

Posmični zidovi izvedeni dvoslojnim hladno oblikovanim čeličnim limovima s betonskim ispunom

Marko Barišić¹, izv. prof. dr. sc. **Ivan Lukačević²**

¹MBK biro za konstrukcije d.o.o., marko.barisc@mbk.hr

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

Sažetak

Posmični zid s dvoslojnim čeličnim limovima i betonskim ispunom inovativan je spregnuti posmični zid sastavljen od čeličnih limova kao vanjske ovojnice, betonskog ispuna i spojnih sredstava. U usporedbi sa klasičnim armiranobetonskim zidovima ovakvi sustavi odlikuju se visokom posmičnom otpornošću i duktilnošću, dok istovremeno omogućuju značajne uštede, od manje debljine zidova, pa do veće brzine izvedbe. U radu je dan opis pojedinačnih komponenti posmičnog zida te pregled važnijih provedenih istraživanja ključnih varijabli koje utječu na ponašanje ovakvih zidova te mogućnost njihove inovativne primjene kod dvojnih okvirnih sustava u kombinaciji s hladno oblikovanim čelikom.

Ključne riječi: spregnute konstrukcije, posmični zidovi, stabilizacija, betonski ispun, hladno oblikovani čelični limovi

Double-skin cold-formed steel shear walls with concrete infill

Abstract

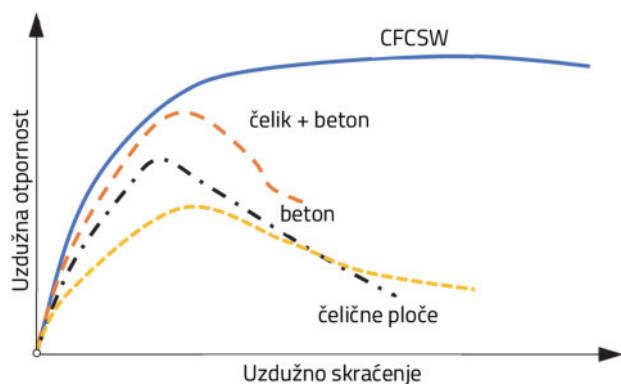
A double-skin steel shear wall with concrete infill is an innovative composite wall consisting of a double-skin steel sheet as an outer shell, concrete infill, and intermediate fasteners. Such systems are characterised by higher shear strength and ductility compared to traditional reinforced concrete walls. Additionally, they enable significant savings, ranging from smaller wall dimensions to increased construction speed. This paper describes the individual components of a shear wall and provides an overview of the most important key research on the variables that influence the behaviour of such walls and the possibility of their innovative application to dual frame systems in combination with cold-formed steel.

Key words: composite structures, shear walls, bracing system, concrete infill, cold-formed steel sheeting

1 Uvod

Čelične konstrukcije od hladno oblikovanih profila imaju široku primjenu u niskim (do 4 kata) i višekatnim zgradama (10 do 12 katova). Njihova popularnost može se pripisati mnogim prednostima, koje između ostalog uključuju veliku otpornost uz malu vlastitu težinu, jednostavnost masovne proizvodnje, brzu izgradnju te ekološku prihvatljivost [1]. Upravo je brzina izgradnje ključni argument koji ide u prilog ovakvim konstrukcijama u usporedbi sa tradicionalnim sustavima, dok se ekološke prednosti ovakvih konstrukcija očituju u manjoj količini otpada uslijed tvorničke proizvodnje te mogućnosti ponovne uporabe ili potpune reciklaže, što promiče kružno gospodarstvo i održivu gradnju. Nadalje, svi elementi ovakvih konstrukcija su zaštićeni od korozije prevlakama cinka što uvelike olakšava održavanje konstrukcije u cjelini. Zbog navedenih prednosti sustava od hladno oblikovanih profila značajno je porastao interes za istraživanjem poboljšanja ponašanja takvih sustava, kao i mogućnost demontaže istih na kraju životnog vijeka. Jedna od mogućih primjena hladno oblikovanih čeličnih elemenata su posmični zidovi, čija je uloga u otpornosti globalnog konstrukcijskog sustava na horizontalna djelovanja ključna [2]. Međutim, niska posmična otpornost, krutost i mala duktilnost takvih zidova podrazumijeva da se ovaj tip posmičnog zida prvenstveno može koristiti kod niskih zgrada ili područjima s niskom seizmičnošću [3-5]. U visoko seizmičkim područjima za stabilizaciju srednje visokih i visokih zgrada posmična otpornost sustava može se povećati uvođenjem betona kao ispune [6], odnosno izvedbom spregnutih zidova. Spregnuti sustavi čelik-beton općenito su jedan od najisplativijih konstrukcijskih sustava i imaju različite primjene u građevinarstvu za izvedbu nosivih elemenata konstrukcija kao što su spregnuti nosači, stupovi i međukatne konstrukcije. U ovim sustavima konstrukcijski čelik i beton djeluju zajedno, pri čemu se iskorištava prednost svih materijala: visoka tlačna otpornost betona, odnosno vlačna otpornost i duktilnost čelika, kako bi se postigla optimalna konstrukcija u odnosu na korištenje pojedinačnih materijala [7]. Prva primjena sustava spregnutih zidova koji kombiniraju dvoslojne čelične limove s betonskim ispunom zabilježena je u nuklearnoj industriji te visokim čeličnim okvirnim konstrukcijama zgrada, pokazujući izvrsne konstrukcijske karakteristike s obzirom na posmičnu otpornost i duktilnost [8]. U usporedbi sa klasičnim armiranobetonskim zidovima, spregnuti zidovi mogu ponuditi optimalnije tehničko rješenje u visokim građevinama, obzirom da se dimenzije zidova mogu znatno reducirati uz zadržavanje ekvivalentne ili veće mehaničke otpornosti i stabilnosti sustava, dok istovremeno omogućuju bržu izvedbu na gradilištu, obzirom na tvorničku proizvodnju predgotovljenih sklopova. Slika 1. prikazuje ponašanje posmičnih zidova od čeličnih limova, klasičnog armiranobetonskog zida i spregnutog zida od čeličnih limova i betonskog ispuna (eng. Concrete Filled Composite

Steel Wall - CFCSW) izloženih tlaku, pri čemu je tlačno, odnosno uzdužno skraćivanje istih prikazano na apscisi, dok je tlačna otpornost prikazana na ordinati. Podaci su prikupljeni iz eksperimentalnih rezultata koje su proveli Usami i suradnici [9]. Ispitivani su uzorci zidova u omjerima širine i debljine od 20, 30, 40 i 50 uz zadržavanje konstantne debljine zidova od 200 mm. Rezultati su pokazali da je tlačna otpornost CFCSW-a veća od zbroya tlačnih otpornosti čelika i betona pojedinačno.



Slika 1. Ponašanje različitih vrsta posmičnog zida u tlaku, prilagođeno iz [8]

Jedan od načina optimalne upotrebe materijala je primjena hladno oblikovanih čeličnih profila i limova u gore navedenom spregnutom sustavu. U radu je dan opis pojedinačnih komponenti CFCSW zidova te pregled važnijih provedenih istraživanja ključnih varijabli koje utječu na ponašanje CFCSW zidova te mogućnost njihove inovativne primjene kod dvojnih okvirnih sustava u kombinaciji s hladno oblikovanim čelikom.

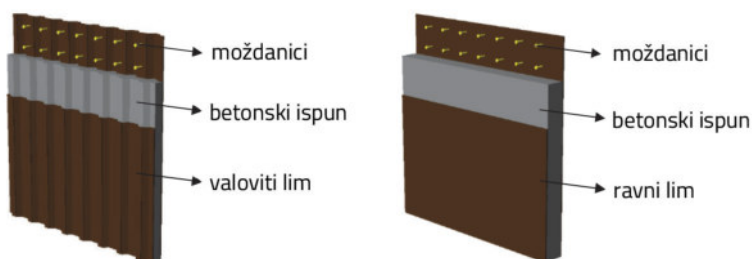
2 Elementi spregnutog posmičnog zida

Općenito, sustav spregnutih posmičnih zidova sastoji se od čeličnih limova kao obostrane vanjske oplata, betonskog ispuna i različitih spojnih elemenata za sprezanje, kao što su trnovi, vijci, dijafragme i slično. U nastavku je dan kratki opis pojedinačnih komponenti koje tvore sustav spregnutog posmičnog zida.

2.1 Čelični limovi

Čelični limovi mogu djelovati kao oplata prije izlivanja betona i istodobno preuzeti opterećenja u fazi izgradnje. Obično se proizvode u radionici i potom transportiraju na gradilište. U uporabnoj fazi djeluju kao ojačanja koja mogu pridonijeti otpornosti zidova na posmik, kao i dvoosno ukrućenje betona radi povećanja njegove tlačne čvrstoće, što dovodi do duktilnijeg načina otkazivanja. Slika 2. pri-

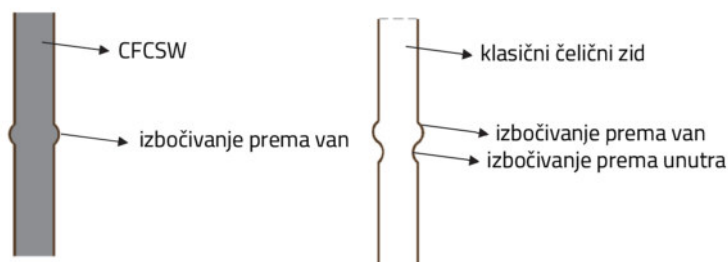
kazuje dva tipa oblikovanja vanjske ovojnice spregnutog posmičnog zida: valoviti, odnosno konvencionalni, ravni čelični lim. Razvidno je da valoviti čelični lim može pružiti dodatnu mehaničku otpornost – fizičku barijeru između čeličnog lima i betona na valovima. U navedenom slučaju betonski ispun doprinosi kompaktnosti sustava: pri horizontalnom djelovanju valoviti lim imati će manju mogućnost lokalne deformacije, obzirom da je ista ograničena visokom tlačnom otpornošću betonskog ispuna u valu. S druge strane, konvencionalni čelični limovi češće se koriste u praksi zbog jednostavnije proizvodnje i mogućnosti izvedbe u većim debljinama [8].



Slika 2. Oblikovanje vanjske ovojnice spregnutog posmičnog zida

2.2 Betonski ispun

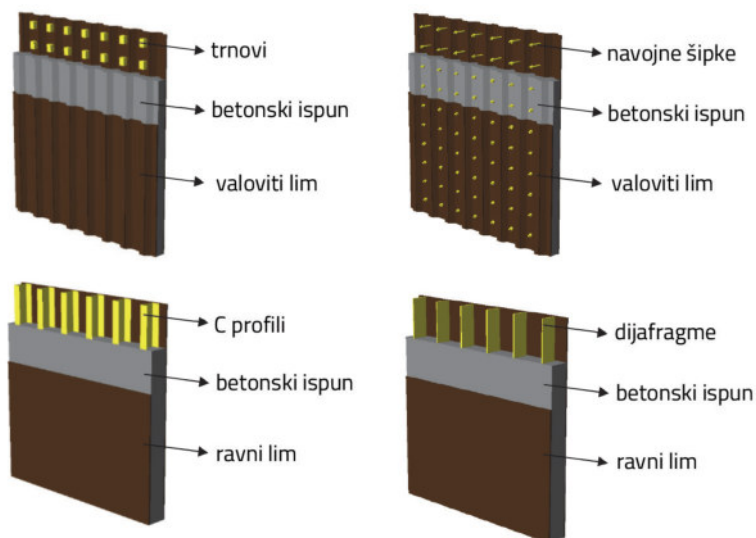
Osim što povećava globalnu otpornost sustava, betonski ispun može spriječiti lokalno izbočivanje čeličnih limova u ranim fazama. Slika 3. prikazuje oblik izbočivanja spregnutog zida od limova i betonskog ispuna te klasičnog čeličnog posmičnog zida. Iz navedenog je vidljivo da se u spregnutim zidovima lokalno izbočivanje događa isključivo prema van [8].



Slika 3. Način otkazivanja spregnutog i klasičnog čeličnog posmičnog zida, prilagođeno iz [8]

2.3 Spojna sredstva

Spregnuto djelovanje čelika i betona postiže se raznim spojnim sredstvima, kao što su trnovi, moždanici, vijci, navojne šipke, dijafragme, rubni i unutarnji profili i slično. O razmaku spojnih sredstava uvelike ovisi ponašanje posmičnog zida u cjelini. Slika 4. prikazuje neke vrste spojnih sredstava za sprezanje betona sa valovitim, odnosno konvencionalnim ravnim limovima.



Slika 4. Primjeri nekih spojnih sredstava u spregnutim posmičnim zidovima sa valovitim i ravnim limovima

3 Dosadašnja istraživanja spregnutih posmičnih zidova i njihova primjena

Spregnuti posmični zidovi tema su brojnih eksperimentalnih i numeričkih analiza pri statičkom, cikličkom i dinamičkom opterećenju. U nastavku je dan pregled važnijih provedenih istraživanja ključnih varijabli koje utječu na ponašanje CFCSW zidova te mogućnosti njihove primjene korištenjem hladno oblikovanih limova.

3.1 Omjer širine i debljine zida

O odabiru osnovne geometrije zidova, njegovoj projektiranoj debljini i visini, odnosno omjeru istih uvelike će ovisiti ponašanje zida. U istraživanju [9], za različite omjere širine (B) i debljine zida (t), eksperimentalnom analizom utvrđeno je da se lokalno izbočivanje čeličnih limova povećava sa smanjenjem omjera B/t . S

druge strane, povećanjem omjera B/t smanjuju se tlačna otpornost i mogućnost deformacije, odnosno duktilnost zida. Nadalje, krutost svih zidova opterećenih na tlačnu silu od 3MN bila je nepromijenjena, neovisno o omjeru B/t , dok se za primijenjenu silu veću od 3MN krutost zidova smanjivala za veće omjere B/t .

3.2 Omjer tlačnog opterećenja

Omjer tlačnog opterećenja posmičnog zida definira se kao omjer primijenjene tlačne sile i krajnje tlačne otpornosti posmičnog zida. Veći omjer tlačnog opterećenja doprinosi boljoj stiješnjenosti betona, stoga spregnuti zidovi apsorbiraju više energije te je samim time njihova sposobnost razgradnje energije veća. Međutim, betonski ispun ima tendenciju drobljenja u ranoj fazi pod većim omjerom tlačnog opterećenja, što dovodi do smanjenja krutosti i otpornosti pod cikličkim opterećenjem. Nadalje, povećanjem omjera tlačnog opterećenja smanjuju se deformacijska sposobnost i duktilnost posmičnog zida [8]. Uzevši u obzir navedeno, pri projektiranju posmičnih zidova potrebno je projektirati odgovarajući omjer tlačnog opterećenja, kako bi se osiguralo da sposobnost razgradnje energije, krutost, otpornost, duktilnost i deformacijska sposobnost posmičnog zida mogu postići zadovoljavajuću vrijednost [8].

3.3 Debljina limova

U fazi eksploatacije čelični limovi djeluju kao armatura. Nastavno na navedeno, provedene su razne studije kako bi se analizirao utjecaj debljine čeličnog lima na sustav spregnutog zida. Takeda i suradnici [10] proveli su eksperimente s tri različite debljine limova, pokazujući da veća debljina lima doprinosi većoj krutosti, posmičnoj otpornosti i stabilnijoj krivulji histereze. Međutim, Ozaki i suradnici [11] naveli su da povećanjem debljine lima može doći do većih oštećenja betonske ispuna pri cikličkom opterećenju, jer se posmična čvrstoća betona nije povećala, što dovodi do smanjenja duktilnosti. Za spregnute zidove pod tlačnim opterećenjem, rezultati istraživanja pokazali su da su povećanjem debljine lima krutost i otpornost na izvijanje povećane [11]. S druge strane, povećanjem debljine lima spregnuto djelovanje sustava se smanjilo. Spregnuto djelovanje može se izraziti kao duljina preko koje lim doseže vlačnu granicu popuštanja. Razvojna duljina u spregnutom posmičnom zidu inspirirana je konceptom razvojne duljine u klasičnim armiranobetonskim zidovima, koja se može definirati kao potrebna duljina ugrađene armature za spregnuto djelovanje betona i čelika [8]. Istaknuto je da veća debljina čeličnog lima rezultira manjom razvojnom duljinom i manjim spregnutim djelovanjem. Međutim, slično klasičnom armiranobetonskom zidu, razvojna duljina CFCSW-a trebala bi biti dva do tri puta veća od debljine zida, što ograničava debljinu lima [12]. Osim otpornosti na savijanje u ravnini, utvrđeno je

da debljina lima ima značajan utjecaj na savijanje izvan ravnine. Utvrđeno je da je korelacija između debljine čeličnog lima i otpornosti na savijanje izvan ravnine gotovo linearna prema eksperimentalnim rezultatima [13]. Međutim, nisu pronađeni značajni utjecaji na posmičnu otpornost izvan ravnine promjenom debljine čeličnog lima [14].

3.4 Razmak spojnih sredstava

Velik broj studija proveden je kako bi se istražio utjecaj razmaka spojnih sredstava na ponašanje spregnutih zidova. Liang i suradnici [15, 16] istraživali su utjecaje razmaka spojnih sredstava na otpornost na izvijanje i krajnju otpornost pri dvoosnom tlačnom opterećenju [15] te dvoosnom tlačnom opterećenju i posmiku [16]. U navedenim radovima predloženi su analitički izrazi za izračun maksimalnog dopuštenog razmaka spojnih sredstava tako da se lokalno izbočivanje lima između spojnih sredstava ne bi dogodilo prije dostizanja granice popuštanja. Osim lokalne vitkosti, razmak spojnih sredstava značajno utječe na spregnuto djelovanje sustava u cjelini. Rezultati istraživanja također su pokazali da se s manjim razmakom spojnih sredstava može postići djelomično spregnuto djelovanje u iznosu od 75-90% [17]. Istovremeno, Sener i Varma [14] te Sener i suradnici [13] definirali su bazu podataka za provođenje parametarske analize razmaka spojnih sredstava na ponašanje spregnutih zidova pri posmiku izvan ravnine [14] i savijanju izvan ravnine [13]. Rezultati istraživanja pokazali su da je posmična otpornost izvan ravnine poboljšana s malim razmakom spojnih sredstava. Međutim, razmak spojnih sredstava nije imao utjecaja na ponašanje spregnutih zidova pri savijanju izvan ravnine.

3.5 Mogućnost primjene

Potencijalna primjena sustava može biti u razvoju seizmički otpornih sustava koji nadilaze nedostatke konvencionalnih rješenja poput okvira otpornih na moment savijanja (eng. *Moment Resisting Frame* - MRF) i okvira poduprtih centričnim veznim sustavom (eng. *Concentric Braced Frame* - CBF). MRF sustavi imaju visoku sposobnost razgradnje seizmičke energije kroz popuštanje nosača, ali potencijalno veliki pomaci mogu otežati zadovoljenje graničnog stanja uporabljivosti. S druge strane CBF sustavi nude veću bočnu krutost čime se ograničavaju pomaci, ali je njihova sposobnost razgradnje smanjena zbog izvijanja dijagonala. Jedna mogućnost poboljšanja je izvedba sustava okvira poduprtog ekscentričnim dijagonalama (eng. *Eccentric Braced Frame* - EBF) koji kombiniraju visoku bočnu krutost s duktilnošću zahvaljujući disipativnom ponašanju seizmičkih spona. Međutim, ovakvi sustavi nemaju sposobnost ponovnog centriranja, što može rezultirati značajnim troškovima popravaka nakon potresa. Ideja dvojnih sustava temelji se

na kombinaciji MRF sustava s inovativnim zamjenjivim veznim sustavom, kao što su seizmičke spone [18] ili zamjenjivi posmični zidovi [19], kako bi se postigla razgradnja seizmičke energije na specifičnim lokacijama i sposobnost ponovnog centriranja, što značajno smanjuje troškove popravaka. Ključni koncept dvojnih sustava je da MRF dio sustava ostaje u elastičnom području tijekom potresa, dok zamjenjive spone ili zidovi razgrađuju energiju. Nakon potresa, oštećeni disipativni elementi se uklanjaju, a elastični MRF okviri osiguravaju sile potrebne za vraćanje konstrukcije u prvobitni položaj.

Preliminarna istraživanja [19, 20] pokazala su da dvojni sustavi s zamjenjivim inovativnim CFCSW uz primjenu hladno oblikovanih čeličnih limova pokazuju tražene prednosti dvojnih sustava u smislu razgradnje energije i sposobnost ponovnog centriranja. Iako su ovi sustavi pokazali obećavajuće rezultate, potrebna su daljnja istraživanja koja će obuhvatiti različite tipologije posmičnih zidova kako bi se dobio dublji uvid u mogućnosti njihove praktične primjene. Također, potrebne su daljnje eksperimentalne i numeričke studije koje će uključiti ciklička opterećenja kako bi se dobio bolji uvid u ponašanje CFCSW zidova u realističnim potresnim uvjetima. Nadalje, ključno je istražiti način spajanja posmičnog zida s čeličnim okvirom kako bi se omogućila demontaža zida nakon nelinearnih deformacija i njegova zamjena novim.

4 Zaključak

Pregledom dosadašnjih istraživanja vidljivo je da će učinkovitost istraživanih sustava posmičnih zidova ovisiti o čitavom nizu varijabli (omjeru tlačnog opterećenja, geometriji čeličnih limova, položaju i broju spojnih elemenata...), što ostavlja značajan prostor za daljnja istraživanja i primjene u građevinarstvu. Uzimajući u obzir navedeno, a u svrhu iznalaženja optimalnog rješenja, konstrukcijske i ekološke učinkovitosti sustava, u budućim istraživanjima potrebno je dodatno istražiti sustave posmičnih zidova koji se sastoji od obostrano postavljenih hladno oblikovanih valovitih čeličnih limova koji su međusobno povezani spojnim sredstvima te ispunjeni betonom, uz eventualnu kombinaciju sa klasičnom armaturom. Također, potrebno je dodatno istražiti primjenu ovog sustava kao stabilizacije čelične okvirne konstrukcije. Posebnu pozornost treba posvetiti načinima povezivanja čelika i betona kao i načinu povezivanja posmičnog zida i čeličnog okvira koji će omogućiti demontažu za zamjene, buduće ponovne uporabe ili recikliranje na kraju životnog vijeka. Također potrebno je istražiti otpornost, krutost, duktilnost te sposobnost razgradnje energije uslijed cikličkog djelovanja potresa te potencijal za primjenu u dvojnog sustavu u kombinaciji s čeličnim okvirima.

Literatura

- [1] J. M. Jacinto, O. G. D. Cruz, and E. J. Guades, "Cold-Formed Steel Structure for Mid-Rise Residential Building: A Literature Review," *Lecture Notes in Civil Engineering*, vol. 310, pp. 37–51, 2023, doi: 10.1007/978-981-19-8024-4_4.
- [2] W. Zhang *et al.*, "Influencing factors analysis on shear capacity of cold-formed steel light frame shear walls," *Structures*, vol. 33, pp. 3588–3604, Oct. 2021, doi: 10.1016/J.ISTRUC.2021.06.064.
- [3] F. W. Wu and Y. Q. Li, "Large-scale shaking table tests of a six-story floor-by-floor assembled CFS frame-framing shear wall structure," *Eng Struct*, vol. 293, p. 116608, Oct. 2023, doi: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2023.116608.
- [4] R. Aktepe, S. Akduman, and B. Guldur Erkal, "Experimental investigation on lateral behavior of novel hybrid cold-formed steel walls with composite sheathing," *J Constr Steel Res*, vol. 202, p. 107766, Mar. 2023, doi: 10.1016/J.JCSR.2022.107766.
- [5] M. Hasanali *et al.*, "A critical review of cold-formed steel seismic resistant systems: Recent developments, challenges and future directions," *Thin-Walled Structures*, vol. 180, p. 109953, Nov. 2022, doi: 10.1016/J.TWS.2022.109953.
- [6] I. Curkovic *et al.*, "Seismic performance of composite plate shear walls with variable column flexural stiffness," *Steel and Composite Structures*, vol. 33, no. 1, p. 19, 2019, doi: 10.12989/SCS.2019.33.1.019.
- [7] B. Androić, D. Dujmović, and I. Lukačević, *Projektiranje spregnutih konstrukcija prema Eurocode 4*. Zagreb: IA projektiranje, 2012.
- [8] J. Mo *et al.*, "A review of the behaviour and design of steel–concrete composite shear walls," *Structures*, vol. 31, pp. 1230–1253, Jun. 2021, doi: 10.1016/J.ISTRUC.2021.02.041.
- [9] S. Usami *et al.*, "Study on a concrete filled steel structure for nuclear power plants (part 2). Compressive loading tests on wall members," in *Transactions of the 13th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMIRT13)*, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brazil, Aug. 1995.
- [10] T. Takeda *et al.*, "Experimental Study on Shear Characteristics of a Concrete Filled Steel Plate Wall," in *Transactions of the 13th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMIRT13)*, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brazil, Aug. 1995.
- [11] M. Ozaki *et al.*, "Study on steel plate reinforced concrete panels subjected to cyclic in-plane shear," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 228, no. 1–3, pp. 225–244, Mar. 2004, doi: 10.1016/J.NUCENGDES.2003.06.010.

- [12] A. H. Varma *et al.*, "Steel-plate composite (SC) walls for safety related nuclear facilities: Design for in-plane forces and out-of-plane moments," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 269, pp. 240–249, Apr. 2014, doi: 10.1016/J.NUCENGDES.2013.09.019.
- [13] K. C. Sener, A. H. Varma, and D. Ayhan, "Steel-plate composite (SC) walls: Out-of-plane flexural behavior, database, and design," *J Constr Steel Res*, vol. 108, pp. 46–59, May 2015, doi: 10.1016/J.JCSR.2015.02.002.
- [14] K. C. Sener and A. H. Varma, "Steel-plate composite walls: Experimental database and design for out-of-plane shear," *J Constr Steel Res*, vol. 100, pp. 197–210, Sep. 2014, doi: 10.1016/J.JCSR.2014.04.014.
- [15] Q. Q. Liang *et al.*, "Local and post-local buckling of double skin composite panels," *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings*, vol. 156, no. 2, pp. 111–119, 2003, doi: 10.1680/STBU.2003.156.2.111.
- [16] Q. Q. Liang *et al.*, "Local Buckling of Steel Plates in Double Skin Composite Panels under Biaxial Compression and Shear," *Journal of Structural Engineering*, vol. 130, no. 3, pp. 443–451, Mar. 2004, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2004)130:3(443).
- [17] K. Zhang *et al.*, "Effect of shear connectors on local buckling and composite action in steel concrete composite walls," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 269, pp. 231–239, Apr. 2014, doi: 10.1016/J.NUCENGDES.2013.08.035.
- [18] I. Lukačević, T. Maleta, and D. Dujmović, "Behaviour of dual eccentrically braced steel frames with short and long seismic links," *20th Congress of IABSE, New York City 2019: The Evolving Metropolis - Report*, pp. 1674–1681, 2019, doi: 10.2749/NEWYORK.2019.1673.
- [19] I. Lukačević *et al.*, "Behaviour of dual steel frames with innovative double skin cold-formed steel concrete composite shear walls," pp. 634–645, Mar. 2025, doi: 10.5592/CO/3CROCEE.2025.105.
- [20] V. Žuvelek *et al.*, "Numerical Investigation of Double-Skin Cold-Formed Steel Shear Wall Filled with Concrete," *Lecture Notes in Civil Engineering*, vol. 489 LNCE, pp. 105–115, 2024, doi: 10.1007/978-3-031-57800-7_9/FIGURES/7.