

НОВАЯ РЕОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОЛЗУЧЕСТИ ГЛИНЫ ПРИ СДВИГЕ¹

Профессор, докт. техн. наук Г. И. ТЕР-СТЕПАНЯН²

Резюме. Предлагается новая реологическая модель ползучести глины при сдвиге. Модель состоит из упругого тела последовательно соединенного с парой, в которой пластическое тело параллельно соединено с упруго-вязким релаксирующим разрушающимся телом с переменной вязкостью. Реологическое тело моделирует обе фазы ползучести—мобилизации и разрушения, и вероятностный характер механических свойств возникающих и разрушающихся в процессе сдвига структур грунта. Выведены уравнения механического поведения модели в процессе ползучести в фазах мобилизации и разрушения; эти уравнения адекватно отражают поведение грунта при ползучести.

Теоретическое изучение и экспериментальные работы, проведенные в 1969—1972 годах, позволили прийти к некоторым выводам относительно поведения глины в процессе ползучести при сдвиге. Предварительное сообщение о результатах исследования было представлено VIII Международному конгрессу по механике грунтов в Москве (Тер-Степанян и др., 1973). Для лучшего понимания условий работы предлагаемой модели и ее соответствия реологическому поведению грунта ниже кратко излагаются основные теоретические и экспериментальные результаты. Более подробно они будут представлены в другом месте.

Теоретические и экспериментальные результаты

Процесс ползучести глины при сдвиге состоит из двух фаз—мобилизации и разрушения. В процессе ползучести глины возникает и разрушается последовательный ряд структур грунта, характеризующихся определенным расположением и ориентацией частиц, контактов между ними и действующими в контактах силами.

Деформативные свойства структур грунта определяются соотношением между двумя противоположными свойствами: текучестью и жесткостью. В количественной форме эти свойства выражаются векторными суммами касательных F и нормальных R составляющих контактных сил, действующих по рассматриваемому сечению aa грунта, проведенному через контакты частиц (рис. 1). Чем выше соотношение F/R , тем более деформируется грунт. В процессе ползучести сохраняется соотношение

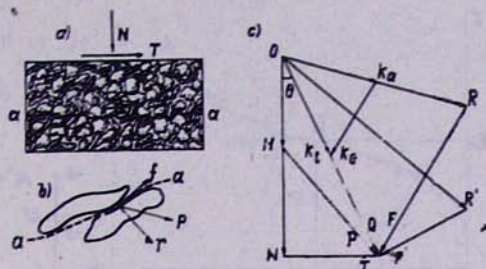
¹ Доложено на Симпозиуме по теории оползневого процесса в мае 1973 г. в Дилижане (Армения).

² Зав. Лабораторией геомеханики Академии наук АрмССР.

Рис. 1. Силы в точках контакта; а) образец грунта; б) силы в точках контакта; в) многоугольник сил.

Նկ. 1. Ուժեր կոնտակտի կետում. ա) գրունտի նմուշ. б) ուժեր կոնտակտի կետում. в) ուժերի բազմանկյուն:

Fig. 1. Forces in points of contact; а) soil sample; б) forces in contact point; в) force polygon.



$$F + R = Q \quad (1)$$

где Q — вектор полной силы, действующей в сечении грунта.

Переход от одной структуры к другой совершается скачкообразно; во время перестройки структуры происходит разрядка избыточных напряжений сдвига и их переход в активные напряжения. При этом сохраняется соотношение

$$k_a - k_e = k_t \quad (2)$$

где $k_a = (R/Q) \operatorname{tg} \theta$ — вектор отношения активных сил, показывающий ту часть контактных сил, которые реализовались в имевшей место деформации, и характеризующий «жесткость» структуры грунта; $k_e = (F/Q) \operatorname{tg} \theta$ — вектор отношения избыточных сил, показывающий ту часть контактных сил, которые не реализовались в деформации; он характеризует «текучесть» структуры грунта, и $k_t = \operatorname{tg} \theta$ — вектор мобилизованного сопротивления сдвигу, направленный вдоль равнодействующих всех сил Q .

В фазе мобилизации происходит упорядочение структуры грунта, т. е. ориентация его чешуйчатых частиц, среднее время оседлой жизни связей увеличивается и поэтому скорость ползучести $\dot{\gamma}$ уменьшается пропорционально возрасту напряжения t

$$\dot{\gamma} = a \frac{\tau - \tau_p}{\tau} \cdot \frac{1}{t}, \quad (3)$$

где a — структурный коэффициент, зависящий от деформируемости F/R грунта и времени оседлой жизни связей, τ — действующее касательное напряжение, τ_p — то значение касательного напряжения, при котором не происходит ползучести и ζ — статическая вязкость грунта.

В фазе разрушения структура грунта дается менее упорядоченной, т. е. происходит деориентация грунта, среднее время оседлой жизни связей уменьшается и поэтому скорость ползучести увеличивается прямо пропорционально времени

$$\dot{\gamma} = a \frac{\tau - \tau_p}{\zeta t_m^2} t, \quad (4)$$

где t_m — время мобилизации, соответствующее переходу от фазы мобилизации к фазе разрушения. Этот переход происходит после совершения определенной деформации γ_m , величина которой зависит от уровня напряжений.

Поэтому кривая зависимости между временем и деформацией сдвига в фазе мобилизации состоит из кусков логарифмических кривых

$$\gamma = a \frac{\tau - \tau_p}{\zeta} \ln \left(\frac{t + \Delta t}{\Delta t} \right) + C, \quad (5)$$

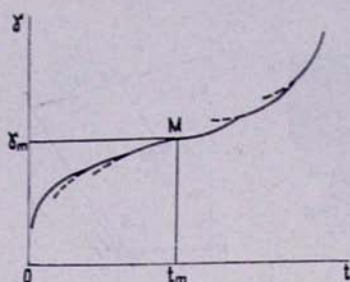


Рис. 3. Скорость ползучести как функция времени.

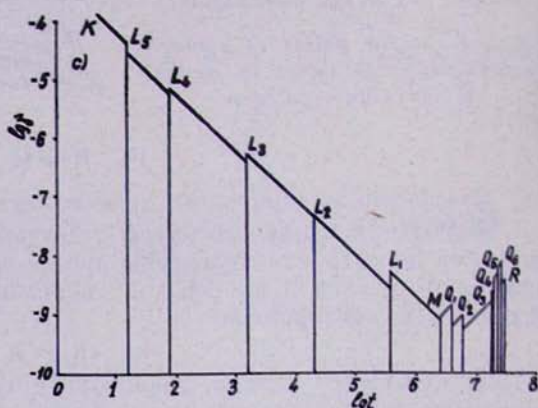
Նկ. 3. Ռեֆորմացիայի արագությունը որպես ժամանակի ֆունկցիա:

Fig. 3. Strain rate as function of time.

Рис. 2. Схема кривых ползучести при сдвиге; M — предел мобилизации.

Նկ. 2. Սահիճի ժամանակ սողի կորագծերի սխեմա. M - մոբիլիզացման սահման:

Fig. 2. Scheme of creep curves at shear; M — mobilization limit.



а в фазе разрушения—из кусков парабол

$$\dot{\gamma} = a \frac{\tau - \tau_p}{\tau_m^2} t^2 + C, \quad (6)$$

где Δt —малый промежуток времени, равный единице, напр. 1 секунда, вводимый в формулу для лучшей математической интерпретации.

В момент перестройки структуры процесс перескакивает с одной возможной кривой на другую, ее пересекающую (рис. 2). Каждый такой кусок кривой отвечает определенной структуре грунта.

На рис. 3 показана экспериментальная зависимость между временем и скоростью ползучести, иллюстрирующая уравнения (3) и (4); график показывает скачкообразное изменение скорости ползучести в обеих фазах деформаций.

Произведение скорости ползучести при отсутствии перестройки структуры на возраст касательных напряжений линейно связан с величиной этих напряжений (рис. 4). Эти линии описываются уравнением

$$\tau = \tau_p + \dot{\gamma} t \gamma. \quad (7)$$

Таким образом, на приведенных реологических кривых статическая вязкость представляет собой тангенс угла, образованного наклонной частью графика с осью ординат.

На рис. 5 показана линейная зависимость между касательным напряжением и деформацией при пределе мобилизации

$$\dot{\gamma}_m = \frac{\tau - \tau_p}{G_m}, \quad (8)$$

где G_m —модуль мобилизации.

При низких и средних уровнях напряжений в фазе разрушения наступает перелом хода процесса, ведущий к его затуханию (предел стабилизации S); деформация γ_s , соответствующая пределу стабилизации, зависит от уровня касательных напряжений. На рис. 6 показана линейная зависимость между величинами касательного напряжения и деформацией γ_s , выражаемая уравнением

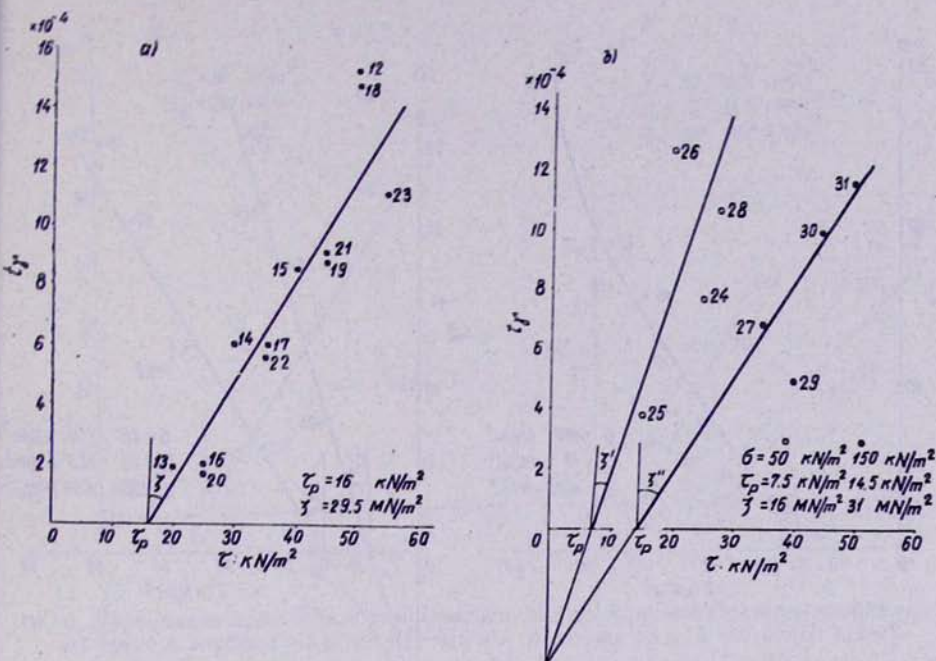


Рис. 4. Приведенные реологические кривые: а) грунт с глубины 40 м; $\sigma = 100 \text{ кН/м}^2$; б) то же 76 м; $\sigma = 50$ и 150 кН/м^2 .

Նկ. 4. Քերված ռեոլոգիական կորագծեր. ա) գրունտ 40 մ խորությունից. $\sigma = 100 \text{ կՆ/մ}^2$.
 б) նույնը 76 մ, $\sigma = 50$ և 150 կՆ/մ^2 .

Fig. 4. Reduced rheological curves: а) soil from depth 40 m. $\sigma = 100 \text{ kN/m}^2$; б) ditto 76 m, $\sigma = 50$ and 150 kN/m^2 .

$$\gamma_s = \frac{\tau - \tau_p}{G_s}, \quad (9)$$

где G_s —модуль стабилизации. При высоких уровнях касательных напряжений процесс заканчивается полным разрушением (срезом) после достижения некоторой деформации γ_r .

На рис. 7 показана зависимость между деформацией и скоростью ползучести (присущая кривая). Анализ скорости ползучести до и после скачка показывает, что скачкообразное изменение структуры грунта имеет своим назначением отклонить предписанный уравнениями механического поведения структур (уравнения 3 до 6) ход деформирования к закономерному, присущему данному грунту.

Таким образом реологическое поведение глины при данном значении нормальных напряжений определяется четырьмя постоянными величинами, имеющими размерность напряжения: пределом ползучести, статической вязкостью и модулями мобилизации и стабилизации. Эти четыре величины линейно связаны с нормальным давлением, действующим на грунт (рис. 8)

$$\tau_p = C_p(\sigma' + \sigma_0) \quad (10)$$

$$\tau_s = C_s(\sigma' + \sigma_0) \quad (11)$$

$$G_m = C_m(\sigma' + \sigma_0) \quad (12)$$

$$G_s = C_s(\sigma' + \sigma_0) \quad (13)$$

где $\sigma_0 = c' \text{ctg} \varphi'$ —всестороннее давление связности, c' и φ' —параметры

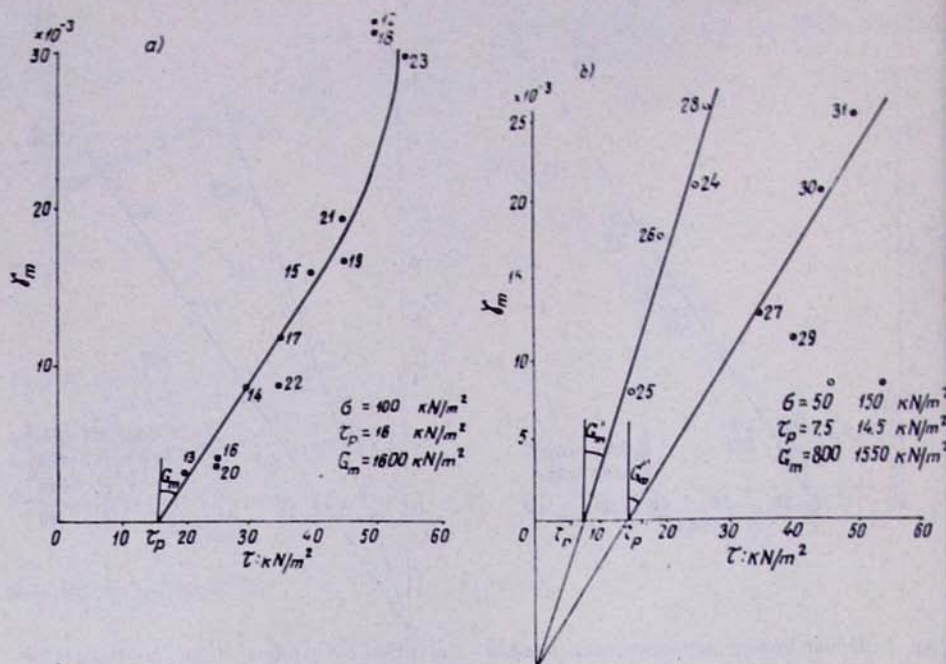


Рис. 5. Деформация при пределе мобилизации как функция касательного напряжения; а) грунт с глубины 40 м; б) то же 76 м.

Նկ. 5. Մոբիլիզացիան ղեֆորմացիան որպես շոշափող լարումների ֆունկցիա. ա) գրունտ 40 մ խորությունից. բ) նույնը 76 մ:

Fig. 5. Mobilization strain as a function of shear stress; a) soil from depth 40 m; b) ditto 76 m.

сопротивления сдвигу τ_f уравнения Кулона—Терцаги, $\tau_f = c' + \sigma' \operatorname{tg} \varphi'$ и σ' —эффективное напряжение в грунте.

Устройство реологической модели

Изложенная выше теория ползучести глины при сдвиге и экспериментально установленные закономерности поведения грунта позволяют предложить новую реологическую модель грунта (рис. 9). Модель состоит из трех частей: верхней, левой и правой.

Верхняя часть—*упругое тело* Гука (пружина H_a). Под действием приложенного касательного напряжения τ пружина мгновенно удлиняется на длину γ_a

$$\gamma_a = \frac{\tau}{G_a}, \quad (14)$$

где G_a —модуль растяжения пружины H_a . Тело претерпевает упругую мгновенную деформацию при любом напряжении τ .

Левая часть—*пластическое тело* Сен-Венана (ползун StV), между элементами которого действует сухое или Кулоново трение. Если приложенное напряжение $\tau < \tau_p$, где τ_p —предел пластичности ползуна, то последний остается неподвижным; если $\tau > \tau_p$, то ползун необратимо смещается. Таким образом, ползун может воспринять напряжение,

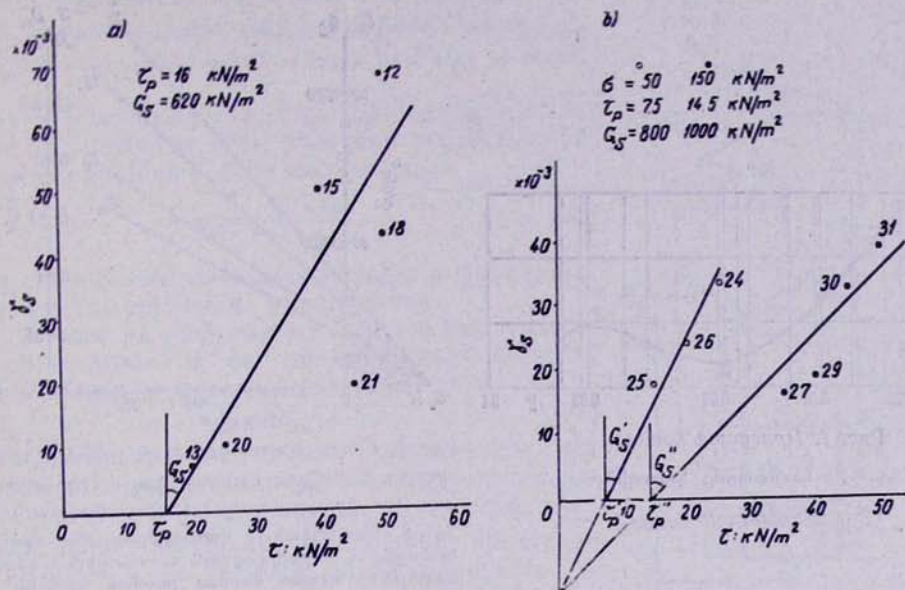


Рис. 6. Деформация при пределе стабилизации как функция касательного напряжения; а) грунт с глубины 40 м, $\sigma = 100 \text{ кН/м}^2$; б) то же 76 м, $\sigma = 50$ и 150 кН/м^2 .

Նկ. 6. Ստաբիլիզացման դեֆորմացիան որպես շարժիչ լարումների ֆունկցիա: ա) դրսևան 40 մ խորությունից, $\sigma = 100 \text{ կՆ/մ}^2$; б) նույնը 76 մ, $\sigma = 50$ և 150 կՆ/մ^2 :

Fig. 6. Stabilization strain as a function of shear stress a) soil from depth 40 m, $\sigma = 100 \text{ kN/m}^2$; b) ditto 76 m, $\sigma = 50$ and 150 kN/m^2 .

не превышающее τ_p , и двигаться в направлении напряжения под действием избытка $\tau - \tau_p$. Это происходит после того, как пружина H_a растянется на длину

$$\gamma = \frac{\tau}{G_a}. \quad (15)$$

Правая часть — упруго-вязкое релаксирующее разрушающееся тело с переменной вязкостью. Оно представляет собой пружину H_b , последовательно соединенную с рассверленным поршнем N , имеющим отверстия S и перемещающимся в амортизаторе P , снабженном змеевиком Q . Поршень N имеет клапанный диск K , могущий поворачиваться вокруг оси поршня и снабженный отверстиями T . Повороты диска K совершаются скачкообразно; при этом каждый раз против части отверстия S поршня N оказывается часть отверстий T диска K . Такие сквозные отверстия показаны стрелками на рис. 9. Суммарная площадь сечения сквозных отверстий характеризует структурный коэффициент a ; эта величина изменяется по программе. Каждое положение клапанного диска K соответствует определенной структуре грунта. Длина амортизатора P , считая от начального положения поршня, равна деформации разрушения γ_r . Как только деформация достигнет этой величины, поршень выходит из амортизатора, сопротивление, оказываемое правой частью, устраняется и тело разрушается.

Правая часть реологического тела имеет два контакта L и M . Контакт L включается в начале движения правой части реологического тела, при $\tau > \tau_p$; тогда через змеевик Q протекает охлаждающая жидкость (фаза мобилизации). Второй контакт M включается после совер-

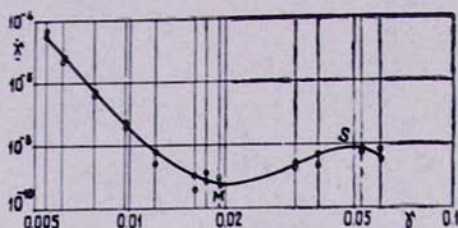


Рис. 7. Присущая кривая.

Նկ. 7. Կենսամոլի կոնցիզիոն:

Fig. 7. Intrinsic curve.

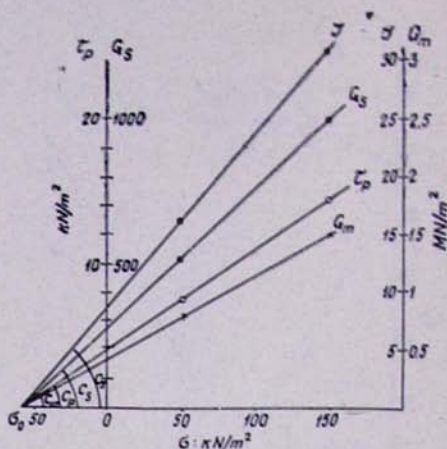


Рис. 8. Статическая вязкость, предел ползучести и модули мобилизации и стабилизации как функции нормального напряжения.

Նկ. 8. Ստատիկական մածուցիկությունը, սողի սահմանը և մոբիլիզացման ու ստաբիլիզացման մոդուլները որպես նորմալ լարման ֆունկցիա:

Fig. 8. Static viscosity, creep limit and mobilization and stabilization moduli as functions of normal stress.

шения деформации мобилизации γ_m , и тогда через змеевик Q протекает нагревающая жидкость (фаза разрушения). Величина деформации γ_m зависит от уровня напряжений τ и модуля мобилизации G_m и определяется из выражения

$$\gamma_m = \frac{\tau - \tau_p}{G_m}. \quad (16)$$

Часть общего напряжения τ , равная $\tau - \tau_p$, передается правой части реологического тела и воздействует на пружину H_b и амортизатор P . Под его действием пружина H_b претерпевает мгновенную упругую деформацию

$$\gamma_b = \frac{\tau - \tau_p}{G_b}, \quad (17)$$

где G_b —модуль растяжения пружины H_b . Под действием напряжения $\tau - \tau_p$ поршень в амортизаторе P перемещается со скоростью

$$\dot{\gamma}_c = a \frac{\tau - \tau_p}{\eta}, \quad (18)$$

где a —структурный коэффициент, зависящий от площади сквозных отверстий поршня и η —динамическая вязкость жидкости в амортизаторе P .

В фазе мобилизации жидкость в амортизаторе охлаждается и ее динамическая вязкость η увеличивается от нуля прямо пропорционально протекшему времени

$$\eta = \zeta t, \quad (19)$$

Рис. 9. Реологическая модель ползучести глины при сдвиге.

Ն. 9. Մաքիի ժամանակ կազմի սողիի ռեոլոգիական մոդելը:

Fig. 9. Rheological model of creep of a clay at shear.

где ζ — статическая вязкость. Подставляя это значение в уравнение (18), получаем скорость перемещения поршня в фазе мобилизации

$$\dot{\gamma}_c = a \frac{\tau - \tau_q}{\zeta t}, \quad (20)$$

т. е. скорость перемещения поршня в фазе мобилизации со временем уменьшается.

В фазе разрушения жидкость в амортизаторе нагревается и ее динамическая вязкость уменьшается от максимального значения

$$\eta_m = \zeta t_m, \quad (21)$$

где t_m — время мобилизации, затраченное на достижение деформации γ_m ; это уменьшение динамической вязкости совершается обратно пропорционально величине отношения протекшего времени t ко времени мобилизации t_m по формуле

$$\eta = \frac{\zeta t_m^2}{t}. \quad (22)$$

Подставляя это выражение в уравнение (18), получаем скорость перемещения поршня в фазе разрушения

$$\dot{\gamma}_c = a \frac{\tau - \tau_p}{\zeta t_m^2} t \quad (23)$$

т. е. скорость перемещения поршня в фазе разрушения со временем увеличивается.

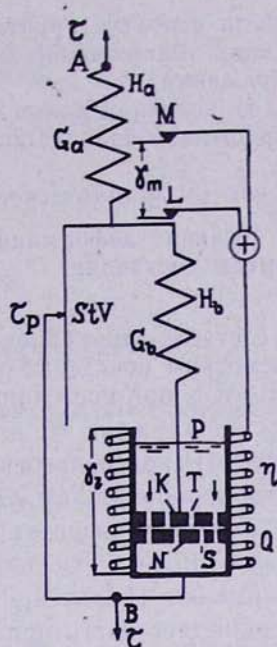
Если концы A и B реологического тела закрепить, то при движении поршня пружина H_b будет упруго восстанавливать свою первоначальную длину. Общая деформация тела сохранится, но напряжения в правой части тела исчезают. Так как напряжения в пружине H_a при этом не устраняются полностью, то в целом имеет место *частичная релаксация*. Если концы A и B тела оставить незакрепленными, то под действием напряжения будет происходить деформация; к упругой деформации $\gamma_a + \gamma_b$ будет добавляться неупругая деформация γ_c за счет вязкого перемещения поршня, происходящего с изменяющейся скоростью вследствие охлаждения жидкости в амортизаторе со временем в фазе мобилизации (*замедляющаяся ползучесть*) и ее нагревания в фазе разрушения (*ускоряющаяся ползучесть*).

Предлагаемое реологическое тело отличается от тела Шведова следующими важными особенностями:

1) змеевиком с охлаждающей или нагревающей жидкостью, который моделирует переменную вязкость, увеличивающуюся в фазе мобилизации и уменьшающуюся в фазе разрушения;

2) контактами L и M , которые управляют охлаждением и нагреванием жидкости в амортизаторе и моделируют предел ползучести и деформацию при пределе мобилизации;

3) клапанным диском с запрограммированным расположением отверстий, который моделирует вероятностный характер механических



свойств структур грунта, предел стабилизации при низких и средних уровнях напряжений и ускорение ползучести при высоких уровнях напряжений;

4) конечная длина γ_r амортизатора, которая моделирует полное разрушение образца после совершения определенной деформации.

Уравнения механического поведения модели в процессе ползучести

Полная деформация γ модели в любой промежуточный момент времени составляет

$$\gamma = \gamma_a + \gamma_b + \gamma_c, \quad (24)$$

где составляющие определяются из выражений (14), (17), (20) и (23). Рассмотрим поведение реологической модели при испытании на ползучесть, т. е. при постоянном значении касательного напряжения. Если $\tau < \tau_p$, то пружина H_a испытывает мгновенную деформацию γ_a (уравнение 14), которая со временем не изменяется. Реакция воспринимается ползуном StV . Если убрать напряжение, то пружина H_a полностью восстанавливает свою длину. Поэтому деформация γ_a является упругой. Если $\tau > \tau_p$, то пружина H_a испытывает мгновенную упругую деформацию (уравнение 14). Одновременно ползун StV сдвигается и воспринимает часть приложенного напряжения равную τ_p ; при этом включается контакт L и через змеевик Q начинает протекать охлаждающая жидкость (фаза мобилизации). Остальная часть напряжения, равная $\tau - \tau_p$, воспринимается пружиной H_b и происходит ее мгновенная деформация γ_b (уравнение 17). Реакция пружины H_b воспринимается поршнем N и происходит вязкое течение, скорость которого определяется вязкостью η жидкости в амортизаторе и величиной a сквозных отверстий в клапанном диске K (уравнение 20). На этом основании записываем

$$d\gamma = a \frac{\tau - \tau_p}{\tau} \cdot \frac{dt}{t} \quad (25)$$

а интегрируя, получаем

$$\gamma = a \frac{\tau - \tau_p}{\tau} \ln t + C \quad (26)$$

Для удобства математической интерпретации это уравнение заменим таким:

$$\gamma = a \frac{\tau - \tau_p}{\tau} \ln \frac{t + \Delta t}{\Delta t} + C \quad (27)$$

Тогда при $t=0$ первый член этого уравнения превращается в нуль и постоянная интегрирования получается равной мгновенной деформации $\gamma_a + \gamma_b$ (уравнения 14 и 17).

$$C = \frac{\tau}{G_a} + \frac{\tau - \tau_p}{G_b} \quad (28)$$

Прибавляя и вычитывая из правой части уравнения (28) величину $\frac{\tau - \tau_p}{G_a}$, будем иметь

$$\frac{\tau}{G_a} + \frac{\tau - \tau_p}{G_b} = \frac{\tau_p}{G_a} + (\tau - \tau_p) \frac{G_a + G_b}{G_a G_b}.$$

Обозначим модуль сдвига в интервале от 0 до τ_p через G_1 и в интервале от τ_p до τ через G_2 ; тогда

$$G_1 = G_a \text{ и } G_2 = \frac{G_a G_b}{G_a + G_b}. \quad (29)$$

Тогда уравнение (27) можно переписать так:

$$\gamma = \frac{\tau_p}{G_1} + \frac{\tau - \tau_p}{G_2} + a_1 \frac{\tau - \tau_p}{\tau} \ln \frac{t + \Delta t}{\Delta t} \quad (30)$$

т. е. кривая ползучести в фазе мобилизации описывается логарифмическим уравнением.

Это уравнение действительно для первого положения клапанного диска при $a = a_1$. В конце этого этапа, при $t = t_1$, общая деформация составит

$$\gamma_1 = \frac{\tau_p}{G_1} + \frac{\tau - \tau_p}{G_2} + a_1 \frac{\tau - \tau_p}{\tau} \ln \frac{t_1 + \Delta t}{\Delta t} \quad (0 < t < t_1) \quad (31)$$

При втором положении клапанного диска K к этой деформации γ_1 добавится деформация γ' при новом значении коэффициента a_2

$$\gamma' = a_2 \frac{\tau - \tau_p}{\tau} \ln \frac{t + \Delta t}{t_1 + \Delta t} \quad (t_1 < t < t_2). \quad (32)$$

Отсюда получаем общее выражение для деформации в фазе мобилизации

$$\gamma = \frac{\tau_p}{G_1} + \frac{\tau - \tau_p}{G_2} + \frac{\tau - \tau_p}{\tau} \sum_{i=1}^{n_1} a_i \ln \frac{t_i + \Delta t}{t_{i-1} + \Delta t}, \quad (33)$$

где $t_0 = 0$ и n_1 — число положений клапанного диска K до предела мобилизации.

В конечной фазе испытания, после достижения деформации γ_m (уравнение 16) включается контакт M и через змеевик Q протекает нагревающая жидкость (фаза разрушения); в этой фазе движение поршня происходит с увеличивающейся скоростью (уравнение 23). Отсюда

$$d\gamma = a \frac{\tau - \tau_p}{\tau t_m^2} t dt; \quad (34)$$

интегрируя, получаем

$$\gamma = a \frac{\tau - \tau_p}{\tau t_m^2} \cdot \frac{t^2}{2} + C. \quad (35)$$

Постоянную интегрирования получаем из условия: при $t = t_m$ $\gamma = \gamma_m$, откуда

$$C = \gamma_m - a \frac{\tau - \tau_p}{2\tau}, \quad (36)$$

а подставляя в предыдущее уравнение, найдем

$$\gamma = \gamma_m + a \frac{\tau - \tau_p}{2\tau} \left(\frac{t^2}{t_m^2} - 1 \right), \quad (37)$$

т. е. кривая ползучести в фазе разрушения описывается уравнением параболы.

Уравнение (37) действительно для первого положения клапанного диска K после предела мобилизации; обозначим его буквой j . В конце этого этапа, при $t = t_j$, общая деформация составляет

$$\gamma_j = \gamma_m + a_j \frac{\tau - \tau_p}{2\tau} \left(\frac{t_j^2}{t_m^2} - 1 \right). \quad (38)$$

При втором положении клапанного диска к достигнутой деформации γ_j добавится деформация γ'' при новом значении коэффициента a_{j+1}

$$\gamma'' = a_{j+1} \frac{\tau - \tau_p}{2\tau} \left[\left(\frac{t^2}{t_m^2} - 1 \right) - \left(\frac{t_j^2}{t_m^2} - 1 \right) \right] \quad (39)$$

или

$$\gamma'' = a_{j+1} \frac{\tau - \tau_p}{2\tau t_m^2} (t^2 - t_j^2). \quad (40)$$

В конце этого этапа, при $t = t_{j+1}$, общая деформация составит

$$\gamma = \gamma_j + a_{j+1} \frac{\tau - \tau_p}{2\tau t_m^2} (t_{j+1}^2 - t_j^2) \quad (41)$$

или учитывая уравнение (38)

$$\gamma = \gamma_m + \frac{\tau - \tau_p}{2\tau t_m^2} \left[a_j(t_j^2 - t_m^2) + a_{j+1}(t_{j+1}^2 - t_j^2) \right]. \quad (42)$$

Отсюда получаем общее выражение для деформации в фазе разрушения

$$\gamma = \gamma_m + \frac{\tau - \tau_p}{2\tau t_m^2} \sum_{i=1}^{n_2} a_i(t_i^2 - t_{i-1}^2), \quad (43)$$

где $t_{j-1} = t_m$ и n_2 — число положений клапанного диска K после предела мобилизации.

Предлагаемая реологическая модель полностью отражает особенности механического поведения глины в течение всего процесса ползучести при сдвиге; она адекватно описывает фазы мобилизации и разрушения, пределы мобилизации и разрушения и скачкообразную перестройку структуры грунта.

ՍԱՀՔԻ ԺԱՄԱՆԱԿ ԿԱՎԻ ՍՈՂՔԻ ՆՈՐ ՌԵՈԼՈԳԻԱԿԱՆ ՄՈԴԵԼ՝

Պրոֆեսոր, տի.ս. զիտ. դոկտոր Գեորգ Տեր-Ստեփանյան

Ռեֆերատ. Առաջարկվում է սահմանափակ կազմի սողորի նոր ռեոլոգիական մոդելը՝ Մոդելը բաղկացած է առաձգական մարմնից, որը հաջորդաբար միացրած է մի զույգի հետ,

¹ Զեկուցված է 1973 թ. մայիսին Գիլիշանում կայացած Սողանքային ընթացքների տեսության սիմպոզիումում:

² ՀՍՀՄ ԳԱ գեոմեխանիկայի լաբորատորիայի վարիչ:

որում մի պլաստիկ մարմինը զուգահեռ միացրած է փոփոխական մածուցիկություն ունեցող առանձնական մածուցիկ ռելաքսացվող քայքայվող մարմնի հետ: Ռեոլոգիական մարմինը մոդելավորում է սողքի երկու փուլ՝ մոբիլիզացման ու քայքայման և սահքի ընթացքում գրունտի առաջացող ու քայքայվող ստրուկտուրաների մեխանիկական հատկությունների հավանական բնույթը: Դուրս են բերված սողքի ընթացքում մոդելի մեխանիկական վարքի բանաձևերը մոբիլիզացման և քայքայման փուլերի համար: Այդ բանաձևերը արեկվատորեն արտացոլում են գրունտի վարքը սողքի ժամանակ:

1969—1972 թթ. ընթացքում կատարված տեսական ուսումնասիրությունը և փորձնական աշխատանքները թույլ տվեցին որոշ եզրակացություններ անել սահքի ժամանակ կավի սողքի վարքի վերաբերյալ: Հետազոտության արդյունքների նախնական տվյալները ներկայացվեցին Գրունտների մեխանիկայի 8-րդ միջազգային կոնգրեսին (Тер-Степанян и др., 1973): Առաջարկվող մոդելի աշխատանքի պայմանների և գրունտի ռեոլոգիական վարքի համապատասխանության լավ պատկերացման համար ստորև հակիրճ շարադրված են հիմնական տեսական և փորձնական արդյունքները: Ավելի մանրամասն նրանք կներկայացվեն մեկ ուրիշ տեղ:

Տեսական և փորձնական արդյունքներ

Սահքի ժամանակ կավի սողքի ընթացքը բաղկացած է երկու փուլից՝ մոբիլիզացման և քայքայման: Սողքի ընթացքում առաջանում և քայքայվում է գրունտի ստրուկտուրաների հաջորդական մի շարք, որը բնութագրվում է մասնիկների որոշակի տեղադրմամբ և կողմնորոշմամբ, դրանց միջև կոնտակտներով և այդ կոնտակտներում գործող ուժերով:

Գրունտի ստրուկտուրաների ձևափոխման հատկությունները որոշվում են երկու հակադարձ հատկությունների հարաբերությունով՝ հոսունության և կոշտության: Քանակական ձևով այդ հատկությունները արտահայտվում են կոնտակտային ուժերի F շոշափող և R նորմալ բաղադրիչների վեկտորային գումարներով. այդ կոնտակտային ուժերը գործում են մասնիկների կոնտակտների միջով անցկացրած գրունտի դիտվող $\alpha\alpha$ կտրվածքով (նկ. 1)³: Ինչքան բարձր է F/R հարաբերությունը անքան ավելի ձևափոխվում է գրունտը: Սողքի ընթացքում պահպանվում է հարաբերությունը (1), որտեղ Q -գրունտի կտրվածքում գործող լրիվ ուժի վեկտորն է:

Անցումը մեկ ստրուկտուրայից դեպի մյուսը կատարվում է թռիչքաձև. ստրուկտուրայի վերականգնման ժամանակ տեղի է ունենում սահքի հավելորդային լարումների լիցքաթափում և նրանց անցումը ակտիվ լարումների: Այդ պահին պահպանվում է (2) հարաբերությունը, որտեղ $K_a = (R/Q) \text{tg} \theta$ ակտիվ ուժերի հարաբերության վեկտորն է, որը ցույց է տալիս կոնտակտային ուժերի այն մասը, որը իրականացվել է տեղի ունեցած ձևափոխության մեջ և բնութագրվում է գրունտի ստրուկտուրային «կոշտությունը». $K_e = (F/Q) \text{tg} \theta$ հավելորդային ուժերի հարաբերության վեկտորն է, որը ցույց է տալիս կոնտակտային ուժերի այն մասը, որը չի իրականացվել ձևափոխության մեջ. այն բնութագրում է գրունտի ստրուկտուրայի «հոսունությունը». $K_i = \text{tg} \theta$ —սահքի մոբիլիզացված դիմադրության վեկտորն է, որը ուղղված է բոլոր ուժերի Q համազորի երկարությունը:

Մոբիլիզացման փուլում տեղի է ունենում գրունտի ստրուկտուրայի կարգավորում, այսինքն փաթիլաձև մասնիկների կողմնորոշում, կապերի նստակյաց կյանքի միջին ժամանակը մեծանում է և այդ իսկ պատճառով՝ սողքի արագությունը նվազում է լարումների է հասակին ուղիղ համեմատական (բն. 3), որտեղ α -ստրուկտուրային գործակիցն է, որը կախված է գրունտի F/R ձևափոխունակությունից և կապերի նստակյաց կյանքի ժամանակից, τ -գործող շոշափող լարման է, τ_p -շոշափող լարման այն նշանակությունն է, երբ չի կատարվում սողք և ζ -գրունտի ստատիկ մածուցիկությունն է:

Քայքայման փուլում գրունտի ստրուկտուրան դառնում է նվազ կարգա-

³ Նկարները և բանաձևերը տե՛ս էջ 108—115:

վորված, այսինքն տեղի է ունենում գրունտի ապակողմնորոշում, կապերի նստակցաց կյանքի միջին ժամանակը նվազում է և այդ իսկ պատճառով սող-
քի արագությունը աճում է ուղիղ համեմատական ժամանակի հետ (բն. 4),
որտեղ t_m մոբիլիզացման ժամանակն է. այն համապատասխանում է մոբի-
լիզացման փուլից անցմանը քայքայման փուլին: Այդ անցումը տեղի է ունե-
նում որոշ γ_m դեֆորմացիայից հետո: Նրա մեծությունը կախված է լարման
մակարդակից:

Այդ իսկ պատճառով ժամանակ-դեֆորմացիայի կորագծերը մոբիլիզաց-
ման փուլում բաղկացած են լոգարիթմական կորագծերի կտորներից (բն. 5),
իսկ քայքայման փուլում—պարաբոլաների կտորներից (բն. 6), որտեղ Δt -
մեկ միավորին հավասար փոքր ժամանակամիջոց է, օր. 1 վայրկյան, որը
մտցվում է բանաձևի մեջ ավելի լավ մաթեմատիկական մեկնաբանման հա-
մար: Գրունտի ստրուկտուրային վերակառուցման մոմենտներում ընթացքը
թռչում է մի հնարավոր կորագծից մի ուրիշ, նրան հատող կորագծին (նկ. 2):
Ամեն մի այդպիսի կորագծի կտոր համապատասխանում է որոշակի գրունտի
ստրուկտուրային:

Ժամանակի և սողքի արագության միջև եղած փորձնական հարաբերու-
թյունը ցույց է տրված նկ. 3-ի վրա: Դա լուսաբանում է բն. 3 և 4. գրաֆիկը
ցույց է տալիս սողքի արագության թռիչքաձև անցումներ երկու փուլում:

Եթե բացակայում է ստրուկտուրայի վերակառուցումը, ապա սողքի արա-
գությունը և շոշափող լարումների հասակի արտադրյալը գծայնորեն կապված
են այդ լարումների մեծության հետ (նկ. 4): Այդ գծերը նկարագրվում են բն.
7-ով: Այսպիսով, բերված ռեոլոգիական կորագծերի վրա ստատիկական մա-
ծուցիկությունը իրենից ներկայացնում է գրաֆիկի թեք մասի կողմից օրդի-
նատների առանցքի հետ կազմված անկյան տանգենսը:

Նկ. 5-ը ցույց է տալիս շոշափող լարումների և մոբիլիզացման սահմանի
դեֆորմացիայի կապը (բն. 8), որտեղ G_m —մոբիլիզացման մոդուլն է:

Լարումների քաժը և միջին մակարդակի դեպքում քայքայման փուլում
տեղի է ունենում ընթացքի բեկում, որը բերում է նրա մարմանը (S ստաբի-
լիզացման սահման). ստաբիլիզացման սահմանին համապատասխանող γ_s
դեֆորմացիան կախված է շոշափող լարումների մակարդակից: Նկ. 6-ի վրա
ցույց է տրված շոշափող լարման և γ_s դեֆորմացիայի միջև եղած գծային
կապը, որը արտահայտվում է բն. 9-ով. այստեղ G_s —ստաբիլիզացման մո-
դուլն է: Շոշափող լարումների բարձր մակարդակի դեպքում ընթացքը ավարտ-
վում է կատարյալ քայքայումով որոշ γ_c դեֆորմացիային հասնելուց հետո:

Նկ. 7-ի վրա ցույց է տրված շոշափող լարումների և մոբիլիզացման միջև
եղած կապը (ներհատուկ կորագիծ): Թռիչքից առաջիկա և հետագա սողքի
արագությունների վերլուծումը ցույց է տալիս, որ գրունտի ստրուկտուրայի
թռիչքաձև փոփոխությունը իր նպատակն ունի բանաձևեր 3-ից մինչև 6-ի կող-
մից կարգադրված սողքի ընթացքը շեղել դեպի կանոնավոր, տվյալ գրունտի
ներհատուկ ընթացքին:

Այսպիսով տվյալ նորմալ լարումների ժամանակ կալի ռեոլոգիական
վարքը որոշվում է չորս մեծությունով, որոնք ունեն լարման չափայնություն՝
սողքի սահմանը, ստատիկական մածուցիկությունը և մոբիլիզացման ու ստա-
բիլիզացման մոդուլներ: Այդ չորս մեծությունները գծայնորեն կախված են
գրունտում գործող նորմալ ճնշման հետ (նկ. 8, բն. 10 մինչև 13), որտեղ
 $\sigma_0 = c' + \sigma' \tan \varphi'$ կապակցությունն է ճնշումն է, c' և φ' —սահքի դի-
մադրությունն պարամետրներն են կուլոն-Տերցագիի հավասարություն՝
 $\tau = c' + \sigma' \tan \varphi'$ և $\sigma' = \frac{1}{2} \sigma$ էֆեկտիվ լարումն է:

Ռեոլոգիական մոդելի կառուցվածքը

Վերևը շարադրված սահքի ժամանակ կալի սողքի տեսությունը և փորձ-
նական եղանակով հաստատված օրինաչափությունները թույլ են տալիս առա-
ջարկել գրունտի ռեոլոգիական նոր մոդել (նկ. 9): Մոդելը բաղկացած է երեք
մասից՝ վերին, ձախ և աջ:

Վերին մասը՝ Հուլի առաձգական մարմինն է (H_a զսպանակ): Կիրառված շոշափող τ լարման աղդեցության տակ զսպանակը ակնթարթորեն երկարում է՝ γ_a երկարությամբ (բն. 14), որտեղ G_a —զսպանակի առաձգականության մոդուլն է: Մարմինը ամեն մի լարման դեպքում ենթարկվում է ակնթարթային առաձգական դեֆորմացիայի:

Չախ մասը՝ Սան Վենանի պլաստիկ մարմինն է (սողուն StV), որի տարրերի միջև գործում է չոր կամ Կուլոնյան շփումը: Եթե կիրառված լարումը $\tau < \tau_p$, որտեղ τ_p —սողունի պլաստիկության սահմանն է, ապա սողունը մնում է անշարժ. եթե $\tau > \tau_p$, ապա այդ մարմինը անվերադարձ շարժվում է: Այսպիսով այն կարող է ընդունել τ_p չգերազանցող լարում և շարժվել լարման ուղղությամբ $\tau - \tau_p$ հավելցուկի աղդեցության տակ: Այս կատարվում է H_a զսպանակը γ երկարությամբ ձգվելուց հետո (բն. 15):

Աջ մասը՝ փոփոխական մածուցիկություն ունեցող առաձգական-մածուցիկ ռելաքսացվող քայքայվող մարմինն է: Այն բաղկացած է H_b զսպանակից, որը հաջորդաբար միացված է S անցքերով գալիլեոնացված N մխոցի հետ, որը շարժվում է Q գալարը ունեցող P մեղմիչի միջով: N մխոցը ունի T անցքեր և կափույրային K սկավառակ, որը կարող է պտտվել իր առանցքի շուրջը: K սկավառակի պտտումը կատարվում է թոփքած. ամեն անգամ K սկավառակի T անցքերի մի մասը գտնվում է N մխոցի S անցքերի դիմաց: Այդպիսի բաց անցքերը ցույց են տրված սլաքներով (նկ. 9): Բաց անցքերի ընդհանուր մակերեսը բնութագրվում է α ստրուկտուրային գործակցով. այդ մեծությունը փոփոխվում է ըստ ծրագրի: Կափույրային K սկավառակի ամեն մի դիրքին համապատասխանում է գրունտի որոշակի ստրուկտուրա: P մեղմիչի երկարությունը հավասար է քայքայման γ_r դեֆորմացիային. հենց որ դեֆորմացիան հասնում է այդ մեծությանը, մխոցը դուրս է գալիս մեղմիչից և մարմինը քայքայվում է:

Ռեոլոգիական մարմնի աջ մասը ունի երկու L և M կոնտակտներ: L կոնտակտը միանում է շարժման սկզբին, երբ $\tau > \tau_p$. այնուհետև սառեցնող հեղուկը հոսում է Q գալարքի միջով (մոբիլիզացման փուլ): Երկրորդ M կոնտակտը միանում է γ_m մոբիլիզացման դեֆորմացիայից հետո. այնուհետև տաքացնող հեղուկը հոսում է Q գալարքի միջով (քայքայման փուլ): Մոբիլիզացման γ_m դեֆորմացիայի արժեքը կախված է լարումների τ մակարդակից և մոբիլիզացման G_m մոդուլից, ըստ բն. (16):

Ընդհանուր τ լարման մի մասը, հավասար $\tau - \tau_p$ փոխանցվում է ռեոլոգիական մարմնի աջ մասին և գործում է H_b զսպանակի և P մեղմիչի վրա: Այս ներգործության հետևանքով H_b զսպանակը երկարում է γ_b չափով (բն. 17), որտեղ G_b —զսպանակի առաձգականության մոդուլն է: $\tau - \tau_p$ լարման աղդեցության տակ N մխոցը շարժվում է մեղմիչի γ_c արագությամբ (բն. 18), որտեղ α —ստրուկտուրային գործակիցն է, որը կախված է բաց անցքերի մակերեսից, η —մեղմիչի մեջ եղած հեղուկի դինամիկական մածուցիկությունից:

Հեղուկը մեղմիչում սառչում է մոբիլիզացման փուլում և նրա դինամիկական η մածուցիկությունը սկսած զրոյից աճում է ուղիղ համեմատական ժամանակի հետ (բն. 19), որտեղ γ —ստատիկական մածուցիկությունն է: Տեղադրելով այս մեծությունը բն. (18) մեջ, ստանում ենք մխոցի շարժման արագությունը մոբիլիզացման փուլում (բն. 20), այսինքն շարժման արագությունը նվազում է:

Քայքայման փուլում հեղուկը մեղմիչի մեջ տաքանում է և նրա դինամիկական մածուցիկությունը նվազում է γ_m հասած մեծությունից (բն. 21), որտեղ ϵ_m —մոբիլիզացման ժամանակն է. դինամիկական մածուցիկության նվազումը հակադարձ համեմատական է անցած է ժամանակի հարաբերությանը՝ ϵ_m մոբիլիզացման ժամանակին (բն. 22): Տեղադրելով այս արժեքը բն. (18) մեջ, ստանում ենք մխոցի շարժման արագությունը քայքայման փուլում (բն. 23), այսինքն շարժման արագությունը աճում է:

նոր արժեքի դեպքում γ' դեֆորմացիան կավեւանա այդ դեֆորմացիային (բն. 32); Այստեղից գտնում ենք մոբիլիզացման փուլում դեֆորմացիայի ընդհանուր հավասարում (բն. 33), որտեղ $t_0=0$ և n_1 -կափուլային սկավառակի դիրքերի քանակն է մինչև մոբիլիզացման սահմանը:

Փորձի վերջին փուլում, երբ դեֆորմացիան հասնում է γ_m (բն. 16), միանում է M կոնտակտը և Q զալարբի միջով հոսում է տաքացնող հեղուկը (բայրյալման փուլ). այս փուլում միտքի տեղաշարժը կատարվում է արագացող արագությամբ (բն. 23): Այստեղից գրում ենք բն. (34) և ինտեգրելով ստանում ենք բն. (35): Ինտեգրման հաստատունն ստանում ենք պայմանից՝ $t=t_m$, $\gamma=\gamma_m$. մտցնելով բն. (35) մեջ գտնում ենք բն. (37), այսինքն սողքի կորագիծը բայրյալման փուլում նկարագրվում է պարաբոլայի հավասարումով:

Բն. (37) ուժի մեջ է մոբիլիզացման սահմանից հետո կափուլային սկավառակի առաջին դիրքի համար. նշենք այն j : Փուլի վերջում, երբ $t=t_j$, ընդհանուր դեֆորմացիան կլինի (բն. 38): Կափուլային սկավառակի երկրորդ դիրքում α_{j+1} դործակցի դեպքում, γ'' դեֆորմացիան կավեւանա այդ դեֆորմացիային (բն. 39 կամ 40): Այդ փուլի վերջում, երբ $t=t_{j+1}$, ընդհանուր դեֆորմացիան կլինի (բն. 41), կամ հաշվի առնելով բն. (38), գտնում ենք բն. (42): Այստեղից գտնում ենք բայրյալման փուլում դեֆորմացիայի ընդհանուր հավասարումը (բն. 43), որտեղ $t_{j-1}=t_m$ և n_2 մոբիլիզացման սահմանից հետո կափուլային սկավառակի դիրքերի քանակն է:

Առաջարկվող ռեոլոգիական մոդելը արտացոլում է կավի մեխանիկական վարքի բոլոր հատկանիշները սահքի ժամանակ սողքի ամբողջ ընթացքում. այն աղեկվատորեն նկարագրում է մոբիլիզացման և բայրյալման փուլերը, մոբիլիզացման և ստաբիլիզացման սահմանները և գրունտի ստրուկտուրայի թռչաթափվելու վերակարգավորումը:

NEW RHEOLOGICAL MODEL OF CREEP OF A CLAY AT SHEAR¹

GEORGE TER-STEPANIAN², Prof., Dr.Sc. (Eng.)

SYNOPSIS. A new rheological model of creep of a clay at shear is suggested. The model consists of an elastic body, connected in series with a pair, where a plastic body is connected in parallel with an elastic viscous relaxing destructible body of varying viscosity. The rheological body models both phases of the creep—mobilization and rupture and the probabilistic character of the soil structures originated and destroyed in the creep process. Equations of the mechanical behaviour of the model in the mobilization and rupture phases are derived; these equations adequately reflect the behaviour of soil at creep.

Theoretical study and experimental work performed in 1969—1972 have led us to come to a number of conclusions concerning the clay behaviour in the process of creep at shear. A preliminary report on the results of this investigation was presented to the Eighth International Conference on Soil Mechanics in Moscow (Ter-Stepanian et al., 1973). The basic theoretical and experimental results are stated concisely below for a better understanding of operating conditions of the suggested model and its correspondence with the rheological behaviour of the soil. These results will be presented in more detail elsewhere.

Theoretical and experimental results

The process of creep of clay at shear consists of two phases: mobilization and rupture. Succession of soil structures are originated and

¹ Reported at the Symposium on the Theory of Landslide Processes held in May 1973 in Dillijan.

² Head, Laboratory of Geomechanics, Armenian Academy of Sciences.

destroyed in the process of creep; they are characterized by a definite arrangement and orientation of particles, contacts between particles and forces that act in these contacts.

Deformative properties of soil structures are determined by relationship between two opposite properties: fluidity and rigidity; the higher this ratio the more deformable the soil. These properties quantitatively are expressed in vectorial sums of the shear F and normal R components of contacts of forces, acting in an arbitrary section aa through the contacts of soil particles (Fig. 1)³. The higher this ratio F/R the more deformable the soil. The relation (1) holds during the creep process, where Q in the vector of the total force acting in the soil section.

The transition from one structure to another takes place in a jump-like way; the discharge of the excessive shear stresses and their transition into the active stresses occurs during this reorganization of the structure. The relationship (Eq. 2) is maintained in the process, where $k_a = (R/Q) \tan \theta$ is the vector of the active force ratio, showing that part of contact forces which have been realized in the deformation; it characterizes the «rigidity» of the soil structure; $k_s = (F/Q) \tan \theta$ is the vector of the excessive force ratio, showing that part of contact forces which have not been realized in the deformation; it characterizes the «fluidity» of the soil structure; and $k_t = \tan \theta$ is the vector of the mobilized shear strength, directed along the resultant of all forces Q .

In the mobilization phase the soil structure becomes more regular, i. e. an orientation of soil particles takes place, the average lifetime of bonds increases and therefore the creep rate $\dot{\gamma}$ decreases directly with the stress age t (Eq. 3), where a is the structural coefficient depending on the soil deformability F/R and on the lifetime of bonds, τ is the acting tangential stress, τ_p is the tangential stress by which no creep occurs (creep limit) and η is the static viscosity of the soil.

In the rupture the soil structure becomes less regular, i. e. the de-orientation of soil particles occurs, the average lifetime of bonds decreases and therefore the strain increases directly with the stress age (Eq. 4) where t is the mobilization time corresponding to the transition from the mobilization phase to the rupture phase. This transition takes place after a definite deformation γ ; its magnitude depends on the stress level.

Therefore the time—strain curves in the mobilization phase consist of pieces of the logarithmic curves (Eq. 5) while in the rupture phase they consist of pieces of parabolas (Eq. 6), where Δt is a small time interval, equal to one unit, e. g. 1 second, which is introduced into the equation for a better mathematical interpretation. In the moments of the soil structure reorganization the process jumps over from one possible curve to another one intersecting it (Fig. 2). Each of such piece of the curve corresponds to a definite soil structure.

The experimental relationship between the time and the strain rate is shown in Fig. 3; it illustrates the Eqs. (3) and (4); the graph shows a jump-like change of the creep strain rate in both phases of the deformation.

The product of the creep rate if no jump-like reorganization of the structure takes place and of the shear stress age is linearly connected with the magnitude of these shear stress (Fig. 4). These lines are described by Eq. (7). Thus the static viscosity is tangent of the angle formed by the inclined part of rheological curves.

³ Figures and formulas see p. 108—119.

The linear relationship between the shear stress and the mobilization strain γ_m (Fig. 5) is expressed by Eq. (8), where G_m is the mobilization modulus.

In the rupture phase the soil becomes less regular, i. e. the de-orientation of soil particles occurs, the average lifetime of bonds decreases and therefore at low and middle stress levels a break in the process takes place which leads to its dumping (stabilization limit S); the strain corresponding to the stabilization limit depends on the shear stress level. The linear relationship between the shear stress and strain γ_s (Fig. 6) is expressed by Eq. (9), where G_s is the stabilization modulus. At high stress levels the process ends in the total rupture after a certain strain γ_r is reached.

The relationship between the creep strain γ and the creep strain rate $\dot{\gamma}$ is shown in Fig. 7 (intrinsic curve). The analysis of the creep strain rate before and after the jump shows that the jump-like change of the soil structure tends to deviate the creep process from that which is ordered by equations of the mechanical behaviour of structures (Eqs. 3 to 6) to another one intrinsic for the given soil.

Thus the rheological behaviour of clay at the given value of normal stress is determined by four constant values which have a dimension of stress: creep limit, static viscosity and mobilization and stabilization moduli. These four values are linearly connected with the normal stress, acting in the soil (Fig. 8, Eqs. 10 to 13), where $\sigma_0 = c' \cot \varphi'$ is the tension intercept, c' and φ' are parameters of the Coulomb-Terzaghi's shear strength equation $\tau_i = c' \pm \sigma' \tan \varphi'$ and σ' is the effective stress.

Arrangement of the rheological model

The propounded theory of creep of clay at shear and the experimentally determined relationships of soil behaviour make it possible to suggest a new rheological model of soil (Fig. 9). The model consists of three parts: upper, left and right.

The upper part is an *elastic* Hook body (spring H_a). Under the action of the applied shear stress τ the spring elongates instantly by the length γ_a (Eq. 14), where G_a is the modulus of elasticity of the spring H_a . The body undergoes elastic instantaneous strain at any stress.

The left part is a *plastic* St. Venant body (StV), where Coulomb friction acts. If the applied stress $\tau < \tau_p$, where τ_p is the plasticity limit of the St. Venant body the latter remains motionless; if $\tau > \tau_p$ this body moves irreversibly. Thus it may take over the stress not exceeding τ_p and move in direction of the stress under the action of the excess $\tau - \tau_p$. This happens after the spring H_a elongates for the length γ (Eq. 15).

The right part is an *elastic-plastic relaxing destructible* body of varying viscosity. It consists of a spring H_b successively connected with a bored piston N with holes S , moving in a damper P with a coil Q . The piston N has holes T and a valve disk K which may turn around its axis. Rotation of the disk K proceeds in a jump-like way; each time a part of holes T of the disk K is facing a part of holes S of the piston N . Such open holes are shown by arrows in Fig. 9. The total area of the open holes is characterized by structural coefficient a ; this value changes by program. To each position of the valve disk K corresponds a definite structure of the soil. The length of the damper P is equal to the rupture strain γ_r ; as soon as the strain reaches this value the piston N moves out of the damper P and the body is destroyed.

The right part of the rheological body has two contacts L and N . The contact L is switched on at the start of the movement at $\tau > \tau_p$; then the cooling liquid flows through the soil Q (mobilization phase). The second contact M is switched on after the mobilization strain γ_m takes place; then the heating liquid flows through the coil Q (rupture phase). The value of the mobilization strain γ_m depends on the stress level τ and on the mobilization modulus G_m according to Eq. (16).

A part of the total stress τ equalling $\tau - \tau_p$ is transferred to the right part of the rheological body and acts on the spring H_b and the damper P . Under this action the spring H_b elongates instantly by the length γ_b (Eq. 17), where G_b is the modulus of elasticity of the spring H_b . Under the action of the stress $\tau - \tau_p$ the piston N moves in the damper at the rate of $\dot{\gamma}_c$ (Eq. 18), where a is the structural coefficient depending on the area of the open holes in the piston, and η is the dynamic viscosity of the liquid in the damper P .

The liquid in the damper is cooled in the mobilization phase and its dynamic viscosity η increases from zero directly with the elapsed time t (Eq. 19), where ζ is the static viscosity. Substituting this value into the Eq. (18), we get the rate of movement of the piston in the mobilization phase (Eq. 20), i. e. the rate of movement decreases.

In the rupture phase the liquid in the damper is heated and its dynamic viscosity decreases from the maximum value η_m (Eq. 21), where t_m is the mobilization time; this decrease of the dynamic viscosity proceeds directly with the time t elapsed after the mobilization time t_m (Eq. 22). Substituting this value into the Eq. (18), we get the rate of movement of the piston in the rupture phase (Eq. 23), i. e. the rate of movement increases.

If the ends A and B of the rheological body are fixed the spring H_b will elastically restore its length as the piston moves. The total deformation of the body will be preserved while stress in the right part will disappear. Since the stress in the spring H_b will not eliminate completely, *partial relaxation* will take place as a whole. If the ends A and B remain unfixed deformation will occur under the action of the stress τ ; inelastic strain γ_c will be added to the elastic one $\gamma_a + \gamma_b$ on account of the viscous displacement of the piston, proceeding at a changeable rate due to the cooling or heating of liquid in the damper (*damping creep* in the mobilization phase and *accelerating creep* in the rupture phase).

The suggested rheological body differs from Schwedoff's body by the following important features: 1) the coil with cooling or heating liquid models the varying viscosity increasing in the mobilization phase and decreasing in the rupture phase; 2) the contacts L and M control the cooling and heating of the liquid in the damper and model the creep limit and the mobilization limit respectively; 3) the valve disk with programmed disposition of holes models the probabilistic nature of the mechanical properties of soil structures, the stabilization limit γ_s at low and middle stress levels and creep acceleration at high stress levels; 4) the finite length γ_r of the damper models the total destruction of the sample after a certain strain is reached.

Equations of mechanical behaviour of the model in the creep process

The total deformation γ of model at any moment of time will be (Eq. 24), where components are determined from Eqs. (14), (17), (20) and (23). Let us consider the behaviour of the rheological body by creep tests, i. e. at the constant value of the shear stress. If $\tau < \tau_p$ the spring H_a will deform instantly for the length γ_a (Eq. 14) which does not change with time. The reaction is taken over by the plastic body StV . If

When the stress is removed the spring H_a will restore completely its length. Therefore the strain γ_a is elastic. If $\tau > \tau_p$ the spring H_a will undergo instantaneous elastic deformation γ_a (Eq. 14). Simultaneously the plastic body StV displaces and takes a part of the applied stress equal to τ_p ; the contact L is switched on therewith and the cooling liquid starts to flow through the coil Q (mobilization phase). The remaining part of the stress, equal to $\tau - \tau_p$, is taken over by the spring H_b and therefore instantaneous deformation occurs (Eq. 17). The reaction of this spring is taken over by piston N and viscous flow occurs; its rate is determined by viscosity η of the liquid in the damper and by the magnitude a of open holes in the valve disk K (Eq. 20). Therefore we write Eq. 25, and integrating, we get Eq. 26.

For a better mathematical interpretation we replace this equation by Eq. (27). Then at $t=0$ the first member of the Eq. (27) is zero and the constant C of integration is equal to the instantaneous strain $\gamma_a + \gamma_b$ (Eq. 28). Adding and subtracting from the right part of this equation $[\tau - \tau_p]/G_a$ and denoting modulus of shear deformation in the interval from 0 to τ_p by G_1 and in interval from τ_p to τ by G_2 (see Eqs. 29), we rewrite Eq. (25) as (Eq. 30), i. e. the creep curve in the mobilization phase is described by a logarithmic equation.

This equation is valid for the first position of the valve disk K , at $a=a_1$. At the end of this stage, at $t=t_1$ the total deformation will be γ_1 (Eq. 31). In the second position of the valve disk the deformation γ' at a new value of the coefficient a_2 will be added to this deformation (Eq. 32).

Hence we get the general equation for deformation in the mobilization phase (Eq. 33), where $t_0=0$ and n_1 is the number of position of the valve disk before the mobilization limit.

In the final phase of the test after the deformation γ_m is attained (Eq. 16) the contact M is switched on and the heating liquid flows through the coil Q (rupture phase); the displacement of the piston in this phase proceeds at an accelerating rate (Eq. 23). Hence we write Eq. (34), and integrating it we get Eq. (35). The constant C of integration is received from the condition at $t=t_m$, $\gamma=\gamma_m$; substituting into Eq. (35) we find Eq. (37) i. e. the creep curve in the rupture phase is described by the equation of a parabola.

Eq. (37) is valid for the first position of the valve disk K after the mobilization limit; let us denote it j . At the end of this stage at $t=t_j$ the total deformation will be (Eq. 38). In the second position of the valve disk the deformation γ'' at a new value of the coefficient a_{j+1} will be added to this deformation (Eq. 39 or 40). At the end of this stage, at $t=t_{j+1}$ the total deformation will be (Eq. 41) or taking into account Eq. (38), we find Eq. (42). Hence we get the general equation for deformation in the rupture phase (Eq. 43) where $t_{j-1}=t_m$ and n_2 is the number of positions of the valve disk K after the mobilization limit.

The suggested rheological model reflects all features of the mechanical behaviour of clay during the whole process of creep at shear; it describes adequately the mobilization and rupture phases, mobilization and stabilization limits and the jump-like reorganization of soil structure.

СИМВОЛЫ И СЛОВА — ЛИТЕРАТУРА — REFERENCES

- Тер-Степанян Г. И., Месчан С. Р. и Галстян Р. Р., 1973. Исследование ползучести глинистых грунтов при сдвиге. Труды к VIII Международному конгрессу по фундаментострою, М., с 51—63.
- Ter-Stepanian G., Meschian S. R. and Galstian R. R., 1973. Investigation of creep of clay soils at shear. Proceedings, Eighth Internat. Confer. Soil Mech. Found. Engg., Moscow, v. 1. pt. 2, p. 433—438.