

---



---

**ГРУНТОВЕДЕНИЕ  
И МЕХАНИКА ГРУНТОВ**


---



---

УДК 624.131:624.131.543

## АНАЛИЗ СЖАТИЯ ВОДОНАСЫЩЕННОГО ГЛИНИСТОГО ГРУНТА НА ОСНОВЕ ЗАКОНА ПРОЧНОСТИ КУЛОНА–МОРА

© 2018 г. Г. П. Постоев<sup>1,\*</sup><sup>1</sup>Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук,  
Уланский пер., д. 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия

\*E-mail: opolzen@geoenv.ru

Поступила в редакцию 05.03.2018 г.

Закон прочности Кулона–Мора в главных напряжениях позволяет рассчитать структурную прочность глинистого грунта и горизонтальные напряжения распора и отпора, которые определяют условия равновесия в точке. С ростом вертикального давления на водонасыщенный грунт, не превышающего структурную прочность, давление полностью воспринимается поровой водой и через нее передается на минеральный скелет. На этом этапе прочность грунта в точке сохраняется, горизонтальные составляющие напряжений (распор), избыточное поровое давление и фильтрация отсутствуют. При превышении внешнего вертикального давления (и соответственно равного ему порового) структурной прочности грунта возникает избыточное поровое давление в точке. Появляется боковое давление (при отсутствии или затрудненной фильтрации воды) – суммарное действие избыточного порового давления (приращение над значением структурной прочности) и эффективного горизонтального напряжения в точке (распор в минеральном скелете). Рассмотрены закономерности изменения мобилизованной прочности грунта в точке в соответствии с критерием Кулона–Мора в главных напряжениях в условиях компрессионного сжатия, свободной фильтрации, при воздействии напором подземных вод.

**Ключевые слова:** прочность, закон Кулона–Мора, главные напряжения, боковое давление (распор, отпор), структурная прочность, избыточное поровое давление, напор подземных вод, фильтрация

DOI: 10.1134/S0869780318040087

### ВВЕДЕНИЕ

Как известно, в модели полностью водонасыщенного грунта, предложенной К. Терцаги, не предусмотрен учет структурной прочности. Сжатие водонасыщенного грунта представлено давлением перфорированного поршня на стальную пружину, которая полностью находится в воде. Опускание поршня происходит вследствие вытеснения воды через отверстия в поршне (моделируется фильтрационная способность грунта) и завершается, когда давление поршня полностью воспринимается пружиной, т.е. в момент когда отсутствуют давление на воду и движение воды через отверстия в поршне. В данном случае моделируются фильтрационная консолидация грунта и распределение давления поршня (внешнего давления) на эффективную (в скелете грунта, т.е. в пружине) и нейтральную (в поровой воде) составляющие.

При рассмотрении прочности грунта предельное состояние по Кулону–Мору в соответствии с описанной моделью обычно представляется в виде предельного сопротивления сдвигу неконсолидированного грунта:

$$\tau = c + (\sigma - u) \operatorname{tg} \varphi, \quad (1)$$

где  $\tau$  – значение касательных напряжений;  $\sigma$  – нормальное напряжение от внешней нагрузки,  $u$  – поровое давление,  $\varphi$  и  $c$  – консолидированные характеристики (в эффективных напряжениях) соответственно угла внутреннего трения и сцепления.

В формуле (1) поровое давление рассматривается в качестве важнейшего фактора, обуславливающего несущую способность грунтового массива. Отмечается, что в начальный момент, когда внешняя нагрузка передается полностью на воду, несущая способность грунта в соответствии с (1) может принимать минимальные значения.

Однако данное представление прочности водонасыщенного глинистого грунта встречает возражения в части недооценки роли контактных взаимодействий между минеральными частицами грунта, которые могут влиять на формирование эффективных напряжений [6]. Кроме того, ряд исследователей считают преувеличенной роль порового давления, в то время как главным фактором прочности глинистых грунтов являются структурные связи [1, 4].

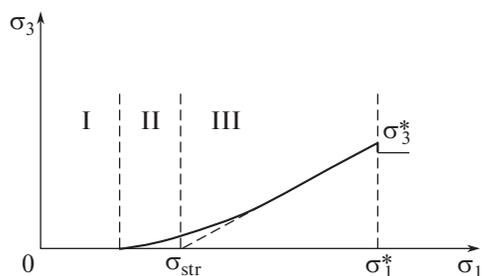


Рис. 1. Диаграмма бокового распора и фазы работы глинистого грунта в компрессионных условиях (по Е.И. Медкову).

В данной статье рассматриваются закономерности сопротивления сжатию водонасыщенного глинистого грунта с учетом прочности структурных связей, порового давления и их влияния на значения главных напряжений (осевого и бокового), определяющих прочность грунта в соответствии с критерием Кулона–Мора в главных напряжениях.

#### УСЛОВИЕ ПРОЧНОСТИ В ГЛАВНЫХ ЭФФЕКТИВНЫХ НАПРЯЖЕНИЯХ

Основной закон прочности грунтов Кулона–Мора в главных эффективных напряжениях имеет вид:

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

где  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$  – соответственно наибольшее и наименьшее главные напряжения,  $\sigma_1 > \sigma_2 \geq \sigma_3$  ( $\sigma_2$  – среднее главное напряжение, не учитываемое в данном условии, в цилиндрическом образце  $\sigma_3 = \sigma_2$ ),  $\varphi$  и  $c$  – значения угла внутреннего трения и сцепления грунта.

Выражение (2) нередко называют условием прочности грунта в образце или в точке массива с горизонтальной дневной поверхностью. Оно определяет, что предельные наибольшие сжимающие напряжения  $\sigma_1$ , действующие на замкнутый элементарный объем грунта (цилиндрический образец), вызывают горизонтальные напряжения распора  $\sigma_3 = \sigma_2$  на боковые границы элементарного объема. Предельные соотношения между  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$  зависят от  $\varphi$  и  $c$  в соответствии с (2). Наименьшие и средние значения горизонтальных напряжений появляются в массиве при их распределении по силовым линиям, которые возникают в зоне влияния локального силового возмущения [8].

По существу полагается, что сжатие грунта происходит при отсутствии поперечных деформаций, т.е. в условиях компрессионного сжатия с возникновением в грунте горизонтальных напря-

жений (распора) и мобилизацией реактивного бокового давления (отпора)  $\sigma_3$ .

Выражение (2) может быть записано следующим образом [8]:

$$\frac{\sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_{str}} = \operatorname{tg}^2(45 - \varphi/2), \quad (3)$$

где  $\sigma_{str}$  – структурная прочность грунта,  $\sigma_{str} = 2c \operatorname{tg}(45 + \varphi/2)$ .

Экспериментальное значение  $\sigma_{str}$  может быть получено при испытании грунта на одноосное сжатие – как предельное давление на образец грунта.

Процесс сжатия грунта в условиях невозможности боковых деформаций с измерением вертикального и бокового давления исследован профессором Е.И. Медковым по результатам испытаний грунтов на стабилометре М-2 (рис. 1) [5].

Е.И. Медков выделил три характерных фазы при сжатии глинистого грунта:

– I – вертикальные (осевые) напряжения  $\sigma_1$  ниже предела упругости; наблюдаются упругие вертикальные деформации грунта, боковой распор  $\sigma_3$  отсутствует;

– II – может появиться плавный рост бокового распора (для пластичных грунтов); в грунтах с жесткими связями  $\sigma_3$  в этой фазе практически отсутствует; кроме упругих деформаций возникают также локальные упруго-пластические сдвиги, особенно при приближении к предельным давлениям;

– III – характеризуется линейной зависимостью между приращениями вертикального давления и бокового распора в компрессионном испытании образца грунта и при незначительном снижении  $\sigma_3$  возникают пластические деформации и затем по достижении  $\sigma_3^*$  (при  $\sigma_1 = \operatorname{const}$ , см. рис. 1) происходит разрушение грунта.

В сыпучих грунтах структурная прочность практически отсутствует и соотношение между  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$  соответствует фазе III, что следует также из критерия Кулона–Мора (3) при  $\sigma_{str} = 0$ .

Таким образом, при  $\sigma_{1i} \leq \sigma_{str}$  внутренние горизонтальные напряжения в грунте, возникающие при указанных значениях вертикального давления, обеспечивают на этом этапе сжатия грунта отсутствие боковых деформаций распора, которые бы свидетельствовали о начале разрушения структурных связей в точке. Появление бокового давления (фаза III по Е.И. Медкову) свидетельствует, что прочность грунта в точке исчерпана, и напряженно-деформированное состояние (НДС) может быть определено только при анализе НДС массива в рассматриваемой зоне.

При этом предельное состояние грунта в точке будет оцениваться по уравнению равновесия между активным горизонтальным напряжением распора, определяемым по критерию Кулона–Мора в соответствии с  $\sigma_1$  и  $\sigma_{str}$ , и горизонтальным напряжением отпора  $\sigma_{3r}$  (реакцией на распор), которое определяется НДС массива в рассматриваемой локальной зоне [8]:

$$(\sigma_1 - \sigma_{str}) \operatorname{tg}^2(45 - \varphi/2) = \sigma_{3r}. \quad (4)$$

Закон Кулона–Мора (2) и (3) справедлив для всех глинистых грунтов как при полной консолидации (в эффективных напряжениях), так и для неконсолидированного состояния водонасыщенного грунта (в полных или тотальных напряжениях). Т.е. в условиях невозможности боковых деформаций для исследуемого грунта (с характеристиками  $\varphi$  и  $c$ ) определено соотношение между главными напряжениями, когда наибольшие главные напряжения  $\sigma_1$  превышают структурную прочность  $\sigma_{str}$ , и грунт приобретает свойства несвязного грунта с возникновением между напряжениями  $\sigma_3$  и  $(\sigma_1 - \sigma_{str})$  линейной зависимости.

При этом отношение  $\Delta\sigma_3/\Delta\sigma_1$  зависит только от угла внутреннего трения [9]. Вычитание значения структурной прочности из величины  $\sigma_1$  в рассматриваемой точке может означать, что исходные связи между минеральными частицами остаются и при  $\sigma_1 > \sigma_{str}$ , а проявление несвязной дисперсности соответствует новому уровню дробления грунта на множество клиньев, как установлено в работе [3]. При этом возникающие трещины в условиях компрессии сомкнуты, и даже в прочных скальных породах сохраняется сплошность среды [2].

Выражение (3) можно представить в виде:

$$\sigma_1 = \sigma_{str} + \frac{\sigma_3}{\operatorname{tg}^2(45 - \varphi/2)}. \quad (5)$$

Правая часть выражения (5) практически представляет прочность  $S$  грунта на компрессионное сжатие. При одноосном сжатии глинистого грунта мобилизация прочности  $S_i = \sigma_{1i}$  по мере роста осевого давления (при  $\sigma_3 = 0$ ;  $\sigma_{1i} \leq \sigma_{str}$ ) представлена на рис. 2.

По мере увеличения осевого давления на образец грунта соответственно монотонно повышается мобилизованное значение прочности до  $\sigma_{1i} = \sigma_{str}$ . Дальнейшее увеличение  $\sigma_{1i}$  приводит к образованию трещин (новых контактов) и разрушению грунта. При этом грунт распадается не на отдельные частицы (т.е. связи между частицами остаются), а по вновь образованным контактам между новыми более крупными агрегатами (клиньями). Давление  $\sigma_1 = \sigma_{str}$  – предел прочности на одноосное сжатие, когда боковое давление (отпор)  $\sigma_3 = 0$  (3). При компрессионном сжатии воз-

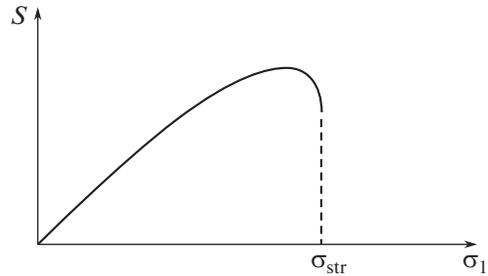


Рис. 2. График роста мобилизованной прочности  $S_i = \sigma_{1i}$  глинистого грунта при одноосном сжатии до разрушения в эффективных напряжениях.

никает боковое давление (отпор). Прочность грунта при  $\sigma_1 > \sigma_{str}$  зависит от мобилизации необходимого значения бокового давления (т.е. от внешней боковой поддержки грунта в точке) во взаимодействии с сопротивлением структурных элементов грунта при этом диапазоне напряжений

$$S_i = \sigma_{1i} = \sigma_{str} + \frac{\sigma_3}{\operatorname{tg}^2(45 - \varphi/2)}.$$

Глинистый грунт при давлении  $\sigma_{1i} > \sigma_{str}$  в точке, в соответствии с изложенным выше, приобретает некоторые свойства сыпучего материала. Т.е. для определения  $S_i$  в условиях компрессионного сжатия необходимы данные о значении бокового давления распора  $\sigma_{3i}$ , (или мобилизованного внешнего значения  $\sigma_{3r}$  по (4)) для рассматриваемого элементарного объема грунта.

### ОСОБЕННОСТИ СОСТОЯНИЯ ВОДОНАСЫЩЕННОГО ГЛИНИСТОГО ГРУНТА

Как было указано выше, выражения (2) и (3) справедливы и для водонасыщенных грунтов. Деформации глинистого грунта в условиях компрессионного сжатия практически отсутствуют (или составляют весьма малые величины) при вертикальном давлении, не превышающим значение структурной прочности грунта. Наличие воды в порах грунта вносит изменения в распределение внешнего давления.

Вода, заполняющая поры, – элемент структурного каркаса глинистого грунта, поскольку она прочно удерживается структурными связями на поверхности минеральных частиц, включая электрические, физико-химические взаимодействия. Образование структурных связей происходит в результате сложных физико-химических процессов на протяжении всей геологической истории. В распределении внутренних напряжений (в том числе в воде) большую роль играют контакты структурных элементов, изменение которых в процессе деформирования оказывает влияние на поведение глинистых грунтов [7]. Как и в модели

К. Терцаги, на начальном этапе сжатия давление  $\sigma_1$  сразу передается на воду. Возникает поровое давление  $u$ , которое транслирует внешнее давление и на минеральные частицы. До достижения предельной прочности грунта (прочности структурного каркаса  $\sigma_{str}$ ) движения воды не должно происходить. В соответствии с законом Кулона—Мора при  $u = \sigma_1 \leq \sigma_{str}$  не возникает боковой распор, т.е.  $\sigma_3 = 0$ , что было бы невозможно при выходе воды за пределы порового объема между глинистыми частицами и достижения контактных границ рассматриваемого элементарного объема грунта (в точке).

В водонасыщенном грунте также вследствие превышения вертикальным давлением значения предельной прочности  $\sigma_{str}$  минерального скелета (с учетом всех связей между частицами грунта) начинается процесс раздавливания грунта с образованием “блоков” частиц (клиньев по [3]). Т.е. наличие воды в порах грунта не вносит изменений в формирование напряженного состояния в точке грунта, подчиняясь общим закономерностям. Но открытие новых каналов (по контактам между блоками) определяет возможность движения воды (при наличии условий фильтрации) или формирование избыточного порового давления (в дополнение к горизонтальным напряжениям распора в минеральном скелете) в рассматриваемой точке (элементарном объеме). Т.е. в условиях компрессионного сжатия (или затрудненной фильтрации) в водонасыщенном глинистом грунте под давлением  $\sigma_1 > \sigma_{str}$  возникают горизонтальные напряжения распора  $\sigma_{3ui}$ , частью которого является избыточное поровое давление.

### ИЗБЫТОЧНОЕ ПОРОВОЕ ДАВЛЕНИЕ

На начальном этапе сжатия водонасыщенного глинистого грунта поровое давление  $u_i = \sigma_{1i}$  до значения  $u_i = \sigma_{1i} = \sigma_{str}$ . При отсутствии условий компрессионного сжатия, т.е. когда  $\sigma_3 = 0$ , при  $u_i = \sigma_{1i} > \sigma_{str}$  начинаются дробление грунта и фильтрация по образуемым трещинам (новым каналам). При этом поровое давление, как и  $\sigma_1$ , падает до нуля, и происходит разрушение образца грунта в соответствии с рис. 2.

В условиях компрессионного сжатия, когда  $u_i \geq \sigma_{str}$  как указано выше происходит дробление скелетного каркаса, и горизонтальные напряжения распора растут в соответствии с (5). Свой вклад в рост напряжений распора в водонасыщенном глинистом грунте вносит поровое давление. Суммарная величина порового давления может быть представлена в виде суммы  $\sigma_{str}$  и значения избыточного порового давления  $\Delta u_i$ .

$$u_i = \sigma_{str} + \Delta u_i, \quad (6)$$

где  $\Delta u_i$  — боковой распор, возникающий в глинистом водонасыщенном грунте от порового давления, который мобилизует соответствующее боковое давление в условиях компрессии (как часть полного бокового давления).

Структурные связи “удерживают” между частицами грунта поровое давление  $u = \sigma_1 \leq \sigma_{str}$ , которое передается и на минеральный скелет, а избыточное поровое давление  $\Delta u_i$  действует в новых каналах, образуемых вследствие дробления грунта при  $\sigma_{1i} > \sigma_{str}$ .

Таким образом, вертикальное наибольшее главное напряжение  $\sigma_{1u}$  (полное значение) в точке, превышающее структурную прочность  $\sigma_{str}$  водонасыщенного грунта, вызывает через поровое давление  $u_i > \sigma_{str}$  возникновение в грунте горизонтальных напряжений  $\sigma_{3u} = \sigma_{2u}$  (напряжений распора), включая избыточное поровое давление  $\Delta u_i$ , которые в условиях компрессионного сжатия мобилизуют (по боковым границам элементарного объема) равные им значения бокового давления (напряжения отпора), определяя условия сжатия по Кулону—Мору в точке в полных напряжениях в соответствии с (3):

$$\frac{\sigma_{3u}}{\sigma_{1u} - \sigma_{str}} = \operatorname{tg}^2(45 - \varphi_u/2), \quad (7)$$

где  $\sigma_{3u}$ ,  $\sigma_{1u}$  и  $\varphi_u$  — значения напряжений и угла внутреннего трения водонасыщенного глинистого грунта по критерию Кулона—Мора в условиях компрессии и проявления порового давления.

Соответственно избыточное значение порового давления при  $\sigma_{1ui}$  может быть определено из выражения:

$$\Delta u_i = \sigma_{3ui} - \sigma_{3efi}, \quad (8)$$

где  $\sigma_{3ui}$  — главное горизонтальное напряжение для водонасыщенного грунта в условиях компрессионного сжатия в соответствии с критерием Кулона—Мора (3);  $\sigma_{3efi}$  —  $i$ -е значение эффективного горизонтального главного напряжения (при отсутствии порового давления) при значении  $\sigma_{1ui}$ , (рис. 3).

Структурная прочность грунта, как в полных, так и в эффективных напряжениях остается одной и той же. Действительно фильтрация в глинистых грунтах с естественной структурой начинается, когда градиент напора превышает начальное значение, т.е. когда преодолевается сопротивление структурных связей, и поровое давление достигает значения  $u_i = \sigma_{str}$ . На этапе значений вертикального давления, превышающих структурную прочность грунта, графиками зависимости между главными напряжениями в точке приобретают вид, как для сыпучего грунта (как в эффективных, так и полных напряжениях). Т.е. в обоих случаях в грунте сохраняются исходные структурные свя-

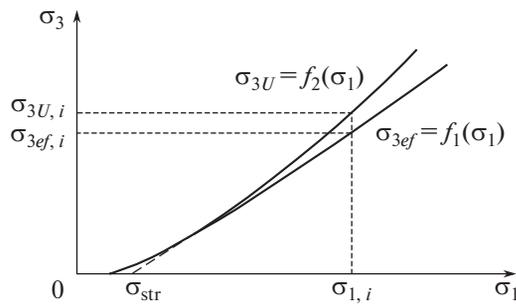


Рис. 3. Зависимость между главными напряжениями в полных и эффективных напряжениях по Кулону–Мору.

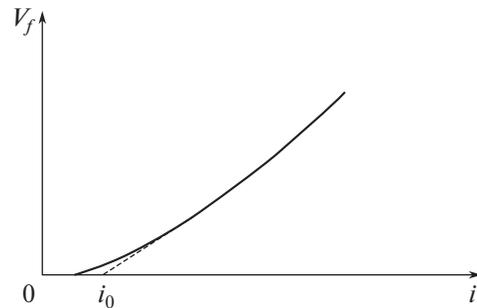


Рис. 4. Зависимость скорости фильтрации в глинистых грунтах от гидравлического градиента.

зи между частицами, но с проявлением дробления на новом уровне (более крупном уровне дисперсности) возникают новые контакты, по которым и происходит взаимодействие возникших напряжений распора и отпора. При этом при формировании указанных контактов предполагается лишь частичное нарушение порового пространства.

Таким образом, суммарная величина порового давления включает значение структурной прочности (начальное значение давления воды в “закрытых” прочностью структурных связей порах грунта) и избыточное давление, которое проявляется в увеличении бокового давления (в условиях компрессии), т.е. во взаимодействии с соседними точками в массиве. Соответственно избыточным поровым давлением следует считать значение, превышающее структурную прочность, т.е.  $(\Delta u_i = u_i - \sigma_{str})$ . Появление избыточного порового давления  $\Delta u_i$  вызывает повышение горизонтального давления распора и соответственно снижение прочности (несущей способности) грунта в точке (для обеспечения равновесного состояния требуется увеличение бокового давления-отпора).

Следует отметить, что избыточное поровое давление определяет необходимый градиент напора для фильтрации воды при соответствующих условиях.

**ПРОЧНОСТЬ ПО КУЛОНУ–МОРУ И ФИЛЬТРАЦИЯ В ГЛИНИСТОМ ГРУНТЕ (СТРУКТУРНАЯ ПРОЧНОСТЬ И НАЧАЛЬНЫЙ ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ ГРАДИЕНТ)**

Как известно в глинистом грунте фильтрация начинается, когда градиент  $i$ , определяющий потерю напора на пути фильтрации, превысит значение начального гидравлического градиента  $i_0$  (рис. 4). При этом, если  $i \leq i_0$ , фильтрация отсутствует, соответственно скорость фильтрации  $V_f$

равна нулю. Но, как следует из рассмотрения сжатия водонасыщенного грунта по Кулону–Мору, напряжения в минеральном скелете могут быть созданы как давлением  $\sigma_1$ , так и напором  $H$  в воде. Т.е. проявление начального гидравлического градиента связано с наличием структурной прочности в глинистом грунте. На это указывали также исследования С.А. Роза и Б.Ф. Рельтова, в которых показано, что фильтрация воды начинается при градиенте, когда преодолевается сопротивление водно-коллоидных пленок, т.е. прочность структурного каркаса. Отсюда значение напора  $H_0$ , превышение которого (в точке) вызывает фильтрацию (при  $\sigma_1 = 0$ ) в водонасыщенном глинистом грунте, определится следующим образом:

$$H_0 = \frac{\sigma_{str}}{\gamma_w}, \tag{9}$$

где  $\gamma_w$  – удельный вес воды.

Т.е. напор, как и внешнее вертикальное давление  $\sigma_1$ , оказывает силовое воздействие (давление столба воды) на минеральный скелет, которое и при  $\sigma_1 = 0$  вызывает все те же рассмотренные выше процессы изменения напряжений и порового давления во взаимодействии с сопротивлением структурного каркаса. Неслучайно схемы на рис. 3 и 4 имеют сходное графическое изображение.

**НЕСТАБИЛИЗИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ГРУНТА**

В механике грунтов рассматривают нестабилизированное состояние грунта при высоком значении порового давления, когда силы трения снижаются до нуля. Действительно с повышением избыточного порового давления повышается боковое давление  $\sigma_{3ui}$ , и снижается значение угла внутреннего трения.

При  $\varphi_u = 0$  с учетом, что в соответствии с (3):  $\sigma_{1u} - \sigma_{str} = \sigma_{3u}$  и  $\sigma_{str} = 2c$ , получим:

$$c = \frac{\sigma_{1u} - \sigma_{3u}}{2}. \quad (10)$$

И по выражению (1) при  $\varphi_u = 0$  имеем  $\tau = c$ . Однако, в действительности дело не в том, что прочность грунта зависит только от сил сцепления. При  $\sigma_1 > \sigma_{str}$  и  $\varphi_u = 0$  линия зависимости  $\sigma_3 = f(\sigma_1)$  приобретает наклон к оси абсцисс в  $45^\circ$ , что свидетельствует о текучести грунта подобно жидкости (равенство приращений вертикальных и горизонтальных напряжений). При этом прочность грунта в точке зависит только от значения бокового давления, т.е. от напряженного состояния вокруг рассматриваемой точки. Следует иметь в виду, что плавун, практически с нулевой прочностью, но “зажатый” в массиве между прочными слоями, может сохранять необходимую прочность грунта и локальную устойчивость в массиве. В этом отношении рассмотрение прочности грунта в главных напряжениях по критерию Кулона–Мора позволяет более надежно учесть этот фактор на основе оценки равновесия горизонтальных напряжений распора и отпора.

Снижение несущей способности грунта может происходить, как вследствие увеличения  $\sigma_1$  (и соответственно бокового распора  $\sigma_3$  в точке, см. (3)) с повышением воздействия на соседние точки массива и с угрозой формирования бокового выпора (при постоянном значении горизонтального давления отпора), так и за счет снижения отпора (вследствие разгрузки напряжений в локальной зоне массива, при постоянном значении, или росте значений распора, в точке под действием вертикального давления  $\sigma_1$ ).

## ДЕЙСТВИЕ НАПОРА ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Если поры грунта открыты для поступления подземных вод (так называемая “открытая система”), то напор  $H$  увеличивает давление в порах грунта на величину  $H\gamma_w$  (где  $\gamma_w$  – удельный вес воды). Но соответственно минеральный скелет грунта испытывает гидростатическое взвешивание на ту же величину. Т.е. изменение напора  $H$  не влияет на изменение порового давления в грунте. Если рассмотреть “закрытую систему”, т.е. водонасыщенные глины являются водоупором, то и в этом случае давление воды в порах грунта не изменяется от действия напора  $H$  (давление столба воды компенсируется уменьшением  $\sigma_1$  за счет взвешивания грунта над кровлей глин). Таким образом, давление подземных вод оказывается нейтральным по отношению к формированию и изменению порового давления в водонасыщенных глинистых грунтах.

**Действие напора в подошве глинистого грунта.** Рассмотрим случай, когда существует поровое давление  $u_i$  (от давления  $\sigma_1$  или от напора подземных вод  $H_1$ ) в соответствии с (6), а по подошве слоя действует напор  $H_2$ , оказывая давление  $u_2 = H_2\gamma_w$ . Если  $u_i > u_2$  (что, как правило, имеет место, поскольку в формировании порового давления в водонасыщенном глинистом грунте основную роль играет вес покровных масс, определяя давление  $\sigma_1$ ), то напор  $H_2$  не будет препятствовать нисходящей фильтрации поровых вод глинистого грунта водоупора. Т.е. указанный процесс фильтрации будет происходить независимо от изменения напора  $H_2$ . Наибольшее значение порового давления в покровной толще формируется на границе с водоносным горизонтом (глубина  $Z_i$ ). В каждой точке массива по указанному контакту  $u_i$  определяется в соответствии с (6) при  $\sigma_{li} = \gamma Z_i$  (где  $\gamma$  – среднее значение удельного веса грунтов покровной толщи). На эту закономерность необходимо обратить внимание при изучении роли напоров в подготовке и проявлении провалов над карстовыми полостями. В частности маловероятно в связи с этим возникновение суффозии в водонасыщенных грунтах глинистого слоя над полостью и выделение ее, как одного из основных факторов образования провала в покровной толще, а условия равновесия грунтов над полостью определяются соотношением соответствующих сил распора и отпора в рассматриваемой локальной зоне массива [8].

## НАБУХАНИЕ

При снижении вертикального сжимающего давления (разгрузки напряжений) происходит деформирование (расширение) грунта в сторону восстановления исходного объема. В глинистых грунтах деформации разгрузки в значительной степени связывают с расклинивающим действием водных пленок между частицами грунта электростатической и физико-химической природы [7]. Однако часто не принимают во внимание, что и горизонтальные напряжения распора  $\sigma_{3u}$  при снижении  $\sigma_1$  оказывают давление на минеральный скелет и поровую воду, способствуя восстановлению исходного состояния грунта. При этом их действие подобно сжатой пружине, получившей возможность восстановить исходное состояние. В переуплотненных грунтах, испытавших в ходе геологической истории периоды сжатия под большими давлениями и повышения структурной прочности за счет увеличения (сцепления) жестких связей, образованный таким образом минеральный скелет как бы запоминает прошлое напряженное состояние. При разгрузке и увлажнении подобных грунтов (например, в котлованах) происходит снижение величины сцепления

(соответственно структурной прочности) и выпор грунта [5] в значительной степени вследствие действия горизонтальных сил.

### ВЫВОДЫ

В качестве основного критерия прочности и состояния грунта в точке следует рассматривать выражение по Кулону—Мору в главных напряжениях (как для эффективных, так и полных значений) с учетом структурной прочности:

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

Это уравнение определяет условия проявления структурной прочности ( $\sigma_1 = \sigma_{str}$  при  $\sigma_3 = 0$ ), начала процесса дробления грунта (при  $\sigma_1 > \sigma_{str}$ , когда преодолевается прочность грунта как материала) и возникновения горизонтальных напряжений распора с мобилизацией давления отпора для сохранения равновесия этих напряжений и прочности грунта в точке на данном этапе:

$$(\sigma_1 - \sigma_{str}) \operatorname{tg}^2(45 - \varphi/2) = \sigma_{3r},$$

где  $\sigma_{3r}$  — реактивное давление окружающего грунта на распор в точке.

Этот критерий равновесия определяет взаимодействие рассматриваемой точки с соседними точками в массиве (окружающим грунтом) и позволяет перейти от рассмотрения ситуации в точке к оценке равновесия в локальной зоне массива, где формируется предельное состояние.

Указанный критерий, тесно связанный с законом Кулона—Мора в главных напряжениях, пока не нашел распространения в механике грунтов, но, как показывают исследования, он более информативен по сравнению с выражением для предельного сопротивления сдвигу глинистого грунта не только для оценки состояния грунта в точке, но и в массиве, в зоне локального силового возмущения, позволяет перейти от анализа исходного состояния массива в условиях компрессии к предельному состоянию в локальной зоне [8].

При рассмотрении процесса сжатия водонасыщенного глинистого грунта по Кулону—Мору выделяются также два характерных этапа состояния: этап 1 — устойчивого состояния грунта в точке, когда поровое давление не превышает значения структурной прочности грунта ( $u_i \leq \sigma_{str}$ ), и этап 2 — с возникновением избыточного порового давления (при  $u_i > \sigma_{str}$ ), как составляющей напряжений распора, когда требуется мобилизация соответствующего значения внешнего бокового давления (отпора) для обеспечения устойчивого состояния в точке. На обоих этапах поровое давление не является нейтральным, так как передает

внешнюю нагрузку на минеральный скелет, формируя напряженное состояние в точке по Кулону—Мору в главных напряжениях в условиях действия порового давления.

При определении коэффициента фильтрации глинистого грунта практически моделируется тот же процесс сжатия, но нагрузка на грунт создается напором в воде. Начальный гидравлический градиент характеризует этап повышения порового давления и соответственно напряжений в минеральном скелете ( $u_i \leq \sigma_{str}$ ) при отсутствии движения воды. Фильтрация возникает, когда под воздействием порового давления будет превышена структурная прочность скелета грунта. В какой-то мере нейтральным относительно напряженного состояния в точке массива можно считать действие напора подземных вод, поскольку на величину порового давления (сформированного весом покровных масс) его изменение не сказывается.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горькова И.М. Физико-химические исследования дисперсных осадочных пород в строительных целях. М.: Стройиздат, 1975. 151 с.
2. Крупномасштабное моделирование подготовки и предвестников землетрясений / Соболев Г.А., Кольцов А.В. М.: Наука, 1988. 208 с.
3. Ляшенко П.А. О деформации глинистого грунта в основании фундамента // Тр. юбилейной конф., посв. 50-летию РОМГГиФ. М.: РОМГГиФ, 2007. Т. 2. С. 114–118.
4. Маслов Н.Н. Основы инженерной геологии и механики грунтов. М.: Стройиздат, 1982. 511 с.
5. Медков Е.И. Фазы сопротивления грунта // Механика грунтов, основания и фундаменты. Тр. МИИТа. М.: ТрансЖелдориздат, 1959. Вып. 100. С. 26–61.
6. Молоков А.А. Инженерно-геологические процессы. М.: Недра, 1985. 206 с.
7. Осипов В.И. Физико-химическая теория эффективных напряжений в грунтах // Грунтоведение. 2013. № 2. С. 3–34.
8. Постоев Г.П. Предельное состояние и деформации грунтов в массиве (оползни, карстовые провалы, осадки грунтовых оснований). М.—СПб.: Нестор-История, 2013. 100 с.
9. Способ определения механических свойств грунтов: пат. на изобр. 2600494 Рос. Федерация/ Постоев Г.П., Казеев А.И., Кутергин В.Н. Бюл. Изобр. № 29. Оpubл. 20.10.2016.

## ANALISIS OF SATURATED CLAY COMPRESSION ON THE BASIS OF THE MOHR-COULOMB CRITERION

G. P. Postoev<sup>a, #</sup>

<sup>a</sup>*Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences, Ulansky per. 13, str.2, Moscow, 101000 Russia*

<sup>#</sup>*E-mail: opolzhen@geoenv.ru*

The Mohr-Coulomb criterion, in terms of principal stresses, allows determining clay structural strength and horizontal stresses that control equilibrium in the point. With vertical pressure on the saturated soil not exceeding the structural strength, the pressure is completely taken by pore water and through the pore water pass to mineral structure. At this stage the soil strength in the point remains the same and there are no horizontal stresses, excess pore pressure or filtration. With vertical pressure (and pore pressure as well) exceeding the values of clay structural strength, the excess pore pressure at a point emerges. Absence or lack of filtration leads to lateral pressure summing up excess pore pressure and effective values of horizontal stress at the point. Regularities of changes in mobilized clay strength at a point on the basis of the Mohr-Coulomb criterion, in terms of principal stresses, are considered during virgin compression, with free filtration, under the influence of groundwater pressure.

**Keywords:** *the Mohr-Coulomb criterion, principal stresses, lateral pressure, soil structure strength, excess pore pressure, groundwater pressure, filtration*

### REFERENCES

1. Gor'kova, I.M. *Fiziko-khimicheskie issledovaniya dispersnykh osadochnykh porod v stroitel'nykh tselyakh*. [Physicochemical studies of dispersed sedimentary rocks for the construction purposes]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1975, 151 p. (in Russian)
2. *Krupnomasshtabnoe modelirovanie podgotovki i predvestnikov zemletryaseni*. [Large-scale modeling of earthquake preparation and precursors]. Sobolev, G.A., Koltsov, A.V. Eds., Moscow, Nauka, 1988, 208 p. (in Russian)
3. Lyashenko, P.A. *O deformatsii glinistogo grunta v osnovanii fundamenta* [About the clay soil deformation in the foundation basis]. *Trudy yubileinoi konferentsii, posvyashchennoi 50-ti letiyu ROMGGiF* [Proc. Jubilee conference devoted to 50<sup>th</sup> anniversary of the Russian society for soil mechanics, geotechnics and foundation engineering], 2007, vol. 2. pp. 114–118. (in Russian)
4. Maslov, N.N. *Osnovy inzhenernoi geologii i mekhaniki gruntov* [Fundamentals of engineering geology and soil mechanics]. Moscow, Stroiizdat, 1982, 511 p. (in Russian)
5. Medkov, E.I. *Fazy soprotivleniya grunta* [Soil resistance phases]. *Mekhanika gruntov, osnovaniya i fundamenty* [Soil mechanics, soil bases and foundations]. Moscow, Transzheldorizdat, 1959, issue 100, pp. 26–61. (in Russian)
6. Molokov, A.A. *Inzhenerno-geologicheskie protsessy* [Engineering geological processes]. Moscow, Nedra, 1985, 206 p. (in Russian)
7. Osipov, V.I. *Fiziko-khimicheskaya teoriya effektivnykh napryazhenii v gruntakh*. [Physicochemical theory of effective soil stresses]. *Gruntovedenie*, 2013, no. 2, pp. 3–34. (in Russian)
8. Postoev, G.P. *Predel'noe sostoyanie i deformatsii gruntov v massive (opolzni, karstovye provaly, osadki gruntovykh osnovanii)*. [Limit state and soil deformations in a massif (landslides, karst failures, ground settlements)]. Moscow, St. Petersburg, Nestor-Istoriya Publ., 2013, 100 p. (in Russian)
9. *Sposob opredeleniya mekhanicheskikh svoystv gruntov: patent na izobretenie 2600494 RF* [Method for determining the mechanical soil properties: Invention patent 2600494 Russian Federation]. Postoev, G.P., Kazeev, A.I., Kutergin, V.N.; publ. 20.10.2016, bull. no. 29. (in Russian)