

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ НАПРЯГАЮЩИХ БЕТОНОВ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ БУРОНАБИВНЫХ СВАЙ

Введение. В мировой практике свайного фундаментостроения наиболее распространенными являются буронабивные сваи, на долю которых приходится более 50% от общего объема применяемых свайных фундаментов [1], а в Италии – даже более 90% [2]. В нашей стране объем применения этих свай не превышает 12-15%. Современные технологии устройства таких свай отличаются высокой производительностью, невысоким уровнем динамических и шумовых воздействий, способностью к восприятию больших нагрузок, низкой себестоимостью строительства и другими преимуществами [3]. Однако по сравнению с забивными сваями их удельная несущая способность остается несколько ниже.

Многочисленные результаты проведенных ранее испытаний различными исследователями [4,5,6 и др.] буровых и буронабивных свай из тяжелых бетонов показывают, что боковая поверхность свай воспринимает от 60% до 90% прикладываемой к свае нагрузки, в зависимости от давления тела сваи на стенки скважины в процессе ее изготовления и работы [5,7,8]. Следовательно, обеспечение плотного контакта сваи с грунтом по всей длине является определяющим для повышения несущей способности сваи по боковой поверхности.

Для повышения эффективности использования свайных фундаментов из буронабивных свай нами предложено использовать бетон на расширяющихся цементах. Его применение обусловлено благоприятными условиями, создаваемыми грунтом для расширения и твердения бетона [9].

Для выяснения влияния расширяющегося бетона на несущую способность буронабивных свай по боковой поверхности, устраиваемых в песчаных грунтах, при действии вертикальной нагрузки, выполнены экспериментальные исследования работы моделей цилиндрических буронабивных свай в лабораторных условиях.

1 Методика экспериментальных исследований

1.1 Программа исследования и характеристика опытных образцов. Параметрическая область исследований была получена с использованием метода планирования экспериментов [10], который позволяет одновременно учесть влияние нескольких факторов на несущую способность свай по боковой поверхности (отклик) и значительно сократить число опытов. В качестве варьируемых факторов для модельных испытаний были приняты следующие конструктивные параметры: тип бетона – тяжелый (ТБ) и расширяющийся (НБ), относительное заглубление сваи ($\lambda = L / d$) при диаметре сваи (d) 50 мм и длине сваи (L) от 400 мм до 800 мм. Физико-механические характеристики грунта основания при испытаниях не варьировались, а приняты фиксированными. Основанием служил песок средней, средней плотности, маловлажный ($\rho = 1,69 \text{ г/см}^3$; $\rho_s = 2,65 \text{ г/см}^3$; $w = 0,05$; $\varphi = 36,9^\circ$; $c = 3,20 \text{ кПа}$; $E = 8,6 \text{ МПа}$).

Для двухфакторного эксперимента все возможные комбинации будут исчерпаны четырьмя опытами, проведенными на нижнем и верхнем уровнях. Для достоверной оценки результатов испытаний и учета их однородности (с учетом изменчивости свойств материалов) испытания на каждом уровне проведены с двух-, реже с трехкратной повторяемостью.

1.2 Материалы для изготовления моделей свай. До проведения экспериментов проведены предварительные исследования расширяющихся цементах и четырех составов бетонов на них. Процентное соотношение составляющих определяли на основании подбора состава вяжущего, обеспечивающего максимальную величину свободного расширения и конструктивную прочность.

1.2.1 Напрягающий цемент. Цемент изготавливался механическим смешиванием в шаровой мельнице следующих составляющих:

- портландцемент бездобавочный (ПЦ) марки М500 ДО;

- глиноземистый цемент (ГЦ) марки М40;
 - гипс природный молотый (Г);
 - расширяющийся сульфоалюминатный модификатор РСАМ (РД).
- Основные характеристики рассмотренных составов расширяющихся цементах (табл.1) были определены на образцах мелкозернистого бетона с соотношением расширяющегося цемента и песка 1:1. Водоцементное отношение, принятое для всех составов, составляло 0,4. В соответствии со стандартными условиями испытаний [11] образцы после первых суток твердения в воздушно-сухих условиях необходимо поместить в воду. Так как грунт по своим прочностным и деформационным характеристикам значительно отличается от материала опалубки, то были изменены условия проведения опыта и образцы помещались в воду через 7-8 часов после их бетонирования. Результаты измерения свободного расширения расширяющихся цементах в условиях водного хранения представлены на рис.1.

Таблица 1. Основные характеристики расширяющегося цемента

Серия	Состав ПЦ:ГЦ:Г:РД, % по массе	Характеристики			
		Линейное расширение, %	Само-напряжение, Н/мм ²	Прочность на сжатие, МПа.	
				8 часов	28 суток
Ц1	63:15:12:10	3,1*	1,7*	2,0	-*
Ц2	72:12:9:7	1,7*	1,5*	2,2	-*
Ц3	69:19:12:0	4,8	1,0	2,6	15,2
Ц4	74:15:11:0	2,9	1,6	3,0	24,8

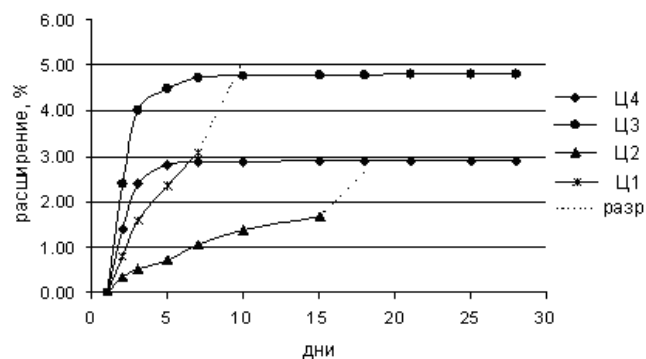


Рис. 1. Свободное расширение расширяющихся цементах

1.2.2 Бетонная смесь. Состав бетонных смесей для моделей свай подбирался на основе стандартных методик. При приготовлении бетонной смеси в качестве заполнителей для бетонов использовали гранитный щебень фракции 5...10 мм и песок с модулем крупности $M_k = 2,32$. Водо-цементное отношение для всех приготовленных бетонов составляло 0,4. Для получения требуемой подвижности использовался гиперпластификатор ГП1. Состав бетонных смесей на 1 м^3 в сухом состоянии представлен в табл. 2. Способ приготовления бетонной смеси – ручной.

Таблица 2. Расход материалов на 1 м^3 бетонной смеси в сухом состоянии

Цемент, кг	Щебень, кг	Песок, кг	Вода, л	ГП1, л
500	700	1020	215	3,82

Для определения прочности и измерения деформаций расширения расширяющихся бетонов были забетонированы цилиндры. В каче-

стве формы для бетонирования цилиндров использовался песчаный грунт, помещенный в деревянные и металлические лотки, подготовка и характеристики которого соответствовали основанию моделей буронабивных свай. Образцы изготавливали диаметром 60 мм и 110 мм, высотой 120 мм и 150 мм соответственно. Для измерения деформаций расширения к лоткам крепились индикаторы часового типа с ценой деления 0,01 мм. Два индикатора располагались с диаметрально противоположных сторон цилиндра, и один индикатор устанавливался на верхнее основание. Это позволяло измерять деформации бетона с момента укладки бетонной смеси (рис. 2). На 28 сутки осуществлялось испытание бетонных образцов на сжатие (табл. 3). Как видно из графиков (рис. 3), расширение напрягающего бетона составляет от 1,4 до 2,2% первоначального размера образца.

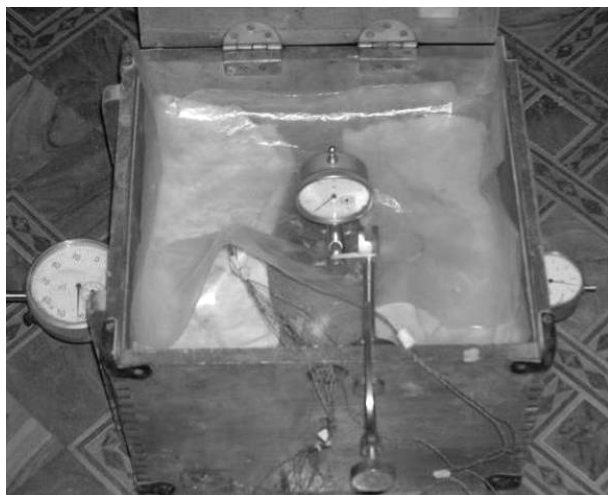


Рис. 2. Измерение деформации расширения бетонных цилиндров Ø60 мм и 110 мм

Таблица 3. Результаты испытания цилиндров на сжатие

Тип бетона	ТБ	НБ1	НБ2	НБ3	НБ4
Средняя прочность в возрасте 28 суток, МПа	38,2	2,4	8,2	5,1	13,8

1.3 Подготовка основания и моделей свай. Испытания проведены в двух грунтовых лотках с искусственно подготовленным основанием. Перед укладкой в лотки грунт тщательно перелопачивался с добавлением необходимого количества воды для достижения оптимальной влажности уплотнения $W_{opt} = 6-8\%$. Далее производили укладку грунта слоями толщиной 8-10 см. После отсыпки каждого слоя грунт тщательно уплотняли ручной трамбовкой. Трамбование производилось по периметру лотка равномерными ударами с постепенным приближением к формообразователю буронабивной сваи. Контроль равномерности уплотнения производили на каждом слое с помощью статического вдавливания микропенетromетра. Отсчеты

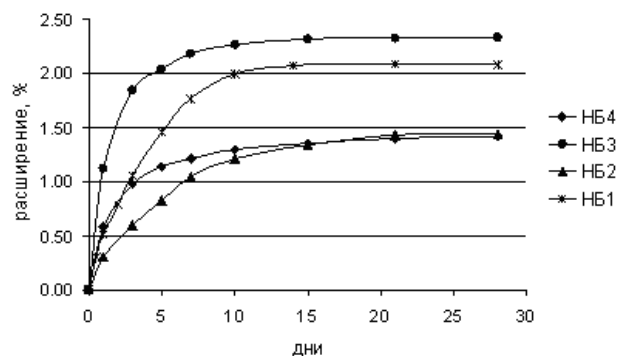


Рис. 3. Деформации расширения напрягающих бетонов

по микропенетromетру заранее были протарированы на кольцах с известной плотностью грунта. Определение физико-механических свойств грунтов выполняли в каждом лотке в уровнях через 1/3 длины сваи стандартными методами. Для сохранности заданной влажности грунт в лотках укрывали полиэтиленовой пленкой.

Так как при устройстве буронабивных и буровых свай по большинству технологических схем в процессе бурения скважины уплотнения стенок скважины не происходит, то для устройства скважин модельных свай, при укладке грунта в лотки, использовали формообразователи из полиэтиленовых труб Ø50 мм. Трубы устанавливались по заранее размеченной сетке до укладки первого слоя грунта и фиксировались в вертикальном положении. Расстояние между боковыми гранями труб назначалось таким образом, чтобы исключить взаимовлияние моделей свай друг на друга. Контроль их вертикальности производили после укладки очередного слоя грунта с использованием уровня, а расстояние между моделями контролировали шаблонами.

После формирования грунтового массива трубы извлекали из грунта и в скважину устанавливали арматуру Ø5 мм класса S500 с отогнутым верхним концом для соединения с тросом выдергивающей установки. Затем скважину заполняли бетонами литой консистенции, следующих типов:

- тяжелый бетон (ТБ);
- бетон на основе напрягающего цемента ЦЗ (НБ3).

Следует отметить, что в результате расширения в продольном и поперечном направлении свай, выполненных из напрягающих бетонов, на поверхности грунта вокруг моделей образывались неравномерно расположенные радиальные трещины (рис. 4). Длина распространения трещин от сваи составляла 60-80 мм или до 1,5 ее диаметра.



Рис. 4. Образование трещин на поверхности грунта на стадии расширения

1.4 Испытание моделей буронабивных свай. По истечении месяца, необходимого для набора прочности бетона, были проведены испытания вертикальной выдергивающей нагрузкой. Испытания проводились в двух лотках с искусственно подготовленным основанием. При этом измеряли осевое перемещение головы модели

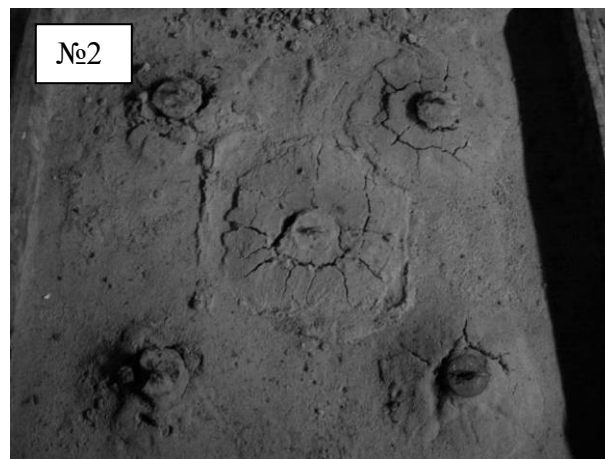


Рис. 5. Общий вид лотков с забетонированными моделями до и после испытаний

сваи в вертикальном направлении и соответствующие им усилия. В каждом лотке испытывали одновременно только одну модель сваи. Рабочие размеры лотка №1 1200×1000×1050(н) мм для моделей свай длиной 800 мм и лотка №2 – 1000×1000×500(н) мм для моделей свай длиной 400 мм (рис. 5).

По верху лотка устанавливали нагрузочную раму, имеющую возможность свободного перемещения по направляющим, и обеспечивающую возможность проведения испытаний как на вдавливающие, так и выдергивающие вертикальные нагрузки (рис. 6). Центрирование рамы над моделью осуществлялось при помощи отвеса. Вырывающее усилие передавалось через стальной трос и систему блоков от рычага в виде кулисы закрепленной в торце рамы. Соотношение плеч рычага 1:10. После подсоединения троса к модели устанавливали два прогибомера 6ПАО с ценой деления 0,01 мм. Загрузку производили гириями ступенями в 1/15-1/20 предполагаемой максимальной вырывающей нагрузки.

После приложения ступени нагрузки замерялись вертикальные перемещения верха сваи. Отсчеты по прогибомерам фиксировали через 5; 15; 25; 40; 60; 90 мин после приложения нагрузки. Следующую ступень нагрузки прикладывали после достижения условной стабилизации грунта, соответствующей приросту перемещений не более 0,1 мм за 0,5 часа.

Опыт считался завершенным, когда происходила резкая потеря удерживающей способности грунта основания с образованием выпора и выскальзыванием сваи.



Рис. 6. Испытание моделей буронабивных свай

2. Результаты эксперимента. В проведенных опытах выпор грунта происходил по концентрическим окружностям с образованием равномерно расположенных радиальных трещин, что свидетельствует о вертикальном приложении нагрузки к модели сваи.

После осмотра извлеченных свай из грунта было установлено, что их боковые поверхности покрыты сплошным слоем песка, что связано с проникновением цементного молока в грунт контактного слоя и его приклейкой к модели сваи. Таким образом, срыв сваи происходил только из-за сдвига грунта по грунту.

По результатам серии испытаний построены графики, характеризующие зависимость вертикального перемещения сваи от усилия, воспринимаемого ее боковой поверхностью (рис. 7).

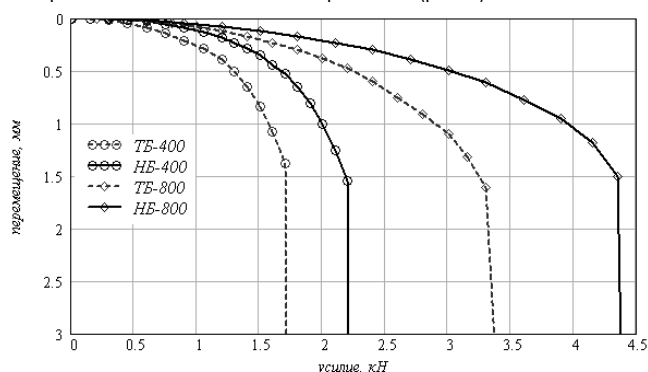


Рис. 7. Графики испытания моделей свай

На основании экспериментальных данных получено следующее уравнение регрессии:

$$Y_{Fdu} = -28,75 + 23,44 X_{\lambda} + 36,25X_{\%} + 0,36X_{\lambda} X_{\%}, (1)$$

где Y_{Fdu} – усилие воспринимаемое боковой поверхностью сваи, кН;

X_{λ} – относительное заглубление сваи;

$X_{\%}$ – линейное расширение тела сваи, %.

Уравнение (1) позволяет оценить влияние каждого варьируемого фактора в рассматриваемом диапазоне на величину усилия, воспринимаемого боковой поверхностью модели. Адекватность уравнения регрессии обусловлена тем, что ошибка между экспериментальными и расчетными данными при определении усилий, воспринимаемых боковой поверхностью сваи, не превышает 5%, что подтвердила дополнительная проверка по F-критерию Фишера.

Заключение. Проведенные испытания модельных свай на выдергивающую вертикальную нагрузку позволили выделить из общих усилий долю предельных контактных сопротивлений сдвигу по боковой поверхности сваи и оценить влияние типа бетона на эту величину. Использование напрягающего бетона обеспечило плотный контакт сваи с грунтом и, следовательно, увеличило силы трения грунта по боковой поверхности сваи до 30%. Это свидетельствует о целесообразности применения напрягающих бетонов для изготовления буронабивных свай.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Van Impe, W.F. Belgian geotechnics' experts research on screw piles. Belgian Screw Pile Technology – design and recent development. Maertens & Huybrechts eds., Balkema, Rotterdam, 2003.
2. Mandolini A., Load tests on piles – Italian practice and perspective. Workshop: Quasi-static pile testing. Delft University of Technology, 2004
3. Ермашов, В.П. Буропресваи: несущая способность и целесообразность применения в Беларуси / В.П. Ермашов, Н.В Тимофей, В.И. Новик // Строительная наука и техника. - 2005. - №2. - С. 56-63.
4. Бахолдин, Б.В. Экспериментальные исследования буронабивных полых свай / Б.В. Бахолдин, В.И Берман, И.В. Михайленко // Основания, фундаменты и механика грунтов.– 1988.– №2. – с.14-16.
5. Григорян, А.А. Экспериментальные исследования распределения напряжений в буронабивных сваях значительных размеров/ А.А Григорян, И.И Хабибулин // Основания, фундаменты и механика грунтов.– 1980.– №3. – с.18-21.
6. Дзагов, А.М. Разработка способа расчета сопротивления оснований буронабивных свай с учетом процесса твердения бетона / А.М. Дзагов. – ЛИСИ, 1990.– 192с.
7. Лапшин, Ф.К. Расчет свай по предельным состояниям / Ф.К. Лапшин. – Изд-во Саратовского университета, 1979. – 152 с.
8. Мамонов, В.М. Несущая способность буронабивных свай, изготовленных из бетонов различного состава/ В.М. Мамонов, А.М. Дзагов, П.М. Ермошкин // Основания, фундаменты и механика грунтов.– 1989.– №1. – с.11-14.
9. 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. конференции. – Гомель: БелГУТ, 2008. – с.251-252.
10. Золотухин, Ю.Д. Испытание сооружений: Справочное пособие / Ю.Д. Золотухин и др. – Мн.: Высш. шк., 1992. – 272 с.
11. СТБ 1335 – 2002. Цемент напрягающий. Технические условия. – Мн.: Минстройархитектуры, 2002. – 11 с.

Материал поступил в редакцию 22.01.09

NEVEJKOV A.N., POJTA P.S. Self-stressed Concrete Efficiency for Bored Piles Fabrication

The paper presents modeling results for bored piles work. These results shown, that most effective is the device of self-stressed concrete bored piles bases.

УДК 624.1+624.015:725.4

Пойта П.С., Шведовский П.В.

ОЦЕНКА МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЗАБИВНЫХ СВАЙ

Введение. Несущая способность свая определяется суммой сопротивлений грунта под острием сваи и по ее боковой поверхности [1].

Сравнение норм и стандартов различных стран [1, 2, 5] показывает наличие существенных отличий зависимости расчетных сопротивлений грунта (R и f) в плоскости острия сваи и по боковой поверхности от плотности, влажности и других факторов, а также колебания их численных значений в достаточно больших пределах.

Погрешность в определении несущей способности свай по оценке многих специалистов составляет до 50%.

В то же время анализ результатов испытаний свай в самых разнообразных грунтовых условиях свидетельствует о том, что 50...80% несущей способности сваи формируется за счет трения грунта по боковой поверхности сваи [2]. Поэтому исходное состояние грунта, способ устройства сваи имеют большое значение в оценке ее несущей способности. Рассматривая работу забивных свай и технологические условия, нами выявлено, что глубина погружения сваи и грунтовые условия несомненно оказывают большое влияние на формирование зоны уплотнения грунта в околоствольном пространстве. Все это говорит о необходимости совершенствования методов определения несущей способности свай.

Анализ и методика исследований. Анализ существующих подходов к определению несущей способности забивной свая за счет сил трения грунта по боковой поверхности показывает, что в расчетах не в полной мере учитывается исходное состояние грунта и практически совсем не учитывается его состояние после погружения сваи и формирование уплотненной зоны вокруг ствола сваи. В качестве примера рассмотрим значения f для забивной сваи сечением 0,3×0,3 м, погруженной в мелкий песок на глубину 10,0 м (рис. 1).

В соответствии с таблицей 6.2 [1] значения f зависят от вида грунта и глубины погружения сваи. Но согласно [3] пески мелкие, средней плотности характеризуются коэффициентом пористости от 0,6 до 0,75. В этом диапазоне коэффициента пористости прочностные характеристики песка мелкого средней плотности значительно меняются:

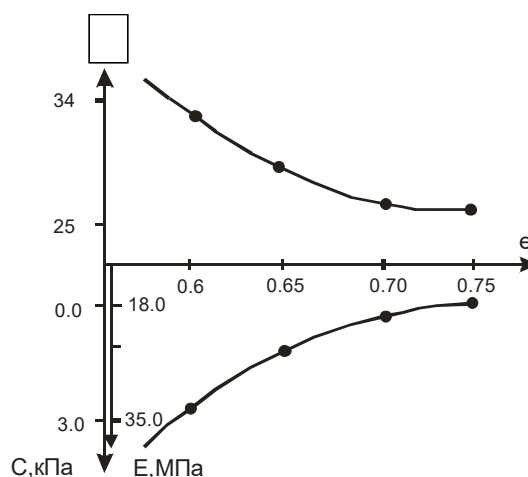


Рис. 1. Изменение φ , C , E в зависимости от e

- угол внутреннего трения: 33°...28°;
- удельное сцепление: 3,0 кПа...0,0;
- модуль деформации: 35 МПа...18 МПа.

Однако таблица 6,2 [1] этих изменений не учитывает, и расчет несущей способности производится для одного фиксированного значения e . С другой стороны, в околоствольном пространстве радиусом около $3d$ (d – диаметр круглой или сторона квадратной сваи) имеет место увеличение плотности грунта (в 1,1...1,2 раза), уменьшение пористости до 9% и возрастание модуля деформации в 2,0...4,0 раза.

Значения φ грунта в околоствольном пространстве также увеличиваются. Вместе с тем, при забивке свай происходит разрушение структурных связей. Таким образом, структура грунта подвергается значительным изменениям. С одной стороны, забивка свай вызывает уплотнение грунта и связанное с ним упрочнение, с другой – разрушение структурных и водно-коллоидных связей.