

№3, 2000

О Несущей способности буровых свай в инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга

Улицкий В.М., Парамонов В.Н., Шашкин А.Г.

При возведении новых зданий и реконструкции старых в примыкании к существующей застройке одной из основных проблем строительства является исключение недопустимых дополнительных деформаций примыкающих зданий. В плане статической работы основания наиболее безопасными как для существующих, так и для проектируемых зданий оказываются свайные фундаменты, прорезающие толщу слабых глинистых грунтов и опирающиеся на относительно надежные моренные отложения или отложения венда. Однако при выборе свайного варианта фундаментов возникает проблема исключения развития недопустимых осадков примыкающих зданий на стадии устройства свайного поля. Наиболее щадящими в условиях Санкт-Петербурга являются сваи, изготовленные по технологии типа "Bauer", "Cazagrande". При усилении фундаментов часто устраиваются сваи по буроинъекционной технологии.

Накопленный опыт испытаний таких свай свидетельствует о том, что несущая способность свай, рассчитанная по формулам и таблицам СНиП 2.02.03-85, оказывается в 2-3 раза ниже фактической несущей способности, определенной в результате статических испытаний [1], [2]. В большинстве же случаев фактическую несущую способность свай не удавалось установить, так как выбор оборудования для статических испытаний осуществлялся, как правило, исходя из рассчитанной несущей способности по СНиП.

Для корректного предварительного назначения несущей способности буровых свай нами выполнен анализ результатов испытаний 73 свай диаметром от 151 до 750 мм длиной от 4 до 36 м и сравнение с расчетными значениями. Выбор расчетного аппарата произведен в рамках СНиП, т.е. в рамках, доступных рядовому проектировщику.

При расчете несущей способности свай были рассмотрены следующие рабочие гипотезы:

Гипотеза 1 (методика СНиП): при изготовлении буровых свай происходит нарушение природной структуры грунта; дополнительное уплотнение грунта (характерное для свай, погружаемых в грунт в готовом виде) отсутствует. Эти предпосылки положены в основу методики СНиП 2.02.03-85, где несущая способность буровых свай определяется по формуле (11): расчетное сопротивление под нижним концом определяется по табл. 7, расчетное сопротивление на боковой поверхности - по табл. 2 с учетом понижающих коэффициентов по табл. 5.

Гипотеза 2: при изготовлении буровых свай не происходит нарушения природной структуры; грунт вокруг сваи уплотняется за счет разницы удельного веса бетона и грунта. Такие базовые предпосылки лежат в основе определения несущей способности забивных свай по формуле (8) СНиП 2.02.03-85: расчетное сопротивление под нижним концом определяется по табл. 1, расчетное сопротивление на боковой поверхности - по табл. 2 без понижающих коэффициентов.

Гипотеза 3: Свая работает как глубокая опора; при изготовлении происходит нарушение природной структуры. Несущая способность определяется как сумма составляющих по нижнему концу и по боковой поверхности. Несущая способность по нижнему концу определяется по формуле (16) СНиП 2.02.01-83, несущая способность по боковой поверхности - по расчетному сопротивлению грунта из табл. 2 СНиП 2.02.03-85 с учетом понижающих коэффициентов по табл. 5 этого же СНиП.

Гипотеза 4: Свая работает как глубокая опора; нарушения природной структуры грунта

вокруг сваи не происходит. Несущая способность определяется как сумма составляющих по нижнему концу и по боковой поверхности. При этом несущая способность по нижнему концу определяется по формуле (16) СНиП 2.02.01-83, несущая способность по боковой поверхности - по расчетному сопротивлению грунта из табл. 2 СНиП 2.02.03-85 без понижающих коэффициентов.

Аналитический анализ ситуации и статистическая обработка результатов исследований включают следующие возможные объективные и субъективные ошибки:

1. Неточность данных об инженерно-геологическом напластовании грунтов. Оценка несущей способности сваи выполняется на основании инженерно-геологических данных по скважине, ближайшей к свае. При этом ближайшая скважина может оказаться на расстоянии десятков метров от сваи.

2. Естественный разброс физико-механических свойств грунтов. Как природная среда, грунты имеют существенную изменчивость свойств и в горизонтальном и в вертикальном направлениях. В связи с этим результаты статических испытаний одинаковых свай, находящихся в пределах "видимости" одной и той же скважины, могут заметно отличаться друг от друга.

4. Неточность принятых прочностных характеристик грунтов под нижними концами. В большинстве рассмотренных случаев при инженерно-геологических изысканиях прочностные характеристики грунтов принимаются по таблицам нормативных документов на основании физических характеристик.

5. Неточность определения фактической несущей способности по графикам статических испытаний (ошибки экстраполяции). Как отмечалось выше, во многих испытаниях, по которым проводился анализ, нагрузка не доводилась до срыва, а в одном из испытаний осадка составила всего 1,2 мм при нагрузке 80 т. В этих случаях ожидаемая фактическая несущая способность определялась нами условно путем экстраполяции графика "нагрузка-осадка" до ординаты 2 см. Кривая экстраполяции строилась с учетом испытаний ближайших свай либо с учетом испытаний аналогичных свай в похожих инженерно-геологических условиях.

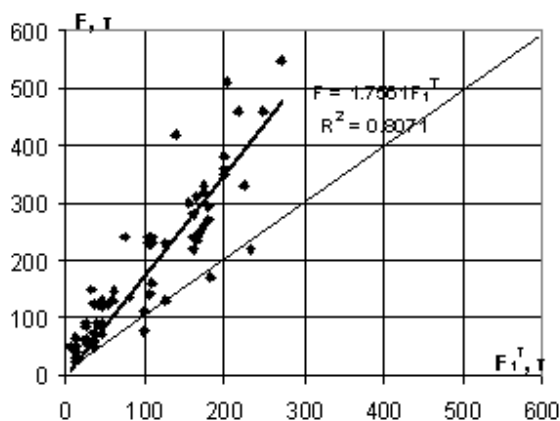


Рис. 1. Диаграмма соответствия рассчитанной несущей способности свай по гипотезе 1 и несущей способности, определенной на основании результатов статических испытаний

На рис. 1 представлена диаграмма, на которой по горизонтальной оси показана несущая способность сваи F_1^T , рассчитанная согласно гипотезе 1, а по вертикальной оси - несущая способность F (фактическая или ожидаемая), определенная по результатам статических испытаний. Диагональная тонкая линия на графике соответствует идеальному совпадению результатов расчета и испытаний. Результаты расчета и статических испытаний практически совпали только в 5 случаях (указанные случаи аномально низкой несущей способности свай по информации, полученной в СПб ГЭЭК ОФИС,

характеризуются тем, что сваи не были доведены до грунтов, принятых в проекте в качестве несущего слоя.) (т.е. в 7% рассмотренных случаев), в остальных случаях фактическая несущая способность оказалась выше рассчитанного значения. Среднеквадратическое отклонение результатов расчета от фактического значения несущей способности для данной выборки составило 107 т. Для того чтобы оценить, в какой степени метод расчета СНиП занижает несущую способность буровых свай, определим коэффициент k уравнения прямой вида $F = k \times F_1^T$ методом наименьших квадратов. Результаты статистического анализа дают величину коэффициента $k = 1,756$ при коэффициенте корреляции $R = 0,9$. Таким образом, фактическая несущая способность, в среднем, оказывается в 1,756 раза выше рассчитанной по СНиП.

Проанализируем результаты сравнения несущей способности, вычисленной по таблицам для забивных свай F_2^T (гипотеза 2) и определенной по результатам статических испытаний F (рис. 2). Сравнение свидетельствует о том, что в 49% случаев расчет несущей способности F_2^T показывает завышенное значение. Среднеквадратическое отклонение результатов расчета от фактических значений несущей способности для данной выборки составило 90 т. В наибольшей степени завышенные результаты получаются в случае опирания свай на грунты твердой консистенции. Если исключить из анализа эти точки, то среднеквадратическое отклонение расчетных значений от фактических снижается до 51 т. Определив коэффициент k уравнения прямой вида $F = k \times F_2^T$, получим, что фактическая несущая способность, в среднем, оказывается на 20% ниже рассчитанной на основании гипотезы 2 (коэффициент $k = 0,797$ при коэффициенте корреляции $R = 0,78$).

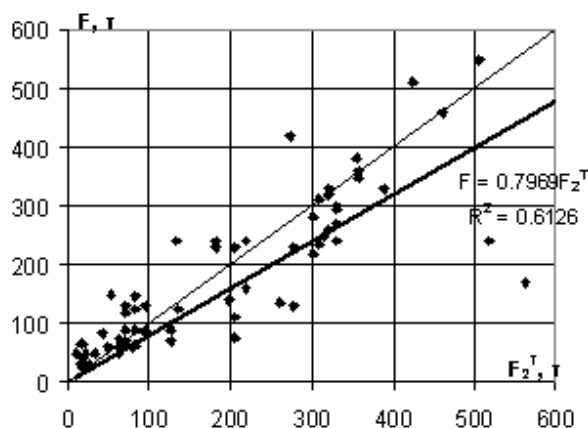


Рис. 2. Диаграмма соответствия рассчитанной несущей способности свай по гипотезе 2 и несущей способности, определенной на основании результатов статических испытаний

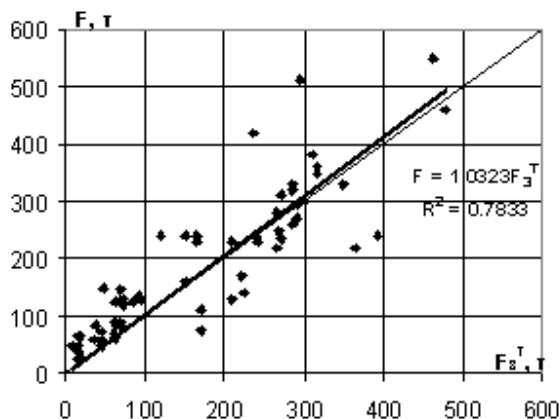


Рис. 3. Диаграмма соответствия рассчитанной несущей способности свай по гипотезе 3 и несущей способности, определенной на основании результатов статических испытаний

Следующая оценка выполнена для несущей способности F_3^T , вычисленной в соответствии с гипотезой 3 (рис. 3). При этом коэффициенты формы фундамента принимались равными единице, в противном случае расчетная несущая способность оказывается существенно выше фактической. Такая методика расчета дала завышенный прогноз несущей способности в 25% случаев, однако существенная разница между расчетными и фактическими значениями имеется лишь в 5 случаях, т.е. в 7% рассмотренных случаев. Среднеквадратическое отклонение результатов расчета от фактического значения составляет 56 т. Корреляционная прямая практически совпадает с теоретической ($k = 1,032$ при коэффициенте корреляции $R = 0,86$).

Прогноз несущей способности буровых свай без введения понижающих коэффициентов для расчетного сопротивления грунта по боковой поверхности F_4^T (гипотеза 4) показал завышение по сравнению с фактической несущей способностью в 47% случаев (рис. 4). Фактическая несущая способность, в среднем, оказывается на 11% ниже рассчитанной на основании гипотезы 4 ($k = 0,893$, коэффициент корреляции $R = 0,91$) при среднеквадратическом отклонении 55 т от теоретической прямой.

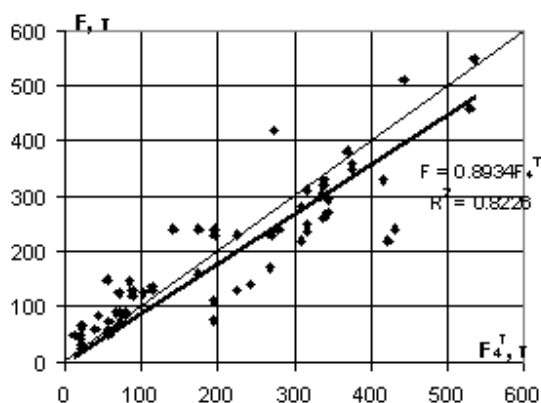


Рис. 4. Диаграмма соответствия рассчитанной несущей способности свай по гипотезе 4 и несущей способности, определенной на основании результатов статических испытаний

Необходимо заметить, что для свай малого диаметра (151 мм) и для свай малой глубины погружения (до 9 м) расчетные значения по всем гипотезам оказались ниже фактической несущей способности (рис. 5). Для свай малого диаметра эта разница, очевидно, связана с тем, что при изготовлении сваи за счет опрессовки скважины высоким давлением ее фактический диаметр может увеличиваться, что приводит к соответственному увеличению площади опирания и площади боковой поверхности по сравнению с проектными значениями. Кроме этого при изготовлении свай в песчаных грунтах вероятны локальные гидроразрывы, заполняемые раствором, что оказывает влияние на характер передачи нагрузки на основание по сравнению с теоретическим.

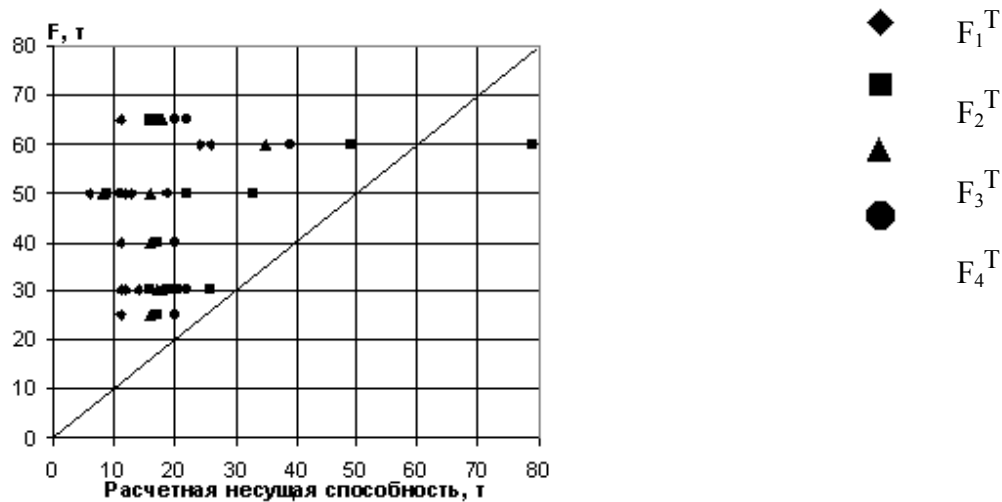


Рис. 5. Диаграмма соответствия рассчитанной несущей способности свай и несущей способности определенной на основании результатов статических испытаний для свай малого диаметра (151 мм) и для свай малой глубины погружения (до 9 м)

На основании проведенного анализа нами построены корреляционные кривые, позволяющие выполнить предварительную оценку несущей способности свай, ожидаемой при статических испытаниях.

Сравним результаты прогноза несущей способности буронабивных свай на реальных проектируемых объектах с результатами статических испытаний.

На одной из площадок запроектированы (на стадии "Проект") буронабивные сваи диаметром 620 мм. Площадка имеет следующее напластование грунтов. С поверхности залегает насыпной слой мощностью 0,9 м, под ним - пески пылеватые и мелкие мощностью 4,4 м, затем следует 11,5-метровая толща слабых озерно-ледниковых отложений, сложенных суглинками текучей консистенции. Моренные отложения залегают с глубины 17 м. В кровле находятся мягкопластичные супеси мощностью 0,8 м, под ними - тугопластичные суглинки, принятые в качестве несущего слоя основания. Исходя из расчетов осадок проектируемого здания и дополнительных осадок примыкающих зданий, минимальная требуемая глубина погружения свай составляла 20,7 м, которая и была принята в предварительном проекте.

Несущая способность сваи, рассчитанная с использованием формул и таблиц СНиП 2.02.03-85 составляет $F_1^T = 107$ т, что соответствует расчетной нагрузке $107/1,4 = 76$ т. Несущая способность сваи при использовании иных предпосылок, изложенных в настоящей статье: $F_2^T = 218$ т, $F_3^T = 150$ т, $F_4^T = 174$ т. По корреляционным кривым несущая способность, ожидавшаяся при испытаниях, составила 216...240 т. В предварительном проекте свайное поле было спроектировано на несущую способность 216 т, что соответствует расчетной нагрузке на сваю $216/1,2 = 180$ т. На площадке были испытаны 2 сваи. При испытаниях одна свая получила осадку 2 см при нагрузке 240 т, вторая при нагрузке 160 т (в последнем случае по данным технадзора не был должным образом подготовлен забой скважины). Таким образом, несущая способность одной сваи точно соответствует верхнему предсказанному пределу, несущая способность второй сваи оказалась на 56 т ниже нижнего предела.

На второй площадке под здание запроектированы буронабивные сваи диаметром 450 мм. Площадка сложена следующими грунтами. С поверхности залегает насыпной слой мощностью 2,8 м, под ним - 1,4-метровый слой торфа, пески пылеватые мощностью 1,8 м, затем следует 6,3-метровая толща слабых озерно-ледниковых отложений, сложенных текучими супесями с 0,9-метровым прослоем пылеватых песков. Моренные отложения залегают с глубины 12,3 м и представлены тугопластичной супесью, принятой в качестве несущего слоя основания. Исходя из расчетов осадок проектируемого здания и дополнительных осадок примыкающих зданий

минимальная требуемая глубина погружения свай составляла 25,5 м, которая и была принята в предварительном проекте.

Несущая способность сваи, рассчитанная с использованием формул и таблиц СНиП 2.02.03-85 составляет $F_1^E=104$ т, что соответствует расчетной нагрузке $104/1,4=74$ т. Несущая способность сваи при использовании иных предпосылок, изложенных в статье: $F_2^T=182$ т, $F_3^T=164$ т, $F_4^T=196$ т. По корреляционным кривым несущая способность, ожидавшаяся при испытаниях, составила 167...195 т. В предварительном проекте свайное поле было спроектировано на несущую способность 150 т, что соответствует расчетной нагрузке на сваю $150/1,2=125$ т. На площадке были испытаны 2 сваи. При испытаниях одна свая получила осадку 9,67 мм при нагрузке 194 т, вторая 11,18 мм при той же нагрузке. На этой нагрузке испытания были остановлены. Экстраполяция результатов испытаний до осадки 2 см позволяет предположить, что фактическая несущая способность свай составляет 230...240 т. Таким образом, несущая способность свай оказалась на 35...45 т выше верхнего предсказанного предела.

Выводы

1. Выполненный анализ свидетельствует о том, что имеется почти двукратный резерв фактической несущей способности буровых свай по сравнению с рассчитываемой по методике СНиП.

2. Наиболее достоверный расчетный прогноз несущей способности буровых свай в инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга возможен при рассмотрении работы свай как глубоких опор и использовании следующих предпосылок:

- несущая способность по острию определяется по формуле (16) СНиП 2.02.01-83 как для глубокой опоры с единичными коэффициентами формы фундамента;

- несущая способность по боковой поверхности определяется по расчетному сопротивлению грунта из табл. 2 СНиП 2.02.03-85 с учетом понижающих коэффициентов по табл. 5 этого же СНиП (как для буровых свай).

3. Предложенный метод расчета позволяет осуществить почти двукратную экономию количества дорогостоящих свай. Однако, для того, чтобы этот резерв был реализован, необходим четкий контроль качества изготовления свай, включающий геологический мониторинг забоя скважины и контроль сплошности ствола сваи.

Тематика прогноза несущей способности буронабивных свай остается актуальной для Санкт-Петербурга, настоящая статья является лишь первой попыткой систематизации и анализа результатов испытаний.

Литература

1. Бронин В.Н., Вершинин В.П., Осокин А.И., Хурамшин Р.Я., Галиопа А.А. Проектирование и устройство свайных фундаментов и разделительных стенок в условиях стесненной застройки Санкт-Петербурга //Реконструкция Санкт-Петербург-2005 /Матер. 3-го междунар. симпозиума. Ч. 5. СПб, 1995. - с. 72-77.

2. Сотников С.Н., Соловьева А.В., Зиновьева И.Д. Опыт применения буровых свай при строительстве зданий в центре Санкт-Петербурга. //Основания, фундаменты и механика грунтов. 1999. - №5. - с. 8-12.