

УДК 681.3.06:624.131

Приближенный аналитический метод определения осадки свай-РИТ в грунтовом основании

В.Е. Быховцев, С.В. Киргинцева

Предлагается приближенный аналитический метод определения осадки свай-РИТ в деформируемом грунтовом основании с учетом уплотнения грунта в области камуфлетного уширения.

Ключевые слова: свая-РИТ, камуфлетное уширение, грунты, математическая модель, метод исследования моделей.

The approximate analytical method of definition a precipitation piles-RIT in the deformable soil basis taking into account soil consolidation in the field of camouflage broadening is offered.

Keywords: pile-RIT, camouflage broadening, soil, mathematical model, method of research of models.

Введение. Одним из способов управления несущей способностью грунтовых оснований строительных площадок возводимых зданий и сооружений является армирование грунтов. Способы и технологии устройства армирующих элементов в грунтах могут быть самыми разнообразными. Армирующими элементами могут быть горизонтальные и вертикальные элементы: пленки и стержни различной прочности. В работе в качестве армирующих элементов рассматриваются РИТ-сваи. При устройстве таких свай в грунт происходит уплотнение грунтового основания в области камуфлетного уширения.

Методом компьютерного моделирования проведен ряд исследований по определению зависимости осадки свай-РИТ в грунтовом основании от геометрических характеристик свай, грунтовых условий, величины нагрузки на сваи с камуфлетными уширениями [1]. Анализ результатов вычислительных экспериментов показал небольшую эффективность устройства уширения для длинных свай в грунтовом основании. Полученные при этом значения осадок длинных свай хорошо согласуются с экспериментальными данными [2, с. 3]. Для коротких РИТ-свай эффективность устройства камуфлетного уширения оказалась значительной.

Постановка задачи. В работе рассматривается одиночная короткая свая с камуфлетным уширением в грунтовом основании. На сваю действует вертикальная нагрузка. Модель уплотнения грунтового основания в области камуфлетного уширения может быть представлена степенной функцией гиперболического типа $\{y = ax^n, a > 0, n < 0\}$ и показана на рисунке 1 [3, с. 128].

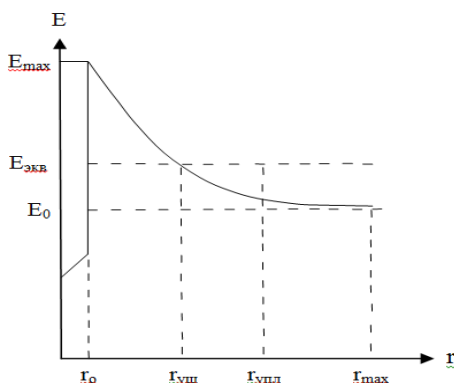


Рисунок 1 – Модель уплотнения грунта

Необходимо определить осадку свай-РИТ в грунте. Решить поставленную задачу можно методом компьютерного моделирования, однако особый интерес представляет возможность дать аналитическое решение задачи.

Многочисленные вычислительные эксперименты показали, что в подобласти грунта, расположенного выше плоскости камуфлетного уширения свай-РИТ, наблюдается телескопический сдвиг [1]. Этот эффект использован при построении аналитического решения поставленной задачи.

Определение осадки свай-РИТ в линейно-деформируемом грунтовом основании. Рассмотрим одиночную сваю-РИТ в однородном линейно-деформируемом грунтовом основании. Как показано, выше плоскости камуфлетного уширения сваи существует телескопический сдвиг, т. е.

$$U = 0, W = f(r), \quad (1)$$

$$\varepsilon_r = \varepsilon_\theta = \varepsilon_z = 0, \gamma_{rz} = \partial W / \partial r, \quad (2)$$

и состояние равновесия рассматриваемой физической системы можно представить только одним уравнением:

$$\frac{\partial^2 W}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial W}{\partial r} = 0,$$

где U и W – горизонтальная и вертикальная составляющие вектора перемещения грунтового основания, или в более компактной форме:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial W}{\partial r} \right) = 0, \quad (3)$$

Решение уравнения (3) должно отвечать и физическим условиям задачи, т.е. в решении должны содержаться физические параметры свай-РИТ и физико-механические характеристики грунтового основания. Решение в виде

$$W = c_1 \ln \frac{c_2}{r_i}; \quad c_1 > 0; \quad c_2 > r, \quad (4)$$

удовлетворяет (3) и соответствует поставленным требованиям, если константы c_1 и c_2 будут определены с помощью указанных параметров. В случае линейного деформирования основания осадка свай-РИТ линейно зависит от нагрузки и обратно пропорциональна модулю сдвига грунта основания и длине РИТ-сваи.

Авторами предлагается два подхода к определению осадки свай-РИТ в линейно-деформируемом грунтовом основании. В первом подходе учитываются радиус ствола и камуфлетного уширения свай-РИТ, а также радиус уплотнения грунтового основания в области камуфлетного уширения. В этом случае константы c_1 и c_2 вычисляются по следующим формулам:

$$c_1 = \frac{\mu P}{GL}; \quad c_2 = \frac{(1 + \mu)L - 4r_0}{2 \left(1 + 2\mu \frac{r_{yuu} - r_0 + \alpha r_{yul}}{r_0} \right)}, \quad (5)$$

где μ и G – коэффициент Пуассона и модуль сдвига грунтового основания; P – нагрузка на сваю-РИТ; L и r_0 – длина и радиус ствола свай-РИТ соответственно; r_{yuu} – радиус камуфлетного уширения свай-РИТ; α и r_{yul} – коэффициент и радиус уплотнения грунта в области камуфлетного уширения соответственно.

Исходя из (5), формула определения осадки одиночной свай-РИТ в линейно-деформируемом грунтовом основании примет вид:

$$W = \frac{2\mu P(1 + \mu)}{E_0 L} \ln \frac{(1 + \mu)L - 4r_0}{2 \left(1 + 2\mu \frac{r_{yuu} - r_0 + \alpha r_{yul}}{r_0} \right) r_i}, \quad (6)$$

где E_0 – модуль деформации окружающего грунта.

По результатам компьютерного моделирования выявлено, что коэффициент уплотнения грунта в области камуфлетного уширения $0 < \alpha < 0,5$ и равен

$$\alpha = \frac{r_{yul}}{r_{\max}}, \quad (7)$$

где r_{\max} – радиус деформируемой области.

Формула (6) полностью соответствует сути уплотнения грунтового основания свай-РИТ: чем больше взрыв грунта, т.е. чем больше радиус уплотнения грунтового основания $r_{упл}$, тем больше степень его уплотнения α и тем осадка свай-РИТ меньше.

Второй предлагаемый подход основан на определении эквивалентного модуля деформации грунта в зоне камуфлетного уширения свай-РИТ и использовании средневзвешенного значения модуля деформации грунтового основания во всей деформируемой области. В данном случае эквивалентный модуль деформации грунта $E_{экв}$ в зоне камуфлетного уширения определяется по формуле:

$$E_{экв} = \frac{E_0}{1 - \mu} \frac{r_{max}}{r_{max} - r_0}, \quad (8)$$

где E_0 – модуль деформации окружающего грунта.

Средний модуль деформации $E_{ср}$ и средний коэффициент Пуассона $\mu_{ср}$ грунтового основания всей деформируемой области вычисляется по формулам:

$$E_{ср} = \frac{S_0 E_0 + S_{экв} E_{экв}}{S_0 + S_{экв}}, \quad (9)$$

$$\mu_{ср} = \frac{S_0 \mu_0 + S_{экв} \mu_{экв}}{S_0 + S_{экв}}, \quad (10)$$

где S_0 и $S_{экв}$ – площади окружающего и уплотненного грунта в области камуфлетного уширения соответственно; μ_0 и $\mu_{экв}$ – коэффициенты Пуассона окружающего и уплотненного грунта в области камуфлетного уширения соответственно.

Используя формулы нахождения эквивалентного модуля деформации грунта в уплотнённой зоне, среднего модуля деформации и среднего коэффициента Пуассона грунтового основания деформируемой области, после несложных преобразований формула определения осадки свай-РИТ в линейно-деформируемом грунтовом основании будет иметь вид:

$$W = \frac{2\mu_{ср} P(1 - \mu_{ср}^2) r_{max} - r_0}{E_{ср} L} \ln \frac{(1 + \mu_{ср})L - 4r_0}{2 \left(1 + 2\mu_{ср} \frac{r_{yuu} - r_0}{r_0} \right) r_i}, \quad (11)$$

Определение осадки свай-РИТ в нелинейно-деформируемом грунтовом основании.

Рассмотрим одиночную сваю-РИТ в нелинейно-деформируемом грунтовом основании. Поскольку выше плоскости камуфлетного уширения сваи существует телескопический сдвиг, то и в случае нелинейного деформирования грунта уравнения (1), (2), (3) будут иметь место.

Уравнения состояния грунтового основания при упругом и неупругом деформировании может быть представлено уравнениями (12) и (13) соответственно:

$$\sigma_i^e = E \varepsilon_i^e, \quad (12)$$

$$\sigma_i = A \varepsilon_i^m, \quad (13)$$

где σ_i , ε_i – интенсивности деформаций и напряжений; E – модуль упругости; A и m – параметры закона деформирования; «e» – признак линейного деформирования.

На основании метода энергетической линеаризации [4, с. 114]

$$\varepsilon_i = \left(\frac{1+m}{2} \frac{E}{A} \varepsilon_i^e \right)^{\frac{1}{m}}, \quad (14)$$

где

$$\varepsilon_i^e = \frac{\sqrt{2}}{2(1+\mu)} \sqrt{(\varepsilon_r - \varepsilon_\theta)^2 + (\varepsilon_\theta - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_r)^2 + \frac{3}{2} \gamma_{rz}^2}, \quad (15)$$

Уравнение (14) устанавливает связь между интенсивностями деформаций, полученными при линейном и нелинейном решении исходной задачи.

Выражение (14) при учете (2) и (15) будет иметь вид:

$$\frac{\partial W}{\partial r} = \left(\frac{1+m}{2} \frac{E}{A} \right)^{\frac{1}{m}} \left(\frac{\sqrt{3}}{2(1+\mu)} \right)^{\frac{1-m}{m}} \left(\frac{\partial W^e}{\partial r} \right)^{\frac{1}{m}}, \quad (16)$$

При упругом деформировании из уравнения (3) следует

$$\frac{\partial W^e}{\partial r} = \frac{c_1}{r}, \quad c_1 = \frac{\mu P}{GL}, \quad (17)$$

Интегрируя (16) при учете (17), получим:

$$W = \left(\frac{1+m}{2} \frac{\sqrt{3} G}{A} \frac{\mu P}{GL} \right)^{\frac{1}{m}} \frac{2(1+\mu)}{\sqrt{3}} \int_{r_0}^{\infty} \left(\frac{1}{r} \right)^{\frac{1}{m}} dr + c_1, \quad (18)$$

В (18) несобственный интеграл будет сходящимся, выполнив интегрирование, получим:

$$W = \frac{2m(1+\mu)}{\sqrt{3}(1-m)} \left(\frac{\sqrt{3}(1+m)\mu P}{2ALr_0} \right)^{\frac{1}{m}} r_0, \quad (19)$$

Используя формулы нахождения эквивалентного модуля деформации грунта в зоне камуфлетного уширения $E_{экв}$, среднего модуля деформации E_{cp} и среднего коэффициента Пуассона μ_{cp} , после несложных преобразований формула определения осадки сваи-РИТ при нелинейном деформировании грунтового основания будет иметь вид:

$$W = \frac{2m(1-\mu_{cp}^2)\sigma_{i,кр}}{\sqrt{3}(1-m)E_{cp}} \frac{r_{max} - r_0}{r_{max}} \left(\frac{\sqrt{3}(1+m)\mu_{cp}P}{2Lr_0\sigma_{i,кр}} \right)^{\frac{1}{m}} r_0, \quad (20)$$

Оценим точность разработанных формул определения осадки сваи-РИТ в грунтовом основании методом компьютерного объектно-ориентированного моделирования на примере конкретной задачи механики грунтов.

Определим осадку короткой сваи-РИТ радиусом $r_0 = 10$ см, длиной $L = 200$ см в грунтовом основании с характеристиками: $E_0 = 30$ МПа, $\mu = 0,32$. Нагрузка на сваю-РИТ $P = 20$ т. Решение поставленной задачи получим двумя способами:

1) Методом компьютерного объектно-ориентированного моделирования на основе метода конечных элементов с помощью программного комплекса «Энергия-ОС», осадка сваи-РИТ S_{mod}^l и S_{mod}^n при линейном и нелинейном деформировании грунтового основания соответственно.

2) Приближенным численно-аналитическим методом по формулам (6) и (11), осадка сваи-РИТ при линейном деформировании $S_{\phi 1}^l$ и $S_{\phi 2}^l$ соответственно; и по формуле (20), осадка сваи-РИТ при нелинейном деформировании S_{ϕ}^n .

Значения осадок короткой сваи с камуфлетным уширением в деформируемом грунтовом основании, полученные методом компьютерного моделирования и приближенным аналитическим методом при условии линейного и нелинейного деформирования грунта, в зависимости от радиуса камуфлетного уширения сваи $r_{уш}$ представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Осадка короткой сваи-РИТ в грунтовом основании (см)

$r_{уш}$	S_{mod}^l	$S_{\phi 1}^l$	$S_{\phi 2}^l$	S_{mod}^n	S_{ϕ}^n
15	0,480	0,573	0,360	0,754	0,613
20	0,370	0,480	0,314	0,431	0,558
30	0,251	0,321	0,231	0,306	0,359

Из данных таблицы 1 видно, что предложенные методы определения осадок коротких свай-РИТ в грунтовом основании при линейном и нелинейном деформировании грунта являются допустимыми. Точность соответствия решений зависит от радиуса камуфлетного уширения. При радиусе камуфлетного уширения $r_{уш}$ не менее 20 см расхождения результатов компьютерного моделирования осадок сваи с камуфлетным уширением в линейно-деформируемом грунтовом основании и полученных по формулам составили не более 5 %.

Заключение. Разработан приближенный аналитический метод определения осадки свай-РИТ в деформируемом грунтовом основании и показано высокое соответствие разработанного аналитического решения по определению осадок коротких свай-РИТ в грунтовом основании и решений, полученных методом компьютерного объектно-ориентированного моделирования.

Литература

1. Киргинцева, С.В. Компьютерный анализ эффективности армирования грунтовых оснований РИТ-сваями / С.В. Киргинцева // Научно-технический журнал «Проблемы физики, математики и техники». – 2014. – № 3(20). – С. 88–91.

2. Невейков, А.Н. Свая, изготовленная по разрядно-импульсной технологии, – свая нового поколения с уширениями в Республике Беларусь [Электронный ресурс] / А.Н. Невейков, О.В. Козунова // ОАО «Буровая компания «Дельта». – Режим доступа :http://belniis.by/sites/default/files/neveykov_a.n._kozunova_o.v._svaya_rit.pdf.

3. Быховцев, В.Е. Математическое и компьютерное моделирование развития зоны уплотнения грунтового основания винтовой сваи / В.Е. Быховцев, В.В. Бондарева, С.В. Торгонская // Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. – 2014. – № 3 (84). – С. 125–130.

4. Быховцев, В.Е. Компьютерное объектно-ориентированное моделирование нелинейных систем деформируемых твердых тел / В.Е. Быховцев. – Гомель : УО «ГГУ им. Ф. Скорины», 2007. – 219 с.

Гомельский государственный
университет им. Ф. Скорины

Поступила в редакцию 27.06.2014