

Analiza otpornosti na savijanje LWT-FLOOR sustava

Andrea Rajić¹, doc. dr. sc. **Ivan Lukačević²**

¹Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, andrea.rajic@grad.unizg.hr

²Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, ivan.lukacevic@grad.unizg.hr

Sažetak

Primjena spregnutih konstrukcija čelik-beton ima velike prednosti kao što su upotreba montažnih elemenata i svladavanje velikih raspona, te optimalna iskoristivost čelika i betona što se posebno očituje uporabom hladno oblikovanih čeličnih profila. Rad predstavlja numeričku parametarsku analizu inovativne spregnute međukatne konstrukcije sastavljene od hladno oblikovanih čeličnih profila i betonske ploče. Način spajanja čeličnih elemenata te stupanj posmične veze pokazali su znatan utjecaj na ponašanje spregnutog sustava LWT-FLOOR dok debljina valovitoga lima kao hrpta, broj zavora u poprečnom presjeku te razmatrane visine čeličnog presjeka nemaju značaj utjecaj za analizirani sustav.

Ključne riječi: spregnuti sustav čelik-beton, sastavljeni hladno – oblikovani čelični elementi, točkasto zavarivanje, posmična veza, parametarska analiza metodom konačnih elemenata

Analyses of LWT-FLOOR system bending resistance

Abstract

Application of composite structural systems have many benefits, such as a prefabrication and long span capability, but also the optimal utilisation of structural steel and concrete which is given particularly by implementation of cold-formed steel (CFS) elements. This paper presents numerical parametric analysis on an innovative solution of a composite floor structure system consisting of built-up CFS elements and slabs. Type of connection between CFS elements and the degree of shear connection had the most significant impact on LWT-FLOOR system behaviour, while the corrugated web thickness, spot weld density and considered steel beam heights had less influence on the analysed composite system behaviour.

Key words: composite steel-concrete system, built-up cold-formed steel elements, spot welding, shear connection, parametric FE analyses

1 Uvod

Spregnuti sustavi čelik-beton su jedni od najisplativijih konstrukcijskih sustava primijenjeni u gradnji višekatnih građevina. Njihov razvoj rezultirao je poželjnim i ekološki prihvatljivim međukatnim sustavima (konstrukcijska učinkovitost, brzina građenja, demontaža te ponovna upotreba) te koji omogućava arhitektonsku slobodu u oblikovanju, malu debljinu betonske ploče, lako prilagođavanje nepravilnoj geometriji, mogućnost smanjenja vlastite težine, itd. Ahmed i Tsavdaridis [1] predstavili su detaljan pregled razvoja spregnutih sustava čelik-beton čiji su glavni ciljevi istraživanja povezani su s inovativnim metodama izgradnje i novim konstrukcijskim proizvodima. Međutim, unatoč opsežnim istraživanjima hladno oblikovanih čeličnih (cold formed steel, CFS) profila, spregnuti sustav formiran od CFS profila još uvijek nije u praktičnoj primjeni, iako ideja postoji već desetljećima [2]. Pregled primjene CFS profila u spregnutim sustavima s različitim tipom posmične veze može se pronaći u članku [3]. Hanaour [2] je bio među prvima koji je istraživao ponašanje spregnutih nosača izvedenih s CFS profilom s različitim tipovima posmične veze. Lakkavalli i Liu [4] proveli su istraživanje spregnutih ploča koje su sastavljene od CFS C profila i betona kako bi istražili ponašanje te procijenili učinkovitost prijenosa posmičnih sila. Hsu i dr. [5] predložili su novi spregnuti sustav nosača sastavljen od armirane betonske ploče izvedene na valovitom limu, CFS sastavljenih profila i moždanika izvedenih od hladno oblikovanog profila poprečnog presjeka oblika šešira. U člancima [6, 7] autori su razmatrali ponašanje spregnutih nosača sastavljenih od CFS i fero-cementne ploče vezanih vijčanim tipom posmične veze. Pokazano je da se otkazivanje događa zbog drobljenja betona u slučaju debljih čeličnih profila, dok se otkazivanje u slučaju tanjih profila događa zbog njihovog izbočivanja. Khadavi i Tahir [8] su proveli istraživanje poboljšanja ponašanja spregnutih nosača formiranih od zatvorenih čeličnih profila ispunjenih betonom u savijanju. Uporaba takvih profila može poboljšati otpornost na savijanje jer beton smanjuje lokalno izbočivanje čeličnog profila. Leal i Batista [9,10] istraživali su ponašanje spregnute međukatne konstrukcije formirane od CFS rešetke i djelomično predgotovljene betonske ploče koje su međusobno povezane inovativnim sredstvima za sprezanje. Pokazali su kako istražena sredstva za sprezanje mogu omogućiti potpunu vezu i prihvatljivu posmičnu otpornost. Lagani međukatni sustav obrađen u članku [11] sastoji se od rešetke formirane od U profila koji formiraju donju pojasnicu, te C profila koji formiraju hrbat i gornju pojasnicu. U svrhu poboljšanja pojedinih dijelova spregnutog sustava čelik-beton koriste se poprečni presjeci i materijali koji su prilagodljiviji sustavu, dok je posmična veza, koja osigurava vezu između pojedinih elemenata, drugi ključni parametar koji uvelike utječe na ponašanje spregnutog sustava. Još jedno istraživanje koje je povezano s inovativnom posmičnom vezom je članak koji analizira ponašanja na savijanje djelomično obloženo hladno oblikovanog spreg-

nutog nosača koristeći armaturu kao sredstvo za sprezanje [12]. Još nekoliko tipova sredstava za sprezanje predstavili su Elsawaf i Bamaga [13] te Hsu i dr [5]. Kako bi se omogućila demontaža spregnutog sustava, u literaturi [14-17] su analizirana demontažna sredstva za sprezanje. Adil Dar i dr. [18] predstavili su usporedbu različitih sredstava za sprezanje u kombinaciji s profiliranim limom u spregnutoj ploči. Shirgaokar [19] je istražio sličnu ideju. Osim utjecaja posmične veze, veliki utjecaj na spregnuti sustav ima i način povezivanja CFS profila u sastavljenom čeličnom nosaču [20]. Glavne prednosti sastavljenih čeličnih CFS nosača s valovitim hrptom (corrugated web, CW) su povećanje otpornosti nosača na lokalno i torzijsko izbočivanje te sprječavanje lokalnog sloma hrpta pri djelovanju koncentriranih sila [21-23] te su sažeta i prikazana kroz istraživanja na nosačima s vijcima [21, 22, 24], točkastim zavarima (spot welds, SW) i tehnike hladnog prijenosa metala (cold metal transfer, CMT) [25-27]. S obzirom da ovakva tehnička rješenja omogućuju standardizaciju oblikovanja detalja i predgotovljenosti, i SW i CMT tehnike zavarivanja su prikladne u automatiziranoj proizvodnji. Numerička parametarska istraživanja su kalibrirana i potvrđena eksperimentalnim ispitivanjima uzimajući u obzir i otvore u hrptu te su rezultati objavljeni u nekolicini radova [26,28-30]. Istraživanja potvrđuju odlično ponašanje sastavljenih nosača izvedenih od CW spojenih SW. Ovaj rad predstavlja parametarsku FE analizu inovativnog rješenja međukatnog sustava. LWT-FLOOR sustav se sastoji od sastavljenog CFS nosača s CW spojenog SW i betonske ploče izvedene na profiliranom limu.

2 Numerički i analitički modeli

2.1 Numerički modeli

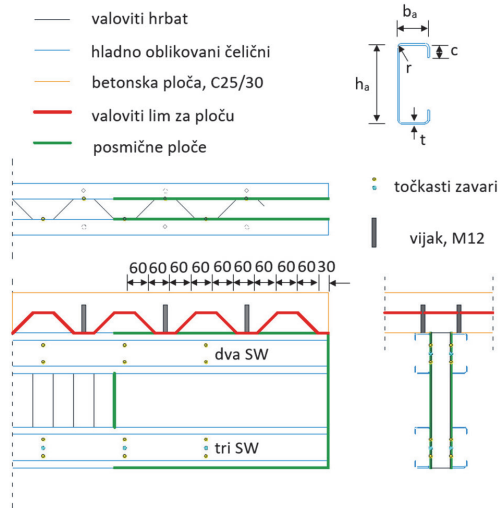
Numerički modeli pripremljeni su u računalnom programu Abaqus/CAE 2021 [31] kao jednostavno oslonjeni nosači dužine 6 m oblikovani prema geometriji danoj u tablici 1 i na slici 1. Opterećenje je zadano preko pomaka u sredini raspona čija konačna vrijednost iznosi 100 mm. S obzirom na visoki stupanj nelinearnosti u modelu (materijalne, geometrijske, SW spojevi i posmične veze), provedena je eksplicitna dinamička analiza [3].

Svojstva betona definirana su modelom plastičnog oštećenja betona (concrete damage plasticity, CDP) kako je objašnjeno u članku [32], dok su svojstva čeličnih elemenata i vijaka definirana bilinearnim elastoplastičnim ponašanjem s očvršćivanjem prema nominalnim karakteristikama za čelik S350 GD i kvalitetu vijka 8.8. Promjer vijaka koji služe kao sredstvo za sprezanje iznosi 12 mm, dok im visina iznosi 85 mm. Korištena su tri različita tipa posmične veze: veza koji ograničava relativni pomak između dvije površine (tie constraint, TC) - puna posmična veza (definirano u Abaqus/CAE); tip posmične veze postignut pozicioniranjem vijaka u parovima u sva-

ko rebro valovitog lima (kontinuirani raspored vijaka), slika 2.a, te pozicioniranjem jednog vijka u svako rebro valovitog lima, u naizmjeničnom rasporedu, slika 2.b.

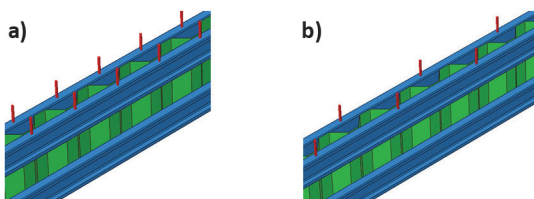
Tablica 1. Geometrijske karakteristike nosača

Hladno oblikovani čelični profil, C120	
Visina [mm], h_a	120
Debljina [mm], t	2,5
Širina pojasnice [mm], b_a	47
Dužina ojačanja [mm], c	21
Unutarnji radijus [mm], r	3
Posmične ploče	
Visina [mm], h	400, 500, 600
Debljina [mm], t	1,0
Valoviti hrbat	
Visina [mm], h	400, 500, 600
Debljina [mm], t	0,8, 1,0, 1,5
Valoviti lim za ploču	
Debljina [mm]	1,0
Visina rebra [mm], h_p	60
Betonska ploča, C25/30	
Ukupna visina, h_c [mm]	120
Proračunska širina, b_{eff} [mm]	1500



Slika 1. Geometrija analiziranog nosača

Vijci su definirani kao “beam” elementi s pridruženim poprečnim presjekom te su ugrađeni u betonsku ploču. S obzirom da ugrađeni elementi mogu biti pridruženi samo jednom elementu, gornja pojasnica CFS profila je povezana s donjim dijelom betonske ploče, kroz valoviti lim, spojem koji omogućava da pomak i rotacija prvog čvora budu jednaki drugom čvoru.



Slika 2. Raspored moždanika: a) u paru, b) naizmjenično

Ungureanu i dr. u radu [33, 34] su prikazali svojstva točkastih zavara u ovisnosti o debljini spojenih elemenata te su svojstva točkastih zavara potrebna za model preuzeta iz njihovog istraživanja. Položaj točkastih zavara analiziran je za dva slučaja. U prvom slučaju su C profili i CW spojeni u dvije dodirne točke, dok su u drugom slučaju spojeni u tri dodirne točke (slika 1). Položaj točkastih zavara na C profilima jednak je za sve tri razmatrane visine čeličnog nosača (visine odgovaraju uobičajenim visinama rešetkastih nosača), dok se broj točkastih zavara između valovitog hrpta i posmične ploče mijenja. Ujedno, razmatran je i slučaj kada su C profili spojeni s valovitim hrptom već opisanom TC vezom.

2.1 Analitički model

Kao posljedicu klasifikacije CFS elemenata u klase 3 i 4, plastičnu otpornost na savijanje nemoguće je dosegnuti. Međutim, za ovakve CFS elemente u spregnutim konstrukcijama čelik-beton, plastičnu otpornost na savijanje je moguće dosegnuti u slučaju pune posmične veze uzimanjem u obzir položaja plastične neutralne osi. Udaljenost neutralne osi od gornjeg ruba betonske ploče za slučaj pune posmične veze može se izračunati prema izrazu (1):

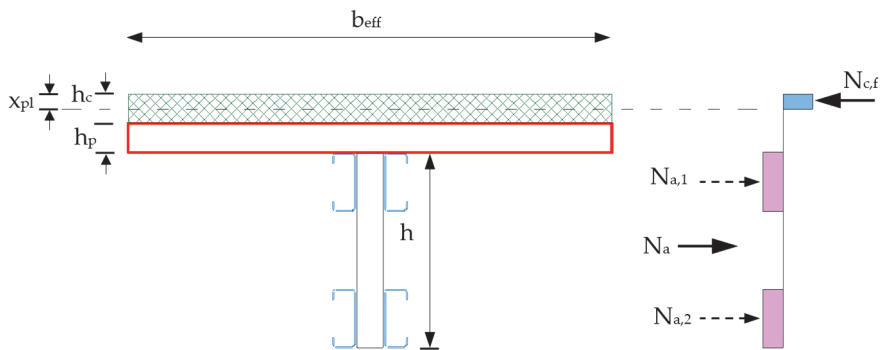
$$x_{pl} = \frac{4 \cdot A_a \cdot f_{yd}}{b_{eff} \cdot 0,85 \cdot f_{cd}} \quad (1)$$

gdje je A_a površina čeličnog profila, f_{yd} je proračunska vrijednost granice popuštanja, b_{eff} je proračunska širina betonske ploče i f_{cd} je proračunska tlačna čvrstoća betona. Za analizirane modele, prema izrazu (1), plastična neutralna os se nalazi na udaljenosti od 39.5 mm od gornjeg ruba betonske ploče. U slučaju pune posmične veze, izraz (2) i slika 3 daju podatke za izračun otpornosti na savijanje:

$$M_{pl,Rd} = b_{eff} \cdot x_{pl} \cdot 0.85 \cdot f_{cd} \left(\frac{h}{2} + h_c + h_p - \frac{x_{pl}}{2} \right) \quad (2)$$

Postavljanjem vijaka na uzdužnom razmaku od 240 mm u paru ili pojedinačno, uspostavljena je djelomična posmična veza u slučaju koje se otpornost na savijanje može procijeniti sljedećim izrazom:

$$M_{Rd} = M_{el,a,Rd} + (M_{pl,Rd} - M_{el,a,Rd}) \cdot \eta \quad (3)$$



Slika 3. Poprečni presjek razmatranog nosača

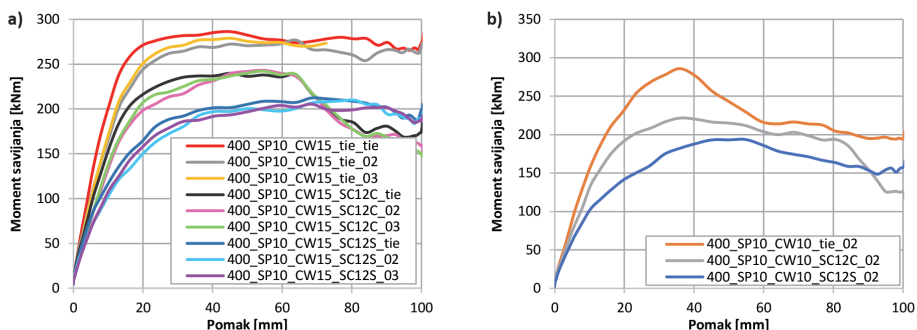
Izraz (3) prilagođen je izraz iz EN 1994-1-1 [35], gdje je umjesto plastične otpornosti na savijanje čeličnog dijela presjeka, $M_{pl,a,Rd}$ uvedena elastična otpornost na savijanje čeličnog dijela presjeka, $M_{el,a,Rd}$. Uzimajući u obzir izraz (3) i punu posmičnu vezu za razmatrane nosače visina $h = 400$ mm, $h = 500$ mm i $h = 600$ mm, otpornosti na savijanje redom iznose $M_{Rd} = M_{pl,Rd} = 252$ kNm, $M_{Rd} = M_{pl,Rd} = 294$ kNm and $M_{Rd} = M_{pl,Rd} = 336$ kNm. Posmična otpornost moždanika s glavom, ako nosač sadrži čelični profilirani lim, mora se reducirati pomoću faktora smanjenja k_l ili k_t ovisno o smjeru rebara u odnosu na uzdužni smjer nosača, prema EN 1994-1-1 [35]. U slučaju analiziranog nosača rebra čeličnog profiliranog lima položena su okomito na smjer pružanja nosača, stoga se faktor smanjenja, k_t , računa prema izrazu (4):

$$k_t = \frac{0,7}{\sqrt{n_r}} \cdot \frac{b_0}{h_p} \cdot \left(\frac{h_{sc}}{h_p} - 1 \right) \quad (4)$$

gdje je n_r broj vijaka/moždanika u rebru čeličnog profiliranog lima, b_0 iznosi 120 mm za razmatrani tip čeličnog profiliranog lima, prema [35], a h_{sc} je visina vijka. Međutim, prema izrazu danom u EN 1994-1-1, potpoglavlje 6.6.4.2. [35], izraz (4) se može primijeniti ako je zadovoljen uvjet $f_u = 450$ N/mm², koji nije bio ispunjen jer su korišteni vijci kvalitete 8.8. Za visinu čeličnog nosača $h = 400$ mm, u slučaju postavljanja moždanika u parove, otpornost na savijanje s primijenjenim faktorom smanjenja iznosi 178 kNm, a u slučaju bez uporabe faktora smanjenja iznosi 252 kNm. Kada se broj moždanika dvostruko smanji, odnosno kada se oni postave naizmjenično, postiže se manja otpornost na savijanje koja u slučaju s primijenjenim faktorom smanjenja iznosi 140 kNm, dok bez spomenutog faktora iznosi 206 kNm. Izračunate otpornosti na savijanje bez faktora smanjenja, k_t , približno odgovaraju otpornostima dobivenim na modelima formiranim s TC vezom. Smanjenjem broja moždanika, otpornost na savijanje se smanjila za otprilike 25 %.

3 Parametarska numerička analiza

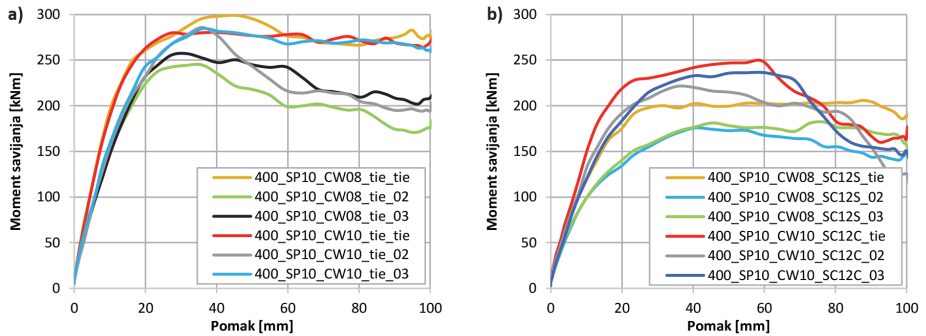
Parametarska numerička analiza provedena je kako bi se istražio utjecaj debljine valovitog hrpta (CW), broja točkastih zavora između C120 profila i CW (dva (02) ili tri (03) točkasta zavora), stupanj posmične veze (SC) koji je određen rasporedom vijaka (promjer 12 mm) pozicioniranih u parovima (SC12C) ili naizmjenično (SC12S), te utjecaja visine čeličnog presjeka (400 mm, 500 mm, 600 mm) na otpornost na savijanje spregnutog nosača. Slika 4.a prikazuje znatan utjecaj stupnja posmične veze na spregnuti nosač s debljinom CW od 1.5 mm te pokazuju da tip veze između čeličnih elemenata (tie veza, dva (02) ili tri (03) točkasta zavora) ima iznimno malen utjecaj na otpornost na savijanje. Slika 4.b prikazuje utjecaj stupnja posmične veze na modelima s dva točkasta zavora na svakom C profilu za visinu čeličnog dijela presjeka od 400 mm i debljinu CW od 1.0 mm. Puna posmična veza rezultirala je najvećom otpornošću na savijanje, dok je u slučaju naizmjeničnog rasporeda moždanika postignuta nešto manja otpornost na savijanje.



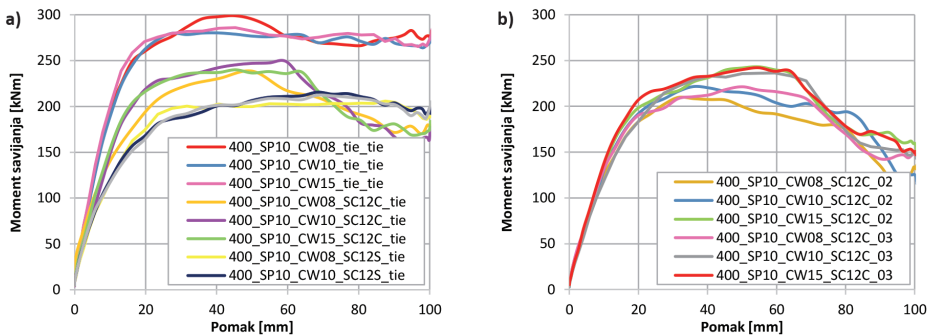
Slika 4. Utjecaj stupnja posmične veze: a) na modelima s debljinom CW od 1.5 mm, b) na modelima s debljinom CW od 1.0 mm i dva točkasta zavora na svakom C profilu

Utjecaj veze između čeličnih elemenata spregnutog nosača u slučaju debljine CW od 0,8 mm i 1,0 mm te za slučaju pune posmične veze prikazan je na slici 5.a. Ako su čelični elementi povezani TC vezom, spregnuti nosač postiže najveću krutost i otpornost na savijanje. U slučaju povezanosti čeličnih elemenata diskretnim SW, otpornost se smanjuje ovisno o broju zavora prisutnih u poprečnom presjeku što je vidljivo na slici 5.b. Također, debljina CW i broj SW u poprečnom presjeku u slučaju djelomične posmične veze imaju veći utjecaj na krutost na savijanje. Slike 6.a i 6.b prikazuju neznatan utjecaj debljine CW na otpornost na savijanje spregnutog nosača čelik-beton u slučaju djelomične posmične veze i tie veze između čeličnih elemenata. U slučaju pune posmične veze i TC veze između C profila i CW, "tie_tie" veza, razmatrani modeli pokazuju visoku otpornost na savijanje, dok je u slučaju djelomične posmične veze, SC12C i SC12S, otpornost na savijanje manja. Iz rezultata

prikazanih na slici 6.a, zaključeno je da stupanj posmične veze ima znatan utjecaj na otpornost na savijanje. Slika 6.b prikazuje utjecaj debljine CW u slučaju djelomične posmične veze kada su moždanici pozicionirani u svakom rebro u paru, SC12C, za slučajeve povezivanja CFS C profila i CW preko dva (02) ili tri (03) zavora. Osim neznatnog utjecaja debljine CW na otpornost na savijanje spregnutog nosača, koji je prikazan na slici 6.a, u slučaju kad su u presjeku prisutni točkasti zavori, utjecaj debljine CW se ne može zanemariti, slika 6.b.

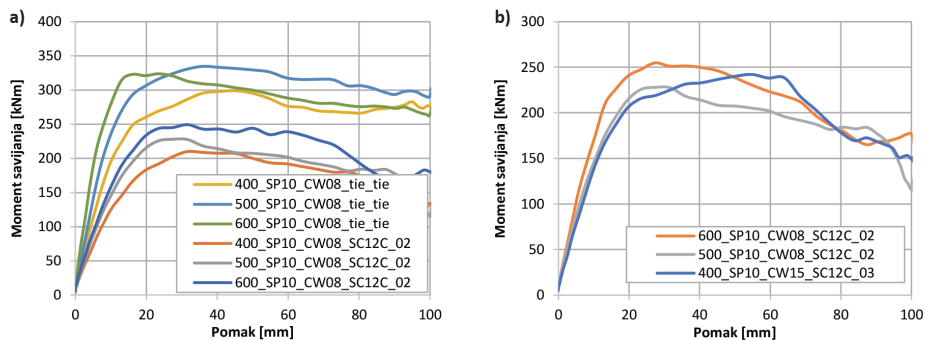


Slika 5. Utjecaj broja SW na otpornost na savijanje: a) puna posmična veza, TC veza, b) djelomična posmična veza



Slika 6. Utjecaj debljine valovitog hrpta: a) TC veza između čeličnih elemenata, b) djelomična posmična veza - moždanici u paru

Slika 7.a pokazuje rezultate utjecaja visine čeličnog presjeka s debljinom CW od 0,8 mm na otpornost i krutost na savijanje u slučaju pune i djelomične posmične veze gdje je značajno smanjena otpornost na savijanje dok je krutost na savijanje slična slučaju pune posmične veze.



Slika 7. Utjecaj visine čeličnog nosača: a) debljina CW od 0.8 mm s punom i djelomičnom posmičnom vezom, b) na modelima s različitim brojem SW

Slike 7.a i 7.b pokazuju kako razmatrane visine čeličnog dijela poprečnog presjeka nemaju značajni utjecaj na otpornost na savijanje za slučaj graničnog stanja nosivosti, dok u slučajevima gdje je bitna krutost na savijanje, kao što je u slučajevima graničnog stanja uporabljivosti, razmatrani čelični nosači mogu postići povoljnije rezultate. Nadalje, debljine čeličnih elemenata i odgovarajuće karakteristike te broj SW znatno utječu na otpornost i krutost na savijanje. Slika 7.b prikazuje rezultate za spregnuti nosač s visinom čeličnog dijela presjeka od 400 mm s tri točkasta zavora te debljinom CW od 1,5 mm koji može postići približnu otpornost na savijanje kao i spregnuti nosač s većom visinom s dva SW i debljinom CW od 0,8 mm. Uspoređujući analitičke izračunate otpornosti za slučaj pune posmične veze, zaključeno je kako su te otpornosti ostvarene samo u slučajevima kada su svi elementi čeličnog presjeka povezani TC vezom. U slučaju kada su primijenjeni SW, slika 7.b, analitički dobivene otpornosti za različite visine presjeka nisu realizirani zbog utjecaja diskretnih SW i smanjenog stupnja posmične veze. Analizirajući numerički dobivene rezultate i analitički dobivene rezultate za djelomičnu posmičnu vezu, zaključeno je kako su rezultati s provedenim smanjenjem pomoću faktora smanjenja, k_v , ostvareni za sve modele. Međutim, rezultati dobiveni bez faktora smanjenja nisu ostvareni. Ovakvi rezultati pokazuju potrebu za smanjenjem posmične otpornosti moždanika, što je potrebno detaljnije istražiti.

4 Zaključak

Pregled literature pokazao je značajan potencijal za daljnji razvoj spregnutih konstrukcijskih rješenja upotrjebljujući CFS profile i inovativna rješenja posmične veze. Ovakav potencijal proizlazi iz inženjerskog, socioekonomskog i ekološkog gledišta za razvoj održivog i otpornog ekosustava implementiranog u suvremeni okoliš. Numerički i analitički rezultati prikazanog spregnutog sustava sastavljenog od CFS profila i betonske ploče pokazali su kako ovaj tip sustava međukatne konstrukcije ima odličnu otpornost na savijanje. Ujedno, velika prednost ovog sustava je smanjena vlastita težina i jednostavnije rukovanje prilikom ugradnje. Numerički rezultati pokazali su da stupanj posmične veze i način spajanja čeličnih elemenata imaju najveći utjecaj na otpornost na savijanje dok debljina CW, broj točkastih zavara te razmatrane visine presjeka nemaju značajan utjecaj. Također, pokazano je kako je moguće postići slične razine otpornosti nosača promjenom broja točkastih zavara te u slučaju promjene visine čeličnog dijela presjeka. Analitički i numerički rezultati su usporedivi za punu posmičnu vezu i za slučaj kada su čelični elementi u presjeku potpuno povezani. Daljnja istraživanja potrebna su za diskretne točkaste zavare između čeličnih elemenata presjeka. U slučaju djelomične posmične veze, uspoređujući analitički i numerički dobivene rezultate, zaključeno je kako korištena prilagodba izraza iz Eurocode-a 4 može dati zadovoljavajuće vrijednosti analitički izračunate otpornosti na savijanje uz upotrebu faktora smanjenja, k_c .

Financiranje

Ovaj rad je sufinancirala Hrvatska zaklada za znanost projektom UIP-2020-02-2964 (LWT-FLOOR).

Literatura

- [1] Ahmed, I.M., Tsavdaridis, K.D.: The evolution of composite flooring systems: applications, testing, modelling and eurocode design approaches, *Journal of Constructional Steel Research* (2019);155, pp. 286-300. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.01.007>.
- [2] Hanaor, A.: Tests of composite beams with cold-formed sections, *Journal of Constructional Steel Research* (2000);54, pp. 245-64. [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(99\)00046-2](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(99)00046-2).
- [3] Lukačević, I., Ćirković, I., Rajić, A., Bartolac, M.: Lightweight Composite Floor System—Cold-Formed Steel and Concrete—LWT-FLOOR Project, *Buildings* (2022), 12, <https://doi.org/10.3390/buildings12020209>.

- [4] Lakkavalli, B.S., Liu, Y.: Experimental study of composite cold-formed steel C-section floor joists, *Journal of Constructional Steel Research* (2006);62, pp. 995-1006. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2006.02.003>.
- [5] Hsu, C.T.T., Punurai, S., Punurai, W., Majdi, Y.: New composite beams having cold-formed steel joists and concrete slab, *Engineering Structures* (2014);71, pp. 187-200. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.04.011>.
- [6] Alhajri, T.M., Tahir, M.M., Azimi, M., Mirza, J., Lawan, M.M., Alenezi, K.K.: Behavior of pre-cast U-Shaped Composite Beam integrating cold-formed steel with ferro-cement slab, *Thin-Walled Structures* (2016);102:18-29. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2016.01.014>.
- [7] Saggaff, A., Tahir, M.M., Azimi, M., Alhajri, T.M.: Structural aspects of cold-formed steel section designed as U-shape composite beam, *AIP Conf Proc* 2017;1903. <https://doi.org/10.1063/1.5011505>.
- [8] Khadavi, K., Tahir, M.M.: Prediction on flexural strength of encased composite beam with cold-formed steel section, *AIP Conf Proc* 2017;1903. <https://doi.org/10.1063/1.5011496>.
- [9] Leal, L.A.A. d. S, Batista, E. de M.: Composite floor system with cold-formed trussed beams and pre-fabricated concrete slab, *Stability and Ductility Steel Structures - Proc Int Colloq Stab Ductility Steel Struct* (2019);13, pp. 682-90. <https://doi.org/10.1002/stco.201900046>.
- [10] de Seixas Leal, L.A.A., de Miranda Batista, E.: Composite floor system with cold-formed trussed beams and prefabricated concrete slab: Selected and extended contribution of SDSS 2019. *Steel Constr* (2020);13, pp. 12-21. <https://doi.org/10.1002/stco.201900046>.
- [11] Tian, L., Kou, Y., Hao, J., Zhao, L.: Flexural performance of a lightweight composite floor comprising cold-formed steel trusses and a composite mortar slab, *Thin-Walled Structures* (2019);144:106361. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.106361>.
- [12] Salih, M.N.A., Md Tahir, M., Mohammad, S., Ahmad, Y., Sulaiman, A., Shek, P.N.: Experimental study on flexural behaviour of partially encased cold-formed steel composite beams using rebar as shear connector, *IOP Conf Series: Materials Science Engineering* (2019);513. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/513/1/012038>.
- [13] Elsawaf, S.A., Bamaga, S.O.: Strength capacity and failure mode of shear connectors suitable for composite cold formed steel beams: Numerical study, *Materials (Basel)* (2021);14. <https://doi.org/10.3390/ma14133627>.
- [14] Jakovljević, I., Spremić, M., Marković, Z.: Demountable composite steel-concrete floors: A state-of-the-art review, *Građevinar* (2021);73, pp. 249-63. <https://doi.org/10.14256/JCE.2932.2020>.

- [15] Bamaga, S.O., Tahir, M.M., Tan, C.S., Shek, P.N., Aghlara, R.: Push-out tests on three innovative shear connectors for composite cold-formed steel concrete beams, *Constr Build Mater* (2019);223, pp. 288-98. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.223>.
- [16] Wang, J.-Y., Guo, J.-Y., Jia, L.-J., Chen, S.-M., Dong, Y.: Push-out tests of demountable headed stud shear connectors in steel-UHPC composite structures, *Compos Struct* (2017);170, pp. 69-79. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.03.004>.
- [17] Yang, F., Liu, Y., Jiang, Z., Xin, H.: Shear performance of a novel demountable steel-concrete bolted connector under static push-out tests, *Engineering Structures* (2018);160, pp. 133-46. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.01.005>.
- [18] Dar, M.A., Subramanian, N., Dar, A.R., Ghowsi, A.F., Siddiqui, F., Fayaz, S.: Comparison of various shear connectors for improved structural performance in CFS concrete composite slabs, *Engineering Structures* (2020);220,111008. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111008>.
- [19] Shirgaonkar, A.A., Patil, Y.D., Patil, H.S.: Influence of stiffeners and pattern of shear screws on behaviour of cold formed profiled deck composite floor, *Case Study in Construction Materials* (2021);15:e00572. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00572>.
- [20] Landolfo, R., Mammana, O., Portioli, F., Di Lorenzo, G., Guerrieri, M.R.: Laser welded built-up cold-formed steel beams: Experimental investigations, *Thin-Walled Structures* (2008);46:781-91. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2008.03.009>.
- [21] Dubina, D., Ungureanu, V., Gîlia, L.: Cold-formed steel beams with corrugated web and discrete web-to-flange fasteners, *Steel Construction* (2013);6:74-81. <https://doi.org/10.1002/stco.201310019>.
- [22] Dubina, D., Ungureanu, V., Dogariu, A.: Lightweight Footbridges of Cold Formed Steel Corrugated Web Beams: Technical Solution And Evaluation, 8th Int. Symp. Steel Bridg. Innov. New Challenges, Istanbul, 2015
- [23] Ungureanu, V., Dubina, D.: Influence of Corrugation Depth on Lateral Stability of Cold-Formed Steel Beams of Corrugated Webs, *Acta Mech Autom* (2016);10:104-11. <https://doi.org/10.1515/ama-2016-0017>.
- [24] Dubina, D., Ungureanu, V., Gîlia, L.: Experimental investigations of cold-formed steel beams of corrugated web and built-up section for flanges, *Thin-Walled Structures* (2015);90:159-70. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2015.01.018>.
- [25] Ungureanu, V., Both, I., Burca, M., Tunea, D., Grosan, M., Neagu, C.: Welding technologies for built-up cold-formed steel beams: experimental investigations, Ninth Int. Conf. Adv. Steel Struct., Hong Kong, China, 2018, e-Proceedings.

- [26] Ungureanu, V., Both, I., Burca, M., Grosan, M., Neagu, C., D. D.: Built-up cold-formed steel beams using resistance spot welding: experimental investigations, Eighth Int. Conf. Thin-Walled Structures (ICTWS 2018), Lisbon, Portugal, 2018
- [27] Benzar, Ş., Ungureanu, V., Dubină, D., Burcă, M.: Built-Up Cold-Formed Steel Beams with Corrugated Webs Connected with Spot Welding, *Adv Mater Res* (2015);1111:157-62. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1111.157>.
- [28] Ungureanu, V., Lukačević, I., Both, I., Burca, M.: Numerical investigation of built-up cold-formed steel beams connected by spot welding, 20th Congr. IABSE, New York City 2019 Evol. Metrop. - Rep., 2019.
- [29] Ungureanu, V., Lukačević, I., Both, I., Dubina, D.: Numerical investigations on built-up cold-formed steel beams for long spans. *ce/papers* (2021);4:2277-84. <https://doi.org/10.1002/cepa.1550>.
- [30] Ungureanu, V., Both, I., Burcă, M., Huang Nguyen, T., Grosan, M., Dubina, D.: Experimental investigations on spot welded built-up cold-formed steel beams, vol. 64. 2018.
- [31] Corp DSS. Dassault Systèmes Simulia Corp. ABAQUS, User's Manual 2016.
- [32] European Committee for Standardization (CEN). European standard EN 1993-1-1: Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, Bruxelles: 2005.
- [33] Ungureanu, V., Both, I., Tunea, D., Grosan, M., Neagu, C., Georgescu, M.: Experimental investigations on built-up cold-formed steel beams using mig brazing 2018.
- [34] Both, I., Ungureanu, V., Tunea, D., Crisan, A., Grosan M.: Experimental and numerical investigations on cold- formed steel beams assembled by mig brazing, 2018.
- [35] European Committee for Standardization CEN. EN 1994-1-1: Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, 2004.