



CONSTRUCTION AND GEOTECHNICS

Т. 12, № 3, 2021

<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>



DOI: 10.15593/2224-9826/2021.3.08

УДК 69.692.115

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РАБОТЫ ВЕРТИКАЛЬНО НАГРУЖЕННЫХ ДЛИННОМЕРНЫХ БУРОНАБИВНЫХ СВАЙ И ИХ РАСЧЕТ

А.Л. Готман^{1,2,3,4}, М.Д. Гавриков¹

¹ Российский университет транспорта, Москва, Россия

² Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

³ Научно-исследовательский, проектно-изыскательский и конструкторско-технологический институт оснований и подземных сооружений имени Н.М. Герсеванова, Москва, Россия

⁴ ООО «ПОДЗЕМПРОЕКТ», Москва, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 21 июля 2021

Принята: 04 сентября 2021

Опубликована: 30 сентября 2021

Ключевые слова:

крупногабаритные буронабивные сваи, сжатие ствола сваи, осадка крупногабаритных свай, допустимая нагрузка на сваю.

АННОТАЦИЯ

Рассматриваются результаты экспериментально-теоретических исследований и численных особенностей работы вертикально нагруженных крупногабаритных (длиной от 50 м и более) буронабивных свай. Выполнен анализ результатов испытаний методом погружного домкрата вертикально нагруженных крупногабаритных буронабивных свай диаметром 2 м, длиной 55 и 65 м в глинистых грунтах. По результатам испытаний выявлены особенности формирования сопротивления грунта под нижним концом и на боковой поверхности свай, и на этой основе дается обоснование необходимости выполнять расчет таких свай по грунту по второму предельному состоянию с учетом сжимаемости ствола сваи. Представлены численные исследования свай на вертикальную нагрузку на базе испытаний свай на реальном объекте. Приведена кинематическая схема включения в работу грунтового основания и ствола сваи по мере нагружения ее вертикальной нагрузкой. На этой основе разработана методика расчета осадки одиночной сваи и методика определения допустимой нагрузки на сваю, при которой осадка сваи не превышает допустимой для проектируемого здания. Дается пример расчета буронабивной сваи по разработанной методике.

© ПНИПУ

© Готман Альфред Леонидович – доктор технических наук, профессор, email: gotmans@mail.ru.

Гавриков Михаил Дмитриевич – аспирант, email: ga-md@yandex.com.

Alfred L. Gotman – Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: gotmans@mail.ru.

Mikhail D. Gavrikov – Postgraduate Student, email: ga-md@yandex.com.

CALCULATION OF A LARGE-SIZE BORED PILE ON A VERTICAL LOAD

A.L. Gotman^{1,2,3,4}, M.D. Gavrikov¹

¹Russian University of Transport, Moscow, Russian Federation

²Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

³Scientific Research, Design and Survey and Design and Technological Institute of Foundations and Underground Structures named after N.M. Gersevanov, Moscow, Russian Federation

⁴LLC "PODZEMPROEKT", Moscow, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 21 July 2021

Accepted: 04 September 2021

Published: 30 September 2021

Keywords:

large-size bored piles, compression of the pile trunk, sediment of large-size piles, permissible load on the pile.

ABSTRACT

paper presents results of experimental and theoretical studies of vertically loaded large bored piles (length from 50 meters and more) performance. The analysis of O-cell load tests on vertically loaded large bored piles with 2m diameter, 55 and 65 meters length, in clay soils is carried out. According to the test results, features of an end and a shaft resistance (formation) were detected, and on this basis, a justification of necessity to calculate such piles according to the second limit state is given, taking into account the compressibility of the pile trunk. The kinematic scheme of inclusion in the work of the soil base and the pile trunk as it is loaded with a vertical load is presented. A shown software research of piles based on pile tests on a real object. On this basis, a method for calculating the permissible settlement of a single pile and a method for determining the permissible load on the pile, at which the setting of the pile does not exceed the permissible settlement for the designed building, has been developed. An example of calculating a bored pile according to the developed method is given.

© PNRPU

Введение

В настоящее время буронабивные сваи широко применяются в строительстве объектов различного назначения как в России, так и за рубежом. За последние 50–60 лет геотехниками выполнен большой объем экспериментально-теоретических исследований вертикально нагруженных буронабивных свай и разработан ряд методов их расчета. При этом за их основу принята общеизвестная концепция, в соответствии с которой сопротивление вертикально нагруженной буронабивной сваи по грунту формируется за счет сопротивления грунта на боковой поверхности сваи и под ее нижним концом [1, 2]. При этом предельное состояние основания сваи наступает сначала на боковой поверхности при определенной осадке (как правило, небольшой, в пределах 1–2 см), получившей название «сдвиговой» осадки, затем, после увеличения нагрузки до некоторой величины, достигается предельное состояние основания под нижним концом сваи, характеризующееся незатухающей осадкой сваи без увеличения нагрузки. Эта нагрузка принимается за предельную. Исходя из этого, расчет сваи по грунту осуществляется с использованием двухчленной формулы, представленной в нормативном документе по проектированию свайных фундаментов.

Расчет несущей способности свай по грунту базируется на этой физической схеме работы сваи и основан на использовании двухчленной формулы, представленной в нормативном документе по проектированию свайных фундаментов. При этом расчетное сопротивление грунта трению на боковой поверхности сваи и под ее нижним концом определяется по различным методикам, в том числе по эмпирическим формулам [3] по данным статического зондирования [4, 5], по физическим характеристикам [6] по теории предельного равновесия [7]. При этом как постулат принимается, что предельное состояние по грунту наступает при осадках, меньших допускаемых по нормам, на основании чего расчет

свай по грунту осуществляется по первому предельному состоянию – по несущей способности грунта основания. Осадка, при которой наступает предельное состояние основания сваи, может существенно отличаться в зависимости от грунтовых условий, формы ствола сваи и ее геометрических размеров. В соответствии с расчетной схемой А.А. Григорян [8] несущая способность сваи формируется за счет сдвигов в области нижнего конца сваи по фиксированным наклонным поверхностям. Следует отметить также методы расчета свай по предельно допускаемым деформациям [9]. В работе [10] представлена методика расчета осадки буронабивной сваи, однако там не учитывается сжатие ствола сваи.

Такой подход хорошо обоснован для массово применяемых в строительстве свай длиной до 20–25 м. Однако в настоящее время все чаще находят применение крупноразмерные буронабивные сваи диаметром 1,0–2,0 м длиной 50 м и более – до 100 м [11]. Такие сваи применяются при строительстве высотных зданий, промышленных высоких башен, мачт и мостов, характеризуемых большими (до 5000 тс на сваю) нагрузками, а также в сложных грунтовых условиях, например, когда прочные несущие слои грунта залегают на большой глубине.

Работа длинных буронабивных свай под нагрузкой существенно отличается от стандартных относительно коротких (длиной до 20–25 м) свай, и существующие методы расчета для таких свай не применимы. Особенностью длинных свай является то, что при действии вертикальной нагрузки происходит сжатие ствола сваи, и величина деформации ствола сваи может достигать 4–5 см, что требует учета при их расчете. Кроме того, статические испытания таких свай по стандартной методике технически невыполнимы, что не позволяет непосредственно по данным статических испытаний получить график «нагрузка – осадка» для оценки их осадки и несущей способности. Испытание таких свай осуществляется по специальной методике погружного домкрата (метод Остерберга) [12], по результатам которого определяются параметры сопротивления грунта на боковой поверхности сваи и под ее нижним концом.

По результатам таких испытаний невозможно получить зависимость «нагрузка – осадка» для сваи в целом, однако параметры сопротивления грунта на боковой поверхности сваи и под ее нижним концом могут быть использованы для анализа напряженно-деформированного состояния системы «свая – грунтовое основание» на разных стадиях нагружения вертикальной нагрузкой.

В связи с этим возникает необходимость исследования особенностей поведения крупноразмерных свай под действием вертикальной нагрузки и разработки методики расчета с учетом этих особенностей.

Результаты экспериментальных исследований

С целью выявления особенностей деформирования длинномерных буронабивных свай при нагружении вертикальной нагрузкой рассмотрим результаты испытания свай по методике погружного домкрата (метод Остерберга), изложенной в работе [11]. Принципиальная схема испытания сваи по этой методике представлена на рис. 1. Испытание производилось следующим образом: сначала проводилось испытание нижним домкратом для определения сопротивления грунта под нижним концом сваи, после чего переходили к испытанию верхним домкратом для получения результатов по сопротивлению грунта на боковой поверхности сваи. На опытной площадке выполнены испытания двух буронабивных свай диаметром 2 м, длиной 55 и 65 м.

Грунтовые условия опытной площадки следующие:

- с поверхности на глубину до 14 м залегают ленточные глины твердой консистенции, $\varphi = 190$, $C = 0,2$ МПа, $E = 30$ МПа;
- ниже, до глубины 19 м, – моренные глины твердой консистенции, $\varphi = 260$, $C = 0,38$ МПа, $E = 100$ МПа;
- ниже, до глубины 75 м, – вендские глины твердой консистенции, $\varphi = 260$, $C = 0,85$ МПа, $E = 200$ МПа.

Результаты испытаний представлены на рис. 2.

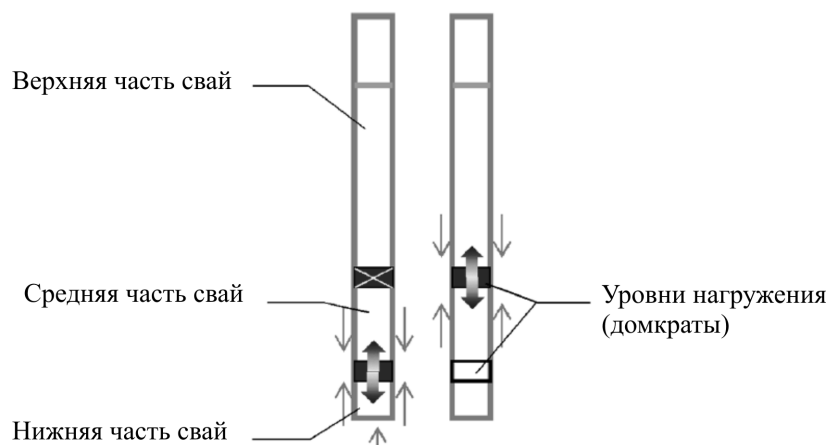


Рис. 1. Схема испытания свай методом погружного домкрата
 Fig. 1. The scheme of testing piles by the method of a lowering jack

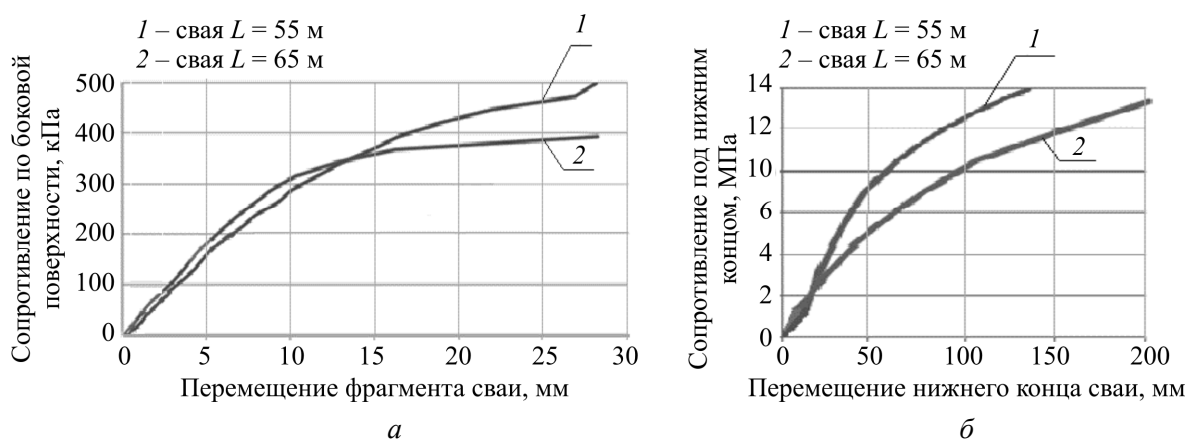


Рис. 2. Удельное сопротивление грунта по боковой поверхности: а – сопротивление грунта под пятой сваи; б – в зависимости от перемещения

Fig. 2. The specific resistance of the soil along the side surface (graph – a), the resistance of the soil under the fifth pile (graph – b), depending on the precipitation

Результаты испытаний свай позволяют анализировать отдельно закономерности формирования сил трения на боковой поверхности сваи и сопротивления грунта под ее нижним концом во всем диапазоне вертикальной нагрузки. Так, из графиков на рис. 2, а, следует, что увеличение сопротивления трению на боковой поверхности сваи завершается при перемещениях 10–15 мм, т.е. при такой осадке полностью реализуется сопротивление грунта трению. Это подтверждает данные, полученные для коротких свай [13], для которых «сдвиговая осадка» составляет 5–15 мм.

На рис. 2, б, представлены графики зависимости осадки нижнего конца сваи от сопротивления грунта под ее нижним концом. Как видим, сопротивление грунта увеличивается линейно во всем диапазоне осадок, вплоть до осадки 150–200 мм без признаков наступления предельного состояния.

Исходя из этого можно сформулировать концепцию закономерности формирования осадки головы сваи при действии вертикальной нагрузки.

Осадка головы сваи включает следующие составляющие:

- сжатие ствола сваи, которое для длинных свай может достигать 4–6 см;
- осадка нижнего конца сваи, величина которой более 15–20 см без наступления предельного состояния основания под пятой сваи;
- осадка за счет деформации околосвайного грунта, которая может достигать 2–3 см и более.

Таким образом, суммарная осадка сваи может достигать 20 см и более без наступления предельного состояния основания под нижним ее концом, что значительно больше допускаемой нормами осадки (10–15 см) для большинства зданий и сооружений.

Из этого следует, что при расчете таких свай приоритетным является расчет осадки сваи.

Численное моделирование

Целью расчета является определение напряженно-деформированного состояния системы «свая – грунтовое основание», т.е. характерные деформации околосвайного грунта и сваи.

Метод исследования: плоская, асимметричная модель свайного основания в программном комплексе Plaxis 2D.

Исходные данные: буронабивная свая длиной 65 м, диаметр поперечного сечения 2 м, материал сваи – тяжелый бетон В40. Физико-механические характеристики грунтов соответствуют грунтовым условиям площадки, на которой были выполнены испытания сваи методом погружного домкрата, представленным выше. Модель грунта – линейно упругая. Угол трения грунта по материалу в зоне интерфейсных участков был принят 0,6 для всех грунтов

Рассмотрим результаты расчетов на примере испытанной сваи. Исходя из результатов, расчет был построен график перемещений от нагрузки на различных участках сваи. Нагрузка задавалась с шагом 1/10 от предельной нагрузки 12 200 тс, определенной предварительным расчетом по данным эксперимента.

На рис. 3 представлены графики, отражающие зависимость осадки различных участков сваи и околосвайного грунта от вертикальной нагрузки.

На основании анализа соотношении осадок сваи и грунта на уровне оголовка и пяты сваи можно сказать следующее:

- до нагрузки 10 980 тс и соответствующей осадки 160 мм зависимость на графиках «нагрузка – осадка» головы и пяты сваи являются линейными. Затем линейность нарушается, и осадка растет практически без увеличения нагрузки;
- при нагрузке 10 980 тс, которую можно условно принять за предельную, разница между осадками головы и пяты сваи 45 мм, и это значение соответствует величине сжатия ствола сваи;
- кроме того, осадка сваи при действии вертикальной нагрузки сопровождается осадкой околосвайного грунта, которая составляет в уровне головы сваи 69 мм, а в уровне пяты сваи 45 мм;

– осадка околосвайного грунта в уровне оголовка сваи происходит до нагрузки 6100 тс и осадки оголовка сваи 86 мм, после чего осадка с возрастанием нагрузки не увеличивается.

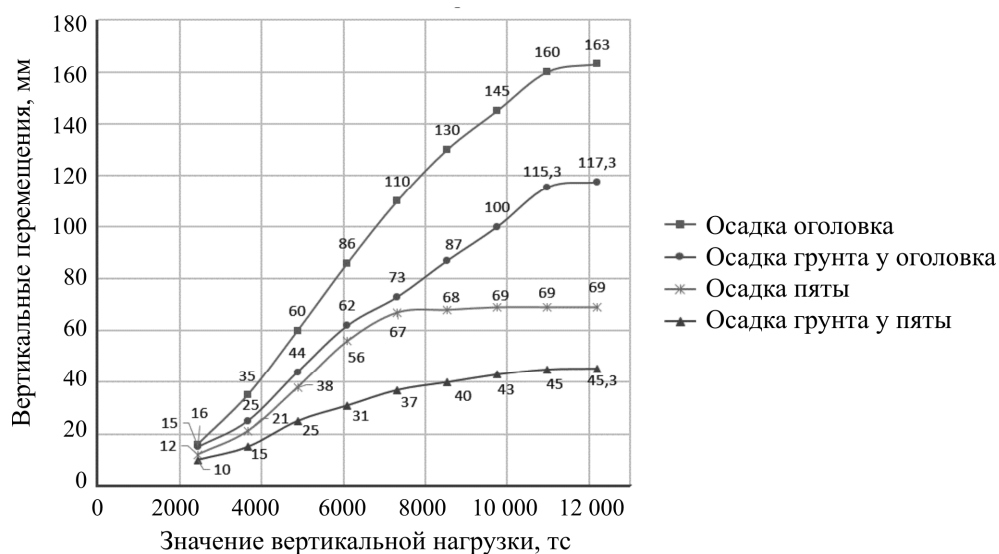


Рис. 3. Графики «нагрузка – осадка» участков свай при действии вертикальной нагрузки
Fig. 3. Graphs of «load – sediment» of pile sections when loading parts from a vertical load

В этот момент разница между осадкой головы сваи 86 мм и осадкой околосвайного грунта 62 мм составляет 24 мм, что соответствует величине сдвиговой осадке, т.е. осадке, при которой полностью реализуется трение по боковой поверхности сваи.

Осадка околосвайного грунта в уровне пяты сваи составила при этой нагрузке 31 мм из чего следует, что за счёт сжатия ствола сваи на величину 45 мм происходит сжатия околосвайного грунта в пределах длины на 31 мм (разница между сжатием грунта в уровне головы сваи и ее нижнего конца).

Исходя из данных на графике, при нагрузке 10 980 тс осадка головы сваи относительно околосвайного грунта составляет 91 мм, а пяты сваи – 70 мм.

Следует также отметить, что полная реализация трения (реализация предельного сопротивления на боковой поверхности сваи) происходит при осадке головы сваи 86 мм, причем из них осадка 24 мм происходит за счёт сдвига сваи относительно грунта, а 62 мм за счет осадки околосвайного грунта.

Таким образом, из результата расчета можно сделать следующие выводы. Осадка головы сваи складывается из следующих составляющих:

- сжатие ствола сваи – 45 мм;
- осадка околосвайного грунта в уровне пяты сваи – 45 мм;
- осадка за счёт сжатия грунта под пятой сваи – 70 мм.

Суммарная осадка оголовка сваи составляет 160 мм.

Метод расчета

Рассмотрим механизм формирования напряженно-деформированного состояния системы «свая – грунтовое основание». Кинематическая схема включения в работу вертикально нагруженной длинной сваи и околосвайного грунта по мере увеличения вертикальной нагрузки представлена на рис. 4.

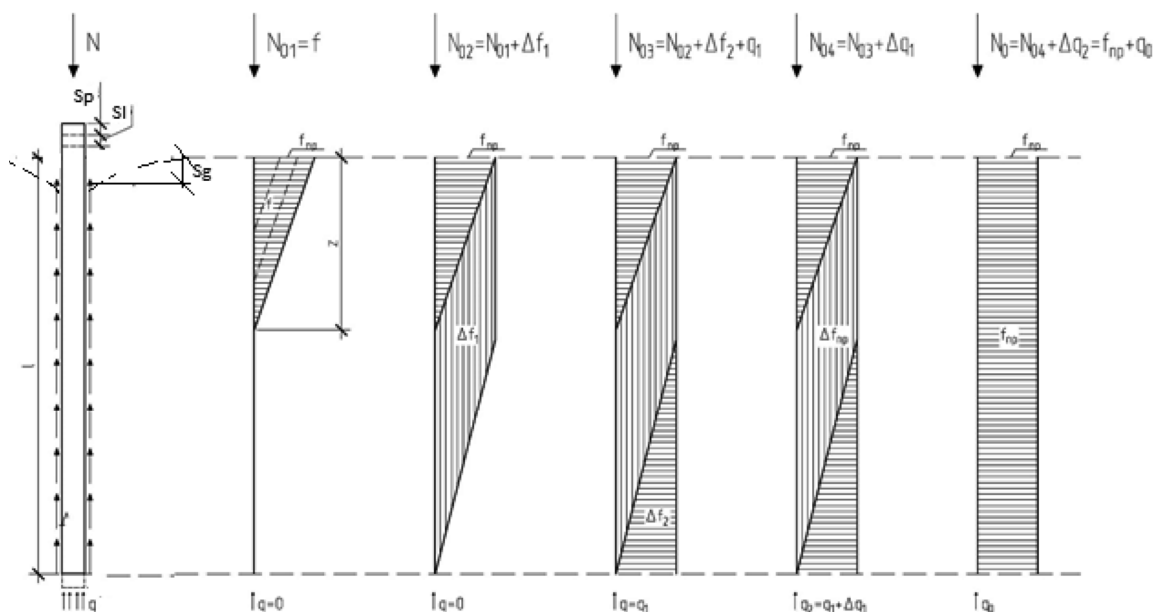


Рис. 4. Кинематическая схема включения в работу вертикально нагруженной длинной сваи и грунтового основания

Fig. 4. Kinematic scheme of inclusion in the operation of a vertically loaded long pile and a ground base

Задача заключается в определении конечной осадки головы сваи в сжимаемом грунтовом основании в предположении, что свая рассматривается как деформируемое упругое тело.

При начальном нагружении сваи до некоторой нагрузки N_{01} в стволе сваи возникают осевые напряжения, затухающие на глубине z . Происходит сжатие ствола сваи, в результате чего в работу включается боковая поверхность сваи на данном участке.

Нагрузка N_{01} воспринимается только боковой поверхностью сваи до глубины z , при которой достигается предельное состояние (полная реализация трения) на боковой поверхности сваи в верхнем сечении (при $z = 0$) (позиция 1 на рис. 4). При этом до начала проскальзывания сваи в грунте происходит упругое сжатие околоствойного массива, величина которого S_g имеет максимум на контакте с боковой поверхностью сваи и затухает на некотором расстоянии от сваи.

По мере увеличения нагрузки до некоторого значения N_{02} происходит включение в работу все более глубоких слоев грунта, а следовательно, осевое напряжение перемещается вниз по длине сваи, и в момент достижения этих напряжений нижнего конца сваи эпюра касательных напряжений (трение на боковой поверхности сваи) будет иметь вид, как показано на рис. 4 (позиция 2). При этой нагрузке сила трения на боковой поверхности сваи в свою очередь достигает предельных значений на участке, где сжатие ствола сваи достигает значения сдвиговой осадки, а ниже трение уменьшается до нуля к нижнему концу сваи. При этом сопротивление грунта под нижним концом сваи равно нулю, т.е. нижний конец сваи в работу еще не включился.

При дальнейшем увеличении нагрузки до некоторого значения N_{03} сдвиговая осадка реализуется по всей длине сваи, и в работу включается грунтовое основание под нижним концом сваи (рис. 4, позиция 4). В этом состоянии осадка головы сваи складывается как сумма осадок за счет сжатия ствола сваи S_p , осадки пяты сваи за счет сжатия грунта под нижним концом сваи S_l и осадки за счет деформации окружающего грунта S_g .

Значение S_p определяется как:

$$S_p = \frac{1}{2} \frac{N_f l}{EA} + \frac{(N_{03} - N_f) l}{EA} = \frac{l(2N_{03} - N_f)}{2EA}, \quad (1)$$

где l – длина сваи в грунте; E – модуль упругости бетона сваи; A – площадь поперечного сечения сваи; N_f – общее сопротивление сваи за счет трения грунта на боковой поверхности сваи.

Значение N_f определяется по формуле:

$$N_f = \pi d \sum f_i l_i, \quad (2)$$

где f_i – расчетное сопротивление трению i -го слоя грунта на боковой поверхности сваи; l_i – толщина i -го слоя грунта.

Значение f_i может определяться по разным методикам, в том числе:

- по данным статического зондирования;
- по теории предельного равновесия (по Кулону);
- по данным статических испытаний методом погружного домкрата;
- по табличным данным, полученным по результатам экспериментальных исследований.

Осадка нижнего конца сваи за счет сжатия грунта при данной нагрузке равна сдвиговой осадке S_c , поскольку этому состоянию соответствует полная реализация трения на боковой поверхности сваи по всей ее длине. По данным экспериментальных исследований ряда авторов [13, 14], сдвиговая осадка для буронабивных свай составляет 10–15 мм. При дальнейшем увеличении нагрузки значение осадки головы сваи S_c остается постоянным и уже не увеличивается.

Таким образом, на данном этапе нагружения осадка головы сваи определяется как:

$$S = \frac{l(2N_{03} - N_f)}{2EA} + S_g. \quad (3)$$

Дальнейшее увеличение нагрузки до некоторого значения N_{04} (рис. 4, позиция 4) вызывает осадку головы сваи за счет сжатия ствола сваи и грунта под пятой сваи от реакции грунта под нижним концом сваи.

В общем случае при любой вертикальной нагрузке N_0 осадка головы сваи за счет сжатия ствола S_p определяется по формуле (1) с заменой N_{03} на N_0 .

Осадка пяты сваи S_l за счет сжатия грунта под пятой сваи при условии линейной зависимости осадки от нагрузки может быть определена по теории упругого полупространства (формула Шлейхера)

$$S_l = \frac{(1 - \mu^2) \omega d P}{E_0 A}, \quad (4)$$

где P – нагрузка, передаваемая на пяту сваи, определяемая по формуле

$$P = N_0 - N_f; \quad (5)$$

где d – диаметр поперечного сечения сваи; E_0 – модуль деформации грунта под пятой сваи; μ – коэффициент Пуассона; ω – коэффициент формы, принимаемый для круглого сечения равным единице.

Осадка S_l включает в себя сдвиговую осадку S_c .

Модуль деформации грунта под нижним концом сваи следует определять с учетом переуплотнения, так как на большой глубине этот фактор имеет существенное значение.

Тогда общая осадка головы сваи запишется как:

$$S = \frac{l(2N_0 - N_f)}{2EA} + \frac{d(N_0 - N_f)(1 - \mu^2)}{E_0 A} + S_g. \quad (6)$$

Решая уравнение (6) относительно N_0 и подставляя вместо S значение $S_{\text{доп}}$ (где $S_{\text{доп}}$ – допустимая осадка), получим формулу для определения допустимой нагрузки на сваю N_g , при которой осадка не будет превышать допустимого значения

$$N_g = \frac{2S_{\text{доп}} - 2S_g + N_f(lB + 2D)}{2(lB + D)}, \quad (7)$$

где

$$B = \frac{1}{EA}; C = \frac{1}{E_0 A}; D = d(1 - \mu^2)C. \quad (8)$$

Осадку околоосвайного грунта предварительно можно определять по решению по методике профессора З.Г. Тер-Мартirosяна [15], однако правомерность такого подхода требуется оценить на основе дополнительных исследований применительно к длинным сваям.

В случае заглубления сваи в неоднородное по глубине многослойное грунтовое основание необходимо определять оптимальную длину сваи, которая зависит от литологического разреза, особенностей залегания слоев с различными характеристиками.

В таких грунтах при изменении длины сваи варьируется соотношение значений осадок за счет сопротивления на боковой поверхности сваи и под ее нижним концом. При наличии ярко выраженного прочного слоя на определенной глубине длина сваи принимается исходя из условия заглубления нижнего конца в этот слой.

При отсутствии такого слоя в литологическом разрезе оптимальную длину сваи следует определять путем выполнения серии расчетов по формуле (7) для свай разной длины с интервалом 1 м с последующим определением соотношения N_{0i}/V_i и проверки выполнения условия

$$N_0/V = \max, \quad (9)$$

где V – объем бетона сваи.

Пример расчета

Необходимо определить допустимую нагрузку на железобетонную буронабивную сваю диаметром $d = 2$ м, длиной $l = 65$ м, заглубленную в глинистые грунты, однородные по глубине.

Значение сопротивления грунта трению на боковой поверхности по всей длине сваи принимаем по данным эксперимента из графика на рис. 2, а, $f = 20$ т/м² как среднеарифметическое значение по всей длине сваи.

Модуль деформации грунта под пятой сваи принимаем $E_0 = 20\,000$ т/м². Модуль упругости бетона $E = 3 \cdot 10^6$ т/м²; коэффициент Пуассона $\mu = 0,4$; площадь поперечного сечения сваи $A = 3,14$ м²; допустимая осадка $S_{\text{доп}} = 16$ см.

Значение осадки околосовайного грунта принимаем из данных численного расчета на рис. 3 $S_g = 4,5$ см.

По результатам расчета по формуле (7) допускаемая нагрузка составила 10 740 тс. При этом сопротивление сваи за счет трения на боковой поверхности 8160 тс, а за счет сопротивления под пятой сваи – 2580 тс. Из этого следует, что реализованное сопротивление под пятой сваи составило 821 т/м², что близко соответствует результатам испытания сваи (см. графики на рис. 2, б).

В качестве проверки определим значения осадок отдельно за счет сжатия ствола сваи и нагрузки, воспринимаемой боковой поверхностью и пятой сваи.

Осадка за счет сжатия ствола сваи составляет 4,6 см, а за счет сопротивления грунта по боковой поверхности и сжатия грунта под пятой сваи – 6,9 см, что с учетом осадки значения осадки околосовайного грунта 4,5 см в сумме дает 16 см, т.е. соответствует значению допускаемой осадки, принятой из условия задачи.

Выводы

1. По результатам испытаний методом погружного домкрата двух буронабивных свай диаметром 2 м, длиной 55 и 65 м в глинистых грунтах установлены закономерности формирования сопротивления грунта на боковой поверхности и под нижним концом свай. Сопротивление грунта трению на боковой поверхности свай достигает максимума при осадке сваи 10–15 мм, и при дальнейшем возрастании нагрузки не увеличивается. Сопротивление грунта под нижним концом увеличивается при осадке пяты сваи 120–150 мм без признаков наступления предельного состояния основания сваи. Из этого следует, что при допускаемых нормами осадках зданий и сооружений предельное состояние основания сваи не будет достигнуто, а следовательно, расчет таких свай в глинистых грунтах следует выполнять по второму предельному состоянию.

2. По результатам численных исследований на примере опытной сваи диаметром 2 м и длиной 65 м получены данные о напряженно-деформированном состоянии системы «свая – грунтовое основание». Установлены закономерности формирования сопротивления грунта на боковой поверхности и под пятой сваи, а также деформирования околосовайного грунта.

3. На основе результатов экспериментов разработана методика осадки одиночной, длинной, буронабивной сваи с учетом сжимаемости ее ствола и методика расчета нагрузки на сваю, при которой осадка сваи не будет превышать допускаемой осадки проектируемого здания или сооружения.

Библиографический список

1. Бахолдин Б.В., Берман В.И., Михайленко И.В. Экспериментальные исследования несущей способности буронабивных полых свай на вертикальную нагрузку // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1988. – № 2. – С. 14–17.
2. Мамонов В.М., Дзагов А.М., Ермошкин П.М. Несущая способность буронабивных свай, изготовленных из бетонов различного состава // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1989. – № 1. – С. 11–14.
3. Poulos H.G. Tall Bulding Foundation Design. – CRC Press, 2017. – P. 532.

4. Шеменков Ю.М., Глазачев А.О. Расчет буронабивных свай по данным статического зондирования при малоэтажном жилищном строительстве // *Жилищное строительство*. – 2012. – № 9. – С. 58–59.

5. Готман А.Л., Глазачев А.О. Исследование вертикально нагруженных буронабивных свай в глинистых грунтах и их расчет по данным статического зондирования // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. – 2014. – № 2. – С. 7–11.

6. Дзагов А.М., Сидорчук В.Ф. О напряженном состоянии основания при устройстве и нагружении буронабивной сваи в глинистых грунтах // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. – 2002. – № 3. – С. 10–15.

7. Зарецкий Ю.К., Карабаев М.И. Расчет буронабивных свай по предельным состояниям // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. – 1985. – № 5. – С. 12–15.

8. Григорян А.А., Хабибуллин И.И. Экспериментальное исследование распределения напряжений в буронабивных сваях значительных размеров // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. – 1980. – № 3. – С. 11–13.

9. Бартоломей А.А. Основы расчета ленточных свайных фундаментов по предельно допустимым осадкам. – М.: Стройиздат, 1982. – 222 с.

10. Бахолдин Б.В., Ястребов П.И., Парфенов Е.А. Особенности расчета осадок фундаментов из буронабивных свай // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. – 2007. – № 6. – С. 1216.

11. Шулятьев О.А. Основания и фундаменты высотных зданий. – М.: АСВ, 2016. – 389 с.

12. Osterberg J.O. New Device for Load Testing Driven Piles and Drilled Separates Friction and End Bearing // *Proc. Int Conf. on Piling and Deep Foundation*. – London. – Balkema, 1989. – P. 159.

13. Далматов Б.И., Лапшин Ф.К., Россихин Ю.В. Проектирование свайных фундаментов в условиях слабых грунтов. – Л.: Стройиздат, 1975. – 240 с.

14. Whitaker T., Cook R.W. An Investigation of the Shaft and Base Resistances of Large Bored Piles in London Clay // *Proc. of the Large Bore Piles*. – ICE. – 1967. – 749 p.

15. Тер-Мартirosян З.Г., Чинь Туан Вьет. Взаимодействие одиночной длинной сваи с основанием с учетом сжимаемости ствола сваи // *Вестник МГСУ*. – 2011. – № 8. – С. 104–110.

References

1. Bakholdin B.V., Berman V.I., Mikhailenko I.V. Experimental studies of the bearing capacity of bored hollow piles on vertical load. *Bases, foundations and soil mechanics*, 1988, no. 2, pp. 14–17.

2. Mamonov V.M., Jagow A.M., Ermoshkin P.M. Bearing capacity of bored piles made of concrete of different composition. *Bases, foundations and soil mechanics*, 1989, no. 1, pp. 11–14.

3. Poulos H.G. Tall bulding foundation design. CRC Press, 2017, 532 p.

4. Semenkov J.M., Glazachev A.O. Calculation of bored piles according to static sensing in low-rise residential construction. *Housing*, 2012, no. 9, pp. 58–59.

5. Gotman A.L., Glazachev A.O. Study of vertically loaded piles in clay soils and their calculated according to static sensing. *Bases, foundations and soil mechanics*, 2014, no. 2, pp. 7–11.

6. Jagow A.M., Sidorchuk V.F. About the stress condition at the device and loading bored piles in clay soils. *Bases, foundations and soil mechanics*, 2002, no. 3, pp. 10–15.

7. Zaretsky J.K., Karabayev M.I. Calculation of bored piles at ultimate limit state. *Bases, foundations and soil mechanics*, 1985, no. 5, pp. 12–15.
8. Grigoryan A.A., Khabibullin I.I. Experimental study of stress distribution in bored piles of significant dimensions. *Bases, foundations and soil mechanics*, 1980, no. 3, pp. 11–13.
9. Bartholomey A.A. Fundamentals of calculating tape pile foundations based on maximum permissible precipitation. Moscow, Stroyizdat, 1982, 222 p.
10. Bakholdin B.V., Yastrebov P.I., Parfenov E.A. Osobennosti rascheta osadok fundamentov i mekhanika gruntov [Features of calculation of foundation sediments from bored piles]. *Bases, foundations and soil mechanics*, 2007, no. 6, pp. 1216.
11. Shulyatyev O.A. Bases and foundations of high-rise buildings. Moscow, ASV. – 2016. – 389 p.
12. Osterberg J.O. New device for load testing driven saws and drilled separates friction and end bearing. *Proc. Int Conf. on Piling and Deep Foundation*. London, Balkema, 1989, pp. 159.
13. Dalmatov B.I., Lapshin F.K., Rossikhin Yu.V. Design of pile foundations in conditions of weak soils. Leningrad, Stroyizdat, 1975, 240 p.
14. Whitaker T., Cook R.W. An investigation of the shaft and base resistances of large bored saws in London clay. *Proc. of the Large Bore Saws*. ICE, 1967, 749p.
15. Ter-Martirosyan Z.G., Chin Tuan Vezet. Interaction of a single long pile with the base, taking into account the compressibility of the pile trunk. *Vestnik MGSU*, 2011, no. 8, pp. 104–110.