

ПРЕТХОДНО НАПРЕГНУТЕ БЕТОНСКЕ КОНСТРУКЦИЈЕ

Ненад Пецић – материјал за наставу – радна верзија

2024.

Лекција 5 део 2: Прорачун претходно напругнутих конструкција (део 4)

Уводне напомене

Наставна целина која следи надовезује се на претходну Лекцију 5 део 1.

У Лекцији 5 представљени су потребни прорачуни, који се раде на усвојеном диспозиционом решењу. Овим прорачунима се потврђују учињене претпоставке у фази разраде (уместо претпостављених вредности, на пример почетних губитака или губитака током времена) – то тако што се докази изводе применом срачунатих вредности. Израдом прорачуна за пројектну документацију доказује се да је решење формирно успешно.

Као и у претходној Лекцији 5 део 1, број у витичастој загради „{9}“ означава место које треба прочитати, сада у Прилогу 5.4; „{n}“ означава повратак у овај текст.

Коментар уз {9}: Код оваквих носача и ПН накнадног утезања у обзир се узимају (прорачунавају) две врсте губитака: **почетни губици** и **губици током времена**. Почетни губици су обрађени у тачки 4.5 Прилога 5.1. У губитке током времена спадају:

- губитак услед релаксације каблова,
- губитак услед скупљања бетона и
- губитак услед течења бетона.

Техника прорачуна је нешто другачија него код почетних губитака, који су се прорачунавали сваки засебно. Код временских губитака, припреме се потребни подаци који се онда употребљавају у сумарном изразу који обухвата ефекте сва три губитка. Овај израз је дат у Прилогу 5.2, на првој страни (израз 5.46 из Еврокода 2 - EN 1992-1-1). Овде се понавља због објашњења. Изразом је дат губитак напона у кабловима $\Delta\sigma_p$:

$$\Delta\sigma_p = \frac{\varepsilon_{cs} \cdot E_p + 0,8 \cdot \Delta\sigma_{pr} + \frac{E_p}{E_c} \cdot \varphi(t, t_0) \cdot \sigma_{c,p}}{1 + \frac{E_p}{E_c} \cdot \frac{A_p}{A_c} \cdot \left(1 + \frac{A_c}{I_c} \cdot z_{cp}^2\right) \cdot (1 + 0,8 \cdot \varphi(t, t_0))}$$

Сваки од три побројана узрочника има свој члан у бројиоцу разломка.

Први се односи на скупљање бетона. Кабл је фиксиран за носач и скраћивање бетона има за последицу скраћивање кабла у истом износу. За кабл скраћивање значи опадање затезања, а промена дилатације затезања (услед скупљања) одговара скраћивању услед скупљања. Множењем са модулом кабла добија се промена напона у каблу.

Други члан се односи на директан пад напона у каблу услед релаксације, $\Delta\sigma_{pr}$. Релаксација је појавно објашњена у Лекцији 2 део 1, стр. 10-11. У наставку је објашњен прорачун ове величине. Поступак прорачуна се односи на такозвану „чисту релаксацију“, која се одвија под непроменљивим условима. Један од важнијих услова је да нема промене првобитне дужине кабла, након затезања. Међутим, кабл је фиксиран за носач који се током времена скраћује услед скупљања и течења бетона, па су ефекти релаксације делимично умањени („редукована релаксација“). Ефекте редукције уводи паушални мултипликатор 0,8 којим се у бројиоцу разломка смањује срачуната „чиста релаксација“.

Трећи члан се односи на течење бетона – накнадно скраћивање услед притиска од дуготрајних оптерећења – ПН, сопствене тежине и додатних сталних терета. Ефекти еластичног скраћивања већ су обрађени у почетним губицима (тачка 4.5.2 у Прилогу 5.1). σ_{cp} је напон у бетону, на месту каблова, од дуготрајних оптерећења; подељен модулом бетона E_c даје еластичну дилатацију, а помножен коефицијентом течења – дилатацију скраћења услед течења бетона. Скраћење каблова је једнако скраћењу бетона, а помножено модулом каблова даће пад затезања каблова (услед течења бетона), што је управо трећи члан у имениоцу разломка.

У бројиоцу разломка сабрана су три директна узрочника лабављења каблова. У имениоцу разломка налази се израз који урачунава ефекте унутрашње прерасподеле напрезања у носачу. Објашњење је нешто сложеније, а може се прочитати у

http://imksus.grf.bg.ac.rs/nastava/beton/PRETHODNO%20NAPREGNUTI%20BETON/VAendar_Prethodno_Naprezanje_CD/Poglavlje_03/PN31%20-%20PrethodnoNaprezanje_03.pdf, поглавља 3.4.1 – 3.4.3. Вредност имениоца је већа од јединице, тако да умањује напред објашњене ефекте губитака.

Приказани израз за временске губитке (израз 5.46 EN 1992-1-1) важи само за статички одређене носаче (за статички неодређене носаче потребне су измене).

Коментар уз **{10}**: Губитак услед релаксације се може срачунати применом израза из Еврокода 2, који су приказани у Прилогу 5.2, на страни 2. Величина губитка дата је у функцији три (у ствари два) главна параметра:

- (1) Врсте обраде челика, што је исказано кроз класу релаксације;
- (2) Величине почетног напона, што је исказано кроз однос μ овог напона и чврстоће $\mu = \sigma_{pi} / f_{pk}$ (слово „ μ “ је овде помоћна ознака и нема везе са коефицијентом трења μ код прорачуна почетних губитака);
- Времена t , које се изражава у часовима (с обзиром да је углавном од интереса коначна вредност губитка, за коју је назначено да се добија када се у образац стави $t = 500\,000$, време не представља активни параметар).

У примеру у Прилогу 5.4 однос напона је око 0,60. У Лекцији 5 део 1, је објашњено да у овом случају не би требало да губитак услед релаксације буде знатније већи од конвенционалне мере релаксације: у примеру он износи око 2,4 % почетног напона (конвенционална мера је, за изабрану класу челика, $\rho_{1000} = 2,5\%$), а биће још редукован фактором 0,8 из сумарног израза. Ово је било узето у обзир код процене величине укупних временских губитака (фактора трајне силе $\eta = 0,80$) у фази разраде.

Коментар уз **{11}**: Овде се припремају преостали подаци потребни за срачунавање сумарног израза за губитке. У складу са пројектним условима одреди се дилатација скупљања и коефицијенти течења за појединачна дуготрајна оптерећења. За ово се могу користити табеле са израчунатим вредностима коефицијената течења и дилатација скупљања које су биле приложене уз лекцију о контроли угиба армиранобетонских конструкција (ТБК2, VI семестар), а могу се наћи и на интернету помоћу идентификатора DOI: 10.5937/tehnika1705655M.

Утицајима ПН и сопствене тежине одговара исти коефицијент течења, јер ова оптерећења почињу да делују истовремено („ t_0 “): приликом ПН, због релативног односа величина ЕО и сопствене тежине (види Лекцију 4 део 1, стр. 2-4) носач ће се искривити навише и ослонити на крајевима; одиже се од оплате (подлоге) и (само)поставља у систем просте греде, чиме се активира савијање од сопствене тежине и ЕО, а почиње и течење од ових дуготрајних оптерећења.

Додатни стални терет, у разматраном примеру секундарни носачи, кровни покривач и инсталације, наноси се касније („ t_1 “), у складу са пројектованом динамиком градње.

Коментар уз {12}: Образац за сумарне временске губитке предвиђа употребу само једне вредности коефицијента течења. Зато се одређује ефективни коефицијент течења који обухвата оптерећења из t_0 и t_1 , према величини напона која се активира у сваком тренутку. Требало би приметити да је напон у t_1 негативан (притисак се смањује), што за рачунску последицу има да је ефективни (заменујући) коефицијент течења већи од појединачних коефицијената течења.

Израчуната вредност временских губитака мања је од величине претпостављене у фази разраде. То значи да се, са усвојеним кабловима, може постићи већа трајна сила од оне којом је урађена фаза разраде. То је, генерално, повољнија ситуација у односу када су губици потцењени. У овом случају могућа су два наставка:

- Задржавање веће остварене силе (то значи остаје претходно усвојена, у фази разреде, сила на преси). Ово је добра опција када напрезање (напони) у фази ПН нису искоришћени, јер носачу остаје већа резерва притиска за прихват експлоатационих оптерећења.
- Одређено умањење силе на преси (силе из фазе разраде), чиме се прорачун у пројекту доводи на вредности из фазе разраде.

Први наведени наставак је бољи, када се не прекорачују напони у фази ПН. Међутим, у примеру који се обрађује управо то би се десило (биће показано у наставку, при израчунавању – провери напона. Због тога је сила на преси умањена и одржане су вредности из фазе разраде.

Коментар уз {13}: Прорачун је урађен у још једном пресеку, да би се показало да се резултати битније не разликују, односно да је могуће спроводити прорачуне губитака у репрезентативном пресеку, а потом добијену вредност користити за све пресеке у распону. Као што је већ поменуто код прорачуна почетних губитака, савремени софтвери најчешће ове прорачуне спроводе у више пресека, али се ни овде, као ни код почетних губитака, не постиже већа поузданост, због сложености укључених појава и употребе бројних претпостављених вредности релевантних параметара.

Коментар уз {14}: Прорачун (провера ограничења) напона спроводи се у складу са изабраним ограничењима према концепту који је објашњен у Лекцији 3 (подсећање: обавезно је ограничење притиска при ПН – због чега је умањена сила на преси, према претходном објашњењу; ограничењима затезања посредно се задовољава услов декомпресије, који се поставља за класу изложености из Пројектног задатка; остала усвојена ограничења су препорука).

Провера напона за поједине фазе традиционално се спроводи коришћењем геометријских карактеристика бетонског бруто пресека. То је, у већини случајева, задовољавајућа апроксимација имајући у виду све већ поменуте чиниоце који утичу на поузданост прорачуна.

Формално коректна контрола напона узима у обзир стање пресека у појединим фазама – при изradi носача и у експлоатацији.

Коментар уз {15}: Прорачун (провера ограничења) напона у фази ПН спроводи се са такозваним нето пресеком. То је бетонски бруто пресек коме су одузети отвори за канале кроз које се воде каблови, који су у овој фази „шупљи“.

Приказани поступак прорачуна геометријских карактеристика је стандардни метод Отпорности материјала за одређивање карактеристика сложеног пресека. Пресек се састоји из два дела: први, бетонски бруто пресек, и други, „шупљине“ – који има негативну површину. Поступак је у свему стандардан.

У погледу резултата, када се пореди са бруто пресеком, требало би запазити следеће:

- Површина је мања;
- Тежиште се помера ка горњој ивици, (па):
- Ексцентрицитет каблова је повећан;
- Отпорни момент доње ивице (W_1) је смањен.

Све претходне констатације утичу да расте израчунати напон (притиска) при ПН на ивици 1, у односу на прорачун са бруто пресеком. Треба истаћи да је ограничење овог напона у домену обавезног, те да не би требало да буде прекорачен. С обзиром да нето пресек даје „тачну“ вредност, а бруто апроксимативну, у случају знатније ослабљеног пресека (већи број отвора) требало би водити рачуна о могућем знатнијем прекорачењу напона.

Види се да је напон притиска на ивици 1 у средњем пресеку достигао вредност допуштеног напона, али то је са сада већ умањеном силом на преси у односу на фазу разраде (940 кН → 910 кН); да је првобитна сила задржана он би био прекорачен, мада не много. Иако је сила у разради усвојена у средини опсега, границе опсега су се сада измениле услед два разлога: почетни губици су (мало) другачији од претпостављених, а карактеристике нето пресека се могу и осетније разликовати од карактеристика бруто бетонског пресека.

Коментар уз {16}: Провера ограничења напона у овом пресеку је посебно интересантна, јер је још у фази разраде констатовано да он има најнеповољнији однос напрезања од спољних оптерећења и носивости (геометријских карактеристика). На ово смо у фази разраде већ диспозиционо деловали – задржавањем максималног расположивог ексцентрицитета.

Напони у овом пресеку су већи него у пресеку у средини распона и, чак уз учињено смањење силе на преси, прекорачени. Сада се види да је сила на преси (из фазе разраде) морала да буде умањена: напон притиска на доњој ивици би са том вредношћу био знатније прекорачен (преко прихватљивих граница).

Коментар уз {17}: Формално израчунавање напона у овом пресеку показало би да су они комотно у дозвољеним границама. Међутим, претпоставке под којим се врши израчунавање напона у техничкој теорији савијања (Бернулијева хипотеза, Хуков закон) овде нису испуњене – локално се уносе велике силе, па такво рачунање напона није баш смислено. Ипак, често се формално рачунају, нарочито ако се посао обавља софтвером. Алтернативно, приказана провера је сасвим довољна.

Коментар уз {18}: Дат је доказ напона са карактеристикама бруто пресека. Требало би нагласити да је то у пракси уобичајени начин провере напона, укључиво и у софтверима за прорачун конструкција. Претходно приказан формално исправан начин за фазу претходног напрезања, са нето пресеком, показује да су остварени напони у суштини већи, нарочито ако је пресек доста „ошупљен“, па овакав прорачун није на страни сигурности. Резултати из Прилога 5.4 показују да би напони у разматраном примеру у свим пресецима били задовољени чак и са првобитном (неумањеном) силом на преси, ако се провера врши са бруто пресеком (напони са умањеном силом су мањи од допуштених).

Циљ претходне демонстрације није да се обавезно препоручи провера напона у фази ПН са нето пресеком: провера може да се задовољавајуће учини и са бруто пресеком, али тада не треба ићи на искоришћење напона (напони би требало да имају маргину у односу на допуштене).

Коментар уз {19}: Прорачун (провера ограничења) напона у експлоатацији спроводи се са такозваним „идеализованим“ (трансформисаним) пресеком, који укључује бетон и челик у пресеку. Бетон је, с обзиром да је инјектирање урађено материјалом на бази цемента „враћен“ на бетонски бруто пресек, а урачунавају се и челици. ПН носачи имају и класичну арматуру – то су претходно напрегнути армиранобетонски носачи. Међутим, када њена површина није велика у односу на површини каблова (што је случај код потпуног и ограниченог ПН, види Лекцију 2, део 1), најчешће се не узима у прорачун, већ се карактеристике трансформисаног пресека добијају из два дела: бруто бетона и каблова

Приказани поступак прорачуна геометријских карактеристика је стандардни метод Отпорности материјала за одређивање карактеристика сложеног пресека. Пресек се састоји из два дела: бетонски бруто пресек, и други, каблови – који има трансформисану површину добијену множењем односом модула. Поступак је у свему стандардан.

У погледу резултата, када се пореди са бруто пресеком, требало би запазити следеће (све супротно у односу на нето пресек):

- Површина је већа;
- Тежиште се помера ка доњој ивици, (па):
- Ексцентрицитет каблова је смањен;
- Отпорни момент доње ивице (W_1) је повећан.

Сумарни ефекат разлика у односу на бруто пресек јесте да је са карактеристикама идеализованог (трансформисаног) пресека лакше испунити напонска ограничења, по то може бити мотив да се у практичној ситуацију употреби овај („тачнији“) прорачун (требало би напоменути да су и при оваквом прорачуну учињене одређене апроксимације: на пример, остварене ефекте ЕО не треба рачунати са геометријским карактеристикама трансформисаног пресека, али тај део апроксимације је на страни сигурности).

Када се инјектирање каблова врши материјалом који не везује (на пример восак), доказ напона у експлоатацији врши се са трансформисаним пресеком који се састоји од бетонског нето пресека и каблова.

У складу са изабраним ограничењима, потребно је спровести провере напона при квази-сталној и при карактеристичној комбинацији. У зависности од односа величина спољних оптерећења једна од њих обично није меродавна.

Коментар уз {20}: Поново се спроводи провера ограничења напона и у овом пресеку. Задржавањем максималног расположивог ексцентрицитета у и њему је постигнуто повољно стање у експлоатацији.

Коментар уз {21}: Поново је дат је доказ напона са карактеристикама бруто пресека, и, као што је већ речено, то је уобичајени начин провере напона у пракси, укључиво и у софтверима за прорачун конструкција. Претходно приказан формално исправан начин за фазу експлоатације, са трансформисаним (идеализованим) пресеком, показује да су остварени напони углавном мањи од оних који се добијају прорачуном са карактеристикама бруто пресека. То практично значи да је употреба бруто пресека за доказивање напона у експлоатацији на страни сигурности. Разлог да се провера ипак учини са

карактеристикама трансформисаног пресека јесте да се тако добија повољнији резултат, то јест напон који (умерено) „не пролази“ са бруто пресеком, могао би да буде прихватљив са идеализованим пресеком.