

# Stupovi od cijevi ispunjenih betonom naprezani na centrični tlak

Ivan Tomičić

## Ključne riječi

stup, cijev, polimerom armirana vlakna (PAV), beton, naprezanje, tlak

## Key words

column, pipe, fibre reinforced polymer (FRP), concrete, stress, pressure

## Mots clés

colonne, tuyau, polymère renforcé de fibres (PRF), béton, contrainte, pression

## Ключевые слова

столб, труба, полимером армированные волокна (ПАВ), бетон, напряжение, давление

## Schlüsselworte

Pfeiler, Rohr, polymerbewehrte Fasern (PAV), Beton, Spannung, Druck

I. Tomičić

Pregledni rad

## Stupovi od cijevi ispunjenih betonom naprezani na centrični tlak

Prikazana je metoda proračuna elementa od betona, centrično tlačno napreznog, ugrađenog u kružnu cijev od polimera armiranih vlaknima (PAV-a) ili ojačanog postojećeg stupa kružnog presjeka trakom od PAV-a. Istaknuto je da u proračunu valja razlikovati učinak nanošenja uzdužnog opterećenja samo na betonsku jezgru od onoga na jezgru i cijev od PAV-a, zbog razlike u modelu sloma cijevi. Najveća je djelotvornost kada vlakna proizvoda od PAV-a slijede prstenove cijevi ili traka.

I. Tomičić

Subject review

## Concrete-filled pipe columns subjected to centric pressure

A method for analyzing either a concrete element subjected to centric load and installed in a circular pipe made of fibre reinforced polymer (FRP), or an existing circular column reinforced with the FRP, is presented. It is emphasized that, during analysis, the effect of applying longitudinal load to concrete core only must be differentiated from that applied on the core and FRP pipe, because of the difference in the pipe failure model. The best efficiency is obtained when the FRP fibres follow the pipe or strip rings.

I. Tomičić

Ouvrage de synthèse

## Colonnes de tuyaux remplis en béton soumises à la pression centrique

La méthode utilisée dans l'analyse d'un élément de béton soumis à la charge centrique et installé dans un tuyau circulaire fait en polymère renforcé de fibres (PRF), ou dans l'analyse de la colonne circulaire existante renforcée par PRF, est présentée. Il a été souligné que, au cours de l'analyse, l'effet d'application de la charge longitudinale au noyau seul de béton, doit être différencié du celui appliqué sur le noyau ainsi que sur le tuyau en PRF, à cause de la différence dans le modèle de rupture de tuyaux. La plus grande efficacité a été obtenue quand les fibres PRF ont suivis les anneaux des tuyaux ou des bandes.

И. Томичич

Обзорная работа

## Столбы из труб заполненных бетоном, напрягаемого центрическим давлением

В работе показан метод расчёта элемента из бетона, напрягаемого центрическим давлением, монтированного в круглую трубу из полимеров армированных волокнами (ПАВ-а) или усиленного существующего столба круглого поперечного сечения лентой из ПАВ-а. Подчёркнуто, что в расчёте необходимо различать эффект нанесения продольной нагрузки только на бетонное ядро и трубу из ПАВ-а, из-за разницы в модели слома трубы. Самая большая эффективность достигается, когда волокна изделия из ПАВ-а следуют кольца трубы или лент.

I. Tomičić

Übersichtsarbeit

## Pfeiler aus betongefüllten Rohren bei zentrischer Druckspannung

Dargestellt ist eine Berechnungsmethode für ein zentrisch druckbeanspruchtes Betonelement, eingebaut in ein Kreisrohr aus faserbewehrtem Polymer (PAV), oder für einen bestehenden Pfeiler mit Kreisquerschnitt, der mit PAV - Band verstärkt ist. Es wird hervorgehoben dass man bei der Berechnung unterscheiden muss ob die Längsbelastung nur auf den Betonkern oder auf den Kern und das PAV - Rohr wirkt, wegen dem Unterschied im Modell des Rohrbruchs. Die grösste Wirksamkeit erzielt man wenn die Fasern des PAV - Produkts die Ringe des Rohrs oder der Bänder folgen.

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

## 1 Općenito

Ovijeni betonski i armiranobetonski stupovi često se primjenjuju u građenju konstrukcija zgrada i mostova. Svrha ovijanja jest povećanje poželjnih svojstava betona, ponajprije tlačne čvrstoće i duktilnosti.

Za ovijanje rabe se, ovisno o presjeku stupa (okrugli, pravokutni), poprečne armature u obliku spirale, zatvorene spone, spone za propletanje te gotove čelične cijevi. Za postojeće stupove koje valja ojačati, rabe se čelične kalote zavarene nakon montaže. Čelik kao gradivo za vanjsko ovijanje ima ozbiljan nedostatak da hrđa, što nepovoljno utječe na prionljivost cijevi s betonom. Osim toga, čelik se proizvodi ograničenih dimenzija i duljina, pa su često potrebna nastavljanja.

Odnedavno se, zbog dokazanih prednosti, osobito u agresivnoj sredini, primjenjuju proizvodi od polimera armiranog vlaknima, skraćeno PAV-a, novog gradiva poznatog i pod nazivom na engleskom jeziku: *Fiber reinforced polymer*, skraćeno FRP.

Za poboljšanje svojstava betonskih stupova u građenju rabe se predgotovljene cijevi od PAV-a, a za ojačanje postojećih tlačnih elemenata, osobito u području plastičnih zglobova, upotrebljavaju se trake ili plahte za ovijanje, nalijepljene na betonski stup epoksidnom smolom ili epoksidnom pastom. Osim za ojačanje betonskih i armiranobetonskih stupova kružnog presjeka, trake i plahte rabe se i za obnovu oštećenih stupova te za zaštitu onih u agresivnoj sredini [1, 2].

Uz to što se proizvodi od PAV-a mogu izrađivati raznih oblika i dimenzija, njihova je prednost što su znatno lakši od čelika, imaju veliku čvrstoću, osobito vlačnu, a neosjetljivi su na koroziju i magnetizam. Proizvode se od staklenih, ugljičnih i aramidnih vlakana pa imamo proizvode od PASV-a, PAUV-a i PAAV-a. Od nedostataka proizvoda od PAV-a navode se: elastično ponašanje do sloma, popuštanje, slično puzanju betona, pod dugotrajnim naprezanjem, bliskom slomu te pad čvrstoće zbog previjanja oko trna. Poteškoćama s ovim novim gradivom pripada pomanjkanje specifikacija proizvoda, propisa za proračun i konstruiranje te visoka cijena.

U ovome radu bit će prikazan proračun naprezanja i deformacija, centrično opterećenoga, kompozitnoga okruglog stupa od betona, smještenog u cijev od PAV-a ili postojećega tlačnog elementa ovijenog nalijepljenom trakom.

Kada se rabe predgotovljene cijevi od PAV-a, valja razlikovati stanje naprezanja u kompozitu, ovisno o tome je li uzdužno opterećenje nanoseno samo na betonsku jezgru ili na oboje, jezgru i cijev od PAV-a.

Iako će se u radu primjenjivati pretpostavka da je stup naprezan centričnim tlakom te da se rabi kružni presjek,

rezultati istraživanja te postupak proračuna moći će se, kao aproksimacija, primjenjivati i za proračun elemenata opterećenih ekscentričnom tlačnom silom. Naime, tlačno područje presjeka stupa, za praktične potrebe, moguće je tretirati kao centrično naprezano. Ipak, za točnije proračune elemenata napreznih na ekscentrični tlak preporučuje se primjenjivati postupak proračuna namijenjen samo za ovako naprezane stupove, danas već poznat u literaturi [3], a uskoro će biti objavljen i kod nas.

Osim navedenoga, u ovome radu bit će prikazana i najnovija istraživanja vremenskog ponašanja betonskih stupova, ovijenih proizvodima od PAV-a, centrično opterećenih tlačnom silom [4]. Konkretnije, bit će analiziran utjecaj skupljanja i puzanja betona na prionljivost između betonske jezgre i cijevi, te na eventualnu preraspodjelu uzdužnog naprezanja između betonske jezgre i omotača od PAV-a.

## 2 Teorijska i eksperimentalna istraživanja

Prema istraživanju više autora [5, 6, 7, 8], beton uzdužno tlačno naprezan bočno se širi u funkciji uzdužnog skraćivanja, međutim, samo kod stabilne vrijednosti Poissonova omjera, odnosno pod naprezanjem manjim od 50 % tlačne čvrstoće. Tijekom tog stanja dolazi do nastajanja mikropukotina na spoju cementnog kamena i agregata, a zbog "negativne" obujamske deformacije ima se privid kompaktnoga betonskog kompozita. Pri naprezanju približno 50 % čvrstoće betona, mikropukotine unutar matrice počinju uzrokovati izrazito nelinearno ponašanje betona te osobito razvoj poprečnih deformacija.

Kod kritične razine uzdužnog naprezanja, koje iznosi 87 % tlačne čvrstoće, dolazi do udruživanja mikropukotina u široke pukotine unutar betonske mase, popraćenog nelinearnim obujamskim deformacijama, a osobito poprečnim, što vodi slomu. Iz toga se može zaključiti da je zadržavanje poprečnog širenja rješenje za povećanje čvrstoće i duktilnosti betona uzduž glavnog naprezanja. Naime, beton ugrađen u cijev od PAV-a ili betonski stup ovijen trakom od PAV-a, uzdužno opterećen, ima djelomično spriječeno poprečno širenje, što ima za rezultat radijalno tlačenje na spoju cijevi i betonske jezgre. Vrijednost toga tlaka ovisi o krutosti cijevi u smjeru prstenova i razini uzdužnog opterećenja. Kada se uzdužno opterećenje povećava, povećava se i poprečno širenje koje, kada je spriječeno, izaziva povećani radijalni tlak. Međutim, kako se proizvodi od PAV-a elastično ponašaju do sloma, povećanje tlaka je zbog efekta ovijenosti promjenjivo, za razliku kada se rabi čelična cijev kada je taj tlak, nakon dostizanja granice popuštanja čelika, konstantan i neovisan o razini uzdužnog opterećenja.

Fam i Rizkalla [7] bavili su se problemom nehomogenosti proizvoda od PAV-a izazvanog usmjerenošću vlakana. Normalno, za slučaj da je uzdužno opterećenje nanoseno na betonsku jezgru rabe se cijevi ili trake s vlaknima u smjeru ovijanja, odnosno prstenova, kako bi se postigla maksimalna krutost i nosivost u tom smjeru. Međutim, kada se zbog uštede betona ili radi smanjenja mase stupa izvodi uzdužna šupljina u betonskoj jezgri, uzdužno se opterećenje prihvaća betonskom jezgrom i cijevi od PAV-a, kao i eventualni momenti savijanja. Posljedica toga bit će dvoosno naprezanje cijevi od PAV-a, a time i potreba primjene cijevi s ugrađenim vlaknima u smjeru prstenova i uzdužne osi.

### 3 Metode proračuna

U ovome radu opisat ću postupak proračuna koji su predložili Fam i Rizkalla [7] za dva primjera djelovanja uzdužnog opterećenja, prvog kada je ono nanoseno samo na betonsku jezgru i drugog nanosenog istodobno na jezgru i cijev. Postupak je primjenjiv za potpuno ispunjenu cijev betonom i onda kada jezgra ima središnju uzdužnu šupljinu. Opterećenje je razmatrano preko uzdužne deformacije  $\varepsilon_{cc}$ , izazvane uzdužnim naprezanjem ovijenog betona  $\sigma_{cc}$ .

Za primjer konstantnoga radijalnog tlaka  $\sigma_R$ , izazvanog ovijenošću, što je prihvatljivo kada se rabi čelična cijev, primjenjuje se prijedlog Mandere i drugih iz 1988. godine [5]. Prema tom prijedlogu uzdužno naprezanje ovijenog betona  $\sigma_{cc}$ , za bilo koju deformaciju  $\varepsilon_{cc}$  u funkciji je vršne čvrstoće  $f'_{cc}$ :

$$\sigma_{cc} = \frac{f'_{cc} \cdot x \cdot r}{r - 1 + x^r} \quad (1)$$

gdje je:

$$x = \frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon'_c} \quad (2)$$

$$r = \frac{E_{c0}}{E_{c0} - E_{sec}} \quad (3)$$

$E_{c0} = 5000\sqrt{f'_c}$  (N/mm<sup>2</sup>) - tangenti modul elastičnosti

$E_{sec}$  - sekantni modul elastičnosti ovijenog betona koji se određuje iz omjera

$f'_{cc}/\varepsilon'_{cc}$ .

Vršna čvrstoća ovijenog betona dobije se prema izrazu:

$$f'_{cc} = f'_c \left( 2,254 \sqrt{1 + \frac{7,94\sigma_R}{f'_c}} - 2 \frac{\sigma_R}{f'_c} - 1,254 \right) \quad (4)$$

Odgovarajuća vršna deformacija ovijenog betona u funkciji je vršne deformacije neovijenog betona  $\varepsilon'_c$ :

$$\varepsilon'_{cc} = \varepsilon'_c \left[ 1 + 5 \left( \frac{f'_{cc}}{f'_c} - 1 \right) \right] \quad (5)$$

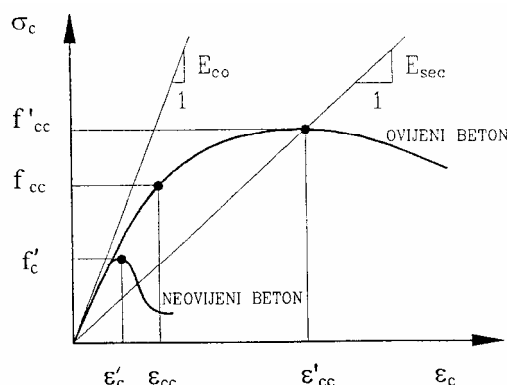
Vršna čvrstoća i ostali parametri vide se na dijagramu naprezanje - deformacija za ovijeni i neovijeni beton (slika 1.).

Primjenom uvjeta ravnoteže i uz pretpostavku da je naprezanje u čeličnoj cijevi dostiglo granicu popuštanja, može se dobiti konstantni radijalni tlak na okolni beton:

$$\sigma_R = \frac{f_y \cdot t}{R} \quad (6)$$

gdje je:

- $f_y$  - granica popuštanja čelične cijevi
- $t$  - debljina stijenke cijevi
- $R$  - polumjer betonske jezgre, a približno i tanke čelične cijevi
- $f'_c$  ( $f_{ck}$ ) - vršna čvrstoća neovijenog betona.



Slika 1. Dijagram  $\sigma$ - $\varepsilon$  za ovijeni i neovijeni beton

Kako je već rečeno, primjenom cijevi od PAV-a i za slučaj nanošenja uzdužnog opterećenja samo na betonsku jezgru, radijalni tlak na beton, izazvan ovijenošću, bit će promjenjiv.

Radijalni pomak, izazvan uzdužnom deformacijom  $\varepsilon_{cc}$  dobije se prema izrazu:

$$u_R = v_c \cdot R \cdot \varepsilon_{cc} \quad (7)$$

gdje je:

$v_c$  -Poissonov koeficijent za beton.

Odnos između radijalnog pomaka i bočnog tlaka bit će:

$$u_R = \frac{1 - v_c}{E_c} \cdot R \cdot \sigma_R \quad (8)$$

gdje je  $E_c$  modul elastičnosti dobiven ispitivanjem betonskih valjaka.

Za primjer tanke cijevi od PAV-a, prstenasto naprezanje i radijalni pomak cijevi mogu se proračunati prema izrazima:

$$\sigma_f = \frac{\sigma_R \cdot R}{t} \quad (9)$$

$$u_R = \frac{\sigma_R \cdot R^2}{E_f \cdot t} \quad (10)$$

gdje je:

$E_f$  - modul elastičnosti cijevi od PAV-a u smjeru prstenova

$R$  - srednji polumjer cijevi debljine stijenke  $t$ , uzet da je jednak polumjeru betonske jezgre (tanka cijev).

Kada je cijev od PAV-a uzdužno opterećena te se uzdužno deformira za  $\varepsilon_{cc}$ , radijalni pomak  $u_R$  može se izračunati prema izrazu:

$$u_R = \nu_f \cdot R \cdot \varepsilon_{cc} \quad (11)$$

gdje je

$\nu_f$  - Poissonov omjer cijevi.

Radijalni tlak cijevi od PAV-a na betonsku jezgru ovisan je o nanošenju uzdužnog opterećenja:

a) Jednoliki uzdužni tlak nanesen samo na betonsku jezgru

Iz uvjeta kompatibilnosti i ravnoteže, uporabom jednadžbi (7), (8) i (10), dobije se izraz za radijalni tlak:

$$\sigma_R = \frac{R}{\frac{R}{E_f \cdot t} + \frac{1 - \nu_c}{E_c}} \cdot \nu_c \cdot \varepsilon_{cc} \quad (12)$$

b) Jednoliki uzdužni tlak nanesen na betonsku jezgru i cijev od PAV-a

Kako se beton pod nanesenim opterećenjem širi prema van, cijev od PAV-a također se širi s odgovarajućim svojim Poissonovim omjerom i izravno je u funkciji s deformacijom. Radijalni se tlak dobiva primjenom jednadžbi (7), (8), (10) i (11):

$$\sigma_R = \frac{R}{\frac{R}{E_f \cdot t} + \frac{1 - \nu_c}{E_c}} \cdot \frac{\nu_c - \nu_f}{1 - \nu_c} \cdot \varepsilon_{cc} \quad (13)$$

Iz jednadžbe (12) može se zaključiti da se povećanjem krutosti cijevi u smjeru prstenova ( $E_f \cdot t / R$ ) i povećanjem Poissonova omjera  $\nu_c$  znatno se povećava radijalni tlak izazvan ovijenošću.

Analizirajući izraz (13), može se zaključiti da kada je Poissonov omjer  $\nu_f$  veći od onoga za beton  $\nu_c$  pojavit će

se negativni bočni tlak, odnosno doći će do odvajanja cijevi od betonske jezgre. Prema tome, cijev od PAV-a bit će znatno djelotvornija kod niskog Poissonova omjera, što ovisi o strukturi cijevi ili trake.

Ako betonska jezgra ima centralnu šupljinu, a šuplji betonski valjak debelu stijenku, radijalni bočni tlak može se odrediti prema izrazu:

$$\sigma_R = \frac{(R_0 - R_i) \nu_c}{\frac{R_0^2}{E_f \cdot t} + \frac{R_0 \left( \frac{R_0^2 + R_i^2}{R_0^2 - R_i^2} - \nu_c \right)}{E_c}} \cdot \varepsilon_{cc} \quad (14)$$

gdje su  $R_0$  i  $R_i$  vanjski i unutrašnji polumjeri, redosljedom.

Analizirajući izraz (14), može se zaključiti da se primjenom šuplje jezgre smanjuje tlak izazvan ovijenošću. Ovaj izraz primjenjiv je samo onda kada je uzdužno opterećenje nanoseno na šuplju jezgru, a kada ono istodobno djeluje na šuplju jezgru i cijev od PAV-a, treba termin  $(\nu_c - \nu_f)$  uključiti umjesto  $\nu_c$  u brojničku, slično jednadžbi (13).

Jednadžbe (12), (13) i (14) dobivene su uz pretpostavku da se oba upotrijebljena materijala, beton i PAV, ponašaju linearno elastično. U nastavku cilj je razviti postupak vrednovanja nelinearnih karakteristika betona, odnosno određivanja  $E_c$  i  $\nu_c$  za svaku razinu deformacije  $\varepsilon_{cc}$ .

Opći nelinearni dijagram naprezanje-deformacija za beton može se aproksimirati u pojedinim točkama linearnim:  $f_i = E_{ci} \cdot \varepsilon_i$ , gdje je  $E_{ci}$  promjenjivi sekantni modul elastičnosti u točki "i" dijagrama, osim u točki 0 kada je on tangentni  $E_{c0}$ . Ovaj početni modul elastičnosti za neovijeni beton može se rabiti za dobivanje prve točke "1" na dijagramu za ovijeni beton ( $f_{cc1}$ ,  $\varepsilon_{cc1}$ ), a za prvu uzdužnu deformaciju  $\varepsilon_{cc1}$ . Prema tome, kada se povećava uzdužna deformacija do nove razine  $\varepsilon_{cc2}$ , redovito za dobivanje druge točke "2", beton se tretira kao novi materijal sa sekantnim modulom elastičnosti  $E_{c1} = f_{cc1} / \varepsilon_{cc1}$ .

Općenito, u bilo kojoj točki dijagrama naprezanje-deformacija za ovijeni beton, sekantni modul elastičnosti može se odrediti izrazom:

$$(E_c)_i = \frac{(f_{cc})_{i-1}}{(\varepsilon_{cc})_{i-1}} \quad (15)$$

Isto tako, Poissonov se omjer, koji predstavlja odnos poprečne i uzdužne deformacije, mijenja, odnosno on se povećava povećanjem stupnja uzdužnog opterećenja. Međutim u uvjetima ovijenosti, deformiranje betona reducirano je zbog ograničenja razvoja mikropukotina. Stoga je ovaj koeficijent manji od koeficijenta neovijenog betona pod jednosmjernim tlakom.

Gardner [6] na osnovi vlastitih istraživanja, a i drugih, predlaže da se slično određivanju modula elastičnosti uvede sekantni Poissonov omjer  $\nu_c = \varepsilon_l / \varepsilon_{cc}$  kod raznih uzdužnih deformacija  $\varepsilon_{cc}$ . Da bi dobio što jednostavniji odnos tih veličina, normalizirao je Poissonov omjer  $\nu_c$  na početni Poissonov omjer  $\nu_{c0}$ , a  $\varepsilon_{cc}$  na deformaciju  $\varepsilon'_{cc}$ , pa slijedi:

$$\left( \frac{\nu_c}{\nu_{c0}} \right) = C \left( \frac{\varepsilon'_{cc}}{\varepsilon_{cc}} \right) + H \quad (16)$$

gdje su  $C$  i  $H$  konstante.

Kod uzdužne deformacije  $\varepsilon'_c = 0$  bit će Poissonov omjer  $\nu_c = \nu_{c0}$ , iz čega slijedi da je  $H = 1$ , odnosno izraz (16) prelazi u oblik:

$$\left( \frac{\nu_c}{\nu_{c0}} \right) = C \left( \frac{\varepsilon'_{cc}}{\varepsilon_{cc}} \right) + 1. \quad (17)$$

Konstanta  $C$  je u korelaciji s omjerom  $(\sigma_R / f'_c)$  pa se taj odnos, radi pojednostavnjenja, daje u linearnom obliku:

$$C = 1,914 \left( \frac{\sigma_R}{f'_c} \right) + 0,719. \quad (18)$$

Jednadžbe (17) i (18) mogu se rabiti, pri bilo kojoj uzdužnoj deformaciji  $\varepsilon_{cc}$  i omjeru ovijenosti  $(\sigma_R / f'_c)$ , za određivanje Poissonova omjera  $\nu_c$ .

#### Tijek proračuna nosivosti kompozitnog elementa napreznog na tlak

Za određivanje dijagrama napreznje-deformacija betona ( $f_{cc} / \varepsilon_{cc}$ ), kružno ovijenog proizvodom od PAV-a, može se sada primjenjivati Manderova metoda i postupak "korak po korak" [5].

Za jednostavan slučaj kao što je tlačni element od betona ovijen proizvodom od PAV-a, kojemu je uzdužno opterećenje nanoseno na betonsku jezgru, rabe se veličine:  $R$ ,  $t$ ,  $E_f$  u smjeru ovijanja, vlačna čvrstoća  $\sigma_{fu}$ , tlačna čvrstoća neovijenog betona  $f'_c$  i odgovarajuća deformacija  $\varepsilon'_c = 0,002$  te početni Poissonov omjer  $\nu_{c0}$  i modul elastičnosti:

$$E_{c0} = 5000 \sqrt{f'_c}. \quad (19)$$

Svaki korak obuhvaća proračun napreznja u prstenovima cijevi  $\sigma_{fi} = (\sigma_R)_i \cdot R/t$ -izraz (9) uz pomoć izraza (15), (18), (17) i (12). Ako je  $\sigma_{fi} \geq \sigma_{fu}$  (vlačna čvrstoća) proračun se završava, a kada je  $\sigma_{fi} < \sigma_{fu}$  proračun se nastavlja uporabom jednadžbi (4), (5) i (1) do proračuna nove vrijednosti za modul elastičnosti  $(E_c)_{i+1} = (f_{cc})_i / (\varepsilon_{cc})_i$  kojom

počinje sljedeći korak. Za početni korak, odnosno  $i = 1$ , uzima se  $(E_c)_i = E_{c0}$ .

Dijagram napreznje-deformacija betona ovijenog PAV-om, primjenom predloženog postupka proračuna, prikazan je na slici 2. za različite razine konstantnog tlaka  $\sigma_R$  izazvanog ovijanjem. Krivulja koja presijeca te dijagrame konačni je odgovor nosivosti dobiven iz uvjeta  $\sigma_{fi} = \sigma_{fu}$ .

Slom elementa od cijevi ispunjene betonom najčešće se događa zbog pucanja (popuštanja) cijevi od PAV-a, odnosno kada prstenasta vlačna napreznja dostignu vlačnu čvrstoću tog proizvoda. Taj model sloma primjenjiv je za slučaj kada je uzdužno opterećenje nanoseno samo na betonsku jezgru, a cijev se rabi za ovijanje betona.

Kada se utvrdi napreznje  $f_{cc}$  kod kojeg će doći do sloma cijevi, valja kontrolirati nosivost stupa, prema ENV 1992, izrazom:  $N_{sd} \leq N_{Rd}$ , gdje je:

$$N_{sd} = \gamma_g N_g + \gamma_q \cdot N_q \quad (20)$$

$$N_{Rd} = 0,85 f_{cc} / \gamma_c \cdot A_c + A_s f_y / \gamma_s \quad (21)$$

$A_s$  - eventualna uzdužna armatura

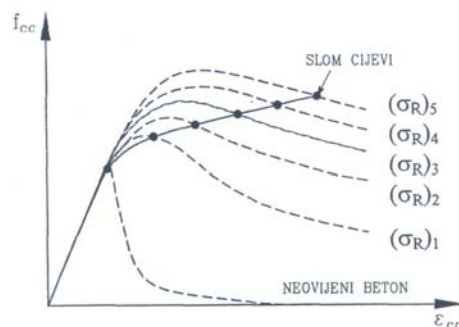
$\gamma_f \approx \gamma_c = 1,5$  - koeficijent sigurnosti za beton

$\gamma_f = 1 / (C_E \cdot \phi) = 1 / (0,95 \cdot 0,7) = 1,5$  (ACI [9],

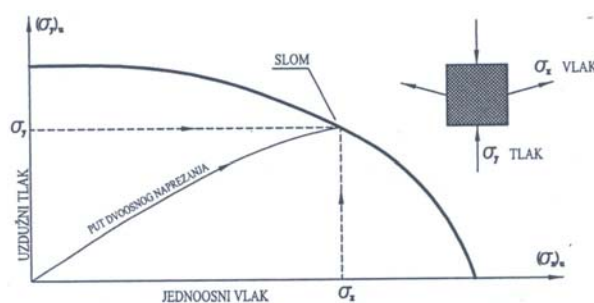
$C_E = 0,95$  - za PAUV, unutar građevine)

$\gamma_f = 1,35 / 0,95 = 1,42$  (FIB [1])

U suprotnom treba povećati debljinu cijevi od PAV-a.



Slika 2. Skupina dijagrama napreznje-deformacija za beton ovijen PAV-om u funkciji radijalnog tlaka



Slika 3. Krivulja sloma za dvoosno napreznje cijevi od PAV-a

Kada je, uz betonsku jezgru, cijev od PAV-a uzdužno opterećena, ona se ponaša kao membrana naprezana uzdužnim tlakom i prstenastim vlakom. Prisutnost uzdužnog tlaka smanjuje nosivost cijevi u smjeru prstenova, pa je potrebno primijeniti kriterij dvoosne čvrstoće (sloma). Kod svake se razine uzdužne deformacije proračunavaju naprezanja u cijevi, u prstenastom i uzdužnom smjeru,  $(\sigma_x, \sigma_y)_f$  te uspoređuju sa slomnom anvelopom međudjelovanja. Za slučaj cijevi od PAV-a, anvelopu sloma načinio je Tsai-Wu, navedena u radu [7] (slika 3.).

Ako vrijednost radijalnog tlaka  $(\sigma_R)_i$  kod bilo kojeg koraka opterećenja bude negativna, na osnovi izraza (13), za vrijednost  $(\sigma_R)_i$  treba uzeti da je nula. Normalno, kod velikoga uzdužnog deformiranja betona njegovo poprečno širenje premašuje ono cijevi od PAV-a pa se ovijenost aktivira.

Parametri ortotropne cijevi od PAV-a mogu se dobiti uporabom klasične laminarne teorije i/ili ispitivanjem uzoraka. Poznavanjem razine uzdužne deformacije cijevi  $\varepsilon_y = \varepsilon_{cc}$ , te kada se proračuna naprezanje  $\sigma_x$  izrazom (9), gdje je ono označeno kao  $\sigma_f$ , poprečna deformacija  $\varepsilon_x$  i uzdužno naprezanje  $\sigma_y$ , uz poznavanje i drugih parametara, dobiju se uporabom jednadžbi:

$$\sigma_x = \frac{E_x}{1 - \nu_{xy} \cdot \nu_{yx}} (\varepsilon_x + \nu_{yx} \cdot \varepsilon_y), \quad (22)$$

$$\sigma_y = \frac{E_y}{1 - \nu_{xy} \cdot \nu_{yx}} (\varepsilon_y + \nu_{xy} \cdot \varepsilon_x) \quad (23)$$

gdje je:

$\nu_{xy}$  - Poissonov omjer za cijev kojoj je osnovno opterećenje u smjeru prstena

$\nu_{yx}$  - Poissonov omjer za cijev kojoj je osnovno opterećenje u smjeru y-osi.

Teorijska i eksperimentalna istraživanja pokazuju da debljina cijevi, preko krutosti u smjeru prstena ( $E_f t/R$ ), utječe na krivulju naprezanje-deformacija ovijenog betona. Vršna se nosivost povećava s povećanjem krutosti, međutim stečeni stupanj nosivosti reduciran je zbog postvršnog omekšanja s njezinim povećanjem.

Djelotvornost usmjerenja vlaknaca također je istražena [7]. Kada su vlakna većinom orijentirana u smjeru prstenova, a uzdužno opterećena jezgra, postiže se maksimalna prstenasta krutost i nosivost, a minimalna u uzdužnom smjeru. S druge strane, kada su sva vlakna, odnosno većina, usmjerena uzduž osi elementa postiže se minimalni efekt ovijenosti.

Kada se uzdužno opterećenje predaje istodobno na jezgru i cijev, primijećena je značajna redukcija krutosti i nosivosti, osobito kada su vlakna pretežno u prstenastom smjeru. Smanjenje nosivosti pripisuje se dvoosnom sta-

nju naprezanja cijevi, a smanjena krutost vanjskom širenju cijevi zbog Poissonova efekta cijevi koji reducira tlak izazvan ovijenošću. Kada su sva vlakna ugrađena u smjeru prstenova, krutost je reducirana zbog smanjenog Poissonova omjera (0,06) prema onomu kada su vlakna u smjeru uzdužne osi (0,28). Također je primijećeno da se razvoj prstenastih naprezanja odgađa dok se beton radijalno deformira preko širenja cijevi kojoj su vlakna pretežno uzduž osi, zbog visokog Poissonova omjera (0,28) u usporedbi s početnim za beton (0,18).

Na djelotvornost ovijenosti također utječe eventualna šupljina (cijev) unutar jezgre. Povećanjem izmjere šupljine [7] primijećena je redukcija vršne aksijalne nosivosti i maksimalnog tlaka izazvanog ovijenošću betonske jezgre.

#### 4 Vremensko ponašanje ovijenih stupova PAV-om

Nakon što su se počeli uspješno primjenjivati proizvodi od PAV-a u građevinarstvu, vrlo se često postavljalo pitanje vremenskog ponašanja ovijenog betona. Nedavna teorijska i eksperimentalna istraživanja, koja su proveli Naguib i Mirmiran [4], sastojala su se u određivanju utjecaja skupljanja i puzanja betona, ugrađenog u cijev od PAV-a ili postojećeg elementa od betona, naknadno ojačanog trakom ili plahtom od PAV-a, na prionljivost cijevi i betonske jezgre te stanje naprezanja pod dugotrajnim opterećenjem. Zaključci su ovog istraživanja:

- Skupljanje betonske jezgre u cijevi od PAV-a je između 10 % i 20 % od skupljanja isto takvoga izloženog betona. Za sve praktične potrebe betonska se jezgra može smatrati zatvorenom s posve zanemarljivim deformacijama od skupljanja. Osim toga, pretpostavka o mogućem odvajanju betonske jezgre od cijevi, zbog skupljanja betona, nije realna.
- Prionljivost između betonske jezgre i cijevi od PAV-a je manja od one između jezgre i čelične cijevi, ali još uvijek dovoljno velika da smanji uzdužno skupljanje betonske jezgre.
- Općenito je puzanje ovijenog betona manje od puzanja izloženog betona. Približno se može uzeti da je ono manje za 22 % od onoga danog propisima za adekvatni izloženi beton.
- Djelotvornost puzanja betonske jezgre unutar cijevi od PAV-a, kao zatvorenog betona, nije značajna, kao ni preraspodjela naprezanja izazvana puzanjem između betona i cijevi.

Ova istraživanja koja se odnose na centrično naprezane elemente od kompozitnog gradiva, betona i proizvoda od PAV-a mogu se primjenjivati i na one ekscentrično naprezane kada postoje uvjeti za ovijenost tlačnog područja, kako je to obrazloženo na početku ovog rada.

## 5 Zaključak

Prikazana je metoda proračuna kružnih betonskih elemenata ovijenih cijevima ili trakama od PAV-a. Osniva se na Manderovu prijedlogu proračuna ovijenih betonskih stupova, uzdužno centrično opterećenih, te zbog promjenjivosti modula elastičnosti i Poissonova omjera betona, postupka "korak po korak". Opći nelinearni dijagram naprezanje-deformacija za ovijeni beton, za trenutačnu razinu deformiranja, aproksimira se linearnim.

Metoda je prilagođena proračunu stupova od betona ugrađenog u cijev od PAV-a ili prije izvedenih kružnih stupova koje, zbog potrebe ojačanja, valja oviti trakama ili plahtama od PAV-a. Proračun je primjenjiv kada je uzdužno opterećenje nanoseno samo na betonsku jezgru, a svrha ovijanja jest povećanje svojstava betonske jezgre, odnosno povećanje nosivosti i deformabilnosti, te za slučaj da se uzdužno opterećenje predaje istodobno na betonsku jezgru i cijev od PAV-a, s tim da treba računati da se u cijevi pojavljuje dvoosno naprezanje.

Za pojedine stupnjeve opterećenja, proračunavaju se naprezanja izazvana opterećenjem i ovijanjem po danim izrazima, ovisno o tome je li uzdužno opterećenje nanoseno samo na betonsku jezgru ili na nju i cijev od PAV-a.

Najpovoljniji učinak ovijanja postiže se uzdužnim opterećenjem samo betonske jezgre, kada će vršna nosivost biti postignuta maksimalnim naprezanjem cijevi u smjeru prstenova. Uzrok sloma elementa, kojem su simultano uzdužno naprezani jezgra i cijev od PAV-a, bit će kritična kombinacija naprezanja u smjeru prstena i uzduž osi. U ovom primjeru djelotvornost ovijanja bit će manja od one kada je uzdužno opterećenje nanoseno samo na jezgru.

Na nosivost cijevi od PAV-a utječe usmjerenost vlakana i debljina cijevi. Za ekstremni slučaj kad su vlakna pretežito u smjeru prstena, postiže se maksimalna ovijenost, a minimalna kada su ona većinom usmjerena uzduž cijevi. S povećanjem debljine cijevi povećava se njezina krutost i nosivost.

## LITERATURA

- [1] FIB, Task Group 9.3 FRP: *Externally bonded FRP reinforcement for RC structures*, Technical report, Bulletin 14, July 2001.
- [2] Tomičić, I.: *Ojačanje armiranobetonskih stupova trakama od polimera armiranog vlaknima*, Građevinar 57 (2005.) 10, 785-792.
- [3] Fam, A. Z.; Flisak, B.; Rizkalla, S. H.: *Experimental and Analytical Modeling of Concrete-Filled Fiber-Reinforced Polymer Tubes Subjected to Combined Bending and Axial Loads*, ACI Structural Journal, Vol. 100, No. 4, July-August 2003, 490-509
- [4] Naguib, W.; Mirmiran, A.: *Time-Dependent Behavior of Fiber-Reinforced Polymer-Confined Concrete Columns under Axial Loads*, ACI Structural Journal, Vol. 99, No. 2, March-April 2002., 142-148.
- [5] Mander, J. B. et al.: *Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete*, Journal of Structural Engineering, Vol. 114, No. 8, August 1988, 1804-1826.
- [6] Gardner, N. J.: *Triaxial Behavior of Concrete*, ACI Journal, Proceedings Vol. 66, No. 2, February 1969, 136-146.
- [7] Fam, A. Z.; Rizkalla, S. H.: *Confinement Model for Axially Loaded Concrete Confined by Circular Fiber-Reinforced Polymer Tubes*, ACI Structural Journal, Vol. 98, No. 4, July-August 2001, 451-461.
- [9] ACI 440. 2R-02: *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*, Reported by ACI Committee 440, July 2002.
- [8] Tomičić, I.: *Utjecaj ovijenosti betona na nosivost i duktilnost elemenata naprezanih savijanjem*, Građevinar 37(1985.), 12, 521.-526.