

STRENGTHENING OF A DEEP EXCAVATION UNDER COMPLEX ENGINEERING AND GEOLOGICAL CONDITIONS

Ina Bozhinova-Popova, Emanuela Malinkova

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: ina_popova@abv.bg; emanuela.malinkova@mgu.bg

SUMMARY. The article presents a solution for the reinforcement of a 12.5-metre-deep excavation with high groundwater level located in a densely built-up area, with facilities like a nearby Sofia Metropolitan tunnel, a sewage collecting tunnel, as well as the Perlovska River. The reinforcement is 60 cm thick and includes slurry walls with joint pipes between the wall sections. The anchors are of limited length due to the closely located structures. The groundwater drawing was carried out with five pumps from deep pumping wells. After the reinforcement construction was completed, the excavation works were successfully executed.

Keywords: lowering ground water level, weak soils, small diameter vertical drains, ground water, pile foundation.

УКРЕПВАНЕ НА ДЪЛБОК ИЗКОП ПРИ СЛОЖНИ ИНЖЕНЕРНОГЕОЛОЖКИ УСЛОВИЯ

Ина Божинова-Попова, Емануела Малинкова

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, София 1700

Резюме. В статията е дадено решение за изпълнение на изкоп с дълбочина 12,5 m при високи нива на почвените води и при околنو пространство, наситено със сгради и съоръжения, между които близко разположен тунел от Софийското метро, канализационен тунел и Перловската река. Укрепването е с шлицови стени с дебелина 60 cm и фугови тръби между отделните кампади. Анкерите са сравнително къси, тъй като тяхната дължина е ограничена от околните близко разположени съоръжения. Водопонижението е извършено чрез 5 помпи, които са разположени в дренажни кладенци с голяма дълбочина. Изпълнението е завършено успешно и обектът е изграден над котата на терена без никакви проблеми.

Ключови думи: водопонижение, слаби почви, вертикални дренажи с малък диаметър, почвени води, пилотно фундиране.

Въведение

Един от най-важните проблеми в Столицата са местата за паркиране. По тази причина, при много от съвременните сгради, особено тези с по-голяма височина, се изпълняват подземни етажи за паркинги. Поради наличното гъсто застрояване и съществуващата инженерна инфраструктура, изпълнението на дълбоки изкопи за нуждите на паркирането е трудно и отговорно.

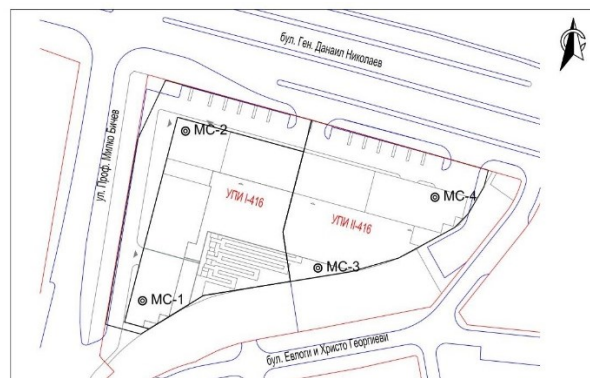
Обектът, който се разглежда в статията, е особено сложен, тъй като съчетава дълбок изкоп в терен с високо ниво и голям приток на подпочвените води, както и силно ограничено пространство, в което да се изпълняват анкерите: от една страна – Перловската река с мостова конструкция, от другата страна – близо разположен тунел на Софийското метро и прилежащата канализационна тръба с голямо сечение. Въпреки тези трудности, изкопът е укрепен, отводнен и изпълнен без проблеми.

Теренът, в който се проектира укрепване и отводняване на строителен изкоп, се намира в централната част на гр. София, м. „Подуене-Център“, район Оборище. Имотът се намира от източната страна на Парк “Заимов”. От северната страна имотът граничи с бул. “Ген. Данаил Николаев”. По югоизточната страна, имотът граничи с корекцията на коритото на р. Перловска. Теренът е равнинен с надморска височина, варираща от кота 529 до 531 метра.

Инженерногеоложки и хидрогеоложки проучвания

За нуждите и целите на настоящото проектиране са използвани геодезични, конструктивни и архитектурни данни за подземната част на сградата, както и данни за

преминаващ в близост съществуващ метро тунел, данни за коритото на р. Перловска и кадастрални данни за подземните комуникации по периферията на обекта. За уточняване на инженерногеоложките и хидрогеоложките условия са изпълнени 4 броя сондажни изработки, чиито дълбочини са до 20 m под кота терен.



Фиг.1. Ситуация с разположение на проучвателните сондажни изработки

Сондажите са разположени по периметъра на строителната площадка. Отчетено е водното ниво под кота терен, във всички изработки. Взети са ненарушени проби от почвените разновидности. Изпълнени са допълнителни проучвания „in situ“, по метода SPT. Използван е програмен продукт, чрез който от SPT изпитванията са уточнени характеристиките на почвите, които са съобразени и с данни от мащабните проучвания на характерните почвени разновидности, получени и обработени във връзка със строителството на Софийския метрополитен. Данните обхващат всички почвени разновидности, в това число и

насипите, които на определени места имат дебелини до 3 m. Определянето на характеристиките на насипите се налага поради факта, че те са негодни за фундиране, но създават земен натиск. С получените по-горе стойности на якостните характеристики на почвите се изчислява укрепителната конструкция на вертикалните откоси на изкопа за строителство на сградата. Видът и данните за физикомеханичните показатели на почвените разновидности са дадени в сондажната колонка на *Фиг. 2*

дата: 03.2022г.		ЛИТОЛОЖКА КОЛОНКА МС-1		Кота 530.83 m			
Кота на пласта, m	Дълбочина, m	Дебелина, m	Водно ниво, m	Растрер на пласта	Литолошко описание	Тип, Лаб. No, Дълбочина	SPT
525.53	5.30	5.30		1	Изкуствен насип, почвен слой, глина, органична, черна	$\gamma=19 \text{ kN/m}^3$ $\phi=14^\circ$ $c=15 \text{ kPa}$ $\delta=9^\circ$	5.00m = 18/21/24
518.03	12.80	7.50	6.5	3	Глина, прахова с пясъчливи прослойки, слетло кафява	$\gamma=19 \text{ kN/m}^3$ $\phi=20^\circ$ $c=40 \text{ kPa}$ $\delta=10^\circ$ $\gamma=10 \text{ kN/m}^3$ $\phi=20^\circ$ $c=40 \text{ kPa}$ $\delta=10^\circ$	10.00m = 3/5/6
516.43	14.40	1.60		4	Пясък и чакъл, дребни, заглинени, ръжживо-кафяви	$\gamma=10 \text{ kN/m}^3$ $\phi=25^\circ$ $c=25 \text{ kPa}$ $\delta=16^\circ$	
513.03	17.80	3.40		5	Глина до пясъчлива глина, прахови, с прослойки от заглинен пясък, сиво-кафяви	$\gamma=10 \text{ kN/m}^3$ $\phi=21^\circ$ $c=40 \text{ kPa}$ $\delta=11^\circ$	15.10m = 3/4/10
510.83	20.00	2.20		6	Пясък до глинест пясък, среден до едър с глинести с глинести прослойки, сиво-кафяв	$\gamma=10 \text{ kN/m}^3$ $\phi=24^\circ$ $c=25 \text{ kPa}$ $\delta=16^\circ$	19.80m = 5/9/12

Фиг. 2. Сондажна колонка

Околното пространство е изследвано и по данни от подземния кадастър на Столична община, огледи на място, данни за минаващото в близост трасе на метротунела:

- откъм ул. „Проф. Милко Бичев“ – наличие на метротунел и подземен колектор.
- откъм бул. „Ген. Данаил Николаев“ – означен е канализационен канал и ел. трасе;
- откъм бул. „Евлоги и Христо Георгиеви“ - р. Перловска в стоманобетонно корито, покрито с плоча.

Земен натиск и статически изследвания

Земният натиск върху укрепителната конструкция е определен по програма, разработена в МГУ за нуждите на Софийския метрополитен и е използвана за тази цел дълги години без проблеми. В нея се отчита съдействието на триенето почва-укрепителна стена, което обикновено намалява земния натиск до 20 %. Дълбочината на фундиране е на 12,9 m под нивото на естествения терен. Тъй като има високи нива на почвените води, а някъде има и почви, които могат да се размекнат при действието на водите и преминаването на тежки машини, се предвижда 40 cm баластрова възглавница.

С тази възглавница ще се осъществи и дренирането на повърхностни води, чрез вкопаване на дренажни канавки, ако се наложи тяхното изпълнение.

Като се вземе предвид и дебелината на баластровата възглавница, дълбочината на изкопите става 13,30 m, мерено от кота терен. Максималната изчислителна дълбочина на строителния изкоп с включена водопонизителна система (площен дренаж), мерено от горен ръб укрепителна ограда е приета на 13 m. Поради архитектурни и конструктивни съображения шлицовата стена е на по-ниска кота от нивото на естествения терен и затова е приета посочената изчислителна дълбочина.

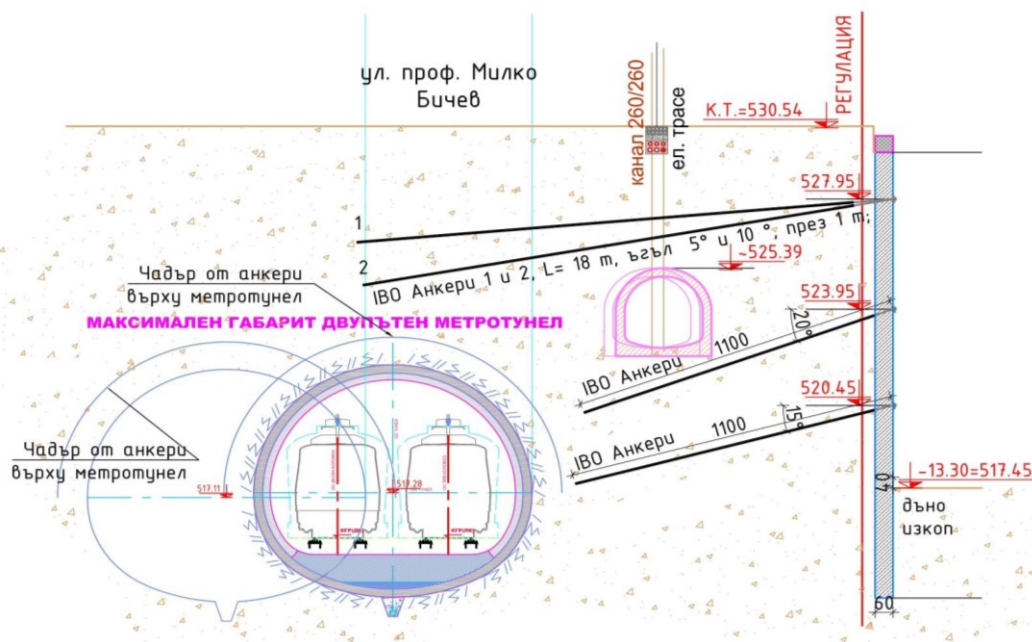
Поради по-голямата дълбочина на строителната яма, се приема подпиране на три нива с пасивни анкери тип ИВО. Съществуващите близко разположени съоръжения, дефинират местата и дължините на използваните анкери. Съобразяването с особеностите на околното пространство, позволява изпълнението на анкерно укрепване, без да се нарушават функциите и стабилитетите на прилежащите съоръжения.

Изчисленията за укрепителните стени са направени, като са отчетени коравините на стените, пружинните константи на анкерите и коефициентите на Винклер за околната почва. Съблюдавано е условието земната реакция върху забитата част да е по-малка от пасивното съпротивление на почвите. При тази постановка, земният натиск до дълбочината на изкопа се приема като равномерно разпределен, съгласно постановката на Шнебели (Schnebeli 1972). Към него пропорционално се добавя водният натиск в дълбочина от котата на водното ниво. На практика, нивото на подземните води в процеса на изкопаване и отводняване на строителния изкоп се понижава, поради сработването на водните нива във и вътре в изкопа. Отводняването на изкопа се изпълнява от вътрешната страна на шлицовите стени.

Укрепителните стени и анкерите са оразмерени за максимален огъващ момент. Необходимата дълбочина на забиване на укрепителната конструкция с оглед на статиката е 4 m под кота дъно изкоп.

Като се отчете определеното натоварване, се приемат анкери през осови хоризонтални разстояния от 1 m с определена дължина съгласно фигура 3.

Изчислителната схема е по силово-деформационния метод, (Божинов, Попов 2016). Съгласно последни разработки за земния натиск с отчитане и на влиянието на кохезията в основната схема, наклоните на плъзгателните повърхнини се увеличават вследствие на кохезията /пълно доказателство с подобрене на основната теория на Кулон е изложено в книгата на проф. Б. Божинов (Божинов 2022)/.



Фиг. 3. Схема на укрепване с шлицова стена и IBO анкери на три нива до Метро тунел и канализационен тунел.

Съгласно направените изводи, наклонът на плъзгателната повърхнина с отчитане действието на кохезията, се определя като корен на уравнението (Божинов 2022):

$$\gamma H [\sin \alpha \cdot \cos \alpha - \sin(\alpha - \varphi) \cdot \cos(\alpha - \varphi)] + 2c \cdot \cos^2(\alpha - \varphi) = 0 \quad (1)$$

където: “ γ ” е средното обемно тегло на почвата, “ H ” е дълбочината на изкопа, “ α ” е наклонът на плъзгателната повърхнина спрямо хоризонта, “ c ” е кохезията и “ φ ” е ъгълът на вътрешно триене на почвата.

Съгласно тези изводи, при дълбочина на изкопа $H = 13$ m, обемно тегло на почвата 20 kN/m^3 , ъгъл на вътрешно триене 20° и кохезия 30 kPa , наклонът на плъзгателната повърхнина става:

$$20 \times 13 [\sin \alpha \cdot \cos \alpha - \sin(\alpha - 20) \cos(\alpha - 20)] + 2 \times 30 \cos^2(\alpha - 20) = 0 \quad (2)$$

Решението на горното уравнение дава ъгъл на наклона спрямо хоризонталата $\alpha = 65^\circ$, докато по теорията на Кулон, този ъгъл е 55° . Това означава, че клинът, който се получава при плъзгане вследствие на земен натиск, става по-стръмен и неговият катет на повърхността на терена вместо 9,10 m, става 7,5 m. Това позволява използването на по-къси анкери. Именно тази постановка е направила възможно използването на по-късите анкери, съобразени с ограниченото околнo пространство на обекта.

За укрепителна конструкция на строителния изкоп е прието да бъде анкерирана шлицова стена с дебелина 60 cm. За да се гарантира водоплътност на стените и липса на отклонения на отделните кампади при изпълнението им, връзката между стените е с фугови полутръби.

Отводняване на строителен изкоп

За определяне на представителна стойност на коефициента на филтрация и параметри на депресионната линия, са направени допълнителни сондажи и опитни

водочерпения. При преглед на видовете почви и техните дебелини и дълбочини на залегане се установява, че водоплътни пластове до дълбочината на фундиране няма. Редуват се глини с пясъчни прослойки, пясъци и чакъли, както и насипи. Може да се очаква, че почвените води ще се подхранват главно през силно пропускливите пясъци и чакъли, но ще проникват и през останалите почвени разновидности, като пласт 3 – глина, прахова с пясъчни прослойки, пласт 5 – също глина с прослойки от заглинен пясък и дори през насипите, които не са уплътнени и имат значителна водопроводимост.

За ориентацията относно водните количества, които следва да се изпомпват, може да се приеме средна дълбочина на водните нива 4 m под котата на естествения терен. Като се приеме дълбочина на изкопа 13 m, остават за водопонижение до дъното на изкопа около $s=9$ m. При обем на порите $n=0,5$, и площ за отводняване $A=8000 \text{ m}^2$, при пълно водонасищане на почвата, се получава акумулирано водно количество:

$$Q_w = s \cdot n \cdot A = 9 \cdot 0,5 \cdot 8000 = 36\,000 \text{ m}^3 \quad (3)$$

От този обем следва да се изпомпват около 50 %, тъй като няма да се достигне пълно осушаване на почвите. Поради очаквано допълнително подхранване на водите, и тъй като водопонижението трябва да бъде най-малко на 50 cm под котата на дъното, се очакват водни количества от порядъка до 30000 m^3 вода за изпомпване. Водопоизителните кладенци ще се изпълняват от нивото на терена по време на изпълнение на шлицовите стени. А водочерпеното ще започне след като шлицовите стени са вече изпълнени.

Исходни данни и изчисления

Почвите в петното на сградата са преобладаващо пропускливи в по-голяма или по-малка степен. Това дава известно основание, да ги третираме като еднопластова среда. В дълбочина залегат пластове от долния плейстен.

Те могат да се приемат като водоуплътни. По тази причина, при отводняването се приема схемата: безнапорен хоризонт с дълбочина на водоупора 17 m. Средната стойност на определения представителен коефициент на филтрация на почвите, съгласно данни от допълнителните пробни водочерпвания, е приблизително $4,5 \cdot 10^{-5}$ m/sec. Радиусът на влияние при водопонижението, определен по формулата на Зихард (Grundbau 1966 и Гълъбов, Стоянов 2005) и при водопонижение от 4 m при взаимодействие с външна среда е:

$$R = 3000 \cdot s\sqrt{k} = 3000 \cdot 4\sqrt{4,5 \cdot 10^{-5}} = 80m \quad (4)$$

Дълбочината на водопонижението се приема въз основа на обстоятелството, че изкопът е ограден от водоуплътни стени, които не позволяват филтрация през тях.

Изчисления

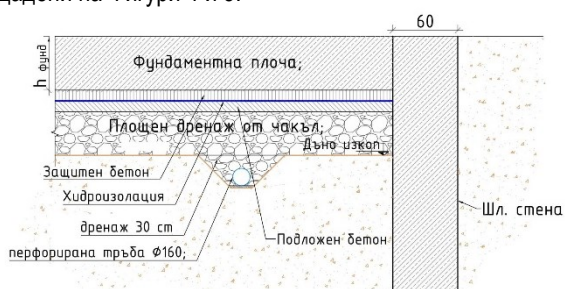
Площта за отводняване е приблизително 8000 m². Периметърът е около 400 m. Отнесено към кръгъл кладенец, това прави радиус на кладенеца:

$$r = \sqrt{\frac{8000}{\pi}} = 50m \quad (5)$$

Водопритокът може да се определи по формулата на Форхаймер (Гълъбов, Стоянов 2005):

$$Q = \frac{1.37 \cdot k(h_1^2 - h_2^2)}{\frac{lgR}{r}} = 16.6 \text{ l/sec} \quad (6)$$

Ако се монтират помпи с дебит по 3,5 l/s, това прави приблизително 5 помпи, които ще обезпечат количеството от 16,6 l/sec. Схема на площен дренаж и разрез на водопонизителен кладенец с помпено оборудване са дадени на Фигури 4 и 5.

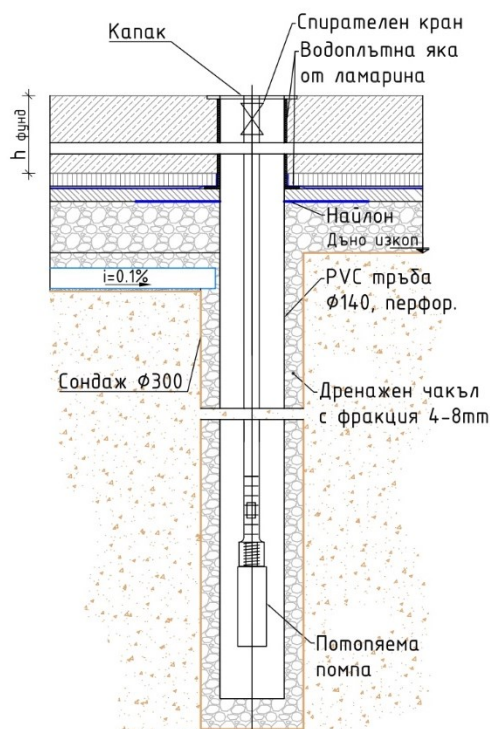


Фиг. 4. Схема на площен дренаж с дренажна тръба под фундаментната плоча

Мониторинг за стабилност на конструкцията и напрегнатото състояние на анкерите

Контролът се състои в измерване на усилията в анкерите чрез динамометри, пробно натоварване на инжекционните анкери и наблюдение на преместванията чрез репери. Данните от измерванията ще дадат основание да се провери действителния коефициент на сигурност на конструкцията чрез сравнение с проектните данни. Съгласно ЕВРОКОД 7 се предвижда задължително изпитване на вече изпълнени инжекционни анкери (пробно натоварване) за удостоверяване на годността им.

Получените от измерванията резултати са изключително важен показател за оценка на ефективността на изградените укрепителни съоръжения и сигурността на околното пространство.



Фиг. 5. Схема на водопонизителен кладенец с помпено оборудване

Заклучение

От изпълненото укрепяване и отводняване се установи, че на практика укрепителни стени със сравнително малка дебелина и подпрени само на три нива, могат да се прилагат в подобни тежки инженерногеоложки и хидрогеоложки условия. Измерванията на преместванията на шлицовите стени показаха нищожни резултати – само няколко милиметра. Пасивните анкери останаха ненапрегнати, което показва, че те изменят напрегнатото състояние на почвения масив около подпорните стени, а не са само опорни конструкции на стените. Потвърди се и предпоставките за изменение на ъгъла на плъзгателната повърхнина и съответното намаление на активния земен натиск. Натрупаният опит може да се използва и при други подобни случаи.

Литература

- Абрамов, С. (1955). *Хидрогеологические расчеты вертикальных дренажей при осушении угольных месторождений*. Москва
- Божинов, Б. (2022). *Геотехнически обект, Авангард Прима*, София.
- Божинов, Б., Дингозов, Г. (1979). *Пилотно фундиране*, София.

- Божинов, Б., Попов, С. (2016). *Изчисляване на пилоти, шлицови и шпунтови стени, натоварени с хоризонтални сили и огъващи моменти*, София.
- Божинова-Хаапанен, А. (2021). *Деформационни свойства на структурирани глинни*, София.
- Гълъбов М., Стоянов Н. (2005). *Динамика на подземните води*, София.
- Зееверт, Л. (1986). *Фундиране при трудни условия на земната основа*.
- Минков, В. (1965). *Фундиране*, София.
- Трофименкова, Ю. (1969). *Справочник проектировщика*, Москва.
- Grundbau – *Jdschenbuch, Band 1.2 Auflage, Berlin-Munchen, 1966.*
- Sanglerat, (1965). *Le penetrometre et la rekonnaissance des sols*, Paris.
- Schnebeli, G. (1972). *Leparois moulesdans lesol*. Paris.
- www.uacg.bg, Еврокод 7: *Геотехническо проектиране, 2007*