

УДК 624.131:504.55

DOI: 10.23671/VNC.2016.4.20897

СИСТЕМНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ МИКРОСТРУКТУР ЛЕССОВЫХ ГРУНТОВ СЕВЕРНОГО ПРЕДКАВКАЗЬЯ И ИХ ДИНАМИКА В ХОДЕ ПРИРОДНОГО САМОУПЛОТНЕНИЯ

© 2016 А.В. Гридневский, к.г.-м.н.

Академия строительства и архитектуры Донского государственного технического университета, 344022, Россия, г. Ростов-на-Дону, ул. Социалистическая, 162, e-mail: a328@ya.ru

На примере лессовых грунтов Северного Предкавказья иллюстрируется возможность количественного анализа многоуровневой организации микроструктур в аспекте их структурной прочности. С этой целью исследовался микрорельеф поверхностей разрушения образцов при разных увеличениях. Установлены параметры состояний микроструктур, изменяющиеся в ходе природного самоуплотнения лессовых грунтов.

Ключевые слова: микрорельеф поверхности разрушения, микроструктура, растровая электронная микроскопия, энтропия, просадочность, лессы.

Лессовые грунты широко распространены в Северном Предкавказье и других районах юга России. В субаэральной зоне верхнечетвертичная часть лессового массива обладает большой пористостью, недоуплотнена и при замачивании проявляет просадочные деформации. Для среднечетвертичных и нижнечетвертичных отложений характерна более высокая влажность или полное водонасыщение, повышенные статические нагрузки. Для них свойственна большая плотность и возможно отсутствие просадочных свойств.

Деформации лессовых грунтов при замачивании развиваются по трудно предсказуемому сценарию, обусловленному структурно-минеральными особенностями [Гридневский, 2014]. Механизм этого процесса исследуют с помощью микроструктурного анализа [Булыгина и др., 2013], включающего численное и физическое моделирование [Zourmpakis et al., 2003]. Обработка микроскопических изображений сопровождается трудностью идентификации элементов структуры – морфологии микроагрегатов и порового пространства [Ping et al., 2016].

В данной работе анализируются просадочные деформации грунтов как процесс трансформации многоуровневой структуры с точки зрения динамики и локализации прочности контактов между структурными элементами. Методика количественного анализа микроструктур основана на взаимосвязи морфологии поверхности разрушения грунта и пространственного распределения прочности структурных связей. Теоретически прочность корпускулярных систем исследовалась под руководством П.А. Ребиндера [Ребиндер, 1979]. Для модели твердого корпускулярного тела сопротивление разрушению определяется числом контактов в единице сечения и средней прочностью индивидуального контакта. Эта идея применена в работах В.И. Осипова и В.Н. Соколова при исследовании прочности глинистых грунтов [Осипов, Соколов, 2013]. Процесс разрушения образцов рассматривается нами как тест, позволяющий вскрыть отношение структурных связей к усилию разрыва и оценить их относительное распределение по прочности и в пространстве. Морфо-

логия поверхности скола обусловлена структурно-минеральными особенностями и должна тесно коррелировать с деформационно-прочностными свойствами.

Для исследования отобраны лессовидные суглинки природного сложения Северного Предкавказья и Нижнего Дона: г. Буденновск, г. Кропоткин, п. Старомарьевка, п. Орловский, г. Волгодонск, п. Мержаново и др. Грунты отбирались из зон аэрации, капиллярной каймы и обводнения. Осредненные показатели свойств грунтов приведены в таблице 1.

Таблица 1

Осредненные показатели физико-механических свойств лессовых грунтов

Н, м	ρ_d , т/м ³	n, %	I_p , %	S_r , ед.	E_o , мПа	E^B_o , мПа	ε_{sl} , %
8,5	1,50	43,9	13	0,51	12,7	4,8	4,1
18,0	1,53	43,1	14	0,54	18,0	9,8	0,5
27,0	1,65	38,7	13	0,96	-	11,6	0,0

Примечание. Н – глубина отбора образца; ε_{sl} – относительная деформация просадочности при нагрузке 0,3 мПа; ρ_d – плотность сухого грунта, г/см³; n – пористость, %; I_p – число пластичности, %; S_r – коэффициент водонасыщения, ед.; E_o и E^B_o – компрессионные модули общей деформации при естественной влажности и в условиях замачивания соответственно.

Предварительно высушенные образцы вырезались в виде прямоугольных призм сечением 8x8 мм². Поверхность разрушения готовилась раскалыванием образцов по линейным надрезам – концентраторам напряжений. Микрорельеф поверхностей разрушения (далее МПР) исследовался по наиболее характерным участкам методом растровой электронной микроскопии при увеличениях 50, 100, 250 крат. Уровни организации микроструктур (младший, средний и старший) отображались в грубом, среднем и мелком микрорельефах соответственно (табл. 2). Для количественного описания рельефа формировались стереоизображения. С помощью стереокомпаратора по ним строились профили МПР (900 точек на образец), используемые для оценки энтропии (H) высотных отметок [Шеннон, 1963], ее относительного значения (H/H_{max}) и степени организованности микрорельефа ($1-H/H_{max}$). Значения степени организованности микрорельефа O_r варьируют от 0,2 до 0,7. Минимальная упорядоченность рельефа характерна для супесей и легких суглинков зоны аэрации, максимальная – для более плотных грунтов с высокой дисперсностью и однородностью, а также насыщенных гидрофильными глинистыми минералами. Иерархическая организация структур оценивалась показателями O_r микрорельефов I, II, III порядка (табл. 2).

Таблица 2

Уровни микроструктур грунтов и МПР

Уровень микроструктуры	Измеряемые элементы микрорельефа, мкм	Порядок рельефа	Увеличение микроскопа, крат
Младший	300–400	Грубый (I)	50
Средний	100–200	Средний (II)	100
Старший	1–80	Мелкий (III)	250

Результаты исследований. Визуализация микроструктурного анализа выполнена в трех координатах: коэффициента водонасыщения грунтов (S_r), нагрузки от

собственного веса (P) и степени организованности (O_r) МПР I, II и III порядков.

Элементы МПР I порядка интенсивно меняются при средней степени водонасыщения грунтов ($S_r = 0,5 \div 0,7$) и незначительном возрастании статических нагрузок ($0,1 \div 0,2$ мПа). Параметр O_r увеличивается от 0,3 до 0,5 (рис. 1). При невысокой влажности грунта разрушение структуры происходит в межагрегатном пространстве – зоне невысокой концентрации контактов частиц и наибольшего напряжения на них. С ростом влажности формируется более компактная упаковка крупных структурных элементов (300-400 мкм), которая повышает упорядоченность МПР.

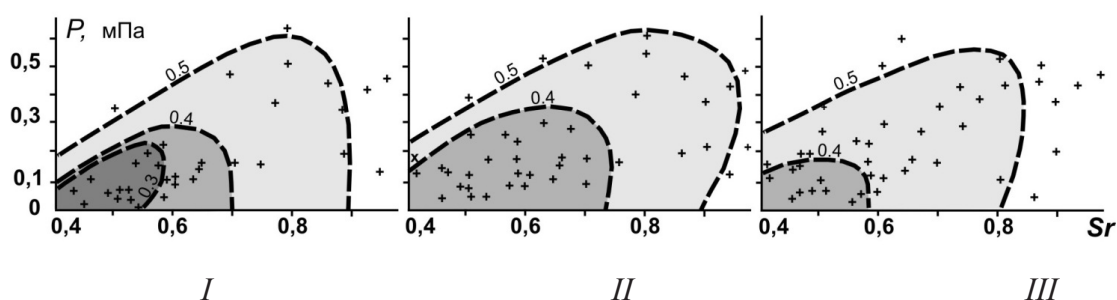


Рис. 1. Распределение степени организованности разных уровней микроструктур грунтов: штриховые линии – изолинии значений степени организованности рельефа поверхности разрушения (O_r); P , S_r – статическая нагрузка, мПа и коэффициент водонасыщения, ед. в точке отбора образцов; порядок микрорельефа поверхностей разрушения: I – грубый, II – средний и III – мелкий соответственно; штриховые линии – значения степени организованности МПР

Более сглаженным является МПР II порядка. Степень организованности его изначально выше ($O_r = 0,4$) и менее чувствительна к увеличению нагрузки (рис. 1). Сравнение показывает, что градиенты O_r при изменении статических нагрузок для МПР I и II порядков составляют 0,4 и 0,2 соответственно. Подобный эффект можно связать с большей прочностью микроагрегатов с размерами 100-200 мкм.

При разрушении микроагрегатов размером 10-80 мкм формируется МПР III порядка. Высокая степень организованности сохраняется в наиболее широком диапазоне влажности и статических нагрузок. Она обусловлена высокой концентрацией контактов и более однородным распределением прочности связей в структурных элементах. Кроме этого, микрорельеф III порядка в значительной степени определяется размерами структурных элементов грунта – пылеватых частиц, которые не разрушаются при раскалывании образца и ограничивают формирование его высокой неоднородности.

Из рисунка 1 видна тенденция увеличения степени организованности МПР от I к III порядку, которая обусловлена снижением вариаций размеров структурных элементов и способов их пространственного взаимодействия.

Совмещение графиков, приведенных на рисунке 1, позволяет идентифицировать условия увлажнения и статического напряжения в грунтовой толще, при которых параметры O_r первых двух уровней МПР сближаются (рис. 2). Этот эффект можно интерпретировать как нивелирование прочности контактов между частицами грунтов одновременно на нескольких уровнях микроструктур. Степень организованности МПР III порядка изначально имеет более высокие значения и демонстрирует инертность в полях влажности и давления. Такой эффект можно объяснить необходимостью большей энергии для разрушения структурных элементов этого уровня.

Интересно отметить, что параметры O_r могут иметь как низкие, так и высокие

значения. Как видно из рисунка 2, при минимальных значениях влажности и статической нагрузки степень организованности МПР наименьшая – $0,3 \div 0,4$. Она соответствует зоне аэрации грунтовой толщи, в которой недоуплотненные просадочные грунты находятся в неравновесном состоянии. В более глубоких и увлажненных частях массива прочность контактных связей нивелируется, глинистые микроагрегаты частично разрушаются и степень организованности МПР возрастает до $0,4 \div 0,5$. В ходе природного самоуплотнения структуры гомогенизируются и грунты постепенно переходят в устойчивое состояние. Участки рисунка без штриховки иллюстрируют состояния грунтов, при которых степень организованности МПР разных уровней не совпадает. В этом случае структурная организация находится в состоянии трансформации, а грунт находится в неустойчивом состоянии и сохраняет тенденцию к уплотнению в сложившихся условиях влажности и статического давления.

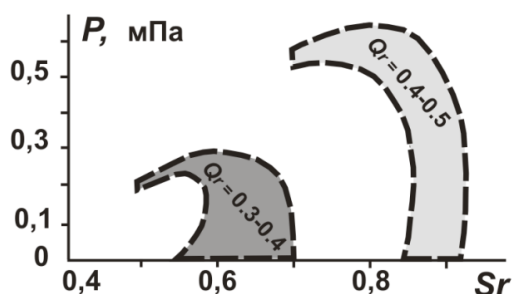


Рис. 2. Условия формирования одинаковой степени организованности трех уровней микроагрегатов в лессовых грунтах; условные обозначения см на рис. 1

Большую разницу в степени организованности разных уровней микроагрегатов следует ожидать для просадочных грунтов в области капиллярной каймы, где прочность структурных связей снижена, но их дифференциация еще велика. Такой же эффект может проявляться в начальной стадии деформаций при увлажнении грунтов под фундаментами зданий. При быстром водонасыщении грунтов трансформация микроагрегатов под нагрузкой проявляется несинхронно на всех уровнях. Чем ярче выражен этот эффект, тем дольше развиваются послепросадочные деформации, растягивающихся на многие месяцы за счет медленного изменения прочности микроагрегатов [Чмшкян, 2012].

По мере насыщения грунтов глинистой фракцией количество и площадь контактов между частицами возрастают. При этом контактные напряжения снижаются, структурные элементы оказываются более устойчивыми к разрушению и снижают возможность провальных осадков грунтов при замачивании.

Заключение

Многоуровневый анализ МПР является эффективным инструментом для исследования механизма структурной трансформации лессовых грунтов в ходе их уплотнения. Он позволяет идентифицировать динамику разных уровней организации микроагрегатов в ходе просадочных деформаций. Следует ожидать его высокую информативность при изучении влияния дисперсного и минерального составов лессовых грунтов на формирование их структурных особенностей. Полученные данные о взаимосвязях статических нагрузок, водонасыщения грунтов и их микроагрегатных параметров целесообразно учитывать при изучении неоднородности деформационно-прочностных свойств массивов с целью опробования и формирования прогнозов их динамики в условиях техногенеза.

Литература

1. Булыгина Л.Г., Соколов В.Н., Кошелев А.Г. Влияние особенностей микростроения глинистых грунтов различного генезиса на их деформирование при компрессионных и штамповых испытаниях // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология, 2013. – №5. – С. 552–559.
2. Гридневский А.В. Методические аспекты геоэкологического картирования территории Ростовской области // Сергеевские чтения. Развитие научных идей академика Е.М. Сергеева на современном этапе. Выпуск 16. Материалы годичной сессии научного Совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (21 марта 2014 года). – М.: РУДН, 2014. – С. 243–246.
3. Осипов В.И., Соколов В.Н. Глины и их свойства. Состав, строение и формирование свойств. – М.: ГЕОС.2013. – 576 с.
4. Ребиндер П.А. Поверхностные явления в дисперсных системах: физико-химическая механика. – М.: Наука, 1979. – 381 с.
5. Чмшкян А.В. Совершенствование методов расчета просадочных деформаций // Инженерный вестник Дона, 2012, № 4, ч.2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2012/1256 (доступ свободный).
6. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике. – М.: Иностранная литература, 1963. — 832 с.
7. Ping Li, Vanapallia Sai K., Tonglu Li. Review of collapse triggering mechanism of collapsible soils due to wetting // J. of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2016. – Vol.8, Issue 2. – Pp. 256–274.
8. Zourmpakis A., Boardman D.I., Rogers C.D.F. Creation of artificial loess soils. Springer Proceedings in Physics, Vol. 93, p.p. 123-134. Proceedings of the International Conference «From Experimental Evidence towards Numerical Modeling of Unsaturated Soils», Weimar, Germany, September 18–19, 2003, Vol. 1.

DOI: 10.23671/VNC.2016.4.20897

SYSTEMIC ORGANIZATION AND MICROSTRUCTURES DYNAMICS OF THE NATURAL SELF-PACKING OF LOESS SOILS

© 2016 A.V. Gridnevskiy, Sc. Candidate (Geol.-Min.)

Academy of Civil Engineering and Architecture of Don State Technical University,
344022, Russia, Rostov-on-Don, st.Socialisticheskaya, 162, e-mail: a328@ya.ru

On the example of the loess soils of Northern Ciscaucasian there is shown the possibility of quantitative analysis of multi-level organization of microstructures in terms of their structural strength. The asynchronous transformation of the structural elements of different levels of the organization at the natural consolidation has been established. There are conditions of soil moisture and static pressure in which microstructures are both similar and dissimilar degree of order at several levels of their organization, which corresponds to different states of self-packing of natural soils.

Keywords: micro-relief surface destruction, microstructure, scanning electron microscopy, entropy, subsidence, loess.