

УДК 624.131.5

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ОДИНОЧНОЙ ВИНТОВОЙ СВАИ С УЧЕТОМ УПЛОТНЕНИЯ ГРУНТА

Д. В. ПРОКОПЕНКО*Учреждение образования «Гомельский государственный
университет имени Ф. Скорины», Республика Беларусь*

Введение

Одной из проблем удешевления жилья является задача разработки и внедрения рациональных конструкций фундаментов зданий. При определенных свойствах грунтового основания и способе устройства фундамента здания экономически целесообразным может оказаться фундамент на основе винтовых свай. Такой фундамент и грунтовое основание образуют сложную нелинейную систему деформируемых твердых тел. При завинчивании свай в грунтовое основание происходит уплотнение грунта вокруг ствола с постепенным убыванием до его первоначального состояния. Неучет этой особенности приводит к недоиспользованию несущей способности грунтового основания и, как следствие, к повышению стоимости фундамента возводимого здания.

Постановка задачи

Рассматривается винтовая свая в нелинейно-деформируемом грунтовом основании. На винтовую сваю действует нормальная равномерно распределенная внешняя нагрузка. Необходимо исследовать несущую способность грунтового основания винтовой свай с учетом уплотнения грунта вокруг ствола свай.

Решение этой задачи проводилось посредством специальных натуральных экспериментов, выполненных в БЕЛНИИС (г. Минск).

В настоящей работе винтовая свая и грунтовое основание рассматриваются как единая нелинейная физическая система. Для исследования указанной нелинейной физической системы используются методы математического и компьютерного объектно-ориентированного моделирования на основе метода конечных элементов и метода энергетической линеаризации [1], [2].

Математическая модель системы

Ядро математической модели будем строить на основе принципа минимума полной энергии системы. Для краевых задач нелинейной механики грунтов математическая модель исследуемой физической системы будет иметь вид [1], [2]:

- 1) геометрическая модель деформируемой среды;
- 2) механико-математическая модель элементов системы:
 - при линейно-упругом деформировании: $\sigma_i = E\varepsilon_i$;
 - при нелинейно-упругом деформировании: $\sigma_i = f(\varepsilon_i)$, в частности

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

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

3) система краевых условий, задается в соответствии с классификацией поставленной задачи как краевой задачи математической физики;

4) условия равновесия системы (ядро математической модели):

$$\frac{\partial \Pi}{\partial \{U\}} = 0,$$

где

$$\Pi = \frac{1}{2} \int_V \{\varepsilon\}^T \{\sigma\} dV - \{U\}^T \{P\},$$

где $\Pi, \{P\}$ – полная энергия деформируемой системы и вектор внешних сил; $\{\sigma\}, \{\varepsilon\}, \{U\}$ – векторы напряжений, деформаций и перемещений; V – объем области существования исследуемой системы;

5) математическая модель (форма) искомого решения: $\varphi = \alpha_0 + \alpha_1 x + \alpha_2 y + \alpha_3 z$.

Учет уплотнения грунта при математическом моделировании несущей способности грунтового основания винтовой сваи

Уплотнение грунта изменяет значение основных физико-механических характеристик грунта. Следовательно, использование приведенных значений нормативных характеристик грунтового основания без их коррекции при расчете осадки сваи будет неправомерным.

Характер взаимодействия винтовой сваи с грунтовым основанием существенно влияет на величину осадки отдельной сваи и свайного фундамента в целом. При анализе деформационного процесса грунтового основания винтовой сваи можно выделить два этапа: завинчивание сваи и взаимодействие сваи с грунтовым основанием при действии сжимающей нагрузки. При завинчивании сваи происходит смятие грунта и его уплотнение вследствие внедрения тела сваи. При действии на винтовую сваю сжимающей нагрузки образуется деформируемая область. Геометрия уплотнения может быть определена только экспериментально, что очень трудоемко и дорого. Учет уплотнения математическими методами или методом компьютерного моделирования приводит к необходимости принятия некоторой модели структуры и свойств рассматриваемой физической системы [3]. Наиболее эффективными могут быть два подхода: рассмотреть некоторое однородное грунтовое основание эквивалентное по несущей способности исходному уплотненному грунтовому основанию, другим вариантом может быть неоднородно-уплотненное грунтовое основание с изменяющимся модулем деформации.

В обоих случаях необходимо определять физико-механические характеристики грунта в пределах расчетной области. Для этого были разработаны формулы для определения модуля деформации грунтового основания [4].

Для эквивалентного грунтового основания:

$$E_{\text{экв}} = \frac{E_0}{1 - \mu f};$$

$$f = \frac{R_{\text{max}}}{R_{\text{max}} - r_{\text{св}}},$$

где $E_{\text{экв}}$ – модуль деформации для эквивалентного грунтового основания; E_0 – начальный модуль деформации грунтового основания; R_{max} – радиус деформируемой области; $r_{\text{св}}$ – радиус сваи; μ – коэффициент Пуассона.

Для неоднородно-уплотненного грунтового основания:

$$E_i = E_0 \left(\frac{R_{\max}}{r_i} \right)^{\mu, f}$$

где E_i – модуль деформации i -й точки деформируемой области грунтового основания; r_i – расстояние от ствола сваи до i -й точки деформируемой области грунтового основания.

В настоящей работе рассмотрены оба подхода.

Компьютерное моделирование несущей способности грунтового основания винтовой сваи

Модельная задача. Железобетонная одиночная свая сечением 0,20 м погружена на 4,1 м в грунтовое основание, на сваю действует вертикальная статическая нагрузка P . Приведенные начальные характеристики грунтового основания: $E = 32$ МПа. Необходимо определить осадку сваи. Уравнение состояния было принято в виде $\sigma_i = A \varepsilon_i^m$. Значения параметров A и m равны: $A = 10$, $m = 0,55$. Размеры расчетной области: 115 × 760 см.

Задача решалась в линейной и в нелинейной постановках. Результаты вычислений приведены в таблице.

$$\mu = 0,3;$$

$$E_{\text{экв}} = 508 \text{ кг/см}^2 = 50,8 \text{ МПа};$$

$$E_{i1} = 573 \text{ кг/см}^2 = 57,3 \text{ МПа}; E_{i2} = 412 \text{ кг/см}^2 = 41,2 \text{ МПа}; E_{i3} = 344 \text{ кг/см}^2 = 34,4 \text{ МПа}.$$

Осадка винтовой сваи в грунтовом основании при вдавливающей нагрузке

E	$S \backslash P$	10000	15000	17500	20000	22500	25000
–	$S_{\text{оп}}$	1,2	2,4	3	4	5	6,6
E_0	$S_{\text{лин}}$	1,63	2,44	2,84	3,25	3,65	4,1
E_0	$S_{\text{нел}}$	1,88	3,34	4,2	5,18	6,29	7,5
$E_{\text{экв}}$	$S_{\text{лин}}$	1,12	1,69	1,97	2,25	2,53	2,81
$E_{\text{экв}}$	$S_{\text{нел}}$	1,19	2,55	3,29	4,14	5,2	6,47
E_i	$S_{\text{лин}}$	1,18	1,18	2,1	2,37	2,66	2,97
E_i	$S_{\text{нел}}$	1,23	2,7	3,38	4,25	5,24	6,5

Примечание. $S_{\text{лин}}$, $S_{\text{нел}}$ – осадки сваи при линейном и нелинейном деформировании основания соответственно, см.; $S_{\text{оп}}$ – нелинейные осадки сваи, определенные опытным путем, см.; P – вдавливающая нагрузка, действующая на сваю, кг.

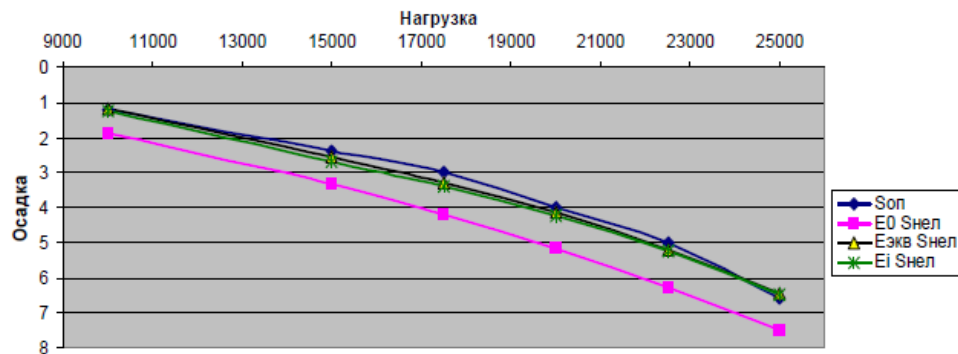


Рис. 1. Осадка винтовой сваи в нелинейно-деформируемом грунтовом основании методами натурального эксперимента и компьютерного моделирования с учетом и без учета уплотнения

Анализ результатов, полученных экспериментально и методом компьютерного моделирования

1. Осадки винтовой сваи для вертикально действующей нагрузки при условии нелинейного деформирования грунтового основания с начальными характеристиками уменьшают несущую способность грунтового основания в среднем на 34 % по сравнению с экспериментальными данными.

2. Осадки винтовой сваи для вертикально действующей нагрузки при условии нелинейного деформирования грунтового основания с эквивалентными характеристиками отличаются в среднем на 5 % от экспериментальных данных.

3. Осадки винтовой сваи для вертикально действующей нагрузки при условии нелинейного деформирования грунтового основания при учете реальной закономерности уплотнения грунта вокруг сваи отличаются в среднем на 8 % от экспериментальных данных.

4. При расчете осадки винтовой сваи в эквивалентном грунтовом основании несущая способность грунтового основания увеличилась в среднем на 29 % по сравнению с осадкой винтовой сваи в грунтовом основании с начальными характеристиками.

5. При расчете осадки винтовой сваи в грунтовом основании с изменяющимися характеристиками несущая способность грунтового основания увеличилась в среднем на 26 % по сравнению с осадкой винтовой сваи в грунтовом основании с начальными характеристиками.

Литература

1. Быховцев, В. Е. Компьютерное объектно-ориентированное моделирование нелинейных систем деформируемых твердых тел / В. Е. Быховцев. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2007. – 219 с.
2. Быховцев, В. Е. Методология исследования деформаций нелинейных систем твердых тел методом компьютерного объектно-ориентированного моделирования / В. Е. Быховцев, В. В. Бондарева, Д. В. Прокопенко // Материалы юбилей. Респ. науч.-техн. конф. ГГУ. – Гомель, 2009.
3. Быховцев, В. Е. Методология, методы и технология компьютерного объектно-ориентированного моделирования нелинейных систем деформируемых твердых тел / В. Е. Быховцев // Проблемы физики, математики и техники. – 2011. – С. 89–99.
4. Прокопенко, Д. В. Приближенный аналитический метод определения осадки винтовой сваи в нелинейно-деформируемом грунтовом основании с учетом его уплотнения / Д. В. Прокопенко, В. Е. Быховцев // Изв. ГГУ. – 2012. – С. 110–114.

Получено 18.09.2013 г.