

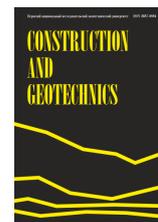


**пермский
политех**

CONSTRUCTION AND GEOTECHNICS

Т. 15, № 4, 2024

<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>



DOI: 10.15593/2224-9826/2024.4.04

УДК 624.131.54

ОСАДКИ СВАЙ В ПРОБИТЫХ СКВАЖИНАХ С УШИРЕНИЕМ С УЧЕТОМ ФИЛЬТРАЦИОННОЙ КОНСОЛИДАЦИИ

М.В. Панкина

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства,
Пенза, Российская Федерация

О СТАТЬЕ

Получена: 28 апреля 2024
Одобрена: 12 сентября 2024
Принята к публикации:
05 ноября 2024

Ключевые слова:

свая в пробитой скважине, свая с уширением, фундамент в вытрамбованном котловане, осадка во времени, фильтрационная консолидация, осадка с учетом нелинейности.

АННОТАЦИЯ

При неритмичном процессе строительного производства актуальным является оценка скорости развития осадки фундамента. Устройство свай в пробитых скважинах с уширением ведется по технологии фундаментов в вытрамбованных котлованах и предполагает формирование уплотненной околосвайной зоны. В ходе уплотнения основания трамбовками в водонасыщенном глинистом грунте имеет место фильтрационная (первичная) консолидация и ползучесть скелета грунта (вторичная консолидация). Для свай в пробитых скважинах с уширением характерны значительные давления под уширением порядка 1000+3000 кПа, превышающие расчетное сопротивление грунта. Для определения конечной (стабилизированной) осадки свай в пробитых скважинах с уширением предложена комбинированная расчетная схема грунтового основания в виде линейно деформируемого полупространства и в нелинейной постановке. Факторы времени рассчитаны для двух случаев: при давлении под подошвой уширения свай в пробитых скважинах с уширением 1000 и 2000 кПа. Установлено, что стабилизация деформаций происходит в относительно короткий период порядка 80 сут, что на практике должно соответствовать периоду возведения строительных конструкций надземной части здания. Указанный небольшой срок стабилизации осадок при значительных давлениях обусловлен малой толщиной активной зоны сжатия основания. Тем не менее расчет осадки свай в пробитых скважинах с уширением во времени позволяет регулировать сроки проведения строительных мероприятий с учетом условий обеспечения относительно равномерных осадок всех участков здания.

© Панкина Мария Вячеславовна – старший преподаватель, e-mail: pankina.marya@mail.ru, ORCID: 0000-0002-1591-5938.

Mariia V. Pankina – Senior Lecturer, e-mail: pankina.marya@mail.ru, ORCID: 0000-0002-1591-5938.



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

THE SETTLEMENT OF PILE IN PUNCHED HOLE WITH BROADENING TAKING INTO ACCOUNT FILTRATION CONSOLIDATION

M.V. Pankina

Penza State University of Architecture and Construction, Penza, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 28 April 2024
Approved: 12 September 2024
Accepted for publication:
05 November 2024

Keywords:

piles in the punched holes, pile with broadening, ramming piles, foundation in the rammed pits, settlement in time, settlement with nonlinearity.

ABSTRACT

There is relevant to rate foundation settlement speed in an irregular construction process. The technology of piles in punched holes with broadening is based on foundations in rammed pits technology and involves the compacted near-pile zone formation. There are filtration consolidation (primary) and creep of the soil skeleton (secondary consolidation) during the base compaction by rammers in a water-saturated clay soil. The piles are characterized by under broadening pressures of 1000 ÷ 3000 kPa, exceeding the estimates resistance of the basement soil. To determine the final (stabilized) pile settlement, a combined estimated scheme of the soil base in the form of a linearly deformable half-space and in a nonlinear formulation is proposed. The time factors are calculated for two cases: for the pressure 1000 kPa and 2000 kPa under the broadening. Deformation stabilization occurs in a relatively short period of about 80 days, which in practice should correspond to the period of construction building. This short settlement stabilization at significant pressures is due to the small active zone. Nevertheless, estimate the settlement in time allows to adjust the building timing, taking into account the conditions for ensuring relatively the regular settlement of all building sections.

Введение

В процессе строительства зданий и сооружений при поэтапном увеличении нагрузки на фундаменты деформации основания во времени протекают неравномерно, что влечет перераспределение усилий в надфундаментных конструкциях. Прогнозирование осадок во времени является одной из наиболее сложных задач механики грунтов, над которой в свое время работали Н.А. Цытович [1], С.Б. Ухов [2], З.Г. Тер-Мартirosян [3], А.А. Бартоломей [4] и др.

В процессе решения указанной задачи следует обращать внимание на стабилизированные и нестабилизированные деформации основания, т.е. конечные осадки и перемещения во времени. В инженерной практике в большинстве случаев ограничиваются определением конечной (стабилизированной) осадки фундамента. Однако для строительного производства характерно неритмичное ведение работ, что в ряде случаев обуславливает необходимость учета развития осадок во времени. Указанное относится к объектам со значительными размерами в плане, когда возможно расположение свай в различных слоях грунта с существенным отличием деформационных характеристик и коэффициентов фильтрации, что исследовалось Ю.К. Зарецким [5]. Вопросы взаимодействия свайных фундаментов и грунтового основания при учете фактора времени поднимались в работах А.З. Тер-Мартirosяна [6], А.Б. Пономарева [7], Ю. Л. Винникова [8], Ф. Кувабары [9], Ш. Фенга [10] и др. Учет осадок во времени актуален для свай в пробитых скважинах с уширением (СПСУ), особенностью которых являются значительные давления под уширением порядка 1000÷3000 кПа и мощность активной зоны сжатия грунтового основания 3,0÷5,0 м.

Методика эксперимента и теоретические подходы

Для нагруженного грунтового основания характерно протекание процессов релаксации и ползучести. Указанные процессы главным образом имеют место в глинистых грунтах и практически не проявляются в песках, что подтверждается в ряде работ [11–13].

Под ползучестью следует понимать развитие деформаций грунта во времени при постоянном давлении под уширением. При этом реологические процессы самым существенным образом зависят от степени влажности и показателя текучести грунта. По мере увеличения последнего значение указанных процессов возрастает.

Модель грунта представляет собой грунтовую массу, в которой давление вначале передается на поровую воду (поровое давление), а затем перераспределяется на скелет грунта (эффективное давление). В общем и целом каждому периоду времени соответствует уравнение равновесия, согласно которому давление на основание распределяется на скелет грунта $P_{ск}$ и поровую воду P_w :

$$P = P_{ск} + P_w. \quad (1)$$

В водонасыщенном грунтовом основании под уширением сваи одновременно протекают два процесса: процесс фильтрации воды по закону Дарси; а по законам упругости и ползучести – деформации твердой части грунтового основания. По мере завершения выдавливания воды из пор грунтового основания давление окончательно перераспределяется на скелет грунта. В этот момент $P = P_{ск}$, что соответствует окончанию процесса фильтрационной (первичной) консолидации. С увеличением нагрузки на грунтовое основание нарастает процесс вторичной консолидации вследствие ползучести скелета грунта.

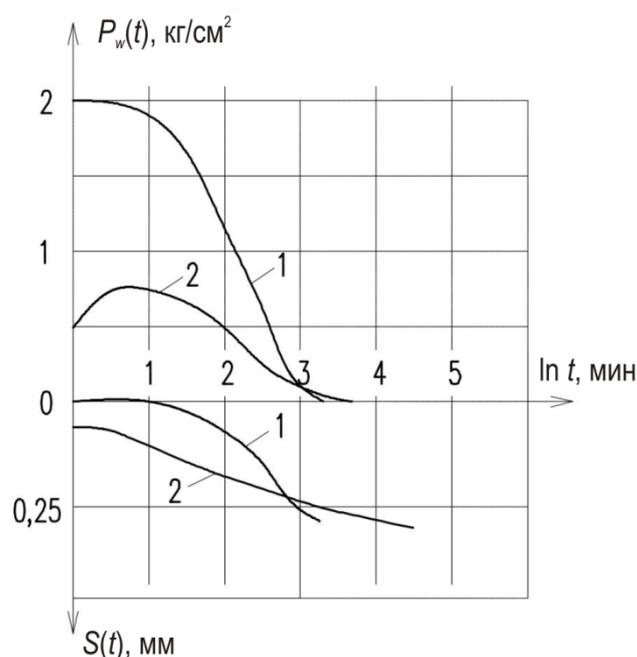


Рис. 1. Сравнение кривых консолидации глинистого грунта ненарушенной структуры ($h = 2,5$ см): 1 – по теории фильтрационной консолидации; 2 – по эксперименту

Fig. 1. Comparison of consolidation curves of undisturbed clay soil ($h = 2,5$ cm): 1 – according to the filtration consolidation theory; 2 – according to experiment

В вышеуказанных работах [1, 7, 12] отмечается, что первичная и вторичная консолидации в наибольшей степени проявляются в водонасыщенных грунтах. Первичная консолидация характеризуется коэффициентом первичной консолидации C_v , определение которого может осуществляться двумя методами: СП 23.13330.2011 «Основания гидротехнических сооружений» и СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений». Первый предложен

Ф. Тейлором [14] и носит название метода корня квадратного из времени. Второй предложен А. Казагранде [15] – логарифмический метод. Оба метода включают испытание грунтов на сжатие, и при некотором постоянном давлении анализируется характер деформаций во времени в соответствии с графиками $S = f(\sqrt{t})$ или $S = f(\ln t)$ (рис. 1) [1].

В рекомендациях по определению параметров ползучести и консолидации грунтов лабораторными методами (ПНИИИС Госстроя СССР, М.: Стройиздат, 1989) отмечаются серьезные расхождения. Различие может составлять 5÷9 раз. Тем не менее в настоящее время в исследованиях Н.А. Цытовича [1] и С.Б. Ухова [2] достаточно достоверно решена задача первичной консолидации грунтовой массы и получено выражение для степени консолидации на любое заданное время t :

$$t = \frac{4Nh^2}{\pi^2 C_v}, \quad (2)$$

где N – фактор времени, зависящий от характера эпюры распределения вертикальных напряжений σ_z по глубине; h – расчетная толщина слоя, в пределах которой учитывается процесс фильтрационной консолидации, м (рис. 2). Для прямоугольной и треугольной эпюр распределения напряжений σ_z значения фактора времени принимаются по табл. 1 в зависимости от степени уплотнения S_t/S_∞ , где S_t – осадка в произвольный момент, S_∞ – конечная расчетная осадка.

Таблица 1

Значение фактора времени N от степени уплотнения

Table 1

The value of the time factor N depends on the degree of compaction

Эпюра	Фактор времени N	Степень уплотнения $U_{90} = S_t/S_\infty$ при первичной консолидации									
		0,205	0,21	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,95
Прямоугольная	N	0,02	0,08	0,17	0,31	0,49	0,71	1,00	1,40	2,09	2,80
Треугольная	N	0,005	0,02	0,06	0,13	0,24	0,42	0,69	1,08	1,77	2,54

Коэффициент консолидации определяется из выражения

$$C_v = \frac{k_\phi}{m_v \gamma_w}, \quad (3)$$

где k – коэффициент фильтрации, м/сут; m_v – коэффициент относительной сжимаемости, м²/тс, определяется по формуле:

$$m_v = \frac{(1 + e_0)\beta}{E}, \quad (4)$$

где e_0 – коэффициент пористости; β – коэффициент бокового расширения, принимается в зависимости от вида грунта; γ_w – удельный вес воды, равный 10,0 кН/м³; E – модуль деформации грунта, кПа.

При расчетах первичной консолидации грунтового основания СПСУ следует отметить следующие особенности, обусловленные технологией устройства указанных свай. Эта технология включает пробивку скважины, что сопровождается вытеснением грунта и, как след-

ствии, формированием вокруг пробитой скважины уплотненной зоны грунта. По мере завершения формирования скважины в ее забой порциями втрамбовывается щебень проектного объема, в результате чего образуется уширение. Уширение устраивается по технологии фундаментов в вытрамбованных котлованах. Вокруг уширения формируется уплотненная область грунта с развитием вниз на толщину порядка $h_y = 1,2D_y$ (D_y – диаметр уширения).

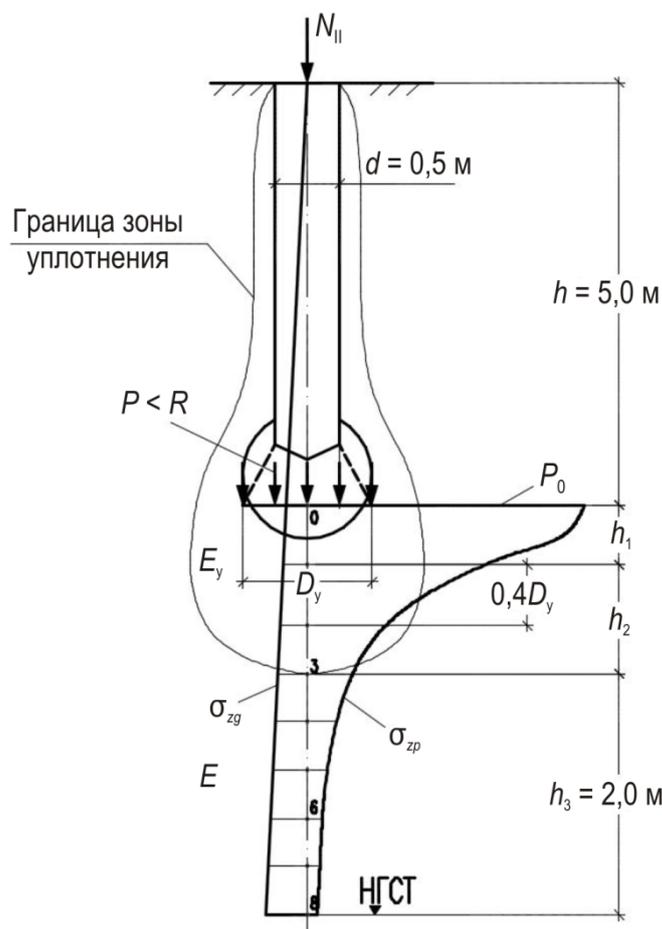


Рис. 2. Схема для расчета осадки СПСУ во времени при давлении
 Fig. 2. A scheme for estimate the pile settlement in time

Под уширением в пределах уплотненной области грунта модуль деформации значительно выше по сравнению с модулем деформации грунта естественного сложения. Его значения принимаются порядка $20,0 \div 25,0 \text{ МПа}$. Однако расчетно-допускаемое давление под уширением, как правило, превышает расчетное сопротивление грунта с учетом характеристик уплотнения $P_{рд} > R_y$ [16]. Следовательно, часть области грунтового основания под уширением работает в условиях деформирования, которое не аппроксимируется линейной зависимостью. В работе С.Г. Кушнера [17] обращено внимание на необходимость учета соответствующего модуля деформации при применении нелинейных моделей грунтового основания. Рекомендуется принимать модуль деформации в первой фазе напряженно-деформируемого состояния (НДС) грунтового основания при $P \approx R_y$ с учетом зависимости $S = f(P)$. Для второй фазы НДС рекомендуется принимать осредненное значение модуля деформации в диапазоне давлений $R_y \leq P \leq P_{рд} = P_u \frac{\gamma_c}{\gamma_n}$. Предельное сопротивление

уплотненного грунтового основания P_u и коэффициенты надежности γ_c и γ_n принимаются согласно СП 22.13330.2016. В ранних совместных работах В.С. Глухова и М.В. Панкиной [16, 18] предлагается расчет осадки СПСУ выполнять с использованием комбинированной расчетной схемы грунтового основания в виде линейно деформируемого полупространства и в нелинейной постановке, в целом определяя конечную осадку методом послойного суммирования. Расчетная схема определения осадки во времени показана на рис. 1.

Результаты

Предлагаемый автором алгоритм расчета осадки во времени с учетом первичной консолидации апробирован на примере суглинка с показателем текучести $I_L = 0,4$ для двух случаев: при давлениях под уширением на уплотненный слой грунта $P_1 = 1000$ кПа и $P_2 = 2000$ кПа. В обоих случаях для слоев суглинка под подошвой уширения приняты нижеприведенные характеристики.

Слой «1» – с учетом пластических деформаций в пределах слоя толщиной $h_1 = 0,4$ м: коэффициент пористости $e_0 = 0,7$; коэффициент фильтрации $k_{\phi} = 0,6 \cdot 10^{-5}$ м/сут; модуль деформации с учетом нелинейности $E_n = 30000$ кПа; коэффициент бокового расширения для глины $\beta = 0,62$.

Коэффициент относительной сжимаемости m_v , м²/кН, определяется по формуле (4):

$$m_v = \frac{(1+0,7) \cdot 0,62}{30000} = 0,000035.$$

Коэффициент консолидации C_{v1} , м²/сут, определен по формуле (3):

$$C_{v1} = \frac{0,00006}{0,000035 \cdot 10,0} = 0,170.$$

Слой «2» – уплотненный линейно-деформируемый суглинок с толщиной слоя $h_2 = 0,8$ м: коэффициент пористости $e_0 = 0,6$; коэффициент фильтрации $k_{\phi} = 0,6 \cdot 10^{-5}$ м/сут; модуль деформации $E_y = 20000$ кПа; коэффициент бокового расширения $\beta = 0,5$; коэффициент сжимаемости $m_v = \frac{(1+0,6) \cdot 0,5}{20000} = 0,00004$ м²/кН; коэффициент консолидации

$$C_{v2} = \frac{0,00006}{0,00004 \cdot 10,0} = 0,15 \text{ м}^2/\text{сут}.$$

Слой «3» – природного сложения толщиной $h_3 = 2,0$ м в пределах точек 3÷8 (см. рис. 1), характеристики: $e_0 = 0,72$; $k_{\phi} = 1,5 \cdot 10^{-5}$ м/сут; $E = 10000$ кПа; $h_3 = 2,0$ м; $\beta = 0,4$;

$$m_v = \frac{(1+0,72) \cdot 0,4}{10000} = 0,000070 \text{ м}^2/\text{кН}; C_{v3} = \frac{0,00015}{0,000070 \cdot 10,0} = 0,21 \text{ м}^2/\text{сут}.$$

При сложном напластовании грунтов осадку во времени необходимо определять с учетом средневзвешенных характеристик слоев грунта в пределах сжимаемой толщи. Средневзвешенное значение коэффициента консолидации C_v с учетом толщины уплотненных слоев $h_1 = 0,4$ и $h_2 = 0,8$ м и слоя грунта естественного сложения $h_3 = 2,0$ м находим из выражения:

$$C_v = \frac{C_{v1}h_1 + C_{v2}h_2 + C_{v3}h_3}{h_1 + h_2 + h_3} = \frac{0,17 \cdot 0,4 + 0,15 \cdot 0,8 + 0,21 \cdot 2,0}{0,4 + 0,8 + 2,0} = 0,18. \quad (5)$$

Определено время осадки сваи t_i для различных стадий ее работы с учетом процесса фильтрационной консолидации по формуле (2), принимая значения фактора времени N по табл. 1 для случая, когда сжимающие напряжения уменьшаются с глубиной по закону треугольника [12]. Такое распределение напряжений соответствует характеру эпюры дополнительных напряжений при расчете осадки по схеме линейно-деформируемого полупространства.

К примеру, при степени консолидации $U_1 = 0,205$ и фактора времени согласно табл. 1 $N = 0,005$ время консолидации составляет 0,12 сут:

$$t_1 = \frac{4N \cdot 3,2^2}{3,14^2 \cdot 0,18} = 32,3N = 0,12.$$

Осадка во времени для каждой степени уплотнения определяется по формуле

$$S_i = SU_0, \tag{6}$$

где S – расчетная конечная осадка, равная 100,0 мм при давлении $P_2 = 2000,0$ кПа.

Во втором случае при давлении $P_2 = 2000,0$ кПа для слоя «3» толщина $h_3 = 1,2$ м. Расчетная конечная осадка $S = 40,0$ мм. В табл. 2 приведены результаты расчета осадки во времени с учетом фильтрационной консолидации.

Таблица 2

Осадка во времени с учетом фильтрационной консолидации

Table 2

The settlement in time with filtration consolidation

Давление P , кПа	Степень уплотнения U_i									
	0,205	0,21	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,95
Время уплотнения t , сут										
1 000	0,07	0,28	0,84	1,83	3,36	5,90	9,69	15,16	24,86	35,65
2 000	0,16	0,65	1,94	4,20	7,75	13,57	22,29	34,88	57,17	82,00
Осадка во времени S_i , мм										
1 000	8,2	8,4	120,	16,0	20,0	24,0	28,0	32,0	36,0	38,0
2 000	20,5	21,0	30,0	40,0	50,0	60,0	70,0	80,0	90,0	95,0

Для различных значений степени консолидации U можно построить графики осадок во времени. Уместно отметить, что при $U = 1,0$ решение не имеет смысла, так как $N = \infty$. Поэтому принято ограничиваться значением $U = 0,95$. На рис. 3 показаны зависимости изменения осадки во времени $S = f(t)$ для двух вышеуказанных характерных случаев, которые отличаются величиной давления под уширением.

Обсуждение

Как вытекает из алгоритма определения осадки СПСУ во времени, определяющими параметрами, оказывающими наиболее заметное влияние на характер зависимости $S = f(t)$, следует считать давление P под уширением, модули деформации E_y уплотненного слоя и E слоя грунта естественного сложения, а также коэффициенты фильтрации слоев грунта в активной зоне сжатия. Поэтому при расчете осадок СПСУ необходимо проанализировать возможное изменение напряжено-деформируемого состояния основания во времени для всех этапов консолидации. Это позволит исключить возникновение аварийной ситуации вследствие неравномерных осадок свай, особенностью которых является значительная несущая способность и

большие давления под подошвой уширения порядка 1000÷3000 кПа. Из рис. 3 следует, что стабилизация деформаций грунтового основания СПСУ при давлении $P_2 = 2000$ кПа происходит в относительно короткий период времени порядка 80 сут, что на практике должно соответствовать периоду возведения строительных конструкций надземной части здания. Указанный небольшой срок стабилизации осадок при значительных давлениях P обусловлен малой толщиной активной зоны сжатия основания. Тем не менее расчет осадки СПСУ во времени позволяет регулировать сроки проведения строительных мероприятий с учетом условий обеспечения относительно равномерных осадок всех участков здания.

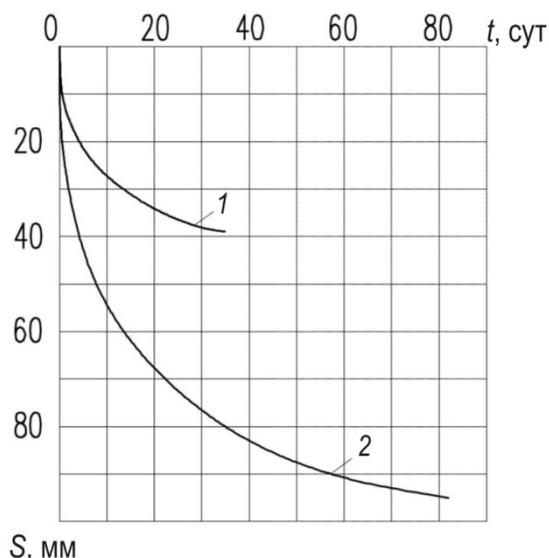


Рис. 3. Зависимость осадки S (мм) от времени t (сут) с учетом первичной консолидации при давлении под уширением свай: 1 – $P = 1000$ кПа; 2 – $P = 2000$ кПа
Fig. 3. The settlement S (mm) dependence on time t (day) taking into account primary consolidation at pressure under the pile broadening: 1 – $P = 1000$ kPa; 2 – $P = 2000$ kPa

Выводы

Рассмотренное выше решение по определению осадки СПСУ во времени основано на предпосылках теории консолидации К. Терцаги – Н.М. Герсеванова, чего вполне достаточно для решения практических инженерных задач. Однако на развитие осадок во времени оказывает влияние также ряд других факторов, в том числе ползучесть скелета грунта. Указанное влияние тем существеннее, чем больше давление на грунт. Поскольку для СПСУ весьма характерны значительные давления под подошвой уширения, поэтому продолжение разработки методики расчета осадки рассматриваемых свай с учетом вторичной консолидации является весьма актуальной задачей.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Вклад автора 100 %.

Библиографический список

1. Прогноз скорости осадок оснований сооружений / под ред. Н.А. Цытовича. – М.: Стройиздат, 1967. – 239 с.

2. Ukhov, S.B. Prediction of consolidation-induced settlement of a dual-layer bed subject to increasing surface load over time / S.B. Ukhov, V.I. Sheinin // *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. – 2004. – Vol. 41, no. 3. – P. 73–77. DOI: 10.1023/B:SMAF.0000040183.49958.6f
3. Тер-Мартirosян, З.Г. Осадка и длительная несущая способность свай с учетом реологических свойств грунтов / З.Г. Тер-Мартirosян, А.З. Тер-Мартirosян, Л.Ю. Ермошина // *Construction and Geotechnics*. – 2022. – Т. 13, № 1. – С. 5–15. DOI: 10.15593/2224-9826/2022.1.01.
4. Бартоломей, А.А. Прогноз осадок свайных фундаментов / А.А. Бартоломей, И.М. Омельчак, Б.С. Юшков. – М.: Стройиздат, 1994. – 384 с.
5. Зарецкий, Ю.К. Теория консолидации грунтов / Ю.К. Зарецкий. – М.: Наука, 1967. – 268 с.
6. Тер-Мартirosян, З.Г. Взаимодействие барреты с многослойным окружающим и подстилающим грунтами с учетом их упругих и упруго-вязкопластических свойств / З.Г. Тер-Мартirosян, А.З. Тер-Мартirosян, Х.Х. Дам // *Вестник МГСУ*. – 2022. – Т. 17, № 9. – С. 1135–1144. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.9.1135-1144
7. Пономарев, А.Б. К вопросу прогноза осадки свай на аргиллитоподобной глине численными и аналитическими методами / А.Б. Пономарев, Е.Н. Сычкина, Н.Л. Волгарева // *Вестник МГСУ*. – 2016. – № 6. – С. 34–45.
8. A nonlinear approach for time-dependend settlement analysis of a single pile and pile groups / S. Feng, X. Li, F. Jiang, L. Lei, Z. Chen // *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. – 2017. – Vol. 54, is. 1. – P. 7–16. DOI: 10.1007/s11204-017-9426-8
9. Kuwabara, F. Settlement behaviour of non-linear soil around single piles subjected to vertical loads / F. Kuwabara // *Soils and Foundations*. – 1991. – Vol. 31, iss. 1. – P. 39–46. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2002)128:1(76)
10. Zotsenko, N.L. Long-term settlement of buildings erected on driven cast-in-situ piles in loess soil / N.L. Zotsenko, Yu.L. Vinnikov // *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. – 2016. – Vol. 53, no. 3. – P. 189–195. DOI :10.1007/s11204-016-9384-6
11. Bezvolev, S.G. Actualized procedure for the engineering analysis of primary and secondary consolidations of water-saturated soils / S.G. Bezvolev // *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. – 2018. – Vol. 55, no. 1. – P. 1–8. DOI: 10.1007/s11204-018-9494-4
12. Лапшин, Ф.К. Расчет свай по предельным состояниям / Ф.К. Лапшин. – Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1979. – 152 с.
13. Experimental study on the influence of granulometric and material compositions on soil rheological properties / J. Yuan, L. Ye, G. Hu, F. Ying-Guang // *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. – 2020. – Vol. 57, no. 1. – P. 35–42. DOI: 10.1007/s11204-020-09634-7
14. Taylor, D.W. Research on consolidation of clays / D.W. Taylor. – Massachusetts Institute of Technology, 1942. – 147 p.
15. Casagrande, A. Notes on soil testing for engineering purposes / A. Casagrande, R.E. Fadum. – Harvard Soil Mechanical Services, 1940. – 74 p.
16. Glukhov, V.S. Calculation of widened pile settlement with regard to nonlinearity / V.S. Glukhov, M.V. Glukhova // *Journal of Physics: Conference Series* : 2, Perm, 26–28 May. – Perm, 2021. – P. 012056. DOI: 10.1088/1742-6596/1928/1/012056
17. Кушнер, С.Г. Расчет деформаций оснований зданий и сооружений / С.Г. Кушнер. – Запорожье, 2008. – 496 с.
18. Глухов, В.С. Нелинейные деформации уплотненного грунтового основания под уширением свай в пробитых скважинах / В.С. Глухов, М.В. Панкина // *Construction and Geotechnics*. – 2023. – Т. 14, № 1. – С. 19–28. DOI: 10.15593/2224-9826/2023.1.02

References

1. Rate forecast of the foundations settlement. Eds. N.A. Tsytovich. Moscow, Stroyizdat, 1967, 239 p.
2. Ukhov S. B., Sheinin V.I. Prediction of consolidation-induced settlement of a dual-layer bed subject to increasing surface load over time. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2004, vol. 41, no. 3, pp. 73-77. DOI :10.1023/B:SMAF.0000040183.49958.6f.
3. Ter-Martirosyan Z.G., Ter-Martirosyan A.Z., Ermoshina L.Yu. Settlement and long-term bearing capacity of the pile taking into account the rheological properties of soils. *Construction and Geotechnics*, 2022, vol. 13, iss. 1, pp. 5-15. DOI: 10.15593/2224-9826/2022.1.01.
4. Bartolomey A.A., Omelchak I.M., Yushkov B.S. Forecast settlement pile foundations. Moscow, Strojizdat, 1994, 384 p.
5. Zaretskyi Yu.K. The soil consolidation theory. Moscow, Nauka, 1967, 268 p.
6. Ter-Martirosyan Z.G., Ter-Martirosyan A.Z., Dam H.H. Interaction between a barrette and multilayered surrounding and underlying soils, taking into account their elastic and elastic-viscoplastic properties. *Bulletin of MSCU*, 2022, vol. 17, no. 9, pp. 1135-1144. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.9.1135-1144.
7. Ponomarev A.B., Sychkina E.N., Volgareva N.L. Forecasting pile settlement on claystone using numerical and analytical methods. *Bulletin of MSCU*, 2016, no. 6, pp. C. 34-45.
8. Feng S., Li X., Jiang F., Lei L., Chen Z. A nonlinear approach for time-depended settlement analysis of a single pile and pile groups. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2017, vol. 54, iss. 1, pp. 7-16. DOI :10.1007/s11204-017-9426-8.
9. Kuwabara F. Settlement behaviour of non-linear soil around single piles subjected to vertical loads. *Soils and Foundations*, 1991, vol. 31, iss. 1, pp. 39-46. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2002)128:1(76).
10. Zotsenko N. L., Vinnikov Yu.L. Long-term settlement of buildings erected on driven cast-in-situ piles in loess soil. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2016, vol. 53, no. 3, pp. 189-195. DOI: 10.1007/s611204-016-9384-6.
11. Bezvoley S.G. Actualized procedure for the engineering analysis of primary and secondary consolidations of water-saturated soils. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2018, vol. 55, no. 1, pp. 1-8. DOI: 10.1007/s11204-018-9494-4.
12. Lapshin F.K. Piles calculation by limit states. Saratov, Saratov University Press, 1979, 152 p.
13. Yuan J., Ye L., Hu G., Ying-Guang F. Experimental study on the influence of granulometric and material compositions on soil rheological properties. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2020, vol. 57, no. 1, pp. 35-42. DOI :10.1007/s11204-020-09634-7.
14. Taylor D. W. Research on consolidation of clays. Massachusetts Institute of Technology, 1942, 147 p.
15. Casagrande A., Fadum R.E. Notes on soil testing for engineering purposes. Harvard Soil Mechanical Services, 1940, 74 p.
16. Glukhov V.S., Glukhova M.V. Calculation of widened pile settlement with regard to nonlinearity. *Journal of Physics: Conference Series*, 26–28 May, Perm, 2021, pp. 012056. DOI: 10.1088/1742-6596/1928/1/012056.
17. Kushner S.G. Base foundation deformations calculation. Zaporizhia, 2008, 496 p.
18. Glukhov V.S., Pankina M.V. Nonlinear deformations of the compacted soil base under the broadening of piles in punched holes. *Construction and Geotechnics*, 2023, vol. 14, iss. 1, pp. 19-28. DOI: 10.15593/2224-9826/2023.1.02.