

Основания и фундаменты, подземные сооружения

УДК 624.131

DOI: 10.14529/build180406

ТЕОРИЯ НЕЛИНЕЙНОЙ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИВЯЗКОЖЕСТКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРЕДЕЛЬНО-НАПРЯЖЕННЫХ ГРУНТОВ В ОСНОВАНИЯХ НАГРУЖАЕМЫХ ОДИНОЧНЫХ СВАЙ: МЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Л.М. Борозенец

Тольяттинский государственный университет, г. Тольятти, Россия

Исследования проведены в соответствии с известной необходимостью создания единой теории нелинейного упругопластическивязкожесткого деформирования предельно-напряженных зернистых грунтов в основаниях нагружаемых одиночных свай. Продолжение материала следует во второй статье «Теория нелинейной упругопластическивязкожесткой деформации предельно-напряженных грунтов в основаниях нагружаемых одиночных свай: математическая модель». В этой статье определены основные положения модели теории нелинейного деформирования предельно-напряженных грунтов. Изучены отличительные особенности зернистых сред в роли моделей механического поведения пылевато-глинистых и песчаных грунтов под нагрузкой. Показаны подходы к моделированию зернистых сред пылевато-глинистых и песчаных грунтов. Представлено научное обоснование форм грунтовых уплотненных ядер в основаниях штампа и нижних концов исследуемых одиночных свай. Сделаны обобщенные выводы по сущности содержания положений разработанной теории.

Ключевые слова: теория, напряжение, деформация, взаимодействие, упругопластическивязкожесткость, процесс, свая, грунт, основание, сдвиг, равновесие, устойчивость, осадка.

Введение

Решаемая проблема базируется на известных положениях теории напряжения нелинейного упругопластическивязкого взаимодействия нагружаемой одиночной сваи с грунтами основания [1] и в продолжение дополнительно разработанных: основных положений модели теории нелинейного деформирования предельно-напряженных зернистых пылевато-глинистых и песчаных грунтов; отличительных особенностей зернистой среды в роли модели механического поведения указанных грунтов под нагрузкой; подходов к моделированию зернистых сред пылевато-глинистых и песчаных грунтов; представлении уплотнённого ядра грунта в форме кругового конуса в основании нижнего конца взрывофугасной набивной сваи.

Теория развития нелинейной деформации в механических процессах взаимодействия нагружаемых одиночных свай с грунтами основания включает рассмотрение: генерации круговым конусом предельных зональных давлений в грунтах основания на боковую поверхность ствола взрывофугасной набивной сваи [2].

1. Основные положения модели теории нелинейного деформирования предельно-напряженных грунтов

При разработке модели теории грунта и соответствующих ей уравнений состояния учитывалось то, что они должны отображать адекватно все процессы, протекающие в основании фундамента при его нагрузке по достоверным данным экспериментальных исследований.

Для решения общей задачи механики нескальных грунтов, заключающейся в расчётах предельного напряжённо-деформированного состояния грунтов, взаимодействующих с фундаментами, оценки их прочности и устойчивости использована модель «зернистой среды», которая учитывает основные особенности нелинейного напряжения и деформирования, и предложенный аппарат анализа, который позволяет прогнозировать происходящие в грунтах основания процессы.

В качестве метода решения общей задачи механики вытеснения зернистых грунтов разработано решение предельных задач или совместное решение уравнений равновесия, геометрических соотношений и получаемых из них физических уравнений или уравнений состояния при определении начальных, промежуточных и конечных

упругопластическивязкожестких предельных напряжений и деформаций.

Установлено, что напряжения и деформации в массиве грунта существуют от действия внешних нагрузок, с одной стороны, и внутренних сил: упругости структуры скелета сухого грунта σ_d , сил сцепления c и генерируемых ими сил связности физической и физико-химической природы [3, 4] с другой стороны. Сделан вывод о том, что разрушение структуры и сдвиг грунта происходит при действии предельного сдвигающего касательного напряжения τ_i , равного по величине предельному сжимающему нормальному давлению σ_i , генерируемого связностью как суммарной силой всех возможных видов взаимодействия физической и физико-химической природы и сцепляемости сдвигаемого грунта, где i – номер состояния предельного равновесия сдвигаемого грунта.

2. Отличительные особенности зернистых сред в роли моделей механического поведения пылевато-глинистых и песчаных грунтов под нагрузкой

Принимается, что массивы пылевато-глинистых и песчаных грунтов строительных площадок, служащие основаниями для одиночных свай, являются зернистыми средами четвертичных отложений. В качестве моделей механического поведения грунтов под нагрузкой определены следующие:

– «дисперсные среды» в зернистых грунтах оснований нагружаемых одиночных свай – глин и суглинков, состоящих в основном из малоразмерных зернистых частиц глинистых минералов – «дисперсий»;

– «дисперсно-дискретные среды» в зернистых грунтах оснований нагружаемых одиночных свай – суглинопесей, супесей, супылепесей, состоящих из комплекса дисперсий с включением относительно крупноразмерных зернистых минеральных песчаных частиц «дискреций»;

– «дискретные среды» в зернистых грунтах оснований нагружаемых одиночных свай – песков, состоящих в основном из относительно крупноразмерных зернистых минеральных песчаных частиц – дискреций.

Зернистые среды считаются однородными. В них одновременно совершается нелинейное упругое, пластическое, вязкое и жесткое деформирование напряжённого грунта. Элементарные виды деформаций: упругие, пластические, вязкие и жесткие выявлены по результатам экспериментального исследования сжимаемости однородного супесчанистого основания штампа в натуральных полевых условиях [5].

Остаточные значения генерируемых сил связности покоя в пластических контактах σ_{lim} , равные силам фрикционности сдвига или трения τ_{lim} , составляют условие состояния предельного равновесия

$$\sigma_{lim} = \tau_{lim} \quad (1)$$

характеризуемого углом внутреннего трения грунта φ . Передача усилий в зернистых средах происходит через связи, упругие и пластические контакты и носит закономерный характер. Достижение максимального сопротивления сред внешнему воздействию соответствует порогу предельного равновесия.

По причине зернистого строения среды действительный характер ее нелинейного деформирования происходит по фазам *A*, *B* и *B*, установленным по результатам расчётного исследования зернистого грунта – супеси. Первая фаза *A* – фаза нелинейного уплотнения грунта активным давлением грунтов пластического состояния на нагружаемую сваю. Вторая фаза *B* определена как фаза нелинейного допредельного разуплотнения грунта. Третья фаза *B* названа фазой линейного запредельного разуплотнения грунта. Фазы *B* и *B* – фазы разуплотнения пассивным давлением нагружаемой сваи на грунты пластического состояния с генерацией постоянного окончательного давления обжатия ствола сваи.

В зернистой среде под плоской подошвой нагружаемого квадратного штампа формируется уплотнённое ядро напряженно-деформированного состояния грунта в виде пирамидального тангенсоида, одновременно с этим в среде основания под уплотнённым ядром формируется ограниченное полупространство напряженно-деформированного состояния; под плоскими подошвами нагружаемых круглого штампа и нижнего конца буровой сваи образуются уплотненные ядра из грунта в виде тангенсоидов вращения; под нижними концами набивной сваи – уплотненное ядро грунта в виде кругового конуса. При этом значения напряжений по границам состояний предельных равновесий как в объёме уплотнённого ядра, так и в объёме ограниченного полупространства основания являются равнозначными.

Для зернистой среды как модели механического поведения нескальных грунтов под нагрузкой будет свойственна их особенность постоянства значений эталонных коэффициентов пропорциональности для модулей нелинейных деформаций, полученных на основании теоретических и экспериментальных исследований нелинейной общей, упругой, пластической, вязкой и жесткой деформаций для различных видов указанных грунтов, имеющих исходный модуль общей деформации.

Разработаны модели упругой, пластической, вязкой и жесткой зернистых сред. Свойство упругости зернистых сред формирует силу упругого сопротивления структуры грунта σ_d . Основными уравнениями, описывающими упругую зернистую среду, служат равенства:

$$\sigma_e = E_e \varepsilon_e \quad (2)$$

$$\varepsilon_e = S_e / \Delta h \quad (3)$$

где E_e – нелинейный модуль упругой деформации грунта; ε_e – относительная упругая сжимаемость слоя грунта; S_e – значение упругого сжатия слоя грунта; Δh – мощность слоя сжимаемого грунта.

Свойство пластичности зернистых сред создаёт силу пластического сопротивления связности физико-химической природы в контактах пластического состояния материалов сжимаемых и сдвигаемых минеральных частиц грунта. Уравнениями, описывающими пластическую зернистую среду, являются:

$$\text{– для дисперсной зернистой среды} \\ \tau_\gamma = \sigma_d \operatorname{tg} \varphi = \sigma_\gamma; \quad (4)$$

– для дисперсно-дискретной и дискретной сред

$$\tau_\gamma = \sigma_d \operatorname{tg}^n \varphi = \sigma_\gamma, \quad (5)$$

$$\sigma_\gamma = E_\gamma \varepsilon_\gamma, \quad (6)$$

$$\varepsilon_\gamma = S_\gamma / \Delta h, \quad (7)$$

где E_γ – нелинейный модуль пластической деформации грунта; ε_γ – относительная пластическая сжимаемость слоя грунта; S_γ – значение пластического сжатия слоя грунта; n – показатель степени жесткого сопротивления зацепления.

Свойство вязкости зернистых сред обеспечивает силу вязкого сопротивления удельного сцепления физико-химической природы в контактах пластического состояния материалов сжимаемых и сдвигаемых минеральных песчаных частиц в минералогических составах грунтов. Равенствами, описывающими вязкую зернистую среду, служат:

$$\text{– для дисперсной зернистой среды} \\ \tau_c = c \operatorname{tg} \varphi = \sigma_c, \quad (8)$$

– для дисперсно-дискретной и дискретной сред

$$\tau_c = c \operatorname{tg}^n \varphi = \sigma_c, \quad (9)$$

$$\sigma_c = E_c \varepsilon_c, \quad (10)$$

$$\varepsilon_c = S_c / \Delta h, \quad (11)$$

где E_c – нелинейный модуль вязкой деформации грунта; ε_c – относительная сжимаемость слоя грунта; S_c – величина вязкого сжатия слоя грунта.

Свойство жесткости зернистых сред определяет силу сопротивления зацепления в контактах материалов сжимаемых и сдвигаемых минеральных песчаных частиц в минералогических составах грунтов. Уравнениями, описывающими жесткие дисперсно-дискретную и дискретную зернистые среды, являются:

$$\tau_q = (\sigma_d + c) \operatorname{tg}^n \varphi = \sigma_q, \quad (12)$$

$$\sigma_q = E_q \varepsilon_q, \quad (13)$$

$$\varepsilon_q = S_q / \Delta h, \quad (14)$$

где E_q – нелинейный модуль жесткой деформации грунта; ε_q – относительная жесткая сжимаемость слоя грунта; S_q – величина жесткого сжатия слоя грунта.

В грунтах с упругими, пластическими, вязкими и жесткими свойствами соблюдается нелинейная зависимость между напряжениями и деформациями, поэтому данные модели называются «моделями нелинейно-деформируемых упругой, пластической, вязкой и жесткой зернистых сред».

3. Экспериментально-теоретическое обоснование форм грунтовых уплотненных ядер в основаниях штампа и нижнего конца взрывофугасной набивной сваи

Механика силового вдавливающего вытеснения грунтов широко экспериментально и теоретически исследовалась многими специалистами при установлении критических нагрузок по условию обеспечения общей устойчивости оснований для строений [6, 7]. В результате исследований было обнаружено явление формирования упругого ядра под подошвой штампа из уплотняемого и присоединяемого грунта.

3.1. Уплотненное ядро грунта в форме пирамидального тангенсоида в основании квадратного штампа с плоской подошвой

С помощью экранов С.Е. Кагановская [8] экспериментально определила размеры и форму упругого и уплотненного ядер, возникающих в основании из связного грунта глины при действии на жесткий шероховатый штамп центральной вертикальной нагрузки. Автором установлена последовательность развития деформаций и влияние степени их развития на достижение основанием предельного по устойчивости состояния. Формирование уплотненного ядра в целом завершается при достижении нагрузкой значения, близкого к критическому при резком возрастании интенсивности осадки штампа. При этом уплотненное ядро в глине получается высотой $h = (0,9 \dots 1,0) b$ (рис. 1).

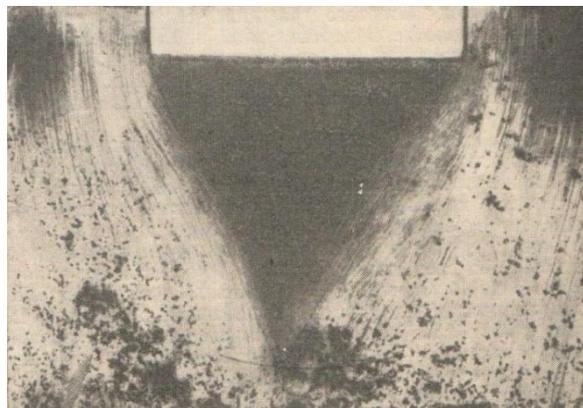


Рис. 1. Вид уплотненного ядра грунта при критической нагрузке по устойчивости основания

Основания и фундаменты, подземные сооружения

По значениям углов внутреннего трения грунта φ_i , приведенным в таблице, на рис. 2 графически выстраивается расчетная форма уплотненного ядра грунта в виде пирамидального тангенсоида под квадратной плоской подошвой штампа в супеси по исследованию [5].

Сравнение расчетной формы уплотненного ядра грунта в супеси на рис. 3 с видом уплотненного ядра в глине на рис. 2 показывает их абсолютное сходство.

Анализ картин, полученных С.Е. Кагановской для глины в разные моменты деформации, позволил теоретически уточнить последовательность процессов развития, вид и характер зон состояний предельных равновесий в пяти объемах упругих и уплотненных ядер при достижении основанием предельного по устойчивости состояния грунта, что изображено на рис. 3.

Напряженное состояние предельного равновесия по боковой поверхности каждого уплотненного ядра оценивается уравнениями общего вида

в следующем символическом выражении для глин и суглинков при $n = 1$; суглинопесей при $n = 1...1,3$; супесей при $n = 1,13...1,50$; супылепесей при $n = 1,38...1,53$; песков при $n = 1,53...2,00$:

$$\sigma_1 = \tau_1 = (\sigma_d + c)(\cos \varphi + \sin \varphi) \operatorname{tg}^n \varphi_1,$$

$$\sigma_5 = \tau_5 = (\sigma_d + c)(\cos \varphi + \sin \varphi) \operatorname{tg}^n \varphi_5.$$

Формы уплотненных ядер грунтов для плоских круглой формы штампов и для плоских нижних концов буровых свай установлены соответственно в виде тангенсоидов вращения.

3.2. Уплотненное ядро грунта в форме кругового конуса в основании нижнего конца взрывофугасной набивной сваи

Взрывофугасная набивная свая рассматривается составной с присоединенным несущим круговым конусом в забое скважины. Анализ распределения напряжений под выпуклой подошвой фундамента показал, что уплотненное ядро грунта

Значения углов и коэффициентов внутреннего трения грунта

Углы	Формулы расчета	Углы φ_i , град.	Коэффициенты $\operatorname{tg}^{1,1} \varphi_i$	Сумма коэффициентов $\Sigma \operatorname{tg}^{1,1} \varphi_i$
φ_1	5,7	24,0	0,517	0,517
φ_2	5,8	34,5	0,833	1,350
φ_3	5,9	45,0	1,00	2,350
φ_4	5,10	55,5	1,511	3,867
φ_5	5,11	66,0	2,435	6,296

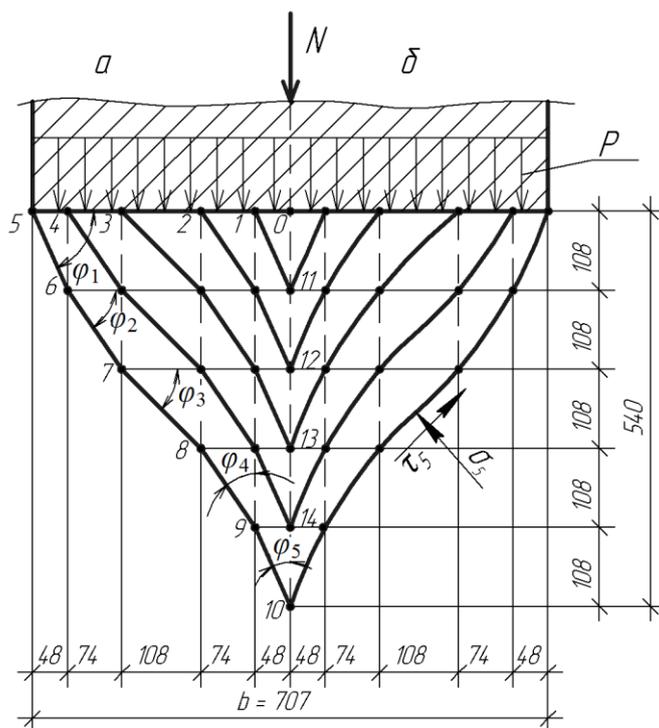


Рис. 2. Расчетная форма уплотненного ядра грунта в виде пирамидального тангенсоида под квадратной подошвой штампа в супесчаном основании:
а – ломанная образующая боковой поверхности уплотненного ядра;
б – криволинейная тангенсоида образующей уплотненного ядра

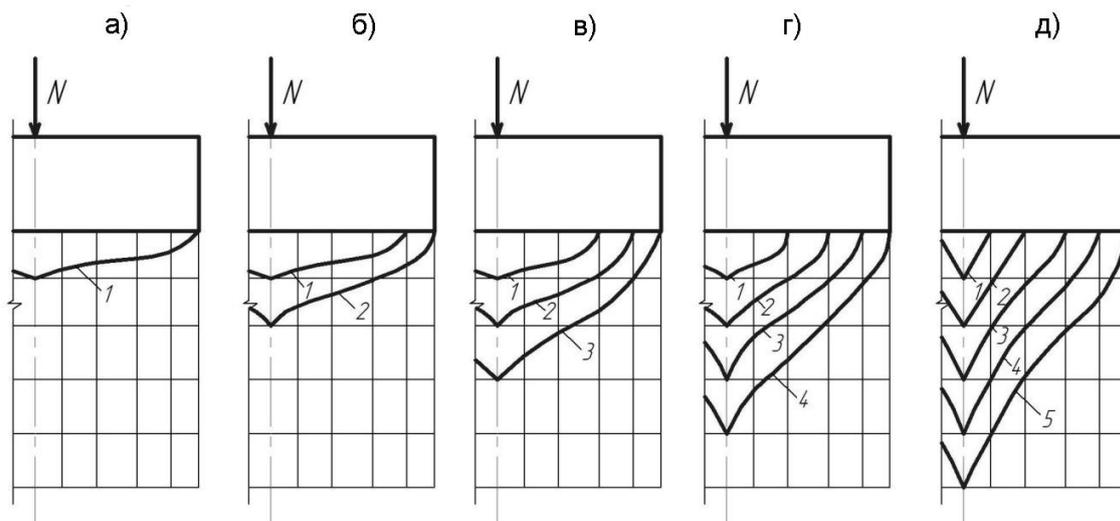


Рис. 3. Последовательность развития, вид и характер изменения зон состояний предельных равновесий грунта в объемах пяти упруго и пластическивязко уплотненных ядер

формируется в виде кругового конуса с образованием зон пяти состояний предельных равновесий грунтов. Угол при вершине конуса получается равным значению двух углов внутреннего трения грунта $\alpha = 2\varphi$. Расчетная схема форм зон пяти состояний предельных равновесий уплотненного ядра грунта в виде кругового конуса под выпуклым забоем взрывофугасной скважины показана на рис. 4.

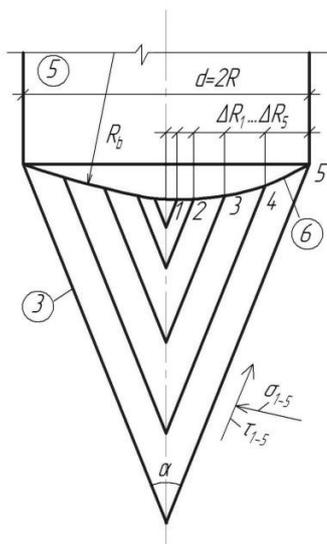


Рис. 4. Расчетная схема форм зон состояний предельных равновесий 1...5 в разрезе кругового конуса:

- ⑤ – круговой конус; ⑤ – скважина;
- ⑥ – выпуклый забой скважины

Круговой конус 3 формируется вначале процесса взрывофугасного грунтовытеснения скважины, затем в пооперационно последующем грунтовытеснении скважины круговой конус вытесняет грунт в глубину, распирает в стороны и выпирает его вверх до сопряжения с огибающей зоной уп-

лотнения, полученной от предыдущего грунтовытесняющего воздействия. В результате, образуются напряженно-деформированные зоны пяти состояний предельных равновесий 1...5 взрывофугасно-грунтоуплотненного основания вокруг взрывофугасно-грунтовытесненной скважины и кругового конуса в забое скважины. Этим выделена важность работы механизма кругового конуса в основаниях взрывофугасных набивных свай.

Выводы

1. Впервые создана новационная фундаментальная механическая модель теории нелинейного упругопластическивязкожесткого деформирования предельно-напряженных зернистых пылевато-глинистых и песчаных грунтов в основаниях нагружаемых одиночных свай.
2. Показаны отличительные особенности зернистых сред в роли моделей механического поведения пылевато-глинистых и песчаных грунтов под нагрузкой.
3. Определены подходы к моделированию механического поведения дисперсных, дисперсно-дискретных и дискретных сред зернистых пылевато-глинистых и песчаных грунтов зон пяти состояний предельных равновесий оснований нагружаемых одиночных свай.
4. Проведено экспериментально-теоретическое обоснование форм уплотненных ядер в основаниях штампа с плоской подошвой в виде пирамидального тангенсоида и выпуклого торца нижнего конца одиночной взрывофугасной набивной сваи в виде кругового конуса.

Литература

1. Борозенец, Л.М. Теория напряжения нелинейного упругопластическивязкого взаимодействия нагружаемой одиночной сваи с грунтами ос-

Основания и фундаменты, подземные сооружения

нования / Л.М. Борозенец // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2017. – Т. 7, № 3. – С. 27–34.

2. Борозенец, Л.М. Геотехника фундаментостроения и грунтоустойчивости: моногр. / Л.М. Борозенец. – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2015. – 588 с.

3. Ребиндер, П.А. Физико-химическая механика / П.А. Ребиндер. – М.: Знание, 1958. – 64 с.

4. Грунтоведение / под ред. акад. Е.М. Сергеева. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: МГУ, 1983. – 392 с.

5. Клейн, Г.К. Основания и фундаменты / Г.К. Клейн, Н.М. Дорошкевич, П.П. Смиренин. – М.: Высш. Шк., 1967. – 264 с.

6. Курдюмов, В.И. К вопросу о сопротивлении естественных оснований / В.И. Курдюмов // Вторая публичная лекция. – СПб.: Тип. Эрлих, 1891. – С. 31–35.

7. Дубов, К.А. Форма уплотненного ядра, образующегося в глинистом основании под жестким фундаментом при критической нагрузке / К.А. Дубов // Сб. «Основания, фундаменты и подземные сооружения», № 63. Тр. НИИОСП им. Н.М. Герсеванова. – М.: Стройиздат, 1972.

8. Кагановская, С.Е. Исследование устойчивости глинистого основания с помощью экранов / С.Е. Кагановская // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1973. – № 3. – М.: Стройиздат. – С. 29–31.

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

Поступила в редакцию 14 июня 2018 г.

DOI: 10.14529/build180406

THE THEORY OF NONLINEAR ELASTIC-PLASTIC-VISCOUS-RIGID DEFORMATION OF EXTREMELY-STRESSED SOIL IN FEET OF LOADED SINGLE PILES: MECHANICAL MODEL

L.M. Borozenets, tsp@tltsu.ru

Togliatti State University, Togliatti, Russian Federation

Research was carried out in accordance with the well-known necessity to elaborate a unified theory of nonlinear elastic-plastic-viscous-rigid deformation of extremely stressed granular soil in foundations of loaded single piles. Main provisions of the model of the theory of nonlinear deformation of extremely-stressed soils were determined. Distinctive features of granular media in the role of models of mechanical behavior of silt-loam soils and sandy soils under load were studied. The conducted differential analysis of deformation experimentally studied the base of a stamp; as a result, a methodology was developed: construction of separate calculation graphs of elastic, plastic, viscous and rigid soil deformations; the theory of nonlinear general, elastic, plastic, viscous and rigid soil deformations; reference step coefficients of proportionality of the modulus of nonlinear general, elastic, plastic, viscous and rigid soil deformations; approaches to modeling a granular media of silt-loam soils and sandy soils. A scientific justification of the forms of compacted soil plugs at foundations of stamps and in lower ends of single piles under research was presented. A theory of geometric parameters and their correlations with the stress-strain state of soil was developed. Generalized conclusions regarding the essence of the content of provisions of the developed theory were made.

Keywords: theory, stress, deformation, interaction, elastic-plastic-viscous rigidity, process, pile, soil, foundation, shear, balance, stability, settlement.

References

1. Borozenets L.M. Stress Theory of Nonlinear Elastic Plastic Viscous Interaction of the Loaded Single Pile with Base Soil. *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
2. Borozenets L.M. *Geotekhnika fundamentostroeniya i gruntoustoychivosti: Monografiya* [Geotechnics of Foundation Engineering and Soil Stability: Monograph]. Tol'yatti, TGU Publ., 2015. 588 p.
3. Rebinder P.A. *Fiziko-khimicheskaya mekhanika* [Physico-Chemical Mechanics]. Moscow, Znaniye Publ., 1958. 64 p.
4. Sergeyev E.M., Golodkovskaya G.A., Ziangirov R.S. *Gruntovedeniye* [Soil Science]. Moscow, MGU Publ., 1983. 389 p.
5. Kleyn G.K., Doroshkevich N.M., Smirenkin P.P. *Osnovaniya i fundamenty* [Bases and Foundations]. Moscow, High School Publ., 1967. 264 p.
6. Kurdyumov V.I. *K voprosu o soprotivlenii estestvennykh osnovaniy* [On the Question of the Resistance of Natural Bases]. *Vtoraya publichnaya lekciya* [Second Public Lecture]. St. Petersburg, Ehrlieh Publ., 1891, 37 p.
7. Dubov K.A. [Form Compacted Nucleus Formed in the Clay Based Foundation under Heavy Load at a Critical]. *Sb. «Osnovaniya, fundamenty i podzemnyye sooruzheniya» № 63, Tr. NIIOSP im. N.M. Gersevanova* [Collection of the Institute of Foundations "Foundations, Basements and Underground Structures"]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1972, no. 63. (in Russ.).
8. Kaganovskaya S.E. [Study of the Stability of the Clay Base with the Help of Screens]. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov* [Bases, Foundations and Soil Mechanics]. Moscow, Strojizdat Publ., 1973. pp. 29–31. no. 3. (in Russ.).

Received 14 June 2018

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

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. DOI: 10.14529/build180406

FOR CITATION

Borozenets L.M. The Theory of Nonlinear Elastic-Plastic-Viscous-Rigid Deformation of Extremely-Stressed Soil in Feet 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