

Самедов А.М., д.т.н., профессор
Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт»
Ткач Д.В., ведущий инженер
ГП «Проектный институт «Укрметротоннельпроект»

НЕЛИНЕЙНАЯ ДЕФОРМИРУЕМОСТЬ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ И ВОДОНЕПРОНИЦАЕМОСТЬ ПЕРЕУВЛАЖНЕННЫХ ГРУНТОВ ПРИ СЖАТИИ

Выполнены исследования переувлажненных грунтов в модифицированном и природном состояниях. Получены коэффициенты относительной сжимаемости, которые позволяют определить величины нейтральных давлений в поровой воде и описать процессы фильтрационной консолидации, уплотнения твердых частиц и деформации ползучести. Выяснено, что при уплотнении переувлажненных грунтов после фильтрационной консолидации протекает нелинейная деформация в твердых частицах грунта. В процессе исследований удалось определить стадии возникновения и развития напряженно-деформированного состояния переувлажненных грунтовых массивов при сжатии.

Ключевые слова: переувлажненный грунт, фильтрационная консолидация, поровое давление, деформация грунтов, ползучесть, основание сооружения, грунтовый массив, подземное сооружение.

Самедов А.М., д.т.н., професор
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»
Ткач Д.В., провідний інженер
ДП «Проектний інститут «Укрметротунельпроект»

НЕЛІНІЙНА ДЕФОРМОВАНІСТЬ ТВЕРДИХ ЧАСТОК ТА ВОДОПРОНИКНІСТЬ ПЕРЕЗВОЛОЖЕНИХ ҐРУНТІВ ПРИ СТИСНЕННІ

Виконано дослідження перезволожених ґрунтів у модифікованому і природному станах. Отримано коефіцієнти відносної стисливості, які дозволяють визначити величини нейтральних тисків у поровій воді й описати процеси фільтраційної консолидації, ущільнення твердих частинок і деформації повзучості. З'ясовано, що при ущільненні перезволожених ґрунтів після фільтраційної консолидації протікає нелінійна деформація у твердих частках ґрунту. У процесі досліджень удалось визначити стадії виникнення і розвитку напружено-деформованого стану перезволожених ґрунтових масивів при стисненні.

Ключові слова: перезволожений ґрунт, фільтраційна консолидація, поровий тиск, деформація ґрунтів, повзучість, фундамент споруди, ґрунтовий масив, підземна споруда.

Samedov A., ScD, Professor
National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»
Tkach D., lead engineer
The State Enterprise «Project institut «Ukrmetrotonnelproekt»

NONLINER DEFORMABLE SOLIDS AND WATERLOGGED GROUND WATER RESISTANCE IN COMPRESSION

To rewet soils are saturated soils, which don't have a composition free of water, that move in capillary and gravitational form, that is interstitial water in a free state by its own weight does not move. For the movement of this water require additional pressure, which creates a conversion to the free interstitial water or the temperature for conversion water into steam. To water-logged soils include bog, half-bog soils, sod-podzolic, carbonized and clay soils, cation exchange capacity of more than 30 mg per 100 g of soil and exchangeable cations are included in the vast amount of hydrogen and aluminum. These soils are not fixed binders such as portland cement, slag cement, polymer and selikat solutions.

It should be noted that the process of filtration consolidation takes place during compression in water-logged soil for a very long time t , so we can assume that the pore pressure $U_w(t)$ takes place at a different time, where:

Stage I – corresponds to the initial stress-strain state, and the stress field forms in the skeleton and pore water when apply external load, but the filtering process has not spread to the interior of the array of soil waterlogging. This state does not continue long, but has already begun the development of filtration consolidation.

Stage II – corresponds to the time t , when in the soil originate compression of the pore water of the entire volume of water-logged array and begins dissipation of excess pore pressure and ends with the complete dissipation of excess pore pressure and compaction of solids by squeezing pore water in the pore space.

Stage III – corresponds to the end of the stress-strain state water-logged soil, when all the pressure σ of the load perceive by soil skeleton and definitely deformed due to the change of creep solids. The duration of the creep process of the skeleton is almost less then during the full squeezing pore water or the process of consolidation and compaction, or duration of the second stage. The duration of the volumetric creep may take longer during the operation building which built on water-saturated and water-logged soil foundation. That can express by a hereditary creep theory or theory of aging.

In this study conducted research water-logged soils in the modified and natural conditions. We got the coefficients of relative compressibility, which allow us to determine the values of the neutral pressure in the pore water and describe the processes of filtration consolidation, solids densification process and creep processes. In the solid particles of the soil occurs nonlinear distortion after filtration consolidation with compacting water-logged soil. It was possible to identify the stages of formation and development of stress-strain state of waterlogged soil masses under compression.

Keywords: *water-logged soil, filtration consolidation, pore pressure, soil deformation, creep, base construction, ground array underground structure.*

Введение. В водонасыщенном грунте поры заполнены свободной водой (гравитационной и капиллярной), которая может двигаться в случае применения строительного водопонижения (фильтрации – дренажа – заполнения щебнем, гравием и другими зернистыми материалами). В водонасыщенном грунте природная влажность $W \rightarrow W_{sat}$, где $W_{sat} = 28 - 55\%$ влаги в грунтах. В таких грунтах с применением мер водопонижения природную влажность W можно уменьшить до 25% , т.е. до влажного состояния, их СНиП разрешает использовать как основания сооружений.

В переувлажненном грунте свободная, гравитационная и капиллярная вода в порах отсутствует, вода в порах не двигается, природная влажность $W \rightarrow W_{sat}$ (от 30 до 55%). В переувлажненном грунте строительные понижения не дают никаких уменьшений влажности, и грунт остается влажным постоянно время: $W \rightarrow W_{sat} = const$. Эти грунты можно только сушить, поэтому проблемы их как основания сооружений очень трудно решаемы и СНиП не рекомендует принимать их в качестве основания сооружений.

Такие грунты мы предлагаем использовать для оснований путем высушивания с помощью негашеной извести, жженого магнезия и закреплять с добавлением цемента.

К переувлажненным грунтам относятся водонасыщенные грунты, у которых нет в составе свободной воды, имеющей движение в капиллярном и гравитационном виде, т.е. поровая вода в свободном виде от собственного веса не движется. Для движения этой воды требуется дополнительное давление, которое создает переход поровой воды к свободной, или температура для пререхода поровой воды в пар. Также к переувлажненным грунтам можно отнести болотные, полуболотные почвы, дерново-подзолистые, гумистые и карбонизированные глинистые грунты, емкость обмена катионов которых превышает 30 мг на 100 г грунта, а в обменные катионы входят в преобладающем количестве водород и алюминий. Такие грунты не закрепляются вяжущими материалами, например портландцементами, шлакопортландцементами, полимерными и силикатными растворами.

Анализ последних источников исследований и публикаций. В некоторых литературных источниках [1, 2, 9] приводятся исследования реологических свойств грунтов. Однако в них отсутствуют изменения параметров переувлажненных глинистых грунтов, которые часто встречаются при строительстве подземных сооружений. В изученной литературе [1 – 14] не изучается достаточно глубоко нелинейная деформируемость твердых частиц, особенно модифицированного слабого переувлажненного грунта.

Выделение не решенных ранее частей общей проблемы. Проводимые ранее исследования не рассматривали работу переувлажненных грунтов как основания подземного сооружения и его поведения с учетом длительного периода эксплуатации. Следовательно, исследование деформируемости данных грунтов, которая наблюдается во время длительного периода восприятия сжимающих нагрузок с учетом водонепроницаемости и ползучести, является актуальной задачей.

Основной материал и результаты. К переувлажненным грунтам можно отнести: суглинок легкий карбонатный, суглинок тяжелый карбонатный гумусированный, супесь легкую гумусированную, супесь тяжелую гумусированную и карбонатную.

Показатели этих грунтов можно увидеть в табл. 1 по нашим испытаниям образцов-близнецов, взятых при различных глубинах $3,0 - 5,0$ м бурениями скважин.

Таблица 1 – Физические показатели переувлажненных грунтов

Показатели переувлажненных грунтов	Обозначения и ед. измерения	Образцы				
		№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5
Удельный вес частицы	$\gamma_s, \text{кН/м}^3$	26,30	26,90	25,70	27,40	27,60
Удельный вес грунта	$\gamma, \text{кН/м}^3$	16,4	17,8	16,2	15,6	19,9
Удельный вес в сухом состоянии	$\gamma_d, \text{кН/м}^3$	13,6	14,2	14,1	15,2	17,0
Природная влажность	W, доли ед.	0,24	0,26	0,28	0,27	0,29
Оптимальная влажность стандартного уплотнения	W_{op} , доли ед.	0,12	0,14	0,11	0,13	0,15
Максимальная молекулярная влажность	W_M , доли ед.	0,086	0,092	0,10	0,084	0,096
Нижний предел раскатывания	W_p , доли ед.	0,15	0,18	0,16	0,19	0,22
Верхний предел текучести	W_L , доли ед.	0,25	0,27	0,24	0,23	0,28
Гран. состав содержания фракций, %:						
– более 2 мм		–	–	2	6	8
– 2,0 – 0,1 мм		34	42	22	30	21
– 0,1 – 0,05 мм		27	25	28	22	16
– 0,05 – 0,002 мм		34	27	41	39	53
– менее 0,002 мм		5	6	7	3	2
Сила сцепления	C, МПа	0,012	0,015	0,013	0,0115	0,0146
Угол внутреннего трения	ϕ , град.	$12^{\circ}10'$	$13^{\circ}50'$	$12^{\circ}40'$	$11^{\circ}40'$	$14^{\circ}40'$
Предел прочности при сжатии в природном сложении	R, МПа	0,13	0,22	0,18	0,16	0,19
Потери при прокаливании	%	4,3	3,6	4,8	7,3	3,9
pH водной вытяжки	–	5,0	6,7	7,1	7,0	5,4

Примечание: образцы относятся :

- № 1 – суглинок легкий гумусированный карбонатный;
- № 2 – суглинок тяжелый гумусированный карбонатный;
- № 3 – суглинок легкий карбонатный гумусированный;
- № 4 – супесь легкая карбонизированная гумусированная;
- № 5 – супесь карбонизированная гумусированная.

При прогнозировании осадок оснований сооружений, состоящих из вышеперечисленных переувлажненных грунтов, в случае сжимаемости оснований, сначала возникает нейтральное давление $\sigma_{\text{эф}}$, которое воспринимается твердой частицей (скелетом) переувлажненных грунтов. Сжатая поровая вода нейтральным давлением приводит к фильтрационной консолидации переувлажненных грунтов, которую можно выразить из постоянства объемной деформации поровой воды и твердых частиц в следующем виде:

$$\frac{\partial E}{\partial t} - n \frac{\partial E_w}{\partial t} = \frac{K_{\phi}}{\gamma_w} \nabla^2 u_w, \quad (1)$$

где E и E_w – объемные деформации грунта и поровой воды;

n – пористость грунта;

K_{ϕ} – коэффициент фильтрации грунта;

$\gamma_w = 10 \text{ кН/м}^3$ – удельный вес поровой воды;

∇ – оператор Лапласа;

U_w – поровое давление;

t – время.

Уравнение (1) характеризует закон деформации твердых частиц грунта и поровой воды в водонасыщенных и переувлажненных грунтах. Учитывая, что поровая вода практически не сжимаема, т.е. $E_w = 0$, а фактически в переувлажненном грунте, как и в водонасыщенном, твердые частицы (скелет) тоже не сжимаемы, т.к. эффективное давление доходит до твердой частицы через контактную точку, площадь которой очень мала, коэффициент сжимаемости $m_0 = \frac{e_1 - e_2}{P_2 - P_1}$, МПа⁻¹, в водонасыщенном грунте очень мал (примерно в 10 раз меньше, чем коэффициент сжимаемости поровой воды). Значит, в переувлажненном грунте твердые частицы тоже практически не сжимаемы. Поэтому при сжатии поровая вода должна отфильтровываться или отжиматься, после чего твердые частицы будут воспринимать эффективное давление и грунт будет уплотняться, а затем будут развиваться деформации ползучести скелета.

Сначала рассмотрим отжатие поровой воды в переувлажненном грунте (на примере суглинка, супеси и глины), которое сопровождается коэффициентом нелинейной фильтрации K_{ϕ} ,

$$K_{\phi} = K_{\phi 0} \cdot \eta \cdot n_1, \quad (2)$$

где $K_{\phi 0}$ – начальное значение коэффициента фильтрации;

η – экспериментальный параметр,

$$\eta = \exp[-a \cdot (q - U_w)];$$

a – коэффициент, который определяется опытным путем или экспериментально;

q – внешняя нагрузка;

U_w – нейтральные давления поровой воды;

n_1 – параметр нелинейности водопроницаемости глинистых переувлажненных грунтов, определяемый экспериментально и зависящий от вида глинистых грунтов.

Коэффициент нелинейной фильтрации переувлажненного грунта (1) можно выразить в следующем виде степенной функции:

$$K_{\phi} = K_{\phi 0} \cdot e^{-n_1 \cdot a \cdot \sigma},$$

где n_1 , a – коэффициенты, определяемые экспериментально;

σ – давление от внешней нагрузки q .

Коэффициент нелинейной фильтрации K_f в переувлажненном грунте при сжатии происходит в длительном времени t и сопровождается нелинейной деформацией фильтрационной консолидации, выражаемой в степенной функции в следующем виде:

$$U_w(t) = U_{w,0}(t_0) + [1 - U_{w,0}(t)] \cdot [1 - \exp(-\tau' t)], (0 \leq t \leq t_k), \quad (3)$$

где $U_w(t)$ – изменение порового давления во времени t ;

$U_w(t_0)$ – начальное поровое давление при условно мгновенном времени $t_0 \leq 1$ ч;

τ' – коэффициент, характеризующий обратную величину времени, например $\tau = 1 / \tau'$, час⁻¹, зависит от условий дренирования поровой воды, вида грунта, величины уплотняющих давлений (коэффициент τ' определяется путем испытания образцов переувлажненных (или водонасыщенных) грунтов в компрессионном приборе при давлениях $P_i = 0,05 - 0,3$ МПа с обеспечением фильтрации);

t_k – время завершения (конечная) фильтрационной консолидации при максимальной величине уплотняющих давлений, например до $P = 0,4$ МПа, или давлении от собственного веса слоя грунта, толщина слоя – 10 м, время завершения фильтрационной консолидации будет более 10 лет.

Процесс фильтрационной консолидации во времени и деформация уплотнения переувлажненных грунтов показаны на рис. 1.

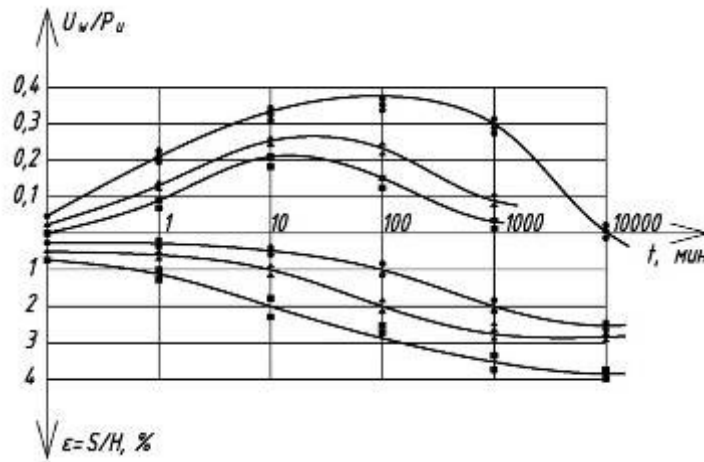


Рисунок 1 – Кривые консолидации поровой воды образцов из переувлажненных суглинков легких карбонатных гумусированных (торфяные включения до 8,2%, карбонатные – 16,4%) и уплотнения твердых частиц (деформация ε) при уплотняющих давлениях $P_u=0,1 - 0,3$ МПа во времени t : 1 – $P_u=0,1$ МПа; 2 – $P_u=0,2$ МПа; 3 – $P_u=0,3$ МПа; $\varepsilon=s/h, \%$, S – осадка, $h = 25$ мм – высота образца на компрессионном приборе

Как видно из рис. 1, по кривым консолидации поровой воды в переувлажненных легких карбонизированных и гумусированных суглинках в природном сложении во время испытания образцов-близнецов на компрессионном приборе можно определить, что максимальная величина давления поровой воды U_w зависит от величины уплотняющих давлений P_u и после 50 мин. уменьшается, а после 1000 мин. завершается. Процесс уплотнения твердых частиц (деформация ε) начинается при минимальном времени t , и до 10 мин. стабильно происходят уплотнения, затем до 1000 мин. они увеличиваются, а после 1000 мин. уплотнения стабилизируются. Это показывает, что после 100 ч процесс консолидации поровой воды почти завершается и уплотнения доходят до максимального значения.

Процессы фильтрационной консолидации поровой воды и уплотнения твердых частиц проходят при нелинейной затухающей форме.

При уплотнении переувлажненных грунтов после фильтрационной консолидации (или отжатия определенной части поровой воды) протекает нелинейная деформация в твердых частицах грунта (скелете).

Эту деформацию можно выразить в следующем виде:

$$\frac{\partial E}{\partial t} = b \cdot e^{-\frac{a\sigma}{t}} \quad \text{или} \quad e(t) = e_0 - b \cdot (1 - e^{-\frac{a\sigma}{t}}), \quad (4)$$

где e_0 – начальный коэффициент пористости переувлажненного грунта в природном состоянии,

$$e_0 = \frac{\gamma_s}{\gamma} (1 + w) - 1;$$

γ_s – удельный вес частиц, кН/м³;

γ – удельный вес грунта, кН/м³;

w – природная влажность;

$e(t)$ – коэффициент пористости при уплотнении во времени t ;

a и b – параметры, определяемые испытаниями, они зависят от вида переувлажненного грунта и от уплотняющих давлений σ ;

$e = 2,72$ – постоянная основания десятичных логарифмов.

Если отсутствуют значения опытных параметров a и b , то можно использовать $a = 18,15 \text{ МПа}^{-1}$, $b = 7,10$ для переувлажненных карбонизированных и гумусированных суглинков, имеющих коэффициент фильтрации $K_f = 2,7 - 2,9 \cdot 10^{-5} \text{ м/ч}$ и коэффициент пористости $e_0 = 0,88 - 0,91$ в природном состоянии, при уплотняющих давлениях $\sigma = P_u = 0,25 - 0,35 \text{ МПа}$ коэффициент сжимаемости переувлажненных частиц грунта $m_w = 10^{-2} - 1,2 \cdot 10^{-2} \text{ МПа}^{-1}$, фильтрационная консолидация завершается без уплотняющих давлений очень длительное время (примерно 25 – 35 лет от собственного веса при толщине слоя 8 – 10 м или $P_u = 0,05 \text{ МПа}$).

Коэффициент относительной сжимаемости скелета, определяемый в компрессионном испытании переувлажненных грунтов, будет

$$m_v = m_{v1} + m_{v2} + m_{v3}, \quad (5)$$

где m_{v1} – коэффициент условно-мгновенного относительного сжатия при $t=0$;

m_{v2} – коэффициент вторичного относительного сжатия (т.е. в процессе консолидации или сжатия пор воды начинается фильтрация отжатой части поровой воды под нейтральным давлением при $t=1$ ч и больше);

m_{v3} – коэффициент относительного сжатия переувлажненного грунта во времени при $t=10$ часов и более при уплотнении и деформации ползучести скелета.

Тогда суммарные коэффициенты относительной сжимаемости переувлажненного грунта во времени будут

$$m_v(t) = m_{v1} + m_{v2} \cdot [1 - e^{-\delta(t-\tau)}] + m_{v3} \cdot \frac{t}{t_k}, \quad (6)$$

где δ – параметр ползучести твердых частиц, которая происходит после отжатия частиц поровой воды и уплотнения твердых частиц за счет уменьшения порового пространства, определяется путем испытаний на ползучесть твердых частиц или скелета;

τ – отрезок времени, за который протекает фильтрация поровой воды под нейтральным давлением.

Если условно считать, что переувлажненный грунт состоит из упругого скелета (например, из мелкого или пылеватого песка, как супесь или суглинок) и поровой воды, заполняющей полностью поровое пространство в виде двухфазного грунта, то приходим к уравнению консолидации, предложенному Терцаги – Герсевановым, в следующем виде:

$$\frac{\partial U_w}{\partial t} = c_v \cdot \frac{\partial^2 U_w}{\partial z^2}, \quad (7)$$

где c_v – коэффициент фильтрационной консолидации при сжатии, $c_v = \frac{K_\phi}{\gamma_w m_v}$.

Если состояние скелета переувлажненных грунтов принимать в виде уравнения наследственной ползучести после фильтрации поровой воды и уплотнения за счет уменьшения пор, то уравнение консолидационного уплотнения под поровым давлением во времени t будет, исходя из компрессионных испытаний, с учетом коэффициентов относительной сжимаемости m_{v1} , m_{v2} , m_{v3} ,

$$U_w(t) = U_w(t=0) \cdot \left[1 + \frac{m_{v2}}{m_{v1} \cdot (1 + \psi_1 \cdot r) + \psi_2 \cdot m_{v2}} \cdot \left\{ 1 - \exp \left[-\delta \cdot \left(1 - \frac{m_{v2}}{m_{v1} + m_w \cdot n} \right) \right] \right\} \right], \quad (8)$$

где m_w – коэффициент относительной сжимаемости поровой воды в условно-мгновенном времени $t=0$ при нейтральном поровом давлении $U_w(t=0)$, полученной деформации сжимаемости $\varepsilon_l(t=0)$ за счет уменьшения пористости n ,

$$m_w = \frac{\varepsilon_l(t=0)}{U_w(t=0) \cdot n};$$

$U_w(t=0)$ – поровое давление при сжатии давлением σ в мгновение времени $t=0$,

$$U_w(t=0) = \frac{\partial m_{v1}}{n \cdot m_v + m_{v1}};$$

σ – общее давление при сжатии переувлажненного грунта;

$\sigma = \sigma_{\varepsilon\phi} + \sigma_w$ ($\sigma_{\varepsilon\phi}$ – часть давления, воспринимаемого твердыми частицами, эффективное давление создается после нейтрального σ_w – порового давления, которое воспринимает поровая вода);

ψ – изменение коэффициента пористости e при $t=0$, т.е. обратная величина начального коэффициента пористости, в данном случае $e=e_0$,

$$\psi = \frac{1}{e(t=0)};$$

r – коэффициент, зависящий от соотношения коэффициента относительной сжимаемости и коэффициента пористости,

$$r = \frac{m_{v1}}{m_w} \cdot [1 + e(t=0)].$$

Параметр ползучести переувлажненного грунта при компрессионном сжатии можно принимать в следующем виде с учетом коэффициента относительной сжимаемости:

$$\varepsilon_l(t) = \sigma_{\varepsilon\phi} \cdot \{m_{v1} + m_{v2} \cdot [1 - \exp(-\delta)t]\}, \quad (9)$$

где $m_{v2} = m_v - m_{v1}$ – коэффициент относительной сжимаемости после отжатия определенной части поровой воды и после уплотнения за счет освободившихся пор при отжатии части поровой воды в процессе деформации ползучести $\varepsilon_l(t)$.

При компрессионном отжати были определены:

$$m_v = \frac{\varepsilon_1}{\sigma_{эф}}; \quad m_{v1} = \frac{\varepsilon_{1e}}{\sigma_{эф}};$$

где ε_{1e} – деформации твердых частиц, состоящих из упругих элементов (песчаных твердых частиц);

δ – параметр ползучести переувлажненного грунта при полном давлении сжатия σ во времени t , с учетом коэффициентов относительной сжимаемости m_{v1} и m_{v2} в компрессионном испытании начальных значений деформации ползучести $\varepsilon_1(t)$,

$$\delta = \frac{1}{t} \ln \left[\frac{e_1(t)}{\sigma \cdot m_{v2}} - \frac{m_{v1}}{m_{v2}} - 1 \right].$$

Естественный параметр ползучести

$$\delta = \delta_s + \delta_g,$$

где δ_s – параметр ползучести скелета;

δ_g – параметр отжата поровой воды в начале и в конце испытания.

Следует отметить, что процесс фильтрационной консолидации происходит при сжатии в переувлажненном грунте очень долгое время t , поэтому можно считать, что поровое давление $U_w(t)$ протекает в различное время, где:

I стадия – соответствует начальному напряженно-деформированному состоянию, когда при приложенной внешней нагрузке формируется поле напряжений $\delta = \delta_s + \delta_g$ в скелете и поровой воде, но процесс фильтрации еще не распространился вглубь массива переувлажненного грунта. Такое состояние длится не долго, но уже начинается развитие фильтрационной консолидации;

II стадия – соответствует времени t , когда в грунте от сжимающих давлений σ происходит интенсивное сжатие поровой воды по всему объему переувлажненного массива, начинается рассеивание избыточного порового давления и заканчивается полным рассеиванием избыточного порового давления и уплотнением твердых частиц за счет отжата поровой воды в поровом пространстве;

III стадия – соответствует конечному напряженно-деформированному состоянию массива из переувлажненных грунтов, когда все давление σ от нагрузок принимается скелетом грунта и определенно деформируется за счет изменения ползучести твердых частиц. Длительность процесса ползучести скелета практически меньше, чем период полного отжата поровой воды или время процесса консолидации и уплотнения, то есть длительность второго этапа. Длительность объемной ползучести может занять больше времени при эксплуатации сооружений, построенных в водонасыщенном или переувлажненном грунтовом основании; ее можно выразить с помощью теории наследственной ползучести или теории старения.

Выводы. На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. В массиве переувлажненных грунтов при сжатии возникают два вида давления: нейтральное – воспринимаемое поровой водой, и эффективное – воспринимаемое твердыми частицами (скелетом). Сначала появляются нейтральные, при отжате поровой воды или обеспечении фильтрационной консолидации, а затем эффективные, которые создают уплотнение твердых частиц за счет отжата части поровой воды и обеспечивают деформации ползучести твердых частиц (скелета) грунта.

2. С помощью коэффициентов относительной сжимаемости, полученных при испытании образцов-близнецов из переувлажненных грунтов на компрессионном приборе, можно определить величины нейтральных давлений в поровой воде, описать процессы фильтрационных консолидаций, а также уплотнение твердых частиц и деформации ползучести, и определить стадии возникновения и развития напряженно-деформированного состояния переувлажненных грунтовых массивов при сжатии.

Литература

1. Терцаги К. Теория механики грунтов / К. Терцаги. – М. : Госстройиздат, 1961. – 580 с.
2. Зарецкий Ю. К. Теория консолидации грунтов / Ю. К. Зарецкий. – М. : Наука, 1967. – 272 с.
3. Зарецкий Ю. К. Вязкопластичность грунтов и расчеты сооружений / Ю. К. Зарецкий. – М. : Стройиздат, 1988. – 360 с.
4. Горелик Л. В. Расчеты консолидации оснований и пластин из грунтовых материалов / Л. В. Горелик. – М. : Энергия, 1975. – 154 с.
5. Полуборинова-Кочина П. Я. Теория движения грунтовых вод / П. Я. Полуборинова-Кочина. – М. : Гостехиздат, 1952. – 250 с.
6. Самедов А. М. Смещение разжиженного массива вдоль линии подпорных стен / А. М. Самедов, Т. Исмаилов // *Miedzynarodowa konferencja VI Szkoła Geomechaniki, Gliwice-Ustron 21 – 24 października 2003.* – 2003. – С. 151 – 158.
7. Самедов А. М. Расчет и проектирование подземных дренажных сооружений (монография) / А. М. Самедов. – К. : НТУУ «КПИ», 2013. – С. 229 – 338.
8. Самедов А. М. Укрепление переувлажненных глинистых грунтов молотой негашеной известью или жженой магнезией / А. М. Самедов, Д. В. Ткач // *Известия Тульского государственного университета «Науки о Земле».* – Тула : ТулГУ, 2012. – Вып. 2. – С. 162 – 170.
9. Самедов А. М. Проблемы использования бескарбонатных и малокарбонатных слабых горных пород как основания подземных сооружений / А. М. Самедов, Д. В. Ткач // *Перспективы освоения подземного пространства: 6-я Международная научно-практ. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов.* – Дн-к, 2012. – С. 42 – 45.
10. Самедов А. М. Описание нелинейного процесса консолидации шельфовых грунтов комбинированными реологическими моделями / А. М. Самедов, Л. А. Асланов // *Вісник НТУУ «КПІ». Серія: Гірництво.* – К. : НТУУ «КПІ», 2012. – Вип. 22. – С. 37 – 45.
11. Biot M. A. *General solutions of the equations of elasticity and consolidation for a porous material* / M. A. Biot // *J. of Applied Mechanics, Trans. ASME.* – 1956. – Vol. 23. – P. 91 – 96.
12. Biot M. A. *General theory of the three dimensional consolidation* / M. A. Biot // *J. Appl. Phys.* – 1941. – Vol. 12, № 2. – P. 155 – 164.
13. Nagaraj T. S. *Induced cementation of soft clays Analysis and assessment* / T. S. Nagaraj, N. Miura, A. Yamadera // *Int. Symp. on Lowland Technology (Institute of Lowland Technology, Saga University, Japan).* – 1998. – P. 267 – 278.
14. *Influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations* / H. B. Seed, K. Tokimatsu, L. F. Harder, R. M. Chung // *J. of the Geotechnical Engineering Division, ACSE.* – 1985. – Vol. 111, № 12. – P. 1425 – 1445.

© Самедов А.М., Ткач Д.В.
Надійшла до редакції 27.12.2016