

**Работа в PLAXIS. Поведение скальных грунтов**

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 «Поведение скальных грунтов» [8], которая появилась на указанном сайте 17 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 [5].

Отметим, что в журнале «Геоинфо» уже вышли четыре перевода [1–4] статей этой серии [6, 7, 9, 10], а публикации по ссылкам [11–13] в списке литературы использовал сам Бринкгреве при подготовке представленной работы [8].

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



**БРИНГГРЕВЕ РОНАЛЬД (BRINGGREVE 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**

Хотя программный комплекс PLAXIS в свое время разрабатывался для слабых дисперсных грунтов, сейчас он хорошо оснащен для анализа поведения прочных дисперсных и скальных грунтов методом конечных элементов. В дополнение к специализированным средствам для моделирования тоннелей, анкеров и напряженных состояний в полевых условиях он включает необходимые комплексные геомеханические модели для имитации поведения различных типов скальных грунтов.

**Особенности поведения скальных грунтов**

В серии статей о комплексных геомеханических моделях в данном блоге я часто упоминал «особенности поведения дисперсных грунтов». Теперь, поскольку мы говорим здесь о скальных грунтах, я хотел бы упомянуть некоторые «особенности поведения скальных грунтов» и указать на их различия с поведением дисперсных:

- жесткость скальных грунтов значительно выше жесткости дисперсных и практически не зависит от напряжения;
- прочность скальных грунтов значительно выше прочности дисперсных (в основном за счет структурной прочности), причем с повышением напряжения она увеличивается менее линейно;
- поведение скальных грунтов часто бывает анизотропным в отношении как жесткости, так и прочности; на это сильно влияет их геологическая история, которая могла привести к выветриванию, образованию систем трещин, зон ослабления разломов и другим нарушениям сплошности и однородности;
- деформации скальных грунтов могут зависеть от времени (ползучесть), но сильно отличаться от ползучести слабых дисперсных грунтов.

Важно отметить, что поведение скальных грунтов (даже одной и той же формации) может сильно варьировать от одного места к другому из-за локальных неоднородностей. При взятии неповрежденного образца зерна скального грунта и его испытании в лаборатории измеренные показатели свойств, как правило, более благоприятны, чем свойства всего массива скальных грунтов. Следовательно, для определения характерных свойств скальных пород необходимы полевые исследования в массиве.

**Модель Хёка – Брауна**

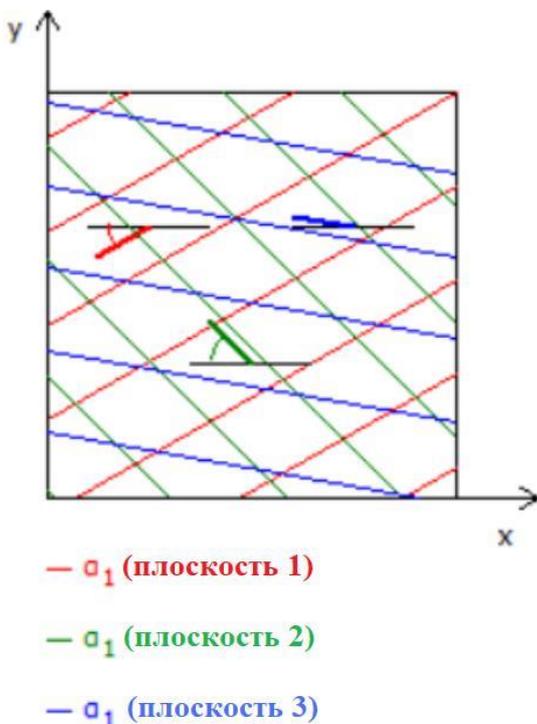
Модель Хёка – Брауна (Hoek-Brown model) представляет собой комбинацию закона упругости Гука и критерия разрушения Хёка – Брауна. Этот хорошо известный критерий разрушения скального грунта выражает то, что прочность скальной породы с увеличением напряжения возрастает менее линейно.

Модель Хёка – Брауна в первую очередь предназначена для выветрелых скальных грунтов. В программном комплексе PLAXIS есть удобная процедура, которая поможет вам определить пять параметров модели на основе результатов полевых исследований, лабораторных испытаний и эмпирических данных.

Стандартная модель Хёка – Брауна в PLAXIS является линейно-упругой идеально-пластической. Существует ее усовершенствованная версия, доступная как пользовательская модель с дополнительным вводом параметров прочности на растяжение и остаточной прочности [12]. Она называется «модель Хёка – Брауна с разупрочнением» (Hoek & Brown model with softening) и включает разупрочнение, то есть снижение прочности из-за пластического деформирования до достижения остаточной прочности.

### Модель трещиноватого скального грунта

Модель Хёка – Брауна не может в явном виде иметь дело с дискретными системами трещин и трещиноватостью, которые могут привести к сильно анизотропному поведению в массиве скального грунта. Если в вашем проекте используются скальные породы с четко выраженными нарушениями сплошности, для них больше подходит модель трещиноватого скального грунта (Jointed Rock model). Направление поверхностей ослабления (и другие преобладающие направления нарушений сплошности) можно смоделировать с помощью параметров падения (см. рисунок) и простирания трещин.



**Рис.** Пример с тремя разными углами падения, определяемыми параметром  $\alpha_1$

Стандартная модель трещиноватого скального грунта в PLAXIS является линейно-упругой и идеально-пластической. Пластическая деформация может происходить только в заранее

определенных направлениях ослабления (трещинах). Это означает, что минеральный скелет скальной породы считается линейно-упругим (с неограниченной прочностью на сдвиг), что можно рассматривать как ограничение модели. Если вы хотите рассматривать массивную часть породы как упругопластический материал (то есть задать прочность массива без трещин), то для этого рекомендуется пользовательская модель, которая обладает такой возможностью, а именно «Модель изотропного трещиноватого скального грунта с критерием разрушения Мора – Кулона» (Isotropic Jointed Rock with Mohr-Coulomb Failure Criterion model).

### **Модель для каменной соли N2PC Rock Salt**

Помимо стандартных моделей скальных грунтов в PLAXIS есть несколько пользовательских моделей, которые включают в себя особые характеристики скальных пород. Например, N2PC Rock Salt используется для моделирования анизотропного термоупруго-вязкопластического материала на основе степенной зависимости ползучести упрочняющегося тела Нортон (Norton-based Double Power Creep model – N2PC model) [11]. Она предназначена для каменной соли и других типов скальных пород, которые демонстрируют ползучесть в зависимости от времени. N2PC можно использовать для глубоких подземных проектов в горнодобывающей и нефтяной промышленности, таких как хранение источников энергии, в том числе газа. В сочетании со встроенными средствами изменений температуры в программе PLAXIS 2D Ultimate ползучесть в модели N2PC Rock Salt может быть определена даже как зависящая от температуры.

### **Модель набухающего скального грунта**

Модель набухающего скального грунта (Swelling Rock model) [13] – это еще одна пользовательская модель, которая включает такую особенность скальной породы, как набухание. Типичный пример, когда может быть использована эта модель, – проектирование тоннеля в ангидрите. При контакте ангидрита с водой он может со временем напитаться водой и увеличить свой объем на величину до 60%. Это может вызвать значительные дополнительные напряжения или деформации в обделке тоннеля. Благодаря наличию модели набухающего скального грунта и средств моделирования тоннелей программный комплекс PLAXIS хорошо оснащен для выполнения такого анализа.

### **Начните анализ поведения скальных грунтов в PLAXIS сегодня**

Как вы поняли из этой статьи, программный комплекс PLAXIS не только включает средства для геотехнического анализа дисперсных грунтов, но и позволяет выполнять точные расчеты методом конечных элементов для сложных проектов в скальных породах. Эффективные рабочие процессы в сочетании с надежными комплексными геомеханическими моделями грунтов делают PLAXIS идеальным инструментом для проектов, связанных с прочностью скальных пород, строительством тоннелей, глубоким подземным хранением источников энергии и с многим другим.

Итак, начните анализ поведения скальных грунтов в программном комплексе PLAXIS сегодня – и вы обнаружите, что он так же хорошо подходит для скальных грунтов, как и для дисперсных.

### **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-vybora-modeli-grunta-v-programme-plaxis-44343.shtml](http://geoinfo.ru/product/brinkgreve-ronald/o-vazhnosti-pravilnogo-vybora-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-ispytaniy-gruntov-44450.shtml](http://geoinfo.ru/product/brinkgreve-ronald/rabota-v-plaxis-o-preimushchestvah-modelej-hs-hss-i-virtualnyh-ispytaniy-gruntov-44450.shtml).
3. Бринкгреве Р. Работа в PLAXIS. Модель слабого грунта и ее модификация с учетом ползучести // ГеоИнфо. 20.05.2021. URL: [geoinfo.ru/product/brinkgreve-ronald/rabota-v-plaxis-model-slabogo-grunta-i-ee-modifikaciya-s-uchetom-polzuchesti-44672.shtml](http://geoinfo.ru/product/brinkgreve-ronald/rabota-v-plaxis-model-slabogo-grunta-i-ee-modifikaciya-s-uchetom-polzuchesti-44672.shtml).
4. Бринкгреве Р. Работа в PLAXIS. Моделирование землетрясений и разжижения грунтов // ГеоИнфо. 15.06.2021. URL: [geoinfo.ru/product/brinkgreve-ronald/rabota-v-plaxis-modelirovanie-zemletryasenij-i-razzhizheniya-gruntov-44817.shtml](http://geoinfo.ru/product/brinkgreve-ronald/rabota-v-plaxis-modelirovanie-zemletryasenij-i-razzhizheniya-gruntov-44817.shtml)
5. Brinkgreve R. Profile // TUDelft. The last accessed date: 07.06.2021. 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).
6. Brinkgreve R.B.J. Liquefaction and earthquake modelling // VIRTUOSITY, A BENTLEY COMPANY. Blog: Infrastructure Insights. 10.03.2021. URL:.
7. 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).
8. Brinkgreve R.B.J. Rock behaviour // VIRTUOSITY, A BENTLEY COMPANY. Blog: Infrastructure Insights. 17.03.2021. URL: [blog.virtuosity.com/geotechnical-rock-behaviour](http://blog.virtuosity.com/geotechnical-rock-behaviour).
9. 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).
10. 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).
11. Bui T.A., Brinkgreve R.B.J., Zampich L. The norton-based double power creep model for rock salt. N2PC user manual. Delft: Plaxis bv, 2018.
12. Marinelli F., Zalamea N., Brasile S., Brinkgreve R.B.J. An advanced Hoek & Brown model with softening: user manual. Delft: Plaxis bv, 2019.
13. Schadlich B., Schweiger H.F., Marcher T. Numerical analysis of swelling deformations in tunnelling: a case study // Proceedings of the EURO:TUN 2013, 3rd Int. Conf. on Computational Methods in Tunnelling and Subsurface Engineering (ed. G. Meschke). Aedificatio Publishers, 2013. P. 429–436.