

KOMPOZITINIŲ PLIENBETONINIŲ PLOKŠČIŲ, ARMUOTŲ PLIENINIŲ  
PLAUŠU, SAVYBIŲ TYRIMAS

Mindaugas Petkevičius

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

El. paštas mindaugas.petkevicius@stst.vgtu.lt

**Anotacija.** Nagrinėjama plieninio plaušo įtaka kompozitinių plienbetoninių plokščių stiprumui ir standumui veikiant statinei trumpalaikiai apkrovai. Bandiniams panaudoti „kregždės uodegos“ tipo plieniniai lakštai ir plieniniu plaušu armuotas betonas. Iš viso buvo pagamintos keturios plokštės. Siekiant nustatyti plieninio plaušo įtaką kompozitinių plokščių stiprumui ir standumui, atliktas eksperimentinis tyrimas. Eksperimentinių bandymų metu buvo matuojamos skersinės, išilginės, šlyties deformacijos ir įlinkiai. Bandymų rezultatai parodė, kad plieninio plaušo naudojimas kompozitinėse plokštėse yra efektyvus: laikomoji galia yra 20–24 % didesnė ir įlinkių reikšmės, veikiant  $0,6M_R$  (čia  $M_R$  lenkimo momentas, kuriam veikiant plokštės suyra) apkrovai, yra 16–18 % mažesnės už plokščių su įprastu betonu.

**Reikšminiai žodžiai:** kompozitinė plokštė, plieninis plaušas, standumas, stiprumas.

## Įvadas

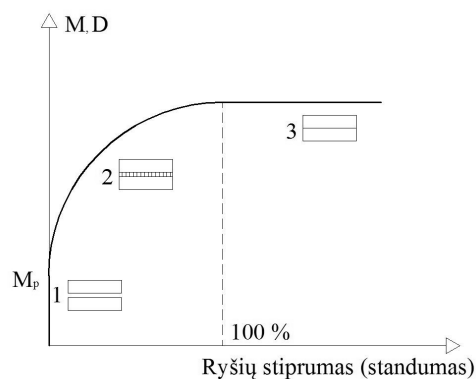
Profiliuotųjų plieninių lakštų komponavimas su betono sluoksniu yra optimalus pastatų perdangų konstrukcijos sprendinys. Šie konstrukciniai sprendiniai padeda gerokai sumažinti konstrukcijos kainą, sutaupoma iki 30 % betono, gaunamas geras konstrukcijos stiprumas ir standumas, nereikalingi klojiniai, greitas įrengimas, mažas konstrukcijos aukštis ir svoris. Tokios konstrukcijos yra naudojamos gyvenamųjų ir komercinių pastatų perdangoms įrengti (Dowling *et al.* 1997).

Optimaliai parenkant ir išdėstant kompozitines konstrukcijas sudarančius komponentus, geriau naudojamos komponentų fizikinės ir mechaninės savybės. Kompozitinių konstrukcijų darbas labai priklauso nuo sluoksnių jungties standumo.

Kompozitinėse plienbetoninėse plokštėse bendrąjį sluoksnių darbą veikiant apkrovai galima pasiekti neleidžiant plieniniam lakštui ir betono sluoksniui pasislinkti sąlyčio plokštumoje. Adhezinis ir trinties betono ir metalo sukibimas ne visuomet garantuoja, kad pasislinkimas neįvyks. Eksperimentiniai tyrimai rodo, kad tokios plokštės suyra sąlyčio zonoje prie atramų (de Andrade *et al.* 2004; Tenhovuori *et al.* 1996), praslydus betonui ir plieniniam lakštui. Taigi šio tipo konstrukcijos stiprumas ir standumas priklauso nuo kontakto zonos plieninio lakšto ir betono stiprumo sąlyčio. Todėl ieškoma įvairių būdų betono sluoksnio ir plieninių lakštų sąlyčio stiprumui ir standumui užtikrinti.

Dažnai profiliuotųjų lakštų skardoje daromi įvairios formos nelygumai (briaunelės), kurie didina mechaninį atsparumą praslysti (Burnet *et al.* 2004; Motak *et al.* 2004). Atramų zonoje gali būti įrengiama specialių inkarų.

Kaip pavaizduota 1 pav., tokių konstrukcijų stiprumas ir standumas priklauso nuo sluoksnių stiprumo ir standumo ryšio.



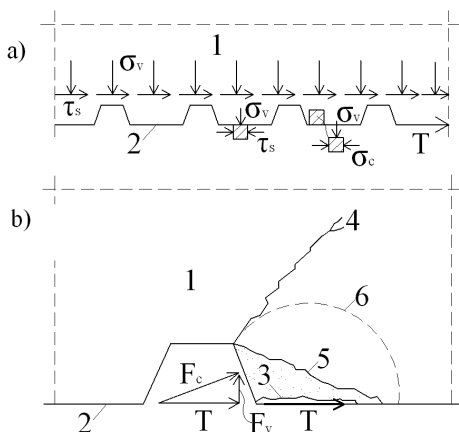
**1 pav.** Sluoksnių stiprumo (standumo) ryšių įtaka konstrukcijos darbui veikiant apkrovai (Vaškevičius *et al.* 2001):

$M, D$  – konstrukcijos stiprumas ir standumas; 1 – nėra ryšių; 2 – netvarūs ryšiai; 3 – stiprūs ir standūs ryšiai

**Fig. 1.** Influence of strength (stiffness) of connections between the layers on structure behaviour under the load (Vaškevičius *et al.* 2001):  $M, D$  – strength and stiffness of the structure; 1 – without connections; 2 – yielding connections; 3 – stiff and strong connections

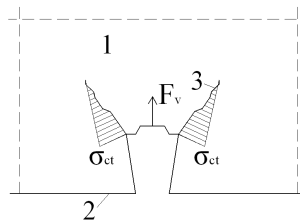
Kai ryšių nėra, dirba tik profiliuotasis plieninis lakštas (1 pav., 1). Didinant ryšio standumą bendrasis konstrukcijos stiprumas ir standumas taip pat didėja (1 pav., 2). 2 keivės ruože (tarp 1 ir 3) konstrukcija suirs dėl šlyties įtempimų sluoksnių kontakto plokštumoje. Kai ryšiai yra pakankamai stiprūs ir standūs (3 ir toliau), konstrukcija suirs įstrižame arba statmename pjūvyje. Vadinasi, sluoksniuotos konstrukcijos skiriasi ir tuo, kad projektuojant pirmąsias reikia apskaičiuoti ne dviejų, o trijų pjūvių: įstrižojo, statmenojo (vertikalojo) ir horizontaliojo (sluoksnių kontakto plokštumoje) stiprumą (Vaškevičius *et al.* 2001).

Bandiniuose panaudojus plieninius lakštus su įvairios formos nelygumais (briaunelėmis) iš atliktų eksperimentinių tyrimų nustatytas tokių plokščių suirimo mechanizmas (Valivonis 2006). Lenkiant tokią plokštę, kontakto zonoje atsiranda šlyties jėga  $T$  (2 pav.), kuri prie briaunelės sukelia vietinius gniuždymo įtempimus  $\sigma_c$ . Gniuždymo įtempimams viršijus betono gniuždomąjį stiprį betono struktūra suyra, susidaro kylio formos pleištas, kuris sukelia vertikaliąsias ir horizontaliąsias jėgas. Susidaro sudėtingas įtempimų būvis, todėl pagrindiniams tempimo įtempimams viršijus betono tempiamąjį stiprį įvyksta suirimas (3 pav.). Tokio tipo konstrukcija suyra ruože tarp jėgos pridėjimo vietos ir atramos.



**2 pav.** Įtempimų ir deformacijų būvis kontakto zonoje tarp profiliuotojo plieno lakšto ir betono sluoksnio (Valivonis 2006): a – įtempimų pasiskirstymas išilgai bangų; b – įtempimai ir suirimo mechanizmas prie briaunelės: 1 – betono sluoksnis; 2 – plieno lakšto briaunelė; 3 – betono atskala (pleištas); 4 – plyšys per pagrindinį įtempimą; 5 – betono vidinės struktūros suardymas, plyšiai; 6 – plastiškumo zona

**Fig. 2.** State of stresses and strains in the contact zone between the profiled sheeting and the concrete (Valivonis 2006): a – distribution of stresses along the rib; b – stresses and mechanism of failure at the key on the rib: 1 – layer of concrete; 2 – rib in the sheeting; 3 – spalled of concrete; 4 – crack due to the principal stresses; 5 – destruction of concrete inner structure, cracks; 6 – plasticity zone



**3 pav.** Įtempimų pasiskirstymas skersai bangos (Valivonis 2006): 1 – betono sluoksnis; 2 – plieninis profiliuotasis lakštas; 3 – pagrindinio plyšio kryptis

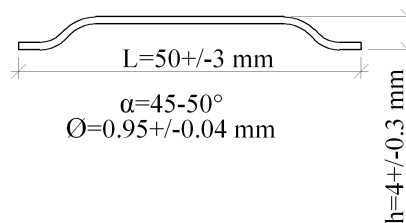
**Fig. 3.** Distribution of load effects in transverse direction of the rib (Valivonis 2006): 1 – layer of concrete; 2 – steel profiled sheeting; 3 – direction of the main crack

Siekiant padidinti kontakto zonos stiprumą, bus panaudotas plieniniu plaušu armuotas betonas.

Šio darbo tikslas – nustatyti plieninio plaušo įtaką kompozitinių plienbetoninių plokščių stiprumui ir standumui.

### Kompozitinių plokščių darbo eksperimentinis tyrimas

Tyrimams paruoštos keturios kompozitinės plienbetoninės plokštės. Bandiniams gaminti naudoti STEEL-COMP firmos „kregždės uodegos“ CS48-36-750 ZN0.9 tipo plieniniai lakštai. Betono mišiniui gaminti naudota granito skalda (5–11 mm), kvarcinis smėlis (0–5 mm) ir portlandcementis. Plieninis plaušas TF HE 50/1.0 tipo (4 pav.), plaušo kiekis  $20 \text{ kg/m}^3$  betono.



**4 pav.** Plieninio plaušo TF HE 50/1.0 schema

**Fig. 4.** Steel fiber TF HE 50/1.0 scheme

Buvo atlikti du betonavimai. Pirmuoju ir antruoju betonavimu pagaminta po dvi plokštes. Vieno betonavimo metu vienos plokštės betonas armuotas plieniniu plaušu, kitos – nearmuotas. Visų plokščių skerspjūvių aukštis 100 mm.

Kiekvieno betonavimo metu medžiagų mechaninėms savybėms nustatyti pagaminti kontroliniai bandiniai. Gautos medžiagų mechaninių charakteristikų vidutinės reikšmės pateiktos 1 ir 2 lentelėse.

**1 lentelė.** Betono mechaninių charakteristikų vidutinės reikšmės  
**Table 1.** Rate meanings of mechanical characteristics of concrete

Betonavimo Nr.	Betono kubelinis gniuždomasis stiprumas $f_{c, cube}$ (MPa)	Betono cilindrinis gniuždomasis stiprumas $f_c$ (MPa)	Betono tempiamasis stiprumas $f_{ct}$ (MPa)	Tamprumo modulis $E_{cm}$ (GPa)	Pastabos
1	40,25	38,26	4,40	27,71	Be plaušo
	38,38	30,49	3,24	30,29	Su plaušu
2	38,85	32,10	4,08	33,46	Be plaušo
	37,20	32,60	3,60	31,23	Su plaušu

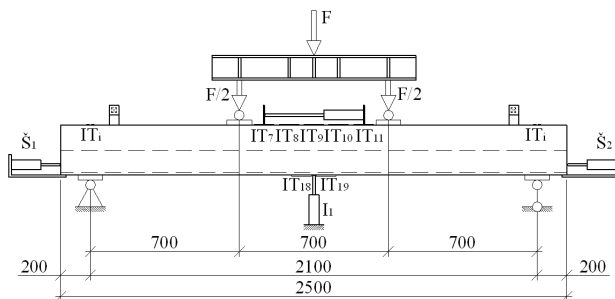
**2 lentelė.** Plieninio lakšto mechaninių charakteristikų vidutinės reikšmės

**Table 2.** Rate meanings of mechanical characteristics of steel sheeting

Eilės Nr.	Plieno stipris pagal takumo ribą $f_y$ (MPa)	Tamprumo modulis $E_s$ (GPa)
1	413,0	210,0

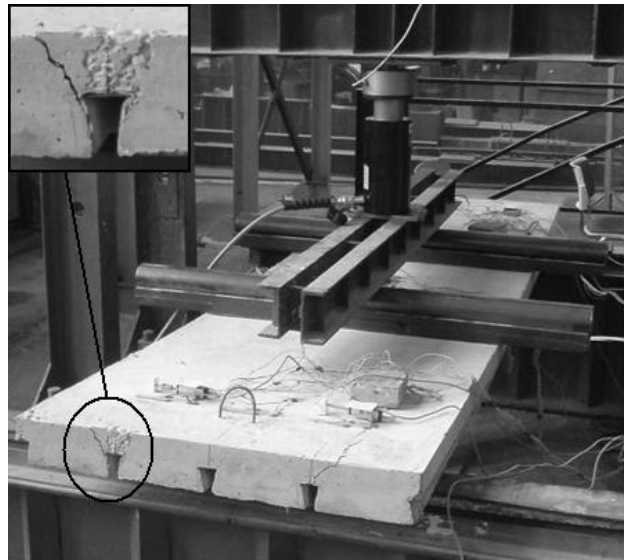
Bandymo schema parodyta 5 ir 6 paveiksluose. Plokštė bandymo metu apkrauta statine tumpalaikė apkrova, dviem sutelktomis jėgomis, pridėtomis tarpatriamio trečdaliuose (5 pav.). Apkrova keliami pastoviu greičiu naudojant kėliklį.

Bandant buvo matuojamos skersinės, išilginės, šlyties deformacijos ir įlinkiai. Išilginės tempimo (plokštės apačioje) ir gniuždymo (plokštės viršuje) deformacijos buvo matuojamos tarpatriamio viduryje. Skersinės betono deformacijos matuotos prie atramų (plokštės viršuje) ties plieninio lakšto bangomis. Šlyties deformacijos išmatuotos plokštės galuose. Įlinkis buvo matuojamas tarpatriamio viduryje.



**5 pav.** Bandymo schema

**Fig. 5.** Test arrangement scheme



**6 pav.** Kompozitinė plienbetoninė plokštė bandymo stende po suirimo

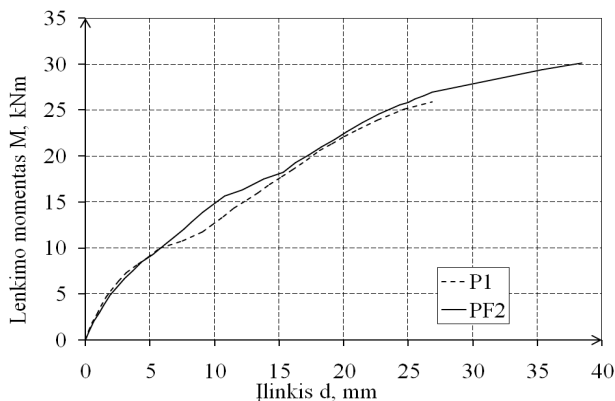
**Fig. 6.** Composite steel – concrete slab in test setup after failure

## Ekperimentinių tyrimų rezultatai

Pagal 5 pav. parodytą schemą išbandytos dvi bandinių grupės, pagamintos pirmojo ir antrojo betonavimo metu. Atskiruose grafikuose pateikti kiekvienos bandinių grupės rezultatai. Iš bandymų metu prietaisais išmatuotų rezultatų nubraižytos įlinkio – lenkimo momento, šlyties deformacijų – lenkimo momento, skersinių deformacijų – lenkimo momento, išilginių deformacijų (gniuždomoje tempiamoje zonoje) – lenkimo momento priklausomybės.

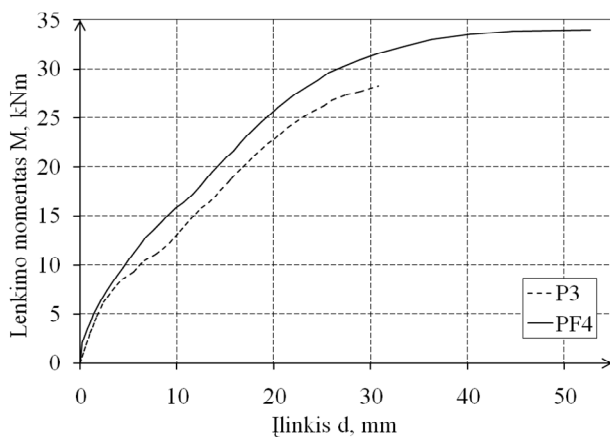
Kaip rodo pateiktų priklausomybių analizė (9, 10 pav.), konstrukcija dirba tamptariai iki  $(0,368-0,385M_R)$  plokštėms P1, P3 (betonas be plieninio plaušo) ir iki  $(0,442-0,486M_R)$  plokštėms PF2, PF4 (betonas su plieniniu plaušu), šlyties deformacijos  $\approx 0$  (čia  $M_R$  plokščių suirimo momentas). Kai lenkimo momentas viršija  $(0,368-0,385M_R)$  plokštėse P1, P3 ir  $(0,442-0,486M_R)$  plokštėse PF2, PF4, suyra kontakto tarp betono ir plieninio lakšto cheminė sukibtis, sluoksniai pradeda slinkti vienas kito atžvilgiu (9, 10 pav.) ir ties plieninio lakšto skersinėmis briaunelėmis atsiranda vietinių gniuždymo įtempimų. Kompozitinės plienbetoninės plokštės suirimas horizontaliame pjūvyje galimas, kai suyra mechaninė sukibtis nukerpant skersines briauneles arba betonui peršokus per plieninio profiliuotojo lakšto skersines briauneles. Kadangi plieninio profiliuotojo lakšto bangos ir skersinių briaunelių forma suvaržo betono pakilimą nuo lakšto, tai ties skersinėmis briaunelėmis betono sluoksnyje susidaro sudėtingas įtempimų būvis. Virš lakšto bangos skersine kryptimi atsiranda vertikalios ir horizontalios deformacijos. Lenkimo momentui viršijus  $M \sim 0,4M_R$

plokštėse P1, P3 ir  $M \sim 0,5M_R$  plokštėse PF2, PF4 labai padidėja šlyties (9, 10 pav.) ir skersinės virš plieninio lakšto bangų (11, 12 pav.) deformacijos. Pagrindiniai tempimo įtempimai betono sluoksnyje yra pasvirę  $\sim 45^\circ$  kampu su plokštės vertikale. Kai tempimo įtempimai pasiekia ribinį betono stiprumą, tempiant atsiveria išilginiai plyšiai (6 pav.). Išilginių plyšių kryptis prisitaiko prie pagrindinių įtempimų. Apkrovai pasiekus ( $0,9-0,95M_R$ ) betono sluoksnyje, virš plieninio lakšto bangų pastebėta išilginių plyšių. Jie tęsėsi nuo plokštės galo iki jėgos pridėjimo vietos. Plokščių PF2, PF4 (betonas armuotas plieniniu plaušu) atsivėrę išilginiai plyšiai buvo daug siauresni nei P1, P3.



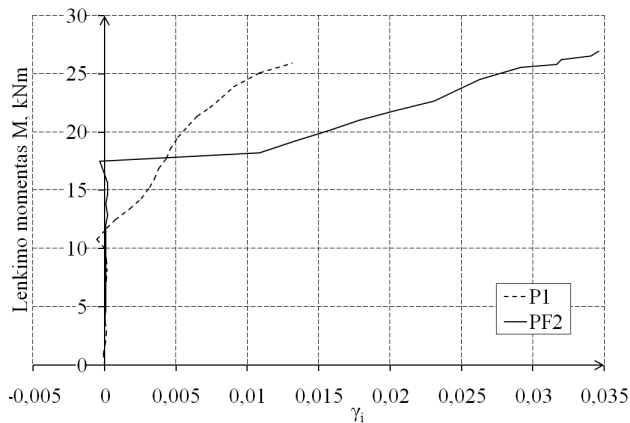
7 pav. Plokščių P1 ir PF2 įlinkių nuo lenkimo momentų priklausomybės

Fig. 7. Experimental relationship between the deflections and the bending moments of slabs P1 and PF2



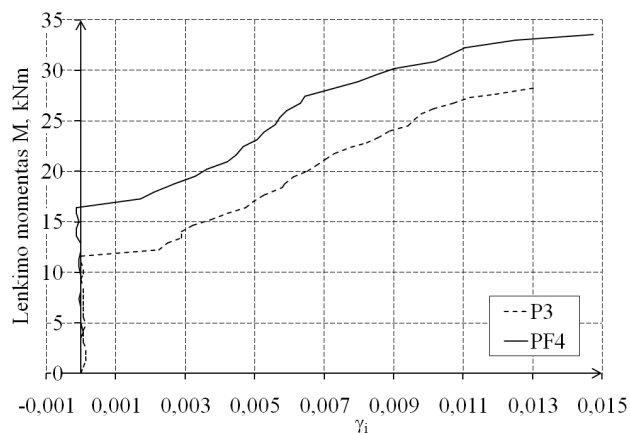
8 pav. Plokščių P3 ir PF4 įlinkių nuo lenkimo momentų priklausomybės

Fig. 8. Experimental relationship between the deflections and the bending moments of slabs P3 and PF4



9 pav. Plokščių P1 ir PF2 kontakto zonoje šlyties deformacijų nuo lenkimo momentų priklausomybės

Fig. 9. Relationship between the shear deformations and the bending moments in contact zone of slabs P1 and PF2

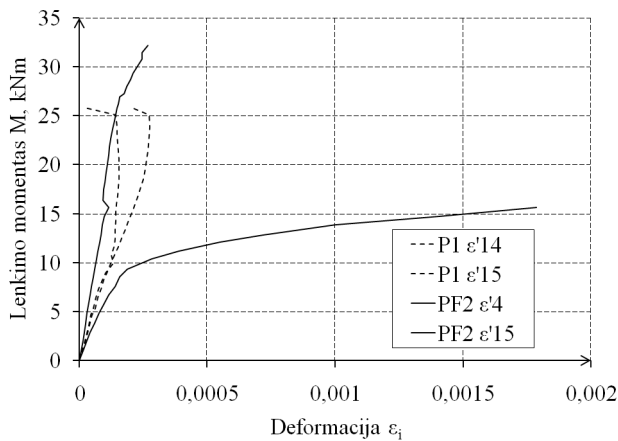


10 pav. Plokščių P3 ir PF4 kontakto zonoje šlyties deformacijų nuo lenkimo momentų priklausomybės

Fig. 10. Relationship between the shear deformations and the bending moments in contact zone of slabs P3 and PF4

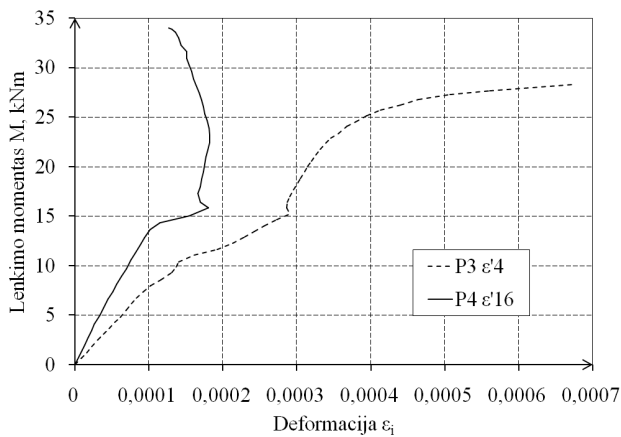
Tyrimas parodė, kad kol atsiveria statmenieji plyšiai betono sluoksniu tempiamoje zonoje ( $0,368-0,385M_R$ ) plokštėse P1, P3 ( $0,442-0,486M_R$ ), plokštėse PF2, PF4, įlinkiai didėjo proporcingai (7, 8 pav.), plokštės dirbo tamprojoje stadijoje – ryšys tarp sluoksnių buvo tamprus.

Atsivėrus statmeniesiems plyšiams, kol plieninis lakštas ir supleišėjusio betono sluoksnis dirba kartu, įlinkiai kinta proporcingai, tačiau jų didėjimas pagreitėja, lūžio taškai matomi (7, 8 pav.). Proporcingas įlinkių didėjimas yra todėl, kad plieninis lakštas vienodai dengia visą betono tempiamąją zoną, dėl to tempiamame betono sluoksnyje atsiveria mažesni statmenieji plyšiai.



**11 pav.** Plokščių P1 ir PF2 skersinių deformacijų virš lakšto bangų nuo lenkimo momentų priklausomybės

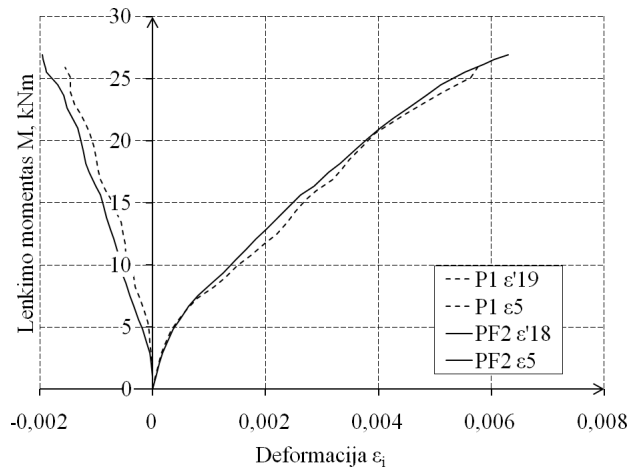
**Fig. 11.** Relationship between transverse deformations over the ribs of the sheeting and the bending moments of slabs P1 and PF2



**12 pav.** Plokščių P3 ir PF4 skersinių deformacijų virš lakšto bangų nuo lenkimo momentų priklausomybės

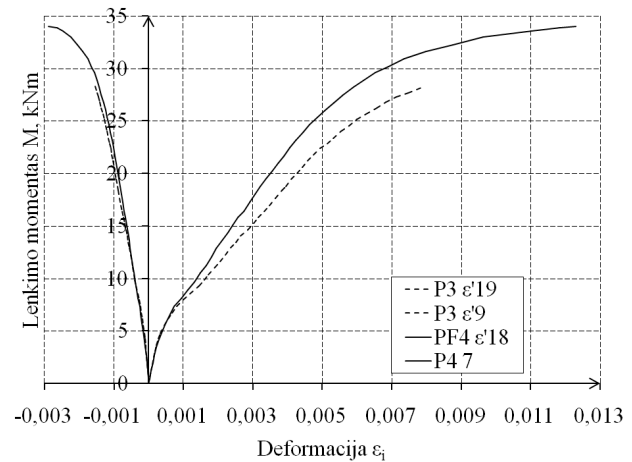
**Fig. 12.** Relationship between transverse deformations over the ribs of the sheeting and the bending moments of slabs P3 and PF4

Visų plokščių darbas iki  $(0,368-0,385M_R)$  apkrovos, prie kurios sluoksniai pradeda slinkti vienas kito atžvilgiu, plokštėse P1, P3 beveik nesiskiria (7–10 pav.). Kai plokštėse PF2, PF4 lenkimo momentas viršija  $M \sim 0,4M_R$ , plieninis plaušas betono sluoksnyje ištraukia į bendrą darbą perimdamas didėjančius tempimo įtempimus ir suvaržydamas virš plieninio lakšto bangų didėjančias skersines deformacijas. Todėl betono sluoksnyje virš plieninio lakšto bangų neatsiveria statmenieji plyšiai ir ties skersinėmis lakšto briaunelėmis susidarius sudėtingam įtempimų būviui geriau panaudojamas betono gniuždomasis stipris, jungtis tarp sluoksnių tampa stipresnė ir standesnė. Visa tai daro įtaką konstrukcijos tampriam darbui veikiant didesnei apkrovai.



**13 pav.** Plokščių P1 ir PF2 išilginių deformacijų gniuždomoje (tempiamoje) zonoje nuo lenkimo momentų priklausomybės

**Fig. 13.** Relationship between longitudinal deformations in compression (tension) zone and the bending moments of slabs P1 and PF2



**14 pav.** Plokščių P3 ir PF4 išilginių deformacijų, gniuždomojoje (tempiamojoje) zonoje nuo lenkimo momentų priklausomybės

**Fig. 14.** Relationship between longitudinal deformations in compression (tension) zone and the bending moments of slabs P3 and PF4

Plokštėse PF2, PF4 lenkimo momentui viršijus  $M \sim 0,5M_R$  padidėja skersinės ir šlyties deformacijos, todėl įvyksta sluoksnių pasislinkimas vienas kito atžvilgiu, ir įlinkiai pradeda sparčiau didėti, tačiau, palyginti su plokštėmis P1, P3, veikiant  $M \sim 0,6M_R$  apkrovai, jie yra 16–18 % mažesni.

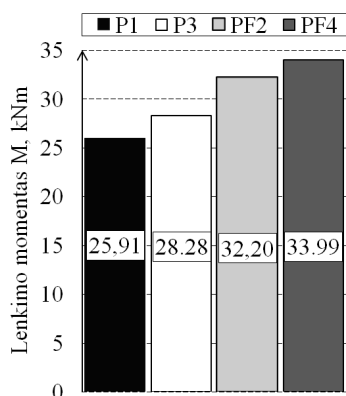
Plokščių PF2, PF4 suirimas yra plastiškas, išilginiai plyšiai, atsiveriantys prie atramų virš plieninio lakšto bangų, gerokai siauresni nei P1, P3 plokščių.

Iš skersinių deformacijų virš plokščių bangų priklausomybių (11, 12 pav.) matyti, kad tik apkrovus

konstrukciją betonas virš plieninio lakšto bangų pradeda deformuotis skersine linkme.

Kai apkrova nedidelė, išilginės tempimo plieniniame lakšte ir gniuždymo betono sluoksnyje deformacijos, matuotos plokštės viduryje, yra panašios (13, 14 pav.). Didėjant apkrovai, išilginės deformacijos plieniniame lakšte didėja labiau negu betono sluoksnio gniuždomojoje zonoje. Plieniniu plaušu armuotos plokštės PF4 tempimo deformacijos ~ 0,25 karto mažesnės už P3 plokštės.

Visų išbandytų kompozitinių plokščių P1, PF2, P3 ir PF4 suirimo pobūdis buvo vienodas. Suirimas įvyko horizontaliame pjūvyje. Suirimo metu betone atsivėrė išilginių plyšių ir buvo užfiksuotas horizontalusis lakšto poslinkis (0,5–4 mm). Skirtingų bandinių grupių – skirtinga suirimo apkrova. Suirimo apkrovos skirtumas, lyginant plokštės P1 su P3 ~ 2,4 kN ir lyginant PF2 su PF4 ~ 1,8 kN, matyti 15 pav.



15 pav. Lenkimo momentų, kuriems esant suiro plokštės, diagrama

Fig. 15. Diagram of bending moments were the slabs failed

## Išvados

1. Plieninio plaušo naudojimas plokščių betono sluoksniui armuoti yra efektyvus, kai laikomoji galia 20–24 % didesnė už plokštės su įprastu betoniniu sluoksniu.

2. Plokščių, armuotų plieniniu plaušu, įlinkių reikšmės veikiant  $0,6M_R$  apkrovai yra 16–18 % mažesnės už plokščių su įprastu betoniniu sluoksniu.

3. Plokščių, armuotų plieniniu plaušu, suirimas plastiškas. Atsivėrė išilginiai plyšiai virš plieninio lakšto bangų yra mažesnio pločio nei plokštėse su įprastu betonu.

4. Visų plokščių suirimas įvyko horizontaliajame pjūvyje. Buvo užfiksuotas (0,5–4 mm) sluoksnių vienas kito atžvilgiu pasislinkimas. Vadinasi, visų išbandytų plokščių kontakto tarp sluoksnių ryšys yra dalinio standumo, jungtis pasiduooda.

## Literatūra

- Burnet, M. J.; Oehlers, D. J. 2004. Rib shear connectors in composite profiled slabs, *Journal of Constructional Steel Research* 57: 67–87.
- Bode, H.; Minas, F.; Sauerborn, I. 1996. Partial connection design of composite slabs, *Journal of Structural Engineering International* 6(1): 6–53.
- de Andrade, S. A. L.; da S Vellasco, P. C. G.; da Silva J. G. S.; Takey T. H. 2004. Standardized composite slab systems for building constructions, *Journal of Constructional Steel Research* 60: 493–524.
- Dowling, P. J.; Burgan, B. A. 1997. Steel structures in the new millennium, *Statyba [Civil Engineering]* 4(12): 5–19.
- Motak, J.; Machacek, J. 2004. Experimental behaviour of composite girders with steel undulating web and thin-walled shear connector's hilti stripcon, *Journal of Civil Engineering and Management* 10(1): 9–45.
- Tenhovuori, A.; Karkkainen, K.; Kanerva, P. 1996. Parameters and definitions for classifying the behaviour of composite slabs, in *Proc. of on Engineering Foundation Conference—Composite Construction in Steel and Concret.*
- Vainiūnas, P.; Valivonis, J.; Marčiukaitis, G.; Jonaitis, B. 2006. Analysis of longitudinal shear behaviour for composite steel and concrete slabs, *Journal of Constructional Steel Research* 62: 1264–1269.
- Valivonis, J. 2006. Analysis of behaviour of contact between the profiled steel sheeting and the concrete, *Journal of Civil Engineering and Management* 12(3): 187–194.
- Vaškevičius, A.; Marčiukaitis, G.; Valivonis, J. 2001. Lenkiamųjų kompozitinių elementų, armuotų profiliuotais metalo lakštais, darbo analizė, *Statyba [Civil Engineering]* 7(6):1392–1525.

## ANALYSIS OF THE BEHAVIOUR OF COMPOSITE STEEL AND STEEL FIBER REINFORCED CONCRETE SLABS

M. Petkevičius

Summary

There was a pending influence of steel fiber on the strength and stiffness of composite steel–concrete slabs under statical short-time load. Steel profiled sheeting and steel fiber reinforced concrete were used for specimens. Four composite slabs were made. Experimental investigations into the behaviour and influence of steel fiber reinforced concrete in composite slabs were conducted. Transverse, longitudinal, shear deformation and deflection of the slab were measured.

The results indicated that the use of steel fiber in composite slabs was effective: strength was 20–24 % higher and the meanings of deflections under the action of the bending moment were  $0,6M_R$  (where  $M_R$  is the bending moment at failure of the slabs) and were 16–18 % lower for slabs with usual concrete.

**Keywords:** composite slab, steel fiber, stiffness, strength.