

УДК 624.131.15

© Р. А. Мангушев, д-р техн. наук, профессор
© А. А. Веселов, д-р техн. наук, профессор
© Л. Н. Кондратьева, д-р техн. наук, профессор
© С. В. Ланько, канд. техн. наук, доцент
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)
E-mail: ramangushev@yandex.ru, npk-cgt@yandex.ru,
kondratjevaln@yandex.ru, sergeylanko@gmail.com

DOI 10.23968/1999-5571-2017-14-6-114-121

© R. A. Mangushev, Dr. Sci. Tech., Professor
© A. A. Veselov, Dr. Sci. Tech., Professor
© L. N. Kondrat'eva, Dr. Sci. Tech., Professor
© S. V. Lan'ko, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
(Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering)
E-mail: ramangushev@yandex.ru, npk-cgt@yandex.ru,
kondratjevaln@yandex.ru, sergeylanko@gmail.com

ИЗМЕНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ГРУНТОВ ПРИ УСТРОЙСТВЕ ПОДЗЕМНОЙ ЧАСТИ ЗДАНИЯ В КОТЛОВАНАХ БОЛЬШОГО ОБЪЕМА В УСЛОВИЯХ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ

SOIL CHARACTERISTICS VARIATION DURING CONSTRUCTION OF THE UNDERGROUND PART OF THE BUILDING IN LARGE-SIZE PITS IN CONDITIONS OF URBAN DEVELOPMENT

Рассмотрены методика и результаты исследования изменений характеристик грунтового массива под влиянием устройства подземной части здания. Приводятся численные оценки изменения деформационных и прочностных характеристик грунтов в котловане и вне котлована, в основании зданий окружающей застройки. Показана целесообразность оперативного контроля изменения геотехнических условий строительства с применением методов статического зондирования и последующим использованием уточненных характеристик грунтов для оценки зоны влияния строительства, а также для геотехнического прогноза взаимного влияния строительства и окружающей застройки.

Ключевые слова: статическое зондирование, струйная цементация грунтов, численные и аналитические методы расчета.

The article presents a methodology and test results of the research aimed at assessing the characteristics alteration of soil under the underground part of the building. There are submitted numeric calculation results of deformation and strength characteristics change of soil in the excavation pit and outside the pit, in the base of the surrounding buildings. The authors emphasize the expediency of carrying out the operational supervision of changes taking place in geotechnical conditions during construction using the CPT-methods and updated soil characteristics for estimating the construction impact zones, as well as providing a geotechnical forecast of the mutual effect of the construction and the surrounding buildings.

Keywords: cone penetration testing (CPT), jet-grouting, computational and analytical modeling.

Введение

Возведение подземных пространств большого объема в условиях плотной городской застройки требует учета влияния техногенных факторов на изменение характеристик грунтов в ходе строительства при геотехническом сопровождении объекта. Указанное влияние может распространяться как на грунты основания будущего здания, так и на окружающий массив. Вскрытие котлована большого объема в сложных геотехнических условиях уже влечет за собой наруше-

ние структуры грунтов, а дополнительное техногенное воздействие при устройстве свай или иных конструкций может увеличить воздействие на грунты. Своевременное выявление областей массива грунта с измененными характеристиками позволяет провести геотехнические расчеты для уточнения напряженно-деформированного состояния грунтов основания с целью прогноза осадок сооружения и соседних зданий на различных стадиях разработки котлована.

В настоящей статье рассмотрены изменения характеристик грунтов при устройстве котлована трапецевидной формы в плане, размерами сторон $82 \times 67 \times 159 \times 158$ м, глубиной 12,5 м, в условиях плотной застройки и слабых грунтов Санкт-Петербурга [6].

Конструктивные параметры подземной части сооружения и зданий окружающей застройки

Ограждение котлована по проекту было выполнено из погруженного вибрированием на глубину 21 м шпунтового ограждения (Arcelor 18), жесткость которого была впоследствии увеличена за счет устройства «стены в грунте», выполненной с помощью технологии струйной цементации и армированной проектными профилями (двутавр № 40) с шагом 1,0 м.

Помимо грунтоцементной «стены в грунте» для снижения горизонтальных перемещений ограждения котлована ниже его дна, на глубине 11,5–14 м была выполнена горизонтальная грунтоцементная диафрагма толщиной 2–2,5 м. Значения проектной прочности грунтоцемента принимались не менее 1,0 МПа, а модуль деформации — не менее 400 МПа. По результатам отбора образцов и их испытаний было установлено, что значения прочности изменяются от 0,3 до 30 МПа [2], а модуль деформации может быть выражен зависимостью $E = (90 \dots 100) R_{ск}$ [3]. В результате статистической обработки результатов фактическое значение прочности составило $>1,0$ МПа для расчетов по I группе предельных состояний и $>4,0$ МПа — по II группе предельных состояний.

Конструктивное решение подземной части выполнялось по схеме «top-down» с устройством временных буровых свай длиной 29 м, диаметром 600 мм для опирания распорных плит перекрытия (толщиной 400 мм), а также постоянных свай для восприятия всей нагрузки от сооружения диаметром от 800 до 1200 мм, которые объединяются плитным ростверком толщиной 1200 мм. Технология разработки котлована выполнялась постадийно с перерывами на устройство распорных дисков (схема «top-down»).

В зону влияния котлована попадали 4–7-этажные жилые здания дореволюционной постройки с продольными и поперечными несущими стенами и ленточными фундаментами. Расстояние до

ближайших продольных стен зданий составляло от 5 до 14 м. Таким образом, проведение работ по вибропогружению шпунта, устройству свай, созданию грунтоцементной горизонтальной и вертикальной диафрагм могло привести к существенным изменениям физико-механических свойств грунтового массива [7].

Инженерно-геологическое строение участка (по данным предпроектных изысканий) является типичным для центральной части Санкт-Петербурга и до глубины 20 м представлено тиксотропными водонасыщенными пылеватоглинистыми грунтами.

Методика исследования изменения свойств грунтов

Для оценки влияния устройства подземной части здания на свойства грунтов был выполнен сравнительный анализ результатов статического зондирования за 2005 и 2009 г. На стадии предпроектных изысканий в 2005 г. на площадке строительства было выполнено статическое зондирование грунтов (СРТ) зондом II типа (по ГОСТ 19912–2001)*.

В 2009 г. статическое зондирование выполнялось НПК «Центр геотехнологий СПбГАСУ» в рамках научно-технического сопровождения строительства. Исследования грунтов проводились после выполненных работ по устройству свай, ограждения котлована и разработке котлована на 2/3 его глубины.

Зондирование проводилось с помощью многоканального зонда II типа (СРТ-U) фирмы Geotech AB [4], установленного на малогабаритную самоходную установку RIG 204D той же фирмы (рис. 1, 2).

Статическое зондирование грунтов проводилось на четырех площадках (рис. 3), на каждой из которых выполнялось от 6 до 14 точек зондирования с расстоянием между точками не более 1 м друг от друга.

Точки статического зондирования были размещены линейно вдоль ограждения котлована, с тем чтобы получить данные для последующей обработки на одном расстоянии от ограждения.

Для определения физико-механических характеристик исследуемых грунтов статическим зондированием используются величины лобово-

* Материалы предоставлены компанией ООО «Изыскатель».



Рис. 1. Общий вид площадки и малогабаритной установки



Рис. 2. Проведение работ по статическому зондированию

го сопротивления конуса q_c и трения по боковой поверхности зонда f_s . Применяемый беспроводной акустический зонд позволяет также получить дополнительные параметры зондирования: поровое давление u , температуру t и угол наклона зонда T по отношению к вертикали. Контроль неизменности вида грунта и сравнение его с данными полевых изысканий 2005 г. производились по номограмме Робертсона [6] с использованием q_c и параметра $R_f = (f_s/q_c) \cdot 100\%$ (рис. 4). Определение физико-механических свойств грунтов производилось с использованием СП 11-105-97 и ТСН 50-302-2004.

Результаты исследования изменений характеристик грунтового массива

По результатам обработки данных 2005 и 2009 г. были получены графики статического

зондирования, а также значения механических свойств грунтов.

На площадке № 1, расположенной внутри котлована, зондирование выполнено в 14 точках. Грунты этой площадки более всего подвергались интенсивному воздействию строительства при вибропогружении шпунта, при устройстве буровых свай, а также при устройстве грунтоцементных конструкций.

На площадке № 2, расположенной на расстоянии 2,6 м от котлована, зондирование выполнено в 10 точках, осуществлялось на расстоянии 0,3 м от боковой поверхности железобетонной обвязочной балки наружного ограждения котлована. На грунты в пределах этой площадки наибольшее влияние оказали устройство грунтоцементных конструкций и активная зона фундаментов соседних зданий.

На площадке № 3, расположенной на расстоянии 5,6 м от котлована, зондирование выполнено в восьми точках, расположенных на расстоянии 3,3 м от наружной грани железобетонной обвязочной балки наружного ограждения котлована. На грунты в пределах этой площадки влияние оказали те же факторы, что для площадки № 2.

На площадке № 4, расположенной во дворе жилого дома на расстоянии 25 м от котлована, зондирование выполнено в шести точках. Изменений свойств грунтов не зафиксировано, значения параметров, полученных зондированием, практически совпадают с исходными данными (различие составило не более 5%), в связи с чем данные по этой площадке не приводятся.

Для сопоставительного анализа изменения грунтового массива за счет техногенного воздействия для каждого инженерно-геологического элемента (ИГЭ) были получены средние значения параметров q_c , f_s и R_f (рис. 5).

Анализ приведенных данных показал, что наибольшему влиянию от техногенных воздействий при строительстве подверглись грунты верхней части разреза — ИГЭ-2, 3 и 4, залегающие в котловане. Из сравнения графиков следует, что сопротивление грунтов статическому зондированию на площадке № 1 под воздействием строительства увеличилось более чем в два раза.

За пределами котлована на расстоянии 0,3 м от железобетонной обвязочной балки наиболее значительное увеличение сопротивления грунта

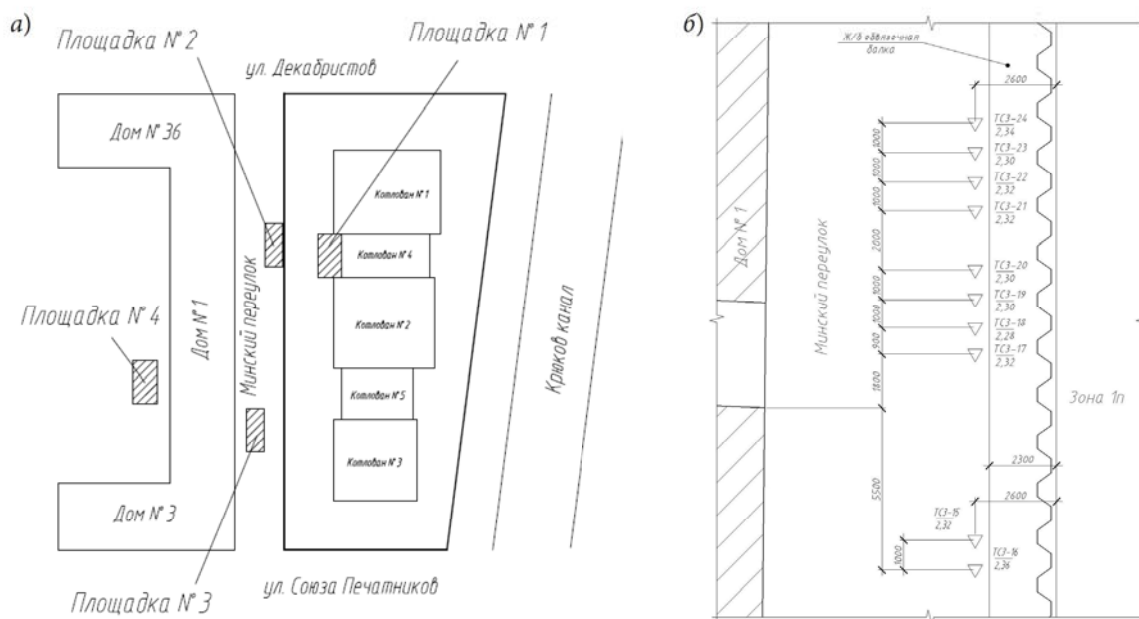


Рис. 3. Схема размещения опытных площадок (а) и схема расположения точек зондирования на одной из площадок (б)

q_c, f_s отмечено в суглинках ИГЭ-5 и 6. На расстоянии 3,3 м от ограждения котлована сопротивление грунта зондированию увеличилось не более чем на 50 % по сравнению с сопротивлением грунта до начала строительства.

Увеличение значений механических свойств грунтов объясняется уплотнением грунтов ИГЭ 2...6 при изготовлении большого количества свай [5], восстановлением структурных связей, а также частичным упрочнением грунтов в процессе изготовления грунтоцементных конструкций. В ледниковых суглинках ИГЭ-7 изменение параметров зондирования практически отсутствует.

Исходные параметры и свойства грунтов приведены в табл. 1, значения изменившихся свойств грунтов — в табл. 2.

Проверка вида грунта по номограмме Робертсона для каждой точки зондирования и для каждого ИГЭ показала, что грунты соответствуют первоначальным наименованиям.

Для анализа влияния технологии струйной цементации грунтов на изменение их свойств отдельно были проанализированы параметры зондирования для площадок № 2 и 3.

По графикам и таблицам видно, что увеличение свойств вблизи конструкции достигает

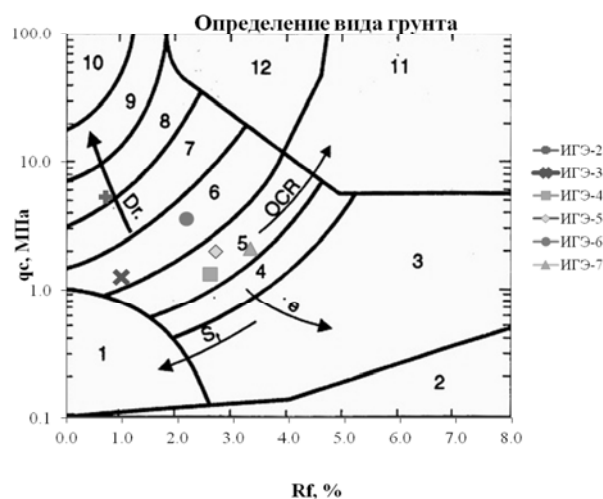


Рис. 4. Контроль неизменности вида грунта по номограмме Робертсона

двукратного. Одной из возможных причин этого увеличения является эффект «клакажа» [1]: при выходе грунтоцементной пульпы на поверхность зачастую происходят кратковременные закупорки затрубного пространства скважины вязкой пульпой, вследствие чего в размываемой полости происходит повышение давления, вызывающее гидроразрыв грунта с заполнением гидроразрывной трещины раствором. Таким образом, массив грунта вокруг сваи получается

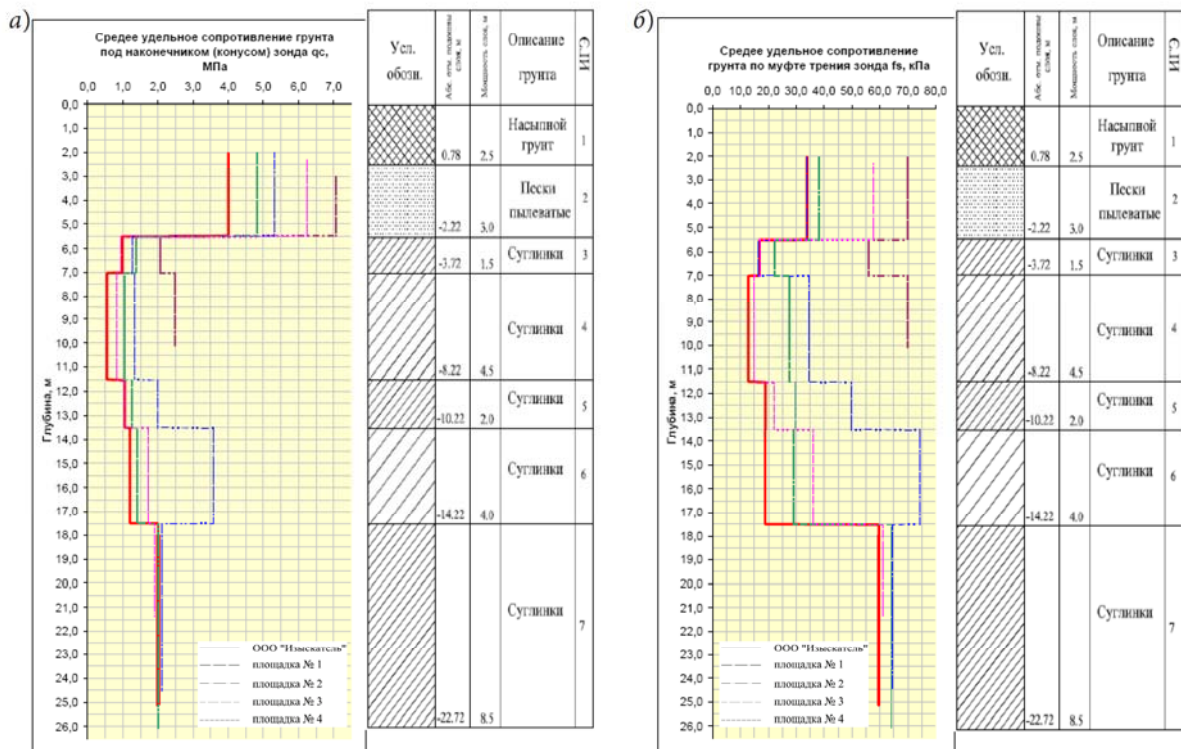


Рис. 5. Графики средних значений удельных сопротивлений по острию зонда (а) и муфте терния (б)

армированным горизонтальными полосами цементного раствора («гидроразрывное армирование») (рис. 7).

Данный эффект удалось обнаружить при вскрытии дна котлована, где над грунтоцементной диафрагмой располагался слой осушенного грунта, армированного горизонтальными полосами цементного раствора.

Полученные уточненные данные изменения свойств грунтов позволили провести дополнительные геотехнические расчеты для определения напряженно-деформированного состояния

массива, подземных конструкций, а также более точно спрогнозировать деформации окружающей застройки и строящегося сооружения в целом (рис. 8).

Выводы

1. Использование методов современного статического зондирования и анализ результатов позволили оперативно оценить изменение характеристик грунтов в котловане строящегося здания и около него от влияния техногенных воздействий.

Таблица 1

Значения исходных параметров зондирования и механических характеристик грунтов

№ ИГЭ	Площадка № 1			Площадка № 2			Площадка № 3		
	φ*, град	c*, кПа	E, МПа	φ*, град	c*, кПа	E, МПа	φ*, град	c*, кПа	E, МПа
1	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2	30	—	16,0	30	—	14,4	29	—	12,0
3	16	23,0	9,0	16	23,0	10,0	15	20,0	7,0
4	10	23,2	10,0	10	20,5	7,0	10	17,0	3,5
5	25	34,0	11,5	25	27,0	9,8	25	25,0	9,3
6	26	43,0	15,0	25	30,0	9,6	25	25,0	9,3
7	25	35,0	12,0	26	36,0	12,0	26	35,0	12,0

Значения механических характеристик измененных грунтов

№ ИГЭ	Среднее значение удельного сопротивления		R_f %	Физико-механические характеристики		
	по конусу, q_c МПа	по муфте трения, f_s кПа		φ^* , град	c^* , кПа	E , МПа
1	—	—	—	—	—	—
2	4,00	33,83	0,83	29	—	12,0
3	1,00	16,77	2,10	15	20,0	7,0
4	0,55	12,86	2,30	10	17,0	3,5
5	1,06	18,96	1,69	25	25,0	9,3
6	1,20	18,87	1,68	25	25,0	9,3
7	2,00	59,54	3,14	26	35,0	12,0

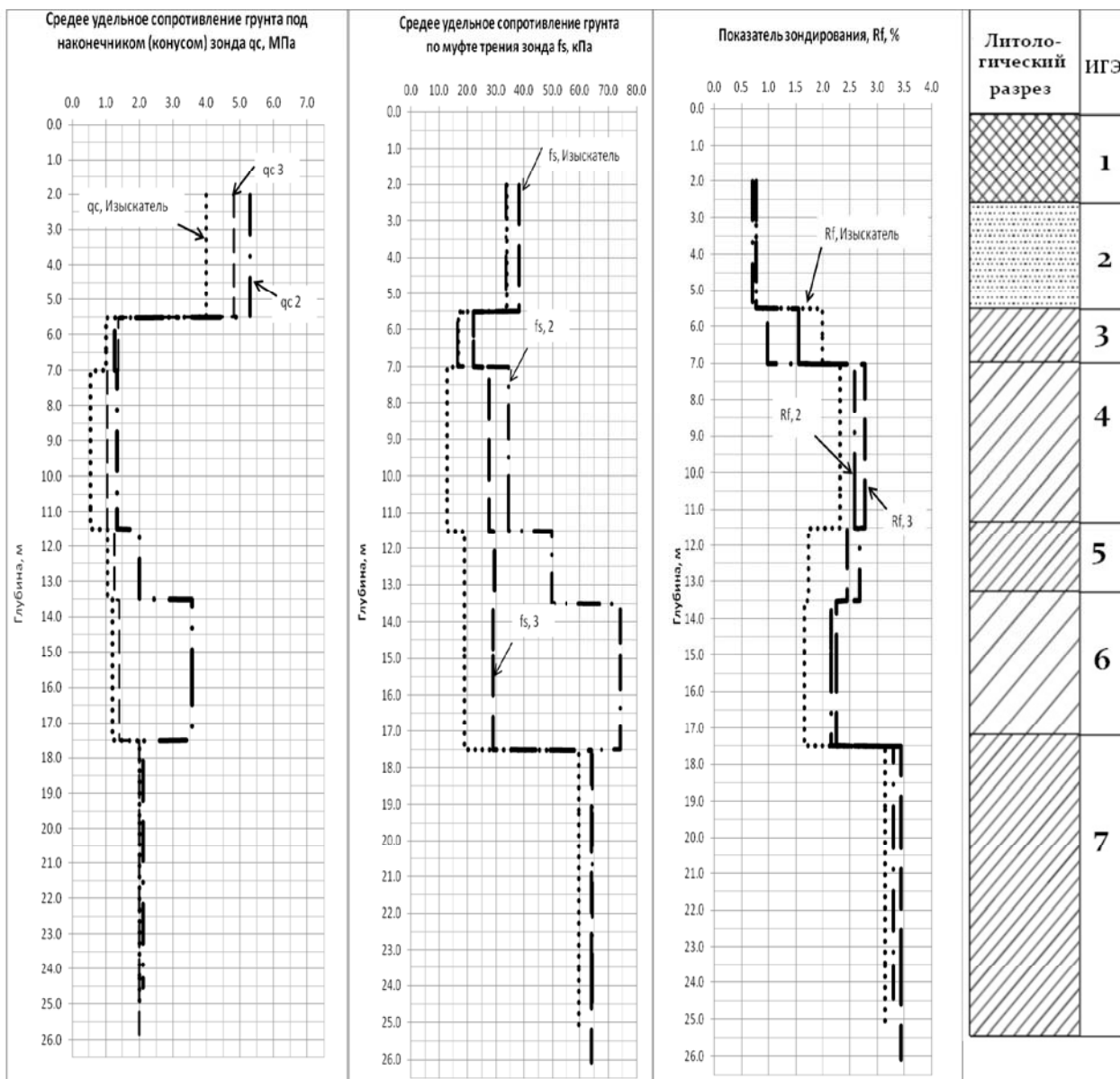


Рис. 6. Графики средних значений удельных сопротивлений по острию зонда q_c , по муфте трения f_s и параметра зондирования R_f



Рис. 7. Массив грунта, армированный полосками грунтоцемента при устройстве диафрагмы ниже дна котлована

2. При проектировании и возведении зданий с развитой подземной частью следует учитывать возможное изменение свойств грунтов при производстве работ по устройству шпунтового ограждения, буровых свай и грунтоцементных конструкций.

3. Использование изменившихся значений характеристик грунтов, полученных в результате зондирования, в численных расчетах позволило с большей достоверностью оценить ожидаемые деформации окружающей застройки и строящегося здания в целом.

Библиографический список

1. Бройд И. И. Струйная геотехнология: учеб. пособие. М.: АСВ, 2004. 448 с.
2. Гутковский В. Э., Мангушев Р. А., Конюшков В. В. Определение прочностных характеристик грунтоцементного массива, выполненного по технологии jet-grouting в инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга // Вестник гражданских инженеров. 2010. № 2 (23). С. 69–77.
3. Ланько С. В. Влияние грунтоцементных конструкций на прочность и деформируемость ограждений котлованов в условиях городской застройки: автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2013. 26 с.

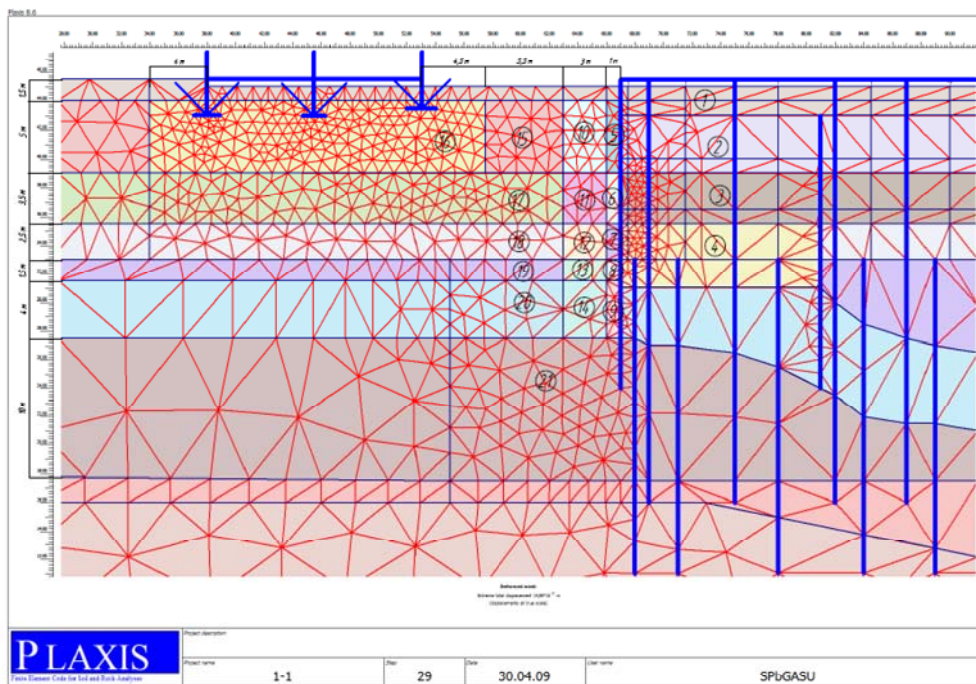


Рис. 8. Расчетная схема измененного грунтового основания

4. Мангушев Р. А., Ошурков Н. В., Игошин А. В. Использование передвижной установки для целей реконструкции и строительства в стесненных условиях Санкт-Петербурга / сб. докл. междунар. науч.-практ. конф. «Реконструкция Санкт-Петербурга – 2005». Ч. 1. СПб., 2005. С. 214–218.

5. Мангушев Р. А., Ошурков Н. В., Арутюнов И. С., Ершов А. В. Исследование механических характеристик грунтов при устройстве буровых свай проходным шнеком // Материалы конф. «Научно-практические и теоретические проблемы геотехники». СПб.: СПбГАСУ, 2007. С. 91–104.

6. Мангушев Р. А., Панферов А. А., Ледяев А. П., Кулагин Н. И., Ильичев В. А., Гутовский В. Э., Александров В. Н. Основные концептуальные технические и технологические решения при строительстве подземной части второй сцены Санкт-Петербургского государственного академического Мариинского театра // Проектирование и строительство подземной части нового здания (второй сцены) Государственного академического Мариинского театра: сб. науч.-техн. статей / под общ. ред. В. А. Ильичева, А. П. Ледяева, Р. А. Мангушева. СПб.: СПбГАСУ, 2011. С. 12–33.

7. Мангушев Р. А., Ошурков Н. В., Гутовский В. Э. Влияние трехуровневого подземного пространства на жилые здания окружающей застройки // Жилищное строительство. 2010. № 5. С. 23–27.

8. Lunne T., Robertson P. K., Powell J. J. M. Cone Penetration Testing in geotechnical practice. Sponpress, 2001. 312 p.

References

1. Broyd I. I. *Struynaya geotekhnologiya. Ucheb. posobie* [Jet geo-technology. Teaching manual]. Moscow, ASV Publ., 2004, 448 p.

2. Gutovskiy V. Eh., Mangushev R. A., Konyushkov V. V. *Opreделение prochnostnykh kharakteristik gruntotsementnogo massiva, vypolnennogo po tekhnologii jet-grouting v inzhenerno-geologicheskikh usloviyakh Sankt-Peterburga* [Determination of compression strength of soil cement by means of jet grouting technology in engineering geological conditions of St. Petersburg]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2010, no. 2 (23), pp. 69–77.

3. Lan'ko S. V. *Vliyanie gruntotsementnykh konstruksiy na prochnost' i deformiruemost' ograzhdeniy kotlovanov v usloviyakh gorodskoy zastroyki. Avtoref. diss. kand. tekhn.*

nauk [Impact of the jet grouting designs on durability and deformability of the excavation pit shoring in conditions of urban development. Author's thesis of PhD in Sci. Tech. diss.]. St. Petersburg, 2013, 26 p.

4. Mangushev R. A., Oshurkov N. V., Igoshin A. V. *Ispol'zovanie peredvizhnoy ustanovki dlya tsey rekonstruksii i stroitel'stva v stesnennykh usloviyakh Sankt-Peterburga* [The use of a mobile installation for reconstruction and construction in the constrained conditions of St. Petersburg urban development]. *Trudy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. «Rekonstruktsiya Sankt-Peterburga – 2005»* [Proc. of the Int. sci.-pract. conf. "Reconstruction of St. Petersburg – 2005"]. Pt. 1. St. Petersburg, 2005, pp. 214–218.

5. Mangushev R. A., Oshurkov N. V., Arutyunov I. S., Ershov A. V. *Issledovanie mekhanicheskikh kharakteristik gruntov pri ustroystve burovyykh svay prokhodnym shnekom* [Research of mechanical characteristics of soil at arrangement of boring piles with pass screws]. *Trudy konf. «Nauchno-prakticheskie i teoreticheskie problemy geotekhniki»* [Proc. of the conf. "Scientific, practical, and theoretical problems of geo-engineering"]. St. Petersburg, SPSUACE Publ., 2007, pp. 91–104.

6. Mangushev R. A., et al. *Osnovnye kontseptual'nye tekhnicheskije i tekhnologicheskije resheniya pri stroitel'stve podzemnoy chasti vtoroy stseny Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo akademicheskogo Mariinskogo teatra* [The main conceptual engineering and technology solutions at construction of the underground part of the second stage of the St. Petersburg State Academic Mariinsky Theatre]. *Proektirovanie i stroitel'stvo podzemnoy chasti novogo zdaniya (vtoroy stseny) Gosudarstvennogo Akademicheskogo Mariinskogo Teatra. Sb. statey* [Design and construction of the underground part of the new building (the second scene) of State Academic Mariinsky Theatre. Coll. of works]. Ed. by Il'ichyov V. A., Ledyayev A. P., Mangushev R. A. St. Petersburg, SPSUACE Publ., 2011, pp. 12–33.

7. Mangushev R. A., Oshurkov N. V., Gutovskiy V. Eh. *Vliyanie trekhurovnevnogo podzemnogo prostranstva na zhilye zdaniya okruzhayushchey zastroyki* [The influence of three-level underground space on residential buildings of the neighbouring area]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo – Housing construction*, 2010, no. 5, pp. 23–27.

8. Lunne T., Robertson P. K., Powell J. J. M. *Cone Penetration Testing in geotechnical practice*. Spon Press Publ., 2001, 312 p.