

PRETHODNO NAPREGNUTE BETONSKE KONSTRUKCIJE

Nenad PEČIĆ – materijal za nastavu – radna verzija

2024.

LEKCIJA 7: KONTROLA GLAVNIH NAPONA ZATEZANJA (PRORAČUN PREMA TRANSVERZALNIM SILAMA)

Napomena: U lekcijama 1 – 5 objašnjen je koncept PN i, kroz primer, prikazan pragmatičan pristup projektovanju koji polazi od zadovoljenja SLS zahteva. U Lekcijama 6 i 7 proveravaju se ULS zahtevi. S obzirom da je konstrukcija u primeru poprečno opterećena – napregnuta na savijanje – to, kao i kod armiranobetonskih konstrukcija, podrazumeva obezbeđenje u odnosu na momente i transverzalne sile. Provera u odnosu na savijanje urađena je u Lekciji 60. U ovoj, Lekciji 7, vrši se provera u odnosu na transverzalne sile. Nosač je već koncipiran, a njegove karakteristike (presečne sile, preseči, materijali) poznate. Zbog toga proračun u odnosu na beton znači proveru uslova prikazanih u nastavku, a, u zavisnosti od rezultata, radi se proračun potrebne armature (uzengija) za nošenje transverzalnih sila. Kao i ranije, tekst u italic-u predstavlja uputstva za studente; uspravan tekst je primer prikaza u projektnoj dokumentaciji.

Nije predviđeno da iz ove lekcije studenti samostalno rade PIO zadatak. Međutim, standardizovani zadatak iz proračuna prema transverzalnim silama je u programu za pismeni ispit (zadatak za proračun PN nosača prema transverzalnim silama, kao i drugi tipovi zadataka za polaganje pismenog ispita, biće prezentiran u materijalu za pripremu ispita koji će biti dostupan na kraju kursa). Sve varijante proračuna PN nosača prema transverzalnim silama (koje se mogu javiti na pismenom ispitu) prikazane su u primeru u nastavku.

Proračun na smicanje PN nosača sprovodi se prema istim obrascima Evrokoda 2 koji se koriste i za armiranobetonske (ne-PN elemente).

Međutim, trebalo bi primetiti i neke razlike u načinu primene i očekivanim rezultatima. Na početku treba primetiti da je merodavna transverzalna sila PN nosača razlika transverzalne sile od spoljnih opterećenja i transverzalne sile od EO (jer je EO suprotnog znaka). To, pri istim uslovima (opterećenjima) čini situaciju kod PN nosača povoljnijom u odnosu na AB nosače (sila je manja). Osim toga, postojanje podužnog pritiska od PN takođe povoljno utiče na nosivost pri smicanju. Generalno, moguće je da:

- (1) Beton može da prihvati smicanje (zatezanje) od transverzalne sile, i nije potrebna proračunska armatura za smicanje, ili*
- (2) Beton ne može da prihvati smicanje (zatezanje) od transverzalne sile, i potrebna je proračunska armatura za smicanje.*

Nosivost betonskog PN preseka na smicanje((1), bez proračunske armature za smicanje) je generalno veća od nosivosti AB preseka istih karakteristika. Za to je zaslužan doprinos normalne sile (napona) pritiska od PN (vidi obrasce (6.2a,b) u Prilogu 7.1) izražen kroz (pozitivan) član σ_{cp} , koji je kod AB konstrukcija napregnutih poprečno na savijanje često jednak nuli. Ovo se odnosi na nosače sa prslinama.

Kada je nosač bez prslina u zoni proračuna prema transverzalnim silama (što se može očekivati kod potpunog i ograničenog PN, vidi Lekciju 2 deo 1, str. 6), može se za PN nosače koristiti (uz proveru ispunjenosti uslova „bez prslina“ na način prikazan u primeru u nastavku!) alternativni izraz (6.4) (Prilog 7.1) za nosivost betona pri smicanju za slučaj (1). Ovaj izraz najčešće, kod PN nosača iskazuje dosta veću nosivost betona (bez osiguranja armaturom) pri smicanju.

Kada nisu ispunjeni uslovi za (1), beton ne može da prihvati smicanje (zatezanje) od transverzalne sile, potrebna je proračunska armatura za smicanje – slučaj (2). Proračun u ovom slučaju je veoma sličan proračunu AB elemenata, s tim da treba obratiti pažnju na razliku u veličini kraka unutrašnjih sila z (objašnjeno u primeru u nastavku).

Trapezasto opterećenje sopstvenom težinom, sa ordinatama prema tački 4.3.1, $g_1 = 16,00 \text{ kN/m'}$ (sredina) i $g_2 = 13,11 \text{ kN/m'}$ (oslonac) ima veličinu $13,37 \text{ kN/m'}$ u preseku na $1,50 \text{ m}$ od oslonca. Transverzalna sila na osloncu je $0,5 \times (16,00 + 13,11) \times 17,00 = 247,4 \text{ kN}$, a vrednost na $1,50 \text{ m}$ od oslonca je $247,4 - 0,5 \times (13,11 + 13,37) \times 1,50 = 227,5 \text{ kN}$

$$V(g) = 227,5 \text{ kN}$$

$$V(\Delta g) = 406,1 \text{ kN} \quad (= 26,2 \times 17,00 - 26,2 \times 1,50)$$

$$V(q_1) = 66,7 \text{ kN} \quad (= 4,3 \times 17,00 - 4,3 \times 1,50)$$

$$V(q_2) = 34,1 \text{ kN} \quad (= 2,2 \times 17,00 - 2,2 \times 1,50)$$

Transverzalna sila od PN se može sračunati iz ekvivalentnog opterećenja, ili, s obzirom da je nosač statički određen, kao $P \times \sin \alpha$, gde je α ugao tangente na resultantni kabl i normale na posmatrani presek; pošto je presek vertikalni, α je nagib tangente prema horizontali i može se sračunati uz pomoć prvog izvoda. Trasa resultantnog kabla prikazana je u tački 4.2.

Jednačina resultantnog kabla (odstojanje od donje ivice, na paraboličnom delu):

$$d_p = 60,42 - 41,85 \times (s/1180) \times (2 - s/1180), \text{ (s se unosi u cm).}$$

Položaj kabla za $s = 200 \text{ cm}$ ($x = 1,50 \text{ m}$):

$$d_p = 47,4 \text{ cm}, \quad z_p = 26,1 \text{ cm}.$$

Prvi izvod za $s = 200 \text{ cm}$ ($x = 1,30 \text{ m}$) iznosi:

$$\tan \alpha = (-)41,85 \times (2/1180 - 2 \times 200/1180^2) = 0,0589.$$

Nagib trase u posmatranom preseku

$$\sin \alpha = 0,0588.$$

Međutim, prilikom provere fizo zone (tačka 12.2 Priloga 4.8), konstatovano je da je potrebno izmeniti trase kablova iz rebra, što je i učinjeno sa kablovima broj 4 i 5, koji su sada većim delom pravi. Posledica je da aproksimacija resultantnog kabla parabolom nije više precizna, pa će se položaj i nagib rezultante odrediti prema podacima iz plana kablova. Podaci o trasama kablova se mogu videti i u prilogu 4.7-6(t).

Položaj resultantnog kabla za $s = 1,50 \text{ m}$:

$$d_p = (13,8 \times 2 + 30,9 \times 2 + 64,8 + 94,1 + 114,9)/7 = 51,9 \text{ cm}$$

Položaj resultantnog kabla za $s = 2,50 \text{ m}$:

$$d_p = (13,0 \times 2 + 26,7 \times 2 + 53,9 + 86,8 + 106,8)/7 = 46,7 \text{ cm}$$

Položaj resultantnog kabla za $s = 2,00 \text{ m} = \frac{1}{2}(1,50 + 2,50)$:

$$d_p \approx \frac{1}{2}(51,9 + 46,7) = 49,3 \text{ cm (49,2 cm prema planu kablova)} \quad z_p = 24,2 \text{ cm}.$$

Nagib resultantnog kabla za $s = 2,00 \text{ m}$:

$$\tan \alpha \approx \frac{46,7 - 51,9}{250 - 150} = (-)0,0520$$

Za određivanje transverzalne sile potrebna je vrednost sile PN. Upotrebiće se vrednost iz najbližeg sračunatog preseka. Za fazu prethodnog naprezanja, to je sila na osloncu $P_0 = 5676 \text{ kN}$ (tačka 4.5.4), a za fazu eksploatacije $P_t = 4835 \text{ kN}$, prema preseku na $x = 2/6L$ (tačka 4.6.2.2). U slučaju da su gubici sračunati samo u reprezentativnom preseku, sile bi se uzele prema njemu (5803 kN i 4916 kN).

Transverzalna sila od PN:

$$V(P_0) = 0,0520 \times 5676 = 295,2 \text{ kN}$$

$$V(P_t) = 0,0520 \times 4835 = 251,4 \text{ kN}$$

Ukupna ULS transverzalna sila u preseku na $x = 1,50$ m:

- u fazi PN

$$V_{Ed} = 1,0 \times 227,5 - 1,0 \times 295,2 = (-) 67,7 \text{ kN (sopstvena težina deluje povoljno, } \gamma_G = 1,0)$$

- u fazi eksploatacije

$$V_{Ed} = 1,35 \times 227,5 + 1,35 \times 406,1 + 1,50 \times 34,1 + 1,50 \times 0,5 \times 66,7 - 1,0 \times 251,4 = 705,1 \text{ kN}$$

ili

$$V_{Ed} = 1,35 \times 227,5 + 1,35 \times 406,1 + 1,50 \times 66,7 + 1,50 \times 0,6 \times 34,1 - 1,0 \times 251,4 = 734,7 \text{ kN}$$

$$V_{Ed, \max} = 734,7 \text{ kN}$$

Merodavno je stanje eksploatacije.

ULS moment, samo od spoljnih opterećenja, u preseku na početku horizontalne vute koji odgovara $V_{Ed, \max}$ (opterećenje je $1,35 \times (13,11 + 26,2) + 1,50 \times (4,3 + 0,6 \times 2,2) = 61,5 \text{ kN/m}$):

$$M_{Ed} \approx 1/2 \times 61,5 \times 1,50 \times (34,0 - 1,50) = 1499 \text{ kNm}$$

dok istovremeni (ULS) moment od prethodnog naprezanja iznosi

$$(-)\gamma_p \times P_t \times z_p = -1,0 \times 4835 \times 24,2 \times 10^{-2} = -1170 \text{ kNm}$$

Nosivost na smicanje elementa bez proračunske armature za smicanje

Proračun nosivosti prema transverzalnim silama PN nosača, za slučaj kada nije potrebna armatura za smicanje, može da ima dve varijante.

Prva varijanta se odnosi na PN nosače kod kojih u su u zoni velikih transverzalnih sila momenti savijanja mali (slobodni oslonac, odgovara razmatranom primeru), tako da nema prslina od savijanja. Potrebno je dokazati da je ivični napon, ukoliko je zatezanje, manji (po apsolutnoj vrednosti) od $f_{ctk,0,05}/\gamma_c$.

Druga varijanta primenjuje opšti postupak za određivanje nosivosti na smicanje V_{Rdc} za armiranobetonske elemente bez armature za smicanje, s tim da postoji povoljni učinak podužnog normalnog napona σ_{cp} od sile PN. Ova varijanta se uvek može primenjivati, na strani sigurnosti, i onda kada su ispunjeni uslovi za prvu varijantu. Nosivost elementa određena po drugoj varijanti, kada su ispunjeni uslovi za prvu varijantu je obično manja u odnosu na prvu.

Prva varijanta (za elemente bez prslina u zoni kontrole)

Kontrola napona na ivici 1:

Maksimalno zatezanje ne sme da bude veće od $f_{ctk,0,05}/\gamma_c$. Za C35/45, $f_{ctk,0,05} = 2,2 \text{ MPa}$ i

$$f_{ctk,0,05}/\gamma_c = 2,2/1,50 = 1,5 \text{ MPa}$$

Napon na ivici 1 u eksploataciji, za granično opterećenje i $\gamma_p = 1,0$,

$$\sigma_{c,1}(t) = \frac{4835}{5340} + \frac{117000 - 149900}{169845} = 0,71 > -0,15 \text{ kN/cm}^2$$

pa se može primeniti postupak za elemente bez prslina (jednačina (6.4) EN1992-1-1):

$$f_{ctd} = \alpha_{ct} \times f_{ctk,0,05}/\gamma_c = 1,0 \times 2,2/1,50 = 1,5 \text{ MPa} = 0,15 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_{cp} = \frac{4835}{5340} = 0,905 \text{ kN/cm}^2$$

$$b_{w, \text{nom}} = 200 - 0,5 \times 1 \times 60 = 170 \text{ mm} = 17,0 \text{ cm.}$$

Nosivost na smicanje, izračunata prema naponima u težištu:

$$V_{Rd,c} = \frac{12\,483\,600 \times 17,0}{118\,223} \sqrt{0,15^2 + 1,0 \times 0,905 \times 0,15} = 714,1 \text{ kN}$$

Preporučljivo je da se nosivost izračuna i prema naponima koji nisu težišni (uzima se najmanja nosivost!): potrebno je izabrati mesto gde je τ napon takođe veliki (okolina težišta i gde je presek male širine), a σ napon je manji od težišnog. S obzirom da je, u razmatranom primeru, ULS moment od spoljnog opterećenja veći od momenta od PN, pritisak opada ispod težišta. Proračun će se uraditi na spoju rebra i donje flanše. Uticaji PN se uzimaju umoženi sa faktorom α_1 uvođenja sile PN, koji za kablove ankerovane kotvama iznosi 1,0.

Napon u betonu na spoju rebra i donje flanše:

$$\sigma_c = \frac{4835}{5340} + \frac{1170\,00 - 1499\,00}{12\,483\,600} (73,5 - 40,0) = 0,82 \text{ kN/cm}^2$$

$$S = 107\,000 \text{ cm}^3 \text{ (statički moment donje flanše prema težištu preseka).}$$

Nosivost na smicanje, izračunata prema naponima na spoju rebra i donje flanše:

$$V_{Rd,c} = \frac{12\,483\,600 \times 17,0}{107\,000} \sqrt{0,15^2 + 1,0 \times 0,82 \times 0,15} = 756,5 \text{ kN}$$

Merodavna je vrednost prema naponima u težištu. *To je stoga što je ukupni moment od opterećenja i PN veoma mali (1499 – 1170 kNm). Kada je razlika momenata veća, može se dobiti da je merodavna vrednost van težišta, na mestu gde je širina preseka mala i ka manje pritisnutoj strani.*

$$V_{Rd,c} = 714,1 \text{ kN} < V_{Ed,max} = 734,7 \text{ kN}$$

Potrebno je osiguranje armaturom.

Druga varijanta (za elemente sa prslinama u zoni kontrole):

$$d = 147,0 - 49,3 = 97,7 \text{ cm} = 977 \text{ mm}$$

$$\rho_l = \frac{A_p}{b_w d} = \frac{58,38}{20 \times 97,7} = 0,0299 > 0,02 \rightarrow \rho_l = 0,02$$

(Napomena: U gornjem izrazu za veličinu ρ_l – koja se dalje primenjuje u izrazu (6.2a) EN 1992-1-1 – nije na strani sigurnosti da se uzme $b_w = b_{w,nom}$ prema izrazu (6.16) Evrokoda 2. Zato je upotrebljena bruto širina rebra $b_w = 20 \text{ cm}$.)

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{977}} = 1,452$$

$$\sigma_{cp} = 0,905 \text{ kN/cm}^2 = 9,05 \text{ N/mm}^2$$

$0,2f_{cd} = 0,40 \text{ kN/cm}^2 < \sigma_{cp} = 0,905 \text{ kN/cm}^2 \rightarrow$ uzima se za proračun $V_{Rd,c}$ vrednost $0,2f_{cd} = 4,0 \text{ MPa}$ umesto σ_{cp} :

$$V_{Rd,c} = [0,12 \times 1,452 \times (100 \times 0,02 \times 35)^{1/3} + 0,15 \times 4,0] \times 170 \times 977 = 218\,900 \text{ N}$$

Drugi uslov (uzima se veći!):

$$v_{min} = 0,035 \times 1,452^{3/2} \times 35^{1/2} = 0,362$$

$$V_{Rd,c} = [0,362 + 0,15 \times 4,0] \times 170 \times 77 = 159\,800 \text{ N} = 159,8 \text{ kN}$$

$$V_{Rd,c} = 218,9 \text{ kN} < V_{Ed,max} = 734,7 \text{ kN}$$

Zaključak: potrebno je osiguranje armaturom.

Maksimalna nosivost na smicanje

Maksimalna nosivost na smicanje određuje se istim postupkom kao za armiranobetonske elemente, ali postoje specifičnosti pri izračunavanju b_w , α_{cw} i z . Ostali inputi podležu standardnom postupku.

$$b_w = b_{w,nom} = 170 \text{ mm} = 17,0 \text{ cm.}$$

$$f_{cd} = 0,85 \times 35 / 1,50 = 19,83 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{cp} = 0,905 \text{ kN/cm}^2$$

$$0,25f_{cd} = 0,50 \text{ kN/cm}^2 < \sigma_{cp} < 0,5f_{cd} = 0,99 \text{ kN/cm}^2 \rightarrow \alpha_{cw} = 1,25$$

$$z = 77,7 \text{ cm} = 777 \text{ mm}$$

Krak unutrašnjih sila „ z “ se za armiranobetonske elemente napregnute na savijanje može, za proračun na smicanje, usvojiti kao $0,9d$. Kod PN elemenata on može biti dosta manji i ova vrednost nije na strani sigurnosti. Bolja pretpostavka je $0,7 \div 0,8d$, ili se može uraditi ULS proračun na savijanje i na taj način dobiti „tačna“ vrednost. Navedena vrednost ($77,7 \text{ cm} \sim 0,8d$) usvojena je kao rastojanje od rezultantnog kabla do sredine gornje flanše). Imajući u vidu da se d povećava u zoni proračuna, zbog nagnutosti kablova, prikazana vrednost je na strani sigurnosti za sve ostale preseke ka rasponu.

$$v = v_1 = 0,6 \times \left(1 - \frac{35}{250}\right) = 0,516$$

Najveća vrednost maksimalne nosivosti na smicanje $V_{Rd,max}$, za $\cot\theta = \tan\theta = 1,0$ (nagib pritisnutih štapova $\theta = 45^\circ$) iznosi:

$$V_{Rd,max} = 1,25 \times 170 \times 777 \times 0,516 \times 19,83 / (1,0 + 1,0) = 844\,700 \text{ N}$$

$$V_{Rd,max} = 844,7 \text{ kN} > V_{Ed,max} = 734,7 \text{ kN}$$

Najmanja vrednost za $V_{Rd,max}$, za $\cot\theta = 2,5$ i $\tan\theta = 0,4$ (nagib pritisnutih štapova $\theta \approx 22^\circ$) iznosi:

$$V_{Rd,max} = 1,25 \times 170 \times 777 \times 0,516 \times 19,83 / (2,5 + 0,4) = 582\,600 \text{ N}$$

$$V_{Rd,max} = 582,6 \text{ kN} < V_{Ed,max} = 734,7 \text{ kN}$$

Pošto je $V_{Rd,max} (\theta = 22^\circ) < V_{Ed,max} < V_{Rd,max} (\theta = 45^\circ)$, najmanji raspoloživi ugao θ se može dobiti iz uslova $V_{Rd,max} = V_{Ed,max}$:

$$V_{Rd,max} = 734,7 \text{ kN} \rightarrow \sin(2\theta) = \frac{2 \times 734\,700}{1,25 \times 170 \times 777 \times 0,516 \times 19,83} = 0,870 \rightarrow \theta = 30,2^\circ$$

Usvaja se za proračun armature za smicanje $\theta = 30,2^\circ$; $\tan(30,2^\circ) = 0,582$

(Kada je $V_{Ed,max} \leq V_{Rd,max} (\theta = 22^\circ)$, proračun se može nastaviti sa bilo kojim uglom θ ($22^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$). Kada je $V_{Ed,max} > V_{Rd,max} (\theta = 45^\circ)$ potreban je „jači“ presek – u razmatranom primeru to znači šire rebro. Kada je $V_{Rd,max} (\theta = 22^\circ) < V_{Ed,max} < V_{Rd,max} (\theta = 45^\circ)$, kao u primeru, može se odrediti ugao θ_1 za koji je $V_{Rd,max}(\theta = \theta_1) = V_{Ed,max}$, a za dalji proračun može se usvojiti θ iz opsega $\theta_1 \leq \theta \leq 45^\circ$. Najmanja armatura za smicanje dobija se kada se usvoji najmanji raspoloživi ugao θ !)

Proračun armature za smicanje

Armatura se određuje iz uslova

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \times z \times f_{ywd} \times \cot\theta \geq V_{Ed} \rightarrow \frac{A_{sw}}{s} \geq \frac{V_{Ed} \times \tan\theta}{z \times f_{ywd}}$$

$$f_{ywd} = f_{ywk} / 1,15 = 500 / 1,15 = 435 \text{ MPa} = 43,5 \text{ kN/cm}^2$$

$$\frac{A_{sw}}{s} \geq \frac{734,7 \times 0,582}{77,7 \times 43,5} = 0,127 \text{ cm}^2/\text{cm} = 12,7 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Usvaja se $2\emptyset 12/15 \text{ cm}$ ($15,1 \text{ cm}^2/\text{m}$).

Minimalni koeficijent armiranja armaturom za smicanje

$$\rho_{w,\min} = \frac{0,08\sqrt{35}}{500} = 0,95 \times 10^{-3}.$$

Minimalna vertikalna armatura za smicanje

$$\left(\frac{A_{sw}}{s}\right)_{\min} \geq 0,95 \times 10^{-3} \times 20,0 = 0,0190 \text{ cm}^2/\text{cm} = 1,90 \text{ cm}^2/\text{m}.$$

Maksimalni razmak uzengija u zoni osiguranja (prema NA, 9.2.2(6), Tabela 1, za slučaj $V_{Ed,\max} > 0,6V_{Rd,\max}$) iznosi $0,25 \times 977 = 245 \text{ mm}$, ali ne više od $200 \text{ mm} \rightarrow s_{\max} = 200 \text{ mm} > 15 \text{ cm}$.

Ponavljanjem prethodnog proračuna u još 1 – 2 preseka, idući ka rasponu, trebalo bi utvrditi mogućnost povećanja razmaka ili smanjenja prečnika armature za smicanje u presecima koji su dalje od oslonca. S obzirom na debljinu rebra, razmak vertikalne armature ne bi trebalo povećavati preko $200 \div 250 \text{ mm}$, kako bi se izbeglo nastajanje prslina od skupljanja betona, a prečnik upotrebljene armature uzengija, imajući u vidu sveukupne dimenzije preseka i nosača, ne bi trebalo da bude manji od $\emptyset 8$. S druge strane, udaljavanjem od oslonca, osim što opada transverzalna sila, povećavaju se dimenzije preseka, ekscentricitet kablova (statička visina) i krak unutrašnjih sila, tako da se relativno „blizu“ može očekivati ispunjenje uslova za navedenu slabiju armaturu za smicanje. Povećanje razmaka prevashodno je motivisano stvaranjem uslova za lakšu (kvalitetniju) ugradnju betona, a ne uštedom u količini armature.

4.9. Armatura za osiguranje zatezanja od savijanja

Ukoliko su pri proračunu dobijeni normalni naponi zatezanja, trebalo bi ih osigurati (običnom) armaturom. Svrha ovoga je da ukoliko nastane prslina njena propagacija po visini preseka bude ograničena, a širina mala. Zbog ograničavanja širine prikladno je da napon u armaturi koja bi prihvatila zatezanje ne bude veliki. Napon od $200 - 250 \text{ MPa}$ orijentaciono odgovara širini prslina od oko $0,2 \text{ mm}$, za zatezanje u eksploataciji. Za fazu prethodnog naprezanja može da se uzme i do f_{yd} , jer će zona koja je zategnuta pri PN u eksploataciji biti pritisnuta. U primeru u fazi PN nije bilo zatezanja (kod projektovanog nosača, iako je bilo dopušteno zatezanje, za izabrane preseke i PN, napon na gornjoj ivici je ostao pritisak. U fazi eksploatacije, presek u sredini raspona je na donjoj ivici pri karakterističnoj kombinaciji imao računsko zatezanje od $0,19 \text{ kN/cm}^2$, uz istovremeni pritisak na gornjoj ivici od $1,72 \text{ kN/cm}^2$.

Za presek u sredini raspona dobijen je (tačka 4.7.4.1 Priloga 5.4) napon zatezanja na donjoj ivici od $0,19 \text{ kN/cm}^2$ pri karakterističnoj kombinaciji, uz istovremeni pritisak na gornjoj ivici od $1,72 \text{ kN/cm}^2$. Visina zategnute zone je (visina preseka je 200 cm):

$$h - x = \frac{0,19}{0,19 + 1,72} \cdot 200 = 19,9 \text{ cm}.$$

Ukupna sila zatezanja u betonu (širina preseka je 50 cm , trougaoni dijagram zatezanja):

$$F = 0,5 \times 50 \times 19,9 \times 0,17 = 94,5 \text{ kN}.$$

Za usvojeni dopušteni napon od $200 \text{ MPa} = 20,0 \text{ kN/cm}^2$ potrebna površina iznosi:

$$A_s = 94,5 / 20,0 = 4,73 \text{ cm}^2.$$

Usvojena konstruktivna armatura $4\emptyset 16$ ($8,04 \text{ cm}^2$) (vođice uzengija) zadovoljava. U ostalim računatim presecima (presek na $x=2/6L$) dobijeno je slično računsko zatezanje. Usvaja se ista armatura duž celog nosača.

PRILOG 7.1

(Izvodi iz teorije – obrasci potrebni za proračun; numeracija poglavlja i izraza je prema Evrokodu 2:)

6.2.2 ELEMENTI U KOJIMA NIJE POTREBNA PRORAČUNSKA ARMATURA ZA SMICANJE

- (1) Proračunska vrednost nosivosti pri smicanju $V_{Rd,c}$ data je izrazom:

$$V_{Rd,c} = [C_{Rd,c} k (100 \rho_l f_{ck})^{1/3} + k_1 \sigma_{cp}] b_w d \quad (6.2.a)$$

sa minimalnom vrednošću

$$V_{Rd,c} = (v_{\min} + k_1 \sigma_{cp}) b_w d \quad (6.2.b)$$

gde je:

$$f_{ck} \quad \text{u [MPa]}$$

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0 \quad \text{sa } d \text{ u [mm]}$$

$$\rho_l = \frac{A_{sl}}{b_w d} \leq 0,02$$

A_{sl} površina zategnute armature, koja se produžava za $\geq (l_{bd} + d)$ dalje od posmatranog preseka

b_w najmanja širina poprečnog preseka u zategnutoj zoni u [mm]

$$\sigma_{cp} = N_{Ed} / A_c < 0,2 f_{cd} \text{ u [MPa]}$$

N_{Ed} aksijalna sila u poprečnom preseku od opterećenja ili prethodnog naprezanja, u [N] ($N_{Ed} > 0$ za pritisak). Uticaj prinudnih deformacija na N_{Ed} može da se zanemari

A_c površina poprečnog preseka betona u [mm²]

$V_{Rd,c}$ u [N].

Napomena: Vrednosti $C_{Rd,c}$, $v_{\min}$ i k_1 , koje se primenjuju u određenoj zemlji, date su u njenom Nacionalnom aneksu. Preporučena vrednost za $C_{Rd,c} = 0,18 / \gamma_c$, za $v_{\min}$ vrednosti su date u izrazu (6.3N) i $k_1 = 0,15$.

$$v_{\min} = 0,035 k^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2} \quad (6.3N)$$

- (2) U prethodno napregnutim elementima preko jednog polja, bez armature za smicanje, nosivost pri smicanju u zonama sa prslinama usled savijanja može da se sračuna prema izrazu (6.2a). U zonama u kojima nema prslina od savijanja (gde je napon u betonu pri zatezanju savijanjem manji od $f_{ctk,0,05} / \gamma_c$), nosivost pri smicanju treba da se ograniči na vrednost čvrstoće betona pri zatezanju. U tim zonama nosivost pri smicanju data je izrazom:

$$V_{Rd,c} = \frac{I \cdot b_w}{S} \sqrt{(f_{ctd})^2 + \alpha_1 \sigma_{cp} f_{ctd}} \quad (6.4)$$

gde je:

I moment inercije poprečnog preseka

b_w širina poprečnog preseka u težišnoj osi, vodeći računa o otvorima cevi za kablove, prema izrazima (6.16) i (6.17)

S statički momenat površine poprečnog preseka iznad težišne ose, u odnosu na težišnu osu

- $\alpha_1 = l_x / l_{pt2} \leq 1,0$ za prethodno zategnute kablove
 $= 1,0$ za druge vrste prethodnog naprezanja
 l_x rastojanje posmatranog preseka od početka dužine prenošenja (*transmission length*) sile prethodnog naprezanja
 l_{pt2} gornja granična vrednost dužine prenošenja sile prethodnog naprezanja, prema izrazu (8.18)
 σ_{cp} napon pritiska u betonu, u težišnoj osi preseka, od aksijalnog opterećenja i/ili prethodnog naprezanja ($\sigma_{cp} = N_{Ed} / A_c$ u [MPa], $N_{Ed} > 0$ za pritisak).

Za poprečne preseke u kojima se širina preseka menja po visini, glavni napon može da ima maksimalnu vrednost na osi koja se razlikuje od težišne ose. U takvom slučaju minimalna vrednost nosivosti pri smicanju treba da se odredi sračunavanjem $V_{Rd,c}$ u različitim osama po visini poprečnog preseka.

(3) Proračun nosivosti pri smicanju prema izrazu (6.4) nije potreban za poprečne preseke koji se nalaze na rastojanju od oslonca manjem od preseka elastične težišne ose i prave koja polazi od unutrašnje ivice oslonca pod uglom od 45° .

Vrednost ν data je u Nacionalnom aneksu.

$$\nu = 0,6 \left[1 - \frac{f_{ck}}{250} \right] \quad (f_{ck} \text{ u MPa}) \quad (6.6N)$$

6.2.3 ELEMENTI U KOJIMA JE POTREBNA PRORAČUNSKA ARMATURA ZA SMICANJE

Oznake:

- α ugao između armature za smicanje i ose grede upravne na silu smicanja
 θ ugao između pritisnutog betonskog štapa i ose grede upravne na silu smicanja
 b_w minimalna širina poprečnog preseka između zategnutog i pritisnutog pojasa
 z krak unutrašnjih sila za element sa konstantnom visinom poprečnog preseka, koji odgovara momentu savijanja u posmatranom elementu. U analizi smicanja armiranobetonskih elemenata bez aksijalne sile, normalno može da se usvoji aproksimativna vrednost $z = 0,9 d$.

U elementima sa kablovima za prethodno naprezanje koji su u nagibu, u zategnutom pojasu treba da se predvidi podužna armatura za prihvatanje podužne sile zatezanja od smicanja, definisane u tački (7).

(2) Ugao θ treba da se ograniči. Granične vrednosti su $1 \leq \cot \theta \leq 2,5$ (6.7N)

(3) Za elemente sa vertikalnom armaturom za smicanje, nosivost pri smicanju, V_{Rd} , jednaka je manjoj od sledeće dve vrednosti:

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} z f_{ywd} \cot \theta \quad (6.8)$$

$$V_{Rd,max} = \alpha_{cw} b_w z \nu_1 f_{cd} / (\cot \theta + \tan \theta) \quad (6.9)$$

gde je:

- A_{sw} površina preseka armature za smicanje
 s rastojanje uzengija
 f_{ywd} proračunska granica razvlačenja armature za smicanje
 ν_1 koeficijent kojim se smanjuje čvrstoća betona zbog prslina od smicanja
 α_{cw} koeficijent kojim se uzima u obzir stanje napona u pritisnutom pojasu.

Vrednosti ν_1 i a_{cw} , koje se primenjuju u određenoj zemlji, date su u njenom Nacionalnom aneksu. Preporučena vrednost za ν_1 je ν (videti izraz (6.6N)).

Preporučena vrednost a_{cw} je:

1	za konstrukcije koje nisu prethodno napregnute	
(1 + σ_{cp}/f_{cd})	za	$0 < \sigma_{cp} \leq 0,25 f_{cd}$ (6.11.aN)
1,25	za	$0,25 f_{cd} < \sigma_{cp} \leq 0,5 f_{cd}$ (6.11.bN)
2,5 (1 - σ_{cp}/f_{cd})	za	$0,5 f_{cd} < \sigma_{cp} < 1,0 f_{cd}$ (6.11.cN)

gde je: σ_{cp} srednja vrednost napona pritiska u betonu, sa pozitivnim znakom, od proračunske aksijalne sile. Dobija se kao srednja vrednost napona u betonskom preseku, uzimajući u obzir i armaturu. Vrednost σ_{cp} ne treba da se sračuna na rastojanju manjem od $0,5d \cdot \cot \theta$ od ivice oslonca.

Maksimalna efektivna površina preseka armature za smicanje $A_{sw,max}$, za $\cot \theta = 1$, data je izrazom:

$$\frac{A_{sw,max} f_{ywd}}{b_w s} \leq \frac{1}{2} \alpha_{cw} \nu_1 f_{cd} \quad (6.12N)$$

(5) U zonama elemenata u kojima nema diskontinuiteta sile V_{Ed} (na primer, za jednako podeljeno opterećenje), armatura za smicanje na svakom inkrementu dužine $l = z (\cot \theta + \cot \alpha)$ može da se sračuna prema najmanjoj vrednosti V_{Ed} na posmatranom inkrementu dužine.

(6) Kada su u rebu kablovi u injektiranim cevima prečnika $\varnothing > b_w/8$, nosivost pri smicanju $V_{Rd,max}$ treba da se sračuna sa nominalnom debljinom rebra datom izrazom:

$$b_{w,nom} = b_w - 0,5 \Sigma \varnothing \quad (6.16)$$

gde je $\varnothing$ spoljašnji prečnik cevi a $\Sigma \varnothing$ se određuje na najnepovoljnijem nivou visine poprečnog preseka.

Za cevi od rebrastog lima, u kojima su kablovi injektirani, za $\varnothing \leq b_w/8$ može da se smatra da je $b_{w,nom} = b_w$.

Za cevi koje nisu injektirane, za injektirane plastične cevi i za kablove bez prianjanja sa betonom, nominalna širina rebra je:

$$b_{w,nom} = b_w - 1,2 \Sigma \varnothing \quad (6.17)$$

Vrednost 1,2 u izrazu (6.17) uvedena je da bi se uzelo u obzir cepanje pritisnutih betonskih štapova usled poprečnog zatezanja. Ako je obezbeđena adekvatna poprečna armatura ta vrednost može da se smanji na 1,0.

(7) Dodatna sila zatezanja u podužnoj armaturi, ΔF_{td} , usled smicanja V_{Ed} , može da se sračuna prema:

$$\Delta F_{td} = 0,5 V_{Ed} (\cot \theta - \cot \alpha) \quad (6.18)$$

pri čemu $(M_{Ed}/z) + \Delta F_{td}$ ne treba da se uzme veće od $M_{Ed,max}/z$, gde je $M_{Ed,max}$ maksimalni moment duž raspona grede.