

ГЕОТЕХНОЛОГИЯ НАУЧНОГО АНАЛИЗА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ И ОСАДОЧНОЙ ДЕФОРМАЦИИ ГРУНТОВ ЗЕРНИСТЫХ СРЕД ОСНОВАНИЙ ВЗРЫВОФУГАСНЫХ СВАЙ

Л.М. Борозенец

Тольяттинский государственный университет, г. Тольятти, Россия

Представлены данные натурального эксперимента полевого испытания зернистых грунтов основания взрывофугасной сваи в грунтовывтесненной скважине на несущую способность и осадочную деформацию. Создана методология расчетного исследования с представлением теорий, методик и методов расчетного получения значений напряжений пяти зон состояний предельных равновесий грунтов зернистых сред оснований по боковым поверхностям кругового конуса и ствола изучаемой сваи. Сделано обоснование выбора зон состояний предельных равновесий грунтов зернистых сред, задействованных экспериментально взрывофугасной свай в основании. Осуществлен расчет предельной несущей способности грунтов основания и осадки взрывофугасной сваи. Разработана методика теоретического построения расчетного графика зависимости осадки сваи от нагрузки. Показаны основные выводы представляемой научной работы.

Ключевые слова: геотехнология, методология, теория, познание, методика, метод, напряжение, способность, деформация, осадка, грунт, основание, скважина, свая, ствол, конус.

Введение

Геотехнология научного анализа обоснования несущей способности и деформации зернистых грунтов предназначена для решения геотехнологических задач оснований взрывофугасных односвайных фундаментов. Геотехнология – познание методологий техники расчетного анализа несущей способности и устойчивости оснований различных видов свай. Методология – теория и познание методов расчета несущей способности и устойчивости грунтов зернистых сред оснований одиночных свай.

Научная разработка проблемы производится с использованием положений созданных теорий нелинейных упругопластическивязких и упругопластическивязкожестких напряжений и деформаций предельно-напряженных зернистых грунтов [1–4].

Предлагается методика выбора зон состояний предельных равновесий грунтов, задействованных в эксперименте. Представлены результаты проработки предельной несущей способности грунтов основания одиночной взрывофугасной сваи и его осадочной деформации. Разработана методика теоретического построения расчетного графика зависимости осадки от нагрузки анализируемой взрывофугасной сваи.

1. Полевое экспериментальное испытание несущей способности и деформации грунтов основания натурной взрывофугасной сваи

Разработка методологии расчетного исследования рассматриваемых вопросов проводится с использованием экспериментальных результатов, полученных в полевых условиях для взрывофугасной сваи В-2. Схема взрывофугасной сваи В-2 представ-

лена на рис. 1а. График $S = f(P)$ испытания взрывофугасной сваи статической нагрузкой показан на рис. 1б.

Грунты – суглинки, макропористые 1-го типа просадочности.

Нагрузки на основание сваи: от массы ствола сваи $N_c = \pi \cdot R^2 \cdot l_c \cdot \gamma_6 = 2,64$ кН; от массы домкрата $N_d = 0,5$ кН; внешняя нагрузка $N_0 = 160,0$ кН. Общая нагрузка на основание сваи $N = N_0 + N_c + N_d = 163,1$ кН.

В состав взрывофугасной набивной сваи В-2 включено уплотненное ядро грунта в виде кругового конуса 4 как жесткого грунтового несущего элемента в основании нижнего конца сваи. Круговой конус формируется от устья скважины и со-провождает процесс грунтовывтеснения до ее проектной глубины h_c . Геометрическими параметрами для определения размеров кругового конуса служат диаметр его основания, равный диаметру ствола сваи d_c , и угол при его вершине α , равный значению двух углов внутреннего трения грунта φ .

2. Техника методологии расчетного исследования нелинейно-линейности напряжений обжатия боковой поверхности свай грунтами зернистых сред в области основания взрывофугасной сваи

Расчетное исследование с целью упрощения проводится по средневзвешенным значениям физико-механических характеристик грунтов:

– удельного сцепления

$$\bar{c} = \frac{c_1 h_1 + c_2 h_2 + c_3 h_3}{\sum h_i} = 28,862 \text{ кПа}; \quad (1)$$

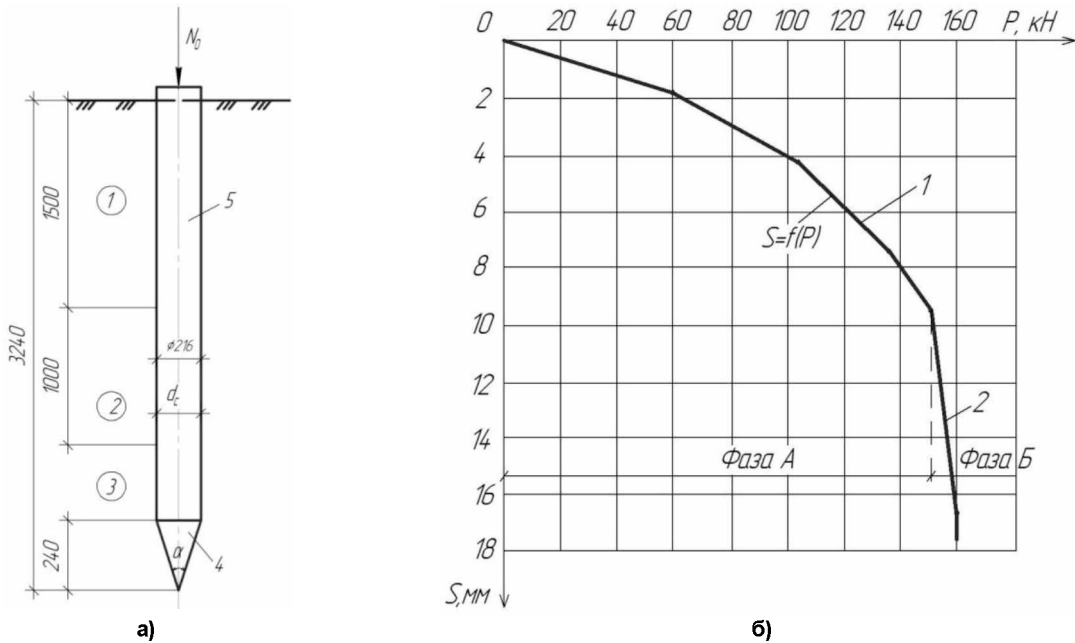


Рис. 1. Схема взрывофугасной набивной сваи В-2 (а): 1, 2, 3 – слои грунтов; 4 – круговой конус грунта, 5 – свая; график зависимости $S = f(P)$ сваи В-2 (б): 1 – нелинейная часть графика, 2 – линейная часть графика

– угла внутреннего трения

$$\bar{\varphi} = \frac{\varphi_1 h_1 + \varphi_2 h_2 + \varphi_3 h_3}{\Sigma h_i} = 22^\circ; \quad (2)$$

– удельного веса скелета сухого грунта

$$\bar{\gamma}_d = \frac{\gamma_{d1} h_1 + \gamma_{d2} h_2 + \gamma_{d3} h_3}{\Sigma h_i} = 14,95 \text{ кН/м}^3; \quad (3)$$

– удельного веса грунта

$$\bar{\gamma} = \frac{\gamma_1 h_1 + \gamma_2 h_2 + \gamma_3 h_3}{\Sigma h_i} = 17,8 \text{ кН/м}^3. \quad (4)$$

Средневзвешенные значения углов внутреннего трения грунта пяти зон состояний предельных равновесий грунтов φ_i соответственно:

$$\varphi_1 = \varphi = 22^\circ; \quad (5)$$

$$\varphi_2 = 22,5^\circ + \varphi / 2 = 33,5^\circ; \quad (6)$$

$$\varphi_3 = 45^\circ; \quad (7)$$

$$\varphi_4 = 67,5^\circ - \varphi / 2 = 56,5^\circ; \quad (8)$$

$$\varphi_5 = 90^\circ - \varphi = 68^\circ. \quad (9)$$

Коэффициенты углов внутреннего трения грунта:

$$\text{tg}\varphi_1 = 0,4040; \text{tg}\varphi_2 = 0,6619; \text{tg}\varphi_3 = 1,0;$$

$$\text{tg}\varphi_4 = 1,5108; \text{tg}\varphi_5 = 2,4750.$$

Коэффициент тотальности напряжений сжатия:

$$k_{1,1} = \sin\varphi_1 + \cos\varphi_1 = 1,3018. \quad (10)$$

2.1. Техника теории и методов расчетного определения напряжений пяти зон состояний предельного равновесия зернистых грунтов в основании ствола взрывофугасной сваи

Расчетное определение параметров пяти зон состояний предельных равновесий грунта вокруг

боковой поверхности ствола сваи заключается в следующем.

Минимальные касательные напряжения сопротивления сдвигу пяти зон состояний предельных равновесий грунта:

– для нелинейной зависимости:

$$\tau_{3,1} = (\sigma_d + c) \sin\varphi_1 \text{tg}\varphi_1 = 6,64 \text{ кПа}; \quad (11)$$

$$\tau_{3,2} = (\sigma_d + c) \sin\varphi_2 \text{tg}\varphi_2 = 10,86 \text{ кПа}; \quad (12)$$

$$\tau_{3,3,1} = (\sigma_d + c) \sin\varphi_{3,1} \text{tg}\varphi_{3,1} = 13,64 \text{ кПа}; \quad (13)$$

– для линейной зависимости:

$$\tau_{3,3} = (\sigma_d + c) \sin\varphi_3 \text{tg}\varphi_3 = 16,41 \text{ кПа}; \quad (14)$$

$$\tau_{3,4} = (\sigma_d + c) \sin\varphi_4 \text{tg}\varphi_4 = 24,79 \text{ кПа}; \quad (15)$$

$$\tau_{3,5} = (\sigma_d + c) \sin\varphi_5 \text{tg}\varphi_5 = 40,62 \text{ кПа}. \quad (16)$$

Последовательно суммарные значения нелинейных напряжений по зонам:

$$\Sigma\tau_{3(0-1)} = 0 + \tau_{3,1} = 6,64 \text{ кПа}; \quad (17)$$

$$\Sigma\tau_{3(0-2)} = \Sigma\tau_{3(0-1)} + \tau_{3,2} = 17,5 \text{ кПа}; \quad (18)$$

$$\Sigma\tau_{3(0-3,1)} = \Sigma\tau_{3(0-2)} + \tau_{3,3,1} = 25,70 \text{ кПа}. \quad (19)$$

Последовательно суммарные значения линейных напряжений по зонам:

$$\Sigma\tau_{3(0-3)} = \Sigma\tau_{3(0-3,1)} + 0,5\tau_{3,3} = 33,91 \text{ кПа}; \quad (20)$$

$$\Sigma\tau_{3(0-4)} = \Sigma\tau_{3(0-3)} + \tau_{3,4} = 58,7 \text{ кПа}; \quad (21)$$

$$\Sigma\tau_{3(0-5)} = \Sigma\tau_{3(0-4)} + \tau_{3,5} = 99,3 \text{ кПа}. \quad (22)$$

Схемы формирования зон состояний предельных равновесий грунта вокруг боковой поверхности ствола и кругового конуса сваи см. рис. 2 и 3.

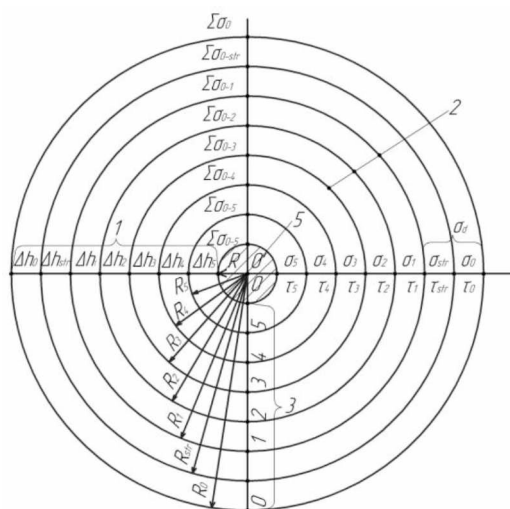


Рис. 2. Схема пяти зон состояний предельных равновесий вокруг ствола и кругового конуса сваи: 1 – область пяти зон предельных равновесий грунта в основании сваи; 2 – задействованные в эксперименте зоны 1, 2, 3; 3 – границы зон; 5 – свая

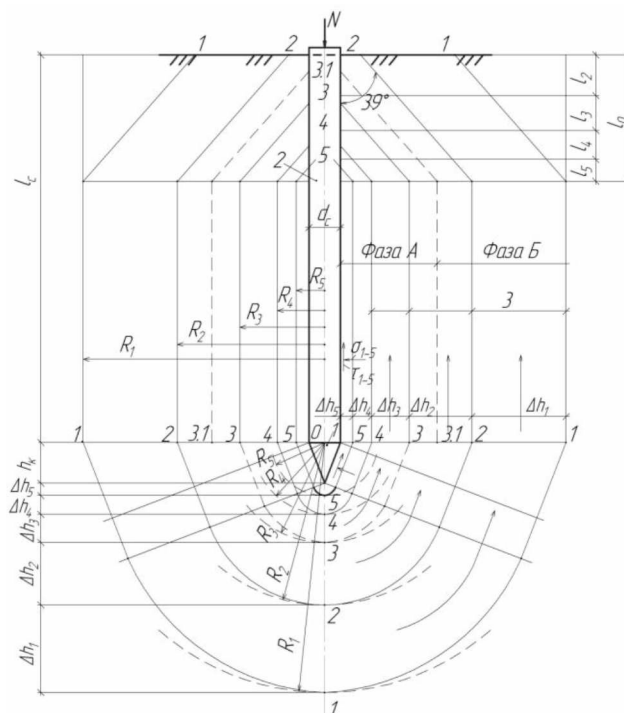


Рис. 3. Схемы формирования зон состояний предельных равновесий грунта вокруг боковой поверхности ствола и кругового конуса сваи

2.2. Техника теории и методов расчетного определения напряжений пяти зон состояний предельного равновесия зернистых грунтов в основании кругового конуса взрывофугасной сваи

Расчет параметров пяти зон состояний предельных равновесий грунта вокруг боковой поверхности кругового конуса производится по аналогии с методикой расчета параметров вокруг боковой поверхности ствола сваи.

Максимальные тотальные напряжения зон состояний предельных равновесий:

– упругости:

$$\sigma_{str} = \sigma_d \cos \varphi = 13,86 \text{ кПа}; \quad \sigma_0 = \sigma_d - \sigma_{str} = 1,07 \text{ кПа};$$

– упругопластичновязкости:

• напряжения $\tau_1 \dots \tau_{3,1}$ распределяются для нелинейной зависимости в следующем виде:

$$\tau_1 = (\sigma_d + c)(\cos \varphi_1 + \sin \varphi_1) \operatorname{tg} \varphi_1 = 23,04 \text{ кПа}; \quad (23)$$

$$\tau_2 = (\sigma_d + c)(\cos \varphi_2 + \sin \varphi_2) \operatorname{tg} \varphi_2 = 37,75 \text{ кПа}; \quad (24)$$

$$\tau_{3,1} = (\sigma_d + c)(\cos \varphi_{3,1} + \sin \varphi_{3,1}) \operatorname{tg} \varphi_{3,1} = 47,39 \text{ кПа}; \quad (25)$$

• напряжения $\tau_3 \dots \tau_5$ распределяются для линейной зависимости в следующем порядке:

$$\tau_3 = (\sigma_d + c)(\cos \varphi_3 + \sin \varphi_3) \operatorname{tg} \varphi_3 = 57,03 \text{ кПа}; \quad (26)$$

$$\tau_4 = (\sigma_d + c)(\cos \varphi_4 + \sin \varphi_4) \operatorname{tg} \varphi_4 = 86,16 \text{ кПа}; \quad (27)$$

$$\tau_5 = (\sigma_d + c)(\cos \varphi_5 + \sin \varphi_{51}) \operatorname{tg} \varphi_5 = 141,15 \text{ кПа}. \quad (28)$$

Последовательно суммарные значения напряжений по зонам для нелинейной зависимости в следующем виде:

$$\Sigma \tau_{0-1} = 0 + \tau_1 = 23,04 \text{ кПа}; \quad (29)$$

$$\Sigma \tau_{0-2} = \Sigma \tau_{0-1} + \tau_2 = 60,79 \text{ кПа}; \quad (30)$$

$$\Sigma \tau_{0-3,1} = \Sigma \tau_{0-2} + \tau_{3,1} = 89,30 \text{ кПа}. \quad (31)$$

Последовательно суммарные значения напряжений по зонам для линейной зависимости в следующем порядке:

$$\Sigma \tau_{0-3} = \Sigma \tau_{0-3,1} + 0,5 \tau_3 = 117,82 \text{ кПа}; \quad (32)$$

$$\Sigma \tau_{0-4} = \Sigma \tau_{0-3} + \tau_4 = 203,98 \text{ кПа}; \quad (33)$$

$$\Sigma \tau_{0-5} = \Sigma \tau_{0-4} + \tau_5 = 345,13 \text{ кПа}. \quad (34)$$

Радиусы границ зон (35)–(41): $R_5 = 0,153 \text{ м}; R_4 = 0,259 \text{ м}; R_3 = 0,448 \text{ м}; R_2 = 0,868 \text{ м}; R_1 = 2,291 \text{ м}; R_{str} = 3,356 \text{ м}; R_0 = 49,416 \text{ м}.$

Мощность сжимаемой толщи каждого слоя грунта между границами зон (42)–(48): $\Delta h_5 = 0,045 \text{ м}; \Delta h_4 = 0,106 \text{ м}; \Delta h_3 = 0,189 \text{ м}; \Delta h_2 = 0,420 \text{ м}; \Delta h_1 = 1,423 \text{ м}; \Delta h_{str} = 1,245 \text{ м}; \Delta h_0 = 45,879 \text{ м}.$

3. Техника методологии теоретического обоснования реализации предельной несущей способности грунтов зернистых сред оснований взрывофугасных свай по критическим нагрузкам

Согласно теоретическим результатам в процессе формирования кругового конуса из-под него восходящим потоком грунт последовательно по зонам выпирается вверх вдоль ствола сваи под напряжениями поршневого давления кругового конуса σ_{1i} – максимального главного нормального сжатия, действующего параллельно стволу сваи, и σ_{3i} – минимального главного нормального сжатия, направленного ортогонально к боковой поверхности ствола сваи, обжимающего его и формирующего касательное напряжение τ_{3i} , удерживающего сваю от погружения.

Максимальные тотальные напряжения зон состояний предельных равновесий см. равенства (23)–(28). Последовательно суммарные значения напряжений пяти зон см. формулы (29)–(34).

Площадь боковой поверхности кругового конуса

$$A_k = 0,5\pi d_c l_0 = 0,102 \text{ м}^2, \quad (35)$$

где $l_0 = 0,5d_c / \sin\varphi = 0,288 \text{ м}$ – образующая конуса.

Нагрузки по зонам состояний предельных равновесий зернистых грунтов кругового конуса ствола сваи:

$$P_1 = A_k \Sigma \tau_{0-1} = 2,26 \text{ кН}; \quad (36)$$

$$P_2 = A_k \Sigma \tau_{0-2} = 5,96 \text{ кН}; \quad (37)$$

$$P_{3.1} = A_k \Sigma \tau_{0-3.1} = 8,75 \text{ кН}; \quad (38)$$

$$P_3 = A_k \Sigma \tau_{0-3} = 11,55 \text{ кН}; \quad (39)$$

$$P_4 = A_k \Sigma \tau_{0-4} = 19,99 \text{ кН}; \quad (40)$$

$$P_5 = A_k \Sigma \tau_{0-5} = 33,82 \text{ кН}. \quad (41)$$

Длина схода напряжений по боковой поверхности к оголовку сваи, см. рис. 3:

$$l_2 = R_2 - R_3 = \Delta h_2 = 0,420 \text{ м}; \quad (42)$$

$$l_3 = R_3 - R_4 = \Delta h_3 = 0,189 \text{ м}; \quad (43)$$

$$l_4 = R_4 - R_5 = \Delta h_4 = 0,106 \text{ м}; \quad (44)$$

$$l_5 = R_5 - R_c = \Delta h_5 = 0,045 \text{ м}. \quad (45)$$

$$l_0 = l_2 + \dots + l_5 = 0,76 \text{ м}. \quad (46)$$

По полученным суммарным значениям напряжений пяти зон состояний предельных равновесий определяются критические нагрузки на взрывофугасную набивную сваю:

– первое состояние предельного равновесия

$$P_{0-1} = P_{1c} + P_{1k} = 15,87 \text{ кН}, \quad (47)$$

где $P_{1c} = A_c \tau_{3.1} = 13,52 \text{ кН}$ – нагрузка на ствол сваи при $A_c = 2,036 \text{ м}^2$ – площади боковой поверхности ствола сваи; $P_{1k} = A_k \tau_1 = 2,35 \text{ кН}$ – нагрузка на круговой конус при $A_k = 0,102 \text{ м}^2$ – площади боковой поверхности кругового конуса и $\tau_1 = 23,04 \text{ кПа}$ – расчет см. (23);

– второе состояние предельного равновесия грунта

$$P_{1-2} = P_{2c} + P_{2k} + P_{0-1} = 40,28 \text{ кН}, \quad (48)$$

где $P_{2c} = P_{2c1} + P_{2c2} = 20,56 \text{ кН}$; $P_{2c1} = 0,5 (\sigma_d + \tau_{3.2}) A_{2c1} = 1,54 \text{ кН}$; $A_{2c1} = U l_2 = 0,285 \text{ м}^2$; $U = 2\pi R = 0,678 \text{ м}$; $P_{2c2} = A_{c2} \tau_{3.2} = 19,02 \text{ кН}$; $A_{c2} = A_c - A_{2c1} = 1,751 \text{ м}^2$; $P_{2k} = A_k \tau_2 = 3,85 \text{ кН}$; $\tau_2 = 37,75 \text{ кПа}$ – расчет см. (24);

– третье состояние предельного равновесия грунта

$$P_{1-3} = P_{3c} + P_{3k} + P_{1-2} = 74,18 \text{ кН}, \quad (49)$$

где $P_{3c} = P_{3c1} + P_{3c2} = 27,68 \text{ кН}$; $P_{3c1} = A_{3c1} 0,5 \tau_{3.3} = 1,05 \text{ кН}$; $A_{3c1} = U l_3 = 0,128 \text{ м}^2$; $P_{3c2} = A_{3c2} \tau_{3.3} = 26,63 \text{ кН}$; $A_{3c2} = A_c - (A_{2c1} + A_{3c1}) = 1,623 \text{ м}^2$; $P_{3k} = A_k \tau_3 = 6,22 \text{ кН}$; $\tau_3 = 57,03 \text{ кПа}$ – расчет см. (26);

– четвертое состояние предельного равновесия грунта

$$P_{1-4} = P_{4c} + P_{4k} + P_{1-3} = 122,31 \text{ кН}; \quad (50)$$

где $P_{4c} = P_{4c1} + P_{4c2} = 39,34 \text{ кН}$; $P_{4c1} = 0,5 \tau_{3.4} A_{4c1} = 0,89 \text{ кН}$; $A_{4c1} = U l_4 = 0,072 \text{ м}^2$; $P_{4c2} = A_{4c2} \tau_{3.4} = 38,45 \text{ кН}$; $A_{4c2} = A_c - (A_{2c1} + A_{3c1} + A_{4c1}) = 1,551 \text{ м}^2$; $P_{4k} = A_k \tau_4 = 8,79 \text{ кН}$; $\tau_4 = 86,16 \text{ кПа}$ – расчет см. (27);

– пятое состояние предельного равновесия грунта

$$P_{1-5} = P_{5c} + P_{5k} + P_{1-4} = 199,07 \text{ кН}; \quad (51)$$

где $P_{5c} = P_{5c1} + P_{5c2} = 62,37 \text{ кН}$; $P_{5c1} = 0,5 \tau_{3.5} A_{5c1} = 0,63 \text{ кН}$; $A_{5c1} = U l_5 = 0,031 \text{ м}^2$; $P_{5c2} = A_{5c2} \tau_{3.5} = 61,74 \text{ кН}$; $A_{5c2} = A_c - (A_{2c1} + A_{3c1} + A_{4c1} + A_{5c1}) = 1,52 \text{ м}^2$; $P_{5k} = A_k \tau_5 = 14,39 \text{ кН}$; $\tau_5 = 141,15 \text{ кПа}$ – расчет см. (28).

В соответствии с данными экспериментального исследования на боковую поверхность ствола взрывофугасной набивной сваи действуют средние давления, зарегистрированные мессдозами через один час после укладки бетонной смеси в скважине, равное $\sigma_6 = \tau_6 = 12,0 \text{ кПа}$, и при предельной несущей способности грунта по боковой поверхности ствола опытной сваи, равное $\sigma_k = \tau_k = 28,9 \text{ кПа}$, которые суммарно представляют общее предварительное напряжение грунта в процессе взаимодействия со свай.

$$\tau_b = \sigma_b = \sigma_6 + \sigma_k = 40,9 \text{ кПа}. \quad (52)$$

Предельные нагрузки на сваю с учетом напряжений грунта от взаимодействия с бетоном боковой поверхности ствола сваи:

$$P_1 = P_{0-1} + P_b = 98,73 \text{ кН}, \quad (53)$$

где $P_{0-1} = 15,87 \text{ кН}$ – см. (61) $P_b = A_c \sigma_b = 82,86 \text{ кН}$;

$$P_2 = P_{1-2} + P_b = 122,84 \text{ кН}, \quad (54)$$

где $P_{1-2} = 40,28 \text{ кН}$ – см. (62);

$$P_3 = P_{1-3} + P_b = 157,04 \text{ кН}, \quad (55)$$

где $P_{1-3} = 74,18 \text{ кН}$ – см. (63)

$$P_4 = P_{1-4} + P_b = 205,17 \text{ кН}, \quad (56)$$

где $P_{1-4} = 122,31 \text{ кН}$ – см. (64);

$$P_5 = P_{1-5} + P_b = 281,93 \text{ кН}, \quad (57)$$

где $P_{1-5} = 199,07 \text{ кН}$ – см. (65).

4. Техника методологии расчетного исследования нелинейно-линейности деформации пяти зон состояний предельных равновесий грунтов зернистых сред основания и осадки взрывофугасной сваи

Модуль общей деформации определяется по результатам полевого исследования взрывофугасной набивной сваи В-2 (см. рис. 16) при нагруз-

Основания, фундаменты, подземные сооружения

ке в пределах пропорциональности $P = 125$ кН при стабилизированной осадке $S = 6$ мм для диаметра условного массивного фундамента $d_{y,1} = 928$ мм (рис. 4), коэффициент Пуассона суглинка $\nu = 0,37$. Модуль общей деформации E для грунтов естественного состояния площадки испытаний определен по графику зависимости осадки от нагрузки полевого исследования сваи равным $5,2$ МПа. В основании кругового конуса взрывофугасной сваи грунт предельно уплотнен и имеет повышенные модули общей деформации.

Методика расчетного определения деформационной устойчивости грунтов оснований и осадок взрывофугасной набивной сваи разрабатывается с использованием круговых конусов условных фундаментов с диаметрами $d_{y,1}$ первой, $d_{y,2}$ второй, $d_{y,3,1}$ половины третьей зон фазы А уплотнения и кругового конуса ствола сваи диаметром d_c третьей, четвертой и пятой зон фазы Б до предельного разуплотнения. Модули попредельно-равновесных деформаций грунта E_1 и нелинейной общей деформации E_1^0 – для первой зоны; E_2 и E_2^0 – для второй зоны; $E_{3,1}$ и $E_{3,1}^0$ – для половины третьей зоны в основании кругового конуса сваи определяются с использованием схем условных массивных фундаментов $A_i B_i C_i D_i$, показанных на рис. 4. Модуль попредельно-равновесных линейных деформаций $E_{3,1-5}^0 = 5,2$ МПа; линейной общей деформации E_3^0 – для третьей зоны; E_4^0 – для четвертой зоны; E_5^0 – для пятой зоны определяются в основании кругового конуса нижнего конца ствола сваи. Позиционная схема показана на рис. 4.

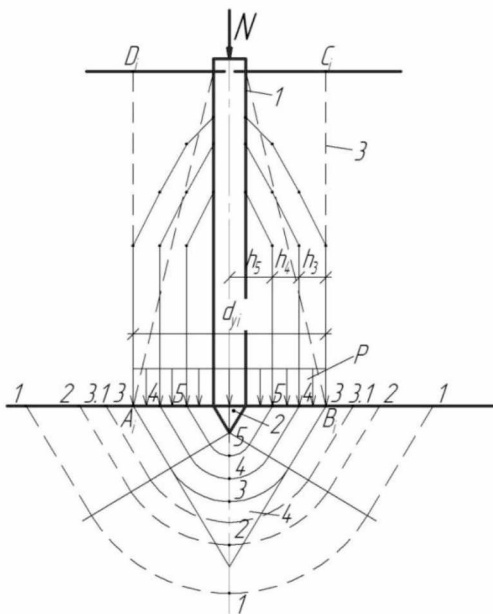


Рис. 4. Схема формирования кругового конуса 4 условного массивного фундамента 3 и кругового конуса 2 ствола взрывофугасной сваи 1; 1, 2, 3 – зоны состояний предельных равновесий кругового конуса 4; 3, 4, 5 – кругового конуса 2

Диаметры условных объемных массивных фундаментов:

– $A_1 B_1 C_1 D_1$ в первой зоне состояния предельного равновесия

$$d_{y,1} = d_c + 2 \cdot 0,25 \Delta h_1 = 0,928 \text{ м}; \quad (58)$$

– $A_2 B_2 C_2 D_2$ в первой и во второй зонах состояний предельных равновесий

$$d_{y,2} = d_c + 2 \cdot 0,25 (\Delta h_1 + \Delta h_2) = 1138 \text{ мм}; \quad (59)$$

– $A_{3,1} B_{3,1} C_{3,1} D_{3,1}$ в первой, второй и в половине третьей зон состояний предельных равновесий

$$d_{y,3,1} = d_c + 2 \cdot 0,25 (\Delta h_1 + \Delta h_2 + 0,5 \Delta h_3) = 1185 \text{ мм}. \quad (60)$$

Модули нелинейной общей деформации зернистых грунтов:

– первой зоны, при $P = 98,7$ кН – см. (53), $S_1 = 4$ мм – по графику на рис. 1б, $d_{y,1} = 928$ мм, см. (58).

$$E_1^0 = (1 - \nu^2) P_1 / d_{y,1} S_1 = 22,98 \text{ МПа}. \quad (61)$$

Эталонный попредельно-равновесный коэффициент пропорциональности (табл. 1)

$$K_1^0 = E_1^0 / E_1 = 1,393, \quad (62)$$

Модуль деформации уплотненного зернистого грунта

$$E_1 = E_1^0 / K_1^0 = 16,5 \text{ МПа}; \quad (63)$$

– второй зоны, при $P_2 = 122,8$ кН – см. (54), $S_2 = 6$ мм – по графику на рис. 1б, $d_{y,2} = 1138$ мм, см. (59).

$$E_2^0 = (1 - \nu^2) P_{y,2} / d_{y,2} S_2 = 15,76 \text{ МПа}. \quad (64)$$

$$K_2^0 = E_2^0 / E_2 = 1,205, \quad (65)$$

$$E_2 = E_2^0 / K_2^0 = 13,1 \text{ МПа}; \quad (66)$$

– половины третьей зоны, при $P_{3,1} = 142,14$ кН, $S_{3,1} = 8,3$ мм – по графику на рис. 1б, $d_{y,3,1} = 1185$ мм, по уравнению (60).

$$E_{3,1}^0 = (1 - \nu^2) P_{3,1} / d_{y,3,1} S_{3,1} = 12,47 \text{ МПа}. \quad (67)$$

$$K_{3,1}^0 = E_{3,1}^0 / E_{3,1} = 1,017. \quad (68)$$

$$E_{3,1} = E_{3,1}^0 / K_{3,1}^0 = 12,26 \text{ МПа}. \quad (69)$$

От третьей до пятой зон состояний предельных равновесий грунта, при $E_{3,5} = 5,2$ МПа и диаметре основания кругового конуса сваи $d_c = 216$ мм:

– третьей зоны, при $P_3 = 11,5$ кН – см. (55), $S_3 = 16$ мм – на рис. 1б.

$$E_3^0 = (1 - \nu^2) P_3 / d_c S_3 = 2,89 \text{ МПа} \quad (70)$$

$$K_3^0 = E_3^0 / E = 0,5558, \quad (71)$$

– четвертой зоны, при $P_4 = 20,0$ кН – см. (56), $S_4 = 43$ мм – по вектору линейного графика на рис. 5.

$$E_4^0 = (1 - \nu^2) P_4 / d_c S_4 = 1,87 \text{ МПа}. \quad (72)$$

$$K_4^0 = E_4^0 / E = 0,3556, \quad (73)$$

– пятой зоны, при $P_5 = 33,8$ кН – см. (57), $S = 86$ мм – по вектору линейного графика на рис. 5.

$$E_5^0 = (1 - \nu^2) P_5 / d_c S_5 = 1,57 \text{ МПа}. \quad (74)$$

$$K_5^0 = E_5^0 / E = 0,3010. \quad (75)$$

Эталонные попредельно-равновесные коэффициенты пропорциональности модулей нелинейной общей деформации грунта сведены в табл. 1.

Таблица 1
Эталонные попредельно-равновесные коэффициенты пропорциональности нелинейной общей деформации грунта

Вид графика № СПР*	Нелинейный			Линейный		
	1	2	3.1	3	4	5
k_1^0	1,3930	1,2050	1,017	0,5558	0,3556	0,3010

*СПР – состояние предельного равновесия.

Таким образом, разработан метод определения эталонных попредельно-равновесных коэффициентов пропорциональности модулей нелинейной и линейной общей деформации грунта для использования кругового конуса условного массивного фундамента в фазе А уплотнения первой, второй и половины третьей зон состояний предельных равновесий и кругового конуса сваи в фазе Б разуплотнения в половине третьей, четвертой и пятой зонах.

Конечные осадки сваи по зонам состояний предельных равновесий:

$$S_1 = (1 - \nu^2) P_1 / d_{y1} E_1^0 = 0,00399 M = 4,0 \text{ мм}; \quad (76)$$

$$S_2 = (1 - \nu^2) P_2 / d_{y2} E_2^0 = 0,005999 M = 6,0 \text{ мм}; \quad (77)$$

$$S_{3,1} = (1 - \nu^2) P_{3,1} / d_{y3,1} E_{3,1}^0 = 0,00687 M = 8,67 \text{ мм}; \quad (78)$$

$$S_3 = (1 - \nu^2) P_3 / d_c E_3^0 = 0,0160 M = 16,0 \text{ мм}; \quad (79)$$

$$S_4 = (1 - \nu^2) P_4 / d_c E_4^0 = 0,04273 M = 42,7 \text{ мм}; \quad (80)$$

$$S_5 = (1 - \nu^2) P_5 / d_c E_5^0 = 0,08608 M = 86,1 \text{ мм}. \quad (81)$$

Результаты расчетного определения показаны в табл. 2.

Таблица 2
Напряжения σ_i , нагрузки P_{ki} , P_{yi} и осадки S_i

№ СПР	1	2	3.1	3	4	5
σ_i , кПа	23,0	60,8		117,8	204,0	345,1
P_{ki} , кН	2,26	5,96	8,8	11,6	20,0	33,8
P_{yi} , кН	98,7	122,8	142,1	159,0	205,2	281,9
S_i , мм	4,0	6,0	8,7	16,0	42,7	86,1

По полученным результатам научного анализа несущей способности и осадочной деформации предложена Методика теоретического построения расчетного графика нелинейно-линейной зависимости осадки от нагрузки основания взрывофугасной сваи, показанного на рис. 5.

5. Техника методологии выбора зон состояний предельных равновесий грунтов, задействованных опытной взрывофугасной свай

С целью расчетного определения несущей способности основания взрывофугасной набивной

сваи В-2 выбираются уравнения состояний предельных равновесий, в состав которых входят известные предельные сопротивления грунта по боковым поверхностям кругового конуса и ствола сваи при критической нагрузке. Критическая внешняя нагрузка на сваю, определенная экспериментально, составила $P_{кэ} = 160,0$ кН при осадке $S = 16$ мм в соответствии с графиком на рис. 1б, полная критическая нагрузка $P_{кэ} = 163,1$ кН. Напряжения σ_i нагрузки P_i и осадки S_i по зонам пяти состояний предельных равновесий грунта основания сваи определены расчётом и приведены в табл. 2.

Коэффициент пропорциональности отношения критических экспериментальной $P_{кэ} = 163,1$ кН и расчетной нагрузки $P_{кр} = 281,9$ кН

$$n = P_{кэ} / P_{кр} = 0,5757. \quad (82)$$

Доля нагрузки, воспринимаемая полным круговым конусом при $P_{ск} = 33,8$ кН (см. формулу (55))

$$\Delta P_k = P_{ск} n = 19,47 \text{ кН}. \quad (83)$$

По значению доли нагрузки ΔP_k определяются задействованные в эксперименте зоны состояний предельных равновесий грунта:

$$\Sigma P_{(1-3)к} = P_{1к} + P_{2к} + P_{3к} = 19,77 \text{ кН}, \quad (84)$$

где $P_{1к} = 2,26$ кН; $P_{2к} = 5,96$ кН; $P_{3к} = 11,55$ кН;

$$\Delta P_3 = \Sigma P_{(1-3)к} - \Delta P_k = 0,3 \text{ кН};$$

$$\Delta P_{3к} = P_{3к} - \Delta P_3 = 11,25 \text{ кН}. \quad (85)$$

За критическую принимается третья зона состояния предельного равновесия грунта при $P_{3к} = 11,55$ кН.

Таким образом, установлено, что в 1...3-й зонах состояний предельных равновесий грунта неполного кругового конуса опытной взрывофугасной набивной сваи задействованы минимальные главные нормальные напряжения сжатия $\sigma_{3,i}$ и касательные напряжения сдвига $\tau_{3,i}$.

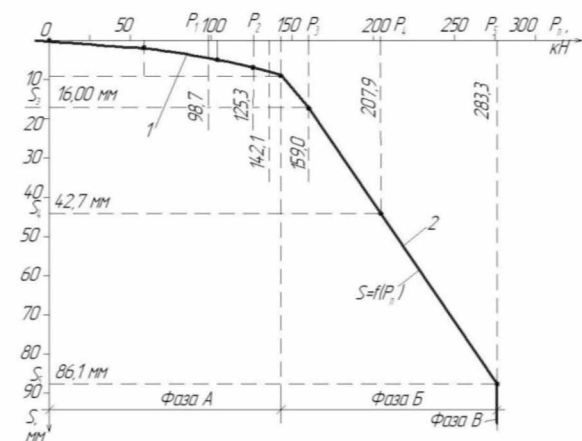


Рис. 5. Графики зависимости осадки от нагрузки $S = f(Pn)$ взрывофугасной сваи: 1 – нелинейный экспериментально-расчетный 1...3.1 зон состояний предельных равновесий грунта; 2 – линейный расчетный 3...5 зон состояний предельных равновесий грунта

Выводы

Разработана геотехнология расчетно-экспериментального исследования несущей способности и осадочной деформации грунтов зернистых сред оснований взрывофугасной сваи.

Создана техника методологии расчетного определения напряжений обжатия сваи пятью зонами состояний предельных равновесий грунтов зернистых сред в основании рассматриваемой сваи.

Осуществлены расчеты напряжений пяти зон состояний предельных равновесий по боковой поверхности ствола и кругового конуса сваи.

Определена техника методологии теоретического обоснования реализации предельной несущей способности по критическим нагрузкам и соответствующей ей осадочной деформации грунтов зернистых сред основания взрывофугасной сваи, произведено теоретическое построение расчетного графика зависимости ее осадки от нагрузки.

Показана техника методологии выбора зон состояний предельных равновесий грунта задействованных взрывофугасной свай.

Литература

1. Борозенец, Л.М. *Геотехника фундаментостроения и грунтоустойчивости: моногр.* / Л.М. Борозенец. – Тольятти: ТГУ, 2015. – 588 с.
2. Борозенец, Л.М. *Теория напряжения нелинейного упругопластическивязкого взаимодействия нагружаемой одиночной сваи с грунтами основания* / Л.М. Борозенец // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура».* – 2017. – Т. 17, № 3. – С. 27–34.
3. Борозенец, Л.М. *Теория нелинейной упругопластическивязкожесткой деформации предельно-напряженных грунтов в основаниях нагружаемых одиночных свай: механическая модель* / Л.М. Борозенец // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура».* – 2018. – Т. 18, № 4. – С. 37–43.
4. Борозенец, Л.М. *Теория нелинейной упругопластическивязкожесткой деформации предельно-напряженных грунтов в основаниях нагружаемых одиночных свай: математическая модель* / Л.М. Борозенец // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура».* – 2019. – Т. 19, № 1. – С. 20–26.

Борозенец Леонид Михайлович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Промышленное и гражданское строительство», Тольяттинский государственный университет (Тольятти), tsp@tltsu.ru

Поступила в редакцию 27 июня 2019 г.

DOI: 10.14529/build190405

GEOTECHNOLOGY OF THE SCIENTIFIC ANALYSIS OF THE BEARING CAPACITY AND SETTLEMENT DEFORMATION OF THE GRANULAR ENVIRONMENTS SOIL OF THE BASES OF PILES PUNCHED WITH CRATERING EXPLOSIVES

L.M. Borozenetz, tsp@tltsu.ru

Togliatti State University, Togliatti, Russian Federation

The data on the bearing capacity and settlement deformation are presented as obtained from an on-site experiment within a field test of granular soil in the base of a pile punched with cratering explosives in a soil-displaced well. The methodology of the calculated study is elaborated, and the theories, techniques and methods are provided for calculating the values of tension of five zones of limit state of soil elastic equilibrium in granular environments of the bases along the side surface of the circular cone and shaft of the considered pile. The substantiation is given for the choice of the zones of limit state of soil elastic equilibrium in granular environments involved in the experiment with the pile punched with cratering explosives in the base. The calculation of the ultimate bearing capacity of soil of the base and of the settlement of the pile punched with cratering explosives is presented. The technique of theoretical building of the calculated graph of the pile settlement dependency on the load is developed. The main conclusions of the presented scientific work are provided.

Keywords: geotechnology, methodology, theory, knowledge, technique, method, tension, capacity, deformation, settlement, soil, base, well, pile, shaft, cone.

References

1. Borozenets L.M. *Geotekhnika fundamentostroyeniya i gruntoustoychivosti* [Geotechnics of Foundation Engineering and Soil Resistance]. Tol'yatti, TGU Publ., 2015. 588 p.
2. Borozenets L.M. [Theory of Stress of Nonlinear Elastoplastic Viscous Interaction of a Loaded Single Pile with Base Soils]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*, 2017, vol. 17, no. 3, pp. 27–34. (in Russ.) DOI: 10.14529/build170304
3. Borozenets L.M. [Theory of Nonlinear Elastoplastic Visco-Hard Deformation of Extremely Stressed Soils in the Bases of Loaded Single Piles: Mechanical Model]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*, 2018, vol. 18, no. 4, pp. 37–43. (in Russ.) DOI: 10.14529/build180406
4. Borozenets L.M. [Theory of Nonlinear Elastoplastic Visco-Hard Deformation of Extremely Stressed Soils in the Bases of Loaded Single Piles: Mechanical Model]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*, 2019, vol. 19, no. 1, pp. 20–26. (in Russ.) DOI: 10.14529/build190103

Received 27 June 2019

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Борозенец, Л.М. Геотехнология научного анализа несущей способности и осадочной деформации грунтов зернистых сред оснований взрывофугасных свай / Л.М. Борозенец // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2019. – Т. 19, № 4. – С. 44–51. DOI: 10.14529/build190405

FOR CITATION

Borozenetz L.M. Geotechnology of the Scientific Analysis of the Bearing Capacity and Settlement Deformation of the Granular Environments Soil of the Bases of Piles punched with Cratering Explosives. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*. 2019, vol. 19, no. 4, pp. 44–51. (in Russ.). DOI: 10.14529/build190405