

ПРЕТХОДНО НАПРЕГНУТЕ БЕТОНСКЕ КОНСТРУКЦИЈЕ

Ненад Пецић – материјал за наставу – радна верзија

2024.

Лекција 5 део 1: Прорачун претходно напрегнутих конструкција (део 3)

Уводне напомене

Наставна целина која следи надовезује се на претходну Лекцију 4.

За Лекцију 4 био је одабран приступ презентирања помоћу примера пројектовања. У оквиру Лекције 4 представљен је Пројектни задатак и могући поступак диспозиционог конципирања носача (Прилози 4.1 – 4.7). Диспозиционо конципирање конструкције обухватало је кључне провере – захтеве који су одлучујући да ли решење задовољава или не. Оно што може да захтева мања прилагођавања, остављено је да буде дотерано у фази израде пројекта, која је представљена у Лекцији 5. 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 формирано успешно.

Као и у претходној лекцији, број у витичастој загради „{1}“ означава место које треба прочитати, сада у Прилогу 5.1; „{n}“ означава повратак у овај текст.

Коментар уз {1}: Дате су генералне инструкције за могуће начине презентирања прорачуна. Посебно би требало нагласити да пројектну документацију не би требало проширивати приказима итерација или верзијама прорачуна које су у каснијим фазама измењене. Добра документација садржи само минимум података који је потребан за повезано и логично представљање конструкције и доказнице о испуњености захтева које постављају прописи.

Коментар уз {2}: Приказ решења конструкције треба да буде умерено детаљан, али разумљив. Користе се урађени цртежи – планови оплате и каблова, из којих треба формирати основне скице (подужни изгледи, карактеристични пресеци) и даје се преглед битних величина које се користе у прорачунима који следе. Прикладно је, због прегледности, навести све величине на једном месту, а не сукцесивно, како се појављују у прорачуну.

Коментари у Прилогу 5.1, који не треба да се нађу у тексту пројектне документације (намењени студентима), написани су нагнутим словима („*italic*“). У овом тексту даје се допуна тих коментара.

На слици на стр. 1 Прилога 5.1 приказана је оплата носача, у изгледу. Распон носача износи 34,00 метара и то је размак осовина његових ослонаца на стубове хале. Сам носач мора бити физички дужи, и на слици је приказано да је то по пола метра у односу на осе ослонаца. То значи и да су каблови дужи за око метар од распона. Код левог ослонаца назначене су координата x , која се односи на величине које произилазе из распона (на пример момент савијања) и координата s (која се користи за величине које зависе од укупне дужине), $s = x + 0,50$ m.

Коментар уз {3}: Приказани су сви инпути. Презентиране пресечне силе су израчунате без апроксимација које нису неопходне (на пример, утицаји од сопствене тежине – која је трапезасто, а не једнако подељено оптерећење, одређени су „тачно“, а не поступком из фазе разраде – замењујућим једнако

подељеним оптерећењем; с друге стране, ако се упореди тај поступак и „тачни“ видеће се да је приближни био прилично прецизан).

Коментар уз {4}: Код оваквих носача и ПН накнадног утезања у обзир се узимају (прорачунавају) две врсте губитака: **почетни губици** и **губици током времена**. У почетне губитке – губитке током ПН (обрађени у тачки 4.5 Прилога 5.1) спадају:

- губитак услед трења при затезању каблова;
- губитак услед еластичног скраћења при сукцесивном затезању каблова, и
- губитак при уклињавању.

Коментар уз {5}: **Губитак услед трења** настаје услед кретања кабла при затезању кроз заштитну цев, уз истовремено притискање (ЕО) на зид цеви. Кабл се покреће услед издуживања које је последица затезања: преса „извуче“ (просечно) 5-6 mm по метру дужине, што за разматрани носач износи укупно око 200 mm, а види се као ход пресе – излажење клипа. Трење при кретању, уз истовремени притисак на подлогу разматра се као (обично, Кулоново) трење, са интензитетом трење = притисак×коэффициент трења. Шире објашњење може се наћи у тачки 3.1.1 у http://imksus.grf.bg.ac.rs/nastava/beton/PRETHODNO%20NAPREGNUTI%20BETON/VAlendar_Prethodno_Naprezanje_CD/Poglavlje_03/PN31%20-%20PrethodnoNaprezanje_03.pdf (ознаке овде одговарају раније устаљеној пракси).

Образац који ћемо користити (чије се порекло објашњава у наведеној литератури), са усаглашеним ознакама величина, приказан је у Прилогу 5.2. Ознаке у њему имају следеће значење:

- $\Delta\tau$ - коефицијент преостале силе - (децимални) однос силе умањене за губитак само од трења и силе на преси (силе пре губитка), тако да се сила на посматраном месту (s) може писати као: $P(s) = \Delta\tau \times P(s=0)$;
- e – основа природног логаритма (2.71828...);
- θ - укупно скретање кабла на посматраном потезу на коме се рачуна губитак силе, обавезно мерено у радијанима (rad). Ако траса има једнозначну кривину, то је угао између почетне тангенте и тангенте на трасу на посматраном месту;
- s – дужина кабла од места утезања до посматраног места; код гредних носача може се користити дужина пројекције на осу носача (уместо стварне дужине кабла мерене по кривој линији трасе);
- μ - коефицијент трења за пројектована скретања, по јединици скретања, $1/rad$, узима се из каталога система или норматива (Еврокод 2);
- k - коефицијент трења за случајна скретања, по јединици дужине, $1/m$, узима се из каталога система или норматива (Еврокод 2);
- k_1 - коефицијент трења за случајна скретања, по јединици дужине и скретања, $1/(rad \times m)$, узима се из каталога система или норматива (Еврокод 2); нема никакве суштинске разлике између коэффицијената k и k_1 ; ради се о два облика истог обрасца, при чему је у другом коэффициент μ извучен испред заграде, па је коэффициент k прерачунат у k_1 – види Прилог 5.2.

Образац се изводи из услова равнотеже (није емпиријски). Због тога има погодних опција при практичној примени (објашњено у примеру у наставку).

У Прилогу 5.3 дат је пример прорачуна губитака услед трења при утезању.

Пример комбинује различите елементе трасе (континуално скретање, преломи) ради вежбе. Треба приметити важну особину обрасца за промену (губитак) силе услед трења, која је примењена у примеру: образац се може користити тако да се при прорачуну следећег места користи најближе срачунато (узима се прираштај

угла $\Delta\theta$ и прираштај дужине Δs у односу на то суседно место, а вредност силе на том претходном месту се користи као почетна сила, уместо да се увек рачуна од почетка кабла – места на коме ради преса). Такође, код траса које континуално скрећу (парабола), скретање на одређеном месту може се проценити као део укупног скретања пропорционалан „пређеном“ делу дужине ($\theta(s) = (\alpha/L) \times s$).

Прорачун губитка од трења у примеру у Прилогу 5.1 је спроведен за три пресека (места) на носачу: средину распона ($x = 3/6L$), „критични пресек“ ($x = 2/6L$) и ослонац ($x = 0$). Вредности губитака су различите од пресека до пресека, али након сабирања са осталим губицима, вредности преостале силе ће се (углавном) уједначити, с обзиром да појединачни губици имају различите вредности на различитим местима и то на разнородан начин (једни су мањи где су други већи).

Као репрезентативан, посматраћемо губитак од трења у средини распона. У примеру у Прилогу 5.1 он је износио око 4,3 % (т. 4.5.1.1). Уобичајено се креће око вредности 4 – 5 % за места у средини распона носача са „таласастим“ трасама као што је парабола; та вредност одговара дужини од $\frac{1}{2}$ таласа (средини). Када се дође до другог краја (цела траса), губитак је два пута толико (8 - 10 %). У Прилогу 5.1 предвиђено је затезање са обе стране, тако да на крајевима, услед трења, нема губитака.

Треба приметити да и када је предвиђено затезање само са једне стране, неће настати ситуација да је, услед трења, један крај без губитака, а други са губитком од 8 – 10 %. То је стога што се ретко сви каблови затежу са истог краја носача: обично се, због симетрије, наспрамни каблови из фланши затежу истовремено (да би се избегло савијање око вертикалне осе, уколико би се радило један по један). Величина преса често онемогућава њихово истовремено постављање на две суседне котве (минимални осовински размак котви је доста мањи од прорстора за две пресе) и то се решава тако што се оне постављају на различитим крајевима носача. Ако се сви каблови затежу са само једног краја (кабла), али се око половине затегне са једног, а преостали са другог краја носача, преостала сила након губитка од трења ће бити прилично уједначена дуж распона, а губитак ће бити на нивоу вредности за пресек у средини распона.

Коментар уз {6}: **Губитак услед еластичног скраћења настаје при сукцесивном затезању каблова.** Порекло губитка је следеће: При затезању (првог) кабла производи се притисак у бетону и, сходно томе носач се скраћује. Када преса заврши затезање кабла (постигне се пројектована сила), кабл се сидри (фиксира за носач). При затезању следећег кабла производи се још притиска и носач се (даље) скраћује. Међутим, претходно затегнути кабл је фиксиран за носач и скраћује се заједно са носачем. За први кабл ово скраћење значи „лабављење“ претходно унетог затезања – губитак дела силе. И даље, затезање сваког наредног кабла значи лабављење свих оних који су претходно (затегнути и) фиксирани за носач. Губитак је утолико већи што је већи број корака (највећи број корака је када се каблови затежу један по један). Образац који овом одговара приказан је у Прилогу 5.2 (дат је коефицијент преостале силе Δ_{el}). За гредне носаче који се претходно напрежу накнадним утезањем губитак на местима са највећим ексцентрицитетом каблова је најчешће до око 5 %. Код ПН на стази је обично нешто већи: образац из Прилога 5.2 се користи тако што се уместо коефицијента 0,5 узме 1,0 (код ПН на стази се проблем често погрешно тумачи: нема сукцесивног затезања, јер се сила преноси једноремено из свих каблова; међутим, непосредно пре скраћивања, које доводи до лабављења, сви каблови су фиксирани (атхезијом) за носач и сваки од њих ће утицати на све друге; код ПН накнадним утезањем кабл лабави само оне који су затегнути пре њега).

Објашњење како се долази до обрасца може се наћи у тачки 3.1.2 у http://imksus.grf.bg.ac.rs/nastava/beton/PRETHODNO%20NAPREGNUTI%20BETON/VAendar_Prethodno_Naprezanje_CD/Poglavlje_03/PN31%20-%20PrethodnoNaprezanje_03.pdf.

Коментар уз {7}: **Губитак при уклињавању** настаје као последица поступка који се примењује при фиксирању каблова (ужади) клином. „Механизам“ (поступак) анкеровања клином објашњен је у Лекцији 2 (део 2) на стр. 17 и 20. Када преса попусти уже, долази до делимичног враћања ужета са клином назад у носач, што је неопходно да би се клин заглавио у свом отвору. Услед овог враћања (δ_{sl} , обично неколико милиметара, узима се из каталога система) уже се делимично лабави (опада сила затезања) у близини котве. Због покрета ужета у супротном смеру од оног у коме се кретало при затезању, јавља се и трење у супротном смеру („повратно трење“), које ограничава пролонгирање лабављења. Губитак силе се осећа најчешће у околини котве и ретко пропагира до средине распона (у Прилогу 5.2 са s_{sl} је означено растојање до кога се осећа овај губитак. Образац је примењив на плитке закривљене трасе.

Објашњење како се долази до обрасца може се наћи у тачки 3.1.3 у http://imksus.grf.bg.ac.rs/nastava/beton/PRETHODNO%20NAPREGNUTI%20BETON/VAendar_Prethodno_Naprezanje_CD/Poglavlje_03/PN31%20-%20PrethodnoNaprezanje_03.pdf.

Коментар уз {8}: Резиме величине почетних губитака у три разматрана пресека дуж носача указује на оправданост приступа да се они срачунају на једном (репрезентативном) месту, а да се тако срачуната почетна сила P_0 користи за прорачун у свим пресецима. У данашње време прорачун губитака често се спроводи у оквиру софтвера који се користе за прорачун конструкција, тако да се могу срачунавати и у више пресека. Требало би напоменути да то не утиче битније на поузданост прорачуна у поређењу са прорачуном који се базира на репрезентативном пресеку. Захтеване прецизности уношења силе ПН обично допуштају толеранције од неколико процената (углавном се пореди сила на манометру и издужење кабла – ход пресе), што је више од срачунатих разлика. У суштини, интересантна је вредност силе у „критичном“ пресеку ($x = 2/6L$), а она се у примеру само за око 1 % разликује од оне у средини распона.

У фази разраде (Лекција 4) учињена је претпоставка о величини почетних губитака од 10 %, што се прорачуном потврдило – губитак на релевантним местима износи 9 – 10 %.

Из овог, првог дела Лекције 5, ради се Задатак број 4.

Садржај 4. задатка се може видети у Прилогу 5.1, на страни 8.