pasiekė takumo ribą (1,1 mm)

2.3 pav. pavaizduota gelžbetoninė sija bandymo metu, kai atveriami pradiniai plyšiai. Bandymo metu buvo matuojama apkrovimo jėga, įlinkiai linijiniais poslinkių matuokliais ir plyšiai su plyšių liniuote, kuri pavaizduota 2.4 pav.



2.3 pav. Gelžbetoninės sijos vaizdas bandymo metu, kai atveriami pradiniai plyšiai

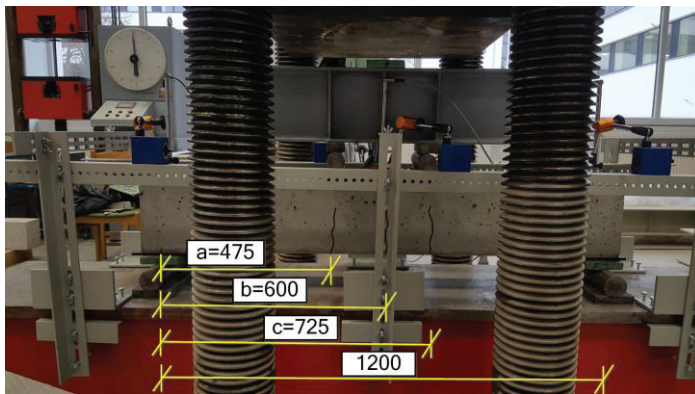


2.4 pav. Gelžbetoninės sijos normaliniai plyšiai tempiamoje zonoje

Apkrovimo metu gelžbetoninėse sijos atsivėrė trys pagrindiniai normaliniai plyšiai. Vienas – sijos viduryje, kiti du – apkrovos pridėjimo pūvyje. Nukrovus sijas, plyšių plotis sijos sumažėjo. Po nukrovimo plyšių pločiai buvo matuojami optiniu žiūronu. Plyšių plotis pateiktas 2.5 lentelėje, o plyšių išsidėstymas – 2.5 pav.

2.5 lentelė. Tempiamos zonos normalinių plyšių plotis gelžbetoninėse sijose po nukrovimo

Sija	Pradinio plyšio plotis po apkrovos pridėjimo vieta (a) w_p , mm	Pradinio plyšio plotis viduryje (b) w_p , mm	Pradinio plyšio plotis po apkrovos pridėjimo vieta kitoje pusėje (c) w_p , mm
B1	0,025	0,05	0,025
C1	0,1	0,8	0,1
B2	0,05	0,05	0,05
C2	0,3	0,9	0,7
B3	0,05	0,1	0,05
C3	0,2	1,0	0,4

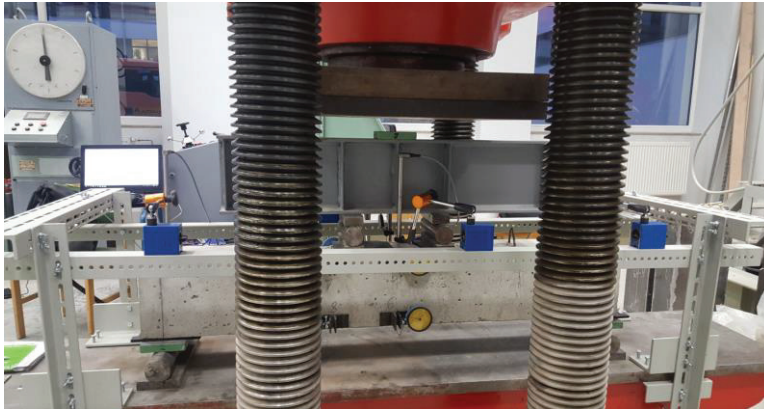


2.5 pav. Pradinių plyšių išdėstymas

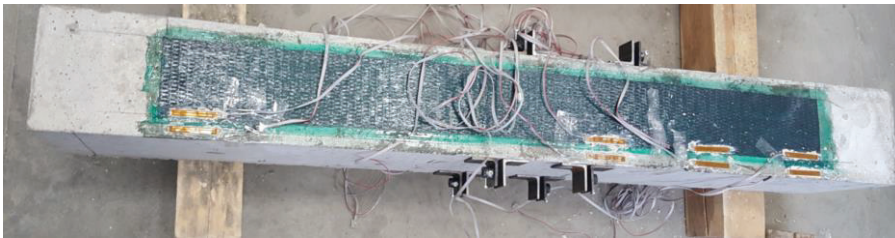
Neapkrautas ir nukrautas nuo pradinės apkrovos sijos buvo stiprinamos anglies plaušu. Visos devynios sijos buvo stiprintos vienu metu, naudojant tą patį dviejų komponentų mišinį, o visų gelžbetoninių sijų stiprinimo darbai bei klijų mišinio sudarymas vyko pagal gamintojo pateiktas rekomendacijas (DRIZORO). Gelžbetoninės sijos paviršius prieš sustiprinimą paruošiamas jį nuvalant nuo dulkių ir kitų nešvarumų. Įsitikinama, ar paviršius neturi nelygumų, kurie galėtų paveikti anglies plaušo sukibimą su betonu. Nuvalius paviršių, teptuku tepamas gruntas „MAXPRIMER[®]-C (S)“. Šio grunto rekomenduojama naudojimo temperatūra 15–35 °C. Sijos teptos gruntu esant 16–18 °C temperatūrai. Pagrindinės grunto medžiagos kiekio santykis su kietikliu yra atitinkamai 4:1. Vieno kvadratinio metro sijos paviršiui padengti reikia 0,25 kg grunto. Gelžbetoninių sijų stiprinimui buvo sunaudota 0,375 kg „MAXPRIMER[®]-C (S)“ mišinio, įvertinus tai, kad turi būti padengiamas didesnis betono paviršiaus plotas už stiprinamosios medžiagos. Sumaišius komponentus 16–18 °C temperatūroje, šis mišinys pradeda rišti po 160–170 min. Per šį laiką buvo nugruntuotos gelžbetoninės sijos. Klijuoti anglies plaušą ant grunto anksčiausiai galima po 16 valandų. Anglies plaušas buvo klijuojamas po trijų parų, kai buvo užteptas gruntas. Naudoti klijai „MAXEPOX[®]-CS (S)“, kurių panaudojimo terminas – apie 160–170 min po komponentų sumaišymo, per kurį buvo užklijuotas anglies plaušas. Pagrindinės klijų grunto medžiagos kiekio santykis su

kietikliu yra atitinkamai 4:1. Vieno kvadratinio metro sijos paviršiui padengti reikia 0,8 kg (0,5 kg po anglies plaušu ir 0,3 kg virš anglies plaušo) klijų mišinio. Sijoms stiprinti sunaudota 1,13 kg klijų mišinio. Anglies plaušas klijuotas ant betono esant 16–18°C temperatūrai. Klijuojant daugiau nei vieną sluoksnį anglies plaušo, laiko tarpas tarp sluoksnių klijavimo negali būti trumpesnis nei 20–30 minučių. Anglies plaušas klijuotas spaudžiant ant užteptų klijų, švelniai ranka išstumiant orą nuo vieno anglies plaušo galo iki kito. Sustiprintos gelžbetoninės sijos išbandytos ne anksčiau, kaip po 14 parų nuo sustiprinimo. 1 serijos sijos stiprintos vienu sluoksniu 0,7 m ilgio anglies plaušu, 2 serijos sijos – trimis anglies plaušo sluoksniais, kurių ilgis 1,0 m, 3 serijos sijos – vienu sluoksniu anglies plaušu, kurio ilgis 1,0 m. Visos naudojamos anglies plaušo juostos buvo 0,1 m pločio. Anot gamintojo (DRIZORO), ši stiprinimo sistema anglies plaušu yra 20 % lengvesnė, palyginti su stiprinama plieno juosta. Anglies plaušo tempiamasis stipris yra dešimt kartų didesnis už plieno ir tris kartus didesnis nei stiklo plaušo. Šiai stiprinimo sistemai būdingas ne tik aukštas atsparumas nuovargiui, bet ir ilgalaikis atsparumas ultravioletiniams spinduliams, beveik visiems chemikalams, jūrinei aplinkai, drėgmei ir šalčio ciklams.

Gelžbetoninės sijos, stiprintos anglies plaušu, vaizdas bandymo metu pateiktas 2.6 pav. Eksperimento metu buvo matuojami tokie parametrai: sijų įlinkiai, apkrovimo jėga, plyšių plotis, betono ir anglies plaušo deformacijos. Įlinkiai buvo matuojami linijiniais poslinkių matuokliais sijos tarpatramio viduryje prie sijos kraštų ir virš sijos atramų. Sijos įlinkis nustatytas, iš vidurinio sijos taško poslinkio eliminavus atraminių taškų poslinkių vidurkį. Apkrovimo jėgos dydis gautas pagal universalaus preso kompiuterio parodymus. Plyšių plotis ir betono deformacijos matuotos mechaniniais laikrodiniais matuokliais. Kiekvienoje sijoje naudoti aštuoni laikrodiniai matuokliai – keturi tempiamo betono zonoje ir keturi gniuždomo betono zonoje. Dalis jų buvo išdėstyta normalinių plyšių vietoje (supleišėjusi zona), o dalis – tarp normalinių plyšių (nesupleišėjusi zona). Betono ir anglies plaušo deformacijos sijos apačioje matuotos elektroniniais jutikliais, kurie pavaizduoti 2.7 pav. Naudoti šeši elektroniniai jutikliai 1 serijai sijų ir aštuoni jutikliai – 2 bei 3 serijoms. Mažesnis jutiklių kiekis naudotas 1 serijai dėl trumpesnio anglies plaušo ilgio. Jutiklių išdėstymo vieta buvo ties anglies plaušo galu, apkrovos pridėjimo pjūvyje ir tarpe tarp anglies plaušo galo bei apkrovos pridėjimo pjūvio. Elektroninių jutiklių bazės ilgis – 6 cm. Norint gauti tikslesnius ir patikimesnius parodymus, elektroniniai jutikliai buvo klijuojami ir kitoje anglies plaušo galo pusėje, nes eksperimento metu nebuvo aišku, kuris anglies plaušo galas praras sukibimą. Elektroninių jutiklių klijavimo tikslas buvo gauti matavimo rezultatus, kurie leistų nustatyti santykinų deformacijų skirtumą tarp betono ir anglies plaušo, t. y. netiesiogiai išmatuoti tangentinis įtempis ir praslydimą.



2.6 pav. Gelžbetoninės sijos, stiprintos anglies plaušu, vaizdas bandymo metu



2.7 pav. Gelžbetoninės sijos, stiprintos anglies plaušu, elektroninių jutiklių išdėstymo vaizdas

Gelžbetoninės sijos, stiprintos anglies plaušu, suirimas buvo fiksuojamas tada, kai atsiklijuodavo anglies plaušas. Buvo užfiksuoti du anglies plaušo atplyšimo atvejai, kurie pavaizduoti 2.8 pav. 3 serijos sijų anglies plaušas atplyšo išplėsdamas betoną, o 1 ir 2 serijos sijų anglies plaušas atsiklijuodavo praktiškai nepasižeidus betonui. Iš atplyšimo rezultatų galima teigti, kad 3 serijos kontakto zonos tarp anglies plaušo ir betono silpniausia vieta buvo betono stipris (pasireiškė kohezija), 1 ir 2 serijos – sukibimas tarp anglies plaušo ir betono (pasireiškė adhezija).

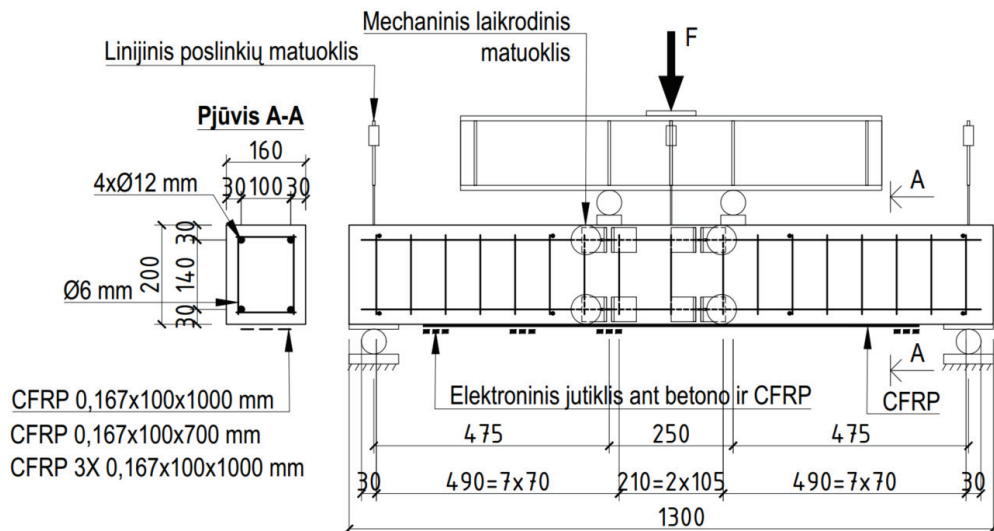


a)

b)

2.8 pav. Betono vaizdas ties anglies plaušo galu po atplyšimo: a) 3 serijos sijos vaizdas; b) 1 ir 2 serijų sijos vaizdas

2.9 pav. pateikta kompozitinės sijos keturių taškų lenkimo eksperimento schema. Bandoma sija, kurios tarpatramis 1,2 m. Sijos aukštis – 200 mm, plotis – 160 mm. Grynojo lenkimo zonos ilgis – 250 mm. Atramose ir apkrovos pridėjimo vietoje naudojami cilindrai, kad neatsirastų papildomų nenumatytų įrašų sijos skerspjūvyje.



2.9 pav. Eksperimento schema ir kompozitinės sijos parametrai

2.3. Lenkiamų gelžbetoninių sijų, sustiprintų anglies plaušu, pleišėtumo, standumo ir stiprumo eksperimentiniai tyrimai

Eksperimento metu lenkiamų gelžbetoninių sijų, sustiprintų anglies plaušu, apkrovimo jėga ir įlinkiai buvo fiksuojami universaliojo preso kompiuterine programa ir linijiniais poslinkių matuokliais. Suirimo jėga ir sijos tarpatramio įlinkiai, esant 100 kN apkrovimo jėgai, pateikti 2.6 lentelėje. Suirimo jėga fiksuojama tada, kai anglies plaušas atsiklijuoja nuo gelžbetoninės sijos. Įlinkis f fiksuojamas neįvertinant pradinio liekamąjo įlinkio, o įlinkis f_s apskaičiuotas įvertinant pradinį liekamąjį įlinkį. Pradinis įlinkis gautas apkrovus, o vėliau nukrovus gelžbetoninę siją. Likęs įlinkis (plastinės sijos deformacijos) ir yra liekamasis įlinkis. Liekamieji įlinkiai pateikti 2.7 lentelėje.

2.6 lentelė. Kompozitinės sijos suirimo jėga ir tarpatramio įlinkis esant 100 kN apkrovai

Sija	Suirimo jėga F , kN	Įlinkis f , mm	Įlinkis įvertinant pradinį liekamąjį įlinkį f_s , mm
A1	110,2	3,65	3,65
B1	116,2	3,11	4,14
C1	117,6	3,39	4,91
A2	103,7	2,98	2,98
B2	127,3	2,48	2,88
C2	138,2	2,88	5,88

Sija	Suirimo jėga F , kN	Įlinkis f , mm	Įlinkis įvertinant pradinį liekamąjį įlinkį f_{Σ} , mm
A3	120,9	4,12	4,12
B3	124,1	3,23	3,65
C3	133,0	3,43	6,55

2.7 lentelė. Liekamieji įlinkiai nukrovus gelžbetoninę siją

Sija	Pradiniai liekamieji įlinkiai f_p , mm
A1	0
B1	1,03
C1	1,52
A2	0
B2	0,40
C2	3,00
A3	0
B3	0,43
C3	3,12

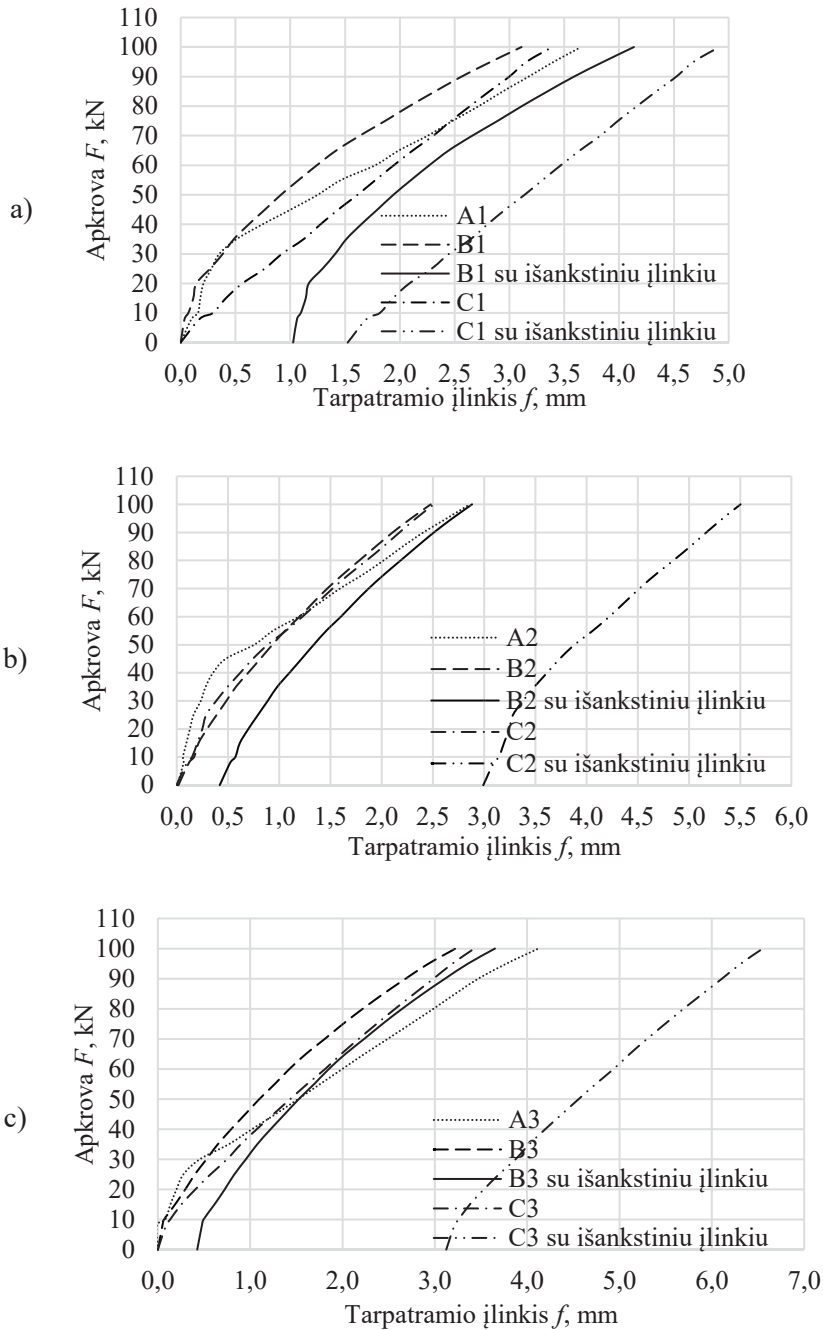
Didžiausią laikomąją galią pasiekė C tipo kompozitinės sijos, kurių pradiniai plyšiai buvo didžiausi. Mažiausią laikomąją galią pasiekė tos sijos, kurios buvo nesupleišėjusios. Taip galėjo atsitikti dėl to, kad B ir C tipo kompozitinių sijų betonai buvo pasiekę tampriai-plastines deformacijas po gelžbetoninės sijos nukrovimo (Daugevičius, 2010), todėl ir plieninė armatūra turėjo liekamąsias deformacijas (įtempius). Apkrovus kompozitines sijas, B ir C tipo sijų anglies plauše pasireiškė tokio paties dydžio, o armatūroje – didesnės santykinės deformacijos, palyginti su A tipo sijomis. Didesnės B ir C tipo sijų santykinės deformacijos armatūroje lemia didesnę laikomąją galią, palyginti su A tipo sijomis.

Kita priežastis, dėl kurios B ir C tipo sijų laikomoji galia galėjo būti didesnė, yra kreivis. Didesnis kreivis (įlinkis) lemia didesnę anglies plaušo atplėšimo jėgą, kuri yra statmena kontakto zonos tarp anglies plaušo ir betono paviršiumi. 2.10 pav. pateiktos apkrovos-įlinkių kreivės.

Dar viena priežastis, dėl kurios B ir C tipo sijų laikomoji galia galėjo būti didesnė, yra ta, kad, stiprinant supleišėjusią gelžbetoninę siją anglies plaušu, į plyšius, esančius betone, patenka klijų, kurie pagerina sukibimą tarp betono ir anglies plaušo. Šį stiprumo padidėjimą aprašė Al-Rausan ir kt. (Al-Rousan, AL-Tahat, 2019), kai buvo atliekamas anglies plaušo ištraukimo iš betono paviršiaus bandymas.

Yu ir kt. (2020) gavo rezultatus, kad kuo labiau pažeista (didesnis plyšio plotis) gelžbetoninė konstrukcija prieš sustiprinimą, tuo mažesnė laikomoji galia po sustiprinimo. Tai prieštarauja šios disertacijos išvadoms, kuriose teigiama, kad, esant didesniam sijos pažaidos lygiui, sijos stiprumas yra didesnis. Šį neatitikimą galima paaiškinti tuo, kad skyrėsi šioje disertacijoje nagrinėjamų bei Yu ir kt. kompozitinių sijų suirimo pobūdis. Disertacijoje stiprintos sijos suirimo pobūdis buvo plaušo sukibimo praradimas su betonu, o Yu ir kt. – anglies plaušo plyšimas. Šiuo atveju anglies plaušo galai neatsiklijavo dėl to, kad jie buvo inkaruoti U formos plaušu bei prispausti virš atramų. Tikėtina, kad disertacijoje nagrinėtų sijų, sustiprintų anglies plaušu, su pradiniais plyšiais stiprumas galėtų būti mažesnis, palyginti su

kompozitinėmis sijomis be pradinių pažeidimų, jeigu būtų užinkaruoti plaušo galai ir anglies plaušas trūktų grynojo lenkimo zonoje. Detaliau Yu ir kt. atliktas tyrimas aptartas 1.1. poskyryje.



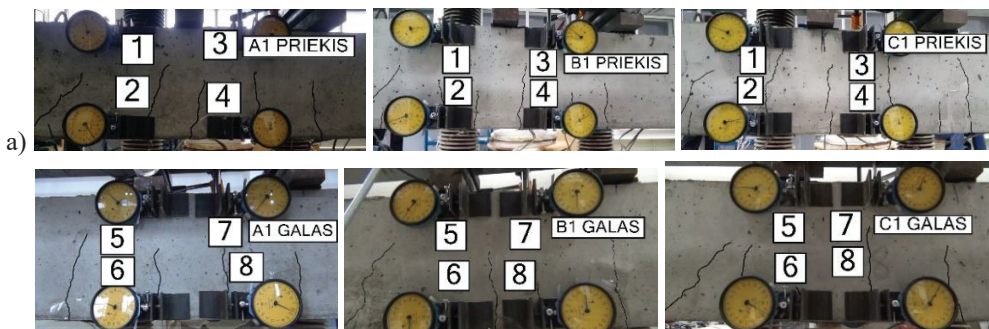
2.10 pav. Apkrovos-įlinkių kreivės: a) 1 serijos sijų; b) 2 serijos sijų; c) 3 serijos sijų

Čia 1–3 – serijos numeris ir A–C – sijos tipas. Detaliau apie sijų parametrus yra paaiškinta 2.4 lentelėje. Sija su išankstiniu įlinkiu reiškia, kad prie išmatuotų kompozitinių sijų įlinkių bandymo metu yra pridėtas pradinis įlinkis, kuris buvo gautas apkrovus ir nukrovus gelžbetoninę siją prieš ją stiprinant.

Pagal apkrovos-įlinkių kreives matyti, kad didžiausias iš visų serijų (1–3 serijos) sijų standumas buvo A tipo sijų (neįvertinus pradinių įlinkių) iki normalinių plyšių atsivėrimo. Atsivėrus pirmiesiems plyšiams, standumas staiga krito ir pradėjo sparčiai augti įlinkiai. Tai įvyko, kai sijų apkrova siekė 25–45 kN, priklausomai nuo serijos numerio. Ties 45–75 kN A tipo sijų įlinkiai viršijo su pradiniais plyšiais buvusių sijų įlinkius ir toliau didėjo iki 100 kN. Vertinant kreivių tendencijas, galima teigti, kad A tipo sijų įlinkiai ir išliko didžiausi iki pat suirimo. Palyginus B ir C tipo sijų lenkiamuosius standumus, nustatyta, kad didesnę standumą turėjo B tipo sija 1-oje ir 3-ioje serijoje viso apkrovimo metu. Didžiausias 1 serijos įlinkių skirtumas siekė 0,7 mm, esant 60 kN, ir 3 serijos – 0,4 mm, esant 60 kN apkrovai. 2-oje serijoje B ir C tipo sijų įlinkiai viso apkrovimo metu išliko labai panašūs ir didžiausias skirtumas neviršijo 0,1 mm. Didžiausi įlinkių skirtumai tarp sijų su išankstiniais plyšiais ir be jų, esant 100 kN apkrovai: 1 serijos – 0,6 mm, 2 serijos – 0,4 mm, 3 serijos – 0,9 mm.

Įvertinus pradinius įlinkius prieš kompozitinių sijų apkrovimą, matyti, kad didžiausi – C tipo sijų įlinkiai. Kadangi C tipo gelžbetoninės sijos buvo apkrautos iki armatūros takumo ribos. Tai reiškia, kad sijoje yra pasireiškusių plastinių deformacijų ir nukrovus sijas, lieka gana dideli įlinkiai. Šiuo atveju – nuo 1,5 mm iki 3,1 mm. A ir B tipo sijų su pradiniais įlinkiais lenkiamojo standumo pasiskirstymas skiriasi, priklausomai nuo serijos. 1 serijos B tipo sijos įlinkis didesnis, palyginti su A tipo sija viso apkrovimu metu. A tipo sijų standumas iki 70 kN mažėja sparčiau nei B tipo, o viršijus šią apkrovą, standumų skirtumas nekinta. A ir B tipo sijų įlinkiai pradeda kisti vienodu greičiu – ~0,5 mm per 10 kN. 2 serijos A tipo sijos lenkiamasis standumas taip pat krenta sparčiau už B tipo seriją viso apkrovimo metu po pirminių plyšių atsivėrimo ties 45 kN apkrova. 3 serijos A tipo sijos lenkiamasis standumas pradėjo mažėti, o įlinkiai sparčiai didėti ties 25 kN. Esant 55 kN apkrovai, įlinkis susilygina su B tipo sija, kuris siekia 1,5 mm. Esant 100 kN apkrovai, 3 serijos A ir B tipų sijų įlinkių skirtumas yra 0,5 mm.

2.11 pav. pateiktas kompozitinių sijų plyšiai ir mechaninių poslinkių matuoklių išdėstymas apkrovimo metu, kai sijų apkrova siekė 100 kN.





2.11 pav. Kompozitinių sijų plyšiai ir mechaninių poslinkių matuoklių išdėstymas:
a) 1 serijos sijų; b) 2 serijos sijų; c) 3 serijos sijų

Gelžbetonių sijų, sustiprintų anglies plaušu, vizualiai matomų plyšių skaičius tiek su išankstiniais plyšiais, tiek be jų 100 kN apkrovimo metu buvo panašūs ir siekė nuo keturių (C3) iki septynių (A2) plyšių. Tačiau galima išvelti tendenciją, kad iš anksto nesupleišėjusioje sijoje pasireiškė didžiausias plyšių skaičius, o su didžiausiais išankstiniais plyšiais – mažiausias plyšių skaičius. Eksperimento metu buvo pastebėta, kad stiprintose sijos su išankstiniais plyšiais atsivėrinėdavo ir didėdavo buvę pirminiai plyšiai. Stiprintose sijos, be pirminių plyšių, atsivėrdavo mažesni plyšiai, tačiau jų būdavo daugiau.

2.4. Lenkiamų gelžbetoninių sijų ir ruloninio anglies plaušo kontakto zonos elgsenos eksperimentiniai tyrimai

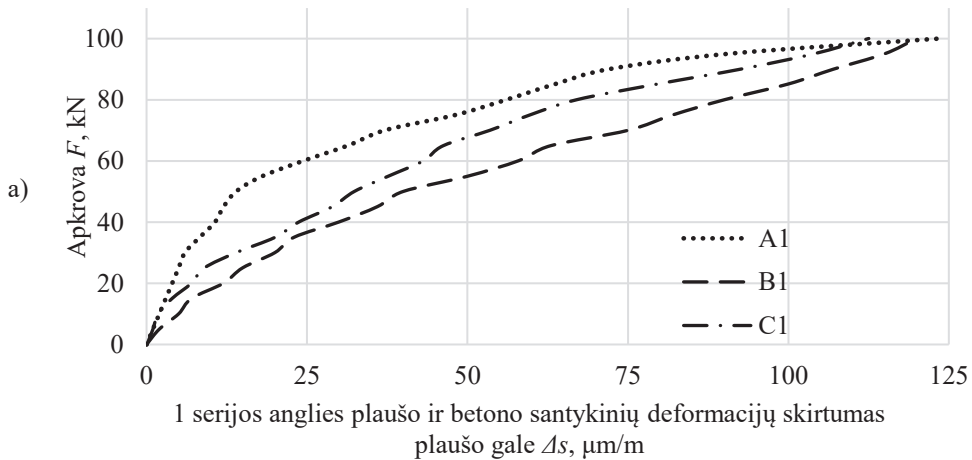
Norint nustatyti pradinių plyšių įtaką gelžbetoninėms sijos, kurios stiprintos anglies plaušo audiniu, buvo atliekami anglies plaušo ir betono deformacijų matavimai. Matavimui buvo naudojami elektroniniai jutikliai. Kompozitinių sijų anglies plaušo ir betono deformacijų skirtumas pateiktas 2.12 pav. Elektroninių daviklių išdėstymo schema yra pateikta 2.7 pav.

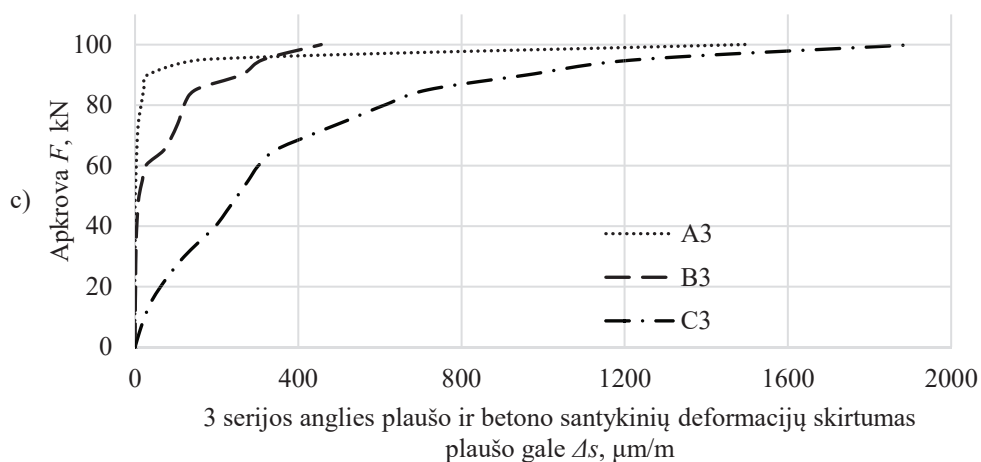
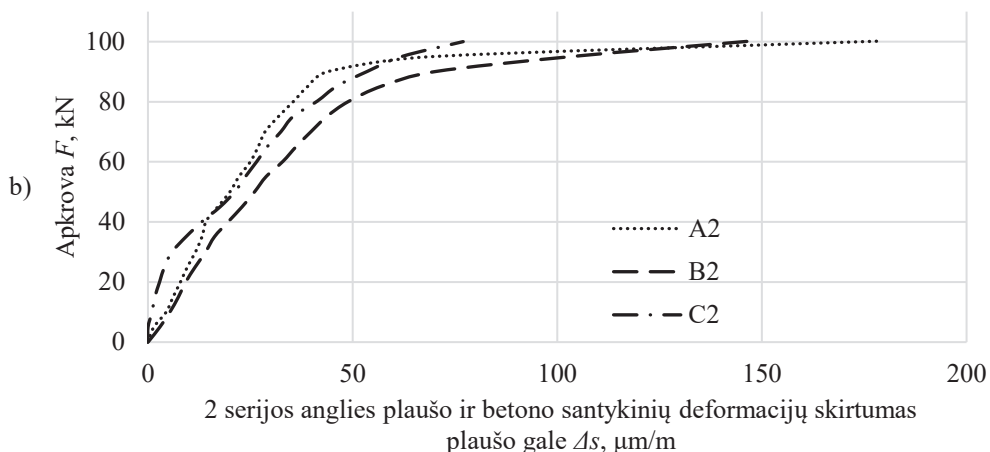
Gauti rezultatai rodo, kad beveik viso apkrovimo metu (iki 90–100 kN) A tipo sijų santykinų deformacijų skirtumas buvo mažiausias, palyginti su tos pačios serijos kompozitinėmis sijos. Laikinas nukrypimas nuo šios tendencijos fiksuotas tik A2 sijos atveju iki 40 kN apkrovos. A2 ir A3 sijų spartus santykinų deformacijų skirtumo (nuo 150 iki 1500 $\mu\text{m}/\text{m}$ per 10 kNm) didėjimas pasireiškia tarp anglies plaušo ir betono pasiekus 90–100 kN apkrovimą. Reikia atkreipti dėmesį, kad, esant tokiam

apkrovimo dydžiui, buvo pasiekta gelžbetoninės sijos tempiamos armatūros takumo riba. Ties šiuo apkrovimo dydžiu A tipo sijų santykinų deformacijų skirtumas tarp anglies plaušo ir betono tampa didžiausias, palyginti su tos pačios serijos sijomis.

1 ir 2 serijos C tipo kompozitinių sijų deformacijų skirtumai tarp anglies plaušo ir betono buvo mažesni esant tokiai pat apkrovai, palyginti su B tipo sija viso apkrovimo metu, ir nuolatos didėjo. 3 serijos C tipo sijos deformacijų skirtumas tarp anglies plaušo ir betono buvo didesnis, palyginus su B tipo sija.

Lyginant 1 ir 3 serijas pagal pasiektus maksimalius santykinų deformacijų skirtumus tarp anglies plaušo ir betono, didžiausi skirtumai buvo nustatyti 3 serijos sijų (nuo 450 iki 1900 $\mu\text{m}/\text{m}$) atveju. Taip galėjo atsitikti dėl to, jog 3 serijos sijos buvo sustiprintos ilgesniu anglies plaušu ir veikė mažesnė anglies plaušo atplėšimo jėga dėl sijos įlinkio. 1 serijos sijos didesnė anglies plaušo atplėšimo jėga galėjo padidinti praslydimą tarp anglies plaušo ir betono. 2 serijos maksimalūs santykinų deformacijų skirtumai yra mažesni (nuo 200 iki 240 $\mu\text{m}/\text{m}$), palyginus su 3 serija. Taip yra todėl, kad kompozitinių sijų 2 serija yra stiprinta trimis anglies plaušo sluoksniais. Standesnė sija lemia mažesnius įlinkius ir mažesnes skerspjuvio deformacijas. Tikėtina, kad arčiausiai betono esantis anglies plaušo sluoksnis turi didesnes deformacijas ir normalinius įtempius nei toliausiai esantis sluoksnis. Kadangi klijų tamprumo modulis yra žymiai mažesnis už anglies plaušo tamprumo modulį, tarp sluoksnių gali susidaryti praslydimas. Atsiradęs praslydimas tarp anglies plaušo sluoksnių gali paveikti mažesnes deformacijas toliausiai nuo betono nutolusiame anglies plaušo sluoksnyje.



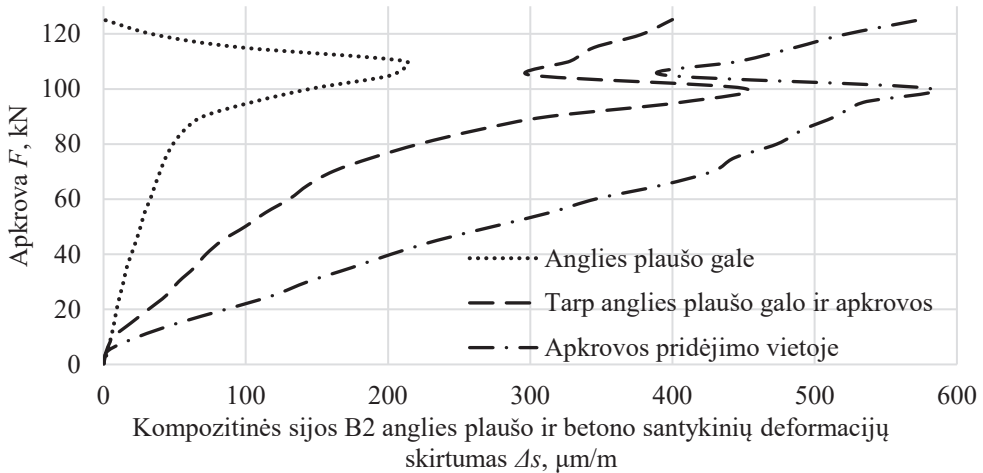


2.12 pav. Kompozitinių sijų anglies plaušo ir betono santykinių deformacijų skirtumas nuo apkrovos plaušo gale: a) 1 serijos sijų; b) 2 serijos sijų; c) 3 serijos sijų

2.13 pav. pateiktas kompozitinės sijos B2 santykinių deformacijų skirtumas tarp anglies plaušo ir betono. Didžiausias anglies plaušo ir betono santykinių deformacijų skirtumas gautas ties koncentruota jėga, mažiausias – ties anglies plaušo galu. Natūralu, kad gauti tokie rezultatai, nes nuo sijos atramos link apkrovos pridėjimo vietos lenkimo momentas didėja, kartu didėjant betono ir anglies plaušo deformacijoms. Santykinių deformacijų skirtumas (apkrovos pridėjimo vietoje bei tarp anglies plaušo galo ir apkrovos) nuolat didėjo nuo apkrovos pridėjimo iki 100 kN (pasiekė 580 ir 450 $\mu\text{m/m}$ atitinkamai), vėliau buvo staigus kritimas (iki 390 ir 300 $\mu\text{m/m}$ atitinkamai) ir maždaug ties 105 kN apkrova vėl pradėjo didėti. Santykinių deformacijų skirtumas apkrovos pridėjimo vietoje pasiekė 580 $\mu\text{m/m}$, o tarp anglies plaušo galo ir apkrovos – 400 $\mu\text{m/m}$, esant 125 kN apkrovai. Kritimas gautas ties 100 kN, kai pastovi apkrova buvo palaikoma siekiant užfiksuoti indikatorių parodymus. Toks kritimas nebuvo pastebėtas anglies plaušo gale. Deformacijų

skirtumas anglies plaušo gale pradėjo kristi pasiekus 110 kN apkrovą (santykinų deformacijų skirtumas $210 \mu\text{m/m}$) bei krito iki $0 \mu\text{m/m}$, kai buvo pasiekta 125 kN apkrova. Kritimas įvyko praktiškai tuo pat metu, kai pradėjo didėti deformacijų skirtumas ties apkrova ir tarp anglies plaušo galo ir apkrovos.

Pagal 2.13 pav. duomenis galima daryti išvadą, kad maksimalūs anglies plaušo ir tempiamo betono santykinų deformacijų skirtumai ties plaušo galu užfiksuoti prieš pat praslydimą tarp šių sluoksnių pradžia. Prasidėjusį sukibimo praradimą žymi traškėjimas.



2.13 pav. Kompozitinės sijos B2 anglies plaušo ir betono santykinų deformacijų skirtumo priklausomybė nuo apkrovos dydžio (čia: anglies plaušo gale – deformacijos, matuotos 14 cm nuo sijos atramos; tarp anglies plaušo galo ir apkrovos – deformacijos, matuotos 30 cm nuo sijos atramos; apkrovos pridėjimo vietoje – deformacijos, matuotos 47,5 cm nuo sijos atramos)

2.5. Antrojo skyriaus išvados

1. Visų tipų gelžbetoninių sijų, sustiprintų anglies plaušu, stiprumas buvo didesnis, palyginus su nesustiprintomis sijomis. Anglies plaušu sustiprintų sijų laikomoji galia padidėjo nuo 9,2 % iki 45 %, priklausomai nuo plaušo kiekio ir stiprinamų sijų supleišėjimo intensyvumo. Laikomoji galia daugiausiai padidėjo sijų su didžiausiais pradinių plyšių pločiais (armatūrai pasiekus takumo ribą) – nuo 23 % iki 45 %, o mažiausiai – sijų be pradinių plyšių – nuo 9,2 % iki 27 %. Viena priežastis, kuri tai galėtų paaiškinti, yra liekamosios tampriai-plastinės armatūros ir betono deformacijos, dėl kurių didesni įtempiai pasiekti armatūroje ir mažesni anglies plauše, palyginus su nepažeistomis sijomis. Kita priežastis – supleišėjusių sijų mažesnis įlinkis po sustiprinimo ir galimas plyšių užpylimas kljais plaušo kljavimo metu. Mažesnis įlinkis lemia mažesnę anglies plaušo atplėšimo jėgą, kuri yra statmena kontakto zonos tarp anglies plaušo ir betono paviršiumi, o kljai, esantys plyšyje, pagerina sukibimą (Al-Rousan, AL-Tahat, 2019). Reikia pabrėžti, kad rezultatai gauti tik eksperimento metu išbandytoms sijoms, o tiriant kitokių matmenų ir kitų medžiagų parametrų sijas, rezultatai gali skirtis nuo pateiktų disertacijoje.
2. Didžiausias kompozitinių sijų standumas iki normalinių plyšių atsivėrimo buvo būdingas toms sijoms, kurios neturėjo pradinių plyšių. Atsivėrus pirmiesiems plyšiams, standumas staiga sumažėjo ir pradėjo sparčiai didėti įlinkiai. Tai įvyko, kai sijų apkrova siekė 25–45 kN, priklausomai nuo serijos numerio. Esant 45–75 kN apkrovai, sijų be pradinių plyšių įlinkiai viršijo su pradiniais plyšiais buvusių sijų įlinkius. Sijų be pradinių plyšių įlinkis buvo didesnis nuo 7,3 % iki 27,6 % už sijas su pradiniais plyšiais, esant 100 kN apkrovai. Įvertinus pirminius įlinkius, 1 ir 2 serijos sijų įlinkių skirtumas mažėja, didėjant apkrovai, palyginus sijas be pradinių plyšių ir sijas su vidutinio dydžio plyšiais (B tipo sijos). 3 serijos A ir B tipo sijų įlinkiai susilygina ties 50 kN apkrova. Esant 100 kN apkrovai, A ir B tipo sijų įlinkiai, įvertinus pradinius įlinkius, skiriasi nuo 3,5 % iki 13,0 %. C tipo sijų įlinkiai, įvertinus pradinius įlinkius, visais atvejais yra didžiausi, palyginti su A ir B tipo sijomis, ir labai priklauso nuo pradinio apkrovimo metu buvusių armatūros plastinių deformacijų dydžio.
3. Kompozitinių sijų vizualiai matomų plyšių skaičius 100 kN apkrovimo metu buvo panašus ir siekė nuo keturių (C3) iki septynių (A2) plyšių. Nepaisant to, galima įžvelgti tendenciją, kad iš anksto nesupleišėjusioje sijoje pasireiškė didžiausias plyšių skaičius, o didžiausių išankstinių plyšių atveju užfiksuotas mažiausias plyšių skaičius. Eksperimento metu pastebėta, kad stiprintose sijose su išankstiniais plyšiais atsivėrinėdavo ir didėdavo buvę pirminiai plyšiai. Stiprintose sijose be pirminių plyšių atsivėrdavo mažesni plyšiai, tačiau jų būdavo daugiau.
4. A tipo sijų anglies plaušo ir betono santykinų deformacijų skirtumas plaušo gale buvo mažiausias, palyginti su tos pačios serijos sijomis iki 90–100 kN. Maksimalūs anglies plaušo ir tempiamo betono santykinų deformacijų skirtumai ties plaušo galu užfiksuoti prieš pat praslydimą tarp šių sluoksnių pradžia.

3. ANALITINIAI ANGLIES PLAUŠU SUSTIPRINTŲ GELŽBETONINIŲ SIJŲ TYRIMAI

3.1. Analitiniai modeliai, leidžiantys įvertinti sluoksnių sukibimo įtaką sluoksniuotų konstrukcijų standumui

Iteracijų metodas.

Skaičiuojant gelžbetonines konstrukcijas, stiprintas anglies plaušu, taikomas universalus iteracijų metodas (Zadlauskas, 2013). Šio metodo pranašumas yra tas, kad galima įvertinti fiziškai netiesinį betono darbą. Iteracijų metodu buvo apskaičiuotos kompozitinės sijos, kurių rezultatai pateikti 4.3. poskyryje.

Tamprus kūno iteracijų metodo skaičiavimo pagrindas – Huko dėsnis. Atsiradus plastinėms medžiagos deformacijoms, skerspjūvio santykinės deformacijos gaunamos taikant deformacijų modulį. Bendroji iteracijų metodo skaičiuojamoji išraiška pateikta 3.82 formulėje. Iteracijų metodas sudaromas elemento skerspjūvį sudalijant į atskirus sluoksnius. Kiekvienas sluoksnis turi savo standumą. Standumo matricos išraiška pateikta 3.83 formulėje. Betono fizinis netiesiškumas įvertinamas per deformacijų modulį.

$$[E_{\text{stand}}]\{\boldsymbol{\varepsilon}\} = \{\mathbf{F}\} \quad (3.82)$$

čia: $[E_{\text{stand}}]$ – standumo matrica (3.83); $\{\boldsymbol{\varepsilon}\}$ – santykinų deformacijų vektorius (3.84); $\{\mathbf{F}\}$ – apkrovų vektorius (3.85)

$$[E_{\text{stand}}] = \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & -2 & 1 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -2 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \dots & 1 \\ E_1 A_1 & E_2 A_2 & E_3 A_3 & E_4 A_4 & \dots & k_{\text{sukib.}} E_n A_n \\ 0 & E_2 A_2 h_i & 2E_3 A_3 h_i & 3E_4 A_4 h_i & \dots & k_{\text{sukib.}} (1-n) E_n A_n h_i \end{bmatrix} \quad (3.83)$$

čia: E_i – i -tojo sluoksnio deformacijų modulis; A_i – i -tojo sluoksnio skerspjūvio plotas; $k_{\text{sukib.}}$ – koeficientas, įvertinantis praslydimą tarp anglies plaušo ir betono

$$\{\boldsymbol{\varepsilon}\} = \{\boldsymbol{\varepsilon}_1 \quad \boldsymbol{\varepsilon}_2 \quad \boldsymbol{\varepsilon}_3 \quad \boldsymbol{\varepsilon}_4 \quad \dots \quad \boldsymbol{\varepsilon}_n\}^T \quad (3.84)$$

čia: $\boldsymbol{\varepsilon}_i$ – i -tojo sluoksnio santykinės deformacijos

$$\{\mathbf{F}\} = \{0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad \dots \quad \mathbf{M}\}^T \quad (3.85)$$

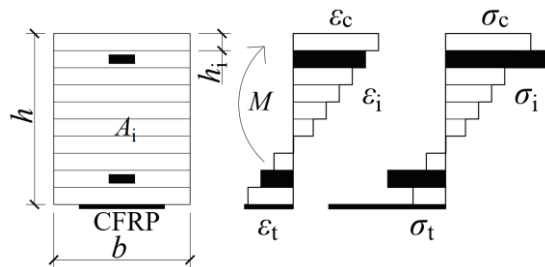
čia: \mathbf{M} – lenkimo momentas

Analitinis modelis gaunamas aprašant standumo matricą bei santykinų deformacijų ir apkrovų vektorius. Į standumo matricos paskutines dvi eilutes įrašomas kiekvieno sluoksnio deformacijų modulis, sluoksnio skerspjūvio plotas ir storis. Į apkrovų vektorius įrašomos siją veikiančios jėgos. Šiuo atveju nežinomasis dydis yra santykinės sluoksnių deformacijos. Žinant santykinės sluoksnių deformacijas, galima apskaičiuoti įtempius ir jėgas. Sudarant analitinį modelį, pirmiausia nurodoma, kad visas skerspjūvis dirba kaip tamprus kūnas. Jeigu santykinės deformacijos viršija

tamprias medžiagos santykinės deformacijos, tada priartėjimo būdu perskaičiuojamas tos medžiagos deformacijų modulis pagal nurodytą priklausomybę. Jeigu santykinės deformacijos viršija ribines santykinės deformacijas, tada to sluoksnio deformacijų modulis fiksuojamas lygus 0. Taip atlikus keletą ciklų, gaunamos tikrosios skerspjūvio deformacijos. 3.83 formulėje galima įvertinti ir sluoksnio praslydimą, įvedus koeficientą $k_{\text{sukib.}}$. Kai $k_{\text{sukib.}} = 1$, tada yra idealus sukibimas, kai $k_{\text{sukib.}} = 0$, tada sukibimo nėra. 3.1 pav. pateikta skerspjūvio skaičiuojamoji schema, santykinių deformacijų ir įtempių pasiskirstymo schemas. Įlinkio skaičiavimo algebrinė išraiška pateikta 3.86 formulėje.

$$f = k \cdot l^2 \frac{1}{r} \quad (3.86)$$

čia: $k = 0,0989$ yra koeficientas, įvertinantis skaičiuojamąją schemą (2.9 pav.); l – tarpatramio ilgis; $1/r = (\varepsilon_1 - \varepsilon_n)/h$; h – sijos aukštis



3.1 pav. Iteracijų metodo skerspjūvio skaičiuojamoji schema bei santykinių deformacijų ir įtempių pasiskirstymo schemas

Gelžbetoninės sijos, stiprintos anglies plaušu, įlinkių skaičiavimas pagal LST EN 1992-1-1:2007 Eurokodas 2. Gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas (EC2) (LST EN 1992-1-1. Eurokodas 2. Gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas. 1-1 dalis, 2007).

Vienas iš analitinių būdų, kuriuo disertacijoje yra įvertinti gelžbetoninių sijų, sustiprintų anglies plaušu, įlinkiai, yra EC2 metodika. Atsivėrę plyšiai sumažina sijos standumą tik toje vietoje, kurioje atsivėrė plyšiai, tačiau sijos skerspjūvio vieta tarp plyšių nepraranda standumo. Sijos įlinkis gaunamas atsižvelgus į supleišėjusias ir nesupleišėjusias sijos vietas. 3.87 formulėje yra pateiktas kreivio skaičiavimas (LST EN 1992-1-1. Eurokodas 2. Gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas. 1-1 dalis, 2007). Pagal gautą kreivio reikšmę, pasitelkus 3.87 ir 3.86 formules, buvo apskaičiuotas įlinkis. Įlinkių priklausomybės nuo apkrovos rezultatai yra pateikti 4 skyriuje.

$$\frac{1}{r} = \zeta \frac{1}{r_{\text{cr}}} + (1 - \zeta) \frac{1}{r_{\text{uc}}} \quad (3.87)$$

čia: $1/r$ – gelžbetoninės konstrukcijos kreivis; $1/r_{\text{cr}}$ – gelžbetoninės sijos kreivis, apskaičiuotas visiško supleišėjimo sąlygomis; $1/r_{\text{uc}}$ – gelžbetoninės sijos kreivis,

apskaičiuotas nesupleišėjimo sąlygomis; ζ – pasiskirstymo koeficientas (kurį taikant atsižvelgiama į skerspjūvio lenkiamąjį standį)

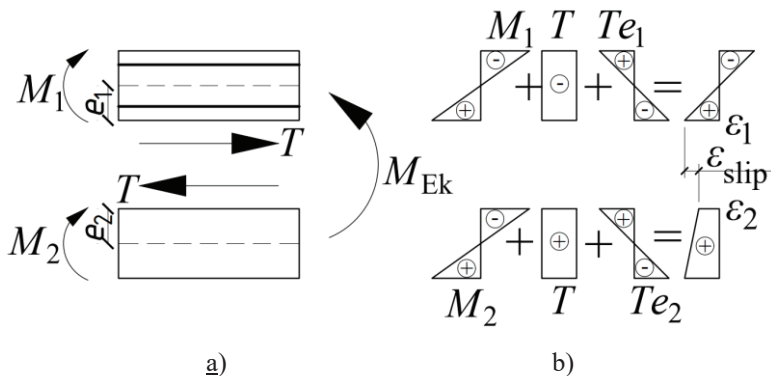
Kompozitinės sijos kreivis apskaičiuotas pagal santykinės gniuždomo ir tempiamo betono deformacijas. Betono deformacijos buvo fiksuojamos mechaniniais laikrodiniais matuokliais supleišėjusioje ir nesupleišėjusioje zonose. Pasiskirstymo koeficientas ζ apskaičiuojamas pagal 3.88 formulę.

$$\zeta = 1 - \beta \left(\frac{M_{cr}}{M_{Ed}} \right)^2 \quad (3.88)$$

čia: β – koeficientas, kurį taikant atsižvelgiama į apkrovimo trukmės arba kartotinės apkrovos įtaką vidutinei deformacijai ($\beta = 1,0$, kai veikia vieną kartą trumpalaikė apkrova; $\beta = 0,5$, jei apkrovos ilgalaikės arba veikia daug kartotinės apkrovos ciklą); M_{cr} – gelžbetoninės sijos pleišėjimo momentas (apskaičiuotas pagal apkrovą ir jos pridėjimo vietą eksperimento metu, kai atsivėrę plyšiai buvo užfiksuoti pagal faktą); M_{Ed} – lenkiamasis momentas (apskaičiuotas pagal apkrovą ir jos pridėjimo vietą eksperimento metu)

3.2. Analitinio modelio, leidžiančio įvertinti dviejų sluoksnių kontakto zonos šlyties jėgos ir tangentinių įtempių pasiskirstymą per elemento ilgį, sudarymas

Sudarant analitinį modelį, aprašantį sukibties įtaką gelžbetoninei sijai, stiprintai anglies plaušu, svarbu tinkamai įvertinti sukibimo jėgą ir tangentinius įtempius tarp betono ir anglies plaušo. 3.2 pav. a) pateikta dvisluoksnio elemento skaičiuojamoji schema ir 3.2 pav. b) – sluoksnių santykinės deformacijos bei jų dedamosios nuo išorinio lenkimo momento. M_{Ek} (3.89 formulė) yra išorinis lenkimo momentas, kuris veikia elementą, M_1 ir M_2 yra pirmą ir antrą sluoksnius veikiantys lenkimo momentai nuo išorinio poveikio, pasiskirstę priklausomai nuo sluoksnių standumo. 3.2 pav. pirmu sluoksniu žymima gelžbetoninė sija, antruoju – anglies plaušas. Anglies plaušo mastelis yra išdidintas ir nėra proporcingas gelžbetoninės sijos masteliui dėl žymėjimo aiškumo.



3.2 pav. a) Dvisluoksnio elemento skaičiuojamoji schema; b) santykinės deformacijos ir jų dedamosios

$$M_{EK} = M_1 + M_2 \quad (3.89)$$

čia: M_{EK} – išorinis lenkimo momentas, M_1 , M_2 – atitinkamai pirmo ir antro sluoksnio (elemento) lenkimo momentai nuo išorinio poveikio M_{EK}

Kompozitinės sijos abu sluoksniai nuo išorinio poveikio išsikreivina vienodai, todėl jų kreivis yra vienodas (3.90):

$$\frac{1}{r_1} = \frac{1}{r_2} \quad (3.90)$$

čia: $1/r_1$ ir $1/r_2$ – atitinkamai pirmo ir antro sluoksnio kreiviai

Iš kreivių lygties (3.90) įrašomos lenkimo momento įrašos į formulę 3.91. Lenkimo momentas skaičiuojamas apie kiekvieno elemento (sluoksnio) centrą:

$$\frac{M_1 - T \cdot e_1}{E_c \cdot I_1} = \frac{M_2 - T \cdot e_2}{E_{CFRP} \cdot I_{CFRP}} \quad (3.91)$$

čia: e_1 , e_2 – atitinkamai pirmo ir antro sluoksnio ekscentricitetas (atstumas nuo sluoksnio neutraliosios ašies iki sluoksnių kontakto zonos); E_c – betono tamprumo modulis; E_{CFRP} – anglies plaušo tamprumo modulis, I_1 – pirmo sluoksnio (gelžbetoninės sijos) inercijos momentas; I_{CFRP} – anglies plaušo inercijos momentas; T – sukibimo (kontakto) jėga

Išvedinėjant formules, pirmo ir antro sluoksnio standumų santykis pažymimas dydžiu α (3.92):

$$\alpha = \frac{E_c \cdot I_1}{E_{CFRP} \cdot I_{CFRP}} \quad (3.92)$$

Iš 3.91 lygties išsireiškiamos pirmo (3.93) ir antro (3.94) sluoksnių (elementų) lenkimo momentų dedamosios nuo išorinio momento:

$$M_1 = (M_2 - T \cdot e_2) \cdot \alpha + T \cdot e_1 \quad (3.93)$$

$$M_2 = \frac{(M_1 - T \cdot e_1)}{\alpha} + T \cdot e_2 \quad (3.94)$$

3.93 ir 3.94 lygtys įrašomos į 3.89 formulę. Išsireiškiami pirmo (3.95) ir antro (3.96) sluoksnių (elementų) lenkimo momentai nuo išorinio poveikio:

$$M_1 = \frac{M_{EK} + T \cdot \left(\frac{e_1}{\alpha} - e_2\right)}{1 + \frac{1}{\alpha}} \quad (3.95)$$

$$M_2 = \frac{M_{EK} + T \cdot (e_2 \cdot \alpha - e_1)}{1 + \alpha} \quad (3.96)$$

Ši lygybė galioja, kai išorinis lenkimo momentas yra vienodas per visą ilgį. Kintant išoriniam poveikiui per sijos ilgį, keičiasi ir lenkimo momentai M_1 bei M_2 .

Jeigu tarp pirmo ir antro sluoksnių, t. y. tarp gelžbetoninės sijos ir anglies plaušo yra idealus sukibimas, praslydimas $\varepsilon_{slip} = 0$. Tačiau jeigu sukibimas nėra idealus,

pasireiškia tarpusavio sluoksnių praslydimas. 3.2 pav. b) parodytas skerspjūvio sluoksnių santykinės deformacijos ir jų dedamosios bei pirmo ir antro sluoksnių praslydimas. Pagal pateiktą 3.2 pav. b) rašoma praslydimio lygtis (3.97):

$$\varepsilon_{\text{slip}} = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 \quad (3.97)$$

čia: $\varepsilon_{\text{slip}}$ – skerspjūvio sluoksnių praslydimas; $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – atitinkamai pirmo ir antro skerspjūvio sluoksnių santykinės deformacijos

Pagal 3.2 pav. b) parodytą schemą išreiškiamos pirmo (3.98) ir antro (3.99) sluoksnių kontakto zonos santykinės deformacijos:

$$\varepsilon_1 = \frac{M_1}{W_1 \cdot E_c} - \frac{T}{A_c \cdot E_c} - \frac{T \cdot e_1}{W_1 \cdot E_c} \quad (3.98)$$

čia: W_1 – pirmo sluoksniu atsparumo momentas

$$\varepsilon_2 = -\frac{M_2}{W_2 \cdot E_{\text{CFRP}}} + \frac{T}{A_{\text{CFRP}} \cdot E_{\text{CFRP}}} + \frac{T \cdot e_2}{W_2 \cdot E_{\text{CFRP}}} \quad (3.99)$$

čia: W_2 – antro sluoksniu atsparumo momentas

3.95 ir 3.96 formulės įrašomos į 3.98 ir 3.99 formules, o jos įrašomos į 3.97 išraišką ir gaunama 3.100 išraiška:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\text{slip}} = & \frac{M_{\text{EK}} + T \cdot \left(\frac{e_1}{\alpha} - e_2\right)}{W_1 \cdot E_c \cdot \left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)} - \frac{T}{A_c \cdot E_c} - \frac{T \cdot e_1}{W_1 \cdot E_c} \\ & + \frac{M_{\text{EK}} + T \cdot (e_2 \cdot \alpha - e_1)}{W_2 \cdot E_{\text{CFRP}} \cdot (1 + \alpha)} - \frac{T}{A_{\text{CFRP}} \cdot E_{\text{CFRP}}} - \frac{T \cdot e_2}{W_2 \cdot E_{\text{CFRP}}} \end{aligned} \quad (3.100)$$

Pertvarkius 3.100 išraišką ir išorinį poveikį aprašius kaip kintamąjį pagal išilginę elemento ašį, gaunama anglies plaušo sukibimo jėga per skerspjūvio ilgį (3.101):

$$\begin{aligned} T(x) = & \left(\varepsilon_{\text{slip}}(x) - \frac{M_{\text{EK}}(x)}{W_1 \cdot E_c \cdot \left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)} - \frac{M_{\text{EK}}(x)}{W_2 \cdot E_{\text{CFRP}} \cdot (1 + \alpha)} \right) / \\ & \left(\frac{\frac{e_1}{\alpha} - e_2}{W_1 \cdot E_c \cdot \left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)} - \frac{1}{A_c \cdot E_c} - \frac{e_1}{W_1 \cdot E_c} \right. \\ & \left. + \frac{e_2 \cdot \alpha - e_1}{W_2 \cdot E_{\text{CFRP}} \cdot (1 + \alpha)} - \frac{1}{A_{\text{CFRP}} \cdot E_{\text{CFRP}}} - \frac{e_2}{W_2 \cdot E_{\text{CFRP}}} \right) \end{aligned} \quad (3.101)$$

čia: $\varepsilon_{\text{slip}}(x)$ – skerspjūvio sluoksnių praslydimas, kintantis per elemento ilgį; $M_{\text{EK}}(x)$ – išorinis poveikis, kintantis per elemento ilgį

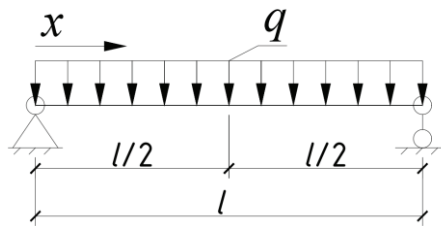
Pagal pasirinktą eksperimentiniame tyrime skaičiuojamąją schemą, taip pat pagal koncentruotas jėgas, pakeistas analoginiu išskirstytu krūviu, išreiškiamas skerspjūvio sluoksnių praslydimas $\varepsilon_{\text{slip}}(x)$, kintančio per elemento ilgį, formulė (3.102).

Daugiklis prieš koeficientą k aprašo galimą praslydimą tarp sluoksnių per elemento ilgį, priklausomai nuo lenkimo momentų reikšmės.

$$\varepsilon_{\text{slip}}(x) = k \cdot \left(\frac{M_1(x)}{W_1 \cdot E_c} + \frac{M_2(x)}{W_2 \cdot E_{\text{CFRP}}} \right) \quad (3.102)$$

čia: k – koeficientas, įvertinantis praslydimą (kinta nuo 0 iki 1,0 priklausomai nuo to, koks praslydimas yra nurodomas; kai $k = 0$, praslydimas nėra (sukibimas idealus); kai $k = 1,0$, nėra sukibimo (sluoksniai dirba kaip atskiri elementai); $M_1(x)$ (3.103), $M_2(x)$ (3.104) – atitinkamai pirmo ir antro sluoksnių (elementų) lenkimo momentai nuo išorinio poveikio $M_{\text{EK}}(x)$ (3.105), kintantys per elemento ilgį

Formulėse 3.103, 3.104, 3.105 skaičiuoti lenkimo momentai aprašyti tik pusei sijos tarpatramio. Čia x yra kintamasis nuo sijos tarpatramio krašto iki sijos centro. Dviatramės kompozitinės sijos lenkimo schema pateikta 3.3 pav.



3.3 pav. Dviatramės kompozitinės sijos lenkimo schema

$$M_1(x) = \frac{q \cdot l \cdot x - q \cdot x^2}{2 \cdot \left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)} \quad (3.103)$$

$$M_2(x) = \frac{q \cdot l \cdot x - q \cdot x^2}{2 \cdot (1 + \alpha)} \quad (3.104)$$

$$M_{\text{EK}}(x) = \frac{q \cdot l}{2} \cdot x - \frac{q \cdot x^2}{2} \quad (3.105)$$

Galutinė anglies plaušo su betonu sukibimo jėga per sijos ilgį, lygtis pagal 3.3 pav. skaičiuojamąją schemą (įrašomi nariai iš 3.103, 3.104, 3.105 formulių į 3.101 formulę):

$$T(x) = \frac{\left(k \cdot \left(\frac{q \cdot l \cdot x - q \cdot x^2}{2 \cdot \left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \cdot W_1 \cdot E_c} + \frac{q \cdot l \cdot x - q \cdot x^2}{2 \cdot (1 + \alpha) \cdot W_2 \cdot E_{CFRP}} \right) - \frac{\frac{q \cdot l}{2} \cdot x - \frac{q \cdot x^2}{2}}{W_1 \cdot E_c \cdot \left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)} - \frac{\frac{q \cdot l}{2} \cdot x - \frac{q \cdot x^2}{2}}{W_2 \cdot E_{CFRP} \cdot (1 + \alpha)} \right)}{\left(\frac{\frac{e_1}{\alpha} - e_2}{W_1 \cdot E_c \cdot \left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)} - \frac{1}{A_c \cdot E_c} - \frac{e_1}{W_1 \cdot E_c} + \frac{e_2 \cdot \alpha - e_1}{W_2 \cdot E_{CFRP} \cdot (1 + \alpha)} - \frac{1}{A_{CFRP} \cdot E_{CFRP}} - \frac{e_2}{W_2 \cdot E_{CFRP}} \right)} \quad (3.106)$$

Tangentiniai kontakto įtempiai gaunami diferencijuojant kontakto (šlyties) jėgą išilgai elemento ašiai (Balevičius, Augonis, 2018; Zabulionis, 2005; Ржаницын, 1982):

$$\tau(x) = \frac{\partial T(x)}{b_{CFRP} \cdot \partial x} \quad (3.107)$$

Į 3.107 formulę įrašoma anglies plaušo su betonu sukibimo jėga per sijos ilgį (3.106 formulė) ir gaunami tangentiniai kontakto įtempiai per elemento ilgį (3.108 formulė):

$$\tau(x) = \frac{\left(k \cdot \left(\frac{q \cdot l - q \cdot 2 \cdot x}{2 \cdot \left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \cdot W_1 \cdot E_c} + \frac{q \cdot l \cdot x - q \cdot 2 \cdot x}{2 \cdot (1 + \alpha) \cdot W_2 \cdot E_{CFRP}} \right) - \frac{\frac{q \cdot l}{2} - q \cdot x}{W_1 \cdot E_c \cdot \left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)} - \frac{\frac{q \cdot l}{2} - q \cdot x}{W_2 \cdot E_{CFRP} \cdot (1 + \alpha)} \right)}{\left(\frac{\frac{e_1}{\alpha} - e_2}{W_1 \cdot E_c \cdot \left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)} - \frac{1}{A_c \cdot E_c} - \frac{e_1}{W_1 \cdot E_c} + \frac{e_2 \cdot \alpha - e_1}{W_2 \cdot E_{CFRP} \cdot (1 + \alpha)} - \frac{1}{A_{CFRP} \cdot E_{CFRP}} - \frac{e_2}{W_2 \cdot E_{CFRP}} \right)} \cdot b_{CFRP} \quad (3.108)$$

Dviejų sluoksnių sukibimo įtempius galima aprašyti ir pagal sudėtinių strypų teoriją (Ржаницын, 1982), sprendžiant diferencialines lygtis. Šios lygtys su išskirstyta apkrova yra išspręstos (Balevičius ir kt., 2018) ir yra pateiktas sukibimo jėgos per elemento ilgį sprendinys (3.109 formulė):

$$T(x) = \frac{\Delta_0}{\gamma} \cdot \eta_0(x) + \frac{\Delta_1}{\gamma} \cdot \eta_1(x) \quad (3.109)$$

čia: γ – standumo koeficientas (3.110); $\eta_0(x)$ (3.111), $\eta_1(x)$ (3.112) – šlyties jėgos pasiskirstymo funkcija; Δ_0 (3.114), Δ_1 (3.115) – kreivio koeficientas

Standumo koeficiento skaičiavimas:

$$\gamma = \frac{1}{E_c \cdot A_c} + \frac{1}{E_{CFRP} \cdot A_{CFRP}} + \frac{(e_1 + e_2)^2}{E_c \cdot I_c + E_{CFRP} \cdot I_{CFRP}} \quad (3.110)$$

čia: I_c – gelžbetoninės sijos inercijos momentas; I_{CFRP} – anglies plaušo inercijos momentas

Šlyties jėgos pasiskirstymo funkcija $\eta_0(x)$:

$$\eta_0(x) = \frac{\cosh(\lambda \cdot x)}{\cosh\left(\lambda \cdot \frac{l}{2}\right)} - 1 \quad (3.111)$$

čia: λ – efektyvusis kontakto standumas (3.113)

Šlyties jėgos pasiskirstymo funkcija $\eta_1(x)$:

$$\eta_1(x) = x^2 + \frac{2}{\lambda^2} - \frac{2 + \left(\lambda \cdot \frac{l}{2}\right)^2}{\lambda^2} \cdot \frac{\cosh(\lambda \cdot x)}{\cosh\left(\lambda \cdot \frac{l}{2}\right)} \quad (3.112)$$

Efektyvusis kontakto standumas:

$$\lambda = \sqrt{\xi \cdot \gamma} \quad (3.113)$$

čia: ξ – šlyties modulis

Kreivio koeficientas Δ_0 :

$$\Delta_0 = k_0 \cdot \frac{M_{Ek}}{E_c \cdot I_c + E_{CFRP} \cdot I_{CFRP}} \cdot (e_1 + e_2) \quad (3.114)$$

čia: k_0 – apkrovos schemos faktorius ($k_0 = 1$)

Kreivio koeficientas Δ_1 :

$$\Delta_1 = k_1 \cdot \frac{M_{Ek}}{E_c \cdot I_c + E_{CFRP} \cdot I_{CFRP}} \cdot (e_1 + e_2) \quad (3.115)$$

čia: k_1 – momento pasiskirstymo funkcija ($k_1 = 4/l^2$)

Tangentinius sukibimo (šlyties) įtempius galima gauti pasinaudojus 3.107 formule. Į 3.107 formulę įrašius 3.109 išraišką ir atlikus sukibimo (šlyties) jėgos diferenciaciją pagal x , gaunami tangentiniai sukibimo (šlyties) įtempiai (3.116):

$$\tau(x) = \frac{1}{b_{CFRP} \cdot \gamma} \cdot (\Delta_0 \cdot \eta'_0(x) + \Delta_1 \cdot \eta'_1(x)) \quad (3.116)$$

čia: $\eta'_0(x)$ (3.117), $\eta'_1(x)$ (3.118) – šlyties įtempių pasiskirstymo funkcija

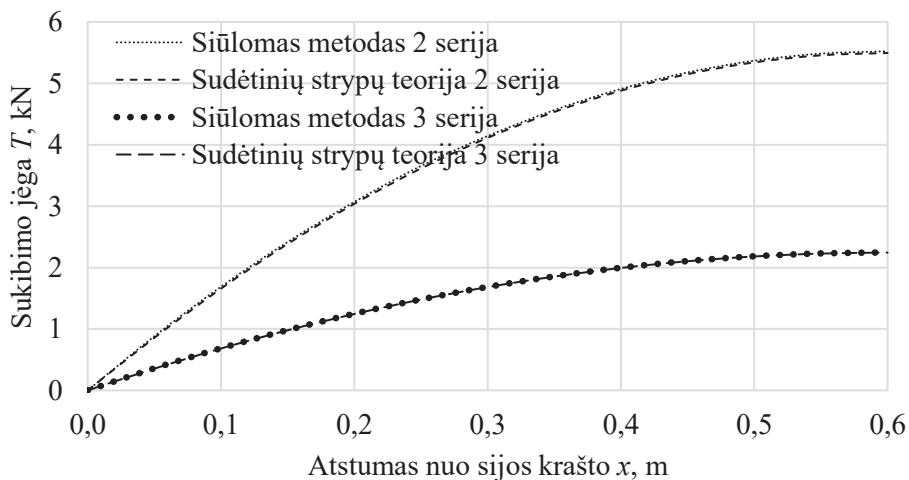
Šlyties įtempių pasiskirstymo funkcija $\eta'_0(x)$:

$$\eta'_0(x) = \frac{\lambda \cdot \sinh(\lambda \cdot x)}{\cosh\left(\lambda \cdot \frac{l}{2}\right)} \quad (3.117)$$

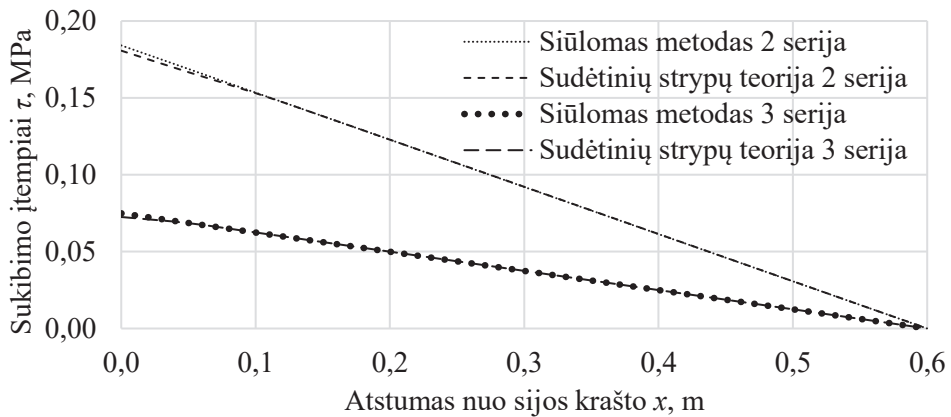
Šlyties įtempių pasiskirstymo funkcija $\eta'_1(x)$:

$$\eta'_1(x) = 2 \cdot x - \left(2 + \left(\frac{\lambda \cdot l}{2}\right)^2\right) \cdot \frac{\sinh(\lambda \cdot x)}{\lambda \cdot \cosh\left(\lambda \cdot \frac{l}{2}\right)} \quad (3.118)$$

3.4 ir 3.5 pav. atitinkamai pateiktas sukibimo (šlyties) jėgos ir tangentių įtempių pasiskirstymas per elemento ilgį. Skaičiuota, kad sukibimas tarp betono ir anglies plaušo yra idealus. Paveikslėliuose pavaizduota pagal 2 ir 3 serijos sijų parametrus skaičiuota sukibimo jėga ir tangentiniai įtempiai per elemento ilgį. Tik šiuo atveju skaičiavimuose traktuojama, kad anglies plaušo ilgis yra per visą elemento ilgį, o keturių taškų lenkimas pakeistas į dviatramės sijos lenkimą, kai apkrova yra išskirstytas krūvis. Išskirstytas krūvis pasirinktas $q = 132 \text{ kN/m}$, kuris atitinka maksimalų lenkimo momentą ($23,75 \text{ kNm}$) nuo 100 kN apkrovos, kuri naudota eksperimento metu. Šiuo atveju sumažėjęs inercijos momentas dėl plyšių nėra vertinamas.

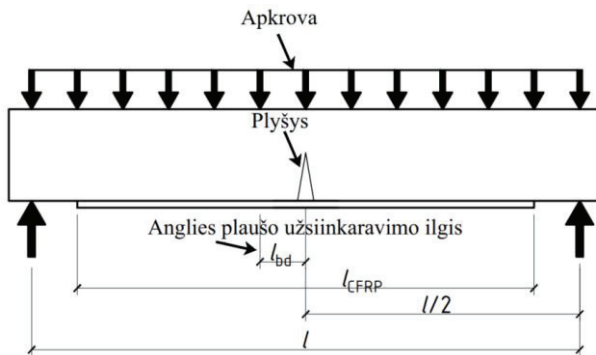


3.4 pav. Sukibimo (šlyties) jėgos tarp anglies plaušo ir betono pasiskirstymas per elemento ilgį



3.5 pav. Sukibimo (šlyties) įtempių tarp anglies plaušo ir betono pasiskirstymas per elemento ilgį

Vertinant 3.4 ir 3.5 pav. gautas sukibimo (šlyties) jėgos ir tangentinių įtempių pasiskirstymo per elemento ilgį kreives, matyti, kad siūlomo metodo šlyties jėga beveik idealiai sutampa su sudėtinių strypų teorijos gauta šlyties jėga, skirtumas neviršija 1 %, o tangentinių sukibimo įtempių – 2 %. Tai leidžia teigti, kad siūlomas šlyties jėgos ir įtempių metodas yra pakankamai tikslus. Šis metodas yra daug lengviau pritaikomas praktikoje, nes galima įvertinti įvairius apkrovimo būdus, išvengiant sudėtingų diferencialinių lygčių sprendimo. Siūlomą metodą galima pritaikyti ir supleišėjusiam elementui skaičiuoti.



3.6 pav. Supleišėjusios gelžbetoninės sijos, stiprintos anglies plaušu, sukibimo jėgos tarp anglies plaušo ir betono skaičiuojamoji schema

Siūlomas metodas gali būti pritaikomas skaičiuoti supleišėjusias gelžbetonines konstrukcijas, stiprintas anglies plaušu. Skaičiavimai atliekami kompozitinei sijai, kurios tarpatramio viduryje yra atsivėręs vienas plyšys. Bendras sijos vaizdas ir skaičiuojamoji schema yra pateikti 3.6 pav. Skaičiavimuose įvertinta, kad anglies plaušas yra sijos centre, o ilgis trumpesnis už sijos ilgį. Norint tai įvertinti, reikia pakoreguoti praslydimo skaičiavimo lygtį (3.102):

$$\varepsilon_{\text{slip}}^*(x) = k \cdot \left(\frac{M_1(x)}{W_1 \cdot E_c} + \frac{M_2(x)}{W_2 \cdot E_{\text{CFRP}}} \right) + (1 - k) \cdot \left(\frac{M_1 \left(\frac{l - l_{\text{CFRP}}}{2} \right)}{W_1 \cdot E_c} + \frac{M_2 \left(\frac{l - l_{\text{CFRP}}}{2} \right)}{W_2 \cdot E_{\text{CFRP}}} \right) \quad (3.119)$$

čia: $\varepsilon_{\text{slip}}^*(x)$ – skerspjūvio sluoksnių praslydimas, įvertinantis trumpesnę anglies plaušo ilgį ir kintantis per elemento ilgį; l_{CFRP} – anglies plaušo ilgis

Toje vietoje, kurioje yra atsivėręs plyšys, sukibimo tarp anglies plaušo ir betono nėra, t. y. plyšio vietoje yra maksimalus galimas praslydimas. Tolstant nuo plyšio, sukibimas tarp anglies plaušo ir betono pradeda didėti, kol pasiekia reikšmę, kuri lygi tokiai pat kaip kompozitinės sijos be plyšių. Šis atstumas, kuriame pilnai užsiinkaruoja anglies plaušas, pažymėtas l_{bd} . Skerspjūvio sluoksnių praslydimas plyšio veikimo zonoje, kintantis per elemento ilgį, išreiškiamas pagal 3.120 formulę:

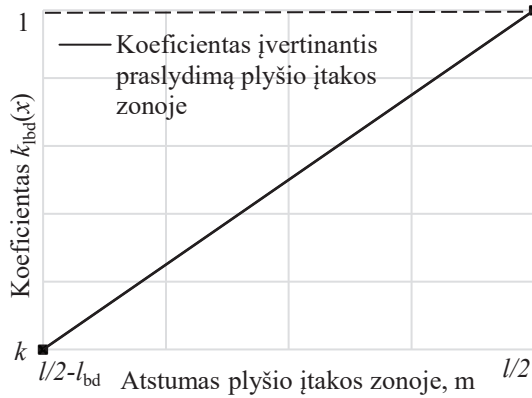
$$\varepsilon_{\text{slip,ibd}}^*(x) = k_{\text{ibd}}(x) \cdot \left(\frac{M_{1,\text{ibd}}(x)}{W_1 \cdot E_{c,\text{ibd}}(x)} + \frac{M_{2,\text{ibd}}(x)}{W_2 \cdot E_{\text{CFRP}}} \right) + (1 - k_{\text{ibd}}(x)) \cdot \left(\frac{M_1 \left(\frac{l - l_{\text{CFRP}}}{2} \right)}{W_1 \cdot E_c} + \frac{M_2 \left(\frac{l - l_{\text{CFRP}}}{2} \right)}{W_2 \cdot E_{\text{CFRP}}} \right) \quad (3.120)$$

čia: $\varepsilon_{\text{slip,ibd}}^*$ – skerspjūvio sluoksnių praslydimas plyšio veikimo zonoje, kintantis per elemento ilgį; $k_{\text{ibd}}(x)$ – koeficientas, įvertinantis praslydimą plyšio įtakos zonoje per elemento ilgį pagal tiesės funkciją (3.121); $M_{1,\text{ibd}}(x)$, $M_{2,\text{ibd}}(x)$ (3.122, 3.123) – atitinkamai pirmo ir antro sluoksnių (elementų) lenkimo momentai nuo išorinio poveikio plyšio įtakos zonoje, kintantys per elemento ilgį; $E_{c,\text{ibd}}(x)$ – betono deformacijų modulis plyšio įtakos zonoje, kintantis per elemento ilgį pagal laipsninės funkcijos lygtį (3.129)

Disertacijos autorius sijos plyšio įtakos zonoje siūlo naudoti koeficientą, kintantį pagal tiesės funkciją (3.7 pav.). Traktuojama, kad koeficientas $k_{\text{ibd}}(x)$ kinta nuo koeficiento k , kai anglies plaušas pilnai užsiinkaruoja iki vieno plyšio vietoje, kurioje sukibimo nėra. Koeficientas įvertina praslydimą plyšio įtakos zonoje per elemento ilgį pagal tiesės funkciją:

$$k_{\text{ibd}}(x) = k + (1 - k) \frac{\left(x - \frac{l}{2} + l_{\text{bd}}\right)}{l_{\text{bd}}} \quad (3.121)$$

čia: l_{bd} – atstumas, kurio reikia, kad anglies plaušas pilnai užsiinkaruotų (skaičiavimuose priimtas pagal (1.19) formulę); k – koeficientas, įvertinantis praslydimą (kinta nuo 0 iki 1,0 priklausomai nuo to, koks praslydimas yra nurodomas; kai $k = 0$, praslydimas nėra (sukibimas idealus); kai $k = 1,0$, nėra sukibimo (sluoksniai dirba, kaip atskiri elementai))



3.7 pav. Koeficientas, įvertinantis praslydimą plyšio įtakos zonoje per elemento ilgį

Pirmo ir antro sluoksnių (elementų) lenkimo momentas nuo išorinio poveikio plyšio įtakos zonoje, kintantis per elemento ilgį:

$$M_{1,lb d}(x) = \frac{q \cdot l \cdot x - q \cdot x^2}{2 \cdot \left(1 + \frac{1}{\alpha_{lb d}(x)}\right)} \quad (3.122)$$

$$M_{2,lb d}(x) = \frac{q \cdot l \cdot x - q \cdot x^2}{2 \cdot (1 + \alpha_{lb d}(x))} \quad (3.123)$$

čia: $\alpha_{lb d}(x)$ – pirmo ir antro sluoksnių standumų santykis plyšio įtakos zonoje per elemento ilgį (3.124)

Pirmo ir antro sluoksnių standumų santykis plyšio įtakos zonoje per elemento ilgį $\alpha_{lb d}(x)$:

$$\alpha_{lb d}(x) = \frac{E_{c,lb d}(x) \cdot I_1}{E_{CFRP} \cdot I_{CFRP}} \quad (3.124)$$

Betono deformacijų modulio plyšio įtakos zonoje kitimą galima aprašyti pagal tiesės lygtį, tačiau yra gaunamas tam tikras šuolis kontakto (šlyties) įtempių kreivėje. Norint to išvengti, disertacijos autorius siūlo priimti betono deformacijų modulio kitimą pagal laipsninės funkcijos lygtį. Šios lygties laipsnis priklauso nuo sluoksnių standumo santykio ir anglies plaušo užsiinkaravimo ilgio, tačiau didžiausiems (maksimaliems) įtempiams įtakos neturi.

$$E_{c,lb d}(x) = a \cdot x^v + c \quad (3.125)$$

čia: a – laipsninės funkcijos daugiklis (3.126); v – laipsnio rodiklis (gaunamas priartėjimo būdu: 1 serija – 12,55; 2 serija – 1,88; 3 serija – 2,67); c – laipsninės funkcijos konstanta (3.127)

Laipsninės funkcijos daugiklis:

$$a = \frac{E_{c,cr} - E_c}{\left(\frac{l}{2}\right)^v + \left(\frac{l}{2} - l_{bd}\right)^v} \quad (3.126)$$

čia: $E_{c,cr}$ – supleišėjusio skerspjūvio betono deformacijų modulis (3.129)

Laipsninės funkcijos konstanta:

$$c = E_c - a \cdot \left(\frac{l}{2} - l_{bd}\right)^v \quad (3.127)$$

Supleišėjusio betono deformacijų modulis gaunamas rašant skerspjūvio jėgų ir momentų pusiausvyros lygtis kaip supleišėjusiam elementui. Pagal gautas gniuždomos zonos aukščio ir santykinių deformacijų reikšmes galima užrašyti kreivio lygtį:

$$\frac{\varepsilon_{c,cr}}{x_{cr}} = \frac{M_{Ek}}{I_1 \cdot E_{c,cr}} \quad (3.128)$$

Iš kreivio lygties 3.128 išreiškiamas supleišėjusio betono deformacijų modulis traktuojant, kad inercijos momentas nekinta plyšio įtakos zonoje:

$$E_{c,cr} = \frac{M_{Ek} \cdot x_{cr}}{I_1 \cdot \varepsilon_{c,cr}} \quad (3.129)$$

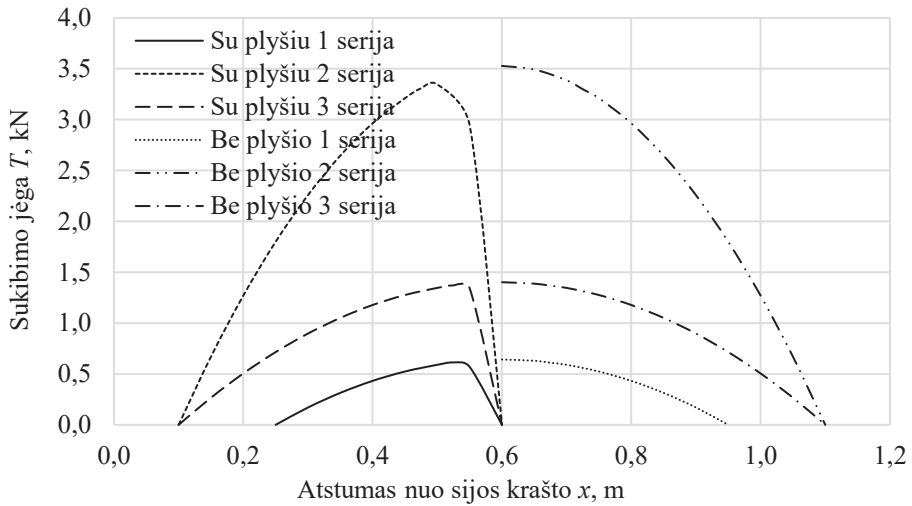
Pagal 3.106 formulę, įvertinus visus kintamuosius dydžius, turinčius įtakos sukibimo jėgai tarp betono ir anglies plaušo, rašoma sukibimo jėgos lygtis plyšio įtakos zonoje:

$$T_{lbd}(x) = \left(\begin{array}{c} \varepsilon_{slip,lbd}(x) - \frac{M_{Ek}(x)}{W_1 \cdot E_{c,lbd}(x) \cdot \left(1 + \frac{1}{\alpha_{lbd}(x)}\right)} \\ - \frac{M_{Ek}(x)}{W_2 \cdot E_{CFRP} \cdot (1 + \alpha_{lbd}(x))} \end{array} \right) / \quad (3.130)$$

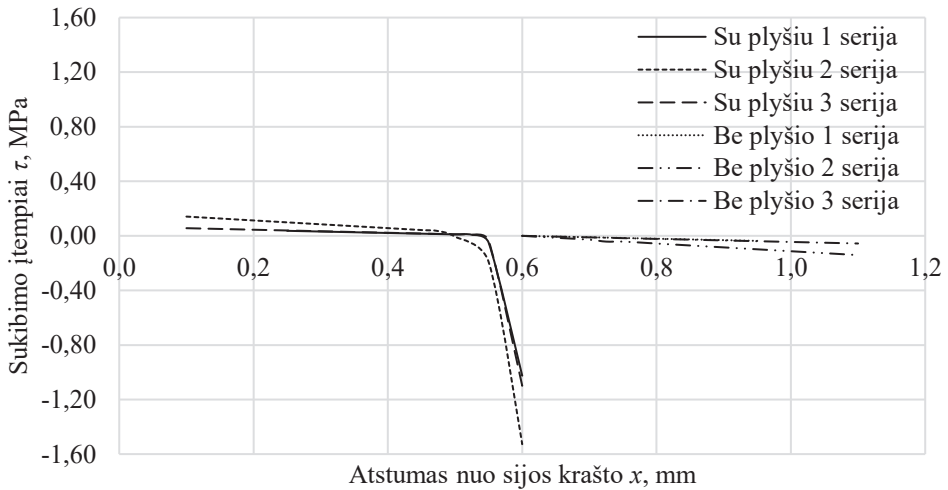
$$\left(\begin{array}{c} \frac{e_1}{\alpha_{lbd}(x)} - e_2 \\ W_1 \cdot E_{c,lbd}(x) \cdot \left(1 + \frac{1}{\alpha_{lbd}(x)}\right) - A_c \cdot E_{c,lbd}(x) - W_1 \cdot E_{c,lbd}(x) \\ + \frac{e_2 \cdot \alpha_{lbd}(x) - e_1}{W_2 \cdot E_{CFRP} \cdot (1 + \alpha_{lbd}(x))} - \frac{1}{A_{CFRP} \cdot E_{CFRP}} - \frac{e_2}{W_2 \cdot E_{CFRP}} \end{array} \right)$$

Tangentiniai kontakto įtempiai plyšio įtakos zonoje, gaunami diferencijuojant kontakto (šlyties) jėgą (3.130) išilgai elemento ašiai:

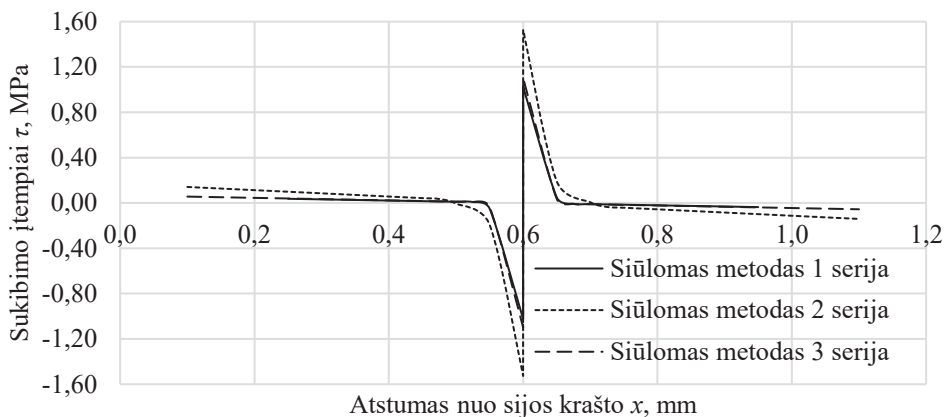
$$\tau_{lbd}(x) = \frac{\partial T_{lbd}(x)}{b_{CFRP} \cdot \partial x} \quad (3.131)$$



3.8 pav. 1–3 serijos kompozitinių supleišėjusių ir nesupleišėjusių sijų siūlomo metodo sukibimo (šlyties) jėgos tarp anglies plaušo ir betono pasiskirstymas per elemento ilgį



3.9 pav. 1–3 serijos kompozitinių supleišėjusių ir nesupleišėjusių sijų siūlomo metodo sukibimo (šlyties) įtempių tarp anglies plaušo ir betono pasiskirstymas per elemento ilgį



3.10 pav. 1–3 serijos kompozitinių supleišėjusių sijų siūlomo metodo sukibimo (šlyties) įtempių tarp anglies plaušo ir betono pasiskirstymas per elemento ilgį

Pagal disertacijos autoriaus pasiūlytą analitinį modelį (3.130 ir 3.131 formules), 3.8–3.10 pav. pateikta 1–3 serijos kompozitinių supleišėjusių ir nesupleišėjusių sijų šlyties jėgos ir tangentiniai įtempiai tarp betono ir anglies plaušo kitimas per elemento ilgį. 3.8 pav. ir 3.9 pav. pavaizduotos kreivės aprašo kompozitinės sijos tarp betono ir anglies plaušo kontaktą atstumu 0,0 m – 0,6 m nuo atramos, kai yra atsivėręs plyšys tarpatramio viduryje (0,6 m nuo sijos atramos) ir atstumu 0,6 m – 1,2 m nuo atramos, kai sija yra nesupleišėjusi. 3.10 pav. parodo supleišėjusių sijų tangentinių įtempių tarp betono ir anglies plaušo kitimą per elemento ilgį, kai vienas plyšys yra atsivėręs tarpatramio viduryje. Iš esmės supleišėjusios sijos kreivės aprašomos pagal dvi funkcijas, t. y. iki plyšio veikimo zonos ir plyšio veikimo zonoje. Iki plyšio veikimo zonos galima taikyti sudėtinių strypų teoriją, kurią aprašė kiti autoriai (Balevičius, Augonis, 2018), o antrą kreivę reikėtų taikyti pagal disertacijos autoriaus siūlomą analitinį modelį. Nuo sijos atramos iki plyšio veikimo zonos kontakto šlyties jėga didėja, o pasiekus ją, pradeda sparčiai mažėti, kol ties plyšiu tampa lygi 0 kN. Atvirkštinis procesas gaunamas su tangentiniais įtempiais, kurie nuo sijos atramos mažėja link sijos tarpatramio vidurio iki plyšio veikimo zonos, o pasiekę ją, pradeda sparčiai didėti ir maksimumą pasiekia ties plyšiu. Kontakto šlyties įtempiai supleišėjusioje sijos pjūvyje yra gerokai didesni už įtempius anglies plaušo galuose. Skirtumas siekia nuo 10,8 iki 27,9 kartų, priklausomai nuo serijos. Šis įtempių padidėjimas ties atsivėrusiu plyšiu gali stipriai sumažinti anglies plaušo sukibimą su gelžbetonine sija. Sukibimo jėgos skirtumas tarp nesupleišėjusios ir supleišėjusios sijos nėra toks didelis, palyginti su šlyties įtempiais, ir maksimali reikšmė skiriasi nuo 4,5 % iki 16,4 %. Šlyties jėgos ir tangentiniai įtempiai tarp betono ir anglies plaušo dydis priklauso nuo anglies plaušo ilgio, inkaravimo ilgio ir gelžbetoninės sijos bei anglies plaušo standumų. Siūlomo analitinio modelio kontakto įtempių tarp betono ir anglies plaušo palyginimas pateiktas 4.3 poskyryje.

3.3. Analitiniai metodai, leidžiantys įvertinti sukibimo jėgą tarp anglies plaušo ir betono

Viena iš svarbiausių gelžbetoninių sijų, sustiprintų anglies plaušu, savybių yra sukibimas tarp anglies plaušo ir betono. Sukibimo kokybė dažnai lemia konstrukcijos laikomąją galią ir standumą. Norint nustatyti maksimalų galimą sukibimą, iš esmės reikia žinoti, kokia maksimali tempimo įrąža gali veikti anglies plauše. Daug autorių nagrinėjo, kokia galima maksimali sukibimo (kontakto) jėga tarp betono ir anglies plaušo. Jų siūlomi analitiniai modeliai, formulės ir paaiškinimai pateikiami 1.3 poskyryje, gauti rezultatai – 3.1 lentelėje. Reikia paminėti, kad, skaičiuojant pagal minėtų autorių siūlomas metodikas, itin reikšmingas turėtų būti duomenų įvedimas siekiant, kad būtų įvesti teisingi dydžiai, nes skirtingi autoriai taiko skirtingus matavimo vienetus. Autoriai analitiniais modeliais gautus rezultatus lygina su rezultatais, gautais ištraukimo bandymo metu.

Norint apskaičiuoti maksimalią sukibimo jėgą, reikia nustatyti tam tikrus betono parametrus. Betono ir anglies plaušo mechaninės savybės bei sijos geometrija pateikta 2.1. ir 2.2. poskyriuose. 3.132 formulėje (Duarte ir kt., 2016; Lacroix, 1998) skaičiuojamas betono vidutinis cilindrinis gniuždomasis stipris f_{cm} , kuris taikomas vietoj charakteristinio betono cilindrinio gniuždomojo stiprio f_{ck} pagal 2.3 lentelėje aprašytus betono vidutinius kubinius gniuždomuosius stiprius. Betono vidutinis cilindrinis gniuždomasis stipris naudojamas skaičiuojant maksimalią galimą sukibimo jėgą pagal minėtų autorių siūlomas metodikas.

$$f_{cm} = \left(0,76 + 0,2 \log_{10} \frac{f_{cm,cube}}{19,6} \right) \cdot f_{cm,cube} \quad (3.132)$$

Pagal 3.133 ir 3.134 formulę (LST EN 1992-1-1. Eurokodas 2. Gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas. 1-1 dalis, 2007; *fib*, 2010) yra įvertinamas betono vidutinis tempiamasis stipris. Kai betono charakteristinis cilindrinis gniuždomasis stipris f_{ck} yra mažiau arba lygu 50 MPa:

$$f_{ctm} = 0,3 \cdot (f_{ck})^{2/3} \quad (3.133)$$

Kai betono charakteristinis cilindrinis gniuždomasis stipris f_{ck} yra daugiau už 50 MPa:

$$f_{ctm} = 2,12 \cdot \ln(1 + 0,1 \cdot (f_{ck} + \Delta f)) \quad (3.134)$$

čia: $\Delta f = 8$ MPa

3.1 lentelė. Analitiniai metodai, leidžiantys įvertinti sukibimo jėgą tarp anglies plaušo ir betono

Nr.	Autorius	Anglies plaušo ašinė jėga, įvertinus sukibimą tarp anglies plaušo ir betono, N_{CFRP} , kN		
		A1	A2	A3
1.	(Van Gemert, 1980)*	69,9	103,7	94,7
2.	(Tanaka, 1996)*	90,1	110,9	110,1
3.	(Yoshizawa, Wu, 1997)*	89,0	100,2	100,2

Nr.	Autorius	Anglies plaušo ašinė jėga, įvertinus sukibimą tarp anglies plaušo ir betono, N_{CFRP} , kN		
		A1	A2	A3
4.	(Maeda ir kt., 1997)	23,4	37,1	23,4
5.	(Neubauer, Rostásy, 1997)	14,2	25,1	13,8
6.	(Khalifa ir kt., 1998)	25,8	43,2	24,5
7.	(Adhikary, Mutsuyoshi, 2001)*	116,5	175,8	157,8
8.	(Chen, Teng, 2001)	15,0	26,5	14,7
9.	(De Lorenzis ir kt., 2001)	31,4	54,9	31,1
10.	(Yang ir kt., 2001)	13,8	33,2	13,4
11.	(Dai ir kt., 2005)	33,8	59,0	33,4
12.	(Lu ir kt., 2005)	31,4	54,9	31,1
13.	(Camli, Binici, 2007)	41,3	66,1	47,6
14.	(Izumo, 2003)	14,0	23,1	13,4
15.	(Iso, 2003)	35,6	62,7	35,3
16.	(Sato, 2003)	13,3	21,4	13,1
17.	Maksimali galima įrašų skaičiuojant pagal CFRP stiprumo ribą	56,8	170,0	56,8

* – autoriai, kurių siūlomose skaičiavimo metodikose nevertinamas anglies plaušo storis

Išanalizavus 3.1 lentelėje pateiktus rezultatus, nustatyta, kad skirtingų autorių siūlomų maksimalios sukibimo jėgos tarp anglies plaušo ir betono analitinių modelių rezultatai skiriasi kelis kartus. Didžiausi skirtumai gauti tarp tų rezultatų, kurių analitiniuose modeliuose nėra vertinamas anglies plaušo storis. 3.1 lentelėje šie analitiniai modeliai pažymėti žvaigždute (*). Šiose formulėse didžiausia sukibimo jėga gaunama įvertinus tik anglies plaušo ilgį, plotį ir betono klasę. Vien tik maksimali teorinė galima tempimo jėga anglies plauše (56,8 kN), apskaičiuota kaip skerspjūvio ploto ir plaušo stiprio sandauga, yra 2–3 kartus mažesnė, palyginti su autorių, kurie analitiniuose modeliuose nevertino plaušo storio t_{CFRP} . Palyginus autorių siūlomus analitinius modelius, kurie įvertina anglies plaušo storį, pagal A tipo sijų parametrus kinta tarp: A1 – 13,3-41,3 kN; A2 – 21,4-66,1 kN; A3 – 13,1-47,6 kN. Skirtumas tarp minimalios ir maksimalios galimos sukibimo jėgos yra 2–3 kartai. Pagal kai kurių autorių siūlomas metodikas, sukibimo jėga nesikeičia didinant sukibimo ilgį. Taip yra dėl to, kad formulėse yra vertinamas anglies plaušo sukibimo efektyvusis ilgis, tačiau neįvertinamas geometrinis ilgis. Efektyvųjų anglies plaušo sukibimo ilgį nulemia tik anglies plaušo storis, tamprumo modulis ir betono stipris.

Reikia paminėti, kad reikšmingos įtakos sukibimui tarp anglies plaušo ir betono turi paviršiaus paruošimas, naudojami klijai ir mastelio efektas (Pellegrino, 2016). Todėl naudojant skirtingas metodikas, gauti gana skirtingi rezultatai.

3.4. Rezultatai ir jų palyginimas

Lenkiamų gelžbetoninių sijų, sustiprintų anglies plaušu, stiprumo skaičiavimų rezultatai pagal ACI, ISIS ir *fib* normas pateikti 3.2 lentelėje ir lyginami su eksperimento metu gautais rezultatais. Skaičiavimo metodikos pagal šias normas yra pateiktos 1.4. poskyryje. Šiuo atveju skaičiuotos ir analizuotos A tipo kompozitinės sijos, nes šias normas galima pritaikyti tik toms sijomis, kurios yra apkrautos

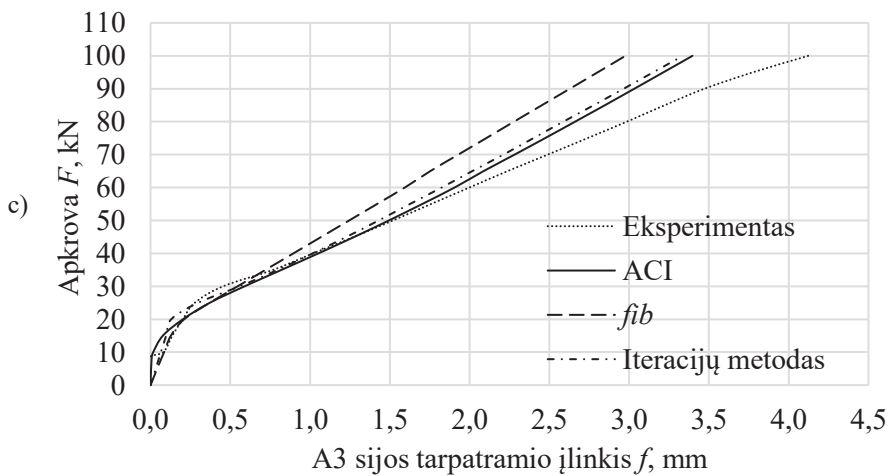
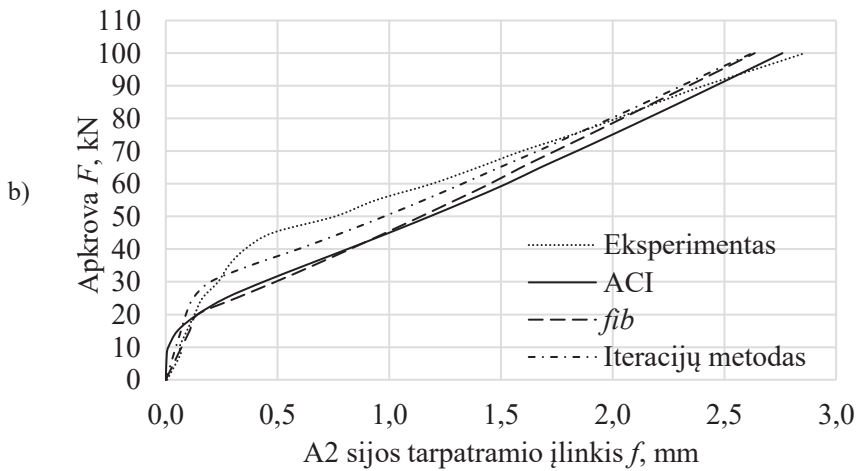
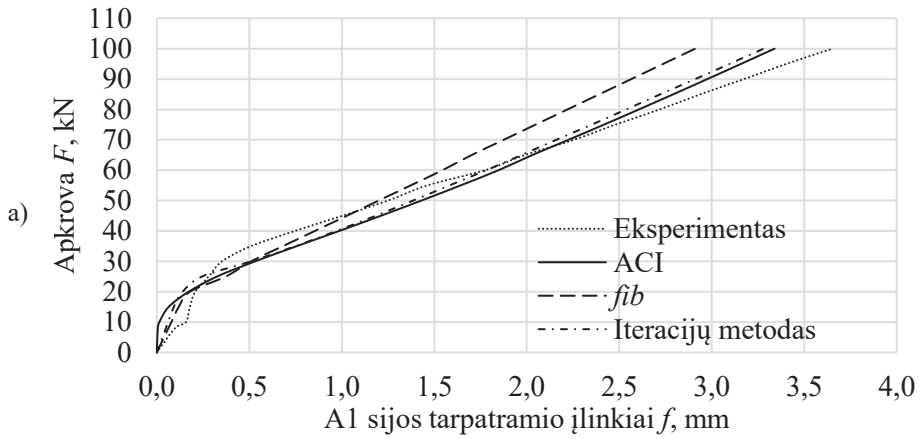
išankstine apkrova (stiprinant sijas, jos yra veikiamos apkrovos) arba be išankstinės apkrovos. Disertacijoje analizuotos B ir C tipo sijos turėjo išankstinę apkrovą prieš stiprinimą, tačiau stiprinimo metu jų neveikė apkrova.

3.11 pav. pateikta A tipo sijų įlinkių priklausomybė nuo apkrovos. Grafikuose pateikti įlinkiai iki 100 kN veikiamos apkrovos.

3.2 lentelė. Eksperimento metu gautos kompozitinės sijos suirimo jėgos palyginimas su ACI, ISIS ir *fib* normomis

Sija	Suirimo jėga F , kN			
	Eksperimentas	ACI	ISIS	<i>fib</i>
A1	110,2	129,6	119,5	127,1
B1	116,2	-	-	-
C1	117,6	-	-	-
A2	103,7	173,6	159,8	155,4
B2	127,3	-	-	-
C2	138,2	-	-	-
A3	120,9	129,3	118,9	125,1
B3	124,1	-	-	-
C3	133,0	-	-	-

Pagal 3.2 lentelėje pateiktus rezultatus matyti, kad pagal visas skaičiavimo normas (ACI, ISIS, *fib*) gautos kompozitinės sijos stiprumo reikšmės yra didesnės už eksperimento metu gautas reikšmes, išskyrus A3 siją, kuri skaičiuota pagal Kanados normas ISIS. Čia sijos stiprumas mažesnis 1,7 %. Palyginus visus rezultatus pagal skaičiavimo normas, didžiausia laikomoji galia buvo nustatyta pagal ACI normas. Taip yra todėl, kad, skaičiuojant pagal Amerikos normas, yra priimta, kad sukibimas tarp anglies plaušo ir betono yra pakankamas ir kompozitinės sijos laikomoji galia bus prarandama dėl betono arba anglies plaušo laikomosios galios netekimo. ACI normų laikomoji galia buvo nuo 2,0 % iki 11,7 % didesnė, palyginti su ISIS ir *fib* normomis. Palyginus skaičiavimo normų rezultatus su eksperimento rezultatais pagal kompozitinių sijų serijas, gauti tokie laikomosios galios nesutapimai: A1 sijos +8,4 % – +17,6 %; A2 sijos +49,9 % – +67,4 %; A3 sijos -1,7 % – +6,9 %. Čia + reiškia, kad laikomoji galia yra didesnė, palyginti su eksperimento metu gautomis reikšmėmis, - reiškia mažesnę laikomąją galią. Pagal lentelėje gautus skirtingų sijų tipų ir serijų rezultatus galima išvelgti tendenciją, kad A2 sija prarado laikomąją galią anksčiau dėl prasto sukibimo ir skirtumai tarp skaičiavimo normų bei eksperimento turėtų būti mažesni. Lyginant apskaičiuotas laikomosios galios reikšmes su didžiausiomis reikšmėmis kiekvienos serijos atskirai, skirtumai būtų dar mažesni: 1 serijos – +1,6 % – +10,2 %; 2 serijos – +12,4 % – +25,6 %; 3 serijos – -10,6 % – -2,8 %.



3.11 pav. Įlinkių nuo apkrovos lyginamosios priklausomybės pagal atliktą eksperimentą, ACI ir *fib* normas bei iteracijų metodą: a) A1 sija; b) A2 sija; c) A3 sija

3.11 pav. pateiktos A tipo kompozitinių sijų įlinkių nuo apkrovos lyginamosios priklausomybės pagal eksperimentą, ACI ir *fib* normas bei iteracijų metodą. Įlinkiai gauti eksperimento metu iki 18 kN apkrovos buvo mažesni arba lygūs įlinkiams, apskaičiuotiems pagal ACI ir *fib* normas (iki 25–32 kN apkrovos iteracijų metodu). Viršijus 18 kN (25–32 kN iteracijų metodu) ribą, sijos standumas pradėjo mažėti, kadangi pradėjo vertis plyšiai ir įlinkiai pradėjo sparčiau didėti (0,4–0,5 mm per 10 kN), skaičiuojant pagal normas ir iteracijų metodą. Ankstyvas plyšių atsivėrimas, skaičiuojant pagal ACI ir *fib* normas, yra todėl, kad, norint supaprastinti sijos skaičiavimus, pleišėjimo momentas skaičiuojamas įvertinus tik betono darbą, neatsižvelgiant į armatūros ir anglies plaušo kiekį. Tai ypač gerai pastebima kompozitinėje sijoje A2, kuri buvo stiprinta trimis anglies plaušo sluoksniais. Eksperimento metu sijos įlinkiai pradėjo sparčiai augti atsivėrus plyšiams ir įlinkių kreivė tapo plokštesnė (įlinkiai pradėjo augti greičiau), palyginti su ACI ir *fib* normomis bei iteracijų metodu. Sijos A1 įlinkiai tapo lygūs reikšmėms, gautoms skaičiuojant pagal normas, esant 48–70 kN, sijos A2 – esant 80–92 kN, sijos A3 – esant 34–48 kN. Visais atvejais, esant maksimaliai matuotai apkrovai (100 kN), eksperimento metu gauti įlinkiai buvo didžiausi, o įlinkiai, skaičiuoti pagal *fib* normas, – mažiausi. Palyginus eksperimento metu gautus įlinkių skirtumus, esant maksimalioms matuotoms apkrovoms, su normomis ir iteracijų metodu: sija A1 – pagal ACI normas -0,4 mm (-10,8 %), pagal *fib* – -0,8 mm (-21,6 %), pagal iteracijų metodą – -0,4 mm (-10,8 %); sija A2 – pagal ACI normas -0,1 mm (-3,6 %), pagal *fib* – -0,25 mm (-8,8 %), pagal iteracijų metodą – -0,25 mm (-8,8 %); sija A3 – pagal ACI normas -0,8 mm (-19,5 %), pagal *fib* – -1,2 mm (29,3 %), pagal iteracijų metodą – -0,85 mm (-20,7 %).

Gautų rezultatų statistinis įvertinimas pateiktas 4.2 lentelėje.

3.5. Trečiojo skyriaus išvados

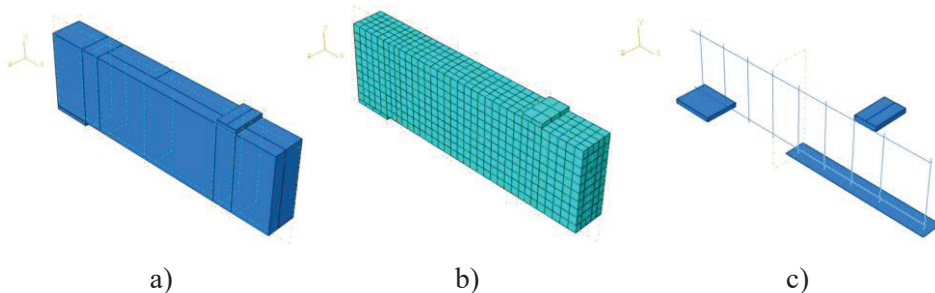
1. Siūlomo metodo ir sudėtinių strypų teorijos apskaičiuota šlyties jėga tampriam nesupleišėjusiam elementui tarpusavyje sutampa gerai ir skirtumas neviršija 1 %, o tangentinių sukibimo įtempių – 2 %. Galima daryti išvadą, kad siūlomas šlyties jėgos ir įtempių skaičiavimo analitinis metodas yra pakankamai tikslus. Siūlomas metodas yra daug lengviau pritaikomas praktikoje, nes galima paprasčiau aprašyti įvairius apkrovimo atvejus, išvengiant sudėtingų diferencialinių lygčių sprendimo. Siūlomu metodu galima apskaičiuoti supleišėjusios kompozitinės sijos kontakto šlyties įtempius, kurie plyšio veikimo zonoje yra gerokai didesni už įtempius anglies plaušo galuose. Šis skirtumas nagrinėtose sijose siekia nuo 10,8 iki 27,9 kartų, priklausomai nuo sijų tipo. Toks šlyties įtempių padidėjimas plyšio veikimo zonoje sumažina anglies plaušo sukibimą su gelžbetonine sija.
2. Analitinių modelių rezultatai, skaičiuojant maksimalią sukibimo jėgą tarp anglies plaušo ir betono, skiriasi kelis kartus, vertinant įvairių autorių siūlomas metodikas. Didžiausi skaičiavimo rezultatų skirtumai pastebimi analitiniuose modeliuose, kuriuose neaprašomas anglies plaušo storis. Šių modelių kintamieji yra anglies plaušo ilgis, plotis ir betono klasė. Palyginus autorių siūlomas analitinius modelius, kurie aprašo anglies plaušo storį pagal A tipo sijų parametrus, nustatyta, kad sukibimo jėga kinta: A1 – 13,3–41,3 kN; A2 – 21,4–66,1 kN; A3 – 13,1–47,6 kN. Skirtumas tarp minimalios ir maksimalios galimos sukibimo jėgos yra 2–3 kartai. Kai kurios autorių siūlomos metodikos nevertina anglies plaušo geometrinio ilgio, t. y. didėjant ilgiui, sukibimo jėga tarp anglies plaušo ir betono nesikeičia. Vietoj geometrinio anglies plaušo ilgio naudojamas efektyvusis anglies plaušo sukibimo ilgis, kuris priklauso nuo anglies plaušo ilgio, tamprumo modulio ir betono stiprio.
3. Skaičiuojant kompozitinės sijos laikomąją galią pagal ACI, ISIS ir *fib* normas, nustatyta, kad beveik visų sijų stiprumas yra didesnis už eksperimento rezultatus. Mažesnę laikomoji galia (1,7 %) gauta tik A3 sijos, kuri skaičiuota pagal ISIS normas. Lyginant skaičiavimo normas pagal laikomąją galią, didžiausios reikšmės gautos skaičiuojant pagal ACI normas. ACI normose nurodoma, kad sukibimas tarp anglies plaušo ir betono yra pakankamas, sija netenka laikomosios galios dėl betono arba anglies plaušo suirimo. Skaičiuojant pagal ACI normas, laikomoji galia buvo nuo 2,0 % iki 11,7 % didesnė, palyginti su ISIS ir *fib* normomis. Palyginus skaičiavimo normų rezultatus su eksperimento rezultatais pagal kompozitinių sijų serijas, gauti laikomosios galios skirtumai: A1 sijos +8,4 % – +17,6 %; A2 sijos +49,9 % – +67,4 %; A3 sijos -1,7 % – +6,9 %.
4. Kompozitinės sijos įlinkiai, gauti eksperimento metu iki 18 kN apkrovos, buvo mažesni arba lygūs įlinkiams, apskaičiuotiems pagal ACI ir *fib* normas, o iki 25–32 kN – pagal iteracijų metodą. Viršijus 18 kN ribą pagal ACI ir *fib* normas ir 25–32 kN ribą iteracijų metodu, apskaičiuotos sijos standumas pradėjo mažėti, atsivėrė pirmieji plyšiai ir įlinkiai pradėjo sparčiau didėti (0,4–0,5 mm per 10 kN). Įlinkiai, gauti eksperimento metu, esant 100 kN apkrovai, buvo didžiausi, palyginti su skaičiavimo normomis, mažiausi – pagal *fib* normas.

4. LENKIAMŲ ANGLIES PLAŠŲ SUSTIPRINTŲ GELŽBETONINIŲ SIJŲ SKAITINIS MODELIAVIMAS

Dalis šiame skyriuje pateiktos medžiagos buvo publikuota mokslo žurnale (Lisauskas ir kt., 2020).

4.1. Baigtinių elementų modelio sudarymas

Gelžbetoninių sijų, sustiprintų anglies plaušu, analizei ir palyginimui buvo sudarytas baigtinių elementų modelis. Skaičiavimo modelis buvo rengiamas baigtinių elementų programa „Abaqus“, norint maksimaliai atvaizduoti eksperimento metu išbandytą kompozitinę siją, kurios skaičiuojamoji schema pavaizduota 2.9 pav. Programa plačiai naudojama tarp mokslininkų (Bsisu, Hussein, Sargand, 2017; Kishi ir kt., 2005), nes yra vaizdi, vartotojiška ir turi daug galimybių. Buvo modeliuojama ne visa sija, o tik jos ketvirtis, taip norint sumažinti skaičiavimo resursus (Mabrouk, Ramadan, 2017; Paul, Sahu, 2020). Skaičiavimams buvo pasitelktas standartinis analizės tipas. 4.1 pav. pavaizduotas skaičiuojamasis baigtinių elementų modelis, baigtinių elementų dydis ir elementai. Plieninė sijos atrama ($100 \times 80 \times 10$ mm), gelžbetoninė sija ($650 \times 80 \times 200$ mm) ir atrama apkrovai ($80 \times 50 \times 10$ mm) ketvirtyje modelio buvo sukurtos kaip aštuonių taškų tiesialinijinis elementas (C3D8R). Kadangi anglies plaušas yra itin plonas ($500 \times 50 \times 0,166$ mm), palyginti su kitais elementais, jis buvo skaičiuotas, kaip keturių taškų dvigubai išlenktas kevalas (S4R). Išilginė (ilgis 625 mm) ir skersinė (ilgis 160 mm) armatūra buvo modeliuojama kaip tiesialinijinė 3D santvara (T3D2). Betono kubelių dydis – 10 mm; anglies plaušo – 16,6 mm; armatūros – 20 mm.



4.1 pav. Gelžbetoninės sijos, stiprintos anglies plaušu, vaizdai programoje „Abaqus“:
a) bendras sijos vaizdas; b) sijos baigtinių elementų vaizdas; c) visų elementų vaizdas atskirai, neįskaitant betono

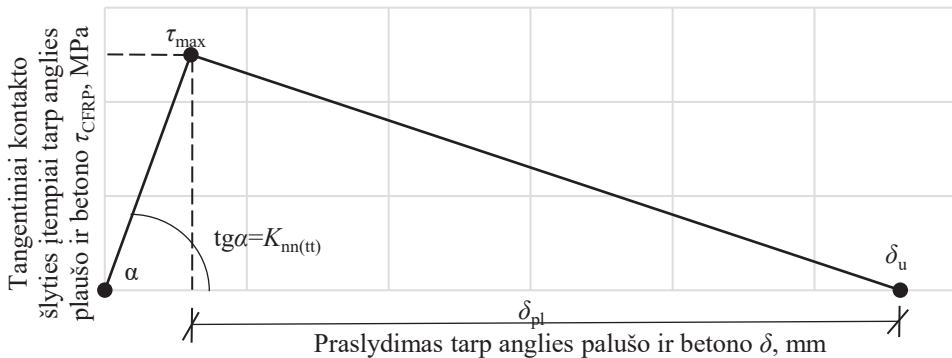
Apkrova ant sijos buvo imituota kaip linijinis poslinkis, skaičiavimo programoje siekiant išvengti galimai matematiškai neišsprendžiamų lygčių. Priverstinis linijinis poslinkis modeliuotas ant plokštelės, esančios apkrovos pridėjimo plote. Vertikalūs linijiniai poslinkiai buvo suvaržomi atraminės plokštelės apačioje. Kompozitinė sija su atramine ir apkrovos plokštele buvo sujungtos idealiu ryšiu, kaip ir išilginė bei skersinė armatūra su betonu. Anglies plaušo sukibimo su betonu modelis ir savybės bei naudojamų medžiagų modeliai aprašyti 4.2 poskyryje.

Sijos su išankstiniais plyšiais buvo aprašomos trimis žingsniais: 1) gelžbetoninė sija apkraunama eksperimento metu taikyta apkrova; 2) gelžbetoninė sija nukraunama; 3) aktyvuojant sukibimą tarp anglies plaušo ir betono, kompozitinė sija apkraunama užduodant priverstinį poslinkį. Šio modelio trūkumas – liekamieji įtempiai. Taikant baigtinių elementų metodą, buvo gauti ženkliai didesni liekamieji įtempiai nei eksperimento metu, tai neatspindi realių armatūros pradinių įtempių prieš apkrovimą.

4.2. Teoriniai medžiagų modeliai

Atliekant gelžbetoninių konstrukcijų, sustiprintų anglies plaušu, skaičiavimus baigtinių elementų metodu, labai svarbu tiksliai įvertinti sukibimą tarp anglies plaušo ir betono. Daug mokslininkų tyrinėjo sukibimą, kad būtų įmanoma kuo tiksliau aprašyti skaičiuojamąjį modelį (Arruda ir kt., 2016; Bsisu ir kt., 2017; Camata ir kt., 2015; Francois ir kt., 2002; Niu, Wu, 2006; Obaidat ir kt., 2010; Rizkalla ir kt., 2002; Saadatmanesh, Malek, 1998). 4.2 pav. pateiktas supaprastintas sukibimo tarp anglies plaušo ir betono modelis (ABAQUS, 2018), o

4.1 lentelėje pateikti skaičiavimuose naudoti ir autorių siūlomi sukibimo modelio parametrai. Tarp betono ir anglies plaušo buvo pasirinktas kietas ryšys (angl. *hard contact*). Tai reiškia, kad anglies plaušas negali įsispausti į betono paviršių. Modelis buvo aprašomas pagal šlyties įtempių priklausomybę nuo praslydimo taikant dvilinijinę funkciją. Pagal nurodytą standumą praslydimas tarp anglies plaušo ir betono didėja tol, kol šlyties įtempiai τ_{\max} pasiekia maksimalią reikšmę. Pasiekę maksimalią reikšmę, kontakto zonos įtempiai pradeda mažėti ir sukibimas tampa lygus nuliui, kai anglies plaušo praslydimas pasiekia ribinį praslydimą δ_u . Sukibimo standumas buvo įvertintas pagal 4.135 formulę. Apskaičiavus kompozitinę siją pagal kraštutines ($K_{nn} = 16,5 \text{ MPa/mm}$, $K_{tt} = 0,41 \text{ MPa/mm}$ ir $K_{nn} = 12800 \text{ MPa/mm}$, $K_{tt} = 16,5 \text{ MPa/mm}$) kontakto standumo parametru reikšmes, gauta, kad parametru dydžiai didelės įtakos neturėjo. Skirtumas siekė iki 6,2 %.



4.2 pav. Tangentinių kontakto šlyties įtempių tarp anglies plaušo ir betono-praslydimo kreivė

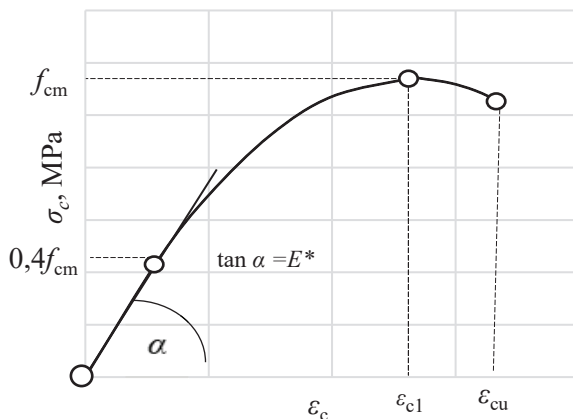
4.1 lentelė. Sukibimą nusakančių parametru reikšmės programoje „Abaqus“, aprašant sukibimą tarp anglies plaušo ir betono

Kontakto zonos parametrai programoje „Abaqus“	Priimta reikšmė baigtinių elementų modelyje	Reikšmių rėžiai, kuriuos pateikia kiti autoriai
Normalinis standumas, K_{nn} MPa/mm	2063	16,5–12800
Šlyties standumas, K_{tt} MPa/mm	2063	0,41–2900
Maksimalūs šlyties įtempiai MPa	25	0,21–25
Plastinis praslydimas δ_{pl} mm	1,0	0,127–1,0
Klumpumo koeficientas	0,001	0,001

$$K_{mm(tt)} = \frac{E_{EpoX}}{t_{EpoX}}; \quad (4.135)$$

čia: E_{EpoX} – klijų tamprumo modulis; t_{EpoX} – klijų storis

Betonas yra tamptriai plastinė medžiaga, tad norint gauti kuo tikslesnius rezultatus, reikia aprašyti netiesinį fizikinį betono darbą. Norint gauti šį modelį, reikia sudaryti betono įtempių-santykinų deformacijų kreivę (4.3 pav.). 4.136 formulėje (fib, 2010; LST EN 1992-1-1. Eurokodas 2. Gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas. 1-1 dalis, 2007) pateikta priklausomybė, pagal kurią įvertinamas betono netiesiškumas. Baigtinių elementų modelyje betonas vertinamas kaip izotropinė medžiaga.

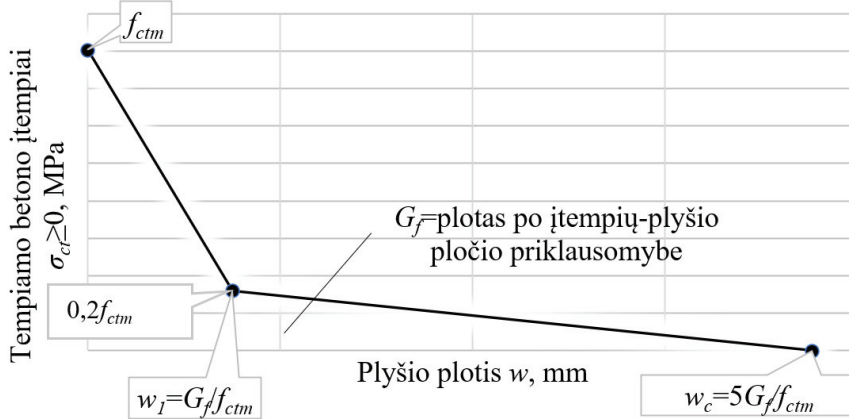


4.3 pav. Gniuždomo betono įtempių-santykinų deformacijų kreivė

$$\frac{\sigma_c}{f_{cm}} = \frac{k \cdot \eta - \eta^2}{1 + (k - 2) \cdot \eta}; \text{ kai } |\epsilon_c| < |\epsilon_{c1}|; \quad (4.136)$$

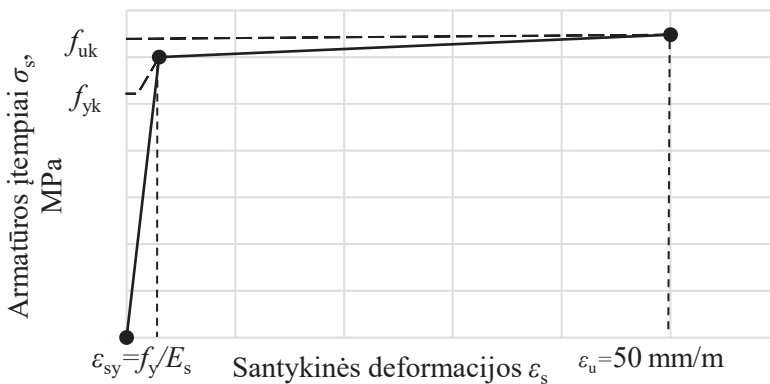
čia: $k = 1,05E_{cm}|\epsilon_{c1}|/f_{cm}$; $\eta = \epsilon_c / \epsilon_{c1}$; σ_c – betono gniuždomieji įtempiai; f_{cm} – vidutinis betono cilindrinis gniuždomasis stipris; ϵ_c – gniuždomo betono santykinė deformacija; ϵ_{cu} – ribinė gniuždomo betono santykinė deformacija; ϵ_{c1} – gniuždomo betono santykinė deformacija, esant didžiausiems gniuždymo įtempiams; E_{cm} – vidutinis gniuždomo betono tamprumo modulis.

Norint gauti tikslesnius rezultatus, reikia aprašyti ne tik gniuždymo, tačiau ir tempimo betono darbą. Baigtinių elementų programa „Abaqus“ suteikia galimybę betono tempimo įtempius aprašyti trimis skirtingais variantais: priklausomybe nuo plyšio pločio (*fib*, 2010); santykinių deformacijų priklausomybe arba irimo energija. Buvo išnagrinėti visi trys variantai ir pasirinktas pirmasis variantas, t. y. betono tempimo įtempių priklausomybė nuo plyšio pločio. Skaičiuojant pagal visus tris skirtingus variantus, skaičiuojamieji modeliai didelės įtakos galutiniams stiprumo ir standumo rezultatams neturėjo. Betono tempimo įtempių priklausomybė nuo plyšio pločio pateikta 4.4 pav.



4.4 pav. Tempimo betono įtempių-plyšio pločio priklausomybė

Armatūros įtempių-santykinių deformacijų kreivė buvo aprašoma kaip dvilininė funkcija. Kreivė pateikta 4.5 pav. Anglies plaušui konstatuota tiesinė įtempių ir santykinių deformacijų priklausomybė.



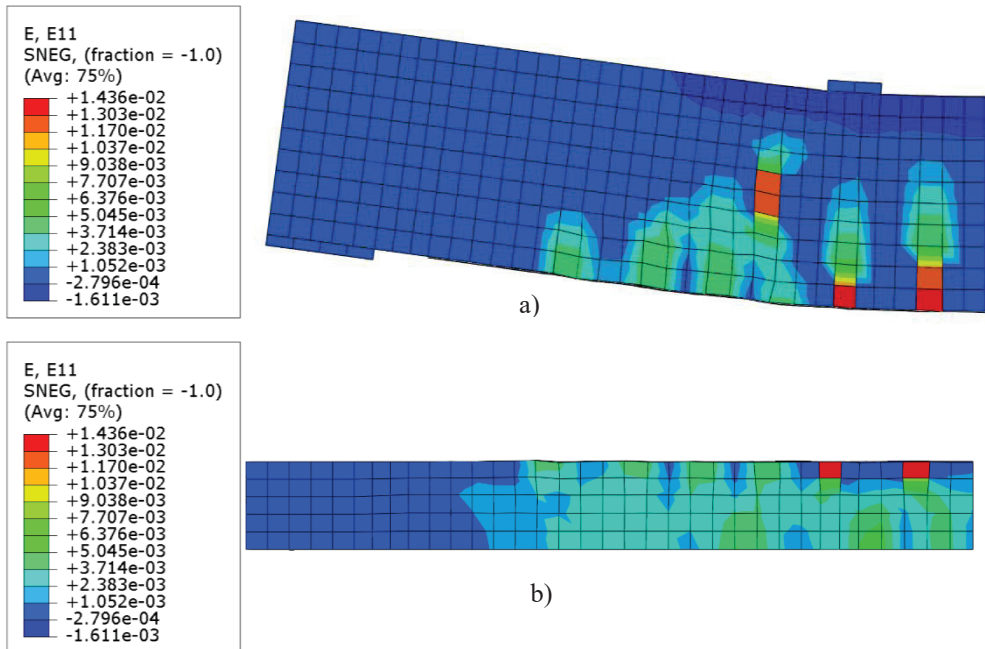
4.5 pav. Armatūros įtempių-santykinių deformacijų priklausomybė

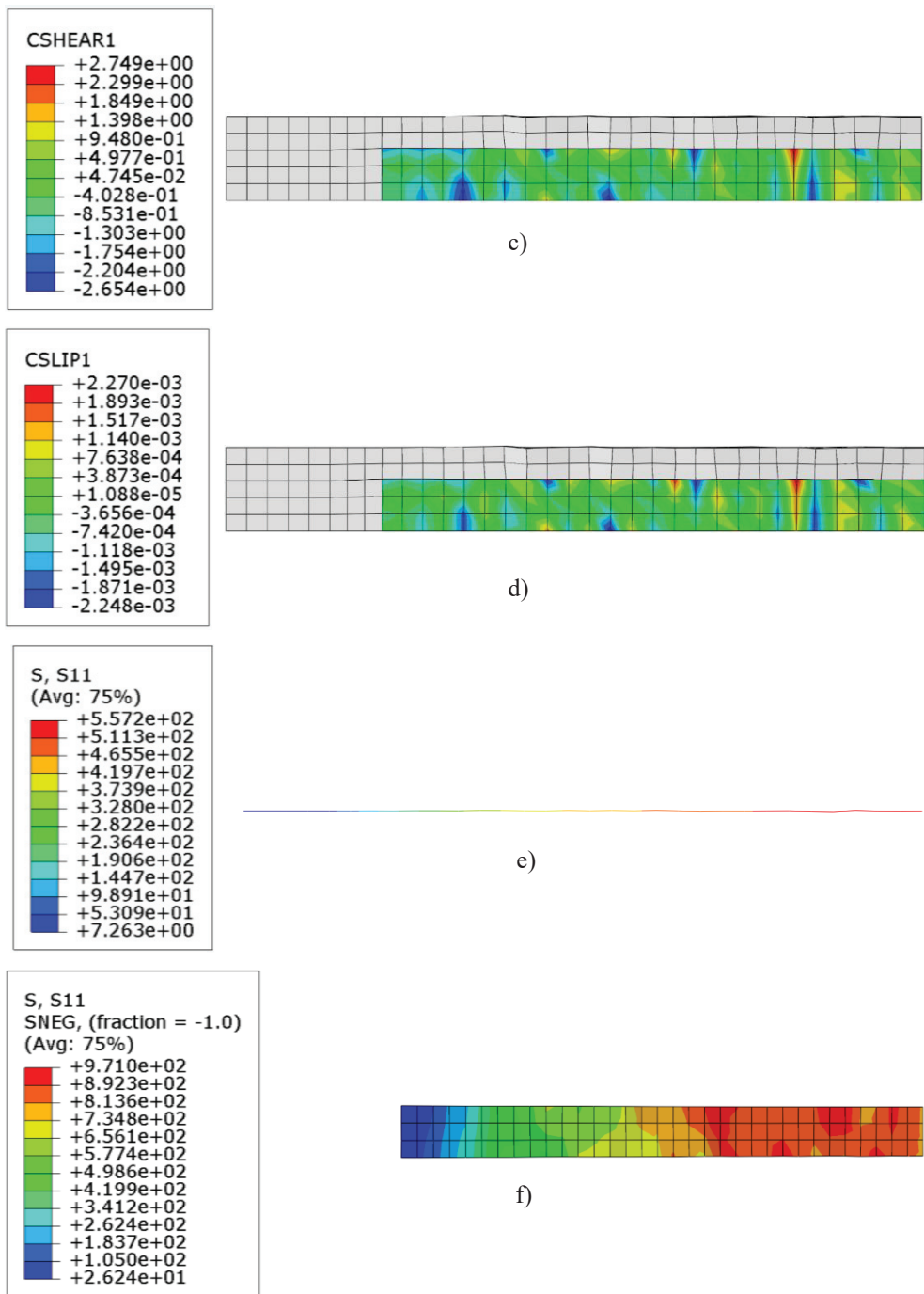
4.3. Rezultatai ir jų palyginimas

Šiame poskyryje pateikiami kompozitinės sijos A3 santykinių deformacijų, kontakto zonos tarp anglies plaušo ir betono šlyties įtempių bei santykinio praslydimo

rezultatai. Taip pat nurodomi išilginės tempiamos armatūros ir anglies plaušo normalinių įtempių rezultatai, gauti baigtinių elementų programa „Abaqus“, kai sijos apkrova buvo 100 kN (4.6 pav.). 4.7 pav. pavaizduoti kompozitinės A3 sijos siūlomo metodo ir programos „Abaqus“ kontakto įtempių plyšio vietoje rezultatai. 4.8 pav. pateikti ir lyginami įlinkių rezultatai, gauti baigtinių elementų metodu, su atliktu eksperimentu, euro kodu ir iteracijų metodu. Skaičiavimai buvo atliekami A tipo kompozitinėms sijoms, kurios neturėjo pradinių plyšių. Pasirinkta maksimali apkrovos pateikimo riba iki 100 kN, nes eksperimento metu įlinkio matavimas neviršijo šios ribos. Detalesnis iteracijų metodo ir euro kodų aprašymas pateiktas 3 skyriuje.

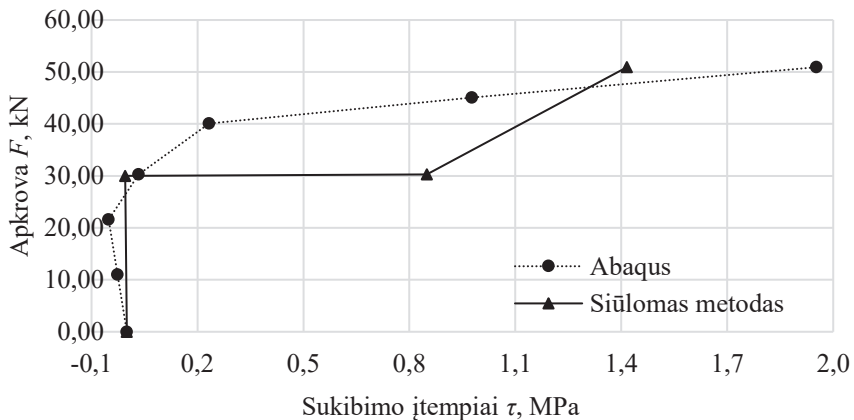
4.6 pav. a) ir b) pavaizduotos kompozitinės sijos betono santykinės deformacijos. Pateiktame paveikslėlyje galima pamatyti plyšių atsivėrimo pagal santykinės betono deformacijos vietas. Tempiamo betono maksimalios santykinės deformacijos yra $0,15 \times 10^{-3}$ (fib, 2010), kurias viršijus stipris pradeda mažėti, kol atsiveria plyšys. 4.6 pav. c) ir d) pavaizduoti kontakto zonos tarp anglies plaušo ir betono tangentiniai šlyties įtempiai bei santykinis praslydimas. Maksimalūs šlyties įtempiai yra 2,75 MPa, o santykinis praslydimas – $2,27 \times 10^{-3}$. 4.6 pav. e) ir f) pateikti tempiamos išilginės armatūros ir anglies plaušo normaliniai įtempiai. Maksimalūs armatūros įtempiai yra 557 MPa, o anglies plaušo – 971 MPa, esant 100 kN apkrovai.





4.6 pav. Kompozitinės sijos A3 rezultatai, gauti programa „Abaqus“, kai sijos apkrova 100 kN: a) sijos betono santykinės deformacijos (vaizdas iš priekio); b) sijos betono santykinės deformacijos (vaizdas iš apačios); c) kontakto zonos tarp anglies plaušo ir betono įtempiai [MPa]; d) kontakto zonos santykinis praslydimas; e) išilginės tempiamos armatūros normaliniai įtempiai [MPa]; f) anglies plaušo normaliniai įtempiai [MPa]

Norint patikrinti siūlomą metodą ir įvertinti, ar jis pakankamai tiksliai aprašo tangentinių įtempių pasiskirstymą kompozito plyšio vietoje tarp betono ir anglies plaušo, buvo atlikta tangentinių įtempių palyginamoji analizė su rezultatais, gautais programa „Abaqus“ (4.7 pav.). Pasirinktas skaičiuojamasis pjūvis yra sijos viduryje, kur veikia didžiausias lenkimo momentas ir atsivėrė pirmasis plyšys. Didžiausi tangentiniai įtempiai gauti programa „Abaqus“, kai siją veikė 50 kN apkrova. Pažymėtina, kad skaičiavimuose naudoti vidutiniai skerspjūvio šlyties įtempiai. Tangentiniai įtempiai nagrinėti pasiūlytu metodu iki 30 kN apkrovos kaip tampriam elementui, o virš 30 kN – kaip elementui, kuriame atsivėrė plyšys (supleišėjęs skerspjūvis). Esminę įtaką šlyties įtempiams turi anglies plaušo užsiinkaravimo ilgis. Kuo didesnis užsiinkaravimo ilgis, tuo mažesni įtempiai gaunami, ir atvirkščiai – kuo mažesnis užsiinkaravimo ilgis, tuo gaunami didesni įtempiai. Skirtingi autoriai pateikia skirtingą metodiką, skirtą skaičiuoti užsiinkaravimo ilgį bei skaičiuotiną maksimalią sukibimo jėgą, kurią gali atlaikyti anglies plaušas. Šių autorių metodikos pateiktos 1.3 poskyryje. Skaičiuoti pasirinkta 1.17 formulė, iš kurios išskaičiuojamas skaičiuotinas anglies plaušo inkaravimo ilgis pagal jėgą, kuri gauta anglies plauše suirimo metu. Pagal išskaičiuotą inkaravimo ilgį buvo gauta siūlomo metodo kreivė nuo 30 kN iki 50 kN. Siūlomo metodo maksimalių tangentinių įtempių skirtumas nuo rezultatų, gautų programa „Abaqus“, buvo 27,3 %. Ši įtempių skirtumą galėjo lemti inkaravimo ilgis ir programa „Abaqus“ pasirinktas elementų tinklelio matmuo bei betono ir plaušo sukibimą apibūdinantys parametrai.



4.7 pav. Kompozitinės A3 sijos siūlomo metodo kontakto įtempių plyšio vietoje rezultatų palyginimas su rezultatais, gautais programa „Abaqus“

Analizuojama 4.8 pav. pateikta apkrovos-įlinkių priklausomybė. A1 sija, kuriai stiprinti yra naudojamas trumpiausias anglies plaušas, įlinkių rezultatai pagal eurokodą, baigtinių elementų ir iteracijų metodus buvo mažesni, palyginti su eksperimentu iki 25 kN, kai pradėjo atsivėrinėti pirmieji plyšiai. Anksčiausiai plyšiai atsivėrė skaičiuojant pagal iteracijų metodą, kai įlinkiai pradėjo sparčiau didėti. Iteracijų metu skaičiuotų įlinkių augimas buvo ne toks spartus, palyginti su kitomis skaičiavimo metodikomis (0,35 mm per 10 kN). Didžiausias įlinkių skirtumas, esant maksimaliai 100 kN apkrovai, gautas tarp eksperimento rezultatų ir EC2 metodikos

apskaičiuotų reikšmių, tai – 28 % skirtumas. Mažiausias įlinkių skirtumas gautas tarp eksperimento rezultatų iteracijų metodo apskaičiuotų reikšmių, tai – 16 % skirtumas.

A2 sijai, kurioje gelžbetoninės sijos stiprinimui panaudotas trijų sluoksnių anglies plaušas, įlinkių rezultatai tarp eksperimento ir eurokodo bei iteracijų metodo iki 30 kN, tarp eksperimento bei baigtinių elementų metodo iki 80 kN buvo praktiškai identiški (skirtumas neviršijo 5 %). Skaičiuojant pagal EC2, standumas buvo didžiausias iki 85 kN apkrovos, virš 85 kN apkrovos didesnę standumą turėjo tik iteracijų metodu skaičiuotos kompozitinės sijos. Didžiausias įlinkio skirtumas siekė 33 %, mažiausias – 0 %. Skaičiuojant iteracijų metodu, didžiausias standumo kritimas ir rezultatų skirtumas buvo ties 40–45 kN (60 %), didėjant apkrovai įlinkių skirtumas mažėjo ir rezultatai susilygino su eksperimento rezultatais ties 75 kN, viršijus šią apkrovą – iteracijų metodu gauti įlinkiai buvo mažesni už eksperimento metu gautus rezultatus. Esant maksimaliai matuotai 100 kN apkrovai, įlinkių skirtumas pagal EC2 normas nesiskyrė daugiau, kaip 2 %, palyginus su eksperimentu. Baigtinių elementų ir iteracijų metodais apskaičiuoti įlinkiai skyrėsi 0,3 mm, palyginti su eksperimentu, t. y. apie 11 %.

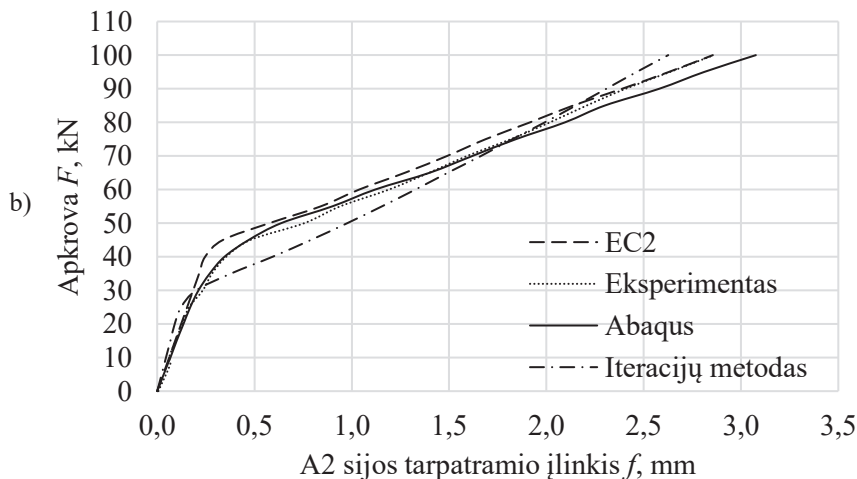
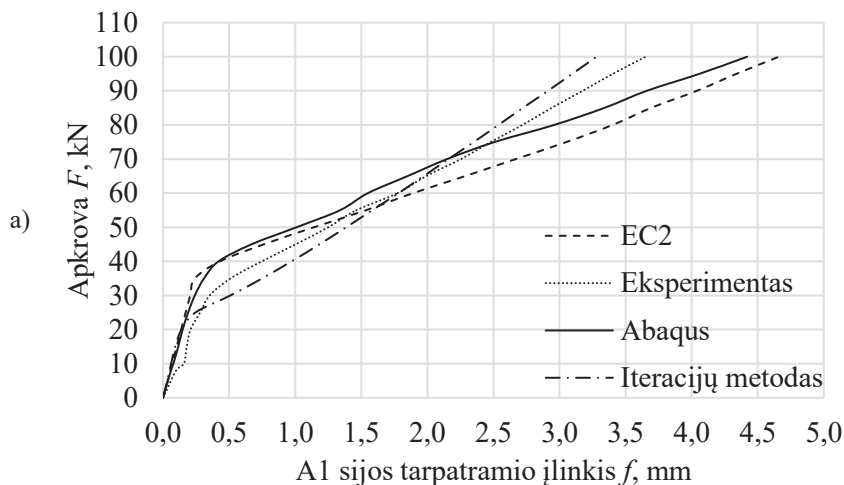
Skaičiuojant baigtinių elementų metodu, sijos A3 lenkiamasis standumas, kai gelžbetoninė sija stiprinama vienu sluoksniu anglies plaušo, buvo didžiausias iki 68 kN, palyginti su kitais skaičiavimo metodais. BEM ir eksperimento įlinkio rezultatai nuo 68 kN iki 100 kN buvo panašūs ir skirtumas neviršijo 6 %. Įlinkio rezultatai, gauti skaičiuojant pagal EC2, buvo labai panašūs į rezultatus, gautus eksperimento metu iki 65 kN, kur vėliau įlinkiai pradėjo labiau augti (0,4 mm per 10 kN), skaičiuojant pagal EC2. Didžiausias skirtumas, palyginti su eksperimento rezultatais, pasiektas esant maksimaliai matuotai 100 kN apkrovai ir sudarė 14 %. Įlinkiai, skaičiuojant iteracijų metodu, buvo panašūs į eksperimento metu gautus įlinkius iki 50 kN. Vėliau įlinkių augimas sulėtėjo. Didžiausias skirtumas tarp rezultatų, gautų eksperimento metu, ir iteracijų metodu, esant maksimaliai matuotai 100 kN apkrovai, siekė 20 %.

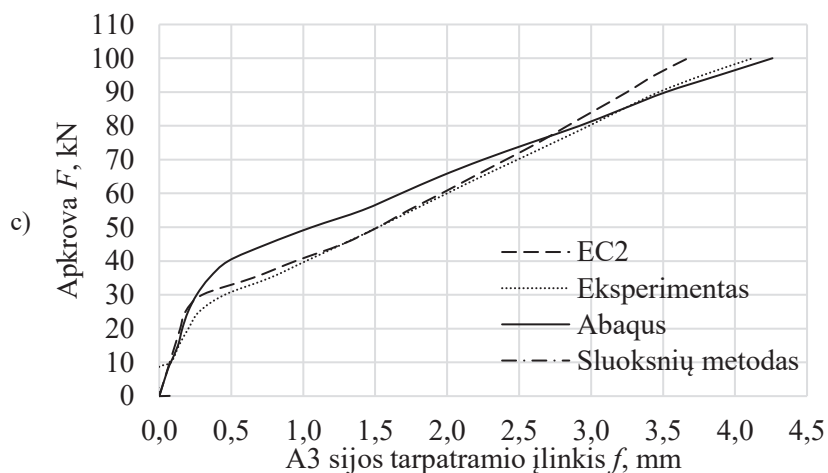
Apibendrinus A tipo sijų įlinkių skaičiavimo rezultatus pagal įvairias metodikas, galima teigti, kad panašiausi rezultatai pagal absoliutinius dydžius gauti skaičiuojant baigtinių elementų ir iteracijų metodu. Didžiausias skirtumas siekė 0,8 mm (21 %). Vertinant pagal įlinkių absoliutines reikšmes, rezultatai nuo eksperimento labiausiai skyrėsi skaičiuojant pagal EC2 (1,0 mm (27 %)).

Palyginus kreivės formos panašumą viso apkrovimo metu, panašiausi rezultatai gauti pagal iteracijų metodą A1 sijai, pagal EC2 ir baigtinių elementų metodus – A2 ir pagal EC2 – A3 sijoms. Didžiausi skirtumai išryškėdavo tarp eksperimento metu gautų rezultatų ir taikomų skaičiavimo metodų betono plyšių atsivėrimo metu tempiamoje zonoje bei esant maksimaliai matuotai apkrovai (100 kN). Taip galėjo atsirasti dėl to, kad pasirinkti tempiamo betono medžiagų skaičiuojamieji modeliai nevisiškai tiksliai įvertina tempiamo betono stiprį bei betono tempriai plastinį darbą. Ženklesni skirtumai mažesnių įlinkių pagal įvairias skaičiavimo metodikas, esant maksimaliai 100 kN matuotai apkrovai, atveju gali būti gauti todėl, kad pasireiškia praslydimas tarp betono ir anglies plaušo. Kuo didesnis praslydimas tarp skirtingų medžiagų, tuo didesnis įlinkis pasireiškia.

Įlinkių skaičiavimo metodiką, kuri yra pateikta EC2, skaičiuojant gelžbetonines konstrukcijas įvertinant plyšių įtaką, galima taikyti gelžbetoninėms konstrukcijoms, kurios yra stiprintos anglies plaušu.

Gautų įlinkių statistinis įvertinimas pateiktas 4.2 lentelėje. Skaičiavimuose įvertinti rezultatai, gauti eksperimento metu, taip pat apskaičiuoti pagal EC2, ACI, *fib* normas, iteracijų metodą ir programa „Abaqus“. Statistinis įvertinimas atliktas dviem variantams: kai standartinis nuokrypis bei variacijos koeficientas skaičiuojamas pagal visus gautus rezultatus ir kai statistinių nuokrypų reikšmės gaunamos nuo eksperimento rezultatų. A tipo sijų standartinis nuokrypis kinta nuo 0,12 mm iki 0,24 mm visų gautų įlinkių rezultatams bei nuo 0,16 mm iki 0,29 mm, kai standartinis nuokrypis skaičiuojamas nuo eksperimento rezultatų, o variacijos koeficientas atitinkamai kinta nuo 0,18 iki 0,23 ir nuo 0,20 iki 0,26.





4.8 pav. Įlinkių nuo apkrovos lyginamosios priklausomybės pagal EC2, eksperimentą, baigtinių elementų ir analitinį metodus: a) A1 sija; b) A2 sija; c) A3 sija

4.2 lentelė. A tipo kompozitinių sijų įlinkių statistinis įvertinimas

Sijos numeris	Standartinio nuokrypio reikšmė nuo visų įlinkių rezultatų pagal 2.81 formulę, mm	Standartinio nuokrypio reikšmė nuo eksperimento įlinkių rezultatų, mm	Variacijos koeficientas nuo visų įlinkio rezultatų	Variacijos koeficientas nuo eksperimento įlinkių rezultatų
A1	0,24	0,28	0,23	0,20
A2	0,12	0,16	0,22	0,25
A3	0,18	0,29	0,18	0,26

4.4. Ketvirtojo skyriaus išvados

1. Atlikus skaičiavimus baigtinių elementų metodu, esant 100 kN apkrovimui, gauta, kad A3 sijos kontakto zonos tarp anglies plaušo ir betono taškiniai šlyties įtempiai yra 2,75 MPa, santykinis praslydimas – $2,27 \times 10^{-3}$, tempiamos išilginės armatūros normaliniai įtempiai – 557 MPa, o įtempiai anglies plauše – 971 MPa.
2. Siūlomu metodu ir programa „Abaqus“ A3 sijai apskaičiuotų maksimalių tangentinių įtempių plyšio vietoje reikšmių skirtumas sudarė 27,3 %. Toks skirtumas gautas nurodžius inkaravimosi ilgį pagal (Chen, Teng, 2001), o programoje „Abaqus“ kubinio elemento kraštinę nurodžius 10 mm.
3. Pagal EC2, baigtinių elementų ir analitinį metodus apskaičiavus A tipo kompozitinių sijų įlinkius ir palyginus juos su eksperimento metu gautaisiais, nustatyta, kad su eksperimentiniais įlinkiais (pagal absoliutinį dydį) geriausiai sutampa analitiniu ir baigtinių elementų metodu apskaičiuoti įlinkiai, jų skirtumas neviršija 0,8 mm (21 %). Didžiausias skirtumas gautas skaičiuojant EC2 metodika, jis siekė 1,0 mm (27 %). Didžiausi įlinkių skirtumai tarp eksperimento rezultatų ir skaičiavimo metodikų nustatyti plyšių tempiamoje betono zonoje atsivėrimo metu ir esant maksimaliai 100 kN matuotai apkrovai. Apskaičiuotų A tipo sijų standartinis nuokrypis kinta nuo 0,12 mm iki 0,24 mm nuo visų įlinkių vidurkio bei nuo 0,16 mm iki 0,29 mm pagal eksperimentinius rezultatus, o variacijos koeficientas atitinkamai kinta nuo 0,18 iki 0,23 ir nuo 0,20 iki 0,26.
4. Skaičiuojant gelžbetoninės sijos, stiprintos anglies plaušu, įlinkius pagal EC2 metodiką, kuri įvertina plyšių įtaką standumui, nustatyta, kad apskritai rezultatai gerai atspindi rezultatus, gautus eksperimento metu. EC2 metodiką galima taikyti gelžbetoninėms konstrukcijoms, stiprintomis anglies plaušu.

BENDROSIOS IŠVADOS

1. Išanalizavus literatūrą, nustatyta, kad iki šiol atliktuose tyrimuose reikšmingas dėmesys skiriamas anglies plaušo inkaravimo užtikrinimui. Dažnai pasitaikantis kompozito suirimo pobūdis yra anglies plaušo sukibimo su betono paviršiumi praradimas, tačiau nėra pasiūlyto detalaus analitinio modelio, kuriuo būtų galima įvertinti sukibimą tarp anglies plaušo ir betono, kai gelžbetoninėje sijoje atsiveria plyšiai, paveikiantys tiek sijos stiprumą, tiek standumą.
2. Anglies plaušu sustiprintų sijų laikomoji galia padidėjo nuo 9,2 % iki 45 %, priklausomai nuo plaušo kiekio ir stiprinamų sijų supleišėjimo intensyvumo. Labiausiai padidėjo sijų su didžiausiais pradinių plyšių pločiais laikomoji galia (armatūrai pasiekus takumo ribą) – nuo 23 % iki 45 %, o mažiausiai – sijų be pradinių plyšių – nuo 9,2 % iki 27 %. Viena priežasčių, kuri tai galėtų paaiškinti, yra liekamosios tampriai-plastinės armatūros ir betono deformacijos, dėl kurių didesni įtempiai pasiekti armatūroje ir mažesni – anglies plauše, palyginti su nepažeistomis sijomis. Kita priežastis – supleišėjusių sijų mažesnis įlinkis po sustiprinimo ir galimas plyšių užpylimas kljais plaušo kljavimo metu.
3. Siūlomas metodas gali būti plačiau taikomas praktikoje negu sudėtinių strypų teorijos metodas, kadangi juo galima įvertinti įvairius apkrovimo atvejus, išvengiant sudėtingų diferencialinių lygčių sprendimo. Siūlomu metodu galima apskaičiuoti supleišėjusios kompozitinės sijos kontakto šlyties įtempius, kurie plyšio veikimo zonoje yra gerokai didesni už įtempius anglies plaušo galuose. Šis skirtumas nagrinėtose sijose siekia nuo 10,8 iki 27,9 kartų, priklausomai nuo sijų tipo. Toks šlyties įtempių padidėjimas plyšio veikimo zonoje sumažina anglies plaušo sukibimą su gelžbetonine sija.
4. A3 sijai plyšio vietoje didžiausia šlyties įtempių reikšmė, apskaičiuota siūlomu metodu, gauta 27,3 % mažesnė nei gauta programa „Abaqus“. Pažymėtina, kad siūlomo metodo tikslumui reikšmingos įtakos turi plaušo inkaravimo ilgis, o „Abaqus“ modelio – pasirinktas elementų tinklelio matmuo bei betono ir plaušo sukibimą apibūdinantys parametrai.
5. A tipo sijų įlinkių, apskaičiuotų pagal įvairias metodikas, standartinis nuokrypis kinta nuo 0,12 mm iki 0,24 mm kaip nuokrypis, apskaičiuotas nuo visų įlinkių vidurkio, bei nuo 0,16 mm iki 0,29 mm kaip nuokrypis, apskaičiuotas nuo eksperimentinių reikšmių. Variacijos koeficientas atitinkamai kinta nuo 0,18 iki 0,23 ir nuo 0,20 iki 0,26.

LITERATŪRA

1. ABAQUS. *ABAQUS/CAE User's manual*. 2018.
2. ABDALLAH, M., MAHMOUD, F. AL, BOISSIÈRE, R., KHELIL, A., ir J. MERCIER. Experimental study on strengthening of RC beams with Side Near Surface Mounted technique-CFRP bars. *Composite Structures* [interaktyvus]. 2020, 234 (November 2019), 111716. Elsevier. ISSN 0263-8223. Prieiga per doi: 10.1016/j.compstruct.2019.111716
3. ACI Committee 318. *Building Code Requirements for Structural Concrete (318-99) and Commentary (318R-90)*. 1999.
4. ADHIKARY, B. B., ir H. MUTSUYOSHI. Study on the bond between concrete and externally bonded CFRP sheet. *Proceedings of the 6th International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures*. 2001, 1, 371-378.
5. AI-HUI, Z., WEI-LIANG, J., ir GUI-BING, L. Behavior of preloaded RC beams strengthened with CFRP laminates. *Journal of Zhejiang* [interaktyvus]. 2006, 7(3), 436-444.
6. AL-ROUSAN, R. Z., ir M. F. AL-TAHAT. Consequence of surface preparation techniques on the bond behavior between concrete and CFRP composites. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. 2019, 212, 362-374. Elsevier Ltd. ISSN 09500618. Prieiga per doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.299
7. ALHASSAN, M. A., AL-ROUSAN, R. Z., ir H. M. TAHA. Precise finite element modelling of the bond-slip contact behavior between CFRP composites and concrete. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. 2020, 11(240), 1-11. Elsevier Ltd. ISSN 0950-0618. Prieiga per doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117943
8. ARRUDA, M. R. T., FIRMO, J. P., CORREIA, J. R., ir C. TIAGO. Numerical modelling of the bond between concrete and CFRP laminates at elevated temperatures. *Engineering Structures* [interaktyvus]. 2016, 110, 233-243. Elsevier Ltd. ISSN 0141-0296. Prieiga per doi: 10.1016/j.engstruct.2015.11.036
9. AZAM, R., SOUDKI, K., West, J. S., ir M. NOËL. Strengthening of shear-critical RC beams : Alternatives to externally bonded CFRP sheets. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. 2017, 151, 494-503. Elsevier Ltd. ISSN 0950-0618. Prieiga per doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.06.106
10. BALEVIČIUS, R., ir M. AUGONIS. The effects of bond, shrinkage and creep on cracking resistance of steel and GFRP RC members. *Composite Structures* [interaktyvus]. 2018, 187 (December 2017), 85-101.
11. BARRIS, C., SALA, P., GÓMEZ, J., ir L. TORRES. Flexural behaviour of FRP reinforced concrete beams strengthened with NSM CFRP strips. *Composite Structures* [interaktyvus]. 2020, 241, 1-9. Elsevier. ISSN 0263-8223. Prieiga per doi: 10.1016/j.compstruct.2020.112059
12. BENGAR, H. A., ir A. A. SHAHMANSOURI. A new anchorage system for CFRP strips in externally strengthened RC continuous beams. *Journal of Building Engineering* [interaktyvus]. 2020, 30 (January), 1-13. Elsevier Ltd. ISSN 2352-7102. Prieiga per doi: 10.1016/j.job.2020.101230

13. BILOTTA, A., CERONI, F., NIGRO, E., ir M. PECCE. Efficiency of CFRP NSM strips and EBR plates for flexural strengthening of RC beams and loading pattern influence. *Composite Structures* [interaktyvus]. 2015, 124, 163-175. Elsevier Ltd. ISSN 0263-8223. Prieiga per doi: 10.1016/j.compstruct.2014.12.046
14. BLASCHKO, M. Strengthening with CFRP. *Massivbau Seminar*. Munich, 1997.
15. BSISU, K. A., HUSSEIN, H., ir S. SARGAND. The Use of Hashin Damage Criteria. CFRP – Concrete Interface and Concrete Damage Plasticity Models in 3D Finite Element Modeling of Retrofitted Reinforced Concrete Beams with CFRP Sheets. *Arabian Journal for Science and Engineering* [interaktyvus]. 2017, 14, 1171-1184.
16. BUSEL, J. P., SHIELD, C. K., BANK, L. C., BROWN, V. L., CAMPBELL, T. I., FAM, A. Z., ir M. W. LEE. *Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars. ACI 440.1R-06*. 2006.
17. CAMATA, G., SPACONE, E., AL-MAHAIDI, R., ir V. SAOUMA. Analysis of Test Specimens for Cohesive Near-Bond Failure of Fiber-Reinforced Polymer-Plated Concrete. *Journal of Composites for Construction* [interaktyvus]. 2015, 10, 528-538.
18. CAMLI, U. S., ir B. BINICI. Strength of carbon fiber reinforced polymers bonded to concrete and masonry. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. 2007, 16, 1431-1446.
19. CAPOZUCCA, R., ir M. CERRI. N. Static and dynamic behaviour of RC beam model strengthened by CFRP-sheets. *Construction and Building Materials*. 2002, 16, 91-99.
20. CARLOS, T. B., PAULO, J., RODRIGUES, C., DE LIMA, R. C. A., ir D. DHIMA. Experimental analysis on flexural behaviour of RC beams strengthened with CFRP laminates and under fire conditions. *Composite Structures* [interaktyvus]. 2018, 189, 516-528. Elsevier. ISSN 0263-8223. Prieiga per doi: 10.1016/j.compstruct.2018.01.094
21. CHEN, C., SUI, L., XING, F., LI, D., ZHOU, Y., ir P. LI. Predicting bond behavior of HB FRP strengthened concrete structures subjected to different confining effects. *Composite Structures* [interaktyvus]. 2018, 14(187), 212-225.
22. CHEN, J. F., ir J. G. TENG. Anchorage Strength Models for FRP and Steel Plates Bonded to Concrete. *Journal of Structural Engineering*. 2001, 8(127), 784-791.
23. CHENG, D., ir Y. YANG. Design method for concrete columns strengthened with prestressed CFRP sheets. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. 2017, 151, 331-344. Elsevier Ltd. ISSN 0950-0618. Prieiga per doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.06.104
24. DAI, B. J., UEDA, T., ir Y. SATO. Development of the Nonlinear Bond Stress-Slip Model of Fiber Reinforced Plastics Sheet-concrete Interfaces with a Simple Method. *Journal of Composites for Construction* [interaktyvus]. 2005, 9(1), 52-62. Prieiga per doi: 10.1061/(ASCE)1090-0268(2005)9:1(52)
25. DAUGEVIČIUS, M., ir J. VALIVONIS. Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened with CFRP under Long-Term Load Action. *11th international symposium on fiber reinforced polymers for reinforced concrete structures*. 2013, pp. 1-7. Guimarães, Portugal.

26. DAUGEVIČIUS, M. *Influence of long-term load on the behaviour of reinforced concrete beams strengthened with carbon fibre composite*. Daktaro disertacija. Vilnius: Vilniaus Gedimino technikos universitetas, 2010.
27. DIAS, S. J. E., ir J. A. O. BARROS. NSM shear strengthening technique with CFRP laminates applied in high T cross section RC beams. *Composites Part B* [interaktyvus]. 2017, 114, 256-267. Elsevier Ltd. ISSN 1359-8368. Prieiga per doi: 10.1016/j.compositesb.2017.01.028
28. DIAS, S. J. E., BARROS, J. A. O., ir W. JANWAEN. Behavior of RC beams flexurally strengthened with NSM CFRP laminates. *Composite Structures* [interaktyvus]. 2018, 201, 363-376. Elsevier. ISSN 0263-8223. Prieiga per doi: 10.1016/j.compstruct.2018.05.126
29. DRIZORO (n.d.). Repair and strengthening system based on carbon fiber sheets. *Technical bulletin 8*. Prieiga: [https://www.drizoro.com/ingles/documentos/fichas/drizoro wrap.pdf](https://www.drizoro.com/ingles/documentos/fichas/drizoro%20wrap.pdf)
30. DUARTE, A. P. C., SILVA, B. A., SILVESTRE, N., BRITO, J. DE, JÚLIO, E., ir J. M. CASTRO. Finite element modelling of short steel tubes filled with rubberized concrete. *Composite Structures* [interaktyvus]. 2016, 13(150), 28-40. Elsevier Ltd. ISSN 0263-8223. Prieiga per doi: 10.1016/j.compstruct.2016.04.048
31. EL-ZOHAIRY, A., SALIM, H., SHAABAN, H., MUSTAFA, S., ir A. EL-SHIHY. Experimental and FE parametric study on continuous steel-concrete composite beams strengthened with CFRP laminates. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. 2017, 157, 885-898. Elsevier Ltd. ISSN 0950-0618. Prieiga per doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.09.148
32. ELGHAZY, M., REFAI, A. EL, EBEAD, U., ir A. NANNI. Experimental results and modelling of corrosion-damaged concrete beams strengthened with externally-bonded composites. *Engineering Structures* [interaktyvus]. 2018, 172, 172-186. Elsevier. ISSN 0141-0296. Prieiga per doi: 10.1016/j.engstruct.2018.06.037
33. ESFAHANI, M. R., KIANOUSH, M. R., ir A. R. TAJARI. Flexural behaviour of reinforced concrete beams strengthened by CFRP sheets. *Engineering Structures* [interaktyvus]. 2007, 29, 2428-2444.
34. *Eurokodas. Konstrukcijų projektavimo pagrindai*. Vilnius, 2004.
35. *fib. Externally bonded FRP reinforcement for RC structures. Technical report bulletin 14*. 2001, 138.
36. *fib. Model Code for Structures 2010*. 2010, 428.
37. FRANCOIS, B.-B., DAVID, E., ir E. RAGNEAU. Finite element modelling of flexural behaviour of externally bonded CFRP reinforced concrete structures. *Engineering Structures*. 2002, 24(24), 1423-1429.
38. GUO, J. D. *Interfacial models for fiber reinforced polymer (FRP) sheets externally bonded to concrete*. Daktaro disertacija. 2003, 6.
39. GUO, Z. G., CAO, S. Y., SUN, W. M., ir X. Y. LIN. Experimental study on bond stress-slip behaviour between FRP sheets and concrete. *Proceedings of the International Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures*. 2005, 7, 77-83.
40. HAMED, A. A. A., EL-KASHIF, K. F. O., ir H. M. SALEM. Flexural strengthening of preloaded reinforced concrete continuous beams: An

- experimental investigation. *Alexandria Engineering Journal* [interaktyvus]. 2019, 58, 207-216. Faculty of Engineering, Alexandria University. ISSN 1110-0168. Prieiga per doi: 10.1016/j.aej.2018.11.011
41. HANOON, A. N., JAAFAR, M. S., ZAIDEE, S. R. AL, HEJAZI, F., ir F. N. A. A. AZIZ. Effectiveness factor of the strut-and-tie model for reinforced concrete deep beams strengthened with CFRP sheet. *Journal of Building Engineering* [interaktyvus]. 2017, 12(June 2016), 8-16. Elsevier Ltd. ISSN 2352-7102. Prieiga per doi: 10.1016/j.jobbe.2017.05.001
 42. HEMZAH, S. A., ALYHYA, W. S., ir S. A. HASSAN. Experimental investigation for structural behaviour of self-compacting reinforced concrete hollow beams with in-place circular openings strengthened with CFRP laminates. *Structures* [interaktyvus]. 2020, 24, 99-106. Elsevier. ISSN 2352-0124. Prieiga per doi: 10.1016/j.istruc.2020.01.008
 43. HOSEN, M. A., JUMAAT, M. Z., ALENGARAM, U. J., SULONG, N. H. R., ir A. B. M. S. ISLAM. Structural performance of lightweight concrete beams strengthened with side-externally bonded reinforcement (S-EBR) technique using CFRP fabrics. *Composites Part B* [interaktyvus]. 2019, 176, 1-9. Elsevier Ltd. ISSN 1359-8368. Prieiga per doi: 10.1016/j.compositesb.2019.107323
 44. HOSSEINI, M. R. M., DIAS, S. J. E., ir J. A. O. BARROS. Behavior of one-way RC slabs flexurally strengthened with prestressed NSM CFRP laminates – Assessment of influencing parameters. *Composite Structures* [interaktyvus]. 2020, 245, 1-19. Elsevier. ISSN 0263-8223. Prieiga per doi: 10.1016/j.compstruct.2020.112259
 45. IMRAN, M., ir M. MAHENDRAN. Fire behaviour of CFRP strengthened short SHS steel columns with and without insulation. *Composites Part B* [interaktyvus]. 2020, 193(November 2019), 108016. Elsevier Ltd. ISSN 1359-8368. Prieiga per doi: 10.1016/j.compositesb.2020.108016
 46. ISM, M. M., ir M. RABIE. Flexural behavior of continuous RC beams strengthened with externally bonded CFRP sheets. *Alexandria Engineering Journal* [interaktyvus]. 2019, 58, 789-800. Faculty of Engineering, Alexandria University. ISSN 1110-0168. Prieiga per doi: 10.1016/j.aej.2019.07.001
 47. ISO. Technical report of technical committee on retrofit technology. In: *Proc., international symposium on latest achievement of technology and research on retrofitting concrete structures structures*. 2003.
 48. IZUMO. Technical report of technical committee on retrofit technology. In: *Proc., international symposium on latest achievement of technology and research on retrofitting concrete structures structures*. 2003.
 49. JIN, L., XIA, H., JIANG, X., ir X. DU. Size effect on shear failure of CFRP-strengthened concrete beams without web reinforcement: Meso-scale simulation and formulation. *Composite Structures* [interaktyvus]. 2020, 236, 1-16. Elsevier. ISSN 0263-8223. Prieiga per doi: 10.1016/j.compstruct.2020.111895
 50. KELPŠA, Š. *Plieno plaušo įtaka lenkiamų gelžbetoninių elementų pleišėjimui ir standumui*. Daktaro disertacija. Kaunas: Kauno technologijos universitetas, 2017.
 51. KHALIFA, A., GOLD, W. J., NANNI, A., ir A. A. M. I. Contribution of Externally Bonded FRP to Shear Capacity of Flexural Members. *Journal of*

- Composites for Construction* [interaktyvus]. 1998, 2(4), 195-203.
52. KISHI, N., ASCE, M., ZHANG, G., ir H. MIKAMI. Numerical Cracking and Debonding Analysis of RC Beams Reinforced with FRP Sheet. *Journal of Composites for Construction* [interaktyvus]. 2005, 9(4).
 53. LACROIX, A. E. *Comparative study of strength design methods for rectangular reinforced concrete and composite steel-concrete columns*. Daktaro disertacija. Manitoba, 1998.
 54. LEE, H. K., CHEONG, S. H., HA, S. K., ir C. G. LEE. Behavior and performance of RC T-section deep beams externally strengthened in shear with CFRP sheets. *Composite Structures* [interaktyvus]. 2011, 93, 911-922.
 55. LISAUSKAS, T., AUGONIS, M., ZINGAILA, T., ir M. R. T. ARRUDA. Stiffness and Strength Analysis of Flexural RC Beams Strengthened with CFRP Sheets Considering the Influence of Pre-cracking. *Mechanics*. 2020, 8.
 56. LISAUSKAS, T., AUGONIS, M., ir Š. KELPŠA. The Stress's State Analysis of Carbon Fibre Reinforced Concrete Elements Evaluating the Bond Influence. *Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering* [interaktyvus]. 2018, 2(23), 79-85.
 57. LL., A., ASSIH, J., ir Y. DELMAS. Shear strengthening of RC beams with externally bonded sheets. *Journal of Structural Engineering*. 2001, 127(4), 374-380.
 58. LORENZIS, L., MILLER, B., ir A. NANNI. Bond of FRP Laminates to Concrete. *ACI Materials Journal*. 2001, 98-M29, 256-264.
 59. *LST EN 1992-1-1. Eurokodas 2. Gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas*. 1-1 dalis, 234. Vilnius, 2007.
 60. *LST EN 12390-3:2009. Sukietėjusio betono bandymai*. 3 dalis. *Bandinių gniuždomasis stipris*. Vilnius, 2009.
 61. *LST EN 12390-13:2013. Sukietėjusio betono bandymai*. 13 dalis. *Kirstinio tamprumo modulio nustatymas gniuždant*. Vilnius, 2013.
 62. LU, X. Z., TENG, J. G., YE, L. P., ir J. J. JIANG. Bond – slip models for FRP sheets/plates bonded to concrete. *Engineering Structures* [interaktyvus]. 2005, 18, 920-937.
 63. MABROUK, A. G., ir RAMADAN, O. M. Finite Element Modeling of RC Beams Shear-strengthened with Side Bonded CFRP Sheets. *APFIS2017 – 6th Asia-Pacific Conference on FRP in Structures*. 2017, July, pp. 1-6.
 64. MAEDA, T., ASANO, Y., SATO, Y., UEDA, T., ir Y. KAKUTO. A study on bond mechanism of carbon fiber sheet. *Proceedings of the 3rd International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement of Concrete Structures*. 1997, 1.
 65. MALEK, A. M., SAADATMANESH, H., ir M. R. EHSANI. Prediction of failure load of R/C beams strengthened with FRP plate due to stress concentration at the plate end. *ACI Structural Journal*. 1998, 95(2), 142-152.
 66. MATTHYS, S. *Structural behaviour and design of concrete members strengthened with externally bonded FRP reinforcement*. 2000.
 67. MHANNA, H. H., HAWILEH, R. A., ir ABDALLA, J. A. Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using CFRP Wraps. *Procedia Structural Integrity*

- [interaktyvus]. 2019, 17, 214-221. Elsevier B. V. ISSN 2452-3216. Prieiga per doi: 10.1016/j.prostr.2019.08.029
68. MOFRAD, M. H., MOSTOFINEJAD, D., ir A. HOSSEINI. A generic non-linear bond-slip model for CFRP composites bonded to concrete substrate using EBR and EBROG techniques. *Composite Structures* [interaktyvus]. 2019, 220, 31-44.
 69. MOSTOFINEJAD, D., HOSSEINI, S. M., TEHRANI, B. N., EFTEKHAR, M. R., ir M. DYARI. Innovative warp and woof strap (WWS) method to anchor the FRP sheets in strengthened concrete beams. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. 2019, 218, 351-364. Elsevier Ltd. ISSN 0950-0618. Prieiga per doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.05.117
 70. MUKHTAR, F. M., ir R. M. FAYSAL. A review of test methods for studying the FRP-concrete interfacial bond behavior. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. 2018, 169, 877-887. Elsevier Ltd. ISSN 0950-0618. Prieiga per doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.02.163
 71. NEUBAUER, U., ir F. S. ROSTÁSY. Design aspects of concrete structures strengthened with externally bonded CFRP-plates. *Proceedings of 7th International Conference on Structural Faults and Repair Concrete + Composites*. 1997, 2, 109-118.
 72. NGUYEN-MINH, L., PHAN-VU, P., TRAN-THANH, D., TRUONG, Q. P. T., PHAM, T. M., NGO-HUU, C., ir M. ROVNÁK. Flexural-strengthening efficiency of cfrp sheets for unbonded post-tensioned concrete T-beams. *Engineering Structures* [interaktyvus]. 2018, 166, 1-15.
 73. NIU, H., ir Z. WU. Effects of FRP-Concrete Interface Bond Properties on the Performance of RC Beams Strengthened in Flexure with Externally Bonded FRP Sheets. *Journal of Materials in Civil Engineering* [interaktyvus]. 2006, 18(October), 723-731.
 74. NURBAIAH, M. N., HANIZAH, A. H., NURSAFARINA, A., ir N. A. M. Flexural Behaviour Of RC Beams Strengthened With Externally Bonded (EB) FRP Sheets Or Near Surface Mounted (NSM) FRP Rods Method. *International Conference on Science and Social Research (CSSR 2010)*. 2010, pp. 1232-1237.
 75. OBADAT, Y. T., HEYDEN, S., ir O. DAHLBLOM. The effect of CFRP and CFRP/concrete interface models when modelling retrofitted RC beams with FEM. *Composite Structures* [interaktyvus]. 2010, 92(6), 1391-1398. Elsevier Ltd. ISSN 0263-8223. Prieiga per doi: 10.1016/j.compstruct.2009.11.008
 76. PAUL, S. K., ir P. SAHU. Finite Element Analysis of Retrofitting of Rc Beam With CFRP Using Abaqus. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2020, 07(02), 1268-1273.
 77. PELLEGRINO, C. *Design Procedures for the Use of Composites in Strengthening of Reinforced Concrete Structures* Technical Committee 234-DUC [interaktyvus]. 2016.
 78. RASHID, K., LI, X., DENG, J., XIE, Y., WANG, Y., ir S. CHEN. Experimental and analytical study on the fl exural performance of CFRP- strengthened RC beams at various pre-stressing levels. *Composite Structures* [interaktyvus]. 2019, 227, 1-12. Elsevier. ISSN 0263-8223. Prieiga per doi: 10.1016/j.compstruct.2019.111323

79. RIZKALLA, S. H., BUSEL, J. P., BAKIS, C. E., BALAGURU, P. N., BALLINGER, C. A., BANK, L. C., BELARBI, A., ir kt. *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures (ACI 440.2R-02)*. 2002.
80. SAADATMANESH, H., ir M. R. EHSANI. RC beams strengthened with FRP plates. Analysis and parametric study. *Journal of Structural Engineering*. 1992, 117(11), 3434-3455.
81. SAADATMANESH, H., ir A. M. MALEK, Design Guidelines for Flexural Strengthening of RC Beams with FRP Plates. *Journal of Composites for Construction*. 1998, 2(4), 158-164.
82. SALAMA, A. S. D., HAWILEH, R. A., ir J. A. ABDALLA. Performance of externally strengthened RC beams with side-bonded CFRP sheets. *Composite Structures* [interaktyvus]. 2019, 212, 281-290. Elsevier. ISSN 0263-8223. Prieiga per doi: 10.1016/j.compstruct.2019.01.045
83. SATO. Technical report of technical committee on retrofit technology. In: *Proc., international symposium on latest achievement of technology and research on retrofitting concrete structures*. 2003.
84. SINGH, S. B. *Analysis and Design of FRP Reinforced Concrete Structures*. India, 2014.
85. *Statybos techninis reglamentas STR 2.05.03:2003. Statybinių konstrukcijų projektavimo pagrindai*. Vilnius. 2003, (231).
86. TÄLJSTEN, B. *Plate bonding: strengthening of existing concrete structures with epoxy bonded plates of steel or fibre reinforced plastics*. Doktoro disertacija. Luleå University of Technology, 1994, 190.
87. TANAKA, T. *Shear resisting mechanism of reinforced concrete beams with CFS as shear reinforcement*. Doktoro disertacija. Japan: Hokkaido University, 1996.
88. TARAGHI, P., SHOWKATI, H., ir T. ZIRAKIAN. Buckling stability performance assessment of CFRP-strengthened conical shells under uniform external pressure. *Thin-Walled Structures* [interaktyvus]. 2020, 148, 1-15. Elsevier Ltd. ISSN 0263-8231. Prieiga per doi: 10.1016/j.tws.2020.106618
89. TRIANTAFILIOU, T. C., DESKOVIC, N., ir M. DEURING, Strengthening of RC with prestressed fiber reinforced plastic sheets. *ACI Structural Journal*. 1992, 10, 235-244. Diubendorf.
90. TRIANTAFILLOU, T. C., ir N. PLEVRIS. Strengthening of RC beams with epoxy-bonded fibre-composite materials. *Materials and Structures*. 1992, 11(25), 201-211.
91. VAN GEMERT, D. A. Force transfer in epoxy-bonded steel-concrete joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 1980, 67-72.
92. WAN, B., JIANG, C., ir Y.-F. WU. Effect of defects in externally bonded FRP reinforced concrete Concrete substrate. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. 2018, 172, 63-76. Elsevier Ltd. ISSN 0950-0618. Prieiga per doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.217
93. YANG, X., GAO, W. Y., DAI, J.-G., LU, Z.-D., ir K.-Q. YU. Flexural strengthening of RC beams with CFRP grid-reinforced ECC matrix. *Composite Structures* [interaktyvus]. 2018, 189(October 2017), 9-26. Elsevier. ISSN 0263-

8223. Prieiga per doi: 10.1016/j.compstruct.2018.01.048
94. YANG, Y., YUE, Q., ir Y. HU. Experimental study on bond performance between carbon fiber sheets and concrete. *Journal of Building Structures*. 2001, 22(3), 36-42.
95. YORESTA, F. S., MARUTA, R., MIEDA, G., ir Y. MATSUMOTO. Unbonded CFRP strengthening method for buckling control of steel members. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. 2020, 241, 1-14. The Author(s). ISSN 0950-0618. Prieiga per doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118050
96. YOSHIZAWA, H., ir Z. WU. Analysis of debonding fracture properties of CFS strengthened member subject to tension. *Proceedings of 3rd international symposium on non-metallic (FRP) reinforcement for concrete structures*. 1997, 1, 284-294.
97. YU, F., ZHOU, H., JIANG, N., FANG, Y., SONG, J., FENG, C., ir Y. GUAN. Flexural experiment and capacity investigation of CFRP repaired RC beams under heavy pre-damaged level. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. 2020, 230, 117030. Elsevier Ltd. ISSN 0950-0618. Prieiga per doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117030
98. ZABULIONIS, D. Stress and strain analysis of a bilayer composite beam with interlayer slip under hygrothermal loads. *Mechanika*. 2005, 6(56), 5-12.
99. ZADLAUSKAS, S. *The research on cracking and deformation of reinforced concrete bridges under static and dynamic loads*. Daktaro disertacija. 2013.
100. ZAKI, M. A., RASHEED, H. A., ir T. ALKHRDAJI. Performance of CFRP-strengthened concrete beams fastened with distributed CFRP dowel and FIBer anchors. *Composites Part B* [interaktyvus]. 2019, 176, 1-19. Elsevier Ltd. ISSN 1359-8368. Prieiga per doi: 10.1016/j.compositesb.2019.107117
101. ZHOU, C.-Y., YU, Y.-N., ir E. L. XIE. Strengthening RC beams using externally bonded CFRP sheets with end self-locking. *Composite Structures* [interaktyvus]. 2020, 241, 1-10. Elsevier. ISSN 0263-8223. Prieiga per doi: 10.1016/j.compstruct.2020.112070
102. ZHU, Y., CHEN, Y., HE, K., FENG, R., ZHANG, X., ZHU, Q., ir C. TANG. Flexural behavior of concrete-filled SHS and RHS aluminum alloy tubes strengthened with CFRP. *Composite Structures* [interaktyvus]. 2020, 238, 1-23. Elsevier. ISSN 0263-8223. Prieiga per doi: 10.1016/j.compstruct.2020.111975
103. РЖАНИЦЫН, А. Р. *Строительная механика*. Москва: Высшая школа, 1982.

MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS

PUBLIKACIJOS

Tarptautinės mokslinės informacijos instituto duomenų bazės „ISI Web of Science“ leidinyje, turinčiame citavimo indeksą

1. Lisauskas, T., Augonis, M., Zingaila, T., ir M. R. T. Arruda. Stiffness and Strength Analysis of Flexural RC Beams Strengthened with CFRP Sheets Considering the Influence of Pre-cracking. *Mechanics = Mechanika*. Kauno technologijos universitetas. Kaunas: Technologija. ISSN: 1392-1207, eISSN: 2029-6983. 2020. Vol. 26, No. 4, pp. 277-284. Prieiga: <http://dx.doi.org/10.5755/j01.mech.26.4.25064>

Tarptautiniame duomenų bazės „SCOPUS“ leidinyje

2. Lisauskas, T., Augonis, M., ir Š. Kelpša. The Stress's State Analysis of Carbon Fibre Reinforced Concrete Elements Evaluating the Bond Influence. *Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering = Darnioji architektūra ir statyba*. Kauno technologijos universitetas. Kaunas: Technologija. ISSN: 2029-9990, eISSN: 2335-2000. 2018. Vol. 2, No. 23, pp. 79-85. Prieiga: <http://dx.doi.org/10.5755/j01.sace.23.2.20987>

Konferencijų pranešimų medžiagoje

1. Lisauskas, T., Augonis, M. The Analysis of the State of Stress of Carbon Fiber reinforced Concrete Elements Evaluating the Influence of the Bond. *Advanced Construction 2018: Proceedings of 6th International Scientific Conference = Pažangioji statyba 2018: 6-osios tarptautinės mokslinės konferencijos pranešimai*. Kauno technologijos universitetas. Kaunas: Technologija. ISSN: 2029-1213, eISSN: 2338-8983. 2018, pp. 55-56. Prieiga: <http://dx.doi.org/10.5755/e01.2538-8983.2018>
2. Lisauskas, T., Augonis, M. The Strength and Stiffness Analysis of Carbon Fiber Reinforced Concrete Elements Evaluating the Influence of the Precracks. *13th International Conference „Modern Building Materials, Structures and Techniques“ = 13-oji tarptautinė konferencija „Modernios statybinės medžiagos, konstrukcijos, metodai“*. Vilniaus Gedimino technikos universitetas. Vilnius: Technika, 2019.

SL344. 2021-03-15, 12,75 leidyb. apsk. I. Tiražas 12 egz. Užsakymas 71.
Išleido Kauno technologijos universitetas, K. Donelaičio g. 73, 44249 Kaunas
Spausdino leidyklos „Technologija“ spaustuvė, Studentų g. 54, 51424 Kaunas

