РАЗДЕЛ II. АРХИТЕКТУРА

Алексеев С.И.

Проектирование свайных фундаментов с оптимизацией выбираемой осадки

Петербургский государственный университет путей сообщения императора

Александра I

(Россия, Санкт-Петербург)

doi:10.18411/sciencepublic-12-07-2020-04

idsp: sciencepublic-12-07-2020-04

Аннотация

Предлагается методика расчёта свайных фундаментов исходя из критерия выбираемой (задаваемой) осадки (условия расчёта по второму предельному состоянию), для эквивалентно условного фундамента глубокого заложения.

Рассмотрена графическая интерпретация методики расчёта с определением площади эквивалентно условного фундамента глубокого заложения. Приведён численный пример решения кустового свайного фундамента в зависимости от деформационных свойств основания. Полученные решения оптимизируются по выравненной осадке. Предложена формула определения необходимого числа свай, обладающих одинаковой осадкой, что позволяет снизить неравномерность относительной осадки рядом расположенных фундаментов до минимальных допустимых значений.

Ключевые слова: свайный фундамент, расчёт по второму предельному состоянию, заданная осадка, число свай, программный расчёт на сайте: <http://www.buildcalc.ru>, выравнивание неравномерности осадки свайного фундамента.

Введение

Основополагающие принципы расчёта фундаментов по заданной осадке рассмотрены в предыдущих работах автора [1, 2, 3]. В данных работах осадку упругопластического основания для фундамента заданного размера предлагается определять через вычисляемый многофункциональный коэффициент нелинейности упругопластического деформированного основания (K_i).

Тогда:

$$S_i = S_{y(R)} \times K_i, \quad (1)$$

где, $S_{y(R)}$ – осадка основания, соответствующая давлению равному расчётному сопротивлению грунта R (условная граница применимости теории линейно деформируемой среды), определяемая по рекомендациям Свода правил [4]; S_i – осадка упругопластического основания для фундамента заданного размера, при давлениях P_i превышающих R .

Основные допущения.

Использование основы данного метода для свайных фундаментов базируются на следующих основных принятых допущениях:

1. Для осадки свайного куста примеряется эквивалентно условный фундамент глубокого заложения с глубиной залегания подошвы в уровне расположения острия свай.
2. Предельное давление на грунт основания для эквивалентно условного фундамента глубокого заложения вычисляется на основе решений Березанцева В.Г., Глушкевич С.С., Соколовского В.В., которые реализованы в современном Своде правил [4].

В соответствии с первым принятым допущением расчётная схема кустового эквивалентно условного свайного фундамента может быть представлена на рис. 1.

Тогда среднее давление (P_i) под подошвой эквивалентно условного фундамента может быть определено из следующего выражения:

$$P_i = \frac{N_0 + N_y}{b_y \times \ell_y} = \frac{N_0}{b_y \times \ell_y} + d_y \times \gamma_{\text{ср.}}; \quad (2)$$

где, N_0 – нагрузка по обрезу свайного фундамента;

$N_y = d_y \times b_y \times \ell_y \times \gamma_{\text{ср.}}$ - осреднённый вес эквивалентно условного фундамента, включающий в себя вес свай, ростверка, и грунта в межсвайном пространстве; d_y – глубина эквивалентно условного фундамента; b_y , ℓ_y – ширина и длина эквивалентно условного фундамента (в первом приближении данные величины могут быть заданы исходя из условий минимальных конструктивных размеров ростверка); $\gamma_{\text{ср.}}$ - осреднённое значение удельного веса эквивалентно условного фундамента.

Рис. 1. Расчётная схема эквивалентно условного свайного фундамента, с формированием поверхностей скольжения по решению Березанцева В.Г. [5]

Графическая интерпретация результатов расчёта.

На основе второго принятого допущения, используя выражение (1), представляется возможность, задаваясь предварительно различной величиной (b_y) (рядовое расположение свай под стену или условная ширина подошвы свайного куста), построить графики расчётной зависимости $S_i = S_i(P_i)$ (рис. 2).

Решения в соответствии с уравнением (2) может быть реализовано в виде расчётных графических зависимостей $P_i = P_i(b_{yi})$, которые для различных расчётных сечений (N-N) свайного фундамента в зависимости от нагрузки, представлены кривыми 1-1, 2-2, 3-3 (рис. 3).

В соответствии с условиями поставленной задачи, задаёмся величиной осадки, при которой будем рассчитывать свайный фундамент. Графическая интерпретация такого решения представлена на рис. 2. Тогда, по заданной осадке (S_A) (см. стрелочную идентификацию на рис. 2), находят значения давлений P_1 , P_2 , P_3 , соответствующие b_{y1} , b_{y2} , b_{y3} – задаваемым величинам ширины подошвы эквивалентно условного фундамента.

Рис. 2. Графики расчётной зависимости (1) осадки (S_i) от прикладываемого давления (P_i) на основание; b_{y1} , b_{y2} , b_{y3} – задаваемая величина ширины подошвы эквивалентно условного фундамента

Найденные пары значений P_1 и b_{y1} ; P_2 и b_{y2} ; P_3 и b_{y3} из решений на рис. 2, наносят на график $P_i = P_i(b_{yi})$ (рис. 3) в виде отдельных точек, соединяя которые получаем кривую А, соответствующую равной заданной осадки (S_A).

Рис. 3. Графики расчётной зависимости (2) $P_i = P_i(b_{yi})$; 1-1, 2-2, 3-3 – кривые давлений для различных расчётных сечений (N-N) свайного фундамента в зависимости от нагрузки; А – кривая равной заданной осадки S_A ; $b_{y(m1)}$, $b_{y(m2)}$, $b_{y(m3)}$, – размеры требуемой ширины подошвы эквивалентно условного фундамента

Совместное решение или пересечение кривых давлений 1-1, 2-2, 3-3 для различных расчётных сечений свайного фундамента в зависимости от нагрузки и возможного изменения ширины подошвы эквивалентно условного фундамента (рис. 3) с кривой А – определит требуемые размеры подошвы эквивалентно условных свайных фундаментов $b_{y(t1)}$, $b_{y(t2)}$, $b_{y(t3)}$, соответствующие равной заданной осадке (S_A).

Следует подчеркнуть, что все, представленные на рис. 3, расчётные значения свайных фундаментов будут иметь различные размеры подошвы эквивалентно условных свайных фундаментов $b_{y(t1)}$, $b_{y(t2)}$, $b_{y(t3)}$, но обладать практически одинаковой осадкой.

Определение необходимого количества свай.

Определив, таким образом, ширину подошвы требуемого эквивалентно условного свайного фундамента $b_{y(ti)}$, нетрудно найти площадь подошвы данного фундамента: $A_{yc} = b_{y(T)} \times \ell_y$.

Таким образом, на полученной в результате расчёта, площади (A_{yc}) эквивалентно условного свайного фундамента должны быть размещены сваи. Учитывая, что площадь передачи давления от одной сваи может быть принята $(3d)^2$, получим необходимое (n) число свай:

$$n = \frac{A_{yc}}{(3d)^2}; \quad (3)$$

где, d – условный диаметр свай.

Определив по формуле (3) необходимое количество свай, получаем решение, которое будет соответствовать той заданной осадке (SA) при которой производился расчёт. Следовательно, поставленная задача практически решена.

Следует подчеркнуть, что проведя подобные расчёты для другого свайного фундамента, при другой степени нагружения, но при той же заданной осадке (SA), получаем другое количество свай, но обладающих одинаковой осадкой, что позволяет снизить неравномерность относительной осадки рядом расположенных фундаментов до минимальных допустимых значений.

Численный пример по предлагаемой методике расчёта.

Представленная интерпретация графического решения рассматриваемой методики (рис. 2, 3), может быть рассмотрена и в аналитической форме. Решения осуществляем по программе автора «BRNL», размещённой на сайте: <http://www.buildcalc.ru/> [7].

Для примера выполним расчёт куста столбчатого эквивалентно условного свайного фундамента, при длине свай 12 м и вертикальной расчётной нагрузке в 4350 кН. Основные исходные данные, а также грунтовые условия, с модулем деформации основания в 20 МПа, представлены в нижерасположенной табличной форме. Следует подчеркнуть, что расчёт эквивалентно условного свайного фундамента, с учётом не линейной работы основания, (рис.4) производится по двум предельным состояниям, с определением (две последние строки в таб. «Рассчитанные данные по основанию») коэффициента надёжности и величины осадки, которая может, как задаваться, так и определяться по заданным размерам подошвы. Используя последнее условие, получим:

BRNL - Расчёт фундамента с учётом нелинейной работы основания

Отчёт результатов расчёта:

Учётные данные

Объект:	Пример расчёта куста эквивалентно условного свайного фундамента с модулем деформации основания в 20 МПа
Тип здания:	Бескаркасное здание из кирпича без армирования

Данные по фундаменту

Основные данные фундамента

Тип фундамента:	Столбчатый
Тип стены:	Внутренняя
Высота фундамента (размер фундамента от обреза до подошвы), м:	12.00
Глубина заложения фундамента (расстояние от планировочной отметки до подошвы фундамента), м:	12.00
Ширина подошвы фундамента, м:	3.00

Данные столбчатого фундамента

Соотношение сторон подошвы фундамента $N = L / B$:	1.00
---	------

Нагрузки по обрезу фундамента

Вертикальная нагрузка N , кН:	4,350.00
Горизонтальная нагрузка, приложенная поперёк ширины подошвы фундамента Q_B , кН:	0.00
Изгибающий момент, приложенный поперёк ширины подошвы фундамента M_B , кН*м:	0.00
Горизонтальная нагрузка, приложенная вдоль длины подошвы фундамента Q_L , кН:	0.00
Изгибающий момент, приложенный вдоль длины подошвы фундамента M_L , кН*м:	0.00

Данные по грунту
Введённые данные

№	Н, м	Наименование	Тип грунта	γ , кН/м ³	φ , °	C, кПа	e	W	I _L	E	μ	Источник данных
1	30	Песок	Пески пылеватые насыщенные водой	17	34	0	0.7	-	-	20000	0.3	Эксперимент

Расчётные данные

№	Н, м	γ_1 , кН/м ³	γ_2 , кН/м ³	φ_1 , °	φ_2 , °	C ₁ , кПа	C ₂ , кПа	γ_{c1}	γ_{c2}	K
1	30.00	15.45	17.00	30.91	34.00	0.00	0.00	1.10	1.16	1.00

Дополнительная информация

Грунтовые воды

Грунтовые воды отсутствуют

Информация о сооружении

Сооружение обладает жёсткой конструктивной схемой	
Отношение длины сооружения или его отсека к высоте:	2.00

Справочная информация

Удельный вес минеральных частиц грунта, кН/м ³ :	27.00
Удельный вес воды, кН/м ³ :	10.00

Результаты расчёта

Рассчитанные данные по совместной работе грунта и фундамента

Средневзвешенное значение удельного веса грунта по I-му предельному состоянию выше подошвы фундамента, кН/м ³ :	15.45
Средневзвешенное значение удельного веса грунта по II-му предельному состоянию выше подошвы фундамента, кН/м ³ :	17.00
Приведённая глубина заложения фундамента d ₁ , м:	12.00

Рассчитанные данные по основанию

Расчётное сопротивление грунта основания R, кПа:	2,101.66
Предельное давление (несущая способность) грунта основания R_{пр}, кПа:	9,961.43
Предельная нагрузка на фундамент N _{пр} , кН:	89,652.86
Минимальное давление под подошвой фундамента P _{min} , кПа:	723.33
Среднее давление под подошвой фундамента P _{ср.} , кПа:	723.33
Максимальное давление под подошвой фундамента P _{max} , кПа:	723.33
Осадка эквивалентно условного свайного фундамента S, см:	8.74
Коэффициент надёжности эквивалентно условного свайного фундамента:	12.39

Рис. 4. Пример результатов расчёта куста эквивалентно условного свайного фундамента по двум предельным состояниям, с учётом не линейной работы основания с модулем деформации в 20 МПа

Следует подчеркнуть, что не линейная работа основания, за счёт развития зон пластических деформаций под подошвой эквивалентно условного фундамента глубокого заложения, обусловлена в основном величиной предельного давления грунта основания (несущая способность), которая составляет: R_{пр} = 9961.43 кПа (рис. 4, вторая строка таб. «Рассчитанные данные по основанию»).

Необходимо отметить, что подобные программные решения могут быть многократно повторены при любых изменениях начальных условий, рассматриваемой задачи. Это позволяет провести анализ и оптимизацию получаемых решений. Пример интерпретации такого подхода представлен в графическом виде на рис. 5.

Рис. 5. Расчётная зависимость осадки (S) куста эквивалентно свайного фундамента от его ширины (by), по условиям рассматриваемого примера. 1 – основание с модулем деформации в 20 МПа; 2 – основание с модулем деформации в 25 МПа

Результаты решений программного расчёта (рис. 5) позволяют построить графические зависимости осадки (S) условного свайного фундамента от его ширины (by) или $(b)_y = [(b)_y](s)$. В данном примере построены две кривые 1 и 2 (рис. 5), отличающиеся деформационными свойствами оснований. При анализе полученных зависимостей, очевидно, что для кривой 1 при ширине подошвы эквивалентно условного свайного фундамента $(b)_y \geq 3$ м осадка данного эквивалентно условного свайного фундамента (S) практически стабилизируется в размере 8,5 см, для кривой 2 (основание с модулем деформации в 25 МПа) подобная оптимальная осадка составляет около 7 см.

Таким образом, данные величины осадок следует считать оптимальными для рассматриваемых грунтовых условий и действующих нагрузок.

Анализируя полученные зависимости (рис. 5) по условиям одинаковой (допустимой для данного вида сооружения) осадки, не трудно заметить:

- для основания с модулем деформации в 20 МПа (кривая 1 или для 1 фундамента), при осадке 8,74 см ширина подошвы эквивалентно условного свайного фундамента составит 3 м.
- для основания с модулем деформации в 25 МПа (кривая 2 или для 2 фундамента), при осадке 8,56 см ширина подошвы эквивалентно условного свайного фундамента составит 2 м.

Следовательно, и 1 и 2 свайные фундаменты будут давать практически одинаковую осадку (с минимальной неравномерностью относительной осадки), с соответствующей требуемой шириной эквивалентно условного фундамента $b_{y(t1)} = 3$ м и $b_{y(t2)} = 2$ м.

Определив, таким образом, ширину подошвы требуемых эквивалентно условных свайных фундаментов $b_{y(t1,2)}$, нетрудно найти площадь (A_{yc}) подошвы кустовых столбчатых эквивалентно условных фундаментов и, используя формулу (3), рассчитать необходимое (n) число свай:

$$n_1 = \frac{A_{yc}}{(3d)^2} = \frac{9}{(3 \cdot 0,3)^2} = 11; \quad n_2 = \frac{4}{(3 \cdot 0,3)^2} = 5.$$

Таким образом, по условиям рассматриваемого примера, два свайных фундамента, устраиваемые в основаниях с модулем деформации в 20 МПа и 25 МПа, для получения практически одинаковой осадки в размере около 8,6 см, должны иметь соответственно минимальное количество 11 и 5 забивных свай сечением 30x30 см.

Следует подчеркнуть, что проектирование свайных фундаментов по величине задаваемой осадке (II предельное состояние) позволяет снизить неравномерность относительной осадки рядом расположенных фундаментов до минимальных допустимых значений (учёт неоднородности грунтовых оснований и различной степени нагружения), что создаёт наиболее благоприятные условия для работы надземных конструкций сооружения.

Для внецентренно нагруженных свайных фундаментов, представленную методику необходимо дополнить определением горизонтальной составляющей в уровне головы свай и выполнить расчётную проверку ж/б стволов свай на изгиб в соответствии с рекомендациями СП 24.13330.2011 [6].

Выводы.

1. Использование предлагаемой методики расчёта свайных фундаментов в отличие от традиционного способа [6], не предполагает определение несущей способности свай, проведение их испытаний и расчёта осадки, что обладает существенным экономическим эффектом.

2. Проектирование свайных фундаментов по величине задаваемой осадке (II предельное состояние) позволяет снизить неравномерность относительной осадки рядом расположенных фундаментов до минимальных допустимых значений, что создаёт наиболее благоприятные условия для работы надземных конструкций сооружения.

1. Алексеев С. И. Инженерный метод проектирования фундаментов по выровненным осадкам. Основания, фундаменты и механика грунтов № 5, 1998, М., Стройиздат.
2. Алексеев С. И. Проектирование ленточных фундаментов по заданной осадке с учётом двух предельных состояний <http://www.buildcalc.ru/Articles/Open.aspx?id=2015022201>, 2015 г.
3. Алексеев С. И. Механика грунтов, основания и фундаменты. Избранные главы. Учебное пособие (для магистрантов и аспирантов строительных специальностей), Издательство АСВ. М. 2019 г.
4. Свод правил. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/456054206>
5. Березанцев В. Г. Расчёт оснований сооружений. (Пособие по проектированию). Л. 1970 г.
6. Свод правил. СП 24.13330.2011. Свайные фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 2.02.03-85. <http://docs.cntd.ru/document/1200084538>
7. BRNL – Расчёт размеров и осадки существующего или нового фундамента с учётом возможной нелинейной работы основания. СВИДЕТЕЛЬСТВО о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015615210. Официальный бюллетень федеральной службы по интеллектуальной собственности (РОСПАТЕНТ) № 6 (104) 2015, 20.06.2015 г.