

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСЧЕТА СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ ПРИ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ

Викладений порівняльний аналіз методів розрахунку пальових фундаментів під час статичних та динамічних навантажень, проаналізовано особливості динамічного розрахунку такого виду конструкцій.

Представлен сравнительный анализ методов расчета свайных фундаментов при статических и динамических нагрузках, проанализированы особенности динамического расчета такого вида конструкций.

In the article the comparative analysis of calculation methods of pile foundations at the static and dynamic loadings is represented, the features of dynamic calculation of such type of constructions are analyzed.

Вопросы обоснования конструктивных особенностей свай и свайных фундаментов, выбора методов их расчета и технологии строительства, а также анализ результатов исследований взаимодействия свай рассмотрены в многочисленных работах [1–5].

В целом, свайные фундаменты обладают рядом преимуществ по сравнению с фундаментами других типов, и нашли широкое применение в современном строительстве. Одно из их достоинств – это применение свай в местах расположения несущего грунта на большой глубине. В этом случае свайный фундамент является наиболее целесообразным по техническим и экономическим соображениям.

Одной из сложных проблем является разработка методов расчета и учета взаимодействия свайных фундаментов с грунтом, в частности, свай глубокого заложения (>35 м) [3; 5]. Причем современные методы оценки нелинейного деформирования грунта под нагрузкой позволяют проанализировать только отдельные аспекты поведения свай глубокого заложения. Это объясняется неопределенностью состояния грунта после устройства свайного фундамента, пространственностью работы свайного сооружения, учет которой затруднен ограниченными возможностями ЭВМ, а также отсутствием в общем случае адекватных численных методов расчета для моделей, допускающих наряду с упругим пластичное деформирование или разупрочнение.

Как известно, расчеты фундаментов выполняются по следующим предельным состояниям:

- 1) по прочности;
- 2) по несущей способности оснований и по устойчивости против глубокого сдвига совместно с грунтом;

3) по трещиностойкости – для железобетонных фундаментов;

4) по деформациям оснований и фундаментов с определением их осадок и горизонтальных смещений верха опор.

При определении несущей способности свай-стоек либо висячих свай следует задаваться характеристиками грунта, при определении и использовании которых учитываются некоторые особенности.

В механике грунтов грунт рассматривается как линейно деформируемая среда. И для расчета используются в основном две расчетные схемы:

1) упругое линейно деформированное тело (основные параметры – модули упругости или деформации E и коэффициент Пуассона μ);

2) упругое основание типа Фусса-Винклера (основной параметр – коэффициент постели K).

Рассмотрим некоторые особенности этих схем. Основной недостаток первой схемы – модуль упругости E при больших нагрузках не является постоянным, (в таких случаях его называют модулем деформации). Кроме того, в данной схеме не учитывается работа грунта, расположенного выше подошвы плиты ростверка, одновременное взаимодействие нескольких свай с грунтом и взаимодействие столба с грунтом одновременно по боковой поверхности и подошве. Таким образом, можно полагать, что эта схема применима только для упругого полупространства и упругой полуплоскости.

По второму варианту справедливо утверждение: перемещения каждой точки упругого основания линейно связаны с интенсивностями нагрузок и не зависят от нагрузок, действующих на остальные точки поверхности. Отсюда следует, что за пределами загружаемой поверхности перемещения точек равны нулю, что на самом деле не соответствует действительности.

При определении несущей способности свай глубокого заложения появляется ряд дополнительных сложностей. Так, по данным исследований [6] при действии трехосного нагружения на сваю глубокого заложения (>35 м) было установлено, что угол внутреннего трения φ меньше нормативного значения, приведенного в СНиП [5]. В результате был сделан вывод, что касательное напряжение τ не является линейной функцией от удельного сцепления C и угла внутреннего трения φ , то есть формула $\tau = C + \sigma \operatorname{tg} \varphi$ в данном случае не справедлива. При этом огибающая кругов Мора предельных напряжений криволинейна, а расчетные параметры сопротивления грунта сдвигу φ и C различны для различных точек диаграммы. Для примера можно привести полученное уравнение криволинейной огибающей кругов предельных напряжений у полускальных, скальных и твердых глин [6]

$$\tau = (\lambda(C + f\sigma))^{\frac{1}{r}}. \quad (1)$$

Если вычислять значения прочности грунтов, находящихся при больших всесторонних давлениях по формуле Кулона, а параметры φ и C определять при давлениях 0,2...0,4 МПа, то прочность будет занижена. Наоборот, если использовать φ и C , полученные при больших значениях для расчетов прочности при малых давлениях, то она будет завышена.

Однако качественная разница между расчетом по обеим схемам существенна и при правильном назначении основных характеристик грунта и выборе условий расчета. По гипотезе Винклера при нагружении балки или плиты рядом сосредоточенных сил, например, в случае колонн, максимальными оказываются отрицательные моменты в пролетах, минимальными – положительные под колоннами. На этом основании можно сделать вывод, что балка либо стремится изогнуться выпуклостью вверх, либо прогиб волнообразно изменяется вокруг прямой. Вместе с тем расчет по схеме упругого линейно деформированного тела, то есть на основе теории упругости, как правило, дает общий изгиб выпуклостью вниз.

Проведенные натурные опыты показывают, что реальная распределительная способность грунта меньше, чем рассчитанная по теории упругости [5; 7], что выражается в быстром затухании осадок поверхности грунта по мере удаления от места приложения нагрузки. Результаты этих опытов иногда используются без

глубокого критического анализа. Так, например, опыты часто проводятся со штампами относительно небольших размеров на слабосвязном основании и без пригрузки. Для реальных фундаментов особенно больших площадей распределительная способность значительно больше, что видно по осадке и крену старых зданий при возведении вблизи них нового [5; 7].

Снижение коэффициента постели с увеличением площади штампа в указанном пределе непосредственно вытекает из того, что при этих площадях справедливо определение осадок по формуле теории упругости при неизменном модуле деформации. Причем, когда при больших площадях основание начинает работать по схеме, близкой к схеме упругого слоя конечной толщины, значительно меньшей, чем ширина фундамента, коэффициент постели стремится к некоторому постоянному пределу.

При проектировании оснований гидротехнических сооружений с длинными стальными сваями, расчет несущей способности их по СНиП [5] либо не может быть выполнен, либо нуждается в существенной корректировке, так как СНиП [5] в этих случаях дает заниженные значения несущей способности [1].

При расчете свайных фундаментов по первой группе предельных состояний несущая способность фундамента по грунту определяется из расчета наиболее нагруженной одиночной сваи фундамента на действие осевой (вертикальной) нагрузки. При этом расчетную нагрузку на сваю в случае фундаментов с вертикальными сваями рекомендуется рассчитывать по весьма приближенной формуле, а для варианта с наклонными сваями вообще отсутствуют какие-либо конкретные рекомендации. Существенные недостатки такого подхода заключаются в следующем:

- переход в предельное состояние одной из свай фундамента не всегда свидетельствует о потере несущей способности свайного фундамента как конструкции в целом;
- при расчете нагрузки на сваю не учитывается положение ростверка относительно поверхности грунта, характер отпора грунта и деформации конструкции;
- не учитывается взаимовлияние свай через грунтовую среду и взаимовлияние нагрузок и действующих в сваях усилий.

Также не удовлетворяет многим требованиям современной проектной практики методика расчета свайных фундаментов и их оснований по деформациям. При этом основные недостатки методики заключаются в следующем:

– рассчитываются только осадки фундамента; крены и повороты конструкции не определяются;

– чрезмерная схематизация реальной свайной конструкции путем замены её условным фундаментом, когда в качестве нагрузки учитывается вес грунта в объеме условного фундамента;

– использование модели основания в виде линейно деформируемого полупространства или линейно деформируемого слоя во многих случаях не соответствует условиям взаимодействия свай с грунтом.

В еще меньшей степени пригоден для гидротехнических свайных сооружений расчет на горизонтальные нагрузки, приведенный в приложении к СНиП [5]. Свая рассматривается как балка на линейно деформируемом основании, характеризуемом коэффициентом постели, линейно изменяющимся по глубине. Приведенные значения коэффициента пропорциональности отвечают условиям очень малых горизонтальных перемещений голов свай, в пределах которых работу грунтовой среды можно считать линейной. Допускается возможность перехода верхних слоев грунта в предельное состояние (развитие пластических зон), характеризуемое прочностным коэффициентом постели. Расчет может быть выполнен только для свай постоянного поперечного сечения в однородном грунте при шарнирном или жестком закреплении голов. Сваи рассчитываются на постоянную горизонтальную нагрузку без учета возможного циклического многократного характера ее приложения.

Также определенные сложности существуют при исследовании фундамента на воздействие динамической нагрузки. Сложность составляет выбор подхода при моделировании данной нагрузки, а именно, рассмотрение ее в динамическом или квазистатическом виде.

Реализация динамических свойств свайного фундамента и основания отличается некоторыми специфическими особенностями, которые выделяют целый ряд задач динамического характера в отдельную область расчетов. Особая сложность этих задач заключается в анализе как статических параметров – напряжений и деформаций, так и динамических характеристик – амплитуд и частот колебаний, присущих разным их формам.

Одним из наиболее спорных вопросов при реализации динамической задачи в случае свайного фундамента является вопрос о видах динамической нагрузки, а именно, является ли

данная нагрузка гармонической или импульсной периодической. Рассмотрение данного вопроса с этих двух позиций имеет свои специфические особенности, которые в явном виде связаны с решением динамической задачи.

Следует также отметить, что важным вопросом является выбор модели грунтового основания при динамическом взаимодействии. Из разработанных интегральных моделей (квазистатические модели Винклера, с двумя коэффициентами постели, динамические – Н. К. Снитко, Б. Г. Коренева, Винклера–Фойгта) для практической реализации возможно применение и модели Винклера и модели Винклера–Фойгта, в то же время применение дифференциальных моделей более затруднительно. Эти модели (квазистатические – невесомое упругое полупространство, слой конечной толщины, неоднородные полупространства различного типа, динамические – упругое весомое полупространство, весомый слой, модель Г. Б. Муравского) учитывают деформационные и инерционные свойства основания в каждой его точке, позволяя провести решение контактных задач [8; 9].

Согласно СНиП [5] основание должно рассматриваться как упруговязкое, линейно деформируемое и безинерционное. Упругие свойства основания описываются коэффициентами сжатия и сдвига различных типов, а рассеивающие свойства (свойства диссипации) – коэффициентами демпфирования. Уравнение вынужденных вертикальных колебаний фундамента сооружения в виде одномассовой системы в случае такого основания имеет вид:

$$m\ddot{z} + B\dot{z} + kz = Fe^{i\omega t}, \quad (2)$$

где m – масса фундамента; \ddot{z} – ускорение; $B\dot{z}$, kz – демпфирующая и упругая части реакции основания; F – вертикальная сила; ω – частота возмущения силы; t – время.

При рассмотрении поездной нагрузки как импульсно-периодической, после прекращения каждого импульса, фундамент испытывает собственные колебания, уравнение которых имеет вид:

$$z(t) = A \sin(\omega t + \varphi), \quad (3)$$

где A – амплитуда колебаний; φ – начальная фаза.

Достаточно простая реализация условия (3) возможна с применением метода конечных элементов (МКЭ), в котором оно записывается в матричной форме:

$$|z| = |\psi| \sin(\omega t + \varphi), \quad (4)$$

где $|\psi|$ – вектор-столбец, характеризующий форму собственных колебаний (соотношение между смещениями узлов).

При расчете МКЭ на динамические воздействия число компонент вектора $|z|$ зачастую бывает меньше, чем при статическом расчете [8]. При расчете на импульсно-периодическую нагрузку следует проверить ее вид – если время действия импульса τ не превышает $2,5T_s$, где T_s – период наименьшей из учитываемой форм колебаний, то импульс имеет величину равную

$$S = P_0 \int_0^{\tau} f(t) dt,$$

где P_0 – наибольшее значение импульса; $f(t)$ – функция его формы. Часто форма импульса не учитывается.

Важно также отметить, что проблема присоединенных масс грунта недостаточно изучена и часто опускается в динамических расчетах, причем модели основания являются безинерционными. Это положение развивается в СНиП [5], что значительно упрощает схему расчета, но некоторые исследователи обращают внимание на влияние присоединенных масс грунта [8; 9]. Также исследования доказывают нелинейность динамических деформационных и инерционных свойств грунта [9], что затруднительно реализовать в инженерных расчетах.

Поэтому для более репрезентативных исследований следует применять расширенный алгоритм динамического расчета, который наиболее полно соответствует расчетам, которые опираются на концепцию взаимного анализа взаимодействия в системе «сооружение–основание»:

1) расчет сооружения с учетом нелинейных свойств грунта и динамических особенностей системы;

2) анализ частот и форм вынужденных колебаний;

3) анализ напряженно-деформированного состояния системы «фундамент–основание».

Представленный алгоритм позволяет наиболее полно анализировать как динамические, так и статические характеристики основания и свайного фундамента при динамических нагрузках.

Таким образом, в расчете свай глубокого заложения существует ряд проблем и задач, которые необходимо решать теоретическим и опытным путем в виду возможного их широкого применения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Левачев С. Н. Сваи в гидротехническом строительстве: Учебное пособие / С. Н. Левачев, В. Г. Федоровский, С. В. Курило и др. – М.: АСВ, 2003. – 67–75 с.
2. Романов Д. А. Рекомендации по проектированию и устройству фундаментов из буронабивных свай и опор-колонн / Д. А. Романов, С. В. Романов, В. Д. Романов и др. – К.: Будівельник, 1985. – С. 15–24.
3. Завриев К. С. Руководство по расчету фундаментов глубокого заложения / Всесоюзный научно-исследовательский институт транспортного строительства. – М.: Госстройиздат, 1981. – С. 43–47.
4. Горбунов-Посадов М. И. О путях развития теории расчета конструкций на упругом основании // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1963, – № 1. – С. 13–14.
5. СНиП 2.02.03-85. Свайные фундаменты. Минстрой РФ. – М.: ГП ЦПП, 1985. – 48 с.
6. Петренко В. Д. Прочность грунтов при большом давлении / В. Д. Петренко, И. К. Бадалаха, В. Н. Косяк // Залізничний транспорт України, 2005. – № 3 (48). – С. 51–53.
7. Цытович Н. А. Механика грунтов. – М.: Госстройиздат, 1963. – 636 с.
8. Динамический расчет зданий и сооружений: Справочник проектировщика / Под ред. Б. Г. Коренева и И. М. Рабиновича. – М.: Стройиздат, 1981. – 215 с.
9. Швец В. Б. и др. Справочник по механике и динамике грунтов. – К.: Будівельник, 1987. – 232 с.

Поступила в редколлегию 04.12.2006.