

4.6. Gubici sile prethodnog naprezanja u vremenu {9}

Proračun se sprovodi prema odredbama Evrokoda 2 (EN 1992-1-1:2004).

Gubici se sračunavaju prema uticajima u preseku u sredini raspona. Usvaja se da je u svim presecima relativni gubitak u vremenu dovoljno približan ovako sračunatoj vrednosti. {n}

4.6.1. Gubitak od čiste relaksacije {10}

S obzirom na male varijacije sile (početnog napona) PN – posmatrano sa aspekta ulaznog podatka za procenu relaksacije – proračun će se sprovesti sa početnim naponom prema reprezentativnom preseku u sredini raspona. Kako je u njemu, u razmatranom primeru, početna sila PN najveća, ovaj pristup je i na strani sigurnosti.

Ulazni podaci:

- klasa relaksacije: 2 (*žice i užad sa niskom relaksacijom*)
- relaksacija nakon 1000 časova: $\rho_{1000} = 2,5 \%$ (3.3.2(6) EN 1992-1-1:2004)
- početni napon u užadima: $\sigma_{pi} = 5803/58,38 = 99,4 \text{ kN/cm}^2$
- karakteristična čvrstoća: $f_{pk} = 167,0 \text{ kN/cm}^2$ (IMS SPB katalog)
- odnos napona: $\sigma_{pi} / f_{pk} = 99,4/167,0 = 0,595$
- vreme: 500 000 časova (~57 godina), $t/1000 = 500$
- pad napona usled čiste relaksacije: (3.3.2(7) EN 1992-1-1:2004 – Prilog 5.2)

$$\Delta\sigma_{pr} = 99,4 \cdot 0,66 \cdot 2,5 \cdot e^{9,1 \times 0,595} \cdot 500^{0,75 \times (1 - 0,595)} \cdot 10^{-5} = 2,43 \text{ kN/cm}^2.$$

Zbog promene dužine nosača kroz vreme usled skupljanja i tečenja betona, kablovi se skraćuju. Relaksacija koja se odvija pri promeni dužine je redukovana (nije 'čista'). Efekat redukcije se uključuje direktno u konačnom obrascu, množenjem pada napona koeficijentom 0,8. {n}

4.6.2. Gubici u vremenu (ukupni) {11}

Ulazni podaci:

- RH = 60 %, beton klase C35/45, cement klase R
- srednja debljina elementa, prema preseku u sredini:
 $2 \times 6400 / [(50 + 35 + 18.03 + 110 + 18.03 + 35) \times 2] = 24,1 \text{ cm};$
- dilatacija tečenja, za opterećenje koje nastaje 16. dana (faza PN): $\varphi(\infty, 16) = 2,22$; (Prilog B EN1992-1-1)
- dilatacija tečenja, za opterećenje koje nastaje (oko) 90. dana (Δg): $\varphi(\infty, 90) = 1,66$;
- konačna dilatacija skupljanja: $\varepsilon_{cs} = 0,515 \times 10^{-3}$ (Prilog B EN1992-1-1);
- čista relaksacija: $2,43 \text{ kN/cm}^2$; (tačka 4.6.1.)

Vrednosti koeficijenata tečenja φ i dilatacije skupljanja ε_{cs} mogu se očitati sa nomograma i iz tabela u poglavlju 3.1.4 Evrokoda 2. Dosta preciznije, vrednosti se mogu direktno izračunati korišćenjem izraza navedenih u Prilogu (Aneksu) B Evrokoda 2. Napred navedene vrednosti dobijene su ovakvim proračunom. Preporučuje se određivanje proračunom ili uz pomoć tabela zadovoljavajuće preciznosti (koje obuhvataju sve relevantne parametre). Studenti su tabele sa vrednostima koeficijenta tečenja i dilatacije skupljanja dobili u kursu TBK2 (Proračun ugiba armiranobetonskih konstrukcija), a mogu se preuzeti i na linku navedenom u predavanju.

Koeficijenti tečenja φ , određeni prema Evrokodu 2, odgovaraju tangentnom modulu betona E_c , čija je vrednost 5 % veća od sekantnog modula E_{cm} , $E_c = 1,05 \times E_{cm}$. {n}

4.6.2.1. Gubici u vremenu za presek u sredini raspona

Geometrijske karakteristike preseka u sredini raspona:

$$\begin{aligned} A_c &= 6400 \text{ cm}^2, \\ I_c &= 29\,013\,000 \text{ cm}^4, \\ A_p &= 58,38 \text{ cm}^2, \\ \text{ekscentricitet kablova } z_{cp} &= 81,43 \text{ cm}, \\ E_c &= 1,05 \times 34 = 35,7 \text{ GPa}, E_p = 195 \text{ GPa}, \\ E_p/E_c &= 195/35,7 = 5,46. \end{aligned}$$

Uticaji u sredini raspona:

$$\begin{aligned} \text{početna sila PN iznosi } P_0 &= 5803 \text{ kN}, & (\text{tačka 4.5.4 – Prilog 5.1}) \\ M(g) &= 2173 \text{ kNm (16. dan)}, & (\text{tačka 4.4 – Prilog 5.1}) \\ M(\Delta g) &= 3786 \text{ kNm (90. dan)}. \end{aligned}$$

{12} Napon u betonu, u nivou težišta kablova, od opterećenja 16. i 90. dana:

$$\sigma_{c,p}(16) = \frac{5803}{6400} + \frac{5803 \cdot 81,43 - 217300}{29\,013\,000} \cdot 81,43 = 1,62 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_{c,p}(90) = \frac{-378600}{29\,013\,000} \cdot 81,43 = -1,06 \text{ kN/cm}^2.$$

Ukupni dugotrajni napon nakon 90. dana:

$$\sigma_{c,p} = 1,62 + (-1,06) = 0,56 \text{ kN/cm}^2.$$

Zajednički (zamenjujući) koeficijent tečenja za ukupni dugotrajni napon:

$$\varphi(\infty, t_0) = \frac{1,62 \times 2,22 + (-1,06) \times 1,66}{1,62 + (-1,06)} = 3,28.$$

Ova aproksimacija je potrebna jer obrazac ne predviđa unošenje opterećenja u dve faze.

Pad napona u kablovima usled skupljanja i tečenja betona i relaksacije čelika (obrazac (5.46) EN 1992-1-1:2004):

$$\Delta\sigma_p = \frac{0,515 \cdot 10^{-3} \cdot 19500 + 0,8 \cdot 2,43 + 5,46 \cdot 3,28 \cdot 0,56}{1 + 5,46 \cdot \frac{58,38}{6400} \cdot \left(1 + \frac{6400 \cdot 81,43^2}{29\,013\,000}\right)} \cdot (1 + 0,8 \cdot 3,28) = 15,2 \text{ kN/cm}^2$$

Konačni (trajni) napon i sila u kablovima:

$$\begin{aligned} \sigma_{p,t} &= 99,4 - 15,2 = 84,2 \text{ kN/cm}^2, \\ P_t &= 58,38 \times 84,2 = 4916 \text{ kN}, \\ \eta &= 4916/5803 = 0,847 \text{ (odnos trajne i početne sile PN)}. \end{aligned}$$

Ukupni pretpostavljeni koeficijent trajne sile u fazi razrade bio je $(1-0,10) \times (1-0,20) = 0,720$.

*Sračunati koeficijent trajne sile iznosi $0,911 \times 0,847 = 0,772$, to jest sračunati ukupni gubici su oko $0,772 - 0,720 = 0,052 = 5\%$ manji od pretpostavljenih. **Zato je sila na presi, u konačnoj verziji umanjena sa 940 kN, iz faze razrade, na usvojenih 910 kN (-3,2 %). Time su, približno, očuvani efekti ciljani tokom razrade i izbegnuta prekoračenja napona. {n}***

4.6.2.2. Gubici u vremenu za presek na $x=2/6L$ **{13}**

Geometrijske karakteristike preseka na $x=2/6L$:

$$\begin{aligned} A_c &= 6013 \text{ cm}^2, \\ I_c &= 22\,022\,000 \text{ cm}^4, \end{aligned}$$

$$A_p = 58,38 \text{ cm}^2,$$

$$\text{ekscentricitet kablova } z_{cp} = 71,8 \text{ cm},$$

$$E_c = 35,7 \text{ GPa}, E_p/E_c = 5,46.$$

Uticaji u preseku:

$$\text{početna sila PN iznosi } P_0 = 5711 \text{ kN}, \quad (\text{tačka 4.5.4})$$

$$M(g) = 1932 \text{ kNm (16. dan)},$$

$$M(\Delta g) = 3365 \text{ kNm (90. dan)}. \quad (\text{tačka 4.4})$$

$$\text{Početni napon u užadima: } \sigma_{pi} = 5711/58,38 = 97,8 \text{ kN/cm}^2$$

$$\text{Odnos napona: } \sigma_{pi} / f_{pk} = 97,8/167,0 = 0,586$$

Pad napona usled čiste relaksacije:

$$\Delta\sigma_{pr} = 97,8 \cdot 0,66 \cdot 2,5 \cdot e^{9,1 \times 0,586} \cdot 500^{0,75 \times (1 - 0,586)} \cdot 10^{-5} = 2,30 \text{ kN/cm}^2.$$

Napon u betonu, u nivou težišta kablova, od opterećenja 16. i 90. dana:

$$\sigma_{c,p}(16) = \frac{5711}{6013} + \frac{5711 \cdot 71,8 - 193200}{22022000} \cdot 71,8 = 1,66 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_{c,p}(90) = \frac{-336500}{22022000} \cdot 71,8 = -1,10 \text{ kN/cm}^2.$$

Ukupni dugotrajni napon nakon 90. dana:

$$\sigma_{c,p} = 1,66 + (-1,10) = 0,56 \text{ kN/cm}^2.$$

Zajednički (zamenjujući) koeficijent tečenja za ukupni dugotrajni napon:

$$\varphi(\infty, t_0) = \frac{1,66 \times 2,22 + (-1,10) \times 1,66}{1,66 + (-1,10)} = 3,32.$$

Pad napona u kablovima usled skupljanja i tečenja betona i relaksacije čelika:

$$\Delta\sigma_p = \frac{0,515 \cdot 10^{-3} \cdot 19500 + 0,8 \cdot 2,30 + 5,46 \cdot 3,32 \cdot 0,56}{1 + 5,46 \cdot \frac{58,38}{6013} \cdot \left(1 + \frac{6013 \cdot 71,8^2}{22022000}\right) \cdot (1 + 0,8 \cdot 3,32)} = 15,0 \text{ kN/cm}^2$$

Konačni (trajni) napon i sila u kablovima, na $x=2/6L$:

$$\sigma_{p,t} = 97,8 - 15,0 = 82,8 \text{ kN/cm}^2,$$

$$P_t = 58,38 \times 82,8 = 4835 \text{ kN}.$$

Odnos trajne i početne sile PN je $\eta = 4835/5711 = 0,847$, što je praktično isto kao i u izabranom reprezentativnom preseku u sredini raspona.. Međutim, važniji zaključak je da su trajne sile u ovim presecima praktično slične (4916 i 4835 kN se razlikuju za svega 1,6%), pa se proračun gubitaka konceptom izbora reprezentativnog preseka pokazao sasvim zadovoljavajućim. **{n}**

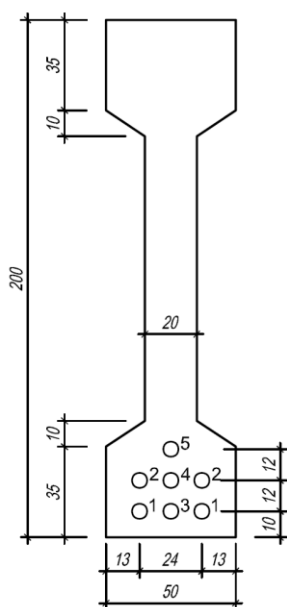
4.7. Dokaz napona **{14}**

Formalno ispravan dokaz napona radi se sa karakteristikama neto i idealizovanog (transformisanog) preseka. U praktičnim proračunima uobičajeno se koristi bruto betonski presek. U nastavku je dokaz sproveden na oba načina, kako bi se ukazalo na moguća prekoračenja napona. **{n}**

4.7.1. Faza PN – neto presek {15}

4.7.1.1. Presek u sredini raspona

Određuju se karakteristike betonskog preseka umanjenog za otvore – cevi za kablove. Postupak proračuna se sprovodi prema uobičajenom načinu iz otpornosti materijala, za presek složen iz dva dela: betonski bruto presek (1), i otvori, (2). Površina otvora se unosi kao negativna, u težištu kablova (otvora). Može se zanemariti sopstveni moment inercije površine otvora. Obrasci prikazani u nastavku predstavljaju uobičajeni postupak otpornosti materijala, prepakovan u oblik pogodan za lakše računanje, kada se proračun sprovodi ručno.



Geometrijske karakteristike betonskog bruto preseka

$$A_c = 6400 \text{ cm}^2$$

$$I_c = 29\,013\,000 \text{ cm}^4$$

$$z_{c,1} = z_{c,2} = 100,0 \text{ cm}$$

(položaj težišta u odnosu na donju i gornju ivicu)

Površina otvora

(površina jedne zaštitne cevi $6,0^2 \times \pi / 4 = 28,27 \text{ cm}^2$)

$$\Delta A_c = -7 \times 28,27 = -198 \text{ cm}^2$$

$$d_p = 18,57 \text{ cm}$$

(odstojanje težišta otvora od donje ivice)

Neto presek:

- površina

$$A_{cn} = 6400 + (-198) = 6202 \text{ cm}^2$$

- položaj težišta

$$z_{cn,1} = 100 - (100 - 18,57) \cdot \frac{-198}{6202} = 102,6 \text{ cm} \quad (= z_{c,1} - (z_{c,1} - d_p) \cdot \frac{\Delta A_c}{A_{cn}})$$

$$z_{cn,2} = 200 - 102,6 = 97,4 \text{ cm}$$

- ekscentricitet kablova u neto preseku

$$z_{cn,p} = 102,6 - 18,57 = 84,03 \text{ cm}$$

- moment inercije

$$I_{cn} = 29\,013\,000 + 6400 \times (100,0 - 97,4)^2 + (-198) \times (102,6 - 18,57)^2 = 27\,658\,000 \text{ cm}^4$$

$$(= I_c + A_c \times (z_{c,2} - z_{cn,2})^2 + \Delta A_c \times (z_{cn,1} - d_p)^2)$$

- otporni momenti

$$W_{cn,1} = 27\,658\,000 / 102,6 = 269\,570 \text{ cm}^3$$

$$W_{cn,2} = 27\,658\,000 / 97,4 = 283\,960 \text{ cm}^3$$

Uticaji u preseku:

$$M(g) = 2173 \text{ kNm} = M_{\min}$$

$$P_0 = 5803 \text{ kN}$$

Geometrijske karakteristike neto preseka su manje od karakteristika bruto preseka, a ekscentricitet je drugačiji. Zbog toga (a i zbog razlike u veličini procenjene i sračunate sile PN), moguće je da neki napon, koji je u fazi razrade bio zadovoljen, sada bude prekoračen. Ova prekoračenja, ipak, ne mogu da budu velika i mogu se rešiti korekcijom sile PN.

Dokaz napona u fazi PN:

- donja ivica

$$\sigma_{c,1}(0) = \frac{5803}{6202} + \frac{5803 \cdot 84,3 - 217300}{269570} = 1,94 = 1,94 \text{ kN/cm}^2$$

- gornja ivica

$$\sigma_{c,2}(0) = \frac{5803}{6202} - \frac{5803 \cdot 84,3 - 217300}{283960} = -0,02 > -0,30 \text{ kN/cm}^2$$

Naponi su zadovoljeni. Prvobitno usvojena sila na presi od 940 kN po kablu dala bi prekoračenje napona pritiska. **{n}**

4.7.1.2. Presek na $x=2/6L$ ($d = 180,7 \text{ cm}$) **{16}**

Geometrijske karakteristike betonskog bruto preseka

$$A_c = 6013 \text{ cm}^2$$

$$I_c = 22\,022\,000 \text{ cm}^4$$

$$z_{c,1} = z_{c,2} = 90,35 \text{ cm}$$

Površina otvora

$$\Delta A_c = -198 \text{ cm}^2$$

$$d_p = 18,57 \text{ cm (odstojanje težišta otvora od donje ivice)}$$

Neto presek:

- površina

$$A_{cn} = 5815 \text{ cm}^2$$

- položaj težišta

$$z_{cn,1} = 92,7 \text{ cm}$$

$$z_{cn,2} = 88,0 \text{ cm}$$

- ekscentricitet kablova u neto preseku

$$z_{cn,p} = 74,1 \text{ cm}$$

- moment inercije

$$I_{cn} = 20\,967\,000 \text{ cm}^4$$

- otporni momenti

$$W_{cn,1} = 226\,180 \text{ cm}^3$$

$$W_{cn,2} = 238\,260 \text{ cm}^3$$

Uticaji u preseku:

$$M(g) = 1932 \text{ kNm} = M_{\min}$$

$$P_0 = 5711 \text{ kN}$$

Dokaz napona u fazi PN:

- donja ivica

$$\sigma_{c,1}(0) = \frac{5711}{5815} + \frac{5711 \cdot 74,1 - 193200}{226180} = 2,00 > 1,94 \text{ kN/cm}^2 (!)$$

- gornja ivica

$$\sigma_{c,2}(0) = \frac{5711}{5815} - \frac{5711 \cdot 74,1 - 193200}{238260} = 0,02 > -0,30 \text{ kN/cm}^2$$

Napon pritiska na donjoj ivici $\sigma_{c,1}(0)$ je prekoračen oko 3 %, što je prihvatljivo. Ukoliko bi se smanjila sila na presi za još oko 2 %, pritisak bi bio zadovoljen (jednak dopuštenom; to ne bi poremetilo presek u sredini raspona). Komentarisace se na kraju proračuna.

4.7.1.3. Presek na kraju nosača {17}

Presek je pravougaoni $b \times h = 50 \times 140$ cm. S obzirom da su spoljni uticaji približno jednaki nuli, a presek pun pravougaoni, kontroliše se samo položaj rezultante PN.

- težište kotvi

$$d_p = (2 \times 15 + 2 \times 39 + 83 + 105 + 127) / 7 = 60,4 \text{ cm}$$

- ekscentricitet

$$z_{cp} = 140/2 - 60,4 = 9,6 \text{ cm} < 140/6 = 23,3 \text{ cm}$$

→ sila je u jezgru preseka

- $P_0 = 5676$ kN (tačka 4.5.4.)

Nije potrebna dalja kontrola napona. {n}

4.7.2. Faza PN – bruto presek {18}

4.7.2.1. Presek u sredini raspona

Geometrijske karakteristike bruto preseka, presečne sile i sila PN prikazani su u Tački 4.7.1.1.

Dokaz napona u fazi PN:

- donja ivica

$$\sigma_{c,1}(0) = \frac{5803}{6400} + \frac{5803 \cdot 81,43 - 217300}{290133} = 1,79 < 1,94 \text{ kN/cm}^2$$

- gornja ivica

$$\sigma_{c,2}(0) = \frac{5803}{6400} - \frac{5803 \cdot 81,43 - 217300}{290133} = 0,03 > -0,30 \text{ kN/cm}^2$$

Naponi su zadovoljeni.

Formalno ispravan proračun u tački 4.7.1.1 pokazao je da je napon $\sigma_{c,1}(0)$ na granici, što ovde nije uočljivo.

4.7.2.2. Presek na $x=2/6L$ ($d = 180,7$ cm)

Geometrijske karakteristike bruto preseka, presečne sile i sila PN prikazani su u Tački 4.7.1.2.

Dokaz napona u fazi PN:

- donja ivica

$$\sigma_{c,1}(0) = \frac{5711}{6013} + \frac{5711 \cdot 71,8 - 193200}{243780} = 1,84 < 1,94 \text{ kN/cm}^2 \text{ (o.k. !)}$$

- gornja ivica

$$\sigma_{c,2}(0) = \frac{5711}{6013} - \frac{5711 \cdot 71,8 - 193200}{243780} = 0,06 > -0,30 \text{ kN/cm}^2$$

Naponi su zadovoljeni.

Formalno ispravan proračun u tački 4.7.1.2 pokazao je da je napon $\sigma_{c,1}(0)$ umereno prekoračen, što ovde nije uočljivo. {n}

4.7.3. Faza eksploatacije – idealizovani presek {19}

4.7.3.1. Presek u sredini raspona

Otvori su sada injektirani i beton ponovo postoji u formi bruto preseka. Određuju se karakteristike betonskog preseka uvećanog za površinu kablova. Zbog razlike u modulu elastičnosti površina kablova se pretvara u odgovarajuću (zamenjujuću) površinu betona – množenjem odnosom modula elastičnosti. Postupak proračuna se sprovodi prema uobičajenom načinu iz otpornosti materijala, za presek složen iz dva dela: betonski bruto presek (1), i kablovi, (2). Površina kablova, pomnožena odnosom modula se unosi u težištu kablova. Može se zanemariti sopstveni moment inercije površine kablova. Obrasci su isti kao i kod proračuna neto preseka.

Geometrijske karakteristike betonskog bruto preseka

$$\begin{aligned} A_c &= 6400 \text{ cm}^2 \\ I_c &= 29\,013\,000 \text{ cm}^4 \\ z_{c,1} &= z_{c,2} = 100,0 \text{ cm} \end{aligned}$$

Površina kablova:

- stvarna $A_p = 58,38 \text{ cm}^2$
- transformisana $\Delta A_c = 58,38 \times (195/34 - 1) = 276 \text{ cm}^2$ (Množenjem odnosom modula umanjenim za 1, umesto samo odnosom, odbija se od betona prostor koji zauzimaju kablovi; numerička razlika u odnosu na množenje samo odnosom modula je mala i ova korekcija se ređe radi. U formalnom pogledu, ovako je ispravnije a količina računa je ista.)
- $d_p = 18,57 \text{ cm}$ (odstojanje težišta kablova od donje ivice)

Idealizovani presek:

- površina

$$A_{ci} = 6400 + 276 = 6676 \text{ cm}^2$$
- položaj težišta

$$z_{ci,1} = 100 - (100 - 18,57) \cdot \frac{276}{6676} = 96,6 \text{ cm} \quad (= z_{c,1} - (z_{c,1} - d_p) \cdot \frac{\Delta A_c}{A_{ci}})$$

$$z_{ci,2} = 200 - 96,6 = 103,4 \text{ cm}$$
- ekscentricitet kablova u idealizovanom preseku

$$z_{ci,p} = 96,6 - 18,57 = 78,0 \text{ cm}$$
- moment inercije

$$I_{ci} = 29\,013\,000 + 6400 \times (100,0 - 103,4)^2 + (276) \times (96,6 - 18,57)^2 = 30\,766\,000 \text{ cm}^4$$

$$(= I_c + A_c \times (z_{c,2} - z_{ci,2})^2 + \Delta A_c \times (z_{ci,1} - d_p)^2)$$
- otporni momenti

$$W_{ci,1} = 30\,766\,000 / 96,6 = 318\,490 \text{ cm}^3$$

$$W_{ci,2} = 30\,766\,000 / 103,4 = 297\,540 \text{ cm}^3$$

Uticaji u preseku:

$$\begin{aligned} M_{qp,max} &= 5959 \text{ kNm.} \\ M_{rare,max} &= 6771 \text{ kNm} \\ P_t &= 4916 \text{ kN (tačka 4.6.2.1.)} \end{aligned}$$

Dokaz napona u fazi eksploatacije:

Geometrijske karakteristike idealizovanog preseka su veće od karakteristika bruto preseka, što je povoljnije, ali je ekscentricitet manji. Zbog toga (a i zbog razlike u veličini procenjene i sračunate sile PN), moguće je da neki napon, koji je u fazi razrade bio zadovoljen, sada bude prekoračen. Ova prekoračenja, ipak, ne mogu da budu velika i mogu se rešiti korekcijom sile PN.

Pri kvazi-stalnom opterećenju

- donja ivica

$$\sigma_{c,1}(qp) = \frac{4916}{6676} + \frac{4916 \cdot 78,0 - 595900}{318\,490} = 0,07 > 0 \text{ kN/cm}^2 \quad (\text{zadovoljava})$$

- gornja ivica

$$\sigma_{c,2}(qp) = \frac{4916}{6676} - \frac{4916 \cdot 78,0 - 595900}{297\,540} = 1,45 \leq 1,58 \text{ kN/cm}^2 \quad (\text{zadovoljava})$$

Pri karakterističnoj kombinaciji

- donja ivica

$$\sigma_{c,1}(\text{rare}) = \frac{4916}{6676} + \frac{4916 \cdot 78,0 - 677100}{318\,490} = -0,19 > -0,32 \text{ kN/cm}^2 \quad (\text{zadovoljava})$$

- gornja ivica

$$\sigma_{c,2}(\text{rare}) = \frac{4916}{6676} - \frac{4916 \cdot 78,0 - 677100}{297\,540} = 1,72 \leq 2,10 \text{ kN/cm}^2 \quad (\text{zadovoljava})$$

Naponi u eksploataciji su zadovoljeni. S obzirom da je pri proračunu faze PN (tačke 4.7.1.1.i 4.7.1.2) konstatovano da ne postoji rezerva (čak je bilo i prekoračenje), sila se ne može povećavati (povećanje sile PN relaksira napone u eksploataciji). {n}

4.7.3.2. Presek na $x=2/6L$ {20}

Geometrijske karakteristike betonskog bruto preseka

$$A_c = 6013 \text{ cm}^2$$

$$I_c = 22\,022\,000 \text{ cm}^4$$

$$z_{c,1} = z_{c,2} = 90,35 \text{ cm}$$

Površina kablova:

- stvarna $A_p = 58,38 \text{ cm}^2$

- transformisana $\Delta A_c = 58,38 \times (195/34 - 1) = 276 \text{ cm}^2$

$$d_p = 18,57 \text{ cm (odstojanje težišta kablova od donje ivice)}$$

Idealizovani presek:

- površina

$$A_{ci} = 6013 + 276 = 6289 \text{ cm}^2$$

- položaj težišta

$$z_{ci,1} = 87,2 \text{ cm}$$

$$z_{ci,2} = 93,5 \text{ cm}$$

- ekscentricitet kablova u idealizovanom preseku

$$z_{ci,p} = 87,2 - 18,57 = 68,6 \text{ cm}$$

- moment inercije

$$I_{ci} = 23\,382\,000 \text{ cm}^4$$

- otporni momenti

$$W_{ci,1} = 268\,140 \text{ cm}^3$$

$$W_{ci,2} = 250\,070 \text{ cm}^3$$

Uticaji u preseku:

$$M_{qp,max} = 5194 \text{ kNm.}$$

$$M_{rare,max} = 5916 \text{ kNm}$$

$$P_t = 4835 \text{ kN (tačka 4.6.2.2.)}$$

Pri kvazi-stalnom opterećenju

- donja ivica

$$\sigma_{c,1}(qp) = \frac{4835}{6289} + \frac{4835 \cdot 68,6 - 519400}{268140} = 0,07 > 0 \text{ kN/cm}^2 \quad (\text{zadovoljava})$$

- gornja ivica

$$\sigma_{c,2}(qp) = \frac{4835}{6289} - \frac{4835 \cdot 68,6 - 519400}{250070} = 1,52 < 1,58 \text{ kN/cm}^2 \quad (\text{zadovoljava})$$

Pri karakterističnoj kombinaciji

- donja ivica

$$\sigma_{c,1}(rare) = \frac{4835}{6289} + \frac{4835 \cdot 68,6 - 591600}{268140} = -0,20 > -0,32 \text{ kN/cm}^2 \quad (\text{zadovoljava})$$

- gornja ivica

$$\sigma_{c,2}(rare) = \frac{4835}{6289} - \frac{4835 \cdot 68,6 - 591600}{250070} = 1,81 \leq 2,10 \text{ kN/cm}^2 \quad (\text{zadovoljava})$$

Naponi su zadovoljeni. **{n}**

4.7.4. Faza eksploatacije – bruto betonski presek **{21}**

4.7.4.1. Presek u sredini raspona

Geometrijske karakteristike bruto preseka, presečne sile i sila PN prikazani su u Tački 4.7.3.1.

Pri kvazi-stalnom opterećenju:

- donja ivica

$$\sigma_{c,1}(qp) = \frac{4916}{6400} + \frac{4916 \cdot 81,43 - 595900}{290133} = 0,09 > 0 \text{ kN/cm}^2 \quad (\text{zadovoljava})$$

- gornja ivica

$$\sigma_{c,2}(qp) = \frac{4916}{6400} - \frac{4916 \cdot 81,43 - 595900}{290133} = 1,44 \leq 1,58 \text{ kN/cm}^2 \quad (\text{zadovoljava})$$

Pri karakterističnoj kombinaciji

- donja ivica

$$\sigma_{c,1}(rare) = \frac{4916}{6400} + \frac{4916 \cdot 81,43 - 677100}{290133} = -0,19 > -0,32 \text{ kN/cm}^2 \quad (\text{zadovoljava})$$

- gornja ivica

$$\sigma_{c,2}(rare) = \frac{4916}{6400} - \frac{4916 \cdot 81,43 - 677100}{290133} = 1,72 \leq 2,10 \text{ kN/cm}^2 \quad (\text{zadovoljava})$$

Naponi su zadovoljeni.

4.7.4.2. Presek na $x=2/6L$ ($d = 180,7$ cm)

Geometrijske karakteristike bruto preseka, presečne sile i sila PN prikazani su u Tački 4.7.3.2. Pri kvazi-stalnom opterećenju

- donja ivica

$$\sigma_{c,1}(qp) = \frac{4835}{6013} + \frac{4835 \cdot 71,8 - 519400}{243740} = 0,10 > 0 \text{ kN/cm}^2 \text{ (zadovoljava)}$$

- gornja ivica

$$\sigma_{c,2}(qp) = \frac{4835}{6013} - \frac{4835 \cdot 71,8 - 519400}{243740} = 1,51 \leq 1,58 \text{ kN/cm}^2 \text{ (zadovoljava)}$$

Pri karakterističnoj kombinaciji

- donja ivica

$$\sigma_{c,1}(rare) = \frac{4835}{6013} + \frac{4835 \cdot 71,8 - 591600}{243740} = -0,20 > -0,32 \text{ kN/cm}^2 \text{ (zadovoljava)}$$

- gornja ivica

$$\sigma_{c,2}(rare) = \frac{4835}{6013} - \frac{4835 \cdot 71,8 - 591600}{243740} = 1,81 \leq 2,10 \text{ kN/cm}^2 \text{ (zadovoljava)}$$

Naponi su zadovoljeni. Na kraju ovog proračuna trebalo bi uvek razmotriti da li ima prostora za uvećanje sile PN, s obzirom da to pogoduje trajnom stanju nosača – dobijaju se veće rezerve pritiska. U ovom pogledu ograničavajući su uslovi iz faze PN. U primeru je, u tački 4.7.1.2 već konstatovano prekoračenje pritiska, tako da nema prostora za povećanje sile, iako kapacitet usvojenih kablova to dopušta. **{n}**

Dodatak: U tački 4.7.1.2 konstatovano je prekoračenje napona pritiska na donjoj ivici $\sigma_{c,1}(0)$ za oko 3 %, što je označeno kao prihvatljivo. Takođe je proračunom (nije prikazan, ali se lako izvodi) dobijeno da bi, ukoliko bi se smanjila sila na presi za još oko 2 %, ovaj pritisak bio zadovoljen (jednak dopuštenom). Ukoliko bi se ovaj napon doterivao, potrebno je razmotriti da li postoji i kolika je rezerva napona u eksploataciji, s obzirom da njima ne pogoduje smanjenje sile PN. Najmanju rezervu od 0,7 MPa ima napon na donjoj ivici pri kvazi-stalnom opterećenju u srednjem preseku (tačka 4.7.3.1), koja dopušta umanjeno sile P_t na 4740 kN, odnosno sile P_0 na oko 5600 kN (presek na $L/6$, tačka 4.7.3.2 ima istu rezervu, ali dopušta nešto veću redukciju sile). Na osnovu rezultata iz tačke 4.5.4, sili od 5600 kN odgovarala bi sumarna sila na presi od 6150 kN, koja se može postići sa 6 izabranih kablova ($6 \times 1044 = 6264$ kN). Međutim, raspored kablova u dva reda po 3 ne bi zadovoljio zahtev trasiranja u preseku na $L/6$ od oslonca, gde je vršena izmena trasa kablova 4 i 5, kako bi se rezultantni kabl proveo kroz fizo zonu. Ukoliko se ostavi samo jedan red kablova u flanši i 4 u pravcu rebra, ekscentricitet u srednjem preseku i u preseku na $L/3$ su umanjeni, pa će se ponovo otvoriti problem sa fizo zonom u preseku na $L/3$. Stoga je u izabranom primeru zadržano 7 kablova.

Konačno, da li uopšte smanjivati silu? Pokazano prekoračenje od 3 % je prihvatljivo i s obzirom na veličinu i s obzirom na to da će deformacije skupljanja i tečenja u kraćem roku relaksirati deo ovog napona. S druge strane, zadržavanje izabrane sile (bez umanjivanja) daje povoljnije trajno naponsko stanje u eksploataciji. Zato je pragmatično da se sila zadrži.

Treba primetiti da uobičajeni proračun sa bruto presekom nije ni pokazao prekoračenje.