

УДК 624.15:692.115+624.139

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПЕСЧАНОГО ОСНОВАНИЯ КОРОТКИХ БУРОНАБИВНЫХ СВАЙ ИЗ НАПРЯГАЮЩИХ БЕТОНОВ В БОЛЬШОМ ГЕОТЕХНИЧЕСКОМ ЛОТКЕ И ПРИ ПОМОЩИ ПК PLAXIS 2D**А.Н. НЕВЕЙКОВ, В.Н. ДЕДОК***(Белорусский государственный университет транспорта, Гомель)*

Представлена оценка напряженно-деформированного состояния и несущей способности буронабивных свай из напрягающих бетонов по результатам натурных исследований в большом геотехническом лотке и численного моделирования в ПК Plaxis 2D. Дано краткое описание методики проведения натурных экспериментов и создания их конечно-элементных моделей в ПК Plaxis 2D на основе упруго-пластической модели Мора – Кулона. Выводы базируются на сопоставлении результатов натурных исследований буронабивных свай и данных численных расчетов в ПК Plaxis 2D.

Ключевые слова: буронабивная свая, напрягающий бетон, несущая способность, численное моделирование.

Состояние вопроса. Ограниченность территорий для строительства в черте города, высокая их стоимость вынуждают уплотнять существующую застройку, повышать этажность зданий, что сопровождается ростом нагрузок на фундаменты. Эти обстоятельства предъявляют повышенные требования к надежности работы оснований и фундаментов и не позволяют использовать фундаменты, возводимые в открытых котлованах, забивные и некоторые виды набивных свай без дополнительных мероприятий, даже при залегании у поверхности сравнительно прочных грунтов. Эффективным решением данной проблемы является применение буронабивных свай. Их применение в указанных условиях требует поиска путей повышения эффективности таких свай, одним из которых является применение бетонов и растворов на напрягающем цементе (далее – НЦ) [1–3]. Их применение обусловлено благоприятными условиями, создаваемыми грунтом для расширения и твердения бетона [3]. Расширение ствола сваи создаст дополнительное давление на грунт и снизит разуплотнение скважины, улучшит контакт сваи с грунтом, и как следствие, повысит её несущую способность [4–6].

Опыт применения безусадочных и напрягающих бетонов показал свою эффективность для буронабивных свай в твердых глинах и скальных грунтах [1; 2], обеспечив существенное повышение несущей способности. Однако очевидно, что проблема применения свай из бетонов и растворов на НЦ не может быть сведена к подбору приемлемого состава бетона, она не может быть эффективно решена без рассмотрения напряженно-деформированного состояния (далее – НДС) сваи и основания в процессе ее изготовления, твердения и работы под нагрузкой. Хотя натурные исследования по определению несущей способности и деформативности буронабивных свай и обладают наибольшей достоверностью, однако требуют значительных временных и материальных затрат.

В связи со сказанным выше и благодаря стремительной компьютеризации широкое применение в геотехнике получил прогноз несущей способности и деформативности оснований фундаментов численным моделированием. Перспективность решения таких задач при исследовании НДС оснований и фундаментов значительно повысилась.

В работе [6] представлены результаты экспериментальных исследований коротких буронабивных свай из бетонов и растворов на напрягающем цементе в большом геотехническом лотке, заполненном песком мелким маловлажным средней плотности с характеристиками $\rho = 1,69...1,71 \text{ г/см}^3$; $\rho_s = 2,66 \text{ г/см}^3$; $e = 0,70...0,72$; $\varphi = 32,4...32,6^\circ$; $c = 2,4...2,8 \text{ кПа}$; $E = 8,1...10 \text{ МПа}$ при действии вертикальной статической нагрузки. Типы исследованных свай приведены в таблице 1.

Для изготовления буронабивных свай в работе [6] использовали бетон на портландцементе (расширение 0%), бетон на НЦ (расширение 2,2...2,3%) и раствор на НЦ (расширение 4,5...4,6%). Коэффициент продольного армирования свай составлял $\rho_l \approx 0,01$ при защитном слое бетона 50 мм. Нижние части свай высотой 450...500 мм в сериях 1, 2, 3 и 250...300 мм в серии 4 не армировали из условия ограничения вертикальных перемещений ствола менее сдвиговой осадки и для обеспечения свободного расширения бетона и раствора на НЦ, уплотнения грунта под торцом и (или) по боковой поверхности. Однако в работе [6] практически не затронуты вопросы НДС самой сваи и их оснований при изготовлении и твердении, которые и определяют работу сваи при нагружении.

Методика исследования. Для уточнения полученных ранее данных [6] о влиянии напрягающих бетонов и растворов на несущую способность буронабивных свай при действии вертикальной статической нагрузки, для уточнения НДС оснований таких свай при расширении ствола и последующей проверки полученных расчетных зависимостей [7; 8] выполнено численное моделирование их работы

в ПК Plaxis 2D методом конечных элементов. Данный ПК хорошо зарекомендовал себя при решении задач о НДС свайных фундаментов [9; 10; др.] – получено хорошее соответствие результатов расчета экспериментальным данным.

Таблица 1. – Типы испытанных (моделируемых) свай в каждой из серий

Серия	№ 1		№ 2	№ 3	№ 4	
Конструкция сваи в серии						
Марка сваи в серии	СТП-1-1 СНП-1-3	СТД-1-2 СНД-1-4	СТП-2-5 СНП-2-7	СТО-3-9 СНО-3-10	– СРНШ-4-11; СРНШ-4-12	– СРНП-4-13*, СРНО-4-14*
<p>Сокращения и обозначения, аналогичные [6]: С – свая; Т – бетон на портландцементе; Н – бетон на НЦ; РН – раствор на НЦ; П – полость под торцом; Д – динамометр под торцом; Ш – свая-штамп; О – обычная свая. Число – серия и порядковый номер в [6] и данной работе; * – только для численного расчета.</p>						

Натурные измерения НДС грунта от расширения бетонов и растворов на НЦ, отраженные ранее в работе [6], выполняли для свай 1-й серии Ø315 мм в большом геотехническом лотке в соответствии

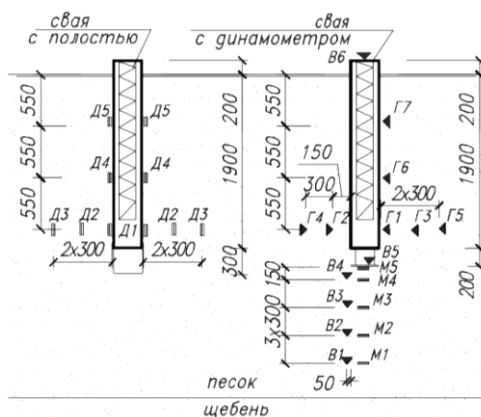


Рисунок 1. – Размещение мессдоз (Д, М) и марок (В, Г) при измерении НДС грунта для свай 1-й серии на напрягающем бетоне

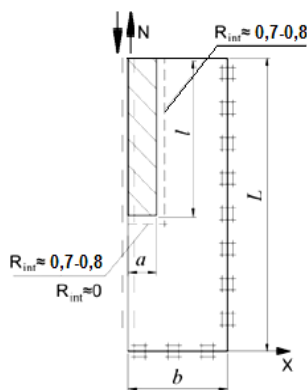


Рисунок 2. – Расчетная схема сваи в ПК Plaxis 2D

с рисунком 1. Измерение величин давления в грунте производили мессдозами, перемещений – при помощи вертикальных и горизонтальных грунтовых марок с индикаторами часового типа ИЧ-10 и прогибомерами 6ПАО. Для снятия показаний мессдоз использовали опробованную в работах [11; 12 и др.] тензометрическую станцию «Тисса». По величине горизонтальных и вертикальных перемещений марок судили об изменении плотности сложения грунта по методике, основанной на методике Х.М. Моххамада [13]. Обобщенные результаты натурных экспериментальных исследований НДС грунта, не отраженные ранее в работе [6], для анализа и сопоставления результатов представлены ниже совместно с результатами численного моделирования НДС грунта в ПК Plaxis 2D.

Численное моделирование работы коротких буронабивных свай выполнено в ПК Plaxis 2D методом конечных элементов в осесимметричной постановке. Для создания конечно-элементных расчетных схем в ПК Plaxis 2D использованы исходные данные и параметры, соответствующие реальным условиям эксперимента [6].

Для моделирования грунтов основания использовали упругопластическую модель Мора – Кулона, которая потребовала введения пяти основных параметров: модуля деформации грунтов E , коэффициента Пуассона ν , удельного сцепления c , угла внутреннего трения ϕ и удельного веса грунта γ . Для моделирования материала сваи (расчетная схема сваи в ПК Plaxis 2D представлена на рисунке 2) применили линейно-упругую модель с жесткостными характеристиками бетона или раствора на соответствующем типе цемента. Взаимодействие конструкций с грунтом описывали через интерфейсные элементы.

Для моделирования условия загрузки всей сваи или только боковой поверхности на торце сваи прочность интерфейсов была принята равной $R_{int} = 0,7...0,8$ или $R_{int} \approx 0$

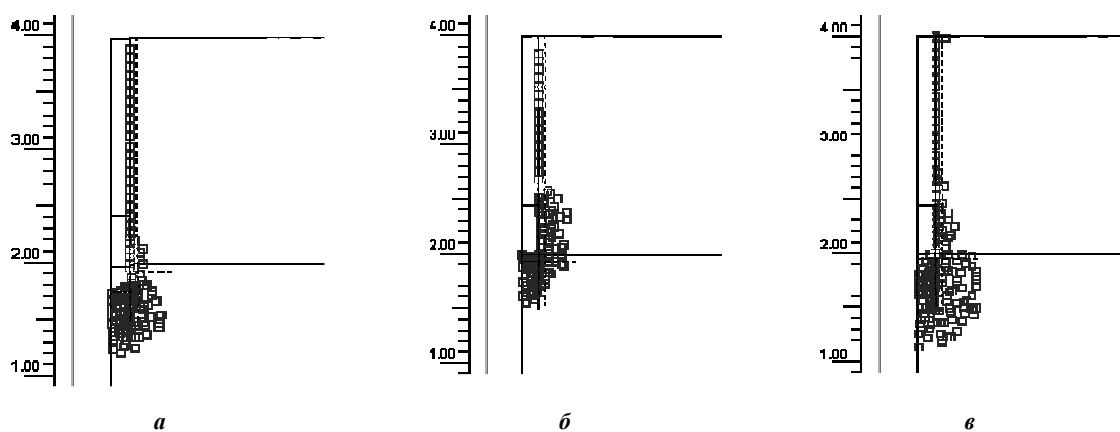
соответственно, по боковой поверхности прочность интерфейсов принята равной $R_{int} = 0,7 \dots 0,8$. Коэффициент принимался по рекомендации Руководства к программному комплексу Plaxis 2D [14] с учетом результатов проведенных ранее модельных испытаний [3]. Создание сетки элементов велось в автоматическом режиме с ее локальным измельчением на контакте «свая – грунт».

В процессе моделирования выполняли оценку НДС околосвайного грунта от расширения бетонов и растворов на НЦ, несущей способности свай из бетонов и растворов на портландцементе (далее – ПЦ) и НЦ при работе на вертикальную нагрузку и сопоставление результатов расчета с экспериментальными данными, полученными в большом геотехническом лотке.

Расчет производили в три этапа: 1) учет гравитационной нагрузки с последующим обнулением деформаций, вызванных этой нагрузкой; 2) размещение свай с учетом расширения бетона (раствора); 3) приложение вертикальной нагрузки.

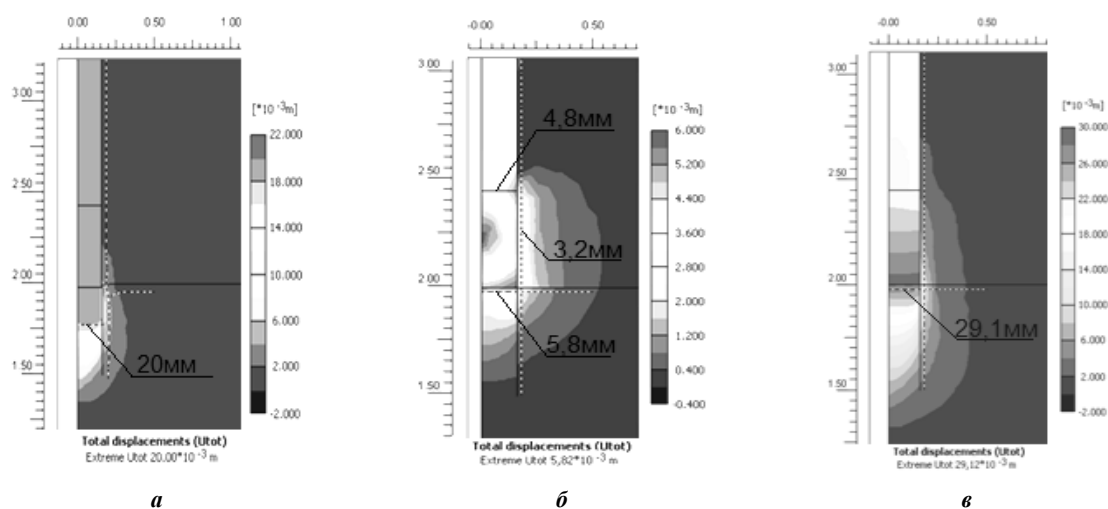
Задание расширения бетона (раствора) на НЦ и загрузку свай осуществлялось объемным расширением (деформациями) тела свай и в перемещениях соответственно и с учетом полученных ранее экспериментальных данных [4–6].

Результаты исследования и их анализ. Описанная выше методика исследования позволила решить задачи исследования работы буронабивных свай из различных типов бетона (раствора), а также исследовать процессы, происходящие в грунте в ходе расширения напрягающего бетона и статического нагружения свай. На рисунках 3–7 приведены результаты моделирования НДС свай СТД-1-2, СНД-1-4.



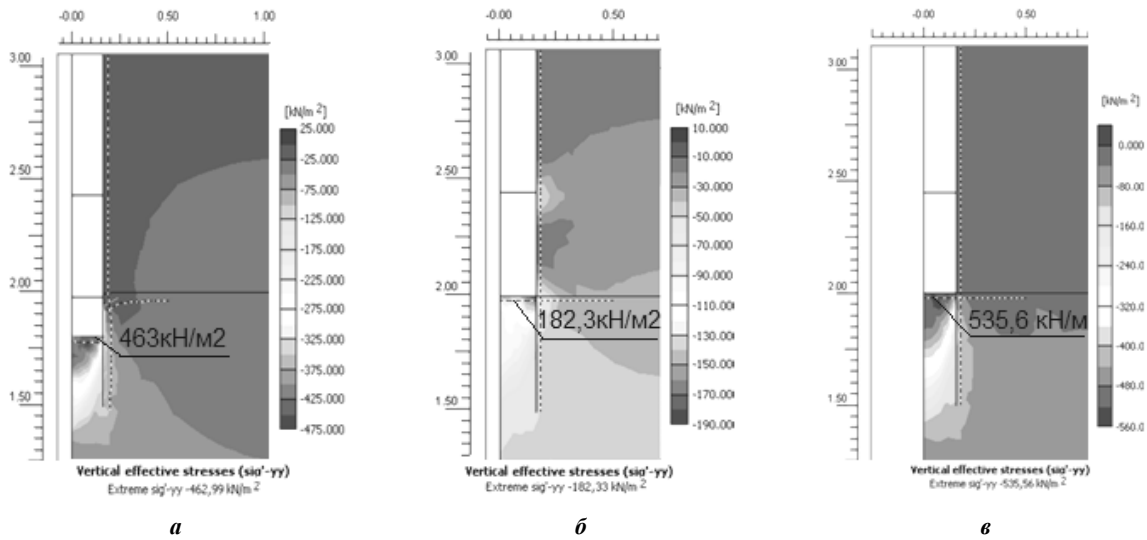
a – свая СТД-1-2 (осадка 20 мм); *б* – свая СНД-1-4 (расширение бетона); *в* – свая СНД-1-4 (осадка 20 мм)

Рисунок 3. – Распределение пластических точек вокруг вдавливаемых свай 1-й серии



a – свая СТД-1-2 (осадка 20 мм); *б* – свая СНД-1-4 (расширение); *в* – свая СНД-1-4 (осадка 20 мм)

Рисунок 4. – Изополя перемещений в грунтовом массиве в зоне нижнего конца вдавливаемых свай 1-й серии



а – свая СТД-1-2 (осадка 20 мм); **б** – свая СНД-1-4 (расширение); **в** – свая СНД-1-4 (осадка 20 мм)

Рисунок 5. – Изополя вертикальных напряжений в грунтовом массиве в зоне нижнего конца вдавливаемых свай 1-й серии с указанием их максимальных значений

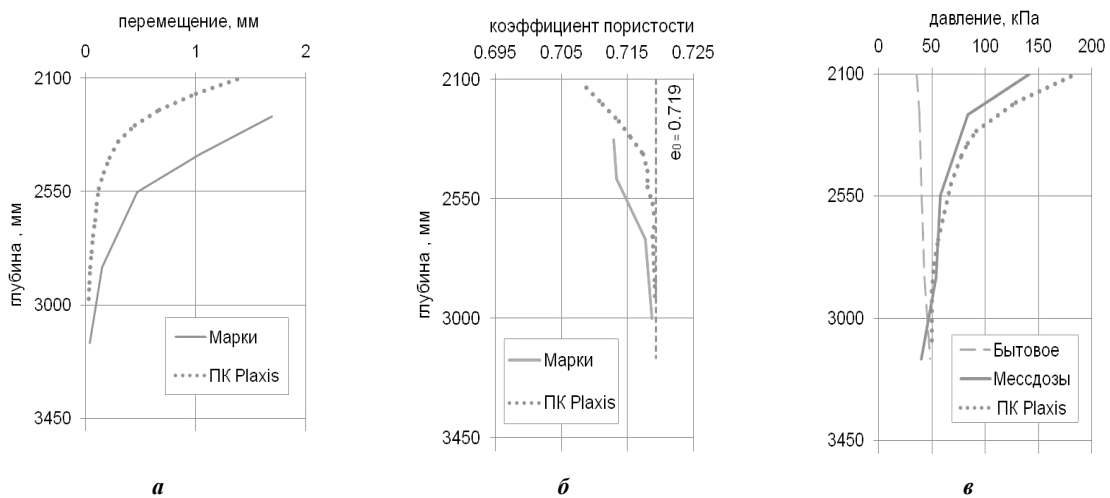


Рисунок 6. – Перемещение (**а**) и коэффициент пористости (**б**) грунта на расстоянии 350 мм от оси сваи и напряжения (**в**) в грунте под торцом от расширения ствола сваи СНД-1-4

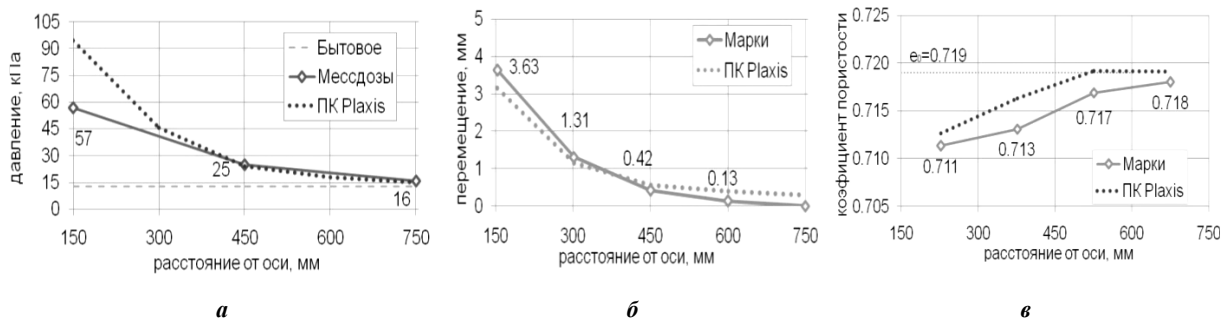


Рисунок 7. – Напряжения (**а**) и перемещения (**б**), коэффициент пористости (**в**) в грунте в радиальном направлении от оси расширяющегося ствола свай СНД-1-2 и СНД-1-4 соответственно

По результатам проведенных исследований и моделирования буронабивных свай в таблице 2 приведены характерные данные, показывающие распределение нагрузок между пятой и боковой поверхностью свай; на рисунке 8 представлены графики «нагрузка – осадка» свай 1...4-й серий на вдавливание.

Таблица 2. – Основные результаты испытания (моделирования) коротких буронабивных свай

Серия	Диаметр/ длина	Шифр свай	Максимальное усилие, кН			Перемещение, мм		Среднее сопротивление грунта, кПа	
			по боковой поверхности	на торец	на сваю	боковой поверхности	торца, свай	по боковой поверхности (τ)	под торцом (σ)
1	Ø315/1900	СТП-1-1	22,8 (18,7)	–	–	7,5 (3,1)	–	12,1 (9,9)	–
		СТД-1-2	21,3 ^{b)} –	31,5 (29,3) ^{б)}	52,8 (47,0)	–	20 (20)	11,4	404,3 (377)
		СНП-1-3	30,0 (26,5)	–	–	8,6 (5,1)	–	15,8 (14,1)	–
		СНД-1-4	27,5 ^{b)} –	35,0 (32,5) ^{б)}	62,5 (59,0)	–	20мм (20)	14,6	449,2 (418)
2	Ø205/1900	СТП-3-5	15,0 (12,7)	–	–	7,2 (3,0)	–	12,3 (10,6)	–
		СНП-3-7	19,5 (17,7)	–	–	8,1 (5,5)	–	15,9 (14,4)	–
3	Ø205/1900	СТО-3-9	14,5 ^{a)} –	13,8 ^{б)} (14,3) ^{б)}	28,3 (27,0)	–	20 (20)	11,8	418,2 (433)
		СНО-3-10	19,0 ^{a)} –	15,5 ^{б)} (15,8) ^{б)}	34,5 (33,5)	–	20 (20)	15,6	469,8 (479)
Среднее значение для свай на обычном бетоне								11,8 (10,3)	408,5 (398,0)
Среднее значение для свай на напрягающем бетоне								15,4 (14,3)	456,9 (448,5)
Средний прирост, %								23,7 (38,3)	11,8 (12,7)
4	Ø205/1900	СРН-Ш-4-11	22,5	15,9	–	9,0	20	18,4	481,9
		СРН-Ш-4-12	21,5	16,4	–	9,2	20	17,6	497,1
		СРН-П-4-13	(20,5)	–	–	(5,4)	–	(16,7)	–
		СРН-О-4-14	–	(16,5) ^{б)}	(37,0)	–	(20)	–	(500,1)
Среднее значение для свай на напрягающем растворе								18,0 (16,7)	489,5 (500,1)
Средний прирост, %								48,8 (62,1)	19,0 (25,7)
<i>Примечания:</i>									
1. Значение в скобках получено по данным численного моделирования в ПК Plaxis 2D.									
2. В таблице приняты следующие сокращения и обозначения: ^{a)} – среднее значение по предыдущим испытаниям серии [6] по каждому типу бетона; ^{б)} – разность общей нагрузки и нагрузки на боковую поверхность для свай с полостью; ^{в)} – разность общей нагрузки и нагрузки на торец (по показаниям тензодинамометра); С – свая; Т – бетон на ПЦ; Н – бетон на НЦ; РН – раствор на НЦ; П – полость под торцом; Д – динамометр под торцом; Ш – свая-штамп; О – обычная свая; число – серия и порядковый номер сваи.									

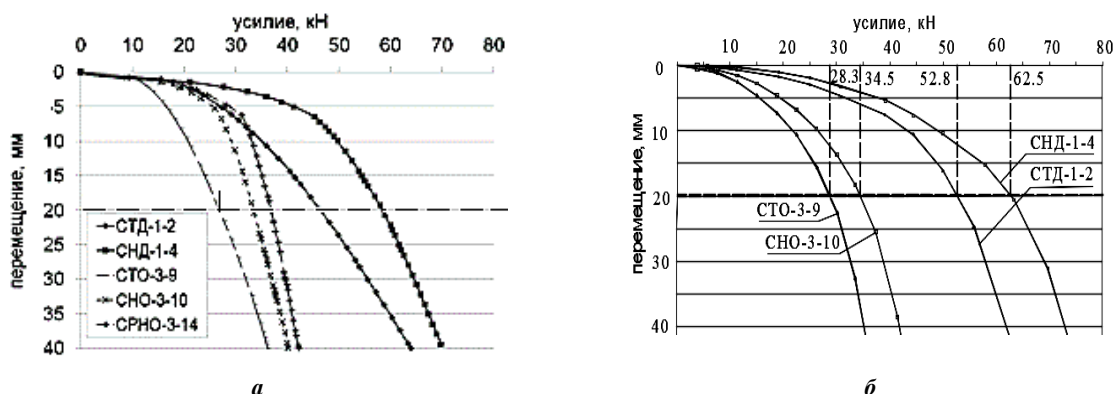


Рисунок 8. – Результаты численного моделирования (а) и испытания (б) [6] коротких буронабивных свай

Результаты испытаний и численных расчетов позволили сформулировать *выводы*, которые согласуются с ранее сделанными выводами в работах [3; 6]:

- расширение бетонов и растворов на НЦ в нижней части свай, свободных от армирования, близко к свободным деформациям контрольных образцов [3; 6];
- расширение бетона и раствора на НЦ обеспечило ранее включение торца в работу, повысило сдвиговую осадку сваи за счет обеспечения плотного контакта ствола сваи с грунтом и преднапряжения грунта сваей;
- расширение бетона и раствора на НЦ обеспечило прирост давления на грунт боковой поверхностью ствола в нижней части сваи не менее 45 кПа, а по торцу – не менее 130 кПа;
- нагрузка, воспринимаемая боковой поверхностью свай в серии 1, оказалась незначительно ниже определенной по теории приближенного моделирования [9], что связано с отклонением размеров свай и влиянием масштабного фактора;
- сопротивление грунта свай из бетона на НЦ в 1, 2, 3-й сериях по боковой поверхности возросло на 24...38%, по торцу на 11...13% по сравнению с бетоном на ПЦ;
- общая нагрузка на сваи из бетона на НЦ в 1, 2, 3-й сериях повысилась на 18...20% по сравнению с бетоном на ПЦ, невысокое значение которой объясняется «рыхлым» грунтом и небольшой долей нагрузки, воспринимаемой боковой поверхностью сваи (около 50%);
- сопротивление грунта свай из раствора на НЦ в 4-й серии возросло по боковой поверхности на 48...62%, по торцу – на 19...26% по сравнению с бетоном на ПЦ, что объясняется высоким расширением раствора в 4-й серии (4,6%) по сравнению с бетоном в 1, 2, 3-й сериях (2,3%) и армированием свай узким центрально расположенным каркасом;
- испытания свай 4-й серии показали более высокую эффективность армирования свай центрально расположенным узким каркасом (одним стержнем) по сравнению с армированием стандартным пространственным каркасом (серии 1...3), что объясняется увеличенным защитным слоем бетона и, как следствие, повышенным перемещением стенок скважины и давлением на грунт;
- взаимодействие бетона и раствора на НЦ и песчаного основания приводит к образованию упрочненной менее влажной зоны грунта с незначительным повышением плотности сложения при расширении бетонов и растворов, которые отводят воду от стыка двух сред для потребления влаги на образование этрингита, что также сказывается на повышении сопротивления грунта по боковой поверхности и торцом;
- полученные расчетом по МКЭ в Plaxis 2D результаты значений несущей способности свай отличаются на 5...25% от значений, полученных при натурных испытаниях в большом геотехническом лотке, что свидетельствует о необходимой достоверности испытаний. При этом следует отметить существенное отличие в величине напряжений, возникающих в грунте вокруг ствола сваи, свободного от армирования (разбежка составляет 30...45%), что можно объяснить релаксацией напряжений при расширении бетонов и растворов и отсутствием разуплотнения грунта при моделировании, которая не учитывается выбранной моделью грунта Мора – Кулона при численном моделировании;
- применение ПК Plaxis позволяет получить полное представление о НДС сваи и грунта в виде изополей перемещений и напряжений, распределения пластических точек, отношений действующих касательных напряжений к предельным, а также построить графики зависимости осадок и перемещений точек грунта от нагрузки.

Заключение. Проведенные экспериментальные исследования в большом геотехническом лотке и численным моделированием в ПК Plaxis 2D показали эффективность применения бетона и раствора на НЦ для изготовления буронабивных свай и позволили оценить напряженно-деформированное состояние оснований буронабивных свай из бетонов и растворов на НЦ и их влияние на несущую способность, деформативность оснований таких свай.

На основе выполненных в представленной работе исследований для устройства свай наиболее целесообразно применять растворы на НЦ как обладающие значительным расширением. Бетон и раствор на НЦ рекомендуется применять для преднапряжения грунта в нижней части буронабивных свай, свободных от армирования, и для устройства буроинъекционных свай с буровыми высокопрочными трубчатыми штангами «Титан», «Атлант» и другими или буронабивных свай с узким каркасом, что подтверждено 4-й серией испытаний и результатами натурных испытаний [15]. Применение бетона и раствора на НЦ в таких сваях обеспечит эффективное использование деформаций расширения ствола сваи для плотного контакта с основанием, что приведет к повышению сопротивлений грунта по боковой поверхности и под торцом сваи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Особенности применения свай в Восточной Сибири / Ю.Н. Козаков [и др.]. – Красноярск : Стройиздат, 1992. – 268 с.

2. Sheikh, S.A. Expansive cement concrete for drilled shafts / S.A. Sheikh, Y. Fu, M.W. O'Neill // ACI material journal. – 1993. – V. 91. – P. 237–245.
3. Пойта, П.С. Эффективность применения напрягающих бетонов для изготовления свай в построечных условиях / П.С. Пойта, А.Н. Невейков // Проблемы и перспективы развития транспортных систем и строительного комплекса : материалы II междунар. науч.-практ. конф. – Гомель : БелГУТ, 2008. – С. 251–252.
4. Невейков, А.Н. Эффективность применения напрягающих бетонов для изготовления буронабивных свай / А.Н. Невейков, П.С. Пойта // Вестн. БрГТУ. – 2009. – № 1. Строительство и архитектура. – С. 32–36.
5. Невейков, А.Н. Напрягающий бетон и буронабивные сваи / А.Н. Невейков // Проблемы и перспективы развития транспортных систем и строительного комплекса : материалы IV междунар. науч.-практ. конф. – Гомель : БелГУТ, 2010. – С. 252–253.
6. Невейков, А.Н. Экспериментальные исследования несущей способности буронабивных свай из напрягающего бетона / А.Н. Невейков // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди : зб. наук. пр. – Ровно : РДУ, 2012. – Вип. 23. – С. 598–607.
7. Расчет напряженно-деформированного состояния ствола буронабивной сваи из напрягающего бетона / П.С. Пойта [и др.] // Budownictwo o zoptymalizowanym potencjale energetycznym : Praca zbiorowa – Czestochowa : Wydawnictwo Politechniki Czestochowskiej, 2009. – P. 250–258.
8. Невейков, А.Н. Взаимодействие буронабивных свай из обычных и напрягающих бетонов с грунтовым массивом / А.Н. Невейков, П.С. Пойта // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке научных кадров : сб. тр. XVII науч.-метод. семинара. – Гродно : ГГУ, 2010. – С. 202–207.
9. Пономарев, А.Б. Экспериментально-теоретические основы прогноза осадок и несущей способности фундаментов из свай распорной конструкции : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.02 / А.Б. Пономарев. – Пермь, 1999. – 32 с.
10. Тер-Мартirosян, А.З. Взаимодействие фундаментов зданий и сооружений с водонасыщенным основанием при учете нелинейных и реологических свойств грунтов : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.02 / А.З. Тер-Мартirosян. – М., 2016. – 42 с.
11. Драган, А.В. Трещиностойкость железобетонных элементов при действии осевых растягивающих усилий : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / А.В. Драган. – Брест, 2008. – 24 с.
12. Бондаренко, В.М. Соппротивление осевому сжатию сталетрубобетонных элементов с ядром из напрягающего бетона : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / В.М. Бондаренко. – Брест, 2010. – 24 с.
13. Моххамад, Х.М. Бурионъекционное упрочнение оснований зданий и сооружений при реконструкции : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.02 / Х.М. Моххамад. – Минск : БНТУ, 1998. – 20 с.
14. Plaxis. Справочное руководство. Версия 8. – СПб. : НИП-Информатика, 2004. – 182 с.
15. Невейков, А.Н. Применение расширяющихся бетонов и растворов для опытного устройства буронабивных и бурионъекционных свай в Республике Беларусь / А.Н. Невейков // Актуальные проблемы исследования материалов, конструкций, технологий и организации строительства в трансграничном аспекте : сб. ст. II междунар. конф. – Брест : БрГТУ, 2017. – С. 126–131.

Поступила 07.12.2017

INVESTIGATION OF THE STRESS-STRAIN STATE OF THE SANDY BASE OF SHORT BORED PILES FROM EXPANSIVE CONCRETE IN A LARGE GEOTECHNICAL TRAY AND WITH USING THE PLAXIS 2D PROGRAM

A. NEVEIKOV, V. DEDOK

The article defines the stress-strain state and load-bearing capacity of bored piles made of expansive concrete based on field studies in a large geotechnical tray and of numerical tests simulation in Plaxis 2D program. This article describes the routine full-scale experiments and their finite element schemes using Plaxis 2D program and the elastic-plastic Mohr – Coulomb model. The implications are based on the comparative analysis of the results obtained from the held studies of bored pile test and calculation data in Plaxis 2D program.

Keywords: bored pile, expansive concrete, bearing capacity, numerical simulation.