

Primljen / Received: 7.5.2024.

Ispravljen / Corrected: 4.9.2024.

Prihvaćen / Accepted: 12.9.2024.

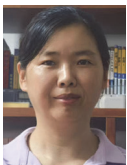
Dostupno online / Available online: 10.11.2024.

Analiza bočnoga posmika šuplje ploče s bočnim zupcima na temelju konstitucijske simulacije kohezijske sile

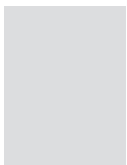
Autori:



Songgang Yang, dipl.ing.građ.
1903929701@qq.com



Prof.dr.sc. Xiaojuan Shu, dipl.ing.građ.
254528003@qq.com
Autor za korespondenciju



Yongguang Li, dipl.ing.građ.
1600541101@qq.com



Prof.dr.sc. Mingyan Shen, dipl.ing.građ.
511272252@qq.com



Prof.dr.sc. Chao Zhao, dipl.ing.građ.
1020173@hnust.edu.cn

Znanstveno i tehnološko sveučilište u Hunanu
Građevinski fakultet
Xiangtan, Kina

Prethodno priopćenje

[Songgang Yang](#), [Xiaojuan Shu](#), [Yongguang Li](#), [Mingyan Shen](#), [Chao Zhao](#)

Analiza bočnoga posmika šuplje ploče s bočnim zupcima na temelju konstitucijske simulacije kohezijske sile

U ovom se radu, na temelju šupljih ploča sa spojem s čepom i rupom, predlaže šuplja ploča s bočnim zupcima za lakše bočno spajanje. Konstruirani su sklopovi s bočnim zupcima oblika V i W. Ispitivanjima na posmik malih uzoraka s različitim oblicima bočnih zubaca razvijen je kohezijski konstitucijski model s epoksidnim ljepilom koje je odabrano kao materijal za spajanje površine između zubaca. Spojna površina simulirana je epoksidnim ljepilom nulte debljine primjenom Voronoijevoga matematičkog modela za nasumičnu jediničnu podjelu. Ravninski mikromehanički simulacijski model konačnim elementima razvijen je primjenom računalnoga programa Abaqus za analizu oblika sloma i posmične čvrstoće šupljih ploča s dva sklopa s bočnim zupcima pod djelovanjem posmika, a za provjeru su provedena odgovarajuća ispitivanja na posmik. U sklopu s bočnim zupcima V oblika, vanjski beton je prvi izgubio čvrstoću te je isključen iz procesa, pri čemu je visina posmične površine pukotina kod potpunoga sloma bila približno polovina visine grede. Spoj s bočnim zupcima W oblika nije pokazao znatniji rani gubitak čvrstoće tijekom posmika, pri čemu je potpuna površina posmičnoga sloma iznosila približno 4/5 visine grede. Simulacijska analiza pokazala je veće širine pukotina tijekom sloma kod prvoga sklopa i manju širinu kod drugoga.

Ključne riječi:

šuplja ploča s bočnim zupcima, otpornost na posmik, kohezijska sila, konačni element, simulacijski eksperiment

Research Paper

[Songgang Yang](#), [Xiaojuan Shu](#), [Yongguang Li](#), [Mingyan Shen](#), [Chao Zhao](#)

Analysis of lateral shear performance of side-toothed hollow slab based on cohesive force constitutive simulation

Herein, based on mortise–tenon hollow slabs, a side-toothed hollow slab structure is proposed for easier lateral connections. Side-tooth structures of both the V- and W-side teeth were constructed. By conducting shear tests on small specimens with different side-tooth shapes, a cohesive constitutive model of epoxy adhesive, which was selected as the inter-tooth bonding material, was developed. The bonding interface was simulated with a zero-thickness epoxy adhesive by using the Voronoi mathematical model for random unit division. A plane micromechanical finite element simulation model was developed using the Abaqus software to analyse the failure modes and shear strength of the hollow slabs with two side-tooth structures under shear action, and the corresponding shear tests were conducted for verification. In the V-side teeth structure, the outer concrete lost its strength earlier and exited the work process, with the height of the cracking shear surface at complete failure being approximately half of the beam height. The W-side teeth joint structure did not exhibit a significant early strength loss during shearing, with the complete shear failure surface being approximately 4/5 of the beam height. The simulation analysis showed larger crack widths during failure in the former and smaller widths in the latter.

Key words:

side-toothed hollow slab, shear resistance, cohesive force, finite element, simulation experiment

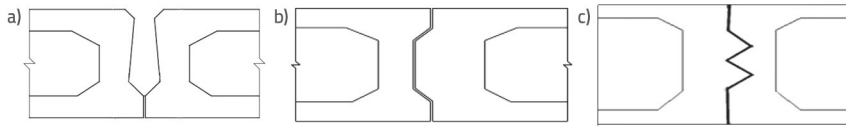
1. Uvod

U današnjim montažnim gredama od šupljih ploča, uobičajeno primjenjivana konstrukcija spoja pero i utor, kao što je prikazano na slici 1.a., ima poprečnu posmičnu čvrstoću koja ovisi o visini spoja pero i utor i kvaliteti betona unutar spoja. Pod utjecajem dugotrajnoga preopterećenja koje stvaraju vozila tijekom uporabe mostovi sa šupljim pločama skloni su oštećenjima kao što su korozija čelične armature, slom spoja i pucanje greda [1, 2]. Štoviše, zbog nedovoljne visine, slabe zbijenosti betona unutar spoja i manje količine armature njihova je posmična čvrstoća inherentno mala. Kada dođe do pojave pukotina i prodora vode, posmična sila brzo opada, što dovodi do ozbiljnoga naprezanja na pojedinačnim pločama i ugrožava sigurnost konstrukcije glavne grede. Tim tipičnim problemima posvećuje se sve veća pozornost, a domaći znanstvenici provode sve više istraživanja o otpornosti spojeva na posmik. Wang [3] je predložio metodu proračuna posmične sile zglobnoga spoja grednih mostova primjenom energijske metode. Zaključak dobiven tim istraživanjem bio je da, s povećanjem broja grednih mostova, sila zgloba raste, dok se sila zgloba smanjuje s povećanjem raspona. Vellaichamy [4] je proučavao sposobnost vezivanja kompozitnih ploča s dva različita profila čeličnih ploča. Rezultati su pokazali da je prevladavajući način sloma u ispitivanim uzorcima bio uzdužni posmični slom između betona i profiliranih čeličnih ploča.

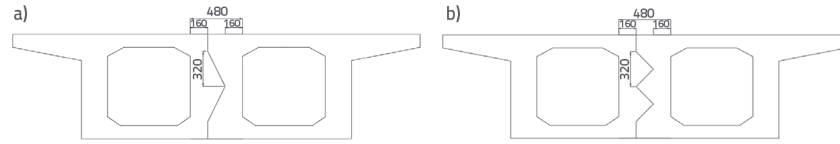
Gu i suradnici [5] analizirali su oštećenja zglobova primjenom modela konačnim elementima i uspostavili sustav procjene na temelju različitih parametara oštećenja. Di i suradnici [6] proveli su destruktivna ispitivanja na 12 šupljih ploča u uporabi i uočili da je granica sigurnosti posmične nosivosti greda šupljih ploča s rasponom od 10 m samo 5,3 %. Zhang i suradnici [7] proveli su ispitivanja opterećenja na savijanje na prednapetim betonskim šupljim pločama koje su bile u uporabi nekoliko godina i uočili da se njihova otpornost na stvaranje pukotina znatno smanjila s malom krutošću i naprezanjem. Wang i suradnici [8] inovativno su upotrijebili membransku konstrukciju u modelima konačnim elementima za simulaciju prijenosa sile između zglobova. Predložili su metodu proračuna bočne raspodjele uzimajući u obzir pomak između spojeva, potvrđujući da je glavni uzrok pucanja spojeva između šupljih ploča slom spojne površine između spojeva i šupljih ploča. Zhou [9] je prvi upotrijebio mlazni beton za ojačanje grednih mostova, a učinak armiranja bio je dobar u stvarnim ispitivanjima statičkoga opterećenja mosta. Mlazni beton se može primjenjivati za ojačanje greda i zglobnih spojeva u grednim mostovima. Demir [10] je uveo inovativni pristup za ojačavanje greda na točkama dodira susjednih konstrukcija, omogućujući projektantima izradu nacrtu armiranobetonskih greda pomoću tih metoda primjenom jednostavnih proračuna. Du i suradnici [11] su na temelju eksperimenata i analize simulacije konačnim elementima, zaključili da je učinak betona lijevanoga na licu mjesta i spojeva na poboljšanje posmične nosivosti šupljih ploča ograničen, dok proklizavanje spojeva i greda šupljih ploča ima ograničen utjecaj

na posmičnu nosivost. Znanstvenici su predložili različite metode ojačanja za rješavanje ovih problema. Semendary i suradnici [12] primijenili su beton ultravisoke učinkovitosti kao materijal za punjenje spojeva kako bi riješili problem pucanja spojeva u američkim mostovima od šupljih ploča, s dobrim rezultatima u praktičnim primjenama na mostovima. Zhong i suradnici [13] kombinirali su čelične ploče s čeličnim vlaknima ojačanim polimerima za armiranje šupljih ploča, što je znatno poboljšalo nosivost pri savijanju i krutost greda šupljih ploča u usporedbi s uporabom samih čeličnih ploča ili čeličnih vlakana ojačanih polimerima. Natarajan [14] je uočio da dodavanje 0,09 % i 0,06 % staklenih vlakana u beton može učinkovito povećati njegovu čvrstoću na savijanje i posmik, što može pomoći u ojačavanju zglobnih spojeva. Zhang i suradnici [15] primijetili su da je posmik uzoraka s običnim bočno ojačanim betonskim utorima bolji od posmika onih uzoraka s uobičajenim betonskim utorima ojačanim s donje strane, te su naglasili znatan utjecaj smjera lijevanja na posmičnu čvrstoću spojne površine. Jin i suradnici [16] pokazali su da uporaba čeličnih ploča tipa sidra i kombinirane betonske armature u uvjetima oštećenja spojeva može učinkovito obnoviti prijenos sile između jednostavno poduprtih šupljih ploča i znatno poboljšati ukupnu krutost šupljih ploča. Zhang [17] je sažeo karakteristike naprezanja i mehanizme sloma zglobnih spojeva. Vjerovali su da povećanje veličine zglobnih spojeva, povećanje i proširenje čeličnih šipki zglobnih spojeva, povećanje gustoće čeličnih šipki zglobnih spojeva i dodavanje križnih čeličnih šipki zglobnih spojeva može učinkovito poboljšati prijenos sile i ojačati zglobne spojeve.

S obzirom na ograničenu poprečnu posmičnu čvrstoću između postojećih šupljih ploča na pero i utor, koja je zbog kvalitete spojeva znatno niža od posmične čvrstoće samih greda, neki su znanstvenici predložili izmjene u konstrukciji spojeva i šupljih ploča radi povećanja poprečne posmične čvrstoće. Zhang i Xue [18] predložili su novi tip šuplje ploče (čep i rupa), kao što je prikazano na slici 1.b. Poprečni spoj nove šuplje ploče s čepom i rupom teorijski je bolji od uobičajenoga spoja pero i utor. Međutim, konstrukcija s čepom i rupom zahtijeva spajanje susjednih greda počevši od kraja grede, što otežava izgradnju. Nakon montaže spoja s čepom i rupom treba ubrizgati ljepilo ili smjesu za injektiranje kako bi se poboljšala cjelovitost. Ünal [19] je proveo ispitivanja na savijanje u četiri točke na 16 armiranobetonskih greda u mjerilu 1/1 mijenjanjem omjera raspona posmika/omjera efektivne dubine (a/d) i razmaka spona. Autor je uočio da omjer a/d i broj spona imaju znatan utjecaj na učinkovitost jednostavno poduprtih greda. Ye i suradnici [20] predložili su poboljšanje otpornosti spojeva na posmik postavljanjem posmičnih ojačanja na spojeve šupljih ploča. Feng [21] je predstavio novu gredu šuplje ploče s pribudnicom koja je ekonomski nadmašila konvencionalne šuplje ploče u poprečnom spoju u smislu konstrukcije i učinkovitosti nakon izgradnje. Zhang i suradnici [22] eksperimentalno su pokazali da gruba obrada utora na stranama šupljih ploča ne samo da je povećala posmičnu čvrstoću, već je također osigurala određenu razinu duktilnosti.



Slika 1. Pero i utor, čep i rupa i bočno nazubljenje: a) pero i utor; b) čep i rupa; c) bočno nazubljenje



Slika 2. Konfiguracija predložene šuplje ploče: a) konfiguracija bočnoga zupca oblika V; b) konfiguracija bočnoga zupca oblika W

Autori rada sugeriraju da konstrukcijski sustav šupljih ploča s čepom i rupom koji se temelji na koncepciji bešavnih spojeva može znatno povećati doprinos same grede poprečnoj posmičnoj čvrstoći. Stoga se predlaže oblikovanje nove spojne konstrukcije kojom bi se maksimizirala poprečna otpornost na posmik. U skladu s time, u ovom se radu prikazuje sklop šuplje ploče s bočno nazubljenom konfiguracijom za spajanje grede na gredu, kao što je prikazano na slici 1.c. Bočno spajanje povećava doprinos grede u pružanju otpornosti na posmik, a povezivanje ljepilom pojednostavljuje izgradnju u usporedbi s izlivanjem na spojeve pero i utor. Za razliku od konstrukcije s čepom i rupom, gradnja može započeti od srednje grede, s naknadnim gredama koje se sekvencijalno spajaju sa strane grede kako bi se uklonile poteškoće u izgradnji. Ovo istraživanje uspoređuje simulaciju konačnih elemenata i eksperimentalne rezultate kako bi se ispitati ključni parametri posmika nove šuplje ploče, mehanička svojstva ljepila za konstrukcije i odnos između konfiguracije s bočnim zupcima i posmične čvrstoće između ploča.

2. Oblikovanje spojnoga sklopa šupljih ploča s bočnim zupcima

Nacrt novoga sklopa s bočnim zupcima uključivao je usporedbu dviju vrsta zubaca: bočne zupce oblika W i V. Središte zubaca postavljeno je na sredinu visine grede, a dubina zubaca (d) projektirana je tako da bude 2/3 debljine (B) mreže šuplje ploče. Širina bočnoga zupca oblika V (h) projektirana je da bude tri, četiri i pet puta veća od dubine zupca, dok je ukupna širina (h) bočnoga zupca oblika W projektirana da bude dva, četiri i šest puta dubina zupca. Pozivajući se na standardni nacrt prednapetih šupljih

ploča s rasponom od 20 m i visinom grede od 95 cm, s debljinom rebra (B) od 24 cm (uključujući polovinu debljine spoja pero i utor), odgovarajuće dimenzije sklopa s bočnim zupcima za šuplju ploču prikazane su na slici 2.

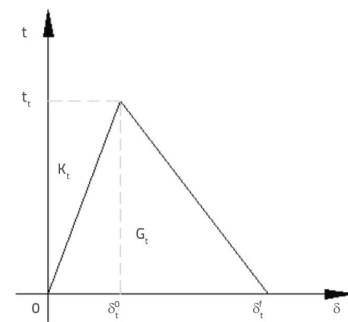
Bočne strane greda (uključujući površine zubaca i gornju i donju okomitu ravninu) zalijepljene su pomoću ljepila za konstrukcije. Nakon usporednih procjena tlačne čvrstoće, vlačne čvrstoće i otpornosti na starenje, za lijepljenje se preporučuju dvije vrste ljepila za konstrukcije: epoksidna ljepila

i karbonska ljepila za ploče. Indikatori mehaničkih svojstava oba ljepila, izmjereni nakon 168 h normalnoga stvrdnjavanja i ispitivanja starenjem, navedeni su u tablici 1.

3. Konstitucijski model materijala

3.1. Konstitucijski model betona

Cilj je ovoga istraživanja uspostaviti poboljšani model simulacije konačnim elementima za nazubljeni spoj šupljih ploča s bočnim zupcima kako bi se analizirao njihov posmik. To zahtijeva uvođenje odgovarajućega i razmjerno preciznoga konstitucijskog modela. Na temelju karakteristika naprezanja betona unutar zupca pod djelovanjem posmične sile između greda konstitucijski je model posmika betona uspostavljen primjenom kohezijskoga bilinearnog modela oštećenja u računalnom programu Abaqus. Konstitucijski model i oblik matematičke funkcije prikazani su na slici 3. i u izrazu (1). Rezultati parametara navedeni su u tablici 2.



Slika 3. Konstitucijski model betona

Tablica 1. Pokazatelji mehaničkih svojstava dviju vrsta ljepila za konstrukcije

Mehanička svojstva Ljepila	Vlačna čvrstoća [MPa]	Vlačna čvrstoća nakon starenja [MPa]	Prosječna brzina starenja vlačne čvrstoće [%]	Tlačna čvrstoća [MPa]	Tlačna čvrstoća nakon starenja [MPa]	Prosječna brzina starenja tlačne čvrstoće [%]
Ljepilo za karbonske ploče	34,82	32,86	5,63	72,67	68,72	5,44
Epoksidno ljepilo	42,37	40,72	3,89	93,66	90,67	3,22

Tablica 2. Konstitucijski parametri materijala

Materijal	K_t [Pa/m]	t_t [MPa]	t_t^f [MPa]	δ_t^o	δ_t^u	δ_t^f	G_t [J/m ²]
Beton	/	1,95	/	/	/	4	15,60
Epoksidno ljepilo-beton	0,39	2,68	1,98	7,10	7,89	10,62	16,76
Karbonska ploča ljepilo-beton	0,36	2,54	1,81	6,99	7,09	10,52	15,71

$$t = \begin{cases} K_t \delta & (0 < \delta < \delta_t^o) \\ t_t \frac{\delta_t^f - \delta}{\delta_t^f - \delta_t^o} & (\delta_t^o < \delta < \delta_t^f) \end{cases} \quad (1)$$

$$t = \begin{cases} K_t \delta & 0 < \delta < \delta_t^o \\ t_t^f + (t_t^m - t_t^f) \left(\frac{\delta_t^u - \delta}{\delta_t^u - \delta_t^o} \right) & \delta_t^o < \delta < \delta_t^u \\ t_t^f & \delta_t^u < \delta < \delta_t^f \end{cases} \quad (2)$$

- K_t - krutost betonskih uzoraka
- δ - posmični pomak betonskih uzoraka
- δ_t^o - pomak koji odgovara početnom oštećenju (graničnoj posmičnoj čvrstoći) betonskih uzoraka
- δ_t^f - granični pomak zbog pukotina betonskih uzoraka
- t_t - čvrstoća pri početnom oštećenja (granična posmična čvrstoća) betonskih uzoraka
- G_t - energija sloma

- K_t - krutost betonskih uzoraka
- δ - posmični pomak betonskih uzoraka
- δ_t^o - pomak koji odgovara početnom oštećenju (graničnoj posmičnoj čvrstoći) betonskih uzoraka
- δ_t^f - granični pomak zbog pukotina betonskih uzoraka
- t_t - čvrstoća pri početnom oštećenju (granična posmična čvrstoća) betonskih uzoraka
- G_t - energija sloma
- σ_t^u - deformacija koja odgovara stabilnoj fazi vlačnoga odvajanja betonskih uzoraka
- t_t^m - čvrstoća pri početnom oštećenju (granična posmična čvrstoća) betonskih uzoraka
- t_t^f - čvrstoća tijekom stabilne faze vlačnoga odvajanja betonskih uzoraka

3.2. Posmični konstitucijski model na površini između ljepila za konstrukcije i betona

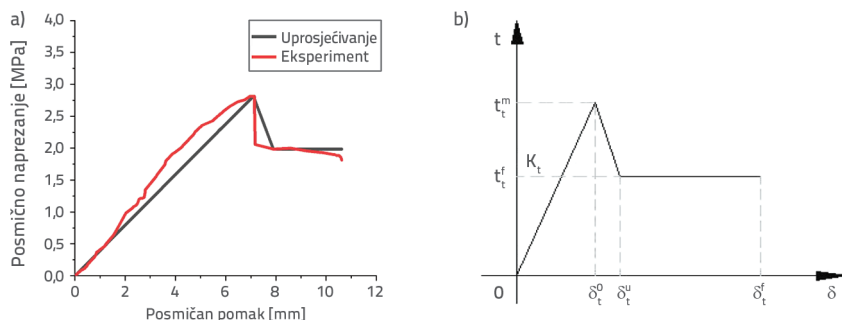
Posmični konstitucijski modeli na površini između epoksidnoga ljepila, karbonskoga ljepila za ploče i betona ispitani su izravnim posmikom. Kvadratni uzorci betona C40 pripremljeni s dvije polirane i očišćene bočne površine lijepljeni su ljepilom za konstrukcije s kontroliranom debljinom sloja ljepila od 0,8-1,2 mm. Nakon 168 h stvrdnjavanja, tijekom kojih je ljepilo postiglo svoju projektnu čvrstoću, uzorci su podvrgnuti ispitivanju na posmik kako bi se odredio odnos između popsmične sile i posmičnoga pomaka. Eksperimentalni rezultati su zatim primijenjeni za prilagođavanje konstitucijskih modela, pri čemu načelo prikladnosti osigurava konzistentnu energiju sloma. Konačni rezultati prikladnosti i matematički oblik prikazani su na slici 4. i u izrazu (2).

3.3. Oblikovanje uzorka za ispitivanje na posmik

U uzorcima za ispitivanje na posmik opisanim u kasnijem odjeljku šuplji je dio unutar ploče pojednostavljen, to jest, nije sadržavao nikakvu šupljinu. Shema oblikovanja uzoraka i stvarne fotografije uzoraka prikazane su na slici 5.

U ovom je radu izrađeno 30 skupova uzoraka: 10 skupova nelijepljenih uzoraka, 10 skupova uzoraka lijepljenih karbonskim ljepilom za ploče i 10 skupova uzoraka lijepljenih primjenom ljepila za čelik, s tri uzorka u svakom skupu. Za svaku vrstu

ravne linije, bočnih zubaca oblika V i bočnih zubaca oblika W, izračunana je aritmetička sredina 10 skupova rezultata ispitivanja. Eksperiment je započeo lijepljenjem betonskih uzoraka različitih oblika zubaca s karbonskim ljepilom za ploče ili ljepilom za čelik, njihovim postavljanjem na ispitnu opremu i kontrolom vertikalnoga opterećivanja pomoću računala. U početku je bočni pritisak povećan na 0,5 kN pri brzini od 200 N/s, a zatim na 10 MPa pri brzini od 100 N/s. Nakon što je vertikalno opterećivanje završeno, smjer je

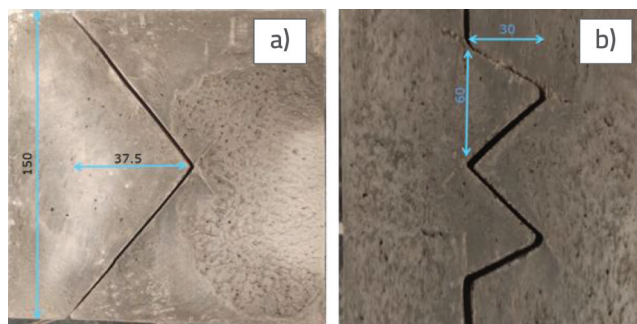


Slika 4. Konstitucijski model ljepila za konstrukcije: a) rezultati prikladnosti; b) konstitucijski model

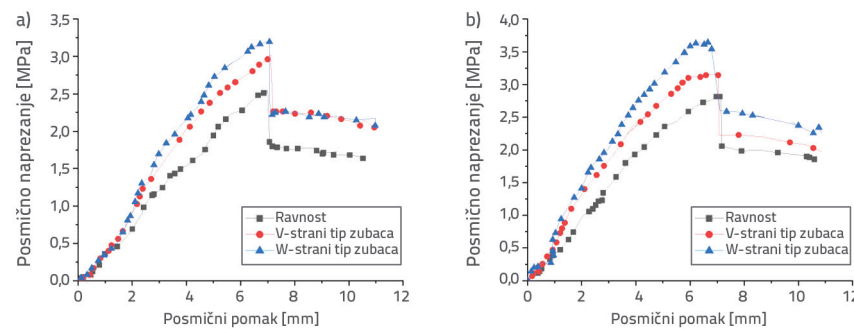
Tablica 3. Rezultati ispitivanja na posmik betonskih uzoraka s različitim oblicima zubaca uzduž spojne površine

Serijski broj	Oblik	Necementirajući [MPa]	Ugljični pločasti cement [MPa]	Ljepljiva veza za čelik [MPa]
1	Ravna linija	2,03	2,49	2,68
2	V-bočni zupci	2,26	2,89	3,07
3	W-bočni zupci	2,46	3,03	3,66

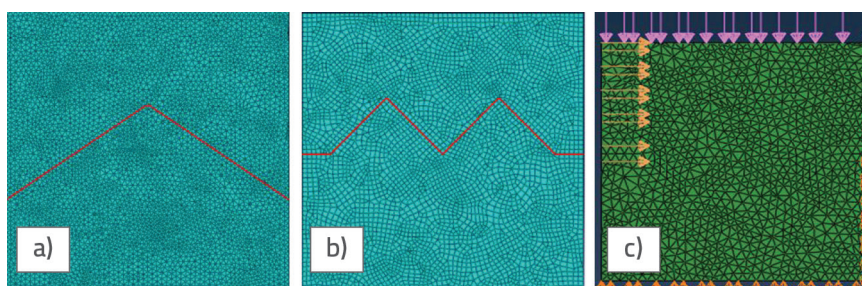
prebačen na horizontalni posmik. Horizontalno opterećivanje kontrolirano je pomakom, počevši s probnim opterećenjem od 0,1 mm. Nakon što je probno opterećivanje završeno, počelo je glavno opterećivanje brzinom od 1 mm/s sve dok uzorak nije popustio. Ako su tijekom ispitivanja otkrivene anomalije podataka, opterećivanje je odmah prekinuto, prije nastavka ispitivanja, dok se problem ne riješi. Konačni rezultati ispitivanja posmične čvrstoće za uzorke s različitim oblicima zubaca uz primjenu dva različita spojna materijala prikazani su u tablici 3.



Slika 5. Nacrt uzorka: a) bočni zupci oblika V; b) bočni zupci oblika W



Slika 6. Rezultati posmika uzoraka s različitim oblicima zubaca s karbonskim ljepljivom za ploče i ljepljivom za čelik: a) karbonsko ljepljivo za ploče; b) ljepljivo za čelik



Slika 7. Dijagrami modela i simulacije opterećenja: a) bočni zupci oblika V; b) bočni zupci oblika W; c) shema opterećenja

Uz isti oblik ispitnoga bloka, neovisno o tome je li oblik ispitnoga bloka bio ravan, s bočnim zupcima oblika V ili s bočnim zupcima oblika W, posmična je čvrstoća betonskoga ispitnog bloka ispunjenoga ljepljivom za čelik bila veća od posmične čvrstoće bloka ispunjenoga karbonskim ljepljivom za ploče. Pod istim uvjetima, oblik je ispitnoga bloka variran od ravne linije do bočnoga zupca oblika W, a posmična se čvrstoća ispitnoga bloka *sandwich* betona, karbonskoga ljepljiva za ploče i ljepljiva za čelik postupno povećavala. Nakon sveobuhvatnoga je razmatranja zaključeno da je posmična čvrstoća uzorka s bočnim zupcima oblika W s ljepljivom za čelik najveća, a učinak posmika najbolji. Slika 6. prikazuje odnos između posmičnih pomaka i posmičnih napreznja betona različitim oblicima s karbonskim ljepljivom za ploče i ljepljivom za čelik.

4. Analiza simulacije konačnim elementima uzorka s bočnim zupcima

Problem prijenosa vertikalne sile posmikom zapravo je problem ravninskoga napreznja, pa je razvijen model u ravni. U ovom je radu računalni program Abaqus primijenjen za razvoj modela uzorka bočnih zubaca oblika V i W s ljepljivom za čelik. U tim je modelima beton prikazan elementom za dvodimenzionalnu deformaciju u ravni (CPE3), međufazni međusloj bilo je ljepljivo za čelik, razmatran je dvodimenzionalni spojni element s četiri čvora (COH2D4), ali je to svojstvo modelirano kohezijskim elementom bez debljine. Razvijen je model simulacije i analize skaliranoga sklopa kako bi se olakšala usporedba, verifikacija i korekcija parametara s kasnijim skaliranim ispitivanjima na posmik.

Kao što je prikazano na slici 7., pri ispitivanju posmične čvrstoće primijenjen je slabi bočni pritisak (djelovanje zbijenoga sučelja). Model je bio u skladu s eksperimentalnim opterećenjem i rubnim uvjetima. Kontrolna veličina opterećenja od 45 kN (ljubičaste strelice na slici 7.c. primijenjena je na gornjem rubu modela kako bi se simulirao rubni pritisak. Na donjem je rubu modela spriječen pomak u smjeru y , na desnom

rubu u smjeru x , a horizontalno je opterećivanje primijenjeno na polovini visine lijevoga ruba kako bi se formirala posmična sila. Primjena horizontalne posmične sile kontrolirana je maksimalnim horizontalnim pomakom od 25 mm, a duljina koraka opterećivanja bila je 0,0001. Razvijeni model uzorka i shema simuliranoga opterećenja prikazani su na slici 7.

4.1. Rezultati simulacije konačnim elementima

Rezultati dobiveni simulacijom konačnim elementima prikazani su na slikama 8. i 9. Kao što je vidljivo na slikama 8.a., 8.b., 9.a. i 9.b, kada je ispitni blok bio izložen tlačnoj smičnoj sili, najveća deformacija se dogodila na krajevima cementiranja, odnosno na dijelovima zaokruženima na slikama. Međutim, zbog viskoznosti materijala za cementiranje, ispitni se blokovi nisu slomili ni po plohi zubaca oblika V ni po plohi zubaca oblika W. Betonski dijelovi označeni crvenim točkastim linijama vjerojatno su prvi koji će se slomiti pod posmičnom silom izazvanom pritiskom po rubu, a oblici sloma stvarnih ispitnih blokova bili su u skladu s rezultatima simulacija. Posmična čvrstoća ispitnoga bloka s bočnim zupcem oblika V povećala se za približno 35,8 % u usporedbi s posmičnom čvrstoćom običnih betonskih spojeva. Kod ispitnih blokova s bočnim zupcem oblika W posmična je čvrstoća bila 48,8 % veća od čvrstoće običnih betonskih spojeva, što to pokazuje da je posmična čvrstoća ispitnog bloka s bočnim zupcem oblika W bila viša od čvrstoće ispitnoga bloka s bočnim zupcem oblika V kada je punilo bilo ljepilo za čelik.

Rezultati numeričke simulacije prikazani su na slikama 8.c. i 9.c. Tablica 4. prikazuje usporedbu rezultata simulacije i eksperimentalnih rezultata. Kada je ispitni blok bio s bočnim zupcem oblika V, posmična je čvrstoća stvarnoga ispitnog bloka bila 3,07 MPa, dok je ona dobivena numeričkom simulacijom bila 3,08 MPa. Pogreška rezultata između ta dva bloka bila je samo 0,3 %. Kada je ispitni blok bio s bočnim zupcem oblika W, posmična je čvrstoća stvarnog ispitnog bloka bila je 3,72 MPa, dok je ona dobivena numeričkom simulacijom bila 3,78 MPa. Pogreška rezultata između ta dva bloka bila je samo 1,6 %, što pokazuje da su dva rezultata vrlo konzistentna jedan s drugim. Stoga je najveća posmična čvrstoća postignuta uporabom ljepila za čelik.

Tablica 4. Usporedba simuliranih i eksperimentalnih vrijednosti posmika

Serijski broj	Oblik	Rezultat eksperimenta [MPa]	Rezultat simulacije [MPa]	Pogreška [%]
1	V-bočni zupci	3,07	3,08	0,3
2	W-bočni zupci	3,66	3,78	1,6

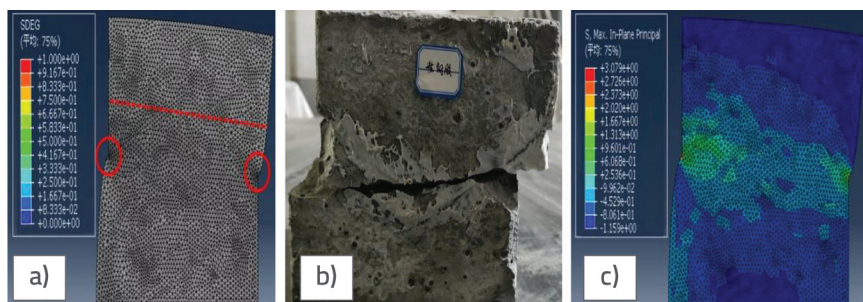
Prema sveobuhvatnom ispitivanju i rezultatima simulacije, posmična čvrstoća ispitnoga uzorka može se značajno poboljšati primjenom bočnoga zupca oblika W spojenoga ljeplimozupcgg za čelik. Stoga se može smatrati da novi zglobni spoj poboljšava otpornost na posmik gređa od šupljih ploča.

5. Zaključak

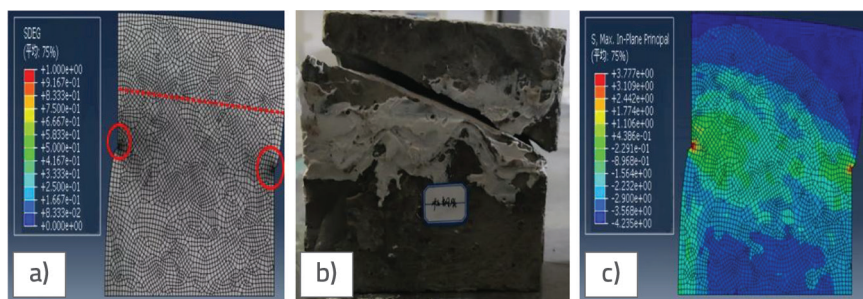
Kako bi se maksimizirala poprečna otpornost na posmik, predložen je cementirani sklop šuplje ploče s bočnim zupcima.

Uspoređena su svojstva čvrstoće i starenja četiri vrste materijala za cementiranje, a najbolji materijal za cementiranje prikladan za navedene konstrukcije je ljepilo za čelik.

Na temelju linearnoga eksperimenta predložen je konstitucijski model kohezijske sile i posmika ljepila za čelik i određeni su odgovarajući konstitucijski parametri. Na temelju eksperimenta bočno nazubljene konstrukcije pokazano je da spoj bočnim zupcima oblika W s ljeplimom za čelik može znatno poboljšati ukupnu posmičnu čvrstoću konstrukcije i učinkovito poboljšati ukupnu krutost šuplje ploče.



Slika 8. Usporedba rezultata ispitivanja i simulacije za bočne zupce oblika V s ljeplimom za čelik: a) pojava pukotina u simulaciji; b) pojava pukotina pri ispitivanju; c) posmično naprezanje



Slika 9. Usporedba rezultata ispitivanja i simulacije za bočne zupce oblika W s ljeplimom za čelik: a) pojava pukotina u simulaciji; b) pojava pukotina pri ispitivanju; c) posmično naprezanje

Odgovarajuća površina sloma također je poboljšana, pri čemu se pukotine nisu stvarale samo uzduž površine spoja. Pukotine su se pojavile i u šupljoj ploči, što je donekle poboljšalo stvaranje pukotina pri smicanju spoja.

Razvijen je model kohezijske sile konačnim elementima. Rezultati simulacije bili su u skladu s eksperimentalnim rezultatima, pokazujući da je oblikovanje moglo točno postići maksimalnu poprečnu otpornost na posmik te da su razvoj

naprezanja i načini sloma bili pogodni za poboljšanje otpornosti na posmik.

Zahvala

Ovo je istraživanje financijski podržala Nacionalna zaklada za prirodne znanosti Kine (potpora br. 52178285). Autori se zahvaljuju na podršci.

LITERATURA

- [1] Aimin, Y., Ji, B., Di, H.: Countermeasure for the typical damage of prestressed concrete hollow slab girder, GeoHunan International Conference, Hunan, China.
- [2] Naito, C., Jones, L., Hodgson, I.: Development of flexural strength rating procedures for adjacent prestressed concrete box girder bridges, *Journal of Bridge Engineering*, (2011), pp. 662-670. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000186](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000186)
- [3] Gang, W.: Strength analysis of shear joints in articulated plate beam bridges, *Journal of Shanghai Institute of Railway Technology*, 15 (1994) 3, pp. 20-25.
- [4] Vellaichamy, P., Veerasamy, S., Mangottiri, V.: Shear Bond Characteristics of Steel Concrete Composite Deck Slab, *GRAĐEVINAR*, 74 (2022) 5, pp. 393-401, <https://doi.org/10.14256/JCE.3273.2021>
- [5] Gu, W.: Research on hinge joint damage evolution rule and evaluation Technology of Concrete Hollow Slab Girder Bridge, Yangzhou University, Yangzhou, China, 2020.
- [6] Di, J., Sun, Y., Yu, K., et al.: Experimental Investigation of Shear Performance of Existing PC Hollow Slab, *Engineering Structures*, (2020), pp. 211. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110451>
- [7] Wang, J., Zhang, G., Liu, J., et al.: Research on destructive test of pretensioned prestressed concrete hollow slab in service, *International Journal of Structural Integrity*, (2018), pp. 211. <https://doi.org/10.1108/IJSI-07-2017-0043>
- [8] Gang, W.: Mechanism analysis on typical diseases of prestressed concrete hollow core slab bridges, Zhejiang University, Zhejiang, China, 2016.
- [9] Zhou, X.D.: Study on the Application of Shotcrete in Reinforcing Slab Bridges, Chang'an University, Shanxi, China, 2005.
- [10] Demir, A., Ince, Y., Altioik, T.Y.: Experimental and Numerical Investigation of RC Beams Strengthened with CFRP Composites, *GRAĐEVINAR*, 73 (2021) 6, pp. 605-616, <https://doi.org/10.14256/JCE.3051.2020>
- [11] Menglin, D., Zhouhong, Z., Yuchen, L., et al.: Shear Bearing Performance of Prestressed Concrete Hollow Slab Beams in Service, *Journal of Southeast University*, 51 (2021) 3, pp. 384-390.
- [12] Semendary, A.A.: Early age behaviour of an adjacent prestressed concrete box-beam bridge containing UHPC shear keys with transverse dowels, *Journal of Bridge Engineering*, (2017). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0001034](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001034)
- [13] Zhong, X.Q.: Theoretical and experimental research on hollow slab beam bridge reinforced by steel plate and fibre-modified Polymer Concrete, Harbin Institute of Technology, Heilongjiang, China, 2019.
- [14] Natarajan, S., Murugesan, A., Dhanapal, J., Narayanan, A.: Glass fibre reinforced ultra-high strength concrete with silica fume, *GRAĐEVINAR*, 74 (2022) 10, pp. 849-856, <https://doi.org/10.14256/JCE.3431.2021>
- [15] Tao, Z.: Experimental study on shear resistance of bond surface of new and old concrete under the Influence of Many Factors, Hunan Agricultural University, Hunan, China, 2019.
- [16] Hui, J.: Test and Calculation Method of Anchor Steel-Concrete Reinforcement Technology for Strengthening Prefabricated Hollow Slab Bridge, Chang'an University, Shanxi, China, 2021.
- [17] Zhi, Z.: Hollow plate hinge seam failure mechanism and prevention measure research, *Shanxi Architecture*, 35 (2009) 2, pp. 318-320.
- [18] Xiaowan, Z.: Precast hollow-cored slab bridge transverse joint Design and Improvement Methods, Jilin University, Jilin, China, 2017.
- [19] Ünal, A., Kamanlı, M., Solak, A., Cengiz, S.: Numerical investigation of the effect of support conditions on beam shear behaviour in full scale reinforced concrete beams, *GRAĐEVINAR*, 75 (2023) 12, pp. 1193-1201, <https://doi.org/10.14256/JCE.3823.2023>
- [20] Jian-Shu, Y., Jiu-Sheng, L., Bo, Y., et al.: Experiment on Shear Property of Hinge Joints of Concrete Hollow Slab, *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 30 (2013) 6, pp. 33-39.
- [21] Shuang, F.: Study on transverse structure Optimization of Prestressed Concrete Hollow Slab Beams, Harbin Institute of Technology, Heilongjiang, 2020.
- [22] Juan-Xiu, Z., Jun, L., Jian-Shu, Y., et al.: Study on Surface Roughness Treatment of Hollow Panel Side, *Journal of China & Foreign Highway*, 33 (2013) 6, pp. 136-139, <https://doi.org/10.14048/j.issn.1671-2579.2013.06.031>