

УДК 624.154.04:624.156.04]:624.131.213

РАСЧЕТ ОСАДКИ СВАЙНО-ПЛИТНОГО ФУНДАМЕНТА С УЧЕТОМ РАССЕЙВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ ПОД ПЛИТОЙ

CALCULATION OF PILED-RAFT FOUNDATION SETTLEMENT TAKING INTO ACCOUNT STRESS DISSIPATION UNDER THE RAFT

Сернов В.А., к.т.н., доцент (Белорусский национальный технический университет, г. Минск)

Sernov V.A., Ph.D., associate professor (Belorussian National Technical University, Minsk)

В статье приведено обоснование расчетных схем для определения осадки свайно-плитных фундаментов. Предложен метод расчета, учитывающий рассеивание напряжений под плитой в пределах межсвайного пространства.

Analytical models substantiation for settlement calculation of piler-raft foundations are given in the article. Computing method taking account of stress dissipation under the raft was introduced.

Ключевые слова:

Свая, ростверк, осадка, фундаментная плита.

Введение

Результаты многочисленных модельных и натурных экспериментальных исследований фрагментов свайно-плитных фундаментов [1, 2], а также данные мониторинга строящихся зданий, полученные в нашей стране и за рубежом, показывают, что в диапазоне осадок, не превышающих предельно допускаемые значения по действующим строительным нормам графики зависимости осадки основания от веса здания имеют зависимость близкую к линейной. Следовательно, при расчете осадки свайно-плитного фундамента основание можно представить линейно-деформируемым полупространством. В данном случае для расчета напряжении можно применить закономерности теории упругости.

Конструктивно свайно-плитный фундамент состоит из фундаментной плиты и совокупности свай, которые в зависимости от их шага могут рассматриваться как отдельно стоящие, либо объединенными в свайное поле. При возведении здания в основании фундаментной плиты возникают вертикальные напряжения, затухающие с глубиной. Максимальные значения напряжений будут непосредственно под подошвой плиты, а на глубине

равной глубине сжимаемой толщи грунта эти напряжения принимаются равными нулю.

Сваи рассматриваются как отдельно стоящие в случае передачи основной части нагрузки от сооружения на основание через подошву фундаментной плиты, а сами сваи под плитой располагаются локально в точках приложения нагрузок от несущих элементов здания. В этом случае шаг свай, как правило, превышает $5-6d$ (d – диаметр свай) и при расчете осадок их взаимным влиянием можно пренебречь. Если доля нагрузки, передаваемой на основание сваями сопоставима с долей нагрузки, передаваемой фундаментной плитой или превышает ее, шаг свай в среднем составляет примерно $3-4d$. В данном случае необходимо учитывать их взаимное влияние. Эпюры вертикальных напряжений от сил трения вдоль боковых поверхностей свай будут накладываться друг на друга в межсвайном пространстве и на уровне нижних концов свай.

Пренебрегая деформациями стволов свай, принимаем, что осадка их нижних концов будет равна осадке фундаментной плиты. В этом случае осадка свайно-плитного фундамента будет определяться как осадка входящих в его состав свай от вертикальных напряжений, действующих в горизонтальной плоскости на уровне нижних концов свай. Эти напряжения возникают в результате следующих воздействий:

- 1) контактные давления нижних концов свай на основание;
- 2) вертикальные давления от сил трения грунта вдоль боковых поверхностей свай;
- 3) дополнительные давления при загрузке фундаментной плиты.

В соответствии с принципом суперпозиций просуммировав эти давления, можно определить вертикальные сжимающие напряжения на уровне нижних концов свай.

Взаимодействие одиночной сваи с основанием

Для расчета осадки свайно-плитного фундамента необходимо понимать разницу в распределении вертикальных напряжений в основании одиночной сваи и свайного поля.

Как известно, несущая способность сваи складывается из суммы предельных сопротивлений грунта под ее нижним концом и вдоль боковой поверхности. Значения этих сопротивлений в зависимости от уровня проектируемого здания можно определить по таблицам действующих СНиП, по результатам зондирования, либо испытаниям свай статической нагрузкой. Наиболее достоверным способом определения несущей способности одиночной сваи и ее осадки является испытание статической нагрузкой.

Осадка одиночной сваи возникает от вертикальных напряжений в основании под ее нижним концом и вдоль боковой поверхности. Напряжения под нижним концом сваи распределяются по аналогии с глубинным штампом

и затухают на глубину 2-3d. Значения этих напряжений могут быть вычислены по формуле 2.28 [3].

Значения вертикальных напряжений от сил трения вдоль боковой поверхности сваи в любой плоскости, перпендикулярной ее оси, можно определить, используя решение Д. Пати [4]:

$$p_{z_0} = 1,148 f (R/r)^{-1,237} \quad , \quad (1)$$

где: f — расчетное сопротивление грунта по боковой поверхности сваи в пределах последних 1-2 м у острия;

r — радиус сваи;

R — расстояние от оси сваи до исследуемой точки.

Эпюры напряжений, построенные по зависимости 1 (рисунок 1) показывают, что максимальные вертикальные напряжения, возникающие у боковой поверхности сваи, резко затухают с удалением от нее.

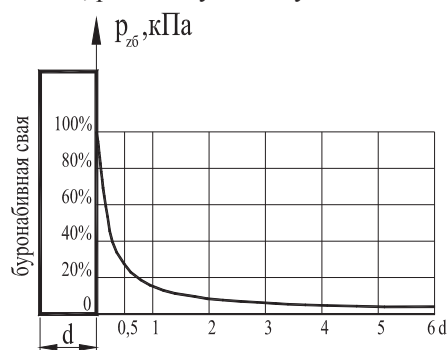


Рис. 1. Схемы взаимодействия традиционных свайных и свайно-плитных фундаментов с основанием

На расстоянии $0,5d$ от ствола сваи значения этих напряжений уменьшаются в 4 раза, а на расстоянии $1d$ — в 6 раз. Эти расчеты подтверждаются результатами экспериментальных исследований, проведенных С. И. Цымбалом [5] и объясняют отсутствие значительных вертикальных перемещений грунта уже на расстоянии менее $0,5d$ от боковой поверхности сваи при проведении модельных исследований.

Взаимодействие свай группе

Экспериментально установлено, что при локальном расположении свай под несущими конструкциями и их шаге 5-6d и более сваи работают как отдельно стоящие. Взаимное влияние свай незначительно и им можно пренебречь. Осадка таких свай, как и одиночных возникает от лобового

давления их нижних концов на основание и сил трения в пределах участка боковой поверхности длиной $4d$ в нижней части стволов свай (рисунок 1).

При увеличении количества свай и уменьшении их шага в группе до $3d$ эпюры вертикальных давлений p_b от сил трения боковых поверхностей свай будут объединяться и накладываться в пределах горизонтальных сечений. Вертикальные давления при наложении эпюр p_b будут суммироваться (рисунок 2). Таким образом, при объединении и суммировании эпюр p_b будет возрастать интенсивность вертикальных давлений и увеличиваться площадь их приложения. В отличие от одиночной сваи, на осадку свай в группе будут влиять силы трения от участков, расположенных выше, чем $4d$ от нижнего конца сваи. Эти силы будут создавать дополнительную пригрузку основания на уровне нижних концов свай и при прочих равных условиях осадка сваи в составе группы превысит осадку отдельно стоящей сваи.

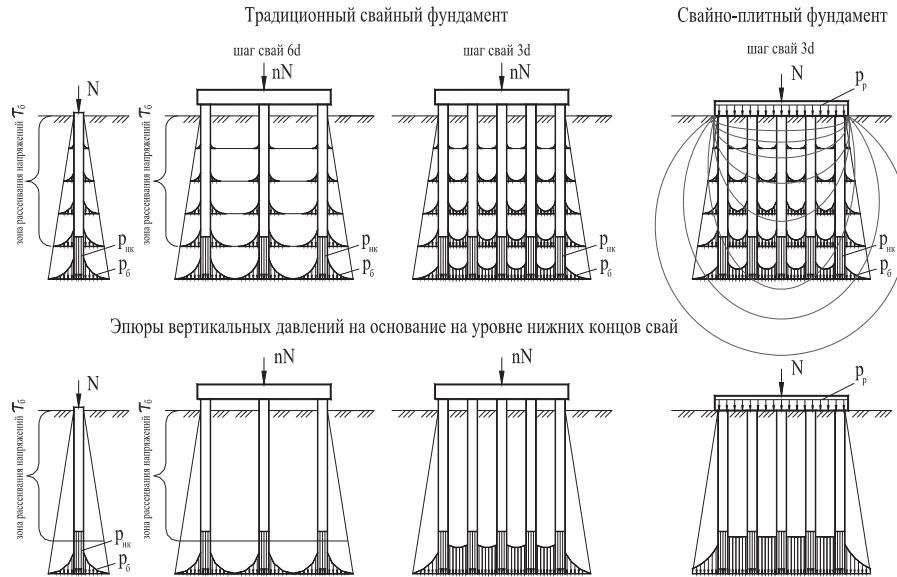


Рис. 2. Схемы взаимодействия традиционных свайных и свайно-плитных фундаментов с основанием

Взаимное влияние свай не ограничивается только дополнительной пригрузкой основания от сил трения в верхней части их стволов. Вертикальные напряжения от лобового сопротивления нижних концов свай также могут накладываться друг на друга. По принципу суперпозиций эти напряжения суммируются провоцируя увеличение осадки сваи в составе группы в сравнении с одиночной сваей.

Дополнительные вертикальные напряжения в основании сваи от контактных давлений под нижними концом соседней сваи и ее

дополнительную осадку $S_{доп,нк}$, м можно определить используя решение Миндлина [6] о силе $P, кН$ приложенной внутри полупространства на некоторой глубине. При одинаковой длине свай $z=h$, дополнительную осадку можно определить по следующей зависимости:

$$S_{доп,нк} = K_{нк} \cdot \frac{P}{8\pi E} \quad (2)$$

$$K_{нк} = \frac{3-4\nu}{r} + \frac{8(1-\nu)^2 - (3-4\nu)}{\sqrt{r^2 + 4h^2}} + \frac{(3-4\nu) \cdot 4h^2 - 2h^2}{(\sqrt{r^2 + 4h^2})^3} + \frac{24h^4}{(\sqrt{r^2 + 4h^2})^5}$$

где: P — вертикальная нагрузка равная сумме нагрузок воспринимаемой нижним концом сваи и боковой поверхностью на участке длиной $4d$ у нижнего конца сваи, кН;

$K_{нк}$ — коэффициент влияния, зависящий от вида грунта, длины свай и расстояния между ними.

r — расстояние по горизонтали от линии действия сосредоточенной силы P до рассматриваемой точки, м;

h — расстояние от гижнего конца сваи до поверхности грунта, м;

E — модуль деформации грунта, кПа;

ν — коэффициент бокового расширения, м;

Для свайного поля, состоящего из большого количества свай дополнительная осадка сваи может быть определена суммированием коэффициентов влияния от всех свай входящих в состав фундамента по зависимости:

$$S_{доп,нк} = \sum_{i=1}^n K_{нк,i} \cdot \frac{P_i}{8\pi E} \quad (3)$$

Рассеивание вертикальных напряжений в основании фундаментной плиты

Результаты экспериментальных исследований [7, 8] свидетельствуют, что напряжения в грунтах под фундаментной плитой в составе свайно-плитного фундамента распределяются аналогично напряжениям под плитой на естественном основании. Максимальные вертикальные напряжения возникают непосредственно под подошвой фундаментной плиты. С глубиной эти напряжения уменьшаются. Слой грунта, в котором происходит полное затухание напряжений, называется глубиной сжимаемой толщи H_c . Сравнение существующих методов расчета глубины сжимаемой толщи грунта для сплошных фундаментных плит по ТКП 45-5.01-67-2007 с результатами измерений напряжений в основании 9-ти и 16-тиэтажных зданий [9] показали хорошую сходимость теоретических значений H_c с экспериментальными данными. Следовательно, толщину слоя грунта, в котором произойдет полное затухание напряжений от контактных давлений под фундаментной плитой можно определить по зависимостям ТКП 45-5.01-

67-2007. Если толщина этого слоя не превышает длину свай L , т.е. $H_c < L$ (рисунок 3) контактные давления под плитой не окажут влияние на осадку свайного поля [10]. В случае $H_c > L$ (рисунок 4) на уровне нижних концов свай возникнут дополнительные напряжения $\sigma_{z, \text{дон}}$ влияющие на осадку свайного поля. С незначительной погрешностью в сторону надежности фундамента криволинейная эпюра затухания вертикальных напряжений может быть представлена в виде прямой линии с координатой на уровне подошвы плиты равной среднему контактному давлению p_n и координатой на глубине H_c равной нулю.

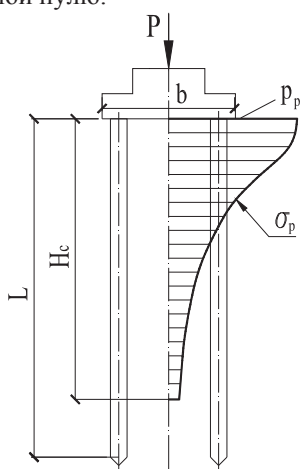


Рис.3. Схема распределения вертикальных напряжений под подошвой фундаментной плиты при $H_c < L$

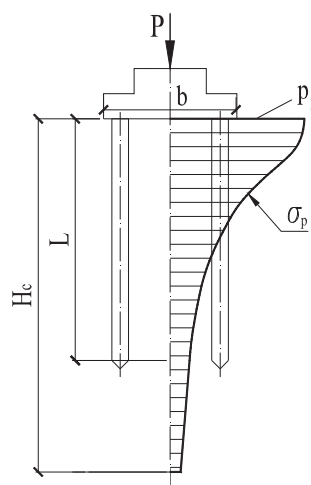


Рис.4. Схема распределения вертикальных напряжений под подошвой фундаментной плиты при $H_c > L$

Дополнительное вертикальное напряжение на уровне нижних концов свай от воздействия фундаментной плиты можно определить по зависимости:

$$\sigma_{z, \text{дон}} = p_n \cdot \frac{L}{H_c} \quad (4)$$

где: p_n — среднее давление под подошвой фундамента, кПа ;

L — длина свай, м ;

H_c — глубина сжимаемой толщи грунта в основании фундаментной плиты, м .

Расчет осадки свайно-плитного фундамента по результатам статических испытаний свай

Испытание сваи статической нагрузкой является наиболее достоверным способом определения ее несущей способности и осадки. Недостатком этого метода является то, что он не дает информации о сопротивлении отдельно

боковой поверхности сваи и ее нижнего конца, а так же распределение сил трения вдоль боковой поверхности сваи. Решением этой проблемы может быть включение в программу изысканий отдельных испытаний грунтов статической нагрузкой под нижним концом сваи и вдоль ее боковой поверхности. Для оценки сопротивления отдельных слоев грунта по длине сваи и распределения усилий между боковой поверхностью и нижним концом сваи можно использовать результаты статического зондирования.

Осадка свайно-плитного фундамента $S_{СПФ}$ может определяться как сумма осадки одиночной сваи S_1 , дополнительной осадки от напряжений в глубине основания от давлений под нижними концами соседних свай $S_{доп,нк}$ и осадки окружающего основания грунта от вертикальных напряжений на уровне нижних концов свай, возникающих от сил трения вдоль боковых поверхностей свай и контактных давлений под подошвой фундамента S_M .

$$S_{СПФ} = S_1 + S_{доп,нк} + S_M \quad (5)$$

где: S_1 — осадка одиночной сваи, определяется по графикам статических испытаний, м;

$S_{доп,нк}$ — дополнительная осадка от лобовых давлений на грунт нижних концов всех свай в фундаменте, м, определяется по зависимости:

$$S_{доп,нк} = n \cdot K_{нк,ср} \cdot \frac{P}{8\pi E} \quad (6)$$

где: n — количество свай в группе;

$K_{нк,ср}$ — средний коэффициент влияния, зависящий от вида грунта, количества и длины свай и расстояния между ними;

P — вертикальная нагрузка равная сумме нагрузок воспринимаемой нижним концом сваи и боковой поверхностью на участке длиной $4d$ у нижнего конца сваи, кН;

S_M — осадка слоя грунта в пределах от уровня нижних концов свай до глубины сжимаемой толщи H_c , м.

Значение S_M определяется методом послойного суммирования в соответствии с ТКП 45-5.01-67-2007 «Фундаменты плитные. Правила проектирования».

Выводы

1. Осадка свайно-плитного фундамента определяется как осадка входящих в его состав свай от вертикальных напряжений, действующих в горизонтальной плоскости на уровне нижних концов свай. Эти напряжения возникают в результате контактных давлений нижних концов свай на основание, вертикальных давлений от сил трения грунта вдоль боковых поверхностей свай и дополнительных давлений при загрузке фундаментной плиты.

2. В отличие от существовавших до сих пор подходов в разработанном нами методе расчета предусматривается определять осадку свайно-плитного фундамента с учетом дополнительных вертикальных напряжений в уровне

нижних концов свай от взаимодействия плиты с основанием, если глубина сжимаемой толщи грунта под его подошвой превышает длину свай.

1. Сернов, В.А. Натурные исследования фрагментов свайно-плитных фундаментов из конических свай / В.А. Сернов // Сб. науч. тр. – Ровно, 2014. – Вып. 29 : Ресурсоєкономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. – С. 555–560. 2. Sernov, V.A. Investigation of piled-raft foundations in soil conditions of Minsk / V.A. Sernov // Proceedings of the conference of Baltic piling days 2012, Tallin, Estonia, 3-5 September 2012. С. 95-102. 3. Пилягин, А.В. Проектирование оснований и фундаментов зданий и сооружений / А.В. Пилягин. – М. : Издательство Ассоциации строительных вузов, 2005. – 248 с. 4. Далматов, Б.И. Проектирование свайных фундаментов в условиях слабых грунтов / Б.И. Далматов, Ф.К. Лапшин, Ю.В. Россихин. – Л. : Стройиздат, 1975. – 240 с. 5. Цымбал, С.И. Экспериментальное исследование напряженного состояния в основании модели висячей сваи / С.И. Цымбал // Республ. межвед. науч.-техн. сб. – Киев : Будівельник, 1973. – Вып. 6 : Основания и фундаменты. – С. 134–141. 6. Цытович, Н.А. Механика грунтов / Н.А. Цытович. – М. : Госстройиздат, 1963. – 636 с. 7. Козачок, Л.Д. Исследование распределения вертикальных напряжений в основании кустов висячих свай с низким ростверком: дис. ... канд. техн. наук : 05.23.02 / Л.Д. Козачок. – Л., 1979. – 174 л. 8. Кондрашов, В.А. Исследование деформаций грунта основания моделей свайных фундаментов методом фотофиксации траектории движения грунтовых частиц / В.А. Кондрашов // Основания, фундаменты и подземные сооружения : Труды пятой конф. молодых науч. сотрудников, Москва, 9–10 июня 1970 г. – М., 1970. — С. 239–246. 9. Тугаенко, Ю.Ф. Развитие деформаций в основаниях фундаментов, способы их ограничения и методы оценки / Ю.Ф. Тугаенко. – Одесса : Астропринт, 2003. – 224 с. 10. P5.01.015.05 «Рекомендации по расчету свайных фундаментов с несущими ростверками» Минск, БНТУ, 2005 — 24 с.