© С.А. Пуневский, А.Ю. Панфилов,
Ю.А. Климашевский, 2008

УДК 622.271

С.А. Пуневский, А.Ю. Панфилов, Ю.А. Климашевский

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОРОД - НАМЫВНЫХ И ЕСТЕСТВЕННЫХ ОСНОВАНИЙ СУХИХ ОТВАЛОВ ЛЕБЕДИНСКОГО И СТОЙЛЕНСКОГО ГОКов

Семинар № 1

Для оценки устойчивости откосных сооружений хвостохранилищь Лебединского и Стойленского ГОКов, а также прогноза несущей способности намывных и естественных тонкодисперсных отложений с позиции размещения на них отвальных насыпей. Выполнен комплекс определения физико-механи-ческих свойств грунтов, относящихся к слабейшим инженерно-геоло-гическим элементам.

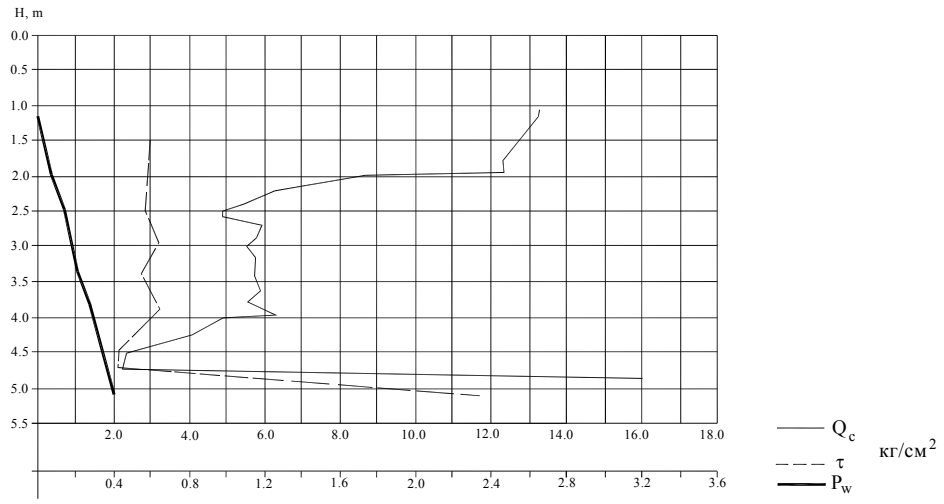
В июле 2006 г. были отобраны пробы для лабораторных испытаний из намывных отложений ядерной зоны гидроотвала № 1 ЛГОКа. Перекрытые песками глинистые отложения извлекались из шурфа с помощью бура геолога. Кроме намывных отложений были также отобраны из шурфов и скважин в окрестности прудов № 1 и № 2 по трассе канавы для отвода фильтрационных вод из хвостохранилища ЛГОКа. Кроме отбора проб было выполнено зондирование естественных оснований сухих отвалов Лебединского и Стойленского ГОКов.

Зондирование выполнялось комбинированным зондом МГГУ-ДИГЭС [3] с помощью установки гидрогеомеханического контроля УГК-1 конструкции Ю.И.Кутепова на глубину до 5-6 м. Отбор проб осуществлялся из шурфов и из скважин, пройденных с помощью бура геолога до глубины 5 м. Основной объем испытаний выполнялся для глинистых отложений основания (глины иловатые), залегающих в примерном диапазоне глубин 2.5-5 м. Эти отложения согласно данным предшествующих изысканий, обладают минимальными характеристиками сопротивления сдвигу.

На рис. 1 даны колонки зондирования в окрестности 2-х водоемов по трассе канавы. Зондирование показало, что общее сопротивление вращательному срезу глинистых отложений основания в диапазоне глубин 2-4 м не превышает 0.5-0.6 кг/см^2, сопротивление задавливанию зонда – 6 кг/см^2 (1-й водоем) и 3 кг/см^2 (2-й водоем). При этом избыточного (сверх гидростатического) порового давления в ненагруженном отвалом основании зафиксировано не было как в зондировочных скважинах, так и в стационарном пункте замера порового давления. Различие в значениях сопротивления пенетрации определяются повышенным обводнением основания близ 2-го водоема (уровень воды расположен менее чем на 1 метр от

По данным зондирования (величине сопротивления пенетрации q_3, МПа) примерно оцениваются значения характеристик сопротивления сдвигу глинистых грунтов (сцепление С и угол внутреннего трения φ) [5]. В таблице обобще-

Колонка зондирования скв. 1-06 на 1-ом пруду



Колонка зондирования скв. 3-06 на 2-ом пруду

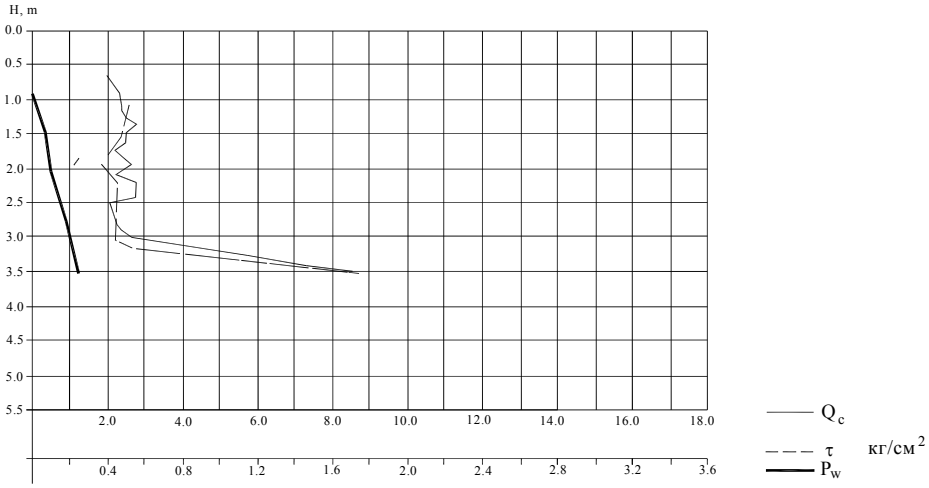


Рис. 1. Колонки зондирования скважин на пруду № 1 и № 2

ны значения φ и С для глин и суглинков аллювиального, делювиального, флювиогляциального и гляциального происхождения. Нормативный модуль деформации $E \cong 7q_3$.

Сопротивление сдвигу глинистой водонасыщенной породы [1, 2]

$$\tau = c' + (\sigma_n - p_u) tg\varphi' \qquad (1)$$

где c' и φ' - сцепление и угол внутреннего трения для консолидированной породы (определены по эффективным напряжениям); σ_n - полное нормальное напряжение; p_u - поровое давление (избыточное).

Как видно из выражения (1), по мере уплотнения и уменьшения давления в поровой воде сопротивление сдвигу возрас-

Прочностные характеристики глинистых грунтов

q_3, МПа	φ, градус	С, кПа	q_3, МПа	φ, градус	С, кПа
0.25	12	13	3.5	23	53
0.5	16	18	4.0	24	58
1.0	17	24	4.5	25	64
1.5	18	30	5.0	26	70
2.0	19	36	5.5	27	76
2.5	20	41	6.0	28	82
3.0	22	47			

тает, приближаясь к величине сопротивления полностью стабилизированной породы. Этим обстоятельством в значительной мере объясняется практический интерес к определению максимальной величины порового давления и исследованию изменений его во времени. Характерное для массива сложное напряженное состояние пород можно моделировать в лабораторных условиях на стабилометрах, которые по принципу работы разделяют на гидростатический и компрессионный типы [2].

Образцы глинистых пород основания испытывались на приборах ВСВ-25, КПр-1 и на приборах трехосного сжатия компрессионного типа УСВ-2 (универсальный стабилометр ВИОГЕМ конструкции Н.П.Верещагина). Испытания выполняются в соответствии с изданными ВИОГЕМ методическими указаниями [4], а также ГОСТ 12248-96 «Грунты. Методы лабораторного определения прочности и деформируемости».

Стабилометр УСВ-2 относится к компрессионному типу, т.е. образец высотой 10 см и диаметром 5 см сжимается в нем без возможности бокового расширения до достижения заданного вертикального давления. При определении показателей прочности образец доводят до разрушения, увеличивая вертикальную нагрузку при постоянном боковом давлении или уменьшая боковое давление при постоянном вертикальном. Эти операции возможны благодаря наличию в стабилометре специального регулятора давления, позволяющего производить снижение давления небольшими ступенями по 0.05-0.10 кг/см^2. Боковое расширение образца замеряется по объему вытесненной из гидравлической камеры воды, которая поступает в стеклянную измерительную трубку (волюмометр).

При лабораторных испытаниях на сдвиг в приборах плоскостного среза и стабилометра ставилась задача максимального учета реального напряженного состояния намывного массива.

После предварительного уплотнения под бытовыми нагрузками (σ_n=1 кг/см^2) образцы догружались в диапазоне ΔP_z = 1-4 кг/см^2 (0.1-0.4 МПа), имитирующем приложение внешней нагрузки к основанию. Затем производились быстрые сдвиги в приборах плоскостного среза или разрушение образцов в стабилометре по закрытой схеме (без оттока воды из образца).

В результате испытаний нормально-уплотненных образцов на приборах плоскостного среза получены следующие параметры уравнения сопротивления сдвигу для ядерной зоны гидроотвала № 1 (12 испытаний): φ = 16^0, с = 4 тн/м^2, для глинистого слоя в основании головной дамбы хвостохранилища ЛГОКа (15 испытаний) φ = 13^0, с = 1.3 тн/м^2.

На стабилометре УСВ-2 было выполнено 9 консолидированно-недренированных испытаний для ядерной зо-

ны гидроотвала № 1 и 12 для иловатых глинистых пород естественного основания в окрестности пруда фильтрационных вод у головной дамбы хвостохранилища ЛГОКа.

В результате испытаний по закрытой схеме (без оттока воды из образца) получено для намывных глинистых отложений ядерной зоны гидроотвала № 1 $\varphi = 13^0$, $c = 3.4$ тн/м^2, для глинистого слоя в основании головной дамбы хвостохранилища ЛГОКа $\varphi = 14^0$, $c = 1.7$ тн/м^2

Закрытая схема моделирует работу массива при быстром росте нагрузки и затрудненной фильтрации, т.е. в наиболее тяжелых условиях. Поровое давление имеет значительную величину; измерение его возможно в течение всего опыта. Такие условия соответствуют условиям нейтрального сдвига.

Определения по закрытой схеме дают самое низкое расположение предельной огибающей Мора, т.е. наименьшие значения характеристик прочности. При проектировании по этим характеристикам обеспечивается устойчивость сооружения в самых опасных условиях нагружения. Проведение испытаний по закрытой схеме возможно только на стабилометрах, тогда как эффективный сдвиг (при нулевом поровом давлении) может быть осуществлен и на других приборах. Производственное испытание по закрытой схеме длится, как правило, не больше 10 мин.

Открытая схема воспроизводит условия работы грунта при хорошем дренировании и медленном росте нагрузки. В этих условиях возникающее поровое давление сравнительно быстро рассеивается, и вся нагрузка воспринимается практически скелетом грунта (эффективный сдвиг). Испытания по открытой схеме дают наиболее высокие показатели прочности грунта. В этом смысле испытания по закрытой и открытой схемам определяют соответственно нижнюю и верхнюю границы области возможных положений предельной огибающей. Испытания по открытой схеме позволяют получать данные об изменениях объема грунта в процессе опыта, а также характеристику зависимости между напряжениями и деформацией грунта. Проведение испытаний по открытой схеме вследствие длительности процесса консолидации требует значительно больших затрат времени, чем испытания по закрытой схеме. Скорость проведения таких испытаний определяется в основном водопроницаемостью исследуемых грунтов. Обычно оно лежит в пределах от 0.5 до трех суток.

Основным преимуществом трехосных испытаний перед другими методами лабораторных испытаний сопротивления грунтов сдвигу является возможность более правильного воспроизведения природного напряженного состояния грунта и условий его работы в сооружениях. При трехосном сжатии на образец грунта действует не только вертикальная нагрузка, но и боковые нагрузки $\sigma_2 = \sigma_3$, величина которых создается независимо от вертикальной нагрузки. Весьма существенным является возможность измерения порового давления, возникающего в процессе нагружения и изменяющегося во времени. Из всех перечисленных методов трехосное сжатие является единственным методом, позволяющим испытывать грунт по закрытой системе, т. е. без оттока воды из образца в процессе опыта, а также с определением объема поступающей или выходящей из образца воды. Предельная кривая Мора находится как огибающая кругов Мора, отвечающих разрушению грунта. Для построения круга Мора на оси абсцисс откладывают максимальное и минимальное главные напряжения σ_1 и σ_3 и на их разности, как на диаметре, строят

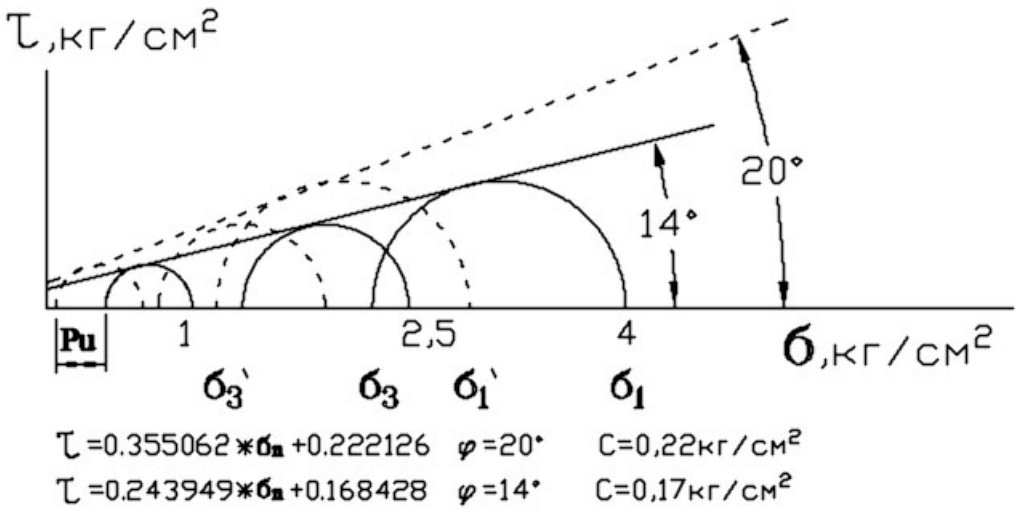


Рис. 2. Определение сопротивления сдвигу в эффективных напряжениях (φ=20°, C≈0.25 кг/см²)

окружность. Если для каждого круга Мора (каждого испытания) определено поровое давление, то может быть построена предельная огибающая в эффективных напряжениях (рис. 2).

В ходе компрессионных испытаний фиксировалась стабилизированная осадка образцов под различными ступенями уплотняющей нагрузки (ΔP=0.05-0.1 МПа) и через относительную осадку $\Delta h|h$ рассчитывались значения $\varepsilon_i(P_i)$ по формуле

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{i-1} - \frac{\Delta h_i}{h}(1+\varepsilon_{i-1}) \qquad (2)$$

Начальный коэффициент пористости ε_o (при P=0) определялся по формуле

$$\varepsilon_o = \frac{\upsilon_n}{\upsilon_s} = \frac{\Pi}{1-\Pi} = \frac{(1+W)\rho}{\rho} - 1. \qquad (3)$$

При обработке результатов трехосных испытаний предельную огибающую (в данном случае прямую) по данным трехосного сжатия обычно находят графически как общую касательную к ряду кругов Мора. Параметры этой прямой могут быть вычислены аналитически. При наличии двух испытаний (двух кругов Мора) используют формулы

$$\sin\varphi = \frac{R_2 - R_1}{x_2 - x_1}, \qquad (4)$$

где R - радиус круга Мора, x – координата центра круга Мора;

$$R_1 = \frac{\sigma_1' - \sigma_3'}{2}; \quad R_2 = \frac{\sigma_1'' - \sigma_3''}{2}; \qquad (5)$$

$$x_1 = \frac{\sigma_1' - \sigma_3'}{2}; \quad x_2 = \frac{\sigma_1'' - \sigma_3''}{2}; \qquad (6)$$

$$c_0 = \frac{R_1}{\cos\varphi} - x_1 tg\varphi. \qquad (7)$$

При наличии трех и более испытаний параметры прямой следует находить методом наименьших квадратов. В этом случае

$$tg\varphi = \frac{A-1}{2\sqrt{A}}; \qquad (8)$$

$$c_0 = \frac{\sigma_0}{2\sqrt{A}}, \qquad (9)$$

где $$A = \frac{n\sum_1^n \sigma_1\sigma_3 - \sum_1^n \sigma_1 \sum_1^n \sigma_3}{n\sum_1^n \sigma_3^2 - \left(\sum_1^n \sigma_3\right)^2}, \qquad (10)$$

$$\sigma_o = \frac{\sum_1^n \sigma_3^2 \sum_1^n \sigma_1 - \sum_1^n \sigma_3 \sum_1^n \sigma_1\sigma_3}{n\sum_1^n \sigma_3^2 - \left(\sum_1^n \sigma_3\right)^2}. \qquad (11)$$

Заключение

Полученные данные о прочностных характеристиках глинистых отложений были использованы для оценки несущей способности ядерной зоны гидроотвала № 1 и в расчетах устойчивости головных дамб хвостохранилищ с учетом замеров порового давления.

На приборах плоскостного среза и трехосного сжатия определялись прочностные характеристики намывных глинистых отложений ядерной зоны гидроотвала № 1 и иловатых глинистых пород естественного основания в окрестности пруда фильтрационных вод у головной дамбы хвостохранилища ЛГОК.

В результате испытаний нормально-уплотненных образцов на приборах плоскостного среза получены следующие параметры уравнения сопротивления сдвигу для ядерной зоны гидроотвала № 1 $\varphi = 16^0$, $c = 4$ тн/м^2, для глинистого слоя в основании головной дамбы хвостохранилища ЛГОКа $\varphi = 13^0$, $c = 1.3$ тн/м^2. На приборе компрессионного типа (стабилометре УСВ-2) для намывных глинистых отложений ядерной зоны гид-роотвала № 1 $\varphi = 13^0$, $c = 3.4$ тн/м^2, для глинистого слоя в основании го-ловной дамбы хвостохранилища ЛГОКа $\varphi = 14^0$, $c = 1.7$ тн/м^2

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абелев М.Ю.* Строительство промышленных и гражданских сооружений на слабых водонасыщенных грунтах. М., Стройиздат, 1983.
2. *Бишоп А., Хенкель Д.* Определение свойств грунтов в трехосных испытаниях. Госстройиздат, М., 1961.
3. *Гальперин А.М., Зайцев В.С., Хейфиц В.З. и др.* Устройство для комплексного зондирования грунтов: Пат. РФ №2025559 от 30.12.1994.//БИ №21.
4. *Методические* указания по определению деформационных, прочностных и фильтрационных характеристик горных пород в стабилометрах. Белгород, ВИОГЕМ, 1973.
5. *Полевые* методы инженерно-геологических изысканий./В.И.Лебедев, В.В.Ильичев, К.П.Шевцов, А.Т.Индюков. М., Недра, 1988. ГИАБ

Коротко об авторах

Пуневский С.А., Панфилов А.Ю. – Московский государственный горный университет,
Климашевский Ю.А. – ОАО «Лебединский ГОК».

Доклад рекомендован к опубликованию семинаром № 1 симпозиума «Неделя горняка-2007».
Рецензент д-р техн. наук, проф. *А.М. Гальперин.*