

КОМПЛЕКСНЫЕ ИСПЫТАНИЯ НА БОКОВУЮ НАГРУЗКУ ГРУПП СВАЙ И БУРОВЫХ СТВОЛОВ В ГЛИНИСТОМ ГРУНТЕ

К. РОЛЛИНС, Р. КИНГ – факультет гражданского и экологического строительства Университета им. Бригема Янга (Прово, штат Юта, США).

ДЖ. СНАЙДЕЛ – Компания BBS&M (Клевеленд, штат Огайо, США).

С. ДЖОНСОН – Компания RBG Engineering (Прово, штат Юта, США).

Полномасштабные испытания на боковую нагрузку проводились на двух группах свай в слабых глинах (расстояние между центрами свай составляло 3,9 и 5,65 диаметра свай), а также на 324-мметровой отдельно стоящей свае. Группы свай взаимодействовали с двумя буровыми стволами диаметром 1,2 м, устроенными методом вибрирующих обсадных труб. Взаимодействие между сваями внутри группы способствовало уменьшению сопротивления по боковой поверхности всей группы, но этот эффект снижался по мере увеличения расстояния между сваями. Для каждой группы свай путем обратных расчетов вычислялись *R*-множители, которые сравнивались со значениями, полученными для жестких глин. Измеренные величины сопротивления по боковой поверхности буровых стволов оказались больше вычисленных с помощью нескольких аналитических программ, согласно которым требовалось усовершенствовать моделирование буровых стволов большого диаметра.

ВВЕДЕНИЕ

Для фундаментов глубокого заложения очень важна способность выдерживать боковую нагрузку. В особенности это относится к фундаментам в сейсмически активных районах, подверженных воздействию ветров и волн, а также проходящих судов. Хотя разработаны весьма надежные методы прогнозирования сопротивления по боковой поверхности отдельных свай под действием статической нагрузки, инженеры до сих пор не располагают достаточной информацией для проектирования групп свай, в которых сваи расположены близко друг к другу. К сожалению, из-за высокой цены и технических трудностей, связанных с проведением испытаний групп свай на боковую нагрузку, доступны результаты лишь немногих полномасштабных испытаний, отражающих распределение нагрузки внутри группы свай. Тем не менее данные, полученные в ходе немногочисленных полевых испытаний, а также изучение моделей свидетельствуют, что свая в группе свай

испытывает значительно большее смещение при данной нагрузке, чем отдельно стоящая свая [3, 6].

Несмотря на то что иногда кривые «нагрузка–боковое перемещение» для свай ведущего ряда группы могут совпадать с кривыми для отдельных свай, амплитуда этих кривых для свай замыкающего ряда значительно меньше. Видимо, когда группы свай с близко расположенными сваями смещаются в боковом направлении, зоны разрушения отдельных свай перекрываются так, как показано на рис. 1. Меньшее сопротивление по боковой поверхности свай замыкающего ряда из-за впереди стоящих свай обычно описывается как взаимодействие «свая–грунт–свая», или «эффект группового взаимодействия». Взаимодействие внутри группы свай становится менее значимым при увеличении расстояния между сваями.

Для обеспечения сопротивления по боковой поверхности было предложено заменить свайную группу буровым стволом большого диаметра. Однако в условиях озерных отложений долины Солт Лейк Веллей буровые

стволы редко использовались из-за требований к качеству строительных работ и несущей способности на боковую нагрузку, а также из-за давления артезианских вод.

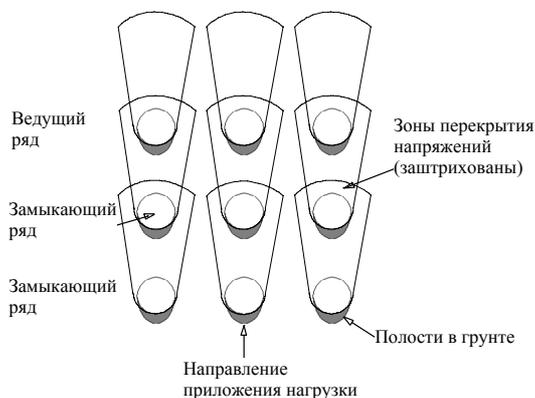


Рис. 1. Взаимодействие «свая–грунт–свая» в свайной группе

Для более тщательного изучения кустового эффекта в зависимости от расстояния между сваями и сравнения с показателями работы буровых стволов большого диаметра в международном аэропорту Солт Лейк проводились серии испытаний на боковую нагрузку. Испытания проходили на двух группах свай с разным расстоянием между сваями и двух фундаментах на буровых стволах большого диаметра.

1. ГРУНТОВЫЕ УСЛОВИЯ

Из-за сложной природы взаимодействия между сваями и грунтом в ходе испытаний проводилось комплексное геотехническое исследование с целью точного определения геологического разреза и свойств грунта на изучаемой площадке. Исследование включало отбор образцов и их испытания в лабораторных, а также полевых условиях. Отбор образцов грунта ненарушенной структуры осуществлялся с помощью тонкостенных труб Shelby диаметром 76 мм, образцов нарушенной структуры – ручным шнеком. В полевых условиях проводились испытания на сопротивление конусу СРТ, стандартные пенетрационные испытания SPT, испытания дилатометром DMT, прессиометром PMT, испытание

на сдвиг крыльчаткой VST и измерение скорости сдвиговой волны в вертикальных скважинах.

На рис. 2 приведен геологический разрез, выполненный по данным полевых и лабораторных исследований. Поскольку обычно основная доля боковой нагрузки действует на сваи в их верхней части (в пределах 10...15 диаметров свай), основным интерес для исследования представляют верхние слои грунта. Они представлены слоями ила и глины, подстилаемыми слоем песка. Во время испытания грунтовые воды находились недалеко от поверхности.

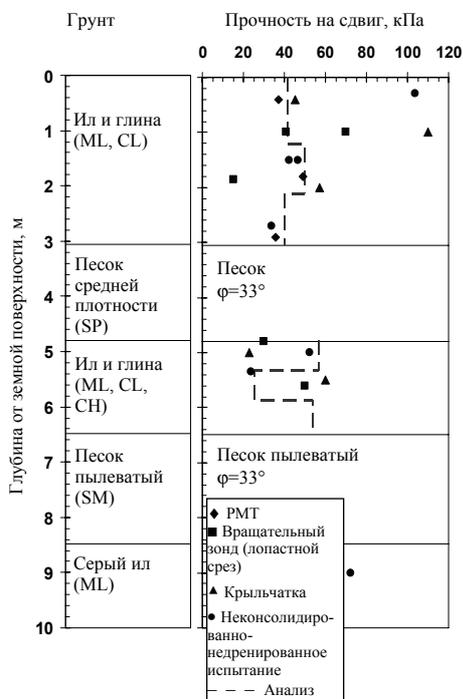


Рис. 2. Геологический разрез и прочность на сдвиг грунтов на испытательной площадке

Связные поверхностные грунты были представлены слоями ила и глин с низким индексом пластичности, которые, согласно Единой системе классификации грунтов (USCS), определяются как ML, CL, CL–ML. Гидрометрический анализ показал, что большая часть (50...75%) связных поверхностных грунтов (глубина залегания – 1,7...4,5 м) состоит из частиц ила с 10...25%-ным содержанием частиц глины.

Значения недренированной прочности на сдвиг в зависимости от глубины, полученные в ходе различных испытаний (см. рис. 2), в верхних слоях глины колеблются от 30 до 50 кПа, прочность в нижних слоях глины несколько ниже. На рис. 2 приводится также график средней проектной прочности (для сравнения с измеренными величинами прочности на сдвиг), который будет использоваться для последующего компьютерного анализа.

Испытания на консолидацию показали, что до глубины 10 м грунт переуплотнен. Степень переуплотнения выше в поверхностных слоях (в основном из-за выветривания) и уменьшается с глубиной. Измеренная скорость сдвиговой волны составляет 120 м/с на глубине 0...1,5 м от земной поверхности и 150 м/с на глубине 1,5...4,5 м. Нижний несвязный слой грунта представлен песками средней крупности и мелкозернистым песком (SP или SM, согласно классификации USCS). Исходя из количества ударов молота для SPT и величин сопротивления по острию можно сделать вывод о плотности песка: относительная плотность D_r составляет 65...85%. На рис. 2 также показаны вычисленные величины угла трения.

2. ОПЫТНЫЕ ФУНДАМЕНТЫ

В качестве тестовых использовались 324-метровые трубчатые сваи OD с толщиной стенок 9 мм. Сваи в закрытом виде забивались на глубину 10,67 м гидравлическим молотом. Сталь, из которой они были изготовлены, соответствовала 3-му классу спецификации Американского стандарта по испытанию материалов ASTM A252 со средним пределом текучести 400 МН/м^2 (погрешность – 0,2%) и стандартным отклонением 15 МН/м^2 . Момент инерции самих свай составил $1,16 \times 10^8 \text{ мм}^4$. К каждой свае были присоединены две железные пластины для защиты датчиков деформации, что увеличило момент инерции до $1,43 \times 10^8 \text{ мм}^4$. На рис. 3 приведена схема испытания трех групп свай. Первая группа испытывалась в 1996 г., она состояла из 9 свай, расположенных в три ряда, по три сваи в каждом, с расстоянием между осями свай 0,915 м, т. е. 2,8 диаметра свай (Rollins et al, 1998). Вторая группа состояла из 15 свай (5

рядов по три сваи) с расстоянием между их осями 1,27 м, т. е. 3,9 диаметра свай. Третья группа состояла из 9 свай (три ряда по три сваи) с расстоянием между их осями 1,83 м, т. е. 5,6 диаметра свай.

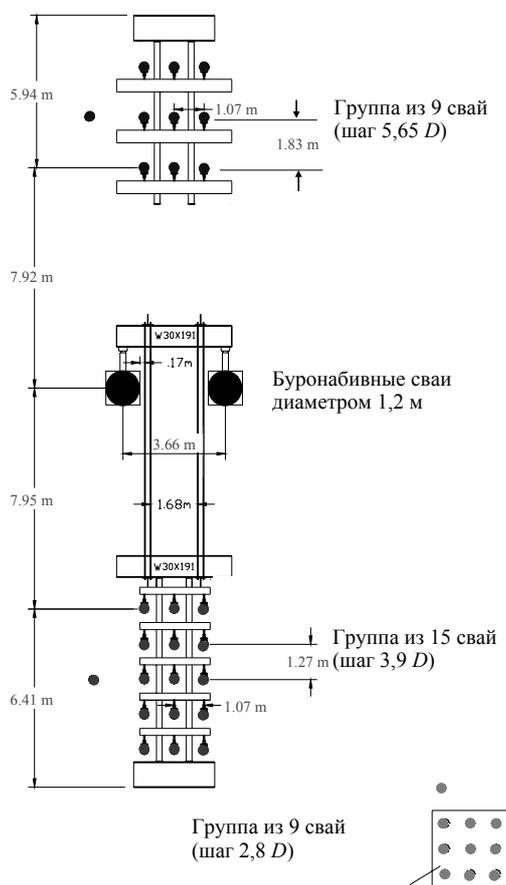


Рис. 3. Схема расположения свайных групп и буровых стволов

Буровые стволы опускали с помощью установки Soilmec 518, оснащенной осциллятором, который вдавливал и поднимал 1,2-метровые обсадные трубы. Использование этой надежной и эффективной технологии способствовало предотвращению выпора дна и созданию однородной колонны. Диаметр буровых стволов составил 1,2 м, прочность бетона на сжатие – 37,9 мПа. Арматурный каркас каждого ствола состоял из 18 продольных стержней №11 с 50-мметровым покрытием, соединенных со спиралями №5, расположенными с шагом 75 мм. На глубине 9,15 м

каждую вертикальную решетку обрезали, и шаг между спиралями увеличивался до 300 мм. Буровой ствол, расположенный с восточной стороны, уходил в грунт на глубину 19,8 м, западный – на 15,2 м.

3. СХЕМА И ПРОЦЕДУРА ИСПЫТАНИЙ

Во время испытаний два буровых ствола взаимодействовали с каждой группой свай посредством рамной системы нагружения (см. рис. 3). Восемь стальных сочлененных между собой стержней соединялись с двумя перекрестными балками. Таким образом, группа свай и два буровых ствола извлекались одновременно после приложения нагрузки от гидравлических молотов. Гидравлические домкраты подсоединяли к коллектору, поэтому давление в каждом домкрате оставалось постоянным.

Нагрузку на каждый ствол определяли при помощи двух мессдоз. Изгиб и поворот каждого ствола измеряли двумя струнными потенциометрами, соединенными с независимыми рамами. Отклонение ствола от вертикали измеряли инклинометром. Кроме того, на периферии вокруг арматурных каркасов были установлены 4 полихлорвиниловые трубы для проведения акустических испытаний в перекрестных скважинах.

Каждую сваю прикрепляли к раме с помощью шпоночного соединения. Рама была весьма жесткой, поэтому все сваи отклонялись на одинаковый угол. Нагрузку, действующую на каждую сваю, измеряли отдельно. К каждой свае прикрепляли линейный датчик на основе дифференциального трансформатора для измерения отклонения в точке нагружения. Два дополнительных датчика измеряли отклонения голов двух свай для определения угла их вращения.

Испытания проводили со ступенчатым приращением нагрузки, при этом использовался метод контроля перемещений. Отклонения для каждой группы свай по мере приращения нагрузки составляли: 6, 13, 19, 25, 38, 51, 64, 76 и 89 мм. Нагрузку прикладывали до тех пор, пока не достигалось нужное отклонение, а затем выдерживали в течение 5 мин. После этого нагрузку снимали, а затем вновь наращивали до достижения необходимого

отклонения. Процедуру повторяли 15 раз. Использовалась циклическая нагрузка, поскольку таким образом определялось изменение величины сопротивления, которое могло возникнуть при землетрясении, когда на фундаменты воздействуют многочисленные циклы боковых нагрузок.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

На рис. 4 показаны кривые «нагрузка–боковое отклонение» для каждого из буровых стволов. В целом кривые весьма похожи, однако восточный ствол, погруженный на глубину 19,8 м, испытывает несколько меньшие боковые смещения, чем западный ствол, заложенный на глубину 15,2 м. Для сравнения зависимостей на рис. 4 также приводятся графики «общая нагрузка – средняя величина отклонения» для 4 комбинированных стволов и группы, состоящей из 15 свай. При одинаковом отклонении два буровых ствола обычно способны выдержать на 20...30% большую нагрузку, чем группа из 15 свай. Тот факт, что два буровых ствола имеют большее сопротивление, отчасти можно объяснить наличием кустового эффекта, действующего в группе близко расположенных свай и уменьшающего сопротивление по боковой поверхности. Комплексное сравнение эффективности этих двух типов фундаментов необходимо и для определения общих затрат на их строительство.

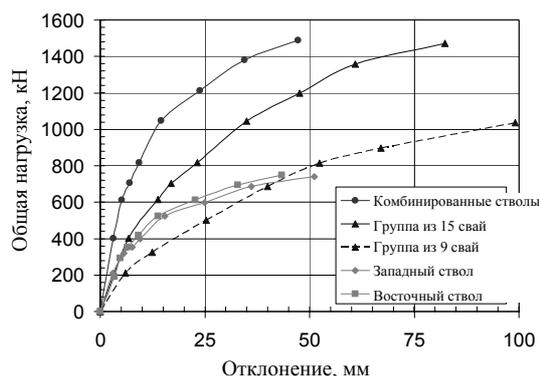


Рис. 4. Кривые «нагрузка–боковое отклонение» для буровых стволов

После проведения испытаний группы из 15 свай нагрузочную раму перенастраивали для испытаний группы из 9 свай. В ходе этого

испытания буровые стволы нагружали в противоположном направлении, а сваи вдавливали в нетронутый грунт. На рис. 5 приведена сравнительная кривая «нагрузка–отклонение» для группы из 9 свай. В этом случае буровой ствол диаметром 1,2 м работал примерно так же, как и 9 отдельных свай диаметром 324 мм, расположенных на расстоянии 5,65 диаметра. Однако, когда сваи располагались на расстоянии 3,9 диаметра сваи, потребовалось бы 11 свай для достижения такой же величины сопротивления по боковой поверхности, как при использовании одного ствола большого диаметра.

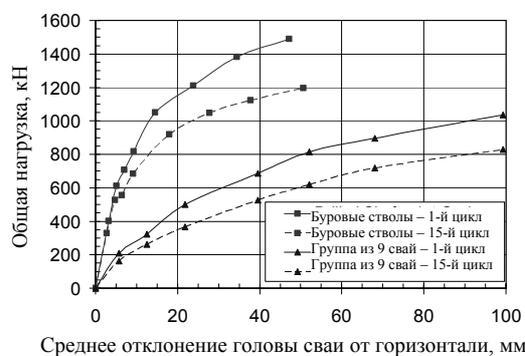


Рис. 5. Циклы нагружения буровых стволов и группы из 9 свай

На рис. 5 показаны пиковые кривые «нагрузка–боковое отклонение» для 1-го и 15-го циклов нагружения для буровых стволов и группы из 9 свай. Уменьшение сопротивления по боковой поверхности при 15-метровом нагружении по сравнению с 1-метровым циклом составляет 15...20% для обоих типов фундаментов. Поэтому можно предположить, что существенное уменьшение сопротивления по боковой поверхности в значительной степени зависит от сопротивления грунта, а не от работы конструкции фундамента.

Как выяснилось, распределение нагрузки внутри свайной группы – это функция расположения ряда в группе свай. На рис. 6 приведены средние кривые зависимости «нагрузка–отклонение» для каждого ряда в группе, состоящей из 15 свай. На сваи 1-го ряда приходится наибольшая средняя нагрузка, поэтому зависимость «нагрузка–боковое отклонение» для этого

ряда почти соответствует зависимости для отдельной сваи. Однако при данном отклонении сопротивление по боковой поверхности уменьшается от 2-го к 3-му ряду, а затем остается постоянным. Несколько большее сопротивление в 4-м ряду объясняется случайными изменениями характеристик прочности грунта, в котором заложена свайная группа. Тем не менее результаты испытаний позволяют предположить, что при проектировании величину сопротивления по боковой поверхности 3–5-го рядов группы свай можно считать постоянной.

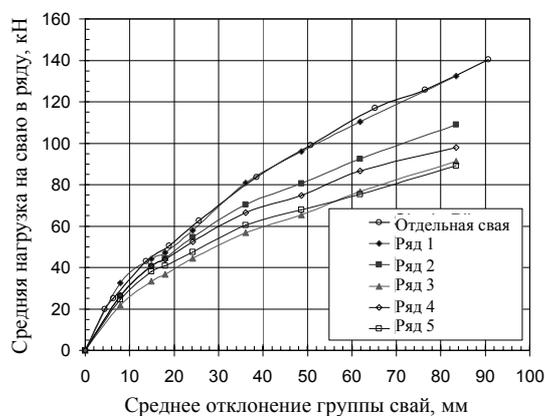


Рис. 6. Средняя зависимость «нагрузка–боковое отклонение» для каждого ряда в группе из 15 свай и отдельной сваи

5. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ

Предварительный анализ боковой нагрузки проводили на отдельно стоящих сваях и фундаментах на буровых стволах. Сваи и буровые стволы моделировали как балки, а сопротивление грунта – как нелинейную работу пружин, описываемую кривыми p – y , где p – сопротивление грунта по боковой поверхности сваи; y – боковое отклонение сваи. Для анализа использовали компьютерные программы LPILE Plus 4.0 [5], SWM (Ashour et al, 1994) и FBPIER [4]. Нелинейную работу буровых стволов, обусловленную образованием трещин в бетоне, моделировали с помощью программных методов.

Результаты, полученные в ходе измерений и расчетов для отдельной сваи, хорошо согласуются между собой (рис. 7). Используя те же характеристики грунта, что и для испы-

тания отдельной сваи, разрабатывали p -множители для каждого ряда обеих свайных групп. Эти множители использовали вместе с данными измерений [6] (рис. 8).

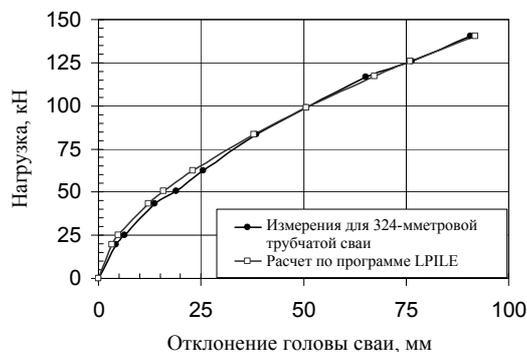


Рис. 7. Сравнение кривых «нагрузка–отклонение от вертикали» для отдельной сваи, построенных по данным измерений и расчетов

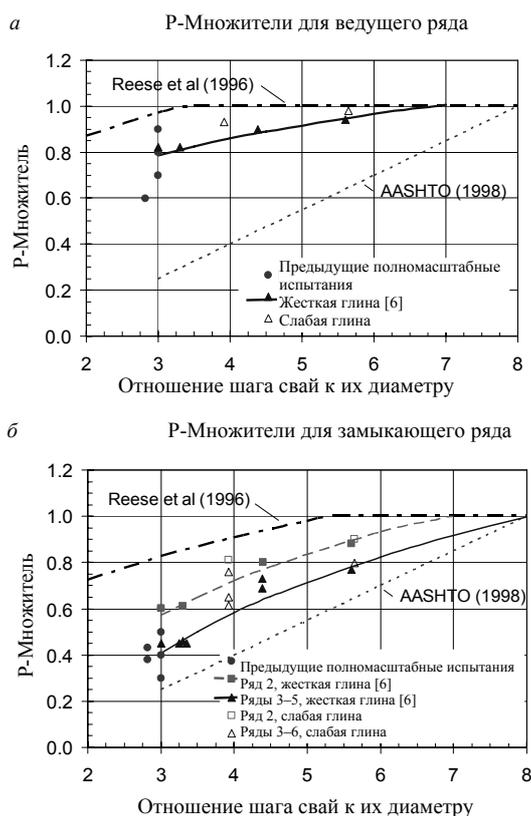


Рис. 8. p -множители как функция шага свай по результатам обратного расчета для ведущего

(первого) ряда в группе свай (а) и замыкающего ряда (б)

Используя кривые, приведенные на рис. 9, можно вычислить величину уменьшения сопротивления по боковой поверхности, обусловленного взаимодействием близко расположенных свай. По мере увеличения шага свай возрастает величина p -множителя, вычисленного методом обратного расчета, что указывает на уменьшение группового взаимодействия свай при их расположении близко друг от друга подобные фундаменты менее эффективны, чем буровые стволы большого диаметра, в которых этот эффект отсутствует.

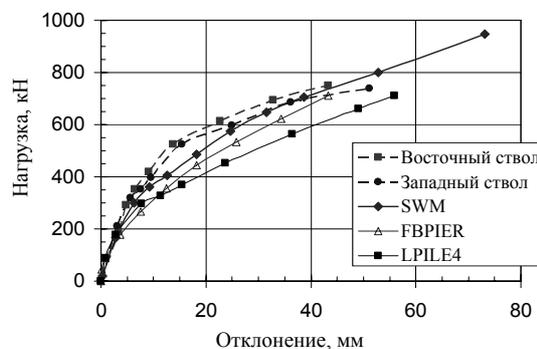


Рис. 9. Сравнение кривых «нагрузка–отклонение от вертикали» для буровых стволов, построенных по данным измерений и расчетов

Кривая «нагрузка–отклонение» для бурового ствола диаметром 1,2 м была построена по программе LPILE с использованием той же модели грунта, что и для трубчатой сваи диаметром 324 м. Рассчитанная нагрузка примерно на 25...30% меньше, чем измеренная (см. рис. 9). Результаты, полученные при использовании программы SWM, лучше соответствуют данным измерения. Кривая, полученная по программе FBPIER, лежит между кривыми LPILE и SWM. Подобное расхождение является результатом нескольких факторов: 1 – в ходе испытаний использовался ствол большего диаметра, чем при анализе; 2 – измеренная величина сопротивления грунта для ствола большого диаметра была больше вычисленной; 3 – между нелинейным поведением железобетона и его модели существовали различия. Отметим, что мы располагаем

относительно небольшим объемом данных об испытании буровых стволов большого диаметра, и проведенное испытание должно помочь в совершенствовании методов расчета сопротивления по боковой поверхности этих фундаментов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показана возможность безопасного и экономически выгодного сооружения фундаментов на буровых стволах методом погружения осцилляторных обсадных труб в неоднородные слои суглинков и песка.

Эффект взаимодействия в группе свай, расположенных на небольшом расстоянии друг от друга, приводит к уменьшению сопротивления по боковой поверхности. Это является их существенным недостатком по сравнению с отдельными стволами большого диаметра.

Параметры кустового эффекта можно вычислить при помощи p -множителей. Тем не менее методы анализа буровых стволов большого диаметра еще не являются достаточно точными и требуют дополнительной доработки.

Благодарности

Финансовую поддержку данного исследования осуществлял Государственный научный фонд по гранту CMS-0100363. Компания Build, Inc. предоставила по себестоимости буровое оборудование, а компания Vecho, Inc. спонсировала сооружение буровых стволов.

Выводы, сделанные в ходе исследования, могут не отражать взгляды спонсоров.

Список литературы

1. *AASHTO* (2000). Bridge Design Specifications, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
2. *Ashour, M., Norris, G. and Pilling, P.* (2002). Strain wedge model capability of analyzing behavior of lateral loaded isolated piles, drilled shafts and pile groups. *J. of Bridge Engrg., ASCE*, 7(4), 10
3. *Brown, D.A., Morrison, C., and Reese, L.C.* 1988. Lateral load behavior of a pile group in sand, *J. Geotech. Engrg., ASCE*, 114(11), 1261–1276.
4. *Hoit, M., Hays, C., and McVay, M.* (1997). The Florida Pier analysis program methods and models for pier analysis and design. Transportation. Research Record. 1569, Trans. Research Board, Washington, D.C., 1–7.
5. *Reese, L.C. and Wang, S.T.* 1994. Documentation of computer program LPILE version 4.0 for windows, Ensoft, Inc., Austin, Texas, 365 p.
6. *Rollins, K.M., Olsen, R.J., Egbert, J.J., Olsen, K.G., Jensen, D.H., Garrett, B.H.,* (2003). Response, analysis, and design of pile groups subjected to static and dynamic lateral loads. Report No. UT-03.03, Research Div., Utah Dept. of Trans. 523 p.