

## ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ПАРАМЕТРИТЕ НА ПЪЛЗЕНЕ В ГЛИНЕСТИ ПОЧВИ

**Т. Германов**

Напрегнатото и деформирано състояние в глинестите почви зависи от много фактори, по-важни от които са физико-механичните свойства на отделните фази и тяхното взаимодействие в процеса на деформиране. Наличието в повения скелет на фини дисперсни частици и водно-колоидни връзки създава нееднозначна зависимост между напреженията и деформациите. Вискозните свойства в глинестите почви влияят за известно забавяне на деформациите от напреженията, причина за което е пълзенето на скелета.

Много теоретични и експериментални изследвания [2, 5, 6] доказват, че закономерностите при изменението на деформациите на почвения скелет във времето най-добре се описват с теорията на наследственото пълзене и стареене [1]. В случая на едномерно напрегнато състояние, зависимостта между напреженията, деформациите и времето е [1, 2, 5,]:

$$e_0 - e(t) = \sigma'(t) \cdot m_v(t, t) - \int_{t_1}^t \sigma'(\tau) \frac{\partial}{\partial \tau} m_v(t, \tau) d\tau, \quad (1)$$

където:

$e_0$  и  $e(t)$  са началният и изменящият се във времето коефициент на порите;

$\sigma'(t)$  – ефективното напрежение в момент  $(t)$ ;

$\sigma'(\tau)$  - ефективното напрежение, което се изменя във времето;

$\tau$  – текущата координата от времето

$t_1$  - параметър на “възрастта”, отчитащ предисторията на напрегнатото състояние.

$m_v(t, \tau)$  - обобщен коефициент на обемна деформация,

$$m_v(t, \tau) = m_0(\tau) + m_l(t, \tau); \quad (2)$$

$m_0(\tau)$  - коефициент на мигновена деформация, който може да се приеме постоянен;

$m_l(t, \tau)$  – коефициент на продължителна (пълзяща) деформация, който се приема [1, 2, 5,]:

$$m_l(t, \tau) = \varphi(\tau) \{ 1 - \exp[-\eta(t - \tau)] \}; \quad (3)$$

$\varphi(\tau)$  - функция, отчитаща стареенето на твърдата фаза, която се приема

$$\varphi(\tau) = m_l + \frac{m_h}{t};$$

$m_l$  - коефициент на уплътняване при пълзене;

$m_h$  - коефициент на уплътняване отчитащ деформациите на уякчаване (стареене) почвения скелет;

$\eta$  - параметър отчитащ скоростта на пълзене;

При решаване на задачите за определяне на деформациите на глинестите почви, а така също при разработката на практически методи за оразмеряване на земната основа на строителните съоръжения е необходимо сравнително точно определяне на отделните параметри включени в горните изрази. Този проблем е непосредствено свързан с конкретния теоретичен модел възприет при решаване отделните задачи моделиращи определени гранични условия.

В настоящата статия, на базата на теоретични и експериментални изследвания, от някои от съществуващите методи за определяне параметрите на пълзене. Предлага се метод за определяне параметъра на „възрастта“ на почвения скелет.

Да разгледаме най-масовия случай – компресионния опит, когато имаме уплътняване на многофазна глинеста почва ( $0,85 \leq S_r \leq 1,0$ ) и филтрация на порната течност само във вертикална посока.

Съгласно предпоставката на теорията наследственото пълзене, че почвения скелет е еднородно изотропно тяло и че зависимостта между напреженията и деформациите имат линеен характер, коефициентите  $m_0$  и  $m_l$  можем да определим от:

$$s_0 = \frac{\sigma'_0}{M_0} H_0, \quad s_l = \frac{\sigma'_l}{M_l} H_0, \quad (5)$$

където:

$H_0$  – началната височина на почвения образец;

$s_0$  – измерената деформация на почвения образец непосредствено след прилагането на товара  $q$ ;

$\sigma'_0$  и  $\sigma'_l$  – ефективните напрежения в началния и стабилизирания (след разсейване на порния натиск) моменти.

Началното ефективно напрежение при многофазната глинеста почва  $\sigma'_0 = q - u_0$  ( $u_0$  - начална стойност на порния натиск) при сравнително малки височини на почвения образец може да се приеме  $u_0 \approx 0$ . Ефективното напрежение след разсейване на порния натиск се приема равно на външното натоварване, т.е.  $\sigma'_l = q$ .

$M_0$  и  $M_l$  са компресионните модули в началния и стабилизирания (по отношение на напреженията) моменти:

$$M_0 = \frac{(1+e_0)}{m_0}, M_l = \frac{(1+e_0)}{m_l}, \quad (6)$$

От (5) и (6) се определят коефициентите на уплътняване  $m_0$  и  $m_l$ .

От характера на функцията (3), следва да коефициентът да се определи след разсейване на порния натиск. При условие, че слягането в този период е почти стабилизирано, предполага се, че свойството стареене (тиксотропно уякчаване) липсва, което означава, че  $m_h = 0$ . Експерименталните изследвания [4,6] показват, че в почти всички случаи (особено за глинести почви с голяма пластичност) закономерността на деформациите, след разсейване на порния натиск е от логаритмичен вид. Тогава коефициентът  $m_h$  може да се определи по наклона на кривата  $s(t)$  в полу-логаритмичен мащаб [7], т.е.

$$m_h = \frac{(1+e_0)(s_\infty - s_l)}{H_0 q \ln \frac{t_\infty}{t_f}}, \quad (7)$$

където:

$s_\infty$  - стабилизираното слягане (при съответен критерии) в момента  $t_\infty$

$t_f$  - моментът на разсейване на порния натиск.

За определяне на скоростта на пълзене (параметърът  $\eta$ ) за сега съществуват няколко метода, които се различават в зависимост от условията при които се провежда експеримента [3, 6]. Ще анализираме някои от тях.

При условие, че опитът се провежда в отворена система и функцията на порния натиск има добре изразен екстремален характер, Тер-Мартirosян [6] предлага параметърът  $\eta$  да се определи от условието за максимум на функцията  $u_w(t)$ . Това условие се изпълнява, когато една от експоненциалните функции става нула, което съответства на показател на експоненциалната функция  $\approx 10$ . Тогава изразът за определяне на  $\eta$  може да се представи в следния вид:

$$\eta = \frac{10}{t_{\max}} \cdot \frac{b \cdot t_{\max} - 10}{b \cdot t_{\max} - 10 \cdot a}, \quad (8)$$

$$\text{където: } b = \frac{C_v \pi^2}{4H_0^2(1+A_w)}; \quad a = \frac{1+A_w+A_l}{1+A_w}; \quad C_v = \frac{(1+e_0)k_f}{m_0 \gamma_w}.$$

$$A_w = \frac{e_0 m_w}{m_0}; \quad A_l = \frac{m_l}{m_0}; \quad m_w = \frac{1-S_r}{P_a};$$

$k_f$  – коефициент на филтрация;

$e_0$  – средният коефициент на филтрация;

$\gamma_w$  - обемното тегло на водата;

$t_{\max}$  – времето съответстващо на максималната стойност на порния натиск;

$m_w$  – коефициент на обемно уплътняване на порната течност;  
 $S_r$  – степен на водонасищане;  
 $p_a$  – атмосферното налягане.

Компресионният опит с глинести почви при отворена система, както е известно е продължителен (особено когато се изпитват високи почвени образци). По тази причина параметрите могат да се определят от компресионен опит при затворена (недренирана) система с измерване на порен натиск, при което значително се съкращава срокът на експеримента.

В [2] представихме точното решение на едномерната задача за уплътняване на многофазна глинеста почва при затворена система с отчитане на деформациите на порната течност, пълзенето и стареенето на почвения скелет. Функцията на порния натиск има вида:

$$u(t_w) = u(\tau_0) \left\{ 1 + A_{w0} \exp[(1 + \chi_l)\tau_0] \tau_0^{\chi_h} \left( \chi_l + \frac{\chi_h}{\tau_0} \right) \right\} J(t_w); \quad (9)$$

$$\text{където: } J(t_w) = \int_{\tau_0}^{t_w} \frac{\exp(-r\tau)}{\tau^{\chi_h}} d\tau; \quad r = 1 - \chi_l; \quad \chi_l = \frac{A_l}{1 + A_{w0}};$$

$$\chi_h = \frac{\eta A_h}{1 + A_{w0}}; \quad A_{w0} = \frac{e_0 m_w}{m_0}; \quad A_l = \frac{m_l}{m_0}; \quad A_h = \frac{m_h}{m};$$

$$t_w = \eta \cdot t; \quad \tau_0 = \eta \cdot t_1;$$

$$u(\tau_0) \text{ е началният порен натиск, който се определя с израза: } u(\tau_0) = \frac{\sigma_z}{1 + A_{w0}};$$

$\sigma_z$  - напрежение от външно натоварване.

При условие, че се пренебрегне стареенето на почвения скелет ( $m_h = 0$  и  $\tau_0 \approx 0$ ) получаваме израз аналогичен на полученото решение от Тер-Мартиросян [6].

$$\beta(t_w) = \frac{u(t_w)}{u(\tau_0)} = 1 + \frac{A_{w0} A_l}{1 + A_{w0} + A_l} [1 - \exp(-r \cdot t_w)]. \quad (10)$$

Ако в определен момент измерим порния натиск  $u_w(t)$ , съгласно (10) можем да определим параметъра  $\eta$  с израза:

$$\eta = - \frac{1 + b_1 - \beta(t_w)}{b_1 r t}, \quad (11)$$

където: 
$$b_l = \frac{A_{w0} \cdot A_l}{1 + A_{w0} + A_l};$$

В [6] се предлага коефициентите  $m_0$  и  $m_l$  да се определят при затворена система. Например, от условието за равенство на деформациите на почвения скелет и порната течност в началния момент ще получим:

$$u(\tau_0) = \frac{q}{1 + A_{w0}}. \quad (12)$$

Тогава, ако измерим началния порен натиск, непосредствено след прилагане на товара, можем да определим:

$$A_{w0} = \frac{q - u(\tau_0)}{u(\tau_0)}; \quad m_0 = \frac{e_0 m_w}{A_{w0}}. \quad (13)$$

От крайната, стабилизирана стойност на порния натиск  $u_\infty$  съгласно (10) за  $t_w \rightarrow \infty$  можем да определим безразмерния параметър  $A_l$  с израза:

$$A_l = \frac{u_\infty(1 + A_{w0}) - 1}{u(\tau_0)A_{w0} - u_\infty}, \quad m_l = A_l m_0 \quad (14)$$

В Таблица №1 са дадени стойностите на пълзене, определени от наши компресионни опити при отворена система, а в Таблица №2 – при затворена система. Опитите са проведени във високи компресионни апарати, при които се изключва триенето по околната повърхнина на образеца, с измерване на порния натиск [4]. Вижда се, че стойностите на определените параметри се изменят в широки граници в зависимост от плътността и пластичността на глинестите почви (опитите са проведени с пясъчлива глина и глина с показател на пластичност 11%, респ. – 31,8%).

Ако сравним стойностите на  $m_0$  и  $m_l$  при отворена и затворена системи, се вижда, че те съществено се различават. Това се дължи на факта, че и двата случая имаме различни условия на деформиране на почвения скелет. При затворена система деформациите са по-малки, следователно и стойностите на  $m_0$  и  $m_l$  са по-малки. Това показва, че при прогнозиране на деформациите на глинеста земна основа, където има условия за вертикална филтрация, тези параметри трябва да се определят от опити при отворена система.

Таблица № 1

## Параметри на пълзене при отворена система

$H_0$	$q$	$e_0$	$m_0$	$m_l$	$m_h$	$\eta$	$c_v$
cm	$10^5$ Pa		$10^{-5}$ Pa $^{-1}$	$10^{-5}$ Pa $^{-1}$	$10^{-5}$ Pa $^{-1}$	min $^{-1}$	cm $^2$ /min
Г л и н а							
14,7	1,0	1,030	0,00388	0,03297	0,00512	0,00502	1,5711
14,7	2,0	0,969	0,00023	0,02803	0,00519	0,00375	2,4621
10,4	0,5	1,109	0,02190	0,03249	0,00423	0,02327	0,3840
10,4	1,0	1,064	0,00585	0,03908	0,00526	0,01994	1,4105
10,4	2,0	0,75	0,00553	0,02332	0,00672	0,02703	1,4412
10,4	4,0	0,896	0,00256	0,01126	0,00602	0,03025	2,9561
П е с ъ ч л и в а г л и н а							
18,4	0,5	0,681	0,00554	0,04310	0,00158	0,01878	2,4250
18,4	1,0	0,647	0,00309	0,02692	0,00290	0,01889	4,2649
18,4	2,0	0,587	0,00154	0,01214	0,00161	0,04989	8,2099
18,4	4,0	0,549	0,00168	0,00657	0,00170	0,07030	7,3356
12,0	0,5	0,833	0,00535	0,05325	0,00193	0,02598	3,3562
12,0	1,0	0,790	0,00310	0,04306	0,00164	0,01785	5,6442
12,0	2,0	0,734	0,00352	0,02414	0,00138	0,03330	4,8139
12,0	4,0	0,67,9	0,00212	0,00843	0,00165	0,04090	7,7409

Параметърът  $\eta$  (скоростта на пълзене) може да се определи и чрез компресионен опит без измерване на порния натиск. За тази цел е необходимо да се изключи влиянието на филтрацията, т.е. деформациите да се осъществяват предимно за сметка на пълзенето на скелета. Изследванията на С. Р. Месчян [3] показват, че при височина на компресионната касета до 20mm закономерностите на уплътняване на водонаситените глинести почви се описват с теорията на наследственото пълзене. От експерименталния характер на функцията  $m_l(t, \tau)$  (3) следва, че зависимостта  $\dot{s}(t)$  има логаритмичен вид. Тогава достатъчно е да се начертае зависимостта  $\dot{s}(t)/q.H_0$  в логаритмичен мащаб на времето  $t$ , където  $\dot{s}(t) = \Delta s/\Delta t$  и тангенсът на наклона на тази линия ще определи параметъра  $\eta$ . Тази методика е разработена подробно в [6]. Тя може да послужи и за проверка на приложението на теорията на наследственото пълзене към съответната глинеста почва. Ако зависимостта  $\ln[\dot{s}(t)/q.H_0]$  е права линия, следва, че ядрото на пълзене има вида (3).

Теоретичните резултати [2] показаха, че върху големината и разпределението на порния натиск съществено влияние оказва параметърът  $\tau_0$ , който не трябва да се приема произволно или нула. За негово определяне може да послужи изразът (9). При  $t_w \rightarrow \infty$  след известни преобразования интегралът  $J(t_w)$  може да се представи:

$$J(t_w) = \int_{\tau_0}^{\infty} \frac{\exp(-r\tau)}{\tau^{\chi_h}} d\tau = r^{(\chi_h-1)} \cdot \frac{\exp(-r\tau_0)}{(r\tau_0)^{\chi_h}} \left(1 - \frac{\chi_h}{(r\tau_0)} + \frac{\chi_h(\chi_h+1)}{(r\tau_0)^2} - \frac{\chi_h(\chi_h+1)(\chi_h+2)}{(r\tau_0)^3} - \dots\right) \quad (16)$$

Ако се ограничим с първия член на реда (16) за функцията на коефициента на порен натиск ще получим:

$$\beta(\infty, \tau_0) = \frac{u_{\infty}}{u(\tau_0)} = 1 - \frac{A_{w0}}{r} \left( \chi_l + \frac{\chi_h}{\tau_0} \right) \left( 1 - \frac{\chi_h}{r\tau_0} \right). \quad (17)$$

Като решим уравнение (17) по отношение на  $t_0$  ще получим:

$$\tau_0 = \frac{b_2}{2} \left( \sqrt{1 + \frac{4\chi_h}{b_2}} - 1 \right), \quad (18)$$

където: 
$$b_2 = \frac{\chi_h A_{w0}}{r^2 \left( 1 - \frac{\chi_h A_{w0}}{r} - \beta_{\infty} \right)};$$

$u_{\infty}$  - стойността на порния натиск при неговото стабилизирано състояние.

Таблица 2

Параметри на пълзене при затворена система

$q$ $10^5 \text{Pa}$	$\epsilon_0$	$A_{w0}$	$m_0$ $10^{-5} \text{Pa}^{-1}$	$m_l$ $10^{-5} \text{Pa}^{-1}$	$\eta$ $\text{min}^{-1}$	$\tau_0$ -	$t_1$ min
<b>Г л и н а</b>							
1,0	1,260	24,0	0,00630	0,08990	0,00087	0,000022	0,025
2,0	1,205	24,0	0,00650	0,13797	0,00086	0,000025	0,029
3,0	1,106	74,0	0,00180	0,05260	0,00146	0,000063	0,043
<b>п е с њ ч л и в а Г л и н а</b>							
1,5	0,636	6,5	0,00014	0,00079	0,00069	0,000143	0,207
2,0	0,593	19,0	0,00044	0,00303	0,00600	0,001000	0,168
2,5	0,568	24,0	0,00033	0,00194	0,00840	0,001600	0,190
3,0	0,549	41,9	0,00018	0,00023	0,00273	0,000580	0,214

Стойностите на параметрите  $\tau_0$  и  $t_1$  в таблица № 2 показват, че те също зависят от плътността и пластичността на глинестите почви. Освен това, за разлика от другите стареещи материали (бетон, пластмаси и др.), тук  $t_1$  не следва да се разглежда

като възраст на стареещия скелет, а като параметър на почвената среда, който се определя на базата на експерименталните изследвания Възможност за определяне на  $\tau_0$  и  $t_1$  дава предложената методика.

Представена от катедра „Земна механика, фундиране и инженерна геология”.

Постъпила ноември 1978 г.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Арутюнян, Н.* Некоторые вопросы теории ползучести. Государственное издательство технико-теоретической литературы, М., 1952.
2. *Германов, Т.* Върху носещата способност на земната основа при кратковременни статични товари. - *Строителство*, 1978, кн. 7.
3. *Месчан, С.* Механические свойства грунтов и лабораторные методы их определения. М., Недра, 1974.
4. *Стефанов, Г. и Т. Германов.* Экспериментальные исследования консолидации многофазных глинистых грунтов. Труды пятой дунайской европейской конференции по механике грунтов и фундаментостроению. Братислава, 1977.
5. *Флорин, В.* Основы механики грунтов, т. II, М., Госстройиздат, 1961.
6. *Цытович, Н. и др.* Прогноз скорости оснований сооружений. М., Издательство литературы по строительству, 1967.
7. *Tsytoovich, N., Z. Ter-Martirosyan, K. Kulkarni.* Consolidation of Time - Hardening Soils, Proceedings of the 4th Danube – European Conference on SMFE, Bled, 1974.

## ОПДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОЛЗУЧЕСТИ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ

Т. Германов

### РЕЗЮМЕ

Приводятся результаты теоретических и экспериментальных исследований многофазных глинистых грунтов. Закономерность изменения деформации скелета грунта во времени принимается по теории наследственной ползучести. Анализируются некоторые из методов определения скорости ползучести, коэффициентов старения, мгновенного и вторичного уплотнения. Предлагается метод определения параметра "возраста" скелета грунта. В таблицах даны значения отдельных параметров, полученных при лабораторных экспериментах.



## LA DETERMINATION DES PARAMETRES DU FLUAGE DANS LES SOLS ARGILEUX

T. Germanov

### R E S U M E

On expose les résultats de certaines études théoriques et expérimentales concernant les sols argileux à phases multiples. La loi de dépendance des déformations du squelette du sol le temps est postulée d'après la théorie du fluage héritier. On analyse certaines des méthodes permettant de déterminer la vitesse du fluage, les coefficients de vieillissement et de compressibilité instantané et secondaire. On propose une méthode pour déterminer le paramètre de l' "age" du squelette du sol. Les valeurs des différents paramètres qui ont été obtenues d'après des expériences en laboratoire, sont données en tables.