

Proračun naprezanja prijanjanja između prednapetog AB nosača i FRP-a

Tomislav Brozović¹, prof. dr. sc. **Tomislav Kišiček²**

¹Institut IGH d.d., tomislav.brozovic@igh.hr

²Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, kisha@grad.hr

Sažetak

Istraživanja nosivosti betonskih nosača ojačanih na savijanje FRP-om pokazala su da je delaminacija, odnosno gubitak prijanjanja između FRP-a i betona primarni oblik sloma ojačanog nosača. U ovom radu opisan je proračunski model naprezanja prijanjanja između FRP-a i prednapetog betonskog nosača. Numerički proračun se temelji na određivanju zakrivljenosti poprečnih presjeka duž nosača. Zakrivljenost poprečnih presjeka se određuje pomoću dijagrama moment savijanja – zakrivljenost, koji je opisan sa 5 karakterističnih točaka, odnosno 4 područja u kojima se presjek može nalaziti ovisno o momentu savijanja.

Ključne riječi: prednapeti AB nosač, dijagram moment savijanja – zakrivljenost, prijanjanje, FRP, ojačanje

Bond calculation between prestressed RC girder and FRP

Abstract

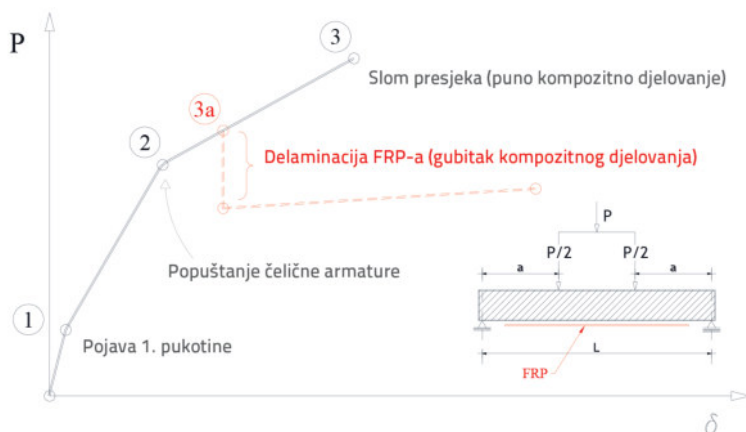
Bond failure and loss of composite action between FRP sheets and concrete surface is the main issue of FRP strengthening technique applied to concrete girders. In this work the procedure for bond shear stress calculation between FRP sheets and prestressed concrete beam is presented. The calculation is based on double integration of the curvature, which can be calculated by a cross-section analysis along the RC beam. Curvature of the cross-section can be determined with the 5-point bending moment – curvature diagram.

Key words: prestressed RC beams, bending moment – curvature diagram, bond shear stress, FRP, strengthening

1 Uvod

Promjena momenta savijanja u betonskoj gredi ojačanoj FRP-om odražava se i na promjenu sile u FRP-u preko posmičnog naprezanja prijanjanja. Stoga je osnovni uvjet uspješnosti primjene FRP-a u ojačanju betonskih greda jaka prijanjajuća veza između FRP-a i betona koja omogućuje njihovo zajedničko spregnuto djelovanje i time veću nosivost ojačanog konstruktivnog elementa.

Dosadašnja su istraživanja pokazala da je raskid prijanjajuće veze i posljedična delaminacija FRP-a od površine betona glavni i izrazito dominantni oblik sloma betonskih nosača pojačanih FRP-om [1]. Takvi oblici sloma (slika 1), neovisno o tome jesu li nastali u zoni sidrenja FRP-a u blizini ležajeva ili su nastali u zoni raspucavanja u sredini raspona nosača, se u pravilu događaju iznenada, bez prethodne najave, sa naglim padom nosivosti i krutosti, te su stoga opasni i nedopustivi.



Slika 1. P- δ dijagram za presjek u sredini raspona slobodno oslonjene AB grede ojačane FRP-om

U sklopu ovog rada prikazan je postupak numeričkog proračuna globalnog naprezanja prijanjanja između FRP-a i prednapete AB grede. Proračun se temelji na analizi zakrivljenosti poprečnih presjeka uzduž nosača. Svaki poprečni presjek duž nosača ima određenu zakrivljenost nastalu zbog naprezanja od momenta savijanja. Za određeni oblik poprečnog presjeka nosača te za poznate mehaničke karakteristike materijala i poznatu količinu i položaj armature i FRP-a, moguće je proračunati dijagram moment savijanja – zakrivljenost ($M - 1/r$) [2]. Pritom se zanemaruje zakrivljenost i progib zbog poprečnih sila.

U radu [3], opisan je postupak proračuna progiba FRP-om ojačanog prednapetog AB nosača na temelju analize zakrivljenosti poprečnih presjeka, određenih pomoću $M - 1/r$ dijagrama. $M - 1/r$ dijagram je u [3] opisan sa četiri karakteristične točke, a koje opisuju: početno stanje (nakon prednapinjanja), pojavu prve pukoti-

ne, popuštanje natege te slom. Međutim, ovisno o koeficijentu armiranja prednapetog nosača i stupnju prednapinjanja, armatura može osim konstruktivne imati i značajnu nosivu ulogu u prijenosu vlačnih naprezanja (djelomično prednapeti nosači), a što je u radovima [3, 4] zanemareno.

U sklopu ovog rada prikazan je proračun koji se bazira na preciznijem $M-1/r$ dijagramu opisanom sa 5 točaka, a u kojem će se uzeti u obzir i pojava popuštanja čelične armature ($M_v, 1/r_v$).

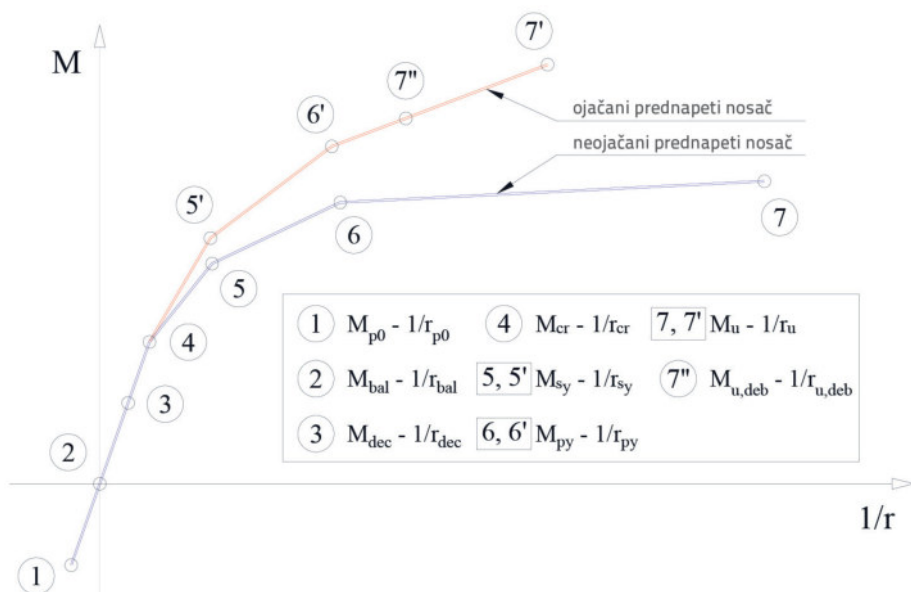
2 Dijagram moment savijanja – zakrivljenost opisan sa 5 karakterističnih točaka

Prvi korak u proračunu progiba, naprezanja u materijalu te proračunu globalnog naprezanja prijanjanja između FRP-a i ojačane prednapete AB grede jest analiza zakrivljenosti poprečnih presjeka uzduž nosača.

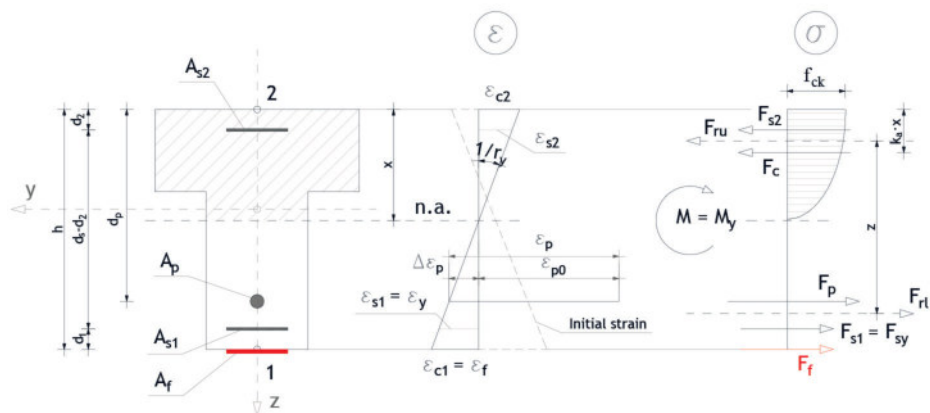
Na $M - 1/r$ dijagramu, u prvom području, koje je omeđeno točkama 1 i 4, (slika 2), presjek nosača se nalazi u stanju naprezanja I, što znači da su vlačna naprezanja u presjeku mala te ih može preuzeti beton. Beton je dakle neraspucan, što rezultira velikim momentom tromosti, odnosno velikom savojnom krutosti nosača. Točka 1 predstavlja početno stanje naprezanja nakon prednapinjanja, dok se u točki 2 presjek nalazi u uravnoteženom (balansiranom) stanju, pri čemu je distribucija napona jednolika po visini presjeka. Daljnjim povećanjem opterećenja, tlačno naprezanje iščezava na gornjem rubu (točka 3 - dekompresija).

Drugo karakteristično područje na $M - 1/r$ dijagramu je omeđeno točkama 4 i 5. Pri opterećenju koje je pridruženo točki 4 dolazi do prekoračenja vlačne čvrstoće betona te do njegovog pucanja, odnosno do otvaranja prve pukotine (prelazak u stanje naprezanja II). Time dolazi i do pada momenta tromosti betonskog presjeka, odnosno do pada krutosti, a što je na dijagramu vidljivo u smanjenju nagiba $M - 1/r$ krivulje. Obzirom da je beton isključen iz prijenosa vlačnih naprezanja, sva vlačna naprezanja u raspucanom presjeku preuzima ugrađena čelična armatura, natege te FRP kao dodatna vanjska armatura.

Ukoliko se dodatno poveća opterećenje nosača, vlačna naprezanja u promatranom kritičnom presjeku nosača rastu te dostižu granicu popuštanja čelične armature (točka 6) i popuštanja natege (točka 7). Nakon pojave popuštanja armature i/ili natege krutost nosača značajno pada i već pri malom prirastu sile značajno raste progib grede. Kritično središnje područje slobodno oslonjenog nosača je u stanju naprezanja III, te u konačnici dolazi do sloma, a koji može biti u obliku drobljenja betona, pucanja čelične armature ili natege, te pucanja ili delaminacije FRP-a.



Slika 2. Usporedba $M - 1/r$ dijagrama za pojačani i nepojačani presjek prednapete AB grede



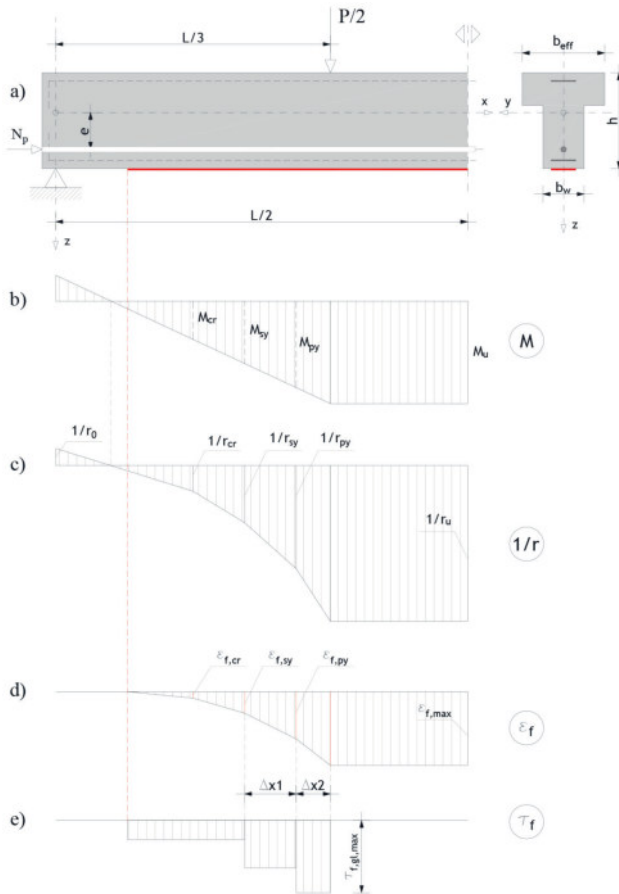
Slika 3. Raspodjela relativnih deformacija i naprezanja u poprečnom presjeku ojačane prednapete AB grede u trenutku popuštanja armature

3 Proračun zakrivljenosti i prijanjanja uzduž nosača

Nakon što se proračunaju karakteristične točke koje opisuju dijagrame odnosa moment savijanja – zakrivljenost, moguće je za neki moment savijanja (M) odrediti pripadnu zakrivljenost ($1/r$).

Za prednapetu AB gredu zakrivljenost nekog poprečnog presjeka se u funkciji momenta savijanja računa prema slijedećim izrazima:

$$1/r = f(M) = \begin{cases} 1/r_0 & \text{za } M = M_0 \\ 1/r_0 + \frac{1/r_{cr} - 1/r_0}{M_{cr} - M_0} (M - M_{cr}) & \text{za } M_0 \leq M \leq M_{cr} \\ 1/r_{cr} + \frac{1/r_{sy} - 1/r_{cr}}{M_{sy} - M_{cr}} (M - M_{sy}) & \text{za } M_{cr} \leq M \leq M_{sy} \\ 1/r_{sy} + \frac{1/r_{py} - 1/r_{sy}}{M_{py} - M_{sy}} (M - M_{py}) & \text{za } M_{sy} \leq M \leq M_{py} \\ 1/r_{py} + \frac{1/r_u - 1/r_{py}}{M_u - M_{py}} (M - M_u) & \text{za } M_{py} \leq M \leq M_u \\ 1/r_u & \text{za } M = M_u \end{cases} \quad (1)$$



Slika 4. Prikaz prednapete AB grede; te dijagrama momenta savijanja (M), zakrivljenosti ($1/r$), relativne deformacije FRP lamele (ϵ_f) i naprezanja prijanjanja (τ_f)

Proračun karakterističnih točaka, tj. parova vrijednosti, kojima se opisuje M-1/r dijagram temelji se na Bernoullijevoj pretpostavci ravnog poprečnog presjeka, pri čemu su uzima u obzir da nema proklizavanja između betona s jedne strane te natega, armature i FRP-a s druge strane.

Za svaku karakterističnu točku M-1/r dijagrama računaju se vrijednosti relativnih deformacija u slojevima presjeka u kojima se polaže armatura, natege i FRP, te na gornjem i donjem rubu betonskog presjeka. Nakon što se za svaku točku iscrta dijagram relativnih deformacija, može se napraviti dijagram odnosa zakrivljenosti ($1/r$) i relativne deformacije u određenom sloju poprečnog presjeka (ε_{c2} , ε_{sv} , ε_{py} , ε_f) [5].

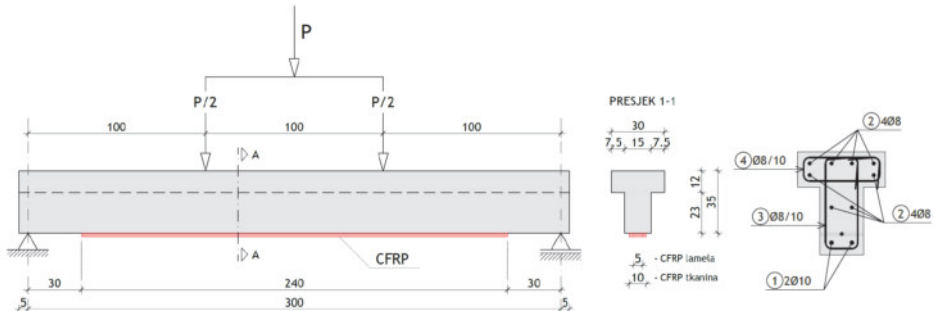
Na slici (4a) prikazan je prednapeti AB nosač opterećen na savijanje koncentriranim silama u trećinama raspona. Za poznate vrijednosti momenta savijanja (slika 4b), na temelju izraza danim u (1), mogu se u diskretnim točkama izračunati redom: zakrivljenost (slika 4c) te relativne deformacije i uzdužna naprezanja u betonu, čeličnoj armaturi te u FRP-u (slika 4d).

Na temelju poznate vrijednosti relativne deformacije u FRP-u može se u nekom intervalu nosača, omeđenom točkama i i i+1, izračunati posmično naprezanje prijanjanja (slika 4e) između FRP-a i betona slijedećim izrazom:

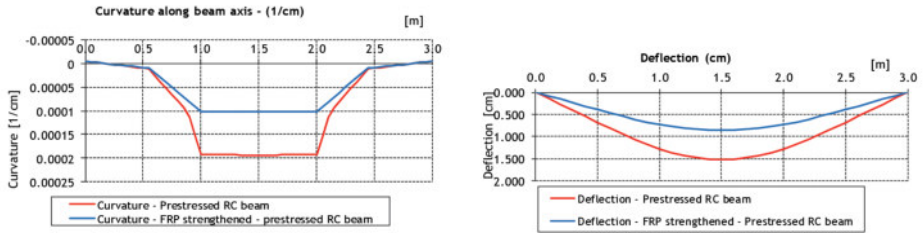
$$\tau_f = \frac{(\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i) \cdot E_f \cdot t_f}{\Delta x} \quad (2)$$

4 Numerički primjer proračuna naprezanja prijanjanja

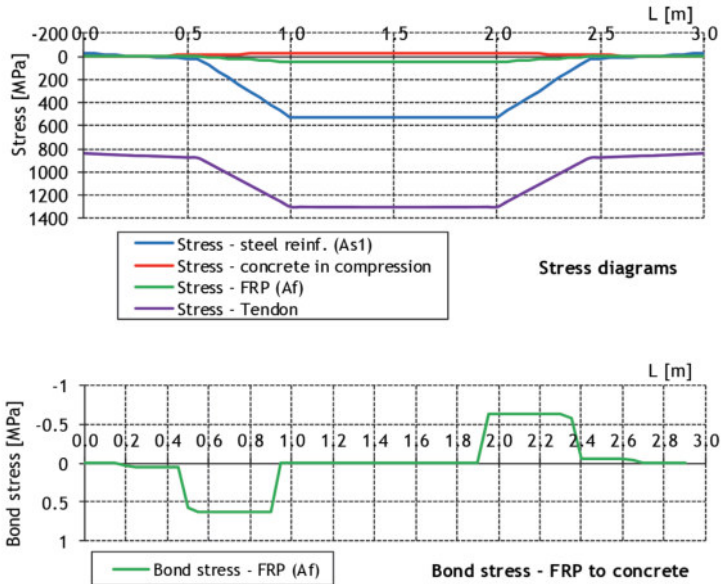
U nastavku se daje numerički primjer proračuna progiba, uzdužnih naprezanja u betonu, armaturi, natezi i FRP-u, te globalnog naprezanja prijanjanja između FRP-a i betona. Proračun je napravljen u programu MS Excel (upis ulaznih podataka i ispis rezultata), dok je proračunski model programiran u VBA-u. U proračunu su uzeti u obzir slijedeći parametri grede i materijala: $L = 3,0$ m, $b_w/b_{eff}/h/h_f/c = 15/30/35/12/2$ cm, tlačna čvrstoća betona: C40/50, $A_s = 3\Phi 12$, $A_{frp} = 50 \times 1,2$ mm, $\Phi_p = 0,5$, $N_p = 80$ kN. Greda je opterećena koncentriranim opterećenjem u trećinama raspona (slika 5).



Slika 5. Geometrijske karakteristike analizirane prednapete AB grede



Slika 6. Usporedba M-1/r dijagrama i progibnih linija ojačane i neojačane grede



Slika 7. uzdužna naprezanja i naprezanje prianjanja između FRP-a i betona

5 Zaključak

U radu je prikazan postupak proračuna naprezanja u betonu, čeličnoj armaturi, nategama te FRP-u u prednapetoj AB gredi ojačanoj na savijanje lijepljenjem FRP-a na vlačnu pojasnicu. Također, prikazan je i proračun naprezanja prianjanja između FRP-a i betona. Postupak se temelji na analizi zakrivljenosti diskretnih točaka nosača. Zakrivljenost se računa pomoću dijagrama moment savijanja – zakrivljenost ($M - 1/r$), opisanog sa 5 karakterističnih točaka. Dosadašnja istraživanja opisivala su $M - 1/r$ dijagram sa 4 točke, pri čemu nije bilo uzimano u obzir popuštanje čelične armature.

Sva su dosadašnja istraživanja o ponašanju prednapetih AB nosača ojačanih na savijanje FRP trakama bila fokusirana na istraživanje nosivosti i krutosti nosača

kroz odnos opterećenja i progiba. Budući je dokaz graničnog stanja naprezanja jedan od ključnih dokaza u provjeri prednapetih nosača, proračunskim modelom opisanim u ovom radu mogu se precizno izračunati uzdužna naprezanja u materijalu te globalno naprezanje prijanjanja između FRP-a i betona.

Literatura

- [1] fib Bulletin No. 90. "Externally applied FRP reinforcement for concrete structures", Technical report, 2019, fib
- [2] Kišiček, T., Sorić, Z.: Dijagram moment savijanja – zakrivljenost za armiranobetonske grede, GRAĐEVINAR 55 (2003) 4, pp 207 – 215
- [3] Kramer, K., W., Rasheed, H.: Analytical load-deflection behavior of prestressed concrete girders strengthened with FRP, ACI Journal Proceedings, Vol. 327, (2018)
- [4] El-Tawil, s., Okeil, A.: Design of concrete bridge girders strengthened with CFRP laminates, Technical report, University of Florida, (2001)
- [5] Czaderski C., Flexural and Shear Strengthening of Reinforced Concrete Structures, in The International Handbook of FRP Composites in Civil Engineering, CRC Press, 2013. p. 235-252