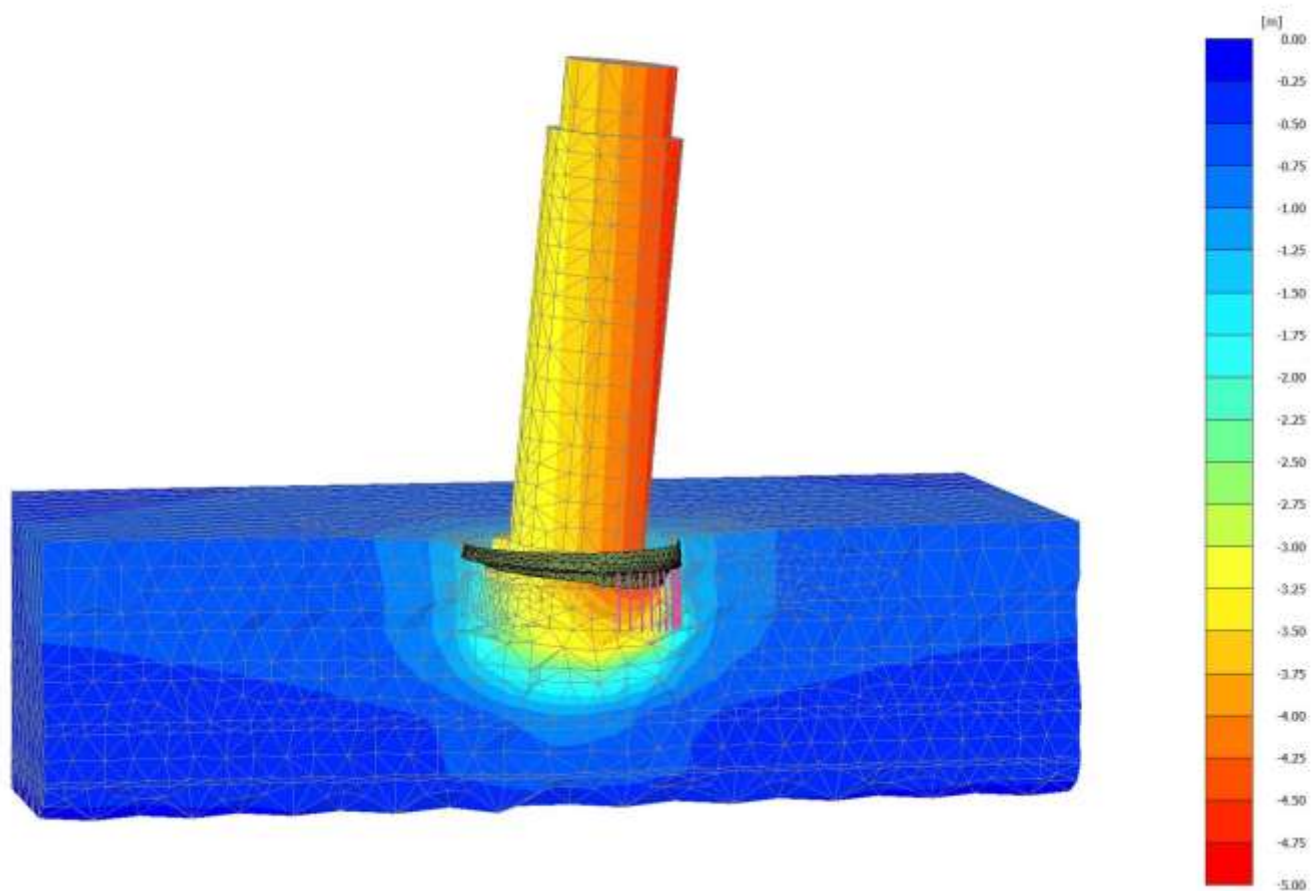


Рональд Бринкгреве о том, что такое численное моделирование (МКЭ) в геотехнике и о валидации моделей



Метод конечных элементов (численное моделирование) был признан перспективным для решения задач геотехники еще во времена СССР. Сегодня он все больше входит в практику проектирования и закрепляется в нормативных документах. Но для обоснования корректности расчетных моделей, применяемых для выполнения инженерных (в том числе геотехнических) расчетов численными методами, ведущие мировые организации в этой сфере — NAFEMS (Международная ассоциация по инженерному анализу и численному моделированию) и ASME (Американское общество инженеров-механиков) — разработали и предложили использовать процедуру валидации, первой составной частью которой является верификация. Предлагаем читателям обзор материалов доклада представителя Делфтского технологического университета (Нидерланды), члена геотехнического комитета NAFEMS и одного из разработчиков программы PLAXIS Рональда Бринкгреве [1]. Обзор посвящен валидации моделей, применяемых для геотехнических расчетов методом конечных элементов, основным источникам расхождений между реальными объектами проектирования и их численными моделями и организационным вопросам контроля качества численного моделирования при геотехническом проектировании. Этот доклад был сделан в 2013 году на 3-м Международном симпозиуме по вычислительной геомеханике COMGEO III (в нем, в свою очередь, излагаются основные идеи справочного издания того же автора [2]). Вопросы, которые рассматриваются в работе Бринкгреве, и сейчас весьма актуальны для

российской геотехники, так как действующая в нашей стране система сертификации программных комплексов, по существу, не дает никаких гарантий их корректности, а является по большей части формальностью.

Статья подготовлена при поддержке компании «НИП-Информатика» — партнера журнала «ГеоИнфо».

Аналитическая служба

info@geoinfo.ru

В последние десятилетия метод конечных элементов (МКЭ) все чаще используется для анализа напряженно-деформированных состояний и несущей способности проектируемых сооружений и их грунтовых оснований. Он фактически стал ежедневным инженерным инструментом, чему способствует рост производительности компьютеров и разработка надежного и удобного программного обеспечения. Однако МКЭ, как и другие методы, имеет свои ограничения. Неучет этих ограничений пользователями конечноэлементных программ может привести к ненадежным проектам.

Хорошую модель на основе МКЭ, приемлемо отражающую состояние и процессы, характерные для реального объекта проектирования, и позволяющую реалистично прогнозировать расчетные величины для проекта, разработать трудно, особенно для использования в геотехнике (в силу неоднородности и нелинейного поведения грунтовых оснований).

При использовании метода конечных элементов в геотехнике грунт моделируется с помощью комплексной геомеханической модели, определяющей зависимость «напряжение – деформация» и сформулированной в рамках сплошной среды. При создании конечноэлементной модели для геотехнического проекта наиболее важен правильный выбор комплексной геомеханической модели и соответствующего набора ее параметров. Это определяет основное ограничение при численном моделировании, поскольку любая, даже очень сложная, комплексная геомеханическая модель отражает реальное поведение грунта упрощенно (разработчикам PLAXIS удалось решить проблему с помощью создания основных моделей для глинистых и песчаных грунтов Soft Soil, Soft Soil Creep, Hardening Soil, Hardening Soil Small, которые представляют собой оптимальное соотношение между требуемым набором параметров, получаемых по данным стандартных инженерных изысканий, и степенью полноты описания основных механизмов поведения. Сегодня многие программы заимствуют модели грунтов, разработанные в PLAXIS. – *Ред.*).

В своем докладе [1], сделанном в 2013 году на 3-м Международном симпозиуме по вычислительной геомеханике, Рональд Бринкгреве (R. Brinkgreve) отмечает, что именно молодое поколение инженеров легко обучается использованию геотехнического конечноэлементного программного обеспечения и вроде бы хорошо справляется с численным моделированием. Однако это иногда происходит без полного понимания основ и ограничений комплексных геомеханических моделей и численных методов, применяемых в таких программах. В итоге руководители проектов или ведущие инженеры сталкиваются с тем, что получаемые при использовании разработанных численных моделей результаты не соответствуют ожидаемым на основании их опыта. Поэтому возникла необходимость в методических рекомендациях по проверке достоверности геотехнических конечноэлементных расчетов, что и побудило Бринкгреве написать справочное издание [2], а на его основе сделать доклад [1].



ЧТО ТАКОЕ ВАЛИДАЦИЯ И ВЕРИФИКАЦИЯ?

Когда речь идет о контроле качества результатов, полученных с помощью программ для численного моделирования, часто используются термины «валидация» и «верификация».

Верификация по формулировке Бринкгреве [1] – это процесс определения того, что компьютерная модель точно представляет лежащую в ее основе математическую модель и способна воспроизвести ее теоретическое решение, то есть что компьютер выдает данные, не противоречащие тем, которые ожидалось.

В отношении процесса верификации компьютерной модели часто используется термин «*эталонная (контрольная) задача*» (*benchmark*), что означает четко определенную задачу, для которой существует эталонное решение. Важна точность, с которой эталонное решение воспроизводится численной моделью.

Используется также термин «*сравнительный анализ по эталону*» (*benchmarking*), что означает оценку различий в результатах, полученных разными разработчиками моделей или при использовании разных программ для определенной эталонной задачи. Это понятие подчеркивает роль пользователя в верификации.

Валидация по формулировке автора доклада [1] – это процесс определения того, насколько достоверно компьютерная модель представляет реальный объект (верификация является первой составной частью валидации. – *Ред.*).

И верификация, и валидация важны как для разработчиков программ, необходимых при численном моделировании, так и для пользователей этих программ (и, соответственно, для тех, кто отвечает за применение результатов моделирования при проектировании реальных объектов).

И все же, как отмечает Бринкгреве [1], верификация – это в основном (но не полностью) задача для разработчиков программного обеспечения, а валидация в основном (но не полностью) является задачей для пользователей. Поэтому последним очень важно понимать возможности и ограничения моделей и методов, которые они используют.

ИСТОЧНИКИ РАСХОЖДЕНИЙ МЕЖДУ РЕЗУЛЬТАТАМИ МОДЕЛИРОВАНИЯ И РЕАЛЬНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

Бринкгреве [1] напоминает, что любая численная модель включает в себя несколько компонентов, являющихся источниками приближений (аппроксимаций) и ошибок, поэтому необходимо определить вклад каждого из этих компонентов в общее расхождение между результатами моделирования и реальными параметрами. Если при валидации удастся выявить причины отдельных расхождений, то появляется возможность усовершенствования модели и снижения общей ошибки моделирования, а также количественной оценки вариаций расчетных величин с учетом неопределенностей

параметров и диапазонов их возможных значений. Далее автор доклада [1] рассматривает основные источники расхождений между реальностью и ее численной моделью по отдельности.

1. Упрощения

Модели, основанные на методе конечных элементов, включают разные упрощения реальности, которые следует рассматривать в рамках процесса валидации. Бринкгреве [1] выделяет следующие из них.

Геометрические упрощения. Реальность всегда трехмерна, но большинство геотехнических моделей все еще являются двумерными. Упрощаются и детали, касающиеся моделирования поверхности земли, слоев грунта, сооружений, границ моделей и т.д.

Упрощения в поведении материалов. Одним из самых сложных материалов в мире является грунт. При численном моделировании геотехнических проблем его поведение представляется с помощью зависимости «напряжение – деформация». Чем сложнее модель, тем больше у нее модельных параметров, и все они должны быть определены по результатам полевых или лабораторных испытаний грунта. Модель как минимум должна отражать особенности его поведения, которые имеют отношение к решаемой инженерной задаче. При этом даже самая сложная модель все же упрощает реальное поведение грунта (поэтому сегодня нет одной универсальной модели для всех грунтов, а используются разные модели для разных грунтов, а зачастую и несколько моделей могут быть выбраны для одного грунта, с целью описания те или иных особенностей его поведения. – *Ред.*).

Упрощения в процессе строительства. Реализация геотехнических проектов часто включает в себя несколько этапов строительства с различными условиями нагружения, и все они должны учитываться при численном анализе, так как наиболее критические напряжения, деформации или ситуации с устойчивостью могут возникать на промежуточных этапах. Однако история строительства и нагружения при моделировании, как правило, упрощается, что может привести к расхождениям между моделью и реальностью.

2. Ошибки моделирования

Процесс валидации может помочь в выявлении, количественном определении, уменьшении и даже ликвидации ошибок моделирования. Автор доклада [1] называет следующие из них.

Ошибки ввода (ошибки во входных данных). Необходимой частью валидации является проверка корректности входных данных.

Ошибки дискретизации. Численное моделирование практической ситуации включает в себя *пространственную дискретизацию* – разделение грунта и проектируемого сооружения расчетной сеткой на ячейки (конечные элементы) с определенными

свойствами материала. Размер и порядок интерполяции элементов определяют точность, с которой аппроксимируется решение. После оптимизации сетки численное решение имеет тенденцию сходиться с теоретическим, но по сравнению с реальностью могут возникать занижения деформаций, завышение устойчивости и несущей способности и т.д. Во время расчета применяется также *дискретизация процесса нагружения* с помощью разделения этого процесса на этапы, или временные шаги. Чем больше шаги, тем больше модельное нагружение может отклоняться от реального, которое является непрерывным.

Ограничения методов. Численные методы имеют свои возможности и свои ограничения. Использование того или иного метода за пределами его ограничений приведет к ошибкам моделирования.

3. Комплексные геомеханические модели

В дополнение к тому, что говорилось о комплексных геомеханических моделях выше, Бринкгреве [1] перечисляет некоторые конкретные аспекты, которые необходимо учитывать при моделировании поведения грунта.

Псевдоупругое поведение. Хотя поведение грунта далеко не упругое, основой комплексной геомеханической модели часто является теория упругости. Истинно упругая модель основана на потенциале упругой деформации (упругом потенциале) или на функции энергии деформации. Если упругий потенциал не может быть определен, модель является псевдоупругой и может привести к диссипации энергии или к ее генерации, а это может дать недостоверные результаты расчетов. Наиболее известным примером истинно упругой модели является закон изотропной линейной упругости Гука. Если переформулировать жесткость в законе Гука и представить ее через простой степенной закон зависимости от напряжения, это приведет к псевдоупругой модели, которая может оказаться противоречивой. Конечно, только упругое поведение никогда не используется, но все же оно может доминировать в модели, особенно для условий разгрузки или повторного нагружения.

Неассоциированная пластичность. Для формулирования критерия разрушения Мора – Кулона используется теория пластичности в виде набора функций текучести, чтобы определить, будут ли возникать пластические деформации. Фактический расчет пластических деформаций основан на функции потенциала пластической деформации, которая по форме обычно сходна с функцией текучести. Разница между этими двумя функциями называется неассоциированной пластичностью. Для моделей, основанных на неассоциированной пластичности, не может быть получено однозначное решение. В результате численные модели могут страдать от вариаций механизмов и наличия нескольких разрушающих механизмов, которые зависят от численной дискретизации (размера ячеек сетки, шага интегрирования). Рассматривая простую модель Мора – Кулона с углом дилатансии, меньшим, чем угол внутреннего трения, следует понимать, что эта ситуация может привести к проблемам, связанным с неассоциированной пластичностью.

Разупрочнение. Что касается использования моделей разупрочнения в краевых задачах, некоторые исследователи продемонстрировали, что численные результаты могут

иметь сильную зависимость от сетки. Как только развиваются пластические деформации, материал будет локально разупрочняться, в то время как материал вне пластической зоны сохранит свою прочность. Чем мельче ячейки сетки, тем меньше пластическая зона, тем больше пластические деформации и тем строже отражается поведение разупрочнения. Это влияет не только на «постпиковое» поведение, но и на разрушающие нагрузки. При этом несущие способности при практическом применении могут сильно зависеть от сетки (в версии PLAXIS CE V20 появилась модель с разупрочнением для переуплотненных грунтов OC Clay. Кроме того, доступна пользовательская модель сверхпластичного грунта. – *Ред.*).

Недренированное поведение. Моделирование поведения в недренированных условиях при подходе с использованием эффективного (истинного) напряжения может быть очень чувствительным. Моделирование «недренированного» поведения иногда можно выполнять путем введения большой объемной жесткости для поровой воды, чтобы грунт в целом стал почти несжимаемым. Помимо того что поровое давление, рассчитанное таким образом, может оказаться неточным, следует понимать, что величина порового давления сильно зависит от используемой комплексной геомеханической модели и может быть неверной для конкретного типа моделируемого грунта. Если поровое давление является недостоверным, эффективное напряжение также будет неправильным. А принимая во внимание свойства эффективной прочности, можно понять, что результирующая недренированная прочность на сдвиг при этом также будет недостоверной.

4. Неопределенности исходных данных

Для реальных объектов проектирования есть много аспектов, которые не полностью известны или которые нельзя точно измерить в полевых условиях. Примерами неопределенностей являются выклинивание слоев грунта, линзы и пространственные вариации свойств грунтового основания.

Неопределенности могут привести к расхождениям между поведением модели и поведением реального сооружения и его основания. Далее Брингреве [1] рассматривает некоторые способы их устранения в процессе проектирования.

Подход с использованием общего коэффициента запаса. При расчете геотехнических коэффициентов запаса (устойчивости, запаса по несущей способности, запаса по сдвигу и пр.) в передовых численных моделях обычно используется следующее выражение:

Коэффициент запаса = Сопротивление сдвигу / Минимальное сопротивление сдвигу, необходимое для равновесия

В численном алгоритме при подходе с использованием общего коэффициента запаса сопротивление сдвигу в модели уменьшается до тех пор, пока не наступит геотехническое разрушение (потеря устойчивости или несущей способности), на основе чего определяется коэффициент запаса. Однако изменение сопротивления грунта сдвигу путем снижения его прочностных свойств может изменить характеристики поведения модели и она больше не

будет соответствовать фактическому материалу. Кроме того, может возникнуть вопрос о том, что делать с другими параметрами модели (например, с жесткостью или углом дилатансии). И наконец, если говорить о недrenированных грунтах, то как надо рассчитывать коэффициент безопасности – для дренированных или для недrenированных условий?

Подход с использованием частных коэффициентов запаса. Чтобы преодолеть расхождения из-за неопределенностей, можно применять и частные коэффициенты запаса для различных параметров. Использование частных коэффициентов по Еврокоду 7 основано на более трудоемком вероятностном подходе, при котором минимальный уровень достоверности определяется для сооружения в целом. Бринкгреве [1] особо подчеркивает, что *до сих пор нет единого аргументированного мнения о том, как применять Еврокод 7 при использовании МКЭ* (напомним, что статья вышла в 2013 году. – *Ред.*). В соответствии с этим документом возможно выполнять расчеты методом конечных элементов в соответствии с различными подходами к проектированию и схемам расчетов, но разные подходы могут привести к разным результатам. К тому же вопросы и замечания, упомянутые для подхода с использованием общего коэффициента безопасности, остаются такими же и здесь (в PLAXIS имеется подход с использованием частных коэффициентов запаса Design Approaches, который позволяет использовать российские нормативные коэффициенты. – *Ред.*).

Параметрический анализ. При рассмотрении влияния неопределенностей исходных данных в нагрузках, параметрах модели и даже геометрических вариациях может быть выполнен параметрический анализ, при котором выявляются основные параметры численной модели, влияющие на результаты, а их сочетания определяются максимальными и минимальными значениями величин. Выполняя расчеты с этими величинами, можно найти максимальные и минимальные значения требуемых результатов расчета и получить представление о работе сооружения в диапазоне прогнозируемых выходных данных. Это не устраняет расхождений между поведением модели и поведением реального объекта, но позволяет хотя бы учесть влияние неопределенностей исходных данных в параметрах модели. (В этом пункте речь идет об анализе чувствительности параметров, который позволяет определить степень влияния параметров элементов расчетной схемы на результат. Например, в качестве итогов такого анализа можно установить, что угол внутреннего трения грунта ИГЭ-3 и удельное сцепление ИГЭ-1 влияют на коэффициент устойчивости существенно больше, чем другие параметры. – *Ред.*)

5. Неправильная интерпретация результатов

Если даже была разработана модель, которая достаточно достоверно отражает состояние и поведение реального объекта, предостерегает Бринкгреве [1], это не является гарантией того, что расчеты будут проходить гладко. Чтобы получить правильное решение, могут понадобиться те или иные приемы, допуски и компромиссы. При этом надо доказать, что они не приведут к нереалистичной аппроксимации исходной модели.

Даже если расчеты успешно завершены и результаты получены, это еще не конец истории. Следует понимать, как указывает автор работы [1], что компьютерная модель не дает прямого решения инженерной проблемы – необходимо еще правильно

интерпретировать результаты использования компьютерной модели и должным образом преобразовать их для решения проблем проектирования конкретного объекта. Неправильная интерпретация может также привести к расхождениям между компьютерной моделью и реальностью.

Следует также понимать, добавляет Бринкгреве [1], что модель не может включать в себя все явления, которые имеют отношение к реальной ситуации. В этом отношении важную роль играет комплексная геомеханическая модель, но иногда каким-то образом надо учитывать и локальные механизмы (например, влияние суффозии не может быть выявлено с помощью стандартного подхода теории сплошной среды).

(Опыт и интуиция геотехника во многом определяют результаты моделирования. После завершения расчета геотехник должен просмотреть как минимум 4–5 результатов по деформациям, напряжениям, поровому давлению и пр., чтобы убедиться в соответствии полученной и ожидаемой картин. – *Ред.*)

МЕТОДЫ ВАЛИДАЦИИ

Для того чтобы уменьшить расхождения между реальным объектом и его численной моделью, необходимо выполнить ее валидацию. При этом процесс валидации в дополнение к проверке всей модели в целом должен проводиться и для отдельных компонентов моделирования, что дальше и рассматривает автор доклада [1].

1. Верификация

Прежде чем рассматривать валидацию численной модели для конкретной практической ситуации, важно проверить надежность математических моделей и методов при их использовании в компьютерной программе (то есть выполнить верификацию модели). Конечно, за это должны отвечать разработчики конечноэлементного программного обеспечения (в инструкции к программе PLAXIS приводится большое количество верификационных примеров по напряжениям, деформациям, консолидации, устойчивости, фильтрации, динамическому и температурному воздействиям и др. – *Ред.*), но и пользователям следует выполнять верификацию тех моделей и методов, которые имеют отношение к решению их инженерных задач.

Верификация компьютерных моделей выполняется путем сравнения результатов их применения для типичных (возможно, упрощенных) случаев с уже известными решениями для этих задач. При численном моделировании для геотехнических целей при верификации могут быть использованы следующие решения:

- **решения в рамках теории упругости для сплошных грунтовых сред и для сооружений** (например: по распределению осадок и напряжений под ленточным фундаментом на упругом грунте; по изгибам балок, плит и обшивок, подверженных различным нагрузкам, с учетом различных типов опор);
- **упругопластические решения** (например, по расширению цилиндрической полости для малых и больших деформаций);
- **решения по несущей способности** (например: по устойчивости вертикального откоса в связном грунте; по несущей способности жесткого круглого или ленточного фундамента на связном или несвязном грунте);

- **«упругие» решения при динамических воздействиях** (например: по одномерному распространению волны; по импульсной нагрузке на упругом полупространстве, то есть решение задачи Лэмба);
- **решения задач о движении жидкости или связанные с этим проблемы** (например: решение Дарси для напорного потока; решение задачи Муската для ненапорного потока сквозь однородную среду с вертикальными гранями; решение задачи по одномерной консолидации).

2. Анализ граничных условий

Для инженерных задач, связанных с анализом несущей способности или устойчивости, а также задач, для которых нет аналитических решений (что бывает для большинства практических ситуаций), могут использоваться достаточно краткие решения, основанные на теоремах верхней и нижней границ, то есть на анализе граничных условий.

Если для внешней разрушающей нагрузки на сплошную среду можно найти решение, при котором выполняются условия как верхней, так и нижней границы, решение считается истинной разрушающей нагрузкой (в соответствии с теоремой о единственности решения).

Это редко бывает для практических ситуаций, но все же полезно найти решения для верхней и нижней границ, которые достаточно близки друг к другу, – и тогда они могут быть использованы для валидации численного решения.

Бринкгреве [1] ссылается на публикации Лямина и Слоана (Lyamin, Sloan, 2002), потративших много сил на решения для верхней и нижней границ и разработавших алгоритм, основанный на конечных элементах и линейном программировании, который может использоваться для некоторых геотехнических ситуаций (в том числе для склонов, насыпей, фундаментов и выемок). Предложенный ими метод может показаться похожим на метод конечных элементов, но он основан на других принципах, поэтому вполне может использоваться для валидации решений по устойчивости или несущей способности, полученных с помощью истинных конечноэлементных моделей. При этом, как отмечает автор доклада [1], надо учитывать, что решения по верхней границе основаны на ассоциированной пластичности, которая может быть причиной различий по сравнению с результатами использования конечноэлементной модели, для которой проводится валидация.

3. Валидация комплексных геомеханических моделей и их параметров

Выбор комплексной геомеханической модели должен основываться на оценке ее возможностей и ограничений для описания существенных особенностей поведения грунта в конкретной ситуации. В этом отношении модель и ее параметры как бы отражают поведение «искусственного грунта». Но она используется в численной модели, которая должна отражать поведение грунта в реальных условиях. Поэтому сначала имеет смысл оценить поведение «искусственного грунта» в отдельных точках пространства напряжений при моделировании лабораторных испытаний (например, «дренированных» и «недренированных» трехосных, одометрических, на простой сдвиг, при постоянной скорости деформации). Результаты моделирования лабораторных тестов можно сравнить с данными реальных испытаний, что даст представление о возможностях и ограничениях комплексной геомеханической модели для описания конкретных особенностей поведения

грунта и о точности, с которой она это делает. Более того, модельные параметры могут быть оптимизированы для наилучшего соответствия данным реальных испытаний. (Удобным инструментом предварительного анализа исходных данных является виртуальная лаборатория Soil Test, включенная в состав PLAXIS. Кроме стандартных компрессионных и трехосных испытаний в ней есть виброиспытания и полевые прессиометрические испытания. – *Ред.*)

При этом Бринкгреве [1] отмечает, что траектории напряжений, уровни напряжений и уровни деформаций в реальных условиях могут значительно отличаться от таковых при лабораторных испытаниях грунта. Следовательно, хорошее соответствие между результатами смоделированного испытания и данными реального испытания еще не является гарантией того, что «искусственный математический грунт» является хорошим представлением реального грунта при практическом применении. Тем не менее численное моделирование лабораторных испытаний важно для качественного понимания поведения модели и поэтому должно учитываться в процессе валидации.

В отличие от лабораторных испытаний грунта, испытания в полевых условиях нельзя упростить до модели из отдельных точек (элементов) пространства напряжений. Однако некоторые полевые испытания (например, прессиометрические) все же можно смоделировать как краевую задачу с использованием конечноэлементной модели. Такое моделирование может быть полезным для оптимизации свойств жесткости и прочности *in situ*.

В рамках валидации параметров модели для инженерного применения можно было бы также выполнить предварительный анализ по одномерной колонке грунта, представляющей собой профиль грунта в месте расположения проектируемого объекта. Если проект предполагает в основном вертикальную нагрузку, анализ грунтовой колонки может использоваться для проверки соответствия рассчитанных осадок ожидаемым на основе инженерной оценки или традиционных расчетов.

Кроме того, если надо рассмотреть поведение грунта, зависящее от времени (например, консолидацию или ползучесть), первоначальный анализ колонки грунта может использоваться для валидации модельных параметров и начальных условий, ведущих к определенной скорости осадки в начале развития проекта. Эту скорость можно сравнить с результатами измерений, произошедших в историческом прошлом, или с имеющимися данными наблюдений.

4. Валидация сетки конечных элементов и границ модели

Требуется проверить, не зависят ли результаты расчетов от выбора границ расчетной схемы. Это можно грубо оценить, переделав численный анализ с границами моделей, взятыми дальше, и сравнив результаты, но это может оказаться трудоемким процессом.

После любого численного анализа как минимум следует удостовериться, что изменения напряжений и деформаций вблизи границ модели относительно невелики. Этого не требуется делать вблизи вертикальных границ симметрии, но при этом должно быть подтверждено, что условия симметрии применяются должным образом (например, не должно быть потока подземных вод через границу симметрии). (Как правило, проверяют, не влияют ли вертикальные границы на расчеты устойчивости, а горизонтальные – на расчеты осадок. – *Ред.*)

Для динамического анализа следует убедиться, что на границах модели нет «паразитных» отражений. Лучший способ это проверить – создать в модели компьютерную анимацию скоростей.

Дискретизация модели (то есть деление ее на элементы с помощью сетки) в зависимости от типа используемых элементов определяет точность, с которой аппроксимируется численное решение. В целом более мелкая сетка конечных элементов дает более точное решение. При этом полезны локальные уточнения путем уменьшения ячеек сетки (в отличие от общего уточнения) в тех частях модели, в которых будут возникать концентрации напряжений или деформаций.

В дополнение к точности сетки необходимо подтвердить, что качество самих элементов является приемлемым. Например, следует избегать очень тонких (удлиненных) элементов. «Тонкость» элемента обычно выражается как соотношение длин его сторон, точнее как отношение радиуса максимального внутреннего круга к радиусу минимального внешнего круга, нормализованное относительно размера оптимального элемента (равностороннего треугольника или квадрата). Эти значения в настоящее время доступны в большинстве коммерческих конечноэлементных программ и должны быть проверены. По крайней мере необходим визуальный контроль.

5. Валидация начальных условий

Необходимо задать начальные условия в модели и удостовериться в том, что исходное напряженное состояние в ней соответствует реальной ситуации. Начальные условия могут включать в себя компоненты общего или эффективного напряжения, поровое давление, давление предуплотнения, коэффициент пористости и другие параметры состояния в зависимости от используемой комплексной геомеханической модели (моделей).

Упрощенная процедура генерации начальных напряжений состоит в том, чтобы интегрировать вес колонки грунта над каждой точкой пространства напряжений для вычисления общего вертикального напряжения, затем вычесть поровое давление для расчета вертикального эффективного напряжения, а затем умножить на заданное значение K_0 для расчета бокового эффективного напряжения, при этом принять все компоненты напряжения сдвига равными нулю. Однако этот « K_0 -метод» не гарантирует равновесия, поэтому при его использовании надо подтвердить, что результирующее напряженное состояние находится в равновесии и что принять начальные напряжения сдвига равными нулю было допустимо (близко к реальности).

Есть и альтернативная процедура: начальные напряжения могут быть рассчитаны путем нагружения модели гравитационными силами, связанными с собственным весом материалов. Несмотря на то что использование «гравитационного метода» приведет к состоянию равновесия в конце расчета, он не может должным образом отражать реальное начальное напряженное состояние, поскольку не учитывается полная история нагружения среды. Поэтому в дополнение может потребоваться выполнение вычислений для моделирования прошлых условий нагружения, которые влияют на напряженное состояние в начале рассматриваемого технического применения. Здесь Бринкгреве [1] обращает внимание читателей на то, что недренированные грунты во время начальных расчетов напряжений могут нуждаться во временном моделировании как дренированные, чтобы избежать генерации нереалистичных избыточных поровых давлений.

При анализе эффективных напряжений важно создать реалистичное распределение начальных поровых давлений. Простые распределения гидростатических поровых давлений могут быть сгенерированы на основе уровня грунтовых вод (УГВ), тогда как в более сложных ситуациях может потребоваться отдельный расчет для потока подземных вод. В последнем случае требуются реалистичные значения проницаемости, которые часто трудно получить по данным исследований грунта. Поэтому разработчики моделей часто неправильно используют «инструмент УГВ» для создания более сложных распределений поровых давлений на основе негоризонтальных участков уровня. При таком подходе следует соблюдать осторожность, поскольку в действительности негоризонтальные уровни подразумевают потоки грунтовых вод и, возможно, негидростатические распределения поровых давлений. Следует избегать «скачков» УГВ, так как это приведет к аналогичным скачкам порового давления на всем протяжении модели, что крайне нереалистично.

6. Другие методы валидации

В дополнение к валидации компонентов модели существуют различные способы проверки модели в целом путем сравнения результатов, полученных с помощью численного моделирования, с другими источниками. Бринкгреве [1] рассматривает некоторые из этих способов.

Измерения. Данные измерений, полученные при мониторинге во время развития проекта (деформации, поровые давления, усилия в конструкциях и т.д.), могут использоваться не только для проверки результатов использования численной модели, но и для обновления используемых в ней параметров при условии, что измерения были выполнены достаточно точно и надежно. Обновленную таким путем модель можно применять для более точного прогнозирования предстоящих этапов строительства (это одно из преимуществ использования программы PLAXIS в работе над сложными проектами. – *Ред.*).

Получение расчетных графиков, диаграмм и таблиц. В прошлом, когда компьютерное моделирование не было так распространено, в большом количестве публиковались расчетные графики, диаграммы и таблицы для отдельных инженерных и конструкторских аспектов геотехники (осадок, устойчивости, деформаций и др.). Но и теперь они все еще важны, хотя и носят довольно общий характер и могут быть не очень точными. Дело в том, что расчетные графики и пр. могут оказать большую помощь при валидации численных моделей, давая представление о порядках величин, которые следует ожидать в определенных ситуациях.

Использование другого программного обеспечения. Для получения независимых решений в целях сравнения с результатами применения компьютерных конечноэлементных моделей могут применяться другие программные инструменты (электронные таблицы с простыми правилами расчетов, аналитические методы с помощью обычного программного обеспечения для геотехнического анализа, передовое программное обеспечение для двумерного или трехмерного численного моделирования, отличного от изначально использованного при валидации модели).

7. Использование эталонных задач

Эталонная (контрольная) задача в рамках верификации и валидации – это четко определенная задача, для которой известно эталонное решение.

Эталонное (контрольное) тестирование – это оценка вариаций результатов, полученных разными разработчиками моделей или другого компьютерного программного обеспечения для одной и той же четко определенной задачи.

Большинство эталонных задач – упрощенные практические задачи, для которых не существует аналитических решений, а имеются только шаблонные численные решения. Разработчик той или иной модели может использовать такую задачу, чтобы проверить, получает ли он сходное решение. При этом небольшое отклонение (в несколько процентов) от эталонного решения является вполне приемлемым. Более высокие отклонения иногда могут быть допустимыми в зависимости от типа задачи и требуемого уровня детализации.

Использование опубликованных решений эталонных задач для геотехники показало, что могут возникнуть довольно большие различия с результатами расчетов с помощью численных моделей, и это подчеркивает необходимость валидации последних. С более подробной информацией об эталонных задачах Бринкгреве [1] предлагает ознакомиться в написанном им справочном издании [2].

НЕТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ

Существуют и нетехнические проблемы, связанные с процессом валидации. Далее Бринкгреве [1] кратко рассматривает две из них, являющиеся с его точки зрения основными.

1. Достаточность или нехватка достоверных результатов изысканий, в частности данных по грунту. Тут важно убедить заказчиков в необходимости достаточных и высококачественных исследований грунтов оснований проектируемых объектов и других условий будущих строительных площадок. Это не только уменьшит неопределенности в грунтовых и других условиях, но и облегчит валидацию параметров моделей, снизив риск того, что проект будет неадекватным, если он будет основан на недостаточных или ошибочных геотехнических данных.

2. Распределение ответственности между людьми и организациями, вовлеченными в различные аспекты численного моделирования. Во-первых, инженер-геотехник (пользователь конечноэлементного программного обеспечения) несет ответственность за создание компьютерной модели, определение необходимых модельных параметров и надлежащую валидацию модели. Она должна точно отражать состояние и поведение реального проектируемого объекта и его основания.

Во-вторых, руководитель инженера, выполняющего моделирование, или руководитель проекта несет ответственность за контроль того, что созданная модель достаточно достоверно отражает реальность и что разработанный на ее основе проект будет иметь требуемый уровень безопасности. Эта ответственность включает проверку того, как и в какой степени была выполнена валидация модели, путем постановки правильных вопросов. В обязанности руководителя также входит забота о наставничестве,

инструктировании и обучении более молодых инженеров, чтобы они могли развивать необходимые навыки в области численного моделирования в дополнение к своим геотехническим навыкам.

В-третьих, организация несет ответственность за то, чтобы разработка и использование в ней численных моделей на всех уровнях вносили вклад в обеспечение высокого качества проекта. Организация должна быть структурирована таким образом, чтобы в ней было достаточно знаний и возможностей не только для создания численных моделей, но и для их валидации и контроля этого процесса начиная с ранней стадии численного моделирования и заканчивая интерпретацией результатов для геотехнического проектирования.

И наконец, разработчик программного обеспечения несет ответственность за создание программ, которые были бы в достаточной степени верифицированы и не содержали бы ошибок программирования. Он также обязан должным образом документировать модели и методы, использованные в этом программном обеспечении, и делать эту документацию доступной для пользователей.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

- Валидация позволяет либо доказать, что геотехническая конечноэлементная модель и получаемые при ее использовании данные приемлемо отражают состояние и поведение реального объекта проектирования и его грунтового основания, либо усовершенствовать модель до нужного уровня.
- Для правильной валидации модели и уменьшения ошибок моделирования необходимо понимание причин расхождений между реальным объектом проектирования и его численной моделью.
- Хорошее понимание возможностей и ограничений комплексных геомеханических моделей и лежащих в их основе теорий необходимо для того, чтобы решить, какая из них лучше всего подходит для создания геотехнической конечноэлементной модели, приемлемо отражающей реальность.
- Валидация начинается с верификации методов и моделей, использованных в программном обеспечении. Далее проводится валидация как модели в целом, так и различных ее компонентов (геометрии, границ модели, поведения материала, сетки конечных элементов, начальных условий, этапов расчета).
- В рамках процесса валидации полезно извлечь уроки из ситуаций, которые были проанализированы в прошлом, то есть сравнить результаты использования численной модели с решениями эталонных (контрольных) задач.
- Для получения качественных численных моделей и их валидации важно иметь достаточные и качественные результаты испытаний грунтов оснований проектируемых объектов и других условий будущих строительных площадок, о чем должен быть вовремя осведомлен заказчик.
- В проектно-строительной организации должно быть достаточно знаний и возможностей для создания численных моделей и их валидации, а также контроля этого процесса, начиная с ранней стадии численного моделирования и заканчивая интерпретацией результатов для геотехнического проектирования.

Источники

1. *Brinkgreve R.B.J.* Validating geotechnical finite element models // Proceedings of the 3-rd International Symposium on Computational Geomechanics (COMGEO III), Krakov, Poland, 21–23 August, 2013. Rhodes, Greece & Swansea, UK: International Center for Computational Engineering. P. 292–304.
2. *Brinkgreve R.B.J.* Validating numerical modelling in geotechnical engineering. UK: NAFEMS, 2013.

Список литературы, использованный автором доклада [1]

- Brinkgreve R.B.J. (2013), Validating Numerical Modelling in Geotechnical Engineering, NAFEMS, UK.
- Carter J.P., Desai C.S., Potts D.M., Schweiger H.F., Sloan S.W. (2000). Computing and computer modelling in geotechnical engineering. Proc. GeoEng 2000, Int. Conf. on Geotechnical and Geological Engineering, Melbourne. Technomic, 1157–1252.
- Lyamin A.V., Sloan S.W. (2002). Upper Bound Limit Analysis Using Linear Finite Elements And Non-Linear Programming. International Journal For Numerical And Analytical Methods In Geomechanics, Vol. 26, 181–216.
- Lyamin A.V., Sloan S.W. (2002). Lower Bound Limit Analysis Using Non-Linear Programming, International Journal For Numerical Methods In Engineering, Vol. 55, 573–611.
- NAFEMS i.c.w. ASME (2009). What is Verification and Validation? Leaflet. NAFEMS, UK. www.nafems.org.
- Potts D.M., Zdravkovic L. (1999). Finite element analysis in geotechnical engineering: Theory. London, Thomas Telford.
- Potts D.M., Zdravkovic L. (2001). Finite element analysis in geotechnical engineering: Application. London, Thomas Telford.
- Schweiger H.F. (1998), Results from two geotechnical benchmark problems. Proc. 4th European Conf. Numerical Methods in Geotechnical Engineering (ed. A. Cividini), Springer, 645–654.
- Schweiger H.F. (2002), Results from numerical benchmark exercises in geotechnics. Proc. 5th European Conf. Numerical Methods in Geotechnical Engineering (ed. P. Mestat), Presses Ponts et chaussees, Paris, 305–314.
- Schweiger H.F. (2006), Results from the ERTC7 benchmark exercise, Proceedings NUMGE 2006 (ed. H.F. Schweiger), Taylor & Francis, London, 3–8.

Заглавное фото: <https://twitter.com/wesigeotecnica/status/568774597140742144/photo/1>