

УДК 624.131.43

DOI: 10.17213/mgvgif/2026-5-211-217

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ДВУХСЛОЙНЫХ ОБРАЗЦОВ ГРУНТОВ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ

И. В. Королева, Ф. Н. Волков

Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ),
г. Казань, Россия

Аннотация. Представлены результаты лабораторных исследований поведения двухслойных образцов грунтов при компрессионном сжатии и одноплоскостном срезе. В ходе одометрических испытаний установлено влияние взаимного расположения слоев на величину относительных вертикальных деформаций: образцы с верхним слоем супеси показали деформации в среднем на 30 % больше по сравнению с образцами, в которых верхним слоем являлся песок. По результатам испытаний на одноплоскостной срез определены прочностные характеристики образцов и выявлено, что разрушение слоистой системы происходит преимущественно по контактной поверхности между слоями. Полученные результаты подтверждают существенное влияние контактной зоны и порядка напластования грунтов на деформирование и прочность слоистых систем.

Ключевые слова: лабораторные испытания, слоистое основание, одометрическое сжатие, одноплоскостной срез

STUDY OF THE BEHAVIOR OF TWO-LAYER SOIL SAMPLES UNDER LABORATORY CONDITIONS

I. V. Koroleva, F. N. Volkov

Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russia

Annotation. This article presents the results of laboratory studies on the behavior of two-layer soil samples under compression and single-plane shear. Oedometer tests revealed the influence of the relative position of the layers on the magnitude of relative vertical deformations: samples with a sandy loam top layer demonstrated deformations that were, on average, 30% greater than those with a sand top layer. Single-plane shear tests were used to determine the strength characteristics of the samples, revealing that failure of the layered system occurs primarily along the contact surface between the layers. The obtained results confirm the significant influence of the contact zone and the bedding order of soils on the deformation and strength of layered systems.

Keywords: laboratory tests, layered base, oedometer tests, single-plane cut

Введение

Одной из важных особенностей грунтовых оснований является их структура. Чаще всего она представляет собой множество горизонтальных слоев с разными физико-механическими характеристиками. Изучению вопросов влияния напластования грунтов на напряженно-деформированное состояние оснований зданий и сооружений посвящено большое количество работ, как отечественных, так и зарубежных авторов [1–5]. Для понимания механизма взаимодействия слоев проводятся лабораторные испытания слоистых образцов.

В статье [6] приводятся результаты трехосных испытаний однородных и слоистых образцов. Авторы проводили испытания с целью выяснить, насколько применимы традиционные подходы механики грунтов к описанию работы слоистых образцов. Для создания образцов использовались смесь песка и резины (Composite HomS - $\gamma = 12.03 \text{ кН/м}^3$, $e = 0,49$) и гравий (Aggregate HomS - $\gamma = 14.36 \text{ кН/м}^3$, $e = 0,8$). Испытания проводились при боковом давлении не более 30 кПа. Авторами отмечено неоднородное распределение деформаций по высоте образца — измеренная общая осевая деформация не отражает реальную картину. Характеристики слоистого образца (HetS) (рис. 1) имеют промежуточные значения, отличающиеся от усредненных, поскольку присутствует влияние контакта на границе взаимодействия слоев.

	$E_t(\text{MPa})$	φ_{peak} degrees	φ_{cv}^1 degrees	ψ_{peak} degrees
Aggregate HomS	13,62	49,1	41,5	20,9
HetS	5,76	39,7	34,8	15,6
Composite HomS	3,91	36,6	33,3	10,8

Рис. 1. Характеристики образцов, полученные в ходе трехосных испытаний [6]

Исследования, выполненные различными авторами [1–5], показывают, что взаимное расположение слоев существенно влияет на напряженно-деформированное состояние основания, его несущую способность и характер разрушения. Следует отметить, что большинство публикаций посвящено либо моделированию работы слоистого основания в целом, либо анализу распределения напряжений в массиве грунта. При этом вопросы механизма деформирования непосредственно слоистых образцов изучены недостаточно. В связи с этим возникает необходимость экспериментального изучения поведения двухслойных образцов при различных видах лабораторных испытаний.

Целью данной работы является исследование поведения двухслойных образцов грунтов в лабораторных условиях. В связи с этим можно выделить следующие задачи:

- разработка методики и создания двухслойных образцов;
- проведение одометрических испытаний образцов;
- проведение испытаний в приборе одноплоскостного среза;
- анализ полученных результатов исследований.

Основная часть

Для проведения одометрических испытаний использовались два вида грунтов, из которых после подготовки были изготовлены двухслойные и однородные образцы. Воздушно сухой песок, просеянный через сито с размером ячейки 2×2 мм, перемешивался с водой и послойно укладывался в

форму. Воздушно сухая, измельченная супесь отсыпалась в контейнер с послойным увлажнением. После увлажнения грунт выдерживался в герметичной емкости в течение 12 часов для равномерного распределения влаги по всему его объему. После этого были получены грунты со следующими характеристиками: песок влажностью $W = 5 \%$ и супесь влажностью $W = 10 \%$. Кольцо одометра ($h = 22$ мм) было предварительно разделено разметкой по высоте на 4 части для контроля положения слоев. Заполнение кольца производилось послойно с последующим взвешиванием после укладки каждого слоя. Контроль массы позволял обеспечивать одинаковую плотность образцов в различных сериях испытаний. Плотность образцов составляла $\rho = 1,69$ г/см³.

Образцы помещались в компрессионный прибор КПП-1. Вертикальная нагрузка на образец создавалась с помощью гирь массой 3 кг, устанавливаемых на подвес прибора. Гири устанавливались очень плавно, без ударов. Испытания проводились при ступенчато-возрастающей статической нагрузке. Каждая ступень нагрузки выдерживалась в течение 7 минут, с фиксацией вертикальных деформаций образца на первой, третьей, пятой и седьмой минутах. Испытания проводились при следующих ступенях нагружения: $P_1 = 100$ кПа; $P_2 = 200$ кПа; $P_3 = 300$ кПа; $P_4 = 400$ кПа; $P_5 = 500$ кПа; $P_6 = 600$ кПа; $P_7 = 700$ кПа. После завершения испытаний образцы разрезались для фотофиксации процесса деформирования слоев (рис. 2).



Рис. 2. Слоистый образец после испытания в одометре

Программа испытаний включала в себя 4 серии экспериментов. В первой серии испытывали образцы, сформированные из песка влажностью $W = 10 \%$, плотностью $\rho = 1,5$ г/см³. Для второй серии были созданы однородные образцы из супеси влажностью $W = 10 \%$, плотностью $\rho = 1,8$ г/см³. Для третьей и четвертой серий использовались двухслойные образцы, состоящие из песка и супеси с указанными выше параметрами, однако, в третьей серии

верхнюю половину высоты образца составляла супесь, а в четвертой серии — песок. Приготовление грунтов для создания образцов, выполнялось по методике, описанной выше. Грунты помещались в грунтоотборную гильзу прибора П10-С, разделенную разметкой на две равные части, и взвешивались для контроля массы. Испытания проводились методом одноплоскостного среза в приборе П10-С (рис. 3) под действием нормального напряжения, которое создавалось при помощи гирь, устанавливаемых на рычажную систему прибора. Образцы испытывались при вертикальном давлении равном $P_1 = 100$ кПа и $P_2 = 300$ кПа, выдерживаемом до стабилизации вертикальных деформаций. За условную стабилизацию принята скорость деформаций, не превышающая 0,01 мм/мин. После этого ступенями прикладывалась горизонтальная нагрузка. Для этого на подвес прибора устанавливались гири массой по 100 г при вертикальном давлении $P_1 = 100$ кПа и 300 г при $P_2 = 300$ кПа. Следующая гиря устанавливалась на подвес после стабилизации горизонтальных перемещений каретки прибора и фиксации их значений. Испытание считалось законченным, если при приложении очередной ступени касательной нагрузки происходил мгновенный срез (срыв) одной части образца по отношению к другой или общая деформация сдвига превышала 5 мм.



Рис. 3. Образец супеси после испытания

В результате обработки данных, полученных в ходе испытаний образцов на одометрическое сжатие, определены значения относительных вертикальных деформаций, построены осредненные графики их зависимости от нагрузки (рис. 4). Анализ графиков (рис. 4) показывает, что характер деформирования образцов зависит как от величины приложенной нагрузки, так и от взаимного расположения слоев.

В диапазоне нагрузок 0 кПа – 200 кПа наблюдается наиболее интенсивный рост относительных вертикальных деформаций у всех образцов. Наибольшие деформации в данном интервале фиксируются у однородной

супеси. Однородный песок, напротив, демонстрирует минимальные значения деформаций. Слоистые образцы занимают промежуточное положение, при этом образец с верхним слоем супеси деформируется заметно интенсивнее по сравнению с образцом, в котором верхним слоем является песок.

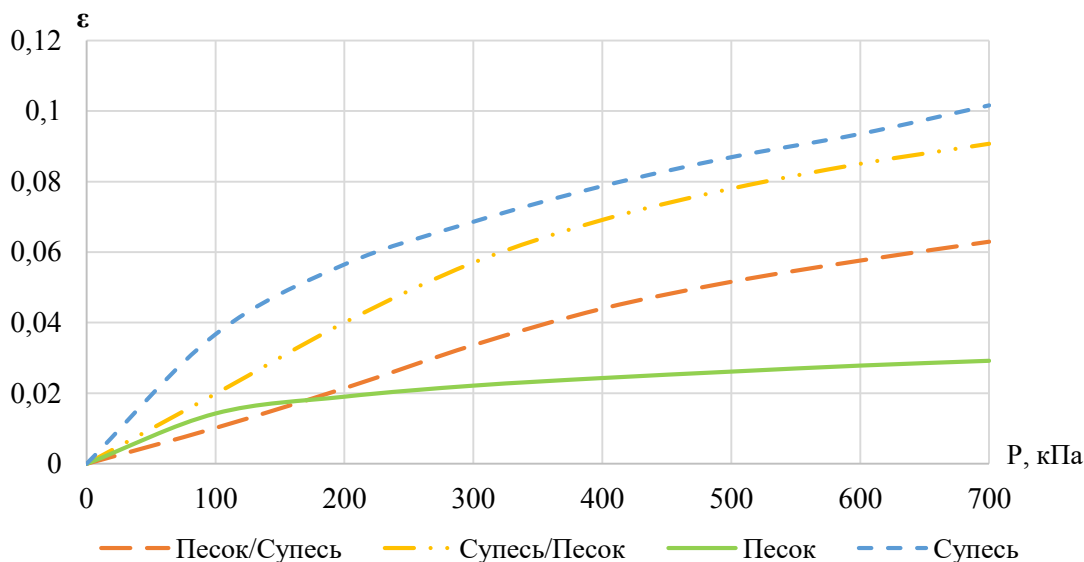


Рис. 4. Осредненные графики зависимости вертикальных относительных деформаций от нагрузки ε/P

В интервале нагрузок 200–400 кПа скорость нарастания деформаций снижается. Различие между слоистыми образцами сохраняется: образец «супесь–песок» продолжает показывать большие относительные деформации, что может быть связано с более активным уплотнением верхнего слоя супеси.

При нагрузках 400–700 кПа деформации продолжают возрастать, однако характер кривых становится более пологим, что свидетельствует о постепенном снижении сжимаемости грунтов вследствие их уплотнения. При этом различия между образцами сохраняются на всем диапазоне нагрузок.

Полученные результаты показывают, что взаимное расположение слоев оказывает существенное влияние на деформирование слоистой системы, особенно на начальных этапах нагружения. Значения относительных деформаций у образцов с супесью сверху были в среднем на 30 % больше, чем у образцов с верхним слоем песка.

Характеристики образцов, полученные в ходе обработки данных, полученных при испытаниях на одноплоскостной срез приведены в табл. 1. Особое внимание стоит обратить, на то, что слоистый образец имеет значение угла внутреннего трения, отличающееся от однородных образцов. Исходя из этого можно предположить, что разрушение образца происходит по контактному слою (рис. 5), который имеет собственные характеристики. Это согласуется с результатами испытаний других исследователей [6, 7].

Таблица 1. Результаты проведения испытаний на одноплоскостной срез

Вид образца	Φ , град	C , кПа
Супесь	31,5	7,29
Слоистый	27,8	0
Песок	26,9	0



Рис. 5. Фотография разрушенного слоистого образца после проведения испытания на одноплоскостной срез

Заключение

По результатам проведенных лабораторных исследований слоистых образцов грунтов можно сделать следующие выводы:

1. Слоистые образцы при одометрических испытаниях показали промежуточные значения относительных деформаций ϵ по сравнению с однородными образцами. Следует отметить, что для диапазона нагрузок 100–700 кПа в образцах третьей серии (супесь сверху) относительные деформации ϵ были в среднем на 30% больше, чем у образцов четвертой серии (верхний слой песка). Вышеизложенное позволяет отметить значительное влияние напластования грунтов на сжимаемость образцов, даже при одинаковой плотности слоев. Полученные выводы также подтверждается результатами других авторов [6, 7].

2. Угол внутреннего трения слоистого образца ($\phi_{\text{сл}} = 27,8^\circ$) практически равен углу внутреннего трения песка ($\phi_{\text{п}} = 26,9^\circ$) и существенно ниже, чем у однородной супеси ($\phi_{\text{суп}} = 31,5^\circ$). Сцепление слоистого образца ($c = 0$) не отличается от сцепления песка, в то время как супесь обладает сцеплением 7,29 кПа. Из этого можно сделать вывод о том, что, разрушение при сдвиге происходит по контактной поверхности «песок – супесь» в пределах песчаного слоя, так как супесь обладает связностью. Контактная зона является наиболее слабым элементом слоистой системы.

Благодарности: работа выполнена за счет гранта, предоставленного Академией наук Республики Татарстан образовательным организациям высшего образования, научным и иным организациям на поддержку планов развития кадрового потенциала в части стимулирования их научных и научно-педагогических работников к защите докторских диссертаций и выполнению научно-исследовательских работ.

Список источников

1. Sarah Abdul Hussein Mandeel, Haider M. Mekkiyah, Abbas Fadhil Ibrahim Al-Ameri Estimate the Bearing Capacity of Full-Scale Model Shallow Foundations on Layered-Soil Using PLAXIS / Sarah Abdul Hussein Mandeel, Haider M. Mekkiyah, Abbas Fadhil Ibrahim Al-Ameri // Solid State Technology. – 2020. – Vol. 63, No. 1. – PP. 1775-1787. – ISSN: 0038-111X.
2. Siraziev, L. Experimental studies of the various soils bedding influence on the stress-strain state of a layered subsoil base of the slab foundation / L. Siraziev, D. Sergeev // E3S Web of Conferences Volume 274 (2021) : 2nd International Scientific Conference on Socio-Technical Construction and Civil Engineering (STCCE - 2021), Kazan, 21–28 апреля 2021 года. Vol. 274. – France: EDP Sciences, 2021. – P. 3021. – DOI 10.1051/e3sconf/202127403021. – EDN XXKBPC.
3. Sarah Abdul Hussein Mandeel, Haider M. Mekkiyah, Abbas Fadhil Ibrahim Al-Ameri Bearing Capacity of Square Footing Resting on Layered Soil / Sarah Abdul Hussein Mandeel, Haider M. Mekkiyah, Abbas Fadhil Ibrahim Al-Ameri // AL-AMERI /AL-QADISIYAH JOURNAL FOR ENGINEERING SCIENCES. – 2020. – №13. – PP. 306-313. – <https://doi.org/10.30772/qjes.v13i4.700>.
4. Mahmoud Ghazavi, Ehsan Khosroshahi Bearing capacity of circular footings on multi-layered sand-waste tire shreds reinforced with geogrids / Mahmoud Ghazavi, Ehsan Khosroshahi // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. – 2024. – №16. – PP. 1085-1094. – <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2023.04.026>.
5. Сиразиев, Л. Ф. Экспериментальные исследования влияния напластования различных грунтов на напряженно-деформированное состояние слоистого грунтового основания плитного фундамента / Л. Ф.Сиразиев, Д. Н. Сергеев // Известия КГАСУ. – 2017. – № 2 (40). – С. 153-159.
6. Gabriel Marchi de Oliveira, Isabel Falorca Stress-strain Relationship in Homogeneous and Two-layered Triaxial Test Specimens / Gabriel Marchi de Oliveira, Isabel Falorca // STARTCON19 - International Doctorate Students Conference + Lab Workshop in Civil Engineering, KnE Engineering. – 2020. – Vol. 2020. – PP. 88–99. – DOI 10.18502/keg.v5i5.6923.
7. Тер-Мартirosян, З. Г. Определение прочностных характеристик анизотропных грунтов в трехосном приборе / З. Г. Тер-Мартirosян, Э. К. Мешкова // Геотехника. – 2015. – № 5. – С. 4-7. – EDN VCQPPF.

© Королева И. В., Волков Ф. Н., 2026