

## ВЯЗКО-ГИПОПЛАСТИЧНОСТЬ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА НАБЛЮДЕНИЙ ДЛЯ СЛАБЫХ ГРУНТОВ

*Г. ГУДЕХУС – Институт механики грунтов и скальных пород, Университет  
г. Карлсруэ, Германия.*

### *Посвящается памяти профессора Лауриуса Бьеррума*

Приводятся зависимости вязко-гипопластичности для грунтов, содержащих мягкие частицы (в особенности для глин), полученные путем численного моделирования. С помощью одной системы уравнений для определения скорости развития эффективных напряжений в зависимости от скорости деформации выводятся известные закономерности для компрессионного сжатия и ползучести, а также для дренированного и недренированного сдвига. Решающим является соотношение  $OCR = p_e/p'$  при эквивалентном давлении  $p_e$ , зависящем от коэффициента пористости  $e$  и соотношения напряжений. Требуется лишь 5 параметров, которые достаточно легко определить. Таким образом можно проследить природную консолидацию слабых грунтов, а также их последующее уплотнение и развитие ползучести под воздействием насыпи, включая боковое расширение и локализацию. Данный метод можно применять для расчета котлованов с распорками в слабых глинистых грунтах. Он также позволяет усовершенствовать метод наблюдений.

### ВВЕДЕНИЕ

Л. Бьеррум (Bjerrum, 1973) дал общий обзор особенностей работы *слабых грунтов*. Он детально описал зависимости показателей жесткости и прочности грунтов от коэффициентов пористости и переуплотнения, скорости деформации и составляющих напряжения, а также эффекты объемной и девиаторной ползучести. Вдохновленные его визитом 30 лет назад, мы в Университете Карлсруэ начали разработку основополагающих уравнений для слабых грунтов. Ляйнэнкюгель (Leinenkugel, 1976) ввел понятие *индекса вязкости*  $I_v$  и предложил общую концепцию для скоростных зависимостей, ползучести и релаксации, используя понятие *эквивалентного напряжения*  $\sigma_e$  Хворслева (Hvorslev, 1937). Колимбас (Kolymbas, 1978) предложил уравнение скоростного типа, включающее эффекты вязкости. Таково происхождение понятия *гипопластичность*.

В течение примерно 25 лет наша работа была сконцентрирована на твердозернистых грунтах без учета эффектов вязкости. После того как Колимбас объединил эффекты плотности и давления (Kolymbas, 1991), теория гипопластичности стала пользоваться успехом, ее достоверность была неоднократно доказана (Gudehus, 2003 *a* и *b*). Скоростная зависимость и ползучесть задавались посредством учета прочности частиц, зависящей от скорости, а также параметром  $I_v$  (Gudehus, 1996), но без учета релаксации. Ниемунис (Niemunis, 1996, 2003) смог преодолеть это противоречие путем введения модифицированной модели Кэм Клэй. В нашем варианте теории Ниемуниса (Gudehus, 2003*c*) часть, включающая модель Кэм Клэй, заменена тремя аттракторами гипопластичности и асимптотами при компрессионной ползучести и релаксации.

В настоящей статье закономерности *вязко-гипопластичности* даны в частично обновленном графическом представлении (см. разд. 1). Свойства, описанные Бьеррумом (Bjerrum, 1973), представлены одним или

двумя скоростно-зависимыми уравнениями. Для проявления эффектов вязкопластичности решающее значение имеет коэффициент переуплотнения  $OCR$ . Требуется лишь 5 ключевых параметров, причем ниже даются их типичные величины для глин с низкой и высокой пластичностью, служащие также для нужд классификации. Целесообразность такого подхода была показана с помощью конечноэлементных испытаний (Niemunis, 2003; Gudehus, 2003c). Необходимо определить поле исходного состояния  $\sigma'$  и  $e$ , тогда с помощью граничных условий можно рассчитать изменения состояния и положения. У нас была возможность удостовериться в этом в процессе испытания моделей и натуральных измерений (Gudehus, 2003a и b, Cudmani и др., 2003).

Р. Пек (Peck, 1969) дал описание *метода наблюдений*, который он разработал совместно с Терцаги. Он использовал качественные и традиционные количественные модели прогнозирования. В некоторых случаях выдвинутые им жесткие общие требования могут быть более адекватно удовлетворены с помощью концепций гипопластичности. Это показано в разд. 2 для случаев устройства насыпи на слабых грунтах. Поле исходного состояния можно последовательно описать путем обратного анализа с применением теории гипопластичности. Разрушение при ползучести и долговременные смещения рассчитываются с помощью той же теории и анализируются с использованием коэффициента переуплотнения  $OCR$  и порового давления. Это ведет к созданию частично обновленной концепции метода наблюдений.

Проведение работ по выемке грунта в массиве текучих глин с применением распорок и шпунтового ограждения котлована анализируется в разд. 3. Исходное состояние аналогично исходному состоянию, принятому в разд. 2, за исключением случаев близко стоящих зданий. Величины смещений и усилий в распорках принимаются по результатам испытаний, проведенных, например, в Чикаго. Пек (Peck, 1969) упоминает такой случай, и мы сегодня можем использовать его результаты с большей эффективностью.  $OCR$  снова оказывается основной величиной при оценке устойчивости и деформативности.

Обновленный метод наблюдений может быть использован при анализе фундаментов, туннелей, откосов и т. д., но при этом нельзя забывать об ограничениях, накладываемых соответствующей теорией (см. заключение).

## 1. ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВЯЗКО-ГИПОПЛАСТИЧНОСТИ

Численное моделирование при расчетах по параметрам вязко-гипопластичности описывается в настоящей статье для высокопластичных (в дальнейшем обозначаемых индексом  $H$ ) и низкопластичных (в дальнейшем обозначаемых индексом  $L$ ) водонасыщенных глин. *Одометрическое сжатие* (рис. 1) с постоянной скоростью деформации, начинающееся с низких величин  $e$ , можно аппроксимировать выражением

$$e \approx e_r - C_c \ln(\sigma'/\sigma_r), \quad (1)$$

где  $C_c$  – индекс сжимаемости (например, 0,35 для  $H$  и 0,06 для  $L$ );  $e_r$  – эталонный коэффициент пористости (например, 2,6 для  $H$ , 0,75 для  $L$ );  $\sigma_r$  – эталонное давление.

В отличие от классического подхода величина  $\sigma_r$  зависит от скорости деформации:

$$\sigma_r = \sigma_{rr} [1 + I_v \ln(|\dot{\epsilon}|/D_r)] \approx \sigma_{rr} (|\dot{\epsilon}|/D_r)^{I_v}, \quad (2)$$

где  $I_v$  – индекс вязкости (например, 0,05 для  $H$  и 0,02 для  $L$ );  $D_r$  – условная скорость деформации, (например  $D_r = 10^{-6} \text{ с}^{-1}$ );  $\sigma_{rr}$  – условное давление (например 100 кПа).

Эффект скорости заметен для  $H$ , если  $\dot{\epsilon}$  изменяется на несколько порядков, и незначителен для  $L$ .

*Коэффициент переуплотнения* определяется как

$$OCR = \sigma_e / \sigma' \approx \sigma_{rr} \exp\left(\frac{e_r - e}{C_c}\right) / \sigma' \quad (3)$$

при эквивалентном давлении  $\sigma_e$ , определяемом из выражения (1), как было предложено Хворслевом (Hvorslev, 1937), но в данном случае при  $\sigma_r$  – из выражения (2) для  $\dot{\epsilon} = D_r$ . Таким образом, линия  $NCL$  для  $\dot{\epsilon} = D_r$  характеризуется величиной  $OCR = 1$ , в противном случае остается верным отношение  $OCR \approx (D_r / \dot{\epsilon})^{I_v}$ . Нулевое состояние, например при  $e = 2,3$  и  $\sigma' = 6$  кПа для  $H$ , имеет  $OCR = 4$ . Сжатие при  $\sigma = 40$  кПа, приложенном в тече-

ние 10 мин, и выравнивание порового давления при толщине образца  $d = 2$  см с водопроницаемостью  $k = 10^{-9}$  м с<sup>-1</sup> ведут к известному снижению  $e$  (в осях с  $\log t$ ). Линия первичного сжатия, ассоциированная с  $\dot{\epsilon}$ , благодаря фильтрации достигает, например, состояния 1 при  $e = 2,1$ ,  $\sigma' = 35$  кПа и  $OCR = 0,8$ . После достижения постоянного  $\sigma'$  начинается объемная ползучесть, которую можно аппроксимировать известным отношением

$$e \approx e_0 - C_\alpha \ln(1 + t/t_d) \quad (4)$$

при

$$C_\alpha \approx C_C I_V \quad (5)$$

и временем первичной консолидации

$$t_d \approx 10d^2 C_c \gamma_w / \sigma' (1+e)k. \quad (6)$$

Это приводит, например, к состоянию 2 по прошествии приблизительно  $10^8$  ч при  $e = 1,1$  и  $OCR = 2,2$ . Выражения (4), (5) и (6) верны только для определенного интервала и подходящих величин начального  $OCR$ .

Вводя сходным образом  $\sigma = 105$  кПа, после выравнивания порового давления можно достичь состояния 3 при  $OCR \approx 0,9$ . Последующую ползучесть можно также аппроксимировать посредством выражения (4) с новыми величинами  $e_0$  и  $t_d$  и постоянной  $C_\alpha$ . Для  $L$  этот тип ползучести приводит к отображенному на графике состоянию 2 в течение чрезвы-

чайно длительного периода из-за низких величин  $C_\alpha$ .

Частичная разгрузка и повторная нагрузка от и вновь до линии  $NC$  (например, 5–6–5 на рис. 1,а) при постоянной величине  $|\dot{\epsilon}|$  может быть аппроксимирована выражением (1), если заменить  $C_c$  на  $C_s$ . Значение  $e_r$  берется из линии  $NC$ ,  $\sigma_r$  дается по выражению (2), как и в предыдущем случае.

Результаты вычисляем посредством одного уравнения, которое можно записать как

$$\dot{\sigma}' = \frac{\sigma'(1+e)}{2} \left[ \dot{\epsilon} \left( \frac{1}{C_s} - \frac{1}{C_c} \right) - D_r \left( \frac{\sigma'}{\sigma_e} \right)^{1/1_v} \left( \frac{1}{C_s} - \frac{1}{C_c} \right) \right]. \quad (7)$$

Выражение (7) приводит к известному модулю жесткости

$$E_s = \dot{\sigma}' / \dot{\epsilon} = \dot{\sigma}'(1+e) / C_c \quad (8)$$

для  $\dot{\epsilon} > 0$  и  $\sigma' / \sigma_e = (|\dot{\epsilon}| / D_r)^{1_v}$  посредством (2), и к (8), если взять  $C_s$  вместо  $C_c$  для  $\dot{\epsilon} < 0$ . Величина  $E_s$  зависит от скорости, так же как и  $\sigma'$ , через (2). Для состояний переуплотнения, т. е. при  $OCR > (D_r / |\dot{\epsilon}|)^{1_v}$ , зависимость (8) не соблюдается, а величина  $E_s$  недостаточно достоверна. Записав (7) при  $\dot{\sigma}' = 0$  и  $OCR = (D_r / |\dot{\epsilon}|)^{1_v}$ , можно вывести (4) и (5). Выражение (7) достоверно для  $\sigma'_2 = K_0 \sigma'_1$  при  $K_0 \approx 1 - \sin \phi_c$ , в противном случае приходится использовать второе эволюционное уравнение для  $\delta'_2$  (Niemunis, 2003).

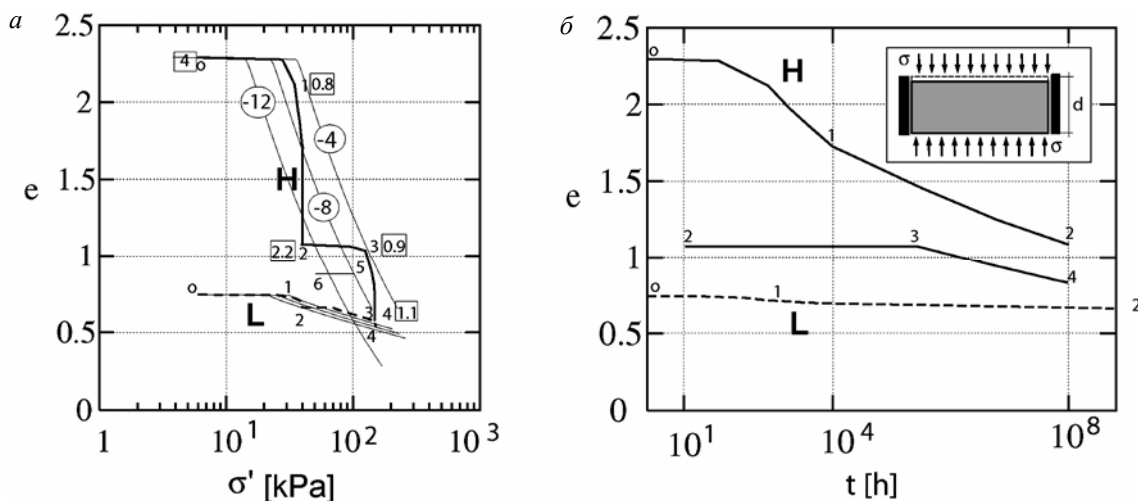


Рис. 1. Изменение коэффициента пористости в зависимости от эффективного давления и времени для высокопластичных (H) и низкопластичных (L) глин в одометре, рассчитанное по вязко-гипопластичности (значения  $OCR$  обведены квадратом, логарифмы  $\dot{\delta}$  при  $s^{-1}$  – кругом, временные интервалы обозначены цифрами)

Недренированный сдвиг выявляет довольно гибкие закономерности, начиная, например, с  $OCR = 2$  (рис. 2). В конечном счете это приводит к критическим состояниям при сдвиговом напряжении

$$\tau_c \approx \sigma' \tan \varphi_c \quad (9)$$

и постоянном угле трения  $\varphi_c$  (например,  $10^\circ$  для  $H$  и  $28^\circ$  для  $L$ ). Критический коэффициент пористости понижается при  $\sigma'$  следующим образом:

$$e_c \approx e_{cr} - C_c \ln(\sigma'/\sigma_r) \quad (10)$$

при значениях  $C_c$  и  $e_{cr}$ , несколько меньших соответствующих величин для выражения (1). Величина  $\sigma_r$  в очередной раз является скоростью-зависимой согласно (2), в данном случае при  $|\dot{\gamma}|/2$  вместо  $|\dot{\epsilon}|$ . Следовательно,  $\tau_c$  зависит от  $\dot{\gamma}$  через (2) и (9) при  $e$  через (10). Эволюции до критических состояний показаны на графике для сдвиговых скоростей  $10^{-4}$ ,

$10^{-6}$  и  $10^{-8} \text{ c}^{-1}$ . Скачки  $\dot{\gamma}$  вызывают переходы к линиям с новыми  $\dot{\gamma}$ , что показано на графике (см. рис. 2) для глин  $H$  и может быть использовано для определения величин  $I_v$  по предложению Ляйненкугеля (Leinenkugel, 1976).

«Гирлянды», наблюдаемые при таких испытаниях, можно получить, приняв для расчетов более мягкие  $\dot{\gamma}$ -переходы. В данном случае расчетные траектории напряжений также характеризуются не столь большим повышением промежуточного напряжения  $\sigma'$  и являются, таким образом, более реалистичными. Все это показывает, что необходимо учитывать реальную «программу нагружения» с различными и переменными величинами скорости деформации.

Для тех же начальных величин  $\sigma'$  и  $e$  (или  $OCR$ ) глины  $L$  являются более жесткими и прочными, чем глины  $H$ . В силу скоростной зависимости, согласно выражению (2), жесткость и прочность повышаются с увеличением

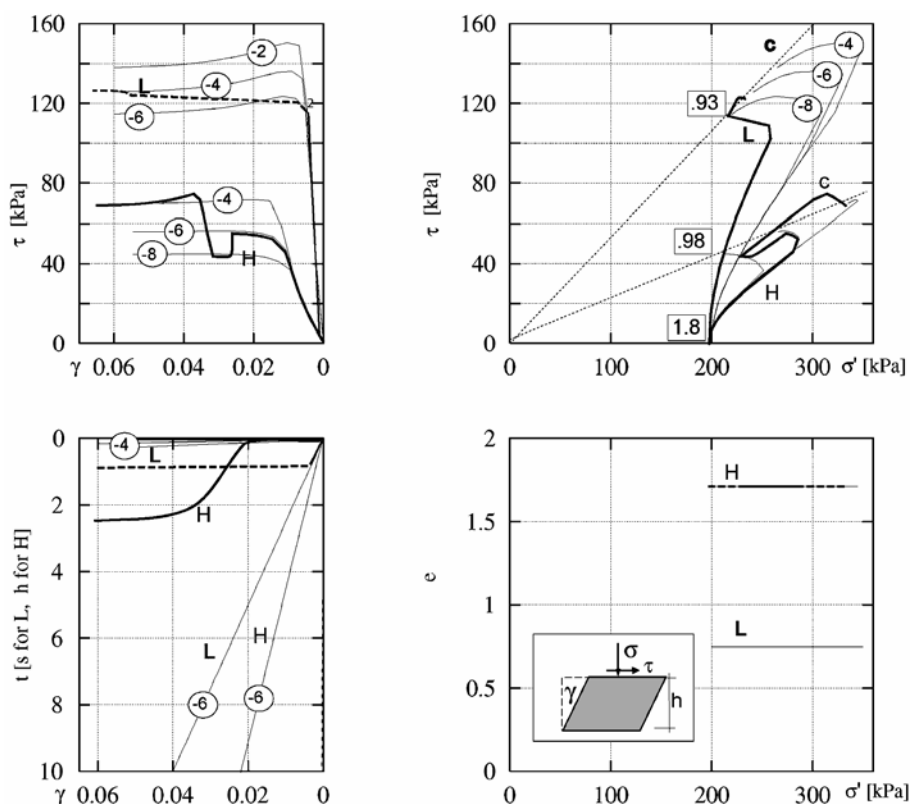


Рис. 2. Эволюция сдвигового напряжения, эффективного нормального напряжения и коэффициента пористости, рассчитанных по вязко-гипопластичности для недренированного простого сдвига из состояний при  $OCR \approx 2$ . Ползучесть при постоянном  $\tau$  обозначена пунктиром; для глин  $H$  и  $L$  применены разные временные масштабы (остальные обозначения см. на рис. 1)

$\dot{\gamma}$ . Величина  $OCR = 1$  является достоверной для критических состояний при  $\dot{\gamma}/2 = D_r$ , в противном случае  $OCR \approx (2D_r/|\dot{\gamma}|)^{1/v}$ . Это достигается в силу того, что значения  $\sigma_e$  зависят также от соотношения напряжений  $\tau/\sigma'$ , как было описано Хворселевом (Hvorslev, 1937). Реакция на постоянное значение  $\dot{\gamma}$  является гибкой для  $H$  и несколько более хрупкой для  $L$ . Расчетные траектории нагружения также реалистичны, а величина  $\sigma'$  уменьшается с понижением  $\delta$ .

Если  $\tau$  и  $\sigma$  удерживаются на постоянном уровне по достижении состояния 2 (например, при  $10^{-6} \text{ c}^{-1}$ ), развивается девиаторная ползучесть. Величина  $\dot{\gamma}$  понижается до тех пор, пока не будет достигнуто значение  $\dot{\gamma}$  для критического состояния при  $\tau = \tau_c$ , когда ползучесть стабилизируется. Это – относительная стабилизация, так как достигнутое равновесие является статическим, а не термодинамическим. Ползучесть развивается быстрее для глин  $L$ , чем для  $H$ , и нарастает после определенного замедления для глин  $L$  в силу

их хрупкости.

Начинаясь после нормального уплотнения, т. е. при  $OCR \approx 1$ , недренированный сдвиг с постоянной величиной  $\dot{\gamma}$  вызывает сходную реакцию (рис. 3).

Критические состояния развиваются асимптотически, как и в предыдущих случаях. Пик сдвигового напряжения  $\tau$  снова заметнее у более твердых частиц и повышается с ростом скорости деформации. Эти пики нельзя описать с помощью традиционных величин  $\phi'$  и  $c'$ , последняя из которых практически пропорциональна  $\sigma_e$ , как, например, у Хворслева (Hvorslev, 1937). Такие величины  $\phi'$  и  $c'$  являются произвольными и не имеют физического смысла. Реальный материал не обладает связностью (Schofield, 2002), а его свойства зависят от скорости.

Если величина  $\tau$  поддерживается на постоянном уровне по достижении, например, состояния 2 при  $\dot{\gamma} = 10^{-4} \text{ c}^{-1}$  непосредственно перед достижением пика, величина  $\dot{\gamma}$  уменьшается сначала до значений, ассоциируемых с

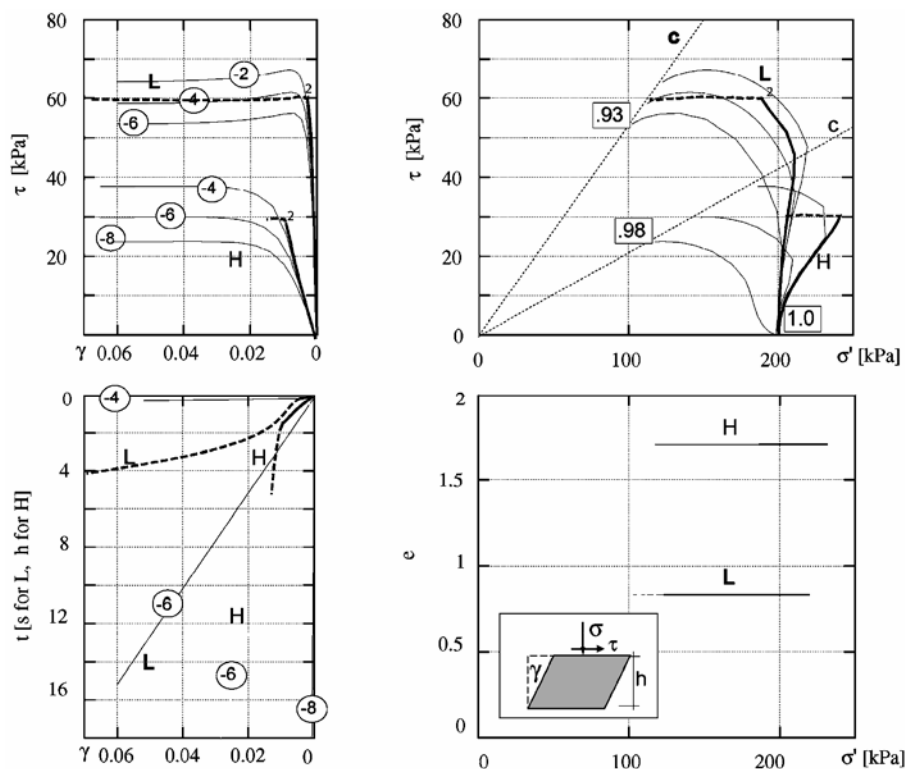


Рис. 3. Эволюция сдвигового, эффективного нормального напряжения и коэффициента пористости, рассчитанных по вязко-гипопластичности для недренированного простого сдвига из состояний  $OCR \approx 1$ . Ползучесть при постоянном  $\tau$  обозначена пунктиром и разными временными масштабами для глин  $H$  и  $L$  (остальные обозначения см. рис. 1)

пиком  $\tau$  для более низких величин  $\dot{\gamma}$ . Затем эта величина возрастает до значений, характерных для данных  $\tau = \tau_c$  и  $e$ . Этот тип *разрыва при ползучести* намного серьезнее для глин  $L$ , чем для глин  $H$ , что требует осторожности в расчетах. Критическая деформация, ассоциированная с ним, сильно зависит от начального состояния.

*Дренарованный сдвиг* после нормального уплотнения ведет к более сильной стабилизации, чем недренарованный, что вызвано увеличением плотности (рис. 4). Выражение (2) справедливо при  $D = \sqrt{\varepsilon^2 + \dot{\gamma}^2} / 2$  вместо  $|\dot{\varepsilon}|$ . Критические состояния достигаются при меньших значениях  $e$  и  $\dot{\gamma}$ , но с той же величиной  $\tau_c$  для заданного уровня  $\sigma'$ . В процессе перехода грунт жестче для больших величин  $\dot{\gamma}$ . Ползучесть при постоянном  $\tau < \sigma' \tan \varphi_c$  и  $\sigma'$  происходит со снижением  $\dot{\gamma}$ . Объемная доля почти соответствует выражению (4), коэффициент дилатансии  $\dot{\varepsilon} / \dot{\gamma}$  определяется

соотношением  $\tau / \sigma'$ .

При дренарованном сдвиге после переуплотнения (рис. 5) проявляется более хрупкий характер поведения материала по сравнению с показанным на рис. 3. При постоянном значении  $\dot{\gamma}$  незначительная начальная контракция сопровождается дилатансией вплоть до критического состояния при величине  $\tau_c$ , определяемой по зависимости (9), и величине  $e_c$ , определяемой по зависимости (10) с учетом (2). Пики  $\tau$  становятся выше при увеличении  $\dot{\gamma}$  и начальном  $OCR$ . Их можно описать при помощи  $\varphi'$  и  $c'$ , но с физической точки зрения это неоправданно и не является необходимым при решении практических задач. Ползучесть без дренажа от состояния 2, достигаемого сдвигом при постоянной  $\dot{\gamma}$ , начинается, скажем, с уменьшением  $\dot{\gamma}$  и приводит к *дилатантному разрыву*. Величина  $\dot{\gamma}$  не может стабилизироваться, если  $\tau$  превышает  $\tau_c$ . Время до разрыва возрастает с начальным

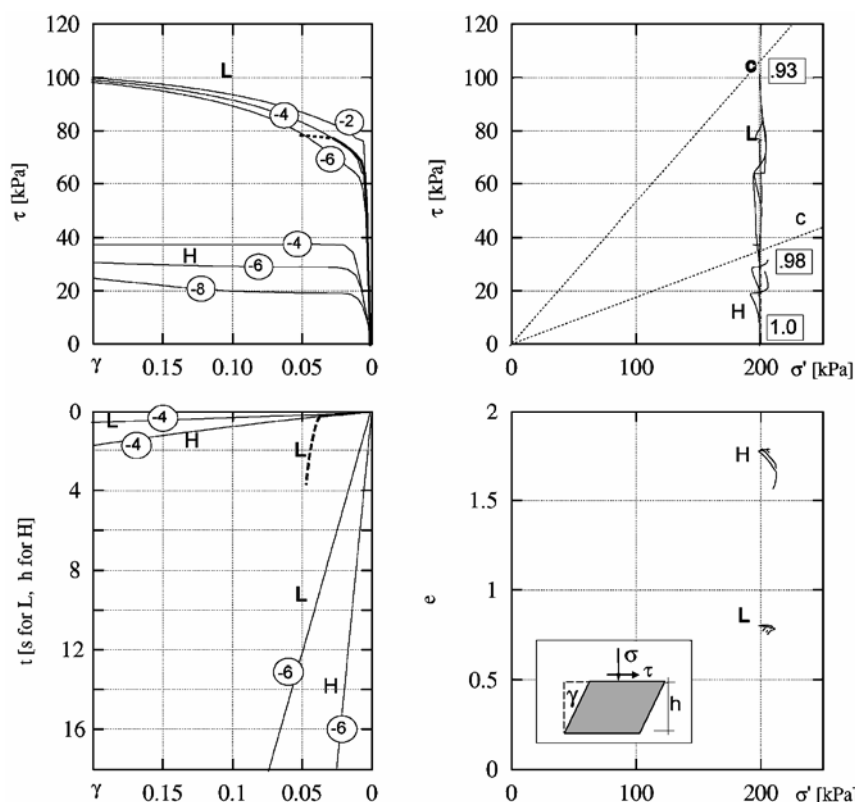


Рис. 4. Эволюция сдвигового напряжения, эффективного нормального напряжения и коэффициента пористости, рассчитанных по вязко-гипопластичности для дренаванного простого сдвига из состояний  $OCR \approx 1$ . Ползучесть при постоянной величине  $\tau$  обозначена пунктиром и разными временными масштабами для глин  $H$  и  $L$

$OCR$  и  $I_v$ . Поскольку серьезное повышение  $\dot{\gamma}$  предотвращает дренаж, поровое давление становится отрицательным, пока не произойдет кавитационное разрушение образца.

Изменение параметров, представленное на графиках (см. рис. 2–5), описывается двумя уравнениями:

$$\dot{\sigma}' = \sigma'(1+e) \left[ L_{11}\dot{\epsilon} + L_{22}\dot{\gamma} - N_1 D_r OCR^{-1/I_v} \right]. \quad (11)$$

$$\dot{\tau} = \sigma'(1+e) \left[ L_{21}\dot{\epsilon} + L_{22}\dot{\gamma} - N_2 D_r OCR^{-1/I_v} \right]. \quad (12)$$

Коэффициенты  $L_{11}$  и т. д. зависят от  $\tau/\sigma'$  и  $\varphi_c$ . Выражение (11) упрощается до (7) при  $\tau = 0$  и  $OCR = \sigma_e/\sigma'$ . Условие  $OCR = p_e/p'$  соблюдается при среднем эффективном давлении  $p'$  и эквивалентном давлении  $p_e$ , которое зависит от  $e$  и  $\tau/\sigma'$ . Для критических состояний при  $\dot{\epsilon} = 0$  и  $\dot{\gamma} = \text{const}$  получаем значения  $\dot{\tau} = 0$  и  $\dot{\sigma}' = 0$ ,  $\tau = \sigma' \text{tg } \varphi_c$  и  $OCR = (2D_r/|\dot{\gamma}|)^{I_v}$ . Для

недренированного сдвига в общем случае значение  $\dot{\sigma}' \neq 0$  выводится из выражения (11). Коэффициенты пиковых напряжений рассчитываются из уравнений (11) и (12) при  $\dot{\tau} = 0$  и  $\dot{\epsilon} = 0$ , которые зависят от  $OCR$  и отношения  $\dot{\epsilon}/\dot{\gamma}$ . Для дренированного сдвига при  $\sigma' = \text{const}$  коэффициент дилатансии  $\dot{\epsilon}/\dot{\gamma}$  выводится из (11) и (12). Коэффициенты пиковых напряжений и коэффициенты дилатансии рассчитывают по (11) при  $\dot{\sigma}' = 0$  и по (12) при  $\dot{\tau} = 0$ , что зависит от  $OCR$  и от  $\dot{\gamma}/D_r$ .

При иных соотношениях начальных компонент напряжений на ранней стадии, включая не упомянутые выше (например,  $K_0 = \sigma_h'/\sigma_v'$ ), можно вывести сходные кривые для тех же асимптот. Другие типы сжатия (например, изотропное) и сдвига (например, трехосный) приводят к сходным кривым, но с несколько иными асимптотами. Можно полу-

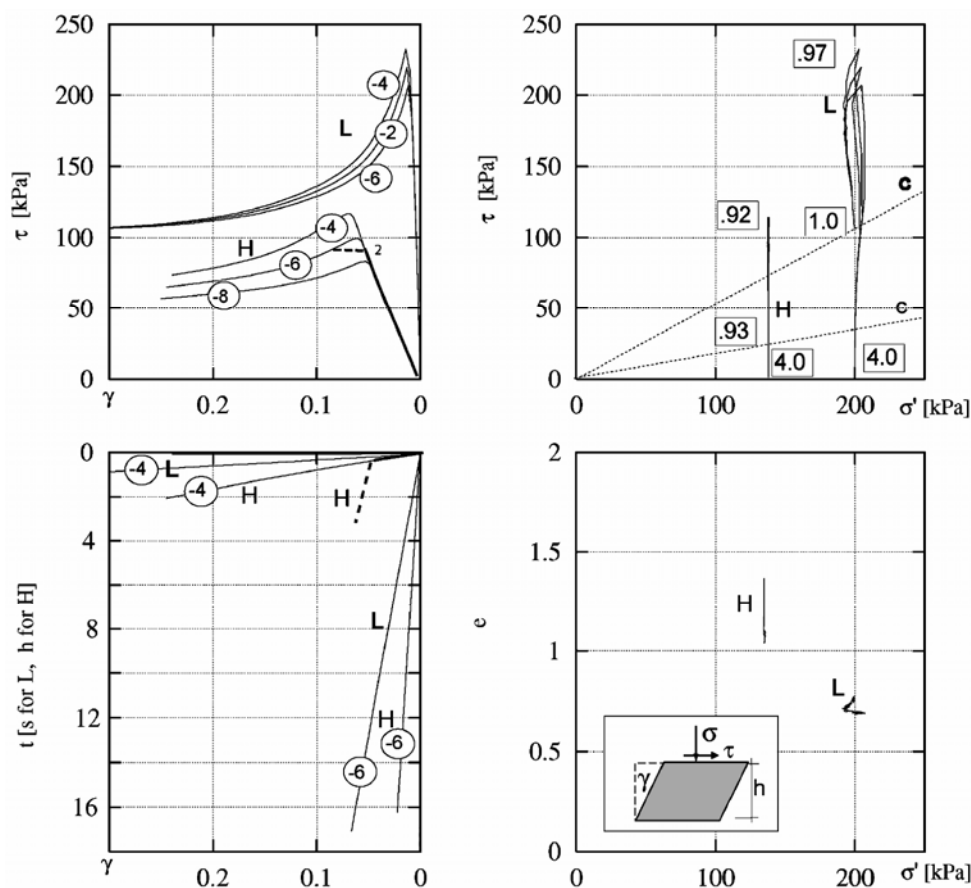


Рис. 5. Эволюция сдвигового напряжения, эффективного нормального напряжения и коэффициента пористости, рассчитанные по вязко-гипопластичности для дренированного простого сдвига из состояний  $OCR \approx 4$ . Ползучесть при постоянной величине  $\tau$  обозначена пунктиром и разными временными масштабами для глин  $H$  и  $L$

читать реалистичные значения сопротивления для недренированного трехосного сжатия и растяжения, так же как и значения сопротивления сдвигу при испытании крыльчаткой в полевых условиях. Ползучесть при сжатии заканчивается по завершении чрезвычайно длительных временных промежутков, так что выражение (4) в данном случае уже не достоверно. Релаксация и реакция на переменное нагружение включаются в рамки той же теории. Описываемые закономерности близки к реально наблюдаемым (например, Вьетгум, 1973). Это достигается решением одного уравнения, выражающего эволюцию компонент эффективных напряжений. Оно является тензорным и, таким образом, объективным и подходящим для конечноэлементных приложений.

Существуют только 5 ключевых параметров материала для примеров, приведенных выше (см. таблицу).

Материал	$I_v$	$e_r$	$C_c$	$C_s$	$\varphi_c$
Глины $H$	0,05	2,60	0,35	0,18	18°
Глины $L$	0,02	0,75	0,06	0,01	28°

Параметры  $I_v$ ,  $e_r$ ,  $C_c$  и  $C_s$  имеют более высокое значение для слабых грунтов и коррелируют как между собой, так и с  $w_L$ . Величина  $\varphi_c$

коррелирует с ними для глин, но для текучих грунтов она может быть намного выше, например, для диатомитовой грязи даже более 60° (Krieg, 2000). Эти параметры можно использовать для классификации. Для отладки и тонкой настройки могут понадобиться дальнейшие параметры, но их в большинстве случаев можно установить эмпирически.

При незначительных деформациях непосредственно после реверсии траекторий (в особенности при переменном нагружении) можно учитывать интергранулярную деформацию для моделирования начальной более высокой жесткости (Niemunis, 2003). Это требует введения еще одного ключевого параметра:  $R$  – верхней границы интергранулярной деформации. Параметр  $R$  варьирует приблизительно от  $10^{-3}$  до  $10^{-1}$  для глин  $L$  и  $H$  и может быть оценен методом корреляции.

## 2. НАСЫПЬ НА СЛАБЫХ ГРУНТАХ

Рассмотрим свободное поле с водонасыщенным слоем слабых высокопластичных глин, под которыми залегает слой плотного песка, с рыхлым слоем песка на поверхности. Все грунтовые слои являются полностью обводненными (рис. 6). Песок моделируется невязкой гипопластичностью, так как его

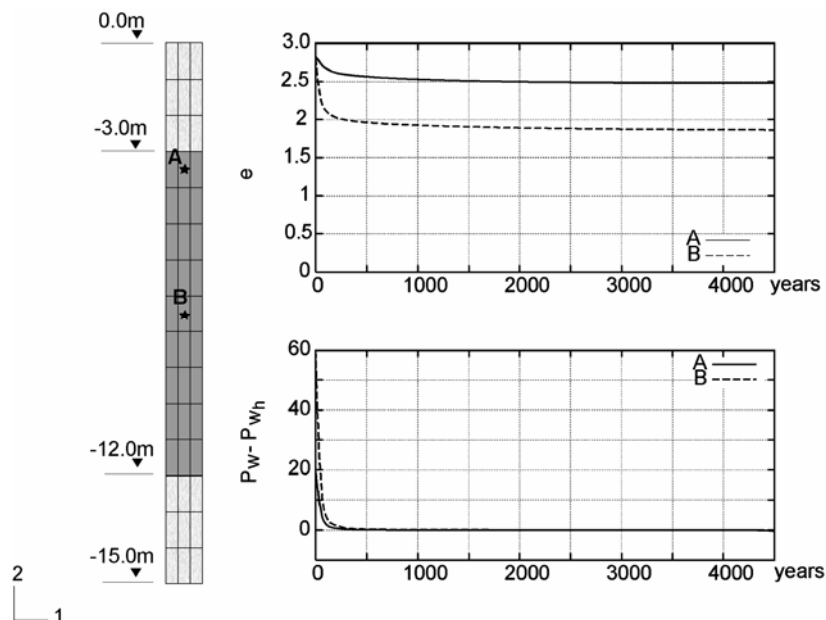


Рис. 6. Расчетная эволюция коэффициента пористости и избыточного порового давления в мягком грунте после седиментации



величина  $I_v \approx 0,01$  допускает пренебрежение ползучестью для рассматриваемых нами промежутков времени. Допустим, что глины  $H$  характеризуются параметрами, приведенными в табл. 1 и имеют возраст отложения 5000 лет, как и песок на поверхности. Предположим, глина имела показатель  $e = 2,8$  непосредственно после отложения. Для простоты принимаем не зависящую от коэффициента пористости водопроницаемость  $k \approx 10^{-9}$  м с<sup>-1</sup>.

Показанное на графике изменение переменных состояния  $e$  и  $\sigma'$  (вертикальная шкала) рассчитывается следующим образом. На первом этапе задается сила тяжести, а тотальное напряжение  $\sigma$  впоследствии не меняется в материальных точках. Давление поровой воды  $p_w = \sigma - \sigma'$  приближается к  $\sigma$ , в то время как  $\sigma'$  имеет низкие значения согласно (1) для принятого начального значения  $e$ . Гидравлический градиент связан с относительной скоростью поровой воды (по отношению к твердой фазе грунта) следующим образом:

$$v_w - v_s = -k \left( \frac{\partial p_w}{\gamma_w \partial z} - 1 \right). \quad (13)$$

Законы сохранения имеют вид

$$\frac{\partial(\alpha_w v_w)}{\partial z} + \frac{\partial \alpha_w}{\partial t} = 0 \quad (14)$$

для воды с ее объемным содержанием  $\alpha_w = e/(1+e)$  при  $S_r = 1$  и

$$\frac{\partial \sigma'}{\partial z} = \gamma' - \frac{\partial p_w}{\partial z} \quad (15)$$

для линейного движения.

Скорость эффективного напряжения  $\dot{\sigma}'$  определяется уравнением

$$\dot{\sigma}' = \frac{\partial \sigma'}{\partial t} + v_s \sigma' \quad (16)$$

при величине  $\dot{\sigma}'$ , определяемой по (7) в одномерной постановке.

Начальное условие здесь такое же, как приведенное выше для  $e$  и  $\sigma'$ , а  $v_s = 0$ . Граничные условия:  $p_w = p_{wh}$  (гидростатическое) и  $\sigma' = \sigma - p_{wh}$  в контактом слое глина/песок, и  $v_s = 0$  в основании. Система уравнений может быть решена в конечноэлементной постановке. Расчетное развитие  $e$  и  $p_w - p_{wh}$  показано на рис. 6. Время затухания  $t_d$ , относящееся к  $p_w -$

$p_{wh}$ , можно рассчитать по выражению (6), подставив в него толщину грунтового слоя  $d$  и усредненные показатели  $k$ ,  $e$  и  $\sigma'$ . Для  $t > t_d$  коэффициент пористости снижается согласно (4). Если величина  $t_d$  превышает время покоя, в особенности при нелинейной водопроницаемости и очень низких величинах  $k$ , глина сохраняет избыточное поровое давление, и справедливо выражение (4). Величина коэффициента переуплотнения  $OCR$  стремится к

$$OCR \approx (t/t_d)^{\nu} \quad (17)$$

при  $t > t_d$ . Следует отметить, что в нашем случае  $OCR$  не является общепринятой величиной, но приближается к ней при  $t > t_d$ . Время седиментации  $t_s$  не связано с  $OCR$ , если  $t_s \ll t$ .

Все перечисленные выводы согласуются с результатами полевых наблюдений. Величину осадок  $s$  можно рассчитать исходя из значений  $e$ , а  $\sigma'$  – из  $\sigma$  и  $p_w$ . Неоднородные слои мягкого грунта можно учитывать, если задать  $k(e)$  и вязко-гипопластические параметры. Многочисленные прослойки тонких пылеватых грунтов можно заменить несколькими такими прослойками с тем же общим объемным содержанием (рис. 7). Если прослойки песка имеют боковое дренирование, необходимо учитывать величину эквивалентной водопроницаемости:

$$k_e \approx k(d_s/d_f)^2. \quad (18)$$

При этом требуется определять величины горизонтальной и вертикальной скорости воды  $v_{wh}$  и  $v_{wv}$ , тогда как  $v_{sh} = 0$  достаточно для сплошной среды при горизонтальной поверхности. Так как история формирования отложений грунта не всегда ясна до конца, необходима адаптация по данным натурных испытаний для значений  $e$ ,  $p_w$  и  $c_u$  (см. рис. 2, 3).

Состояние, отображенное на рис. 6 для периода времени в 5000 лет, принималось как начальное для расчета изменений, вызванных отсыпкой земляной дамбы (рис. 8). Отсыпка слоев грунта моделировалась приложением их собственного веса в реальные интервалы времени. Если принимать в расчет плоскую деформацию, необходимы двумерные аналоги выражений (13) – (16). Изменения позиции и состояния доступны для любого временного отрезка. Например, на рис. 8 показаны смеще-

ния, в частности, осадки  $u_2$  верхнего слоя и горизонтальные смещения  $u_1$  у края откоса через 15 дней после отсыпки.

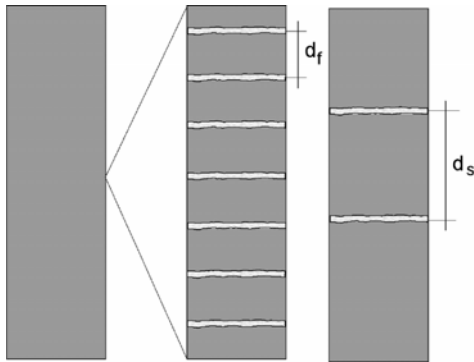


Рис. 7. Структура с множеством грунтовых прослоек и ее аналог

Впоследствии смещения нарастают при постоянной отсыпке. Происходит спонтанное нарастание скорости смещения и порового давления, т. е. достигается *разрушение при ползучести*. Процесс сопровождается локализацией сдвига приблизительно по поверхности скольжения. Такая ситуация не способна привести к очень тонкой зоне сдвига, так как градиент  $p_w - p_{wh}$  удерживает зону сдвига широкой. Это является физически обоснованным допущением.

Все это очень хорошо известно, но не подлежит достоверной оценке с помощью общедоступных методов (см., например, Hunter and Fell, 2003). Пластичность, характеризуемая величиной  $c_u$ , может в лучшем случае дать приблизительную картину разрушения, но не в состоянии дать информацию относительно аутогенного увеличения смещений. Осадки при ползучести неизбежно недооцениваются, если не принимать в расчет боковое расширение. В рамках вязко-гипопластичности мы не зависим от традиционных упрощений. При этом учитываются более высокая жесткость за счет вязкости, а также боковое расширение, не достигающее предельных состояний. Можно также предсказать эффект временной избыточной отсыпки. Этот метод сегодня скорее полностью забывается, чем принимается как само собой разумеющееся. Мы включили этот «стертый из памяти компонент» (ESOM) в уравнение состояния (Gudehus, 2003c). Потеря

устойчивости рассматривается как спонтанное повышение скоростей и порового давления по истечении предсказуемого промежутка времени. Методы предельной пластичности можно использовать только для грубой оценки.

Изменения состояния можно оценить по расчетным контурным графикам  $p_w - p_{wh}$  и  $OCR$ . Разрушение при ползучести характеризуется спонтанным повышением обоих параметров. Таким образом, при  $OCR$ , рассчитанном по средним показателям для интересующего нас участка, условие разрушения записывается как

$$d(OCR_{av})/dt > 0, \quad (19)$$

а знак  $<$  вместо  $>$  в (19) применяется для описания спонтанной стабилизации.

Поэтому при *методе наблюдений* последовательность действий может быть такой:

1. Определение начального состояния, как показано, например на рис. 6 и 8, причем допускаются также  $S_r < 1$  и неизбежный разброс данных.

2. Замена вертикальных дрен и песчаных колонн, подобно прослойкам типа «сэндвич» на рис. 7.

3. Расчет эволюций положения и состояния для вариантов проекта с различными периодами ожидания, включая временную избыточную отсыпку.

4. Выбор вариантов, не допускающих разрушения вследствие ползучести, а также чрезмерных долговременных смещений.

5. Выбор наиболее показательных параметров мониторинга.

6. Осуществление строительства и мониторинга, адаптация прогнозирования и дальнейших полевых операций.

### 3. ВЫЕМКА СЛАБЫХ ГЛИН С РАСКРЕПЛЕНИЕМ КОТЛОВАНА

На рис. 9 показана часть котлована с раскреплением стенок при проведении работ в слабых глинистых грунтах. Для наших расчетов параметры умеренно пластической однородной глины задаются по таблице. При давлении по поверхности  $p_b$  от соседних зданий генерируется начальное состояние, как

показано на рис. 6, но без начальных значений  $p_w - p_{wh}$ . Получаем  $OCR \approx 1,2$ , и

$$\sigma_h / \sigma'_v \approx \sqrt{OCR} (1 - \sin \varphi_c), \quad (20)$$

как известно по эмпирическим данным (Schmidt, 1966). Стена шпунта моделируется численным способом, изменения состояния в близлежащих грунтах при внедрении шпунта не рассматриваются. Модель включает опцию скольжения грунта по шпунтовой стенке.

Откопка котлована в три очереди моделируется снижением величины  $p'$  (и вследствие этого – жесткости и устойчивости) до нуля в реальные интервалы времени. Распорки устанавливаются и крепятся одновременно. Расчетное изменение напряжений в распорках и некоторые горизонтальные смещения показаны на рис. 9, на котором видны значительные аутогенные изменения.

Эти результаты были достоверно подтверждены наблюдениями в Чикаго (Wu and Berman, 1953). Верх стены отклонился назад, усилия в распорках предполагают трапецидальную эпюру распространения давления

грунта с результирующим значением, которое можно рассчитать, применяя адаптированную величину  $c_{it}$ , возрастающую после окончания откопки. Этот случай и сходные с ним были упомянуты Пеком (Peck, 1969), который использовал в своем методе наблюдений качественные или традиционные модели. Сегодня мы можем получить лучшие результаты с помощью вязко-гипопластичности:

1. Строится геологическая композиция и определяется начальное состояние грунта с использованием данных для  $w$ ,  $S_r$  и  $c_{it}$ , с допущением пространственного разброса этих величин.

2. Моделируются установка стен, откопка и раскрепление для разработки вариантов проекта (с их предварительной оценкой путем использования величины  $c_{it}$ ).

3. Выполняются прогнозы вариантов, чтобы избежать разрушения при ползучести с выпором дна и изгибом распорок, а также чрезмерных деформаций стен и окружающей застройки.

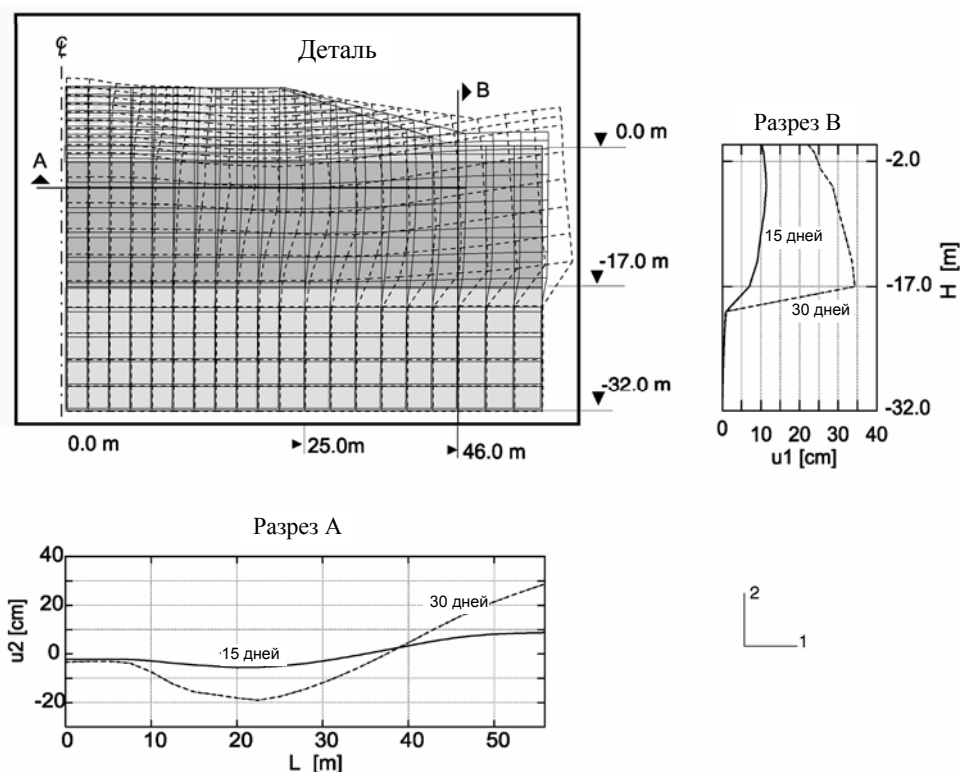


Рис. 8. Расчетные перемещения слабого грунта (см. рис. 6) во время и после отсыпки насыпи (дальняя часть сетки не показана)

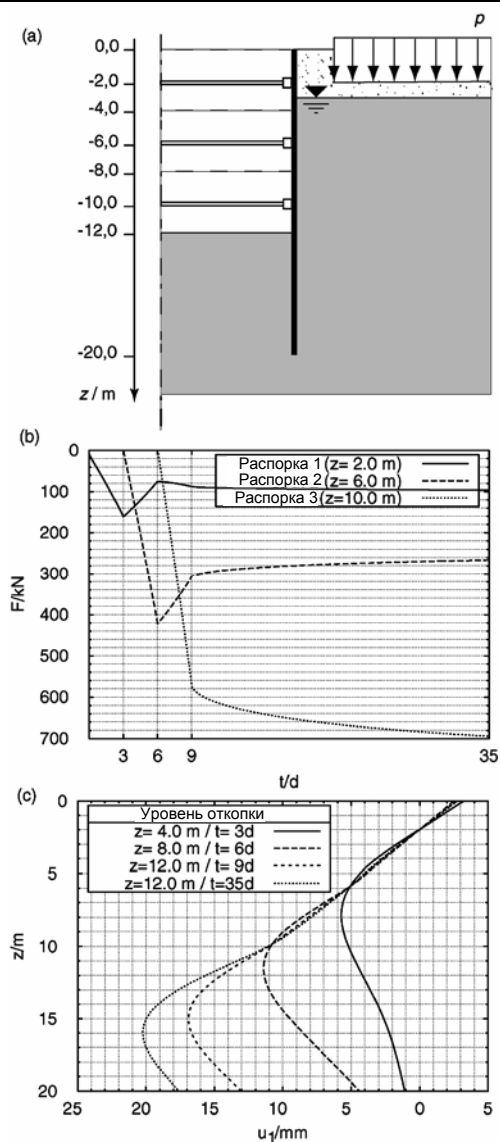


Рис. 9. Расчетная эволюция смещений и усилий для откопки слабого грунта с раскреплением шпунтового ограждения котлована

Шаги 4, 5 и 6 приложимы так же, как написано в разд. 2. Терцаги и Пек (Terzaghi and Peck, 1947) упоминают о критическом смещении стены примерно на 2,5 %, и об увеличении скорости ползучести за этим пределом. Выпор дна, как было описано Бьеррумом (Bjerrum, 1973), можно оценить таким же способом. Этот важный опыт сегодня подтвержден конечноэлементными испытаниями (см. рис. 3 и 5) и его можно включить в анализ по вязко-гипопластичности. Потерю устойчи-

вости можно оценить по выражению (20) и избежать ее путем моделирования контрмер, что невозможно с помощью традиционных моделей.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как показали численные конечноэлементные испытания, при использовании вязко-гипопластичности можно моделировать следующие аспекты реального поведения грунтов с мягкими частицами:

• скоростно-зависимое сжатие и одометрическую ползучесть (см. рис. 1);

• скоростно-зависимый недренаженный сдвиг и ползучесть (см. рис. 2, 3);

• сдвиг со свободным дренажем (рис. 4, 5).

Если коэффициент переуплотнения  $OCR = p_e / p'$  (при зависящем от соотношения напряжений эквивалентном давлении  $p_e$ ) не превышает 1,4, то доминируют скоростно-зависимость и ползучесть. В противном случае поведение материала становится гипопластичным. Необходимы пять ключевых параметров; некоторые типичные величины приведены в таблице.

При практическом применении предлагаемого метода необходимо сначала оценить инженерно-геологические условия участка и начальное состояние. Это можно более последовательно сделать с помощью обратного анализа по вязко-гипопластичности (см., например, рис. 6). Напластования грунтов с множеством грунтовых прослоек нужно упрощать (см. рис. 7). Плотный верхний слой с усадочными трещинами характеризуется более высокой расчетной величиной  $OCR$  и значительно большей водопроницаемостью  $k$ . Можно также реалистично спрогнозировать дальнейшую отсыпку котлована с раскрепленным шпунтом (см. рис. 8 и 9). Изменения положения и состояния могут быть предусмотрены в проекте и мониторинге. Спонтанная потеря устойчивости может быть замечена при наличии аутогенного понижения среднего  $OCR$  при условии отсутствия изменений в граничных районах. Возможность предотвращения негативных ситуаций становится очевидной.

Это позволяет использовать физически достоверную и уже обоснованную альтерна-

тивую методу наблюдений, использующему традиционные методики прогноза. Традиционные модели пластичности не в состоянии дать прогноз спонтанной потери устойчивости, а одних эмпирических альтернатив уже недостаточно. Переход к иным случаям очевиден при наличии:

зданий и сооружений на слабых грунтах, также с компенсационным нагнетанием раствора под давлением и подработкой грунта;

любой разновидности откопки под жидкой или сплошной защитой (например, проходка тоннеля щитовым способом);

глубоких траншей с дренажем, анкерами или раскреплением.

Грунты с твердыми частицами и вследствие этого ничтожно малой вязкостью можно описывать путем применения гипопластичности. Существуют многочисленные подтверждения адекватности данного подхода (Gudehus, 2003b; Karcher и др., 2003), включая задачи из области сильных землетрясений (Cudmani и др., 2003).

Предварительные расчеты по вязко- и гипопластичности показывают, необходима ли предлагаемая процедура с точки зрения безопасности или экономии средств. Нельзя обойтись без надежных геологических исследований, недостаточность которых не исправить ни мониторингом, ни обратным анализом. Водопроницаемость может быть достаточно неравномерной, например из-за наличия прослоек грунта или трещин, что требует упрощений и мониторинга. Безоговорочно следует признать, что инженерное суждение является важным, но требует надежной физической базы.

Теория вязко- и гипопластичности, как и любая другая, имеет определенные границы применимости. Так, для песков с полярными свойствами была учтена локализация сдвига (Nübel, 2003). Это еще предстоит сделать для глин, причем нужно учитывать эффекты рассеяния порового давления. Для изначально низкого  $OCR$  градиент избыточного порового давления влияет на нижнюю границу толщины зоны сдвига (см. рис. 8). При высоком начальном значении  $OCR$  градиент всасывания усиливает локализацию сдвига. Отрицательные значения  $p_w$  могут привести к кавитационным трещинам, например в момент

разрушения при усадке или ползучести. Такое образование трещин еще нужно смоделировать, так же как и развитие мостиков конденсации. Не насыщенные водой грунты рассматривались до сих пор только с точки зрения межзерновых пузырьков. Не рассматриваются макропоры, вызванные действием сил Ван-дер-Ваальса или капиллярных сил, таким образом, чрезвычайно просадочные грунты исключаются из поля зрения. Основные допущения гипопластичности, т. е. утверждения, что объемное содержание вещества и частичные напряжения определяют состояние, не могут объяснить закономерности поведения всех материалов, но с большой степенью достоверности могут быть применены к большинству из них.

В заключение автор хочет поблагодарить Ану-Болену Либрерос-Бертини за выполнение расчетов № 1–8, Томаса Мейера за расчет № 9. Дальнейшая информация может быть получена по электронной почте: Libreros-Bertini: ana.libreros@ibf.unikarlsruhe.de, Meier: thomas.maier@ibf.unikarlsruhe.de

### Список литературы

1. Bjerrum, L. (1973): Problems of Soil Mechanics and Construction on Soft Clays. State-of-the-Art Report, Proc. 8th Int. Conf. SMFE, Moscow, 1–53.
2. Cudmani, R., Osinov, V., Bühler, M. und Gudehus, G. (2003): A model for the evaluation of liquefaction susceptibility in layered soils due to earthquakes. *Proceed. 12<sup>th</sup> Panam. Conf. SMGE*, Cambridge/USA.
3. Gudehus, G. (1996): A comprehensive constitutive equation for granular materials; *Soils and Foundations*, Vol. 36, No. 1, p. 1–12.
4. Gudehus, G. (2003a): Prediction of deformations due to various geotechnical actions by means of hypoplasticity. *Proceed. XIII. Eur. Conf. Soil Mech. Geot. Eng. Prague*.
5. Gudehus, G. (2003b): How to control deformations of partly technogeneuous ground. *Proceed. XIII. Eur. Conf. Soil Mech. Geot. Eng. Prague*.
6. Gudehus, G. (2003c): A Visco-Hypoplastic Constitutive Relation for Soft Soil. Submitted to *Soils and Foundations*, Febr. 2002.

7. Herle, I. and Gudehus, G. (1999): Determination of parameters of a hypoplastic constitutive relation from properties of grain assemblies. *Mech. Cohes. Frict. Mater.*, Vol 4, 461–486.
8. Hvorslev, M. J. (1937): Über die Festigkeitseigenschaften gestörter bindiger Böden. *Ingeniörvid. Skrifter A*, Nr. 45, Danmarks Naturvid. Samfund, Dissertation, Kopenhagen.
9. Kolymbas, D. (1978): Ein nichtlineares viskoplastisches Stoffgesetz für Böden. *Veröff. Inst. Boden- u. Felsmech.* Univ. Karlsruhe, Heft 77.
10. Krieg, St. (2001): Viskoses Bodenverhalten von Mudden, Seeton und Klei. *Veröff. Inst. Boden- u. Felsmech.* Univ. Karlsruhe, Heft 150.
11. Leinenkugel, H.-J. (1976): Deformations- und Festigkeitsverhalten bindiger Erdstoffe. Experimentelle Ergebnisse und ihre physikalische Deutung. *Veröff. Inst. Boden- u. Felsmech.* Univ. Karlsruhe, Heft 66.
12. Niemunis, A. (1996): A visco-plastic model for clay and its FE-implementation. In *Resultats recents on mécanique des soils et des roches*. XI Colloque France-Polonais, Politechn. Gdanska, 151–162.
13. Niemunis, A. (2003): Extended hypoplastic models for soils. Politechnica Gdanska, *Monografia* Nr. 34, Gdansk/Poland.
14. Nübel, K. (2002): Experimental and numerical investigation of shear localization in granular matter. *Veröff. Inst. Boden- u. Felsmech.* Univ. Karlsruhe, Heft 159.
15. Peck, R. B. (1969): Advantages and Limitations of the observational method in Applied Soil Mechanics. *Géotechnique* 19, 2, 171–187.
16. Schofield, A. (2000): Re-appraisal of Terzaghi's Soil Mechanics, *Proc. XVth ICSMGE*, Vol. 4, p. 2473–2482.
17. Schmidt, B. (1966): Discussion of Earth Pressure at Rest Related to Stress History. *Canad. Geot. Journ.* 3, 239–242
18. Terzaghi, K. and Peck, R. (1947): *Soil Mechanics in Engineering Practice*. Wiley.
19. Wu, T.-H. and Berman, G. (1953): Earth pressure measurements in open cut: Contract D-8, Chicago subway. *Géotechnique* III, 248–258.