

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ГЛУБОКИХ КОТЛОВАНОВ НА ДЕФОРМАЦИИ ВМЕЩАЮЩЕГО МАССИВА

Деменков П.А., Комолов В.В.

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург

Ключевые слова: геомеханический прогноз, подземное пространство, глубокий котлован, стена в грунте, численное моделирование, прогноз оседаний поверхности, развитие деформаций массива.

Аннотация. В статье исследованы зависимости влияния геометрических и механических факторов при строительстве глубоких котлованов в слабых глинистых грунтах на развитие деформаций массива в их окрестности. Установлено количественное влияние таких факторов, как геометрические размеры котлована, толщина «стены в грунте», величина ее заглубления ниже отметки дна котлована, а также жесткость распорных конструкций. Проанализированы фактические данные глубоких котлованов для объектов транспортного строительства и подземных частей высотных зданий, определяющие диапазон изменения факторов в зависимости от типа грунта, в котором возводится сооружений. На основе проведенного исследования установлено, что наибольшее влияние на изменение деформаций в грунтовом массиве имеют геометрические параметры котлована, и их влияние также должно быть изучено в пространственной постановке.

ASSESSMENT OF THE EFFECT OF CHANGES IN THE PARAMETERS OF DEEP PITS ON THE DEFORMATION OF THE HOST MASSIF

Demenkov P.A., Komolov V.V.

Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg

Keywords: geomechanical forecast, underground space, deep excavation, slurry wall, numerical modeling, surface subsidence assessment, strain development.

Abstract. In this paper the dependence of the influence of geometrical and mechanical factors during the construction of deep pits in weak clay soils on the development of enclosing massif deformations is investigated. The quantitative influence of such factors as geometric dimensions of the excavation, the thickness of the "slurry wall", its embedding below the bottom of deep pit, and the rigidity of strutting has been established. The actual data of deep pits for transport construction projects and underground parts of high-rise buildings have been analyzed, determining the range of factor changes depending on the type of soil in which the structures are constructed. On the basis of the conducted research it has been established that the geometrical parameters of the excavation have the greatest influence on the change of deformations in the massif, and their influence should also be studied in the spatial formulation.

Введение

Освоение подземного пространства является одним из приоритетных направлений развития современных городов. Причины данной тенденции описаны во многих работах [1-5], как описаны и осложняющие факторы такого строительства [6, 7]. Необходимость возведения глубоких котлованов вблизи существующих зданий и сооружений, их фундаментов, а также иных подземных объектов, ставит целью снижение деформаций грунтового массива при строительстве практически до нуля.

Такие требования к возводимым сооружениям подразумевают применение конструкций крепления повышенной жесткости и конструктивной сложности, а также необходимость развития методов расчета конструкций и прогноза деформаций вмещающего массива до достаточной степени достоверности [8, 9]. С учетом того, что величина и характер деформаций вмещающего массива зависят от комплекса факторов, требуется проведение комплексного геомеханического анализа для их оценки.

Специфика геомеханических процессов, возникающих при строительстве подземных сооружений, определяется инженерно-геологическими условиями, закономерностями механического поведения вмещающего грунта, а также конфигурацией подземного

сооружения и последовательностью ведения строительных работ. Полнота учета этих данных предопределяет достоверность прогноза геомеханических процессов в породном массиве при строительстве подземных сооружений.

Сложность расчетов значительно возрастает при проектировании объектов в слабых грунтах. Одним из таких типов грунтов являются глины, поведение которых зависит от большого количества механических факторов: глина проявляет способность накапливать деформации, пластична и текуча [10-14]. Под термином «слабый грунт» чаще всего подразумевается глинистый грунт со степенью влажности $S_r > 0,8$, показателем консистенции $I_L > 0,5$, модулем деформации $E < 5$ МПа (в диапазоне давлений до 0,3 МПа) и расчетным сопротивлением $R_o < 0,15$ МПа [15, 16]. Таким образом, он создает слабый отпор и не является хорошим основанием для подземных сооружений.

Соответственно, необходимо правильно подобрать параметры крепления подземного сооружения во избежание потери устойчивости и аварий, еще на стадии проектирования [14, 17-19]. Согласно исследованиям [15, 20], почти в половине случаев аварии при устройстве глубоких котлованов происходят из-за просчетов, допущенных на стадии проектирования.

В данной работе проведен анализ существующих глубоких котлованов, возведенных для строительства высотных зданий и для объектов транспортного назначения – станций Московского метрополитена. Проанализированы котлованы с креплением «стена в грунте», так как данный тип крепления – наиболее подходящий для рассматриваемых сложных инженерно-геологических условий строительства [21]. Стены в грунте часто используются и при дальнейшей эксплуатации зданий в качестве несущих конструкций его фундамента или подземной части. Анализировались основные параметры «стены в грунте» – толщина, величина защемления в грунт, а также параметры расстрелов, или распорок, на ее жесткость. Критерием оценки является величина оседаний вмещающего грунта, так как одним из важнейших факторов в условиях плотной городской застройки является необходимость сохранения деформаций окружающего грунта в пределах нормативно допустимых [22, 23].

Исследования в данной статье выполнены методом численного конечно-элементного моделирования в плоской постановке, с учетом нелинейности поведения вмещающего грунта, этапности строительства. Моделирование выполнено для оценки степени влияния изменения каждого из параметров стены в грунте на оседания грунтового массива.

Анализ данных реализованных проектов

При недостаточной изученности инженерно-геологических условий, в частности, невозможности получить достаточное количество исходных данных для численного моделирования и применения продвинутых математических моделей для описания поведения вмещающего грунта, необходимо опираться в том числе на опыт возведения подземных сооружений в аналогичных условиях.

Частью данного исследования является анализ данных по развитию деформаций грунтового массива, а также принятых конструктивных решений при строительстве глубоких котлованов в России и за рубежом. Для анализа выделено две группы котлованов: котлованы, предназначенные для строительства станций метрополитена мелкого заложения; котлованы, предназначенные для строительства подземной части высотных зданий.

Все котлованы имеют ограждающую конструкцию «стена в грунте», усиленную распорной системой. Объекты подобраны таким образом, что во всех случаях монолитная железобетонная «стена в грунте» выполнена из бетона класса В30 толщиной 0,8 м. Все станционные комплексы и высотные здания расположены в идентичных геологических условиях.

Проанализированы толщина стены в грунте с зависимости от глубины выемки, а также величина ее заглубления ниже отметки дна котлована (рис. 1, 2). Грунты, в которых возведены объекты, подразделяются на три основных типа: тип А – наиболее плотные грунты; тип С – наименее плотные.

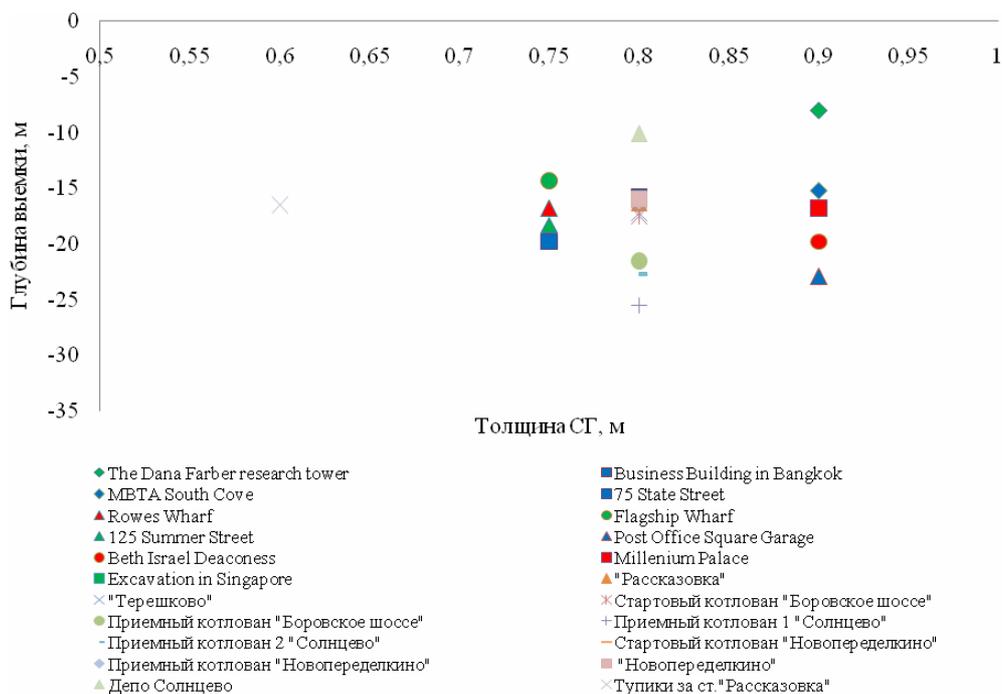


Рис. 1. Данные по толщине «стены в грунте» и глубине выемки объектов: синим цветом отмечены маркеры сооружений, построенных в грунтах типа А; красным и оранжевым – типа В; зеленым – типа С

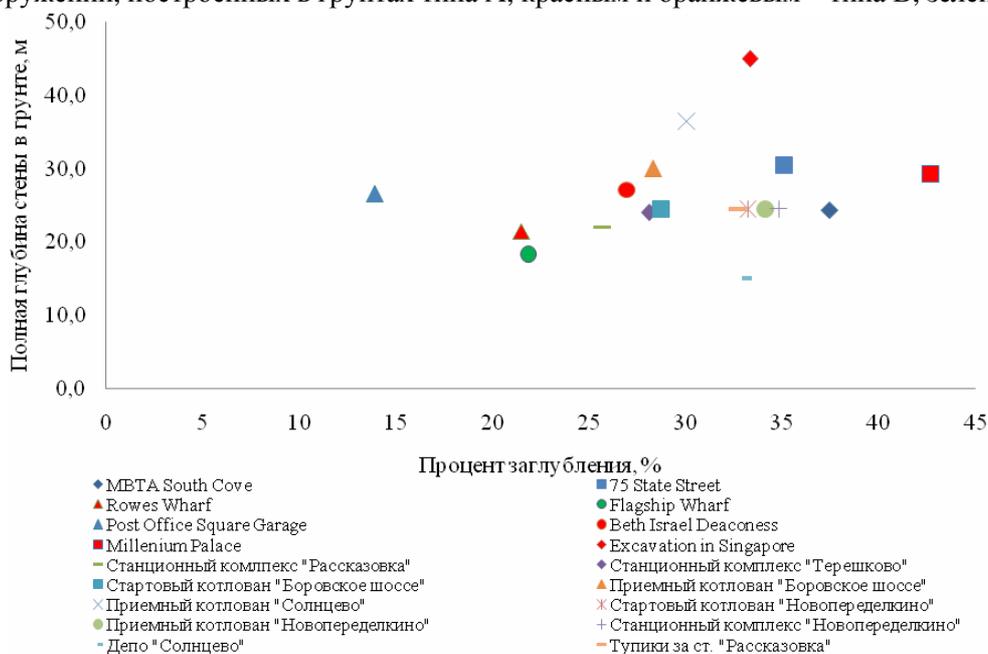


Рис. 2. Данные по величине заглубления «стены в грунте» в котлованах станций Московского метрополитена и из зарубежных источников: синим цветом отмечены маркеры сооружений, построенных в грунтах типа А; красным – типа В; зеленым – типа С

В результате анализа данных можно сказать, что толщина «стены в грунте» в меньшей степени зависит от технологии строительства и глубины котлована, в больше от инженерно-геологических условий (типа грунта). Даже при небольшой глубине выемки толщина стены может быть значительной, что обуславливается сложными инженерно-геологическими, и, возможно, гидрогеологическими, условиями. Величина заглубления «стены в грунте» же, наоборот, определяется требуемой глубиной выемки и практически никак не связана с типом грунта. Средняя величина заглубления при любых условиях составляет примерно 30%.

Для выявления наиболее важных параметров, влияющих на величину оседаний вмещающего грунта, выполнен анализ и сравнение результатов моделирования котлованов с различными геометрическими характеристиками, параметрами ограждающей конструкции и

системы крепления. Рассматривались идеализированные объекты в породах, близких по параметрам к «слабым глинистым грунтам».

Постановка задачи многовариантного моделирования

Целью этого этапа является проведение сравнительного анализа и оценка влияния расчетных параметров подземного сооружения на прогнозируемое развитие деформаций во вмещающем грунтовом массиве.

Расчетная схема выполнена на примере котлована шириной 10 м и глубиной выемки 10 м (рис. 3). При этом геометрические параметры котлована и технологические параметры его крепления в исследовании изменяются в соответствии с таблицами 1-3.

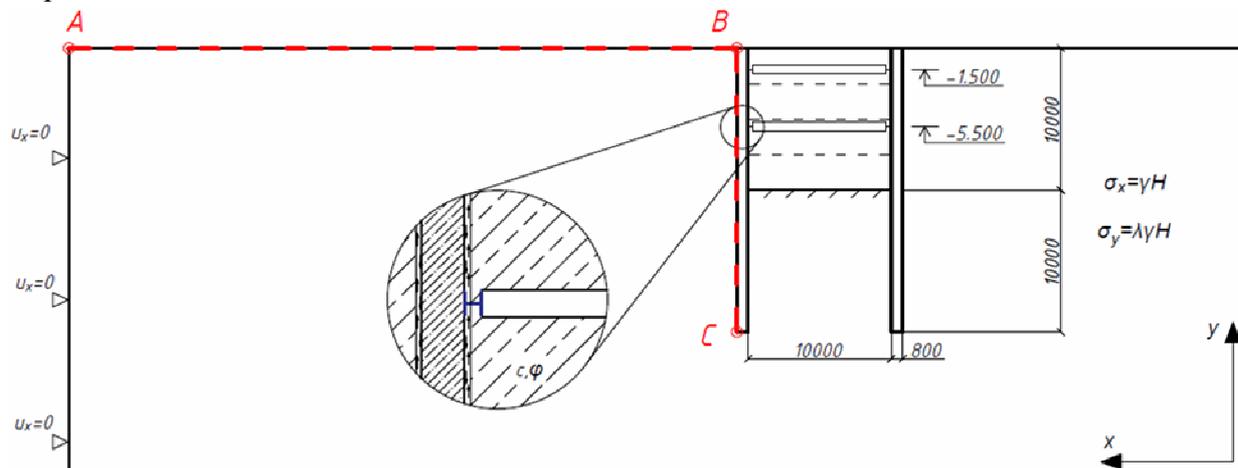


Рис. 3. Расчетная схема задачи

Табл. 1. Геометрические параметры типовых моделей

Наименование параметра	Ед. изм.	Возможные значения
Глубина котлована	м	10; 15; 20
Ширина котлована	м	5; 7,5; 10
Толщина стены в грунте	м	0,5; 0,6; 0,8; 1,0
Шаг изменения положения расстрелов	м	3,0
Максимальное количество расстрелов по глубине	шт.	3

Табл. 2. Геометрические параметры «стены в грунте»

Толщина, м	Площадь, м ²	Момент инерции, м ³	EA, кН	EI, кНм
0,5	0,5	0,010	16250000	338542
0,6	0,6	0,018	19500000	585000
0,8	0,8	0,043	26000000	1386667
1	1	0,083	32500000	2708333

Табл. 3. Механические параметры материала «стены в грунте»

Наименование параметра	Ед. изм.	Значение
Класс бетона	-	B30 (M400)
Объемный вес бетона	кН/м ³	24
Коэффициент Пуассона	-	0,3
Модуль упругости	МПа	32500

Котлован закреплен двумя ярусами стальных расстрелов, расположенными на отметках -1,500 м и -5,500 м. Изменение геометрических параметров в таких пределах позволяет исследовать влияние строительства практически при любых возможных сочетаниях факторов. Предполагается, что котлован возведен в глинистых грунтах, свойства которых описаны далее.

Математическая модель поведения грунта

Правильность первоначального выбора модели, соответствующей ожиданиям от расчета, играет огромное значение. Так, при необходимости получения достоверного прогноза деформаций земной поверхности модель должна включать в себя зависимости для моделирования поведения грунта на стадии нагрузки и разгрузки.

Расчеты выполнены в программном комплексе Plaxis 2D, где реализованы модели поведения грунта, подходящие для различных условий. Существует множество исследований, обосновывающих невозможность применения простейших упругопластических моделей при наличии глинистых обводненных грунтов [24]. Наиболее подходящей для прогноза осадок земной поверхности в рассматриваемых условиях является модель упрочняющегося грунта при малых деформациях Hardening soil model with small strain stiffness (HS small).

Сложность использования модели упрочняющегося грунта при малых деформациях заключается в задании дополнительных параметров жесткости, не указанных в стандартной таблице нормативных характеристик грунтов в составе инженерно-геологических отчетов. Модель HS small рассматривает отдельно модуль деформации грунта при девиаторном нагружении (E_{50}), модуль деформации при сжатии (E_{oed}), а также модуль разгрузки и повторного нагружения грунта (E_{ur}). Для получения указанных параметров необходимо проведение трехосных испытаний. В действительности чаще всего имеются только результаты стабилметрических испытаний для нескольких грунтов из всего разреза, залегающих, как правило, на глубине больше 20 м. Остальные характеристики задаются исходя из рекомендаций разработчиков Plaxis.

Параметры модели материалов HS small для типовых глинистых грунтов сведены в таблицу 4.

Табл. 4. Механические параметры вмещающих глинистых грунтов

Наименование параметра модели материала	Ед. изм.	Глина
Удельный вес грунта при естественной влажности	кН/м ³	19
Удельный вес грунта в полностью водонасыщенном состоянии влажности	кН/м ³	20
Модуль деформации	кПа	15 000
Одометрический модуль деформации	кПа	15 000
Модуль разгрузки	кПа	50 000
Показатель влияния минимальных главных напряжений на деформационные свойства грунта	-	0,7
Сцепление	кПа	35
Угол внутреннего трения	град.	18
Угол дилатансии	град.	0
Коэффициент Пуассона	-	0,15
Величина средних эффективных напряжений, соответствующая уровню напряжений, при которых определялись деформационные показатели	кПа	100
Коэффициент бокового давления для нормально уплотненного состояния	-	0.66
Показатель, характеризующий асимптотическое приближение к предельной величине прочности	-	0.9
Прочность при одноосном растяжении	кПа	0.0
Модуль упругости в диапазоне очень малых деформаций	кПа	207 000
Показатель, характеризующий изменение деформационных свойств в диапазоне от очень малых до малых деформаций	-	0,00025

Этапы исследования

На первом этапе расчета определяется исходное напряженно-деформированное состояние вмещающего массива. Далее моделируется передовое возведение ограждающей конструкции – «стены в грунте». На следующих этапах начинается выемка грунта в пределах проектных границ котлована. Выемка грунта производится по 2,5 м за этап в несколько

этапов в зависимости от глубины. На каждом этапе сначала котлован защищен только стеной без вспомогательных элементов; затем возводятся вспомогательные элементы.

Результаты и обсуждение

Критерием влияния сооружения на вмещающий массив выбрана величина оседания земной поверхности в окрестности котлована. Данный критерий интересен при оценке влияния котлована на близлежащие сооружения, деформации которых не должны превышать критических значений наклонов и кривизны.

Рассматривается грунт на расстоянии от борта котлована до 50 м, что обусловлено тем, что на большем расстоянии от котлована перемещения грунта незначительны и во всех моделях поведение грунта одинаково.

На рисунках 4-6 приведены полученные в результате многовариантного моделирования зависимости оседаний от изменяемых факторов.

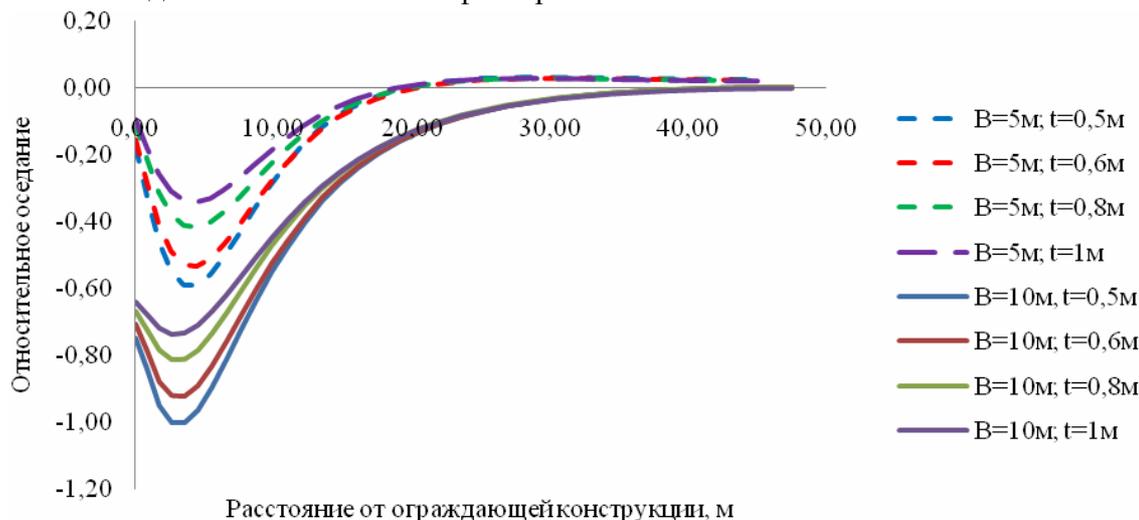


Рис. 4. Зависимость относительных осадков от ширины котлована

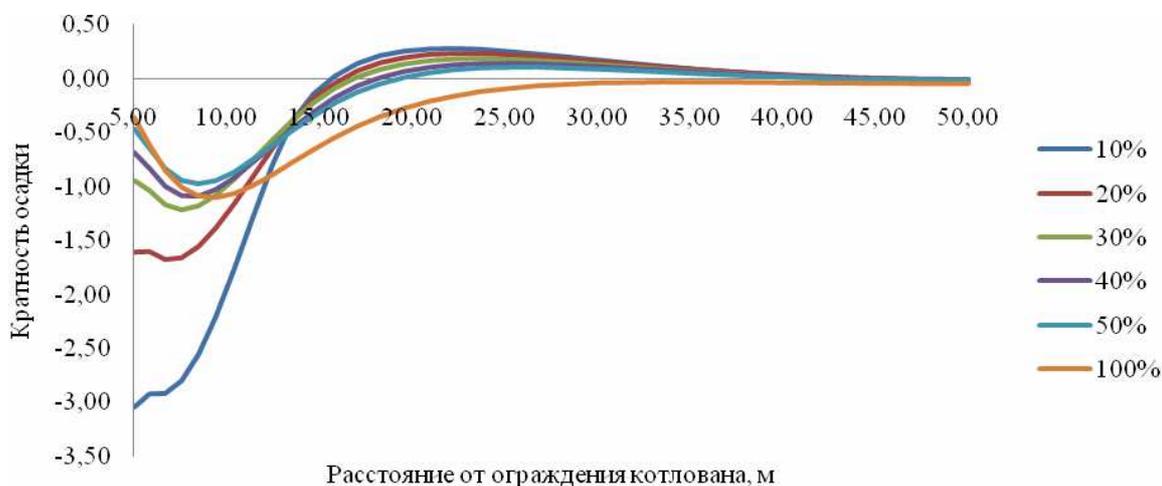


Рис. 5. Зависимость относительных осадков от процента заземления «стены в грунте»

Как видно из графиков (рис. 4, 5), в первую очередь влияют на величину оседаний вблизи борта котлована его геометрические размеры: на рисунке 4 видно, что при уменьшении ширины котлована в 2 раза величина осадок также уменьшается практически в 2 раза. Значительным является также влияние процента заглубления стены в грунте: при уменьшении глубины заземления в 10 раз осадки вырастают почти в 3 раза, что может негативно сказаться на окружающих объектах. Однако это происходит только при значительном уменьшении величины заглубления – до 10%. При величине заглубления в пределах 20-40% влияние не так значительно. Эти результаты согласуются с проанализированными данными по существующим объектам.

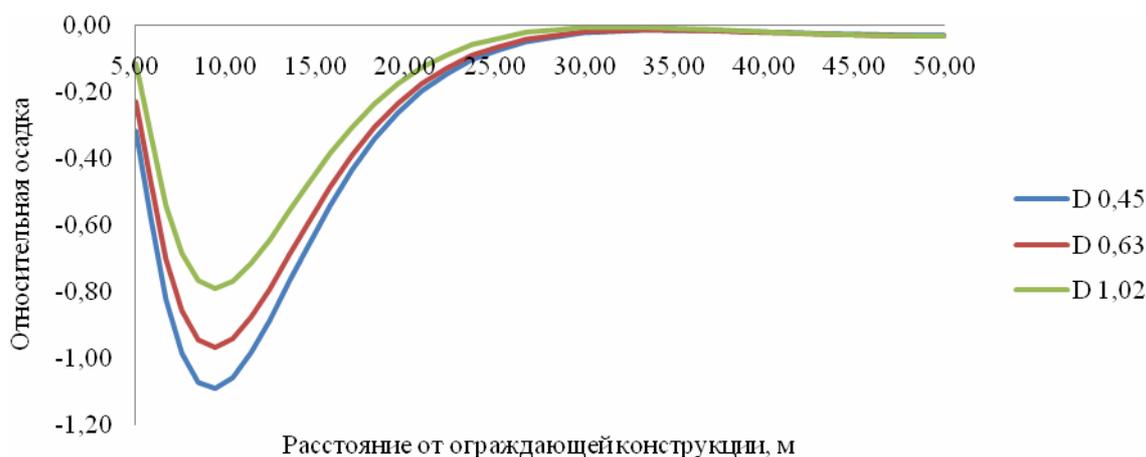


Рис. 6. Зависимость относительных осадок от жесткости расстрелов

При этом толщина «стены в грунте» имеет меньшее влияние на абсолютную величину оседания вблизи котлована.

Как видно из графика (рис. 6), влияние жесткости расстрелов, выраженное в увеличении диаметра в 2 раза, приводит к уменьшению оседаний в 0,7 раз. Зависимость горизонтальных смещений стены в грунте постоянной толщины при постоянной глубине котлована от жесткости расстрелов приведена на рисунке 6 и не является существенной.

По данным проведенных расчетов одним из наиболее существенных параметров является величина заглубления «стены в грунте» в грунт ниже дна котлована.

При защемлении стены на величину, равную или близкую к предельной (при которой происходит потеря устойчивости) влияние данного фактора очень значительно. Соответственно, важно представлять, какая глубина оптимальна во избежание чрезмерных смещений или перерасхода материала при устройстве ограждающей конструкции.

Толщина стены, также оказывающая довольно сильное влияние на деформации вмещающего массива при одних и тех же геометрических характеристиках котлована в относительных величинах, в абсолютных величинах не изменяется значительно. Как следствие, толщину можно менять при должном обосновании без сильного изменения конечного результата.

Заключение

Проведенные в данной статье исследования направлены на выявление геометрических и механических параметров глубоких котлованов и их ограждающих конструкций. Установлено количественное влияние изменения данных факторов на величину оседания грунта в окрестности глубокого котлована. Зависимости подтверждаются результатами анализа фактических данных параметров ограждающих конструкций котлованов транспортного назначения и котлованов для подземных частей высотных зданий.

Численное моделирование в программном комплексе Plaxis 2D с учетом нелинейного поведения грунта позволило спрогнозировать деформации массива с достаточной степенью достоверности.

Одним из основных выводов данного исследования является то, что ширина и глубина котлована оказывают значительное влияние на деформации грунта. При этом, при расчете в плоской постановке предполагается, что котлован бесконечен в направлении, перпендикулярном расчётному сечению. Дальнейшие исследования будут направлены на количественное сравнение результатов деформаций вмещающего грунта, полученных в плоской и пространственной постановках, в зависимости от геометрических размеров подземного сооружения.

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-35-90111.

Список литературы

1. Шашкин А.Г., Зенцов В.Н., Улицкий В.М. Развитие подземного пространства мегаполиса // Жилищное строительство. – 2018. – №9. – С. 30-36.
2. Храбатина Н.В., Пусный Л.А., Дубино А.М. Освоение подземного пространства мегаполисов // Вестник БГТУ имени В.Г. Шухова. – 2018. – №1. – С. 61-65.
3. Денисова Ю.В., Коренькова Г.В. К вопросу необходимости освоения подземного пространства городов // Вестник БГТУ имени В. Г. Шухова. – 2016. – №11. – С. 99-103.
4. Lin Dong. Metro Systems and Urban Development: Impacts and Implications // Tunnelling and Underground Space Technology. 2022, vol. 125, p. 104509.
5. Wout Broere. Urban Underground Space: Solving the Problems of Today's Cities // Tunnelling and Underground Space Technology. 2016, vol. 55, pp. 245-248.
6. Дашко Р.Э., Шидловская А.В., Панкратова К.В., Жукова А.М. Техногенная трансформация основных компонентов подземного пространства мегаполисов и ее учет в геомеханических расчетах (на примере Санкт-Петербурга) // Записки Горного института. – 2011. – Т. 190. – С. 65-70.
7. Летуновский А.М., Макаров В.В., Лозин Г.Б. Решение проблем освоения подземного пространства г. Владивосток // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2013. – Т. 7. – С. 17-24.
8. Nguyen Tai Tien, Karasev M.A., Vilner M.A. Study of the Stress-Strain State in the Sub-Rectangular Tunnel // Geotechnics for Sustainable Infrastructure Development. 2022, vol. 62, pp. 383-388.
9. Akmatov D.Zh., Tikhonov A.A., Kappushev D.Z. Numerical modeling of geomechanical processes in construction of the Moscow Metro running tunnels // Mining Industry Journal (Gornay Promishlennost). 2022, vol. 1, pp. 133-137.
10. Дашко Р.Э., Лохматиков Г.А. Верхнекотлинские глины Санкт-Петербургского региона как основание и среда уникальных сооружений: инженерно-геологический и геотехнический анализ // Записки Горного института. – 2022. – Т. 254. – С. 180-190.
11. Карасев М.А., Беляков Н.А. Прогноз деформаций земной поверхности при строительстве станций метрополитена в твердых глинах // Известия ТулГУ. Науки о Земле. – 2016. – №1. – С. 139-155.
12. Абелев М.Ю. Слабые водонасыщенные глинистые грунты как основания сооружений. – М.: Стройиздат, 1973. – 288 с.
13. Сафин Д.Р. Экспериментальные исследования НДС слабых водонасыщенных глинистых грунтов, армированных вертикальными элементами // Известия КазГАСУ. – 2014. – №4. – С. 230-236.
14. Ofrikhter Ia., Ponomaryov A., Zakharov A., Shenkman R. Estimation of soil properties by an artificial neural network // Magazine of Civil Engineering. 2022, vol. 2(110), p. 11011.
15. Dashko R.E., Pankratova K.V., Korobko A.A. Study of engineering-geological and microbiological factors for assessing the dynamics of fracture in tunnel highway Saint Petersburg – Kiev // Journal of Mining Institute. 2012, vol. 195, pp. 24-27.
16. Dashko R.E., Lebedeva Y.A. Improving Approaches to Estimating Hydrogeological Investigations as a Part of Engineering Survey in Megacities: Case Study of St. Petersburg // Water Resources. 2017, iss. 00978078, vol. 44, pp. 875-885.
17. Шашкин А.Г. Основы расчета подземных сооружений в условиях городской застройки на слабых глинистых грунтах // Жилищное строительство. – 2011. – №6. – С. 39-46.
18. Хачатрян В.А. Проектирование и освоение подземного пространства под зданиями в окружении существующей застройки // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2015. – №6. – С. 95-105.
19. Очкуров В.И., Деменков П.А., Беляков Н.А. Аварийные ситуации при устройстве котлованов // Проблемы Науки. – 2016. – №38(80). – С. 116-118.
20. Teraksa W. Lessons from the collapse during construction of an inlet pumping station: Geotechnical instrumentation aspects. // Field measurements in geomechanics. Proc. of the 5-th Int. Symposium. – Singapore, 2004. – P. 247-252.
21. Надточий Н.С., Любомирский А.В. Технология «Стена в грунте» в подземном строительстве // Alfabuild. – 2018. – №1(3). – С. 46-54.
22. Huang Fu, Yongtao Wang, Jingshu Xu, Qiuqing Pan, Di Wang. Three-Dimensional Stability Analysis of Slurry Trench Based on Mohr-Coulomb Nonlinear Failure Criterion // KSCE Journal of Civil Engineering. 2022, vol. 12, pp. 5038-48.
23. Boonchai Ukritchon, M. Asce, Andrew J. Whittle, Scott W. Sloan Undrained Stability of Braced Excavations in Clay // Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering. 2003, vol. 129(8), pp. 738-755.
24. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. Утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 16 декабря 2016 г. N 970/пр и введен в действие с 17 июня 2017г.

References

1. Shashkin A.G., Zentsov V.N., Ulitsky V.M. The development of the underground space of the metropolis // Housing construction. 2018, no. 9, pp. 30-36.

2. Khrabatina N.V., Pusny L.A., Dubino A.M. Development of the underground space of megacities // Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2018, no. 1, pp. 61-65.
3. Denisova Yu.V., Korenkova G.V. On the question of the need to develop the underground space of cities // Bulletin of the BSTU named after V.G. Shukhov. 2016, no. 11, pp. 99-103.
4. Lin Dong. Metro Systems and Urban Development: Impacts and Implications // Tunnelling and Underground Space Technology. 2022, vol. 125, p. 104509.
5. Wout Broere. Urban Underground Space: Solving the Problems of Today's Cities // Tunnelling and Underground Space Technology. 2016, vol. 55, pp. 245-248.
6. Dashko R.E., Shidlovskaya A.V., Pankratova K.V., Zhukova A.M. Technogenic transformation of the main components of the underground space of megacities and its accounting in geomechanical calculations (on the example of St. Petersburg) // Journal of Mining Institute. 2011, vol. 190, pp. 65-70.
7. Letunovsky A.M., Makarov V.V., Lozin G.B. Solving the problems of underground space development in Vladivostok // Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal). 2013, vol. 7, pp.17-24.
8. Nguyen Tai Tien, Karasev M.A., Vilner M.A. Study of the Stress-Strain State in the Sub-Rectangular Tunnel // Geotechnics for Sustainable Infrastructure Development. 2022, vol. 62, pp. 383-388.
9. Akmatov D.Zh., Tikhonov A.A., Kappushev D.Z. Numerical modeling of geomechanical processes in construction of the Moscow Metro running tunnels // Mining Industry Journal (Gornay Promishlennost). 2022, vol. 1, pp. 133-137.
10. Dashko R.E., Lokhmatikov G.A. Verkhnekotlinsky clays of the St. Petersburg region as the foundation and environment of unique structures: engineering-geological and geotechnical analysis // Journal of Mining Institute. 2022, vol. 254, pp. 180-190.
11. Karasev M.A., Belyakov N.A. Forecast of deformations of the Earth's surface during the construction of metro stations in hard clays // News of the TUSU. Earth Sciences. 2016, no. 1, pp. 139-155.
12. Abelev M.Yu. Weak water-saturated clay soils as foundations of structures. – M.: Stroyizdat, 1973. – 288 p.
13. Safin D.R. Experimental studies of VAT of weak water-saturated clay soils reinforced with vertical elements // News of KSUAE. 2014, no. 4, pp. 230-236.
14. Ofrikhter Ia., Ponomaryov A., Zakharov A., Shenkman R. Estimation of soil properties by an artificial neural network // Magazine of Civil Engineering. 2022, vol. 2(110), p. 11011.
15. Dashko R.E., Pankratova K.V., Korobko A.A. Study of engineering-geological and microbiological factors for assessing the dynamics of fracture in tunnel highway Saint Petersburg – Kiev // Journal of Mining Institute. 2012, vol. 195, pp. 24-27.
16. Dashko R.E., Lebedeva Y.A. Improving Approaches to Estimating Hydrogeological Investigations as a Part of Engineering Survey in Megacities: Case Study of St. Petersburg // Water Resources. 2017, iss. 00978078, vol. 44, pp. 875-885.
17. Shashkin A.G. Fundamentals of calculation of underground structures in conditions of urban development on weak clay soils // Housing construction. 2011, no.6, pp. 39-46.
18. Khachatryan V.A. Design and development of underground space under buildings surrounded by existing buildings // Actual problems of humanities and natural sciences. 2015, no. 6, pp. 95-105.
19. Ochukurov V.I., Demenkov P.A., Belyakov N.A. Emergency situations in the construction of pits // Problems of Science. 2016, no. 38(80), pp. 116-118.
20. Teparaksa W. Lessons from the collapse during construction of an inlet pumping station: Geotechnical instrumentation aspects. // Field measurements in geomechanics. Proc. of the 5-th Int. Symposium. – Singapore, 2004. – P. 247-252.
21. Nadtochiy N.S., Lyubomirsky A.V. Technology "Wall in the ground" in underground construction // Alfabuild. 2018, no. 1(3), pp. 46-54.
22. Huang Fu, Yongtao Wang, Jingshu Xu, Qiuqing Pan, Di Wang. Three-Dimensional Stability Analysis of Slurry Trench Based on Mohr-Coulomb Nonlinear Failure Criterion // KSCE Journal of Civil Engineering. 2022, vol. 12, pp. 5038-48.
23. Boonchai Ukritchon, M. Asce, Andrew J. Whittle, Scott W. Sloan Undrained Stability of Braced Excavations in Clay // Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering. 2003, vol. 129(8), pp. 738-755.
24. SP 22.13330.2016. Foundations of buildings and structures. Approved by Order of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation No. 970/pr dated December 16, 2016 and put into effect from June 17, 2017.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Демеников Пётр Алексеевич – доктор технических наук, доцент, декан Строительного факультета	Demenkov Peter Alekseevich – doctor of technical sciences, associate professor, dean of the Faculty of construction
Комолов Василий Викторович – ассистент кафедры Промышленного и гражданского строительства	Komolov Vasily Viktorovich – assistant of the Department of industrial and civil engineering
Komolov_Vasilii@mail.ru	

Получена 30.11.2022