

УДК 624.131:624.131.543

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЧНОСТИ ГРУНТА ПО ИСПЫТАНИЮ НА КОМПРЕССИОННОЕ СЖАТИЕ

© 2018 г. Г.П. Постоев, А.И. Казеев, В.Н. Кутергин

Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН (ИГЭ РАН),
Уланский пер., д. 13, стр.2, Москва, 101000 Россия.
E-mail: opolzen@geoenv.ru

Поступила в редакцию 23.05.2017 г.
После исправления 10.09.2017 г.

Согласно закону Кулона-Мора прочности грунта, установлены зависимости между главными напряжениями и характеристиками прочности грунта в условиях компрессионного сжатия. По этим зависимостям предложено определять значения угла внутреннего трения, сцепления и структурной прочности грунта по значениям вертикального и бокового давлений без построения огибающей кругов Мора.

Ключевые слова: компрессионное сжатие, закон Кулона-Мора, угол внутреннего трения, сцепление, структурная прочность, боковое давление.

DOI: 10.7868/S0869780318030043

ВВЕДЕНИЕ

Одна из основных проблем механики грунтов, инженерной геологии и геоэкологии — определение реальной прочности грунта в массиве в условиях его естественного залегания, значение которой можно использовать как в расчетах устойчивости и деформирования грунтовых массивов во взаимодействии с сооружениями, так и при характеристике среды проявления опасных геологических процессов.

Для учета разного рода неоднородностей грунтов наряду с лабораторными испытаниями стремятся использовать полевые методы определения их физико-механических свойств (статическое и динамическое зондирование, штамповое испытание, прессиометрия, вращательный срез) и геофизические исследования. Полевые исследования позволяют охватить больший объем грунтового массива, однако ожидания получать по ним более представительные данные о прочностном состоянии массива пока остаются практически недостижимыми. Тем более, как правило, данные полевых исследований увязывают с результатами лабораторных испытаний грунтов, получая результирующие графики и эмпирические зависимости.

Основные параметры механических свойств, характеризующие прочность и деформационное поведение грунтовых массивов, в соответствии

с нормативными документами, — угол внутреннего трения (φ), удельное сцепление (c) и модуль деформации грунтов (E), предел прочности на одноосное сжатие скальных грунтов (R_c).

Ниже рассматривается новый подход к определению показателей прочности, базирующийся на законе прочности грунта Кулона-Мора в главных напряжениях, с учетом структурной прочности.

Прочность грунта по Кулону-Мору. Структурная прочность

Под прочностью грунтов понимается свойство сопротивляться разрушению или сопротивляться воздействию внешних сил без полного разрушения.

Условием прочности грунта по Кулону-Мору является выражение:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3 + 2c \cdot \operatorname{ctg} \varphi} = \sin \varphi, \quad (1)$$

где σ_1 и σ_3 — соответственно наибольшее и наименьшее главные напряжения, $\sigma_1 > \sigma_2 \geq \sigma_3$ (σ_2 — среднее главное напряжение, не учитываемое в данном условии), φ и c — эффективные значения угла внутреннего трения и сцепления грунта.

Выражение (1) нередко называют условием прочности грунта в образце или в точке массива с горизонтальной дневной поверхностью. Оно

определяет, что предельные наибольшие сжимающие напряжения σ_1 , действующие на замкнутый элементарный объем грунта (образец), вызывают горизонтальные напряжения распора $\sigma_3 = \sigma_2$ на боковые границы элементарного объема. Предельные соотношения между σ_1 и σ_3 зависят от φ и c в соответствии с выражением (1).

По существу полагается, что сжатие грунта происходит при отсутствии поперечных деформаций (компрессионные испытания), например, в жесткой обойме с измерением реактивного бокового давления (распора) s_3 .

Выражение (1) может быть записано также следующим образом [6]:

$$\frac{\sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_{str}} = \operatorname{tg}^2(45 - \varphi/2), \quad (2)$$

где σ_{str} – структурная прочность грунта.

Физически структурная прочность грунта на сжатие соответствует предельному давлению, которое может выдержать структурный каркас грунта без разрушительных деформаций. Графически структурная прочность равна отрезку, отсекаемому на оси абсцисс диаграммы Мора кругом, проходящим через начало координат, т.е. как и следует из выражения (2), при $\sigma_3 = 0$, $\sigma_1 = \sigma_{str}$. При $\sigma_1 \leq \sigma_{str}$ прочность структурных связей сохраняется, а при $\sigma_1 = \sigma_{str}$ она полностью отобилизована.

Аналитически структурная прочность определяется в соответствии с (2) через значения φ и c :

$$\sigma_{str} = 2c \operatorname{ctg}(45 + \varphi/2). \quad (3)$$

Экспериментально значение σ_{str} может быть получено из испытания грунта на одноосное сжатие – как предельное давление на образец грунта.

Исследования Е.И. Медкова. Процесс сжатия грунта в условиях невозможности боковых деформаций с измерением вертикального и бокового давления исследован профессором Е.И. Медковым [4] (рис. 1).

Е.И. Медков выделил три характерных фазы при сжатии глинистого грунта. Фаза I – вертикальные (осевые) напряжения σ_1 ниже предела упругости. Наблюдаются упругие вертикальные деформации грунта, боковой распор σ_3 отсутствует. Фаза II – может появиться плавный рост бокового распора (для пластичных грунтов). В грунтах с жесткими связями σ_3 в этой фазе практически отсутствует. Кроме упругих деформаций в данной фазе возникают также локальные упругопластические сдвиги, особенно при приближении

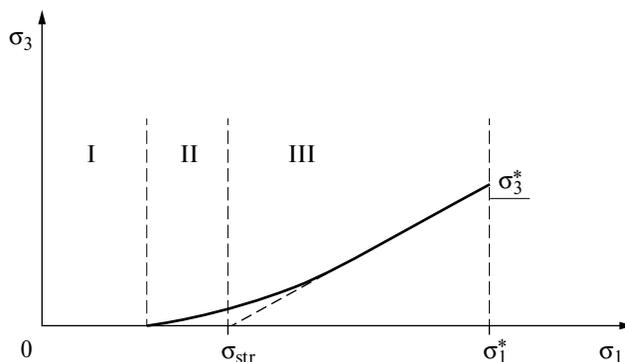


Рис. 1. Диаграмма бокового распора и фазы напряженно-деформационного состояния глинистого грунта в компрессионных условиях (по Е.И. Медкову [4]).

к предельным давлениям. Фаза III характеризуется линейной зависимостью между приращениями вертикального давления и бокового распора при компрессионном испытании образца грунта. При незначительном снижении σ_3 возникают пластические деформации, и затем по достижении σ_3^* (при $\sigma_1^* = \text{const}$, см. рис. 1) происходит разрушение грунта. В сыпучих грунтах структурная прочность практически отсутствует, и соотношение между σ_1 и σ_3 соответствует фазе III, что следует также из критерия Кулона-Мора (3) при $\sigma_{str} = 0$.

Таким образом, структурная прочность является важнейшей характеристикой грунта, определяющей сопротивление структурных связей между частицами структурного каркаса грунта внешнему давлению.

ИЗВЕСТНЫЕ СПОСОБЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОЧНОСТИ ГРУНТА

При определении прочности водонасыщенных глинистых грунтов (φ , c) в условиях неконсолидированного сдвига нередко используют принцип эффективных напряжений. К. Терцаги полагал, что сопротивление сдвигу может определяться только прочностью контактов между частицами структурного каркаса грунта, а давление в поровой воде, являясь нейтральным, имеет важное значение при оценке несущей способности массива. Однако в настоящее время установлено, что теория эффективных напряжений К. Терцаги требует корректировки в части учета внутренних процессов, возникающих в водонасыщенных глинистых грунтах в соответствии с физико-химической теорией контактных взаимодействий между структурными элементами грунта [5].

Определение механических свойств грунта (ϕ и c) по методу одноплоскостного среза по фиксированной плоскости заключается в сдвиге нижней части образца относительно его верхней части касательной нагрузкой при одновременном воздействии на образец нагрузки, нормальной к плоскости среза. Определяют предельное касательное напряжение, при котором происходит срез образца при заданном нормальном напряжении. Недостаток данного способа – необходимость подготовки не менее 3-х образцов грунта одного инженерно-геологического элемента. Это повышает стоимость определения свойств грунта, вызывает трудности в сохранении исходной структуры грунта в подготовленных образцах и единой технологии испытания. Особую трудность представляют испытания водонасыщенных глинистых грунтов.

Известен также способ определения механических свойств грунтов путем сжатия образца грунта в одометре с измерением осевого давления на образец грунта, с определением параметров уплотнения образца грунта под сжимающей осевой нагрузкой в условиях невозможности боковых деформаций [1]. Однако при данном способе испытания грунта в одометре не определяются характеристики его прочности, которые необходимы для расчетов несущей способности и деформируемости грунтов в основании сооружений и прогноза развития опасных геомеханических процессов, вызывающих нарушение равновесия и разрушительные деформации массивов.

К настоящему времени разработаны способы и устройства определения характеристик прочности по испытаниям грунтов в условиях компрессионного сжатия с измерением бокового давления. Но для определения характеристик прочности грунтов требовалась дополнительная операция по построению огибающей предельных кругов Мора, что обосновывалось специальными допущениями [1, 4].

СПОСОБ ИГЭ РАН ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОЧНОСТИ ГРУНТА

В ИГЭ РАН разработан способ определения показателей прочности грунта в условиях компрессионного сжатия грунта с измерением бокового давления по результатам одного испытания без разрушения грунта и построения огибающей предельных кругов Мора на основе закона Кулона-Мора предельного состояния грунта в точке в главных напряжениях [7].

Предлагаемый способ определения механических свойств грунта путем осевого сжатия образца в условиях невозможности бокового расширения с получением характеристик прочности грунта (угла внутреннего трения, сцепления и структурной прочности на сжатие) включает:

- подготовку образца грунта,
- установку образца в обойму прибора с перфорированными штампами,
- создание осевого давления на образец,
- измерение параметров, характеризующих состояние образца грунта.

При сжатии образца грунта в процессе роста осевого активного давления (σ_{li}) производят измерение и бокового реактивного давления – отпора (σ_{3i}). Во время испытания контролируют изменение отношения m_i между приращениями бокового $\Delta\sigma_{3i}$ и осевого $\Delta\sigma_{li}$ напряжений (где $i = 1, 2, \dots, n$ – текущие значения измерений). Испытание прекращают при некотором значении осевого давления σ_{li} , когда соблюдается следующее условие:

$$\Delta\sigma_{3i}/\Delta\sigma_{li} = m_{i-2} = m_{i-1} = m_i = m = \text{const.}$$

Параметры прочности грунта рассчитывают по формулам:

угол внутреннего трения

$$\phi = 2(45 - \arctg \sqrt{\Delta\sigma_{3i} / \Delta\sigma_{li}}), \quad (4)$$

структурная прочность грунта

$$\sigma_{str} = \sigma_{li} - \sigma_{3i} / m, \quad (5)$$

сцепление $c = \sigma_{str} / 2 \operatorname{tg}(45 + \phi/2)$, (6)

где σ_{li} , σ_{3i} – текущие значения давлений, на этапе $\sigma_{li} > \sigma_{str}$; m – коэффициент бокового давления грунта в предельном состоянии по Кулону-Мору при $\sigma_{li} > \sigma_{str}$, $m = \operatorname{tg}^2(45 - \phi/2)$.

На рис. 2 изображена принципиальная схема осевого сжатия образца грунта в условиях невозможности бокового расширения с измерением реактивного бокового давления.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

Результаты испытаний по схеме на рис. 2 для приведенного ниже примера представлены на рис. 3, а на рис. 4 – обобщенные результаты консолидировано-недренированных испытаний на одноплоскостной срез грунтов из выработок ИГС-2 и ИГС-4.

Пример. В ходе инженерно-геологических изысканий на строительной площадке были отобраны монолиты из выработок ИГС-2 и ИГС-4 для одного из инженерно-геологических элементов, и проведены испытания на одноплоскостной срез (рис. 4). По пяти образцам получены значения угла внутреннего трения $\varphi = 21^\circ$; $\text{tg}\varphi = 0.38$; $c = 19$ кПа.

На одном образце из выработки ИГС-4, изготовленном из монолита, отобранного с глубины 12.70–12.85 м проведены компрессионные испытания в приборе, позволяющем контролировать боковое давление (см. рис. 2). По результатам измерения текущих значений σ_1 и σ_3 в процессе сжатия образца грунта построен график зависимости $\sigma_3 = f(\sigma_1)$, и выявлена часть графика при $\sigma_{1i} > \sigma_{1A}$, где зависимость линейная, а отношение $\Delta\sigma_3/\Delta\sigma_1 = \text{const} = \text{tg}\beta$.

Получено, что $\Delta\sigma_3/\Delta\sigma_1 = m = 0.4724$. Из равенства (4) находим $\varphi = 21^\circ$. Структурная прочность определена из выражения (5): $\sigma_{\text{str}} = 55.3$ кПа (при $\sigma_1 = 70$ кПа, $\sigma_3 = 6.95$ кПа). Сцепление c определяется по формуле (6): $c = 19$ кПа (при $\varphi = 21^\circ$ и $\sigma_{\text{str}} = 55.3$ кПа).

Если при испытаниях на одноплоскостной срез, когда для определения характеристик прочности грунта потребовалось 5 образцов грунта с ненарушенной структурой, по предложенному способу [7] на одном образце получены искомые значения φ , c и σ_{str} . При этом для получения характеристик прочности водонасыщенного грунта в условиях эффективных напряжений, в соответствии с теорией К. Терцаги, потребовалось бы проведение каждого испытания в условиях завершённой консолидации (т.е. возросло бы время экспериментальных исследований) или измерение порового давления, чтобы корректировать величины уплотняющих полных напряжений.

Кроме того, в распределении эффективных напряжений в тонкодисперсных глинистых грунтах следовало бы учитывать особенности контактных взаимодействий между частицами грунта, обуславливающих возникновение внутренних напряжений [5], которые могут влиять на экспериментальные определения величин сопротивления сдвигу.

В испытаниях грунта в условиях компрессионного сжатия определяются характеристики прочности, отражающие все взаимодействия в структурном каркасе (скелете) грунта, которые проявляются в конечном итоге в значениях σ_{1i} и σ_{3i} — основных составляющих условия прочности грунта по Кулону-Мору.

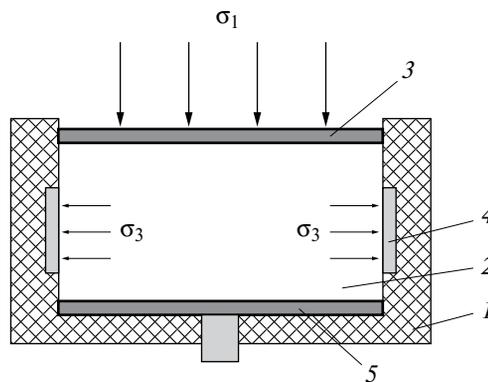


Рис. 2. Принципиальная схема осевого сжатия образца грунта в условиях невозможности бокового расширения с измерением реактивного бокового давления: 1 — корпус прибора; 2 — образец грунта; 3 — верхний перфорированный штамп; 4 — устройство для измерения реактивного бокового давления; 5 — нижний перфорированный штамп.

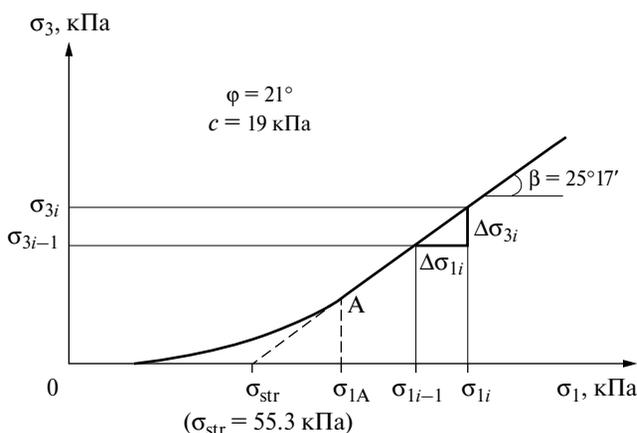


Рис. 3. Результаты проведения испытания по схеме на рис. 2 для приведенного примера.

Следует отметить, что при интерпретации результатов компрессионного сжатия глинистых грунтов преимущественно рассматривается процесс уплотнения образца грунта в вертикальном направлении (уменьшение его пористости). Однако неизбежно происходит уплотнение грунта и в горизонтальном направлении, которое часто упускается из виду.

Согласно исследованиям П.А. Ляшенко [3], в компрессионном испытании при $\sigma_1 > \sigma_{\text{str}}$ грунт дробится на множество клиньев. И в штамповых испытаниях также образуются клинья, плотно прилегающие друг к другу. По мнению П.А. Ляшенко результатом появления “первой тотальной поверхности скольжения” является резкое

увеличение сжимаемости, т.е. при достижении условия $\sigma_1 > \sigma_{str}$. Один из факторов образования новых структурных элементов и новых граничных макро-поверхностей между ними – возникновение распорных горизонтальных главных напряжений $\sigma_2 = \sigma_3$ и бокового деформирования грунта в образце при компрессионном сжатии.

Контроль двух главных (σ_1 и σ_3) напряжений позволяет учесть качественное изменение сжимаемости грунта вследствие подобного нагружения исходного скелетного каркаса грунта, его преобразования в процессе вертикального сжатия и уплотнения по двум направлениям, со всеми взаимодействиями по внутренним поверхностям в грунте, как между его частицами, так и по вновь образованным границам между структурными элементами в процессе деформирования исходного скелетного каркаса. При этом грунт не доводится до разрушения и не строится огибающая кругов Мора, как это делалось ранее [1, 2, 4].

ВЫВОДЫ

Предложенный способ определения характеристик прочности грунта позволяет значительно сократить расходы на производство лабораторных исследований для определения механических свойств грунтов, снизить трудозатраты, а также повысить достоверность определения параметров прочности грунта, избегая неизбежных методических погрешностей, связанных с сохранностью природной структуры и состояния грунта, а также обеспечением однородности образцов, отбираемых для исследуемого инженерно-геологического элемента грунта из выработок при инженерно-геологических изысканиях. Определение характеристик прочности грунта полностью базируется на законе Кулона-Мора предельного состояния грунта в точке в главных напряжений, что позволяет использовать полученные параметры для оценки состояния грунтового массива при различных видах силового воздействия [6].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болдырев Г.Г. Методы определения механических свойств грунтов. Состояние вопроса. Пенза: ПГУАС, 2008. 696 с.
2. Лабораторные работы по грунтоведению. Уч. пос. / Под ред. В.Т. Трофимова и В.А. Королева. М.: Высш. шк., 2008. 519 с.

3. Ляшенко П.А. О деформации глинистого грунта в основании фундамента // Тр. юбилейной конф., посвященной 50-летию РОМГГиФ. М.: РОМГГиФ, 2007. Т. 2. С. 114–118.
4. Медков Е.И. Фазы сопротивления грунта // Механика грунтов, основания и фундаменты. Тр. МИИТа. М.: ТрансЖелдориздат, 1959. Вып. 100. С. 26–61.
5. Осипов В.И. Физико-химическая теория эффективных напряжений в грунтах // Грунтоведение. 2013. № 2. С. 3–34.
6. Постоев Г.П. Предельное состояние и деформации грунтов в массиве (оползни, карстовые провалы, осадки грунтовых оснований). М.: СПб.: Нестор-История, 2013. 100 с.
7. Постоев Г.П., Казеев А.И., Кутергин В.Н. Пат. РФ 2600494 “Способ определения механических свойств грунтов” // Бюл. изобр. 2016. № 29.

REFERENCES

1. Boldyrev, G.G. *Metody opredeleniya mekhanicheskikh svoystv gruntov. Sostoyanie voprosa* [Methods of determination of mechanical soil properties. The state of the problem]. Penza, PGUAS, 2008. 696 p. (in Russian).
2. *Laboratornye raboty po gruntovedeniyu* [Laboratory works on soil science], V.T. Trofimov and V.A. Korolev, Eds. Textbook. Moscow, Vysshaya Shkola, 2008. 519 p. (in Russian).
3. Lyashenko, P.A. About the deformation of clay soils under foundations. *Trudy yubileinoi konferentsii, posvyashchennoi 50-letiyu ROMGGIF* [Conf. Proc., dedicated to 50-th anniversary of ROMGGIF]. Moscow, ROMGGIF, 2007, vol. 2, pp. 114–118 (in Russian).
4. Medkov, E.I. Phases of soil resistance. Soil mechanics, bases and foundations. *Trudy MIITa*. [Conf. Proc. of MIIT] Moscow, Transzheldorizdat, 1959, vol. 100, pp. 26–61 (in Russian).
5. Osipov, V.I. *Fiziko-khimicheskaya teoriya effektivnykh napryazhenii v gruntakh* [Physico-chemical theory of effective stresses in soils]. *Gruntovedenie*, 2013, no. 2, pp. 3–34 (in Russian).
6. Postoev, G.P. *Predel'noe sostoyanie i deformatsii gruntov v massive (opolzni, karstovye provaly, osadki gruntovykh osnovanii)* [Limit state and deformations of soils in a soil mass (landslides, karst collapses, subsidence of soil basement)]. Moscow, St. Petersburg, Nestor-Istoriya, 2013, 100 p. (in Russian).
7. Postoev, G.P., Kazeev, A.I., Kutergin, V.N. *Sposob opredeleniya mekhanicheskikh svoystv gruntov* [Method of determining mechanical soil properties]. Patent RF no. 2600494. 2016. no. 29 (in Russian).

SOIL STRENGTH PARAMETERS DETERMINED BY COMPRESSION TEST

G.P. Postoev, A.I. Kazeev, V.N. Kutergin

*Sergeev Institute of Environmental Geosciences, Russian Academy of Sciences,
Ulansky per. 13, str.2, Moscow, 101000 Russia.*

E-mail: opolzen@geoenv.ru, www.opolzni.ru.

The determination of actual soil strength in a soil massif in its natural bedding conditions is among the main problems of soil mechanics, engineering geology and geoecology. These parameters are used in the stability analysis, for the assessment of soil massif deformations upon its interaction with engineering structures, as well as in the study of hazardous geological processes. A direct shear test is the most common method of determining soil strength characteristics. The disadvantage of this method is the necessity of testing of no less than 3 samples per each engineering-geological element. A new method for determination of consolidated soil strength characteristics by a compression test of a soil sample has been developed at IEG RAS. The lateral stress measured in the course of one test allows obtaining the values of cohesion, angle of internal friction and structural strength. The method does not require building the envelope line of limit Mohr's circles. Thus, the proposed method for the determination of soil strength characteristics can significantly reduce the cost of laboratory tests and labor costs. It increases the accuracy of determination of soil strength characteristics. Inevitable methodological errors are excluded, which are related to the preservation of natural soil structure (in a sample) and condition, and ensure the homogeneity of samples upon engineering geological survey.

Key words: *soil strength properties, soil structural strength, Coulomb-Mohr criterion, angle of internal friction, cohesion, lateral stress, compression testing.*