

Primljen / Received: 17.7.2023.

Ispravljen / Corrected: 14.11.2023.

Prihvaćen / Accepted: 9.12.2023.

Dostupno online / Available online: 10.1.2024.

Numeričko ispitivanje učinka uvjeta oslanjanja na posmično ponašanje grede u armiranobetonskim gredama realnih veličina

Autori:



Izv.prof.dr.sc. **Alptuğ Ünal**, dipl.ing.građ.
Tehničko sveučilište Konya, Turska
Tehnički i prirodoslovni fakultet
Odjel za građevinarstvo
aunal@ktun.edu.tr



Prof.dr.sc. **Mehmet Kamanlı**, dipl.ing.građ.
Tehničko sveučilište Konya, Turska
Tehnički i prirodoslovni fakultet
Odjel za građevinarstvo
mkamanli@ktun.edu.tr



Abdulkadir Solak, dipl.ing.građ.
Tehničko sveučilište Konya, Turska
Tehnički i prirodoslovni fakultet
Odjel za građevinarstvo
abdulkadirsolak@ktun.edu.tr
Autor za korespondenciju



Salih Cengiz, dipl.ing.građ.
Tehničko sveučilište Konya, Turska
Strukovna škola tehničkih znanosti
Odjel za građevinarstvo
scengiz@ktun.edu.tr

Prethodno priopćenje

Alptuğ Ünal, Mehmet Kamanlı, Abdulkadir Solak, Salih Cengiz

Numeričko ispitivanje učinka uvjeta oslanjanja na posmično ponašanje grede u armiranobetonskim gredama realnih veličina

U istraživanjima o gredama u literaturi, gredni su elementi projektirani i ispitani kao jednostavno oslonjeni. Stoga je u ovom radu ponašanje armiranobetonskih (AB) greda u uvjetima upetog oslanjanja numerički ispitano pomoću računalnog programa ANSYS. Varijable primijenjene u istraživanju su omjer posmičnog raspona i statičke visine (a/d) te razmak spona analiziranih uzoraka. U ovom je radu analizirano 16 AB greda u mjerilu 1/1 tijekom ispitivanja savijanjem u četiri točke. Omjeri a/d uzeti su kao 1,0, 2,0 i 3,0 u odabranim elementima ispitivanja. Osim toga, kao druga varijabla, količina poprečne armature dimenzionirana je i analizirana kao $\phi 8/75$, $\phi 8/150$ i $\phi 8/300$ mm razmaka i bez spona. Na temelju numeričkih rezultata prikazani su grafovi odnosa opterećenja i pomaka te krutosti. Numerički rezultati interpretirani su i uspoređeni na temelju grafova prikazanih za svaku analizu, raspodjelu naprezanja i pojavu oštećenja u istraživanju. Rezultati su pokazali da su omjer a/d i broj spona snažno utjecali na ponašanje upeto oslonjenih greda. Rezultati analize greda dobiveni pomoću računalnog programa ANSYS bili su u skladu s eksperimentalnim rezultatima.

Ključne riječi:

upeto oslanjanje, omjer a/d , armiranobetonska greda, eksperimentalno ispitivanje, količina spona, posmično ponašanje grede

Research Paper

Alptuğ Ünal, Mehmet Kamanlı, Abdulkadir Solak, Salih Cengiz

Numerical investigation of the effect of support conditions on beam shear behaviour in full scale reinforced concrete beams

In studies on beams in the literature, the beam elements are designed and tested as simply supported. Therefore, in this study, the behaviour of reinforced concrete (RC) beams under fixed support conditions was numerically investigated using ANSYS finite element software. The variables used in the study are the shear span/effective depth ratio (a/d) and stirrup spacing of the analysed specimens. In this study, 16 RC beams on a 1/1 scale were analysed in 4-point bending protocol. The a/d ratios were assumed to be 1.0, 2.0, and 3.0, in the test members produced. In addition, as another variable, the lateral reinforcement amount was designed and analysed at $\phi 8/75$, $\phi 8/150$ and $\phi 8/300$ mm spacings without stirrups. Load-displacement and stiffness graphs are drawn based on the numerical results. The numerical results were interpreted and compared based on the graphs drawn for each analysis, stress distribution, and damage occurrence in the experiments. The results indicated that the a/d ratio and number of stirrups had strong effects on the behaviour of the fixed supported beams. The results of the beam analyses obtained using ANSYS finite element software were consistent with the experimental results.

Key words:

fixed support, a/d ratio, reinforced concrete beam, experimental study, stirrup ratio, beam shear behaviour

1. Uvod

Armiranobetonske (AB) konstrukcije često se primjenjuju u građevinskim sustavima diljem svijeta, što ih čini jednim od najvažnijih konstrukcijskih elemenata zgrada. AB grede konstrukcijski su elementi koji prenose opterećenje sa sustava zgrade na stupove. Ponašanje greda pod unutarnjim i vanjskim silama vrlo je važno za sigurnost konstrukcije. Stoga je potrebno utvrditi ponašanje AB greda pri različitim opterećenjima. Budući da se AB građevinski sustavi često primjenjuju, različita eksperimentalna i analitička istraživanja provedena su na razini elemenata [1-14]. Cilj je tih istraživanja bio utvrditi ponašanje AB greda koje se primjenjuju u AB konstrukcijama.

U nekoliko ispitivanja gredni su elementi projektirani i analizirani kao jednostavno oslonjeni [16-22]. Međutim, budući da su grede u AB zgradama povezane sa stupovima, ležajevi greda ne funkcioniraju niti kao potpuno upeti ležajevi niti kao potpuno zglobovi ležajevi. Međutim, ležajevi greda u AB zgradama smatraju se sličnijima uvjetu upetog oslanjanja [15, 23]. Ispitivanje AB grede provedeno je na sustavu okvira s gredama ugrađenima u stupove, bez izrade jednostavno oslonjenog elementa za ispitivanje. Glavna je svrha ovog rada smanjiti nedostatak istraživanja u literaturi što je posljedica ograničenog broja istraživanja u kojima su ispitane AB grede u uvjetima upetog oslanjanja.

U ovom su radu ispitane razlike između ponašanja AB greda u uvjetima jednostavnog i upetog oslanjanja. Većina prijašnjih eksperimentalnih i analitičkih istraživanja provedena je u mjerilu 1:2 ili 1:3, a prednjače uzorci malog mjerila jer su isplativi i zato što ispitna oprema nije dovoljno kruta za uzorke realnih veličina. Međutim, nije poznato u kojoj je mjeri ponašanje greda primijenjenih u AB zgradama kompatibilno s gredama malih dimenzija. Osim toga, nije poznato može li se stvarno ponašanje greda prikazati u slučaju smanjenih greda. Stoga je u budućim ispitivanjima potrebno utvrditi ponašanje AB greda u mjerilu 1:1.

Razmak spona vrlo je važan u smislu posmične nosivosti AB greda. Provedena su mnoga istraživanja o utjecaju razmaka spona na ponašanje AB greda [1, 17, 19, 21]. U tim istraživanjima ispitan je utjecaj spona na ponašanje AB greda te su dobiveni važni rezultati. Međutim, nalazi tih ispitivanja odnosili su se na AB grede ispitane pod uvjetima jednostavnog oslanjanja. Stoga bi trebalo istražiti učinak spona na ponašanje AB greda ispitanih u uvjetima upetog oslanjanja.

Jedno od najvažnijih svojstava AB greda u smislu posmičnog ponašanja jest omjer posmičnog raspona i statičke visine (a/d). Eksperimentalna istraživanja pokazala su da omjer a/d veći od 2,5 upućuje na sklonost savijanja grede, a omjer a/d manji od 2,5 na sklonost posmičnog ponašanja grede [20]. Provedena su mnoga istraživanja kako bi se ispitaio učinak omjera a/d na posmično ponašanje grede [1, 2, 4, 5, 12, 17, 18, 23-28]. U tim je istraživanjima učinak omjera

a/d na posmično ponašanje ispitan uzimajući u obzir visinu ili duljinu grede kao varijable. U ovom su istraživanju primijenjene iste dimenzije greda za sve elemente ispitivanja, a promjena u omjeru a/d postignuta je promjenom položaja točaka opterećenja.

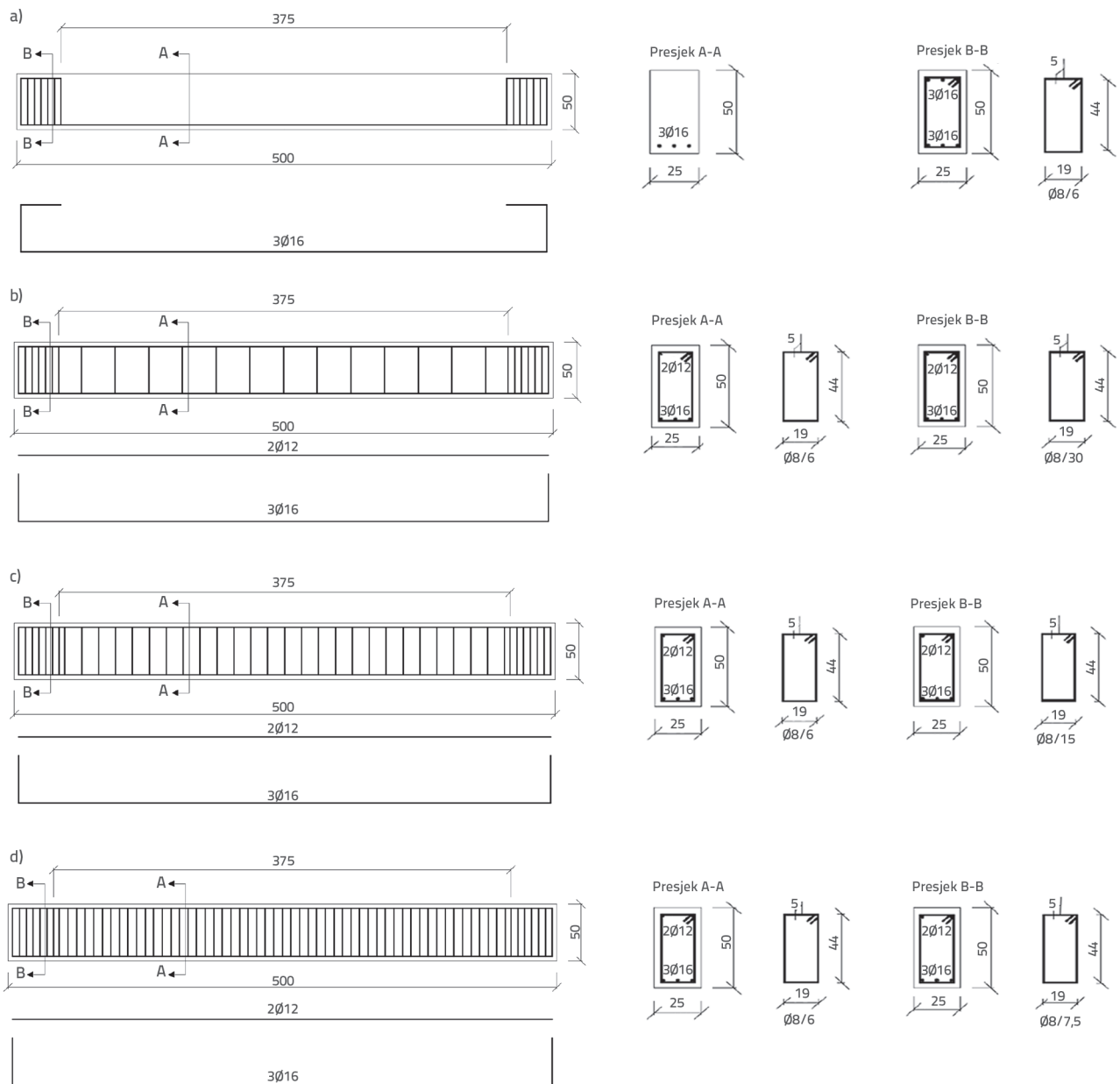
Uzimajući u obzir ta razmatranja, provedeno je numeričko istraživanje kako bi se odredilo posmično ponašanje AB greda u uvjetima upetog oslanjanja. U ovom je istraživanju 16 uzoraka AB greda realnih veličina ispitano pod monotonim opterećenjem. Uzorci projektirani unutar opsega numeričkog ispitivanja analizirani su primjenom računalnog programa ANSYS Workbench 19.2 u postavci savijanja u 4 točke. Kao parametri su u ovom istraživanju primijenjeni koeficijent armiranja sponama i omjer posmičnog raspona i statičke visine (a/d) za AB grede u uvjetima upetog oslanjanja. Nacrane su krivulje opterećenja i pomaka, grafovi krutosti i grafovi potrošnje energije greda, a rezultati su uspoređeni. Rezultati pokazuju da omjer a/d i razmak spona AB greda u uvjetima upetog oslanjanja uzrokuju značajne promjene u posmičnom ponašanju grede.

2. Materijali i metode

U ovom je radu projektirano i analizirano 16 uzoraka greda realnih veličina pomoću računalnog programa ANSYS Workbench 19.2 u postavci opterećenja u 4 točke. Uvjeti oslanjanja i opterećenja u modelu analize primijenjenom u numeričkom istraživanju dobiveni su iz eksperimentalnog rasporeda koji su primijenili autori na Tehničkom sveučilištu Konya, Odjel za građevinarstvo, Laboratorij za istraživanje potresa [29-31].

2.1. Ispitni uzorci

Uzorci su dimenzionirani s identičnim dimenzijama i svojstvima. Razlikovni čimbenici između uzoraka bili su koeficijent armiranja sponama i uvjeti oslanjanja. U prvom, petom i devetom uzorku (SRCB-1, FRCB-1, FRCB-5, FRCB-9) nisu korištene su spona. Međutim, u drugom, šestom i desetom uzorku (SRCB-2, FRCB-2, FRCB-6 i FRCB-10) korištene su spona na razmaku od 300 mm, u trećem, sedmom i jedanaestom uzorku (SRCB-3, FRCB-3, FRCB-7 i FRCB-11) korištene su spona na razmaku od 150 mm, a u četvrtom, osmom i dvanaestom uzorku (SRCB-4, FRCB-4, FRCB-8 i FRCB-12) korištene su spona na razmaku od 75 mm. Uzorci su projektirani u realnoj veličini. Duljina svih elemenata je 5000 mm. Razmak između oslonaca grede je 3750 mm. Presjek grede projektiran je u veličini 250x500 mm. Za uzdužnu armaturu je korišteno $3\phi 16$. Za SRCB-1, FRCB-1, FRCB-5 i FRCB-9 nije korištena druga armature. Za SRCB-2, SRCB-3, SRCB-4, FRCB-2, FRCB-3, FRCB-4, FRCB-6, FRCB-7, FRCB-8, FRCB-10, FRCB-11, FRCB-12 su osim uzdužne armature $3\phi 16$ korištene i $2\phi 12$ kao konstrukcijska armatura. Veličine i svojstva armature uzoraka prikazane su na slici 1., a njihova opća svojstva navedena su u tablici 1.



Slika 1. Svojstva uzoraka: a) SRCB-1, FRCB-1, FRCB-5 i FRCB-9; b) SRCB-2, FRCB-2, FRCB-6 i FRCB-10; c) SRCB-3, FRCB-3, FRCB-7 i FRCB-11; d) SRCB-4, FRCB-4, FRCB-8 i FRCB-12 (mjere u cm)

Kapaciteti pomaka uzoraka dobiveni su iz eksperimentalnih podataka. Protokol opterećenja oblikovan je na temelju kapaciteta pomaka uzoraka (slika 7.). Metoda opterećenja u obliku kontroliranog pomaka primijenjena je na uzorke tijekom analize i određene su vrijednosti opterećenja koje odgovaraju svakoj vrijednosti pomaka. Na temelju dobivenih podataka iscrtani su grafovi odnosa pomaka u sredini grede i opterećenja.

2.2. Materijali

Budući da su uzorci oblikovani u realnoj veličini, njihova svojstva materijala smatrana su odgovarajućima. Stoga su razred betona

C30 i razred armature S420 odabrani da budu iste veličine kao i uzorci. Svojstva materijala primijenjenih u uzorcima navedena su u tablicama 2. i 3.

Za modeliranje betona upotrijebljen je element SOLID65. Taj element ima osam čvorova s tri stupnja slobode u svakom čvoru: translacija čvora u smjerovima x, y i z. Može biti podvrgnut plastičnim deformacijama tijekom primjena u betonu, vlačno puknuti u tri okomita smjera i može biti zdrobljen pod pritiskom (slika 2.).

Izraz (1), koji je predložio Hognestad, primijenjen je za određivanje multilinearne izotropne krivulje naprežanja i deformacije za beton [32]. Vlačna čvrstoća betona određena je testom savijanja u četiri

Tablica 1. Opća svojstva uzoraka

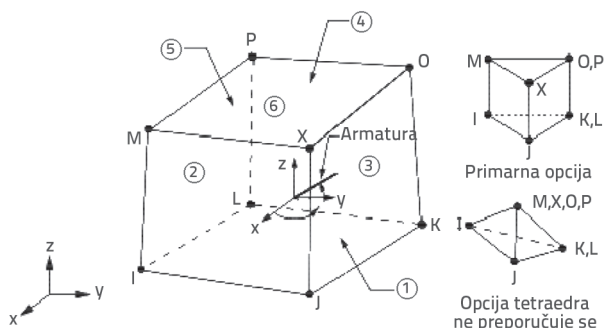
Naziv uzorka	Omjer a/d	Uvjet oslanjanja	Uzdužna armatura	Konstruktivska armatura	Spone
FRCB-1	3	Upeti	3Ø16	-	-
FRCB-2	3	Upeti	3Ø16	2Ø12	Ø8/30
FRCB-3	3	Upeti	3Ø16	2Ø12	Ø8/15
FRCB-4	3	Upeti	3Ø16	2Ø12	Ø8/7,5
FRCB-5	2	Upeti	3Ø16	-	-
FRCB-6	2	Upeti	3Ø16	2Ø12	Ø8/30
FRCB-7	2	Upeti	3Ø16	2Ø12	Ø8/15
FRCB-8	2	Upeti	3Ø16	2Ø12	Ø8/7,5
FRCB-9	1	Upeti	3Ø16	-	-
FRCB-10	1	Upeti	3Ø16	2Ø12	Ø8/30
FRCB-11	1	Upeti	3Ø16	2Ø12	Ø8/15
FRCB-12	1	Upeti	3Ø16	2Ø12	Ø8/7,5
SRCB-1	3	Jednostavni	3Ø16	-	-
SRCB-2	3	Jednostavni	3Ø16	2Ø12	Ø8/30
SRCB-3	3	Jednostavni	3Ø16	2Ø12	Ø8/15
SRCB-4	3	Jednostavni	3Ø16	2Ø12	Ø8/7,5

Tablica 2. Multilinearne izotropne vrijednosti naprezanja i deformacije betona

Tlačna čvrstoća	Deformacija (ε)					
	0,0005	0,001	0,0015	0,002	0,0025	0,003
29,44 MPa	11,10	19,04	23,80	25,39	23,8	19,04

točke kako bi odgovarala uvjetima opterećenja primijenjenim u eksperimentalnim i numeričkim istraživanjima.

$$\sigma_c = f_c \left[\frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} \right)^2 \right] \tag{1}$$

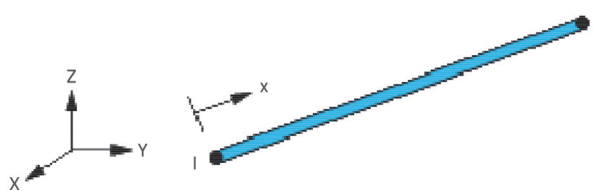


Slika 2. Geometrija SOLID65 (ANSYS korisnički priručnik, 2018)

Vrijednosti naprezanja i deformacije određenih prema Hognestadovom modelu za beton navedene su u tablici 2. Modul elastičnosti izračunan je primjenom početnog nagiba grafa dobivenog iz ovih vrijednosti. Poissonov omjer uzet je kao 0,2 za oba betonska

uzorka. Modul elastičnosti betona iznosio je 22216,25 MPa, a vlačna čvrstoća 2,54 MPa.

Štapni element s dva čvora i linearnog pomaka LINK180 usvojen je za uzdužnu i konstruktivsku armaturu grede kao i za spone. Element predstavlja jednoosni vlačno-tlačni element s tri stupnja slobode u svakom čvoru: translacija čvora u smjerovima x, y i z (slika 3).



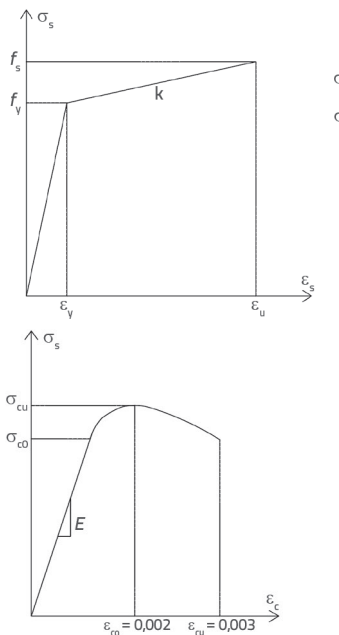
Slika 3. Geometrija LINK180 (ANSYS korisnički priručnik, 2018.)

Grede su dimenzionirane prema normama Eurokodu 2 i ACI-u 318. Budući da su dimenzije grede modelirane u mjerilu 1/1 primijenjenom u eksperimentalnom istraživanju, armatura je smanjena u istom omjeru. Stoga su za grede upotrijebljene uzdužne armature promjera 8 mm i spone promjera 6 mm. Za model pukotina u betonu primijenjen je "William-Warnkeov konstitutivni model za troosno ponašanje

Tablica 3. Svojstva čelika

Srednja vrijednost granice popuštanja [MPa]	Srednja vrijednost vlačne čvrstoće [MPa]	Mjesto upotrebe
Ø8	378,72	Spona
Ø12	386,97	Konstruktivska
Ø16	409,25	Uzdužna

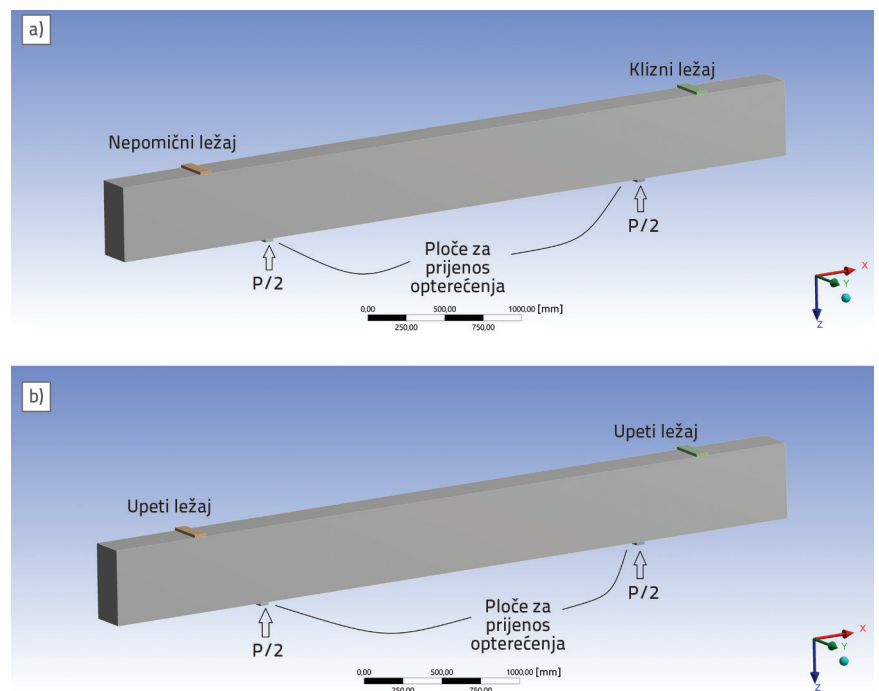
betona” [33]. Koeficijent prijenosa posmika uzet je kao 0,3 za otvorenu pukotinu te 1,0 za zatvorenu pukotinu. Ti su koeficijenti primijenjeni za smanjenje stope pogreške pri dobivanju odnosa opterećenja i pomaka izvedenog metodom konačnih elemenata. Pretpostavlja se da je mehaničko ponašanje armature elastično bilinearno pod monotonim naprezanjem.



Slika 4. Konstitutivni modeli: a) armature; b) betona u tlaku



Slika 5. Izgled uzoraka prije ispitivanja



Slika 6. Uvjeti analize: a) jednostavno oslonjeni; b) upeti

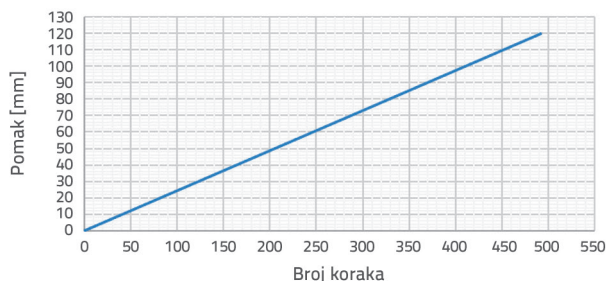
Armatura je u početku pokazivala karakteristike linearnog elastičnog dijela, nakon čega je uslijedila točka popuštanja, očvršćivanje plastičnom deformacijom i lom. Glavni ulazni podaci za čelični model bili su modul elastičnosti, tangenti modul i granica popuštanja. Tangenti modul (k) u analizi je postavljen na 20 MPa. Konstitutivni modeli za čelik i beton u tlaku prikazani su na slici 4.

Šesnaest uzoraka analizirano je pod monotonim opterećenjem pomoću ANSYS Workbench 19.2. Uvjeti oslanjanja i opterećenja

u modelu analize primijenjenom u numeričkom istraživanju dobiveni su iz eksperimenta koji su proveli autori na Tehničkom sveučilištu Konya, Odjel za građevinarstvo, Laboratorij za istraživanje potresa (slika 5.). U ovom modelu su ležajevi i ploče za prenošenje opterećenja dimenzionirani tako da budu kruti (slika 6.).

Kapaciteti pomaka uzoraka dobiveni su iz eksperimentalnih podataka. Protokol opterećenja oblikovan je na temelju kapaciteta pomaka uzoraka (slika 7.). Metoda opterećenja u

obliku kontrole pomaka primijenjena je na uzorke tijekom analize i određene su vrijednosti opterećenja koje odgovaraju svakoj vrijednosti pomaka. Na temelju dobivenih podataka iscrtani su grafovi pomaka u sredini grede i opterećenja.



Slika 7. Protokol opterećenja

Šesnaest elemenata ispitivanja projektiranih u ovom radu testirano je pod monotonim opterećenjem. Isti način opterećenja primijenjen je na sve elemente ispitivanja. Analize su provedene primjenom kontrole pomaka. Opterećenje se nastavilo sve dok nije došlo do značajnih oštećenja na elementima ispitivanja. Pukotine i oštećenja koja su nastala na elementima ispitivanja tijekom eksperimenta su zabilježeni. Grafovi pomaka sredine nosača ucrtani su prema podacima dobivenim s potencijometrijskih ravnala i senzora za mjerenje sile. Osim grafičkih usporedbi, uspoređeni su i obrasci ponašanja elemenata ispitivanja. U tu svrhu usporedno su analizirani oblici sloma i raspodjela pukotina u eksperimentima. Podaci dobiveni analizom su obrađeni, iscrtani su grafovi, a analitički rezultati su interpretirani.

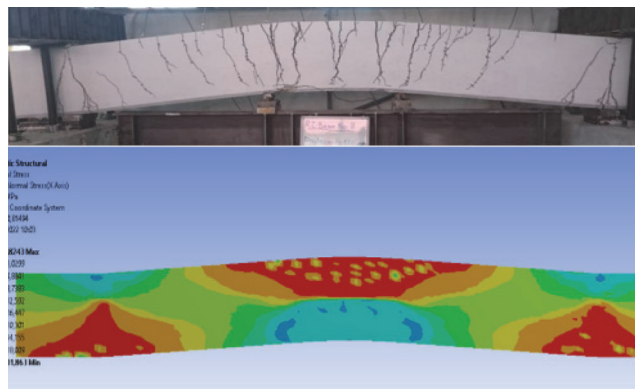
3. Rezultati

3.1. Utjecaj omjera a/d na ponašanje grede s upetim oslanjanjem

Uzorci su uspoređeni kako bi se ispitalo učinak omjera a/d na ponašanje elemenata ispitivanja. U tu svrhu usporedno su analizirani uzorci istih svojstava, ali različitih omjera a/d. Uzorci s niskim omjerima a/d imali su veću nosivost od onih s visokim omjerima a/d. Svi su uzorci u elementima ispitivanja bez spona oštećeni zbog posmičnog otkazivanja. Jedan od tih uzoraka, FRCB-1 i FRCB-9, najprije je dosegao točku popuštanja, a zatim otkazao zbog posmičnog sloma. Međutim, FRCB-5 je otkazao zbog posmičnog sloma prije dosezanja točke popuštanja. Svi uzorci sa sponama dosegli su točku popuštanja. Među zavarenim uzorcima, svi elementi ispitivanja s omjerom a/d od 3 pokazali su savijanje. Osim uzorka FRCB-5, svi uzorci s omjerom a/d od 2 pokazali su savijanje.

Razmak spona imao je značajan utjecaj na ponašanje ispitanih elemenata. Ispitani elementi sa sponama pokazali su duktilnije ponašanje od onih bez spona. Kako se razmak

spona smanjivao, naprezanja su se raspoređivala u elementu. Raspodjela naprezanja dobivena analitičkom analizom uspoređena je s onom dobivenom eksperimentalnim ispitivanjem, slika 8. S većom raspodjelom naprezanja povećala se i potrošnja energije. Naprezanja u uzorcima bila su koncentrirana između točaka opterećenja i nosivih područja. Stoga su uzorci s malim razmakom spona osjetljiviji na posmično ponašanje.



Slika 8. Eksperimentalno ispitivanje i numeričke simulacije

Tablica 4. Usporedba nosivosti elemenata ispitivanja

Element ispitivanja	U usporedbi sa	Nosivost
FRCB-9	FRCB-1	100,5 % veća
FRCB-9	FRCB-5	106,3 % veća
FRCB-10	FRCB-6	47,1 % veća
FRCB-10	FRCB-2	118,7 % veća
FRCB-6	FRCB-2	48,7 % veća
FRCB-11	FRCB-7	50,1 % veća
FRCB-11	FRCB-3	129,1 % veća
FRCB-7	FRCB-3	53,2 % veća
FRCB-12	FRCB-8	50,0 % veća
FRCB-12	FRCB-4	120,3 % veća
FRCB-8	FRCB-4	46,9 % veća

Uspoređeni su elementi ispitivanja s istim geometrijskim svojstvima i rasporedom armature, ali različitim točkama opterećenja (tablica 4.).

Nacrane su i uspoređene krivulje opterećenja i pomaka elemenata ispitivanja.

Grafovi opterećenja i pomaka iscrtani na temelju rezultata eksperimentalnih i analitičkih ispitivanja prikazani su na slici 9., poglavlje 3.2. Kompatibilni rezultati dobiveni su kada su grafovi dobiveni numeričkom analizom uspoređeni s eksperimentalnim rezultatima.

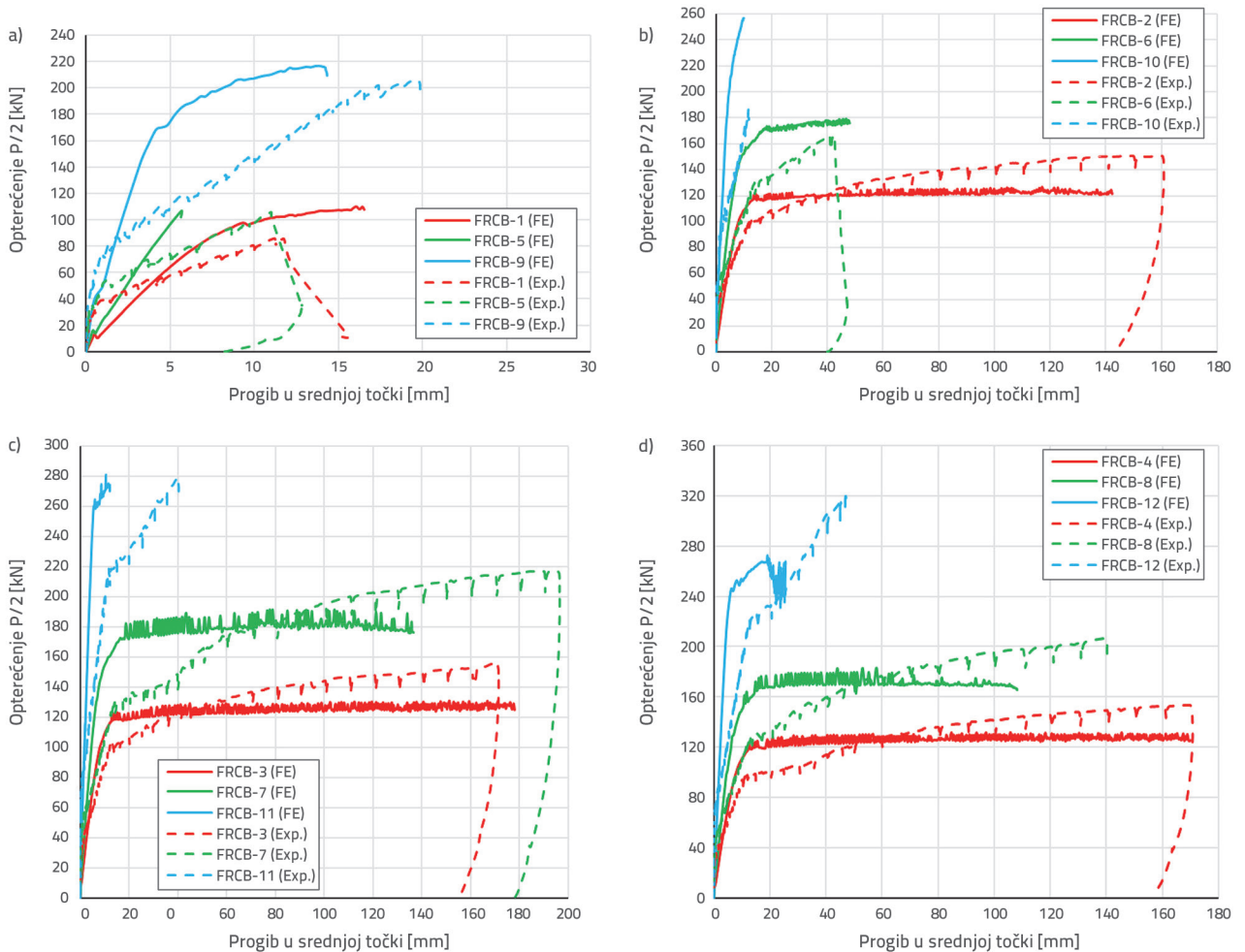
Početna krutost uzoraka s omjerima a/d od 1 bila je veća nego kod uzoraka s omjerima a/d od 2 i 3.

3.2. Utjecaj uvjeta oslanjanja na ponašanje AB greda

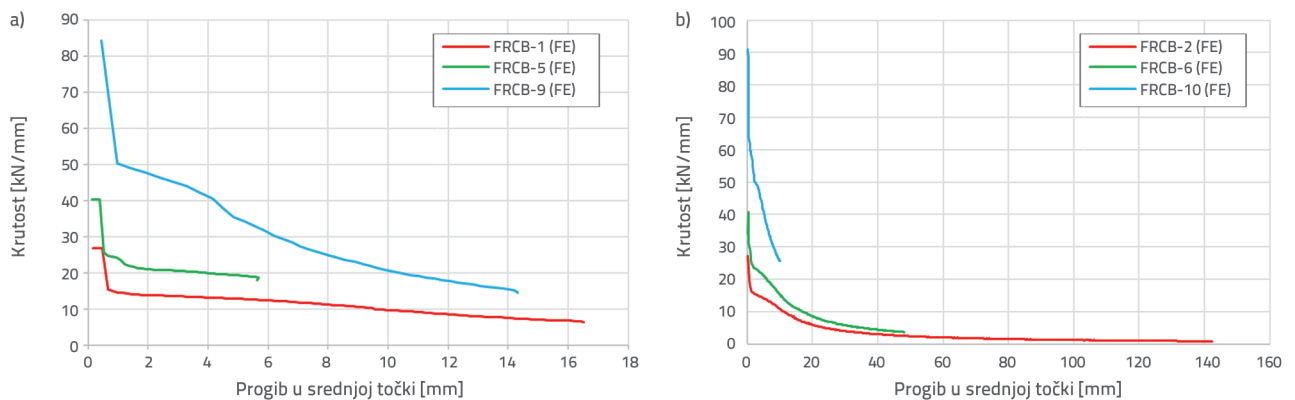
Tijekom analize ispitivana je raspodjela naprezanja uzoraka. Grafovi progiba u sredini nosača i opterećenja ucrtani su prema vrijednostima opterećenja koje odgovaraju svakom pomaku.

Slike 9. do 12. prikazuju usporedbu uzoraka s istim svojstvima, ali različitim uvjetima oslanjanja.

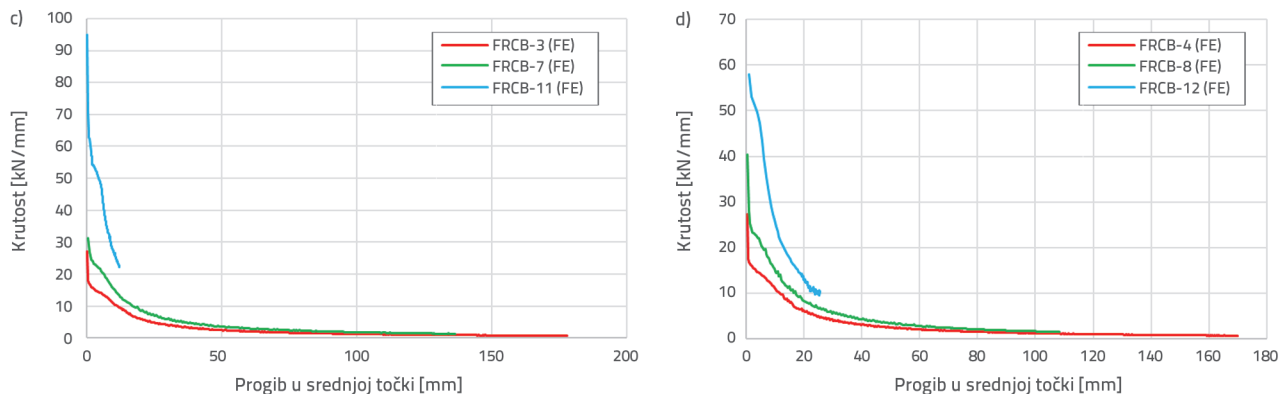
Nosivost elemenata ispitivana u uvjetima upetog oslanjanja bila je veća nego u uvjetima jednostavnog oslanjanja. Iako je FRCB-1 pokazao posmično ponašanje prije nego što je dosegao točku



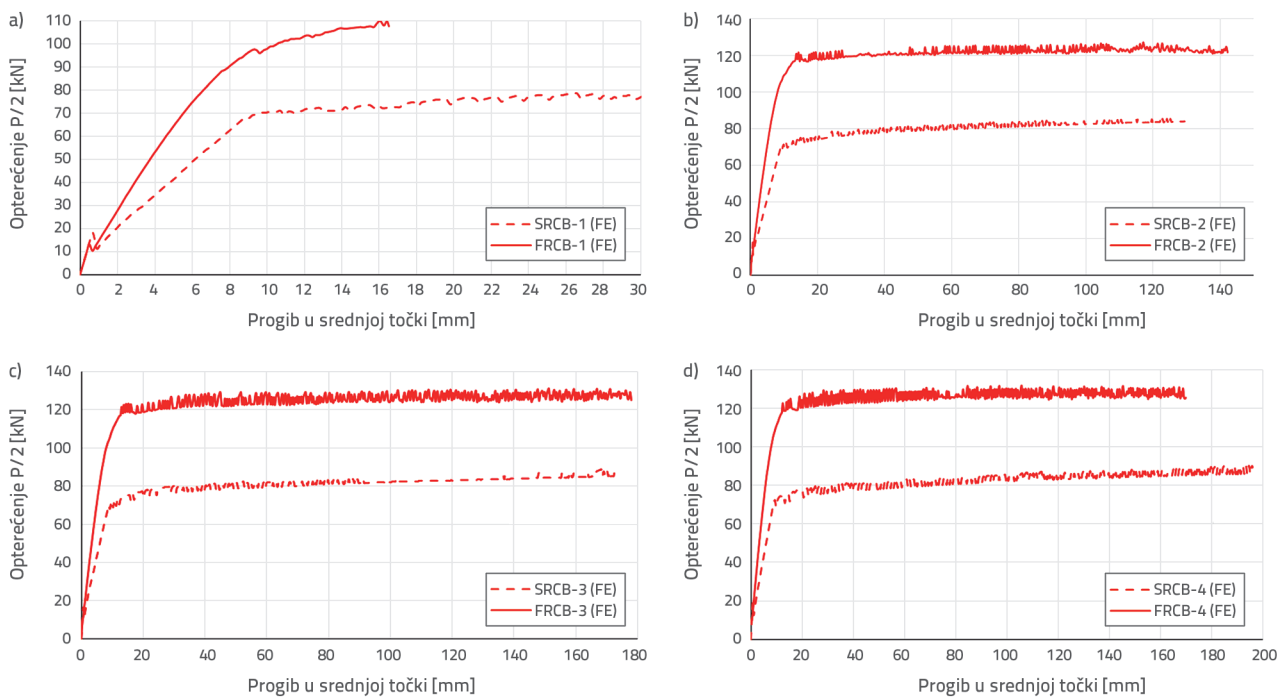
Slika 9. Krivulje progiba sredine nosača i opterećenja: a) bez spona; b) spona Ø8/30; c) spona Ø8/15; d) spona Ø8/7,5 [30]



Slika 10. Krivulje krutosti i pomaka: a) bez spona; b) spona Ø8/30

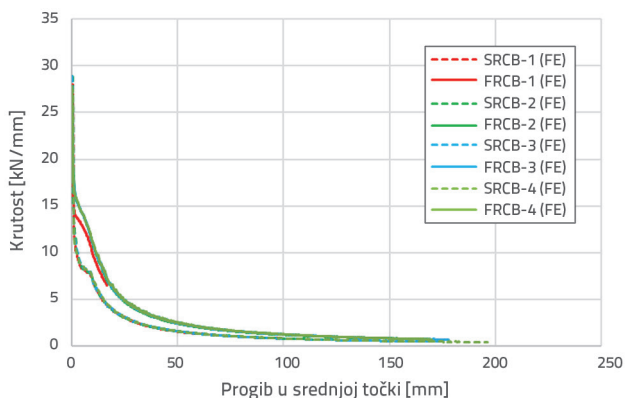


Slika 10. Krivulje krutosti i progiba: c) spone Ø8/15; d) spone Ø8/7,5



Slika 11. Usporedba krivulja opterećenja i progiba

popuštanja, SRCB-1 je najprije dosegao točku popuštanja, a zatim je nosivost pala zbog posmičnog otkazivanja. FRCB-1 je pokazao 38,1 % veću nosivost od SRCB-1. Međutim, FRCB-1 je dosegao nižu razinu pomaka. FRCB-2 je pokazao 48,6 % veću nosivost od SRCB-2, FRCB-3, 44,8 % veću nosivost od SRCB-3, a FRCB-4 je pokazao 61,2 % veću nosivost od SRCB-4. Početne vrijednosti krutosti uzoraka u uvjetima upetog oslanjanja bile su znatno veće od onih u uvjetima jednostavnog oslanjanja. Grafovi krutosti prikazani su na slici 12. S povećanjem vrijednosti opterećenja, kut nagiba se smanjuje zbog smanjenja krutosti. Kutovi nagiba elemenata s upetim oslanjanjem bili su znatno veći nego kod elemenata s jednostavnim oslanjanjem.



Slika 12. Usporedba krutosti

Kada su raspodjele naprezanja uzoraka s upetim ležajevima uspoređene s onima uzoraka s jednostavnim ležajevima, utvrđeno je da su slične u područjima savijanja. Međutim, raspodjele su se razlikovale u područjima oslanjanja.

4. Zaključak

Cilj je ovog istraživanja bio utvrditi razlike u rezultatima ispitivanja savijanja u četiri točke provedenih na jednostavno oslonjenim gredama i gredama u uvjetima upetog oslanjanja. U tu svrhu ispitani su učinci omjera a/d , razmaka spona i uvjeta oslanjanja na ponašanje AB greda. Istraživanje je provedeno eksperimentalno i analitički.

Iako je smanjenje omjera a/d povećalo nosivost greda, također je povećalo tendenciju greda da pokažu posmično ponašanje. Krutost se povećala sa smanjenjem omjera a/d . Međutim, s tim smanjenjem, površina ispod krivulje opterećenja i pomaka se smanjila, a kumulativne vrijednosti potrošene energije smanjile su se u skladu s tim, što pokazuje da se duktilnost greda smanjila sa smanjenjem omjera a/d . Za elemente s istim omjerom a/d , sa smanjenjem razmaka spona, naprezanje na površini grede širilo se na sve površine, a broj pukotina se povećavao. Stvaranje pukotina u gredama povećalo je potrošnju energije. Svi uzorci bez spona otkazali su zbog posmičnog otkazivanja, što pokazuje utjecaj spona na posmično ponašanje. Kada je razmak spona bio nedovoljan, elementi ispitivanja su se iznenada oštetili na krhki način zbog posmičnog otkazivanja prije dosezanja kapaciteta

savijanja. Kod uzoraka s malim razmakom spona pukotine se šire po cijeloj površini grede. Broj pukotina bio je mali kod uzoraka s velikim razmakom spona. Stoga su uzorci s malim razmakom spona bili skloniji posmičnom ponašanju. Budući da su elementi ispitivanja izvedeni i ispitani u ovom radu u omjeru 1/1, rezultati numeričkog ispitivanja smatraju se realističnijima od rezultata drugih ispitivanja u literaturi.

Pri analizi početnih vrijednosti krutosti elemenata, utvrđeno je da su elementi s upetim oslanjanjem 30 % krući od onih s jednostavnim oslanjanjem. Slično tome, nosivost elemenata s ugrađenim osloncima bila je 36 % veća od nosivosti elemenata s jednostavnim osloncima. Za elemente s upetim oslanjanjem, stupanj upinjanja grede i oslonca određen je omjerom vrijednosti momenta dobivenih za oslonac pričvršćen na gredu i vrijednosti momenta dobivenih eksperimentalnim istraživanjem. Zahvaljujući ovom proporcionaliranju, površine oslanjanja u elementima bez posmičnog sloma imale su vrijednosti upinjanja između 71 % i 80 %. Razlika između rezultata analitičkih i eksperimentalnih ispitivanja je u tome što se u eksperimentalnom ispitivanju nije mogao dobiti potpuno upeti nosač.

Zahvala

Ovo je ispitivanje provedeno u Laboratoriju za konstrukcije i potresno inženjerstvo Sveučilišta Selcuk, a pokrovitelj je Ured za istraživačke projekte Sveučilišta Selcuk (BAP-16401014).

LITERATURA

- [1] Altın, S., Demirel, Y.: Kesmeye Karşı Güçlendirilen Betonarme Kirişlerin Davranışı, *Teknik Dergi*, 108 (1997), pp. 1471-1489.
- [2] Kotsovos, M.D.: Shear Failure of Reinforced Concrete Beams, *Engineering Structures*, 9 (1987), pp. 32-38.
- [3] Kotsovos, M.D., Pavlović, M.: Size Effects in Structural Concrete: A Numerical Experiment, *Computers & Structures*, 64(1997) 1-4, pp. 285-295.
- [4] Sahoo, D.R., Bhagat, S., Reddy, T.: Experimental study on shear-span to effective-depth ratio of steel fiber reinforced concrete T-beams, *Materials and Structures*, 49 (2016) 9, pp. 3815-3830.
- [5] Wang, T., Dai, J.G., Zheng, J.J.: Multi-angle truss model for predicting the shear deformation of RC beams with low span-effective depth ratios. *Engineering Structures*, 91 (2015), pp. 85-95.
- [6] Spadea, G., et al.: Structural effectiveness of FRP materials in strengthening RC beams, *Engineering Structures*, 99 (2015), pp. 631-641.
- [7] Qeshta, I.M.I., Shafiqh, P., Jumaat, M.Z.: Flexural behaviour of RC beams strengthened with wire mesh-epoxy composite, *Construction and Building Materials*, 79 (2015), pp. 104-114.
- [8] Phuong, N.D., Mutsuyoshi, H.: Experimental study on performance of mechanical splices in reinforced concrete beams, *ACI Structural Journal*, 112 (2015) 6.
- [9] Pawłowski, D., Szumigała, M.: Flexural Behaviour of Full-scale Basalt FRP RC Beams – Experimental and numerical studies, *Procedia Engineering*, 108 (2015), pp. 518-525.
- [10] Ebead, U.: Inexpensive Strengthening Technique for Partially Loaded Reinforced Concrete Beams: Experimental Study, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27 (2015) 10, pp. 04015002.
- [11] Dadi, K., Agarwal, P.: Effect of types of reinforcement on plastic hinge rotation parameters of RC beams under pushover and cyclic loading. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 14 (2015) 3, pp. 503-516.
- [12] Conforti, A., et al.: Influence of polypropylene fibre reinforcement and width-to-effective depth ratio in wide-shallow beams, *Engineering Structures*, 88 (2015), pp. 12-21.
- [13] Cansız, S.: Effect of tightening zone length of reinforced concrete beams on beam capacity, *GRAĐEVINAR*, 74 (2022) 10, pp. 857-868, doi: <https://doi.org/10.14256/JCE.3504.2022>
- [14] Demir, A., Ince, Y., Altioğ, T.Y.: Experimental and numerical investigation of RC beams strengthened with CFRP composites, *GRAĐEVINAR*, 73 (2021) 6, pp. 605-616, doi: <https://doi.org/10.14256/JCE.3051.2020>
- [15] Vecchio, F., Balopoulou, S.: On the nonlinear behaviour of reinforced concrete frames, *Can. J. Civ. Eng.*, 17 (1990), pp. 698-704.

- [16] Altın, S., Anıl, Ö., Gökten, Y.: Betonarme Kirişlerin Kesmeye Karşı Güçlendirilmesinde Bir Kelepçe Uygulaması, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der., 19 (2004) 4, pp. 415-422.
- [17] Arslan, G., Polat, Z., Yüksek Beton Mukavemetli Betonarme Kirişlerde Uygun Sonlu Eleman Boyutları, ITU Muhendislik Dergisi, 3 (2004) 1, pp. 22-28.
- [18] İnce, R., Arslan, A.: Kesme Açıklığı Kısa Kayma Donatısız Betonarme Kirişlerde Boyut Etkisi. Journal of Engineering and Environment Sciences, 24 (200) pp. 69-77.
- [19] Sin, H.L., et al.: Reinforced Lightweight Concrete Beams in Flexure, ACI Structural Journal, (2011) January-February, pp. 3-12.
- [20] Tokgöz, H., DüNDAR, B.: Kesme Yönünden Yetersiz Dikdörtgen Kesitli Betonarme Kirişlerin CFRP İle Güçlendirilerek Kesme Kapasitelerinin Arttırılması. İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi, 3 (2014) 2, pp. 87-97.
- [21] Cladera, A., Marí, A.R.: Experimental study on high-strength concrete beams failing in shear, Engineering Structures, 27 (2005) 10, pp. 1519-1527.
- [22] Ersoy, G., Özcebe, G.: Betonarme/Temel İlkeler, 2016, İstanbul: Evrim Yayınevi, 816.
- [23] Kim, H.S., Lee, M.S., Shin, Y.S.: Structural behaviours of deep RC beams under combined axial and bending forces, Procedia Engineering, 14 (2011), pp. 2212-2218.
- [24] Kotsovos, M.D., Pavlović, M.N.: Size effects in beams with small shear span-to-depth ratios, Computers & Structures, 2004. 82 (2004) 2-3, pp. 143-156.
- [25] Słowik, M.: Shear failure mechanism in concrete beams, Procedia Materials Science, 3 (2014) pp. 1977-1982.
- [26] Sneed, L.H., Ramirez, J.: Influence of cracking on behaviour and shear strength of reinforced concrete beams, ACI Structural Journal, (2014) January-February, pp. 157-166.
- [27] Yang, K.H., et al.: Shear characteristics of high-strength concrete deep beams without shear reinforcements, Engineering Structures, 25 (2003), pp. 1343-1352.
- [28] Zakaria, M., et al: Shear characteristics of high-strength concrete deep beams without shear reinforcements, Journal of Advanced Concrete Technology, 7 (2009)1, pp. 79-96.
- [29] Kamanlı, M., Unal, A.: Experimental study on shear behaviour of simply supported full-scaled reinforced concrete beams. 2nd International Conference on Science, Ecology and Technology-2016 (ICONSETE'2016), 2016. Barcelona/Spain.
- [30] Unal, A.: Sabit dikdörtgen kesitli kirişlerin farklı mesnet koşullarında kesme kapasitesinin araştırılması, Civil Engineering, 2016, Selçuk University, Konya/Turkey. p. 375.
- [31] Unal, A., Kamanlı, M.: Investigation of stirrup effect on shear behaviour of fixed supported reinforced concrete beams, 2nd International Conference on Science, Ecology and Technology-2016 (ICONSETE'2016), 2016. Barcelona/Spain.
- [32] Hognestad E., Hanson, N.W., McHenry, D.: Concrete stress distribution in ultimate strength design, 52 (1955) ACI J Proc.
- [33] Willam, K.J.: WEP - Constitutive model for the triaxial behavior of concrete, 19 (1974), Int. Assoc. Bridg. Struct. Eng.