



## BETONO SU ELASTINGU PRIEDU IŠ GUMOS ATLIEKŲ ATSPARUMAS CIKLINIŲ APKROVŲ POVEIKIUI

Gintautas Skripkiūnas<sup>1</sup>, Audrius Grinys<sup>2</sup>

*Kauno technologijos universitetas, Studentų g. 48, LT-51367 Kaunas, Lietuva*

*El. paštas: <sup>1</sup>gintautas.skripkiunas@ktu.lt; <sup>2</sup>audrius.grinys@stud.ktu.lt*

*Įteikta 2009 10 17; priimta 2009 11 21*

**Santrauka.** Nagrinėjama betono su elastingu priedu iš mechaniškai smulkintų naudotų padangų gumos atliekų priedo įtaka ciklinių apkrovų poveikiui. Skirtingos frakcijos ir skirtingas gumos atliekų priedo kiekis buvo naudojamas betonuose. Atlikti eksperimentai parodė, kad gumos atliekų priedas turi įtakos ciklinių apkrovų poveikiui. Gauta, kad to paties gniuždomojo stiprio betonuose su mechaniškai smulkintomis gumos atliekomis deformacijos po 20 ciklų 56–63 % didesnės, o liekamosios deformacijos nukrovus yra 219–360 % didesnės nei bandiniuose, kuriuose nebuvo naudojamas gumos atliekų priedas. Pastebėta, kad po ciklinių apkrovų poveikio bandiniai, kuriuose buvo naudojamos gumos atliekos, kur kas labiau deformavosi, susidarė daug didesnės ribinės deformacijos nei bandiniuose, kuriuose nebuvo naudojamas dempferuojantis gumos atliekų priedas. Iš atliktų eksperimentų matyti, kad gumos atliekas tikslinga naudoti betono konstrukcijose, veikiuose daugkartinėmis nuolat pasikartojančiomis apkrovomis.

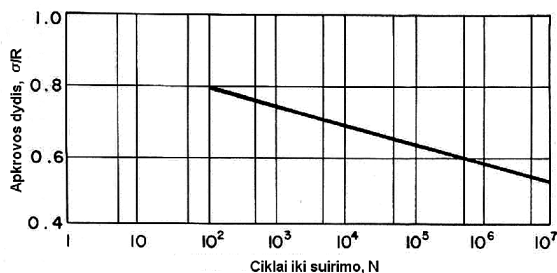
**Reikšminiai žodžiai:** betonas, gumos atliekų priedas, ciklinės apkrovos, liekamosios deformacijos, ribinės deformacijos

### 1. Įvadas

Per paskutinius 20 metų betono atsparumas ciklinių apkrovų poveikiui bei nuovargiui kelia vis didesnę tyrinėtojų susidomėjimą. Susidomėjimą betono atsparumu, kai jį veikia dinaminės arba ciklinės apkrovos, galima paaiškinti keliomis priežastimis. Visų pirma konstrukcijos pradėtos skaičiuoti įvertinus dinaminių apkrovų, tokių kaip vėjo ir (arba) bangų, poveikį. Buvo pastebėta, kad apkrovus pasikartojančia apkrova, keičiasi betono matricos charakteristikos. Taip yra, nes dėl įvairaus dydžio pasikartojančių ciklinių apkrovų plečiasi betone esantys mikroplyšiai, todėl pradeda irti betono struktūra. Autorius (Hordijk 1991) pabandė įvardyti pagrindines betono konstrukcijas, kuriose didėja plyšiai dėl betono nuovargio ar betoną veikiančių pasikartojančių apkrovų – tai tiltai, įvairios paskirties bokštai, atviruose vandenyse esančios platformos, kranų, geležinkelio pabėgiai, aukštybiniai pastatai, vėjo jėgainės, kelių elementai.

Betono stiprumas, veikiant daugkartinėms pasikartojančioms apkrovoms, yra kur kas mažesnis nei stiprumas, nustatytas betoną veikiant trumpalaikę apkrovą, nes dėl nuolatinių, cikliška pasikartojančių apkrovų didėja plastinės betono deformacijos, sumažėja sukibimo ryšiai tarp cementinio akmens ir užpildų, pakinta betono struktūra, atsiranda didesnės valkšnumo deformacijos. JAV tyrinėtojai nustatė, kad betono stiprumas, veikiant ciklinėms apkrovoms, mažėja tiesiškai proporcingai didinant ciklų skaičių (Lloyd *et al.* 2007). Iliojaus universiteto mokslininkai ištyrė, kad veikiant betoną apkrova, kurios dydis lygus 55 % betono stiprio, po 10 mln. nuolat pasikartojančių ciklų betonas suyra (1 pav.).

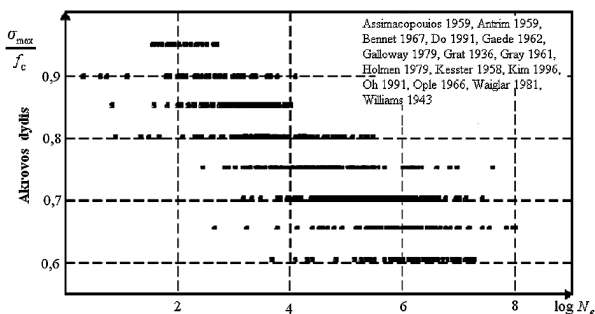
Autorius Cornelissen tai pat išvedė betono stiprio mažėjimo priklausomybę didėjant ciklų skaičiui (Cornelissen 1984). Autorius nustatė, kad betono suirimui įtaką daro ne tik ciklų skaičius, bet ir atliekant ciklus pasirinkta apkrovimo ir nukrovimo metodika. Remda-



1 pav. Tipinis betono suirimas veikiant ciklinėmis apkrovomis  
 Fig. 1. Typical fatigue curve for concrete subjected to repeated loading (where: Stress value,  $\sigma/R$ ; cycles till fracture,  $N$ )

masis atliktais eksperimentais Cornelissen nustatė, kad kai apatinė ciklo tempimo stiprio apkrova lygi nuliui bei viršutinė ciklo apkrova lygi 60 % statinio tempimo stiprio, betonas iki visiško suirimo atlaiko 1 mln. ciklų. Apatinėje ciklo dalyje, veikiant nedidelei gniuždymo stiprio apkrovai, po 1 mln. ciklų betonas suyra prie 40 % statinio tempimo stiprio. Taigi autorius pastebėjo, kad ciklų, kuriuos atlaiko betonas, skaičius didėja mažinant apkrovos dydį pagal tiesinę priklausomybę, o mažinant apatinį ciklo apkrovos dydį, atlaikytų ciklų skaičius mažėja.

Vokiečių mokslininkai (Breitenbücher *et al.* 2007), remdamiesi atliktais eksperimentais, susistemino gniuždymo stiprio pokytį veikiant įvairaus dydžio cikliškai pasikartojančioms apkrovoms (2 pav.).



2 pav. Atlaikytų ciklų  $N_f$  iki bandinio suirimo skaičius veikiant tam tikrai gniuždymo stiprio jėgai  
 Fig. 2. Variation in the maximal bearable number of load cycles to failure  $N_f$  (Stress value,  $\sigma_{max}/f_c$ )

Iš 2 pav. matyti, kad visi autoriai nurodo ciklų iki visiško bandinio suirimo padidėjimą, mažėjant bandinio gniuždymo apkrovos dydžiui.

Kinų mokslininkai (Song *et al.* 2006) pabandė susisteminti tiek apkrovos dydžio įtaką suminiam ciklų skaičiui iki bandinys visiškai suyra, tiek, kaip ir Corne-

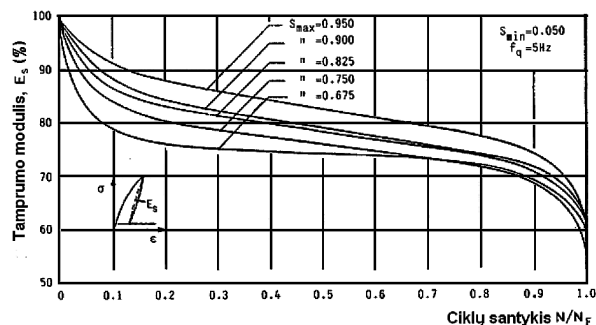
lissen, išnagrinėjo apatinės ciklo apkrovos poveikį suminiam ciklų skaičiui iki bandiniui suyrant bei išvedė tiesines lygtis.

Atlikę eksperimentus autoriai (Song *et al.* 2006) gavo, kad mažinant maksimalios apkrovos dydį, ciklų skaičius, kurį bandinys atlaikė, didėja tiesiškai proporcingai. Taip pat pastebėjo, kad didelę įtaką turi ir pasirinkta ciklo amplitudė. Kinų mokslininkai nustatė, kad padidinus apatinės ciklo dalies apkrovos dydį, betone gerokai greičiau pasireiškia nuovargis, betonas atlaiko daug mažesnę ciklų skaičių veikiant tai pačiai apkrovai. Autoriai nustatė, kad padidinus apatinę ciklo apkrovos dalį nuo 0  $f_c$  iki 0,3  $f_c$ , iki suirimo betonas atlaikys 6 kartais mažiau ciklų, priklausomai nuo viršutinės ciklo apkrovos.

Holmen studijavo betono tamprumo modulio kitimą veikiant betoną dinaminėmis gniuždymo apkrovomis (Holmen 1979, 1982). Jis nustatė, kad betono tamprumo modulis mažėja betoną apkrovus ciklinėmis apkrovomis. 3 pav. pavaizduotas tamprumo modulio kitimas didinant gniuždymo apkrovos ciklų skaičių.

Holmen, nagrinėdamas betono tamprumo modulio pokytį veikiant ciklinėms gniuždymo apkrovoms, eksperimentams apatinę ciklo dalį pasirinko vienodą –  $\sigma_{max}/f_c = 0,050$ , o gniuždymo apkrovos viršutinę ciklo dalį keitė nuo  $\sigma_{max}/f_c = 0,675$  iki  $\sigma_{max}/f_c = 0,950$ . Autorius pastebėjo, kad viršutinės ciklo dalies amplitudės didinimas veikia betono tamprumo modulį. Nustatyta, kad didėjant viršutinės ciklo dalies gniuždymo apkrovai, esant tam pačiam ciklų santykiui  $N/N_f$ , gaunamas didesnis betono tamprumo modulis. Panašias tendencijas nustatė ir kinų mokslininkai (Song *et al.* 2006) keisdami tempimo stiprio viršutinę ciklo dalį.

Vokiečių mokslininkai (Breitenbücher *et al.* 2007) tyrinėjo statinio ir dinaminio tamprumo modulį pokytį veikiant ciklinėmis apkrovomis. Buvo pasirinkta viena



3 pav. Betono tamprumo modulio pokytis veikiant ciklinėmis gniuždymo apkrovomis

Fig. 3. The modulus of elasticity under cyclic loading (Modulus of elasticity,  $E_s$ ; Number of cycles,  $N/N_f$ )

ciklų amplitudė, kai apatinė ciklo dalis lygi  $\sigma_{\max}/f_c = 0,10$  gniuždomojo stiprio, o viršutinė ciklo dalis –  $\sigma_{\max}/f_c = 0,675$ . Autoriai nustatė, kad ir statinis tamprumo modulis, ir dinaminis tamprumo modulis mažėja betoną veikiant cikliškai pasikartojančiomis dinaminėmis apkrovomis.

Betono deformacijų didėjimas, veikiant cikliškai nuolat pasikartojančiomis apkrovomis, nėra iki galo ištirtas. Suformuluotos dvi pagrindinės betono deformacijų didėjimo hipotezės, veikiant dinaminėmis apkrovomis (Song *et al.* 2006; Long term... 1984; Toumi *et al.* 1998, Kim, J., Kim, Y. 1999; Sain, Kishen 2008; Parant *et al.* 2007; Landis *et al.* 2007). Pirmoje hipotezėje autoriai nurodo, kad betono deformacijų didėjimas, veikiant ciklinėmis apkrovomis, vyksta dėl plyšių formavimosi ir vystymosi dėl užpildo sukibimo su cementine matrica mažėjimo. Šis reiškinys veikiamas mažesnio arba didesnio tamprumo modulių skirtumo tarp stambiojo užpildo ir cementinės matricos. Antrosios hipotezės autoriai nurodo, kad deformacijų didėjimas ir betono irimas, veikiant ciklinėmis nuolat pasikartojančiomis apkrovomis, vyksta dėl matricoje esančių mikroplyšių didėjimo. Didėjant betono deformacijoms, mikroplyšiai susijungia suformuodami vieną makroplyšį ir taip suardydami betono struktūrą.

Japonų mokslininkai (Sato, Tateishi, Kakuta 2003), nagrinėdami dinaminį apkrovų poveikį betono konstrukcijoms, nustatė, kad betoną veikiant ciklinėmis apkrovomis betono irimo procesai gerokai skiriasi nei betoną veikiant statine apkrova. Yasuhiko Sato ir bendraautoriai (Sato *et al.* 2003), atlikę išsamią suirusių bandinių analizę, nustatė, kad betoną veikiant ciklinėmis apkrovomis plyšiai daugiau formuojasi užpildo ir cementinės matricos sąlyčio zonoje bei mažiau cementinėje matricoje, nei betoną veikiant statinėmis apkrovomis. Betoną veikiant statinėmis apkrovomis, irimas per užpildą vyksta kur kas dažniau nei betoną veikiant ciklinėmis nuolat pasikartojančiomis apkrovomis.

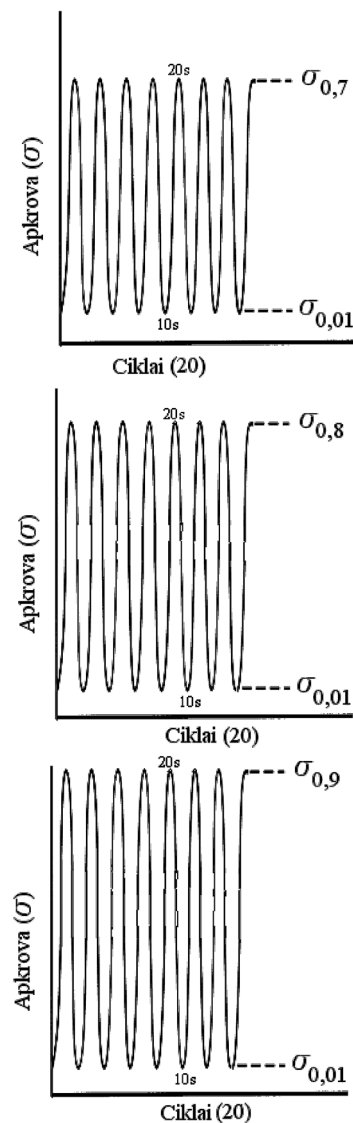
Nagrinėdami betono irimą, Japonų mokslininkai (Sato *et al.* 2003) pastebėjo, kad veikiant statine apkrova dažniausia susiformuodavo vienas magistralinis plyšys, taip suardydamas bandinį, o betoną veikiant ciklinėmis apkrovomis per visą bandinį susiformuodavo nedidelių plyšių tinklas, kurie, susijungdami vienas su kitu, suardydavo bandinį. Panašias tendencijas pastebėjo ir Prancūzų mokslininkai (Parant *et al.* 2007).

Šio tyrimo tikslas – išnagrinėti elastingo priedo iš skirtingo stambumo gumos atliekų įtaką betono atsparumui ciklinių apkrovų poveikiui, nustatyti tokio betono deformacijas ciklinio apkrovimo metu bei jo irimo mechanizmą.

## 2. Tyrimų metodika

Pirmajame tyrimų etape ištirta gumos atliekų įtaka betono deformatyvumui ciklinio gniuždymo metu, antrajame tyrimų etape – gumos atliekų stambumo ir kiekio įtaka betono atsparumui cikliškam gniuždymui. Pirmajame tyrimų etape buvo parinkti tokie betono mišiniai, kad jų gniuždymo stiprumai būtų panašūs tiek su gumos priedu, tiek be jo. Buvo pasirinktas 0/1 fr. gumos atliekų priedas.

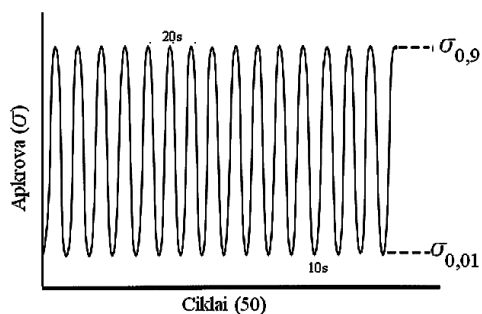
Norint nustatyti dempferuojančio gumos atliekų priedo įtaką betono deformatyvumui, buvo tiriamas betono irimas, apkrovus bandinius ciklinėmis apkrovomis. Nustatytas visiems bandiniams vienodas 20 ciklų skaičius. Vienodo stiprumo bandiniai buvo bandomi pasirinkus tris ciklų amplitudes (4 pav.).



4 pav. Betono ciklinis apkrovimo režimas (20 ciklų)

Fig. 4. Methods of cyclic loading (20 cycles) under different stress level (Stress,  $\sigma$ ; Cycles (20))

Antrajame tyrimų etape buvo naudojamos skirtingos frakcijos (0/1 fr., 1/2 fr., 2/3 fr.) susmulkintų padangų gumos atliekos bei skirtingas jų kiekis (5,0 %, 10 %, 20 %, 30 % bendros užpildų masės). Visiems bandiniams buvo padidintas ciklų skaičius iki 50. Buvo pasirinkta viena apkrovimo amplitudė (5 pav.) Viršutinė ciklo riba buvo parinkta lygi 90 % bandinių prizminio stiprio.



5 pav. Betonų ciklinis apkrovimo režimas (50 ciklų)

Fig. 5. Methods of cyclic loading (50 cycles) under 0,9σ stress level (Stress, σ; Cycles (50))

Bandiniai buvo apkraunami 1 MPa/s greičiu didėjančia gniuždomąja apkrova. Apatinė ciklo riba visiems bandiniams buvo parinkta lygi 5 kN. Apatinėje ciklo dalyje jėga buvo išlaikoma 10 s. Viršutinė ciklo riba buvo parinkta lygi 70 %, 80 % ir 90 % bandinių prizminio stiprio. Viršutinėje ciklo dalyje jėga buvo išlaikoma 20 s. Atlikus reikiamą ciklų skaičių bandiniai buvo apkraunami iki suirimo. Bandinių deformacijos buvo matuojamos poslinkio davikliais, specialia alkūne pritvirtintus prie stacionaraus preso rėmo.

### 3. Naudotos medžiagos ir betono sudėtys

Betono gamybai naudotas AB „Akmenės cementas“ portlandcementis CEM I 42,5 R. Vandens kiekis normalaus tirštumo cemento tešlai yra 24,5 %, cemento savitasis paviršius – 371 m<sup>2</sup>/kg, tankis – 3110 kg/m<sup>3</sup>.

Pirmajame tyrimų etape buvo naudojamas Rizgonių karjero 0/4 fr. smėlis. Dalis smėlio buvo keičiama susmulkintomis gumos atliekomis ir cemento kiekiu taip, kad bendras užpildų tūris kiekvienos serijos betono mišinyje išliktų tas pats.

Antrajame tyrimų etape naudotas Kvesų karjero 0/4 fr. smėlis. Dalis smėlio buvo keičiama skirtingos frakcijos (0/1 fr., 1/2 r., 2/3 fr.) susmulkintomis padangų atliekomis taip, kad bendras užpildų ir gumos priedo tūris betono mišinyje išliktų pastovus (5 %, 10 %, 20 %, 30 % užpildų bendros masės).

Stambiuoju užpildu naudota žvirgždo skalda 4/16 fr. Kaip superplastiklis naudotas Muraplast FK 63.30 (MCE) multikarboksilato esterio pagrindu, tirpalo tankis – 1,04 kg/l.

Tyrimams buvo naudotos gumos atliekos, mechaniškai susmulkinus naudotas automobilių padangas ir frakcionuotas į atskiras frakcijas: 0/1, 1/2 bei 2/3. Šių gumos trupinimo technologinę įrangą turi UAB „Metaloidas“ Šiauliuose. Susmulkintų gumos priedo dalelių vidutinis tankis – 1049 kg/m<sup>3</sup>.

Pirmajame tyrimų etape buvo išbandytos dvi betono sudėtys: betono sudėtis be gumos atliekų priedo bei betono sudėtis su 0/1 fr. gumos atliekų priedu, kurių kiekis – 3,2 % nuo suminio užpildų kiekio. Betono mišinių sudėtys pateiktos 1 lentelėje. Tokio betono vidutinis gniuždomasis stipris – 44 MPa.

Antrajame tyrimų etape išbandyta dvylika betono sudėčių dalį smėlio keičiant skirtingos frakcijos (0/1 fr., 1/2 fr., 2/3 fr.) ir kiekio (5 %, 10 %, 20 %, 30 % nuo užpildų bendros masės) susmulkintomis padangų gumos atliekomis taip, kad bendras užpildų ir gumos priedo tūris betono mišinyje išliktų tas pats. Šių betono mišinių sudėtys pateiktos 2 lentelėje. Tokio betono gniuždomieji stipriai kito nuo 64,3 MPa kontroliniuose bandiniuose iki 10,0 MPa bandiniuose, kuriuose buvo naudojamos smulčiausios frakcijos (0/1 fr.) gumos atliekos bei didžiausias jų kiekis (30 % suminio užpildų kiekio, dalį smėlio 0/4 fr. keičiant gumos atliekomis).

1 lentelė. Pirmojo tyrimų etapo betono mišinių sudėtys ir savybės

Table1. Mix design of the first stage

Žymuo	Gumos priedo stambumas	Medžiagų kiekiai 1 m <sup>3</sup> betono mišinio					
		gumos priedo kiekis, kg	cementas, kg	žvirgždo skalda 4/16 fr., kg	smėlis 0/4 fr., kg	cheminiai priedai, kg	vanduo, l
R 0/1_3.2	0/1	23,13	404	995	723	1,98	182
NR	–	–	330	995	891	1,98	182

2 lentelė. Antrojo tyrimų etapo betono mišinių sudėtys ir savybės

Table 2. Mix design of the second stage

Žymuo	Gumos priedo stambumas	Medžiagų kiekiai 1 m <sup>3</sup> betono mišinio						
		gumos priedo kiekis, %	gumos priedo kiekis, kg	cementas, kg	smėlis 0/4 fr, kg	žvirgždo skalda 4/16 fr, kg	cheminiai priedai, kg	vanduo, l
NR	–	–	–	451	875	949	2.255	160
R 0/1_5	0/1	5	35.14	451	784	949	2.255	160
R 0/1_10		10	70.28		693			
R 0/1_20		20	140.55		510			
R 0/1_30		30	210.83		328			
R 1/2_5	1/2	5	35.14	451	784	949	2.255	160
R 1/2_10		10	70.28		693			
R 1/2_20		20	140.55		510			
R 1/2_30		30	210.83		328			
R 2/3_5	2/3	5	35.14	451	784	949	2.255	160
R 2/3_10		10	70.28		693			
R 2/3_20		20	140.55		510			
R 2/3_30*		30	210.83		328			

**Pastaba:** \*Netechnologiškas mišinys. Betone, kuriame buvo naudojama 30 % užpildo tūrio 2/3 fr. gumos atliekų, vyko užpildų segregacija. Dėl šios priežasties betono mišinys R 2/3\_30 nebuvo naudotas tolesniems tyrimams.

#### 4. Tyrimų rezultatai

##### 4.1. Elastingo priedo iš gumos atliekų įtaka cikliškai gniuždomo betono deformacijoms ir stiprumui

Bandinių deformacijų kreivės po ciklinių apkrovų poveikio pagal tyrimų metodiką, aprašytą 2 skyriuje, pateiktos 6–8 pav.

Nustatyta, kad betono bandiniai be gumos atliekų priedo, apkrauti iki 70 % nuo prizminio gniuždymo stiprio, deformavosi 736  $\mu\text{m}$ , o betono bandiniai su gumos atliekų priedu po tos pačios apkrovos deformavosi 1199  $\mu\text{m}$ . Po 20 ciklų rezultatai parodė deformacijų padidėjimą tiek bandiniuose, kuriuose buvo naudojamos gumos atliekos, tiek bandiniuose be gumos atliekų priedo (6 pav.). Pastebėta, kad pasirinkus  $0,7\sigma_{\text{max}}$  viršutinę ciklo amplitudę, po 20 ciklų, padidėjo bandiniuose be gumos atliekų priedų deformacijos apie 217  $\mu\text{m}$ , o bandiniuose su gumos atliekų priedu – 162  $\mu\text{m}$ . Liekamosios deformacijos bandiniuose be gumos atliekų priedo ir su smulkintų padangų gumos atliekų priedu 0/1 fr. didėjo atitinkamai nuo 164  $\mu\text{m}$  iki 264  $\mu\text{m}$  bei nuo 547  $\mu\text{m}$  iki 661  $\mu\text{m}$ .

Įtempių ir deformacijų priklausomybės apkraunant bandinius ciklinėmis apkrovomis iki 80 % prizminio gniuždomojo stiprio pateiktos 7 pav.

Padidinus viršutinę ciklo apkrovą iki  $0,8\sigma$ , pastebėtas panašus deformacijų pokytis, kaip ir esant viršutinei apkrovai  $0,7\sigma_{\text{max}}$ . Pastebėta, kad bandiniuose be

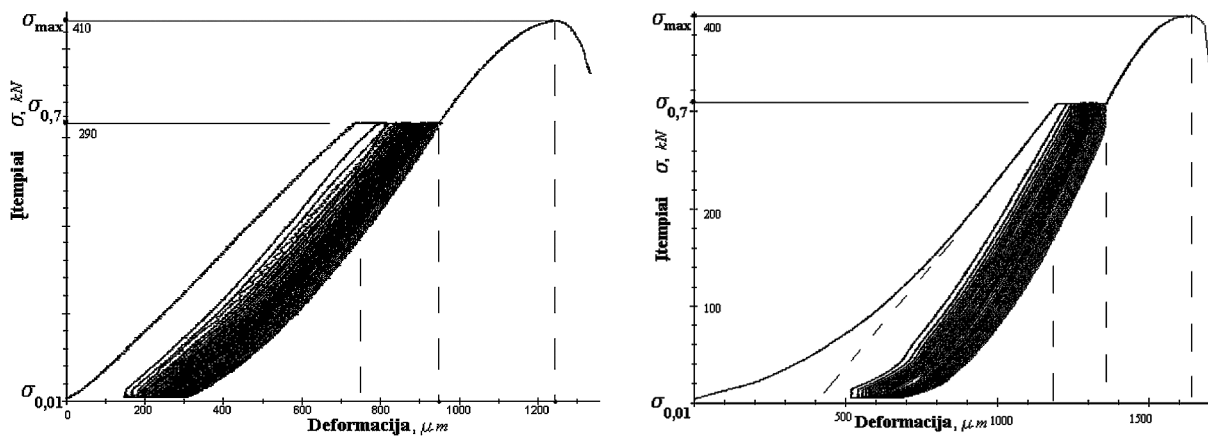
gumos atliekų priedo išilginės deformacijos po pirmo ciklo kito nuo 743  $\mu\text{m}$  iki 880  $\mu\text{m}$  atlikus 20 ciklų. Liekamosios deformacijos po pirmo ciklo kito nuo 85  $\mu\text{m}$  iki 191  $\mu\text{m}$  atlikus 20 ciklų. Bandiniuose su gumos atliekų priedu išilginės deformacijos kito nuo 1161 iki 1434  $\mu\text{m}$ , o nukrovus – nuo 391 iki 642  $\mu\text{m}$ .

Deformacijų kreivės apkraunant bandinius ciklinėmis apkrovomis iki 90 % prizminio gniuždymo stiprio pateiktos 8 pav.

Apkrovus bandinius be gumos atliekų priedo išilginės deformacijos kito nuo 743  $\mu\text{m}$  iki 955  $\mu\text{m}$ , o nukrovus bandinius liekamosios deformacijos – nuo 140  $\mu\text{m}$  iki 271  $\mu\text{m}$ , apkrovus bandinius su 0/1 fr. gumos priedu išilginės deformacijos kito nuo 1213  $\mu\text{m}$  iki 1467  $\mu\text{m}$ , liekamosios deformacijos – nuo 446  $\mu\text{m}$  iki 656  $\mu\text{m}$ .

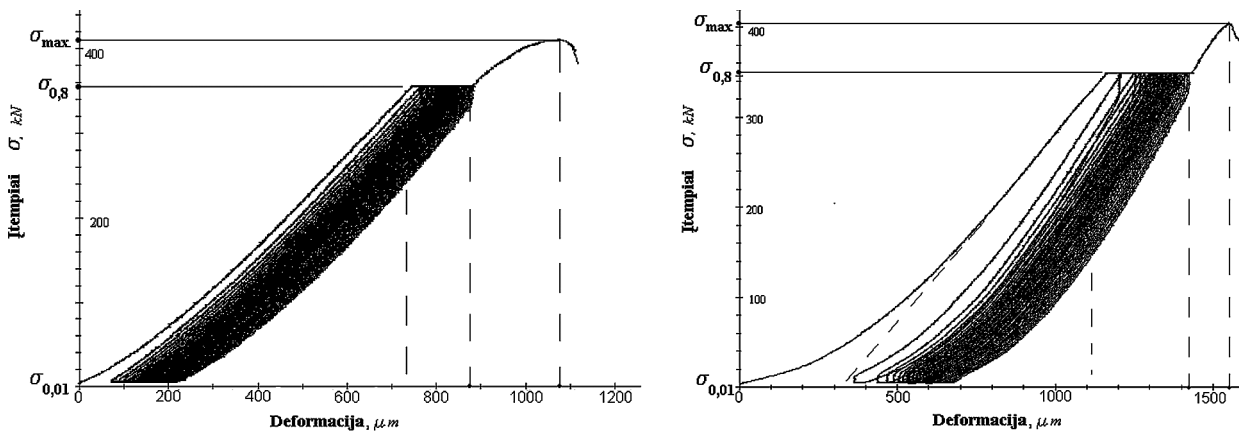
Gauti rezultatai rodo, kad betono, apkrauto cikline apkrova, deformacijos priklauso nuo gumos atliekų priedo. Betonuose su gumos atliekų priedu deformacijos, apkrovus bandinius 70 % prizminio gniuždomojo stiprio, yra 63 % didesnės, o nukrovus bandinius, liekamoji deformacija 234 % didesnė. Apkrovus bandinius 80 % prizminio gniuždomojo stiprio betonų su gumos atliekų priedu deformacijos yra atitinkamai 56 % ir 360 % didesnės už bandinių be gumos priedo. Apkrovus bandinius 90 % prizminio gniuždomojo stiprio atitinkamos deformacijos gautos 63 % ir 219 % didesnės už bandinių be gumos priedo.

Nustatyta, kad 20 ciklų apkrova bandinių stiprumui neturi įtakos, tiek naudojant gumos atliekų prie-



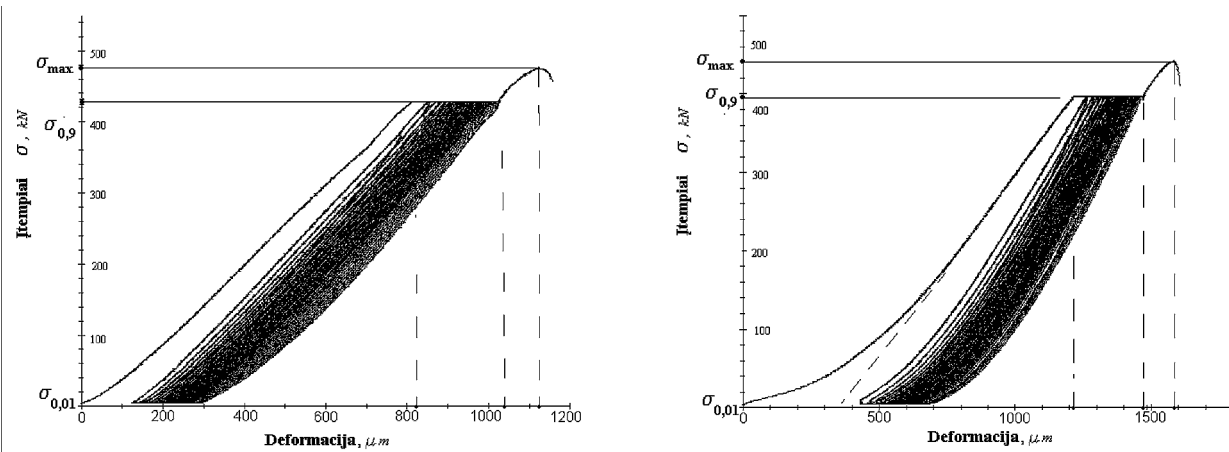
6 pav. Cikliškai gniuždomo betono be gumos priedo ir su 0/1 fr. gumos priedu deformacijų kreivės, jį apkraunant iki  $0,7 \cdot \sigma_{max}$

Fig. 6. Concrete without rubber waste and with rubber waste fr. 0/1 stress- strain curves after 20 cycles loading when upper stress level reaches  $0,7 \cdot \sigma_{max}$  (Stress  $\sigma$ , kN; Strain,  $\mu m$ )



7 pav. Cikliškai gniuždomo betono be gumos priedo ir su 0/1 fr. gumos priedu deformacijų kreivės, jį apkraunant iki  $0,8 \cdot \sigma_{max}$

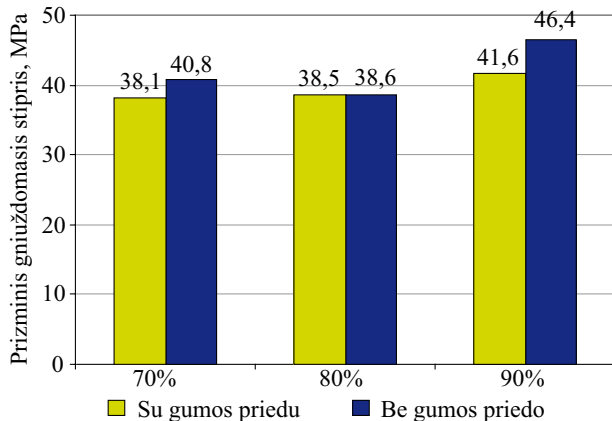
Fig. 7. Concrete without rubber waste and with rubber waste fr. 0/1 stress- strain curves after 20 cycles loading when upper stress level reaches  $0,8 \cdot \sigma_{max}$  (Stress  $\sigma$ , kN; Strain,  $\mu m$ )



8 pav. Cikliškai gniuždomo betono be gumos priedo ir su 0/1 fr. gumos priedu deformacijų kreivės, jį apkraunant iki  $0,9 \cdot \sigma_{max}$

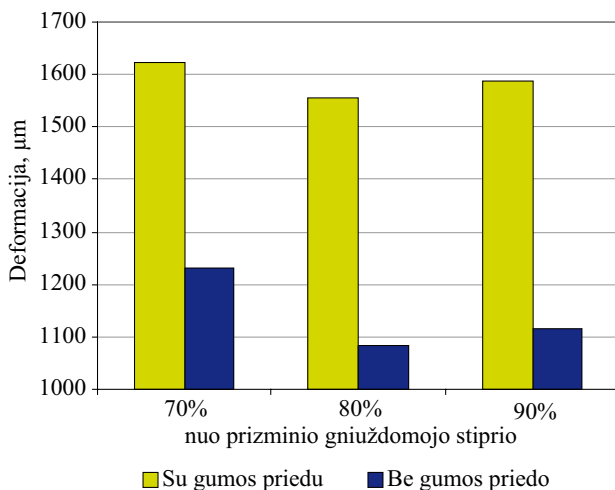
Fig. 8. Concrete without rubber waste and with rubber waste aggregate fr. 0/1 stress- strain curves after 20 cycles loading when upper stress level reaches  $0,9 \cdot \sigma_{max}$  (Stress  $\sigma$ , kN; Strain,  $\mu m$ )

dus, tiek be jų (9 pav.). Ribinės bandinių su gumos atliekų priedu ir be jų deformacijos suyrant gerokai skiriasi (10 pav.). Apkrovus bandinius iki 70 % prizminio gniuždomojo stiprio su gumos atliekų priedu išilginės deformacijos yra 36 % didesnės, apkrovus 80 % yra 47 % didesnės, o apkrovus 90 % yra 42 % didesnės už bandinių be gumos priedo.



9 pav. Betono gniuždomasis stipris po 20 ciklų, kai viršutinė ciklo amplitudė  $0,7\cdot\sigma_{\max}$ ,  $0,8\cdot\sigma_{\max}$  ir  $0,9\cdot\sigma_{\max}$

Fig. 9. Concrete compressive strength after 20 cycles loading when cycle upper stress level reaches  $0,7\cdot\sigma_{\max}$ ,  $0,8\cdot\sigma_{\max}$  and  $0,9\cdot\sigma_{\max}$  (Prismatic compressive strength, MPa)



10 pav. Ribinės bandinių deformacijos po 20 ciklų, kai viršutinė ciklo amplitudė  $0,7\cdot\sigma_{\max}$ ,  $0,8\cdot\sigma_{\max}$  ir  $0,9\cdot\sigma_{\max}$

Fig. 10. The limited strain level of concrete after 20 cycles loading when cycle upper stress level reaches  $0,7\cdot\sigma_{\max}$ ,  $0,8\cdot\sigma_{\max}$  and  $0,9\cdot\sigma_{\max}$  (Strain,  $\mu\text{m}$ ; from prismatic compressive strength)

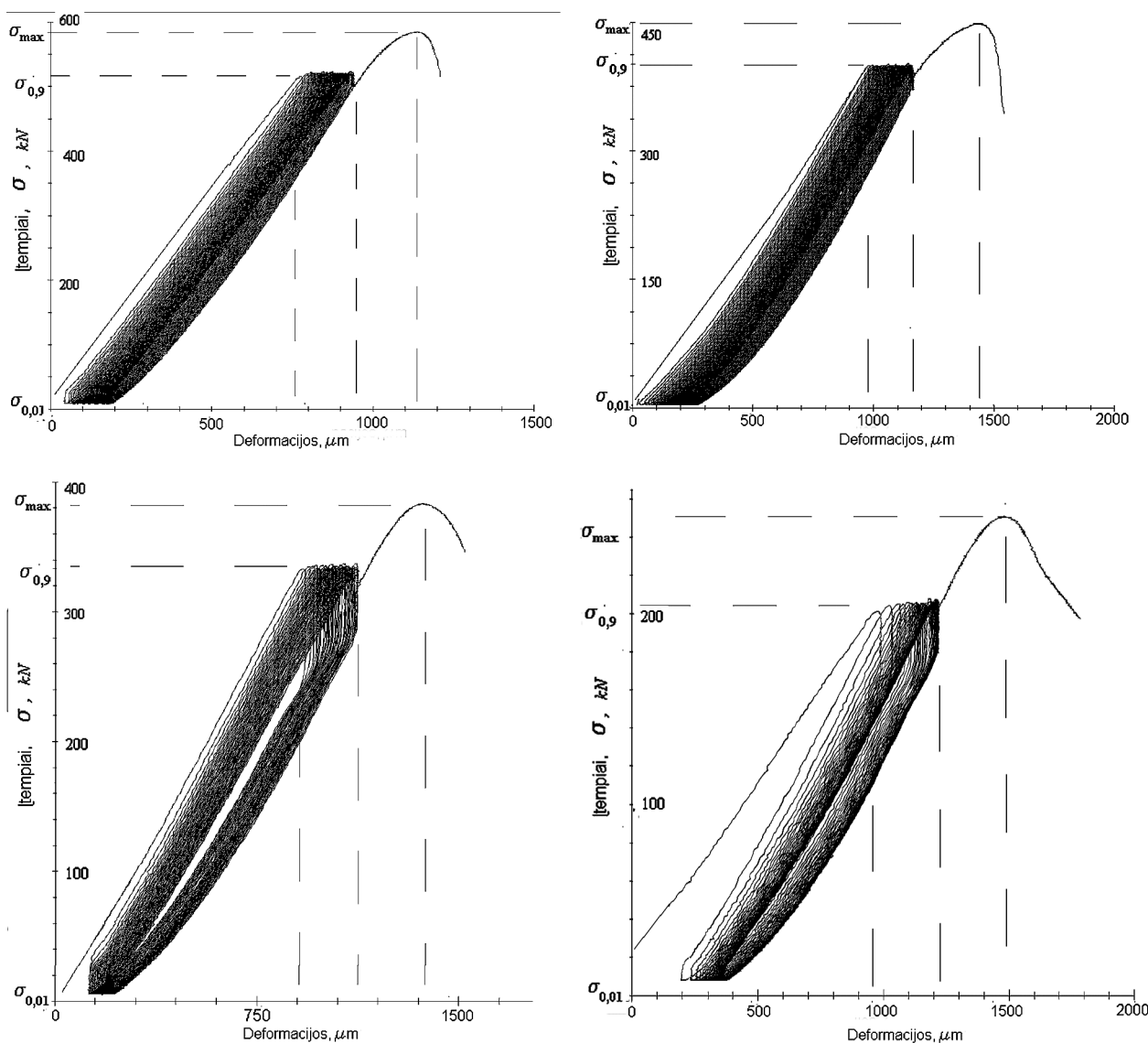
Iš 6–8 pav. pateiktų deformacijų kreivių matoma, kad betono be gumos atliekų deformacijos, priklausomai nuo įtempių, kinta beveik tiesiškai, bandinių be gumos atliekų priedo deformacijų kreivė artima tiesei.

Betono su gumos atliekų priedu deformacijos apkrovimo pradžioje didėja kur kas greičiau nei esant dideliems įtempiams. Pastebėta, kad bandiniuose su gumos atliekų priedu ypač didelės deformacijos (liekamosios) susidaro pradiniu bandinių su gumos atliekų priedu apkrovimo periodu (iki 400–500  $\mu\text{m}$ ). Be to, pastebėta, kad įtempių ir deformacijų kreivė nėra tiesinė kaip kad kontrolinių bandinių, o įgauna kreivės pavidalą. Iš eksperimentų aiškiai matyti, kad nukraunant bandinius su gumos atliekų priedu susidaro daug didesnės liekamosios deformacijos negu betono be gumos atliekų priedo.

#### 4.2. Elastingo priedo kiekio ir stambumo įtaka cikliškai gniuždomo betono deformacijoms ir stiprumui

Bandinių deformacijų kreivės po ciklinių apkrovų poveikio naudojant skirtingos frakcijos (0/1 fr., 1/2 fr., 2/3 fr.) susmulkintų padangų gumos atliekas ir skirtingą jų kiekį (5 %, 10 %, 20 %, 30 % nuo bendros užpildų masės) pagal tyrimų metodiką, aprašytą 2 skyriuje, pateiktos 11, 12 pav. Tyrimų rezultatai parodė, kad bandiniai tiek naudojant gumos atliekų priedus, tiek be jų atlaikė 50 ciklų pasirinkus metodiką, pavaizduotą 5 pav., tačiau, atlikus išsamesnę analizę, pastebėta, kad bandiniuose su gumos atliekų priedais labai skiriasi plastinės deformacijos bei ribinės deformacijos bandiniui suyrant.

11 pav. pavaizduota betono be gumos atliekų priedo deformacijų kreivės po 50 apkrovimo ciklų, kai viršutinė ciklo apkrova  $0,9\cdot\sigma_{\max}$ . Nustatyta, kad betono deformacijos kito nuo 750  $\mu\text{m}$  prieš ciklišką apkrovą iki 950  $\mu\text{m}$  po 50 ciklų. Pateiktame paveiksle matyti, kad ribinės deformacijos suyrant bandiniui buvo 1140  $\mu\text{m}$ . Į betoną įdėjus dempferuojantį smulkintų padangų gumos atliekų 2/3 frakcijos priedą (11 pav.) pastebėtas išilginių ir ribinių deformacijų padidėjimas. Nustatyta, kad bandiniuose su 2/3 fr. gumos atliekomis 5 % nuo suminio užpildų kiekio plastinės deformacijos kito nuo 980  $\mu\text{m}$  iki 1170  $\mu\text{m}$  po 50 ciklų, o ribinės deformacijos suyrant bandiniui – 1450  $\mu\text{m}$  (11 pav.). Padidinus gumos atliekų priedo 2/3 frakcijos kiekį iki 10 % nuo suminio užpildų kiekio, deformacijos kito atitinkamai nuo 910  $\mu\text{m}$  iki 1120  $\mu\text{m}$  ir ribinės deformacijos sudarė 1400  $\mu\text{m}$  (11 pav.). Į betoną įdėję 20 % gumos priedo gausime dar deformatyvesnį konglomeratą. Betonuose padidinus gumos atliekų priedo 2/3 fr. kiekį iki 20 % nuo suminio užpildų kiekio ir, palyginti su bandiniais be gumos atliekų priedo, gausime deformacijų padidėjimą iki 40 %, o ribinių deformacijų – daugiau nei 30 %.



11 pav. Cikliškai gniuždomo betono be gumos atliekų priedo ir betono su 2/3 fr. skirtingu gumos atliekų priedo kiekiu (5 %, 10 %, 20 % bendro užpildų kiekiu) deformacijų kreivės, apkraunant iki  $0,9 \cdot \sigma_{max}$

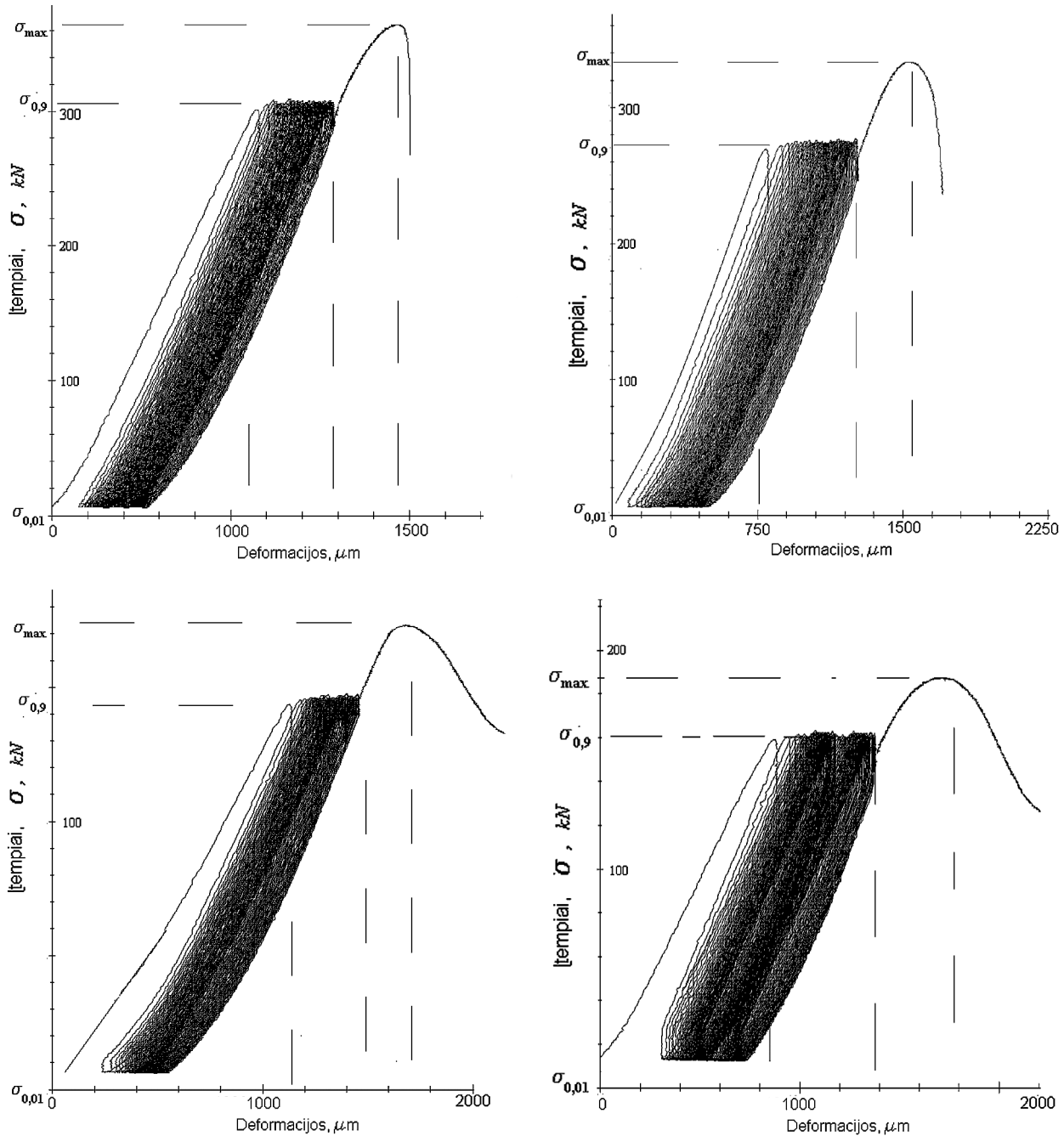
Fig. 11. Concrete without rubber waste aggregate and with a different amount of fr. 2/3 rubber waste (5%, 10%, 20% from total aggregate mass) stress- strain curves after 50 cycles loading when upper stress level reaches  $0,9 \cdot \sigma_{max}$  (Stress,  $\sigma$ ; Strain,  $\mu m$ )

Bandinių su elastingu priedu iš gumos atliekų 0/1 fr. savybės, betoną veikiant ciklinėmis apkrovomis, pateiktos 12 pav. Nustatyta, kad naudojant smulkausios frakcijos gumos atliekas gaunamas didžiausias betono deformatyvumas. Betonuose didinant gumos atliekų priedo 0/1 fr. kiekį nuo 5 % iki 30 % nuo suminės užpildų masės, deformatyvumas didėja. Pagal rezultatus, pateiktus 12 pav., matyti, kad bandiniuose, kuriuose buvo naudojamas gumos atliekų priedo 0/1 fr. kiekis – 5 % nuo suminio užpildų kiekio, platinės deformacijos kito nuo 1050  $\mu m$  iki 1290  $\mu m$  po 50 apkrovimo ciklų. Bandiniuose didinant priedo kiekį, deformacijos didėjo. Buvo gauta, kad bandiniuose, kuriuose buvo naudojama 10 % 0/1 fr. gumos atliekų

priedo, deformacijos padidėjo iki 110 % nemodifikuotų gumos atliekų priedo bandinių atžvilgiu (11 pav.). Įdėjus 20 % bei 30 % nuo suminio užpildų kiekio 0/1 fr. gumos atliekų bandinių deformacijos padidėjo atitinkamai 70 % ir 125 % bandinių be gumos atliekų priedo atžvilgiu (12 pav.).

Iš 12 pav. matyti, kad prieš suirdami bandiniai labiau deformavosi, susidarė daug didesnės ribinės deformacijos nei bandiniuose, kuriuose nebuvo naudojamas demperuojantis gumos atliekų priedas (11 pav.). Buvo nustatyta, kad ribinės deformacijos, priklausomai nuo bandiniuose įdėto gumos atliekų 0/1 fr. kiekio, kito nuo 1470  $\mu m$ , naudojant 5 % gumos atliekų priedo kiekį nuo suminio užpildų kiekio, iki 1820  $\mu m$





**12 pav.** Cikliškai gniuždomo betono su 0/1 fr. skirtingu gumos atliekų priedo kiekiu (5 %, 10 %, 20 %, 30 % bendro užpildų kiekio) deformacijų kreivės, apkraunant iki  $0,9 \cdot \sigma_{\text{max}}$

**Fig. 12.** Concrete with a different amount of fr. 0/1 rubber waste (5%, 10%, 20%, 30% from total aggregate mass) stress-strain curves after 50 cycles loading when upper stress level reaches  $0,9 \cdot \sigma_{\text{max}}$  (Stress,  $\sigma$ ; Strain,  $\mu\text{m}$ )

naudojant 30 % gumos atliekų priedo kiekį nuo suminio užpildų kiekio. Ribinės deformacijos padidėja 60 % pridėjus 30 % gumos atliekų priedo.

## 5. Išvados

1. To paties gniuždomojo stiprio betonuose su mechanškai smulkintomis gumos atliekomis, deformacijos po 20 ciklų 56–63 % didesnės, o liekamosios defor-

macijos nukrovus yra 219–360 % didesnės nei bandiniuose, kuriuose nebuvo naudojamas gumos atliekų priedas.

2. Esant tam pačiam betono gniuždomajam stipriui, betono su 3,2 % nuo bendro užpildų kiekio gumos atliekų priedu ir be gumos atliekų priedo prizminis stiprumas po ciklinių apkrovų (20 ciklų) poveikio nepakinta.

3. To paties gniuždomojo stiprio betono, kuriame buvo naudojamas gumos atliekų priedas po 20 ciklų apkrovos poveikio, ribinės deformacijos yra 36–47 % didesnės nei bandinių be gumos priedo.

4. Betono deformacijos didėja, didinant gumos atliekų priedo kiekį ir smulkėjant gumos dalelių dydžiui. Betono trapumui sumažinti efektyvu naudoti iki 1,0 mm susmulkintas gumos atliekas, dedant jų iki 30 % nuo užpildų kiekio.

5. Betono ribinės deformacijos padidėja iki 30 %, naudojant 20 % 2/3 fr. gumos atliekų priedą ir iki 60 %, naudojant 30 % 0/1 fr. gumos atliekų priedą.

6. Gumos atliekas tikslinga naudoti betono konstrukcijose, veikiamose daugkartinėmis nuolat pasikartojančiomis apkrovomis.

### Literatūra

- Breitenbücher, R.; Ibuk, H.; Alawieh, H. 2007. Influence of cyclic loading on the degradation of mechanical concrete properties, in *Conference Book "Advances in Construction Materials 2007"*, Heidelberg. Berlin: Springer, Part V: 317–324.
- Cornelissen, H. A. W. 1984. Fatigue failure of concrete in tension, *Heron* 29(4): 1–68.
- Holmen, J. O. 1979. Fatigue of concrete by constant and variable amplitude loading. *Bulletin No 79-1, Division of Concrete Structures*. NTH - Trondheim.
- Holmen, J. O. 1982. Fatigue of concrete by constant and variable amplitude loading, *Journal of ACI* 79(1): 71–110.

- Hordijk, D. A. 1991. *Local Approach to Fatigue of Concrete*. Oud-Beijerland.
- Kim, J.-K.; Kim, Y.-Y. 1999. Fatigue crack growth of high-strength concrete in wedge-splitting test, *Cement and Concrete Research* 29: 705–712. doi:10.1016/S0008-8846(99)00025-3
- Landis, E. N.; Zhang, T.; Nagy, E. N.; Nagy, G.; Franklin, W. R. 2007. Cracking, damage and fracture in four dimensions, *Materials and Structures* 40: 357–364. doi:10.1617/s11527-006-9145-5
- Lloyd, J. P.; Lott, J. L.; Kesler, C. E. 2007. *Fatigue of Concrete*. University of Illinois at Urbana-Campaign Library Large-scale Digitization Project.
- Long term random dynamic loading of concrete structures. 1984. RILEM Report. Technical Committee 36-RDL, *Mater. Struct.* 17 (97): 1–29.
- Parant, E.; Rossi, P.; Boulay, C. 2007. Fatigue behavior of a multi-scale cement composite, *Cement and Concrete Research* 37: 264–269. doi:10.1016/j.cemconres.2006.04.006
- Sain, T., Kishen, C. J. M. 2008. Probabilistic assessment of fatigue crack growth in concrete, *International Journal of Fatigue* 30: 2156–2164. doi:10.1016/j.ijfatigue.2008.05.024
- Sato, Y.; Tateishi, A.; Kakuta, Y. 2003. Investigation of Deformational Characteristics of Concrete under Sustained and Cyclic Loading, in *Proceedings of JCI* 25(1): 1123–1128.
- Song, Y.; Cao, W.; Meno, X. 2006. Fatigue properties of plain concrete under triaxial constant-amplitude tension-compression cyclic loading, *Journal of Shanghai University (English Edition)* 9(2): 127–133. doi:10.1007/s11741-005-0064-4
- Toumi, A.; Bascoul, A.; Turatsinze, A. 1998. Crack propagation in concrete subjected to flexural - cyclic loading, *Materials and Structures* 31: 451–458. doi:10.1007/BF02480468

## THE STRENGTH OF CONCRETE WITH AN ELASTIC ADDITIVE OF TIRES RUBBER WASTE UNDER CYCLIC LOADING

G. Skripiūnas, A. Grinys

**Summary.** Concrete strength under cyclic loads is much lower compared to short-term loading strength because cyclic loads stimulate the growth of microcracks in the cement matrix, reduce the adherence of cement stone and aggregates and cause higher creep deformations. The paper presents the deformations of samples with or without a rubber waste additive subjected to cyclic loads and determined by the methods developed during research. The obtained results show that relative plastic strains under cyclic load and relative residual strains after the removal of the load depend on the rubber additive. Relative strains in the rubberized concrete samples loaded at 70% prism compressive strength are 63% higher and residual strains after the removal of the load are 234% higher. When the samples are loaded at 80% of prism compressive strength, relative strains and residual strains after the removal of the load in concrete with the rubber additive are respectively 56% and even 360% higher if compared to the samples without the rubber additive. When the samples are loaded at 90% of prism compressive strength, the obtained respective relative strains are 63% and 219% higher compared to the samples without rubber additives. An increase in relative plastic and residual strains shows the influence of the rubber additive on the stress-strain behaviour of concrete subjected to cyclic loads. The conducted investigation has revealed that concrete with rubber waste additive under cyclic loads changes ultimate strains. We can see a significant difference in the yield deformations leading to the ultimate failure of concrete with or without the rubber additive. When the samples of rubberized concrete are loaded at 70% of prism compressive strength, the longitudinal ultimate strains are 36% higher; loading at 80% results in 47% higher strains and that at 90% results in 42% higher strains compared to the non-rubberized concrete samples. The analysis of changes in deformation conducted by the created method does not give a precise forecast as to the number of cycles that one or another type of concrete will resist under a certain load. Nevertheless, the obtained changes in deformations enable to make

rather precise decisions with regard to the ability of concrete to absorb cyclic stresses with the higher strains of the concrete matrix. A detailed analysis of the test results has revealed the following tendencies: concrete with rubber additives has better deformation abilities under cyclic loads because of bigger plastic (residual) strains and bigger ultimate strains. This leads to the presumption that rubber additives present in the concrete matrix are able to absorb cyclic-load-stimulated internal stresses driving the concrete fragmentation process.

**Keywords:** concrete, rubber waste additive, cyclic loading, residual strains, ultimate strains

**Gintautas SKRIPKIŪNAS.** Assoc. Prof., Dr at the Department of Building Materials, Building Materials and Structures Research Centre. Kaunas University of Technology (KTU). PhD degree at Kaunas University of Technology (1994). The author and co-author of a coursebook and more than 60 scientific articles. Research interests: concrete mixtures rheology, concrete structure and properties, concrete structure modification, high-strength concrete.

**Audrius GRINYS.** Ph.D. student at the Department of Building Materials. Kaunas University of Technology (KTU), Kaunas, Lithuania. Research interests: technological properties of concrete mixture, strength and elasticity – plasticity behaviour of concrete.