

Самородов А.В.*Харьковский национальный университет строительства и архитектуры***МЕТОД ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ
СВАЙНО-ПЛИТНЫХ ФУНДАМЕНТОВ МНОГОЭТАЖНЫХ ЗДАНИЙ
ПО ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМЫМ ОСАДКАМ**

Еще в прошлом столетии видными советскими учеными А.А. Луга, В.Н. Голубковым, В.Г. Березанцевым, Б.И. Далматовым и другими было проведено большое количество экспериментальных и теоретических исследований взаимодействия ленточных свайных фундаментов с грунтовыми основаниями, результаты которых были дополнены проф. А.А. Бартоломеем и опубликованы в монографии [1], посвященной проектированию таких фундаментов по предельно допустимым осадкам.

В настоящее время, судя по большому количеству публикаций и анализу некоторых из них [2-9], одним из самых актуальных научных направлений в области геотехники является включение в работу плиты ростверка при увеличении кратности шага между осями свай $n > 3$, так называемые комбинированные свайно-плитные фундаменты [10]. Такая заинтересованность объясняется, в первую очередь, желанием проектных организаций предлагать оптимальные проектные решения фундаментов за счет рационального использования механических свойств грунтовых оснований, что является прямым следствием заинтересованности инвесторов в снижении стоимости строительства. Однако, эти, в основном, численные исследования выполняются с помощью мощных расчетных комплексов типа ANSYS, PLAXIS, SOFISTIK и др. по учету взаимного влияния свай и ростверка, применения различных моделей основания, что позволяют делать только частные выводы и рекомендации. Однако отсутствует инженерный подход по оптимизации проектных решений свайно-плитных крупно-размерных фундаментов многоэтажных зданий.

Действительно, существует парадоксальная ситуация в нормативной методике

расчета свайных фундаментов, которая состоит из следующих этапов:

- определяется несущая способность свай на основании физико-механических свойств основания - первая группа предельных состояний;

- проводятся обязательные статические испытания свай, где несущая способность, в основном, принимается по деформациям, исходя из предельно допустимых осадок для сооружений, в том числе, в нелинейной стадии - вторая группа предельных состояний;

- определяются осадка основания условного свайного фундамента, взаимодействующего с линейно-деформируемым полупространством при ограничении давления расчетным сопротивлением грунта R в уровне нижних концов свай - вторая группа предельных состояний.

Более того, по результатам испытания натуральных свай при назначении их расчетной нагрузки по деформациям вводится коэффициент надежности $\gamma_k = 1,2$, что приводит, как правило, к снижению осадок свайного поля более чем в 2 раза и противоречит нормативному условию соотношения осадок одиночных свай к предельно допустимым осадкам сооружения $\zeta = 0,2$ [9], т.е. инженеры-проектировщики вынуждены увеличивать количество свай ориентировочно на 20%, при неизменной осадке условного фундамента.

Отсюда видно, что отдельные части методики расчета свайного фундамента не согласованы между собой и, поэтому, осадки свайных фундаментов значительно меньше предельных величин.

Считаем, что здесь кроется принципиально неверный подход к оценке деформаций свайно-плитного фундамента, т.к. при испытании свай определяются местные деформации, а свайно-плитно-грунто-

вий массив имеет общие деформации относительно первоначальной поверхности планировки.

Поэтому, предлагается рассмотреть построение инженерной методики оптимального проектирования свайно-плитного фундамента исходя из предельно допустимых осадок сооружения S_u , принимая во внимание нормативную расчетную схему взаимодействия условного фундамента с линейно-деформируемой грунтовой средой (см. рис. 1).

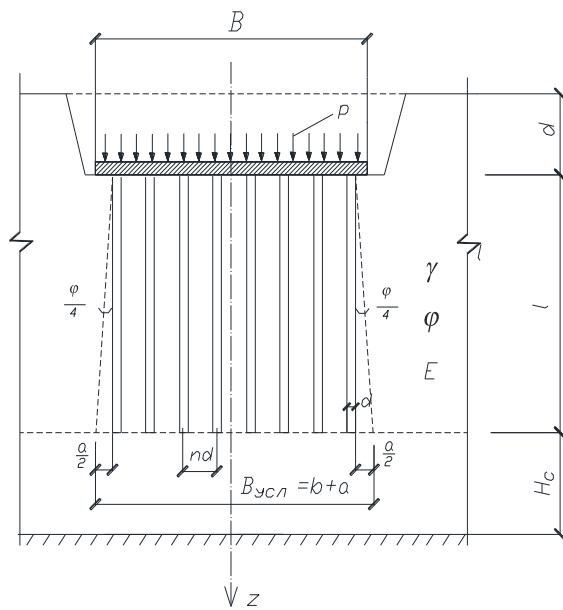


Рис. 1. Расчетная схема взаимодействия свайно-плитного крупноразмерного фундамента с грунтовым массивом

Сделаем ряд обоснований и допущений:

- давление p принимается усредненным равномерно распределенным по всей площади фундаментной плиты и остается такой же интенсивностью на уровне подошвы свай, а также до нижней границы сжимаемой толщи H_c , т.к. для крупноразмерных фундаментов сжимаемая толщина H_c обычно не превышает $0,5 \div 1,0B$, а некоторое увеличение площади подошвы условного фундамента $B_{усл} \times L_{усл}$ по сравнению с размерами плиты $B \times L$ будет компенсировано дополнительным учетом веса свайного поля;

- нижняя граница сжимаемой толщи H_c назначается из нормативного условия

[10]: $k \cdot \sigma_{zg, H_c} = \sigma_{zp, H_c}$ (где k – коэффициент, принимаемый в зависимости от ширины подошвы фундамента B);

- для определения осадки применяем формулу для равномерно нагруженного слоя грунта: $S = \beta \frac{P \cdot H_c}{E}$ (где β – коэффициент, учитывающий невозможность бокового расширения грунта, обычно принимаемый равным $\beta=0,8$);

- для упрощения выводов принимаем физико-механические характеристики грунтовой толщи усредненные: γ, φ и E .

Согласно рис. 1 и принятым допущениям запишем нормативное равенство напряжений на границе сжимаемой толщи $k \cdot \sigma_{zg, H_c} = \sigma_{zp, H_c}$ в виде

$$k \cdot \gamma (d + l + H_c) = p, \tag{1}$$

тогда длина свай будет равна

$$l = \frac{P}{k \cdot \gamma} - d - H_c, \tag{2}$$

а сжимаемая толщина определяется исходя из предельно допустимых деформаций для данного сооружения

$$H_c = \frac{S_u \cdot E}{\beta \cdot p}, \tag{3}$$

при этом, расстояние a между сваями не должно превышать величины

$$a = 2l \cdot \operatorname{tg} \frac{\varphi}{4} + d \tag{4}$$

для обеспечения передачи равномерно распределенной нагрузки p в уровень подошвы условного фундамента, которая и является оптимальным шагом свай $nd=a$ (см. рис. 1).

Т.е. на основании вышеприведенных зависимостей можно по формуле (2) прямо находить длину свай l , предварительно определив сжимаемую толщину H_c по формуле (3) исходя из предельной осадки сооружения S_u , либо предварительно задавшись длиной свай l , определить величину сжимаемой толщи основания по формуле

$$H_c = \frac{P}{k \cdot \gamma} - d - l,$$

и проверить выполнение условия по деформациям

$$S = \beta \frac{p \cdot H_c}{E} \leq S_u.$$

С другой стороны, должно выполняться нормативное условие по недопущению превышения расчетной нагрузки N на одиночную сваю в составе фундамента исходя из ее несущей способности по грунту F_d с учетом коэффициента надежности γ_k :

$$N \leq \frac{F_d}{\gamma_k}. \quad (4)$$

Здесь следует особо отметить, что осадки свайного поля увеличиваются по сравнению с деформацией одиночной сваи при равных вертикальных вдавливающих нагрузках N , что правомерно принимается проектировщиками как «снижение» несущей способности свай в составе фундамента. Однако, несущая способность свайного поля как условного фундамента, наоборот, будет выше суммарной устойчивости одиночных свай, что подтверждает нормативная формула определения несущей способности $N_u(p_u)$, где с ростом ширины B подошвы фундамента эта величина увеличивается, а также показывают натурные эксперименты А.А. Бартоломея [1].

Поэтому, нами предлагается рассматривать сваю не как отдельный элемент с определенной несущей способностью, а, именно, как элемент, обеспечивающий передачу равномерно-распределенной нагрузки p под плитой ростверка на глубину, равную длине свай для принятия «условного» сплошного фундамента, т.е. допускается не выполнять условие (4). Тогда, как правило, всегда будет выполняться условие $p \leq R$ для возможности принятия грунтового основания в виде линейно-деформируемой среды, а условие допустимой предельной нагрузки на основание будет удовлетворяться автоматически, т.к. для центрально нагруженных фундаментов $R < p_u$.

На данном этапе теоретических обоснований без экспериментального подтверждения предложим выполнение нормативного условия (4) в следующем виде:

$$\frac{p \cdot B \cdot L}{x} \leq N, \quad (5)$$

где $x = \frac{B \cdot L}{a^2} + \frac{L}{a}$ - количество свай в свайном поле при регулярном оптимальном шаге $a = 2l \cdot \operatorname{tg} \frac{\varphi}{4} + d$.

На конкретном примере рассмотрим возможность оптимального проектирования свайно-плитного фундамента проектируемого 28-ми этажного здания с полным монолитным железобетонным каркасом в г. Бровары Киевской области со следующими исходными данными:

- размеры плиты в плане $B \times L = 35 \times 35$ м;
 - среднее давление под подошвой плиты равно $p = 450$ кПа;
 - средний удельный вес грунта $\gamma = 20$ кН/м³;
 - допустимая осадка с учетом повышающих коэффициентов $S_u = 27,0$ см = 0,27м;
- другие величины приведены на расчетной схеме рис. 2.

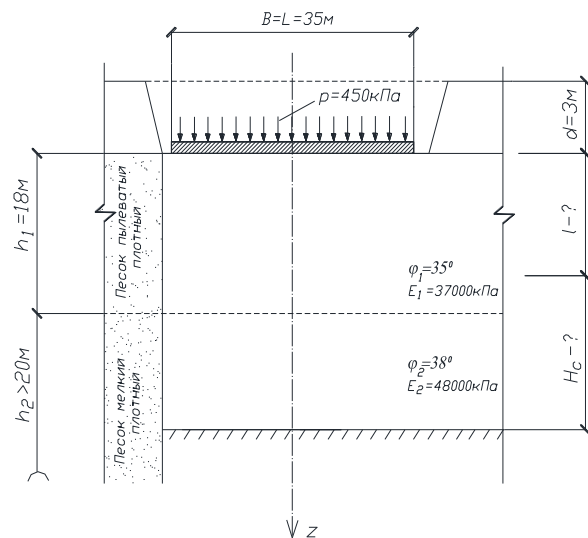


Рис. 2. Схема заложения плиты ростверка на инженерно-геологическом разрезе

На рис. 3 рассмотрим 1-й вариант заложения подошвы свай в первом несущем слое (ИГЭ-1).

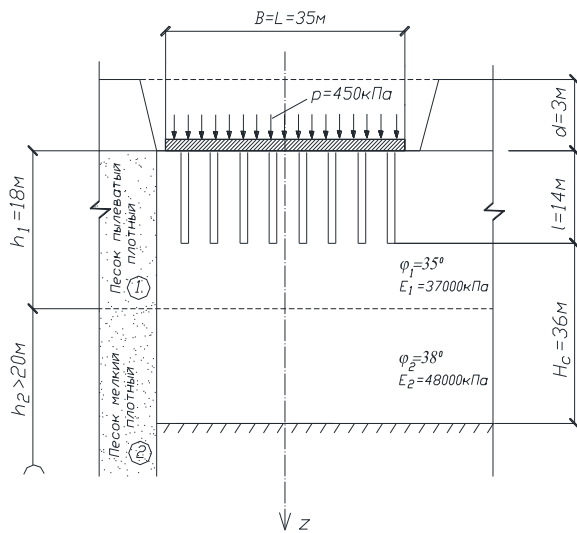


Рис. 3. Вариант заложения свайно-плитного фундамента в ИГЭ-1

Найдем оптимальные параметры длины и шага свай:

$$H_c = \frac{0,27 \cdot 37000}{0,8 \cdot 450} = 28 \text{ м};$$

$$l = \frac{450}{0,5 \cdot 20} - 3 - 28 = 14 \text{ м};$$

$$a = 2 \cdot 14 \cdot \text{tg} \frac{35}{4} + 1 = 5,3 \text{ м}.$$

Определим количество свай:

$$x = \frac{35 \cdot 35}{5,3^2} + \frac{35}{5,3} = 50 \text{ шт.},$$

а расчетная нагрузка на сваю должна быть равна

$$N = \frac{450 \cdot 35 \cdot 35}{50} = 11025 \text{ кН}.$$

На рис. 4 рассмотрим 2-ой вариант заложения подошвы свай во втором несущем слое (ИГЭ-2).

В данном случае, первоначально заданная длиной свай $l = 21 \text{ м}$, обеспечивая заложение подошвы в несущий слой на глубину не менее 2-х метров, при этом оптимальный шаг свай будет равен:

$$a = 2 \cdot 21 \cdot \text{tg} \frac{35,4}{4} + 1 = 7,5 \text{ м}.$$

Сжимаемая толща равна

$$H_c = \frac{450}{0,5 \cdot 20} - 3 - 21 = 21 \text{ м},$$

при этом, естественно, выполняется условие по осадкам сооружения:

$$S = 0,8 \frac{450 \cdot 21}{48000} = 0,15 \text{ м} \leq 0,27 \text{ м}.$$

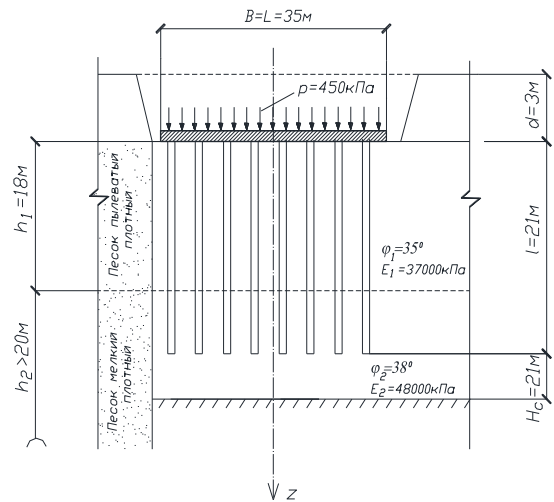


Рис. 4 – Вариант заложения свайно-плитного фундамента в ИГЭ-2

Количество свай будет равно

$$x = \frac{35 \cdot 35}{7,5^2} + \frac{35}{7,5} \cong 27 \text{ шт.},$$

а несущая способность свай должна обеспечить расчетную нагрузку, равную величине

$$N = \frac{450 \cdot 35 \cdot 35}{27} = 20417 \text{ кН}.$$

Из примеров видно, что для оптимального проектирования свайно-плитного фундамента по предельным деформациям число свай незначительно, поэтому повышаются расчетные нагрузки на сваи, которые могут быть обеспечены увеличением диаметра до $d = 1,2 \div 1,5 \text{ м}$, что практически не отразится на параметрах свайного поля, а кратность шага между осями свай будет в реальных проектных пределах: $n = 4 \div 6d$.

На рассмотренной реальной площадке строительства обосновано приняты буринъекционные сваи диаметром $d = 0,63 \text{ м}$ и длиной $l = 20 \text{ м}$ в количестве 169 шт., при этом на основании статических испытаний расчетная нагрузка на сваи составила 2700 кН , а также принято допущение о восприятии «плитой» нагрузки порядка 15%. Если принять в качестве критерия оптимизации общий расход бетона V на свайное поле и диаметр свай $d = 1,2 \text{ м}$ в случае 2-х наших проектных вариантов, то получим

снижение расхода бетона на 25% и 40% соответственно для 1 и 2 вариантов по сравнению с современными подходами при проектировании свайно-плитных фундаментов.

Выводы.

1. Предложен новый метод и разработана методика определения оптимальных параметров крупноразмерного свайно-плитного фундамента: шага a между осями свай и их длины l при проектировании основания по предельно допустимым осадкам S_n сооружений.
2. Впервые предлагается рассматривать сваю не как отдельный элемент с определенной несущей способностью, а как элемент системы, который лишь формирует «условный» сплошной фундамент, передающий равномерно-распределенную нагрузку на глубину, равную длине свай. При этом, нормативное условие (4) может носить рекомендательный характер, а результаты статических испытаний, кроме определения предельной нагрузки на сваи, могут служить способом определения реального модуля деформации грунта E несущего слоя, который, как правило, имеем заниженные лабораторные значения.
3. Даже в случае выполнения всех существующих нормативных условий методика позволяет принимать оптимальные проектные решения при существенном снижении расхода материальных ресурсов, в частности, бетона свай.
4. Теоретическое обоснование данной методики требует широкого экспериментального подтверждения для возможности ее дальнейшего применения при строительстве реальных объектов на свайно-плитных фундаментах.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Бартоломей А.А. Основы расчета ленточных свайных фундаментов по предельно допустимым осадкам. - М.: Стройиздат, 1982. - 223 с.
2. Poulos H.G., Small J.C., Ta L.D., Sinha J. and Chen L. Comparison of Some Methods for Analysis of Piled Rafts. Proc. 14 ICSMFE, Hamburg, 2: 1997. - Pp.1119-1124.
3. Александрович В.Ф., Курилло С.В., Федоровский В.Г. К вопросу о взаимном влиянии свай и плиты в основании свайно-плитного фундамента // Тр. конф. Реконструкция исторических городов и геотехническое строительство. - 2003. - Стр. 125-143.
4. Катценбах Р., Шмитт А., Рамм Х. Основные принципы проектирования и мониторинга высотных зданий Франкфурта-на-Майне. Случаи из практики // Реконструкция городов и геотехническое строительство. - 2005. - №9. - Стр. 80-99.
5. Бахолдин Б.В., Ястребова П.И., Парфенов Е.А. Принципы оценки сопротивления грунтов оснований в случае совместного применения буронабивных свай и плитных фундаментов// Труды международной конференции по геотехнике «Геотехнические проблемы мегаполисов». - Т. 5. - Москва: ПИ «Геореконструкция», 2010. - С. 1661-1666.
6. Улицкий В.М., Шашкин А.Г., Шашкин К.Г. Геотехническое сопровождение развития городов. - СПб.: Геореконструкция, 2010. - 551с.
7. Рузаев А.М. Оптимизация проектных решений свайных фундаментов с учетом взаимного влияния свай и работы низкого ростверка на их несущую способность. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.23.02. - Москва: ГОУ ВПО МГСУ, 2010. - 21 с.
8. Сернов В.А. Расчет осадки свайно-плитного фундамента. // Збірник наукових праць НУВГП. - Рівне: 2012. - Вип. 23. - С. 621-629.
9. Бабанов В.В., Шашкин В.А. Расчетный анализ работы свайных фундаментов с низким и высоким ростверками и с учетом нелинейной работы основания // ОФМГ. - Москва: 2012. - №2. - Стр. 2-7.
10. СП 50-102-2003 Проектирование и устройство свайных фундаментов. - М.: Госстрой России, 2004. - 82 с.
11. ДБН В.2.1-10-2009 Основи та фундаменти споруд. К.: Мінрегіонбуд України, 2009. - 104 с.
12. ДБН В.2.1-10-2009 Зміна №1. Основи та фундаменти споруд. Основні положення проектування. - Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. - 55 с.