

Ispitivanje gređa i ploča armiranih šipkama od PAV-a

Kišiček, Tomislav; Sorić, Zorislav; Rak, Mladenko

Source / Izvornik: **Građevinar, 2007, 59, 581 - 595**

Journal article, Published version

Rad u časopisu, Objavljena verzija rada (izdavačev PDF)

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:237:079249>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-09**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,
University of Zagreb](#)



Ispitivanje greda i ploča armiranih šipkama od PAV-a

Tomislav Kišiček, Zorislav Sorić, Mladenko Rak

Ključne riječi

greda, ploča, šipke, polimer armiran vlaknima (PAV), ispitivanje, progibi, pukotine

Key words

beam, slab, bars, fibre reinforced polymer (FRP), testing, deflections, cracks

Mots clés

poutre, dalle, barres, polymère renforcé de fibres (PRF), essai, déflexions, fissures

Ключевые слова

балка, плита, стержни, полимер армированный волокнами (ПАВ), испытание, прогибы, трещины

Schlüsselworte

Balken, Platte, Stäbe, faserbewehrtes Polymer (PAV), Untersuchung, Durchbiegung, Risse

T. Kišiček, Z. Sorić, M. Rak

Izvorni znanstveni rad

Ispitivanje greda i ploča armiranih šipkama od PAV-a

Opisano je eksperimentalno ispitivanje betonskih greda i ploča armiranih šipkama od polimera armiranog vlaknima (PAV). Rabljena su dva tipa šipaka: šipke od staklenih i šipke od ugljičnih vlakana. Izrađene su tri serije uzoraka greda različito armiranih i dvije serije uzoraka ploča također armiranih na dva različita načina. Od ukupno pet serija svaka je imala tri uzorka, prvi je ispitivan u ciklusima opterećenje-rasterećenje do sloma, a druga dva su ispitivana monotono do sloma.

T. Kišiček, Z. Sorić, M. Rak

Original scientific paper

Testing beams and slabs reinforced with FRP bars

An experimental testing of concrete beams and slabs reinforced with fibre reinforced polymer (FRP) bars is presented. Two bar types were used: glass fibre bars and carbon fibre bars. Three series of differently reinforced beam samples, and two series of slabs samples reinforced in two different ways, were prepared. Each of the total of five series contained three samples. The first was tested by means of loading-unloading cycles until failure, and the other two were tested monotonously until failure.

T. Kišiček, Z. Sorić, M. Rak

Ouvrage scientifique original

L'essai de poutres et dalles renforcées par barres de PRF

Les essais expérimentaux des poutres en béton et des dalles renforcées par barres en polymère renforcé de fibres (PRF) sont présentés. Deux types de barres ont été utilisés: barres en fibres de verre et barres en fibres de carbone. Trois séries d'échantillons des poutres renforcées de manière différente, et deux séries d'échantillons des dalles renforcées de deux manières différentes, ont été préparées. Chacune des cinq séries a été composée de trois échantillons. Le premier a été analysé par cycles de chargement/déchargement jusqu'à rupture, et les autres deux ont été analysés de manière monotone jusqu'à rupture.

T. Kišiček, Z. Sorić, M. Rak

Оригинальная научная работа

Испытание балок и плит, армированных стержнями из ПАВ-а

В работе описано экспериментальное испытание бетонных балок и плит, армированных стержнями из полимеров армированных волокнами (ПАВ). Употреблялись два типа стержней: стержни из стеклянных и стержни из углеродных волокон. Изготовлены три серии образцов балок, армированных разными способами, и две серии образцов плит, также армированных двумя различными способами. Из всех пяти серий, каждая содержала по три образца, при чём, первый испытывался в циклах нагрузка-разгрузка до слом, а два остальных испытывались монотонно до слом.

T. Kišiček, Z. Sorić, M. Rak

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

Untersuchung von Balken und Platten bewehrt mit PAV-Stäben

Beschrieben ist eine experimentale Untersuchung von Betonbalken und -Platten bewehrt mit Stäben aus Faserbewehrtem Polymer (PAV). Benutzt waren zwei Stabtypen: Stäbe aus Glasfasern und Stäbe aus Kohlenstofffasern. Hergestellt wurden drei Serien von Balkenprüfkörpern mit verschiedener Bewehrung und zwei Serien von Plattenprüfkörpern mit zwei verschiedenen Arten der Bewehrung. Von insgesamt fünf Serien hatte jede drei Prüfkörper, den ersten untersuchte man in Belastungs-Entlastungszyklen bis zum Bruch, die übrigen zwei untersuchte man monoton bis zum Bruch.

Autori: Dr. sc. **Tomislav Kišiček**, dipl. ing. građ.; prof. dr. sc. **Zorislav Sorić**, dipl. ing. građ.; prof. dr. sc. **Mladenko Rak**, dipl. ing. građ., Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26

1 Uvod

Za izgradnju građevinskih konstrukcija danas se najviše rabi beton armiran čeličnom armaturom. Nosivost armiranobetonske konstrukcije ugrožena je na razne načine, a jedan od njih je korozijom čelične armature i to pogotovo ako se konstrukcija nalazi u agresivnoj okolini. Sprječavanje korozije je skupo i dugotrajno, često i nedjelotvorno, pa se već duže vrijeme nastoje pronaći materijali koji bi mogli zamijeniti čeličnu armaturu, tj. materijali koji ne korodiraju, a koji imaju svojstva slična čeliku. U posljednjih 10-15 godina u svijetu se sve više pozornosti poklanja materijalima za armiranje betonskih elemenata proizvedenih od polimera armiranog vlaknima – PAV ili engl. FRP (*Fiber Reinforced Polymer*). Ovaj materijal ne korodira. Osim za izradu šipki i mreža za armiranje, te natega za prednapinjanje, PAV se upotrebljava za izradu lamela, traka i plahta koje se mogu rabiti za zaštitu i ojačanje oštećenih ili nedovoljno nosivih konstrukcija.

PAV se proizvodi od staklenih (S), aramidnih (A) i ugljičnih (U) vlakana velike čvrstoće, povezanih epoksidnom smolom, poliesterom ili vinilesterom, uz kalupljenje i prešanje, pa se tako razlikuju proizvodi od PASV-a, PAAV-a te PAUV-a.

Osim otpornosti na koroziju, proizvodi od PAV-a imaju i drugih dobrih karakteristika kao što su: velika vlačna čvrstoća, mala relaksacija, otpornost na vlagu te mala obujamska težina. Nisu osjetljivi na magnetizam i ne provode električnu struju.

Osim dobrih svojstava, proizvodi od PAV-a imaju i nedostataka kao što su linearno elastično ponašanje do sloma, te velika razlika u svojstvima uzduž i poprijeko na smjer pružanja vlakana. Glavni nedostatak jest da takvi proizvodi nisu duktilni, tj. nema izrazitog popuštanja materijala, kod određenog naprezanja, kao kod čelika. Značajan je nedostatak proizvoda od PAV-a slom pod dugotrajnim naprezanjima, zbog smanjene čvrstoće pod dugotrajnim djelovanjem. Ta se pojava na engleskom naziva «creep rupture», a hrvatski bi prijevod mogao glasiti «slom zbog puzanja». Općenito, materijali od PAV-a, imaju modul elastičnosti manji od čelika. Najmanji modul elastičnosti ima PAAV, a najveći PAUV. Toplinski koeficijent ovisi o vrsti vlakana i obično je

malen, dok je za proizvode od ugljičnih vlakana zane-marivo malen.

Osim toga dolazi do pada čvrstoće na mjestu previjanja armature. Moguća su oštećenja takve armature od UV zračenja, a upitna je i trajnost aramidne i staklene armature u vodi te trajnost staklene armature u alkalnoj sredini. Također, jedna od zamjerki je još uvijek visoka cijena proizvoda od PAV-a.

Primjena armature od PAV-a u betonskim konstrukcijama zahtijeva eksperimentalnu i teorijsku podlogu za proračun takvih konstrukcija. Za betonske elemente armirane šipkama od PAV-a za sada nema norma kao ni metoda proračuna i konstruiranja sustava.

Posljednjih 10-ak godina brojni istraživači bave se eksperimentalnim i teorijskim opisom ponašanja betonskih elemenata armiranih armaturom od PAV-a i u sklopu tih istraživanja daju prijedloge proračuna. Izvedeni su brojni eksperimenti, a izvedene su i prve konstrukcije. Proračuni takvih konstrukcija temelje se na modificiranim postojećim izrazima za armiranobetonske konstrukcije s čeličnom armaturom. U izvješću o radu odbora ACI 440 [13] dane su preporuke i izrazi za dimenzioniranje betonskih konstrukcija armiranih armaturom od PAV-a.

U sklopu istraživanja na znanstvenoj temi br. 0082203 «*Primjena nemetalnih materijala u betonskim konstrukcijama*», provedena su eksperimentalna ispitivanja greda i ploča armiranih armaturom od polimera armiranog vlaknima (PAV-a). U ovom članku opisana su ta ispitivanja i njihovi rezultati.

2 Eksperimentalna ispitivanja

2.1 Oblik i dimenzije uzoraka

Ispitivanje je provedeno na uzorcima greda i ploča, dužine 310 cm, statičkog sustava jednopoljnog nosača raspona 2,90 m. Uzorci su opterećeni sa dvije koncentrirane sile P na razmaku 100 cm od ležaja i međusobnom razmaku sila od 90 cm.

Na slici 1. prikazani su uzorci greda i ploča za ispitivanje, a njihove dimenzije te armatura prikazani su u tablicama 1. i 2. U rujnu 2004. godine izrađena su po tri uzorka od svake serije. Sastav betona projektiran je da

Tablica 1. Dimenzije i armatura uzoraka greda

| Serija | Širina/visina uzorka, b/h (cm) | Statička visina, d (cm) | Vlačna armatura | Tlačna armatura |
|-----------------------|--------------------------------|-------------------------|---|---|
| Serija 1 – greda RA | 20/28 | 25 | čelik 3 ϕ 12 (3,39 cm ²) | čelik 2 ϕ 8 (1,01 cm ²) |
| Serija 2 – greda PASV | 20/28 | 25 | PASV 3#4 (3 ϕ 12,7) (3,87 cm ²) | PASV 2#2 (2 ϕ 6,35) (0,63 cm ²) |
| Serija 3 – greda PAUV | 20/28 | 25 | PAUV 3#4 (3 ϕ 12,7) (3,87 cm ²) | PAUV 2#2 (2 ϕ 6,35) (0,63 cm ²) |

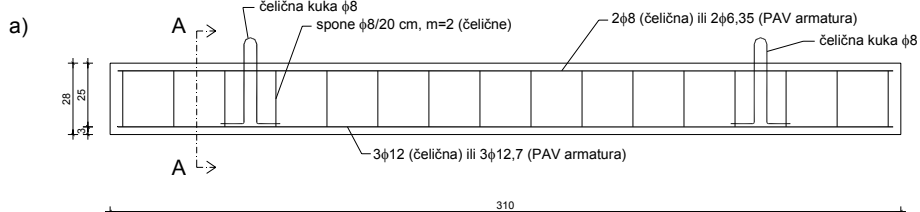
Tablica 2. Dimenzije i armatura uzoraka ploča

| Seriya | Širina/debljina uzorka, b/h (cm) | Statička visina, d (cm) | Glavna armatura | Razdjelna armatura |
|-----------------------|----------------------------------|-------------------------|--|----------------------------------|
| Seriya 1 – ploča MA | 100/12 | 10 | čelik – mreža Q 283 ($\phi 6/10$ cm) | $\phi 6/10$ |
| Seriya 2 – ploča PASV | 100/12 | 10 | PASV #2 ($\phi 6,35$)/10 cm (3,16 cm ² /m) | PASV #2 ($\phi 6,35$)/24 cm |

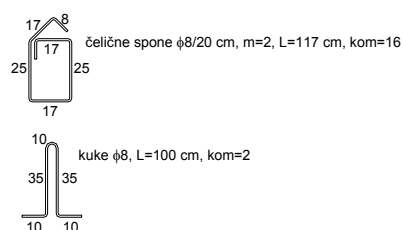
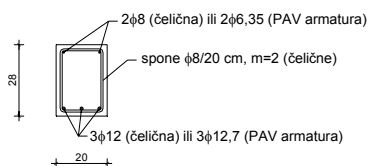
Tablica 3. Karakteristike armature pri uzdužnom vlačnom naprezanju

| Tip armature | Modul elastičnosti (N/mm ²) | Karakteristična granica popuštanja f_{yk} (N/mm ²) | Maksimalno naprezanje σ_{max} (N/mm ²) | Maksimalna relativna deformacija ϵ_{max} | Karakteristična čvrstoća pri slomu f_{tk} (N/mm ²) | Relativna deformacija pri slomu ϵ_{su} |
|-------------------------------------|---|--|---|---|--|---|
| Čelik $\phi 12$ pojedinačne šipke | 211000 | 590 | 672 | 0,1026 | 463 | 0,1288 |
| Čelik $\phi 6$ iz mrežaste armature | 192000 | 560 | 584 | 0,0143 | 398 | 0,0177 |
| PASV $\phi 12,7$ | 41600 | - | 723 | 0,0174 | 723 | 0,0174 |
| PAUV $\phi 12,7$ | 133700 | - | 1270 | 0,0095 | 1270 | 0,0095 |
| PASV $\phi 6,35$ | 42500 | - | 781 | 0,0184 | 781 | 0,0184 |

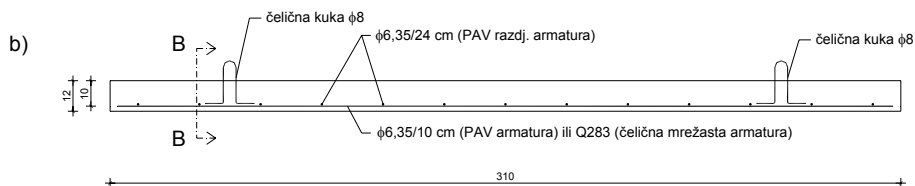
Uzdužni presjek grede



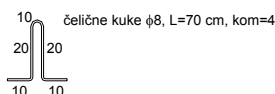
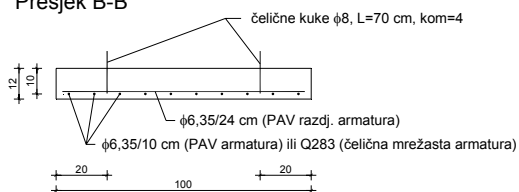
Presjek A-A



Uzdužni presjek ploče



Presjek B-B



Slika 1. Skice uzoraka, a) grede i b) ploča, s položajem armature

odgovara razredu C25/30. Ispitivanja uzoraka greda i ploča, zbog radova na postavljanju novih uređaja za ispitivanje te na preuređenju prostora, obavljena su tek u listopadu i studenom 2005. godine kada je ponovno ispitana tlačna čvrstoća betona koja je u to vrijeme iznosila 45 N/mm^2 . Provedena su i ispitivanja karakteristika armature, a dobiveni rezultati prikazani su u tablici 3.

2.2 Ispitivanje uzoraka

Ispitivanje uzoraka provedeno je u laboratoriju za ispitivanje konstrukcija Zavoda za tehničku mehaniku Građevinskog fakulteta u Zagrebu. Uzorci su ispitivani na uređaju za statičko ili dinamičko ispitivanje uzoraka, proizvođača Zwick/Roell, koji može postići maksimalnu silu od 600 kN te maksimalni pomak klipa od 250 mm. Na slici 2. prikazan je uređaj s postavljenim uzorkom grede prije početka ispitivanja. Svi uzorci greda i ploča ispitani su uz kontrolu prirasta pomaka, tj. progiba.



Slika 2. Uzorak grede u uređaju za ispitivanje

Pomaci i deformacije uzoraka mjereni su elektromehaničkim mjeračima LVDT-a (*Linear Variable Differential Transformer*) koji su preko A/D pretvarača spojeni s elektroničkim računalom s odgovarajućim računalnim

programom za prikupljanje podataka mjerenja. Bilježene su deformacije na gornjoj i donjoj plohi uzorka te po visini uzorka, i to u sredini raspona. Također, mjereni su vertikalni pomaci ležajeva, progib na sredini raspona uzorka i ukupna sila kojom se uzorak opterećuje. Ta se ukupna sila ($2P$) dijeli na dvije jednake koncentrirane sile P koje se primjenjuju u daljnjoj obradi rezultata ispitivanja.

2.2.1 Ispitivanje uzoraka greda

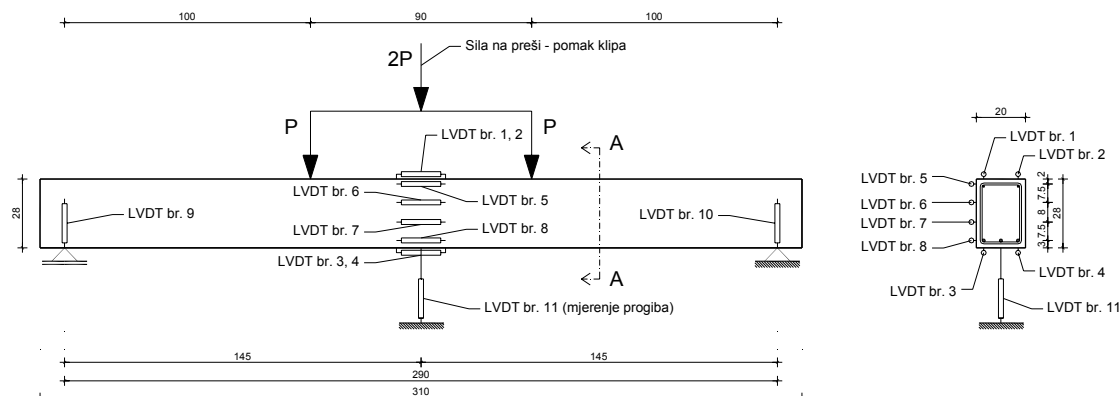
Najprije su ispitani uzorci greda koji su ovisno o vrsti armature u uzorku razvrstani u tri serije od po tri uzorka (tablica 2.). Raspored mjernih mjesta za te uzorke prikazan je na slici 3.

Na gornjoj plohi uzorka nalaze se LVDT-i br. 1 i 2, a na donjoj LVDT-i br. 3 i 4. Njima se mjere tlačne (1 i 2) odnosno vlačne (3 i 4) deformacije grede. Na prednjoj strani uzorka, i to po njegovoj visini, raspoređeni su LVDT-i br. 5 do 8. LVDT br. 5 nalazi se u visini tlačne armature, zatim br. 6 i 7 u trećinama visine uzorka, te LVDT br. 8 koji se nalazi u visini vlačne armature. Uz pomoć LVDT-a br. 9 i 10 mjere se pomaci ležajeva, kako bi se eliminirao eventualni utjecaj pomaka konstrukcije ležajeva na konačni rezultat mjerenja progiba. LVDT br. 11 služi za mjerenje progiba grede i nalazi se u sredini raspona grede. Sila se mjeri na samoj preši, a isto tako bilježi se i pomak klipa preše.

Mjerodavna vrijednost progiba dobije se tako da se od pomaka mjenjenog s LVDT-em br. 11 oduzme srednja vrijednost pomaka mjenjenog LVDT-ima br. 9 i 10.

Prije glavnog ispitivanja svaki je uzorak „treniran“ tako što je tri puta opterećivan do ukupne sile od $2P = 10 \text{ kN}$ te rasterećivan na 0 kN . Uzorci su ispitivani uz kontrolu prirasta pomaka, a brzina prirasta pomaka bila je $0,02 \text{ mm/s}$.

Ispitivanje je provedeno tako da je svaki prvi uzorak iz pojedine serije ispitivan u ciklusima opterećenje – rasterećenje po tri puta, i to do ukupne sile od $2P=20, 40, 60$



Slika 3. Skica uzorka grede s rasporedom mjernih mjesta

i 80 kN, a za svako daljnje povećanje od 20 kN ukupne sile uzorak je rasterećivan do nule (0 kN) samo jednom. Ostali uzorci, nakon «treniranja» tri puta do 10 kN, opterećivani su do sloma bez rasterećenja.

Kako bi se zabilježila pojava i napredovanje pukotina, prirast pomaka je zaustavljan pri približno svakih 10 kN (10, 20, 30 kN, itd.) postignute ukupne sile i to do otprilike 80 % ukupne sile pri slomu uzorka. Pukotine su obilježene tako što su njihov položaj i oblik naznačeni bojom i brojem na površini nosača, i to neposredno pokraj same pukotine da bi se mogla izmjeriti njezina širina. Svaka je pukotina označena rednim brojem, a njihova se širina mjerila uz pomoć povećala sa skalom. Nakon svakog označavanja pukotina, uzorak je fotografiran.

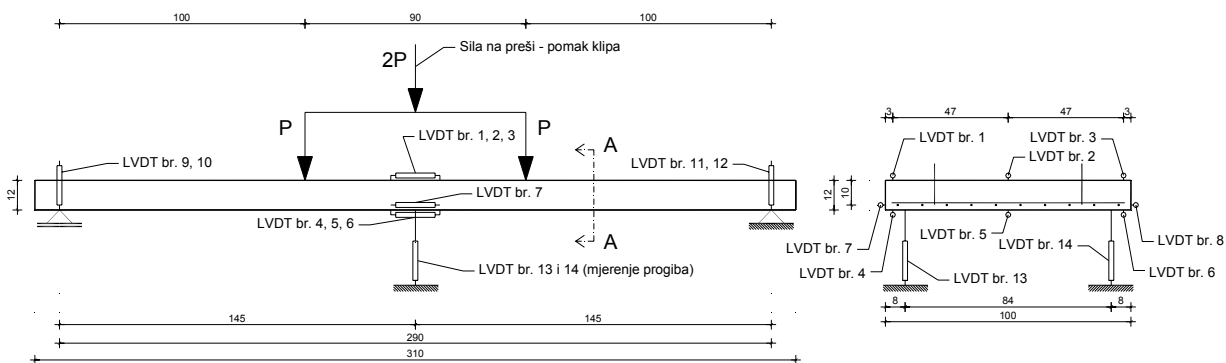
2.2.2 Ispitivanje uzoraka ploča

Nakon ispitivanja uzoraka greda ispitani su uzorci ploča koji su ovisno o vrsti armature u uzorku razvrstani u dvije

12. Mjerodavna vrijednost progiba odredila se tako da se od srednje vrijednosti pomaka mjenog LVDT-ima br. 13 i 14 oduzela srednja vrijednost pomaka lijevog i desnog ležaja.

Kao i pri ispitivanju uzoraka greda, prije glavnog ispitivanja svaki je uzorak „treniran“ tako što je tri puta opterećivan do ukupne sile od $2P=2,5$ kN te rasterećivan na 0 kN. Uzorci su ispitivani uz kontrolu prirasta pomaka, a brzina prirasta pomaka bila je 0,01 mm/s.

Ispitivanje je provedeno tako da je svaki prvi uzorak ploče iz pojedine serije ispitivan u ciklusima opterećenje - rasterećenje po tri puta i to do ukupne sile od $2P = 5, 10, 15$ i 20 kN, a za svako slijedeće povećanje od 5 kN ukupne sile uzorak je rasterećivan samo jednom. Ostali uzorci ispitivani su s konstantnim povećanjem opterećenja do sloma. S obzirom na to da su pokusi provedeni pod kontrolom pomaka, a pukotine su se pojavljivale jedna po jedna, one su obilježavane tako da povećanje poma-



Slika 4. Skica uzorka ploče s rasporedom mjernih mjesta

serije od po tri uzorka (tablica 3.). Raspored mjernih mjesta za te uzorke prikazan je na slici 4.

U sredini raspona mjerene su deformacije ploče. Na gornjoj plohi uzorka ploče bili su postavljeni LVDT-i br. 1, 2 i 3 a na donjoj LVDT-i br. 4, 5 i 6. Njima su se mjerile tlačne (LVDT 1, 2 i 3) odnosno vlačne (LVDT 4, 5 i 6) deformacije grede. Na bočnim stranama, u visini vlačne armature, raspoređeni su LVDT-i br. 7 i 8. Uz pomoć LVDT-a br. 9, 10, 11 i 12 mjereni su pomaci ležajeva, kako bi se eliminirao eventualni utjecaj pomaka konstrukcije ležajeva na konačni rezultat mjerenja progiba. LVDT-i br. 13 i 14 služili su za mjerenje progiba ploče, a nalazili su se u sredini raspona grede. Sila se, kao i kod uzoraka greda, mjerila na samoj preši, a isto tako bilježio se i pomak klipa preše.

Pomak lijevog ležaja je srednja vrijednost pomaka mjenog LVDT-ima br. 9 i 10, a pomak desnog ležaja je srednja vrijednost pomaka mjenog LVDT-ima br. 11 i

ka nije zaustavljano. Pukotine su na uzorcima ploča obilježavane na isti način kao i kod uzoraka greda.

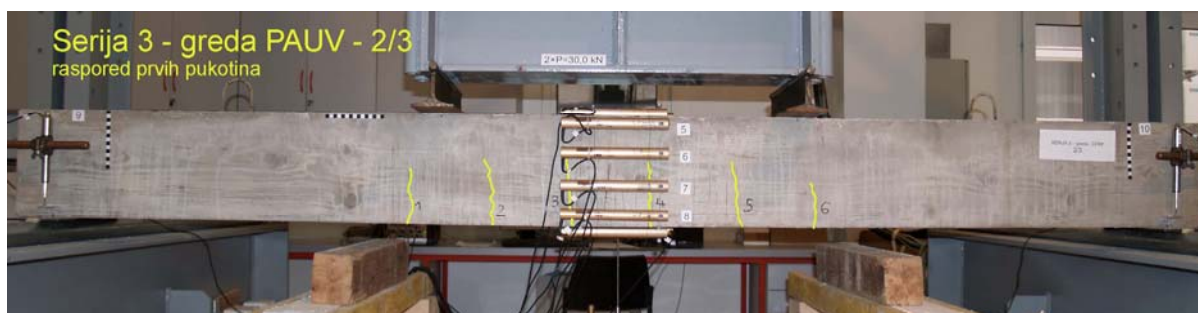
2.3 Rezultati ispitivanja

2.3.1 Rezultati ispitivanja uzoraka greda

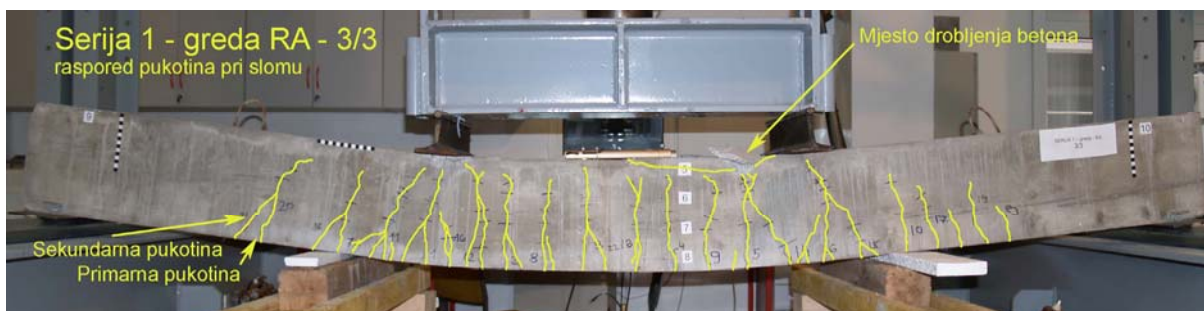
Ovdje su opisana karakteristična zapažanja u vezi s ponašanjem uzoraka greda tijekom ispitivanja. Za raspored i vrstu armature greda te mjerna mjesta treba vidjeti tablicu 2. te slike 1.a) i 3.

Svi uzorci, bez obzira na armaturu, ponašali su se elastično do pojave prvih pukotina. Prve pukotine kod svih su se uzoraka pojavljivale gotovo kod iste sile, što se moglo i očekivati jer je poznato da prije pojave prvih pukotina beton preuzima gotovo sva naprezanja.

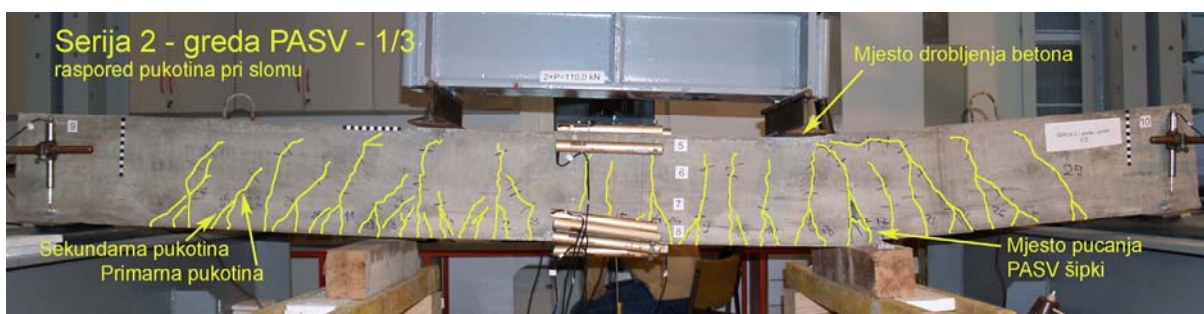
Prve su se pukotine pojavile u srednjoj trećini raspona, u kojoj je moment savijanja konstantan i maksimalan. Pukotine su se kod svih uzoraka pojavljivale na razmaku



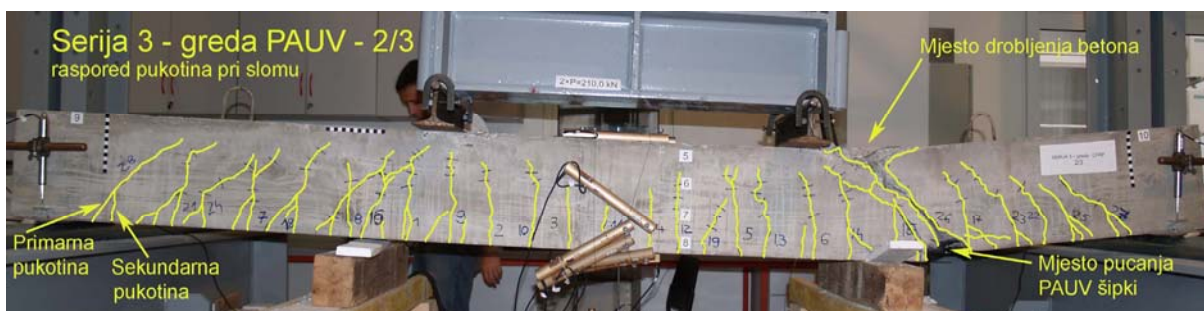
Slika 5. Raspored prvih pukotina za gredu armiranu armaturom od PAV-a



Slika 6. Raspored pukotina pri slomu za gredu armiranu čeličnom armaturom



Slika 7. Raspored pukotina pri slomu za gredu armiranu armaturom od PASV-a



Slika 8. Raspored pukotina pri slomu za gredu armiranu armaturom od PAV-a

spona (približno 20 cm). Nakon tih pukotina počele su se pojavljivati pukotine na sredini razmaka između spona, a zatim i pukotine u krajnjim trećinama raspona.

Na slici 5. prikazana je pojava prvih pukotina kod greda armirane armaturom od PAV-a.

Kod greda armiranih armaturom od PAV-a, izraženija je pojava posmičnih pukotina koje se šire u krajnjim trećinama raspona i koso napreduju od mjesta svog nastanka

prema mjestu unosa koncentriranih sila u nosač. Isto tako izraženije su i sekundarne pukotine koje se pri većim opterećenjima spajaju s glavnim pukotinama. Sekundarne su one pukotine koje nastaju u blizini već nastalih pukotina i s povećanjem opterećenja vrlo se brzo spajaju s njima (slika 6.).

Grede armirane čeličnom armaturom slomile su se tako da je došlo do drobljenja tlačnog područja betona. Ove

Tablica 4. Karakteristične vrijednosti sila i progiba za uzorke greda iz serije 1 (3 ϕ 12 mm, čelična rebrasta armatura)

| Serija 1 – greda RA – grede armirane čeličnom armaturom | | | | | | | | | |
|---|-----------------------|-------------|-------------------|-------------|------------------|---------------------------|------------------|------------------------------|---------------------------|
| Naziv uzorka | Pojava prvih pukotina | | Popuštanje čelika | | maks sila P (kN) | progib kod maks sile (mm) | maks progib (mm) | sila P kod maks progiba (kN) | tip sloma |
| | sila P (kN) | progib (mm) | sila P (kN) | progib (mm) | | | | | |
| Serija 1 – greda RA – 1/3 | 12,5 | 0,9 | 44,9 | 13 | 48,6 | 87 | 119 | 45,0 | duktilni – preko armature |
| Serija 1 – greda RA – 2/3 | 12,5 | 0,8 | 45,0 | 16 | 49,9 | 80 | 84 | 41,2 | duktilni – preko armature |
| Serija 1 – greda RA – 3/3 | 12,5 | 0,9 | 46,5 | 15 | 54,9 | 115 | 128 | 40,8 | duktilni – preko armature |

Tablica 5. Karakteristične vrijednosti sila i progiba za uzorke greda iz serije 2 (3 ϕ 12,7 mm, armatura od PASV-a)

| Serija 2 – greda od PASV-a – grede armirane armaturom od PASV-a | | | | | |
|---|-----------------------|-------------|-------------|-------------|-------------------------------------|
| Naziv uzorka | Pojava prvih pukotina | | Slom nosača | | tip sloma |
| | sila P (kN) | progib (mm) | sila P (kN) | progib (mm) | |
| Serija 2 – greda PASV – 1/3 | 10 | 0,6 | 55,6 | 63 | posmik + pucanje armature od PASV-a |
| Serija 2 – greda PASV – 2/3 | 10,8 | 0,6 | 40,0 | 44 | posmik + pucanje armature od PASV-a |
| Serija 2 – greda PASV – 3/3 | 8,9 | 0,8 | 46,8 | 50 | posmik |

Tablica 6. Karakteristične vrijednosti sila i progiba za uzorke greda iz serije 3 (3 ϕ 12,7 mm, armatura od PAUV-a)

| Serija 3 – greda od PAUV-a – grede armirane armaturom od PAUV-a | | | | | |
|---|-----------------------|-------------|-------------|-------------|-------------------------------------|
| Naziv uzorka | Pojava prvih pukotina | | Slom nosača | | tip sloma |
| | sila P (kN) | progib (mm) | sila P (kN) | progib (mm) | |
| Serija 3 – greda PAUV – 1/3 | 12,2 | 0,9 | 106,6 | 53 | posmik + pucanje armature od PAUV-a |
| Serija 3 – greda PAUV – 2/3 | 12,0 | 0,9 | 108,1 | 54 | posmik + pucanje armature od PAUV-a |
| Serija 3 – greda PAUV – 3/3 | 12,0 | 1,0 | 111,2 | 52 | posmik + pucanje armature od PAUV-a |

su grede i nakon rasterećenja ostale deformirane, što znači da je armatura dostigla plastične deformacije. Na slici 6. prikazan je raspored pukotina pri slomu za gredu armiranu čeličnom armaturom. Vidi se i mjesto drobljenja tlačnog područja betona.

Kod greda armiranih armaturom od PAV-a do sloma je došlo nakon pojačanog širenja kosih posmičnih pukotina te napredovanja od mjesta njihova nastanka prema mjestu unošenja koncentrirane sile (to je ujedno i najkritičniji presjek nosača jer je na tome mjestu maksimalan moment savijanja i maksimalna je poprečna sila), što dovodi do sloma tlačnog područja betona, naglog gubitka stabilnosti nosača i sloma šipki armature od PAV-a zbog posmika. Na slikama 7. i 8. prikazane su grede armirane armaturom od PASVa odnosno PAUV pri slomu, s rasporedom pukotina.

Šipke od PAV-a imaju veliku čvrstoću u uzdužnom smjeru, ali ne mogu podnijeti veće savijanje zbog čega može doći do njihova naglog pucanja. To se i dogodilo (slike 7. i 8.).

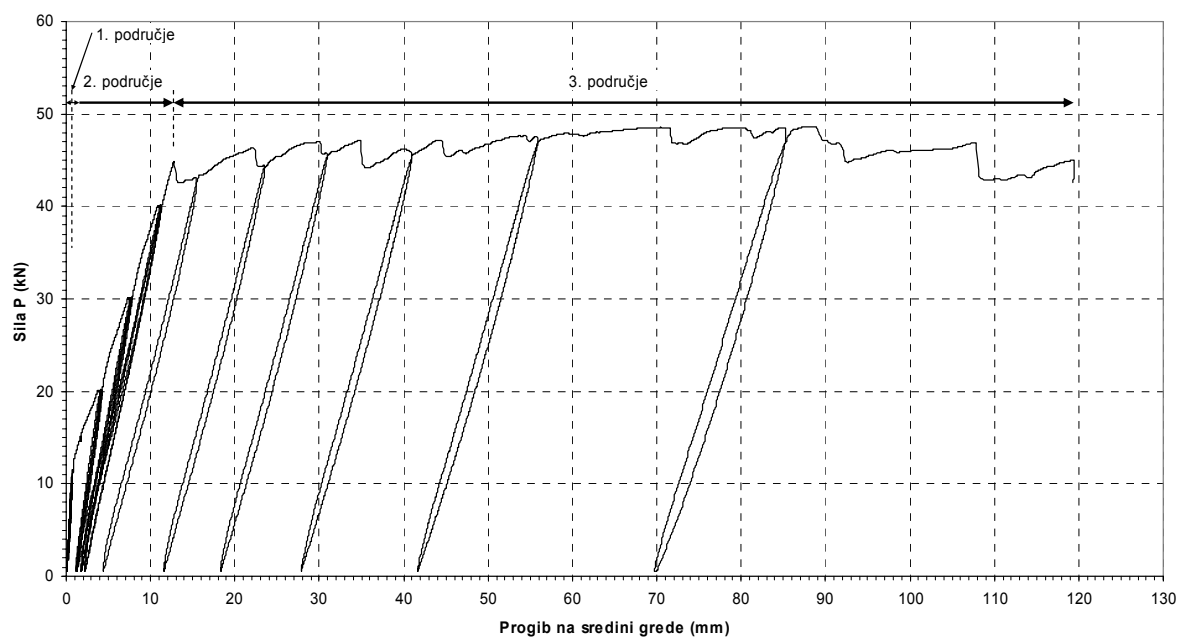
Slom betonskih greda armiranih armaturom od PAV-a je trenutačan uz jaki prasak. Nakon rasterećenja uzorka,

dijelovi uzorka lijevo i desno od mjesta sloma se izravnavaju, što odgovara elastičnom ponašanju armature od PAV-a.

U tablici 4. prikazane su veličine sila i progiba za uzorke greda armiranih čeličnom rebrastom armaturom, i to kod pojave prvih pukotina, kod pojave popuštanja armature te pri maksimalnoj sili i maksimalnom progibu pri slomu. Sila P pri početku popuštanja čelične armature očitana je iz dijagrama na slikama 9. i 12. Treba napomenuti da maksimalni progib ne odgovara maksimalnoj sili, jer je maksimalna sila postignuta prije sloma uzorka, tj. uzorak se slomio pri manjoj sili od maksimalne, ali pri većem progibu.

U tablici 5. prikazane su veličine sila i progiba za uzorke greda armiranih armaturom od PASV-a, i to kod pojave prvih pukotina te pri slomu uzorka, a u tablici 6. prikazane su iste veličine, ali za uzorke greda armiranih armaturom od PAUV-a. Kod ovih greda maksimalni progibi dogodili su se pri maksimalnim silama jer se armatura od PAV-a ponaša elastično do sloma.

Na slici 9. prikazan je dijagram sila-progib za gredu armiranu čeličnom rebrastom armaturom koja je opterećivana u ciklusima do sloma.

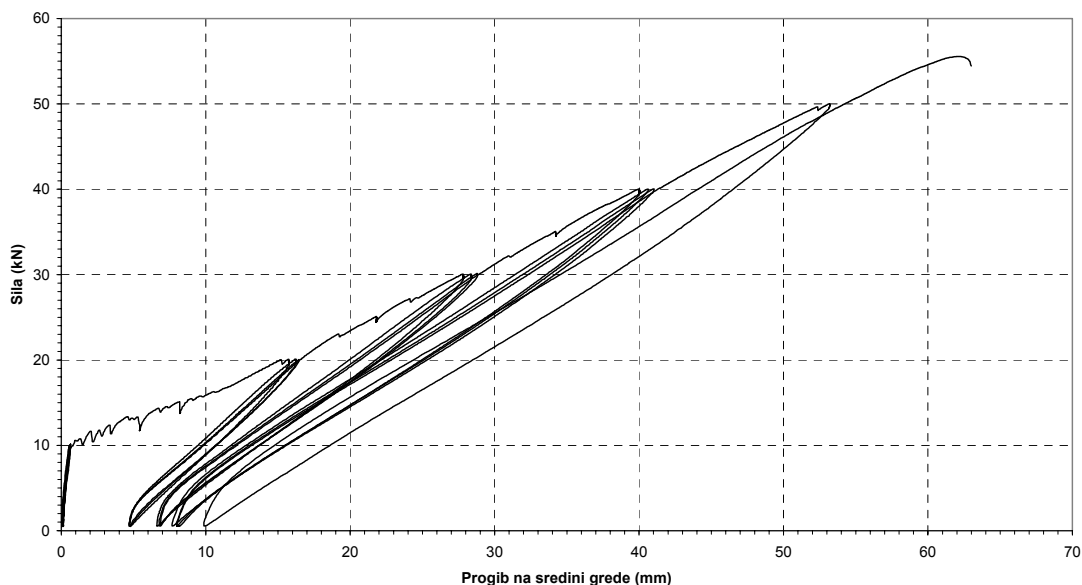


Slika 9. Dijagram sila-progib za gredu (uzorak 1 iz serije 1 sa 3φ12 mm čelične rebraste armature) ciklički opterećivanu do sloma

Na dijagramu sa slike 9. vide se tri karakteristična područja ponašanja uzorka grede.

Prvo područje jest područje prije nastanka prvih pukotina i ono je najmanje (mali progibi i male sile). U tom području dijagram je naj strmiji (najveća krutost grede). Nakon nastanka prvih pukotina nosač se nalazi u drugom području, a krutost nosača se smanjila. U drugom se području s pojavom svake nove pukotine smanjuje krutost, što se vidi kod sve blažih nagiba pri rasterećenju i ponovnom opterećenju.

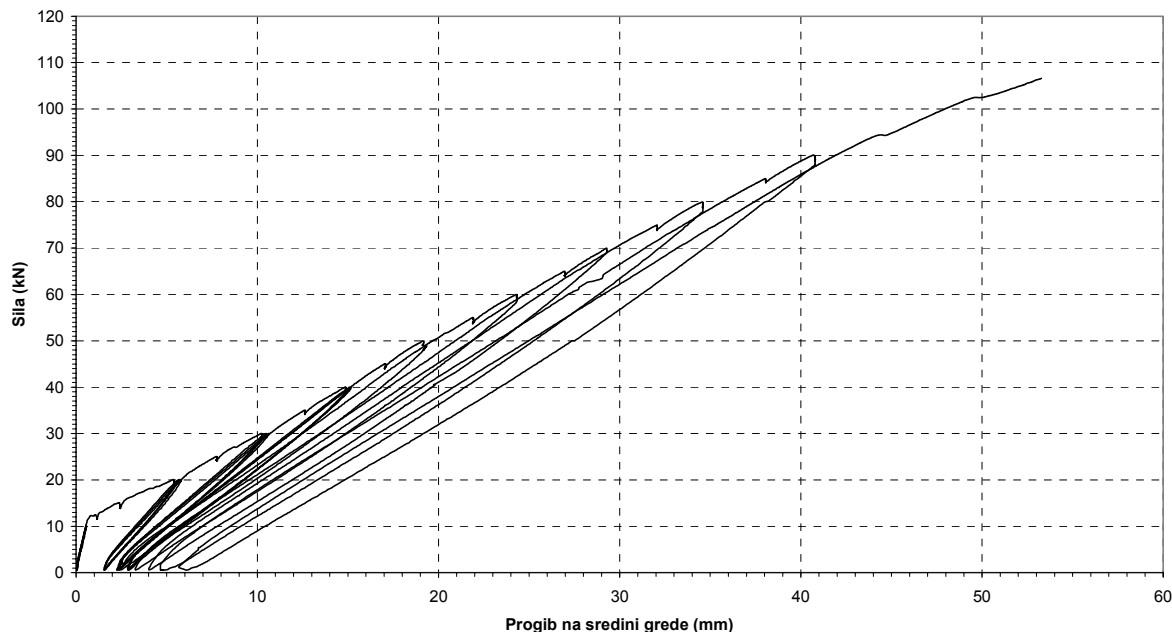
U trećem području ponašanja armatura počinje popuštati, a progib nosača raste uz približno konstantnu silu, što se vidi iz blago uspinjuće (gotovo horizontalne) grane na dijagramu sila - progib na slici 9. U trećem se području vidi promjena nagiba dijagrama sila - progib u odnosu na drugo područje, kod ciklusa opterećenje - rasterećenje što pokazuje smanjenje krutosti grede na savijanje. U trećem području krutost grede na savijanje jednaka je kod svih ciklusa. U tom su području nagibi dijagrama kod ciklusa opterećenje-rasterećenje gotovo jednaki. Takav nagib krivulja u trećem području može se protuma-



Slika 10. Dijagram sila-progib za gredu (uzorak 1 iz serije 2 sa 3φ12,7 mm armature od PASV-a) ciklički opterećivanu do sloma

čiti nastankom stabilizirane slike pukotina, tj. nema nastanka novih pukotina, već se postojeće pukotine samo šire.

Na slici 10. prikazan je dijagram sila-progib za gredu armiranu armaturom od PASV-a koja je opterećivana u ciklusima do sloma, a na slici 11. za gredu armiranu armaturom od PAUV-a.



Slika 11. Dijagram sila-progib za gredu (uzorak 1 iz serije 3 sa $3\phi 12,7$ mm armature od PAUV-a) ciklički opterećivana do sloma

Na dijagramima sila-progib (slike 10. i 11.) za grede armirane armaturom od PASV-a, a i za grede armirane armaturom od PAUV-a, vidljiva su dva karakteristična područja ponašanja uzorka grede. Prvo je područje naprezanja, kao i kod uzoraka armiranih čeličnom armaturom, područje prije nastanka prvih pukotina. Nakon nastanka prvih pukotina, nosač se nalazi u drugom području naprezanja, krutost grede na savijanje se smanjuje i krivulja dijagrama ima manji nagib, tj. pri jednolikom povećanju opterećenja znatno se povećava progib. U drugom se području s pojavom svake nove pukotine smanjuje krutost, što se vidi kod sve blažih nagiba pri rasterećenju i ponovnom opterećenju. S obzirom na to da se armatura od PAV-a ponaša linearno elastično do sloma, kod ovih greda nema trećega karakterističnog područja, tj. nema popuštanja armature.

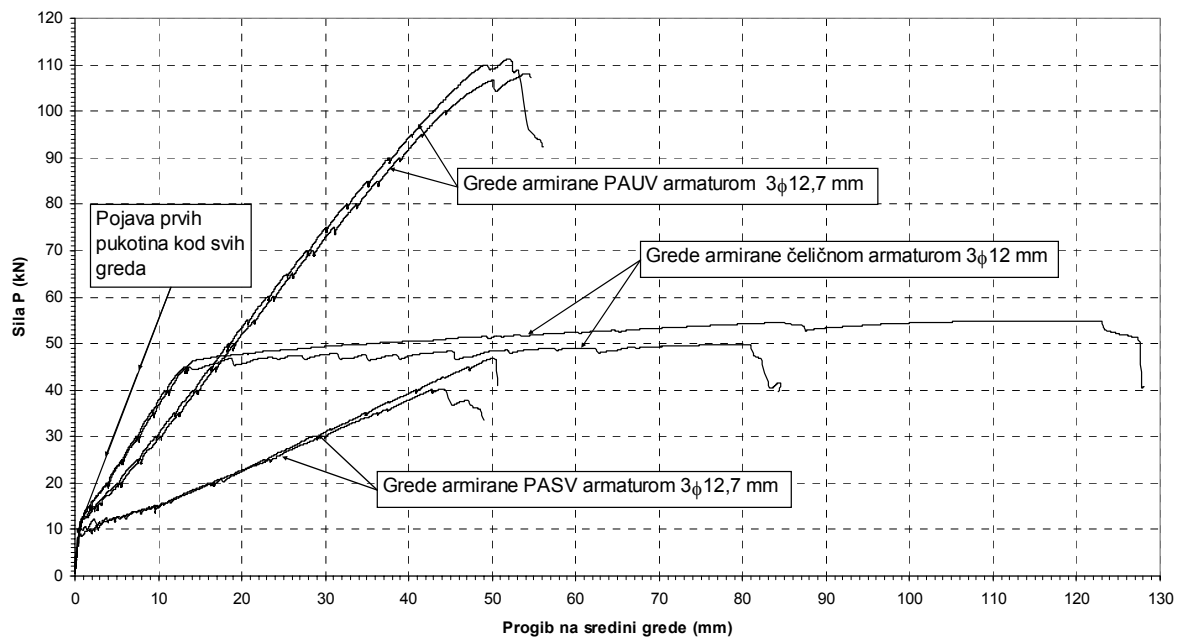
Na slici 12. usporedno su prikazani dijagrami sila-progib za sve uzorke greda koji su opterećivani monotono do sloma. Jasno se mogu vidjeti sličnosti i glavne razlike u ponašanju greda armiranih čeličnom armaturom te armaturom od PASV-a i PAUV-a. Sve grede imaju istu krutost do pojave prvih pukotina. To se tumači malim doprinosom armature na krutost u prvom području napreza-

nja, pa se zato i krutost u tom području proračunava kao krutost čistoga betonskog presjeka bez armature.

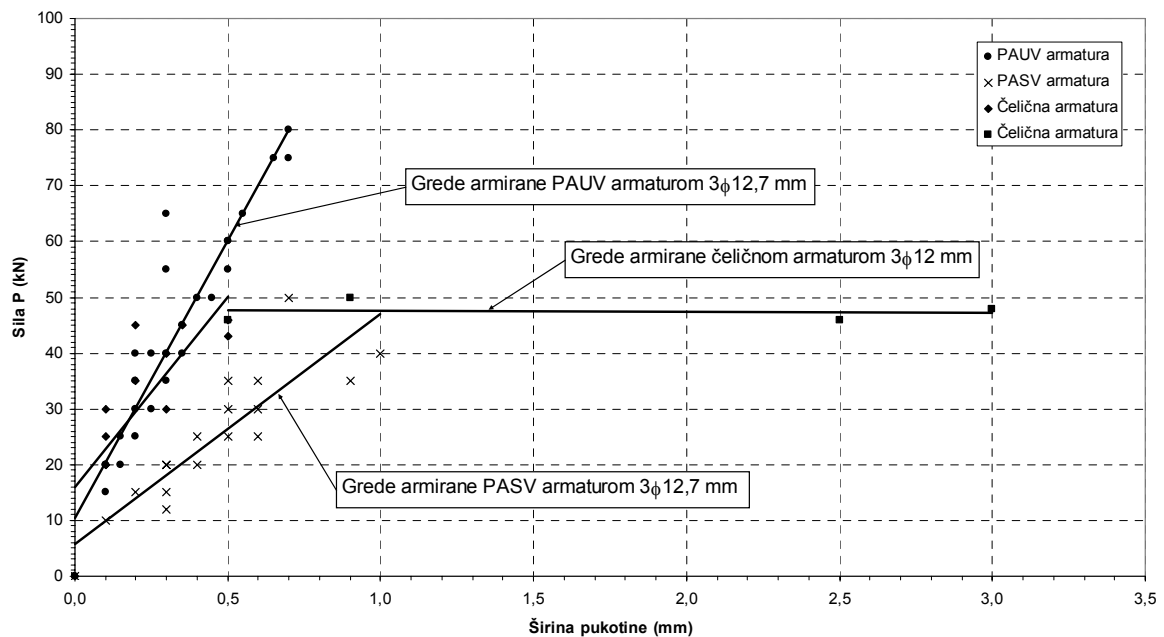
Nakon pojave prve pukotine armatura preuzima vlačna naprezanja, a krutost nosača na savijanje ovisi o njoj, o tlačnom dijelu betona i o geometriji nosača. Može se uočiti da u tom području grede armirane čeličnom armaturom imaju najveću krutost, zatim slijede grede armi-

rane armaturom od PAUV-a, dok najmanju krutost pokazuju grede armirane armaturom od PASV-a. Progib pri slomu za grede armirane armaturom od PAUV-a i PASV-a gotovo je jednak, ali je zato sila pri slomu grede armirane s armaturom od PAUV-a oko 2,5 puta veća od grede armirane armaturom od PASV-a i 2 puta veća od greda armiranih čeličnom armaturom. Grede armirane čeličnom armaturom imaju konačni progib oko 2 puta veći od greda armiranih PASV tj. PAUV armaturom. Sila pri slomu grede armirane čeličnom armaturom je otprilike 25 % veća od sila sloma greda armiranih armaturom od PASV-a i približno 50 % manja od slomnih sila greda armiranih armaturom od PAUV-a. Najvažnija karakteristika greda armiranih čeličnom armaturom njihova je duktilnost, tj. sposobnost da se plastično deformiraju prije sloma. To je jako važno jer do sloma ne dolazi naglo kao kod greda armiranih armaturom od PAV-a, nego se pojava sloma može predvidjeti. Duktilnost greda armiranih čeličnom armaturom, na slici 12. očituje se u dugim gotovo horizontalnim linijama dijagrama sila-progib.

Na slici 13. prikazani su dijagrami sila-širina pukotine za sve tri serije i sve uzorke. Tijekom izvođenja eksperimenata mjerene su širine jedne karakteristične pukotine



Slika 12. Usporedni dijagrami sila-progib za uzorke greda 2 i 3 (za sve tri serije)



Slika 13. Usporedni dijagrami sila-širina pukotine za uzorke greda

na pojedinoj gredi, na sredini između koncentriranih sila. Sve izmjerene širine pukotina grupirane su prema tipu uzorka greda i za svaku grupu podataka proračunan je regresijski pravac. Kako bi se naznačila promjena širine pukotina kod greda armiranih čeličnom armaturom, nakon dostizanja granice popuštanja čelika, širine pukotina grupirane su u dvije skupine kako bi se dobila dva regresijska pravca, jedan za širine pukotina prije početka popuštanja armature, a drugi za širine pukotina tijekom popuštanja čelične armature.

Promjena širine pukotina s porastom opterećenja slična je promjeni progiba, odnosno promjeni krutosti nosača s porastom opterećenja. Na slici 13. može se uočiti da su pri istoj sili, koja je manja od sile pri početku popuštanja čelične armature, širine pukotina kod greda armiranih armaturom od PASV-a najveće, dok su širine pukotina greda armiranih čeličnom i armaturom od PAUV-a približno jednake. S početkom popuštanja čelične armature, širine pukotina takvih greda počinju se jako povećavati uz vrlo mali porast sile. Širine pukotina u greda-

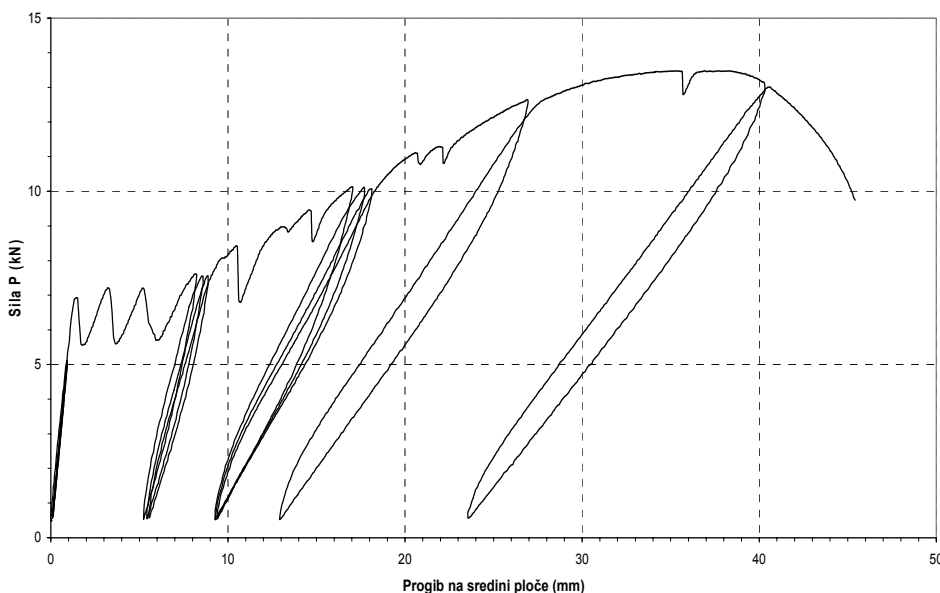
ma armiranim armaturom od PAV-a nastavljaju se linearno povećavati s porastom sile.

2.3.2 Rezultati ispitivanja uzoraka ploča

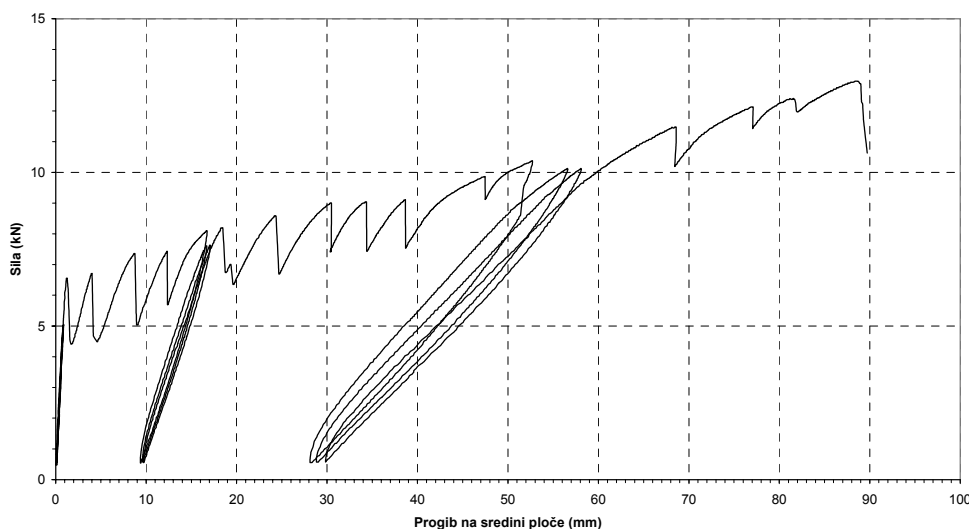
Ovdje su opisana karakteristična zapažanja u vezi s ponašanjem uzoraka ploča tijekom ispitivanja. Za raspored i vrstu armature te raspored LVDT-a kod ploča treba vidjeti tablicu 3., sliku 1.b) i sliku 4. Izrađene su dvije serije uzoraka ploča - one armirane čeličnom mrežastom i one armirane armaturom od PASV-a. U uzorcima ploča nije se rabila armatura od PAUV-a.

Isto kao i kod uzoraka greda svi uzorci, bez obzira na armaturu, ponašali su se elastično do pojave prvih pukotina.

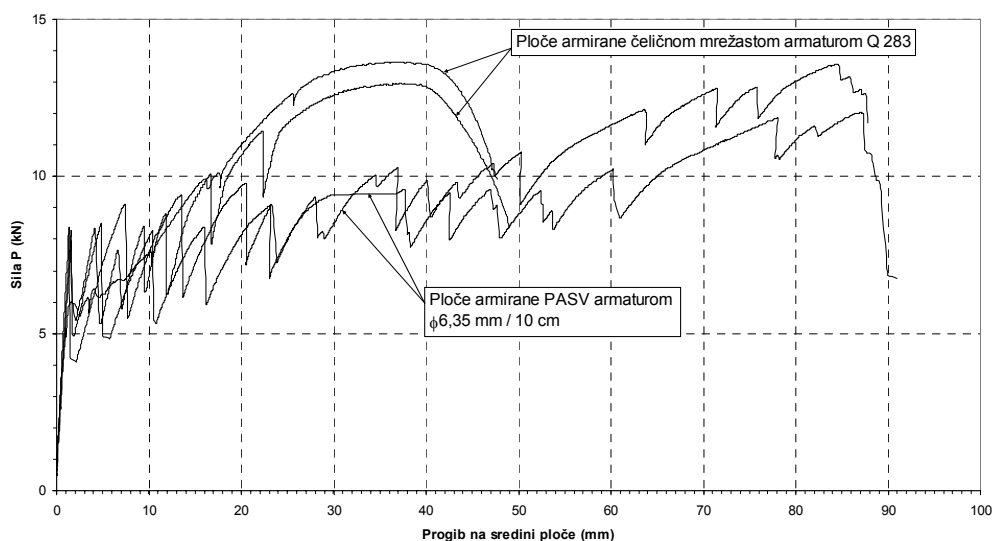
Za razliku od uzoraka greda, prve pukotine kod ploča nisu se pojavile istodobno, na sredini uzorka između koncentriranih sila, nego su se javljale jedna po jedna u kraćem vremenskom razmaku. Na dijagramima sila-progib za uzorke ploča (slike 14. do 17.) vidi se pad sile prilikom svake njihove pojave («pilasti» oblik dijagrama). Kod svih se uzoraka prva pukotina pojavila približno kod iste sile. Pukotine su se kod svih uzoraka ploča pojavile jedna za drugom, u srednjoj trećini raspona, na razmaku približno 24-25 cm, što odgovara razmaku razdjelne armature kod ploča armiranih armaturom od PASV-a i približno dvostrukom razmaku poprečnih šipki kod ploča armiranih čeličnom mrežastom armaturom Q-283. Nakon tih pukotina počele su se pojavljivati nove pukotine na sredini



Slika 14. Dijagram sila-progib za ploču (uzorak 1 iz serije 1, Q-283, čelična mrežasta armatura) ciklički opterećivanu do sloma

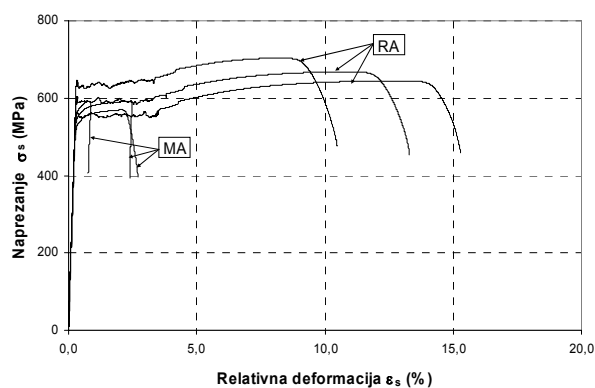


Slika 15. Dijagram sila-progib za ploču (uzorak 1 iz serije 2, $\phi 6,35$ mm/10 cm, armatura od PASV-a) ciklički opterećivanu do sloma



Slika 16. Usporedni dijagrami sila-progib za uzorke ploča s čeličnom i s armaturom od PASV-a

razmaka prvih pukotina, a zatim i pukotine u krajnjim trećinama raspona.



Slika 17. Usporedni radni dijagrami za čeličnu rebrastu i čeličnu mrežastu armaturu

Kod ploča armiranih čeličnom mrežastom armaturom slom je nastao neposredno nakon početka popuštanja armature. Na početku popuštanja čelične armature, dija-

gram sila - progib počinje se izravnavati i nakon toga sila počinje lagano padati uz daljnji prirast pomaka. Ovakvo ponašanje posljedica je male duktilnosti čelične armature mreža i objašnjeno je kasnije (slika 17.).

Za razliku od ploča armiranih čeličnom mrežastom armaturom, ploče armirane armaturom od PASV-a, nakon pojave prvih pukotina, ponašale su se linearno do sloma. Uzrok sloma ploča armiranih i čeličnom i armaturom od PASV-a jest pojedinačno pucanje šipki armature.

U tablici 7. prikazane su veličine sila i progiba za uzorke ploča armiranih čeličnom mrežastom armaturom i to kod pojave prvih pukotina te pri maksimalnoj sili i maksimalnom progibu pri slomu. Slom se dogodio preko armature i nije bio duktilan. Treba napomenuti da maksimalni progib ne odgovara maksimalnoj sili na preši jer je maksimalna sila postignuta prije sloma uzorka, tj. uzorak se slomio pri manjoj sili od maksimalne, ali pri većem progibu ploče.

Tablica 7. Karakteristične vrijednosti sila i progiba za uzorke ploča iz serije 1 (Q-283, čelična mrežasta armatura)

| Serija 1 – ploča MA – ploče armirane čeličnom mrežastom armaturom | | | | | | | |
|---|-----------------------|-------------|------------------|---------------------------|------------------|------------------------------|----------------|
| Naziv uzorka | Pojava prvih pukotina | | maks sila P (kN) | progib kod maks sile (mm) | maks progib (mm) | sila P kod maks progiba (kN) | tip sloma |
| | sila P (kN) | progib (mm) | | | | | |
| Serija 1 – ploča MA – 1/3 | 7,0 | 1,5 | 13,5 | 37 | 45 | 96 | Preko armature |
| Serija 1 – ploča MA – 2/3 | 6,0 | 1,8 | 13,7 | 37 | 48 | 99 | Preko armature |
| Serija 1 – ploča MA – 3/3 | 8,0 | 1,6 | 13,0 | 37 | 49 | 84 | Preko armature |

Tablica 8. Karakteristične vrijednosti sila i progiba za uzorke ploča iz serije 2 (φ6,35 mm/10 cm, armatura od PASV-a)

| Serija 2 – ploča od PASV-a – ploče armirane armaturom od PASV-a | | | | | |
|---|-----------------------|-------------|-------------|-------------|-------------------------------|
| Naziv uzorka | Pojava prvih pukotina | | Slom nosača | | tip sloma |
| | sila P (kN) | progib (mm) | sila P (kN) | progib (mm) | |
| Serija 2 – ploča PASV – 1/3 | 6,6 | 1,3 | 12,9 | 89 | neduktilni - pucanje armature |
| Serija 2 – ploča PASV – 2/3 | 8,4 | 1,4 | 13,0 | 85 | neduktilni - pucanje armature |
| Serija 2 ploča PASV – 3/3 | 8,3 | 1,6 | 12,0 | 87 | neduktilni - pucanje armature |

U tablici 8. prikazane su veličine sila i progiba za uzorke ploča armiranih armaturom od PASV-a i to kod pojave prvih pukotina te pri slomu uzorka.

Na slici 1. prikazan je dijagram sila-progib za ploču armiranu čeličnom mrežastom armaturom. Ploča je opterećivana ciklički do sloma.

Kod ploče armirane čeličnom mrežastom armaturom i opterećivane ciklički vide se promjene krutosti na savijanje koje se na dijagramu očitavaju kao nagibi krivulja opterećenje-rasterećenje u pojedinim ciklusima. S pojavom svake nove pukotine, koja se na dijagramu vidi kao skokovit pad sile (zbog kontrole prirasta pomaka), krutost ploče na savijanje se smanjuje.

Na slici 15. prikazan je dijagram sila-progib za ploču armiranu armaturom od PASV-a koja je opterećivana ciklički do sloma.

Kao i kod ploče armirane čeličnom mrežastom armaturom i opterećivane ciklički i kod ploče armirane armaturom od PASV-a vide se promjene krutosti na savijanje koje se na dijagramu očitavaju kao nagibi krivulja opterećenje-rasterećenje u pojedinim ciklusima.

Na slici 16. usporedno su prikazani dijagrami sila-progib za uzorke ploča koji su opterećivani monotono do sloma, tj. za dva uzorka armirana čeličnom armaturom i dva uzorka armirana armaturom od PASV-a. Ponašanje je svih uzoraka ploča armiranih čeličnom armaturom, pod opterećenjem, slično, osim što postoji mala razlika u maksimalnoj postignutoj sili. Kod ploča armiranih armaturom od PASV-a nema popuštanja armature prije sloma uzorka, već slom uzorka nastupa naglo uz prasak. Kod ovih ploča pojava svake nove pukotine izražena je skokovitim padom sile na dijagramu sila-progib pri pojavi nove pukotine.

Na slici 16. jasno se mogu vidjeti sličnosti i glavne razlike u ponašanju ploča armiranih čeličnom mrežastom armaturom te armaturom od PASV-a. Sve ploče imaju istu krutost do pojave prvih pukotina. To se tumači malim doprinosom armature na krutost u tom području. Nakon pojave prve pukotine armatura preuzima vlačna naprezanja, a krutost nosača na savijanje ovisi o njoj, o tlačnom dijelu betona i o geometriji nosača.

Može se uočiti da ploče armirane čeličnom mrežastom armaturom imaju malo veću krutost od ploča armiranih armaturom od PASV-a. Maksimalna postignuta sila približno je jednaka za obje vrste ploča. Progib pri slomu ploča armiranih armaturom od PASV-a gotovo je dvostruko veći od progiba ploča armiranih čeličnom mrežastom armaturom.

Prema ispitivanju armature (tablica 3.), čelična mrežasta armatura $\phi 6$ mm i armatura od PASV-a $\phi 6,35$ mm imaju približno jednaku relativnu deformaciju pri slomu, ali armatura od PASV-a ima otprilike 95 % veću konačnu

čvrstoću. Modul elastičnosti šipki od PASV-a je približno 5 puta manji od modula elastičnosti čelične armature. Zbog toga je i krutost ploče armirane armaturom od PASV-a nakon pojave pukotina manja od krutosti ploče armirane čeličnom armaturom.

Važno je upozoriti da je uporabljena čelična mrežasta armatura $\phi 6$ mm (MA na slici 17.) imala nedopustivo malu duktilnost, tj. malu deformaciju pri slomu. Na slici 17. vidi se velika duktilnost rebraste armature.

3 Zaključak

U ovom istraživanju važno je uočiti bitnu razliku između ponašanja elemenata greda armiranih s armaturom od PAV-a i elemenata armiranih čeličnom armaturom. Valja istaknuti razliku između čelične armature koja ima svojstvo popuštanja (duktilno ponašanje) i armature od PAV-a koja se ponaša linearno elastično do sloma, tj. neduktilno. Zbog toga betonski elementi armirani armaturom od PAV-a, za razliku od onih armiranih čeličnom armaturom, pokazuju znatno manju duktilnost. Kod elemenata s armaturom od PAV-a beton je duktilniji materijal nego armatura.

Slom greda armiranih čeličnom armaturom dogodio se drobljenjem tlačnog područja betona u srednjoj trećini raspona greda čemu je prethodilo popuštanje armature. Slom greda armiranih armaturom od PASV-a i PAUV-a dogodio se u vanjskoj trećini raspona zbog posmičnog naprezanja.

Kod uzoraka greda armiranih čeličnom armaturom te armaturom od PASV-a i PAUV-a uočene su sličnosti i razlike u ponašanju koje treba istaknuti. Sve grede imaju istu krutost do pojave prvih pukotina. To se tumači malim doprinosom armature na krutost u prvom području naprezanja, pa se zato i krutost u tom području proračunava kao krutost čistoga betonskoga presjeka bez armature. Nakon pojave prve pukotine grede armirane čeličnom armaturom imaju najveću krutost, zatim slijede grede armirane armaturom od PAUV-a, dok najmanju krutost pokazuju grede armirane armaturom od PASV-a. Isti je takav redoslijed i veličina navedenih armatura. Progib pri slomu za grede armirane armaturom od PAUV-a i PASV-a gotovo je jednak, ali je zato sila pri slomu grede armirane armaturom od PAUV-a približno 2,5 puta veća od grede armirane armaturom od PASV-a i 2 puta veća od greda armiranih čeličnom armaturom. Grede armirane čeličnom armaturom imaju konačni progib oko 2 puta veći od greda armiranih armaturom od PASV-a, tj. PAUV-a.

Mjeren je kratkotrajni progib od opterećenja, bez progiba od vlastite težine uzorka i bez utjecaja skupljanja i pužanja betona. Ako se kao granični progib odredi $L/250$, tj. onaj koji predviđa norma HRN ENV 1992-1-1, tada

se vidi da su svi uzorci greda i ploča pri slomu imali znatno veće progibe od te vrijednosti.

Najvažnija karakteristika greda armiranih čeličnom armaturom jest njihova duktilnost, tj. sposobnost da se plastično deformiraju prije sloma. To je jako važno jer do sloma ne dolazi naglo kao kod greda armiranih armaturom od PAV-a, nego se pojava sloma može predvidjeti. Promjena širine pukotine s porastom opterećenja slična je promjeni progiba, odnosno promjeni krutosti nosača s porastom opterećenja.

Pri sili koja je manja od sile na početku popuštanja čelične armature, širine su pukotina greda armiranih armaturom od PASV-a veće nego širine pukotina greda armiranih čeličnom i armaturom od PAUV-a. Pri toj veličini sile širine pukotina greda armiranih čeličnom i armaturom od PAUV-a približno su jednake. S početkom popuštanja čelične armature krutost takvih greda se smanjuje i njihove se širine pukotina počinju jako povećavati uz vrlo mali porast sile. Širine pukotina u gredama armiranim armaturom od PAV-a nastavljaju se linearno povećavati s porastom sile. S obzirom na to da se grede armirane čeličnom armaturom ponašaju duktilno, a gre-

de armirane armaturom od PAV-a neduktilno, širine pukotina greda armiranih čeličnom armaturom pri slomu su najveće. Grede armirane čeličnom armaturom imale su duktilni slom, dok su grede armirane armaturom od PASV-a i PAUV-a imale posmični, tj. neduktilni slom.

Progib pri slomu ploča armiranih armaturom od PASV-a gotovo je dvostruko veći od progiba ploča armiranih čeličnom mrežastom armaturom. Ta je pojava potpuno obrnuta od pojave progiba kod greda. Pojava većeg progiba pri slomu ploča armiranih armaturom od PASV-a nego ploča armiranih čeličnom mrežastom armaturom može se protumačiti karakteristikama materijala. Glavni je razlog taj što čelična mrežasta armatura ima približno jednaku čvrstoću kao i čelična rebrasta armatura, no za razliku od nje ima približno 7 puta manju relativnu deformaciju pri slomu (slika 17.). Ta relativna deformacija manja je i od maksimalne relativne deformacije armature kod proračuna armiranobetonskih nosača na savijanje (20 %) što nije prihvatljivo. Može se zaključiti da bi se dobilo mnogo duktilnije ponašanje ploča kad bi se umjesto čelične mrežaste armature rabile rebraste pojedinačne šipke armature.

Zahvala

Ispitivanja opisana u ovome članku provedena su u sklopu znanstvene teme br. 0082203 "Primjena nemetalnih materijala u betonskim konstrukcijama" koju podupire Ministarstvo znanosti, obrazovanja i športa Republike Hrvatske.

Posebna zahvala tvrtki VIADUKT d.d. na izradi armiranobetonskih uzoraka te djelatnicima Zavoda za tehničku mehaniku Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu gdje je ispitivanje obavljeno.

LITERATURA

- [1] Kišiček, T.: *Progibi betonskih greda s FRP armaturom*, doktorski rad, Zagreb, 2006.
- [2] Tomičić, I.: *Proračun greda armiranih šipkama od polimera armiranog vlaknima*, Ceste i mostovi, god. 47 (2001.), br. 5-6, str. 117.-124.
- [3] Žarnić, R.: *Osnovne lastnosti polimernih kompozitov*, Gradbeni vestnik, letnik 51, junij, 2002., str. 155.-166.
- [4] Benmokrane, B.; Chaallal, O.; Masmoudi, R.: *Flexural Response of Concrete Beams Reinforced With FRP Reinforcing Bars*, ACI Structural Journal, V. 93, No. 1, January-February 1996., pp. 46.-55.
- [5] Masmoudi, R.; Theriault, M.; Benmokrane, B.: *Flexural Behaviour of Concrete Beams Reinforced With Deformed Fiber Reinforced Plastic Reinforcing Rods*, ACI Structural Journal, V. 95, No. 6, November-December 1998., pp. 665.-675.
- [6] Vijay, P. V.; GangaRao, H. V. S.: *Bending Behaviour and Deformability of Glass Fiber-Reinforced Polymer Reinforced Concrete Members*, ACI Structural Journal, V. 98, No. 6, November-December 2001., pp. 834.-842.
- [7] Tomičić, I.; Sorić, Z.; Kišiček, T.; Galić, J.: *Betonske konstrukcije mostova i zgrada armirane šipkama ili kabelima FRP-a*, Znanstveno stručno savjetovanje "Objekti na autocestama" Graditeljstvo i okoliš, Plitvička jezera, 14.11.-16.11.2002. str. 219.-230.
- [8] Tighiouart, B.; Benmokrane, B.; Gao, D.: *Investigation of Bond in Concrete Member With Fibre Reinforced Polymer (FRP) Bars*, construction and Building Materials 12, 1998., pp. 453.-462.
- [9] Alsayed, S. H.; Al-Salloum, Y.A.; Almusallam, T. H.: *Performance of Glass Fiber Reinforced Plastic Bars as a Reinforcing Material for Concrete Structures*, Composites: Part B 31, 2000., pp. 555-567
- [10] Abdalla, H. A.: *Evaluation of deflection in Concrete members Reinforced With Fibre Reinforced Polymer (FRP) Bars*, Composite Structures 56, 2002., pp. 63.-71.
- [11] Toutanji, H.; Deng, Y.: *Deflection and Crack-Width Prediction of Concrete Beams Reinforced With Glass FRP Rods*, Construction and Building Materials 17, 2003., pp. 69.-74.
- [12] Benmokrane, B.; Zhang, B.; Laoubi, K.; Tighiouart, B.; Lord, I.: *Mechanical and Bond Properties of New Generation of Isorod CFRP Reinforcing Bars for Concrete Structures*, Technical Progress Report, NSERC Research Chair in FRP Reinforcement for Concrete Structures, Canada, April 2001.
- [13] ACI Committee 440, *Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars*, 440.1R-01, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2001.
- [14] Kišiček, T.; Sorić, Z.: *Dijagram moment savijanja – zakrivljenost za armiranobetonske gredne elemente*, Građevinar, 55 (2003.) 4, str. 207.-215.

- [15] Galić, J.; Sorić, Z.; Kišiček, T.; Tomičić, I.: *Preporuke za proračun betonskih konstrukcija armiranih FRP šipkama*, Sabor hrvatskih graditelja 2004, Graditelji – nositelji razvojnih projekata Republike Hrvatske, zbornik radova, Cavtat, 22.4.-24.4.2004., str. 287.-298.
- [16] Kišiček, T.; Žarnič, R.; Sorić, Z.; Galić, J.; Marohnić, M.: *Svojstva polimernih kompozita koji se rabe u graditeljstvu*, Sabor hrvatskih graditelja 2004, Graditelji – nositelji razvojnih projekata Republike Hrvatske, zbornik radova, Cavtat, 22.4.-24.4.2004., str. 309.-320.
- [17] Kindij, A.; Sorić, Z.: *Kabeli i trake od složenih materijala za prednapinjanje*, Građevinar 57 (2005) 5. str. 319-326.
- [18] HRN ENV 1992-1-1:2004. Eurokod 2: Projektiranje betonskih konstrukcija – 1-1. dio: Opća pravila i pravila za zgrade (ENV 1992-1-1:1991)