

5. Poston T., Stuart H Teoriya katastrof i ey prilogeniya / T. Poston , N. Stuard. – M.: Mir, 1980. – 607 p.
6. Kobayasi T. Zavisimost meghdu skorostyu tresheny i koefizientom intensivnosti napryageniy v polumerah s dvoynym luchepriplomleniem. Mehanika razrusheniya. Bystroe razrushenie, ostanovka tre cshin / T. Kobayasi, D. Deli. – M.: Mir, 1981. – С. 101-119.
7. Andronov A.A. Teoriya kolebaniy / A.A.Andronov , A.A. Vitt, S.E. Haykin. – M. Nauka, 1981. – 568 p.
8. Beron A.N. Rezanie uglya / A.N. Beron, A.S. Kazanskiy, B.M. Leybov, E., E. Poznin. – M.: Gosgortehizdat, 1962. – 140 p.
9. Kalthoff I. Izmereniya dinamicheskogo koefizienta napryageniy dlya bystrorasprostranyayuschihsy treschin v obrazcah tipa dvoynoy konsolnoy balki. Mehanika razrusheniya. Bystroe razrushenie, ostanovka treschiny / I. Kalthoff, I. Beynet, C. Vinkler. – M.: Mir, 1981. – Vyp. 25. – P. 22-41.

Статья поступила в редакцию 26.05.2014 г.

УДК 624.131.23

А. М. Самедов д. т. н, проф., Д. В. Ткач, асп. (НТУУ «КПІ»)

РЕОЛОГІЧНІ ПАРАМЕТРИ ПЕРЕЗВОЛОЖЕНИХ ГЛИНИСТИХ ГРУНТІВ ЗА ТЕОРІЄЮ СТАРІННЯ

A. M. Samedov, dr. tech. sci., prof., D. V. Tkach, postgraduate student (NTUU «KPI»)

RHEOLOGICAL PARAMETERS OF THE WATER-SATURATED CLAY SOILS ON THE THEORY OF AGING

Розглянуті реологічні зміни перезволожених глинистих ґрунтів при компресійному стисненні та співставленні з класичними теоріями фільтраційної консолідації Терцагі-Герсеванова.

Встановлено, що коефіцієнти відносного стиснення m_{vi} при різних факторах часу t_i суттєво збільшуються. Збільшення коефіцієнта m_{vi} виникає під час завершення консолідаційної фільтрації t_f .

При співставленні зміни порових тисків u_w та осадки в часі t в перезволожених глинистих ґрунтах, на прикладі суглинку видно, що криві, отримані шляхом експерименту відрізняються від класичної теорії Терцагі-Герсеванова в кількісному відношенні.

Ключові слова: *Реологічні параметри, коефіцієнт стиснення, фільтрація, консолідація, стисненність, модулі об'ємної деформації, повзучість, модуль зсуву.*

Рассмотрены реологические изменения переувлажненных глинистых грунтов при компрессионном сжатии и сопоставлены с классическими теориями фильтрационной консолидации Терцаги-Герсеванова.

Установлено, что коэффициенты относительного сжатия m_{vi} при разных факторах времени t_i существенно увеличиваются. Увеличение коэффициента m_{vi} возникает во время завершения консолидационной фильтрации t_f .

При сопоставлении изменения поровых давлений u_w и осадки во времени t в переувлажненных глинистых грунтах, на примере суглинка видно, что кривые, полученные экспериментальным путем, отличаются от классической теории Терцаги-Герсеванова в количественном отношении.

Ключевые слова: *Реологические параметры, коэффициент сжатия, фильтрация, консолидация, сжатие, модуль объемной деформации, ползучесть, модуль сдвига.*

Considered rheological changes waterlogged clay soils with compression and compression compared with the classical theories of filtration consolidation Terzaghi-Gersevanov .

Found that the coefficients of relative compression m_{vi} factors at different time t_i increase significantly. m_{vi} coefficient greater increase occurs during the completion of filtration consolidation t_f .

When comparing the change in pore pressure u_w and precipitation over time t in waterlogged clay soils, loam example shows that the curves obtained an experimental way, different from the classical theory of Terzaghi-Gersevanov quantitatively.

Keywords: *Rheological parameters, compression ratio, filtration, consolidation, compression, bulk modulus, creep, shear modulus.*

Вступ. В деяких джерелах [1-6] приводяться дослідження реологічних властивостей ґрунтів. Однак в цих дослідженнях не має змін параметрів перезволожених глинистих ґрунтів, які часто зустрічаються при будівництві підземних споруд.

Ціль та задачі. Розглянути зміни властивостей перезволожених глинистих ґрунтів при компресійному стисненні з точки зору реології та співставити їх з класичними теоріями фільтраційної консолидації Терцагі-Герсеванова.

Результати досліджень. Для опису процесу повзучості перезволожених глинистих ґрунтів таких, як супісь, суглинок, та глини важливу роль грають наступні реологічні параметри: пружні характеристики ґрунта: модулі зсуву при миттєвому навантаженні G_m та довготривалих навантаженнях G_l , модулі об'ємної деформації при миттєвому K_m та довгодіючому навантаженні K_l , параметри повзучості при зміні форми δ_γ та об'ємної зміни δ_v , параметри старіння τ_{st} , δ_{com} - характер повзучості при компресійному стисненні, коефіцієнти відносної стискаємості в моменти часу $t=0$, $t=t_{st}$ та $t>t_{st}$ після прикладання чергового ступіню навантаження відповідно m_{v1} , m_{v2} , m_{v3} .

В інженерній практиці рівняння спадковості повзучості часто використовується для опису процесу одномірного ущільнення при випробуванні зразків на компресійному пристрої в наступному вигляді:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon(t) &= \sigma_z(t)m_{v1} - \int_{t_{st}}^t \sigma_z(t) \frac{\partial}{\partial t} m_w(t, \tau) dt \\ m_w(t, \tau) &= m_{v1} + m_{v2} \left[1 - e^{-\delta_{com}(t-\tau)} \right] + m_{v3} (\tau / \tau_{st}) \end{aligned} \right\}, \text{де:} \quad (1)$$

m_{v1} - коефіцієнт умовно-миттєвого відносного стиснення; m_{v2} - коефіцієнт вторинного відносного стиснення; $m_{v3} = \alpha_{com} \ln(\tau / \tau_{st})$; α_{com} - параметр старіння (параметр бокової повзучості).

Таким чином, у найпрстішому випадку одномірному ущільненню при випробовуванні зразків в компресійному пристрої рівняння спадкової повзучості містять п'ять параметрів: m_{v1} , m_{v2} , m_{v3} , τ_{st} та δ_{com} , які легко визначаються за результатами компресійних випробувань одного зразка при ступінчастому режимі навантаження.

Вище були наведені рівняння спадкової повзучості (1) при лінійному зв'язку між напруженням та деформаціями в часі t . Теорія спадковості повзучості може бути виражена в нелінійній постановці між напруженнями та деформаціями в часі. Для цього в інтегральні рівняння (1) вводимо не самі напруження та деформації, а функції, що визначають вид цих зв'язків, тобто:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_i(t) &= \frac{1}{G_0} \left\{ \sigma_i(t) + \int_0^t K_\gamma(t, \tau) f_1[\sigma_i(\tau)] d\tau \right\} \\ \varepsilon_i(t) &= \frac{1}{K_0} \left\{ \sigma(t) + \int_0^t K_v(t, \tau) f_2[\sigma(\tau)] d\tau \right\} \\ K_\gamma(t, \tau) &= \frac{\partial}{\partial \tau} \psi_\gamma(\tau) \{ 1 - \exp[-\delta(t-\tau)] \}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$K_v(t, \tau) = \frac{\partial}{\partial \tau} \psi_v(\tau) \{ 1 - \exp[-\delta_v(t-\tau)] \}, \text{де:}$$

$K_\gamma(t, \tau)$ - ядро повзучості, що представляє собою швидкість зсувної деформації при одиничних значеннях $B=1$, G_0 та K_0 початковий миттєвий модуль зсуву та початковий об'ємний модуль деформації; δ_γ - зсувний параметр та δ_v - параметр об'ємної повзучості експериментальні параметри, що залежать від виду ґрунта.

Процес старіння в часі в перезволоженому глинистому ґрунті можна описати функціями старіння ψ_γ , ψ_v в залежності від часу τ :

$$\left. \begin{aligned} \psi_\gamma(\tau) &= \frac{1}{G_2} \{ 1 - \exp[-\delta_\gamma(t-\tau)] \} + \frac{1}{G_3(\tau / \tau_{st})} \\ \psi_v(\tau) &= \frac{1}{K_2} \{ 1 - \exp[-\delta_v(t-\tau)] \} + \frac{1}{K_3(\tau / \tau_{st})} \end{aligned} \right\}, \text{де:}$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{G_3[\tau / \tau_{st}]} &= \alpha_\gamma \ln(\tau / \tau_{st}) \\ \frac{1}{K_3[\tau / \tau_{st}]} &= \alpha_v \ln(\tau / \tau_{st}) \end{aligned} \right\}.$$

Коефіцієнт стиснення перезволожених ґрунтів, виникає після відтиснення порової води. Коефіцієнт стиснення порової води можна вводити після відтиснення. Порова вода приймається практично нестискаємою, але вона віджимається та фільтрується. Це визначається наступним чином: $M_w = 3/K_m$, де K_m - модуль об'ємної деформації скелету.

Коефіцієнти відносного стиснення m_{v1} , m_{v2} , m_{v3} визначаються:

$$m_{v1} = \varepsilon_1(0) / [\sigma - u_w(0)]; \quad m_{v2} = \varepsilon_1(t_1) / [\sigma - m_{v1}], \quad \text{або:}$$

$$m_{v1} = \varepsilon_m / \sigma_1; \quad m_{v2} = (\varepsilon_{stab} - \varepsilon_m) / \sigma_1, \quad \text{де:}$$

ε_m та ε_{stab} умовно миттєва та умовно стабілізована деформації.

При компресійному стисненні ґрунта виникає необхідність визначення наступних параметрів: m_{v1} , m_{v2} , m_{v3} , δ_{com} та τ_{st} .

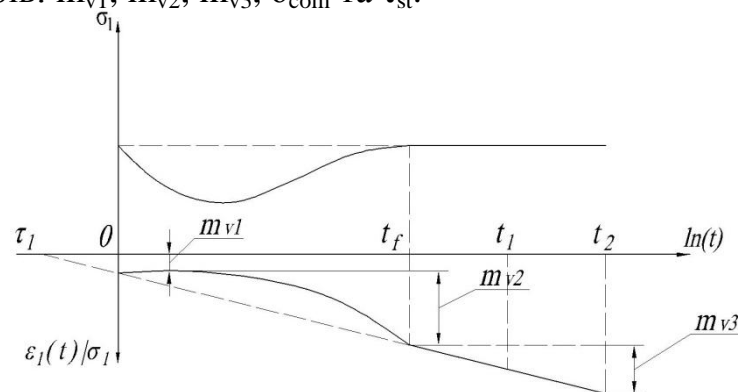


Рис. 1. Криві повзучості при компресійному стисненні перезволожених глинистих ґрунтів, побудована для визначення реологічних параметрів скелету глинистого суглинку, m_{v1} , m_{v2} , та τ_1 (t_f - час завершення консолідаційної фільтрації)

Параметри m_{v3} та τ_{st} знаходяться за кривою $\varepsilon_1(t)/\sigma_1 - \ln(t)$ (рис. 2.)

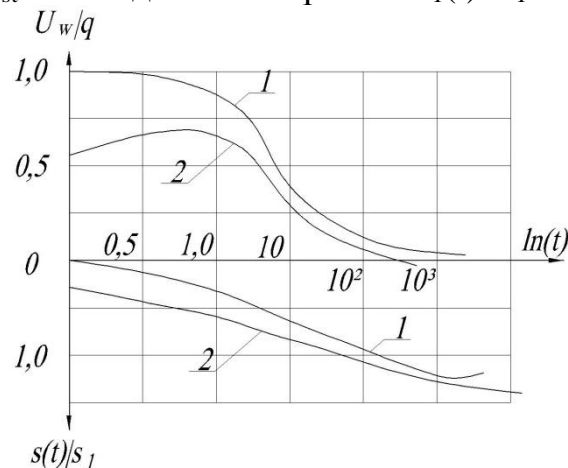


Рис. 2. Зміна порового тиску u_w та осідань в часі t в шарі перезволоженого глинистого суглинку за теорією фільтраційної консолідації Терцагі-Герсеванова (крива 1) та за результатами експериментів в компресійному пристрої (крива 2)

Величина α_{com} визначається:

$$\alpha_{com} = \frac{\varepsilon_1(t_2) - \varepsilon_1(t_{st})}{\sigma_1 \ln(t_2 / t_{st})}, \text{ де:}$$

$t_2 > t_{st} > t_0$. Значення τ_{st} визначається як точка перетину осі $\ln(t)$ з прямою $\varepsilon_1(t)/\sigma_1$.

За теорією старіння деформація ε дорівнює сумі пружної ε_u , та в'язкої ε_v деформацій; тобто:

$$\varepsilon = \varepsilon_u + \varepsilon_v.$$

При призьменній щільності вологість глинистого ґрунта встановлюється функціональний зв'язок між напруженням, деформацією повзучості та часом, тобто:

$$\left. \begin{aligned} f(\varepsilon_v, \sigma, t) &= 0 \\ \varepsilon_v &= F_1(\sigma)F_2(t) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Це може бути тільки після закріплення перезволожених ґрунтів негашеним вапном, паленою магнезією, цементом або шлаком, які нами рекомендовані.

При зміні вологості перезволожених глинистих ґрунтів за нашими рекомендаціями, її вплив можна враховувати введенням додаткового параметру в праву частину формули (3). При подібності кривих повзучості $F_2(t=0)=1$, тобто при миттєвому моменті часу $t=0$ деформація повзучості не відповідає умовам подібності, тоді

$$\varepsilon = \sigma / E + F_1(\sigma)F_2(t); \quad F_2(t) = 0, \text{ де:}$$

E -модуль пружності ґрунтів.

В реології ґрунтів, як показують багато вчених в тому числі Вялов С.С., Гольдштейн Н.М., Тер-Мартіросян З.Г., Месчан С.Р. та інші, найбільше розповсюдження отримали функції $F_1(\sigma)$ вигляду:

$$\sigma = A\varepsilon^m; \quad \sigma = \frac{E_0 \sigma_{sg} \varepsilon}{\sigma_{sg} + E_0}, \text{ де:}$$

$A, m \leq 1$ – параметри нелінійності деформацій, визначаються дослідним шляхом при випробовуванні зразків; E_0 - початковий модуль стиснення; σ_{sg} - межа міцності зразків при стисненні.

Для функції часу $F_2(t)$ С.С. Вялов пропонує наступні залежності:

$$\left. \begin{aligned} F_2(t) &= 1 + \delta \left(\frac{t}{T} \right)^\alpha \\ F_2(t) &= 1 + \ln \frac{t+T}{T} \\ F_2(t) &= 1 + (\delta - 1) \frac{t}{t+T} \end{aligned} \right\}, \text{ де:}$$

$\delta, 0 < \alpha \leq 1$ – параметри повзучості, що отримані дослідним шляхом; t - період часу, $c; T=1c$.

Слід відмітити, що теорія старіння, в наслідок її простоти, знайла широке застосування при дослідженні реологічних властивостей ґрунтів. Однак вона може бути застосована у випадку, коли на глинисті ґрунти діють або постійна або монотонно змінюване навантаження.

Окрім теорії старіння зміна властивостей в глинистих ґрунтах можна приймати теорію текучості, яка встановлює функціональний зв'язок між напруженням, швидкістю деформації повзучості та часу; тобто: $F(\varepsilon_v, \sigma, t)=0$.

При подібності кривих повзучості можна записати:

$$\varepsilon_v = \varphi_1(\sigma)\psi_1(t).$$

Функцію $\psi_1(t)$ можна обрати таким чином, щоб вона описувала згасаючу, та що встановилося або прогресуючу текучість.

Також можна приймати теорію пластичної текучості, що основана на результатах лабораторних випробувань шляхом введення поняття потенціалу пластичності ψ . Частна похідна від ψ пропорційна приросту пластичних деформацій:

$$d\varepsilon_{ij,p} = \Delta\lambda \partial\psi / \partial\sigma_{ij}, \text{ де:}$$

$\Delta\lambda \geq 0$ дуже малий множник; σ_{ij} - напруження текучості для ідеально пластичної глини, можна застосовувати, обмежуючи область пружних деформацій K , тобто $f(\sigma_{ij})=K$.

Якщо приймати умови текучості Мізеса, для перезволожених глинистих ґрунтів можна приймати $f(\sigma_{ij})=T^2$, яка знаходиться в пружньому стані при $T < \tau$, та якщо $T = \tau_{st}$ в пластинчастому стані. В просторі головних напружень це рівняння текучості Мізеса визначає поверхню циліндра з віссю $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$.

Зміна порового тиску u_w та осідання в часі $s(t)$ в шарі перезволожених глинистих ґрунтів за теорією фільтраційної консолідації Терцагі-Герсеванова [1] та за теорією, що наведена в [2] приведені на рис. 2.

Теорія консолідаційної фільтрації Терцагі-Герсеванова пропонує застосовувати скелет ґрунта пружним, а воду нестискаємою. Тоді рівняння консолідації перезволожених глинистих ґрунтів виражається рівнянням наступного виду:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 u_w}{\partial z^2}, \text{ де:} \quad (4)$$

$C_v = K_\phi / (\gamma_w m_v)$ - коефіцієнт консолідації; m_v - коефіцієнт відносної стискаємості скелету ґрунта. Якщо рахувати, що скелет має властивості лінійної спадковості повзучості (формула 2), а порова вода лінійно стискаєма, тоді можна рівняння консолідації записати в наступному вигляді:

$$\frac{\partial^2 u_w}{\partial t^2} + A_1 \frac{\partial u_w}{\partial t} = C_v \left(\delta \frac{\partial^2 u_w}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 u_w}{\partial z^2 \partial t} \right), \text{ де:} \quad (5)$$

$$A_1 = \frac{\delta(m_{v,0} + nm_{g,w})}{m_{v,0} + nm_{g,w}}; \quad C_v = \frac{K_\phi}{\gamma_w(m_{v,0} + nm_{g,w})};$$

$$m_{v,0} = m_{v1} + m_{v2}.$$

K_ϕ - коефіцієнт фільтрації м/доб.; δ - параметр повзучості; $\gamma_w = 10 \text{ кН/м}^3$ питома вага води; $m_{g,w}$ коефіцієнт стиснення порової води.

Порівняння рівнянь (4) та (5) для шару перезволожених глинистих ґрунтів товщиною h при двосторонній фільтрації порової води, поровий тиск буде мати вигляд:

$$u_w(z,t) = \frac{4q}{\pi} \sum_{n=1,2,3,\dots}^{\infty} \frac{1}{n} \left(\frac{B_0 - \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} e^{\lambda_1 t} + \frac{B_0 - \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{\lambda_2 t} \right) \beta_0 \sin \frac{\pi n z}{h}, \text{ де:}$$

$$\beta_0 = \frac{m_{v1}}{m_{v1} + nm_w}; \beta_0 = \frac{\delta m_{v2}}{m_{v1}} (1 - \beta_0); \lambda_{1,2} = \frac{1}{2} \left[- \left(A_1 + C_v \frac{\pi^2 n^2}{h^2} \right) \pm \sqrt{\left(A_1 + C_v \frac{\pi^2 n^2}{h^2} \right)^2 + 4\delta C_v \frac{\pi^2 n^2}{h^2}} \right]$$

q - інтенсивність діючих навантажень; z - глибина розрахункової частини перезволоженого ґрунту; h - товщина перезволожених шарів ґрунту або висота зразка при випробуванні.

Для визначення осадок шару з урахуванням повзучості скелету та стискаємості порової води в часі t можна використовувати наступне рівняння:

$$s(t) = \int_0^h \varepsilon_1(z,t) dz = \int_0^h \left[m_{v1} \sigma_1(z,t) - \int_0^h \sigma_1(z,t) \frac{\partial}{\partial t} m_{v,0}(t,\tau) d\tau \right] dz.$$

Після інтегрування з урахуванням осадки перезволоженого ґрунта при стисненні отримаємо:

$$s(t) = qh [m_{v1} u_I(t) + m_{v2} u_{II}(t)], \text{ де:}$$

$u_I(t)$ та $u_{II}(t)$ функції від m_{v1} , m_{v2} , K_ϕ , $m_{g,w}$, h^2 .

З рис. 2 видно, що поровий тиск в перезволожених глинистих ґрунтах мають максимальні величини в часі $t=0,5 \div 10$ с. В цій зоні часу (від 0,5 до 10 с.) поровий тиск згасає, а осідання ґрунта розвивається пропорційно логорифму часу.

Треба відмітити, що вихідні фізичні параметри, такі як щільність та вологість суттєво впливають на результати їх випробувань. Перезволожені ґрунти мають ступінь вологості $S_r = w\gamma_s/\gamma_w > 0,8$ (γ_s , кН/м^3 - питома вага частинки ґрунта; W , доли од. природна вологість ґрунта; $\gamma_w = 10\text{кН/м}^3$ - питома вага води; $e_0 = \gamma_s/\gamma(1+W) - 1$ - початковий коефіцієнт пористості, γ - питома вага ґрунта, кН/м^3) і відноситься до квазідвофазним ґрунтам, що змінюється в процесі деформування при стисненні і може переходити в стан текучості і в них виникає надлишковий поровий тиск, що викликає процес консолідації.

Квазідвофазні перезволожені ґрунти при стисненні можуть бути в умовах дренажного та недренажного стану.

Висновки

В умовах відсутності дренажу квазідвофазні перезволожені ґрунти необхідно випробовувати зі зміною порового тиску, тобто проводити консолідовані недренажні випробування. Тут при стисненні виникає попереднє ущільнення ґрунта та його напруження, ґрунт має однакову щільність у всіх випробуваннях на зсув при різних значеннях нормального напруження.

В Умовах дренажних випробувань квазідвофазних перезволожених ґрунтів виникає неоднорідний напружений стан в ґрунтовому масиві і неможливо отримати стабільну щільність масиву.

Таким чином, при необхідності випробувань перезволожених глинистих ґрунтів, для визначення повзучості і осадки доцільно виконати випробовування в недренованому вигляді з вимірюванням порового тиску, тобто проводити випробовування в консолідовано-недренованому вигляді.

Список використаних джерел

1. Vyalov S. S. Reologicheskiye osnovy mekhaniki gruntov / S. S. Vyalov - M.: Vysshaya shkola, 1978. - 447s.
2. Goldshteyn M. N. Mekhanicheskiye svoystva gruntov / M. N. Goldshteyn - M.: Stroyizdat, 1973. - 374s.
3. Meschan S. R. Nachalnaya i dlitel'naya prochnost glinistykh gruntov / S. R. Meschan - M.: Nedra, 1976. -207s.
4. Ter-Martirosyan Z. G. Reologicheskiye parametry gruntov i raschety osnovaniy sooruzheniy / Z. G. Ter-Martirosyan - M.: Stroyizdat, 1990. - 200s.
5. Samedov A. M. Opisaniye nelineynogo protsessa konsolidatsii shelfovykh gruntov kombinirovannymi reologicheskimi modelyami / A. M. Samedov, L. F. Aslanov // Вісник НТУУ «КПІ», серія «Гірництво», Зб. наук. пратс'. - 2012. - Vip. 22. - S.37-45.
6. Samedov A. M. O reolgicheskikh modelyakh lessovykh prosadochnykh gruntov / A. M. Samedov // Вісник НТУУ «КПІ», серія «Гірництво»: Зб. наук. пратс'. -2000. - Vip. 3. - S. 29-44.

Стаття надійшла до редакції 08.05 2014 р.