

ПРОРАЧУН ДИЈАФРАГМЕ ПРЕМА КЛАСИЧНОЈ МЕТОДИ И ПРЕМА ЕВРОКОДУ 7

Петар Сантрач¹

Жељко Бајић²

УДК: 624.152

DOI:10.14415/konferencijaGFS 2015.056

Резиме: У односу на претходни период, у последњих 10-так година је значајно порастао број објеката у урбаним срединама за које су изведене дубоке темељне јаме за подземне етаже. Заштита темељних јама и суседних објеката је углавном армирано-бетонским дијафрагмама или шиповима, а изузетно челичним прибојем. Пошто у Србији не постоје технички нормативи или препоруке, методе прорачуна су врло различите а уз оскудну домаћу литературу често и произвољне. Настојећи да бар приближно осветли ову проблематику, рад приказује поређење резултата прорачуна према класичном поступку која се примењује у Србији и методе коју препоручује Еврокод 7. Како би се илустровале разлике, приказан је прорачун армирано-бетонске дијафрагме у две фазе ископа у једноставном геомеханичком профилу. На крају рада је извршена анализа резултата и дати су закључци.

Кључне речи: армирано-бетонска дијафрагма, заштита темељне јаме

1. УВОД

Ископи за дубоке темељне јаме углавном се изводе у комплексним геотехничким условима са високим нивоом поземне воде и у непосредној близини суседних објеката. Заштита темељних јама се најчешће врши дијафрагмама или завесом од бушених шипова. Прорачун се углавном врши према методи граничне равнотеже (Limit states method) и методе модула реакције тла која се још назива Винклерова или напонско зависна метода (Winkler method, Subgrade reaction method, Dependent pressures method).

На основу искуства аутора, сложенији прорачун заснован на МКЕ (метода коначних елемената) и еласто-пластичних конститутивних модела тла, коришћењем софтвера типа Plaxis, GeoStudio, Flac, Fine и друго, у Србији је изузетно редак. Постоје бар три разлога за то. Први је релативно висока цена софтвера уз мали број објеката кроз који би се софтвер исплатио. Други разлог је

¹ Проф. др Петар Сантрач, дипл.инж.грађ., Универзитет у Новом Саду, Грађевински факултет у Суботици, Козарачка 2а, Суботица, Србија, тел: +381 24 554 300, e-mail: santrac@gf.uns.ac.rs

² Мр. Жељко Бајић, дипл.инж.грађ., Универзитет у Новом Саду, Грађевински факултет у Суботици, Козарачка 2а, Суботица, Србија, тел: +381 24 554 300, e-mail: bajic@gf.uns.ac.rs

што су геомеханички истражни радови по правилу сведени на минимум што је недовољно да би се поуздано и квалитетно испитали и дефинисали улазни параметри геомеханичког профила за примену сложеног конститутивног модела. Трећи разлог је не постојање квалитетних мерења током ископа, на основу којих би се вршила повратна анализа и критичка оцена примењених параметара тла и перманентно стицало практично искуство за будуће сличне објекте у сличним геотехничким срединама. У најбољем случају, пројектант има могућност да издејствује вршење геодетског мерења померања наглавнице дијафрагме или завесе од шипова и слегање суседних објеката. На врло корисне податке добијене мерењем инклинације и притисака по дубини заштитног зида треба заборавити. Првенствени разлог је не постојање техничке регулативе која би прописала минималан ниво мониторинга и незаинтересованост инвеститора за кога је то додатан и непотребан трошак. Када се све што је претходно наведено узме у обзир, долази се до закључка, да је у датим околностима најцелисходније, бар за сада, користити релативно грубе и упрошћене методе засноване на релативно оскудним геотехничким подацима.

Пошто је предвиђено да се у Србији почев од јануара 2016. године, Еврокод користи као националан стандард, аутори су урадили упоредну анализу резултата прорачуна једне конзолне и једне разупрте / анкерисане дијафрагме. Прорачуни су извршени према методи граничне равнотеже и према методи модула реакције тла, а стандард прорачуна је класичан и према EN 1997-1:2004 Еврокод 7^[1].

2. ПРИНЦИПИ И ПРЕТПОСТАВКЕ ПРОРАЧУНА

Прорачун потребне дубине дијафрагме (D) се врши по методи граничне равнотеже (ULS), стим што се активни притисак тла рачуна по методи Cullmana а пасивни притисак (отпор тла) за $\phi' > 30^\circ$ по методи Saquot & Kerisela. У раду није извршена редистрибуција активног притиска тла услед утицаја разупирача.

Да би се у оквиру граничног стања употребљивости (SLS) одредило померање главе дијафрагме и проценило слегање терена иза дијафрагме, у рутинској пракси се користи метода модула реакције тла. Пошто се конкретно ради о хомогеном слоју песка, за модул реакције (k_h) се може претпоставити да расте линеарно с дубином (z) која се мери од дна темељне јаме вертикално на ниже, према следећим изразима:

$$k_h = m_h (z/D) \quad , \quad k_h = l_h (z/D) \quad (1)$$

У горњој једначини, (m_h) је константа хоризонталног модула реакције по Roweu^{[2],[3]} за конзолну а (l_h) према Terzaghi-у^[4] за разупрту дијафрагму. За потопљен и збијен песак, усвојено је $m_h \approx 40.0 \text{ MN/m}^3$ (за круту дијафрагму) и $l_h = 8.0 \text{ MN/m}^3$.

- За класични прорачун према граничном стању лома^{[5][6]} користи се само један фактор сигурности, помоћу којег се на основу израчунатог отпора тј. пасивног

притиска тла (p_p) одређује мобилисани пасивни притисак тла (p_{pm}) према изразу:

$$p_{pm} = p_p / F_s \quad , \quad F_s = 1.5 \quad (2)$$

Пасивни притисак тла (p_p) испред потпорне конструкције се рачуна на основу угла смичуће отпорности (ϕ'), кохезије (c'), угла трења између тла и дијафрагме (δ) и облика линије терена у пасивној зони. Парцијални фактори сигурности за сва оптерећења (главна и допунска) су једнака 1.0.

- Према препоруци Еврокода 7 потпорна конструкција се такође пројектује према граничном стању лома али постоје и одређене суштинске разлике. Еврокод 7 предвиђа 3 (три) пројектна приступа са комбинацијама парцијалних фактора сигурности који се односе на дејства, параметре и отпор тла. Пројектни приступ (1) предвиђа следеће комбинације парцијалних фактора у граничном стању:

Комбинација 1: A1 "+" M1 "+" R1

Комбинација 2: A2 "+" M2 "+" R1

Пројектни приступ (2) предвиђа следеће комбинације парцијалних фактора у граничном стању:

Комбинација 1: A1 "+" M1 "+" R2

Пројектни приступ (3) предвиђа следеће комбинације парцијалних фактора у граничном стању:

Комбинација 1: A2 "+" M2 "+" R3

За проверу граничног стања у конструкцији (STR) или у тлу (GEO), скуп A1 или скуп A2 парцијалних фактора за дејства (γ_F) или за ефекте од дејстава граничног стања (γ_E) је у табели A.3 у EN 1997-1:2004 Еврокод 7 (Део-1: Општа правила, стр. 128). У овом раду су у прорачуну разматрана следећа дејства:

- тежина воде и тла,
- напони у тлу,
- притисак тла и подземне воде,
- карактеристична (нефакторисана) оптерећења конструкције/дијафрагме,
- карактеристична (нефакторисана) оптерећења терена иза зида,
- утицај разупирача.

За проверу граничног стања у конструкцији (STR) или у тлу (GEO), скуп M1 или скуп M2 парцијалних фактора за параметре тла (γ_M) је у табели A.4 у EN 1997-1:2004 Еврокод 7 (Део-1: Општа правила, стр. 129). Пројектне вредности параметара тла (X_d) се могу одредити директно или се могу извести на основу репрезентативних вредности помоћу следеће једначине:

$$X_d = X_k / \gamma_k \quad (3)$$

За проверу граничног стања у конструкцији (STR) или у тлу (GEO), скуп R1 или скуп R2 или R3 парцијалних фактора отпора (γ_R) је у табели A.13 у EN 1997-1:2004 Еврокод 7 (Део-1: Општа правила, стр. 132). У прорачуну су коришћени следећи парцијални фактори:

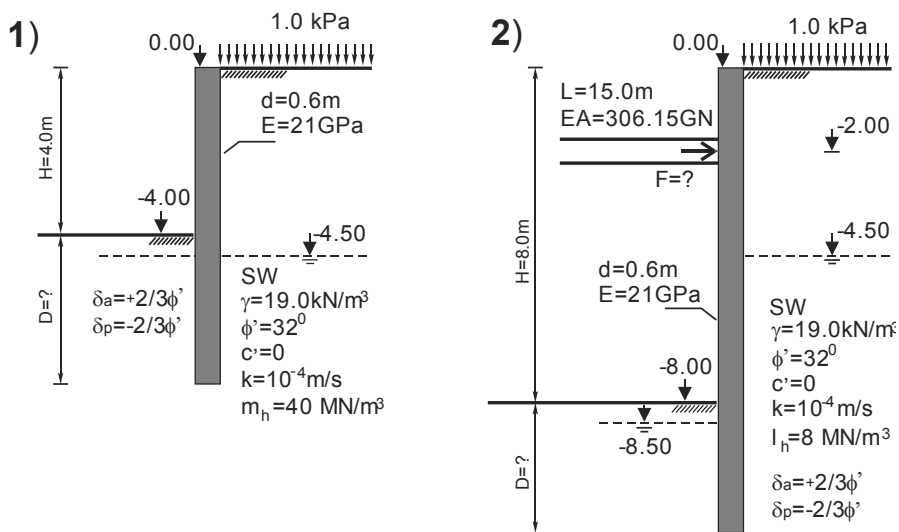
- $\gamma_G=1$ за сет A1, за дејства,

- γ_M за сет M2, за параметре тла,
- $\gamma_{R,e}=1$ за сет R1, за отпоре тла.

Остали параметри коришћени у прорачуну су приказани у конкретном примеру.

3. ПРОРАЧУНСКИ МОДЕЛИ

Прорачуни су извршени на основу два карактеристична модела, који су приказани на слици 1, а који претстављају две узастопне фазе ископа темељне јаме. Модел 1) приказује заштиту ископа дубине 4.0м АБ конзолном дијафрагмом, којој се након ископа додаје разупирач на дубини од 2.0м од површине терена. Модел 2) приказује заштиту ископа дубине 8.0м, АБ дијафрагмом са једним разупирачем, стим што се разупирач постепено активира ископом испод 4.0м. Дијафрагме су дебљине 60цм а марка бетона је МБ30. Профил терена чини слој хомогеног збијеног песка (SW), а ниво подземне воде је на дубини од 4.5м од површине терена.



Слика 1. Прорачунски модели: 1) Конзолна дијафрагма, 2) Разупрта дијафрагма

Код конзолне дијафрагме је дубина ископа 4.0м и не мора се вршити снижавање нивоа подземне воде, док је код разупрте дијафрагме дубина ископа 8.0м, због чега се ниво подземне воде у темељној јами мора снизити за 4.0м. Размак разупирача износи 3.0м а дужина је 15.0м. На површини терена иза дијафрагме постоји корисно покретно оптерећење од 1.0 кПа. Угао трења између дијафрагме и тла је $\delta = \pm 2/3\phi'$.

4. РЕЗУЛТАТИ ПРОРАЧУНА

На основу методе граничне равнотеже, прорачуном је одређена: дубина дијафрагме (D), минимални (M_{\min}) и максимални момент савијања (M_{\max}) и сила у разупирачу (F). Да би се могло извршити поређење резултата, у методи модула реакције тла је дубина дијафрагме (D) усвојена на основу резултата методе граничног стања, а затим је израчунат: минимални (M_{\min}) и максимални момент савијања (M_{\max}), сила у разупирачу (F), померање главе дијафрагме (U_0), померање дијафрагме у нивоу разупирача (U_F) и стабилност тла против хидрауличног слома у дну ископа ($F_{S,h}$). У табели 1 су дати резултати прорачуна за конзолну дијафрагму. Према усвојеној конвенцији, негативан момент савијања затеже залеђе дијафрагме, док је негативно померање усмерено према ископу.

Табела 1. Резултати прорачуна за конзолну дијафрагму

Стандард:	Класичан поступак		EN 1997-1:2004	
Метода:	Граничне равнотеже	Модула реакције тла	Граничне равнотеже	Модула реакције тла
D (m)	3.56	3.56	3.71	3.71
M_{\min} (kNm)	-101.7	-90.0	-124.6	-126.4
U_0 (mm)	-	-23.7	-	-27.4
$H+D$ (m)	7.56	7.56	7.71	7.71

Резултати прорачуна за разупрту дијафрагму су дати у табели 2. Аксијална крутост разупирача је $EA/L=204.1\text{kN/mm}$. Разупирач се поставља на деформисану конзолну дијафрагму дужине 11.28m односно 11.75m, при чему је константа модула реакције тла на $z=3.28\text{m}$ односно 3.75m, мерено од дна ископа (-4.0m) $n_h=40\text{MN/m}^3$.

Табела 2. Резултати прорачуна за разупрту дијафрагму

Стандард:	Класичан поступак		EN 1997-1:2004	
Метода:	Граничне равнотеже	Модула реакције тла	Граничне равнотеже	Модула реакције тла
D (m)	3.28	3.28	3.75	3.75
M_{\max} (kNm)	224.4	266.2	293.3	432.1
F (kN)	325.1	340.1	440.9	507.9
U_0 (mm)	-	-4.1	-	-4.8
U_F (mm)	-	-7.4	-	-9.9
U_{\max} (mm)	-	-12.3	-	-19.0
$F_{S,h}$	3.25	3.25	2.04	(1.94)
$H+D$ (m)	11.28	11.28	11.75	11.75

Да би тло испод дна темељне јаме (ископа) било стабилно против хидрауличног слома, фактор стабилности ($F_{S,hs}$) мора задовољити израз (4) за класичан поступак и израз (5) ако се користи метода који препоручује Еврокод 7 :

$$i_p \cdot \gamma_w \leq \gamma' \quad \rightarrow \quad F_{S,h} = \gamma' / (i_p \cdot \gamma_w) \quad (4)$$

$$i_p \cdot \gamma_w \cdot \gamma_{G,dst} \leq \gamma' \cdot \gamma_{G,stab} \quad \rightarrow \quad F_{S,h} = \gamma_{G,dst} \cdot \gamma' / (\gamma_{G,stab} \cdot i_p \cdot \gamma_w) \quad (5)$$

У горњем изразу, (γ_w) и (γ') су запреминска тежина воде и потопљеног тла, (i_p) је просечан хидраулички градијент у пасивној зони тла, а ($\gamma_{G,stab}$) и ($\gamma_{G,dst}$) су парцијални фактори сигурности за дејства (γ_F) према табели А.17. Просечан хидраулички градијент (i_p) уз дијафрагму у пасивној зони, одређује се на основу струјне мреже.

5. ЗАКЉУЧАК

Упоредни прорачун је извршен за конзолну и разупрту дијафрагму, чије су дужине одређене по методи граничног стања (ULS) и задржане у методи модула реакције тла (SLS). Резултати према ULS и SLS се не упоређују јер су поступци суштински различити. Избором модула реакције тла, појединачно се може изједначити нпр. или само максимални момент савијања или само померања или само сила у разупирачу. Ако се пореде резултати по методи граничног стања за уобичајен фактор сигурности код класичне методе $F_S=1.5$, Еврокод 7 даје веће вредности. За конзолну дијафрагму је дубина (D) већа за 4% а момент савијања (M_{min}) за 23%. За разупрту дијафрагму, (D) је веће за 15%, (M_{max}) за 31%, а сила у разупирачу (F) за 36%. Упоредивањем резултата према методи модула реакције тла, Еврокод 7 поново даје веће вредности. За конзолну дијафрагму (D) је веће за 4% а (M_{min}) за 41%. Разупрта дијафрагма има (D) веће за 15%, (M_{max}) за 63%, а (F) за 50%.

Горњи резултати се не могу уопштити само на основу два примера. За сваки други рачунски пример, у погледу геомеханичког профила, дубине ископа и материјалних параметара, одступања резултата прорачуна може бити потпуно другачије.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] EN-1997-1:2004 Evrokod 7, GEOTEHNIČKI PRORAČUN, Deo 1: OPŠTA PRAVILA. Građevinski fakultet u Beogradu, ISBN 978-86-7518-122-4, Beograd, novembar 2009.
- [2] Rowe, P.W. & Peaker, K (1965). Passive earth pressure measurements. Geotechnique, vol.15, pp 57-78.
- [3] W.K. Pun & P.L.R. Pang (1992). Horizontal subgrade reactions for cantilevered retaining wall analysis., GEO REPORT No. 21. © The Government of the Hong Kong Special Administrative Region.
- [4] Terzaghi, K. (1955). Evaluation of coefficients of subgrade reaction. Geotechnique, vol 5, pp 297-326.
- [5] Stevanović S. (1989). Fundiranje I, Naučna knjiga Beograd.
- [6] Nonveiller, E. (1979). Mehanika tla i temeljenje građevina, Školska knjiga Zagreb.

DIAPHRAGM WALL CALCULATION BY CLASSICAL METHOD AND ACCORDING TO EUROCODE 7

Summary: Compared to the previous period, in the last 10 years a significant increase in the number of structures located in urban areas for which a deep foundation pit for underground floors were constructed. The protection of foundation pit and the adjacent structures is generally done by construction of reinforced concrete diaphragms or sheet pile walls and exceptionally by steel sheet piles. Since for this type of structures Republic of Serbia have no recommendations or technical norms, calculation methods are very different and with scarce domestic literature often very arbitrary. In an effort to shed some light on this issue, this paper presents a comparison of results of calculation according to the classical procedure used in Serbia and procedure recommended by Eurocode 7. To illustrate the differences, calculation of reinforced concrete diaphragm in two phase excavation in a simple geomechanical profile is presented. At the end of this paper an analysis of the results is given with certain conclusions.

Keywords: reinforced-concrete diaphragm wall, protection of foundation pit