УДК 624.159

Я.А. Пронозин, М.А. Самохвалов

Тюменский государственный архитектурно-строительный университет

РЕЗУЛЬТАТЫ ПОЛЕВЫХ И ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ БУРОИНЪЕКЦИОННОЙ СВАИ С КОНТРОЛИРУЕМЫМ УШИРЕНИЕМ

Описан новый способ устройства буройнъекционной сваи с контролируемым уширением для реконструкции зданий и сооружений с возможностью освоения их подземного пространства. Представлен анализ и сравнение результатов полномасштабного эксперимента, проведенного в реальных полевых условиях на строительной площадке в г. Тюмени, с теоретическими исследованиями, связанными как с процессом формирования ствола буройнъекционной сваи, так и с образованием контролируемого уширения на её конце в глинистых грунтах естественного сложения. По результатам исследований определяются радиус уплотненной зоны, деформированное состояние и изменение физико-механических характеристик грунтового массива вокруг образовавшейся сваи.

Ключевые слова: буройнъекционная свая, контролируемое уширение, пакер, слабые глинистые грунты, статические испытания, реконструкция, подземный этаж.

Y.A. Pronozin, M.A. SamokhvalovTyumen State University of Architecture and Civil Engineering,
Tyumen, Russian Federation

THE RESULTS OF FIELD AND THEORETICAL RESEARCH MANUFACTURING OF DRILL-INJECTED PILES CONTROLLED WITH BROADENING

The article describes a new method of device drill-injected pile controlled with broadening for the reconstruction of buildings and structures with the ability to develop their underground space. The article provides an analysis and comparison of results of the full-scale test in actual field conditions at the construction plant in Tyumen with theoretical research related with the process of forming trunk of drill-injected pile, and with the formation of a controlled broadening on its end in clay soils. According to the results of the research defined the radius of the densified zone, strain state and changes in the physical and mechanical characteristics of the soil mass formed around the pile.

Keywords: drill-injected pile, controlled broadening, packer, calculation methods, static tests, the radius of the densified zone, underground floor.

На сегодняшний день во многих городах и регионах Российской Федерации существует большое количество зданий и сооружений, ко-

которые являются памятниками истории, архитектуры и культуры своего времени. Все они, как правило, расположены в стесненных условиях центральной части городской застройки, в сложных инженерно-геологических и гидрогеологических условиях. Большая часть из них нуждается в реставрации, реконструкции и модернизации в соответствии с современными требованиями, которые регламентируют освоение подземного пространства таких зданий с целью размещения в них объектов социальной, инженерной и транспортной инфраструктуры.

Рис. 1. Схема устройства буринъекционной сваи с контролируемым уширением: I – скважина; 2 – труба-инъектор; 3 – хомут крепления; 4 – резиновая мембрана-стакан; 5 – резиновые манжеты; 6 – шланг подачи раствора; 7 – пакер; 8 – забетонированное затрубное пространство; 9 – уплотненная зона грунта; I – бурение скважины, II – монтаж арматурного каркаса в виде трубы-инъектора, подача пакера в первую зону инъекционных отверстий, III – процесс инъецирования раствора во все зоны

Проведя сравнительный анализ существующих инженерных решений [1, 2, 7], связанных с данной проблемой, авторы разработали новый способ устройства буринъекционной сваи с контролируемым уширением (рис. 1). Новым является то, что арматурный каркас выполняют в виде трубы-инъектора с заглушкой в месте расположения мембраны-стакана и тремя зонами инъекционных отверстий закрытыми резиновыми манжетами. Первая зона расположена на концевом участке мембраны-стакана, вторая – вне концевой зоны, и третья располагается в зоне усиления материала фундамента реконструируемого здания. Перед закачкой инъекционного раствора в трубу-инъектор

устанавливают пакер в первую зону инъекционных отверстий. В процессе нагнетания резиновая мембрана-стакан растягивается и образует в грунте эллипсообразное уширение, вытянутое в горизонтальном направлении. Далее раствор подается во вторую зону расположения инъекционных отверстий для опрессовки стенок скважины по всей длине затрубного пространства, а затем в третью зону для усиления материала фундамента реконструируемого здания¹.

Полевые исследования

Для промышленного внедрения нового способа усиления фундаментов и закрепления оснований реконструируемых зданий с возможностью освоения их подземного пространства были выполнены полевые исследования. Полевые исследования проходили на строительной площадке, расположенной на пересечении улиц Щербакова и Дружбы г. Тюмени, ее инженерно-геологические условия показаны в табл. 1.

Таблица 1

Инженерно-геологические условия строительной площадки

Номер ИГЭ	Вид грунта	Глубина H , м	Показатель текучести I_L	γ_1 , кН/м ³	φ_1 , град	c_1 , кПа	E , МПа
1	Насыпной грунт	0–2,0	–	18,5	–	–	–
2	Супесь пластичная	2,0–4,0	0,40	19,8	19,0	8,0	11,0
3	Суглинок мягкопластичный	4,0–9,0	0,75	18,6	15,0	11,0	7,0

Основные задачи полевых исследований:

1. Исследовать радиус уплотненной зоны возле образовавшегося контролируемого уширения в слабом пылевато-глинистом грунте и определить геометрические размеры контролируемого уширения.

2. Исследовать форму ствола, сформированного по манжетной технологии при неоднократной (повторной) инъекции буроинъекционной сваи, и радиус распространения гидроразрывов в слабом пылевато-глинистом грунте.

¹ Способ изготовления буроинъекционной сваи с контролируемым уширением: положительное решение о выдаче патента на изобретение. Заявка №2012155563/03 (087998) от 19.12.2012 / Я.А. Пронозин, Ю.В. Зазуля, М.А. Самохвалов.

3. Исследовать вертикальные деформации грунтового массива при статическом нагружении буройнъекционной сваи с контролируемым уширением.

4. Определить изменение физико-механических характеристик грунтового массива при устройстве буройнъекционной сваи с контролируемым уширением.

5. Определить и сравнить несущую способность буройнъекционной сваи при однократной инъекции, неоднократной (повторной) инъекции и с контролируемым уширением.

Конструкция буройнъекционной сваи была выполнена полностью в соответствии с заявленным патентом² (рис. 2).

Закачка инъекционного раствора в объеме 450 л на один инъектор осуществлялась при помощи универсального шнекового растворонасоса производительностью до 40 л/мин при давлении от 0,8 до 1,8 МПа по манжетной технологии с неоднократной инъекцией и использованием пакера. Неоднократная (повторная) инъекция производится через несколько суток и позволяет получить более эффективное закрепление и уплотнение грунта при меньших значениях давления и меньшем времени закачки раствора в те же горизонты. Новые разрывы при этом образуются в непосредственной близости (выше или ниже) от первых, заполненных затвердевшим раствором. Для установления закономерности развития осадки сваи и изучения распределения деформаций уплотненной зоны грунтового массива вокруг образовавшегося уширения были проведены статические испытания (рис. 3).

Рис. 2. Конструкция инъектора с мембраной-стаканом длиной 6,5 м

² Способ изготовления буройнъекционной сваи с контролируемым уширением: положительное решение о выдаче патента на изобретение. Заявка №2012155563/03 (087998) от 19.12.2012 / Я.А. Пронозин, Ю.В. Зазуля, М.А. Самохвалов.

Рис. 3. Схема и фотография экспериментальной установки: 1 – испытываемая свая; 2 – гильза; 3 – реперная система; 4 – домкрат с манометром; 5 – упорная балка; 6 – анкерные сваи; 7 – глубинные марки; 8 – прогибомеры 6 ПАО; 9 – индикаторы часового типа; 10 – распределительные пластины; 11 – фундаментные блоки

В соответствии с требованиями ГОСТ 5686–94 «Грунты. Методы полевых испытаний сваями» каждая ступень нагружения выдерживалась до условной стабилизации деформации грунта. В результате были построены графики зависимости осадки сваи от нагрузки $s = f(P)$ и во времени $s = f(t)$ (рис. 4).

Рис. 4. Графики зависимости $s = f(P)$ и $s = f(t)$, где $s_{пр}$ – предельное значение осадки сваи (п. 7.3.5 СП 24.13330.2011 «Свайные фундаменты»)

График зависимости осадки сваи от нагрузки $s = f(P)$ представляет собой плавную кривую без ярко выраженного срыва с двумя характерными участками: участок линейной работы, соответствующей нагрузке до 120 кН, и участок упругопластической работы, соответствующий нагрузке 120–200 кН. На графике зависимости осадки сваи во времени $s = f(t)$ выделяется величина упругого выхода сваи при разгрузке 5 мм, что объясняется наличием уплотненной зоны грунтового массива, образованного при закачке раствора в контролируемое уширение.

Для сравнения несущей способности на рис. 5 показаны графики сравнения зависимости осадки различных свай от нагрузки $s = f(P)$, построенные по результатам статических испытаний вертикальной нагрузкой.

Рис. 5. Графики сравнения зависимости осадки свай от нагрузки $s = f(P)$:
 1 – буроинъекционная свая при однократной инъекции; 2 – буроинъекционная свая при неоднократной (повторной) инъекции; 3 – буроинъекционная свая при неоднократной инъекции с контролируемым уширением

Для исследования радиуса уплотненной зоны возле уширения и его геометрических размеров, а также формы ствола сформированной буроинъекционной сваи и радиуса распространения гидроразрывов производились откопка всех свай (рис. 6) и отбор монолитов грунта по разбивочной сетке с интервалом 0,5 м по глубине и на расстоянии 10, 30 и 50 см от оси сваи для лабораторных испытаний с целью определения изменения физико-механических характеристик закрепленного грунта (рис. 7).

Рис. 6. Результаты откопки свай: *а* – буроинъекционная свая при неоднократной (повторной) инъекции; *б* – буроинъекционная свая при однократной инъекции; *в* – расширение стенки скважины за счет действующего давления инъекционного раствора; *г* – контролируемое уширение на конце свай

Рис. 7. Графики изменения физико-механических характеристик слабого пылевато-глинистого грунта после устройства буроинъекционной свай с контролируемым уширением

Лабораторные испытания проводились в соответствии с ГОСТ 5180–84 «Методы лабораторного определения физических характеристик» и ГОСТ 12248–96 «Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости».

Теоретические исследования

Как было сказано выше, при закачке инъекционного раствора в резиновую мембрану-стакан на конце буроинъекционной сваи образуется контролируемое эллипсообразное уширение, вытянутое в горизонтальном направлении с уплотненной зоной грунтового массива, радиус распространения которого необходим для определения несущей способности буроинъекционной сваи. Исследованиями процесса уплотнения грунта при погружении сваи занимались А.А. Бартоломей, В.А. Богомолов, К.В. Голубев, А.В. Есипов, И.В. Лалетин, Ф.К. Лапшин, В.В. Лушников, Р.А. Мангушев, Л.В. Нуждин, М.Л. Нуждин, А.А. Петухов, А.И. Полищук, К. Терцаги и др.

Основные задачи теоретических исследований:

1. Изучение напряженно-деформируемого состояния уплотненной зоны грунтового массива возле образующегося уширения во время закачки инъекционного раствора;
2. Выявление основных закономерностей формирования пластической и упругой области возле буроинъекционной сваи с контролируемым уширением,
3. Определение закономерностей образования и распространения гидроразрывов во время формирования ствола буроинъекционной сваи по манжетной технологии при неоднократном (повторном) инъектировании.
4. Сравнение результатов теоретических исследований с результатами полевых исследований.

По мнению К. Терцаги [3], при погружении сваи уплотненная зона грунтового массива формируется в виде оболочки без изменения коэффициента пористости, т.е. имеют место только деформации уплотнения грунта. Выражение для определения радиуса уплотненной зоны К. Терцаги получает из решения уравнения равновесия цилиндрической оболочки, выделенной в уплотненной зоне радиусом X и толщиной dx по следующей формуле:

$$R = r \left(\frac{P_2}{P_0} \right)^{1-\xi}, \quad (1)$$

где R – радиус уплотненной зоны; r – радиус сваи; P_2 – боковое давление на поверхности сваи; P_0 – горизонтальное давление на глубине приведенного сечения, имевшее место до нагружения сваи; ξ – коэффициент бокового давления грунта:

$$\xi = \operatorname{tg}^2 \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right).$$

Таким образом, упругие деформации грунта вне зоны уплотнения не учитываются, а степень уплотнения грунта уменьшается с удалением от сваи.

Ф.К. Лапшин и К.В. Голубев [1, 4] рассматривают осесимметричную задачу расширения кругового отверстия диаметром, равным диаметру сваи (уширения), и, исходя из условия равенства компонент напряжения на границе упругой и пластической областей, определяют радиус уплотненной зоны грунта при погружении сваи по формуле

$$R = \frac{d}{2} \left[\frac{(p + c \cdot \operatorname{ctg} \varphi)(1 + \xi)}{2(p_0 + c \cdot \operatorname{ctg} \varphi)} \right]^{\frac{1}{1-\xi}}, \quad (2)$$

где d – диаметр нижнего конца сваи (уширения); p – радиальное давление на контуре (давление обжатия); p_0 – природное горизонтальное давление грунта на рассматриваемой глубине; ξ – коэффициент бокового давления грунта.

При этом рассматриваются две области вокруг сваи – упругая и пластическая.

И.В. Лалетин [5] считает, что часть вытесняемых свайей частиц грунта расходуется на изменение его структуры в пределах уплотненной зоны, а другая часть возмещает объемные изменения, возникающие вследствие упругих деформаций грунта за пределами уплотненной зоны. При этом уплотнение грунта происходит за счет уменьшения объема пор, в то время как объем частиц грунта остаётся постоянным. Выражение для определения радиуса уплотнения имеет вид

$$R = r \left(1 + \sqrt{k_0^2 \frac{C}{\sigma_{R_0}}} \right), \quad (3)$$

где r – радиус сваи; k_0 – коэффициент, показывающий долю вытесняемых свай частиц грунта, расходуемых непосредственно на образование уплотненной зоны; C – модуль остаточной деформации грунта; σ_{R_0} – радиальное напряжение на границе уплотнения.

Необходимо отметить, что использование данной формулы в практических расчетах затруднено ввиду сложности определения коэффициента k_0 .

А.В. Есипов [6] для определения радиуса уплотненной зоны грунтового массива предлагает использовать экспериментально-теоретический способ, основывающийся на реальных данных изменения характеристик грунта (в частности, изменения плотности) и законе сохранения массы при уплотнении с последующей математической обработкой и нахождением эмпирической зависимости:

$$\left. \begin{aligned} \rho(x) &= k(R-x)^2 \\ dm &= 4\pi r^2 k \rho(x) dx \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{\Delta \rho}{5(R-r)^2} \times$$

$$\times (R^5 - 10r^3 R^2 + 15r^4 R - 6r^5) - 2r^3 \rho = 0, \quad (4)$$

где r – радиус бетонного уширения; $\Delta \rho$ – разница между максимальной плотностью грунта (у края уширения) и ρ ; ρ – плотность грунта в естественном состоянии; k – коэффициент, определяющийся экспериментально для каждого вида грунта.

Использование данного способа заключается в правильном определении коэффициента k и максимальной плотности грунта, в то же время автор не приводит методику для их определения.

А.И. Полищук и А.А. Петухов [7] определяют зону уплотнения грунта возле уширения на основании сетки отбора монолитов грунта с использованием эмпирической зависимости:

$$\rho_d(x) = \rho_d^0 + (\rho_d^{\max} - \rho_d^0) \cdot \left(1 + \frac{x}{r}\right)^{-\alpha}, \quad (5)$$

где $\rho_d(x)$ – плотность сухого грунта на расстоянии (x); ρ_d^0 – природная плотность сухого грунта; $\rho_d^{\max}$ – максимальное значение плотности сухого грунта; x – расстояние до рассматриваемой точки; r – радиус уширения на конце сваи; α – коэффициент аппроксимации.

Значение максимальной плотности сухого грунта для слабых глинистых грунтов авторы предлагают принимать равным 1,55–1,6 г/см³, значение параметра $\alpha = 1,275$. В данном способе не учитывается изменение напряжённого состояния массива грунта возле образующегося уширения при закачке раствора под давлением.

В.В. Лушников, В.А. Богомоллов [8] описывают напряженно-деформированное состояние уплотнённой зоны грунтового массива исходя из уравнения равновесия для случая расширения сферической полости:

$$2(\sigma_r - \sigma_\theta) + \frac{rd\sigma_r}{dr} = 0 \quad (6)$$

где σ_r, σ_θ – радиальные и тангенциальные напряжения.

Решение задачи базируется на использовании модели упрочняющейся физически анизотропной (разномодульной) грунтовой среды (УРС). Данная модель основана на представлении о существовании упругих (e), допредельных пластических (p) и предельных пластических (f) деформаций по каждому из трех главных направлений. Важнейшей характеристикой среды является начальное напряжение (например, от собственного веса грунта) или любое большее напряжение, когда-либо действовавшее в каждом из трех направлений. Физические соотношения выражаются следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{\sigma_r}{E} - \frac{\nu\lambda\sigma_\theta}{E} - \frac{\nu\lambda\sigma_z}{E} \\ \varepsilon_\theta &= -\frac{\nu\sigma_r}{E} + \frac{\lambda\sigma_\theta}{E} - \frac{\nu\lambda\sigma_z}{E} \\ \varepsilon_z &= -\frac{\nu\sigma_r}{E} - \frac{\nu\lambda\sigma_\theta}{E} + \frac{\lambda\sigma_z}{E} \end{aligned} \right\},$$

где $\varepsilon_r, \varepsilon_\theta, \varepsilon_z$ – деформации; $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$ – напряжения соответственно в радиальном, тангенциальном и вертикальном направлениях; ν – коэффициент Пуассона; E – модуль деформации при сжатии; λ – коэффициент разномодульности, $\lambda = E/E_p$ (E_p – модуль деформации при растяжении).

Напряжения в пластической области определяются на основе условия прочности Кулона – Хворслева, модифицированного для упрочняющейся грунтовой среды:

$$\tau_n = c_i + \sigma_n \operatorname{tg} \varphi_0 \Rightarrow |\sigma_r - \sigma_\theta| - \sin \varphi_0 (\sigma_r + \sigma_\theta) - 2c_i \cos \varphi_0 = 0, \quad (7)$$

где c_i – переменное сцепление, $c_i = c + t\sigma^*$; $\sigma^* = [\sigma_r + \sigma_\theta + \sigma_z]/3$; t – среднее напряжение в грунте (параметр упрочнения) $t = \operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi_0 \geq 0$.

Принципиальное отличие этого условия от традиционного условия прочности Кулона $\tau = \sigma \operatorname{tg} \varphi + c$ состоит в том, что состояние сдвига анализируется с переменным сцеплением c_i и постоянным углом внутреннего трения.

Критическое давление $p_{кр}$, соответствующее началу образования пластических деформаций (напряжения в упругой области достигают предельных значений) на поверхности сферической полости, определяется по следующей формуле:

$$p_{кр} = 12 \left(\sigma_0 \sin \varphi_0 + c \cos \varphi_0 + \frac{\sigma_0 t \cos \varphi_0}{3[1 - \omega - \sin \varphi_0 (3 + \omega)]} - 4t \cos \varphi_0 (2 + \omega) \right). \quad (8)$$

Деформации при $p > p_{кр}$ определяются как продолжение упругих и пластических деформаций, протекающих по закону пластического течения:

$$\left. \begin{aligned} d\varepsilon_r &= d\varepsilon_r^e + d\varepsilon_r^p \\ d\varepsilon_\theta &= d\varepsilon_\theta^e + d\varepsilon_\theta^p \end{aligned} \right\},$$

где $d\varepsilon_r^e$ – упругие деформации; $d\varepsilon_r^e$ – пластические деформации, $d\varepsilon_r^p = \sum (dF / d\sigma_r) d\lambda$.

Радиус уплотненной зоны массива грунта, которая развивается при $p > p_{кр}$, описывается выражением

$$R = \left[\frac{p + s}{p_{кр} + s} \right]^{\frac{1}{\alpha}}, \quad (9)$$

где $s = \sin \varphi_0 / [\sin \varphi_0 + t \cos \varphi_0]$; $\alpha = \frac{12(\sin \varphi_0 + t \cos \varphi_0)}{3 + 3 \cos \varphi_0 + 4t \cos \varphi_0}$;

Сравнение результатов теоретических исследований радиуса уплотненной зоны грунтового массива с результатами полевых исследований показано в табл. 2 и на рис. 8.

Рис. 8. Значения радиусов уплотненной зоны, полученные в соответствии с методами, представленными в табл. 2

Таблица 2

Результаты теоретических исследований

Методы определения	Среднее значение R , м
1. Полевые исследования	0,64
2. К. Терцаги [4]	0,36
3. Ф.К. Лапшин [5]	0,92
4. А.В. Есипов [7]	0,74
5. А.А. Петухов [8]	0,76
6. В.А. Богомолов [9]	0,66

Таким образом, предложенная В.А. Богомоловым и В.В. Лушниковым модель УРС, на наш взгляд, является наиболее подходящей для описания закономерностей образования контролируемого уширения на конце сваи в слабых пылевато-глинистых грунтах, так как имеет две принципиальные особенности: разномодульность и упрочнение, которые зависят как от свойств грунта, так и от конкретного НДС. В основ-

ном проведение такого рода расчетов базируется на значениях физико-механических характеристик грунтов основания, известных по результатам инженерно-геологических изысканий. Следует отметить, что в случае использования контролируемого уширения в процессе производства работ появляются дополнительные исходные данные: начальное и конечное давления закачки инъекционного раствора, определяемые по манометру растворонасоса, а также объем раствора, который однозначно локализуется в мембране-стакане и образует форму уширения в виде вытянутого в горизонтальном направлении эллипсоида.

После образования контролируемого уширения осуществляется формирование ствола буроинъекционной сваи по манжетной технологии при неоднократной (повторной) инъекции также с использованием пакера, перемещаемого внутри инъектора в направлении сверху вниз. Отличительной особенностью данной технологии является закачка инъекционного раствора в режиме гидроразрыва, когда слабый пылевато-глинистый грунт армируется сеткой разрывов, образующихся перпендикулярно действующему в массиве наименьшему главному напряжению. Главной целью создания данных разрывов является увеличение прочности и снижение деформативности закрепляемого массива грунта, за счёт его армирования жесткими элементами из затвердевшего инъекционного раствора и уплотнении массива грунта между этими разрывами в процессе консолидации. По результатам полевых исследований образование гидроразрывов, неконтролируемо распространяющихся в грунтовом массиве, происходит при перепадах давления от 0,6–0,8 до 1,2–1,8 МПа.

Теоретическим и практическим исследованиям процессов образования гидроразрывов при высоконапорной инъекции посвящены работы М. Аббуда, В.А. Богомолова, В.А. Ермолаева, А.Л. Ланиса, В.В. Лушников, А.Г. Малинина, Р.А. Мангушева, В.М. Марголин, М.И. Никитенко, И.И. Сахарова и др.

И.И. Сахаров, М. Аббуд [9] предложили алгоритм численного моделирования закрепления грунтов с использованием гидроразрывов. для реализации которого использовался программный комплекс А.Б. Фадеева «Геомеханика». Распространение раствора вокруг инъектора моделируется по схеме осесимметричной задачи, решаемой в упругопластической постановке итерационным методом. Результаты численных расчетов позволили установить зоны пластики в окрестностях линзы

и смещения вышерасположенного фундамента, основание которого подвергалось закреплению.

Уплотнение грунта между линзами и, как следствие, изменение механических характеристик авторы предлагают определять по следующей формуле:

$$E_i = Cp_i, \quad (10)$$

где E_i – модуль деформации грунта; C – коэффициент, равный 50; p_i – уплотняющее давление.

Основными недостатками предлагаемой авторами методики численного моделирования являлась невозможность учета консолидации грунта, а следовательно, и его уплотнения между линзами, кроме того, не предусматривалось моделирование режима неоднократных инъекций.

А.Л. Ланис [10] вводит коэффициент армирования грунта в результате заполнения гидроразрывов твердеющим раствором:

$$e_a = \frac{(1 - k_a)[e_d(1 - k_a) - k_a]}{(1 + k_a e_d) - k_a^2(1 + e_d)}, \quad (11)$$

для определения модуля деформации закрепленного массива грунта:

$$E_a = \frac{f_a E_s E_d}{f_a k_a E_d + (1 - k_a) E_s}, \quad (12)$$

где $f_a = \exp[a_d k_a (1 + e_d)]$;

Таким образом, в формуле учитывается изменение модуля деформации в результате образования гидроразрывов: грунт уплотняется, изменяя свою структуру на более компактную, и в то же время становится более прочным посредством добавления из затвердевшего раствора включений, значительно более прочных, чем сам грунт.

Мангушев Р.А., Ермолаев А.В. [2] ввиду образующихся вблизи инъектируемых зон пластических деформаций для моделирования гидроразрывов предлагают использовать численные методы, в частности программный комплекс Plaxis 8.x с упругопластической моделью грунта, критерием прочности Кулона – Мора и равнообъемным законом течения. По результатам моделирования нагнетания раствора в течение максимально продолжительного времени в каждый горизонт (2 ч) авторы приходят к выводу, что в первый момент после приложе-

ния давления раствора по контуру трещины это давление практически полностью передается на воду (поровое давление в грунте при этом повышается), далее в течение 2 ч продолжается расширение полости, заполняемой раствором, происходит выдавливание воды вверх и частично вниз от трещины (поровое давление рассеивается), эффективные напряжения возрастают, полость, заполняемая раствором (трещина), расширяется – грунтовый массив уплотняется. Степень уплотненности грунтового массива оценивается по изменению модуля его деформации по сравнению с исходным значением при использовании компрессионной кривой по следующей формуле:

$$E = \frac{1 + e_0}{m_0} \beta, \quad (13)$$

где p – давление закачки раствора; $m_0 = \frac{e_i - e_{i+1} - k_a}{p_{i+1} - p_i}$.

По результатам численного моделирования технологии повторного инъецирования авторами выявлено, что эффективность уплотнения грунта повышается при выборе сравнительно небольшого давления закачки при первом инъецировании и увеличении давления при повторных инъециях.

Также следует отметить, что в соответствии с результатами полевых исследований (рис. 6, в) в процессе формирования ствола буроинъекционной сваи происходит полное заполнение затрубного пространства, образованного между скважиной и инъектором, образующего усеченную цилиндрическую полость, постепенно расширяющуюся в процессе закачки раствора при давлении 0,8–1,2 МПа в среднем на 36 %. Расчетное определение радиуса ствола сваи сводится к решению упругопластической задачи о расширении цилиндрической полости (скважины) при действии осесимметричного давления в полости (или прессиометрических испытаниях) в связных грунтах. Изучению данного вопроса посвящены работы В.А. Богомолова, Б.И. Дидука, В.В. Лушниковой, А.А. Петухова, В.Г. Федоровского, Ж.А. Ямонше и др.

Наиболее адекватной моделью при решении данной задачи, учитывающей разномодульность и упрочнение грунта (физическую и прочностную анизотропию грунта) в процессе расширения скважины, является модель упрочняющейся разномодульной среды,

предложенная проф. В.В. Лушниковым. Радиус ствола сваи определяется по формуле

$$R = \left[\frac{p + s}{p_{\text{кр}} + s} \right]^{\frac{1}{\alpha}}, \quad (14)$$

$$\text{где } p_{\text{кр}} = \frac{2(c \cos \varphi_0 + \sigma_0 \sin \varphi_0 + \sigma_0 t \cos \varphi_0)}{-\omega - \sin \varphi_0 (2 + \omega) - 2/3(1 + \nu/\lambda) - 2/3(1 + \omega)(1 + \nu)t \cos \varphi_0} + \sigma_0;$$

$$\alpha = \frac{-\sin \varphi_0 + 2/3(2 + \nu + \nu/\lambda)t \cos \varphi_0}{1 + 2/3 \sin \varphi_0 + (1 + \nu) \cos \varphi_0};$$

$$s = \frac{c \cos \varphi_0}{\sin \varphi_0 + 1/3(2 + \nu + \nu/\lambda)t \cos \varphi_0}.$$

Изменение модуля деформации грунта в результате расширения скважины от действующего давления определяется по формуле Ламе:

$$E = (1 + \mu)r_0 \frac{dP}{dr}, \quad (15)$$

где dP – приращение давления; $r = f(P)$; dr – соответствующие ему приращения радиальных деформаций; r_0 – начальный радиус скважины; μ – коэффициент Пуассона.

Выводы

1. В ходе полевых исследований при нагружении сваи вертикальной статической нагрузкой были установлены следующие закономерности (см. рис. 4):

– график зависимости осадки сваи от нагрузки $s = f(P)$ представляет собой плавную кривую без ярко выраженного срыва;

– значительная величина упругого выхода модельной сваи при разгрузке (5 мм) объясняется наличием в основании уплотненной зоны.

2. Устройство буроинъекционной сваи с контролируемым уширением приводит к улучшению физико-механических характеристик пылевато-глинистого грунта (см. рис. 7):

– плотность грунтового массива в зоне уширения (в радиусе 50 см от сваи) увеличилась в среднем на 16 % – влажность уменьшилась на 39 %, модуль деформации увеличился на 42 %;

– в зоне формирования ствола буроинъекционной сваи (в радиусе 50 см от сваи) в ИГЭ № 2 (супесь) плотность грунтового массива в среднем увеличилась на 11,6 % – влажность уменьшилась на 35 %, модуль деформации увеличился на 38 %;

– в зоне формирования ствола буроинъекционной сваи (в радиусе 50 см от сваи) в ИГЭ № 3 (суглинок) плотность грунтового массива в среднем увеличилась на 14 % – влажность уменьшилась на 30 %, модуль деформации увеличился на 34 %.

3. По данным графика сравнения осадки свай от нагрузки (см. рис. 5) использование манжетной технологии при неоднократной (повторной) инъекции позволяет получить более эффективное закрепление и уплотнение грунта при меньших значениях давления и меньшем времени закачки раствора в те же горизонты. Новые разрывы при этом образуются в непосредственной близости (выше или ниже) от первых, заполненных затвердевшим раствором.

4. По результатам полевых исследований образование гидроразрывов, неконтролируемо распространяющихся в грунтовом массиве, происходит при перепадах давления от 0,6–0,8 до 1,2–1,8 МПа.

5. Модель УРС [8] лучше других подходит для определения радиуса уплотнённой зоны грунтового массива вокруг контролируемого уширения (расхождение с данными полевых исследований 3 % (см. табл. 2), поскольку деформации при $p > p_{кр}$ определяются как продолжение упругих и пластических деформаций, протекающих по закону пластического течения.

6. В процессе образования гидроразрывов в грунте при давлениях 0,8–1,6 МПа вблизи инъектируемых зон возникают пластические деформации, поэтому для моделирования гидроразрывов необходимо использовать численные методы, учитывающие рассеивающиеся со временем поровые давления, изменение плотности и структуры (пористости) грунта, а также увеличение его прочности из затвердевшего раствора включений, значительно более прочных, чем сам грунт

Библиографический список

1. Голубев К.В., Пономарев А.Б. Исследование напряженно-деформированного состояния грунтового массива вокруг модели одиночной микросваи с уширением на конце // Актуальные проблемы проектирования и строительства в условиях городской застройки: тр.

международ. науч.-практ. сем. (г. Пермь, 27–29 сентября 2005 г.). – Пермь, 2005. – Т. 2. – С. 24–40.

2. Ермолаев В.А., Мацегора А.Г., Осокин А.И. Использование инъекции для улучшения строительных свойств грунта (на примере работ по объекту Синопская наб., д. 74) // Основания и фундаменты: межвуз. тем. сб. тр. / СПбГАСУ. – СПб., 2004. – С. 84–88.

3. Терцаги К. Строительная механика грунта на основе его физических свойств. – М.; Л.: Госстройиздат, 1933. – 691 с.

4. Далматов Б.И., Лапшин Ф.К., Россихин Ю.В. Проектирование свайных фундаментов в условиях слабых грунтов. – Л.: Стройиздат, 1975. – С. 38–41.

5. Лалетин Н.В. Расчет свайных оснований на действие осевой вертикальной нагрузки // Вестник ВИА. – 1954. – № 78. – С. 37–65.

6. Есипов А.В. Взаимодействие микросвай с грунтовым основанием при усилении фундаментов: дис. ... канд. техн. наук. – Тюмень. 2002. – 168 с.

7. Полищук А.И., Петухов А.А., Герасимов О.В. Экспериментальные исследования работы инъекционных свай в глинистых грунтах, устроенных методом высоконапорной инъекции // Проблемы проектирования, строительства и эксплуатации фундаментов, мостов и автомобильных дорог. Механизация строительства. Охрана окружающей среды: материалы Рос. науч.-техн. конф. / Перм. гос. техн. ун-т. – Пермь, 2004. – С. 43–47.

8. Богомолов В.А. Предложения по расчету геотехногенных систем, выполненных методами высоконапорной инъекции // Тр. Международ. науч.-практ. конф. по проблемам механики грунтов, фундаментостроению и транспортному строительству: в 2 т. / Перм. гос. техн. ун-т. – Пермь, 2004. – Т. 1. – С. 25–31.

9. Аббуд М. Геотехническое обоснование стабилизации осадок фундаментов с помощью инъекционного закрепления грунтов: дис. ... канд. техн. наук. – СПб., 2000. – 148 с.

10. Ланис А. Л. Использование метода напорной инъекции при устройстве земляного полотна железных дорог: дис. ... канд. техн. наук. – М., 2009. – 156 с.

References

1. Golubev K.V., Ponomarev A.B. Issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya gruntovogo massiva vokrug modeli odinochnoj mikrosvai s ushireniem na kontse [Investigation of the stress-strain

state of the soil mass around the model with a single micropiles broadening at the end]. *Trudy mezhdunarodnogo nauchno-prakticheskogo seminar "Aktualnye problemy proektirovaniya i stroitelstva v usloviyakh gorodskoj zastrojki"*. Perm, 2005, vol. 2. pp. 24-40.

2. Ermolaev V.A., Matsegora A.G., Osokin A.I. Ispolzovanie injektsii dlya uluchsheniya stroitel'nykh svoystv grunta (na primere rabot po objektu Sinopskaya nab., d. 74) [Using injections to improve construction soil properties (for example, work on the project Sinopskaya Embankment 74)]. *Mezhvuzovskij tematicheskij sbornik trudov "Osnovaniya i fundamenty"*. St.-Petersburg: Sankt-Petrburgskii gosudarstvennyi arkhitekturno-stroitel'nyi universitet, 2004, pp. 84-88.

3. Terzaghi K. Stroitel'naya mekhanika grunta na osnove ego fizicheskikh svoystv [Structural mechanics of soil on the basis of its physical properties]. Moscow; Leningrad: Gosstrojizdat, 1933, 691 p.

4. Dalmatov B.I., Lapshin F.K., Rossikhin Yu.V. Proektirovanie svajnykh fundamentov v usloviyakh slabykh gruntov [Design of pile foundations in weak soils]. Leningrad: Strojizdat, 1975, pp. 38-41.

5. Laletin N.V. Raschet svajnykh osnovanij na dejstvie osevoj vertikal'noj nagruzki [Calculation of pile foundations for action axial vertical load]. *Vestnik VIA*, 1954, no. 78, pp. 37-65.

6. Esipov A.V. Vzaimodejstvie mikrosvaj s gruntovym osnovaniem pri usilenii fundamentov [Interaction with micropiles soil basis at strengthening the foundations]. Thesis of Doctor's degree dissertation, Tyumen, 2002, 168 p.

7. Polishchuk A.I., Petukhov A.A., Gerasimov O.V. Jeksperimental'nye issledovaniya raboty injekcionnykh svaj v glinistyx gruntakh, ustroennykh metodom vysokonapornoj injektsii [Experimental research of injecting piles in clay soils, arranged by high-pressure injection]. *Materialy Rossijskoj nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Problemy proektirovaniya, stroitel'stva i jekspluatatsii fundamentov, mostov i avtomobilnykh dorog. Mehanizaciya stroitel'stva. Okhrana okruzhayushhej sredy"*. Perm: Permskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2004, pp. 43-47.

8. Bogomolov V.A. Predlozheniya po raschetu geotekhnogennykh sistem, vypolnennykh metodami vysokonapornoj injektsii [Suggestions for calculating geotekhnogennykh systems performed by the methods of high-pressure injection]. *Trudy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii po problemam mekhaniki gruntov, fundamentostroeniya i*

transportnomu stroitelstvu. Perm: Permskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2004, vol.1, pp. 25-31.

9. Abbud M. Geotekhnicheskoe obosnovanie stabilizatsii osadok fundamentov s pomoshch'yu inektsionnogo zakrepleniya gruntov [Geotechnical study settlement stabilization of foundations using injection grouting]. Thesis of Doctor's degree dissertation, St.-Petersburg, 2000, 148 p.

10. Lanis A.L. Ispolzovanie metoda napornoj inektsii pri ustrojstve zemlyanogo polotna zheleznykh dorog [Using the method of injection pressure at the roadbed railways]: Thesis of Doctor's degree dissertation, Moscow, 2009, 156 p.

Сведения об авторах

Пронозин Яков Александрович (Тюмень, Россия) – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Строительное производство оснований и фундаментов» Тюменского государственного архитектурно-строительного университета; e-mail: pronozin@tgasu.ru

Самохвалов Михаил Александрович (Тюмень, Россия) – аспирант, ассистент кафедры «Строительное производство оснований и фундаментов» Тюменского государственного архитектурно-строительного университета; e-mail: sammy90@yandex.ru

About the authors

Pronozin Yakov Aleksandrovich (Tyumen, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Head of Department of Building production, bases and foundations, Tyumen State University of Architecture and Civil Engineering; e-mail: pronozin@tgasu.ru

Samokhvalov Mikhail Aleksandrovich (Tyumen, Russian Federation) – Doctoral Student, Assistant Lecturer, Department of Construction production, bases and foundations, Tyumen State University of Architecture and Civil Engineering; e-mail: sammy90@yandex.ru

Получено 04.04.2014