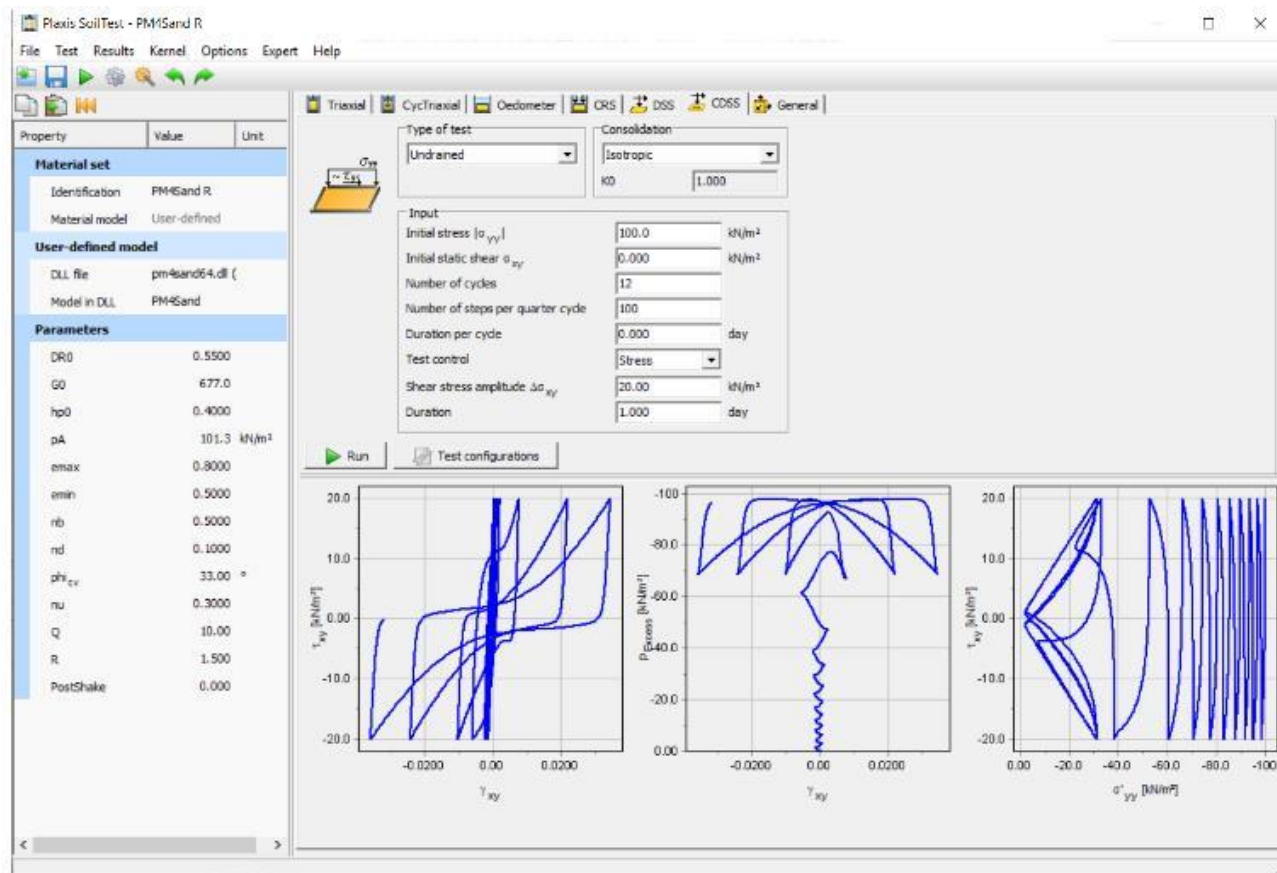


**Работа в PLAXIS. Моделирование землетрясений и разжижения грунтов**



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 «Моделирование землетрясений и разжижения грунтов» [8], 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 [7]. Отметим, что в журнале «Геоинфо» уже вышли три перевода [1–3] статей этой серии [9–11], а публикации по ссылкам [4–6, 12–14] в списке литературы использовал сам Бринкгреве при подготовке представленной работы [8].

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



### **БРИНГГРЕВЕ 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**

Инженерная сейсмология в области геотехники (Geotechnical Earthquake Engineering) – это особая дисциплина в нашей профессии. Она требует понимания терминологии и методов, необходимых для безопасного проектирования сейсмостойких конструкций, а также особенностей поведения грунта при динамических и циклических нагрузках, включая его разжижение. Важные сведения об этой дисциплине и разжижении грунтов можно найти в книгах Крамера [13] и Идрисса и Буланже [12].

## **Численное моделирование землетрясений и разжижения грунтов**

Программный пакет **PLAXIS 2D/3D Ultimate** включает в себя такие необходимые средства для численного моделирования землетрясений и разжижения грунтов, как:

- типы расчетов Dynamic («Динамический») и Dynamic with consolidation («Динамический с консолидацией»);
- специальные модели грунтов для расчета циклического нагружения и разжижения;
- специальные виды граничных условий для расчетной схемы, в том числе для поглощения отражений волн (паразитных волн) на границах;
- ввод и предварительная обработка динамических нагрузок, динамических смещений, скоростей и ускорений (сейсмограмм);
- эффективный инструмент для одномерного анализа реакции грунтов строительной площадки на землетрясение;
- инструмент постобработки для расчета реакции исследуемого участка на землетрясение – часть опции Curves manager («Администратор кривых») в программе Output («Вывод данных»).

В этой серии статей в данном блоге (VIRTUOSITY, A BENTLEY COMPANY. Blog: Infrastructure Insights) основное внимание уделяется геомеханическим моделям грунта. Важно понимать, что модели для статического нагружения не обязательно подходят для динамических нагрузок и наоборот. Поскольку этапам динамических расчетов обычно предшествуют этапы статических вычислений, то в начале ваших динамических расчетов вам может потребоваться «переключить» наборы данных по материалам, слагающим слой грунтов.

## **Особенности поведения грунта при динамическом и циклическом нагружении**

Динамические расчеты требуют включения в модель грунта характеристик, отличающихся от статических. В основном они связаны с эффектами циклического нагружения, такими как:

- зависящая от деформации жесткость (уменьшение модуля сдвига) и восстановление жесткости при малых деформациях при снятии нагрузки; гистерезисное демпфирование, зависящее от деформации;
- снижение жесткости и прочности при циклическом нагружении;
- накопление пластических деформаций при циклическом нагружении;
- повышение порового давления при недренированном циклическом нагружении;
- снижение жесткости и увеличение сдвиговой деформации при достижении разжижения.

Несмотря на преимущества **модели упрочняющего грунта (HS – Hardening Soil)** и **модели слабого грунта (SS – Soft Soil)**, как обсуждалось в моих предыдущих статьях данной серии, эти модели не отражают перечисленные выше особенности. Только **модель упрочняющего грунта при малых деформациях (HSS – Hardening Soil Small)** включает первую особенность и может использоваться при динамических расчетах для неразжижаемых грунтов.

### Модель UBC3D-PLM

Первой моделью циклического нагружения и разжижения, включенной в программный пакет PLAXIS, была модель UBC3D-PLM, или UBC3D-PLAXIS Liquefaction Model (упругопластическая модель, позволяющая моделировать разжижение песчаных и глинистых грунтов под воздействием сейсмических нагрузок. – *Ред.*). Она основана на двумерной модели UBCSand, первоначально разработанной в 1998 году Бити и Бирном [5] в Университете Британской Колумбии (UBC).

**UBC3D-PLM** очень похожа на **модель упрочняющегося грунта (HS)**, но имеет дополнительную особенность, заключающуюся в том, что она накапливает пластические деформации при циклическом нагружении. В сочетании с недренированным поведением в ней создается и увеличивается поровое давление, которое может привести к разжижению после определенного количества циклов (в зависимости от значений ее параметров).

В дополнение к обширной валидации, проведенной компанией **PLAXIS bv** и различными университетами, Афинский национальный технический (политехнический) университет (NTUA) опубликовал процедуру определения и калибровки параметров этой модели [4].

### Модель PM4sand

Через несколько лет после предыдущей модели мы включили в PLAXIS модель **PM4Sand** на основе ее исходной версии 3, разработанной в 2015 году Буланже и Зиотопулу [6] (для анализа поведения песков при динамическом нагружении, включая создание порового давления, разжижение и явления пост-разжижения. – *Ред.*). Внедренная в PLAXIS [14], она дает очень похожие с исходной моделью результаты. Но наш вариант модели, вероятно, более эффективен благодаря среде конечных элементов.

PM4Sand можно рассматривать как усовершенствованную модель для анализа циклического нагружения и разжижения грунтов. Однако это пока двумерная модель, как и исходная. Существует четкая процедура определения ее параметров. Главный параметр  $h_{po}$  определяет количество циклов, необходимых для достижения точки разжижения при

заданном соотношении циклических напряжений. Его можно откалибровать по результатам серии циклических испытаний на прямой простой сдвиг или по корреляции с данными статического (CPT) или динамического (SPT) зондирования. Подпрограмма **SoilTest** (виртуальная лаборатория), встроенная в **PLAXIS**, позволяет удобно выполнить калибровку параметра  $h_{p0}$  (см. рисунок).

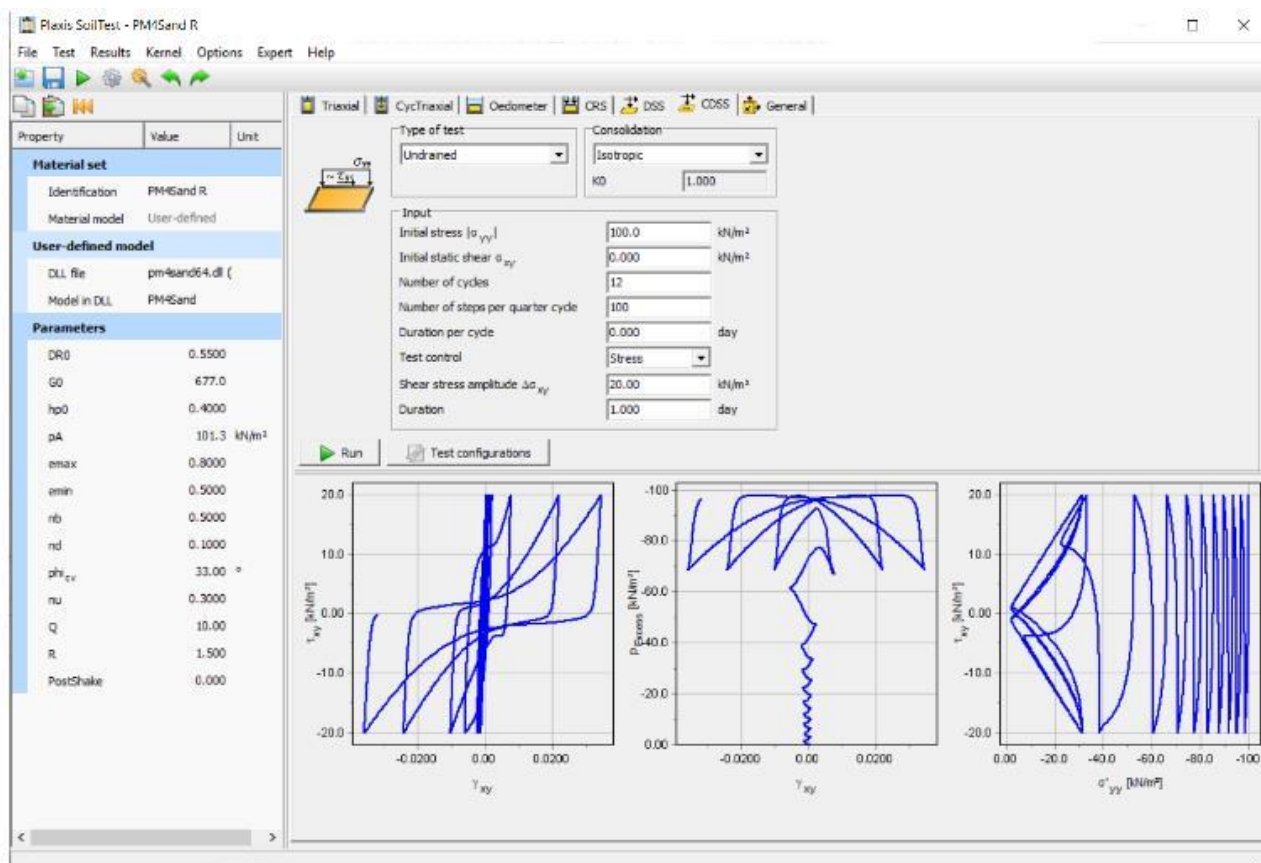


Рис. Моделирование недренированного циклического испытания на прямой простой сдвиг (DSS) для модели PM4Sand с помощью подпрограммы SoilTest (виртуальной лаборатории), встроенной в PLAXIS

## Начните моделирование землетрясений и разжижения грунтов

Хотя динамический анализ обычно сложнее статического, я очень надеюсь, что с этой информацией вы почувствуете себя более уверенно для того, чтобы приступить к моделированию землетрясений и разжижения грунтов. Как правило, для динамических расчетов требуются не те модели грунтов, что для статических вычислений. Программный пакет **PLAXIS 2D/3D Ultimate** предоставляет все необходимые инструменты для динамического анализа, а также две специальные модели, которые можно использовать для геотехнического анализа землетрясений и оценки разжижения грунтов. Калибровку параметров моделей удобно проводить с помощью инструментов виртуальной лаборатории **PLAXIS SoilTest**.

## 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-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. 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. Anthi M., Gerolymos N. A calibration procedure for sand plasticity modeling in earthquake engineering: application to TA-GER, UBCSAND and PM4SAND // Proceedings of the 7th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering. Rome: CRC Press, 2019.
5. Beaty M., Byrne P. Effective stress model for predicting liquefaction behaviour of sand // Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics III. ASCE Geotechnical Special Publication, 1998. № 75. P. 766–777.
6. Boulanger, Ziotopoulou. PM4Sand (Version 3) – a sand plasticity model for earthquake engineering applications: report № UCD/CGM-15/01. Davis, CA, USA: Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California Davis, 2015.
7. 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).
8. Brinkgreve R.B.J. Liquefaction and earthquake modelling // VIRTUOSITY, A BENTLEY COMPANY. Blog: Infrastructure Insights. 10.03.2021. URL: [blog.virtuosity.com/liquefaction-and-earthquake-modelling](http://blog.virtuosity.com/liquefaction-and-earthquake-modelling).
9. 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).
10. 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).
11. 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).
12. Idriss, Boulanger. Soil liquefaction during earthquakes. Earthquake Engineering Research Institute (EERI), 2008.
13. Kramer S.L. Geotechnical earthquake engineering. Prentice Hall, 1996.
14. Vilhar G., Laera A., Foria F., Gupta A., Brinkgreve R.B.J. Implementation, validation and application of PM4S and modelling in PLAXIS // Proceedings of GEESD V. ASCE, 2018. ASCE geotechnical special publication № 292. P. 200–211.