

диафрагмы и деформации основания с учетом ползучести во времени материалов диафрагмы и основания, а также определить контактные давления под подошвой диафрагмы  $P_a(x, t)$ , прогибы в любом сечении диафрагмы  $Y_a(x, t)$ , изгибающие моменты  $M_a(x, t)$ , поперечные силы  $Q_a(x, t)$ . При этом используются параметры ползучести материалов диафрагмы и основания, переменные модули деформации диафрагмы и основания и величины диафрагменной функции и ее корней.

1. Rembielak T., Hromek A., Platek J. Zapobieganie pożarom endogenicznym i odwalon w ścianie na drodze wyprzedzającego iniekcyjnego uszczelniania i wzmacniania rozluźnianego górotworu // Międzynarodowa Konferencja III Szkoła Geomechaniki. – Gliwice–Ustron, Polska, listopad 23–26, 1997. – S. 227– 238.

2. Rembielak T., Hromek A., Platek J. Zastosowanie iniekcji uszczelniania i wzmacniania górotworu w otoczeniu przecznicy 9 KWK "Kazimierz - Juliusz", przed i podczas, jej udrażniania, dla ograniczenia możliwości odnowienia i powstania nowych pożarów endogenicznych // VII Międzynarodowe Sympozjum Geotechnika –Geotechnics 96. – Gliwice–Ustron, Polska, październik 22–25, 1996.– S. 159–170.

УДК 624.539.3

## КОНСОЛИДАЦИЯ И МИНЕРАЛИЗАЦИЯ ИЛИСТЫХ ГРУНТОВ ПРИ СЖАТИИ

*Р.А. Самедов, асп. (ИГМ НАН Украины)*

*При стисненні мулистих ґрунтів мають місце фільтраційна консолідація, осідання в часі, повзучість скелета породи і мінералізація органічних домішок. Ці процеси необхідно розглядати спільно як єдиний фізичний процес.*

При сжатии в илстых грунтах происходит фильтрация воды, а, следовательно, и фильтрационная консолидация. Однако осадка илстых грунтов (уплотнение) не прекращается и после окончания процесса фильтрационной консолидации (когда поровое давление воды приближается к нулю), а продолжается весьма длительное время вследствие ползучести скелета породы.

Консолидация илов как многофазных грунтов связана с взаимодействием твердой и жидкой фаз грунта, изменением их соотношения в пространстве и во времени, другими физико-химическими процессами (тиксотропным упрочнением, старением и др.) и описывается формулой

$$\frac{\partial \varepsilon_0}{\partial t} + nm_{\text{вр}} \frac{\partial P_{\text{вр}}}{\partial t} = \frac{k_{\Phi}}{\gamma_w} \nabla^2 P_{\text{вр}} \quad (1)$$

где  $\epsilon_0$  – относительная объемная деформация среды;  $n$  – пористость;  $m_{vw}$  – коэффициент объемной сжимаемости поровой газосодержащей жидкости;  $k_f$  – коэффициент фильтрации;  $P_w$  – поровое давление;  $\gamma_w$  – удельный вес воды;

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \text{оператор Лапласа.}$$

Уравнение (1) для определения порового давления справедливо для закона деформирования илистых грунтов и решается совместно с уравнениями механики деформируемых сплошных сред на основе принципа эффективных напряжений, полагая, что напряжения в скелете  $\sigma$ , (эффективные напряжения) и напряжения в поровой воде  $P_w$  (поровое давление) связаны уравнением

$$\sigma = \sigma_3 + P_w \quad \text{или} \quad \sigma_3 = \sigma - P_w, \quad (2)$$

т.е. эффективные напряжения в любой точке водонасыщенного (илистого) грунта  $\sigma$ , равны разности между полным напряжением  $\sigma$  и нейтральным давлением  $P_w$ .

Согласно принципу эффективных напряжений К. Терцаги, в илистых грунтах при действии внешних сил необходимо рассматривать две составляющие давления: эффективное давление в скелете грунта  $P_s$  и нейтральное давление в поровой воде  $P_w$ . Эффективное давление уплотняет и упрочняет грунт, а нейтральное создает напор в поровой воде, вызывая процесс ее фильтрации в направлении, противоположном направлению действия сил.

Для любого момента времени полное давление  $P$  в илистых грунтах равно сумме эффективных давлений в скелете грунта  $P_s$  и нейтрального (порового) давления  $P_w$ , т.е.

$$P = P_s + P_w \quad \text{или} \quad P_s = P - P_w. \quad (3)$$

Эффективные напряжения  $\sigma$ , вызывают изменение коэффициента пористости грунта  $e$ , обуславливающего при сжатии уплотнение илистого грунта.

Изменение коэффициента пористости ( $\Delta e$ ) при нагрузке является функцией изменения действующих эффективных напряжений  $\Delta \sigma_s$ :

$$\Delta e = f_v(\Delta \sigma_s). \quad (4)$$

При небольших изменениях давления (0,05...0,1 МПа) величина  $f_v$  может приниматься постоянной, равной  $f_v = m_{vw}$ , (где  $m_{vw} = \Delta e / \Delta \sigma_s$ , – коэффициент объемной сжимаемости илистого грунта).

Коэффициент объемной сжимаемости газосодержащей поровой воды определяется выражением

$$m_{vw} = (1 - J_w) / (P_a + P), \quad (5)$$

где  $J_w$  – коэффициент водонасыщенности;  $P_a$  – атмосферное давление.

Следует отметить, что в илстых грунтах сопротивление сдвигу зависит не от полных напряжений, а лишь от их эффективной части. В таком случае зависимость касательных напряжений от эффективной части напряжений будет иметь вид

$$\tau = f(\sigma - P_w). \quad (6)$$

Уравнения (1)–(6) характеризуют взаимодействие фаз илстого грунта и являются основой теории фильтрационной консолидации водонасыщенных грунтов.

При описании напряженно-деформированного состояния массива многофазных грунтов и составлении соответствующих уравнений необходимо учитывать совместное действие ползучести скелета грунта и сжимаемости газосодержащей поровой воды в илстых или болотистых грунтах. Рассмотрение этих явлений в отдельности при решении задач консолидации не дает ожидаемого эффекта и не позволяет описывать поведение илстых грунтов при длительном сжатии и наличии процесса фильтрации воды.

В зависимости от принятого вида физического уравнения для скелета илстого грунта уравнение консолидации (5) может иметь различный вид (линейный, нелинейный) (рис. 1); строгое решение этого уравнения не всегда удается получить аналитическим путем, поскольку неизвестен закон изменения суммы главных напряжений во времени. Поэтому, в соответствии с теорией объемных сил, предложенной Флорином и Био, согласно которой сумма общих напряжений в течение всего времени уплотнения грунта остается постоянной, в первом приближении можно принять, что сумма главных напряжений является неизменной во времени. Тогда уравнение консолидации для илстых грунтов примет вид

$$\frac{\partial P_w}{\partial t} = C_1'' \nabla^2 P_w. \quad (7)$$

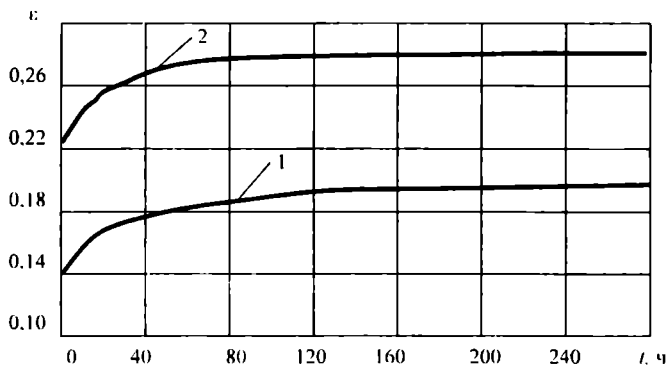


Рис. 1. Кривые консолидации образцов илстых грунтов при давлениях  $P = 0.015$  МПа (1) и  $0.035$  МПа (2)

где  $C_v^r = \frac{k_\phi (1 + 2\xi_0)}{3\gamma_w (m_v + nm_{vw})}$ ,  $\xi_0$  -- коэффициент бокового давления в состоянии покоя.

Следует отметить, что в илистых грунтах очень важную роль приобретает присутствие микроорганизмов, обуславливающих газовыделение, способствующих разложению органической части  $M_r$  и возникновению плывунов. Скорость разложения органической части ила под действием микроорганизмов обуславливает темпы увеличения минеральной составляющей органических масс, т.е. их минерализацию.

В условиях подводного залегания (когда в илах мало микроорганизмов) минерализация илистых грунтов происходит медленно. С понижением уровня грунтовых вод скорость разложения органических остатков увеличивается. Кроме того, при длительном уплотнении процессы разложения органической части ила и минерализации ускоряются в зависимости от колебания уровня грунтовых вод и условий аэрации.

Считая основным фактором минерализации органических веществ концентрацию солей их порового раствора, можно оценить скорость минерализации  $\frac{\partial M_r}{\partial t}$  на основе теории диффузии:

$$\frac{\partial R}{\partial t} = D_m \frac{\partial^2 M_r}{\partial z^2}, \quad (8)$$

где  $D_m$  -- коэффициент миграции порового раствора, аналогичный коэффициенту диффузии. Коэффициент  $D_m$ , определяемый экспериментальным путем, является переменной величиной и зависит от температуры, глубины илистого слоя, концентрации порового раствора и других факторов.

В первом приближении, принимая коэффициент  $D_m = \text{const}$ , решение уравнения (8) для слоя конечной толщины  $h$  при начальном условии  $M_r(z, 0) = M_{r,0}$  и граничных условиях  $M_r(0, t) = M_{r,1}$ ;  $\frac{\partial M_r(h, t)}{\partial z} = 0$  можно представить в следующем виде:

$$M_r(z, t) = \frac{4}{\pi} (M_{r,1} - M_{r,0}) \sum_{n=1,3}^{\infty} \frac{1}{n} \sin \frac{\pi n z}{2h} e^{-4h^2 \frac{\pi^2 n^2}{4h^2} D_m t} \quad (9)$$

Это уравнение определяет закономерность более быстрой минерализации слоя илистых грунтов с большим количеством органических примесей мощностью  $h$  при заданной степени минерализации  $M_{r,1}$  и начальной  $M_{r,0}$ . Из уравнения (9) вытекает, что с увеличением толщины слоя скорость минерализации уменьшается.

Следует отметить, что для решения задач геомеханики, связанных с использованием органо-минеральных составляющих илистых грунтов в качестве оснований сооружений, необходимо к уравнениям механики сплошных деформируемых сред и многофазных грунтов добавить специальные зависимости (8), характеризующие изменение органической составляющей этих

грунтов в пространстве и во времени, и, в первую очередь, изменение степени их минерализации, т.е. учесть длительно протекающие процессы деформирования грунтов вследствие разложения органических примесей в составе илистых грунтов.

Степень уплотнения илистых грунтов при сжатии существенно влияет на их структуру и водопроницаемость. При отсутствии уплотнения и для неструктурных разностей в илистых грунтах закон Дарси полностью применим, а при определенном уплотнении возникает начальный градиент напора  $i_0$ , после преодоления которого в илистых грунтах возможна фильтрация воды или фильтрационная консолидация; при этом величина начального градиента напора и структурная прочность сжатия взаимно связаны. Поэтому процессы фильтрационной консолидации, ползучести скелета и минерализации должны рассматриваться совместно, как единый процесс, создающий условия деформирования илистых грунтов.

Как известно, для прогноза деформаций ползучести скелета грунтов применяется теория наследственной ползучести в линейной и нелинейной постановках. Учитывая, что в состав ила входят растительные органические смеси, для определения относительных деформаций растительного скелета необходимо подобрать специфические ядра ползучести, входящие в состав уравнения наследственной ползучести.

Уравнение наследственной ползучести применительно к илистым грунтам можно записать в следующем виде:

$$\epsilon(t) = \frac{1}{E_{\text{ин}}} \left[ \alpha(t) + \int_0^t K(t-\tau_0) \alpha(\tau_0) d\tau \right] \quad (10)$$

Ядрами ползучести для илистых грунтов примем

$$K(t-\tau_0) = \frac{L}{\delta(t-t_0)+1}, \quad (11)$$

где  $L$ ,  $\delta$  – параметры ядра ползучести, определяемые опытным путем.

При испытании образцов илистых грунтов, содержащих органические включения при  $M_r = 15-25\%$ , при малых нагрузках (порядка 0,005–0,01 МПа) имеют место восстанавливающиеся деформации (как упругие, так и структурно-обратимые), а при больших нагрузках (при  $P > P_{\text{сгр}}$ ) – необратимые структурно-остаточные деформации.

В общем случае полная деформация  $S_{\text{п}}$  состоит из суммы восстанавливающейся  $S_r$  и остаточной  $S_{\text{ост}}$  деформаций:

$$S_{\text{п}} = S_r + S_{\text{ост}}. \quad (12)$$

Восстанавливающаяся деформация  $S_r$  характеризуется коэффициентом, аналогичным коэффициенту линейно деформируемого полупространства:

$$k_r = \frac{1-\mu_0^2}{E_r}. \quad (13)$$

Остаточные деформации определяются согласно теории размерностей по степенным зависимостям следующего характера:

$$P_V = A_T \left( \frac{S_{ост}}{d} \right)^n, \quad (14)$$

где  $P_V$  – внешнее давление, МПа;  $A_T$  – коэффициент, аналогичный числу твердости, МПа ( $\text{Н/м}^2$ );  $d$  – диаметр круглой площадки;  $n$  – степень упрочнения (безразмерный параметр). Тогда величина полной относительной осадки сжимаемого илистого грунта при действии местной нагрузки имеет вид

$$\frac{S_n}{d} = \omega k_V P + \eta \sqrt{\frac{P}{A_T}}, \quad (15)$$

где  $\omega$  – коэффициент формы штампа или испытываемого образца.

Для илистых грунтов с постоянным пределом упрочнения  $\sigma_0$  можно принимать равным структурной прочности (т.е.  $\sigma_0 = P_{стр}$ ); при этом модуль остаточной деформации штампа  $E_{ост.sh}$  (при вдавливании круглого жесткого штампа в илистый грунт, если известен модуль компрессионной остаточной деформации  $E_{ост,k}$ ) определяется формулой

$$E_{ост.sh} = \frac{E_{ост,k}}{1 - \frac{P_{стр}}{P} \left( 1 + \ln \frac{P}{P_{стр}} \right)}. \quad (16)$$

Модуль общей деформации  $E_0$  определяется по результатам определения опытным штампом модулей остаточной  $E_{ост.sh}$  и восстанавливающейся  $E_{v.sh}$  деформации по формуле

$$E_0 = \frac{E_{ост.sh} E_{v.sh}}{E_{ост.sh} + E_{v.sh}}. \quad (17)$$

Коэффициент относительной сжимаемости равен

$$m_{1v} = \frac{S}{h, P}, \quad (18)$$

где  $S$  – полная стабилизированная осадка,  $h, = A\omega d$  – мощность эквивалентного слоя илистого грунта (по Н.А. Цытовичу), где  $A = \frac{(1 - \mu_0)^2}{1 - 2\mu_0}$  и  $\omega$  – коэффициент формы и жесткости штампа (для круглого штампа  $\omega = 0,79$ );  $d$  – диаметр опытного штампа;  $P$  – величина внешней удельной нагрузки на штамп. Тогда модуль общей деформации будет иметь вид

$$E_0 = \frac{1 - \mu_0^2}{A m_{1v}}. \quad (19)$$

Учитывая, что глубина вдавливания штампа в илах обуславливается не только сопротивлением грунта сжатию, но и сопротивлением срезу по

периметру  $\Pi$ , пренебрегать которым при расчете осадки илистых грунтов нежелательно, осадку для илистых грунтов можно определить по формуле

$$S = (B_{\text{op}} + C_{\text{op}} \frac{\Pi}{F}) P, \quad (20)$$

где  $B_{\text{op}}$  и  $C_{\text{op}}$  – коэффициенты, зависящие от количества органических примесей в составе ила и величины удельного внешнего давления на илистый грунт.

Из формулы (20) вытекает, что при значительном вдавливании определяющее значение приобретает сопротивление, возникающее в результате образования под штампом ядра минимальных смещений, и зависимость осадки от отношения периметра к площади штампа  $\Pi/F$  становится нелинейной (рис. 2, кривые 4 и 5).

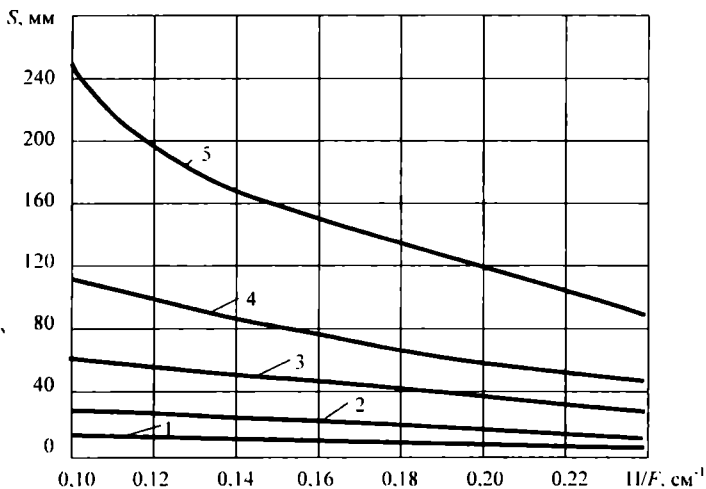


Рис. 2. Зависимость осадки  $S$  от отношения периметра  $\Pi$  к площади штампа  $\Pi/F$  при различной нагрузке: 1 – 0.15 МПа; 2 – 0.025 МПа; 3 – 0.045 МПа; 4 – 0.06 МПа; 5 – 0.08 МПа

Таким образом, при сжатии в илистых грунтах имеют место процессы фильтрационной консолидации, осадки во времени, ползучести скелета и минерализации органических примесей, которые необходимо рассматривать совместно, как единый физический процесс.