УДК 624.131

**УПРОЧНЕНИЕ ГЛИНИСТОГО ГРУНТА ПОД ДАВЛЕНИЕМ**

**П. А. Ляшенко,**

кандидат технических наук, профессор кафедры Оснований и фундаментов,

Кубанский государственный аграрный университет, г. Краснодар

**В. В. Денисенко,**

кандидат технических наук, доцент кафедры Кадастра и геоинженерии,

Кубанский государственный технологический университет, г. Краснодар

тел. 8(918) 488-28-40, e-mail: [lyseich1@yandex.ru](https://mail.yandex.ru/lite/compose?to=lyseich1@yandex.ru)

*Компрессионное сжатие грунта с постоянной скоростью нагружения и непрерывным наблюдением за деформацией позволило выявить кооперативную реакцию контактов частиц и микроагрегатов. На ее основе выделены упругая и неупругая части сопротивления сжатию и оценено упрочнение грунта. Показано, что упрочнение сопровождается ростом объемного содержания воды, участвующей в неупругой деформации. Приведена методика расчетов объемного содержания упруго деформирующейся воды контактов в глинистом грунте и объемного содержания минеральных частиц*.

***Ключевые слова****:* *компрессионное сжатие, постоянная скорость нагружения,* упрочнение грунта, *упругая и неупругая деформация.*

Упрочнение грунта обычно рассматривают на примере одноосного сжатия и сдвига, где это явление наиболее очевидно. Приращение сопротивления образца на единицу приращения осевой деформации (или деформации сдвига) увеличивается, что свидетельствует об упрочнении грунта [1]. Детальное, на физических моделях, рассмотрение явления указывает на неоднозначность результатов, т.е. деформация может сопровождаться как упрочнением, так и разупрочнением, и свидетельствует о влиянии на них неоднородностей грунта и способа испытания образца [2]. Это приводит к необходимости учета особенностей микроструктуры.

При всестороннем сжатии в компрессионном приборе «одновременно с объемными деформациями развиваются и сдвиговые деформации» [3], следовательно, упрочнение и разупрочнение присущи этому виду испытания грунта. Двухосное сжатие образца грунта в модельном опыте порождает трещины сдвига и отрыва, которые наблюдаются визуально и дают сложную картину деформаций, развивающуюся по мере увеличения внешней нагрузки [4]. При этом в грунте образуются новые трещины, увеличиваются или закрываются прежние.

Очевидно, что учесть влияние неоднородностей на граничные условия в этом случае можно лишь как их кооперативную реакцию.

Известно, что нагружение образца «с весьма малой постоянной скоростью» или длительное наблюдение за ползучестью позволяют получить изменение условий на его границах, определяемое микроструктурой грунта [5]. При нагружении постоянной может быть скорость увеличения давления или скорость увеличения деформации.

Целью исследования было выявление эффекта упрочнения глинистого грунта в опыте с компрессионным сжатием образца. Испытано 18 образцов разных грунтов.

**Цикличность скорости деформации при постоянно возрастающей нагрузке**

В настоящей работе применен способ компрессионного испытания с постоянной скоростью увеличения давления на образец и непрерывным измерением его осадки. В результате получен массив пар данных «давление-осадка», причем каждую величину можно использовать при обработке в качестве независимой переменной, так как обе они увеличиваются монотонно. При анализе изменения деформации ее удобно рассматривать как функцию давления. При оценке упрочнения грунта удобно рассматривать сопротивление образца сжатию в функции деформации.

Испытания проводились на автоматизированных приборах АКП-6Н и УСГ-А [6-8]. В качестве примера рассмотрим испытание пылевато-глинистого суглинка с числом пластичности 14 твердой консистенции при постоянно возрастающей нагрузке , где  − скорость увеличения осевого давления;  − время с начала нагружения, и непрерывном наблюдении осадки образца. Осевое давление прикладывалось со скоростью = 0,208 кПа/мин и регистрировалось с шагом осевой деформации  = 0,005 мм [9-10].

Как показал опыт, осевая деформация образца увеличивается ступенчато, размер ступеней , а скорость деформации изменяется  циклически (рисунок 1). Длина цикла деформации по оси давлений , где − длина нисходящей ветви цикла, а − длина восходящей ветви. Приращение деформации  на нисходящей ветви будем считать упругой частью деформации в цикле, приращение  на восходящей − неупругой [10].

Рисунок 1 – Осадка и скорость осадки образца грунта при компрессионном сжатии

постоянно возрастающим давлением

Максимальные  и минимальные  значения скорости деформации уменьшаются, в общем, с увеличением давления, по мере увеличения давления (рисунок 1). Они служат маркерами для выделения циклов деформации и их частей: упругой – на ветви  − и неупругой – на ветви .

Выделенные таким образом приращения давления отразим в виде зависимостей их от деформации образца, считая их приращениями его сопротивления при заданной деформации: и . Обе зависимости имеют общие черты:

1. они цикличны:  образует -циклы (показаны пунктиром на рисунке 2),  образует -циклы;
2. приращение сопротивления  в конце -цикла становится больше, чем в начале, приращение сопротивление  в конце -цикла становится больше, чем в начале, при увеличении деформации , что отражает упрочнение грунта;
3. -циклы и -циклы образуются в противофазе, т.е. увеличение приращений  сопровождается одновременным уменьшением приращений , и наоборот. Однако наименьшие значения тех и других увеличиваются с ростом деформации образца примерно одинаково, указывая на единую причину упрочнения.

Оценить упрочнение численно можно путем расчета увеличения приращений сопротивления на единицу деформации сжатия (осадки) образца. Компрессионные испытания 18-ти грунтов с числом пластичности от 7-и до 26-и дали значения упрочнения от нуля до 18 кПа/мм для  и от 0,3 до 13 кПа/мм для  [10].

Были вычислены также приращения плотности работы деформации на единицу осадки образца. Их значения лежат в диапазоне 105-580 мкДж/мм2/мм для упругой деформации и в диапазоне 113-590 мкДж/мм2/мм – неупругой.

Рисунок 2 – Зависимости приращений упругого и неупругого сопротивлений

от деформации сжатия образца

**Содержание компонентов грунта**

Связанная вода определяет как упругое сопротивление контактов, так и вязкое трение при скольжении глинистых микроагрегатов по микропорам. Роль ее в этих процессах недостаточно изучена, в силу сложности измерений механических параметров микроструктуры, а также ограниченности расчетных моделей [11-13].

Приращение работы деформации образца  на восходящей ветви -цикла отражает упругое сопротивление контактов, на нисходящей – выделение упругой энергии при образовании трещин отрыва. При этом снижается число упруго деформирующихся контактов на образовавшихся при отрыве поверхностях трещин, что порождает нисходящую ветвь -цикла.

Приращение работы деформации образца  в -цикле отражает изменение работы вязко-пластической деформации в микропорах. На нисходящей ветви -цикла сопротивление вязкому течению уменьшается вследствие нарастания упругого сопротивления контактов и уменьшения скорости вязкого скольжения микроагрегатов по микропорам. На восходящей ветви -цикла скорость вязкого скольжения, а вместе с ней и сопротивление в микропоре, резко возрастают в момент образования трещин отрыва.

Эти явления регистрируются в опыте благодаря кооперативной реакции групп контактов на неоднородностях микроструктуры грунта: наиболее крупных порах и наиболее крупных зернах неглинистых минералов [10]. Испытание грунта постоянно возрастающим давлением с непрерывным наблюдением за деформацией образца позволяет измерить эту реакцию.

Введем коэффициент работы упругой деформации , где  и  − приращения удельной (на единицу объема образца) работы упругой и неупругой деформации в -цикле и в -цикле при одном значении деформаций. Предположим, что упругая деформация определяется упруго деформирующейся прочносвязанной водой на поверхности минеральных частиц, а вязко-пластическая деформация определяется слабосвязанной водой микропор. Предположим также, что объемное содержание воды, участвующей в неупругой деформации, , пропорционально сумме объемных содержаний минеральных частиц  и упруго деформирующейся воды :

, (1)

а объемное содержание упруго деформирующейся воды пропорционально объемному содержанию минеральных частиц:

, (2)

Учитывая, что объемное содержание скелета грунта определяется через активную пористость , и добавляя очевидное соотношение

, (3)

получаем из уравнений (1)-(3) формулы для расчета объемного содержания минеральных частиц , упруго деформирующейся воды  и воды, участвующей в вязко-пластической деформации :

, (4)

, (5)

. (6)

Расчеты по формулам (4)-(6) для образца № 74 показали, с увеличением деформации сжатия объемное содержание минеральных частиц  медленно возрастает, а объемное содержание воды, участвующей в вязко-пластической деформации , возрастает быстрее, чем  (рисунок 3). Это дает основание утверждать, что увеличение  является определяющим фактором упрочнения грунта. Действительно, сближение микроагрегатов при увеличении  вызывает выдавливание свободной воды и способствует вовлечению бòльшего объема слабосвязанной воды в их взаимодействие. При этом уменьшается ширина микропор, и увеличивается вязкое сопротивление скольжению микроагрегатов.

Объемное содержание упруго деформирующейся воды  вначале уменьшается вследствие потери части упругих контактов при образовании трещин отрыва. Однако дальнейшее сжатие образца препятствует развитию в грунте таких трещин, величина  стабилизируется (рисунок 3), что отражает консервативный характер прочносвязанной воды.

Рисунок 3 – Зависимости объемных содержаний фаз от деформации сжатия образца

**Феномен упрочнения грунта**

Компрессионное сжатие грунта приводит к его упрочнению, что может быть использовано при расчетах сопротивления основания фундамента. Компрессионное испытание с постоянной скоростью увеличения давления и непрерывной регистрацией осадки показало, что упрочнение и разупрочнение идут параллельно в ходе нагружения и могут быть измерены по минимальным значениям приращений сопротивления, имеющим циклический характер изменения при увеличении осадки.

По результатам того же опыта измерено содержание в грунте разных фаз и установлено, что связанная вода, участвующая в вязко-пластической деформации, является определяющим фактором упрочнения и единой причиной увеличения как упругой части сопротивления образца, так и неупругой.

Слабосвязанная вода слабее взаимодействует с минеральными частицами, чем упруго деформирующаяся вода. Она оказывает вязкое сопротивление скольжению микроагрегатов по микропорам. Сопротивление скольжению микроагрегатов определяет упрочнение как при образовании трещин сдвига и отрыва, так и при движении по уже образовавшимся трещинам сдвига, что отразилось в близости графиков приращений упругого и неупругого сопротивлений.

С увеличением среднего напряжения в образце грунта ширина микропор уменьшается, следовательно, увеличивается вязкое сопротивление скольжению микроагрегатов, что регистрируется как упрочнение образца.

Грунт в основании фундамента всегда находится в сложном напряженно-деформиро-ванном состоянии. Предлагаемая методика позволяет оценить не только упрочнение основания, но распределение в нем содержания разных фаз грунта, главным образом, связанной воды.

***Литература:***

1. Тер-Мартиросян З.Г. Реологические параметры грунтов и расчеты оснований сооружений. – М.: Стройиздат, 1990. – 199 с.

2. Matthews M.C. The engineering application direct and simple shear testing / Ground Eng. 21(2), 1988. – P. 13-21.

3. Ter-Martirosyan Z.G., Ter-Martirosyan A.Z. Rheological properties of soil subject to shear // Soil Mechanics and Found. Eng. 49(6), 2013. – P. 219-226.

4. Reches Z. Networks of shear faults in the field and in experiments, Fragm. // Form and Flow Tract. Media, Proc. F3-Conf, 1986. – Р. 42−51.

5. Покровский Г.И. Исследования по физике грунтов. – М.: Гл. ред. строит. лит.; Ленинград: ОНТИ, 1937. – 135 с.

6. Денисенко В.В., Ляшенко П.А. Автоматический компрессионный прибор АКП-6Н для испытания грунтов постоянно возрастающей нагрузкой // Научные труды Кубанского государственного технологического университета, 2016, № 6. – С. 156-169. – URL: <http://ntk.kubstu.ru/file/1014>.

7. Снежкин Б.А., Денисенко В.В. Автоматизированная установка для лабораторных испытаний грунтов на срез УСГ-А // Отчет о НИОКР по теме № 7500 Министерства энергетики и электрификации СССР. – Краснодар: СевКавТИСИЗ, 1991. – 68 с.

1. Денисенко В.В., Ляшенко П.А. Совершенствование техники и технологии испытания грунтов: монография / КубГТУ. – Краснодар: Изд-во ООО «ПринтТерра», 2019. – 183 с.

9. Ляшенко П.А., Денисенко В.В., Шмидт О.А. и др. Упрочнение и разупрочнение глинистого грунта // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета, 2016, № 120(06). – С. 1541-1557. – URL: <http://ej.kubagro.ru/2016/06/pdf/103.pdf>.

10. Ляшенко П.А., Денисенко В.В. Исследование грунтов методом постоянно возрастающей нагрузки: монография. – Краснодар: КубГАУ, 2018. – 189 с.

11. Злочевская Р И. Связанная вода в глинистых грунтах. – М.: Изд-во МГУ, 1969. – 176 с.

12. Патент на изобретение РФ № 2699554, G01N 33/24. Способ определения максимальной плотности и оптимальной влажности грунта / П.А. Ляшенко, В.В. Денисенко и др. // Изобретения. Полезные модели, 2019, № 25.

13. Osipov V.I. Friction and cohesion as multifaceted factors of soil shear resistance // Soil Mechanics and Found. Eng. 53(3), 2016. – С. 143-151.

P.A. LYASHENKO, V.V. DENISENKO

***CLIMBING STRESS UNDER PRESSURE***

*Compression compression of the soil with a constant loading rate and continuous monitoring of deformation made it possible to identify a cooperative reaction of the contacts of particles and microaggregates. Based on it, the elastic and inelastic parts of the resistance to compression are identified and soil hardening is estimated. It is shown that hardening is accompanied by an increase in the volumetric content of water participating in inelastic deformation. A methodology for calculating the volumetric content of elastically deforming contact water in clay soil and the volumetric content of mineral particles is given.*

***Key words:*** *compression compression, constant loading rate, soil hardening, elastic and inelastic deformation.*