

КОНСОЛИДАЦИОННОЕ УПЛОТНЕНИЕ ТРЕХФАЗНОГО МАССИВА МАЛОПРОЧНЫХ СЛАНЦЕВЫХ ПОРОД

А. Новаковска, магистр (Центральная горноспасательная станция, г. Бытом, РП)

Розглянуто деформаційні явища в насипних геотехнічних спорудах з сланцевих гірських порід, які під час експлуатації зазнали впливу природних та техногенних руйнівних факторів. Розв'язано задачу просторової консолідації масиву сланцевих порід з урахуванням спадкової повзучості та вивітрювання або старіння.

В Верхнесилезском горном регионе сланцевые горные породы, добытые при проведении подготовительных горных выработок в угольных шахтах, часто применяются для строительства гидротехнических сооружений, дамб и ограждений рек и озер, дорожных насыпей и т. д. В процессе эксплуатации массивных сооружений эти породы находятся в двухфазном или многофазном состоянии. В качестве элементов инженерных сооружений они подвергаются действию собственного веса и движущихся транспортных средств, периодического замерзания и оттаивания, увлажнения и высыхания, температурных перепадов, выветривания, различных динамических нагрузок [1].

Сланцевые горные породы можно отнести к промежуточным между сыпучими и монолитными скальными горными породами, то есть к песчано-щебеночным. Характерными свойствами сланцевых пород являются их значительная сжимаемость, структурно-фазовая деформируемость, изменение соотношения твердой и жидкой фаз в единице объема породы в процессе консолидации. Эти свойства определяют важные механические процессы и явления в породах: возникновение и величину осадок (вертикальных перемещений) сооружений, обусловленных уменьшением объема пор; протекание осадок во времени вследствие фильтрационной консолидации и развития контактной ползучести скелета пород; зависимость сопротивления сдвигу пород от внешней нагрузки и деформируемость пород как многофазной системы, имеющей в качестве основного компонента твердые частицы с порами, заполненными водой и воздухом.

При решении плоской и пространственной задач консолидации многофазного массива основной проблемой является определение начального и промежуточного напряженных состояний рассматриваемого массива под воздействием поверхностных и объемных сил. При определении начального напряженного состояния обычно считаем, что в начальный момент приложения нагрузки изменения объема массива не происходит, то есть коэффициент Пуассона равен 0,5, что не всегда имеет место.

Решение задач консолидации многофазного массива малопрочных сланцевых пород выполним на основе гипотез М. Био и В. А. Флорина о

постоянстве суммы главных напряжений в процессе консолидации, используя приведенный модуль деформации и приведенный коэффициент Пуассона для многофазного массива.

Начальное напряженное состояние можно определить, предположив, что в момент приложения нагрузки изменение соотношения фаз в единице объема массива отсутствует и многофазный массив характеризуется приведенными упругими модулями объемного сжатия и сдвига, которые определяются из следующих положений.

Приведенные упругие модули сжатия $\alpha_{\text{пр}}$ и приведенные коэффициенты Пуассона $\mu_{\text{пр}}$ многофазного массива малопрочных сланцевых пород являются такими характеристиками, которые при определении изменения объема и формоизменения под действием главных напряжений дают значения, совпадающие с модулем объемного сжатия α_V и коэффициентом Пуассона скелета $\mu_{\text{ср}}$ малопрочных сланцевых пород с учетом действия эффективных напряжений. Поскольку поровая вода в многофазном массиве при формоизменении не оказывает существенного сопротивления, модули сдвиговой деформации скелета и массива будут одинаковыми, то есть $G_{\text{ср}} = G_{\text{пр}} = G$. Учитывая это положение и то, что поровое давление $\sigma_V = \sigma'_V + 3P_w$, получим приведенный коэффициент сжимаемости

$$\alpha_{\text{пр}} = \alpha_V + \frac{\alpha_w}{n}, \quad (1)$$

где α_V – модуль объемной сжимаемости воды; α_w – модуль объемной сжимаемости скелета породы; σ'_V – напряжение, принимаемое скелетом породы; P_w – нейтральное давление, воспринимаемое водой в порах многофазного массива; n – пористость породы.

Из условия равенства модулей сдвига скелета малопрочных сланцевых пород на основании известных соотношений между коэффициентом Пуассона, модулями линейной и сдвиговой деформаций получим

$$\mu_{\text{пр}} = \frac{\alpha_{\text{пр}} - 2G}{2(\alpha_{\text{пр}} + G)}. \quad (2)$$

Если приведенная среда обладает объемной несжимаемостью, то есть когда $\alpha \rightarrow \infty$, то $\mu_{\text{пр}} \rightarrow 0,5$.

Таким образом, многофазный массив малопрочных сланцевых пород в начальный момент нагружения, когда не происходит изменение соотношения фаз в единице объема, может характеризоваться единым приведенным модулем деформации $\alpha_{\text{пр}}$ и единым приведенным коэффициентом Пуассона для массива в целом $\mu_{\text{пр}}$. По ним определится напряженно-деформированное состояние многофазного массива в начальный момент приложения на его поверхности местной нагрузки. Используя это положение, можно определить начальное распределение порового давления по формуле

$$P_w = \frac{\sigma_V}{3} \frac{\alpha_w}{\alpha_w + \frac{\alpha_V}{n}}. \quad (3)$$

Экспериментальные и теоретические исследования консолидации многофазных грунтов, щебеночных насыпей с песками, малопрочных сланцевых массивов показывают, что основными и определяющими факторами, влияющими на процесс формирования напряженно-деформированного состояния во времени, являются свойства ползучести скелета и сжимаемости поровой воды. Поэтому при рассмотрении задач консолидации массива илисто-карбонатно-сланцевых пород особое внимание уделено учету этих факторов. Кроме того, в многофазном массиве существенное значение имеют ползучесть и старение скелета, сжимаемость газосодержащей поровой воды. Учет этих факторов приводит к новым качественным результатам в теоретических и практических решениях, которые больше соответствуют результатам эксперимента.

Рассмотрим закономерности уплотнения слоя многофазного массива малопрочных сланцевых пород толщиной h при действии равномерно распределенной нагрузки $P(z,t)=P=\text{const}$ и уплотняющей нагрузки, линейно изменяющейся по глубине $P(z)=P(1-z/h)$, с граничными условиями $P_w(h,0)=P_w(0,t)$.

При этих значениях закономерности изменения порового давления в слое многофазного массива малопрочных сланцевых пород толщиной h при двухсторонней фильтрации с учетом ползучести скелета под действием уплотняющей равномерно распределенной нагрузки и сжимаемости поровой воды можно определить с помощью ряда синусоид следующего характера:

$$P_w(z,t) = \frac{4P}{\pi} A_0 \sum_{m=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{m} \left(\frac{B_0 - \delta_2}{\delta_1 - \delta_2} e^{\delta_1 t} + \frac{B_0 - \delta_1}{\delta_2 - \delta_1} e^{\delta_2 t} \right) \sin \frac{\pi n z}{h}, \quad (4)$$

где

$$A_0 = \frac{m_{V_1}}{m_{V_2} + nm_w}; \quad B_0 = \frac{\eta m_{V_2}}{m_{V_1}} (1 - A_0); \quad m_{V_0} = m_{V_1} + m_{V_2};$$

$$\delta_{1,2} = \frac{1}{2} \left[- \left(A + C_V \frac{\pi^2 n^2}{h^2} \right) \right] \pm \sqrt{\left(A + C_V \frac{\pi^2 n^2}{h^2} \right)^2 + 4\eta C_V \frac{\pi^2 n^2}{h^2}};$$

$$A = \frac{\eta(m_{V_0} + nm_w)}{m_{V_1} + nm_w}; \quad C_v = \frac{k_f}{\gamma_w(m_{V_1} + nm_w)},$$

где η – вязкость поровой жидкости; m_w – коэффициент объемной сжимаемости поровой жидкости; m_{V_0} – коэффициент сжимаемости массива пород; m_{V_1} – коэффициент мгновенной относительной сжимаемости; m_{V_2} – коэффициент сжимаемости после условно стабилизированной осадки в период

фильтрационной консолидации массива; k_f – коэффициент фильтрации; t – время; n – пористость массива; z – глубина уплотняемой части.

Если ограждающая конструкция вдоль реки или озера (дамба) из малопрочных сланцевых пород выполнена с гидрозащитными экранами, то фильтрационная консолидация массива происходит в виде фильтрации, а уравнение (4) имеет следующий вид:

$$P_w(z,t) = \frac{4P}{\pi} A_0 \sum_{m=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{m} \left(\frac{B_0 - \delta_2}{\delta_1 - \delta_2} e^{\delta_1 t} + \frac{B_0 - \delta_1}{\delta_2 - \delta_1} e^{\delta_2 t} \right) \sin \frac{\pi n z}{2h}. \quad (5)$$

При односторонней фильтрации значения δ_1, δ_2 определяются аналогичным образом, но вместо h подставляется $2h$.

Для определения величины уплотнения слоя во времени следует полученные решения подставить в уравнение консолидации с учетом линейной наследственной ползучести скелета малопрочных сланцевых пород и проинтегрировать его от 0 до h , то есть

$$S(t) \int_0^h \varepsilon_1(z,t) dz = \int_0^h \left[m_{V_1} \sigma_1(z,t) - \int_0^1 \sigma_1(z,t) \frac{\partial}{\partial \tau} m_V(t,\tau) d\tau \right] dz. \quad (6)$$

Интегрирование этого уравнения дает следующие результаты для случая равномерного распределения уплотняющей нагрузки по глубине:

$$S(t) = Ph \left[m_{V_1} v_1(t) + m_{V_2} v_2(t) \right], \quad (7)$$

где

$$V_1(t) = 1 - \frac{8A_0}{\pi^2} \sum_{m=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{m^2} \left(\frac{B_0 - \delta_2}{\delta_1 - \delta_2} e^{\delta_1 t} + \frac{B_0 - \delta_1}{\delta_2 - \delta_1} e^{\delta_2 t} \right);$$

$$V_2(t) = 1 - e^{-\eta t} - \frac{8A_0}{\pi^2} \sum_{m=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{m^2} \left(\frac{B_0 - \delta_2}{\delta_1 - \delta_2} \frac{e^{\delta_1 t} - e^{-\eta t}}{\delta_1 + \eta} + \frac{B_0 - \delta_1}{\delta_2 - \delta_1} \frac{e^{\delta_2 t} - e^{-\eta t}}{\delta_2 + \eta} \right). \quad (8)$$

Решение этой задачи в частном случае, когда отсутствует сжимаемость поровой воды, совпадает с решением задачи по теории объемных сил, решенной В. А. Флориным, а при отсутствии ползучести скелета – с решением по теории фильтрационной консолидации К. Терцаги.

Для анализа приведем кривые зависимости порового давления от времени, построенные по результатам эксперимента (рис. 1).

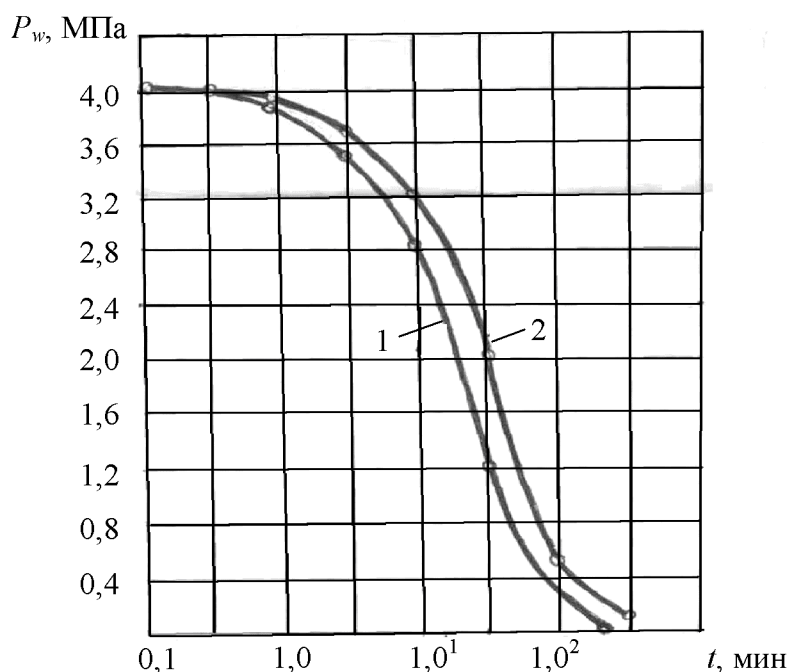


Рис. 1. Зависимость поровых давлений от времени при ступени загрузки 0,4 МПа: 1 – по теории фильтрационной консолидации без учета ползучести скелета и сжимаемости поровой воды; 2 – то же с учетом ползучести скелета, но без учета сжимаемости поровой воды

Как следует из рис. 1, в начальный момент приложения уплотняющей нагрузки поровое давление получает максимальное значение, а затем уменьшается. Это объясняется тем, что в начальный момент приложения уплотняющая нагрузка частично передается на воду и на скелет; экстремальное значение порового давления зависит от толщины уплотняющегося слоя; скорость осадки зависит от скорости фильтрации воды из пор и от свойств ползучести скелета.

Эксперименты проводились с малопрочными сланцевыми породами в условиях одноосного сжатия без возможности бокового расширения. В процессе эксперимента измерялись начальная (условно-мгновенная) осадка, изменяющаяся во времени, и конечная (условно-стабилизированная) осадка. Коэффициенты фильтрации и степени влажности исследованы ранее и являются известными. Образцы находились в водонасыщенном состоянии.

Зная величины начальной осадки, можно определить коэффициент мгновенной относительной сжимаемости массива малопрочных сланцевых пород:

$$m_{v1} = \frac{S_m}{h(P - P_{w,m})}, \quad (9)$$

где $P_{w,m}$ – начальное (условно-мгновенное) поровое давление в образце, которое определяется путем замера или вычисления по формуле

$$P_{w,m} = P \frac{m_{v1}}{m_{v1} + nm_w}, \quad (10)$$

где m_w – коэффициент сжимаемости поровой воды.

Коэффициент вторичной относительной сжимаемости m_{v2} определяется по величине конечной (условно-стабилизированной) осадки, то есть

$$m_{V_2} = \frac{S_{(t \rightarrow \infty)}}{hP} - m_{V_1} \quad (11)$$

В формуле (8) функционал $V_2(t)$ характеризует степень консолидации массива и зависит от фактора времени на малом отрезке времени $\delta_1 t$, мин. Изменения степени консолидации $V_2(t) = \frac{S(t)}{S_{(t \rightarrow \infty)}} = 1,0; 0,9; 0,8; 0,7; 0,6$ в интервале времени 0,1 мин, а при $\delta_1 t = 1$ мин $V_2(t) = 0,6; 0,68; 0,7; 0,74; 0,78$. Зависимости $V_2(t)$ сливаются в один пучок линий при $\delta_1 t = 10$ мин.

Малопрочные сланцевые породы сооружений (плотин, дамб, насыпей, водозаборов и т.д.) обладают ярко выраженной вторичной консолидацией. При рассмотрении процесса консолидации в течение достаточно большого отрезка времени это явление заставляет в расчетах учитывать, кроме наследственной ползучести скелета малопрочных сланцевых пород, еще и процесс выветривания (то есть старения) массива. Поэтому для прогнозирования консолидационного уплотнения необходимо включить коэффициент старения породы, определяемый по наклону прямой осадка–логарифм времени (рис. 2).

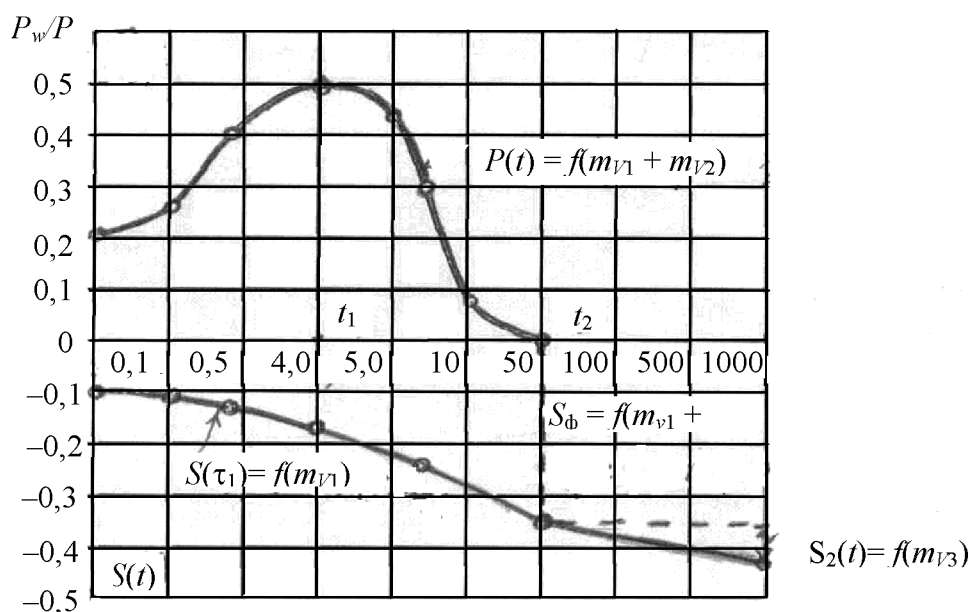


Рис. 2 Схема к определению параметров ползучести τ_1, m_{V_1}, m_{V_2} и вторичной консолидации m_{V_3} малопрочных сланцевых пород мелкодисперсного состава (крупность не более 5 мм) по результатам компрессионных испытаний

Следует отметить, что в этом случае для определения параметра m_{V_2} в качестве условно-стабилизированной осадки (уплотнения) принимали величину, накопленную за период фильтрационной консолидации, то есть в точке перегиба кривой осадка–логарифм времени (см. рис. 2).

Это дает возможность сократить длительность проведения экспериментов с 20...30 до 2...3 дней, так как наклон прямой вторичной консолидации

достаточно точно определяется по трем–четырем точкам и хорошо описывает траекторию, полученную до полной стабилизации осадки.

Таким образом, проведенный эксперимент позволяет прогнозировать уплотнение массива в период фильтрационной и вторичной консолидации. Тогда с учетом процесса старения породы закон уплотнения во времени получит вид

$$S(t) = Ph \left[m_{V_1} v_1(t) + m_{V_2} v_2(t) + m_{V_3} \ln \frac{t}{t_f} \right], \quad (12)$$

где m_{V_3} – коэффициент старения, определяемый по наклону прямой осадка–логарифм времени (см. рис. 2).

Выводы

Консолидация многофазных массивов из малопрочных сланцевых пород связана с взаимодействием твердой и жидкой фазы, изменением их соотношения в пространстве и во времени и другими физико-химическими процессами, такими как консолидационное упрочнение, дробление отдельных кусков, выветривание, старение и т.д.

Составлены уравнения равновесия, физические и геометрические уравнения деформации многофазного массива малопрочных сланцевых пород. Зная эти компоненты, можно составить уравнения совместности, перемещений при уплотнении массива, а также консолидационного процесса.

При совместном решении уравнений формоизменения и объемного деформирования квазиоднофазного массива можно получить дифференциальные уравнения компонентов напряжений во времени с учетом влияющих факторов, таких как боковое давление, структурная связность, структурная и пленочная вода, вязкость и т.д.

При решении плоской и пространственной задач консолидационных процессов основной проблемой является определение начального и промежуточного напряженных состояний рассматриваемого многофазного массива малопрочных сланцевых горных пород под воздействием поверхностных и объемных сил. Для этого использованы приведенные значения коэффициентов модулей сдвига, объемной сжимаемости воды, скелета и порового давления, которые можно определить экспериментально.

Основными и определяющими факторами в процессе формирования напряженно-деформированного состояния многофазного малопрочного сланцевого массива и консолидационного уплотнения являются свойства ползучести и старения скелета, сжимаемости поровой воды. Результаты этих исследований могут быть применены при разработке средств и способов стабилизации сланцевых насыпных массивов в теле инженерных сооружений.

1. *Gryczmanski M., Kawalec J.* Coal mining waste as a structural material in Polish civil and water engineering // 13th International Conference on Solid Waste Technology and Management. – Philadelphia, 1997.