

Заметки Питера Вермеера. Как не игнорировать ползучесть грунтов в геотехнической практике?



По предложению партнера нашего электронного журнала «Геоинфо» – ООО «НИП-Информатика», являющегося официальным дистрибьютором программного комплекса PLAXIS в России, – мы публикуем заметки основателя этих продуктов Питера Вермеера из его колонки в Plaxis Bulletin – объединенном журнале компании PLAXIS BV и Ассоциации пользователей PLAXIS (NL).

В предыдущей части [1] мы дали общую информацию о программе PLAXIS и привели содержание «Колонки Вермеера» из пятого номера Plaxis Bulletin [3], вышедшего в 1998 году (как раз когда появилась версия 7 программы PLAXIS для Windows, а не для DOS). Теперь мы рассмотрим информацию из колонки, предваряющей шестой номер этого журнала за тот же год [4].

Аналитическая служба
info@geoinfo.ru

Питер Вермеер с сожалением отмечает, что на момент написания его заметки [4], казалось бы, всем известные явления ползучести грунтов обычно игнорировались в геотехнической практике. Действительно, для полутвердых грунтов скорости ползучести, как правило, очень малы, но ведь в сочетании с высокими напряжениями

сдвига они могут стать весьма значительными. Например, основной причиной многих оползней в горных районах является именно ползучесть полутвердых грунтов.

Для слабых же грунтов (особенно для органических глин и торфа) ползучесть значительна как при сдвиге, так и при сжатии.

Но, к сожалению, снова подчеркивает Вермеер, ползучести в геотехнической литературе по крайней мере до 1998 года уделялось мало внимания, за исключением разве что ранкиновской лекции Бьеррума 1967 года [2]. Большинство руководств даже не предлагали методов должной обработки ползучести при стандартных одномерных испытаниях на сжатие.

Стандартное испытание образца грунта в компрессионном приборе (одометре) – это испытание на многоступенчатое приложение нагрузки с периодами нагружения ровно по 24 часа. Далее Вермеер рассматривает в своей колонке [4] этот так называемый тест MSL-24 более подробно, чтобы показать, что на самом-то деле это испытание на ползучесть, а не на (первичную) консолидацию.

Для каждой стадии нагружения Δt мы получаем новое напряжение

$$\sigma_{new}^1 = \sigma_{old}^1 + \Delta\sigma \quad (1)$$

и новый коэффициент пористости

$$e_{new} = e_{old} + \Delta e. \quad (2)$$

Эта взаимосвязь хорошо описывается следующей классической формулой:

$$\Delta e = -C_r \log \frac{\sigma_{new}^1}{\sigma_{old}^1} - (C_c - C_r) \log \frac{p_{new}}{p_{old}} - C_\alpha \log \frac{\Delta t}{\tau}, \quad (3)$$

где:

C_c – индекс компрессии;

C_r – индекс рекомпрессии [5]

C_α – коэффициент ползучести при вторичном сжатии

P – напряжение предварительного уплотнения (давление предуплотнения)

τ – эталонное время, равное 24 ч, поэтому при таком выборе при испытаниях MSL-24 $\tau = \Delta t$, следовательно $\log(\Delta t/\tau) = 0$.

Таким образом, как отмечает Вермеер [4], могло бы показаться, что в этом стандартном одометрическом испытании ползучести нет. Действительно, приведенное выше уравнение (3) предполагает, что первичная консолидация длится 24 часа, но это абсолютно не так. Даже чрезвычайно водонепроницаемым образцам, испытываемым в одометре, требуется для консолидации менее 1 часа. Тогда все избыточные поровые давления равны нулю, а в течение остальных 23 часов суток наблюдается «чистая» ползучесть (см. рисунок). Эта ползучесть просто «содержится» во втором члене уравнения (3).

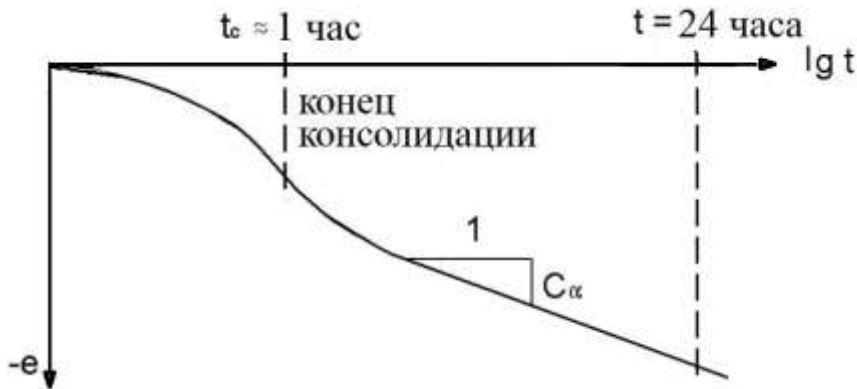


Рис. Результаты испытания MSL-24

Помимо того, что приведенная выше формула (3) вводит в заблуждение, еще один ее недостаток заключается в том, что ее нельзя использовать для общих переходных условий нагружения. Поэтому в качестве первого этапа исследовательского проекта по ползучести в Штутгартском университете Питер Вермеер со своими коллегами получил следующее дифференциальное уравнение:

$$\dot{e} = \dot{e}^e + \dot{e}^c = -C_r \frac{\dot{\sigma}^1}{\sigma^1} - \frac{C_\alpha}{\tau} \left(\frac{\sigma^1}{p} \right)^\alpha, \quad (4)$$

где:

точка используется для обозначения производной по времени;

$$\alpha = \frac{C_c - C_r}{C_\alpha};$$

$$p = p_{old} \exp\left(\frac{-\Delta e^c}{C_c - C_r}\right);$$

$$\Delta e^c = \int \dot{e}^c dt \text{ начиная с } t = t_{old} \text{ и } p = p_{old}.$$

Помимо малых упругих скоростей изменения объема

$$\dot{e}^e = de^e / dt \quad (5)$$

вся деформация считается результатом ползучести. Скорость ползучести полностью зависит от соотношения текущего напряжения и исходного напряжения перед консолидацией.

Скорости ползучести будут высокими для нормально консолидированных образцов, для которых

$$\sigma^1 = p \quad (6)$$

тогда как переуплотненные состояния с меньшими соотношениями σ^1/p практически не дают дальнейшей ползучести.

Новый дифференциальный закон выглядит отличающимся от классического закона уплотнения (компрессии, сжатия), но это обобщение, а не модификация. Преимущество новой формулы заключается в том, что она демонстрирует эффект «старения», как в свое время было представлено Бьеррумом [2], то есть увеличение со временем величины p из-за ползучести.

К сожалению, как пишет Вермеер, к моменту написания его заметки [4] идея «старения» в целом была забыта в геотехнике, в том числе при лабораторных испытаниях глин. Для примера он рассматривает обычное трехосное испытание глин в консолидированно-недренированных условиях (CU), когда образцы уплотняются под некоторым давлением, значительно превышающим исходное давление (давление до консолидации). Вместо тщательного многоэтапного нагружения, выполняемого при испытаниях в одометре, обычна практика нагружения в одну стадию до требуемого давления консолидации (уплотнения). Таким образом, вблизи границ дренирования эффективные напряжения практически мгновенно возрастают до желаемого уровня. Следовательно, граничные области быстро сжимаются, а затем для них наступает относительно длительный период ползучести. Избыточное поровое давление в первую очередь возникает в центре образца и может длиться несколько часов. В отличие от граничных областей, эта центральная точка имеет мало времени для ползучести, по крайней мере если часть испытания в недренированных условиях запускается сразу же после консолидации.

Будучи членом комитета по трехосным испытаниям, Вермеер обнаружил, что большинству лабораторий потребовалось бы 12 часов или, самое большее, 24 часа для стадии консолидации при тестировании. В таких случаях необходимо создавать неоднородные образцы, поскольку относительно центра границы успевают «состариться» и таким образом получить более высокую степень предварительной консолидации и более высокую плотность, чем центральная часть.

Расчеты с использованием новой модели ползучести слабых грунтов (Soft Soil Creep model) показывают, что обычная практика одноэтапного нагружения при трехосных испытаниях в консолидированно-недренированных условиях практически непригодна. Для получения однородных образцов требуется либо многоэтапное нагружение, либо значительный период ползучести между двумя стадиями испытания. К сожалению, как отмечает Вермеер, строительные нормы и правила предписывают очень короткие минимальные периоды консолидации при трехосных испытаниях, поскольку «старение» и другие явления, связанные с вязкостью, в геотехническом сообществе, как правило, игнорируются [4].

В следующей части мы продолжим публиковать заметки Питера Вермеера из следующего выпуска журнала Plaxis Bulletin.

Список литературы

1. Заметки Питера Вермеера в журнале Plaxis Bulletin. Часть 1. Когда нужен «дренированный» и «недренированный» анализ поведения грунтов? // Geoinfo.ru. 18.11.2019. URL: <https://www.geoinfo.ru/product/analiticheskaya-sluzhba-geoinfo/zametki-pitera-vermeera-kogda-nuzhen-drenirovannyj-i-nedrenirovannyj-analiz-povedeniya-gruntov-41720.shtml>

2. *Bjerrum L.* Engineering geology of Norwegian normally-consolidated marine clays as related to settlements of buildings // *Geotechnique*. 1967. Vol. 17. № 2. P. 83–118. URL: edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/191480/mod_resource/content/0/Bjerrum-Rankine%20lecture-Geotechnique-1967.pdf
3. *Vermeer P.* Column Vermeer // *Plaxis Bulletin*. 1998. № 5. URL: plaxis.com/content/uploads/2016/10/Plaxis-Bulletin-05.pdf.
4. *Vermeer P.* Column Vermeer // *Plaxis Bulletin*. 1998. № 6. URL: plaxis.com/content/uploads/2016/10/Plaxis-Bulletin-06.pdf.
5. Васенин В.А., 2018. Исследование компрессионной сжимаемости глинистых отложений для инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга. Часть 1. Статистическая оценка параметров деформируемости при компрессионном сжатии. Журнал «Геотехника», том X, № 5-6/2018

Заглавный рисунок: plaxis.com/content/uploads/2016/10/Plaxis-Bulletin-06.pdf.