Записки Санкт-Петербургского горного института им.Г.В.Плеханова.
Т. 133. СПб, 1992

УДК 624:131.439; 624:131.543

И.П.ИВАНОВ

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ - НАДЕЖНЫЙ ИСТОЧНИК ИНФОРМАЦИИ О ПРОЧНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД

Рост масштабов строительства приводит к увеличению размеров зон влияния сооружений на геологическую среду, что создает значительные трудности при оценке физико-механических свойств горных пород с учетом их неоднородности и анизотропии. Как известно, для толщ горных пород, являющихся основанием или средой различных сооружений, характерно большое разнообразие структурных неоднородностей, которые существенно влияют на их состояние и свойства. Это влияние определяется понятиями масштабного эффекта и коэффициента структурного ослабления. Чем больше объем горных пород, взаимодействующих с различными сооружениями, тем сложнее определить показатели свойств этих пород традиционными методами, применяемыми в инженерных изысканиях. Лабораторные исследования проводятся на небольших и относительно однородных образцах, а полевые работы (зондирование, опытные штампы, прессиометрия и др.), которые рассматриваются как источник информации о свойствах пород в условиях естественного залегания, по существу, не улучшают сложившейся в инженерных изысканиях ситуаций.

Изучение геологических явлений, происходящих под влиянием природных и техногенных факторов, дает уникальную возможность определить показатели прочности и деформируемости горных пород с учетом их неоднородности (трещиноватости, слоистости, закарстованности, разной степени литификации и т.д.) и размеров сфер влияния. Наблюдения за поведением горных пород в период строительства и эксплуатации различных сооружений, а также на естественных склонах рек, озер и морей и на территориях, покрытых просадочными отложениями, могут быть использованы для проведения обратных расчетов, в результате которых можно установить значения показателей важнейших свойств породных образований при их совместном деформировании. Использование получаемой информации только для решения некоторых задач "по аналогии" нельзя признать оправданным, ибо оно не позволяет раскрыть природы сложных явлений, с которыми приходится иметь дело инженеру-геологу.

Проблема определения прочности горных пород имеет особую специфику, заключающуюся в отсутствии четкого представления о природе двух ее показателей: коэффициента трения f и удельного сцепления c. Если придержи-

ваться теории прочности Кулона – Мора, т.е. $\tau = \sigma f + C$, где τ – общее сопротивление сдвигу по поверхности (плоскости) скольжения, на которой действует нормальное напряжение σ, то процесс деформирования и разрушения можно представить в виде графика (рис.1). Максимальное общее соп-

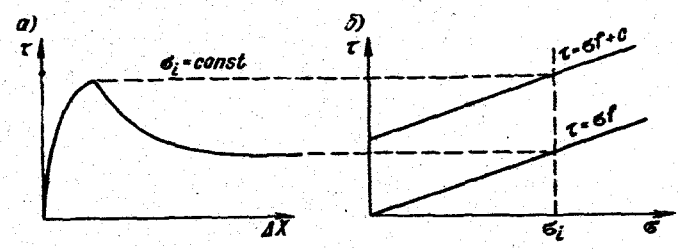


Рис.1. Деформационная кривая сдвига (а) и диаграммы сдвига (б), построенные по максимальным и установившимся значениям сопротивления сдвигу полускальной породы

ротивление сдвигу складывается из трения и сцепления для любой породы, а минимальное (в породах скальных и полускальных) – из трения по сформировавшейся поверхности сдвига (среза); в глинистых породах, кроме трения по этой поверхности, действует еще сопротивление за счет восстанавливающегося сцепления. Анализ экспериментальных данных позволяет сформулировать некоторые положения, которые обосновывают подход к оценке прочности горных пород по наблюдениям за геологическими явлениями:

1. Угол внутреннего трения пород φ, в которых преобладают конденсационные структурные связи, характеризуется устойчивыми значениями, практически совпадающими по определениям в стабилометре, в срезных приборах и методом "плашки по плашке". Это дает основание использовать результаты лабораторных исследований (для решения большинства практических задач можно использовать метод "плашки по плашке") для оценки сопротивления трению неоднородных пород в условиях естественного залегания и в насыпных сооружениях [1,2].

2. Определение показателей сопротивления сдвигу пород, обладающих микронеоднородностью (микротрещины, макропоры и др.), традиционными методами неправомерно, поскольку в этом случае влияние неоднородности сказывается на общем сопротивлении сдвигу, т.е. и на сцеплении, и на трении. В действительности же неоднородность влияет только на величину сцепления, поэтому необходимо использовать методику раздельного определения показателей трения и сцепления [1,2].

3. Прочность пород, определяемая в момент их разрушения, соответствует строго фиксированному напряженному и физическому состоянию, а также временному эффекту. Для большинства геологических явлений, происходящих под влиянием природных факторов, разрушение связано с преодолением естественной длительной прочности. Исключением могут быть явления, для которых основной причиной разрушения послужили землетрясения, наводнения, селевые

потоки, быстрый спад уровня поверхностных (реже подземных) вод. Особым является случай разрушения слоистой среды, механизм которого рассмотрен в работах [1,3]. В этом случае необходимо учитывать условия совместного деформирования пород разной прочности.

4. Уровень неоднородности оценивается различными показателями, но для установления правил дальнейшей работы удобнее пользоваться сравнением объемов элемента однородного породного блока V_δ, в пределах которого прочность оценивается постоянными показателями, и объема сферы влияния сооружения или деформирующегося массива неоднородных пород V_c. При сравнении имеют место следующие характерные случаи:

1) при $V_\delta \geqslant V_c$ деформации протекают в пределах однородной породы, прочность которой определяется традиционными лабораторными и полевыми методами;

2) при $V_\delta \ll V_c$ изучаемая толща пород рассматривается как квазиоднородная и квазисыпучая среда, прочность которой для решения практических задач может быть охарактеризована коэффициентом трения, определяемым по традиционной методике (см. положение I), кроме случаев, когда эта толща представлена трещиноватыми породами, трещины которой заполнены рыхлым материалом или их стенки изменены различными процессами;

3) при $V_\delta < V_c$ прочность толщи пород характеризуется трением и сцеплением (точнее, зацеплением).

Надо отметить, что последний случай наиболее сложен и именно он представляет наибольший интерес. Граница между случаями $V_\delta \ll V_c$ и $V_\delta < V_c$ устанавливается условно по общим теоретическим соображениям для каждой конкретной ситуации в процессе решения поставленной задачи. Так, по данным одних исследователей, ослабление толщи пород за счет трещиноватости происходит при $V_\delta / V_c = 6 \div 120$, а по данным других, - при $V_\delta / V_c = 12 \div 14$ [4]. Очевидно, что самым строгим критерием перехода к квазисыпучей среде будет являться уравнение $\tau = \sigma f$, в котором для рассматриваемых пород известно ориентировочное значение угла внутреннего трения.

5. Обратные расчеты являются надежным способом определения прочности породной толщи только тогда, когда напряженное состояние в момент разрушения оценено точно. Поэтому необходимо изучение источников разрушающих нагрузок (собственный вес пород, гидростатическое и гидродинамическое давление воды, сейсмическое воздействие, нагрузка от сооружений и транспорта).

Рассмотрим некоторые наиболее часто встречающиеся геологические явления, дающие реальную возможность точного определения прочности пород в условиях их естественного залегания.

Абразия и эрозия, как известно, приводят к нарушению устойчивости морских и речных берегов, поэтому наблюдения за их развитием позволяет определить прочность пород в условиях одноосного сжатия, сдвига и отрыва. При разрушении основания вертикального откоса, ограниченного вертикальной трещиной отрыва (рис.2,а), причем в общем случае трещина может залегать под любым углом более $45^\circ + \varphi/2$, уравнение предельного равновесия имеет вид

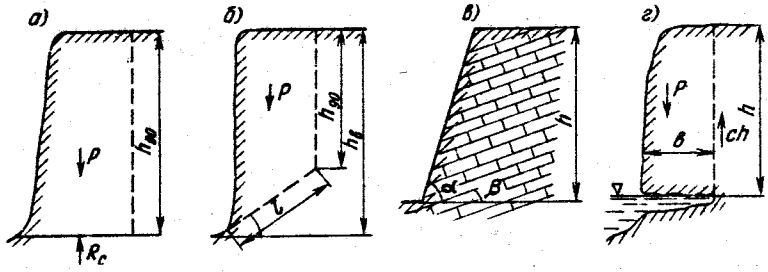


Рис.2. Примеры расчетных схем для определения прочности пород по данным наблюдений за геологическими явлениями

$$\gamma h_{90} = R_c = 2c\,\mathrm{tg}(45^\circ + \varphi/2),$$

γ - удельный вес пород, слагающих склон; R_c - прочность на сжатие пород разрушающегося основания склона; c и φ - показатели сопротивления сдвигу этих пород.

Сцепление

$$c = \gamma h_{90}/2\,\mathrm{tg}(45^\circ + \varphi/2).$$

В случае, когда вертикальная трещина не доходит до основания берега, уравнение равновесия составляется из многоугольника сил в виде (рис.2,б)

$$P = \frac{1}{2}(h_B + h_{90})\gamma l \cos(45^\circ + \varphi/2),$$

где P - вес обрушающегося блока пород; h_{90} и h_B - высота трещины отрыва и вертикального склона; l - длина плоскости скольжения.

При деформировании берегов, сложенных слоистыми толщами, падающими в сторону водоема (рис.2,в), можно определить общее сопротивление по контакту ослабления, используя уравнение, предложенное Г.Л.Фисенко [4]:

$$c'\cos\varphi' = h\gamma\cos\beta\sin(\beta - \varphi')(1 - \sqrt{\mathrm{ctg}\alpha\,\mathrm{tg}\beta}),$$

где c' и φ' - показатели сопротивления сдвигу по контакту перемещения природных масс. При $\alpha = 90^\circ$

$$c'\cos\varphi = h_B\gamma\cos\beta\sin(\beta - \varphi').$$

Сцепление пород легко определить при формировании ниш подмыва в основании толщи (рис.2,г) по формуле $c = \gamma b$.

В случае же залегания плоскости среза F блока весом P под углом $\beta < 90^\circ$ уравнение примет вид

$$P\sin\beta = P\cos\beta\,\mathrm{tg}\varphi + cF$$

или

$$\mathrm{tg}\beta = \mathrm{tg}\varphi + cF/P\cos\beta.$$

В подземных выработках прочность пород в условиях естественного залегания можно определить очень точно по наблюдениям за разрушением цели-

ков. Если учесть, что работа целика моделирует процесс одноосного сжатия под давлением вышележащей толщи, то для однородных пород можно использовать известное уравнение равновесия Соколовского

$$p_0 = \frac{\pi}{2} + \frac{ctg\varphi}{2} \ln\left(\frac{\gamma h}{\alpha}\,\frac{1-\sin\varphi}{1+\sin\varphi}\right),$$

где $\alpha = c\,ctg\,\varphi$; $p_0 = 135^\circ$ при прямоугольной форме выработок, ограничивающих целик.

Наибольший интерес представляют оползневые явления на естественных склонах и искусственных откосах, на которых проводятся стационарные инструментальные наблюдения. Во-первых, это связано с тем, что оползневым процессом могут быть охвачены разнообразные по объему и строению толщи горных пород, по которым можно судить о масштабном эффекте как в однородных породах, так и в толщах, трещиноватых и слоистых. Во-вторых, во время наблюдений с большой точностью устанавливается морфология и местоположение поверхности скольжения, что позволяет применить соответствующий метод расчета и привязать условия равновесия к фиксированной пространственной схеме. В-третьих, напряженное состояние в период наблюдений устанавливается с достаточной для практических расчетов точностью.

Обратные расчеты с целью определения характеристик сопротивления сдвигу проводились Г.Л.Фисенко [4], исходя из предположения, что до оползня откос находился в предельном равновесии в соответствии с равенством сдвигающих и удерживающих усилий на поверхности скольжения:

$$\sum_1^n T_i = \sum_1^n N_i\,tg\varphi_i + \sum_1^n c_i l_i ,$$

а после оползня равновесие обеспечивается только за счет трения между оползневыми массами и их новым основанием, т.е.

$$\sum T_i = \sum N_i\,tg\,\varphi_i ,$$

где $\sum T_i$ и $\sum N_i$ - алгебраическая сумма касательных и нормальных составляющих давления от веса пород.

Нетрудно показать, что второе уравнение имеет два основных недостатка, из-за которых определяемые по нему значения коэффициента трения нельзя признать соответствующими действительности. Как показывают наблюдения за экскавацией оползневых масс, коэффициент их устойчивости всегда больше единицы за счет их инерционного смещения, а также из-за частичного восстановления сцепления по новой поверхности скольжения (это особо заметно в глинистых породах). Кроме того, в большинстве случаев оползневые массы смещаются на значительное расстояние, и их новое положение определяется новыми прочностными характеристиками (в частности, новым коэффициентом трения, ничего общего не имеющим с записанным во втором уравнении равновесия). В свя-

зи с этим мы пошли по пути исследования природы трения и его определения, в результате которого был сделан вывод (см. положение I).

Изложенное здесь позволяет решать большой круг обратных задач при помощи одного уравнения равновесия с одним неизвестным - величиной удельного сцепления пород (породы), через которые проходит оползневая поверхность. Основная сложность связана с определением сцепления отдельных видов пород по литологии и физическому состоянию в случае инсеквентных оползней, поверхность скольжения которых пересекает несколько разновидностей пород (рис.3). Но эта сложность кажущаяся, поскольку сцепление каждого участка поверхности скольжения может быть установлено при анализе данных наблюдений с применением "шаговой процедуры". Вначале определяется сцепление по оползневому телу (отдельному циклу или блоку) в однородных породах, затем для тела, состоящего из двух и трех слоев, а после этого окончательно рассчитывается сцепление для всех пород.

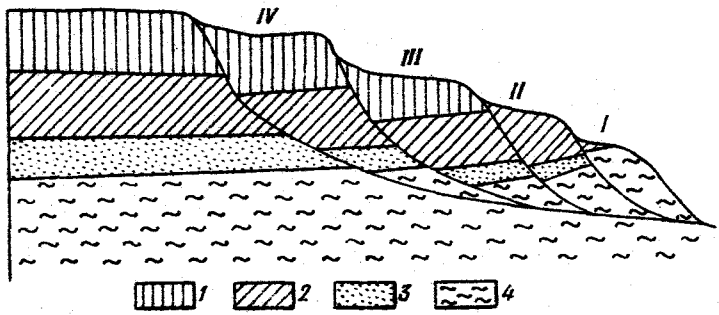


Рис.3. Схематический профиль оползневого склона речной долины
1 - лесс; 2 - лессовидный суглинок; 3 - среднезернистый песок;
4 - пылеватые глины; I-IУ - этапы обратных расчетов для определения сцепления пород

В заключение необходимо обратить внимание на два важных обстоятельства. При определении сцепления в глинистых породах следует иметь в виду глубину (от поверхности склона) прохождения поверхности скольжения, так как в результате набухания прочность в пределах одного слоя глин окажется разной в разных его участках. Это означает, что выполнять расчеты нужно для каждого из них. Та же особенность характерна и для выветрелых (трещиноватых) пород, так как на разных глубинах интенсивность выветривания разная, а следовательно, и коэффициент структурного ослабления не является постоянной величиной. Второе обстоятельство связано с механизмом деформирования слоистой среды, рассмотренным нами в специальных работах [I,3]. В этом случае при анализе результатов наблюдений очень важно установить последовательность развития оползневого процесса и разрушения отдельных типов пород.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. И в а н о в И.П. Инженерно-геологические исследования в горном деле. Л.: Недра, 1987. 255 с.

2. И в а н о в И.П. Определение показателей сопротивления сдвигу трещиноватых и макропористых пород // Вестн. ЛГУ. 1977. № 6. С. 56-59.

3. И в а н о в И.П. Прогноз оползневых деформаций в слоистой среде // Теоретические и методические проблемы инженерной геологии / Ростовский инженерно-строительный ин-т. Ростов-на-Дону, 1980. С. 112-115.

4. Ф и с е н к о Г.Л. Устойчивость бортов карьеров и отвалов. М.. Недра, 1965. 378 с.