

РАСЧЕТНЫЕ ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОРОД

В работе приведены результаты эксперимента по определению механических свойств пород, используемых в процессе расчетов.

Характеристиками упругого поведения массива горных пород являются деформационные свойства E - модуль упругости и коэффициент Пуассона ν . Определение E и ν в настоящее время распространено почти так же, как определение прочностных показателей горных пород. Деформационные характеристики обычно определяются в лабораторных условиях на образцах горных пород в режиме нагрузки и разгрузки для нескольких циклов, измерением их продольных и поперечных деформаций. На рис.1 приведен условный график деформирования образца горной породы в цикле нагрузка-разгрузка. Причем при разгрузке образец разгружается не полностью, чтобы исключить случайное смещение образца и нарушение его центровки.

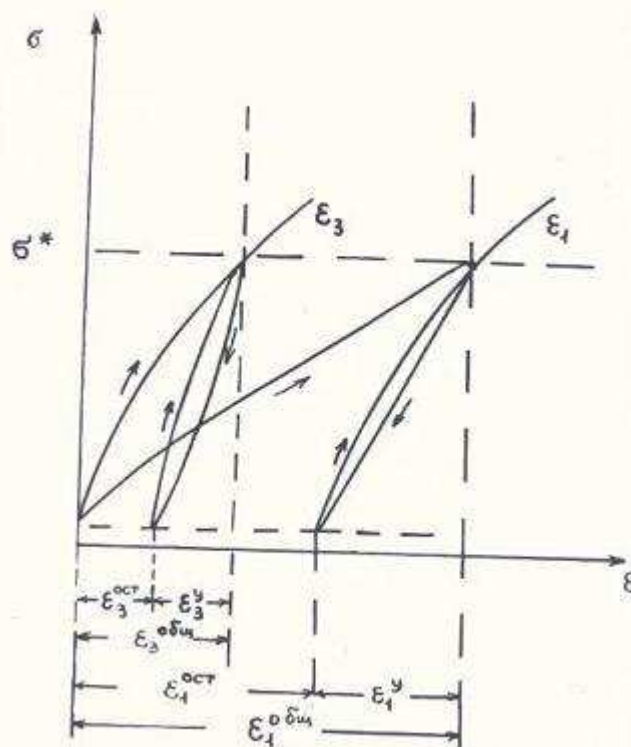


Рисунок 1. Характерные графики для определения упругих констант горных пород: ϵ_1 – продольная деформация; ϵ_3 – поперечная деформация образца.

Из графика 1 определяются модуль упругости $E_0 = \sigma^* / \epsilon_1^y$ где σ^* - максимально приложенное напряжение перед разгрузкой; ϵ_1^y - упругая продольная деформация при разгрузке. Коэффициент Пуассона: $\nu_0 = \epsilon_3^y / \epsilon_1^y$ где ϵ_3^y - упругая поперечная деформация при разгрузке; модуль деформации: $E^d = \sigma^* / \epsilon_1^{об}$ где $\epsilon_1^{об}$ - полная продольная деформация при нагрузке. Коэффициент поперечных деформаций: $\nu_0^{\Pi} = \epsilon_3^{об} / \epsilon_1^{об}$, где $\epsilon_3^{об}$ - полная поперечная деформация при нагрузке. При этом полные объемные деформации образца определяются по формуле: $\epsilon_v^0 = \epsilon_1^{об} - 2\epsilon_3^{об}$, а показатели, необходимые при оценке

хрупкопластических свойств пород, как отношение: $R_1 = \varepsilon_1^{ост} / \varepsilon_1^y$; $R_2 = \varepsilon_1^{ост} / \varepsilon_1^{об}$;
 $R_3 = \varepsilon_1^{ост} / \varepsilon_1^{об}$

Переход от деформационных свойств пород, определенных на образцах вышеизложенным способом, к деформационным свойствам массива является сложной задачей. Для правильной оценки деформационных характеристик массива необходимо учитывать характер нарушенности массива, закладывать в аналитические решения коэффициенты структурного ослабления $R_{осл}$: $R_{осл}^E = E_M / E_0$; $R_{осл}^v = v_M / v_0$. Методы определения деформационных характеристик в лабораторных условиях общеизвестны. Для определения их в натуральных условиях применяются динамические и статические методы.

При рассмотрении зависимостей τ - касательного напряжения и γ - сдвиговой деформации возникает вопрос определения G - модуля сдвига и K - модуля объемного сжатия. В этом случае эти величины связаны с E и ν следующими соотношениями в пределах упругости:

$$G = E / 2(1 + \nu), \quad K = E / 3(1 - \nu).$$

При моделировании широкого круга геомеханических задач очень удобен эквивалентный материал, представляющий собой смесь мелкого песка (97 % веса) с машинным маслом и обладающий заметным сцеплением ($c = 0.5 - 1$ КПа). Специальная экспериментальная установка позволила нам исследовать механические свойства модельного материала непосредственно в условиях плоской деформации, существующих в принятой конструкции модели. Плотность уложенного и укатанного в слое материала $1,7 \text{ г / см}^3$, коэффициент пористости 0,7. Проведены опыты со следующими траекториями нагружения:

а) изотропная компрессия - образец нагружался постепенно и одновременно увеличиваемыми равными напряжениями $\sigma_1 = \sigma_3$;

б) одноосное нагружение - образец нагружался до заданного уровня $\sigma_1 = \sigma_3$ изотропно, а затем σ_1 напряжение постепенно увеличивалось;

в) сдвиг - образец нагружался до некоторого $\sigma_1 = \sigma_3$ изотропно, а потом σ_1 увеличивали, а σ_3 уменьшали равными ступенями;

г) пропорциональное нагружение - $\sigma_1 = n\sigma_3$, где $n = 6, 8, 13$. Все опыты сопровождалось обратным нагружением (разгрузкой).

Результаты испытаний приведены на рис. 2-4. Одноосное сжатие (рис. 3) на первом этапе нагружения сопровождается уменьшением объема образца, а потом пластическое течение становится равно объемным. Выход в критическое состояние при одноосном сжатии четко не фиксируется, т.к. этот выход происходит под малым углом встречи α , и деформирование и изменение размеров образца сопровождается кажущимся безграничным упрочнением. Результаты испытания на сдвиг приведены на рис. 4. Графики выполаживаются при достижении критической нагрузки, существенных явлений дилатации не наблюдается. На рис. 2 показаны результаты опытов на изотропную компрессию с разгрузкой.

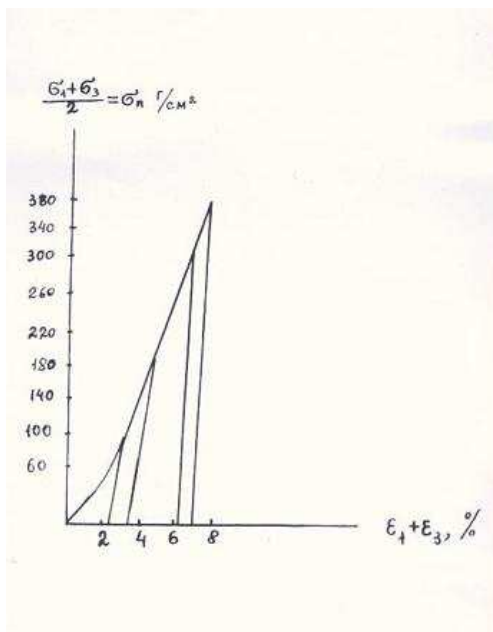


Рисунок 2. Результаты опытов на изотропную компрессию с разгрузкой

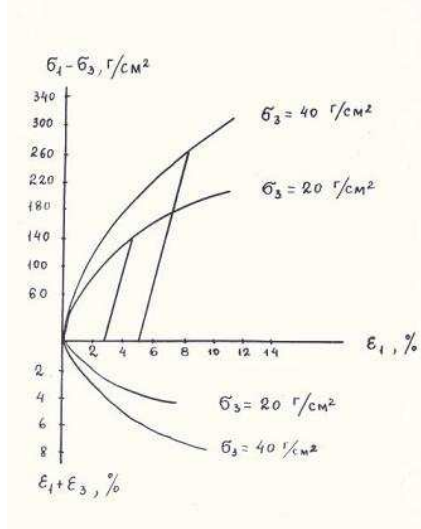


Рисунок 3. Результаты экспериментов на одноосное сжатие с разгрузкой

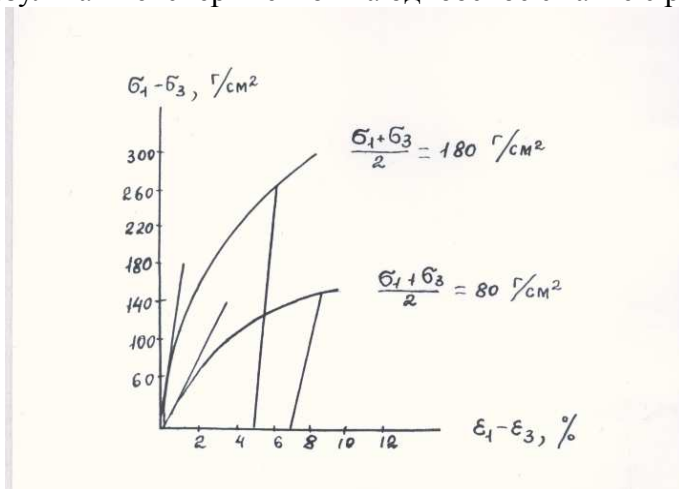


Рисунок 4. Результаты экспериментов на сдвиг с разгрузкой

В теории упругости принимается постоянство значений G и K . Однако проведенные эксперименты показывают, что при больших изменениях напряжений эти модули не постоянны. Семейство графиков (рис.4) описывается гиперболической функцией:

$$\tau = (G_0 \gamma \tau_{пр}) / (\tau_{пр} + G_0 \gamma),$$

где G_0 - начальный модуль сдвига; $\tau_{пр} = C + \sigma \operatorname{tg} \varphi$; $\sigma_n = (\sigma_1 + \sigma_3) / 2$. Определим касательный модуль сдвига $G^{кас}$:

$$G^{кас} = d\tau / d\gamma = G_0 \tau_{пр}^2 / (\tau_{пр} + G_0 \gamma)^2.$$

Подстановка значения $\gamma = \tau \tau_{пр} / (\tau_{пр} - \tau) G_0$ дает зависимость касательного модуля от достигнутого уровня напряжений:

$$G^{кас} = G_0 (1 - \tau / \tau_{пр})^2,$$

где $G_0 = (\sigma_1 + \sigma_3 + 2C \operatorname{ctg} \varphi) \sin \varphi / B$; $\tau = (\sigma_1 - \sigma_3) / 2$; B - безразмерный параметр определяется экспериментально, для рассматриваемого нами графика $B = 0,09$.

Таким же образом из рисунка 2 определим зависимость касательного модуля объемного сжатия в виде:

$$K^{кас} = K_0 (1 + a \sigma_n)^2,$$

где параметр a , имеющий размерность, обратную размерности напряжения, определяются из эксперимента. Для рассматриваемого случая $a = 0,042$.

В случае разгрузки из рисунков 2- 4 получим зависимости для модулей разгрузки:

$$G^{разгр} = 6.4 G_0, K^{разгр} = 8.5 K^{кас}.$$

Итак, определили переменные модули сдвига и объемного сжатия для условий нагружения и разгрузки. Они использованы при решении упруго-пластической задачи в варианте теории пластического течения.