

УДК 624.151.6

З.Г. ТЕР-МАРТИРОСЯН, д-р техн. наук,
В.В. СИДОРОВ (vitsid@mail.ru), П.В. СТРУНИН (spv-dpm03@mail.ru), инженеры,
Московский государственный строительный университет

Расчет напряженно-деформированного состояния одиночной сжимаемой барреты и сваи при взаимодействии с массивом грунта

Приведено описание аналитического метода определения осадки одиночного несущего элемента фундамента глубокого заложения (ФГЗ) конечной жесткости (сваи и барреты). Решение данной задачи основывается на рассмотрении взаимодействия ФГЗ с массивом грунта, обладающим упругопластическими свойствами и на основании модернизации упругого решения. С ростом нагрузки касательные силы трения вызывают сдвиговые деформации, приводящие к возникновению напряжений в окружающем грунте. При этом данные касательные напряжения могут развиваться до определенного предельного значения, вызывающего переход грунта из упругого состояния в пластическое. Предлагаемый алгоритм учитывает накопление осадки на всех стадиях нагружения ФГЗ с учетом перехода грунта из упругого в пластическое состояние.

Ключевые слова: фундамент глубокого заложения, касательные напряжения, осадка, несущая способность, свая, барретта.

В настоящее время вопрос определения напряженно-деформированного состояния (НДС) при взаимодействии элемента фундамента глубокого заложения (ФГЗ) (свай, баррет) с упруго-пластическим грунтом остается актуальным для многих ученых-геотехников. Однако, решение данной задачи вызывает большие трудности, которые заставляют принимать определенные допущения. Например, принимается допущение о том, что напряжение на уровне пяты сваи равно нулю, что значительно упрощает решение, но применимо только для абсолютно жестких свай в условиях морского строительства [1]. Известно решение, основанное на заранее определенной величине перемещения сваи, при котором возникают предельные касательные напряжения до определенной глубины [2]. Еще одним примером является допущение, что элемент ФГЗ работает упруго до полного исчерпания несущей способности по всей длине, а после вся нагрузка передается только на основание (СП 22.13330.2011 «Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01–83*. ОАО «НИЦ «Строительство»). Это решение не рассматривает случаи, когда не по всей длине сваи или барреты возникает предельное напряженное состояние, к тому же свая принята абсолютно жесткой, что не всегда имеет место.

Поэтому, существующие методы решения данной задачи несовершенны и требуют некоторых дополнений.

Предлагаемый авторами алгоритм решения задачи о взаимодействии одиночного элемента ФГЗ (сваи и барреты) с окружающим грунтом, обладающим прочностью, основан на рассмотрении нескольких типов расчетных схем, описывающих распределение внешней нагрузки между боковой поверхностью ФГЗ и его пятой.

С ростом внешней нагрузки в окружающем ФГЗ грунте происходят сдвиговые деформации, вызывающие рост касательных напряжений по его боковой поверхности – τ_{mob} . При этом касательные напряжения могут развиваться до определенного предельного значения – τ^* , вызывающего переход грунта из упругого состояния в пластическое. При этом дальнейший рост касательных напряжений сверх τ^* невозможен, поэтому нагрузка будет передаваться только на участки боковой поверхности ФГЗ, где предел прочности еще не достигнут, либо на пяту элемента.

Процесс перераспределения напряжений между боковой поверхностью элемента ФГЗ и его пятой удобно представить в графическом виде (расчетной схемы). Для составления схемы необходимо решить задачу взаимодействия одиночного элемента с окружающим грунтом в упругой постановке [3], а затем привести ее результаты в соответствие с известным законом изменения прочности грунта по глубине массива грунта, в основе которого лежит известный закон Кулона:

$$\tau^* = \sigma(z) \cdot \operatorname{tg} \varphi + c, \quad (1)$$

где φ – угол внутреннего трения грунта, град;

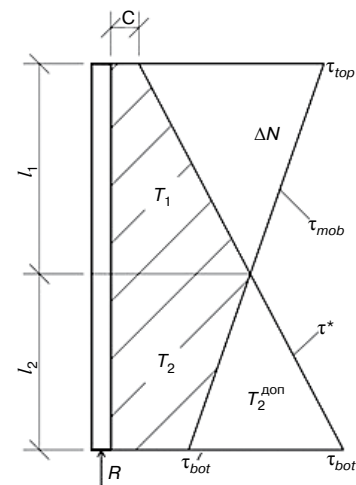


Рис. 1. Расчетная схема взаимодействия одиночного элемента ФГЗ с упругопластическим грунтом

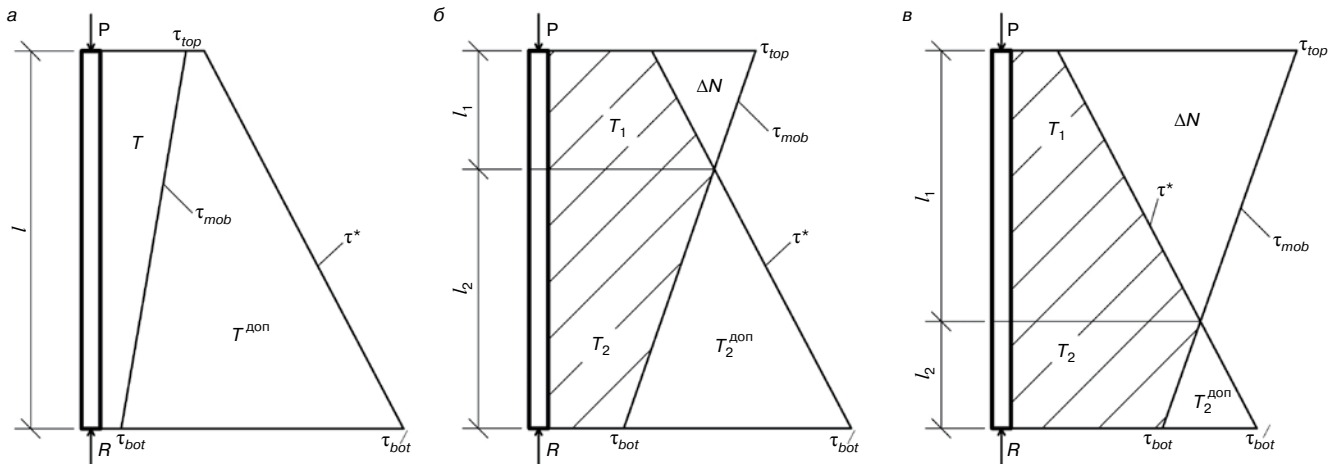


Рис. 2. Варианты расчетных схем при различных внешних нагрузках (пояснение в тексте)

c – сцепление грунта, кПа; τ^* – предельное касательное напряжение, кПа; $\sigma(z)$ – боковое напряжение в грунте на определенной глубине z , кПа.

Полученный из упругого решения закон распределения мобилизованного касательного напряжения (τ_{mob}) является линейным. Совместив эпюры τ_{mob} и τ^* , получим расчетную схему (рис. 1). При пересечении этих эпюр выделяются участки напряжений, которые способна выдерживать боковая поверхность ФГЗ (T_1 и T_2), участок напряжений, который не может воспринять верхняя часть элемента длиной $l_1 - \Delta N$ и «резервную» часть нагрузки, которая не мобилизовалась на нижней части элемента длиной $l_2 - T_2^{\text{доп}}$. При этом возникает реакция на уровне пяты ФГЗ – R .

В зависимости от прилагаемой внешней нагрузки P на элемент ФГЗ характер перераспределения нагрузок по боковой поверхности и пяте меняется. Авторами предлагаются три варианта расчетных схем, представленных на рис. 2. Особенности схем в следующем:

1. При низком уровне внешней нагрузки вся боковая поверхность работает в упругом режиме, ни в одной точке не наблюдается достижения предельного касательного напряжения τ^* . В этом случае не выделяются нагрузки ΔN , $T_2^{\text{доп}}$, а сила по боковой поверхности элемента обозначается как T (рис. 2, а).
2. При среднем уровне нагрузки на элемент ФГЗ, при условии $\Delta N \leq T_2^{\text{доп}}$, вся дополнительная нагрузка воспринимается оставшейся боковой поверхностью сваи и на основании дополнительная нагрузка не передается. (рис. 2, б).
3. При высоком уровне нагрузки на элемент ФГЗ, при условии $\Delta N > T_2^{\text{доп}}$, на всей боковой поверхности сваи возникает предельная несущая способность и вся дополнительная нагрузка передается на основание (рис. 2, в).

Важным допущением в приведенных расчетных схемах является, что основание ФГЗ является упругим. Предельное состояние грунта допускается только на боковой поверхности элемента ФГЗ.

Рассматривая полученные расчетные схемы, можно для каждого случая определить осадку элемента S , и конечную реакцию на уровне пяты после реализации схемы R , кПа. Для этого необходимо рассмотреть передачу внешней на-

грузки на части элемента ФГЗ в соответствии со схемой, которой соответствует внешняя нагрузка.

В условиях высотного строительства наиболее используемой схемой будет третья, т. е. с высоким уровнем внешней нагрузки на сваю или баррету. Коротко рассмотрим процесс передачи нагрузки по элементу и алгоритм определения ее осадки (в соответствии с рис. 2, в).

1) Определяется осадка S_1 от боковых усилий T_1 и T_2 . Данная осадка возникает во время возникновения на боковой поверхности касательных напряжений, не выходящих за пределы прочности грунта (упругая часть осадки). Перемещение барреты (сваи) произойдет от суммы величин T_1 и T_2 . Эти нагрузки есть сумма касательных напряжений по длине элемента ФГЗ.

2) Осадка S_2 , возникает при передаче нагрузки ΔN на нижележащую часть ствола. Ее можно найти, приложив нагрузку ΔN на нижнюю часть барреты длиной l_2 и решив упругую задачу в соответствии с [3]. Необходимо заметить, что во время передачи нагрузки ΔN на нижнюю часть элемента, происходит не только увеличение значения τ от τ_{bot} до τ'_{bot} , но и увеличение давления по пяте элемента ФГЗ от R до R' .

3) Так как «резервная» часть нагрузки $\Delta N > T_2^{\text{доп}}$, то величина, соответствующая их разнице будет передаваться только на уровень пяты ФГЗ. При этом касательное напряжение по всей боковой поверхности не будет увеличиваться, так как оно достигло своего предельного значения τ^* .

Осадку S_3 можно определить по формуле для жесткого штампа с учетом его формы и глубины заложения от поверхности [4].

4) Осадка S_4 определяется сжатием ствола сваи или барреты, которая может быть определена исходя из закона Гука по формуле:

$$\Delta l = \frac{l \cdot \Delta \sigma}{E_{\text{мат}}}, \quad (2)$$

где l – длина сваи или барреты; $\Delta \sigma$ – разница напряжений на оголовке сваи (барреты) и пяте; $E_{\text{мат}}$ – модуль деформации материала сваи (барреты).

Таким образом, осадку элемента ФГЗ можно определить с помощью суммирования найденных осадок:

$$S = S_1 + S_2 + S_3 + S_4. \quad (3)$$

Необходимо отметить, что осадка от сжимаемости ФГЗ в разной степени сказывается на общую осадку сваи или барреты и зависит от жесткости материала. На практике для фундамен-

тов высотных зданий, передающих большие нагрузки на основание используют длинные барреты из тяжелого железобетона с высоким процентом армирования. В этом случае модули деформации грунта и материала барреты различаются на три порядка. В свою очередь для усиления оснований менее нагруженных фундаментов, находят применение грунтоцементные сваи (ГЦС), выполненные по технологии струйной цементации грунтов [5]. Данные сваи являются примером ФГЗ с жесткостью, сопоставимой с жесткостью грунта.

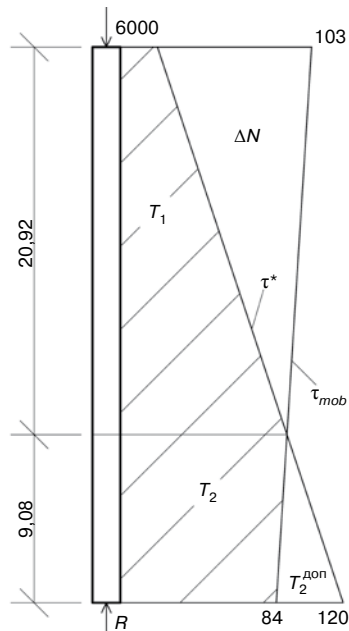


Рис. 3. Расчетная схема определения НДС одиночной барреты при нагрузке 6000 кПа

Приведем результаты решения по предложенному аналитическому методу и сопоставим их с численным решением в Plaxis 3D.

В качестве исходных параметров для барреты примем следующие: размеры поперечного сечения барреты 1,5×3 м; размеры массива грунта 9×18 м; коэффициент Пуассона грунта $\nu = 0,3$; длина барреты $l = 30$ м; коэффициент влияния формы барреты $\omega = 1,22$ (соответствует отношению сторон барреты 1:2); внешняя нагрузка $P = 3000, 4500, 6000, 7000$ кПа; $E_{\text{грунта}} = 30$ МПа; удельное сцепление грунта $c = 20$ кПа; угол внутреннего трения $\phi = 15^\circ$; модуль деформации ствола барреты $E_{\text{барреты}} = 30000$ МПа (железобетон); коэффициент влияния глубины нахождения пяты барреты $k(l) = 0,675$ (зависит от соотношений $m = b/h$ и $n = b/a$).

Рассмотрим расчетную схему для нагрузки в 6000 кПа (рис. 3).

Определим значения ΔN и $T_2^{\text{доп}}$: $\Delta N = 1743$ кПа, $T_2^{\text{доп}} = 327$ кПа. Как видно из сопоставления этих нагрузок $\Delta N > T_2^{\text{доп}}$ на всей боковой поверхности сваи возникает предельная несущая способность и вся дополнительная нагрузка передается на основание. Дальнейший ход решения проводим по описанному выше алгоритму:

1. Находим значение касательной нагрузки $T_1 + T_2 = 4081$ кПа и величину осадки от нее $S_1(T_1 + T_2) = 9,6$ мм. При этом фиксируем значение упругой реакции $R_1 = 256$ кПа, возникающей при вычислении осадки S_1 .
2. Определяем значение осадки от нагрузки $S_2(T_2^{\text{доп}}) = 2,83$ мм. При этом также фиксируем значение упругой реакции $R_2 = 75,6$ кПа, возникающей при вычислении осадки S_2 .

3. Так как $\Delta N > T_2^{\text{доп}}$ дополнительно находим величину $N^{\text{доп}}$ передающуюся на нижнее основание и определяем от нее осадку. Усиление находится из условия равновесия сил:

$$N = T + R, \quad (4)$$

где N – нагрузка передающаяся на сваю; T – нагрузка, на боковой поверхности сваи; R – реакция в уровне пяты сваи.

4. В итоге дополнительная нагрузка на основание сваи будет определяться следующим образом:

$$N^{\text{доп}} = N - T_1 - T_2 - R_1 - R_2 - T_2^{\text{доп}}. \quad (5)$$

После нахождения данной нагрузки $N^{\text{доп}} = 681,4$ кПа, определяем от нее осадку $S_3(N^{\text{доп}})$ как осадку жесткого штампа: $S_3(N^{\text{доп}}) = 25,5$ мм.

5. Находим осадку сжатия ствола барреты в соответствии с выражением (2): $S_4 = 3,1$ мм.

Итоговое значение осадки также будем определять суммированием найденных величин осадок:

$$S_{\Sigma} = S_1 + S_2 + S_3 + S_4 = 41 \text{ мм}. \quad (6)$$

Результаты сопоставления аналитического метода с численным решением для остального диапазона нагрузок приведены на рис. 4.

Результаты проведенного расчета показали, что величины осадок, полученные по предложенному в этой статье алгоритму и по PLAXIS 3D имеют хорошую сходимость с максимальным расхождением результатов до 15% при очень больших нагрузках (для данного поперечного сечения 7000 кПа соответствуют точечной нагрузке 3150 т).

В приведенном выше примере рассматривалась сжимаемая баррета, в которой отношение жесткости барреты к жесткости грунта составляло порядка 1000. В качестве дополнительного сравнения рассмотрим расчет НДС одиночной ГЦС, обладающей жесткостью, сопоставимой с жесткостью грунта.

Рассмотрим НДС вокруг грунтоцементной сваи.

Расчетные параметры сваи и грунта были приняты следующими: длина $l_{\text{сваи}} = 10$ м; модуль деформации $E_{\text{сваи}} = 3000$ МПа; модуль деформации грунта $E_{\text{грунта}} = 10$ МПа;

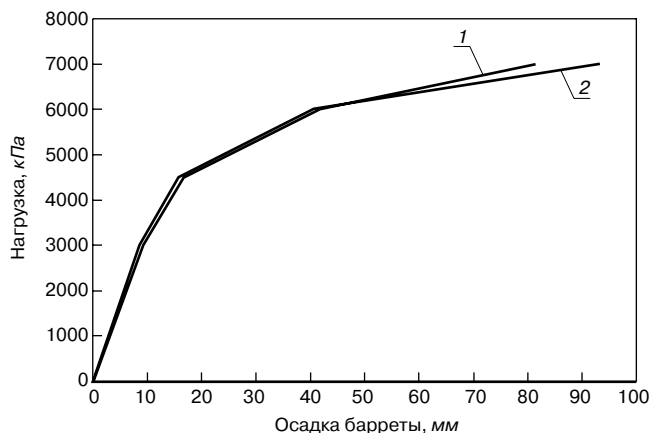


Рис. 4. Сравнение графиков осадок одиночной барреты, взаимодействующей с массивом грунта, обладающим упругоэластическими свойствами, полученных аналитическим и численным методами: 1 – S_{plaxis} ; 2 – $S_{\text{аналит}}$

внешняя нагрузка на сваю $P = 1000, 2000, 4000, 6000$ кПа; диаметр свай принимался одинаковым $0,6$ м, диаметр массива грунта составляет $3,6$ м, $v_{\text{грунта}} = 0,35$; $v_{\text{сваи}} = 0,2$; коэффициент влияния формы сваи $\omega = 0,79$; удельное сцепление грунта $c = 20$ кПа; угол внутреннего трения $\varphi = 15^\circ$; коэффициент влияния глубины нахождения пяты сваи $k(l) = 0,472$.

Рассмотрим расчетную схему для нагрузки, равной 4000 кПа (рис. 4).

Определим значения ΔN и $T_2^{\text{доп}}$. Аналогично расчету для барреты получаем следующие значения: $\Delta N = 1448,7$ кПа, $T_2^{\text{доп}} = 160,7$ кПа. Как видно из сопоставления этих нагрузок $\Delta N > T_2^{\text{доп}}$ на всей боковой поверхности сваи возникает предельная несущая способность и вся дополнительная нагрузка передается на основание. Дальнейший ход решения проводим по описанному выше алгоритму:

1. Находим значение касательной нагрузки $T_1 + T_2 = 2281,2$ кПа и величину осадки от нее $S_1(T_1 + T_2) = 6,8$ мм. При этом фиксируем значение упругой реакции $R_1 = 153$ кПа, возникающей при вычислении осадки S_1 .
2. Определяем значение осадки от нагрузки $S_2(T_2^{\text{доп}}) = 1,6$ мм. При этом также фиксируем значение упругой реакции $R_2 = 746$ кПа, возникающей при вычислении осадки S_2 .
3. Так как $\Delta N > T_2^{\text{доп}}$ дополнительно находим величину $N^{\text{доп}}$ передающуюся на нижнее основание и определяем от нее осадку. Усилие находится из условия (5). В итоге дополнительная нагрузка на основание сваи $N^{\text{доп}}$ будет равняться $1331,1$ кПа. Значение осадки $S_3(N^{\text{доп}})$ как от осадки жесткого штампа будет составлять 26 мм.
4. Находим осадку сжатия ствола сваи в соответствии с выражением (2): $S_4 = 12,6$ мм.

Итоговое значение осадки сваи будет равняться $S_{\Sigma} = 47$ мм. Результаты сопоставления аналитического метода с численным решением для остального диапазона нагрузок приведены на рис. 6.

Как видно из результатов при нагрузках до 4000 кПа сходимость решений является достаточно хорошей, однако дальнейшее увеличение нагрузки приводит к большому расхождению. При этом стоит отметить, что максимальная разность результатов не превышает 27% при нагрузке в 6000 кПа (для данного поперечного сечения соответствует сосредоточенной нагрузке 170 т), которая является предельной для прочности сваи по материалу (грунтоцемент).

Соответственно с достаточной для инженерных расчетов точностью данный метод показал хорошую сходимость.

Выводы

1. Предложенный алгоритм решения задачи о взаимодействии одиночного элемента ФГЗ (сваи, барреты) с массивом грунта, обладающим упругопластическими свойствами, учитывает размеры массива грунта, жесткость ствола элемента

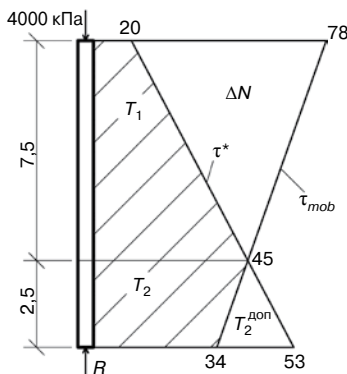


Рис. 5. Расчетная схема определения НДС одиночной грунтоцементной сваи при нагрузке 4000 кПа

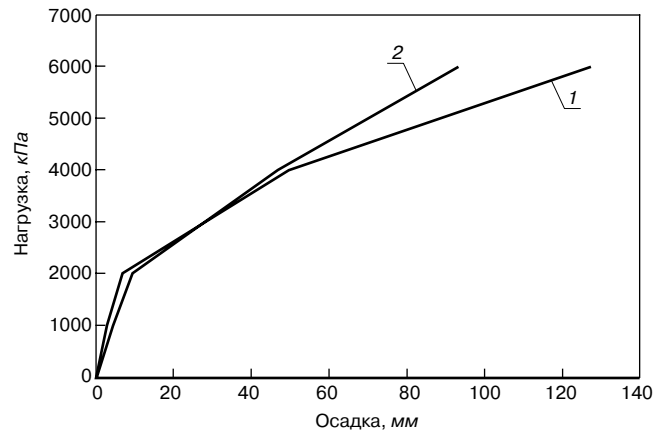


Рис. 6. Сравнение графиков осадок одиночной грунтоцементной сваи, взаимодействующей с массивом грунта, обладающим упругопластическими свойствами, полученных аналитическим и численным методами: 1 – S_{plaxis} ; 2 – $S_{\text{аналит}}$

и не требует трудноопределимых параметров для проведения расчета.

2. Алгоритм пригоден для всего диапазона нагрузок, действующих на элемент ФГЗ и учитывает возможность достижения предельного состояния по части ствола элемента, что отсутствует в предложенном методе расчета в нормативных документах (СП 22.13330.2011).

3. Результаты аналитического решения как для сильно сжимаемого ГЦС, так и для мало сжимаемой барреты хорошо согласуются с результатами упруго-пластического расчета в ПК PLAXIS 3D.

4. Основным допущением этого метода является принятие того, что грунт под подошвой работает линейно, в то время как по боковой поверхности он обладает упругопластическими свойствами. Это допущение связано со сложностью описания упругопластического поведения грунта под подошвой. Однако, при проектировании длинных свай и баррет (длиной свыше 20 м) часто под подошвой оказываются очень прочные и малодеформируемые грунты. С учетом того, что нагрузка доходящая до пяты относительно небольшая [6], то модель работы грунта в основании допускается принимать упругой.

Список литературы

1. Verruijt A. Offshore soil mechanics. Delft University of Technology, 2006. Pp. 68–81.
2. Yi-Chuan Chou Yun-Mei Hsiung. A normalized equation of axially loaded piles in elasto-plastic soil // Journal of GeoEngineering. 2009. Vol. 4. № 1. Pp. 1–7.
3. Тер-Мартirosян З.Г. Струнин П.В. Чин Туан Вьет. Сжимаемость материала сваи при определении осадки в свайном фундаменте // Жилищное строительство. 2012. № 10. С. 13–16.
4. Дорошкевич Н.М., Знаменский В.В., Кудинов В.И. Инженерные методы расчета свайных фундаментов при различных схемах их нагружения // Вестник МГСУ. 2006. № 1. С. 119–132.
5. Малинин А.Г. Струйная цементация грунтов. М.: Стройиздат, 2010. 226 с.
6. Тер-Мартirosян З.Г. Механика грунтов. М.: АСВ, 2009, 550 с.