

**ПОВЫШЕНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ
ПОСРЕДСТВОМ КОНСТРУКТИВНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ**

В.В. Пивонос

Розглядаються конструктивні і технологічні прийоми, що дозволяють підвищити несучу здатність пальових фундаментів з призматичних паль. На основі лабораторних досліджень визначені фізико-механічні характеристики ґрунтів, використовуваних для модельних випробувань. При виготовленні моделей врахований масштабний фактор на основі теорії моделювання. У процесі проведення модельних досліджень врахований перехід від моделі до природи за величинами силового впливу. Ґрунт використовуваний для модельних досліджень: - суглинок лесоподібний, середній, тугопластичний, пілуватий пісок середньої щільності і щільний ($\rho_d = 1,65 \text{ г/см}^3$ і $1,79 \text{ г/см}^3$ відповідно). Моделі паль виконані в масштабі 1:20 до натурних паль круглого поперечного перерізу: $\varnothing 500$ мм, квадратного 400×400 мм, довжиною 3,5 м. Одна модель круглої палі виконана з гвинтовою навивкою з кроком $0,6 \varnothing$. У роботі виявлені зміни параметрів силового впливу на моделі в залежності від форми поперечного перерізу і форми нижнього кінця. Випробування проведені на спеціально підготовленому стенді.

Рассматриваются конструктивные и технологические приемы, позволяющие повысить несущую способность свайных фундаментов из призматических свай. На основе лабораторных исследований определены физико-механические характеристики грунтов, используемых для модельных испытаний. При изготовлении моделей учтен масштабный фактор на основе теории моделирования. В процессе проведения модельных исследований учтен переход от модели к натуре по величинам силового воздействия. Грунт используемый для модельных исследований: - суглинок лессовидный, средний, тугопластичный, пылеватый песок средней плотности и плотный ($\rho_d = 1,65 \text{ г/см}^3$ и $1,79 \text{ г/см}^3$ соответственно). Модели свай выполнены в масштабе 1:20 к натурным сваям круглого поперечного сечения: $\varnothing 500$ мм, квадратного 400×400 мм, длиной 3,5 м. Одна модель круглой сваи выполнена с винтовой навивкой с шагом $0,6 \varnothing$. В работе выявлены изменения параметров силового воздействия на модели в зависимости от формы поперечного сечения и формы нижнего конца. Испытания проведены на специально подготовленном стенде.

The design and technological methods, allowing to increase the bearing capacity of pile foundations of prismatic piles. Based on laboratory studies determined the physical and mechanical characteristics of soils used for model testing. In the manufacture of models takes into account the scale factor based on the theory of modeling. In the process of modeling studies take into account the transition from model to nature on the values of the force action. Primers used for modeling studies: - loess loam, medium, tugoplastichny, silty sand of medium density and dense ($\rho_d = 1,65 \text{ g/cm}^3$ and $1,79 \text{ g/cm}^3$, respectively). Model piles are made in scale 1:20 to full-scale piles of circular cross-section: $\varnothing 500$ mm, square 400×400 mm, a length of 3,5 m. One model circular piles performed with a helical winding with a step $0,6 \varnothing$. We found changes of parameters of force influence on the model, depending on the shape of the cross-section and forms the lower end. Tests were performed on a specially prepared stand.

По економічним соображениям, когда натурные испытания очень дороги, часто, при значительных объемах исследований выполняют эксперименты на моделях, придерживаясь требований предъявляемых к моделированию. Физическое моделирование, в отличие от математического – это замена изучения интересующего явления, протекающего в натуре, изучением аналогичного (подобного) явления на модели, как правило, меньшего размера, т.е. со значениями определяющих параметров этого явления, удобно достижимыми в эксперименте.

Основной смысл моделирования – установление при меньших затратах времени и средств наилучших характеристик натурального изделия (процесса), или установление неизвестных ранее закономерностей. Установление искомых закономерностей с помощью физического моделирования зачастую является единственно возможным способом экспериментального изучения и решения важных практических задач.

Альтернативой физическому моделированию является математическое, которое в

последнее время привело к подлинно революционному преобразованию науки вообще и математики в особенности.

Физическое моделирование – метод экспериментального изучения различных физических явлений, основанный на их физическом подобии. Подобие достигается за счет равенства для модели и реального явления критериев подобия – безразмерных чисел, зависящих от физических параметров, характеризующих явление.

Экспериментальные данные, полученные методом физического моделирования, распространяется на реальное явление также с учетом критериев подобия.

Для обобщения данных экспериментальных исследований служит разработанная рядом ученых (Покровским Г. И., Флориным В. А., Соколовским В. В. и др.) теория, устанавливающая правила моделирования при испытании прочности оснований из несвязных грунтов и при постановке модельных испытаний (например, для определения картины распределения контактных напряжений и др.).

На базе этой теории Евдокимовым П. Д. [4] было введено понятие «числа моделирования»:

$$N = \sigma / \nu \gamma = i_{dem}, \quad (1)$$

где σ – среднее нормальное напряжение грунта под подошвой фундамента;

ν – ширина фундамента;

γ – объемный вес грунта основания.

Моделирование основывается на условии подобия.

Различают геометрическое подобие, которое характеризуется одинаковым соотношением линейных размеров - масштабом длин:

$$\mu_L = L_M / L_N = i_{dem}, \quad (2)$$

где L_M и L_N – длины соответственных размеров модели и природы.

Динамически подобными называются две кинематически и геометрически подобные системы в том случае, если массы частиц грунта в соответственных точках модельного и натурального оснований имеют одинаковые отношения и равны в тех же точках отношениям между соответствующими силами которые определяют перемещения частиц грунта.

Динамическое подобие характеризуется масштабом сил:

$$\mu_L = F_M / F_N, \quad (3)$$

где F_M и F_N – силы действующие на модель и на природу.

Как известно, в основе теории механического подобия лежит закон подобия Ньютона (1686), динамически подобные между собой механические явления имеют одинаковые соотношения определяющих явлений сил:

$$\mu_f = F_M / F_N = \rho_M L_M^2 v_M^2 / \rho_N L_N^2 v_N^2 = N_e = i_{dem}, \quad (4)$$

где N_e – безразмерное число – критерий Ньютона;

L_M и L_N – характерные размеры модели и природы;

v_M и v_N , ρ_M и ρ_N – скорости и плотности среды, относящиеся к модели и к природе.

Правила моделирования сопротивляемости оснований внешним нагрузкам может быть сформулировано следующим образом:

две системы будут динамически подобными, если их числа моделирования N будут одинаковыми.

Равенство скоростей деформаций грунтов в природе и на моделях вытекает из физического представления о трении в грунтах в условиях предельного равновесия.

При испытании одних и тех же грунтов

$$v_M = v_N. \quad (5)$$

Условия подобия [6] могут быть получены, исходя из бесспорного равенства соотношения определяющих явления сил внешнего давления на основание и сил тяжести:

$$\sigma_M L_M^2 / \sigma_H L_H^2 = \gamma_M L_M / \gamma_H L_H^2, \quad (6)$$

приймаючи за характерний параметр ширину фундаменту b , отримаємо:

$$\sigma_M / b \gamma_M = \sigma_H / b \gamma_H, \quad (7)$$

При проведенні експериментів з несвязними ґрунтами, необхідно забезпечити умови

$$N_M = N_H \quad (8)$$

З вищевказаного випливає, що для связного ґрунту необхідно забезпечити умови,

$$\gamma_M = \gamma_H b_H / b_M, \quad (9)$$

тобто, необхідно збільшити об'ємний вага середовища, що можна досягти тільки методом центробежного моделювання дуже складного і дорогого.

Тому ми обмежимося моделюванням по силовому і геометричному подобию.

Моделі свайних фундаментів виконані в масштабі 1:20.

З вираження (4), при рівних значеннях $\rho_M = \rho_H$, $v_M = v_H$, отримаємо $m_f = 17,5^2 / 350^2$, де 17,5 – робоча довжина моделі; 350 см – робоча довжина натурної, тоді $m_f = 306,25 / 122500 = 0,0025$, відповідно, при визначенні зусиль при випробуванні натурної фундаменту перехідним числом буде N_H , рівне $1 / m_f = 1 / 0,0025 = 400$.

Ґрунти для модельних випробувань

На основі комплексу лабораторних досліджень ґрунтів для модельних випробувань були визначені їх фізико-механічні характеристики.

Связний ґрунт-суглинок лессовидний, середній, тугопластичний з глибини 4.0м: $\rho_s=2,69$ г/см³; $\rho = 1,66$ г/см³; $W=0,20$; $W_L=0,30$; $W_P=0,14$; $\varphi=20^\circ$; $C=17$ кПа; $E=9/5$ мПа.

Пісок мелкий пылеватый, середньої щільності: $\rho_s=2,66$ г/см³; $\rho=1,80$ г/см³; $W=0,09$; $e=0,612$; $\varphi=31^\circ$; $C=4$ кПа.

Пісок мелкий пылеватый, щільний: $\rho_s=2,66$ г/см³; $\rho = 2,02$ г/см³; $W=0,13$; $e=0,49$; $\varphi=33^\circ$; $C=5$ кПа.

Характеристики моделей свай

Для випробувань використовувалися моделі свай, виконані розмірами в масштабі 1:20 к натурним сваям. Моделі виготовлялися з щільного дерева, для створення поверхності ідентичної поверхності бетону, обмазувалися сумішшю епоксидного клею з цементом. Моделі по натурним сваям квадратного поперечного сечення 400×400 мм, довжиною 8 м і круглого поперечного сечення Ø500 мм, тієї ж довжини (робоча довжина свай за умовами заделки в ґрунт 3,5 м).

Для інтерпретації конструктивних особливостей свай, моделі призматических свай виконувалися з плоскою поверхністю нижнього кінця (без острия), з заостреним (для свай квадратного поперечного сечення) і з конічним кінцем для круглих. Одна модель круглого сечення з заостреним кінцем виконана з винтової навівкою кроком 0,6d, діаметр поперечної проекції – 32 мм. Вид моделей свай представлений на фото (рис. 1).



Рис. 1. Модели свай

За критерий предельной осадки $S_{u,mi}$ натуральных свай принята величина осадки, согласно формулы 17 раздела 5,4 [2], где $S_{u,mi}$ принято равным $S_{u,mi} = 0,25 S_u$ и $S_{u,mi} = 0,2S_{max}$ и зависит от вида зданий и сооружений [1].

За критерий предельной осадки моделей принято значение в 3,0 мм которое было получено при испытании моделей с доведением их до условного «срыва».

Модели свай погружались на глубину 17,5 см, что соответствует 3,5 м в натуре, указанная глубина погружения была принята из-за ограничения мощности монолитов грунта для модельных испытаний.

Все серии испытаний проводились в образцах связных грунтов природной влажности. Влажность песчаных грунтов искусственно варьировалась. Глубина погружения моделей свай фиксировалась по контрольным меткам. Аналогично контролировалась осадка моделей после часового «отдыха». В связи с ограниченными размерами монолитов с каждой моделью проводилось три испытания, средние значения результатов испытаний приведены в таблицах и на графиках.

Методика проведения экспериментов

Вдавливающее усилие при погружении моделей свай создавалось посредством силового винта (испытательного стенда) при его вращении. Винт проходит через упорную силовую балку испытательного стенда. Для соосного приложения вдавливающего усилия на модели, между оттарированным динамометром, оснащенный индикатором перемещений часового типа, и оголовком моделей свай, и нижней упорной частью силового винта устанавливались стальные упорные шарики. Для фиксирования направления модели использовался кондуктор, обустроенный направляющими роликами. Схема экспериментального испытательного стенда представлена на рис. 2.

Результаты испытаний моделей свай

**с различными конструктивными особенностями и методами устройства
Целью работы являлось:**

- а) определение усилий задавливания моделей свай и их несущей способности;
- б) исследование полученных данных для пересчета на натурную сваю.

Модели призматических свай квадратного поперечного сечения с плоской поверхностью нижнего конца (без острия).

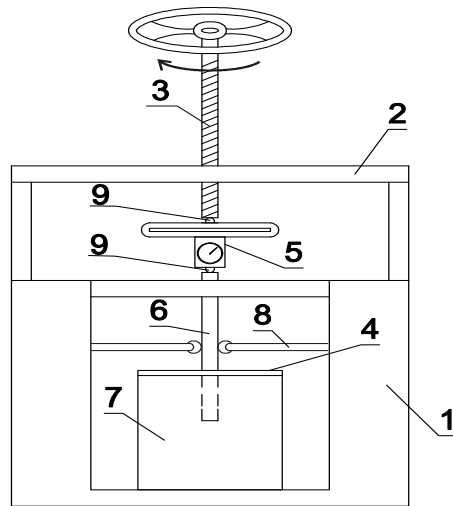


Рис. 2. Схема экспериментального испытательного стенда

1- лоток; 2 - силовая балка из стального проката; 3 - винт со штурвалом (рычагом); 4 - защитное покрытие из технического воска; 5 - динамометр с индикатором перемещения часового типа; 6 - испытываемая модель сваи; 7 - целик грунта в обойме (монолит); 8 - направляющий кондуктор, обустроенный цилиндрическими роликами; 9 - центрирующие стальные опорные шарики

Погружение моделей свай производилось плавно на глубину 17,5 см, показатели усилия погружения снимались в четыре этапа: на отм. 5 см, 10 см, 15 см, 17,5 см. После погружения моделей свай и часового «отдыха» определялась их несущая способность путем плавного погружения моделей свай до перемещения равного 3,0 мм, согласно принятого условия.

На рис. 3 представлен момент проведения испытания на стенде.



Рис. 3. Испытание модели сваи на стенде

По полученным данным представленным в табл. 1 строился график $P_{вд} = f(z)$.

Зависимость вдавливающего усилия от глубины погружения

| | | | | |
|---------------|------|------|------|------|
| $P_{вд}$, кг | 18,3 | 33,3 | 56,6 | 60,0 |
| Z , см | 5 | 10 | 15 | 17,5 |

На рис. 4 представлен график $P_{вд} = f(z)$.

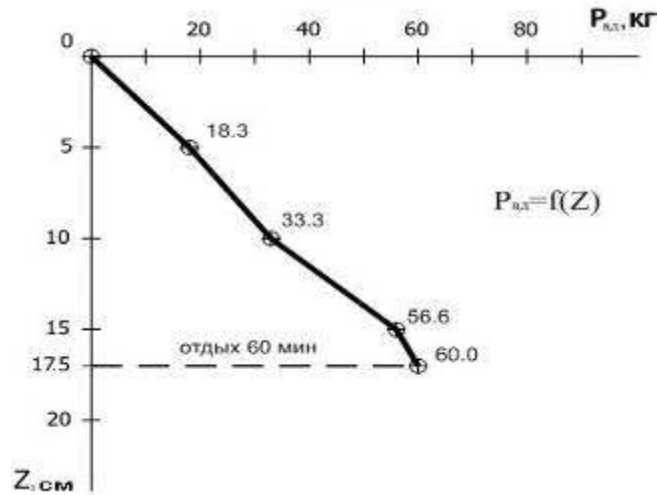


Рис. 4. График $P_{вд} = f(z)$

На рис. 5 представлены результаты испытания моделей свай статической вдавливающей нагрузкой (в суглинке), после «отдыха».

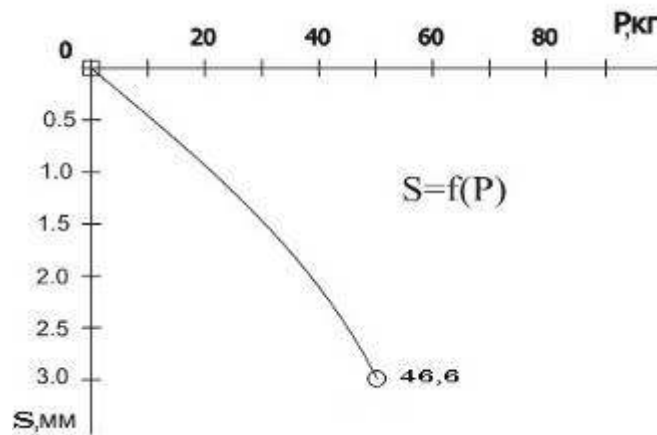


Рис. 5. График $S = f(P)$

В табл. 2 представлены данные зависимости вдавливающего усилия от глубины погружения моделей свай (в песке с $\rho_d=1,65 \text{ г/см}^3$), график зависимости $P_{вд} = f(z)$ представлен на рис. 6.

Зависимость вдавливающего усилия от глубины погружения

| | | | | |
|---------------|------|------|------|------|
| $P_{вд}$, кг | 23,3 | 40,0 | 83,3 | 90,0 |
| Z , см | 5 | 10 | 15 | 17,5 |

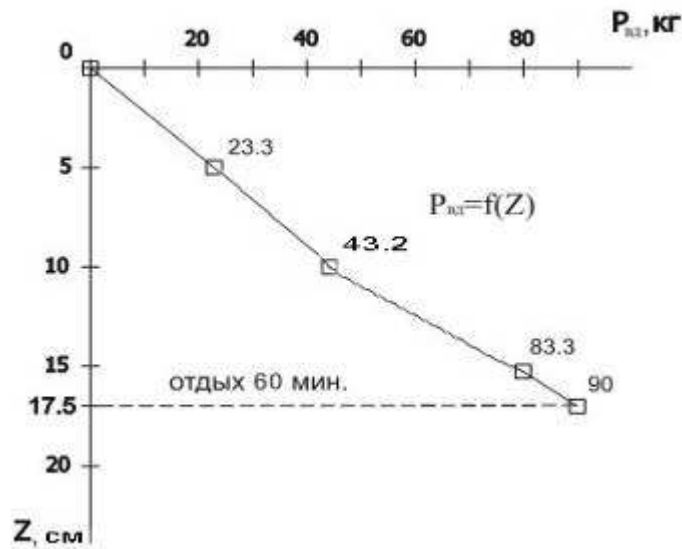


Рис. 6. График $P_{нст} = f(z)$

На рис. 7 представлены результаты испытания моделей свай статической вдавливающей нагрузкой (в песке с $\rho_d=1,65 \text{ г/см}^3$), после «отдыха».

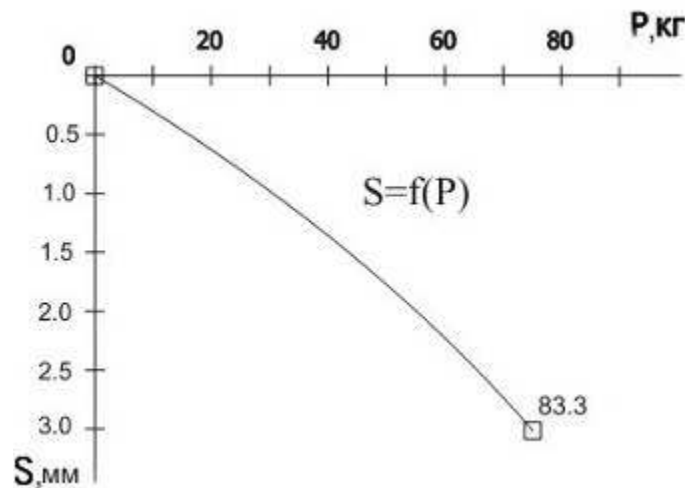


Рис. 7. График $S = f(P)$

Итак, в первой серии опытов на модели с плоской поверхностью нижнего конца (без острия), среднее значение вдавливающего усилия и несущей способности в суглинке составило: 60,0 кг и 76,6 кг, соответственно. Аналогично в песке с $\rho_d=1,65 \text{ г/см}^3$: 90,0 кг и 83,3 кг.

При переходе к натурной свае длиной 3,5 м с размерами 40×40 см (без острия), усилия вдавливания и несущая способность будут составлять:

- для суглинки $60,0 \times 400 = 24000 \text{ кг} = 240,0 \text{ кН}$ – усилие вдавливания, $46,6 \times 400 = 18640 \text{ кг} = 186,4 \text{ кН}$ – несущая способность;
- для песка с $\rho_d=1,65 \text{ г/см}^3$ $90,0 \times 400 = 36000 \text{ кг} = 360,0 \text{ кН}$ – усилие вдавливания, $83,3 \times 400 = 33320 \text{ кг} = 333,2 \text{ кН}$ – несущая способность.

Сопоставим полученные значения несущей способности с расчетным значением согласно СНиП [2]:

$$F_d = \gamma \left(\gamma_{CR} \times R \times A + u \sum_1^n \gamma_{cf} \times h_i \times f_i \right), \quad (10)$$

где $\gamma_c, \gamma_{CR}, \gamma_{cf}$ – коефіцієнти умовий роботи свай, ґрунта под нижнім концом и на боковий поверхносьти, котрыє соотвєтствєнно равняютьсє 1,0;

R – расчєтнє сопротивлєнє ґрунта под нижнім концом свай, кПа (тс/ м²);

A и u – площадь (м²) опирания свай на ґрунт и перимєтр в (м) поперєчнєго сєчєния свай соотвєтствєнно;

h_i – толщина i - го сльоє ґрунта, соприкасающєгося с боковий поверхносьтью свай, м;

f_i – расчєтнє сопротивлєнє i - го сльоє ґрунта основания на боковий поверхносьти свай, кПа (тс/ м²).

$$F_d = 1,0(1,0 \times 1612 \times 0,16 + 1,6(1,0 \times 2 \times 17,0 + 1,0 \times 1,5 \times 26,44)) = 375,8 \text{ кН} - \text{ для суглинка.}$$

$$F_d = 1,0(1,0 \times 1175 \times 0,16 + 1,6(1,0 \times 2 \times 15 + 1,0 \times 1,5 \times 24)) = 293,6 \text{ кН} - \text{ для песка с } \rho_d = 1,65 \text{ г/см}^3.$$

Для суглинка отношение расчєтнєго значения согласно [2] к данным на основе модельных испытаний $k = 375,8 \text{ кН} / 186,4 \text{ кН} = 2,02$, что на 102 % больше чем по данным модельных испытаний.

Для песка с $\rho_d = 1,65 \text{ г/см}^3$, $k = 293,6 \text{ кН} / 333,2 \text{ кН} = 0,88$, что на 12 % меньше чем по данным модельных испытаний.

Модели призматических свай круглого поперєчнєго сєчєния с плоской поверхносьтью нижнєго конца (без острия).

Условия проведения испытаний аналогичны предыдущим.

Полученные данные зависимости вдавливающего усилия от глубины погружения представлены в табл. 3 (для суглинка), в табл. 4 (для песка с $\rho_d = 1,65 \text{ г/см}^3$). Графики $P_{вд} = f(z)$ аналогичные первой серии опытов, в дальнейшем не представлены.

Таблица 3

Зависимость вдавливающего усилия от глубины погружения (для суглинка)

| | | | | |
|---------------|------|------|------|------|
| $P_{вд}$, кг | 26,6 | 46,6 | 63,3 | 66,6 |
| Z , см | 5 | 10 | 15 | 17,5 |

Таблица 4

Зависимость вдавливающего усилия от глубины погружения (для песка с $\rho_d = 1,65 \text{ г/см}^3$)

| | | | | |
|---------------|------|------|------|-------|
| $P_{вд}$, кг | 26,6 | 50,0 | 83,3 | 103,3 |
| Z , см | 5 | 10 | 15 | 17,5 |

Несущая способность моделей свай по результатам испытаний статической вдавливающей нагрузкой после «отдыха» – 60 мин, составила: для суглинка 50,0 кг; для песка с $\rho_d = 1,65 \text{ г/см}^3$ 90,0 кг.

При переходе к натурной свае длиной 3,5 м с Ø500 мм (без острия), усилия вдавливания и несущая способность будут составлять:

- для суглинка $66,6 \times 400 = 26640 \text{ кг} = 266,4 \text{ кН}$ – усилие вдавливания, $50,0 \times 400 = 20000 \text{ кг} = 200,0 \text{ кН}$ – несущая способность;
- для песка с $\rho_d = 1,65 \text{ г/см}^3$ $103,3 \times 400 = 41320 \text{ кг} = 413,2 \text{ кН}$ – усилие вдавливания, $90,0 \times 400 = 36000 \text{ кг} = 360,0 \text{ кН}$ - несущая способность.

Сопоставим полученные значения несущей способности с расчетным значением согласно СНиП [2] по ф-ле (10):

$$F_d = 432,0 \text{ кН} - \text{ для суглинка; } F_d = 334,2 \text{ кН} - \text{ для песка с } \rho_d = 1,65 \text{ г/см}^3.$$

Для суглинка отношение расчєтнєго значения согласно [2] к данным на основе модельных испытаний $k = 432,0 \text{ кН} / 200,0 \text{ кН} = 2,16$, что на 116% больше чем по данным модельных испытаний.

Для песка с $\rho_d = 1,65 \text{ г/см}^3$, $k = 334,2 \text{ кН} / 360,0 \text{ кН} = 0,93$, что на 7% меньше чем по данным модельных испытаний.

Моделі призматических свай квадратного поперечного сечення (с остриєм).

Условия проведения испытаний аналогичны предыдущим.

Полученные данные зависимости вдавливающего усилия от глубины погружения представлены в табл. 5 (для суглинка), в табл. 6 (для песка с $\rho_d=1,65$ г/см³). Графики $P_{вд} = f(z)$ аналогичные первой серии опытов, в дальнейшем не представлены.

Таблица 5

Зависимость вдавливающего усилия от глубины погружения (для суглинка)

| | | | | |
|---------------|------|------|------|------|
| $P_{вд}$, кг | 16,6 | 33,3 | 43,3 | 53,3 |
| Z , см | 5 | 10 | 15 | 17,5 |

Таблица 6

Зависимость вдавливающего усилия от глубины погружения (для песка с $\rho_d=1,65$ г/см³)

| | | | | |
|---------------|------|------|-------|-------|
| $P_{вд}$, кг | 26,6 | 46,6 | 100,0 | 106,6 |
| Z , см | 5 | 10 | 15 | 17,5 |

Несущая способность моделей свай по результатам испытаний статической вдавливающей нагрузкой после «отдыха» – 60 мин, составила: для суглинка 36,6 кг; для песка с $\rho_d=1,65$ г/см³ 100,0 кг.

При переходе к натурной свае длиной 3,5 м с размерами 40×40 см (с острием), усилия вдавливания и несущая способность будут составлять:

- для суглинка $53,3 \times 400 = 21320$ кг = 213,2 кН – усилие вдавливания, $36,6 \times 400 = 14640$ кг = 146,4 кН – несущая способность;
- для песка с $\rho_d = 1,65$ г/см³ $106,6 \times 400 = 42440$ кг = 426,4 кН – усилие вдавливания, $100,0 \times 400 = 40000$ кг = 400,0 кН - несущая способность.

Сопоставим полученные значения несущей способности с расчетным значением согласно СНиП [2] по ф-ле (10):

$F_d = 375,8$ кН – для суглинка; $F_d = 293,6$ кН – для песка с $\rho_d=1,65$ г/см³.

Для суглинка отношение расчетного значения согласно [2] к данным на основе модельных испытаний $k = 375,8$ кН / 146,4 кН = 2,57, что на 157% больше чем по данным модельных испытаний.

Для песка с $\rho_d=1,65$ г/см³, $k = 293,6$ кН / 400,0 кН = 0,734, что на 26,6 % меньше чем по данным модельных испытаний.

Моделі призматических свай круглого поперечного сечення (с остриєм).

Условия проведения испытаний аналогичны предыдущим.

Полученные данные зависимости вдавливающего усилия от глубины погружения представлены в табл. 7 (для суглинка), в табл. 8 (для песка с $\rho_d=1,65$ г/см³). Графики $P_{вд} = f(z)$ аналогичные первой серии опытов, в дальнейшем не представлены.

Таблица 7

Зависимость вдавливающего усилия от глубины погружения (для суглинка)

| | | | | |
|---------------|------|------|------|------|
| $P_{вд}$, кг | 25,0 | 43,3 | 53,3 | 63,3 |
| Z , см | 5 | 10 | 15 | 17,5 |

Таблица 8

Зависимость вдавливающего усилия от глубины погружения (для песка с $\rho_d=1,65$ г/см³)

| | | | | |
|---------------|------|------|-------|-------|
| $P_{вд}$, кг | 30,7 | 60,0 | 113,3 | 126,6 |
| Z , см | 5 | 10 | 15 | 17,5 |

Несущая способность моделей свай по результатам испытаний статической вдавливающей нагрузкой после «отдыха» – 60 мин., составила: для суглинка 43,3 кг; для песка с $\rho_d=1,65$ г/см³ 117,0 кг.

При переходе к натурной свае длиной 3,5 м с $\varnothing 500$ мм (с острием), усилия вдавливания и несущая способность будут составлять:

- для суглинка $63,3 \times 400 = 25320$ кг = 253,2 кН – усилие вдавливания, $43,3 \times 400 = 17320$ кг = 173,2 кН – несущая способность;
- для песка с $\rho_d = 1,65$ г/см³ $126,6 \times 400 = 50640$ кг = 506,4 кН – усилие вдавливания, $117,0 \times 400 = 46800$ кг = 468,0 кН – несущая способность.

Сопоставим полученные значения несущей способности с расчетным значением согласно СНиП [2] по ф-ле (10):

$$F_d = 432,0 \text{ кН} \text{ – для суглинка; } F_d = 334,2 \text{ кН} \text{ – для песка с } \rho_d = 1,65 \text{ г/см}^3.$$

Для суглинка отношение расчетного значения согласно [2] к данным на основе модельных испытаний $k = 432,0 \text{ кН} / 173,2 \text{ кН} = 2,49$, что на 149 % больше чем по данным модельных испытаний.

Для песка с $\rho_d = 1,65$ г/см³, $k = 334,2 \text{ кН} / 468,0 \text{ кН} = 0,71$, что на 29 % меньше, чем по данным модельных испытаний.

Модели призматических свай круглого поперечного сечения с винтовой навивкой, погруженные методом поступательно-вращательного движения (в заранее пробуренную лидерную скважину).

Внешний вид установки, для проведения данного погружения, приведен на рис.8. В данную силовую установку, в нижнюю часть лотка, устанавливался отобранный монолит грунта. Перпендикулярно образцу грунта помещалась модель сваи, которая направлялась кондуктором, для исключения перемещений в горизонтальном направлении. На сваю устанавливался динамометр для определения приложенного усилия к модели, на который через стальной шарик передавалась нагрузка вдавливания от винта. Погружение свай производилось плавно на глубину 17,5 см.



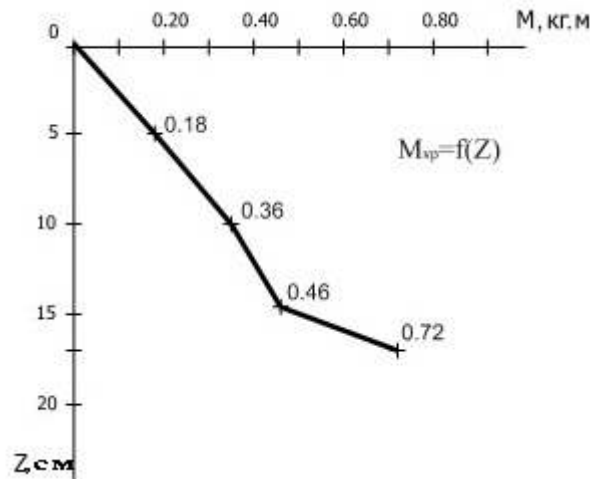
Рис. 8. Испытание модели сваи на стенде

Погружение производилось поступательно-вращательными движениями в предварительно пробуренную скважину глубиной 12,5 см, того же диаметра, что и свая. Показатели приложенного усилия для определения момента при погружении моделей снимались по показаниям динамометра. После погружения свай до планируемой отметки, определяли их несущую способность путем нагружения свай до перемещения 3 мм.

Полученные данные зависимости вдавливающего усилия от глубины погружения и полученного момента при завинчивании представлены в табл. 9 (для суглинка). График изменения крутящего момента от глубины погружения $M_{кр} = f(Z)$ представлен на рис.9, графики $P_{вд} = f(z)$ аналогичные первой серии опытов, в дальнейшем не представлены.

Зависимость вдавливающего усилия от глубины погружения и момента при завинчивании (для суглинка)

| | | | | |
|-----------------|------|------|------|------|
| $P_{вд}$, кг | 6,6 | 23,3 | 36,6 | 46,6 |
| $M_{кр}$, кг/м | 0,18 | 0,38 | 0,46 | 0,72 |
| Z , см | 5 | 10 | 15 | 17,5 |

Рис. 9. График $M_{кр} = f(Z)$

Несущая способность моделей свай по результатам испытаний статической вдавливающей нагрузкой после «отдыха» – 60 мин., составила 73,7 кг.

При переходе к натурной свае длиной 3,5 м с размерами поперечного сечения $\varnothing 500$ мм, с винтовой навивкой, усилие вдавливания, несущая способность и момент при завинчивании будут составлять соответственно:

$46,6 \times 400 = 18640$ кг = 186,4 кН – усилие вдавливания; $73,7 \times 400 = 29480$ кг = 294,8 кН – несущая способность; $0,72 \times 400 = 288,0$ кг.м – максимальный крутящий момент при завинчивании.

Сопоставим полученные значения несущей способности с расчетным значением согласно СНиП [2] по ф-ле (10), $F_d = 432,0$ кН.

Для суглинка отношение расчетного значения согласно [2] к данным на основе модельных испытаний $k = 432,0$ кН / 294,8 кН = 1,46, полученное расчетное значение на 46 % больше чем по данным модельных испытаний.

Модели призматических свай круглого поперечного сечения с винтовой навивкой, погруженные методом поступательно-вращательного движения (серия без лидерных скважин).

Погружение производилось поступательно-вращательными движениями в грунт. Показатели приложенного усилия вдавливания и момента при погружении модели снимались с каждым полным оборотом сваи, до погружения на заданную отметку. После погружения сваи до планируемой отметки, определяли ее несущую способность путем нагружения сваи до перемещения 3мм.

Полученные данные зависимости вдавливающего усилия от глубины погружения и полученного момента при завинчивании представлены в табл. 10 (для суглинка), в табл. 11 (для песка с $\rho_d = 1,65$ г/см³). График изменения крутящего момента от глубины погружения $M_{кр} = f(Z)$ и графики $P_{вд} = f(z)$ аналогичные первой серии опытов, в дальнейшем не представлены.

Таблиця 10

Зависимость вдавливающего усилия от глубины погружения и момента при завинчивании (для суглинка)

| | | | | |
|-----------------|------|------|------|------|
| $P_{вд}$, кг | 18,3 | 33,3 | 56,6 | 60,0 |
| $M_{кр}$, кг/м | 0,18 | 0,38 | 0,48 | 0,75 |
| Z , см | 5 | 10 | 15 | 17,5 |

Зависимость вдавливающего усилия от глубины погружения и момента при завинчивании (для песка с $\rho_d=1,65 \text{ г/см}^3$)

| | | | | |
|-----------------|------|-------|------|-------|
| $P_{вд}$, кг | 18,2 | 45,0 | 67,0 | 76,0 |
| $M_{кр}$, кг/м | 0,4 | 0,645 | 0,9 | 1,155 |
| Z , см | 5 | 10 | 15 | 17,5 |

Несущая способность моделей свай по результатам испытаний статической вдавливающей нагрузкой после «отдыха» – 60 мин., составила: для суглинка 76,6 кг; для песка с $\rho_d=1,65 \text{ г/см}^3$ 132,0 кг.

При переходе к натурной свае длиной 3,5 м с размерами поперечного сечения $\varnothing 500$ мм, с винтовой навивкой, усилие вдавливания, несущая способность и момент при завинчивании будут составлять соответственно:

- для суглинка, $60,0 \times 400 = 24000 \text{ кг} = 240,0 \text{ кН}$ – усилие вдавливания; $76,6 \times 400 = 30640 \text{ кг} = 306,4 \text{ кН}$ – несущая способность; $0,75 \times 400 = 300 \text{ кг. м}$ – максимальный крутящий момент при завинчивании;
- для песка с $\rho_d=1,65 \text{ г/см}^3$, $76,0 \times 400 = 30400 \text{ кг} = 304,0 \text{ кН}$ – усилие вдавливания, $132,0 \times 400 = 52800 \text{ кг} = 528,0 \text{ кН}$ – несущая способность; $1,155 \times 400 = 462,0 \text{ кг.м}$ – максимальный крутящий момент при завинчивании.

Сопоставим полученные значения несущей способности с расчетным значением согласно СНиП [2] по ф-ле (10):

$F_d = 432,0 \text{ кН}$ – для суглинка; $F_d = 334,2 \text{ кН}$ – для песка с $\rho_d=1,65 \text{ г/см}^3$.

Для суглинка отношение расчетного значения согласно [2] к данным на основе модельных испытаний $k = 432,0 \text{ кН} / 306,4 \text{ кН} = 1,41$, что на 41 % больше чем по данным модельных испытаний.

Для песка с $\rho_d=1,65 \text{ г/см}^3$, $k = 334,2 \text{ кН} / 528,0 \text{ кН} = 0,63$, что на 37 % меньше, чем по данным модельных испытаний.

На рис. 10 представлен график зависимости изменения вдавливающего усилия от глубины при погружении моделей свай в плотный песок с $\rho_d=1,79 \text{ г/см}^3$.

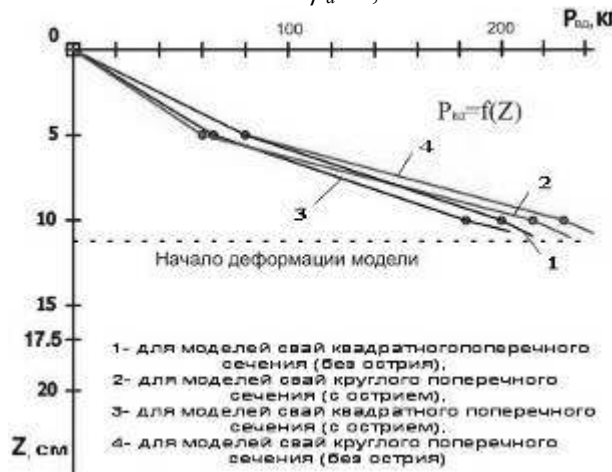


Рис. 10. График $P_{вд} = f(z)$

Погружение моделей свай удалось осуществить до глубины 11,5 см, после этого начали активно проявляться изгибные деформации моделей свай.

Выводы

- Модельные испытания позволяют при небольших затратах выявить общие закономерности развития деформаций основания свайного фундамента, определить предполагаемые параметры оборудования для погружения свай.
- Конструктивные особенности моделей свай (размеры поперечного сечения, форма нижнего конца, наличие винтовой навивки) влияют на величину их условной несущей способности.
- В процессе испытаний выявлено, что при погружении моделей большие усилия вдавливания

- необходимы для образцов погружаемых в песок, чем для образцов погружаемых в суглинок.
- Большой условной несущей способностью обладают модели свай, погруженные в песок, по сравнению с погруженными в суглинок, что особенно очевидно при испытании моделей в плотных песках.
 - Для песчаных грунтов корреляционные зависимости между расчетными значениями и данными модельных испытаний (для призматических моделей квадратного и круглого поперечного сечения без острия) имеют значения близкие к 1,0 для вышеуказанных моделей с острием коэффициент корреляции равен 0,734 и 0,71 соответственно, что говорит о резерве несущей способности.
 - Для глинистых грунтов (суглинка) корреляционная зависимость изменяется от 2,02 до 2,49, т.е., значительно отличается от данных для песка с $\rho_d = 1,65 \text{ г/см}^3$ (имеющих резерв несущей способности).
 - С увеличением плотности песка до $\rho_d = 1,79 \text{ г/см}^3$ значительно возрастает сопротивление грунтовой среды погружению свай. При испытании моделей не удалось погрузить их до контрольной глубины из за начала проявления изгибных деформаций.
 - При испытании моделей свай круглого поперечного сечения с навивкой, погруженных в лидерные скважины (суглинки) $Z = 12,5 \text{ см}$ коэффициент корреляции равен 1,46, что по отношению к аналогичной свае без винтовой навивки, погруженной в по аналогии вдавливанием в 1,7 раза больше, что указывает на повышенную несущую способность свай с винтовой навивкой.
 - Корреляционные зависимости для моделей свай круглого поперечного сечения с винтовой навивкой при погружении в песок с $\rho_d = 1,65 \text{ г/см}^3$ и в суглинок (без лидерной скважины) значительно отличаются, при этом указанная конструкция свай более эффективна в песках.
 - На основании результатов выполненных исследований выявлено что в глинистых грунтах эффективнее применять призматические сваи с тупым концом, так как они имеют большую несущую способность по отношению к сваям с острым концом.
 - В условиях тесной городской застройки, для исключения динамических влияний на близ расположенные строения, целесообразно использовать призматические сваи с винтовой навивкой, погружаемые в зависимости от грунтовых условий, вдавливанием с завинчиванием в предварительно пробуренные лидерные скважины и без них. Исходным материалом свай с винтовой навивкой могут являться продукты утилизации (металлические трубы от отработанных технологических сетей и систем).

Список литературы

1. СНиП 2.02.01-83. Основания и фундаменты. – М.: Госстрой СССР, 1984.
2. СНиП 2.02.03-83. Свайные фундаменты. – М.: Стройиздат, 1986.
3. Руководство по проектированию свайных фундаментов. – М.: Стройиздат, 1980. – 150 с.
4. Евдокимов П. Д. Прочность оснований и устойчивость гидротехнических сооружений на мягких грунтах / П. Д. Евдокимов. – М.-Л.: «ГОСЭНЕРГОИЗДАТ», 1956. – 272 с.
5. Пьянков С. А. Свайные фундаменты. Учебник для строительных вузов. Издательство УлГТУ, Ульяновск 2007. – 105с.
6. Седов Л. И. Методы подобия и размерностей в механике. 10-е изд. / Л. И. Седов. – М.: Наука, 1987. – 430 с.

Пивонос В.В. – к.т.н., доцент кафедри основ і фундаментів Одеської державної академії будівництва і архітектури.