

УДК 681.3.06:624.131

Численный анализ изменения несущей способности грунтового основания цилиндрической сваи

Д.В. ПРОКОПЕНКО

В работе рассматривается несущая способность грунтового основания цилиндрической сваи с учетом уплотнения грунта вокруг сваи. Для исследования несущей способности был применен численный анализ экспериментальных данных осадки одиночной сваи.

Ключевые слова: несущая способность, цилиндрическая свая, грунтовое основание, модуль деформации, механико-математическая модель, аналитическое приближённое решение.

This work deals with the bearing ability of the cylindrical pile soil base taking into account consolidation of the ground round the pile. The numerical analysis of experimental data of the deposits of a single pile has been applied to the research of bearing ability.

Keywords: bearing ability, cylindrical pile, soil base, deformation module, mechanical and mathematical model, analytical approximate solution.

Введение

При устройстве фундаментов зданий на основе цилиндрических свай происходит уплотнение грунта вокруг ствола сваи с постепенным убыванием его до первоначального состояния. В настоящее время все расчеты несущей способности грунтового основания происходят без учета этой особенности, что ведет к недоиспользованию несущей способности грунтового основания и, как следствие, к повышению стоимости возводимого здания. В настоящей работе уточняется механико-математическая модель модуля деформации грунтового основания, примыкающего к боковой поверхности одиночной сваи, и уточняется методика аналитического приближённого решения задачи об осадке цилиндрической сваи при линейно-упругом и нелинейном деформировании при действии на сваю сжимающей нагрузки.

Деформации грунтов как оснований фундаментов

Грунты как основания зданий обладают определенными физико-механическими характеристиками. К основным физико-механическим характеристикам относятся: модуль деформации E , коэффициент Пуассона μ , коэффициент консистенции V . Изменение этих характеристик значительно влияет на несущую способность грунтового основания как оснований фундаментов.

Физико-механические свойства любого деформируемого твёрдого тела определяют его состояние под нагрузкой. Характер и особенности деформационного процесса описываются аналитически или дискретно. Для любого однородного деформируемого твёрдого тела, в том числе элементов структуры грунтового основания, при упругой стадии работы имеет место соотношение (закон Гука) [1], [4]:

$$\sigma_i = E\varepsilon_i.$$

В этом случае достаточно двух физико-механических характеристик: E и μ . Существует несколько хорошо отработанных методик их определения [1]. Значительно сложнее обстоит дело при рассмотрении твёрдого тела и особенно грунта в стадиях за пределом линейного деформирования. В этом случае деформационный процесс в общем виде можно представить некоторой моделью общего типа [2]: $\sigma_i = f(\varepsilon_i)$, в частности,

$$\sigma_i = A\varepsilon_i^m, \quad A > 0, \quad 0 < m < 1,$$

где σ_i, ε_i – интенсивности напряжений и деформаций; A, m – параметры закона нелинейного деформирования.

Эти параметры зависят от особенностей структуры и свойств деформируемого тела, а также от особенностей самого деформационного процесса. Параметры A, m определяются экспериментально. Представляет интерес определение этих параметров аналитическими методами на основе известных физико-механических характеристик деформируемого твердого тела [2].

Изменение модуля деформации грунтового основания при устройстве фундамента здания на основе цилиндрических свай

Характер взаимодействия цилиндрической сваи с грунтовым основанием в силу имеющихся конструктивных особенностей и способа её устройства существенно влияет на величину осадки отдельной сваи и свайного фундамента в целом. При анализе деформационного процесса грунтового основания цилиндрической сваи можно выделить два этапа: погружение сваи и взаимодействие сваи с грунтовым основанием при действии сжимающей нагрузки. При погружении цилиндрической сваи происходит смятие грунта и его уплотнение вследствие внедрения тела сваи с постепенным убыванием величины уплотнения до его первоначального состояния. В целом цилиндрическая свая с уплотнённой областью грунтового основания образуют сложную по структуре и свойствам неоднородную и нелинейную физическую систему. При действии на сваю сжимающей нагрузки происходит дальнейшее деформирование грунтового основания, при этом основные физико-механические характеристики грунта изменяются. Исследование изменения этих характеристик проводилось посредством специальных натурных экспериментов, выполненных в НИИОСП, город Москва, и БЕЛНИИС, город Минск [3]. Отдельные результаты этих исследований приведены на рисунках 1, 2. На рисунке 1 показано изменение модуля деформации грунтового основания вокруг сваи в зависимости от консистенции грунта и глубины от поверхности грунта. На рисунке 2 показано изменение модуля деформации грунтового основания вокруг сваи в зависимости от расстояния от сваи и глубины от поверхности грунта.

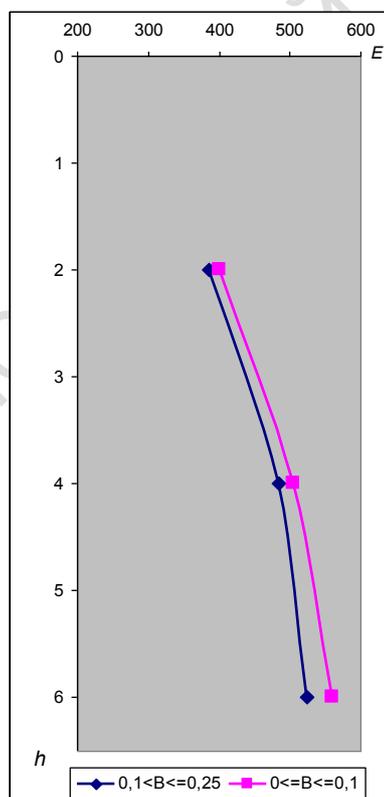


Рисунок 1 – Зависимость модуля

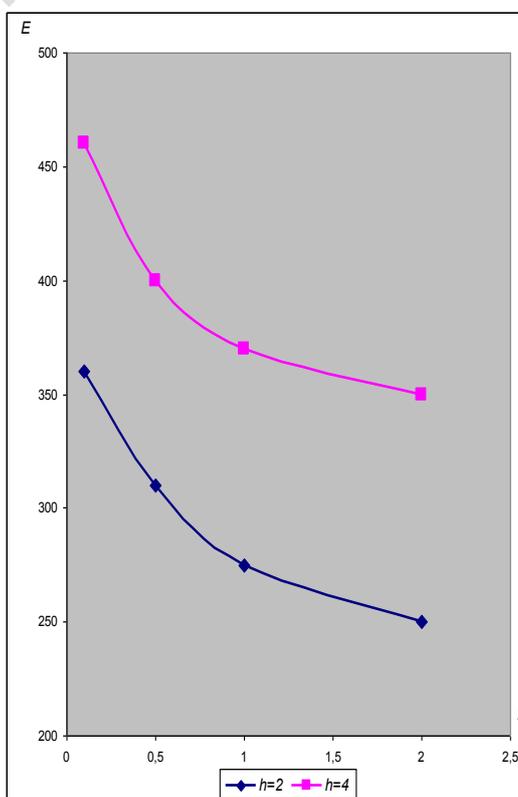


Рисунок 2 – Зависимость модуля

деформации от консистенции
грунта и глубины от поверхности
грунта

деформации от расстояния от сваи и
глубины от поверхности грунта

Приведенные экспериментальные данные были аппроксимированы методом наименьших квадратов. Для модуля деформации E_i в произвольной точке i деформируемой зоны в зависимости от консистенции грунта, расстояния от тела сваи и от поверхности грунта была получена следующая зависимость:

$$E_i = 3\mu E_0 \frac{\sqrt[3]{h}}{(Br_i)^{\frac{\mu}{2}}}, \quad r_i < r_{\max}, \quad (1)$$

где E_0 – первоначальное значение модуля деформации грунтового основания; h – глубина от поверхности грунта; B – коэффициент консистенции грунта; r_i – расстояние от тела сваи, r_{\max} – радиус деформируемой зоны вокруг сваи (выше конца сваи).

Формула (1) применима для глинистых грунтов и цилиндрических свай с диаметром ствола 30 см.

На графиках рисунков 3, 4 показано соответствие экспериментальных данных и полученных по формуле (1). Различие в значениях модуля деформации не превосходит 5%.

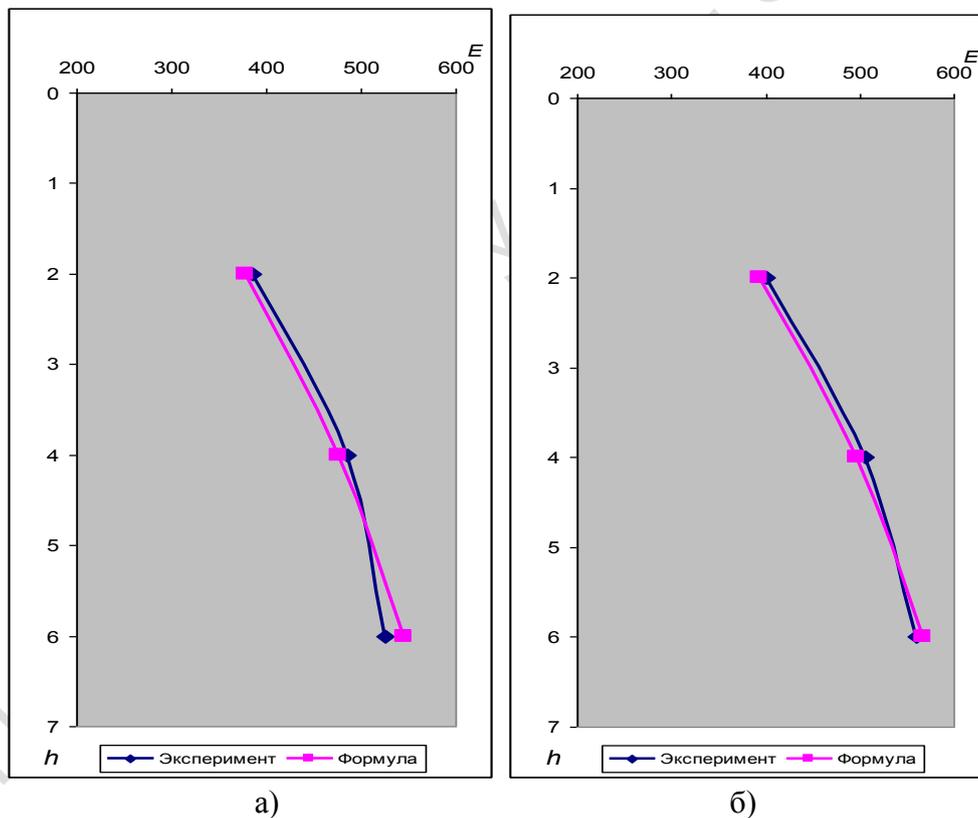
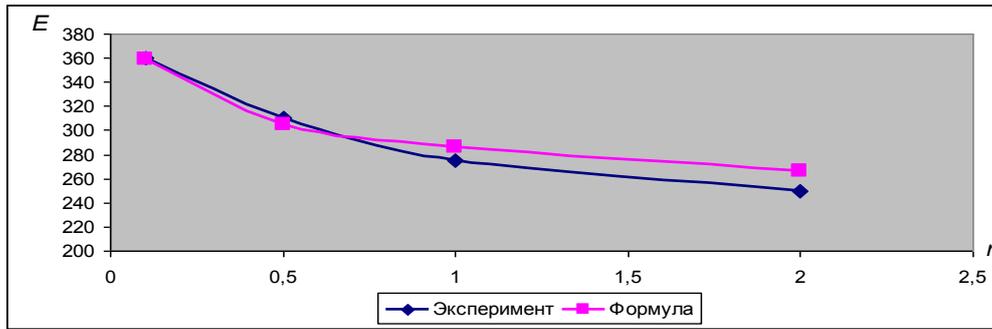
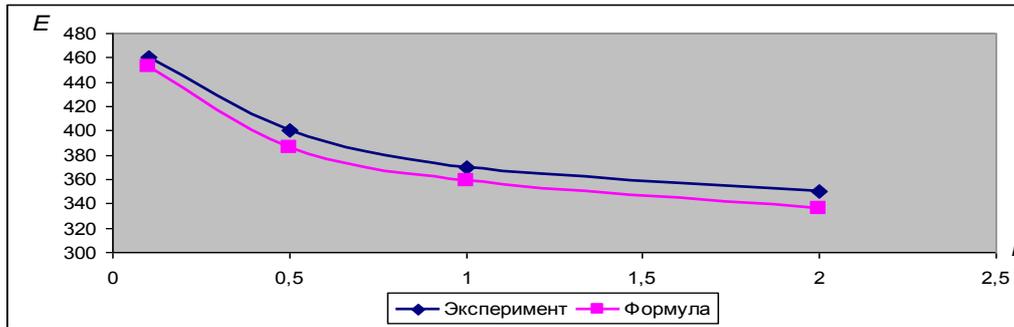


Рисунок 3 – Зависимость модуля деформации от консистенции грунта и глубины от поверхности грунта: а) $0,1 < B < 0,25$; б) $0 < B < 0,1$



а)



б)

Рисунок 4 – Зависимость модуля деформации от расстояния от сваи и глубины от поверхности грунта: а) $h = 2$; б) $h = 4$

Полученный результат позволяет определить деформации грунтового основания одиночной сваи. При этом может быть два подхода: приближенный аналитический и метод компьютерного объектно-ориентированного моделирования. Ниже изложена уточненная методика приближенного аналитического метода определения деформации грунтового основания одиночной цилиндрической сваи.

Линейно-деформируемое грунтовое основание

Будем рассматривать одиночную сваю в однородном линейно-деформируемом грунтовом основании. В этом случае выше плоскости её конца существует так называемый телескопический сдвиг, т. е. будет

$$U = 0, W = f(r), \quad (2)$$

$$\varepsilon_r = \varepsilon_\theta = \varepsilon_z = 0, \quad \gamma_{rz} = \partial W / \partial r,$$

и состояние равновесия можно представить только одним уравнением:

$$\frac{\partial^2 W}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial W}{\partial r} = 0; \quad (3)$$

или в более компактной форме

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial w}{\partial r} \right) = 0, \quad (4)$$

где U , W – горизонтальная и вертикальная составляющие вектора перемещения.

Решение уравнения (4) должно отвечать и физическим условиям задачи, т. е. в решении должны содержаться физические параметры сваи и физико-механические характеристики основания. Решение в виде

$$W = c_1 \ln \frac{c_2}{r_0}; \quad c_1 > 0; \quad c_2 > r_0 \quad (5)$$

удовлетворяет (4) и поставленным требованиям, если константы c_1 и c_2 будут определены посредством указанных параметров. В случае линейного деформирования основания осадка сваи линейно зависит от нагрузки и обратно пропорциональна модулю сдвига грунта основания и длине сваи. В известных решениях принята именно такая зависимость. Для прямой сваи при учёте радиуса ствола:

$$c_1 = \frac{\mu P}{GL}; \quad c_2 = \frac{(1 + \mu)L - 4r_0}{2}; \quad (6)$$

$$W = \frac{\mu P}{GL} \ln \frac{(1 + \mu)L - 4r_0}{2r_i}, \quad (7)$$

где L – длина сваи; r_0 – радиус ствола сваи; P – нагрузка на сваю; G – модуль сдвига.

Используя полученную формулу (1) для нахождения модуля упругости в любой точке деформируемой области, преобразуем формулу (7) к виду:

$$W = \frac{P(1 + \mu)(Br_i)^{\frac{\mu}{3}}}{3\sqrt[3]{hLE_0}} \ln \frac{(1 + \mu)L - 4r_0}{2r_i}.$$

Используя полученный результат, принцип независимости действия сил и эффект телескопического сдвига, нетрудно определить осадку цилиндрической сваи при линейно-упругом деформировании.

Нелинейно-деформируемое грунтовое основание

Будем рассматривать одиночную сваю в однородном нелинейно-деформируемом грунтовом основании. В этом случае условия телескопического сдвига сохраняются (формула (2)), и состояние равновесия можно представить одним уравнением (3).

Уравнение состояния грунта при упругом деформировании может быть представлено законом Гука:

$$\sigma_i^e = E \varepsilon_i^e, \quad (8)$$

а при нелинейном деформировании – любым уравнением кривой параболического типа, но только для соотношения

$$\sigma_i = A \varepsilon_i^m \quad (9)$$

возможны аналитические преобразования, и оно позволяет достаточно точно описывать процесс нелинейного деформирования, поэтому в работе уравнение (9) принято в качестве закона деформирования грунта. В выражении (8) индекс «e» – признак линейного деформирования.

На основании метода энергетической линеаризации [2]:

$$\varepsilon_i = \left(\frac{1 + m}{2} \frac{E}{A} \varepsilon_i^e \right)^{\frac{1}{m}}, \quad (10)$$

где

$$\varepsilon_i^e = \frac{\sqrt{2}}{2(1 + \mu)} \sqrt{(\varepsilon_r - \varepsilon_\theta)^2 + (\varepsilon_\theta - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_r)^2 + \frac{3}{2} \gamma_{rz}^2}. \quad (11)$$

Уравнение (10) устанавливает связь между интенсивностями деформаций, полученными при линейном и нелинейном решении исходной задачи.

Выражение (10) при учёте соотношений (2) и (11) примет вид

$$\frac{\partial W}{\partial r} = \left(\frac{1 + m}{2} \frac{E}{A} \right)^{\frac{1}{m}} \left(\frac{\sqrt{3}}{2(1 + \mu)} \right)^{\frac{1-m}{m}} \left(\frac{\partial W^e}{\partial r} \right)^{\frac{1}{m}}. \quad (12)$$

При упругом деформировании из уравнения (7) следует

$$\frac{\partial W^e}{\partial r} = \frac{c_1}{r}, \quad c_1 = \frac{\mu P}{GL}. \quad (13)$$

Интегрируя (12) при учёте (13) и (1), получим

$$W = \frac{B^2 \sigma_{i,кр}}{3\mu E_0 \sqrt[3]{h}} \left(\frac{1+m}{2} \frac{\sqrt{3} G}{\sigma_{i,кр}} \frac{\mu P}{GL} \right)^{\frac{1}{m}} \frac{2(1+\mu)}{\sqrt{3}} \int_{r_0}^{\infty} r^{\frac{\mu m-2}{2m}} dr + c_1. \quad (14)$$

В (14) несобственный интеграл будет сходящимся. Выполнив интегрирование, получим

$$W = \frac{4\sqrt{3} m^2 (1+\mu) B^{\frac{\mu}{2}} \sigma_{i,кр}}{9\mu E_0 \sqrt[3]{h} (m-1)(2m-\mu m+2)} \left(\frac{\sqrt{3} (1+m) \mu P}{2L\sigma_{i,кр} r_0^{\frac{\mu m-2}{2}}} \right)^{\frac{1}{m}} r_0.$$

Изложенный подход позволяет сравнительно легко определить осадку цилиндрической сваи при нелинейном деформировании.

Заключение

Фундаменты на основе цилиндрических свай отличаются высокой технологичностью устройства и большой несущей способностью, что показано результатами экспериментальных исследований, выполненных в БелНИИС [3]. Грунт необходимо рассматривать как нелинейно-деформируемую среду, и как следствие возникает задача определения физико-механических характеристик грунтового основания цилиндрической сваи. Вполне очевидно, что вследствие устройства цилиндрической сваи грунтовое основание в её окрестности будет находиться в уплотнённом состоянии. Возникает вопрос значимости этого уплотнения и его формального описания. При этом была уточнена механико-математическая модель модуля деформации грунтового основания, примыкающего к боковой поверхности одиночной сваи. Было построено аналитическое приближённое решение задачи о деформациях грунтового основания цилиндрической сваи в любой точке при линейно-упругом и нелинейном деформировании при действии на сваю сжимающей нагрузки.

Разработанная формула для получения модуля деформации в любой точке деформируемой области цилиндрической сваи может использоваться при компьютерном моделировании осадки цилиндрической сваи в нелинейно деформируемом грунтовом основании, так как она дает достаточно точный результат, который отличается от экспериментальных менее чем на 5%.

Полученные результаты в публикациях не обнаружены.

Литература

1. Цытович, Н.А. Механика грунтов / Н.А. Цытович. – М. : Стройиздат, 1963. – 542 с.
2. Быховцев, В.Е. Компьютерное объектно-ориентированное моделирование нелинейных систем деформируемых твёрдых тел / В.Е. Быховцев. – Гомель : УО «ГГУ им. Ф. Скорины», 2007. – 219 с.
3. Рекомендации по проектированию и устройству металлических винтовых свай и анкеров для сооружений в грунтовых условиях Республики Беларусь. – Минск : УП «УП Институт БелНИИС», 2006. – 57 с.
4. Безухов, Н.И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести / Н.И. Безухов. – М. : Высшая школа, 1968. – 512 с.