

PREISKAVE LESENIH OKVIRNIH STENSKIH PANELOV S CEMENTNO- IVERNIMI OBLOŽNIMI PLOŠČAMI

EXPERIMENTAL STUDY OF THE BEHAVIOUR OF LIGHT-FRAME TIMBER WALL PANELS WITH CEMENT-PARTICLE- BOARD SHEATHING

dr. Meta KRŽAN, univ. dipl. inž. grad.

meta.krzan@zag.si

dr. Tomaž PAZLAR, univ. dipl. inž. grad.

tomaz.pazlar@zag.si

ZAG Ljubljana, Dimičeva ulica 12, 1000 Ljubljana

Ivan GRAŠIČ, univ. dipl. inž. les.

ivan.grasic@jelovica.si

dr. Boštjan BER, univ. dipl. inž. grad.

bostjan.ber@jelovica.si

Jelovica hiše, d.o.o., Hrib 1, 4205 Predvor

Znanstveni članek

UDK 620.176:624.011.1

Povzetek | V članku so predstavljeni rezultati eksperimentalnih preiskav študije obnašanja lesenih okvirnih stenskih panelov s cementno-ivernimi obložnimi ploščami pri horizontalnih obremenitvah. Posebnost predstavljene preiskave je uporaba cementno-ivernih plošč pri proizvodnji okvirnih stenskih panelov, saj njihovo obnašanje še ni dobro raziskano. Preiskave so bile izvedene v dveh fazah. Ker je za strižno obnašanje panela bistveno pritrdjevanje obložnih plošč na leseni okvir, so se na manjših vzorcih najprej določile nosilnosti zvez s kovinskimi paličastimi sponkami ter analiziral vpliv debelin plošč in razmika med sponkami. Nadalje so bile zasnovane in izvedene monotone in ciklične strižne preiskave različnih izvedb stenskih panelov. Preskušani so bili trije osnovni tipi panelov, med drugim tudi panel z različnima debelinama obložnih plošč. Rezultati preiskave kažejo ugoden duktilen odziv sten pri strižnih obremenitvah ter potrjujejo, da nosilnost sten zaradi različnih debelin obložnih plošč ni dodatno zmanjšana, kot to pri izračunu nosilnosti predvideva SIST EN 1995-1-1.

Ključne besede: leseni okvirni stenski paneli, cementno-iverna plošča, strižni preskus, nosilnost sponke v eni strižni ravnini

Summary | The paper presents the results of an experimental study of the behaviour of light-frame-timber wall panels with cement-particle-board sheathing under seismic loading. The seismic behaviour of light-frame-timber panels with cement-particle sheathing has not yet been studied in detail. The experimental campaign consisted of two parts. Since the behaviour of the sheathing-to-framing connection is decisive for the shear behaviour of the panels, small specimens were first tested to analyse the lateral load-bearing capacity of the connection between cement-particle board and timber by staples (metal dowel-type fasteners) in dependence of board thickness and the distance between the staples. Furthermore, monotonic and cyclic racking tests of wall panels were conducted. Three types of wall panels were tested, one of them asymmetrical with different board thickness. The results showed ductile behaviour of the panels under lateral loading and proved that there is no additional reduction of the lateral load-bearing capacity due to asymmetry of the panel at different thicknesses of sheathing, as it is assumed in the SIST EN 1995-1-1 code provision.

Key words: Light-frame-timber wall panels, Cement-particle board, Racking test, Lateral load-bearing capacity of staples

1 • UVOD

Pri gradnji lesenih stavb so pri stanovanjskih objektih kot vertikalni nosilni elementi še vedno najbolj pogosti lahki leseni okvirni paneli, na potresno neogroženih območjih pa se lahko uporabljajo tudi za gradnjo objektov s petimi etažami in več (Thompson, 2013). Poleg nizke teže je njihova prednost predvsem njihova večnamenskost, in sicer dobra toplotna in zvočna izolativnost ter v določenih primerih tudi požarna odpornost. Leseni okvirni paneli so sestavljeni iz lesenega okvirja, katerega elementi so navadno zaradi procesa proizvodnje minimalno povezani (npr. z valovitimi sponkami) in služi za prenos vertikalnih obremenitev, na katerega so pritrjene obložne plošče, ki panelom zagotavljajo togost in strižno nosilnost. Slednji sta poleg dimenzij in vrste uporabljenih materialov odvisni predvsem od detajlov pritrjevanja obložnih plošč na leseni okvir (detajl vijachenega, žebljanega ali sponkanega stika) ter pritržitve panela v temelj oziroma stropno konstrukcijo ((Kuhta, 2008), (Casagrande, 2016)). Kot obložni material v današnjem času prevladujejo plošče iz velikih usmerjenih iveri (OSB-plošče) in mavčno-vlaknene plošče (MVP) – predvsem zaradi dobrih požarnih lastnosti je v velikem porastu uporaba slednjih.

Slovenski proizvajalec lesenih montažnih objektov Jelovica za izdelavo okvirnih stenskih panelov kot obložne plošče uporablja cementno-iverne plošče. Te imajo dobro požarno odpornost, a so v primerjavi z MVP manj krhke, hkrati pa tudi manj občutljive za vlago.

V literaturi najdemo rezultate eksperimentalnih preiskav in analizo obnašanja lesenih okvirnih panelov z MVP, OSB in drugimi obložnimi ploščami ((Gatto, 2002), (van de Lindt, 2004), (Dujic, 2006), (Sartori, 2012), (Seim, 2016), (Branco, 2017), eksperimentalnih preiskav stikov omenjenih vrst plošč z lesom ((Fonseca, 2002), (Sartori, 2013), (Verdret, 2015), (Seim, 2016)) ter tudi eksperimentalne študije potresnega odziva objektov z lesenimi okvirnimi paneli ((Kessel, 2004), (Filiatrault, 2009), (Tomasi, 2015)). Ker je uporaba cementno-ivernih plošč pri izdelavi lesenih okvirnih panelov redka (tovrstne plošče vgrajuje le nekaj proizvajalcev v Evropi), v literaturi ni zaslediti eksperimentalnih preiskav tovrstnih panelov pri strižnih obremenitvah kot tudi ne preiskav obnašanja stika cementno-ivernih plošč z lesnim okvirjem.

Namen predstavljene raziskave je bil analizirati potresni odziv treh osnovnih tipov stenskih

panelov s cementno-ivernimi ploščami, ki se najpogosteje uporabljajo v praksi, in sicer panelov z različnimi debelinami obložnih plošč. Eno bistvenih vprašanj je bilo, ali pri porušitvi panelov pri strižnih cikličnih obremenitvah pride do krhke porušitve plošč ali do duktilnega odziva.

Za študij obnašanja panelov pri potresnih obremenitvah so bile zasnovane eksperimentalne preiskave, in sicer v dveh fazah. Ker je detajl pritrjevanja obložnih plošč na leseni okvir bistven za določitev strižne nosilnosti panela, je prva faza študije obsegala preiskave obnašanja različnih variacij detajlov pritrjevanja cementno-ivernih plošč na les s kovinskimi sponkami na posebej zasnovanih manjših preskušancih. V drugi fazi preiskav so bili za analizo obnašanja panelov izvedeni monotoni in ciklični strižni preskusi realnih stenskih panelov s tremi različnimi kombinacijami debelin obložnih plošč ter z detajlom pritrjevanja plošč s sponkami, ki se pri izdelavi panelov uporablja že vrsto let.

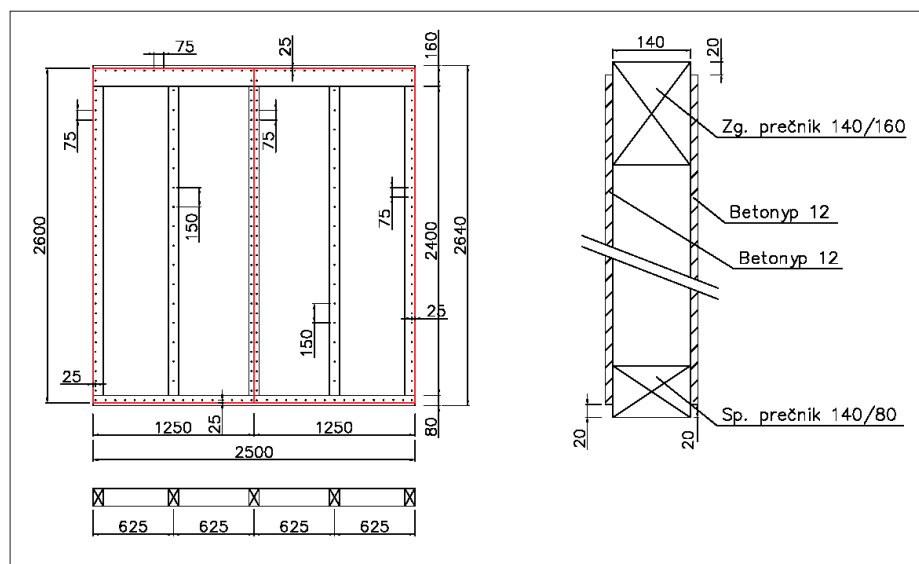
Predstavljena raziskovalna študija je bila v krajši različici predstavljena na 41. zborovanju gradbenih konstruktorjev Slovenije (Kržan, 2019), v članku pa so podani razširjeni rezultati preiskav.

liranega lesa trdnostnega razreda GL 24h. Mehanske karakteristike cementno-ivernih plošč, navedene na tehničnih listih proiz-

2 • OPIS PANELOV IN PREISKAV

2.1 Opis stenskih panelov in materialnih lastnosti osnovnih gradnikov

Dolžina oz. višina preskušanih panelov je bila $l/h = 2500/2640$ mm. Leseni okvirji panelov so bili sestavljeni iz stebričkov dimenzij 140/80 mm na razdalji 625 mm, zgornjih prečk dimenzij 140/160 mm in spodnjih prečk dimenzij 140/80 mm. Trije osnovni preskušani tipi panelov (in malih preskušancev) so bili: panel B12-12, ki je imel na obeh straneh plošče debeline 12 mm in je prikazan na sliki 1, panel B16-16 s ploščami debeline 16 mm na obeh straneh in B12-16, ki je imel na eni strani plošči debeline 12 mm in na drugi 16 mm. Za pritrjevanje plošč na leseni okvir so bile za plošče debeline 12 mm (B12) uporabljene sponke 1,53 x 11,25 x 45 mm, za plošče debeline 16 mm (B16) pa sponke 2,0 x 11,76 x 50 mm. Karakteristična natezna trdnost žice, iz katere so bile izdelane sponke, je bila $f_{u,k} = 800$ MPa. Na krake uporabljenih sponk je bilo nanoseno termolepilo.



Slika 1 • Skica preskušanca B12-12 (iz delavniške dokumentacije Jelovice).

Leseni okvirji in v nadaljevanju opisani mali preskušanci so bili izdelani iz lepljenega lame-

vajalca, so naslednje: upogibna trdnost $f_{m,k} = 9,0$ MPa, natezna trdnost $f_{t,k} = 2,5$ MPa,

tlačna trdnost $f_{c,k} = 11,5$ MPa, modul elastičnosti $E_{m,mean} = 4500$ MPa. V laboratoriju ZAG so bile po standardu SIST EN 310:1996 (SIST, 1996) izvedene preiskave upogibne trdnosti vzorcev cementno-ivernih plošč. Za posamezno debelino plošče je bilo opravljenih 7 preskusov. Povprečna upogibna trdnost f_m izračunana za B12, je 9,8 MPa (koeficient variacije 6,6%), za B16 pa 10,4 MPa (koeficient variacije 7,4%).

2.2 Preiskave strižnega obnašanja enostrižne zveze s sponkami (mali preskušanci)

Pri malih preskušancih smo za vsak tip preskušanca (B12-12, B12-16 in B16-16) preskusili 6 variacij detajla pritrdjevanja, pri čemer smo spreminjali število sponk in razdaljo med njimi. Uporabili smo 3 sponke v eni vrsti in 3 sponke v dveh vrstah na medsebojnih vzdolžnih razdaljah 75, 50 in 37,5 mm. Plošči sta bili na obeh straneh vzorca na les pritrjeni s sponkami (skica vzorcev v preglednici 1), pri čemer sta bili

na eni strani dodatno zlepljeni, s čimer se je zagotovilo, da je pri preskusu prišlo do porušitve na izbrani oz. preiskovani strani vzorca. Med preiskavami so bili za variacije preskušancev B16-16 in B12-16 z eno vrsto sponk zaradi nateznih porušitev plošč izdelani dodatni vzorci s povečano širino plošč (400 mm namesto 200 mm). Za vsako variacijo preskušanca je bil narejen monotonni preskus ter vsaj en, v večini primerov pa dva ciklična preskusa. Skupaj je bilo izvedenih 24 monotonnih preskusov ter 36 cikličnih preskusov. Opravljene preiskave na malih vzorcih s skico enega izmed preskušancev so zbrane v preglednici 1.

Postavitev preskuševališča je prikazana na sliki 2 levo. Vzorci so bili členkasto vpeti v preskuševališče preko debelih pločevin in 4 vijakov M10. Obremenjevanje vzorcev s servohidravličnim batom je bilo izvedeno po ISO 16670:2003 (ISO, 2003). Pri monotonnih preskusih je bilo obremenjevanje vodeno preko pomika hidravličnega bata, ki je naraščal s konstantno

hitrostjo 0,1 mm/s, pri cikličnih preskusih pa preko povprečnega pomika med ploščama in lesom v preiskovanem spoju, izračunanega iz pomikov štirih induktivnih merilnikov (po dva na vsaki strani preiskovanega stika). Amplitudni pomiki cikličnega obremenjevanja so se postopoma povečevali. Razen začetnih ciklov so bili izvedeni trije cikli posameznega amplitudnega pomika, njihova velikost pa je bila določena glede na rezultate monotonnih preskusov, in sicer glede na doseženi mejni pomik, tj. pomik pri padcu sile na 80 % nosilnosti.

2.3 Preiskave strižnega obnašanja stenskih panelov

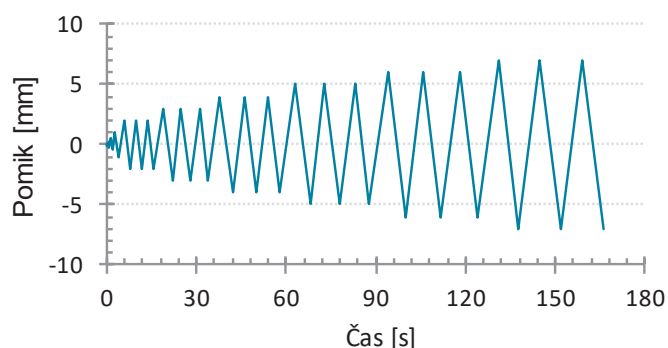
Za vsak tip stenskega elementa je bil izveden en monotonni kvazistatični strižni preskus po SIST EN 594:2011 (SIST, 2011) in dva kvazistatična ciklična strižna preskusa, skupaj torej 9 preskusov (shema preskušanja je podana v preglednici 2).

Na sliki 4 je prikazana postavitve strižnega preskusa panelov. Za preprečitev dvigo-

Ime preskusa	Preskusi	Število sponk	s_0 (mm)	Št. vrst	Skica preskušancev B12-12/r75 (označeni kombinaciji)
B12-12/v1/r37,5	M, 2xC	3	37,5	1	B12-12, razdalja sponk 75 mm
B12-12/v1/r50	M, 2xC	3	50	1	
B12-12/v1/r75	M, 2xC	3	75	1	
B12-12/v2/r37,5	M, 2xC	2 x 3	37,5	2	Ena vrsta sponk (B12-12/v1/r75)
B12-12/v2/r50	M, 2xC	2 x 3	50	2	
B12-12/v2/r75	M, 2xC	2 x 3	75	2	
B16-16/v1/r37,5	M, C+ M*, 2xC*	3	37,5	1	Dve vrsti sponk (B12-12/v2/r75)
B16-16/v1/r50	M, C+ M*, 2xC*	3	50	1	
B16-16/v1/r75	M, C+ M*, 2xC*	3	75	1	
B12-16/v2/r37,5	M, C	2 x 3	37,5	2	Zlepljeno
B12-16/v2/r50	M, C	2 x 3	50	2	
B12-16/v2/r75	M, C	2 x 3	75	2	

Opomba: Oznake B12-12, B16-16 in B12-16 se nanašajo na debelino obložnih plošč na posamezni strani panela, v1 in v2 pomenita sponke v 1 oziroma v 2 vrstah, r37,5, r50 in r75 pomenijo sponke na razdalji 37,5 mm, 50 mm oziroma 75 mm, M in C pomenita monotono oziroma ciklično obremenjevanje, s_0 pomeni razdaljo med sponkami, * pomeni vzorce z večjo širino cementno-ivernih plošč.

Preglednica 1 • Shema preskušanja z opisom in skico preskušancev B12-12/r75.



Slika 2 • Preskuševališče z vzorcem (levo) in protokol obremenjevanja po ISO 16670:2003 (desno).

vanja je bil panel ob straneh s po dvema standardnima dviznim kotnikoma Simpson Strong-Tie HTT22 (kraka 569 x 62 mm, debelina pločevine 2,8 mm, slika

na z 10 samovreznimi lesnimi vijaki 10 x 100 mm na enakomerni medsebojni razdalji preko pasnic jeklenega profila (slika 3 sredina). Vpetje panela spodaj je bilo

s 4 standardnimi strižnimi kotniki Simpson Strong-Tie AE116 (kraka 90 x 48 mm, debelina pločevine 3 mm), pritrjenimi v leseni okvir z 10 lesnimi samovreznimi vijaki 5 x 80 mm na medsebojno enakih razdaljah preko obložnih plošč z ene strani panela (slika 3 desno).

Na vrhu panela je bil na zgornjo prečko položen jekleni profil, preko katerega sta se z bati vnašali horizontalna in vertikalna obtežba. Vertikalna obtežba velikosti 25 kN/m se je vnašala z dvema batoma, nameščenima na jekleni nosilec nad krajnima stebričkoma okvirja. Jekleni nosilec je bil bočno podprt za preprečitev uklona panela izven ravnine.

Horizontalna obtežba bata se je v skladu z ISO 16670:2003 vnašala s kontroliranim povečevanjem horizontalnega pomika stene, merjenim z induktivnim merilnikom na vrhu panela (L1, slika 4), in sicer v obe smeri iz ravnovesne lege s postopnim večanjem amplitude pomika. Razen pri začetnih majhnih amplitudah so bili za

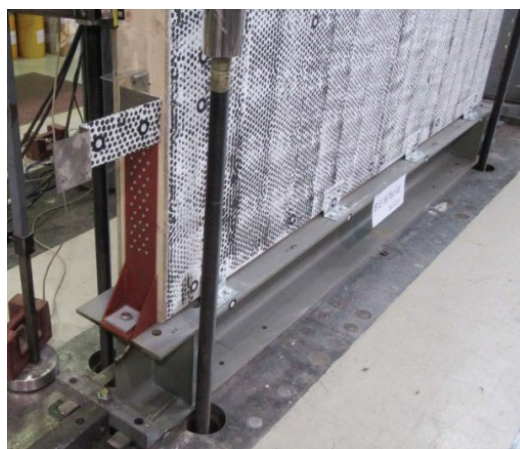
Oznaka preskušanca	Št. preskusov	Protokol obremenjevanja	Debelina plošče t_1 (mm)	Debelina plošče t_2 (mm)
B16-16/75x1	3	M, 2xC	16	16
B12-12/75x1	3	M, 2xC	12	12
B12-16/75x1	3	M*, 2xC	12	16

Opomba: Oznake B16-16, B12-12 in B12-16 se nanašajo na debelino obložnih plošč na posamezni strani panela, 75x1 pomeni sponke v eni vrsti na razdalji 75 mm, M in C pomenita monotono oziroma ciklično obremenjevanje, * pomeni močnejše vpetje panela z delavniško izdelanima dviznim kotnikoma ter strižnim kotnikoma ob strani panela.

Preglednica 2 • Shema strižnega preskušanja panelov.

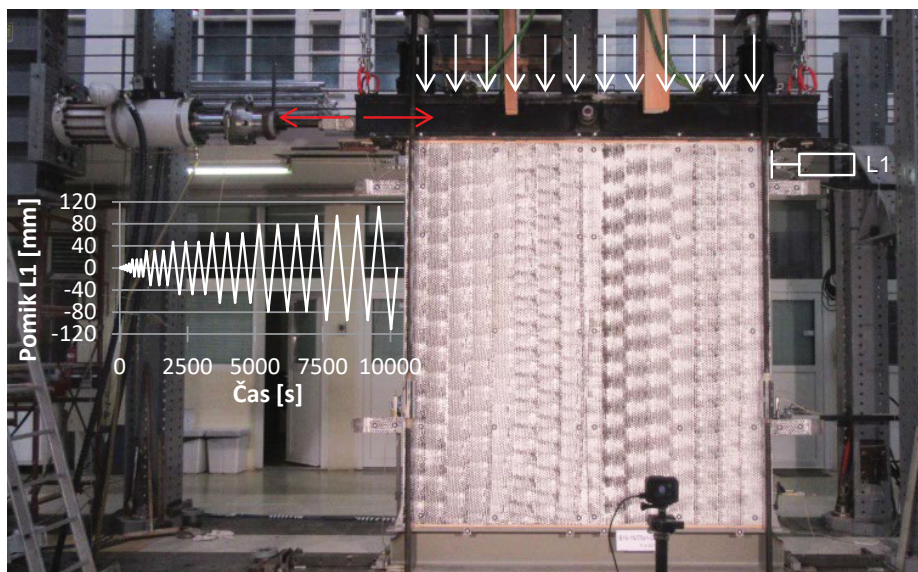
3 levo) z vijakom M16 vpet v temeljni jekleni profil. Kotniki so bili na leseni okvir pritrjeni z 32 lesnimi samovreznimi vijaki CSA 5 x 80 mm. Za preprečitev zdrsa panela je bila spodnja prečka lesenega okvira panela s spodnje strani privijače-

drugačno le pri testu B12-16/75x1/M, kjer sta bila za preprečevanje dviga uporabljena delavniško izdelana kotnika (kraka 500 x 10 mm, debelina pločevine 5 mm), privijačena v panel s 35 lesnimi samovreznimi vijaki CSA 5 x 80 mm, zdrs pa preprečen



Slika 3 • Detalj pritrditve preskušancev z dviznimi kotniki (levo) in vijachenimi spoji spodnje prečke okvirja preko pasnice jeklenega profila (sredina), vpetje panela B12-16/75x1/M z močnejšima dviznim kotnikoma ob straneh in strižnimi kotniki na enakomernih razdaljah vzdolž ene strani panela (desno).

posamezno amplitudo izvedeni trije cikli obremenjevanja. Hitrost obremenjevanja je bila v posameznih fazah preskusov konstantna in je znašala med 0,1 in 0,5 mm/s. Ciklični preskusi so se izvajali do porušitve vzorca oziroma do padca nosilnosti na 80 %. Pomiki panela so bili med preskusom merjeni s šestimi induktivnimi merilniki ter z optičnim merilnim sistemom. S slednjim so bili merjeni pomiki obložnih plošč ene strani panela, pomiki spodnjega in zgornjega jeklenega profila ter pomiki točk krajnih stebričkov lesenega okvirja.



Slika 4 • Postavitev strižnega preskusa panelov.

3 • REZULTATI PREISKAV IN DISKUSIJA

3.1 Strižno obnašanje enostrižne zveze s sponkami (mali preskušanci)

Pri monotoni preskusih je za vse debeline plošč pri dveh vrstah sponk prišlo do porušitve plošče. Pri vzorcih B12-12 je v primeru ene vrste sponk prišlo do izvleka sponke iz lesa, pri vzorcih z vsaj eno ploščo debeline 16 mm (vzorci B12-16 in B16-16) pa v nekaj primerih tudi do porušitve plošče pri eni vrsti sponk (slika 5a). Slednje je kazalo na nižjo natezno trdnost plošče debeline 16 mm, ki najverjetneje izhaja iz vidne nehomogene sestave plošče po prerezu (zaradi tehnološkega procesa proizvodnje). Za preskušance B12-16 in B16-16 so bili zato za variante spojev v

Pri cikličnih preskusih so bile porušitve podobne, in sicer izvek sponk iz lesa (slika 5b), v nekaterih primerih tudi pretrg posameznih sponk (slika 5c), pri čemer v nobenem primeru pri eni vrsti sponk (tudi za ožje vzorce preskušancev B12-16 in B16-16) ni prišlo do porušitve plošče. V nekaj primerih ni prišlo do porušitve plošče niti pri vzorcih z dvema vrstama sponk. Tipi porušitve so za posamezne variacije preskušancev in preskuse povzeti v nadaljevanju na diagramu na sliki 7.

Na diagramu na sliki 6 levo so prikazane sile bata v odvisnosti od relativnega pomika med ploščama in lesom za preskuse B12-12/v1

je podan tudi celoten histerezni odziv sila-pomik. Kot vidimo, gre v primeru izvleka sponk iz lesa za duktilno porušitev, medtem ko je porušitev plošče ožjih preskušancev na levem diagramu vidna kot hipen padec sile (bodisi še v »elastičnem« območju (B12-12/v1/r37,5) bodisi v plastičnem območju po že doseženi maksimalni nosilnosti).

Izračunane povprečne vrednosti bočne nosilnosti kovinskih paličastih veznih sredstev $F_{v,m}$ so za posamezne vrste preskušancev B12-12 in B16-16 podane na sliki 7. Povprečna vrednost $F_{v,m}$ za zvezo z eno sponko vseh cikličnih preskusov, kjer je bil kritičen spoj, je za ploščo debeline 12 mm in sponko 1,53 x 11,25 x 45 mm (zveza B12) enaka 1,14 kN, za ploščo debeline 16 mm in sponko 2,0 x 11,76 x 50 mm (zveza B16) pa 1,60 kN; za monotone preskuse sta vrednosti za zvezi B12 in B16

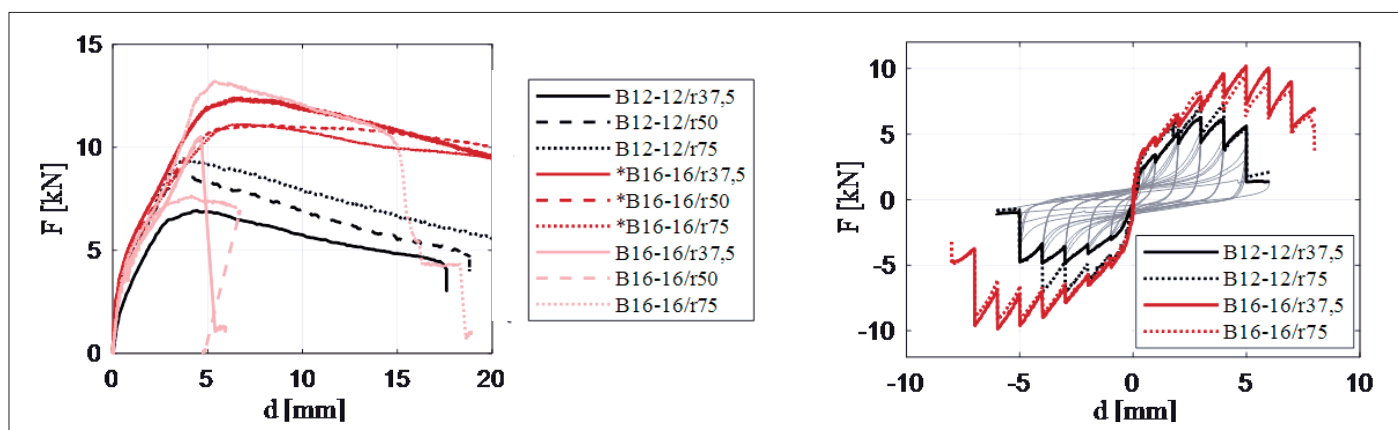


Slika 5 • Tipični porušni mehanizmi: a) porušitev plošče vzorca (B12-16/v1/r75/M); b) izvlek sponk (B12-12/v1/r37,5/C1); c) izvlek in pretrg sponk (B12-12/v2/r37,5/C1).

eni vrsti narejeni dodatni vzorci s povečano širino plošč (400 mm). Pri teh je tudi pri monotoni preskusih prišlo do porušitve z izvlekom sponk.

in B16-16/v1 (z eno vrsto sponk), medtem ko so na sliki 6 desno podane tipične ovojnice histereznih odzivov cikličnih preskusov enakih vzorcev. Za preskus B12-12/v1/r37,5

enaki 1,41 kN in 2,00 kN. Povprečna nosilnost je v primeru monotonega obremenjevanja približno 25 % višja v primerjavi s cikličnim obremenjevanjem.

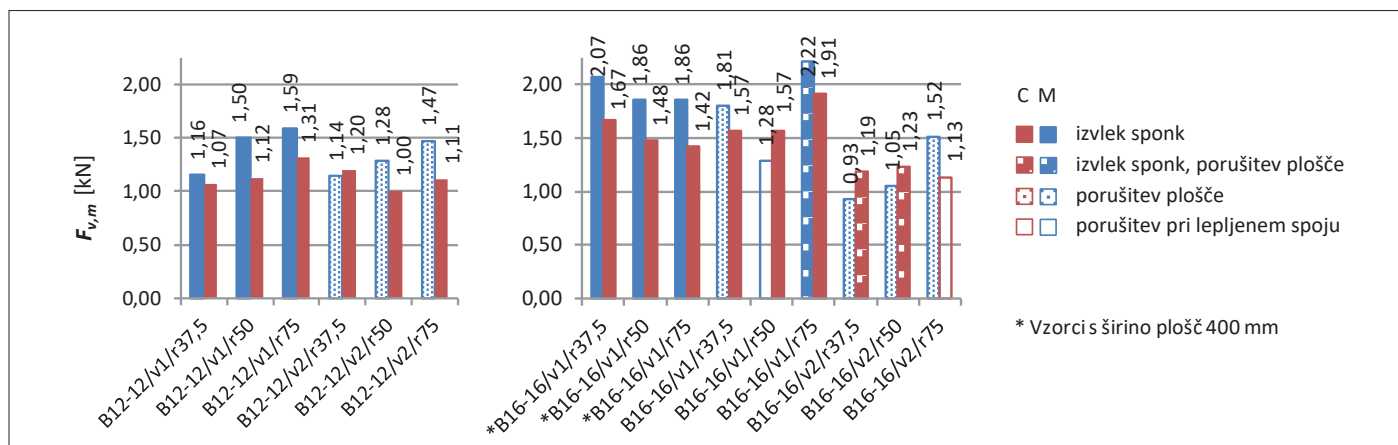


Slika 6 • Primerjava odziva sila-pomik preskušancev B12-12 in B16-16 z eno vrsto sponk: monotoni preskusi (levo), ciklični preskusi (tipične histerezne ovojnice in histerezni odziv, desno).

Karakteristična vrednost nosilnosti zveze z eno sponko $F_{v,k}$ izračunana iz povprečnih vrednosti izvedenih eksperimentalnih preiskav $F_{v,m}$ z upoštevanjem SIST EN 1990:2004

standardu za projektiranje lesenih konstrukcij SIST EN 1995-1-1:2005 (SIST, 2005). Standard glede na materialne in geometrijske karakteristike obeh spojenih elementov ter glede

Primerjava rezultatov (preglednica 3) je pokazala, da so karakteristične vrednosti, izračunane iz rezultatov cikličnih preiskav, za spoj B12 za 32% in za spoj B16 za 13%



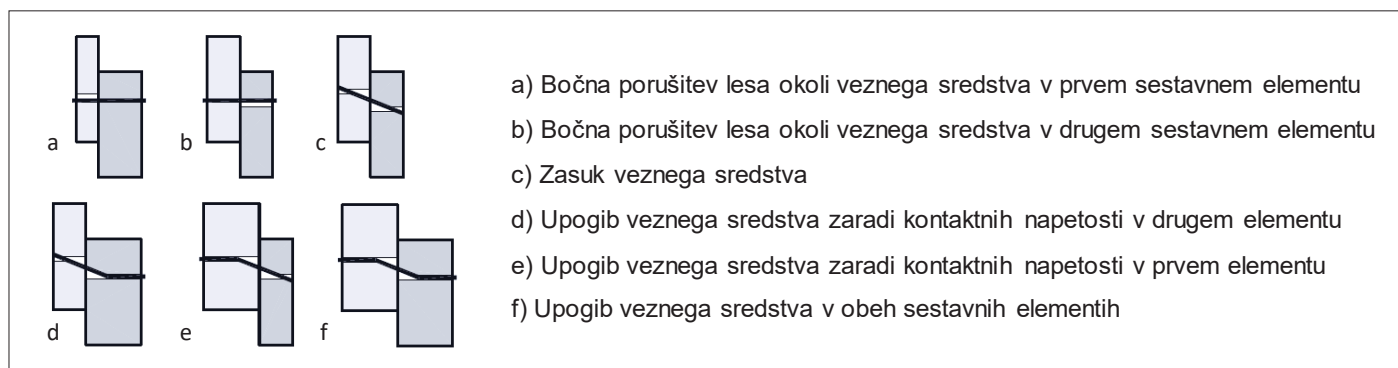
Slika 7 • Vrednosti povprečne bočne nosilnosti zveze cementno-iverne plošče z lesom s sponko ($F_{v,m}$) za ploščo B12 (levo) in B16 (desno).

(SIST, 2004), je za spoj B12 enaka 0,899 kN, za spoj B16 pa 1,221 kN.

Za primerjavo sta bili za preskušano enostržno zvezo lesna plošča-les izračunani tudi karakteristični vrednosti $F_{v,Rk}$ po veljavnem

na dimenzije veznega sredstva predpisuje šest različnih načinov možne bočne porušitve (slika 8), izmed katerih karakteristično bočno nosilnost zveze ($F_{v,Rk}$) predstavlja najbolj kritičen mehanizem.

višje od izračunanih po veljavnem standardu za projektiranje lesenih konstrukcij SIST EN 1995-1-1:2005 (SIST, 2005). Karakteristični računski nosilnosti posamezne zveze s sponko $F_{v,Rk}$ znašata namreč 0,681 kN za B12 in



Slika 8 • Porušitveni kriteriji za določitev bočne nosilnosti enostržne zveze po SIST EN 1995-1-1:2005 (po (Beg s sod., 2009)).

Zveza	$F_{v,m}$ (eksp.) (kN)	$F_{v,k}$ (eksp.) (kN)	$F_{v,Rk}$ (EC5) (kN)	$F_{v,k}$ (eksp.)/ $F_{v,Rk}$ (EC5)
B12, sponke 1,53 x 11,25 x 45 mm	1,137	0,899	0,681	1,32
B16, sponke 2,0 x 11,76 x 50 mm	1,603	1,221	1,038	1,13

Preglednica 3 • Primerjava eksperimentalnih rezultatov cikličnih preskusov (označenih z »eksp.«) in ocene nosilnosti po SIST EN 1995-1-1:2005 (označene z »EC5«).

1,038 kN za B16, pri čemer je po izračunih po standardu za preskušani zvezi B12 in B16 merodajen mehanizem zasuka veznega sredstva (na sliki 8 mehanizem c).

3.2 Strižno obnašanje stenskih panelov

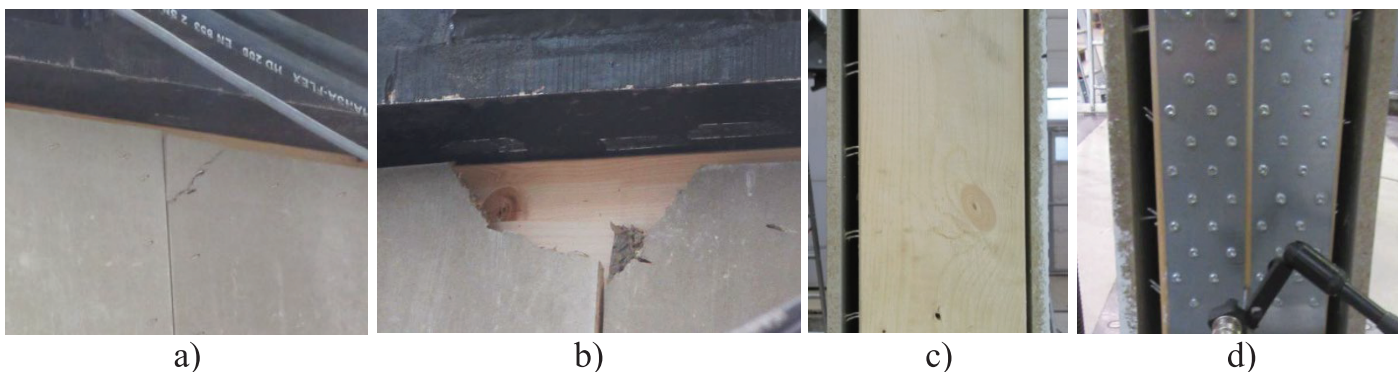
Pri strižnih preskusih panelov je s postopnim povečevanjem horizontalnega pomika in

bil evidentiran pri monotoni preskusih.

- V posameznih primerih je prišlo do poškodb spodnje ali zgornje prečke lesenega okvirja na mestu krajnih stebričkov, in sicer do vidnih razpok v smeri vlaken.

Evidentirani glavni porušni mehanizem z izvlekom sponk omogoča duktilne porušitve panelov, pri katerih je prišlo le do majhnih

nosilnosti in mejnih pomikov panelov (F_{max} in d_u) so na krivuljah označene tudi točke, kjer je prišlo do prvih razpok na oblogah panelov (d_{cr}). Na diagramu je vidno, da je pri preskusu B16-16/M po dosegu maksimalne strižne nosilnosti prišlo do hipne porušitve, in sicer zaradi pretrga dvižnih kotnikov (slika 10 desno). Vidno je tudi, da razpoke obložnih plošč na mestih strižnih kotnikov pri testu B12-16/M niso bistveno vplivale na odziv v primerjavi s testoma B12-12/M in B16-16/M. Tipična histereza odziva cikličnih strižnih preskusov panelov B12-12 in B16-16 sta prikazana na sliki 11 levo, medtem ko je na sliki 11 desno podana primerjava histereznih ovojnic vseh šestih izvedenih cikličnih preskusov panelov.



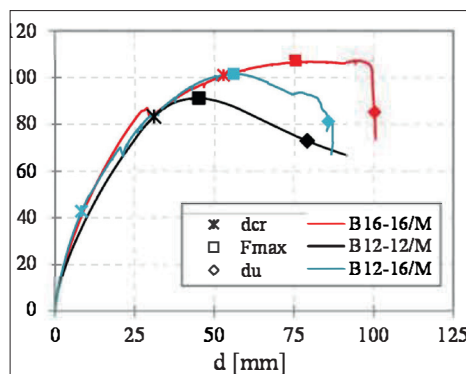
Slika 9 • a) Tipične razpoke obložnih plošč v vogalih pri horizontalnem pomiku 15 mm; b) Poškodovani vogal obložne plošče po koncu preskusa; c) Izvlek sponk oziroma plošč panela (na panelu B12-16 večji izvlek plošče debeline 12 mm) in d) Pretrg sponk pri velikih horizontalnih pomikih (panel B16-16).

strižne obremenitve panela prišlo do naslednjih tipičnih poškodb panelov:

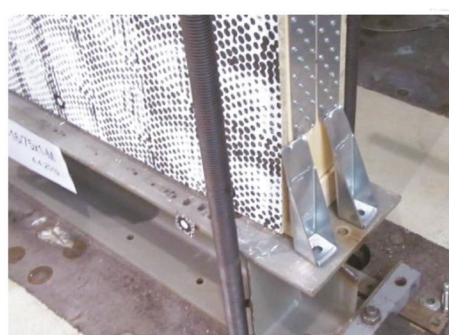
- Zelo tanke razpoke (širina razpoke $d \leq 0,3$ mm) plošč v vogalih pri horizontalnih pomikih vrha panela do 15 mm (slika 9a), ki se nato z večanjem obremenitev in amplitude pomika širijo ($d \leq 1,0$ mm) in v zadnji fazi preskusa na nekaterih mestih rezultirajo v odkrušenih vogalih obložnih plošč (slika 9b). Razen omenjenih razpok v vogalih ter razpok pri preskusu B12-16/75x1/M ob kotnikih zaradi vpetja panela preko obložnih plošč na ploščah ni prišlo do drugih razpok.
- Izvlek sponk. Najprej je bil viden v vogalnih delih panela, z večanjem pomika pa po celotni višini panela z vedno širšo »režo« med lesenim okvirjem in obložnimi ploščami. V primerih panelov B12-16 je bil izvlek večji na strani 12 mm obložne plošče (slika 9c).
- Pretrg sponk, kar se je zgodilo pri mejnih pomikih pri večini cikličnih preskusov; pri nekaterih preskusih le v vogalih plošč, pri nekaterih pa po celotni višini oziroma dolžini panela (slika 9d). Pretrg sponk ni

poškodb obložnih plošč v vogalih (slika 9a, b); z izjemo testa B12-16/75x1/M, pri katerem so zaradi vpetja panela preko obložnih plošč le-te počile na mestih vpetja s kotniki. Duktilna porušitev panelov je razvidna tudi

Rezultati strižne nosilnosti F_{max} mejnih pomikov d_u ter »elastične« togosti (med 10 % in 40 % F_{max} označena kot K_{10-40}) monotoni in cikličnih preskusov so za posamezno vrsto panela zbrani na sliki 12, pri čemer so pri

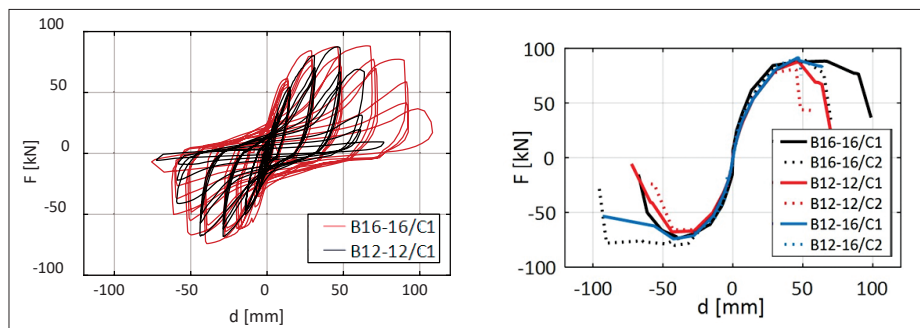


Slika 10 • Primerjava horizontalne sile v odvisnosti od pomika vrha panela monotoni strižnih preskusov (levo) ter pretrg dvižnih kotnikov pri preskusu B16-16/M (desno).

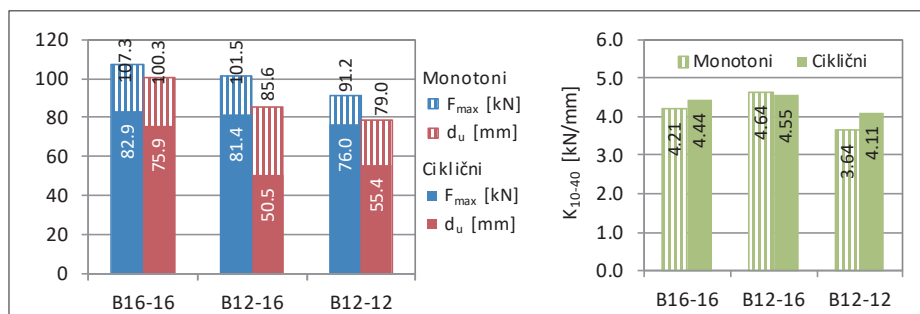


iz dobljenih tipičnih diagramov horizontalna sila–horizontalni pomik vrhov panelov. Na sliki 10 levo so prikazani rezultati monotoni strižnih preskusov; poleg točk maksimalne

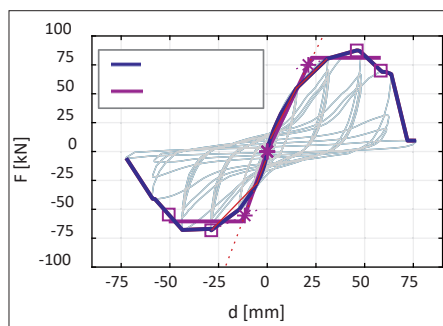
cikličnih preskusih za posamezen tipa panela upoštevani povprečni rezultati obremenjevanja v obeh smereh dveh cikličnih preskusov. Za primerjavo duktilnosti in efektivne togosti



Slika 11 • Primerjava rezultatov cikličnih strižnih preskusov: tipična histerezna odziva horizontalna sila-pomik panelov B12-12 in B16-16 (levo) ter primerjava histereznih ovojnic vseh cikličnih preskusov.



Slika 12 • Primerjava strižnih nosilnosti F_{max} in mejnih pomikov d_u pri monotoni in cikličnih preskusih (levo) ter »elastičnih« togostih K_{10-40} (desno), izračunanih iz rezultatov monotoni in cikličnih preskusov (za ciklične preskuse za posamezen tip panela prikazane povprečne vrednosti obeh smeri obremenjevanja dveh preskusov).



Slika 13 • Histerezna ovojnica in bilinearna idealizacija ovojnice (preskušane B12-12).

so bile histerezne ovojnice horizontalne sile v odvisnosti od pomika idealizirane v bilinearne krivulje (slika 13) po standardu SIST EN 12512:2002 (SIST, 2002), pri čemer je bil za izračun idealizirane horizontalne sile F_{id} dodatno privzet kriterij enakosti energije (enaka vložena energija histerezne ovojnice in idealizirane krivulje). Efektivne togosti K_{ef} idealizirane sile F_{id} in duktilnosti panelov μ so za monotone in ciklične strižne preskuse podane v preglednici 4 (za ciklične preskuse so podane povprečne vrednosti obeh smeri obremenjevanja), zaradi lažje primerjave z vrednostmi v literaturi so v preglednici podani

Preskus	K_{ef} (kN/mm)	$K_{ef,i}/$ $K_{ef, B12-12}$	F_{id} (kN)	$F_{id,i}/$ $F_{id, B12-12}$	Δ_u (%)	$\Delta_{u,i}/$ $\Delta_{u, B12-12}$	μ (/)	$\mu_i/$ μ_{B12-12}
B16-16/75x1/M	4,53	1	98,5	1	3,80	1	4,62	1
B12-16/75x1/M	5,00	1,10	90,6	0,92	3,24	0,85	4,72	1,02
B12-12/75x1/M	3,90	0,86	82,8	0,84	2,99	0,79	3,72	0,81
B16-16/75x1/C1	5,42	1	75,3	1	3,03	1	5,21	1
B16-16/75x1/C2	4,68		78,2		3,26		4,86	
B12-16/75x1/C1	4,09	1,00	75,0	0,94	2,25	0,73	3,76	0,76
B12-16/75x1/C2	6,00		69,6		1,93		3,89	
B12-12/75x1/C1	4,18	0,98	70,8	0,90	2,74	0,66	3,29	0,67
B12-12/75x1/C2	4,95		66,8		1,84		3,49	

Preglednica 4 • Idealizirani rezultati monotoni in cikličnih strižnih preskusov (povprečne vrednosti obeh smeri) ter primerjava povprečnih rezultatov panelov B12-12 in B12-16 s povprečnimi rezultati panelov B16-16 monotoni oziroma cikličnih preskusov.

tudi mejni zasuki panelov Δ_u (d_u/h). Duktilnost je izračunana kot razmerje med pomikom na meji elastičnosti d_e in mejnim pomikom d_u (80 % F_{max}) idealiziranega odziva panela. Vidimo, da se z uporabo tanjših plošč in manjših sponk zmanjša maksimalna nosilnost panela za 15 % pri monotoni preskusih in za 8 % pri cikličnih preskusih, zmanjšanje

je povprečne idealizirane nosilnosti F_{id} je malenkost večje (16 % in 10 % pri monotoni oziroma cikličnih preskusih). Bolj očitno je zmanjšanje mejnih pomikov oziroma duktilnosti; mejni pomiki panelov B12-12 so pri cikličnih preskusih za 34 % manjši v primerjavi s paneli B16-16, panelov B12-16 pa za 27 % (slika 11). Medtem ko je velikost dosežene strižne nosilnosti panelov B12-16 približno linearne med doseženo nosilnostjo panelov B12-12 in B16-16, to pri deformacijski kapaciteti panelov B12-16 ni tako. Zanimivo je tudi, da se povprečne vrednosti togosti panelov v »elastičnem« območju pri cikličnih preskusih bistveno ne razlikujejo; povprečna togost K_{10-40} panelov B12-12 je za 7 % manjša v primerjavi s paneli B16-16, povprečna togost K_{ef} pa samo za 2 %. Povprečna togost K_{10-40} panelov B12-16 je bila pri cikličnih preskusih v povprečju celo višja od panelov B16-16, medtem ko sta bili povprečni togosti K_{ef} enaki. Razlog za višjo togost panelov B12-16 gre pripisati razpršenosti rezultatov, saj je koeficient variacije togosti K_{10-40} panelov B12-16 kar 24 % v primerjavi s koeficientoma variacije 6 % in 8 % pri preskusih panelov B16-16 in B12-12. V skladu s teorijo obnašanja panelov pa je bila pri monotoni testih znatneje manjša efektivna

togost panela B12-12 v primerjavi z B16-16 (za 14 %), večjo togost vzorca B12-16 pri monotoni preskusu pa lahko smiselno razložimo z bolj togim vpetjem panela v temelj. Opravljene preiskave lesenih okvirnih stenskih panelov s cementno-ivernimi obložnimi ploščami potrjujejo, da je obnašanje tovrstnih panelov ob ustreznih detajlih primerljivo s

paneli z drugimi vrstami obložnih plošč. Za primerjavo so v preglednici 5 podani rezultati preiskav stenskih panelov z drugimi obložnimi ploščami, preskušanimi na podoben način. Vsi trije preskušani tipi stenskih panelov s cementno-ivernimi obložnimi ploščami so dosegli relativno visoko strižno nosilnost, v primeru panelov B16-16 tudi duktilnost. Slednja je tudi za panele B12-12 in B16-16 večja od duktilnosti lesenih okvirnih stenskih panelov z mavčno-vlaknenimi obložnimi ploščami.

Glede nesimetričnosti panela rezultati jasno kažejo, da strižno obnašanje panelov B12-16 ni slabše od panelov B12-12, kot bi to pričakovali glede na izračun nosilnosti panelov po SIST EN 1995-1-1. V slednjem je namreč za nesimetrične panele predvidena dodatna redukcija nosilnosti, in sicer naj bi se pri izračunu upoštevalo največ 75 % nosilnosti šibkejši strani (v preiskovanem primeru torej plošče B12) oziroma največ 50 % celotne nosilnosti panela. Redukcija je glede na primer preskusa panela z obložnimi ploščami OSB in MVP iz literature ((Sartori, 2012), preglednica 5) smiselna v

Literatura	Obložne plošče	F_{max} (kN)	d_u (mm)	Δ_u (%)	μ (/)
Gatto s sod., 2002	OSB*	37,4	91,4	3,72	/
	VP*	34,7	106,7	4,34	/
Dujić s sod., 2006	OSB	110,0	41,4	1,54	4,53
Sartori s sod., 2012	OSB	77,8	86,6	3,46	4,87
	MVP	48,3	27,6	1,10	3,37
	OSB-MVP	50,7	52,8	2,11	5,68
Seim s sod. 2016	OSB	79,9	75,2	2,95	2,95
	MVP	64,0	58,0	2,27	2,90

Opomba: Navedeni testi iz literature so bili izvedeni v skladu s podobnim protokolom obremenjevanja (ISO 16670 ali EN 12512) ter imajo razen vzorcev, označenih z *, obložne plošče na obeh straneh stenskih panelov. Testi se razlikujejo v načinu idealizacije rezultatov, torej v preglednici navedene duktilnosti niso medsebojno neposredno primerljive. Preiskave so se nekoliko razlikovale tudi v nivoju vertikalne obremenitve stenskih panelov (20–30 kN/m). Pomen okrajšav: OSB – plošče iz velikih usmerjenih iveri, VP – vezane plošče, MVP – mavčno-vlaknene plošče.

Preglednica 5 • Rezultati podobnih cikličnih preiskav lahkih okvirnih stenskih panelov z drugimi vrstami obložnih plošč.

primeru obložnih plošč različnih materialov, predvsem kadar gre za kombinacijo bolj in manj togih oziroma krhkih materialov. Pri uporabi plošč in detajla pritrdjevanja s podob-

nimi togostnimi karakteristikami pa je vsaj glede na predstavljene rezultate izvedenih testov v standardu opredeljena redukcija pretirana.

4 • SKLEP

Z opravljenimi preiskavami na malih preskušancih je bilo analizirano obnašanje enostrižne mehanske zveze masivnega lesa in cementno-iverni plošče s kovinskimi paličastimi sponkami. Ena izmed glavnih ugotovitev predstavljene 1. faze preiskav je, da je karakteristična bočna nosilnost preiskovane zveze za obe debelini plošč in tipa sponk, izračunana iz rezultatov cikličnih preskusov, večja od tiste, ki jo po izračunu predvideva trenutno veljavni SIST EN 1995-1-1, za debelino plošče 12 mm celo za več kot 30 %. Primerjava re-

zultatov monotoničnih in cikličnih preskusov kaže pri-bližno 25 % nižjo nosilnost zveze v primeru cikličnega obremenjevanja.

Preiskave panelov so pokazale, da je za v praksi največkrat uporabljene sestave panela (debelina obložnih plošč, dimenzije in razporeditev sponk) obnašanje panelov pri strižnih obremenitvah duktilno, pri čemer je glavni porušni mehanizem panela izvlek sponk (in plošč) iz lesa in ne porušitev plošč (plošče so bile poškodovane le v posameznih vogalih, kjer je zaradi koncentracij napetosti

prišlo do razpok). Preiskave potrjujejo tudi, da redukcija strižne nosilnosti panelov, kot jo predvideva izračun po SIST EN 1995-1-1 za panele z nesimetričnimi ploščami, za tovrstne panele ni utemeljena in potrebna.

Izvedene preiskave variacij detajla pritrdjevanja bodo v nadaljnjem raziskovalnem delu služile za izboljšavo detajlov pritrdjevanja obložnih plošč na leseni okvir in s tem večjo nosilnost panelov, hkrati pa bo poglobljena analiza rezultatov preskusov panelov omogočala nadaljnjo študijo nelinearnih parametrov obnašanja panelov pri cikličnem strižnem obremenjevanju, kot sta upadanje togosti, disipacija energije itd.

5 • ZAHVALA

Predstavljeno delo je bilo opravljeno v okviru projekta TIGR4smart in projekta št. C3330-19-952045 »Raziskovalci-2.1-ZAG-952045«, sofinancirana s strani Evropske unije iz sklada za regionalni razvoj ter ministrstva za izobraževanje, znanost in šport v okviru Operativnega programa za izvajanje Evropske kohezijske politike v obdobju 2014–2020.

6 • LITERATURA

- Beg, D., Pogačnik, A., Može, P., Priročnik za projektiranje gradbenih konstrukcij po Evrokod standardih, IZS, Ljubljana, 2009.
- Branco, J. M., Matos, F. T., Lourenço, P. B., Experimental In-Plane Evaluation of Light Timber Walls Panels. *Buildings* 7, 63, 2017.
- Casagrande, D., Rossi, S., Sartori, T., Tomasi, R., Proposal of an analytical procedure and a simplified numerical model for elastic response of single-storey timber shear-walls, *Construction and Building Materials*, Vol. 102, str. 1101–1112, 2016.
- Dujić, B., Aicher, S., Žarnić, R., Testing of wooden wall panels applying realistic boundary conditions, *Proceedings of the 9th World Conference on Timber Engineering*, Portland, Oregon, USA, str. 8., 2006.
- Filiatrault, A., Christovasilis, I. P., Wanitkorkul, A., van de Lindt, J. W., Experimental seismic response of a full-scale light-frame wood building, *Journal of structural engineering*, Vol. 136, Issue 3, str. 246–254, 2009.
- Fonseca, F. S., Rose, S. K., Campbell, S. H., Nail, wood screw, and staple fastener connections, CUREE Richmond, CA, 2002.
- Gatto, K., Uang, C. -M., Cyclic Response of Woodframe Shearwalls: Loading Protocol and Rate of Loading Effects, CUREE Publication No. W-13, Department of Structural Engineering University of California, San Diego, Consortium of Universities for Research in Earthquake Engineering, 2002.
- ISO, ISO 16670:2003 Timber structures - Joints made with mechanical fasteners - Quasi-static reversed-cyclic test method, 2003.
- Kessel, H., zur Kammer, T., Three-dimensional load-bearing behaviour of multi-storey timber frame buildings, *Proceedings of the 8th world conference on timber engineering*, str. 7–12, 2004.
- Kržan, M., Pazlar, T., Grašič, I., Ber, B., Preiskave lesenih okvirnih stenskih panelov s cementno ivernimi obložnimi ploščami, *Zbornik 41. zborovanja gradbenih konstruktorjev Slovenije, SDGK*, 7-8. 11. 2019, Bled, str. 197-204, 2019.
- Kuhta, M., Premrov, M., Influence of Fasteners Disposition on Behaviour of Timber-Framed Walls with Double Fibre-Plaster Coating Boards, *American Journal of Applied Sciences*, Vol. 5, Issue 1, str. 6, 2008.
- Sartori, T., Piazza, M., Tomasi, R., Grossi, P., Characterization of the mechanical behaviour of light-frame timber shear walls through full-scale tests, *World conference on timber engineering*, str. 8, 2012.
- Sartori, T., Tomasi, R., Experimental investigation on sheathing-to-framing connections in wood shear walls, *Engineering Structures*, Vol. 56, str. 2197–2205, 2013.
- Seim, W., Kramar, M., Pazlar, T., Vogt, T., OSB and GFB As Sheathing Materials for Timber-Framed Shear Walls: Comparative Study of Seismic Resistance, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 142, Issue 4, str. 14, 2016.
- SIST, SIST EN 594:2011 Lesene konstrukcije - Preskusni postopki - Natezna trdnost in togost lesenih stenskih okvirjev s ploščami (panelov), 2011.
- SIST, SIST EN 1995-1-1:2005, Evrokod 5: Projektiranje lesenih konstrukcij - 1-1. del: Splošna pravila in pravila za stavbe, 2005.
- SIST, SIST EN 1990:2004, Evrokod - Osnove projektiranja konstrukcij, 2004.
- SIST, SIST EN 12512:2002 Lesene konstrukcije - Preskusni postopki - Ciklično preskušanje spojev z mehanskimi veznimi sredstvi, 2002.
- SIST, SIST EN 310:1996, Lesne plošče - Ugotavljanje upogibne trdnosti in modula elastičnosti, 1996.
- Thompson, D.S., WoodWorks—Design example: Five-story wood-frame structure over podium slab, STB Structural Engineers, Lake Forest, CA, 2013.
- Tomasi, R., Sartori, T., Casagrande, D., Piazza, M., Shaking Table Testing of a Full-Scale Prefabricated Three-Story Timber-Frame Building, *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 19, str. 505–534, 2015.
- van de Lindt, J. W., Evolution of Wood Shear Wall Testing, Modeling, and Reliability Analysis: Bibliography, *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, Vol. 9, str. 44–53, 2004.
- Verdet, Y., Faye, C., Elachachi, S.M., Le Magorou, L., Garcia, P., Experimental investigation on stapled and nailed connections in light timber frame walls, *Construction and Building Materials*, Vol. 91, str. 260–273, 2015.