

Научная статья
УДК 624.131

К.А. Казаринова, Е.Н. Акбулякова
K.A. Kazarinova, E.N. Akbuliakova

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
г. Пермь, Российская Федерация

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

АНАЛИЗ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ ГЛИНИСТОГО ГРУНТА

ANALYSIS OF ELASTIC-PLASTIC DEFORMATIONS OF CLAY SOIL

Данная статья посвящена вопросу деформирования глинистого грунта при действии на него циклических нагрузок. Статья представляет собой анализ результатов проведенных испытаний, основанный на обработке скорректированной диаграммы деформирования. Большое внимание уделяется изменению соотношений упругих и пластических деформаций грунта. Утверждается, что при действии циклического нагружения грунт переходит из естественного состояния в уплотненное и начинает деформироваться преимущественно упруго. Статья представляет собой описание результатов изучения упругопластических деформаций глинистого грунта при испытаниях образцов в приборах компрессионного сжатия.

Ключевые слова: глинистый грунт, упругие деформации, пластические деформации, одомер, модуль деформации, модуль упругости.

The article is dedicated to the issue of clayey soil under the action of cyclic loads. The article represents an analysis of the research tests, based on the processing of the corrected deformation diagram. Much attention is given to the changes of ratios in elastic and plastic deformations. It is claimed that under the action of cyclic loading, the soil passes from its natural state to a compacted one and begins to deform predominantly elastically. The article represents a description of the results of studying elastic-plastic deformations of clay soil when testing samples in compression devices.

Keywords: clay soil, elastic deformations, plastic deformations, odometer, deformation modulus, elastic modulus.

Введение

В Пермском крае широко распространены глинистые грунты осадочного происхождения и элювиальные глинистые грунты коры выветривания [1]. Такие глины и суглинки служат основанием для строительства зданий и сооружений в г. Перми.

Конструктивные элементы зданий и сооружений, включая фундаменты, подвергаются воздействию различных статических и циклических нагрузок. Циклические нагрузки особенно характерны для таких сооружений, как резервуары, каналы, туннели, мосты, сооружения башенного типа и др.

Изучение деформирования глинистых грунтов при циклическом нагружении позволяет более точно определить их реальные свойства и приблизить теоретические прогнозы к реальному поведению грунтов оснований. Это связано с тем, что напряженно-деформированное состояние таких грунтов зависит от их предшествующей истории нагружения, которую необходимо учитывать [2].

На данный момент при разработке расчетных моделей грунтов активно применяются законы теории пластичности [3]. Однако все эти методы ориентированы на случай однократного статического нагружения. Из-за этого они не полностью учитывают поведение грунтов при различных режимах нагружения, которые встречаются в реальных условиях эксплуатации оснований зданий и сооружений. По этой причине разрешение проблемы определения соотношения упругих и пластических деформаций глинистого грунта при вертикальном циклическом нагружении является актуальной задачей.

С целью решения данной проблемы были проведены испытания глинистых грунтов в лабораторных условиях с использованием прибора компрессионного сжатия. Полученные результаты позволили выявить закономерности изменения упругопластических деформаций грунтов при длительно-циклическом режиме нагружения. Анализ экспериментальных данных позволил построить графики изменения относительной деформации грунта при длительно-циклическом нагружении, а также рассчитать одометрический модуль деформации грунта.

Методика экспериментальных исследований глинистых грунтов

Методика экспериментальных исследований глинистого грунта включала в себя определение физических и деформационных характеристик.

Методика исследований деформационных характеристик грунта заключалась в наблюдениях за деформациями образцов глинистого грунта диаметром 71,4 мм, высотой 20,0 мм при циклическом нагружении в приборе компрессионного сжатия (рис. 1).



Рис. 1. Прибор компрессионного сжатия ГТ 1.1.10

Анализ упругопластических деформаций проводился в соответствии с ГОСТ 12248.4-2020 «Грунты. Определение характеристик деформируемости методом компрессионного сжатия» [4].

Относительная деформация определялась по формуле:

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta h_i}{h}, \quad (1)$$

где Δh_i – абсолютная вертикальная стабилизированная деформация образца грунта, мм; h – первоначальный размер образца грунта до приложения нагрузки, равный 20 мм.

Одометрический модуль деформации, в соответствии с [4], в интервале давлений 0,1–0,2 МПа (секущий модуль) с точностью до 1,0 МПа определен по формуле:

$$E_{oed} = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \varepsilon}, \quad (2)$$

где $\Delta \sigma$ – изменение напряжений в заданном интервале, равное 0,1 МПа; $\Delta \varepsilon$ – изменение относительной деформации, соответствующее $\Delta \sigma$.

Результаты исследований

Физические характеристики исследуемого грунта: плотность (ρ) – 2,11 г/см³, природная влажность (ω) – 23 %. В зависимости от числа пластичности исследуемый глинистый грунт с $I_p = 0,19$ является глиной по ГОСТ 25100-2020 [5], так как $I_p > 0,17$. По показателю текучести, исследуемая глина с $I_L = 0,56$ является мягкопластичной, так как $0,50 < I_L < 0,75$ [5].

Результаты испытаний методом компрессионного сжатия образцов № 1–3 представлены в табл. 1–3 и на рис. 2–4 соответственно.

Таблица 1

Результаты испытания грунта методом компрессионного сжатия
(образец № 1)

Вертикальная нагрузка на грунт, МПа	Абсолютная деформация грунта, мм	Относительная деформация грунта, мм
0,00	0,00	0,000
0,02	0,47	0,024
0,05	0,68	0,034
0,10	0,96	0,048
0,20	1,33	0,067
0,01	1,08	0,054
0,02	1,11	0,056

Окончание таблицы 1

Вертикальная нагрузка на грунт, МПа	Абсолютная деформация грунта, мм	Относительная деформация грунта, мм
0,05	1,16	0,058
0,10	1,26	0,063
0,20	1,39	0,070
0,01	1,14	0,057
0,02	1,17	0,059
0,05	1,22	0,061
0,10	1,31	0,066
0,20	1,43	0,072
0,01	1,19	0,060

Вертикальная нагрузка на грунт, σ , МПа

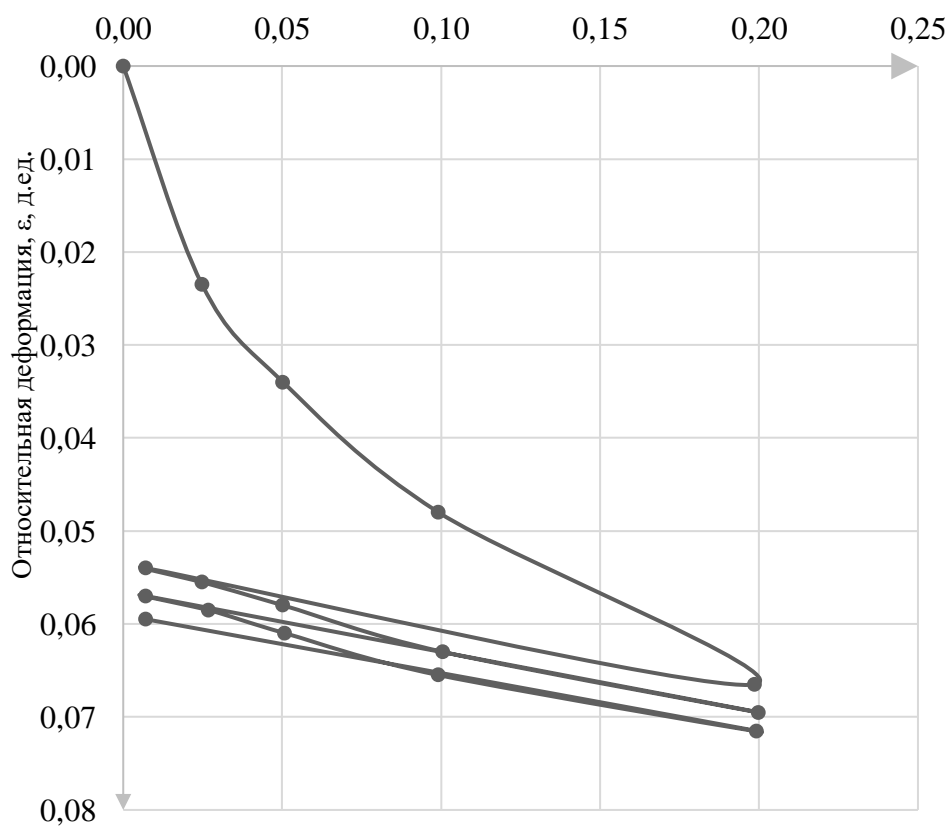


Рис. 2. График испытания методом компрессионного сжатия (образец № 1)

Таблица 2

Результаты испытания методом компрессионного сжатия (образец № 2)

Вертикальная нагрузка на грунт, МПа	Абсолютная деформация грунта, мм	Относительная деформация грунта, мм
0,00	0,00	0,000
0,02	0,41	0,021
0,05	0,63	0,032
0,10	0,93	0,047
0,20	1,32	0,066
0,01	0,99	0,050
0,02	1,04	0,052
0,05	1,10	0,055
0,10	1,21	0,061
0,20	1,38	0,069
0,01	1,08	0,054
0,02	1,12	0,056
0,05	1,17	0,059
0,10	1,27	0,064
0,20	1,41	0,071
0,01	1,10	0,055

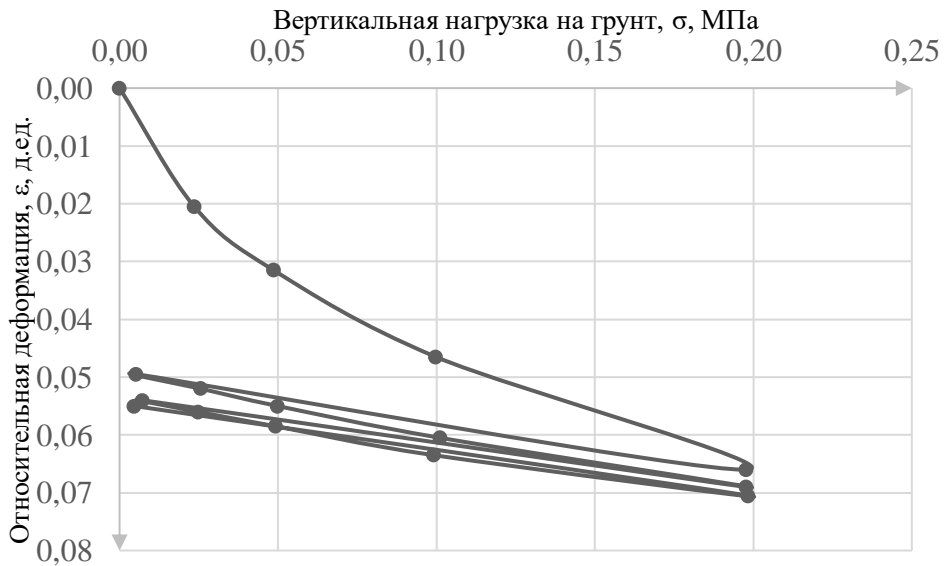


Рис. 3. График испытания методом компрессионного сжатия (образец № 2)

Таблица 3

Результаты испытания методом компрессионного сжатия (образец № 3)

Вертикальная нагрузка на грунт, МПа	Абсолютная деформация грунта, мм	Относительная деформация грунта, мм
0,00	0,00	0,000
0,02	0,56	0,028
0,05	0,76	0,038
0,10	1,01	0,051
0,20	1,40	0,070
0,01	1,12	0,056
0,02	1,16	0,058
0,05	1,22	0,061
0,10	1,31	0,066
0,20	1,46	0,073
0,01	1,19	0,060
0,02	1,23	0,062
0,05	1,28	0,064
0,10	1,36	0,068
0,20	1,50	0,075
0,01	1,23	0,062

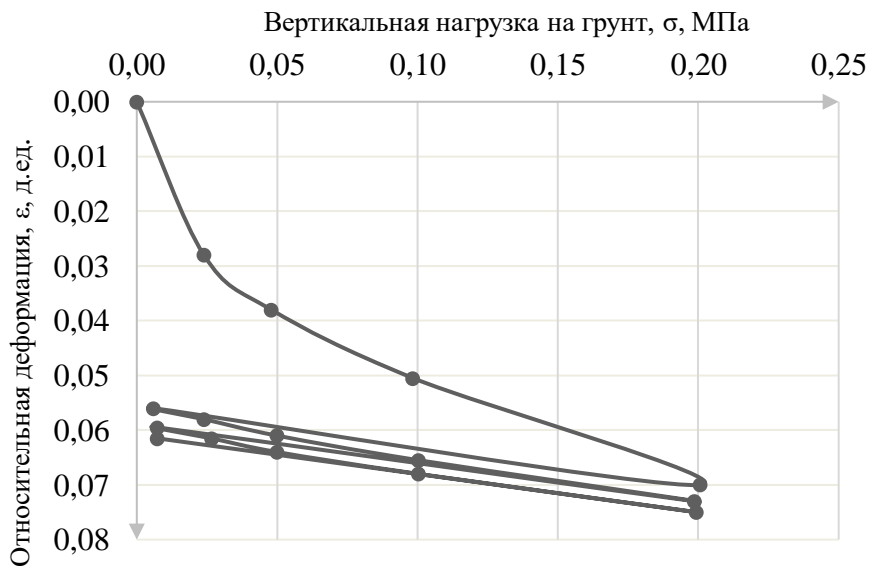


Рис. 4. График испытания методом компрессионного сжатия (образец № 3)

В ходе исследовательской работы определен средний одометрический модуль деформации для трех циклов нагружения, также средние значения упругих и пластических деформаций по каждой ветви нагружения (табл. 4).

Таблица 4

Одометрический модуль деформации глины

Номер цикла нагружения грунта	Одометрический модуль деформации E_{oed} , МПа			$E_{oed(ср)}$, МПа
	Образец 1	Образец 2	Образец 3	
1 (первичная ветвь нагружения)	5	5	5	5
2	15	11	13	13
3	17	14	14	15
1 (первичная ветвь нагружения)	<u>81,2</u> ¹ 18,8	<u>75,0</u> 25,0	<u>80,0</u> 20,0	<u>78,7</u> 21,3
2	<u>19,4</u> 80,6	<u>23,1</u> 76,9	<u>20,6</u> 79,4	<u>21,0</u> 79,0
3	<u>17,2</u> 82,8	<u>6,1</u> 93,9	<u>12,9</u> 87,1	<u>12,1</u> 87,9

Из табл. 4 видно, что среднее значение одометрического модуля первичной ветви нагружения равно 5 МПа. С каждым последующим циклом $E_{oed(ср)}$ возрастает относительно предыдущего на 61,5 % (для второго цикла нагружения) и на 13,3 % (для третьего цикла нагружения).

Анализ табл. 4 показал, что пластические деформации имеют максимальное значение для первичной ветви нагружения. После разгрузки и повторного нагружения грунта пластические деформации имеют меньшие значения по сравнению с первичным нагружением, что говорит о том, что грунт переходит из естественного состояния в уплотненное и начинает деформироваться преимущественно упруго. С каждым последующим циклом нагружения преобладали упругие деформации, и, таким образом, разгрузка не приводила к полному восстановлению деформаций грунта.

Авторы планируют продолжить исследования по данной теме и разработать рекомендации для проектирования фундаментов зданий и сооружений на грунтах, испытывающих циклическое нагружение. Выявленные зависимости планируется использовать для прогноза длительной осадки основания фундамента при циклических нагрузках, а также для определения значения модуля упругости при расчетах оснований фундаментов в программных комплексах, таких как PLAXIS, MIDAS GTS NX и др.

¹Над чертой указано процентное соотношение пластических деформаций, под чертой – упругие деформации.

Заключение

В результате исследований упругопластических деформаций глинистого грунта в приборе компрессионного сжатия получены следующие результаты:

При повторном нагружении образца глинистого грунта его одометрический модуль деформации возрастает в 2,6–3,0 раза относительно значения модуля деформации предыдущего цикла нагружения.

При первичном нагружении грунта формируется остаточная пластическая деформация. Пластические деформации грунта при последующих циклах нагружения имеют тенденцию уменьшаться в 3,7–6,5 раз. Таким образом, с увеличением количества циклов «нагрузка – разгрузка» грунт деформируется преимущественно упруго.

Дальнейшие исследования по данному вопросу позволят разработать рекомендации по прогнозу длительной осадки грунтового основания при циклических нагрузках, а также для определения значения модуля упругости грунта при расчетах оснований фундаментов в программных комплексах, таких как PLAXIS, MIDAS GTS NX и др.

Список литературы

Список литературы

1. Ибламинов Р.Г., Алванян А.К. Региональная минерагения общераспространенных полезных ископаемых зоны сочленения Восточно-Европейской платформы и Уральской складчатой области (на пр. Пермского края) // Вопросы современной науки и практики. – 2009. – № 9. – С. 152–161.

2. Мирсаяпов И.Т., Королева И.В. Оценка прочности и деформируемости глинистых грунтов при режимном нагружении с учетом деградации структуры грунта // Известия КГАСУ. – 2014. – № 4 (30). – С. 205–213.

3. Цытович Н.А. Механика грунтов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Госстройиздат, 1963. – 636 с.

4. ГОСТ 12248.7-2020. Межгосударственный стандарт. Грунты. Определение характеристик деформируемости методом компрессионного сжатия. – Приказ Росстандарта от 14.10.2020 № 824-ст. – 19 с.

5. ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация. – М.: Изд-во стандартов, 2021. – 41 с.

Сведения об авторах

Казаринова Карина Алексеевна – студентка магистратуры профиля «Подземное и городское строительство», строительный факультет (гр. ПГС1-23-1м), Пермский национальный исследовательский политехнический университет, e-mail: kar1nysik@mail.ru

Акбулякова Евгения Николаевна – кандидат технических наук, доцент кафедры строительного производства и геотехники, строительный факультет, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, e-mail: aspirant123@mail.ru

Финансирование: исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Получена: 25.01.2024

Одобрена: 26.01.2024

Принята к публикации: 10.02.2024

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Казаринова, К.А. Анализ упругопластических деформаций глинистого грунта. / К. А. Казаринова, Е. Н. Акбулякова // *Master's Journal*. – 2024. – № 1. – Art. 11.

Please cite this article in English as: Kazarinova K.A., Akbuliakova E.N. Analysis of elastic-plastic deformations of clay soil. *Master's Journal*, 2024, no. 1, art. no. 11