

УЧЕТ ДЕЙСТВИЯ ГРУНТОВЫХ ВОД НА СОСТОЯНИЕ ОПОЛЗНЕВОГО СКЛОНА

Орозобекова А.К., Муратбеков Н.М., Сырдыбаева А.С.

ИГиОН НАН КР, КРУСТА им. Н. Исанова

Действие грунтовых вод на состояние оползневого склона проявляется различными путями. Вода оказывает взвешивающее действие на слагающие склон породы, изменяя силы гравитации. Насыщая грунты, вода изменяет их физико-механические характеристики и, в частности, сдвиговые характеристики, уменьшая величину сопротивления сдвигу. Кроме того, грунтовые воды, смачивая возможные поверхности скольжения, в виде смазки уменьшают силы трения. При этом вода, взвешивая грунтовый скелет, снижает за счет порового давления нормальные напряжения σ в плоскости сдвига и может привести к почти полному снятию внутреннего трения в грунте.

Сопротивление грунта сдвигу при действии грунтовых вод определяется по следующей формуле:

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

где τ – сопротивление грунта сдвигу, кПа;

σ – нормальные напряжения в плоскости сдвига, кПа;

u – поровое давление, кПа;

φ – угол внутреннего трения грунта, град;

c – сцепление грунта, кПа.

Важным фактором является также проявление фильтрационного давления грунтовых вод. Как известно, фильтрационное давление создается во всех случаях движения подземных вод. Если есть градиент, наблюдается уклон поверхности свободного подземного потока или линии пьезометрического уровня для напорных вод то, там есть падение напора. Падение напора вызывается преодолением сопротивления течению воды в грунте. Это сопротивление и создает фильтрационное давление. Обычно подземный поток течет в сторону поверхности склона. При этом толща, слагающая склон, испытывает фильтрационное давление, имеющее одинаковое основное направление с оползневым давлением. Следовательно, фильтрационное давление является одним из факторов - побудителей к развитию оползневых явлений.



Рассмотрим действие фильтрационного давления для случая наклонного пласта грунта, залегающего на водоупоре, параллельном поверхности (рис.1). Этот случай позволяет представить сущность рассматриваемого вопроса [2] и имеет практическое значение в задачах об устойчивости оползневых склонов.

Пусть поры грунта полностью насыщены водой и линии тока воды параллельны поверхности откоса. Тогда последняя является, верхней линией тока, а также и линией депрессии, так как на нее непосредственно действует во всех точках атмосферное давление.

Как известно из гидравлики, линии, перпендикулярные к линии тока, представляют собой эквипотенциальные линии, то есть во всех точках каждой такой линии вода поднялась бы в пьезометрических трубках до одного и того же пьезометрического уровня. Отсюда следует, что вдоль отрезков линий тока, проведенных между двумя эквипотенциальными линиями, будет наблюдаться одинаковая разность пьезометрических уровней, а, следовательно, и одинаковая разность напоров. В данном случае разность напоров Δh между двумя соседними эквипотенциальными линиями, например, ab и ed , будет равна разности отметок точек a и e , т.е. $z_a - z_e$. Следовательно, $\Delta h = z_a - z_e$. Соответствующая длина линии тока будет равна:

$$\Delta l = \Delta h / \sin \alpha = (z_a - z_e) / \sin \alpha.$$

Таким образом, градиент будет равным:

$$i = \Delta h / \Delta l = (z_a - z_e) \sin \alpha / (z_a - z_e) = \sin \alpha. \quad (2)$$

$$\text{Но поскольку принято } \alpha = \beta_{\phi}, \text{ то } i = \sin \beta_{\phi}. \quad (3)$$

Фильтрационное давление на единицу объема грунта равно градиенту (разности напоров на единицу длины, т.е. объему столба воды), умноженному на удельный вес воды:

$$j_{\text{един.}} = i \gamma_{\omega} = \gamma_{\omega} \sin \beta_{\phi}. \quad (4)$$

Общее давление на некоторый слой грунта объемом V будет равно:

$$j = V j_{\text{един.}} = V \gamma_{\omega} \sin \beta_{\phi} = V \gamma_{\omega} \sin \alpha. \quad (5)$$

Это давление направлено вдоль линий тока, параллельно поверхности откоса, и является сдвигающей силой.

Пусть поверхностью скольжения является кровля водоупора. Собственный вес грунта в объеме V с учетом взвешивания будет равен: $P_{\text{с}} = (\gamma - \gamma_{\omega}) V$. Сдвигающая составляющая этого веса Q также направлена вдоль откоса книзу и равна:

$$Q = P_{\text{с}} \sin \alpha,$$

а нормальная к поверхности скольжения составляющая $N = P_{\text{с}} \cos \alpha$.

Таким образом: $Q = (\gamma - \gamma_{\omega}) V \sin \alpha$; $N = (\gamma - \gamma_{\omega}) V \cos \alpha$. (6)

Общая сдвигающая сила равна $Q + j$, а удерживающая сила трения $T = N \operatorname{tg} \varphi$ (если в грунте отсутствует сцепление). Коэффициент устойчивости склона для слоя объемом V будет равен:

$$K_y = \frac{N \operatorname{tg} \varphi}{Q + j} = \frac{(\gamma - \gamma_{\omega}) V \cos \alpha \operatorname{tg} \varphi}{(\gamma - \gamma_{\omega}) V \sin \alpha + V \gamma_{\omega} \sin \alpha} = \frac{(\gamma - \gamma_{\omega}) V \cos \alpha \operatorname{tg} \varphi}{\gamma \sin \alpha} = \frac{(\gamma - \gamma_{\omega}) \operatorname{tg} \varphi}{\gamma \operatorname{tg} \alpha}, \quad (7)$$

При отсутствии фильтрационного и взвешивающего давлений этот коэффициент был бы равен:

$$K_y = \frac{N \operatorname{tg} \varphi}{Q + j} = \frac{\nu V \cos \alpha \operatorname{tg} \varphi}{\nu V \sin \alpha} = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{tg} \alpha} \quad (8)$$

Следовательно, при насыщении откоса водой коэффициент устойчивости снижается в $\frac{\gamma}{(\gamma - \gamma_{\omega})}$ раз, то есть во столько раз, во сколько вес скелета грунта в воздухе больше веса скелета с учетом взвешивания в воде.

Здесь можно видеть, что формулу коэффициента устойчивости можно получить, не рассматривая отдельно фильтрационное давление, а определяя сдвигающую силу исходя из объемного веса грунта γ (то есть веса скелета вместе с водой), а удерживающую силу трения - исходя из веса скелета с учетом взвешивания $(\gamma - \gamma_{\omega})$:

$$K_y = \frac{N \operatorname{tg} \varphi}{Q} = \frac{(\gamma - \gamma_w) V \cos \alpha \operatorname{tg} \varphi}{\gamma V \sin \alpha} = \frac{(\gamma - \gamma_w) \operatorname{tg} \varphi}{\gamma \operatorname{tg} \alpha}, \quad (9)$$

Такой способ оценки устойчивости склона обычно называют «методом взвешивания» и нередко применяют при практических расчетах. Физический смысл этого метода заключается в том, что напор грунтовых вод способен оказать на покровную толщу пород взвешивающее противодействие и тем самым снизить действующие в контактной зоне силы сопротивления сдвигу за счет снижения сил трения. В этих условиях возникает возможность дополнительного водонасыщения грунтов и снижения сопротивляемости их сдвигу. Сдвигающее же усилие в этом случае останется без изменения, так как силы гравитации сохраняются прежней величины (имеется водонасыщение не по всей высоте грунтовой толщи).

Поскольку пьезометрический уровень, соответствующий какой-либо точке поверхности скольжения, находится на отметке пересечения с поверхностью депрессии эквипотенциали, проходящей через эту точку, то поровое давление в этой точке равно $\gamma_w h$ (где h - пьезометрическая высота в данной точке) и направлено по нормали к поверхности скольжения. Следовательно, оно должно быть вычтено из нормального давления, создаваемого весом грунта, находящегося выше поверхности скольжения. Приблизительно можно принимать, что пьезометрическая высота h в каждой точке поверхности скольжения равна вертикальному расстоянию между этой точкой и поверхностью депрессии. Тогда учет действия воды в порах при расчете устойчивости может выполняться следующим образом. При определении нормального давления по поверхности скольжения от него отнимается величина, равная $\gamma_w h$, а при определении сдвигающих сил учитывается полный объемный вес грунта без взвешивания (т.е. вес скелета плюс вес воды в порах). То есть приходим к методу взвешивания.

Итак, учет действия напорных грунтовых вод может производиться двумя способами.

Первый способ учета действия грунтовых вод - метод использования величины гидродинамического давления. Заключается он в следующем:

- сдвиговые характеристики грунта в уровне поверхности скольжения принимаются для случая его водонасыщения (c_v, ϕ_v);
- собственный вес грунта во всех расчетах принимается с учетом взвешивания в воде части оползневого отсека между кривой депрессии и поверхностью скольжения.
- к величине сдвигающей силы добавляется величина гидродинамического давления $j = V\gamma_w \sin \beta_\phi$.

Поскольку, как правило, к оползневому грунту приурочен грунтовый поток, разгружающийся вблизи основания склона, можно с некоторым приближением считать, что в пределах каждого отсека равнодействующая гидродинамического давления параллельна депрессионной кривой, а средний градиент напора в отсеке $i_i = \sin \beta_{\phi_i}$, где β_{ϕ_i} - угол наклона к горизонту хорды, соединяющей точки пересечения депрессионной кривой с границами отсека. То есть принимаем, что уклон кривой депрессии совпадает с наклоном равнодействующей гидродинамического давления. По результатам экспериментальных данных [2] установлено, что направление грунтового потока в сторону напорного откоса приближается к линии откоса, поэтому в пределе гидравлический градиент иногда может быть принят равным $\sin \beta$, где β - угол наклона откоса к горизонту.

При выполнении расчетов устойчивости склонов, будем принимать, что направление гидродинамической силы параллельно поверхности скольжения в данном отсеке (основанию отсека). В таком случае эту силу можно целиком (без разложения на составляющие)

прибавлять к сдвигающей силе. Раскладывать гидродинамическую силу рекомендуется лишь тогда, когда ее наклон будет значительно отличаться от наклона поверхности скольжения.

Следует отметить, что при необходимости разложения гидродинамической силы на составляющие (при значительных ее наклонах) его следует выполнять с учетом градиентов потока в соответствующих направлениях, отвечающих гидродинамической сетке фильтрационного потока. Этот первый способ учета действия грунтовых вод применяется в таких методах расчета устойчивости склона или величины оползневого давления, в конечных формулах которых нет явно выраженных отдельных величин удерживающей и сдвигающей сил. Однако этот способ приемлем и в любых других случаях.

Второй способ учета действия грунтовых вод - метод взвешивания. Заключается он в следующем:

- сдвиговые характеристики грунта в уровне поверхности скольжения принимаются для случая его водонасыщения (c_v, φ_v);
- при определении сил, сдвигающих массив грунта, принимается полный вес отсеков без учета взвешивающего действия грунтовых вод, а при определении сил, удерживающих массив грунта, принимается вес отсеков с учетом взвешивающего действия грунтовых вод в части, находящейся между кривой депрессии и поверхностью скольжения (при этом в вес отсека включается полный объемный вес грунта, находящегося в зоне капиллярного насыщения выше кривой депрессии).

Этот второй способ учета действия грунтовых вод используется для методов расчета, в которых удерживающие и сдвигающие силы оказываются явно выраженными. В целом же оба рассмотренных способа учета действия напорных грунтовых вод равноценны и могут в одинаковой степени применяться в инженерных расчетах.

При отсутствии напорных грунтовых вод и наличии обычного водонасыщения грунтов откоса в расчете коэффициента устойчивости или величины оползневого давления учитываются лишь все физико-механические характеристики пород в замоченном состоянии. Взвешивающее же действие воды или гидродинамическое давление в таком случае не учитывается.

Вспомним различные способы определения объемного веса грунта при его водонасыщении или увлажнении. Объемный вес γ грунта в естественном состоянии с влажностью W равен:

$$\gamma = \gamma_r (1 + 0,01 W) / (1 + e) \quad (10)$$

Объемный вес $\gamma_{\text{бр}}$ грунта, полностью насыщенного водой (вес грунта брутто), определяется по формуле

$$\gamma_{\text{бр}} = (\gamma_r + \gamma_{\omega e}) / (1 + e) = \gamma_{\text{в}} + \gamma_{\omega} = \gamma_{\text{ск}} + n \gamma_{\omega} . \quad (11)$$

Объемный вес $\gamma_{\text{в}}$ грунта, взвешенного в воде (взвешенный объемный вес грунта), определяется по следующим формулам:

- для водопроницаемых грунтов (пески, гравий, щебень, трещиноватые полускальные породы и т.д.)

$$\gamma_{\text{в}} = (\gamma_r - \gamma_{\omega}) / (1 + e); \quad (12)$$

- для непроницаемых и слабопроницаемых грунтов (глинистых, монолитных скалистых, супесей, плотных песков и т.д.)

$$\gamma_{\text{в}} = \gamma - \gamma_{\omega} = \gamma_{\text{ск}} - (1 - n) \gamma_{\omega} . \quad (13)$$

Все физико-механические характеристики грунтов, в том числе и характеристики сопротивляемости грунтов сдвигу c_i и φ_i , различны в основаниях отсеков, находящихся ниже уровня грунтовых вод и выше их. Поэтому целесообразно границы отсеков располагать так, чтобы эти границы совпадали с переходом от части основания блока, находящейся выше грунтовых вод, к части, находящейся под ними.

Итак, необходимо, что приведенные здесь способы учета действия грунтовых вод являются далеко не единственными. Например, И.В. Федоров [3] предложил способ расчета устойчивости откосов с учетом

фильтрационных сил, удовлетворяющий всем условиям статики, графоаналитическим методом. Этим вопросом занимались и многие другие советские и зарубежные ученые (Н.П. Пузыревский, Б.И. Покровский, Д.В. Тейлор, Е.Д. Кадомский, И. Оде, Н.А. Цытович, Н.С. Моргунов, К.И. Фоменко, Ю.А. Соболевский, М.Е. Харр и др.). В некоторых случаях получены решения, отличающиеся большой точностью. Как показал И.В. Федоров [4], учет фильтрационных сил по упрощенной формуле дает незначительные расхождения (до 1,5 %) по сравнению с точными решениями. Этот способ учета особенно применим в практике, так как не требует построения фильтрационной сетки. Для учета фильтрационных сил в данном случае требуется построение лишь кривой депрессии и определение участка высачивания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Цытович Н.А. Механика грунтов. - М.: Высшая школа, 1973.
2. Медков Е.И., Березанцев В.Г., Гольдштейн М.Н., Царьков А.А. Механика грунтов, основания и фундаменты. - М.: Транспорт, 1970.
3. Маслов Н.Н. Механика грунтов в практике строительства. (Оползни и борьба с ними). - М.: Стройиздат, 1977.
4. Харр М.Е. Основы теоретической механики грунтов: Пер. с англ. проф. М.Н. Гольдштейна. - М.: Стройиздат, 1971.
5. Ю.Я. Гольцов, М.Ю. Гольцова Математическая модель фильтрационных расчетов. Москва 2006.