

А. В. ШАПОВАЛ, В. В. КРЫСАН, В. Г. ШАПОВАЛ, Е. В. НЕСТЕРОВА
(Приднепровская государственная академия строительства
и архитектуры, Днепропетровск)

ПОЛЕВОЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ УПРУГИХ И РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГРУНТА

Предложена методика определения упругих (модуля упругости и коэффициента Пуассона) и реологических (коэффициента консолидации и параметров ядра ползучести) свойств водонасыщенных грунтов в ходе их штамповых испытаний. Ее основное отличие от известных методов Тейлора и Казагранде - учет масштабного фактора при определении свойств грунта.

Ключевые слова: модификация, старение, грунт, деформация, основание, ползучесть, сплайн-крипп

Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными практическими задачами

Известные методы определения коэффициента консолидации, вида и параметров ядра ползучести грунтовых оснований базируются на неверном с точки зрения физики процесса постулате о том, что после завершения процесса фильтрационной консолидации начинается процесс ползучести грунтового скелета или вторичная консолидация (на самом деле эти оба процесса протекают одновременно, однако имеют различную скорость) [1]. Кроме того, использование полученных таким образом данных для выполнения практических расчетов сопряжено известными трудностями, поскольку реальные грунтовые основания являются системами с распределенными параметрами, в которых «завершение фильтрационной консолидации» происходит в различное время.

В этой связи проблема разработки методов определения реологических и упругих свойств грунтовых оснований при учете одновременно протекающих процессов фильтрационной консолидации и ползучести грунтового скелета является актуальной и нуждается в своём решении

Анализ последних исследований и публикаций, в которых положено начало решению данной проблемы

Попытка решения очерченной проблемы предпринималась авторами работ [2, 3, 4]. Изложенные в этих работах методики базируются на материалах анализа результатов штамповых испытаний. При этом недостатками работы [2] являются:

- допущение о том, что кривые ползучести грунтового скелета не зависят от величины давления на основание;
- предположение о том, что зависимость «осадка штампа – время» в процессе фильтрационной консолидации описывается экспоненциальной зависимостью, содержащей одну экспоненту (это противоречит результатам [4, 5]).

Постановка задачи исследований

Задача исследований была сформулирована так. Имеются табличные данные штамповых испытаний водонасыщенного грунта постоянными во времени нагрузками (точнее зависимость «осадка – время»). Известны размеры штампа и величина среднего давления под его подошвой. Требуется определить такие характеристики основания:

- модуль упругости грунта E ;
- коэффициент Пуассона грунтового скелета ν ;
- коэффициент консолидации при компрессии c_k ;
- выявить вид ядра ползучести;
- определить его параметры.

Цель работы – определение упругих и реологических характеристик водонасыщенного грунта и его коэффициента консолидации на основе анализа его штамповых испытаний.

Изложение основного материала исследования

Согласно [5, 6] зависимость осадки находящегося в условиях компрессионного сжатия водонасыщенного грунтового образца от времени имеет вид:

$$S(t) = S^\phi(t) + \int_0^t K(t, \tau) \cdot S^\phi(\tau) \cdot d\tau, \quad (1)$$

$$S^\phi(t) = S_\infty \cdot \left[a_1 + a_2 \cdot \exp\left(-k \cdot \frac{c_k \cdot t}{b^2}\right) + a_3 \cdot \exp\left(-2 \cdot k \cdot \frac{c_k \cdot t}{b^2}\right) \right]$$

где $S_\infty = \omega \cdot (1 - \nu^2) \cdot \frac{p \cdot b}{E}$; a_1, a_2, a_3 и k – константы, которые следует определять в соответствии с рекомендациями [5]; c_k – коэффициент консолидации основания при компрессии; b – ширина квадратного или диаметр круглого штампа; p – среднее давление под его подошвой; ω – коэффициент формы штампа [4, 5]; E – модуль упругости основания; ν – его коэффициент Пуассона.

Предлагаемая нами методика имеет два варианта.

В первом случае коэффициент Пуассона предполагается известным.

Его следует принимать равным:

- 0,3 – для песков и супесей;
- 0,35 – для суглинков;
- 0,42 – для глин.

Во втором случае коэффициент Пуассона подлежит определению.

В первом случае определение искомых характеристик следует выполнять в такой последовательности.

1. Вначале табличную зависимость « $S_i - t_i$ » следует аппроксимировать с использованием методики [1, 3] функцией вида

$$S(t) = A \cdot [1 - \exp(-B \cdot t)], \quad (2)$$

где A и B – константы аппроксимации.

2. После этого с использованием формулы

$$c_{k,0} = B \cdot \frac{b^2}{k} \quad (3)$$

необходимо найти значение коэффициента консолидации в первом приближении.

3. Далее табличную зависимость « $S_i - t_i$ » следует аппроксимировать с использованием методики [1, 3] функцией вида

$$S(t) = C \cdot \int_0^t K(t, \tau) \cdot d\tau, \quad (4)$$

где C – константа аппроксимации, а $K(t, \tau)$ – ядро ползучести грунтового скелета.

В случае экспоненциального ядра ползучести $K(t, \tau) = \delta \cdot \exp[-\delta_{1,0} \cdot (t - \tau)]$ равенство (4) имеет вид:

$$S(t) = C \cdot [1 - \exp(-\delta_{1,0} \cdot t)]. \quad (5)$$

В случае степенного ядра ползучести $K(t, \tau) = \delta \cdot (t - \tau)^{\delta_{1,0}}$ равенство (4) имеет вид

$$S(t) = C \cdot (t)^{1 - \delta_{1,0}}, \quad (6)$$

В случае логарифмического ядра ползучести $K(t, \tau) = \frac{\delta}{(t - \tau) + \delta_{1,0}}$ равенство (4) имеет вид:

$$S(t) = C \cdot \ln(\delta_{1,0} + t), \quad (7)$$

В формулах (5), (6), (7) C и $\delta_{1,0}$ – подлежащие определению константы аппроксимации.

4. Затем следует определить область изменения искомых параметров c_k и δ_1 при сканировании их значений. Опыт определения параметров ядер ползучести и коэффициента консолидации позволил нам сделать вывод о том, что диапазон их изменения

$$\left. \begin{aligned} c_k &\in (0, 1 \cdot c_{k,0} \dots 10 \cdot c_{k,0}) \\ \delta_1 &\in (0, 1 \cdot \delta_{1,0} \dots 10 \cdot \delta_{1,0}) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

позволяет получить вполне приемлемые для практических расчетов результаты.

5. После этого с использованием известных значений коэффициента консолидации c_k и параметра ползучести δ_1 (см. (4)) следует вычислить входящие в (1) интегралы. Для принятых нами ранее обозначений равенство (1) примет вид:

$$S(t) = A \cdot f_1(t) + B \cdot f_2(t), \quad (9)$$

где A и B – подлежащие определению константы аппроксимации. Здесь

$$f_1(t) = a_1 + a_2 \cdot \exp\left(-k \cdot \frac{c_k \cdot t}{b^2}\right) + a_3 \cdot \exp\left(-2 \cdot k \cdot \frac{c_k \cdot t}{b^2}\right)$$

и

$$f_2(t) = \int_0^t f_1(\tau) \cdot K(t, \tau) \cdot d\tau.$$

6. Затем необходимо составить переопределенную систему линейных алгебраических уравнений вида

$$\left. \begin{aligned} A \cdot f_1(t_1) + B \cdot f_2(t_1) &= S_1; \\ A \cdot f_1(t_2) + B \cdot f_2(t_2) &= S_2; \\ &\dots\dots\dots \\ A \cdot f_1(t_n) + B \cdot f_2(t_n) &= S_n. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

и на интервале $c_k \in (0, 1 \cdot c_{k,0} \dots 10 \cdot c_{k,0})$ и $\delta_1 \in (0, 1 \cdot \delta_{1,0} \dots 10 \cdot \delta_{1,0})$ методом прямого сканирования найти такие значения коэффициентов консолидации c_k и параметра ползучести δ_1 , при которых выполняется условие

$$F = \sqrt{\frac{1}{n-2} \cdot \sum_{i=1}^n (A \cdot f_1(t_i) + B \cdot [f_2(t_i) + f_3(t_i)] - S_i)^2} \rightarrow \min_{c_k, \delta_1} \quad (11)$$

Систему уравнений (10) следует решать методом наименьших квадратов.

Здесь n – размер выборки значений S_i и t_i . На этом этапе поиска определяются коэффициент консолидации c_k и параметр ползучести δ_1 , при которых обеспечивается минимум функционала (11).

7. Дальнейшее определение упругих и реологических характеристик грунта следует выполнять в такой последовательности. С использованием известного коэффициента консолидации c_k и параметра ползучести δ_1 следует представить (9) в виде (10) и с использованием изложенной в [6] методики определить константы A и B . При этом следует использовать вторую задачу определения нормативного и расчетного значений.

Далее по формулам

$$\begin{aligned} S_\infty &= \omega \cdot (1 - \nu^2) \cdot \frac{p \cdot b}{E} \\ \delta &= \frac{B}{A} \quad \text{и} \quad E = \omega \cdot (1 - \nu^2) \cdot \frac{p \cdot b}{A} \end{aligned} \quad (12)$$

следует определить параметр ползучести δ и модуль общей деформации E .

Таким образом, с использованием предлагаемой нами методики анализа результатов компрессионных испытаний водонасыщенного грунта мы находим такие характеристики:

- коэффициент консолидации грунта c_k ;
- параметры ядра ползучести δ и δ_1 ;
- модуль упругости E .

При этом коэффициент Пуассона грунтового скелета ν является заранее известным.

Второй вариант методики почти полностью совпадает с изложенным выше. Различие заключается в том, что в данном случае неиз-

вестным является также и коэффициент Пуассона ν . В этой связи вместо (11) следует минимизировать функционал вида

$$F = \sqrt{\frac{1}{n-3} \cdot \sum_{i=1}^n (A \cdot f_1(t_i) + B \cdot [f_2(t_i) + f_3(t_i)] - S_i)^2} \rightarrow \min_{\nu, c_k, \delta_1} \quad (13)$$

при выполнении ограничения $0 \leq \nu \leq 0,5$.

Выводы

Изложенные в настоящей работе материалы исследований позволили нам сделать такие выводы.

1. Разработана методика определения деформационных и реологических характеристик грунтовых образцов, основанные на анализе результатов их штамповых испытаний.

2. Первый ее вариант основан на допущении о том, что значение коэффициента Пуассона грунта известно заранее.

3. Второй вариант методики помимо модуля упругости, параметров ядра ползучести грунтового скелета и коэффициента консолидации грунта определять также и коэффициент Пуассона грунтового скелета.

4. В отличие от общепринятых известных методик определения перечисленных материальных констант, изложенная в настоящей статье методика позволяет полностью автоматизировать процесс их нахождения.

5. Область применения предлагаемых нами методик определения материальных констант оснований – полностью водонасыщенные основания, обладающие свойством ползучести.

6. Материальные константы, которые позволяют определять предложенные нами методики, полностью соответствуют модели упругого изотропного водонасыщенного основания, грунтовой скелет которого обладает свойством ползучести.

7. Точность определения материальных констант грунтовых оснований с использованием изложенных в настоящей работе методик можно существенно повысить в ходе анализа испытаний штампов с различной площадью подошвы.

В целом, изложенные в настоящей работе материалы исследований позволили нам сделать вывод о перспективности определения упругих и реологических свойств полностью водонасыщенного обладающего свойством ползучести грунта с использованием предложенных нами методик.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Зарецкий, Ю. К. Теория консолидации грунтов [Текст] / Ю. К. Зарецкий. – М.: Наука. 1967 – 270 с.
2. Зарецкий, Ю. К. Практическая оценка консолидации глинистого грунта и ее приложение [Текст] / Ю. К. Зарецкий и др. // Известия вузов. Строительство и архитектура. – М.: 1983. – № 3. – С. 23-27.
3. Шаповал, В. Г. Ускоренное определение реологических свойств водонасыщенных глинистых оснований [Текст]: дисс. ... канд. техн. наук. – Д.: 1984. – 179 с.
4. Вялов, С. С. Реологические основы механики грунтов [Текст] / С. С. Вялов. – М.: Высш. шк., 1978. – 447 с.
5. Шаповал, А. В. Теория взаимосвязанной фильтрационной консолидации [Текст]: монография / А. В. Шаповал, В. Г. Шаповал. – Д.: Пороги, 2009. – 311 с.
6. Шаповал, В. Г. Механика грунтов [Текст]: учебник / В. Г. Шаповал и др. – Д.: Пороги, 2010 – 168 с.

Поступила в редколлегию 19.06.2012.

Принята к печати 03.07.2012.

А. В. ШАПОВАЛ, В. В. КРИСАН, Є. В. ШАПОВАЛ, О. В. НЕСТЕРОВА (Придніпровська держана академія будівництва та архітектури, Дніпропетровськ)

ПОЛЬОВИЙ МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ПРУЖНИХ ТА РЕОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ҐРУНТУ

Запропоновано методику визначення пружних (модуля пружності і коефіцієнта Пуассона) та реологічних (коефіцієнта консолідації і параметрів ядра повзучості) властивостей водонасичених ґрунтів в ході їх штапових випробувань. Її основна відмінність від відомих методів Тейлора та Казагранде - врахування масштабного фактору при визначенні властивостей ґрунту.

Ключові слова: модифікація, старіння, ґрунт, деформація, основа, повзучість, сплайн-крипп

A. V. SHAPOVAL, V. V. KRYSAN, V. G. SHAPOVAL, H. V. NESTEROVA (Prydniprovsk'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture, Dniepropetrovsk)

FIELD METHOD FOR DETERMINING THE ELASTIC AND RHEOLOGICAL PROPERTIES OF SOIL

Proposed method of determining the elastic (Young's modulus and Poisson's ratio) and reological (coefficient of consolidation) properties of saturated soils during their test compression. Its main difference from the known methods of Taylor and Casagrande - Full automation of the process of determining the properties of the soil.

Keywords: modification, aging, ground deformation, ground, creep, spline-creep