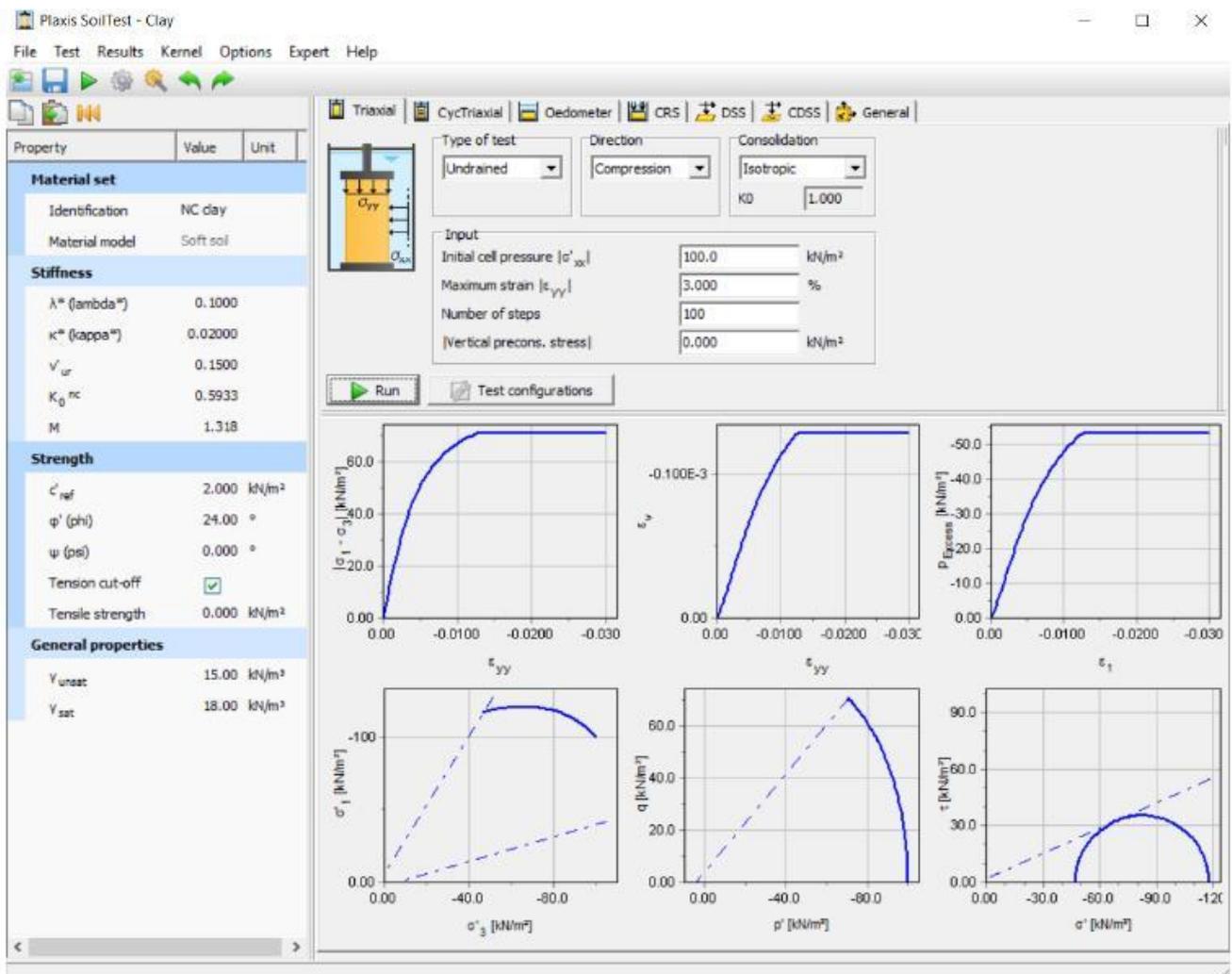


## Работа в PLAXIS. Модель слабого грунта и ее модификация с учетом ползучести



Продолжаем публиковать переводы серии статей известного ученого Рональда Бринкгреве, опубликованных в начале 2021 года в блоге Infrastructure Insights на сайте VIRTUOSITY, A BENTLEY COMPANY (дочерней компании BENTLEY SYSTEMS – мирового лидера в области разработки и внедрения программного обеспечения для проектирования, строительства и эксплуатации инфраструктуры). Сегодня предлагаем вниманию читателей адаптированный перевод статьи «Модель слабого грунта и ее модификация с учетом ползучести» [6], которая появилась на указанном сайте 3 марта 2021 года. Рональд Бринкгреве является одним из разработчиков программного комплекса PLAXIS, доцентом Делфтского технологического университета и руководителем отдела научных исследований и новых разработок Экспертно-консультационного центра по геотехнике компании PLAXIS bv (Нидерланды). Его научные интересы включают прежде всего комплексные геомеханические модели грунта и численные методы исследований грунтовых оснований и их взаимодействий с инженерными сооружениями [3].

Перевод подготовлен при поддержке компании «НИИ-Информатика» – партнера журнала «ГеоИнфо».



### **БРИНКГРЕВЕ РОНАЛЬД (BRINKGREVE RONALD B.J.)**

Доцент Делфтского технологического университета, руководитель отдела научных исследований и новых разработок Экспертно-консультационного центра по геотехнике компании PLAXIS bv, г. Делфт, Нидерланды  
*R.B.J.Brinkgreve@tudelft.nl*

## **ВВЕДЕНИЕ**

Термин «слабый грунт» ассоциируется с пылевато-глинистыми отложениями (в основном с нормально уплотненными глинами). В Нидерландах глины часто содержат органические вещества, а также торф, который еще слабее. В других странах глины могут сильно отличаться от голландских слабых грунтов, например норвежские пльвунные глины с очень высокой чувствительностью. Существуют также природные глины с высокой степенью «структурности» и анизотропии, которые тоже ведут себя по-другому, или глины, которые очень чувствительны к набуханию (набухающие глины). Следовательно, надо быть осторожными при выборе правильной геомеханической модели для конкретного слабого грунта при работе в компьютерных программах на основе метода конечных элементов.

## **МОДЕЛЬ СЛАБОГО ГРУНТА**

В случае нормально уплотненных глин обычно можно положиться на модель слабого грунта (Soft Soil – SS) (рис. 1) при условии, что эти грунты не слишком специфичны или проблематичны. Эта модель различает поведение при первичном нагружении и при разгрузке или повторном нагружении в случае нагрузки ниже давления предварительного уплотнения. В качестве параметров модели SS используются модифицированный коэффициент компрессии при изотропном сжатии и модифицированный коэффициент рекомпрессии, которые могут быть связаны с хорошо известным индексом компрессии  $C_c$  и индексом рекомпрессии  $C_r$ , или индексом упругого подъема  $C_s$ , полученными при испытаниях на одноосное (компрессионное) сжатие. Наилучшая эффективность использования модели слабого грунта достигается при первичном сжатии, поскольку поведение при разгрузке моделируется как упругое.

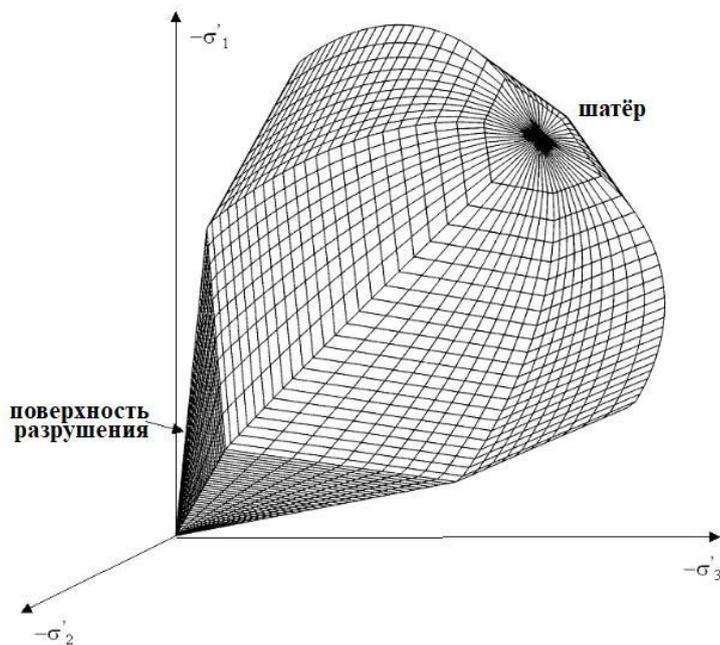


Рис. 1. Модель слабого грунта: поверхность текучести в пространстве главных напряжений

## Особенности поведения грунта

Как упоминалось в моих предыдущих статьях в этом блоге [1, 2, 4, 5], точность геомеханической модели зависит от учитываемых в ней характеристик поведения грунта. В этом отношении модель SS включает некоторые особенности, которые актуальны при практическом использовании для слабых грунтов:

- реалистичное нелинейное поведение при сжатии и при сдвиге;
- логарифмическое поведение при сжатии (логарифмическая зависимость между объемной деформацией и средним эффективным напряжением. – *Ред.*), что означает линейную зависимость жесткости от напряжения (в полулогарифмических координатах. А также дает возможность задать нелинейность одним параметром. – *Ред.*);
- «память» грунта о предварительном нагружении (учет его природного состояния. – *Ред.*);
- различие между первичным нагружением и разгрузкой или повторным нагружением;
- реалистичное развитие порового давления при нагружении слабых грунтов в недренированных условиях;
- точный прогноз недренированной прочности на сдвиг на основе эффективных параметров прочности.

По сравнению с моделью Мора – Кулона модель слабого грунта (SS) учитывает больше особенностей его поведения и намного более реалистична. Однако по сравнению с моделью упрочняющегося грунта (Hardening Soil – HS), описанной в моей предыдущей статье в этом блоге [2, 5], модель SS имеет меньше функций, но она была разработана специально для слабых грунтов (о чем говорит и ее название).

## Параметры модели

Модель слабого грунта включает два параметра, характеризующих поведение его жесткости при первичном нагружении и при разгрузке или повторном нагружении. Эти параметры могут быть легко получены с помощью стандартных компрессионных испытаний в одометре (в России – по ГОСТ 12248, но с альтернативной интерпретацией. – *Ред.*). При этих испытаниях также можно определить начальное давление предуплотнения (в России – по ГОСТ Р 58326. – *Ред.*), которое используется для инициализации напряженного состояния модели. В качестве альтернативы можно использовать корреляции для получения этих параметров по данным полевых испытаний.

Помимо параметров сжатия модель слабого грунта (SS) имеет в основном те же параметры, что и простая модель Мора – Кулона. Это делает модель SS, вероятно, более легкой в использовании, чем модель упрочняющегося грунта (HS) [2, 5], по крайней мере для слабых грунтов.

### **Поведение в недренированных условиях**

Слабые грунты известны своей низкой водопроницаемостью (коэффициентом фильтрации). При быстром нагружении слабого грунта поровое давление увеличивается в результате недренированного поведения. Следовательно, эффективное напряжение уменьшается, а не увеличивается, что имеет последствия для максимального сопротивления сдвигу, которое может быть получено.

Правильный прогноз развития порового давления, снижение среднего эффективного напряжения и, следовательно, недренированной прочности на сдвиг важны в расчетах, когда устойчивость является проблемой. Такую простую модель, как модель Мора – Кулона, опасно использовать для слабых грунтов, поскольку она может значительно завысить сопротивление недренированному сдвигу. Модель SS в этих случаях является предпочтительной, поскольку она обеспечивает гораздо более реалистичное поведение в отношении напряжения и прочности при нагружении в недренированных условиях (рис. 2).

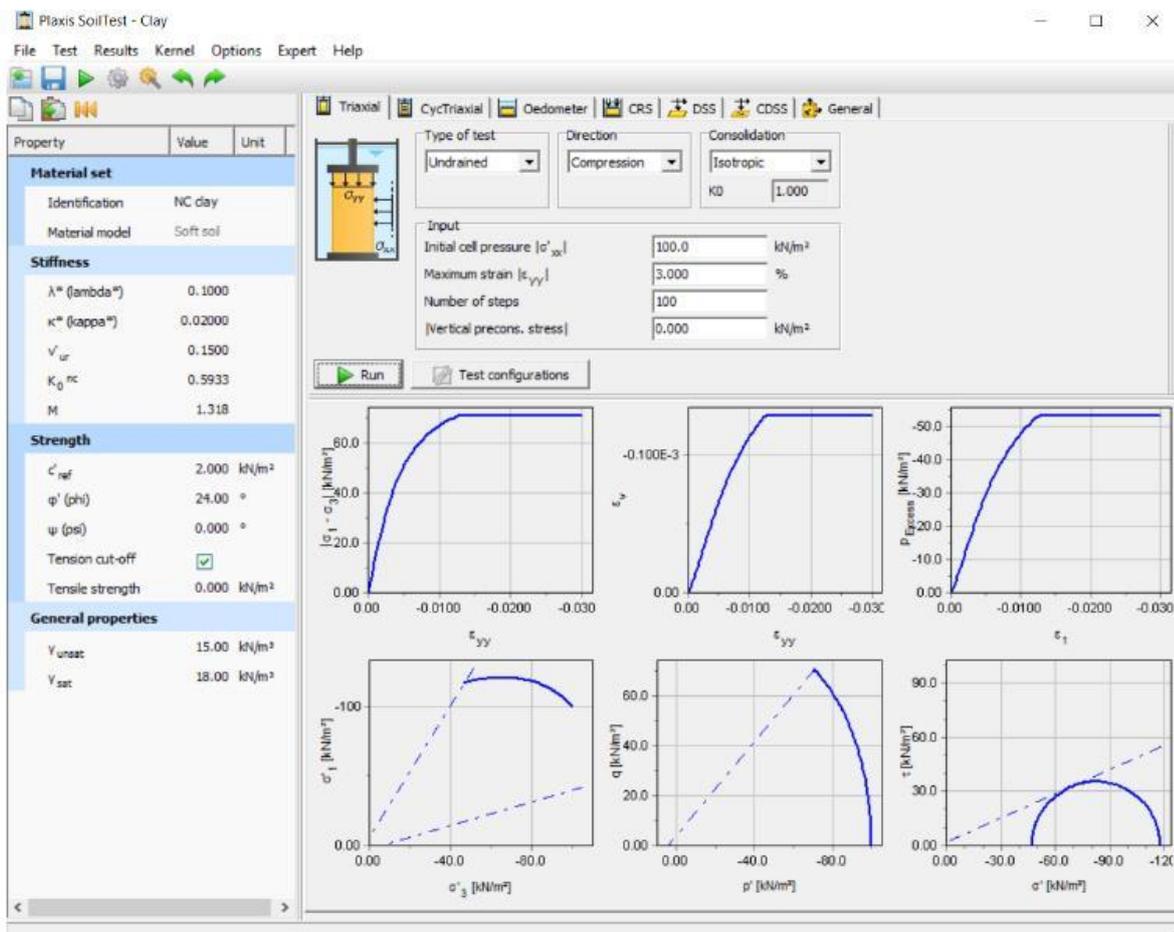


Рис. 2. Моделирование недренированных трехосных испытаний с использованием модели слабого грунта в подпрограмме SoilTest (виртуальной лаборатории), встроенной в PLAXIS

## МОДИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ СЛАБОГО ГРУНТА С УЧЕТОМ ПОЛЗУЧЕСТИ

Хотя порядок и сроки этапов строительства (или схем нагружения) актуальны для всех нелинейных упругопластических моделей, большинство моделей грунта не зависят от времени. Однако время может играть важную роль в случае слабых грунтов. При непродолжительном нагружении поведение слабого грунта является недренированным и создается поровое давление, в то время как за более длинный промежуток времени это (избыточное) поровое давление рассеивается, вызывая осадку. После того как все избыточное поровое давление рассеялось, слабый грунт может продолжать деформироваться в результате ползучести, которую часто называют вторичным сжатием (secondary compression). В модели слабого грунта (SS) ползучесть не учитывается, но имеется модификация этой модели, которая учитывает указанный фактор (Soft Soil Creep – SSC).

Модель SSC учитывает не только объемную ползучесть (сжатие, зависящее от времени), но и девиаторную ползучесть (сдвиг, зависящий от времени). (Отметим, что многие пользователи задают вопрос, учитывается ли в модели сдвиговая ползучесть. Теперь ответ получен от разработчика модели. – *Ред.*) Следовательно, она может использоваться для слабых грунтов, когда важно долгосрочное поведение, зависящее от времени, например при проектировании строительства или укрепления насыпей, свалок, дамб, откосов и склонов.

Модель SSC имеет в основном те же параметры, что и модель SS. Единственным дополнительным параметром является индекс ползучести, который также можно получить по результатам испытаний грунта методом компрессионного сжатия, когда приложенное напряжение сохраняется постоянным в течение более длительного времени (в России – по данным консолидационных испытаний по ГОСТ 12248 с натуральным, а не десятичным логарифмом времени. – *Ред.*).

## **ВЫ ГОТОВЫ К УСОВЕРШЕНСТВОВАННОМУ АНАЛИЗУ ДЛЯ СЛАБОГО ГРУНТА?**

Я надеюсь, что с помощью представленной информации побудил вас использовать модель слабого грунта (SS) и ее модификацию с учетом ползучести (SSC) в ваших геотехнических работах для нормально уплотненных глин. Их параметры могут быть легко получены по данным стандартных инженерных изысканий на площадке будущей реализации того или иного проекта. Анализ методом конечных элементов с применением моделей SS или SSC является более точным и реалистичным, чем при использовании какой-либо более простой модели, по крайней мере для слабых грунтов. И, что более важно, это дает безопасные решения, когда на карту поставлена устойчивость объекта.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Бринкгреве Р. О важности правильного выбора модели грунта в программе PLAXIS // ГеоИнфо. 22.03.2021. URL: [geoinfo.ru/product/brinkgreve-ronald/o-vazhnosti-pravilnogo-vyboora-modeli-grunta-v-programme-plaxis-44343.shtml](http://geoinfo.ru/product/brinkgreve-ronald/o-vazhnosti-pravilnogo-vyboora-modeli-grunta-v-programme-plaxis-44343.shtml).
2. Бринкгреве Р. Работа в PLAXIS. О преимуществах моделей HS, HSS и виртуальных испытаний грунтов // ГеоИнфо. 12.04.2021. URL: [geoinfo.ru/product/brinkgreve-ronald/rabota-v-plaxis-o-preimushchestvah-modelej-hs-hss-i-virtualnyh-ispytanij-gruntov-44450.shtml](http://geoinfo.ru/product/brinkgreve-ronald/rabota-v-plaxis-o-preimushchestvah-modelej-hs-hss-i-virtualnyh-ispytanij-gruntov-44450.shtml).
3. Brinkgreve R. Profile // TUDelft. The last accessed date: 07.04.2021. URL: [tudelft.nl/en/ceg/about-faculty/departments/geoscience-engineering/sections/geo-engineering/staff/academic-staff/brinkgreve-r](http://tudelft.nl/en/ceg/about-faculty/departments/geoscience-engineering/sections/geo-engineering/staff/academic-staff/brinkgreve-r).
4. Brinkgreve R.B.J. On the importance of an appropriate soil model // VIRTUOSITY, A BENTLEY COMPANY. Blog: Infrastructure Insights. 18.02.2021. URL: [blog.virtuosity.com/on-the-importance-of-an-appropriate-soil-model](http://blog.virtuosity.com/on-the-importance-of-an-appropriate-soil-model).
5. Brinkgreve R.B.J. The hardening soil model // VIRTUOSITY, A BENTLEY COMPANY. Blog: Infrastructure Insights. 24.02.2021. URL: [blog.virtuosity.com/the-hardening-soil-model](http://blog.virtuosity.com/the-hardening-soil-model).
6. Brinkgreve R.B.J. The soft-soil and soft-soil creep model // VIRTUOSITY, A BENTLEY COMPANY. Blog: Infrastructure Insights. 03.03.2021. URL: [blog.virtuosity.com/the-soft-soil-and-soft-soil-creep-model](http://blog.virtuosity.com/the-soft-soil-and-soft-soil-creep-model).
7. Brinkgreve R.B.J. Time-dependent behaviour of soft soils during embankment construction – a numerical study // Numerical Models in Geomechanics (ed. by G.N. Pande, S. Pietruszczak). London: CRS press, Taylor & Francis, 2004. P. 631–637.
8. Vermeer P.A., Neher H.P. A soft soil model that accounts for creep // Beyond 2000 in Computational Geotechnics (ed. by R.B.J. Brinkgreve). Rotterdam: Balkema, 1999. P. 249–261.