

д.т.н. Должиков П. Н.,
Збицкая В. В.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ БУРОИНЪЕКЦИОННОЙ СВАИ В РАЗУПЛОТНЕННЫХ ГРУНТАХ

В статье приведены результаты лабораторных исследований несущей способности буроинъекционной сваи методом выдергивания; проанализирована зависимость несущей способности буроинъекционной сваи от коэффициента постели.

Ключевые слова: физическое моделирование, цементно-песчаный грунт, буроинъекционная свая, несущая способность, коэффициент постели.

Введение. В настоящее время постоянно увеличиваются объемы реконструкции и восстановления зданий, уплотняется существующая застройка городских территорий. Надстройка дополнительных этажей, устройство пристроек, замена несущих строительных конструкций здания, техническое перевооружение предприятий сопровождается ростом нагрузок на фундаменты. Также за период длительной эксплуатации зданий возможно ухудшение строительных свойств грунтов оснований, разрушение конструкций фундаментов, нарушение условий их устойчивости. В результате здания претерпевают осадки, в основном неравномерные, и возникает опасность разрушения надземных строительных конструкций [1].

Для повышения прочности основания эксплуатируемых зданий и сооружений и предотвращения развития в их конструкциях деформаций аварийного характера, а также для работ по реконструкции существующих фундаментов и их оснований известны различные методы закрепления грунтов [2]. Одним из перспективных способов усиления оснований и реконструкции фундаментов аварийных зданий является использование буроинъекционных свай [3].

Главной характеристикой сваи является несущая способность. Наиболее широко используемым методом её определения является испытание свай статической вдавливающей нагрузкой [1, 3]. Наряду с

этим также существует метод выдергивания. Несущую способность буроинъекционных свай обычно определяют с помощью натурных испытаний. Сооружение таких свай в целях эксперимента в реальных масштабах дорогостоящее. Поэтому для изучения работы буроинъекционной сваи целесообразно создать ее физическую модель.

Цель работы – исследование несущей способности буроинъекционной сваи на модели.

Изложение материала и его результаты. В данной работе несущая способность буроинъекционной сваи определялась с помощью лабораторных испытаний модели методом выдергивания. Применение рассматриваемого лабораторного метода выполнено впервые.

Для проведения физического моделирования были соблюдены геометрическое и динамическое подобия [4].

Геометрическое подобие предусматривает условие, когда все линейные размеры сваи в натуре пропорционально относятся к соответствующим размерам модели:

$$\frac{l_n}{l_m} = a = const, \quad (1)$$

где l_n – размеры сваи в натуре, см;

l_m – размеры модели, см;

a – линейный масштаб (масштаб длин).

Инъекционные трубы, которые применяются в натуре, имеют диаметр 150 мм, а

диаметр трубки модели – 12 мм. Поэтому линейный масштаб равен

$$a = \frac{d_{сн}}{d_{см}} = 12,5 \quad (2)$$

где $d_{сн}$ – диаметр инъекционной трубы в натуре, см;

$d_{см}$ – диаметр трубки модели, см.

Динамическое подобие предусматривает соблюдение следующего условия: в любой точке модели действует сила, аналогичная по своей природе и по направлению силе в соответственной точке натуре:

$$a_F = \frac{F_n}{F_m} = const, \quad (3)$$

где a_F – масштаб сил;

F_n – сила в натуре, кН;

F_m – сила на модели, кН.

Установим связь между линейным масштабом и масштабом сил.

По условию постановки эксперимента нормальные напряжения, возникающие в модели и в натуре, равны между собой:

$$\sigma_n = \sigma_m, \quad (4)$$

где σ_n и σ_m – нормальные напряжения, возникающие в натуре и в модели, кН/см².

Нормальное напряжение определяется по формуле:

$$\sigma = \frac{F_{max}}{S_{раб}} = \frac{F_{max}}{\pi \cdot d \cdot l}, \quad (5)$$

где F_{max} – максимальная нагрузка, которую может выдержать свая, кН;

$S_{раб}$ – рабочая поверхность сваи, см²;

l – длина сваи, см.

Из выражений (4) и (5) следует, что

$$\frac{F_{max_n}}{\pi \cdot d_n \cdot l_n} = \frac{F_{max_m}}{\pi \cdot d_m \cdot l_m}. \quad (6)$$

Следовательно, необходимо учесть соотношение сил на модели и в натуре

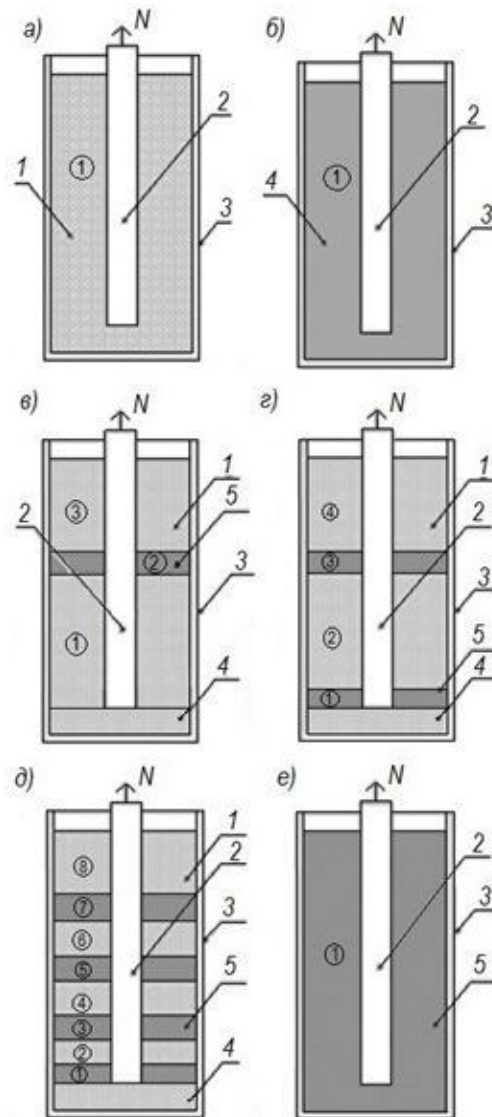
$$F_{max_n} = F_{max_m} \cdot a^2. \quad (7)$$

Из выражения (7) видно, что силы на модели должны быть в 156 раз меньше,

чем силы в натуре.

Планирование эксперимента проводилось с учетом полного факторного анализа [5]. Были учтены следующие факторы влияния: коэффициент постели цементного раствора и модуль деформации материала.

Для исследования работы буроинъекционной сваи применялись 6 видов моделей. Схемы этих моделей приведены на рисунке 1.



1 – разуплотненный глинистый грунт; 2 – свая;
3 – резервуар; 4 – уплотненный глинистый грунт;
5 – цементно-песчаный раствор;
N – выдергивающая сила

Рисунок 1 – Схемы моделей буроинъекционных свай: а-е – 1-6 вид модели соответственно

Каждый вид изготовлялся и испытывался больше трех раз. Полученные результаты были статистически обработаны.

Непосредственно исследования проводились с помощью измерительного прибора ИПМ-23 – индикатора прочности металлов (рисунок 2). С его помощью была обеспечена вертикальная выдергивающая нагрузка и зафиксированы показания в момент срыва сваи с устойчивого положения при помощи измерительного датчика.

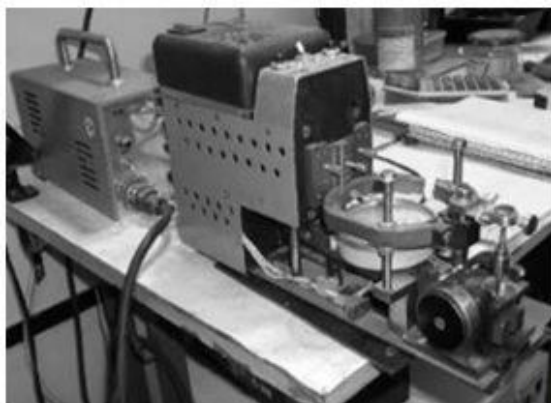
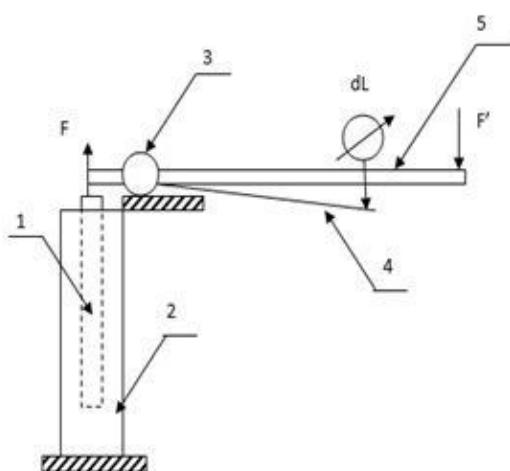


Рисунок 2 – Измерительный прибор ИПМ-23

Прибор состоит из крепежного узла, нагружающей балки, индикатора нагрузки, подающего нагрузку механизма, электронной системы. Схема его работы приведена на рисунке 3.



- 1 – свая; 2 – резервуар; 3 – шарнир опоры;
4 – балка индикатора; 5 – нагружающая балка

Рисунок 3 – Схема работы прибора ИПМ-23

Для моделирования работы сваи в грунте были применены следующие материалы: металлические трубки длиной 300 мм, диаметром 12 мм и толщиной стенки 2 мм; глинистый грунт естественной влажности; цемент марки ПЦ П/А-III-400; песок высушенный; цилиндрический резервуар.

В металлической трубке для обеспечения жесткого сцепления с узлом крепления прибора ИПМ-23 был сконструирован узел крепления модели сваи с измерительным прибором. С помощью данного узла крепления было обеспечено жесткое и прочное соединение с нагружающей балкой.

Готовая к эксперименту модель сваи приведена на рисунке 4.



Рисунок 4 – Готовая к эксперименту модель сваи

Исходные данные моделей и статистически обработанные результаты исследований приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Исходные данные моделей и результаты исследований

№ модели	Длина рабочей части трубки, см	Диаметр трубки, см	№ слоя	Мощность слоя, см	Модуль деформации материала, МПа	Показания прибора, Δl мм
1	22,2	12	1	22,2	21	0,002
2	22,2	12	1	22,2	28	0,010
3	22,2	12	1	12,0	21	0,015
			2	2,7	14000	
			3	7,5	21	
4	22,2	12	1	2,7	14000	0,019
			2	10,0	21	
			3	2,0	14000	
			4	7,5	21	
5	22,2	12	1	2,2	14000	0,032
			2	2,7	21	
			3	1,9	14000	
			4	2,1	21	
			5	2,5	14000	
			6	3,9	21	
			7	1,9	14000	
			8	5,0	21	
6	22,2	12	1	22,2	14000	0,052

Определим максимальную нагрузку, которую может выдержать свая, исходя из выражений для определения нормального напряжения. Поскольку деформационный процесс развивается по длине сваи, то нормальное напряжение можно определить по формуле:

$$\sigma = \frac{\Delta l}{l} \cdot E, \quad (8)$$

где Δl – абсолютная деформация, мм;

l – длина стержня, мм;

E – модуль деформации грунта, МПа.

Следовательно, максимальная нагрузка, которую может выдержать свая, равна:

$$F_{\max} = \frac{\Delta l}{l} \cdot E \cdot \pi \cdot d \cdot l. \quad (9)$$

Для сваи, работающей в различных слоях грунта, максимальная нагрузка определяется по следующей формуле:

$$F_{\max} = \frac{\Delta l \cdot \pi \cdot d}{l} \cdot \sum_{i=1}^n E_i \cdot l_i, \quad (10)$$

где l_i – мощность i -го слоя, мм;

E_i – модуль деформации грунта i -го слоя, МПа.

Введем коэффициент постели для инъекционного раствора и коэффициент постели грунта:

$$k_n = \frac{l_u}{l}, \quad (11)$$

$$k_{nz} = 1 - k_n, \quad (12)$$

где l_u – мощность слоев цементного раствора, мм.

Окончательно получаем формулу для расчета максимальной нагрузки, которую может выдержать буроналивная свая:

$$F_{\max} = \Delta l \cdot \pi \cdot d \cdot (k_n \cdot (E_u - E_z) + E_z), \quad (13)$$

где E_u и E_z – модуль деформации цементного раствора и грунта, МПа.

По данным таблицы 1 рассчитываем коэффициент постели цементного раствора и несущую способность свай, результаты вносим в таблицу 2.

Таблица 2 – Коэффициент постели цементного раствора и несущая способность свай

№ модели	Коэффициент постели цементного раствора $k_{п, д. ед.}$	Максимальная нагрузка на сваю $F_{max}, кН$	Допустимая нагрузка на сваю $N, кН$
1	0	0,0158	0,0132
2	0	0,1055	0,0879
3	0,122	9,7578	8,1315
4	0,212	21,3670	17,8058
5	0,383	64,8091	54,0076
6	1	274,3104	228,5920

В соответствии со СНиП 2.02.03-85 «Свайные фундаменты» одиночную сваю в составе фундамента и вне его по несущей способности грунтов основания следует рассчитывать исходя из условия:

$$N \leq \frac{F_d}{\gamma_k}, \quad (14)$$

где N – нагрузка, передаваемая на сваю, кН;

F_d – несущая способность свай, кН;

γ_k – коэффициент надежности в случае определения предельной нагрузки по результатам испытаний принимается равным 1,2.

Полученные результаты исследования позволили установить зависимость абсолютной деформации сваи от коэффициента постели (рисунок 5). Эта зависимость имеет нелинейный характер.

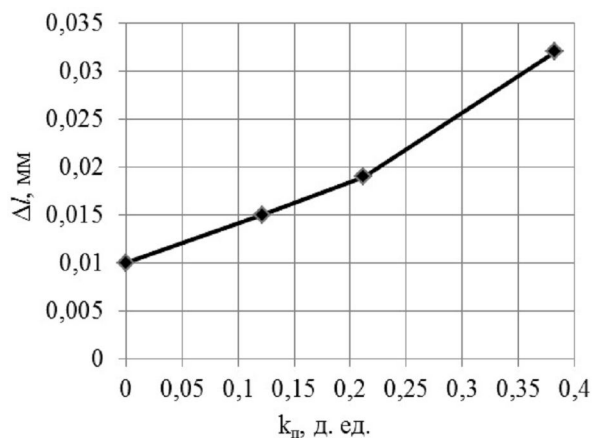


Рисунок 5 – График зависимости абсолютной деформации от коэффициента постели цементного раствора

Также по результатам исследований получена зависимость несущей способности свай от коэффициента постели цементного раствора (рисунок 6). Эта зависимость имеет нелинейный характер и описывается полиномиальной функцией:

$$y = 534,44x^3 + 16,09x^2 + 56,32x + 0,05.$$

Коэффициент корреляции равен: $R = 0,984$.

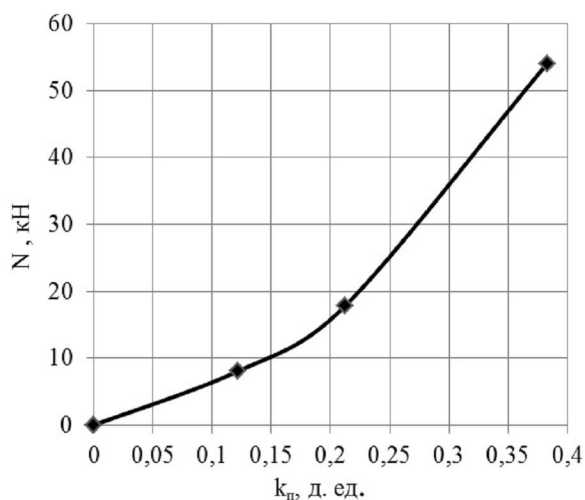


Рисунок 6 – График зависимости несущей способности свай от коэффициента постели цементного раствора

Выводы. 1. В данной работе несущая способность буроинъекционной сваи впервые определялась с помощью лабораторных испытаний модели методом выдергивания прибором ИМП-23.

2. Установлена нелинейная зависимость несущей способности свай от коэффициента

ента постели цементного раствора. При увеличении коэффициента постели цементного раствора с 0,122 до 0,212 и 0,383 несущая способность свай увеличивается в 2,2 и 6,6 раза соответственно, что соответствует строительным требованиям.

3. Результаты данных исследований могут быть положены в основу разработки методики расчета буроинъекционных свай по результатам лабораторных испытаний.

Библиографический список

1. Петухов А. А. Совершенствование способа устройства инъекционных свай в слабых глинистых грунтах для условий реконструкции зданий : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.02 / Аркадий Александрович Петухов. – М., 2006. – 22 с.
2. Швеи В. Б. Усиление и реконструкция фундаментов / В. Б. Швеи, В. И. Феклин, Л. К. Гинзбург. – М. : Стройиздат, 1985. – 204 с.
3. Бровин С. В. Особенности работы буроинъекционных свай усиления в массиве слабых грунтов : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.02 / Сергей Владимирович Бровин. – С.-П., 1994.
4. Должиков П. Н. Физика движения вязкопластичных тампонажных растворов: монография / П. Н. Должиков, А. Э. Кипко. – Донецк : Вебер, 2007. – 237 с.
5. Должиков П. Н. Основы планирования и обработки результатов экспериментальных исследований : учебн. пособ. / П. Н. Должиков, С. В. Семирягин. – Алчевск : ДонГТУ, 2013. – 191 с.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. Антощенко Н. И.

Статья поступила в редакцию 22.10.13

д.т.н. Должиков П. М., Збицька В. В. (ДонДТУ, м. Алчевськ, Україна)

ФІЗИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ БУРОІН'ЄКЦІЙНИХ ПАЛЬ У РОЗУЩІЛЬНЕНИХ ҐРУНТАХ

У статті наведені результати лабораторних досліджень несучої здатності буроін'єкційної палі методом висмикування; проаналізовано залежність несучої здатності буроін'єкційної палі від коефіцієнта постелі.

Ключові слова: фізичне моделювання, цементно-піщаний ґрунт, буроін'єкційна палля, несуча здатність, коефіцієнт постелі.

Dolzhikov P. N., Zbitskaya V. V. (DonSTU, Alchevsk, Ukraine)

PHYSICAL MODELING OF ROOT PILES IN NOT COMPACT GROUND

The article presents the results of laboratory studies of the bearing capacity of root pile using the method pulling; analyzed the dependence of the bearing capacity of root pile on the coefficient of subgrade.

Key words: physical modeling, cement-sand ground, root pile, load bearing capacity, coefficient of subgrade.