

ВЕРИФИКАЦИЯ РАСЧЕТОВ ФИЛЬТРАЦИОННОЙ КОНСОЛИДАЦИИ В ГЕОТЕХНИЧЕСКИХ ПРОГРАММАХ

Инженер Д.Е. Ерченко,
канд. г.-м. наук Е.В. Федоренко
(«МИАКОМ СПб»)

Контакт. информация: evgeniy@miakom.ru

В статье приводится сопоставление аналитических и численных расчетов фильтрационной консолидации в специальных геотехнических программах GEO5 Осадка, Settle3D и Plaxis 2D с известным аналитическим решением Н.А. Цытовича. Если в инженерных программах, реализующих алгоритмы автоматизации аналитических расчетов, сопоставление выполняется прямым способом, то в программах численного моделирования необходимо правильно задать исходные условия и настроить все влияющие параметры для корректного сопоставления.

Ключевые слова: геотехника, численное моделирование, метод конечных элементов (МКЭ), программа Plaxis, консолидация, теория фильтрационной консолидации.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных задач в области транспортной геотехники является определение скорости протекания осадки во времени. Наиболее распространенной теорией, позволяющей решать данную задачу, является теория фильтрационной консолидации грунтов.

Для сравнения результатов аналитического решения одномерной задачи фильтрационной консолидации полностью водонасыщенного слоя грунта при уплотнении его равномерно распределенной нагрузкой в условиях односторонней фильтрации воды, предложенного Н.А. Цытовичем [1], с решениями, получаемыми различными программными комплексами (GEO5, Settle 3D, Plaxis), выполнен расчет задачи, данной в [1] в качестве примера.

1. Пример аналитического расчета времени консолидации

Исходные данные:

- давление на грунт – 2 кгс/см^2 или 200 кПа;
- толщина слоя – 5 м;

- коэффициент относительной сжимаемости (деформация на ед. давления) – $0,01 \text{ см}^2/\text{кгс}$ ($1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{кН}$) или $E_{\text{оed}} = 10000 \text{ кПа}$ и $E_k = 7429 \text{ кПа}$ (при $\nu = 0,3$);
- коэффициент фильтрации – $\kappa_{\text{ф}} = 1 \cdot 10^{-8} \text{ см/сек} = 8,64 \cdot 10^{-6} \text{ м/сут.}$

Аналитический расчет

1) Коэффициент консолидации:

$$C_v = \frac{\kappa_{\text{ф}} \cdot E_{\text{оed}}}{\gamma_w} = \frac{8,64 \cdot 10^{-6} \cdot 10000}{10} = 0,00864 \text{ м}^2/\text{сут.}$$

2) Конечная осадка:

$$S = \frac{P_0 \cdot H_a}{E_{\text{оed}}} = \frac{200 \cdot 5}{10000} = 0,1 \text{ м.}$$

3) Расчет осадки во времени по аналитическим зависимостям [1]:

$$N = \frac{\pi^2 c_v}{4h^2} t = \frac{\pi^2 \cdot 30000}{4 \cdot 500^2} \approx 0,3t;$$

- осадка через 1 год:

$$\begin{aligned} S_{1\text{год}} &= hm_{\nu}P \left[1 - \frac{8}{\pi^2} \left(e^{-N} + \frac{1}{9} e^{-9N} \right) \right] \\ &= 500 \cdot 0,01 \cdot 2,0 \left[1 - \frac{8}{\pi^2} \left(e^{-0,3 \cdot 1} + \frac{1}{9} e^{-9 \cdot 0,3 \cdot 1} \right) \right] = 3,9 \text{ см.} \end{aligned}$$

- осадка через 2 года

$$S_{1\text{год}} = 500 \cdot 0,01 \cdot 2,0 \left[1 - \frac{8}{\pi^2} \left(e^{-0,3 \cdot 2} + \frac{1}{9} e^{-9 \cdot 0,3 \cdot 2} \right) \right] = 5,55 \text{ см.}$$

- 90% консолидации:

для $U = 0,9$ при прямоугольной эпюре уплотняющих давлений (условия компрессионного сжатия) $N = 2,09$:

$$t_{90\%} = \frac{4h^2}{\pi^2 c_v} N = \frac{4 \cdot 500^2}{\pi^2 \cdot 30000} \cdot 2,09 = 7,06 \text{ года (2576 дней).}$$

2. Расчет в программе GEO5 Осадка (аналитический расчет)

Для исключения влияния граничных условий и создания компрессионного сжатия ширина расчетной схемы должна составлять не менее 100 м. На глубине 5 м необходимо задать несжимаемое основание (рис. 1, 2).

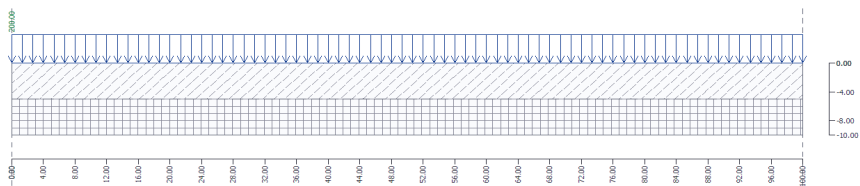


Рис. 1. Расчетная схема в программе GEO5 Осадка

В параметрах грунта задается $E_{\text{оed}}$ и коэффициент фильтрации грунта $K_{\text{ф}}$. Программа имеет достаточно простой интерфейс и не отличается сложностью и наличием большого количества настроек расчета.

Рис. 2. Исходные данные для GEO5 Осадка

Результат решения в графическом виде представлен на **рис. 3**.

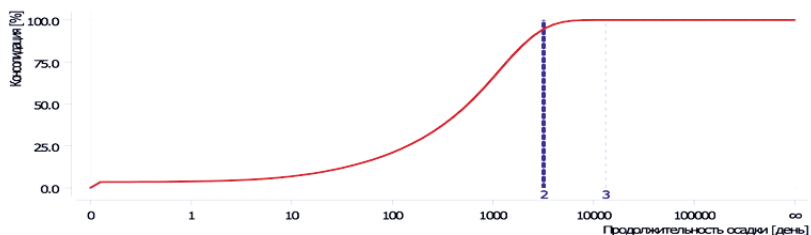


Рис. 3. Кривая консолидации в полулогарифмической шкале (GEO5 Осадка)

3. Расчет в программе Settle3D

Программа Settle3D позволяет (рис. 4):

- выполнять расчет нескольких составляющих осадки:
 - условно-мгновенную осадку (по недренированному модулю деформации E_u , кПа) – первоначальная осадка грунта после приложения нагрузки, но до начала процесса консолидации;
 - консолидационную осадку (по коэффициенту относительной сжимаемости m_v , м²/кН или коэффициенту компрессии C_c);
 - вторичную консолидацию (коэффициент ползучести C_a) – осадка за счет ползучести грунта;
- учесть нелинейную консолидацию (аналог модели SoftSoil);
- учесть вертикальные дренирующие элементы (ленточные дрены, песчаные сваи);
- выполнить расчет осадки от пригруза, а также решение обратной задачи – определение высоты пригруза для достижения требуемой величины осадки;
- а также решать другие задачи при помощи различных параметров и возможностей.

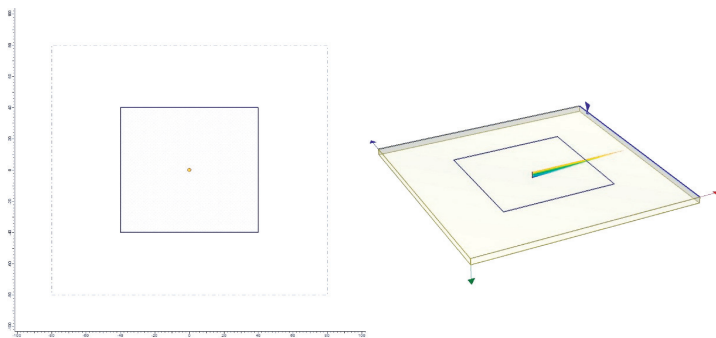


Рис. 4. Расчетная схема в программе Settle3D

Величина сжимаемой толщи ограничивается заданной глубиной скважины (в данном случае 5 м).

Программу можно отнести к профессиональным, охватывающим большое количество различных теорий расчета (включая эмпирические зависимости) и, соответственно, различные настройки, которые могут влиять на результаты расчетов. Отметим, что имеется большой инструментарий для построения разнообразных графиков зависимостей параметров, используемых при расчете (по времени и по глубине): осадка, напряжения, степень консолидации, коэффициент пористости и др.

На **рис. 5, 6** приведены графические результаты расчета.

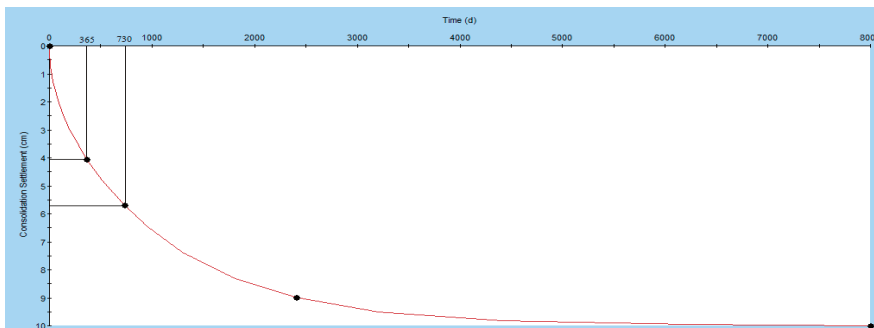


Рис. 5. График зависимости осадки от времени (Settle3D)

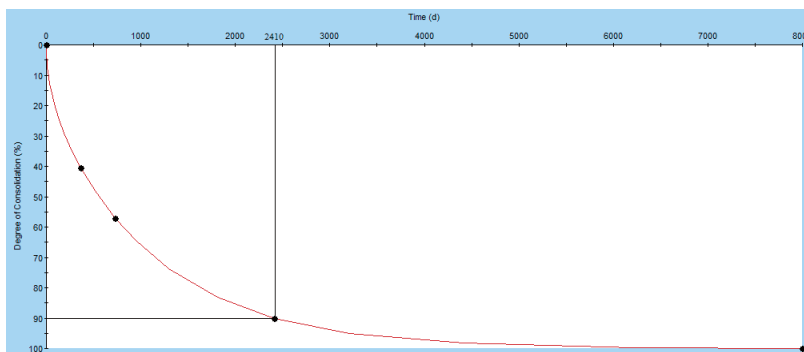


Рис. 6. График зависимости степени консолидации от времени (Settle3D)

4. Расчет в программе Plaxis (численное моделирование)

В качестве модели выбрана линейно-упругая модель (LE), которая отражает поведение при сжатии при постоянном модуле деформации и не зависит от прочностных характеристик, которые в примере не используются. Таким образом, сопоставление расчетов будет корректным.

Параметры модели заданы по приведенным выше значениям и представлены на **рис. 7**. Для линейно-зависимой по деформациям модели LE при заданном типе поведения Undrained A во вкладке Parameters появляется значение коэффициента консолидации, определенного по формулам, приведенным выше. Отметим, что в нелинейно-зависимых

моделях (SS, SSC, HS и пр.) этого значения не будет, поскольку коэффициент консолидации не будет постоянным.

Обязательным условием расчета является задание недренированного поведения по типу Undrained A, который позволяет формировать избыточное поровое давление при режиме расчета Plastic.

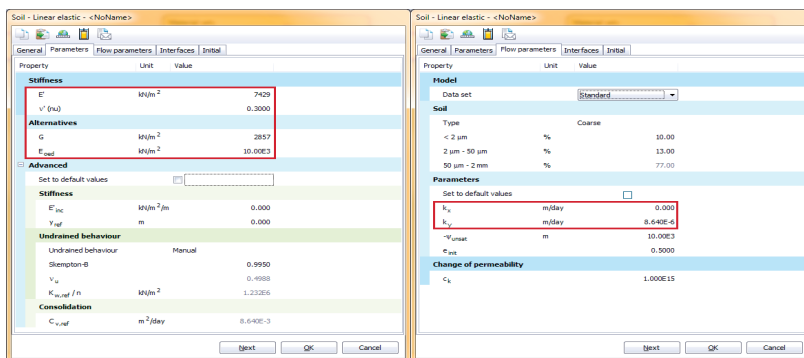


Рис. 7. Исходные данные для Plaxis

Расчет в программе Plaxis произведен в следующей последовательности:

1. Определена конечная осадка для проверки правильности работы расчетной схемы. Для этого выполнен расчет дренированного нагружения (с включенной опцией *Ignor undrained behavior*). Получено значение $U_y = 0,1$ м.
2. Для более корректного сравнения с примером необходимо исключить влияние грунтовых вод, т.е. выполнить расчет без гидростатического давления, поскольку в примере рассмотрено только влияние избыточного порового давления. Для этого при задании гидравлических условий каждой фазы расчета необходимо установить уровень грунтовых вод в нижней части (или за пределами) схемы, что бы исключить его влияние на расчет. Отметим, что режим расчета *Consolidation* не зависит от наличия уровня грунтовых вод, поскольку формирует избыточное поровое давление в зависимости от приложенной нагрузки. Кроме того, необходимо исключить влияние бытовых напряжений, для чего следует задать удельный вес грунта равным нулю.
3. Непосредственно расчет процесса консолидации может быть выполнен несколькими способами:

- **первый способ**

- приложение давления производится в режиме расчета *Plastic*, что исключает начало процесса консолидации в процессе нагружения, а избыточное поровое давление имеет равномерное распределение по образцу;
- далее задается фаза расчета с типом *Consolidation* и соответствующим временем ее продолжительности (1 год, 2 года);

- **второй способ**

- нагрузка прикладывается в течение фазы с типом *Consolidation* за время один год и два года каждый раз начиная от нулевой стадии.

Данные способы расчета показывают разные результаты, при втором способе расчета влияние на величину деформации за заданное время оказывают параметр Скемптона и параметр *First time step*, значения которых должны быть определены пользователем в зависимости от грунтов и требуемой точности расчета и не могут быть корректно выбраны для данного верификационного примера, поскольку необходимые данные отсутствуют. Таким образом, не имея достаточной исходной информации, но варьируя этими параметрами, можно добиться результатов, очень близких к полученным в верификационном примере.

По результатам расчетов строится график процесса консолидации (**рис. 8**). Время достижения 90% консолидации составляет 2570 суток.

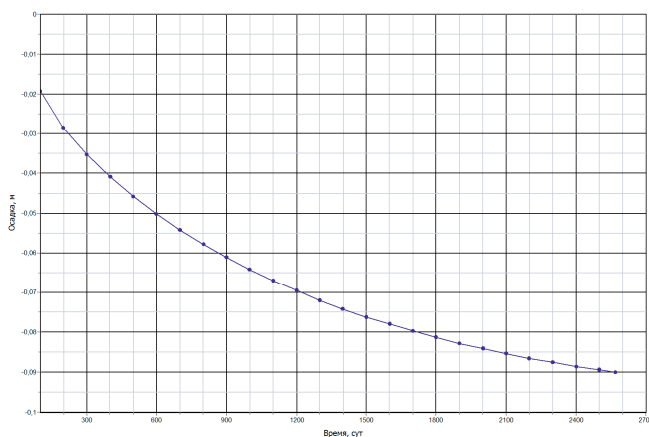


Рис. 8. График консолидации в программе *Plaxis*

В программе имеется встроенный вариант расчета времени консолидации до достижения 90% (*Degree of consolidation*), однако этот вариант расчета дает значение 4033 дня, что значительно превышает все

полученные ранее. Этот вариант расчета определяет 90% консолидации не по величине осадки, а по величине снижения порового давления, что в реальных расчетных схемах (насыпи на слабых грунтах) будет давать отличающиеся результаты, поскольку программа определяет рассеивание порового давления по всей схеме. Для корректного определения времени достижения 90% консолидации рекомендуется произвести расчет снижения избыточного порового давления до 1 кПа, после чего по графику консолидации определить время, при котором осадка составит 90% от конечной.

5. Анализ результатов

Результаты расчетов различными методами сведены в **табл. 1**.

Таблица 1

Результаты расчетов различными методами

<i>Тип расчета</i>	<i>Осадка, см</i>		<i>Время консолидации (90%), сут.</i>
	<i>1 год</i>	<i>2 года</i>	
<i>По Н. А. Цытовичу</i>	3,9	5,55	2576
<i>Программа GEO5 Осадка</i>	3,99	5,58	2920
<i>Программа Settlement 3D</i>	4,0	5,6	2410
<i>Программа Plaxis</i>	3,8	5,47	2570

В примере использован постоянный по глубине модуль деформации, что справедливо только для малосжимаемых грунтов и при изменении давления в пределах 100-300 кПа (по Н. А. Цытовичу). Однако значения модуля деформации слабых водонасыщенных глинистых грунтов не являются постоянной величиной и существенно зависят от напряженного состояния [2]. Нелинейность при сжатии грунта влияет на характер протекания осадки во времени. На **рис. 9** показаны графики осадки при линейной и нелинейной зависимости деформаций от напря-

жений, по которым видно, что при одинаковой конечной осадке время достижения 90% степени консолидации различно.

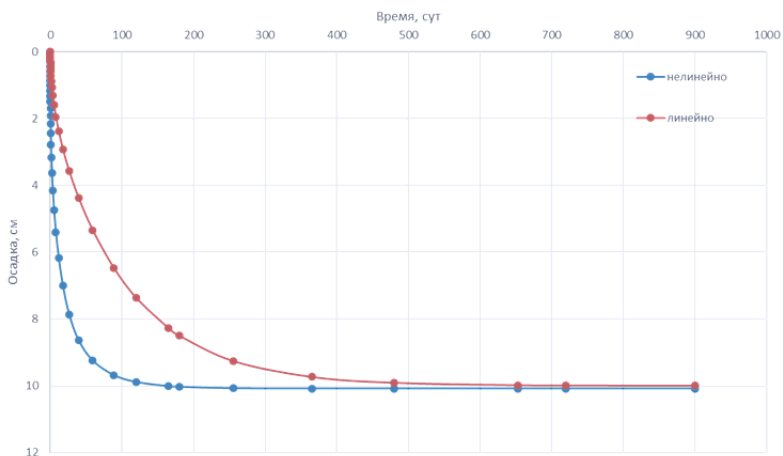


Рис. 9. Сравнение результатов расчета осадки по линейной и нелинейной зависимостям между напряжениями и деформациями

Следует отметить, что проницаемость грунтов также зависит от напряженно-деформированного состояния, а учет изменения коэффициента фильтрации грунта по глубине приведет к изменению времени консолидации.

ВЫВОДЫ

Рассмотренный в статье пример и его реализация в различных программных продуктах позволили сформулировать следующие выводы:

1. Аналитический пример (из учебника Н.А. Цытовича) не может считаться эталонным, поскольку имеет допущения: упрощение расчетных формул (ограничение линейного уравнения первым членом ряда) и отличие в распределении напряжений по глубине от программного.
2. Численное моделирование для корректного сравнения с аналитическим примером требует введения упрощений: невесомая среда, отсутствие грунтовых вод, использование линейно-деформируемых моделей без критерия прочности. Кроме того, крупность сетки, наряду с параметром Скемптона (не может быть

принят равным 1 и который отражает долю условно-мгновенной осадки после приложения нагрузки, происходящей до начала процесса консолидации), величиной начального шага для консолидации (*first time step*), а также другими внутренними параметрами расчета (*desired numbers*), влияет на точность соответствия численных результатов аналитическим.

3. Инженерные программы имеют близкие к искомому примеру результаты, поскольку реализуют аналитические решения путем их автоматизации.
4. Нелинейность зависимости деформаций от напряжений существенно изменяет характер протекания осадки во времени, что влияет на время достижения необходимой степени консолидации и требует ее учета при расчете.

Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что в целом эффективность любого программного продукта как инструмента, используемого для решения задач в области инженерной геотехники, определяется знаниями и квалификацией применяющих их специалистов.

С точки зрения практической значимости рассмотренной работы следует отметить два результата:

- величина осадки, которая во всех случаях получилась достаточно близкой к искомому примеру, и может быть измерена в реальных условиях;
- время реализации осадки, которое имеет большой разброс значений, но и в реальных условиях данный параметр достаточно условный; при этом необходимо принять во внимание, что рассмотрена только фильтрационная (первичная) консолидация, а при строительстве на слабых грунтах влияние ползучести может быть существенным.

В целом следует отметить, что прогнозирование осадки и времени консолидации не может быть отнесено к задачам с точным решением, поэтому в мировой практике принято вести наблюдение за процессом протекания осадки на объекте на основе сравнения с геотехническим прогнозом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Цытович Н.А. *Механика грунтов: Краткий курс: учебник* / Н.А. Цытович. – Изд. 6-е. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2011. – 272 с.
2. Абелев М.Ю. *Строительство промышленных и гражданских сооружений на слабых водонасыщенных грунтах* / М.Ю. Абелев. – М.: Стройиздат, 1983. — 248 с.

LITERATURA

1. Tsytovich N.A. *Mekhanika gruntov: Kratky kurs: uchebnik* / N.A. Tsytovich. – Izd. 6-e. – M.: Knizhny dom «LIB-ROKOM», 2011. – 272 s.
2. Abelev M.Yu. *Stroitelstvo promyshlennykh i grazhdan-skikh sooruzheny na slabykh vodonasyshchennykh gruntakh* / M.Yu. Abelev. – M.: Stroyizdat, 1983. — 248 s.

.....

VERIFICATION OF FILTRATION CONSOLIDATION CALCULATIONS IN GEOTECHNICAL PROGRAMS

Engineer **D.E. Erchenko**,
Ph. D. (Geological and
Mineralogical Sciences) **E.V. Fedorenko**
(«Miakom StP»)
Contact information: evgeniy@miakom.ru

The article compares analytical and numerical calculations of filtration consolidation in special geotechnical programs (softwares): GEO5 Settlement; Settle3D and Plaxis 2D with a well-known analytical solution of N.A. Tsytovich. If in the engineering programs implementing the algorithms for automating analytical calculations the matching is performed in a direct way, then in the numerical modeling programs it is necessary to correctly set the initial conditions and adjust all the influencing parameters for the correct comparison.

Key words: *geotechnics; numerical simulation; finite element method (FEM); Plaxis program; consolidation; theory of filtration consolidation.*

Рецензент: канд. техн. наук А.П. Фомин (ФАУ «РОСДОРНИИ»).

Статья поступила в редакцию: 23.10.2017 г.