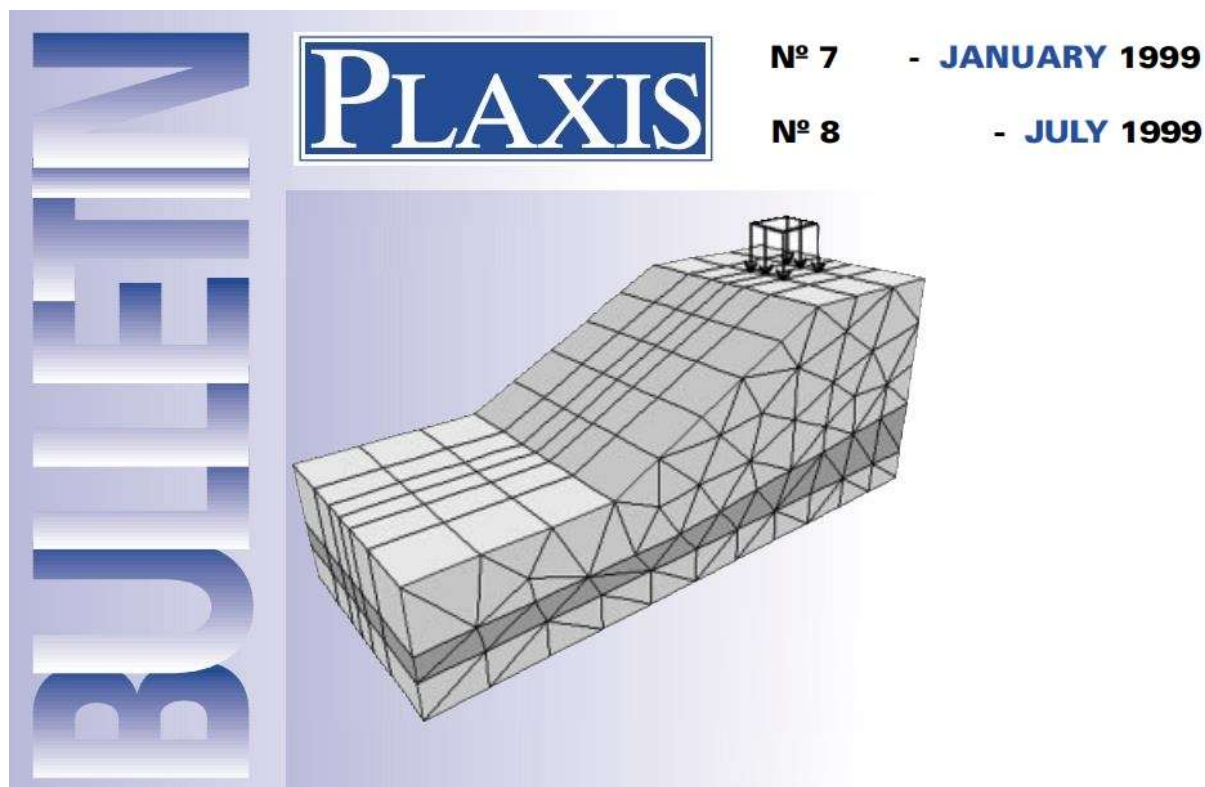


Заметки Питера Вермеера. О деформационных параметрах моделей грунта и коэффициенте переуплотнения



Одним из наиболее популярных конечноэлементных программных комплексов при решении геотехнических задач является PLAXIS. Научный основатель программы – известный голландский профессор Питер Вермеер. Мы продолжаем публиковать заметки из его колонки в Plaxis Bulletin – объединенном журнале компании PLAXIS BV и Ассоциации пользователей PLAXIS (NL). В первой и второй частях [1, 2] мы рассмотрели содержание «Колонок Вермеера» из пятого и шестого номеров Plaxis Bulletin (1998 г.). Теперь мы обратимся к содержанию колонок, предвещающих седьмой и восьмой номера [3, 4], которые вышли в год проведения Первого международного симпозиума PLAXIS (в 1999 г.).

Статья подготовлена при поддержке компании «НИИ-Информатика» – партнера журнала «ГеоИнфо».

АНАЛИТИЧЕСКАЯ СЛУЖБА «ГЕОИНФО»
info@geoinfo.ru

Деформационные параметры моделей грунта, получаемые при компрессионных испытаниях

Свою колонку в седьмом номере журнала Plaxis Bulletin [3] Питер Вермеер начал с того, что, перечитывая свою предыдущую заметку о ползучести грунта и компрессионных испытаниях в одометрах [1], он в очередной раз отметил большое количество отличающихся параметров, которые используют геотехники для описания поведения образцов при сжатии. Он предположил, что для этого есть две причины. Во-первых, мы имеем дело со сложным

материалом и для определения его механического поведения в виде формул требуется определенное количество параметров. Во-вторых, разные страны имеют разные геотехнические «традиции» и используют неодинаковые параметры грунта, особенно в области одномерного сжатия и нахождения параметров сжимаемости (в нашей стране отличия есть и в разных отраслях, например дорожники используют модуль осадки. – *Ред.*).

Далее Вермеер [3] рассматривает некоторые из этих параметров.

Для первичного сжатия в одомере в США в свое время предложили хорошо известный индекс компрессии C_c , основанный на представлении компрессионной кривой в осях «коэффициент пористости – десятичный логарифм давления».

Согласно положениям разработанной в Великобритании механики грунтов критических состояний (фундаментального раздела современной механики грунтов Critical State Soil Mechanics, или CSSM. – *Ред.*) для описания закона сжатия используется другой индекс компрессии, обозначаемый греческой буквой λ и определяемый по компрессионной кривой, представленной в осях «коэффициент пористости – натуральный логарифм давления».

Для модели слабого грунта с учетом ползучести (Soft Soil Creep – SSC) закон сжатия основан на учете деформации, а не коэффициента пористости (взаимно зависимых величин. – *Ред.*), поэтому командой PLAXIS был введен модифицированный коэффициент компрессии λ^* , который основан на представлении компрессионной кривой в осях «относительная деформация – натуральный логарифм давления» (такой подход удобнее по двум причинам: во-первых, относительная деформация – это первичная величина, а коэффициент пористости – производная; во-вторых, относительная деформация не зависит от начального коэффициента пористости и обработку нескольких испытаний одного грунта вести проще. – *Ред.*).

(На конференции PLAXIS в 2019 году было принято решение унифицировать приведенные выше термины в соответствии со статьей В.А. Васенина 2018 года «Исследование компрессионной сжимаемости глинистых отложений для инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга. Часть 1. Статистическая оценка параметров деформируемости при компрессионном сжатии» // *Геотехника*. 2018. Т. 10. № 5-6. С. 18 – 33. – *Ред.*).

Правила преобразования между указанными параметрами достаточно простые, но все еще существует значительный риск путаницы. Вермеер [3] приводит лишь самое необходимое с его точки зрения:

C_c – индекс компрессии;

$$\lambda = C_c / 2,3;$$

(1)

$$\lambda^* = \lambda / (1+e);$$

$$E_{ref}^{oed} = p^{ref} / \lambda^*.$$

Логарифмический закон для сжатия в одомере можно дифференцировать и получить для касательного модуля деформации следующую формулу:

$$E_{oed} = \sigma / \lambda^*.$$

(2)

Следовательно, модули жесткости пропорциональны приложенному вертикальному напряжению с коэффициентом пропорциональности λ^* . В геотехнической литературе используются различные символы для E_{oed} , например M или E_s , как в немецкой литературе.

В программе PLAXIS в качестве параметров модели для описания компрессионного сжатия используются и E_{oed}^{ref} (рис. 1), и λ^* . В модели слабого грунта, в том числе с учетом ползучести (Soft Soil и Soft Soil Creep – SS и SSC), применяется λ^* , а в модели упрочняющегося грунта (Hardening Soil – HS) используется E_{oed}^{ref} . Для ясности, как считает Вермеер [3], было бы гораздо лучше применять одинаковые входные параметры для обеих моделей, но старые традиции отмирают медленно.

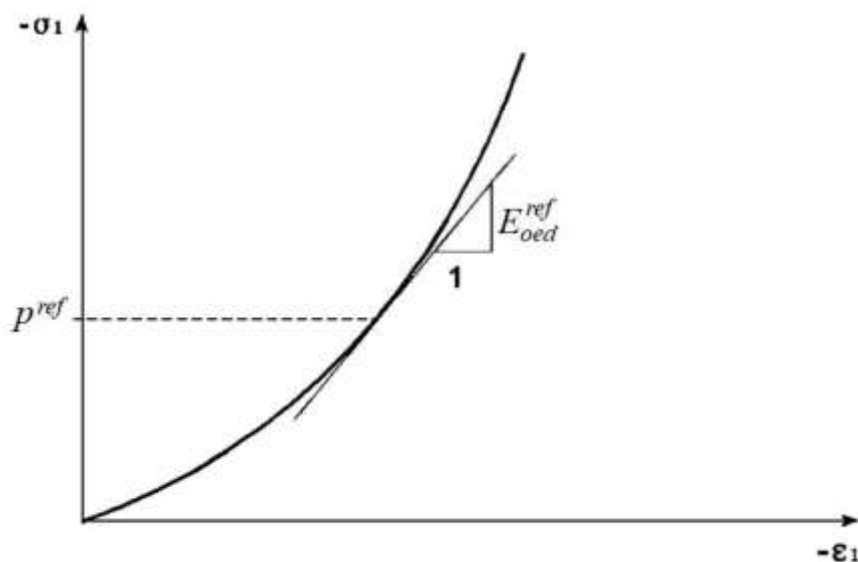


Рис. 1. Определение E_{oed}^{ref} по результатам испытания в одометре

Вермеер [3] напоминает, что использование таких параметров компрессионной кривой как C_c , λ или λ^* , относится к применению логарифмического закона уплотнения, который восходит к работе Терцаги 1925 года (Terzaghi, 1925) и, таким образом, глубоко укоренился в механике грунтов. Однако через десять с лишним лет его всеобщая применимость была опровергнута Оде (Ohde), который первым предложил степенную зависимость:

$$E_{oed} = \alpha \cdot \sigma^m. \quad (3)$$

Во время Второй мировой войны немецкие публикации Оде были частично утрачены, но степенной закон была вновь открыт Ямбу (Janbu). Его преимущество, по мнению Вермеера [3], заключается в том, что он точен для всех типов дисперсного грунта. Например, данные испытаний песков, как правило, хорошо описываются этим законом при использовании показателя степени $m \approx 0,5$, в то время как для слабых грунтов требуется $m \approx 1$.

Автор колонки [3] указывает, что степенная зависимость является гораздо более общей, чем логарифмический закон. При использовании $m=1$ и E_{oed}^{ref}/λ^* она полностью сводится к логарифмическому закону. Но это не означает, что вся модель упрочняющегося грунта (HS) станет идентичной модели слабого грунта с учетом ползучести (SSC). Фактически соответствие будет получено только для поведения при сжатии (модель HS описывает поведение при сдвиге лучше, поскольку сдвиговая жесткость задается как E_{50} – P_{ed}).

В конце своей колонки в седьмом номере журнала Plaxis Bulletin [3] автор отмечает следующее. Чтобы должным образом сравнивать и оценивать различные модели грунта, необходимо также учитывать реакции моделей при трехосных испытаниях в дренированных и недренированных условиях. И это могло бы быть интересной темой для отдельного выпуска.

О коэффициенте переуплотнения для слабых грунтов

В начале «Колонки Вермеера» в седьмом номере журнала *Plaxis Bulletin* [4] ее автор напоминает о том, что очень молодые отложения могли испытывать только напряжения от собственного веса, без дополнительных воздействий, связанных с процессами эрозии, денудации или коллоидного старения и ползучести. Такой грунт может быть действительно нормально консолидированным с коэффициентом переуплотнения (*overconsolidation ratio – OCR*), близким к единице.

Однако, по опыту Вермеера [4], такие ситуации для природных грунтов редки, и даже аллювиальные отложения до удаления вышележащих грунтов в большинстве своем характеризуются напряжениями, вызванными или предварительным уплотнением, или старением, или наличием структурной прочности. Но это может быть не так для техногенных отложений.

Современные слои техногенных отложений самых разных видов появляются, например, в результате горнодобывающей деятельности человека – от вскрышных пород и песчаных грунтов до материалов хвостохранилищ, которые образуются после обработки руды.

Первая проблема хвостохранилищ, с которой столкнулся Вермеер [4], касалась отработанного месторождения высотой 30 м на площади в несколько квадратных километров. На этой территории не было ничего похожего на корку (прочный грунт), поэтому по ней нельзя было ходить. Недренированное сопротивление сдвигу у поверхности было близко к нулю. Но оно увеличивалось с глубиной в соответствии с правилом $C_c=2/4$, что можно ожидать от грунта с $OCR \approx 1,0$. Параметры ила приведены в таблице (даны усредненные значения, так как грунт неоднородный).

Таблица. Параметры рассматриваемого грунта

Параметр	Приблизительное значение
Удельный вес в водонасыщенном состоянии γ , кН/м ²	17
Пористость n , %	60
Число пластичности I_p , %	40
Вертикальная проницаемость k_f , м/с	10^{-9}
Индекс компрессии C_c	0,6

Для обеспечения возможности отсыпать хвостохранилище необходимо было предусмотреть предварительную подготовку территории. Расчеты должны показать как величину осадки, так и время ее протекания (консолидации). Для получения исходных данных были выполнены компрессионные испытания и получена зависимость модуля деформации от действующих напряжений в следующем виде:

$$E_{oed} = \frac{d\sigma'}{d\varepsilon} = \frac{\sigma'}{\lambda^*}, \quad (4)$$

где

$$\lambda^* = \frac{C_c}{(1+e)\ln 10} \approx 0,1.$$

Такое линейное увеличение жесткости с ростом напряжения подразумевает хорошее соответствие закону логарифмической компрессии, что можно ожидать для слабых грунтов. Вермеер [4] рекомендует использовать модель упрочняющегося грунта (Hardening Soil – HS) для задач с экскавацией. Эта модель имеет преимущества по сравнению с моделью слабого грунта (Soft Soil – SS) в части описания разгрузки и повторного нагружения, но в этом случае у него не было выбора (отсутствовали результаты трехосных испытаний). Вместо параметра λ^* , используемого в качестве входного для модели SS, модель HS требует:

$$E_{oed}^{ref} = \frac{\sigma_{ref}}{\lambda^*} = 1000 \text{ кПа} \quad (5)$$

для опорного давления $\sigma_{ref} = 100 \text{ кПа}$.

Для модели HS также необходимо указать $m=1$ для описания сжатия логарифмическим законом.

В целом для отсыпки хвостохранилища на слабом основании (для решения задачи с нагружением) в деформации преобладает сжатие, которое хорошо описывается законом логарифмической компрессии.

Возникает вопрос, как указывает Вермеер [4], можно ли решить эту проблему с помощью простой модели Мора – Кулона (Mohr-Coulomb – MC). Действительно, можно выбрать постоянное значение модуля деформации (условно осредненное для всей толщи), чтобы конечная осадка соответствовала результату, полученному с использованием более продвинутых моделей (HS, SS). Однако такой подход позволит получить сопоставимые результаты только для конечного момента времени (после завершения консолидации). Комплексные геомеханические модели (HS, SS) позволяют получать любые промежуточные результаты в процессе моделирования поэтапной отсыпки (кроме того, модель Мора – Кулона завышает сопротивление сдвигу при использовании типа поведения Undrained A, что приведет к неверной оценке устойчивости. – Ped.), в частности осадки нижних слоев отсыпки будут больше, чем осадки верхних (рис. 2).

Чтобы получить такой результат с помощью модели MC, необходимо использовать разные модули деформации, соответствующие напряжениям для каждого этапа нагружения. Однако, заключает Вермеер [4], это, без сомнения, громоздкий способ действий.

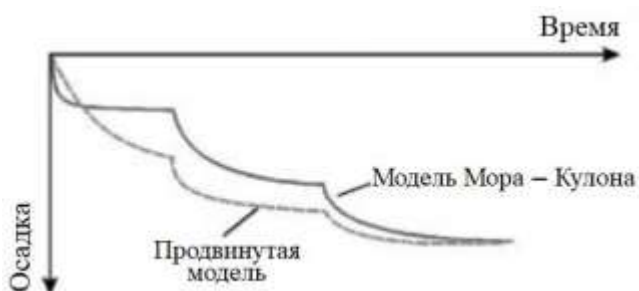


Рис. 2. Сравнение графиков «осадка – время», полученных с помощью модели Мора – Кулона и продвинутых моделей

В следующих частях мы продолжим публиковать заметки Питера Вермеера из других выпусков журнала *Plaxis Bulletin*.

Источники

1. Заметки Питера Вермеера. Как не игнорировать ползучесть грунтов в геотехнической практике? // Geoinfo.ru. 09.12.2019. URL: geoinfo.ru/product/analiticheskaya-sluzhba-geoinfo/zametki-pitera-vermeera-kak-ne-ignorirovat-polzuchest-gruntov-v-geotekhnicheskoy-praktike-41820.shtml.
2. Заметки Питера Вермеера. Когда нужен «дренированный» и «недренированный» анализ поведения грунтов? // Geoinfo.ru. 18.11.2019. URL: geoinfo.ru/product/analiticheskaya-sluzhba-geoinfo/zametki-pitera-vermeera-kogda-nuzhen-drenirovannyj-i-nedrenirovannyj-analiz-povedeniya-gruntov-41720.shtml.
3. *Vermeer P.* Column Vermeer // *Plaxis Bulletin*. 1999. № 7. URL: plaxis.com/content/uploads/2016/10/Plaxis-Bulletin-07.pdf.
4. *Vermeer P.* Column Vermeer // *Plaxis Bulletin*. 1999. № 8. URL: plaxis.com/content/uploads/2016/10/Plaxis-Bulletin-08.pdf.

Рис. на заставке: plaxis.com/content/uploads/2016/10/Plaxis-Bulletin-07.pdf;
plaxis.com/content/uploads/2016/10/Plaxis-Bulletin-08.pdf.