

АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ ГЛУБОКОГО КОТЛОВАНА В СЛАБЫХ ГРУНТАХ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА СТАНЦИИ МЕТРО

У Б.

Колледж гражданского строительства и архитектуры и Ключевая лаборатория по предотвращению стихийных бедствий и безопасности строительных объектов Министерства образования, Университет Гуанси, г. Наньнин, провинция Гуанси, Китай

ПЭН И.

Колледж гражданского строительства и архитектуры и Ключевая лаборатория по предотвращению стихийных бедствий и безопасности строительных объектов Министерства образования, Университет Гуанси, г. Наньнин, провинция Гуанси, Китай 18508465856@163.com

ЛАНЬ Я.

Колледж гражданского строительства и архитектуры и Ключевая лаборатория по предотвращению стихийных бедствий и безопасности строительных объектов Министерства образования, Университет Гуанси, г. Наньнин, провинция Гуанси, Китай

МЭН Г.

Колледж гражданского строительства и архитектуры и Ключевая лаборатория по предотвращению стихийных бедствий и безопасности строительных объектов Министерства образования, Университет Гуанси, г. Наньнин, провинция Гуанси, Китай

АННОТАЦИЯ

Представляем вниманию читателей немного сокращенный и адаптированный перевод доклада китайских геотехников «Анализ поведения глубокого котлована в слабых грунтах для строительства станции метро» (Wu et al., 2019). Этот доклад был сделан в 2019 году в городе Цзилинь (провинция Цзилинь, Китай) на Международной конференции по достижениям в сферах гражданского строительства, энергетических ресурсов и инженерным методам охраны окружающей среды. Он также был опубликован в 2019 году в виде статьи в журнале *Earth and Environmental Science* («Науки о Земле и окружающей среде») издательством британской благотворительной научной организации IOP (Institute of Physics – «Институт физики»), ставшей фактически международной. Эта статья находится в открытом доступе по лицензии CC BY 3.0, которая позволяет распространять, переводить, адаптировать и дополнять ее при условии указания типов изменений и ссылки на первоисточник. В нашем случае полная ссылка на источник для представленного перевода (Wu et al., 2019) приведена в конце.

Проектирование и строительство глубокого котлована для станции метро на территории города Нинбо, сложенной слабыми грунтами, проводилось с помощью конечноэлементного моделирования в программе PLAXIS на основе модели упрочняющегося грунта (Hardening Soil – HS) и сравнительного анализа с данными полевого мониторинга.

Выполненный анализ показал, что результаты численного моделирования могут хорошо согласовываться с данными полевого мониторинга. Было показано, что с помощью модели PLAXIS на основе модели грунта HS вполне можно выполнять численный анализ строительства сложных котлованов в массивах слабых грунтов.

По данным мониторинга и расчетным значениям, горизонтальные смещения подпорной стенки борта котлована («стены в грунте») и осадки поверхности окружающих грунтов, вызванные откопкой примыкающего вспомогательного котлована, невелики и мало влияют на основной котлован. Было показано, что способ крепления котлована и метод строительства, использованные при реализации данного проекта, позволяют хорошо контролировать влияние строительства вспомогательного котлована на основной.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

слабые грунты; сложный котлован; система крепления; подпорная стенка; «стена в грунте»; горизонтальные смещения; осадки поверхности; конечноэлементное моделирование; модель упрочняющегося грунта; полевой мониторинг; сравнительный анализ.

ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

У Б., Пэн И., Лань Я., Мэн Г. Анализ поведения глубокого котлована в слабых грунтах для строительства станции метро (пер. с англ.) // Геоинфо. 2024. Т. 6. № 3. С. 16–22 DOI:10.58339/2949-0677-2024-6-3-16-22

RESPONSE ANALYSIS OF THE EXCAVATION OF A DEEP FOUNDATION PIT FOR A METRO STATION IN SOFT SOILS

B. WU

College of Civil Engineering and Architecture and the Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety of Ministry of Education, Guangxi University, Nanning, Guangxi, China

Y. PENG

College of Civil Engineering and Architecture and the Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety of Ministry of Education, Guangxi University, Nanning, Guangxi, China
18508465856@163.com

Y. LAN

College of Civil Engineering and Architecture and the Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety of Ministry of Education, Guangxi University, Nanning, Guangxi, China

G. MENG

College of Civil Engineering and Architecture and the Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety of Ministry of Education, Guangxi University, Nanning, Guangxi, China

ABSTRACT

We present a slightly abridged and adapted translation of the report "Response analysis of the excavation of a deep foundation pit for a metro station in soft soils" by Chinese geotechnical engineers (Wu et al., 2019). This report was presented in 2019 at the International Conference on Advances in Civil Engineering, Energy Resources and Environment Engineering in Jilin (China). It was also published as an article in the journal "Earth and Environmental Science" by the publishing company of the British scientific society "Institute of Physics" (IOP) that is now virtually international. It is an open access article under the CC BY 3.0 license that allows it to be distributed, translated, adapted, and supplemented, provided that the types of changes are noted and the original source is referred to. In our case, the full reference to the original paper (Wu et al., 2019) used for the presented translation is given in the end.

The whole process of the construction of a deep foundation pit for a subway station in Ningbo soft soil area was modeled using the PLAXIS finite element software on the basis of the HS (Hardening Soil) constitutive model. A comparative analysis of the obtained simulation results and field monitoring data was carried out.

The analysis indicated that the numerical simulation results could be well fitted to the field monitoring data. It was proved that the PLAXIS model on the basis of the HS constitutive model could perform the numerical simulation analysis of complex foundation pit excavation in a soft soil area very well.

According to the monitoring data and calculated values, the horizontal displacements of the retaining wall (diaphragm wall) and the ground surface settlements, which were caused by the excavation of the auxiliary foundation pit, were small and had little effect on the main foundation pit. It was proved that the construction method of the foundation pit support system for the considered project could control the influence of the excavation of the auxiliary foundation pit on the main foundation pit very well.

KEYWORDS:

soft soils; complex pit; pit retaining system; retaining wall; diaphragm wall; horizontal displacements; surface settlements; finite element modeling; hardening soil model; field monitoring; comparative analysis.

FOR CITATION:

Wu B., Peng Yi., Lan Ya., Meng G. Analiz povedeniya glubokogo kotlovana v slabom grunte dlya stroitel'stva stantsii metro [Response analysis of the excavation of a deep foundation pit for a metro station in soft soils] (translated from English into Russian) // Geoinfo. 2024. T. 6. № 3. S. 16–22 DOI:10.58339/2949-0677-2024-6-3-16-22 (in Rus.).

ВВЕДЕНИЕ ►

С постоянным развитием строительства городского метро появилось большое количество проектов глубоких котлованов. Юго-восточная прибрежная территория Китая характеризуется развитой экономикой, и количество строящихся глубоких и крупных котлованов там велико. При этом грунты на этой территории слабые, плохого качества, с большой ползучестью, высокими коэффициентами фильтрации (водопроницаемости) и влажностью. Поэтому для строительства глубокого котлована для станции метро на такой территории требуются особые исследования.

В настоящее время при создании глубоких котлованов успешно применяются численные расчеты. Например, в работе [1] использовалось конечноэлементное программное обеспечение для выполнения анализа на основе численного моделирования всего процесса откопки глубокого котлована для проекта строительства коммерческого и жилого комплекса «Ухань Лаопу Филм». В исследовании [2] применялась программа PLAXIS 3D для исследований в процессе проектирования котлована в районе Западного железнодорожного вокзала города Цзинань. В работе [3] использовались данные полевого мониторинга

для численного анализа строительства глубокого котлована для метро в Пекине. В статье [4] рассказано о применении конечноэлементного программного обеспечения для анализа характеристик системы крепления котлована для строительства станции Цютао метро Ханчжоу. Автор публикации [5] для создания модели использовал конечноэлементную программу ABAQUS и обобщил основную закономерность поднятия дна котлована.

В настоящее время появляется все больше и больше проектов глубоких котлованов, прилегающих друг к другу, но соответствующих публикаций не

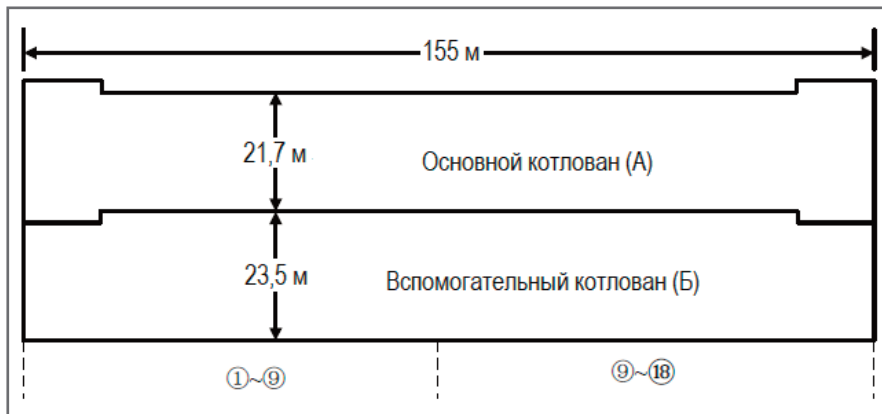


Рис. 1. Схема котлована в плане

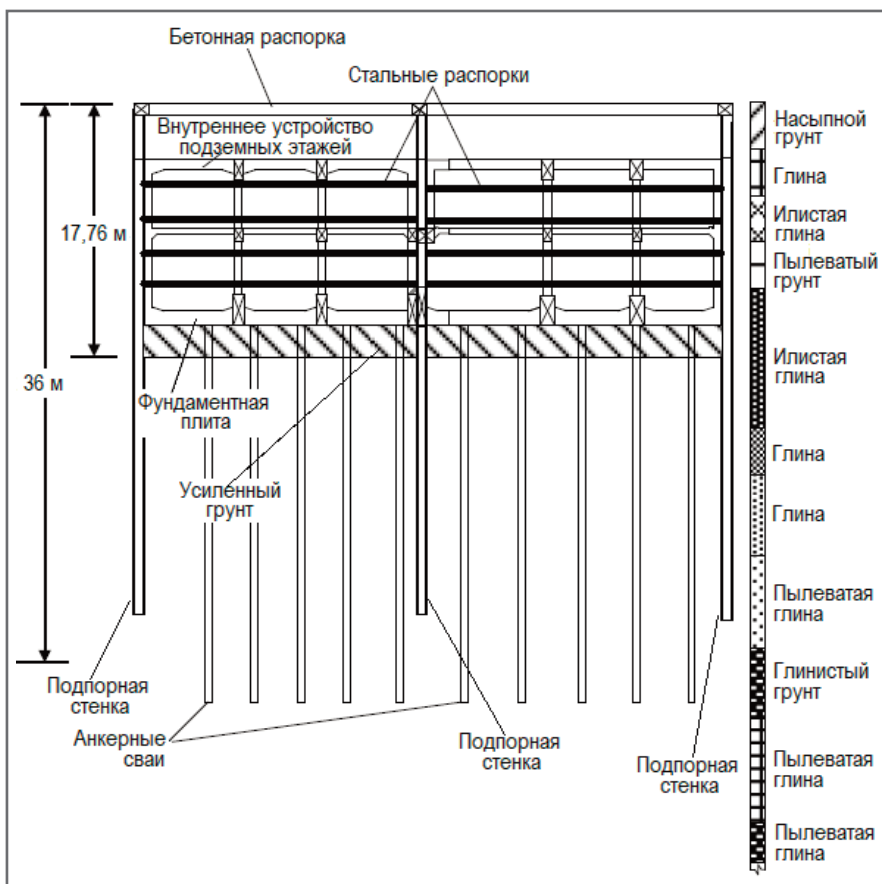


Рис. 2. Схема котлована в поперечном разрезе

хватает. Поэтому в данной статье представлено исследование с использованием конечноэлементной программы PLAXIS 2D для анализа процесса строительства сложного котлована для станции метро на линии Нинбо № 3. Эта работа может быть полезна для проектирования и строительства других глубоких котлованов в слабых грунтах.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПРОЕКТЕ ►

Глубокий котлован для строительства станции метро создавался с использованием метода открытой выемки грунта. Он имел форму прямоугольного

параллелепипеда. При строительстве он разделялся на две части.

Основной котлован (А) для станции метро имел длину 155 м, ширину по большей части длины 21,7 м и глубину 17,76 м. Для него было предусмотрено 5 ярусов распорок: в первом ярусе сверху – железобетонные распорки, в остальных – стальные.

Примыкающий вспомогательный котлован (Б) имел длину 155 м, ширину по большей части длины 23,5 м и глубину 17,76 м. Для него также было предусмотрено 5 ярусов распорок: в первом ярусе сверху – железобетонные распорки, в остальных – стальные.

Готовое сооружение должно иметь два подземных этажа и свайно-плитный фундамент. Грунт под железобетонной фундаментной плитой был усилен на глубину 3 м от ее подошвы. Нижние торцы свай находились на глубине более 36 м от дневной поверхности.

На рисунке 1 представлена принципиальная схема рассматриваемого котлована в плане, на рисунке 2 – устройство котлована, фундамента и подземных этажей в поперечном разрезе.

Геологические условия площадки строительства являются непростыми. Она расположена в равнинной местности сбросовой впадины Нинбо. Вмещающие грунты котлована являются слабыми по механическим свойствам и богатыми водой (см. рис. 2). Поэтому строительство имело большие риски и высокий уровень сложности.

КОНЕЧНОЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬСТВА КОТЛОВАНА ►

Чтобы глубоко изучить деформации подпорной стенки котлована («стены в грунте») и осадки дневной поверхности рядом с котлованом в процессе выемки грунта, была создана численная модель в конечноэлементной программе PLAXIS, которая может эффективно анализировать проблемы деформирования, устойчивости, уплотнения и просачивания подземных вод при геотехническом строительстве и широко используется при проектировании глубоких котлованов.

Двумя наиболее важными факторами при расчетах на основе метода конечных элементов являются создание модели и выбор параметров грунта. Поскольку форма котлована в плане представляет собой обычную «длинную полосу», для 2D моделирования было выбрано поперечное сечение котлована вертикальной плоскостью. Процесс строительства котлована включал устройство «стены в грунте», выемку грунта и установку распорок. Эти процессы были упрощены за счет «активации» и «заморозки» эффектов.

Особенно важны при моделировании выбор комплексной геомеханической (конститутивной) модели поведения грунта и определение его параметров. С помощью модели упрочняющегося грунта (Hardening Soil – HS) можно моделировать поведение различных типов дисперсных грунтов в их разных слоях. Эта модель может учитывать характеристики упрочнения слабой глины и использовать различные модули нагрузки/разгрузки. Она моделирует влияние

Таблица.

Параметры грунтов

Тип грунта (сверху вниз, см. рис. 2)	E_{oed}^{ref} , МПа	E_{50}^{ref} , МПа	E_{ur}^{ref} , МПа	C'_{ref} , кПа	φ' , град.	R_f
Насыпной грунт	5,00	5,00	20,00	10,0	28,0	0,50
Глина	4,63	4,63	23,15	5,6	26,7	0,76
Илистая глина	2,40	3,60	19,20	6,7	24,7	0,83
Пылеватый грунт	2,07	3,10	16,56	5,9	23,8	0,83
Илистая глина	2,23	3,35	17,84	6,9	23,7	0,83
Глина	2,92	2,92	14,60	5,3	23,4	0,76
Глина	6,52	6,52	32,60	24,1	24,9	0,76
Пылеватая глина	5,95	5,95	29,75	21,8	25,1	0,66
Глинистый грунт	7,22	7,22	21,66	4,4	28,5	0,50
Усиленный грунт под фундаментной плитой	65	65	195	60,0	25,0	0,90

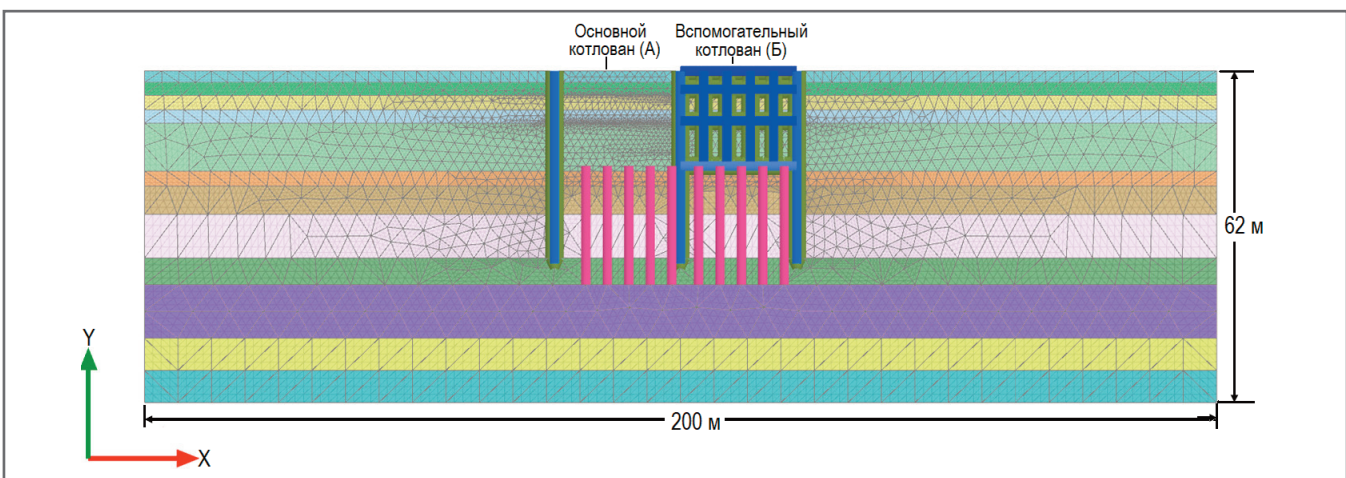


Рис. 3. Конечноэлементная модель грунтового основания и фундамента



Рис. 4. Схема расположения точек мониторинга поведения котлована А

истории напряжений и траектории напряжений на деформирование грунта и | подходит для численного моделирова- | ных условиях. Параметры грунта на ос-
 ния создания котлована в чувствитель- | нове отчета по инженерным изыска-



Рис. 5. Схема расположения точек мониторинга поведения котлована Б

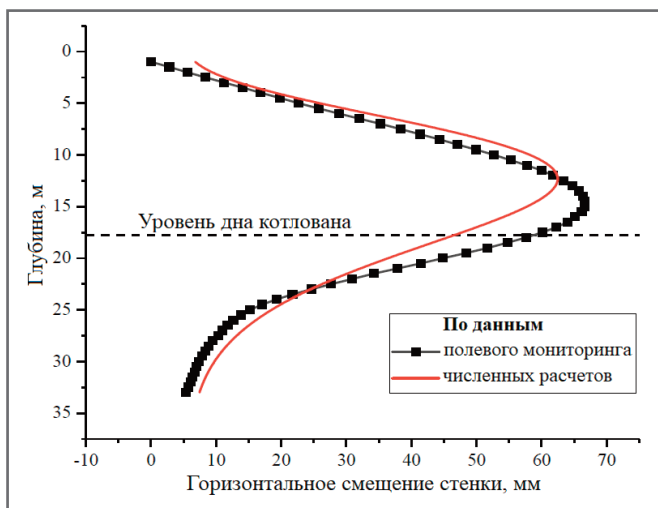


Рис. 6. Сопоставление результатов моделирования и мониторинга горизонтальных смещений подпорной стенки котлована А

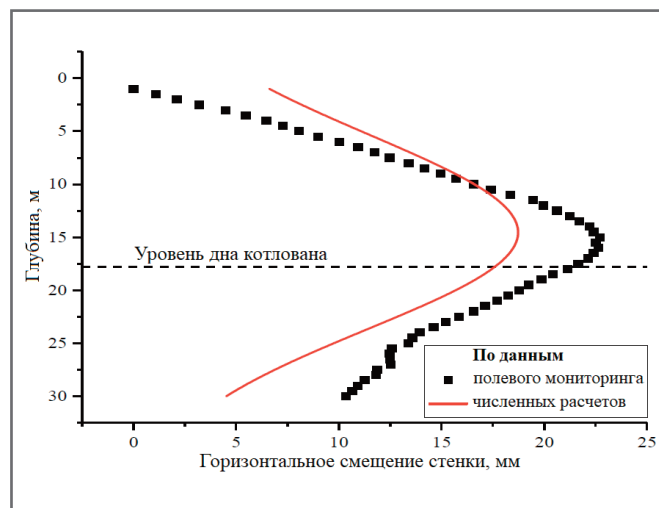


Рис. 7. Сопоставление результатов моделирования и мониторинга горизонтальных смещений подпорной стенки котлована Б

ниям и данных из работ [6–8] представлены в таблице. Расчетная модель котлована показана на рисунке 3.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННЫХ РАСЧЕТОВ И ДАННЫХ МОНИТОРИНГА

Схема расположения точек мониторинга

Чтобы полностью понять деформационное поведение глубокого котлована во время строительства, при его создании выполнялся комплексный мониторинг. В основном отслеживались горизонтальные (с помощью наклонной скважины) и вертикальные смещения подпорной стенки, осевые усилия в распорках, осадки дневной поверхности,

окружающих зданий, проходящего поблизости трубопровода, дна котлована, а также уровни подземных вод.

На рисунке 4 показано расположение основных точек мониторинга для основного котлована (А). На рисунке 5 – размещение основных точек мониторинга для вспомогательного котлована (Б).

Горизонтальные смещения подпорной стенки

На рисунках 6 и 7 сопоставлены результаты моделирования и мониторинга горизонтальных смещений подпорных стенок основного (А) и примыкающего вспомогательного (Б) котлованов соответственно при выемке грунта до дна.

Из рисунков 6 и 7 видно, что расчетные и измеренные значения горизон-

тальных смещений «стен в грунте» очень близки друг к другу. Максимальная измеренная величина смещения для котлована А составляет 66,66 мм, расчетная – 62,46 мм (ошибка – 6,3%); Максимальное измеренное значение для котлована Б равно 22,70 мм, расчетное – 18,72 мм (ошибка – 17,5%). Поскольку погрешность для вспомогательного котлована значительно больше, чем для основного, можно сделать вывод, что с помощью двумерной модели трудно полностью отразить геотехнические условия.

Осадки поверхности

На рисунках 8 и 9 сопоставлены осадки дневной поверхности по данным мониторинга и результатам численного моделирования при выемке грунта до

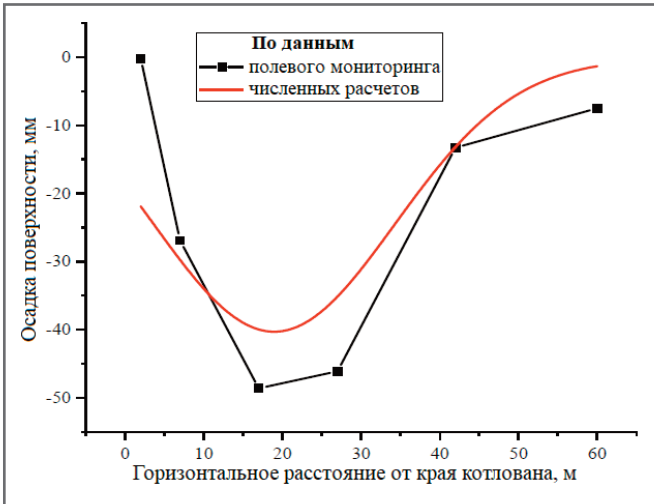


Рис. 8. Сопоставление результатов моделирования и мониторинга осадок дневной поверхности грунта в зависимости от расстояния от края котлована А

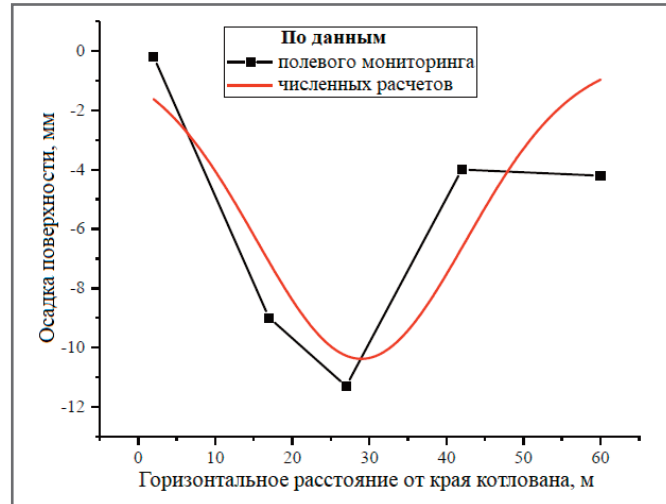


Рис. 9. Сопоставление результатов моделирования и мониторинга осадок дневной поверхности грунта в зависимости от расстояния от края котлована Б

дна для основного (А) и вспомогательного (Б) котлованов соответственно.

Из рисунков 8 и 9 видно, что данные численного моделирования и мониторинга хорошо соответствуют друг другу, а самые большие осадки поверхности произошли посередине выбранного диапазона расстояний от края котлована. Когда котлован А вырыт до дна, максимальная осадка поверхности по данным мониторинга составляет 48,60 мм, а по результатам моделирования – 40,28 мм (ошибка – 17,1%). Для котлована Б при выемке грунта до дна максимальная осадка поверхности по данным мониторинга равна 11,30 мм, а по результатам моделирования – 10,38 мм (ошибка – 8,1%)

ВЫВОДЫ ►

Результаты конечноэлементного моделирования горизонтальных смещений

подпорных стенок и осадок поверхности вокруг котлованов при выемке грунта до дна хорошо согласуются с данными полевого мониторинга.

Численное моделирование на основе метода конечных элементов при использовании комплексной геомеханической модели поведения грунта HS (модели упрочняющегося грунта) можно использовать для моделирования откопки котлована в сложных грунтовых условиях. Результаты моделирования являются разумными и надежными.

Из данных полевого мониторинга и численного моделирования видно, что максимальное горизонтальное смещение «стены в грунте» при откопке котлована до дна происходит примерно на 5 м выше дна котлована.

Из данных мониторинга и моделирования также видно, что деформиро-

вание борта («стены в грунте») вспомогательного котлована, примыкающего к основному котловану, относительно невелико. Максимальное горизонтальное смещение его подпорной стенки по данным мониторинга составляет 34,05% от такового для основного котлована, а максимальная осадка поверхности окружающего грунта равна всего 23,25% от таковой для основного котлована. Это доказывает, что при методе строительства, принятом в рассмотренном проекте, деформирование котлована может хорошо контролироваться.

Данные по рассмотренному в данной статье проекту могут быть использованы как ориентиры при проектировании и строительстве глубоких котлованов в аналогичных слоях слабых грунтов. ■

ИСТОЧНИК ДЛЯ ПЕРЕВОДА ►

(SOURCE FOR THE TRANSLATION) ►

Wu B., Peng Yi., Lan Ya., Meng G. Response analysis of excavation of deep foundation pit in metro station of soft soil // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 330. International Conference on Advances in Civil Engineering, Energy Resources and Environment Engineering, 28–30 June 2019, Jilin, China. № 2. Article 022102. DOI: 10.1088/1755-1315/330/2/022102. URL: iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/330/2/022102.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ, ИСПОЛЬЗОВАННОЙ АВТОРАМИ ПЕРЕВЕДЕННОЙ СТАТЬИ ►

(REFERENCES USED BY THE AUTHORS OF THE TRANSLATED ARTICLE) ►

- Feng X., Xiong Z., Mo Y., et al. Numerical simulation and analysis of surrounding environment deformation influenced by excavation of foundation pits under complex conditions // Chinese Journal of Geotechnical Engineering. 2014. Vol. 36. № S2. P. 330–336.
- Li L., Zhang Y., Hu X. Finite element analysis of a pit-in-pit excavation based on PLAXIS 3D // Chinese Journal of Underground Space and Engineering. 2016. Vol. 12. № S1. P. 254–261.
- Liu N., Gong X., Lou C. Deformation behavior of nearby facilities analysis induced by excavation in soft clay // Journal of Zhejiang University. 2014. Vol. 48. № 07. P. 1141–1147.

4. Yang Y., Wu J. Analysis of retaining structures for deep foundation pit of Qiutao Road Station in Hangzhou Metro // Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. 2008. № S2. P. 3386–3392.
5. Cao L. Finite element method analysis of bottom upheaval of deep foundation pits in soft-clay ground due to excavation // Chinese Journal of Geotechnical Engineering. 2013. № S2. P. 819–824.
6. Wang W., Xu Z. New progress and expectation of foundation excavation engineering technology // Construction Technology. 2018. Vol. 47. № 06. P. 53–65.
7. Song G., Song E. Selection of soil constitutive models for numerical simulation of foundation pit excavation // Engineering Mecanics. 2014. № 05. P. 86–94.
8. Yang L., Zhou L., Xia W., et al. Experimental study of parameters of HS model for numerical analysis of foundation pits in Ningbo soft soil area // Tunnel Constructioun. 2018. Vol. 38. № 06. P. 954–962.

Независимый электронный журнал ГеоИнфо

С 2022 года журнал «ГеоИнфо»
выходит в формате *PDF.
10 выпусков в год.



WWW.GEOINFO.RU