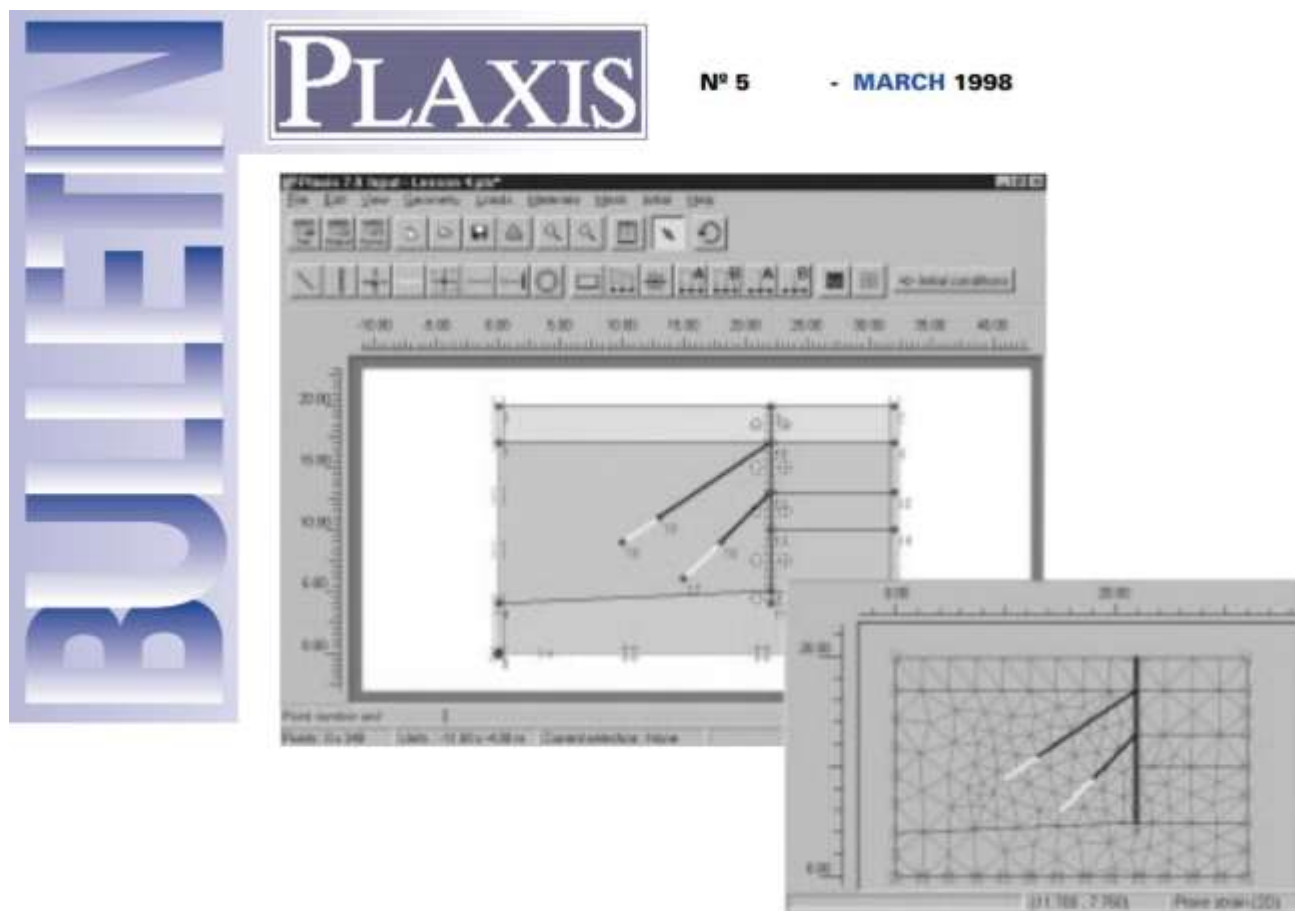


Заметки Питера Вермеера. Когда нужен «дренированный» и «недренированный» анализ поведения грунтов?



Программный комплекс PLAXIS является одним из наиболее популярных в Европе и в России при решении геотехнических задач (прежде всего для расчета напряженно-деформированного состояния грунтовых оснований, фундаментов и сооружений) [6].

По предложению одного из наших партнеров – компании ООО «НИИ-Информатика», которая является официальным дистрибьютором программного комплекса PLAXIS в России, – мы начинаем публиковать заметки основателя этой программы, профессора Штутгартского университета Питера Вермеера, которые он размещал в своей колонке в начале каждого номера Plaxis Bulletin – объединенного журнала компании PLAXIS BV и Ассоциации пользователей PLAXIS (NL), выходящего два раза в год начиная с 1996 года.

В этой статье мы дадим общую информацию о PLAXIS и приведем содержание «Колонки Вермеера» из пятого номера журнала Plaxis Bulletin, вышедшего в 1998 году (как раз когда появилась версия 7 программы PLAXIS уже не для DOS, а для Windows).

О программном комплексе PLAXIS и истории его разработки

Рынок программ для инженерных расчетов предлагает ряд российских и зарубежных продуктов, позволяющих достаточно достоверно выполнять расчеты несущих конструкций зданий и сооружений в их надземной части. Область же расчетов, связанных с геотехнической инженерией, в основу которых положено моделирование грунтов и взаимодействий между конструкциями и грунтами, к сожалению, развита гораздо меньше. В этой сфере предлагается довольно мало качественных, понятных и удобных программ для профессионалов. Существуют, например, такие программы, как ABAQUS, ANSYS, ZSOIL и др. Однако, как считают специалисты, наиболее простым пользовательским интерфейсом, высокой точностью расчетов и очень доступной ценой выгодно отличается программный комплекс PLAXIS, предназначенный для выполнения конечно-элементного анализа деформаций и устойчивости конструкций.

Если говорить об истории создания PLAXIS, то еще в 1970-е годы «прообраз» этой программы начал разрабатывать Питер Вермеер (Pieter Vermeer) из Делфтского университета технологии для использования при проектировании оградительного сооружения Остерсхельдекеринг на Восточной Шельде в Нидерландах. Тогда эта программа носила название ELPLAST, была написана на языке программирования Fortran и работала на крупных компьютерных системах – мейнфреймах IBM. Она могла выполнять двумерные упругопластические вычисления для грунтовых оснований на основе наборов сеток из шестиузловых треугольников.

В дальнейшей разработке, продвижении и внедрении программы участвовали не только сотрудники и аспиранты Вермеера, но и специалисты из других крупных университетов, деятели государственных учреждений и коммерческих компаний. В результате возможности программы значительно расширились и получился многофункциональный и удобный для расчетов продукт, продолжающий динамически развиваться и сейчас.

Первая коммерческая версия PLAXIS для персональных компьютеров появилась в 1987 году. Стала очевидна необходимость коммерческого продвижения программы и ее дальнейшего развития с интуитивно понятным интерфейсом для точных и высококачественных геотехнических расчетов, базирующихся на конечно-элементном методе, для чего в 1993 году в Нидерландах была создана частная компания PLAXIS BV (со штаб-квартирой в Делфте и офисом в Сингапуре), работающая по всему миру. Развивая и совершенствуя программу, разработчики тесно сотрудничают с различными университетами и фирмами, сочетая теоретические исследования и разработки для практической деятельности. А в 2018 году компания PLAXIS BV вошла в состав Bentley Systems.

До седьмой версии программа была DOS-приложением. Начиная с седьмой версии (с 1998 года), она стала программой для операционных систем Windows. Тогда и были введены графические элементы, неструктурированная сетка и ряд других важных особенностей, на основе чего была выпущена первая программа PLAXIS 2D для двухмерного моделирования. Программа PLAXIS 3D с возможностью выполнения трехмерного моделирования была выпущена в 2010 году.

В итоге программа из ориентированной на узкий круг специалистов стала практическим инженерным инструментом, который может активно использоваться в расчетах при строительном проектировании.

Программный комплекс PLAXIS на современном этапе предназначен для проектных организаций и высших учебных заведений, являясь мощным и удобным инструментом как для практического применения в сфере промышленного и гражданского строительства, так и для исследований. Его можно использовать для двумерных и трехмерных расчетов отдельных элементов и для комплексных вычислений при решении большинства задач в сфере традиционной механики грунтов, связанных с закладкой и строительством фундаментов, земляными работами (созданием котлованов, траншей и т.д.), возведением подпорных стенок, расчетами устойчивости склонов, откосов, насыпей, в том числе на динамические воздействия, инфильтрацией, прокладкой тоннелей и т.д. [2, 6]

Особенности расчетов в программе PLAXIS

Грунт моделируется в PLAXIS как многокомпонентный материал (частицы, вода, газ), в котором может возникать гидростатическое и/или избыточное давление в поровой воде, что нашло свое отражение в специальных расчетах (фильтрация, консолидация). Данный программный комплекс позволяет моделировать поэтапное возведение сооружения, экскавацию и отсыпку грунта, различные по величине и направлениям нагрузки, выполнять расчеты фильтрации и консолидации грунтов, производить расчеты устойчивости с определением потенциальных поверхностей разрушения и значений коэффициента запаса, отвечающих уровню достигнутых напряжений, создавать сценарии аварийных ситуаций и оценивать их последствия в работе сооружения.

В PLAXIS есть следующий набор элементов: плита, оболочка, балка, стойка, анкер, шарнир, георешетка, свая, дрена, колодец, туннель, контактные элементы (интерфейсы).

Также имеется набор моделей разной степени сложности для грунтов, бетона и скальных пород. Базовой моделью грунта является идеально-упругопластическая нелинейная модель Кулона – Мора, которая базируется на основных прочностных характеристиках грунтов – удельном сцеплении c , угле внутреннего трения φ , угле дилатансии ψ , коэффициенте Пуассона ν и модуле упругости E . Представлены также следующие нелинейные модели грунта:

- линейно-упругая или линейно-деформируемая (Linear Elastic), идеально пластическая, с критерием прочности (Mohr-Coulomb);
- упругопластическая модель упрочняющегося грунта (HardeningSoil), в том числе с улучшенным описанием области малых деформаций (HardeningSoilSmall);
- модель для слабых грунтов (SoftSoil), в том числе с учетом ползучести (SoftSoilCreep, Sekiguchi-Ohta), анизотропности (Sekiguchi-Ohta, S1Clay) и с учетом сложного напряженного состояния (NGI-ADP);
 - модель анизотропного скального массива, имеющего систему трещин (JointedRock);
 - модель Хека-Брауна для трещиноватых скальных грунтов (Hoek-Brown);

Дополнительно имеются более сложные модели:

- описывающие возможность разжижения грунтов (связных и несвязных) при различного рода циклических воздействиях: вибрация, сейсмические колебания, ветровые и волновые давления;
- отдельная библиотека пользовательских моделей, разработанных разными учеными со всего мира, позволяющая моделировать самые разные особенности поведения (термо-гидро- механическая модель для оценки промерзания и

оттаивания грунта с оценкой деформаций протаивания и морозного пучения; гипопластичная модель, учитывающая разупрочнение связных и несвязных грунтов; модель набухающих грунтов; модель среды Кельвина-Фойгта с критерием прочности Кулона-Мора для вязкопластических деформаций во времени и многие другие).

Производители и дистрибьюторы программного комплекса PLAXIS за рубежом и в России

Компания PLAXIS BV не только является производителем и дистрибьютором широкого спектра 2D и 3D программного обеспечения под торговой маркой PLAXIS, но и предлагает соответствующий выбор курсов, семинаров и экспертных услуг.

Официальным представителем компании PLAXIS BV и дистрибьютором программного комплекса PLAXIS в России уже на протяжении многих лет является компания «НИИ-Информатика», деятельность которой сфокусирована не только на разработке собственных программных продуктов (ТЕХТРАН для станков с ЧПУ, используемый уже на 1000 российских предприятий), но и на внедрении высокотехнологичных продуктов известных зарубежных и российских компаний: Autodesk, Carlson Software, DP Technology, Tekla, CSI, Eurostag, **Plaxis**, Deltares Geosystems (Нидерланды), Altium (Австралия), Fugro (Германия), Csoft, НТП «Трубопровод» (Россия), Интермех (Белоруссия), ЛИРА софт, SCAD Soft (Украина). Соответствующее программное обеспечение внедрено с помощью «НИИ-Информатики» уже более чем на 500 предприятиях России. Команда высококвалифицированных специалистов ООО «НИИ-Информатика» с большим практическим опытом занимается также проведением научно-практических конференций, консультативной, экспертной и обучающей деятельностью и т.д. [3, 4].

Отметим, что программный комплекс PLAXIS имеет сертификат ГОССТАНДАРТА России, удостоверяющий соответствие выполняемых с его помощью геотехнических расчетов требованиям отечественных нормативных документов.

Журнал Plaxis Bulletin

По предложению ООО «НИИ-Информатика» мы начинаем публиковать информацию о применении программы PLAXIS для решения различных геотехнических задач, а начнем с заметок основоположника PLAXIS профессора Штутгартского университета Питера Вермеера, которые он готовил для своей колонки в начале каждого номера Plaxis Bulletin – объединенного журнала компании PLAXIS BV и Ассоциации пользователей PLAXIS (NL), выходящего два раза в год начиная с 1996 года. Этот журнал посвящен использованию метода конечных элементов в геотехнической инженерной практике и включает статьи о практическом применении программ PLAXIS, тематические исследования и справочную информацию о моделях, реализованных в PLAXIS (все номера этого журнала имеются в архиве на сайте [4]).

Из колонки Вермеера в №5 журнала Plaxis Bulletin 1998 года [8]: когда нужен «дренированный» и «недренированный» анализ поведения грунтов?

Принимая участие в создании глубоких котлованов в глинистых грунтах, Питер Вермеер стремился ответить на вопрос, нужен ли в таких случаях анализ поведения грунтов в недренированных условиях. И здесь ему очень помогло практическое

руководство «Глубокие котлованы» Малкольма Пуллера (Malcolm Puller, 1996), откуда он привел следующую цитату:

«Недренированная прочность на сдвиг c_u правильно используется только тогда, когда нагрузка применяется одномоментно, но ее совершенно нелогично использовать, как только изменяется поровое давление. В глинистых грунтах, где подпорная стенка деформируется и пытается отойти от удерживаемого грунтового массива, в нем генерируется отрицательное (пониженное) поровое давление по мере того, как со стороны передней части стенки происходит выемка грунта. В сильно трещиноватых или слоистых переуплотненных глинах снижение давления может происходить относительно быстро – и первоначальная величина c_u быстро становится неприменимой. Поэтому использование c_u в таких анализах может стать чрезмерно оптимистичным» [7].

Вермеер подчеркивает, что он полностью с этим согласен: при выемке грунта во время строительства котлованов происходит разгрузка, и тогда решающей является дренированная долговременная, а не недренированная кратковременная оценка устойчивости. Он считает, что большинство руководств, как правило, концентрируется на проблемах с нагрузкой при строительстве насыпей или фундаментов, когда уплотнение грунта улучшает устойчивость сооружения. Поэтому может возникнуть ложное впечатление, что «недренированный» анализ всегда приводит к консервативной оценке коэффициента запаса прочности.

Для слабых глинистых грунтов, которые имеют низкие значения коэффициента фильтрации, как считает Пуллер, было бы целесообразно провести анализ и для дренированных, и для недренированных грунтовых условий. В связи с этим Вермеер добавляет, что можно было бы также принять решение на основе предварительного приблизительного расчета.

Чтобы судить о степени уплотнения (консолидации) грунта, большинство руководств использует функцию степени консолидации $U=f(T)$, где T – фактор времени:

$$T = \frac{k E_{oed}}{\gamma_w D^2} t,$$

где:

k – коэффициент фильтрации

E_{oed} – одометрический модуль

γ_w – удельный вес воды

D – длина пути фильтрации

t – время консолидации

Без сомнения, отмечает Вермеер, доступные функции для степени консолидации U относятся к одномерной задаче, но часто происходит почти вертикальное дренирование из глубоко залегающих слоев ко дну котлована, при этом условия дренирования для слоев глинистого грунта, расположенных неглубоко из-за непроницаемой ограждающей конструкции часто бывают аналогичными.

Рассматривая одномерную консолидацию, мы имеем хорошо известную связь между степенью консолидации U и фактором времени T . Для $T=0,01$ будет $U=0,1$, что предполагает среднюю степень рассеивания порового давления всего на 10%. В таких

случаях Вермеер предлагает проводить расчеты недренированного поведения грунта и забыть о «дренированном» анализе.

С другой стороны, если строительство занимает очень долгое время, то при $T > 0,4$ и, соответственно, $U > 0,7$, мы имеем почти дренированные условия – и в этом случае Вермеер предлагает проводить только «дренированный» анализ. Для промежуточных вариантов уплотнения программа PLAXIS предлагает использование специального универсального типа поведения моделей по условиям дренирования Undrained A, который позволяет оценивать, как дренированное, так и недренированное поведение в зависимости от темпов строительства и условий дренирования [8, 9].

Эта тема будет продолжена в следующей части нашей статьи на основе информации из «Колонки Вермеера» из следующего выпуска журнала Plaxis Bulletin (отметим, что в следующих выпусках научно-техническая информация будет значительно более объемной).

Список литературы

1. Голубев А.И., Селецкий А.В. Комплексные расчеты гидротехнических сооружений в PLAXIS // НИП-Информатика. 20.09.2011. URL: nipinfor.ru/publications/10049/.
2. Ивахов И. PLAXIS – геотехнические расчеты // CADmaster. Изыскания, генплан и транспорт. НИП-Информатика, 2009. № 1. URL: cadmaster.ru/magazin/articles/cm_11_plaxis.html.
3. О компании // НИП-Информатика. 2019. URL: nipinfor.ru/about/.
4. Plaxis Bulletin archive // Plaxis.com. The last access date: 11.11.2019. URL: plaxis.com/plaxis-bulletin/.
5. PLAXIS BV. Информация // Facebook. 2019. URL: facebook.com/pg/plaxis/about/?ref=page_internal.
6. PLAXIS // Ru.wikipedia. 12.07.2019. URL: ru.wikipedia.org/wiki/PLAXIS.
7. Puller M. Deep excavations: a practical manual. UK: Thomas Telford Ltd., 2003. 571 p.
8. Vermeer P. Column Vermeer // Plaxis Bulletin. 1998. № 5. URL: plaxis.com/content/uploads/2016/10/Plaxis-Bulletin-05.pdf.
9. ОДМ по слабым грунтам (ресурс ГЕОИНФО)

Рис. на заставке: plaxis.com/content/uploads/2016/10/Plaxis-Bulletin-05.pdf.