

ФАЗЫ СЖАТИЯ НЕСВЯЗНЫХ ГРУНТОВ РАЗЛИЧНОГО ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА

COMPRESSION PHASES OF NON-COHESIVE SOILS OF VARIOUS GRANULOMETRIC COMPOSITIONS

МИРНЫЙ А.Ю.

Доцент кафедры механики грунтов и геотехники национального исследовательского университета «Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), к. т. н., г. Москва, reg@oconnor.ru

ГАЙКОВ Е.А.

Студент бакалавриата национального исследовательского университета «Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), г. Москва, yegorsmile@yandex.ru

ЗУБОВ А.О.

Студент бакалавриата национального исследовательского университета «Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), г. Москва

MIRNYY A.Yu.

Associate professor of the Soil Mechanics and Geotechnics Department of the "Moscow State University of Civil Engineering" national research university, PhD (candidate of science in Technics), Moscow, reg@oconnor.ru

GAIKOV E.A.

Undergraduate student of the "Moscow State University of Civil Engineering" national research university, Moscow, yegorsmile@yandex.ru

ZUBOV A.O.

Undergraduate student of the "Moscow State University of Civil Engineering" national research university, Moscow

Ключевые слова:

несвязные грунты; гранулометрический состав; компрессионные испытания; фазы сжатия.

Key words:

non-cohesive soils; granulometric composition; compression tests; compression phases.

Аннотация

В статье проанализированы результаты лабораторных исследований фаз сжатия несвязных грунтов различного гранулометрического состава. Описана использованная для компрессионных испытаний экспериментальная конструкция грунтового лотка с возможностью микросъемки. Представлены выводы об изменениях фаз сжатия, полученные в результате разделения пластических и упругих составляющих общей деформации при компрессионных испытаниях в одометре.

Abstract

The paper analyses laboratory research results of compression phases of non-cohesive soils of various granulometric compositions. An experimental soil tray construction with the possibility of microphotography used for the compression tests is described. Conclusions on changes of the compression phases are made on the basis of singling out the plastic and elastic components of the general deformation at compression tests in oedometers.

Многообразие дисперсных грунтов и их механические свойства определяются видами составляющих их частиц, взаимодействием между ними и формируемыми при этом структурами.

Все дисперсные грунты подразделяются на связные и несвязные. В первой группе формируются многочисленные связи между отдельными частицами, имеющие различную природу и определяющие механическое поведение грунта. Во второй группе эти связи незначительны, что существенно упрощает изучение и моделирование несвязных дисперсных грунтов.

Поведение несвязных грунтов определяется в первую очередь их гранулометрическим составом. В исследованиях многих отечественных и зарубежных авторов рассматривается влияние гранулометрического состава на максимальную возможную плотность, сжимаемость, прочностные характеристики. Для строительства абсолютного большинства промышленных и гражданских объектов наибольшее значение имеет сжимаемость грунтов основания, позволяющая определять осадки сооружений.

Механизм сжимаемости дискретных сред, в частности грунтов, основывается на изменении объема пор скелета, образованного твердыми частицами. Независимо от вида напряженного состояния и разновидности грунта при сжатии происходит постепенное уплотнение структуры и увеличивается количество контактов между частицами. Традиционно в механике грунтов процесс уплотнения разделяется на три этапа:

- сокращение расстояния между частицами и увеличение количества контактов между ними;
- взаимное смещение частиц и их перераспределение в толще грунта;
- стабилизация структуры, потеря частицами степней свободы и дальнейшее уплотнение за счет деформирования самих частиц (размер пор при этом меньше размера каждой отдельной частицы) [5].

Для грунтов с неоднородным гранулометрическим составом ярко выражена промежуточная (вторая) фаза сжатия, называемая фазой сдвигов. На этом этапе в уплотненной структуре грунта происходит потеря устойчивости отдельных мелких частиц и их «мгновенное» перемещение в крупные поры. При этом структура грунта лавинообразно меняется. Наличие и количество таких пор зависят в первую очередь от гранулометрического состава грунта. Если гранулометрический состав достаточно однородный, то размер пор получается меньше характерного размера частиц. Если же неоднородный, то между более крупными частицами могут формироваться поры, занимаемые более мелкими частицами [6]. Описанный механизм проиллюстрирован на рис. 1, а, б.

Если рассматриваются грунты достаточно рыхлого сложения, их структура отличается высокой начальной пористостью и описанные процессы можно легко наблюдать в плоском грунтовом лотке, собранном на базе научно-образовательного центра «Геотехника» Московского государственного строительного университета (рис. 2). Размеры лотка — 150×150×40 мм. Он изготовлен из алюминиевого профиля прямоугольного сечения с размерами 40×20×2 мм. В качестве штампа используется отрезок профиля того же сечения, жесткость которого достаточна для равномерной передачи давления на грунт. Лоток жестко крепится к основанию нагрузочного устройства. В одной из его боковых стенок имеется отверстие малого размера, закрытое стеклом таким образом, чтобы внутренняя поверхность стенки оставалась гладкой. К лотку крепится микроскоп, позволяющий вести микросъемку. Его объектив расположен напротив отверстия в стенке лотка. Для наблюдения за частицами в отраженном свете также имеется подсвечивающее устройство.

Данная конструкция позволяет наблюдать за перемещением частиц при нагружении грунта в лотке при 40–400-кратном увеличении. Несмотря на то что используемый микроскоп не позволяет получать стереоизображения, размер частиц достаточно мал по сравнению с глубиной резкости используемого объектива и получаемые изображения дают достаточно полное представление о положении в наблюдаемом пространстве каждой частицы.

В связи с тем что данная установка является демонстрационным прибором и не предназначена для измерений каких-либо величин в ходе испытания, нет необходимости применять высокие требования к собственной жесткости. Испытания проводятся на песке максимально рыхлого сложения при незначительных величинах нормального давления, в связи с чем боковое давление грунта незначительно и трение о стенки прибора не оказывает влияния на результаты испытаний.

Испытания включали поэтапное нагружение грунтов различного гранулометрического состава в вышеописанном лотке с постоянной видеофиксацией изображений под микроскопом.

В результате анализа полученных видеofайлов (для упрощения работы просматриваемых с увеличенной скоростью) было установлено, что при сжатии грунта однородного гранулометрического состава не происходит перекомпоновка частиц. Даже при максимально рыхлой в начале испытания укладке твердые частицы сразу формируют достаточно устойчивый скелет, а в

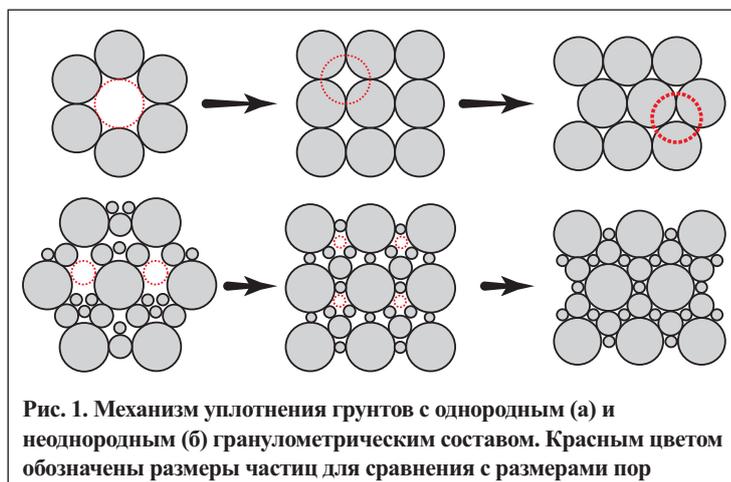


Рис. 1. Механизм уплотнения грунтов с однородным (а) и неоднородным (б) гранулометрическим составом. Красным цветом обозначены размеры частиц для сравнения с размерами пор

дальнейшем идет только уплотнение этого скелета. Случаи резкого перемещения отдельных частиц носят несистематический характер.

В качестве иллюстраций на рис. 3, а, б приведены микрофотографии грунтов однородного и неоднородного гранулометрического состава на начальном этапе испытания в лотке. В однородном грунте размеры пор соизмеримы с размерами частиц, но не превышают их. В неоднородном поры значительно крупнее и могут вмещать в себя наиболее мелкие частицы.

В грунте неоднородного гранулометрического состава хорошо заметно постоянное взаимное смещение частиц на всех этапах нагружения. Это как раз и объясняется тем, что в данном случае высока вероятность возникновения пор, размер которых больше самых мелких частиц.

Тем не менее рассмотрение данного явления с точки зрения микромеханики не позволяет оценить его количественно. Разница в проявлениях фаз сжатия в грунтах с различным гранулометрическим составом может быть выявлена путем разделения упругих и пластических деформаций. Известно, что в грунтах преобладают пластические деформации, вызванные сдвиговыми усилиями и изменением структуры. Упругие

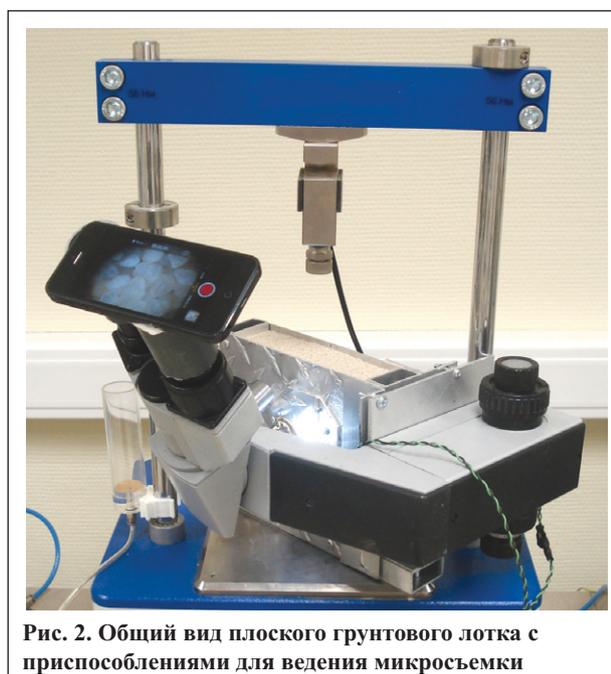


Рис. 2. Общий вид плоского грунтового лотка с приспособлениями для ведения микросъемки

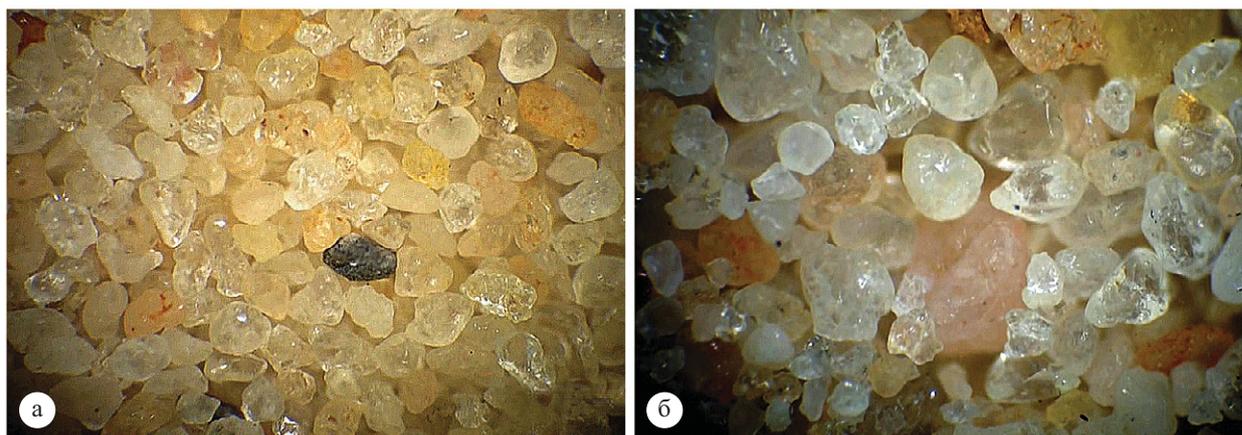


Рис. 3. Грунт однородного (а) и неоднородного (б) гранулометрического состава на начальном этапе испытания в плоском грунтовом лотке. Микрофотографии сделаны при увеличении 40*

деформации определяются только упругой работой скелета грунта и высокой жесткостью частиц. При разгрузке происходит восстановление упругих деформаций за счет релаксации горизонтальных напряжений.

Была выполнена серия компрессионных испытаний несвязных грунтов однородного гранулометрического состава с различными размерами фракций, а также трех смесей разных фракций в равных количествах [4, 6, 10]. Образцы загружались в одометр при минимальной плотности путем засыпки через воронку при минимальной высоте падения. Диаметр образца составлял 87 мм, высота — 25 мм. Фракции испытанных образцов и их начальные плотности представлены в таблице.

Нагружение выполнялось малыми ступенями и доводилось до величины вертикального напряжения 1 200 кПа [1]. Затем проводилась поэтапная разгрузка. Для каждого вида грунта было выполнено по 4 испытания. Их результаты осреднялись.

В связи с тем что при испытаниях проводилась разгрузка, можно определить упругую составляющую деформации при каждом уровне вертикального напряжения. Если предположить, что величина упругой деформации постоянна при каждом уровне напряжения, зависимость общей относительной деформации от напряжения можно разделить на упругую (ϵ_e) и пластическую (ϵ_p) составляющие:

$$\epsilon = \epsilon_e + \epsilon_p.$$

Нанесение на графики испытаний величин упругих и пластических деформаций позволяет выявить принципиальные различия в уплотнении образцов.

На рисунке 4 представлены результаты испытаний грунтов с однородным гранулометрическим составом. Хорошо видно, что упругие и пластические деформации имеют соизмеримые величины, однако первые в конце концов стабилизируются, а вторые равномерно прирастают.

На рисунке 5 представлены результаты испытаний грунтов неоднородного гранулометрического состава. В данном случае пластические деформации многократно превышают упругие, что указывает на значительные взаимные смещения частиц (при этом заметно, что пластические деформации начинают развиваться сразу же после нагружения, что объясняется быстрой переком-

поновкой частиц). Упругие же деформации существенно не отличаются по величине от таковых в грунте с однородным гранулометрическим составом.

Из представленных графиков следует вывод, что у грунтов однородного гранулометрического состава значительно меньше выражены пластические деформации в фазе сдвигов, то есть не происходит перекомпоновки частиц. Их скелет даже при минимальной начальной плотности имеет устойчивую структуру и работает упруго. У грунтов с неоднородным гранулометрическим составом упругие деформации выражены в меньшей степени, а пластические развиваются равномерно в процессе всего нагружения, что указывает на постоянные изменения структуры [9]. Испытания грунтов природного гранулометрического состава дают более выраженные результаты, чем испытания искусственных смесей разных фракций, что можно объяснить большим разбросом в размерах частиц и, как следствие, меньшей устойчивостью скелета.

Данное наблюдение позволяет по-разному трактовать фазы уплотнения грунта в зависимости от его гранулометрического состава. В однородном грунте вторая фаза — фаза сдвигов — практически отсутствует и после уплотнения структуры начинается сжатие самих частиц. Таким образом, несмотря на меньшую начальную плотность (при рыхлой начальной укладке), грунты однородного гранулометрического состава могут обладать меньшей сжимаемостью.

Таблица

Характерный размер частиц и начальная плотность испытываемых грунтов			
Грунт	Фракции, мм	Плотность, г/см ³	
Песок	0,10–0,25	1,46	
	0,25–0,50	1,48	
	0,50–1,00	1,55	
	смесь 1	0,10–0,25 0,25–0,50 0,50–0,80	1,58
	смесь 2	< 0,10 0,25–0,50 0,50–0,80	1,63
Супесь	0,001–0,100	1,42	

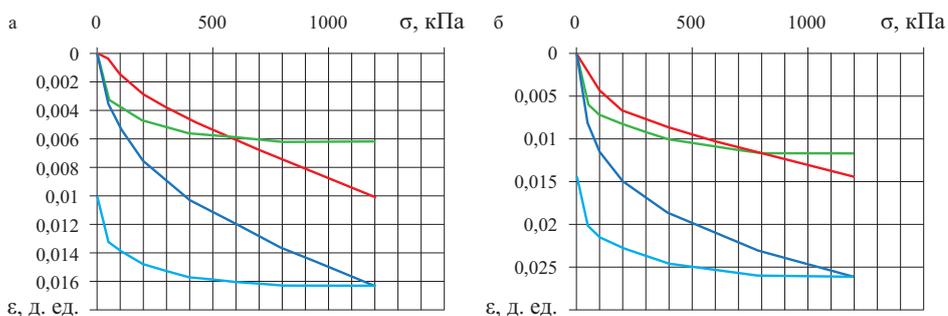


Рис. 4. Результаты компрессионных испытаний грунтов однородного гранулометрического состава при размерах частиц 0,25–0,5 мм (а) и 0,5–1 мм (б). Условные обозначения: ε — относительная деформация, д. ед.; σ — напряжение, кПа; синий и голубой цвет — общие относительные деформации при первичном нагружении и разгрузке соответственно; зеленый — упругие деформации; красный — пластические деформации

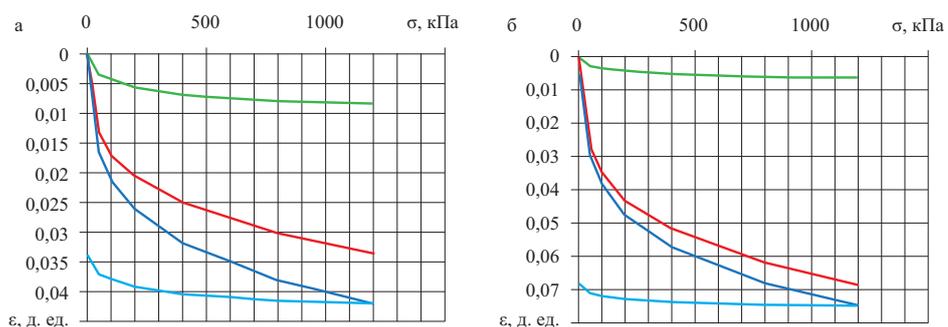


Рис. 5. Результаты компрессионных испытаний грунтов неоднородного гранулометрического состава — искусственной смеси (а) и природного супесчаного грунта (б). Условные обозначения: ε — относительная деформация, д. ед.; σ — напряжение, кПа; синий и голубой цвет — общие относительные деформации при первичном нагружении и разгрузке соответственно; зеленый — упругие деформации; красный — пластические деформации

Этот вывод дает возможность расширить представления о влиянии гранулометрического состава на механическое поведение грунтов. Дальнейшим развитием проведенного исследования может быть количественная оценка взаимосвязи между гранулометрическим составом несвязного грунта и фазами его уплотнения. Это позволит описать нелинейность деформирования грунта как на этапе первичного нагружения, так и на стадиях разгрузки и повторного нагружения.

Примечательно, что данный подход может помочь количественно выразить связь между гранулометри-

ческим составом и сжимаемостью грунта через отношение величин упругих и пластических деформаций. Это отношение, а также точка изменения фазы сжатия могут быть использованы в качестве входных параметров расчетной модели грунта, учитывающей его гранулометрический состав. В связи с тем что определение гранулометрического состава и начальной плотности можно выполнить с достаточно высокой точностью, разработка подобной модели позволит повысить точность количественной оценки напряженно-деформированного состояния оснований. 

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 12248-2010. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. М.: Стандартинформ, 2011.
2. ГОСТ 12536-79. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. М.: Стандартинформ, 2011.
3. ГОСТ 22733-2002. Грунты. Метод лабораторного определения максимальной плотности. М.: Стандартинформ, 2013.
4. Мирный А.Ю., Тер-Мартirosян А.З. Подбор оптимального гранулометрического состава песчано-гравийных смесей для песчаных подушек и насыпей // Жилищное строительство. 2014. № 9. С. 43–46.
5. Тер-Мартirosян З.Г. Механика грунтов. М.: АСВ, 2009. 550 с.
6. Тер-Мартirosян З.Г., Мирный А.Ю. Влияние неоднородности грунтов на их механические свойства // Основания и фундаменты. 2013. № 6. С. 2–7.
7. Тер-Мартirosян З.Г., Мирный А.Ю., Джаро М.Н. Определение прочностных характеристик несвязных грунтов при компрессионных испытаниях // Интернет-вестник ВолгГАСУ. 2012. № 3. С. 1–6.
8. Чановский Е.Г. Лабораторные работы по грунтоведению и механике грунтов. М.: Недра, 1975. 303 с.
9. Santamarina J.C. Soil behaviour at the microscale: particle forces / Proceedings of the Symposium on Soil Behavior and Soft Ground Construction in honor of Charles C. Ladd, October 2001, MIT, Atlanta. URL: <http://people.ce.gatech.edu/~carlos/laboratory/Tools/particle%20force/Particle%20forces.pdf>.
10. Ter-Martirosyan Z.G., Mirnyy A.Yu. Effect of nonhomogeneity of soils on their mechanical properties // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2014. V. 50. № 6. P. 223–231.