

УДК 681.3.06:624.131

## КОМПЬЮТЕРНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ АРМИРОВАНИЯ ГРУНТОВЫХ ОСНОВАНИЙ РИТ-СВАЯМИ

С.В. Киргинцева

Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины, Гомель, Беларусь

## COMPUTER ANALYSIS OF EFFICIENCY OF REINFORCING OF THE SOIL BASES OF RIT-PILES

S.V. Kirhintsava

F. Scorina Gomel State University, Gomel, Belarus

Исследуется осадка свай-РИТ при условии линейного и нелинейного деформирования грунта с учетом и без учета уплотнения грунтового основания в области взрыва.

**Ключевые слова:** свая-РИТ, камуфлетное уширение, грунты, математическая модель, компьютерное моделирование.

Sag of RIT-piles on condition of linear and nonlinear deformation of soil taking into account and without consolidation of the soil basis in the field of explosion is investigated.

**Keywords:** pile-RIT, camouflage broadening, soils, mathematical model, computer simulation.

### Введение

Задача минимизации затрат на устройство оснований фундаментов гражданских и промышленных зданий и сооружений всегда являлась актуальной. В силу этого одним из направлений современного строительства является определение рациональных типов фундаментов для конкретных условий строительной площадки, структура которой чаще является неоднородной и может содержать включения пониженной несущей способности. Вследствие этого возникает необходимость управления несущей способностью грунтового основания. В настоящей работе это достигается посредством армирования грунтов, которое может производиться горизонтальными и вертикальными элементами. Армирующими элементами могут быть материалы различной прочности: пленки и стержни. В работе в качестве армирующих элементов рассматриваются короткие сваи: прямые, винтовые и РИТ-сваи и оценивается их эффективность.

При устройстве РИТ-свай происходит уплотнение грунта в области взрыва. Вследствие этого образуется неоднородное по плотности грунтовое основание. Такой фундамент и грунтовое основание образуют единую сложную по структуре и свойствам нелинейную и неоднородную физическую систему [1]. В настоящей работе в этой системе фундамент и грунтовое основание рассматриваются как физически нелинейные подсистемы. Определение деформированного состояния указанной системы эффективно производить методом математического и компьютерного моделирования на основе метода конечных элементов и методов численного решения нелинейных краевых задач [1], [2], [3].

### 1 Общая физическая постановка задачи

Рассматривается свая-РИТ с одним камуфлетным уширением при условии линейного и нелинейного деформирования грунтового основания. На сваю действует вертикальная нагрузка. Исследование системы «свая-РИТ – грунтовое основание» производилось методом объектно-ориентированного компьютерного моделирования на основе системного подхода и метода конечных элементов, рассмотренного совместно с методом энергетической линеаризации [1].

Виртуальная физическая модель рассматриваемой системы показана на рисунке 1.1. В силу симметрии рассматриваемой задачи, ее численное решение производилось для 1/2 деформируемой области. Дискретизация этой области проводилась треугольными конечными элементами, нумерация узлов расчетной области принята слева направо.

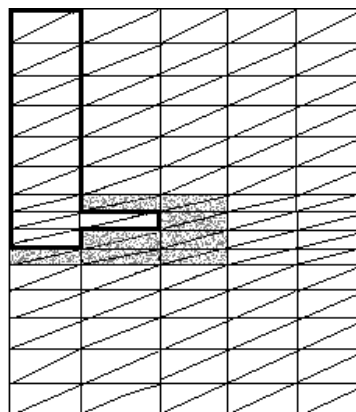


Рисунок 1.1 – Виртуальная физическая модель системы «свая-РИТ – грунтовое основание»

Ставится задача исследования зависимости осадки сваи с камуфлетным уширением от её геометрических характеристик и свойств нелинейно-деформируемого грунтового основания.

## 2 Результаты экспериментальных исследований осадок РИТ-свай

ОАО «Буровая компания «Дельта», г. Гомель, были проведены работы по устройству свай-РИТ в грунтовом основании ряда регионов Беларуси. Экспериментальные исследования по определению зависимости осадки свай-РИТ в грунтовом основании от характеристик свай, грунтовых условий, величины действующей вдавливающей нагрузки отражены в печати [4]. В таблице 2.1 представлены характеристики и результаты испытаний свай-РИТ, полученные методом натурального эксперимента [4].

Для результатов натуральных экспериментов осадок свай-РИТ при действии вдавливающей нагрузки автором были проведены исследования осадок свай-РИТ методом компьютерного объектно-ориентированного моделирования. Исследование проводилось с помощью программного комплекса «Энергия-ОС» [1].

## 3 Математическая модель системы

Математическую модель исследуемой системы построим на основе принципа минимума полной энергии системы. Эта модель может быть представлена следующим образом [1]:

1. 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  $\sigma_i, \varepsilon_i$  – интенсивности напряжений и деформаций;  $E$  – модуль деформации;  $A, m$  – параметры закона нелинейного деформирования.

2. Система краевых условий задается в соответствии с классификацией поставленной задачи как краевой задачи математической физики.

3. Ядро математической модели (условия равновесия системы):

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

где

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

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

## 4 Компьютерное моделирование осадок свай-РИТ в грунтовом основании и анализ результатов

В настоящей работе для исследования осадок свай-РИТ на основании имеющихся экспериментальных данных построены три модельные задачи. Вычислительный эксперимент по определению осадки свай-РИТ проводился в зависимости от диаметра уширения и диаметра зоны уплотнения грунтового основания. Осадки свай-РИТ в зависимости от диаметра уширения без учета и с учетом уплотнения грунтового основания в области взрыва, полученные автором методом компьютерного моделирования, показаны в таблице 4.1. Диаметр уплотненной зоны определялся методом вариантного проектирования на основе экспериментальных данных. Физико-механические характеристики грунтового основания уплотненной зоны в области камуфлетного уширения определялись по формуле [5]:

$$E_{\text{упл.гр.}} = \frac{E_0}{1 - \mu} \frac{r_{\text{max}}}{r_{\text{max}} - r_c}, \quad (4.1)$$

где  $E_0, \mu$  – модуль деформации и коэффициент Пуассона грунтового основания естественного залегания;  $r_{\text{max}}$  – радиус зоны уплотнения;  $r_c$  – радиус сваи;  $E_{\text{упл.гр.}}$  – эквивалентный модуль деформации грунта в уплотнённой зоне.

Таблица 2.1 – Характеристики и осадки свай-РИТ в грунтовом основании

Объект	Объект №1	Объект №2	Объект №3
Характ.			
Пункт	Митино, мкр. 8Б, сек. 1	Митино, мкр. 8Б, сек. 1	Пр-т Вернадского
Объект	Опытная площадка	Опытная площадка	д.37, 19-эт. корпуса
$d_{\text{св}}$ , см	30	30	30
$L_{\text{св}}$ , см	1900	1900	1800
$P$ , т	240	270	234
Грунтовые условия	Насыпь, торф, песок ср. крупности	Насыпь, торф, песок ср. крупности	Техн. грунт, суглинки, песок ср. крупн.
$S_{\text{эксн}}$ , см	1,730	3,204	1,846

$d_{\text{св}}$  и  $L_{\text{св}}$  – диаметр и длина свай-РИТ соответственно;  $P$  – вертикальная нагрузка на сваи-РИТ;  $S_{\text{эксн}}$  – значения осадок свай-РИТ в грунтовом основании, полученные методом натурального эксперимента

Таблица 4.1 – Осадки длинных свай-РИТ в грунтовом основании без учета и с учетом уплотнения грунта (см)

$d_{\text{уш}}$ \ S	Объект №1				Объект №2				Объект №3			
	$S^i$	$S^u$	$S^i_{\text{упл}}$	$S^u_{\text{упл}}$	$S^i$	$S^u$	$S^i_{\text{упл}}$	$S^u_{\text{упл}}$	$S^i$	$S^u$	$S^i_{\text{упл}}$	$S^u_{\text{упл}}$
30	1,683	1,875	1,683	1,875	2,803	4,176	2,803	4,176	1,718	2,089	1,718	2,089
40	1,677	1,860	1,668	1,818	2,773	3,847	2,720	3,779	1,709	2,050	1,703	2,007
60	1,671	1,851	1,648	1,805	2,740	3,555	2,628	3,368	1,701	2,023	1,690	1,992
90	1,668	1,845	1,627	1,785	2,715	3,442	2,547	3,349	1,694	2,011	1,669	1,979
110	1,665	1,841	1,625	1,780	2,695	3,364	2,480	3,262	1,690	1,999	1,663	1,973

$d_{\text{уш}}$  – диаметр уширения свай-РИТ;  $S^i$  и  $S^u$  – значения осадок свай-РИТ без учета уплотнения грунтового основания при условии линейного и нелинейного деформирования грунта соответственно;  $S^i_{\text{упл}}$  и  $S^u_{\text{упл}}$  – значения осадок свай-РИТ с учетом уплотнения грунтового основания при условии линейного и нелинейного деформирования грунта соответственно

Таблица 4.2 – Осадки коротких свай-РИТ в грунтовом основании без учета и с учетом уплотнения грунта (см)

$L_{\text{св}}, \text{см}$ \ $d_{\text{уш}}, \text{см}$ \ S	200				300			
	$S^i$	$S^u$	$S^i_{\text{упл}}$	$S^u_{\text{упл}}$	$S^i$	$S^u$	$S^i_{\text{упл}}$	$S^u_{\text{упл}}$
20	0,585	1,086	0,585	1,086	0,449	0,606	0,449	0,606
30	0,494	0,771	0,422	0,743	0,412	0,510	0,375	0,494
40	0,384	0,423	0,320	0,431	0,362	0,358	0,317	0,365
60	0,297	0,305	0,235	0,305	0,309	0,299	0,255	0,296
70	0,247	0,219	0,194	0,227	0,260	0,226	0,218	0,227
90	0,188	0,180	0,151	0,184	0,210	0,195	0,175	0,190
100	0,139	0,114	0,111	0,108	0,168	0,150	0,147	0,142

Таблица 4.3 – Осадки короткой сваи-РИТ в грунтовом основании (см)

N \ S	$S^i$	$S^u$	$S^i_{\text{упл}}$	$S^u_{\text{упл}}$	N \ S	$S^i$	$S^u$	$S^i_{\text{упл}}$	$S^u_{\text{упл}}$
	1	0,297	0,305	0,235		0,305	11	0,283	0,290
2	0,297	0,304	0,234	0,305	12	0,289	0,296	0,225	0,296
3	0,184	0,130	0,145	0,131	13	0,195	0,141	0,152	0,147
4	0,127	0,081	0,100	0,084	14	0,139	0,086	0,108	0,095
5	0,096	0,068	0,075	0,073	15	0,104	0,076	0,081	0,082
21	0,277	0,284	0,214	0,285	31	0,273	0,280	0,210	0,280
22	0,284	0,292	0,220	0,292	32	0,281	0,288	0,215	0,288
23	0,190	0,137	0,147	0,143	33	0,186	0,134	0,142	0,141
24	0,135	0,084	0,104	0,091	34	0,132	0,083	0,101	0,091
25	0,104	0,078	0,080	0,085	35	0,102	0,079	0,078	0,086

N – номер узла расчетной области

Сравнение полученных и экспериментальных значений осадок длинных свай-РИТ в грунтовом основании позволяет сделать вывод, что грунт работает как некоторая нелинейная среда, значения осадок свай-РИТ при нелинейном деформировании грунтового основания оказались достаточно близкими значениям осадок свай-РИТ, полученным экспериментальным путем.

Анализ результатов проведенного вычислительного эксперимента (таблица 4.1) показал, что для длинных свай влияние размеров диаметра камуфлетного уширения и диаметра зоны уплотнения грунта в области взрыва оказались незна-

чительными: осадка свай-РИТ для трех рассматриваемых объектов уменьшилась в среднем на 7% и 3% соответственно. Значительный интерес представляет влияние диаметров уширений и зон уплотнения грунтового основания коротких свай-РИТ на их осадку в нелинейно-деформируемых грунтовых основаниях.

В таблице 4.2 представлены результаты компьютерного моделирования осадок коротких свай диаметром  $d_{\text{св}} = 20$  см длиной  $L_{\text{св}1} = 200$  см и  $L_{\text{св}2} = 300$  см с одним камуфлетным уширением в грунтовом основании со следующими характеристиками: модуль деформации  $E_{\text{ср}} = 30$  МПа

(300 кг/см<sup>2</sup>), коэффициент Пуассона  $\mu_{cp} = 0,32$ . Вертикальная нагрузка на сваю  $P = 20$  т.

Из данных таблицы 4.2 видно, что диаметр камуфлетного уширения коротких свай длиной  $L_{св1} = 200$  см и  $L_{св2} = 300$  см значительно влияет на осадку свай-РИТ в нелинейно-деформируемом грунтовом основании. В данном случае различия осадок свай с одним уширением достигают 90% при нелинейном деформировании грунта. Влияние диаметра зоны уплотнения грунтового основания в области взрыва на осадку коротких свай-РИТ в нелинейно-деформируемом грунтовом основании также оказалось небольшим.

В таблице 4.3 показаны осадки РИТ-свай длиной  $L_{св1} = 200$  см с диаметром камуфлетного уширения  $d_{уш} = 60$  см в разных плоскостях расчетной области.

Проанализировав данные таблицы 4.3, можно сказать, что в подобласти грунтового основания, расположенного выше плоскости камуфлетного уширения сваи, наблюдается телескопический сдвиг, т. к. на равном расстоянии от сваи вертикальные перемещения практически равны. Данный эффект наблюдался во всех модельных задачах осадок длинных и коротких РИТ-свай в грунтовом основании и получен впервые для свай с камуфлетными уширениями. Используя факт наличия телескопического сдвига, можно дать аналитическое решение задачи для одиночной РИТ-сваи, что будет отражено в следующих публикациях.

#### **Заключение**

Методом конечных элементов и методом энергетической линеаризации получены значения

осадок свай-РИТ, соответствующие экспериментальным исследованиям. Показана эффективность использования коротких свай с камуфлетным уширением в грунтовом основании для армирования грунтов. Выявлен телескопический сдвиг грунта в области, лежащей выше плоскости камуфлетного уширения свай-РИТ.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. *Быховцев, В.Е.* Компьютерное объектно-ориентированное моделирование нелинейных систем деформируемых твёрдых тел / В.Е. Быховцев. – Гомель : УО «ГГУ им. Ф. Скорины», 2007. – 219 с.
2. *Партон, В.З.* Методы математической теории упругости / В.З. Партон, П.И. Перлин. – М. : Наука, 1981. – 688 с.
3. *Зенкевич, О.* Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич. – М. : Мир, 1975. – 540 с.
4. *Невейков, А.Н.* Свая, изготовленная по разрядно-импульсной технологии, – свая нового поколения с уширениями в Республике Беларусь / А.Н. Невейков, О.В. Козунова // ОАО «Буровая компания «Дельта» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://belniis.by/sites/default/files/neveykov\\_a.n.\\_kozunova\\_o.v.\\_svaya\\_rit.pdf](http://belniis.by/sites/default/files/neveykov_a.n._kozunova_o.v._svaya_rit.pdf).
5. *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 им. Ф. Скорины. – 2014. – № 3 (84). – С. 125–130.

*Поступила в редакцию 04.06.14.*