

Ojačanje armiranobetonskih stupova trakama od polimera armiranog vlaknima

Ivan Tomičić

Ključne riječi

stupovi,
ojačanja, PAV (polimer
armiran vlaknima),
traka,
nosivost,
duktilnost

Key words

piers,
strengthenings,
FRP (fibre reinforced
polymer),
strip,
bearing capacity,
ductility

Mots clés

piles,
renforcements,
polymère renforcé
de fibres (PRF),
bande,
capacité portante,
ductilité

Ключевые слова

колонны,
усиления,
PAV (полимер,
армированный
волокнами), лента,
несущая способность,
дуктильность

Schlüsselworte

Stützen,
Verstärkungen,
PAV (faserbewehrtes
Polymer),
Band,
Tragfähigkeit,
Duktilität

I. Tomičić

Pregledni rad

Ojačanje armiranobetonskih stupova trakama od polimera armiranog vlaknima

Prikazana je nova tehnologija ojačanja pravokutnih stupova PAUV trakama. Pretpostavlja se zajednička ovijenost jezgre stupa postojećom poprečnom čeličnom armaturom i dodanim PAUV trakama. Za proračun potrebne armature za ovijanje stupa primjenjivani su aktualni izrazi europskih, američkih i novozelandskih propisa te najnoviji prijedlozi istraživača. Eksperimentalna istraživanja ponašanja ojačanih stupova su pokazala povećanu nosivost, duktilnost te znatnu apsorpciju energije.

I. Tomičić

Subject review

Strengthening reinforced-concrete piers with fibre reinforced polymer strips

The new technology of strengthening rectangular piers with FRP strips is presented. The envelopment of the pier core with the existing transverse steel reinforcement and FRP strips is assumed. Appropriate expressions from European, American and New Zealand regulations, and latest proposals submitted by researchers, are used in the calculation of the quantity of reinforcement to be placed around the pier. Experimental studies of the behaviour of strengthened piers point to an increased bearing capacity, ductility, and significant energy absorption capability.

I. Tomičić

Ouvrage de synthèse

Renforcement des piles en béton armé par les bandes de polymère renforcé de fibres

Une nouvelle technologie de renforcement des piles rectangulaires par les bandes PRF est présentée. L'enveloppement du noyau de la pile avec le ferrailage transversal existant et les bandes PRF est impliqué. Les expressions appropriées, provenant des règlements de l'Europe, de l'Amérique et de la Nouvelle Zélande, ainsi que des recommandations récentes des chercheurs scientifiques, sont utilisées dans le calcul des quantités de ferrailage à mettre en œuvre autour de la pile. Les études expérimentales du comportement des piles renforcées montrent un accroissement important de la capacité portante et de la ductilité, ainsi qu'une capacité d'absorption d'énergie considérable.

И. Томичич

Обзорная работа

Усиление железобетонных колонн лентами из полимера, армированного волокнами

В работе показана новая технология усиления прямоугольных колонн PAUV лентами. Предполагается совместная обмотка ядра колонны существующей поперечной стальной арматурой и дополнительными PAUV лентами. Для расчёта необходимой арматуры для обмотки колонны применялись актуальные выражения европейских, американских и голландских правил, а также новейшие предложения исследователей. Экспериментальные исследования поведения усиленных колонн показали повышенную несущую способность, дуктильность, а также значительную абсорбцию энергии.

I. Tomičić

Übersichtsarbeit

Verstärkung von Stahlbetonstützen mit faserbewehrten Polymerbändern

Dargestellt ist eine neue Technologie der Verstärkung rechteckiger Stützen mit PAUV Bändern. Vorausgesetzt ist die gemeinsame Ummantelung des Stützenkerns mit der bestehenden Stahlquerbewehrung und den beigefügten PAUV Bändern. Für die Berechnung der nötigen Bewehrung für die Stützenummantelung wurden die aktuellen Formeln europäischer, amerikanischer und neuseeländischer Vorschriften angewendet, sowie auch die neuesten Vorschläge der Forscher. Experimentale Forschungen des Benehmens der verstärkten Stützen zeigten erhöhte Tragfähigkeit, Duktilität und bedeutende Energieabsorption.

Autor: Prof. emer. dr. sc. **Ivan Tomičić**, dipl. ing. građ., Vramčeva 21, Zagreb

1 Uvod

Mnoge armiranobetonske konstrukcije zgrada i mostova u svijetu pa tako i u Hrvatskoj, prije 1971. godine, pokazale su se nedovoljno otporne na djelovanje sila potresa. To su potvrdili potresi 60-ih godina u Americi, Japanu i drugdje, te nedavno 1994. u Northridgeu, 1995. u Kobeu i 1999. godine u Kocaeli. Neke su se srušile, a više ih je bilo oštećeno. Kod nas i u bližem susjedstvu to su potvrdili potresi u Skoplju, Bukureštu, Banjoj Luci, Dubrovniku, Budvi i okolici. Najčešća oštećenja armiranobetonskih konstrukcija bila su na stupovima s nedovoljno poprečne armature, u području potencijalnih plastičnih zglobova, potrebne za predviđenu disipaciju seizmičke energije.

Oblikovanje plastičnih zglobova preferira se u gredama višekratnih armiranobetonskih okvira gdje su manje uzdužne sile. Oni se, međutim, ne mogu izbjeći u podnožju višekratnih okvira i stupovima mostova, gdje su i najveće uzdužne sile. Namjena je poprečne armature, i one za propletanje, višestruka. Ona služi za prihvaćanje poprečnih sila, pridržanje glavne uzdužne armature od izvijanja te za ovijanje betonske jezgre, kako bi se poboljšala nosivost i deformabilnost. Povećano plastično deformiranje, prvenstveno uzdužne vlačne armature, prije sloma tlačnog područja, pridonosi duktilnosti presjeka, a time svojstvu trošenja seizmičke energije. Pri tome uzdužna tlačna sila djeluje nepovoljno zbog smanjenja vlačnih deformacija čelika i povećanja tlačnih deformacija u betonu. Da bi se elementi, pretežito tlačno napregnani, dostatno deformirali, odnosno bili duktilni i u prisutnosti veće uzdužne sile, potrebna je znatna poprečna armatura za ovijanje, kako bi se osigurala predviđena disipacija energije.

U vrijeme građenja starijih zgrada i mostova nije se puno znalo o ulozi poprečne armature u povišenju duktilnosti, vrlo traženog svojstva konstrukcija u seizmičkim područjima. Mnogobrojna istraživanja u svijetu pridonijela su da se takvim armiranobetonskim sustavima može povećati svojstvo duktilnosti naknadnim ovijanjem betonske jezgre, u području plastičnih zglobova, dodavanjem poprečne armature oblika spona ili spirale u dograđenu betonsku oblogu ili samo čeličnog plašta. Ovaj način ojačanja danas se, zbog česte korozije čelika, sve manje primjenjuje.

Jedna nova tehnologija ojačanja koja rabi trake ili cijele plahte od polimera armiranog vlaknima (PAV), kao alternativa tradicijskim metodama, zbog dokazanih prednosti, a osobito zbog neosjetljivosti na koroziju, sve se češće primjenjuje, osobito za stupove kružnog presjeka gdje je ovijanje najdjelotvornije. Kada se želi ojačati stupove kvadratnog presjeka, ima prijedloga da se takve elemen-

te ovije čelikom ili trakama od PAV-a, s tim da se stup, kvadratnog ili pravokutnog presjeka, dodavanjem novog betona oblikuje u kružni odnosno eliptični presjek, kako bi se ovijanjem postigla djelotvornost što bliža onoj kada se ovija kružni presjek. Kako je ovaj način ojačavanja skup te ima za posljedicu loš estetski izgled stupa proširenog u području plastičnog zgloba i nešto malo izvan njega, ovaj način poboljšavanja svojstava stupa rijetko se primjenjuje. Najnoviji prijedlog ojačavanja kvadratnih i pravokutnih stupova, na osnovi teorijskih i eksperimentalnih istraživanja, nudi primjenu traka od polimera armiranog vlaknima (PAV) i bez zapaženije promjene izmjera stupa (slika 1.).



Slika 1. Ojačanje PAV plahtama: (lijevo) stupa, (desno) stupova vijadukta

U ovome radu bit će skraćeno opisana istraživanja, navedeni rezultati ispitivanja ojačanih stupova novom tehnologijom, osnovna svojstva tankostijenih proizvoda od PAV-a te postupak proračuna potrebne ploštine traka za ovijanje, kako bi se u području plastičnog zgloba takvih stupova osigurala potrebna nosivost, duktilnost te disipacija seizmičke energije.

2 Tankostijeni PAUV proizvodi

Od polimera armiranog vlaknima proizvode se šipke i žice, natege i tankostijeni proizvodi (trake, plahte, lamele). Vlakna mogu biti staklena, aramidna i ugljična. Zbog dokazanih prednosti, u građevinarstvu se najčešće rabe proizvodi od polimera armiranog ugljičnim vlaknima (PAUV). Također većina istraživača i projekatanta odabire trake i plahte za ojačanje armiranobetonskih stupova od PAUV-a pa će one biti zastupljene i u ovome radu.

Trake od PAUV-a proizvode se od neprekinutih vlakana povezanih epoksidnom smolom. Osim za ojačanje armiranobetonskih elemenata, trake i plahte rabe se za obnovu oštećenih elemenata te zaštitu onih u agresivnoj sredini za čelik.

Proizvodi od polimera armiranog ugljičnim vlaknima ponašaju se elasto-linearno do sloma, imaju niži modul elastičnosti, kao i graničnu deformaciju od čeličnih proizvoda za građevinarstvo, ali zato veću vlačnu čvrstoću (tablica 1.). Istaknuti nedostatak traka od PAUV-a jest pomanjkanje duktilnosti, prihvatljiv pad čvrstoće pri savijanju oko malog promjera trna, i pod dugotrajnim naprezanjem, bliskom vlačnoj čvrstoći ($0,9 f_p$), popuštanje (puzanje) bez povećanja naprezanja. Dobra svojstva ovog proizvoda su neosjetljivost na koroziju, superiorno ponašanje pod dinamičkim opterećenjem te mala težina koja omogućuje brzo postavljanje uz minimum rada.

Osnovna svojstva traka od PAV-a primijenjenih pri nedavnom istraživanju [7], armiranih ugljičnim i staklenim vlaknima, su u tablici 1. Trake od PAUV-a bile su široke 610 mm, a debele 1,0 mm, dok su trake od polimera armiranog staklenim vlaknima (PASV) bile široke 914 mm, a debele 1,25 mm. Vlakna traka postavljena su u smjeru ovijanja. Epoksidna smola (matrica) dobivala se je miješanjem dviju komponenata, A i B.

Tablica 1. Svojstva traka od polimera armiranog vlaknima

Traka	Debljina [mm]	Vlačna čvrstoća [N/mm ²]	Granična deformacija	Modul elastičnosti [N/mm ²]
PAUV	1,00	962	0,0126	76350
PASV	1,25	563	0,021	21346

Trake se ovijaju oko stupa koji se prethodno obradi tako da uglovi budu zaobljeni, a vanjske plohe sanirane i pjeskarene. Prije postavljanja traka, površina betona natopi se epoksidnom smolom, kako bi se poboljšala prionljivost (lijepljenje). Trake se proizvode tako da se vlakna napnu na plastičnoj podlozi te saturiraju epoksidnom smolom uz pomoć četaka. Tako priređene trake ovijaju se oko stupa blago napete, uz nastojanje da prijanjaju uz plohe stupa i bez zaostalih mjehurića zraka. Slojeve traka valja preklapati više od 150 mm. Ojačani stup trakom od PAUV-a treba njegovati (održavati optimalnu temperaturu) barem 6 dana za postizanje pune čvrstoće.

3 Eksperimentalna istraživanja

Projektiranje i građenje armiranobetonskih konstrukcija zgrada i mostova u Sjevernoj Americi do 1971. godine provodilo se prema, u ono vrijeme, aktualnim propisima, odnosno pravilima struke. Prema tim propisima, stupovi okvirnih konstrukcija i mostova, naprezanih seizmičkom kombinacijom djelovanja na ekscentrični tlak, uglavnom nisu imali dovoljno poprečne armature koja bi osigurala dostatnu duktilnost, adekvatnu predviđenoj disipaciji seizmičke energije. Kako je već rečeno, mnogi stupovi dimenzionirani u skladu s tim propisima, izloženi snažnim potresima 60-ih godina u Americi, srušili su se

ili zadobili velika oštećenja. Za preostale stupove, koji su izdržali potres, preporučeno je da se ojačaju i osposobe za prihvat sličnih sila potresa, bez rušenja i velikih oštećenja, u predviđenom vijeku uporabe.

U početku su se stupovi ojačavali dodavanjem armiranobetonskog ili čeličnog plašta, a kasnije, zbog nastalih oštećenja korozijom, počele su se primjenjivati tehnologije koje rabe nemetalne proizvode od PAV-a. Najčešće se to odnosilo na stupove kružnog presjeka gdje je ovijanje najdjelotvornije i najlakše. Tek su kasnije počela istraživanja ojačanja stupova, kvadratnih i pravokutnih presjeka, trakama od polimera armiranog vlaknima.

Nedavna vrlo opsežna istraživanja ojačavanja armiranobetonskih stupova, kvadratnog presjeka, trakama od PAUV-a, načinili su R.D. Iacobucci, S.A. Sheikh i O. Bayrak [7]. Cilj njihovih istraživanja bio je ustanoviti djelotvornost ovijanja stupova, nedovoljno duktilnih i neduktilnih, ali i oštećenih, nemetalnim trakama ili plaktama.

Istraživači su ispitali 8 uzoraka, izmjera $305 \times 305 \times 1473$ mm, zaobljenih uglova ($r = 16$ mm), spojenih s blokom (simulacija temelja) veličine $508 \times 762 \times 813$ mm. Uzorci su bili ispitani cikličkim naprezanjem na savijanje, uz stalnu uzdužnu tlačnu silu. Glavna uzdužna i poprečna armatura bila je proračunana i konstruirana u skladu s propisima do 1971. godine. Glavni parametri studije bili su: broj traka od PAUV-a u kritičnom području (plastični zglob), utvrđenost prethodnog oštećenja stupa i razina uzdužne sile. Uzorci stupova bili su armirani sa 8 šipki, jednoliko raspoređenih po obodu, i sponama (obodne i unutrašnje) koje pridržavaju svaku uzdužnu šipku od lokalnog izvijanja. Omjer ploštine jezgre i punog presjeka uzorka bio je $A_0/A_g = 0,77$.

Eksperimentiralo se s dvije grupe uzoraka. U prvoj su grupi bili kontrolni uzorci proračunani po američkim propisima koji su vrijedili do 1971. pa u skladu s novim ACI-propisima nemaju dovoljno poprečne armature za osiguranje potrebne duktilnosti. U drugoj grupi stupova bili su isto takvi stupovi, ojačani omotačem od PAUV-a u području plastičnog zgloba, a izvan njega PASV trakama.

Za utvrđivanje ponašanja uzoraka izabrani su sljedeći pokazatelji: faktor duktilnosti izražen omjerom pomaka i omjerom zakrivljenosti, kumulativni omjer duktilnosti kao pokazatelj deformabilnosti, nastala oštećenja i količina disipacije energije u cijelom elementu i, posebno, u području plastičnog zgloba.

Uzorci s nedovoljno poprečne armature, prema zahtjevima ACI 318-2002 (1. grupa), ciklički naprezani momentima savijanja i konstantnom tlačnom silom, pokazali su nisku razinu deformabilnosti. Vrlo je brzo došlo do pojave pukotina i otpadanja zaštitnog sloja te oštećenja zbog izvijanja uzdužnih šipki. Sve to dovelo je do opće-

poznatog oštećenja, svojstvenog krhkom slomu, nedovoljno duktilnih stupova.

Ovijeni uzorci, jednako naprezani, ponašali su se, manje ili više, duktilno, ovisno o broju slojeva traka od PAUV-a (1 do 3 sloja). U početku ispitivanja, odnosno kod prvih ciklusa opterećenja, čulo se pucketanje matrice očvrstnule obloge od PAUV-a. Uz porast poprečnog širenja pod uzdužnom silom i cikličkim poprečnim pomacima, uz pucketanje, pojavile su se brazde u kompozitu obloge te odvajanje omotača od betonskog dijela stupa. Kod većih poprečnih pomaka došlo je do popuštanja ojačanja, izvijanja uzdužnih šipki te pucanja vlakana ugrađenih u traku omotača. Rušenje stupa pratio je glasan zvuk, osobito kod uzoraka naprezanih velikom uzdužnom silom. Neki su uzorci slomljeni zbog savijanja i posmika kidanjem šipki.

Ponašanje stupova, ciklički naprezanih, prikazano je dijagramom moment savijanja-zakrivljenost ($M-\phi$). Ojačani stupovi u usporedbi s nedovoljno ovijenim pokazali su znatno veće usporedne parametre, kao što je stupanj duktilnosti, disipacija energije, broj cikličkih opterećenja te nosivost na poprečne sile i momente savijanja, to više što je bio veći broj traka.

Kako povećanje momenta nosivosti u području plastičnog zgloba može izazvati slom izvan zgloba, predlaže se element dimenzionirati u tim područjima na savijanje i poprečne sile prema kapacitetu nosivosti u području plastičnog zgloba.

Eksperimenti su također potvrdili poznatu činjenicu da visoka razina uzdužne tlačne sile nepovoljno djeluje na poželjna seizmička svojstva, te ju valja unijeti u izraz za proračun poprečne armature, uključujući i trake za ojačanje.

Ova istraživanja pokazala su da se i oštećeni stupovi mogu ojačati slojevima traka od PAUV-a, ali ih je prethodno potrebno sanirati. Međutim, veći broj traka bit će potreban za dostizanje adekvatne duktilnosti i drugih, u građenju seizmički otpornih konstrukcija, poželjnih svojstava u odnosu na neoštećene, poprečnom armaturom deficitarne stupove. Usporedba ponašanja stupova nedovoljno armiranih poprečnom armaturom, pa naknadno ojačanih trakama od PAUV-a i onih dostatno poprečno armiranih u skladu s ACI-2002, pokazuje superiorno ponašanje prve skupine stupova prema drugoj.

4 Proračun ojačanja PAUV trakama

4.1 Općenito

Metode proračuna potrebne ploštine traka od PAUV-a za ovijanje pravokutnih armiranobetonskih stupova, s nedovoljno poprečne armature, nema u pristupačnoj

literaturi. U ovome radu primjenjivat će se izrazi prema europskim prednormama ENV 1998 [1,2], američkom propisu ACI 318-99 [3, 4], novozelandskoj normi NZS 3101 iz 1995. godine [5], te onima koji su rezultat najnovijih istraživanja [6] za proračun potrebne čelične armature za ovijanje. Izrazima prema europskim i novozelandskim normama te onim istraživača uzima se u obzir razina uzdužne sile, što je kvaliteta u odnosu na američke propise, koje tu veličinu ne uključuju. U idućem će se postupku proračuna potrebna ploština traka od PAUV-a odrediti iz pretpostavke zajedničkog sudjelovanja u ovijanju, postojeće čelične poprečne armature i dodatnih traka od PAUV-a, u odnosu njihovih krutosti odnosno umnožaka ploštine i modula elastičnosti svake komponente [8]. Pri uporabi izraza za ovijanje, ploština traka bit će zamijenjena adekvatnom ploštinom čelika.

4.2 Izrazi prema propisima za proračun poprečne armature

a) Prijedlog prema europskim propisima ENV 1998, dio 1. i 2.

Za zgrade

$$\alpha \cdot \omega_{wd} \geq 30 \cdot \mu_{1/r} \cdot v_d \cdot \varepsilon_{sy,d} \frac{b_c}{b_0} - 0,035 \quad (1)$$

gdje je:

$$\omega_{wd} = \frac{(\text{volumen spona za ovijanje})f_{yd}}{(\text{volumen betonske jezgre})f_{cd}}$$

$\mu_{1/r}$ - zahtijevana duktilnost presjeka

v_d - $N_{Ed}/(A_c f_{cd})$ - bezdimenzijska proračunska uzdužna sila

f_{cd} = f_{ck}/γ_c - proračunska čvrstoća betona

f_{ck} - karakteristična tlačna čvrstoća betona

γ_c = 1,5 - koeficijent sigurnosti za beton

f_{yd} = f_{yk}/γ_s - proračunska granica popuštanja čelika za ovijanje

f_{yk} - karakteristična granica popuštanja čelika

γ_s = 1,15 - koeficijent sigurnosti za čelik

$\varepsilon_{sy,d}$ - proračunska deformacija čelika koja odgovara računskoj granici popuštanja

$A_c = b_c \cdot h_c$ - ukupna ploština betonskog presjeka

$A_0 = b_0 \cdot h_0$ - ukupna ploština betonske jezgre presjeka (osna izmjera spona)

α - opća učinkovitost ovijanja ($\alpha = \alpha_n \cdot \alpha_s$).

Za pravokutni presjek bit će:

$$\alpha_n = 1 - \sum_n b_i^2 / (6A_0),$$

$$\alpha_s = (1 - s / (2b_0))(1 - s / (2h_0)),$$

gdje je n broj točaka u ravnini spona kojima se uzdužna armatura pridržava od izvijanja, b_0 i h_0 izmjere jezgre, mjerene od osi do osi spona, b_c i h_c izmjere stupa, "s" razmak spona, a b_i razmak pridržanih uzdužnih šipki.

Za mostove

$$\omega_{wd,r} = 1,74 \frac{A_c}{A_0} (0,009 \mu_{l,r} + 0,17) \eta_k \quad (2)$$

$$-0,07 \geq \omega_{wd,\min}$$

gdje je:

$$\eta_k = N_{Ed} / (A_c f_{ck}) - \text{bezdimenzijska proračunska uzdužna sila}$$

N_{Ed} - proračunska uzdužna sila za seizmičku kombinaciju djelovanja.

Mehanički koeficijent armiranja iznosi:

$$\omega_{wd} = \rho_w \cdot f_{yd} / f_{cd}, \quad (3)$$

gdje je ρ_w koeficijent armiranja poprečnom armaturom.

Za pravokutni poprečni presjek stupa bit će:

$$\rho_w = A_{sw} / s \cdot b \quad (4)$$

gdje je:

A_{sw} - ukupna ploština poprečne armature spona po opsegu i onih za propletanje u jednom smjeru

s - razmak poprečne armature (spona) u smjeru osi stupa

b - izmjera jezgre okomite na smjer promatranja (vanjska mjera obodne spona).

Iz gornjih izraza izlazi:

$$A_{sw} = \rho_w \cdot s \cdot b = \omega_{wd} \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot s \cdot b. \quad (5)$$

b) Prijedlog prema ACI 318-99

Potrebna ploština zatvorenih spona i onih za propletanje, na razmaku "s" uzduž stupa, u jednome smjeru, daje se trima izrazima. Mjerodavan je onaj izraz koji daje veću vrijednost:

$$A_{sh} = 0,30s \cdot h_c \frac{f_{ck}}{f_{yh}} \left(\frac{A_c}{A_0} - 1 \right) \quad - \text{ za zgrade i mostove} \quad (6)$$

$$A_{sh} = 0,09s \cdot h_c \frac{f_{ck}}{f_{yh}} \quad - \text{ za zgrade} \quad (7)$$

$$A_{sh} = 0,12s \cdot h_c \frac{f_{ck}}{f_{yh}} \quad - \text{ za mostove}, \quad (8)$$

gdje je h_c izmjera jezgre, mjerena od osi do osi vanjske spona u promatranom smjeru.

c) Prijedlog novozelandske norme NZS 3101 za zgrade i mostove

Ukupna ploština poprečne armature, u jednom smjeru, bit će:

$$\frac{A_{sh}}{s_h \cdot h_c} = \frac{A_c}{A_0} \frac{1,3 - \rho_t \cdot m}{3,3} \frac{f_{ck}}{f_{yh}} \frac{N_{Ed}}{\phi \cdot f_{ck} \cdot A_c} - 0,006 \quad (9)$$

gdje je:

$\rho_t \cdot m$ - mehanički koeficijent armiranja ($m = f_y / (0,85 f_{ck})$)

ρ_t - koeficijent armiranja glavne uzdužne armature

ϕ - faktor redukcije čvrstoće betona za koji se uzima da je 0,85 (duktilna konstrukcija)

s_h - razmak spona uzduž stupa

N_{Ed} - proračunska uzdužna sila za seizmičku kombinaciju djelovanja.

d) Prijedlog istraživača za NZS 3101

Primjenjuje se izraz predložen kada se rabi beton i čelik visokih svojstava i da bude dopuna novoj novozelandskoj normi NZS 3101.

Ukupna ploština poprečne armature u jednome smjeru bit će:

$$\frac{A_{sh}}{s_h \cdot h_c} = \frac{A_c}{A_0} \frac{(\phi_u / \phi_y) - 30 \rho_t \cdot m + 22}{\lambda} \frac{f_{ck}}{f_{yh}} \frac{N_{Sd}}{\phi \cdot f_{ck} \cdot A_c} \quad (10)$$

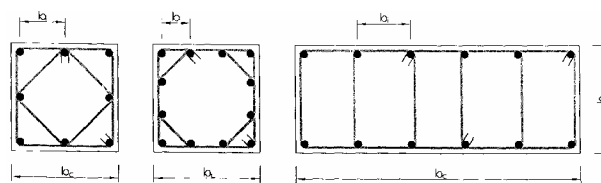
gdje je:

ϕ_u / ϕ_y - koeficijent duktilnosti izražen omjerom zakrivljenosti

$\lambda = 91 - 0,1 f_{ck}$ - faktor ovisan o čvrstoći betona.

U izrazima od (1) do (10) rabljene su originalne oznake dane normama i prijedlogom istraživača, tako da ima primjera da za isti pojam imamo dvije oznake, a i primjera da se neke rabljene izmjere razlikuju u nijansama.

Primjeri ovijanja kvadratnih i pravokutnih presjeka stupova prikazani su na slici 2.



Slika 2. Primjeri armiranja stupova za ovijanje i propletanje (oznake prema [1])

4.3 Debljina PAUV omotača i broj traka

Primjenom zakona superpozicije, ukupna ploština čelične armature za ovijanje bit će:

$$A_{sw} = A_{sh} = \bar{A}_{sh} + \bar{A}_{ph} \quad (11)$$

iz čega se dobije

$$\bar{A}_{ph} = A_{sh} - \bar{A}_{sh} \quad (12)$$

gdje je:

\bar{A}_{sh} - postojeća poprečna čelična armatura u stupu u jednome smjeru

\bar{A}_{ph} - ukupna dodana ploština traka u jednome smjeru svedena na čelik.

Do granice popuštanja vlačna naprezanja u čeliku rastu linearno kao i u PAUV traci. Nakon dostizanja ove granice, naprezanje u čeliku je u blagom porastu do granične deformacije ε_{su} (kraj područja ojačanja), dok je ono u PAUV traci u stalnom porastu.

Nakon dostizanja čvrstoće čelika, slijedi padajuća grana dijagrama $\sigma_s - \varepsilon_s$. Čelik se rasterećuje, dok se PAUV traka sve više napreže te lomi nakon dostizanja svoje granične deformacije, a potom i čelik.

Traka se dimenzionira na naprezanje koje odgovara deformaciji kada čelik počinje popuštati.

Ploština PAUV traka u jednome smjeru jest:

$$A_{ph} = 2 \cdot t_p \cdot s = \bar{A}_{ph} \cdot E_s / E_p, \quad (13)$$

a debljina traka jest:

$$t_p = \frac{\bar{A}_{ph}}{2 \cdot s} \cdot \frac{E_s}{E_p}. \quad (14)$$

4.4 Primjer

Valja postojeći stup mosta, izmjera 50×50 cm, sustava konzola, proračunati u području plastičnog zgloba, naprežanog simultano momentima savijanja $M_{Sdx} = 600$ kNm, $M_{Sdy} = 160$ kNm te uzdužnom silom $N_{Sd} = 3000$ kN, izazvanih seizmičkom kombinacijom djelovanja te, ako je potrebno, ojačati. Kvaliteta materijala: beton C 40/50 N/mm² i čelik za poprečnu i uzdužnu armaturu 500/540 N/mm². Za poprečno ojačanje stupa treba rabiti trake od PAUV-a, izmjera 1×610 mm, svojstava prema tablici 1. Postojeća simetrična uzdužna armatura je $6\phi 22 \dots 22,81$ cm² uz jednu stranicu, a poprečna $4\phi 10/20$ cm, simetrična, u jednom smjeru, odnosno $\bar{A}_{sh} = 0,79 \times 4 = 3,16$ cm².

Glavna uzdužna armatura

$e_y = 600/3000 = 0,20$ m; $e_x = 160/3000 = 0,053$ m;
 $tg\Theta = 0,053/0,20 = 0,265$; $\Theta = 14,9^\circ \sim 15^\circ$

$f_{cd} = 40/1,5 = 26,7$ N/mm²;
 $f_{yd} = 500/1,15 = 434,8$ N/mm²;
korekcijski faktor $k = 0,875$

$$\nu_{Sd} = \frac{3000}{2,67 \cdot 50 \cdot 50} = 0,449$$

$$\mu_{Sd} = \frac{3000 \cdot 20,0}{2,67 \cdot 50 \cdot 50^2} \sqrt{1 + \left(\frac{0,053 \cdot 0,5}{0,20 \cdot 0,5} \right)^2} = 0,186$$

Za $\Theta = 15^\circ$, bit će $\omega_t = 0,625$ te ukupna uzdužna armatura

$$A_s = 0,625 \cdot 0,85 \cdot 40 \cdot 0,875 \cdot 50 \cdot 50 / 500 = 92,97 \text{ cm}^2$$

Uz jednu stranicu bit će

$$A_{s1} = 92,97/4 = 23,2 \text{ cm}^2, \text{ zadovoljava postojeća armatura } 6\phi 22 \dots 22,81 \text{ cm}^2$$

Koeficijent armiranja stupa iznosi:

$$\rho_s = 4 \cdot 22,81 / (50 \cdot 50) = 0,0365$$

Poprečna armatura za ovijanje jezgre

Težište postojeće poprečne armature i slojeva traka od PAUV-a

Pretpostavlja se da će stup biti ojačan s tri trake debljine 1,0 mm

Ploština postojeće armature uz jednu stranicu

$$\bar{A}_{sh1} = 4\phi 10 \cdot 0,5 = 4 \cdot 0,79 \cdot 0,5 = 1,58 \text{ cm}^2$$

Površina traka na visini $s=20$ cm uz jednu stranicu

$$A_{ph1} = 3 \cdot 0,1 \cdot 20 = 6,0 \text{ cm}^2$$

$$\bar{A}_{ph1} = A_{ph1} \frac{E_p}{E_s} = 6,0 \frac{76,35}{200} = 2,29 \text{ cm}^2$$

Težište kompozita u odnosu na vanjski rub stupa

$$d_k = 1,58 \cdot 3,0 - 2,29 \cdot 0,15 / (1,58 + 2,29) = 1,14 \text{ cm}$$

Proračunske vrijednosti

$$h_c = 47 \text{ cm}, d_0 = b_0 = 48 \text{ cm}, A_0 = 48 \cdot 48 = 2300 \text{ cm}^2, A_C = 50 \cdot 50 = 2500 \text{ cm}^2$$

ENV 1998, dio 2-izraz (2)

$$\eta_k = 3000 / (2500 - 4,0) = 0,3, \mu_{1/r, \min} = 13$$

$$\omega_{wd, r} = 1,74 \frac{2500}{2300} (0,009 \cdot 13 + 0,17) 0,3 - 0,07 = 0,093 < \omega_{w, \min} = 0,12$$

$$\rho_w = 0,12 \cdot 26,7 / 434,8 = 0,0074$$

Debljina omotača i broj traka

$$A_{sw} = 0,0074 \cdot 20 \cdot 48 = 7,1 \text{ cm}^2$$

Potrebna je dodatna poprečna armatura (trake od PAUV-a)

$$\bar{A}_{ph} = 7,1 - 3,16 = 3,94 \text{ cm}^2$$

$$t_p = 3,94 / (20 \cdot 2) \cdot 200 / 76,35 = 0,258 \text{ cm} \dots 2,6 \text{ mm (3 trake)}$$

ACI 318-99 - izrazi (6) i (8)

$$A_{sh} = 0,30 \cdot 20 \cdot 47 \frac{40}{500} \left(\frac{2500}{2300} - 1 \right) = 1,92 \text{ cm}^2$$

$$A_{sh} = 0,12 \cdot 20 \cdot 47 \frac{40}{500} = 9,02 \text{ cm}^2$$

$$\bar{A}_{ph} = 9,02 - 3,16 = 5,86 \text{ cm}^2$$

$$t_p = 5,86 / (20 \cdot 2) \cdot 200 / 76,35 = 0,38 \text{ cm} \dots 3,8 \text{ mm (4 trake)}$$

NZS 3101 - 1995 - izraz (9)

$$\frac{A_{sh}}{s_h \cdot h_c} = \frac{2500}{2300} \frac{13 - 0,0365 \frac{500}{0,85 \cdot 40}}{3,3} \frac{40}{500} \frac{3000}{0,85 \cdot 4,0 \cdot 2500} - 0,006 = 0,00109$$

$$A_{sh} = 0,00109 \cdot 20 \cdot 47 = 1,03 \text{ cm}^2 \text{ (nije potrebno ojačanje)}$$

Prijedlog istraživača - izraz (10)

Pretpostavlja se da je materijal visokih svojstava

$$\lambda = 91 - 0,1 \cdot 40 = 87$$

$$\frac{A_{sh}}{s_h \cdot h_c} = \frac{2500}{2300} \frac{13 - 30 \cdot 0,0365 \frac{500}{0,85 \cdot 40} + 22}{87} \frac{40}{500} \frac{3000}{0,85 \cdot 4,0 \cdot 2500} = 0,00665$$

$$A_{sh} = 0,00665 \cdot 20 \cdot 47 = 6,26 \text{ cm}^2$$

$$\bar{A}_{ph} = 6,26 - 3,16 = 3,1 \text{ cm}^2$$

$$t_p = 3,1 / (20 \cdot 2) \cdot 200 / 76,35 = 0,203 \text{ cm} \dots 2,0 \text{ mm (2 trake)}$$

Tablica 2. Rezultati proračuna debljine omotača od PAUV-a

R. br.	Izraz za A_{sh}	η_k	A_{sh} (cm ²)	\bar{A}_{sh} (cm ²)	\bar{A}_{ph} (cm ²)	t_p (mm)	Broj traka
1	ENV (2)	0,30	7,10	3,16	3,94	2,6	3
2	ACI (6)	-	1,92	3,16	-	-	-
3	ACI (8)	-	9,02	3,16	5,86	3,8	4
4	NZS (9)	0,35	1,03	3,16	-	-	-
5	Prijed.(10)	0,35	6,26	3,16	3,10	2,0	2

Sile u horizontalnoj armaturi

Sila u čeličnim sponama

$$\varepsilon_{yd} = 500 / (200000 \cdot 1,15) = 0,0022, f_{yd} = 500 / 1,15 = 434,8 \text{ N/mm}^2$$

$$F_s = 1,58 \cdot 43,48 = 68,7 \text{ kN}$$

Sila u trakama

$$F_p = 6,0(7635 \cdot 0,0022) = 100,8 \text{ kN}$$

$$F_y = 169,5 \text{ kN}$$

Za graničnu deformaciju čelika $\varepsilon_{su} = 0,00235$, bit će

$$F_s = 1,58 \cdot 54 / 1,15 = 74,2 \text{ kN}$$

$$F_p = 6,0(7635 \cdot 0,00235) = 107,65 \text{ kN}$$

$$F_u = 181,85 \text{ kN} < F_{Rp} = 6,0 \cdot 96,2 / 1,5 = 384,8 \text{ kN}$$

gdje je $\gamma_f = 1,25 \cdot 1,2 = 1,5$ [1] (uključen nepovoljni utjecaj okoliša)

Nakon dostizanja proračunske čvrstoće čelika, trake su dostatno jake za prihvaćanje ukupne vlačne sile u poprečnoj armaturi. Do sloma će doći kada deformacija u traci dostigne proračunsku $\varepsilon_{fud} = 0,0083 > \varepsilon_{su}$ (deformacija čvrstoće čelika).

4.5 Komentar uz primjer

Ukupna potrebna ploština armature za ovijanje stupova proračunana je prema pet izraza. Rezultati za ploštinu ojačanja, dobivenu prema tim izrazima, variraju od 3,10 do 5,86 cm², odnosno debljina slojeva traka od PAUV-a od 2,0 do 3,8 mm, ili nije potrebna.

Izraze prema ACI 318-99 ne preporučuje se rabiti zbog izostavljanja razine uzdužne sile. Također izraz aktualne novozelandske norme ne preporučuje se primjenjivati kada se rabe betoni i čelici visokih svojstava. Umjesto tog izraza, kada se rabi materijal visokih svojstava istraživači predlažu novi, a koji bi trebao biti usvojen u budućoj novozelandskoj normi NZS. U ovom primjeru uzeto je da postojeći materijal stupa mosta ima visoka svojstva, iako su ona negdje na granici običnih i visokih svojstava. Može se kazati da izraz prema ENV 1998, koji je u funkciji relevantnih faktora, daje pouzdane vrijednosti te ga autor ovog rada predlaže za uporabu.

Prema preporukama u Bulletinu 14 FIB-a [10], dimenzioniranje PAUV traka moglo bi se provesti kod veće deformacije, odnosno za $\varepsilon_{fud} = f_{fud} / E_f - \varepsilon_0$, čime bi se postigla ušteda tog materijala. Međutim, kako se ovaj prijedlog odnosi na ojačanje greda napreznanih savijanjem, za provjeru u ovom primjeru ojačanja nedostaju podaci o početnoj deformaciji ε_0 te za pad čvrstoće trake zbog ovijanja stupa preko brida zaobljenog malim polumjerom.

5 Zaključak

Nova tehnologija ojačanja armiranobetonskih stupova, pravokutnog ili kvadratnog presjeka, nedovoljno nosivih i duktilnih, predviđa uporabu traka ili plahta od polimera armiranog ugljičnim vlaknima. Eksperimentalna su istraživanja potvrdila svrhovitost takvog ojačanja. Osim povećanja nosivosti i duktilnosti, ojačani stupovi pokazuju veliki kapacitet apsorpcije energije. Radovi na ojačanju mogući su i pod uporabnim opterećenjem i tijekom cijele godine, pod uvjetom da je područje plastičnog zgloba pristupačno i izvan vode.

Za određivanje potrebne armature za ovijanje mogu se primijeniti izrazi prema europskim, američkim i novozelandskim normama te onim najnovijim prijedlozima

istraživača kada se rabi materijal visokih svojstava. Prema izrazu u ENV 1998-dio 2, dobiju se prihvatljivi rezultati koji se nalaze unutar rezultata dobivenih drugim izrazima pa se stoga preporučuje za stupove mostova.

Kako ojačani stupovi imaju dvije vrste armature za ovijanje, postojeću čeličnu i dodanu od PAUV-a, te zbog toga što se ta ojačanja ne nalaze na istom mjestu u presjeku, valjalo je pronaći zamjenjujući položaj rezultatnog omotača, pri čemu je omotač od PAUV-a, zbog jednostavnijeg proračuna, sveden na jedinstveni odnosno čelični.

Prednost je ove tehnologije ojačanja brzina rada, djelotvornost, neznatno povećanje presjeka i zadovoljavajući vanjski izgled te se stoga preporučuje za uporabu.

LITERATURA

- [1] prEN 1998, *Design of Structures for Earthquake Resistance, Part 1: General Rules, Seismic Actions Rules for Buildings*, CEN, Brussels, January 2003.
- [2] ENV 1998, *Design Provision for Earthquake Resistance of Structures: Bridges, Part 2*, CEN, Brussels, December 1994.
- [3] ACI 318-99, *Building Code Requirements for Structural Concrete*, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich. 1999.
- [4] Division I-A, *Seismic Design Guidelines for Highway Bridges*, Final Report, AASHTO, October, 1981.
- [5] Code of Practice for the *Design of Concrete Structures (NZS 3101, Part 1)* Standards Association of New-Zealand, Wellington, 1995.
- [6] Li, B.; Park, R.: *Confining Reinforcements for High-Strength Concrete Columns*, ACI Structural Journal, Vol. 101, No. 3, May-June 2004, 314-324.
- [7] Iacobucci, R.D.; Sheikh, S.A.; Bayrak, O.: *Retrofit of Square Concrete Columns with Carbon Fiber-Reinforced Polymer for Seismic Resistance*, ACI Structural Journal, Vol. 100, No. 6, November-December 2003, 785-794.
- [8] Tomičić, I.: *Ojačanje armiranobetonskih greda nemetalnim lamelama*, Građevinar 53(2001)10, 641-649.
- [9] Tomičić, I.: *Primjena betona visokih svojstava za okvirne konstrukcije*, Građevinar, 54(2002)10, 585-591.
- [10] FIB, Task Group 9.3 FRP, *Externally bonded FRP reinforcement for RC structures*, Technical report, Bulletin 14, July 2001