

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СОЗДАНИЯ РАСЧЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ ГРУНТОВЫХ ОСНОВАНИЙ

Л.А. Строкова

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия,  
E-mail: sla@tpu.ru*

**Аннотация.** Рассмотрена технология создания расчетных моделей грунтовых оснований, указаны достоинства и недостатки аналитических и компьютерных (цифровых) расчетных моделей. Приведены этапы построения цифровой расчетной модели, предложены пути совершенствования технологии создания таких моделей. Рассмотрены примеры реализации отдельных процедур данной концепции.

**Abstract.** The technology of making of the soils calculation models is considered, highs and lows of analytical and numerical models are specified. Stages of construction of numerical model are resulted, ways of perfection of technology of making of models are offered. Examples of realization of the given concept are considered. Examples of realisation of separate procedures of the offered concept are considered.

Вопросы разработки расчетных моделей, адекватно отражающих поведение пород при взаимодействии с инженерным сооружением, имеют научно-прикладное значение в инженерной геологии. Главной целью составления расчетной модели основания является обоснование основных параметров проекта, таких как, тип основания; конструкции, материал и размеры фундаментов на основе предполагаемых предельных состояний, определяющих уравнений поведения грунта под нагрузкой; при максимуме эффективности инвестиций и допуская уровень риска достижения основанием предельных состояний и последствий.

Технология создания расчетных моделей следующая. На первом этапе создания модели выполняется изучение теоретических основ и сбор информации об объекте, выявляются причинно – следственные связи между переменными описывающими объект, а именно, изучается взаимодействие системы инженерное сооружение – грунтовый массив, ее основных составляющих компонентов, устанавливаются предполагаемые предельные состояния основания.

При этом должны учитываться не только нагрузки от проектируемого сооружения, но также возможное неблагоприятное влияние внешней среды, приводящее к изменению физико-механических свойств грунтов (например, под влиянием поверхностных или подземных вод, климатических факторов, различного вида тепловых источников и т.д.).

Следующий этап – построение собственно математической (расчетной) модели. На этом этапе на основе суждений об экспериментальном поведении грунта выбирается подходящий математический аппарат для описания его работы в качестве основания. Определяются входные и выходные данные, принимаются упрощающие предположения об определяющих соотношениях, о граничных и начальных условиях объекта, двухмерной или трехмерной модели, стадии производства работ и/или истории напряжений, т.е. осуществляется идеализация – переход от исходной физической системы к математической модели.

Далее устанавливаются окончательные параметры моделей с учетом условия функционирования объекта, выбирается метод решения либо при помощи формул (если имеется аналитическое решение уравнений), либо численных методов. Методологическое обеспечение процесса разработки аналитических моделей грунтовых оснований создано и отлажено. Существуют нормативы, регламенты по

процедуре создания таких моделей. К недостаткам аналитических моделей относятся: необходимость использования системы упрощающих предпосылок о поведении грунтового массива, невозможность описания эффектов нелинейности и необратимости деформаций в поведении грунтов. Цифровые модели появились сравнительно недавно, стали стремительно занимать свою нишу в проектировании, благодаря высокой точности решений, возможности учета множества факторов при описании системы «грунтовой массив – инженерное сооружение». Методологическое обеспечение процесса разработки таких моделей находится в самом начале становления. После вычислений полученное решение сопоставляется с предполагаемым решением, проводится контроль погрешности моделирования. Результаты, полученные по модели, сопоставляются либо с имеющейся об объекте информацией или проводится эксперимент и его результаты сопоставляются с расчетными.

Современные комплексы программ для оценки напряженно-деформированного состояния ABAQUS, ANSYS, COSMOS, NASTRAN, PLAXIS, LS-DYNA и др., в которых используется метод конечных элементов, позволяют получать численные решения при расчете конструкций на статические и динамические нагрузки для широкого класса материалов с различными механическими характеристиками и поведением. Несмотря на значительное количество работ, посвященных исследованию закономерностей сложного поведения горных пород при разных видах нагружения, большинство из них описывают лишь некоторые аспекты поведения отдельных грунтов конкретных районов. Мало освещенными в публикациях остаются вопросы выбора уравнений поведения грунтов при нагружении. Слабыми звеньями существующей технологии создания цифровых расчетных моделей, требующими совершенствования, являются: выбор определяющего уравнения; задание параметров модели; анализ результатов или тестирование модели на соответствие.

Настоящая работа посвящена исследованию некоторых моментов создания цифровых расчетных моделей грунтовых оснований.

#### **Процедура «Выбор определяющего уравнения грунта»**

К сожалению, нет универсальной теории, объясняющей все феномены поведения грунта при нагрузках, поэтому существует нечеткое множество различных теорий таких как: линейной и нелинейной упругости, упругие модели с изменяющимися модулями упругости, гиперупругости, гипоупругости, идеальной упругопластичности, пластичности с упрочнением (изотропным, кинематическим и смешанным), гиперпластичности, гипопластичности, вязкоупругости, вязкопластичности, вязко-гипопластичности, и соответственно множество уравнений, объясняющих различные аспекты поведения грунтов. Для повышения качества и надежности выполняемых расчетов грунтовых оснований необходимо структурировать информацию о поведении грунтовых массивов при нагружении.

Одна из первых классификаций представлена в работе G.Gudehus [9]. В этой классификации выделены три класса – упругость, пластичность, вязкость с указанием характерных особенностей каждого класса. В работе Т. Шанца [13] идеи Г. Гудеуса о классах получили дальнейшее развитие, обобщены сведения о пригодности использования конкретных моделей для расчетов. Всего им рассмотрено 5 групп моделей.

Уникальный по объему обзор определяющих уравнений сделан Lade [10], который описал типы и компоненты определяющих уравнений, предложил классифицировать определяющие уравнения по совершенству описания различных

эффектов поведения грунта при нагрузках, возможности определения параметров традиционными экспериментами на 3 категории.

Существующие обзоры нацелены на теоретическое осмысление многообразия моделей, но им присущ существенный недостаток – отсутствие инструментария для поддержки решения инженера – расчетчика о выборе определяющего уравнения. В качестве такого инструмента нами предложено использовать «дерево решений».

В качестве базы данных взяты опубликованные материалы [10], для 31 модели, охарактеризованные 18 признаками. Разведочный анализ проводился алгоритмом «Дерево решений» аналитического пакета Deductor.

Модели были отфильтрованы по классам грунтов (скальные и полускальные, дисперсные связные и несвязные), для каждого класса было построено дерево решений, отобраны решающие правила и значимые факторы [2].

Фильтр для несвязных дисперсных грунтов позволил классифицировать только 4 модели из 15: закон Гука, закон дилатансии Rowe, модель Darve и гипопластические модели Kolymbus, Gudehus, Bauer. Было отобрано 4 решающих правила и 2 значимых фактора.

Фильтр для связных дисперсных грунтов позволил классифицировать только 8 моделей из 15; это следующие: модель Drucker-Prager; закон Гука; модель Plaxis Hardening, авторы Brinkgreve и Vermeer; Modified Cam Clay, авторы Roscoe и Burland; модель Elasto-Viscoplastic, предложенную Adachi, Oka; модель Darve; модель Nor-Sand, предложенную Jefferies; модель Fuzzy Set Plasticity, предложенную Klisinski. Было отобрано 8 решающих правил и 5 значимых факторов.

Фильтр для скальных и полускальных грунтов позволил классифицировать еще 5 моделей из 16 моделей: модель Drucker-Prager; закон Гука; модель Plaxis Hardening; модель Darve; модель Fuzzy Set Plasticity. Было отобрано 5 решающих правил и 4 значимых фактора.

Выполнение разведочного анализа данных показало принципиальную возможность использования предложенного подхода при выборе определяющих уравнений для решения различных геотехнических задач.

#### **Процедура «Определение и назначение параметров цифровой расчетной модели»**

В практике инженерно-геологических изысканий определение параметров грунтов проводится в зависимости от стадии проектирования для: 1) описания инженерно-геологических условий площадки; 2) выделения инженерно-геологических элементов; 3) установления параметров цифровой расчетной модели, требующих дополнительных: экспериментов, обработки результатов, приборов и средств измерений (новая задача, еще никак нерегламентированная).

Использование в расчетах сложных определяющих уравнений зачастую требуют сложного дорогостоящего лабораторного оборудования, при этом методика выполнения лабораторных работ не всегда является общепризнанной, закрепленной в нормативных документах [1]. Количество необходимых для расчетов параметров варьирует в значительных пределах от двух до четырех десятков. Время на установление параметра изменяется от нескольких минут (по корреляции между показателями свойств) до двух недель (компрессионные, трехосные испытания) и до полугода и более (при определении параметров ползучести). Следует также заметить, что некоторые параметры сложных определяющих уравнений не имеют физического смысла, а необходимы для более точной аппроксимации экспериментальных кривых.

В [3] с разной степенью детальности изложены методики определения некоторых параметров, используемых в расчетах.

Непременным этапом создания расчетной модели должна стать имитация лабораторных и полевых испытаний. Важный момент этого этапа – проверка двух условий: 1) правильности выбора определяющего уравнения; 2) правильности назначения входных параметров, их калибровка, под которой подразумевается совпадение расчетных данных и кривой, полученной при лабораторном, либо полевом испытании грунта.

О значимости определяющих уравнений для оценки напряженно-деформированного состояния грунтов свидетельствуют, например, кривые оседания поверхности, связанные с проходкой метрополитена, рассчитанные в программном комплексе «PLAXIS» [5–7,12–15] с тремя разными моделями: а) упруго-пластическая модель с изотропным упрочнением (HS); б) упруго-пластическая модель с изотропным упрочнением и учетом жесткости малых деформаций (HSS); в) упругая идеально-пластическая модель Мора–Кулона (MC) при прочих равных условиях [4]. Из этих трех признана менее подходящей для расчетов модель MC. Что касается упруго-пластических моделей с изотропным упрочнением HS и HSS, то они хорошо зарекомендовали себя.

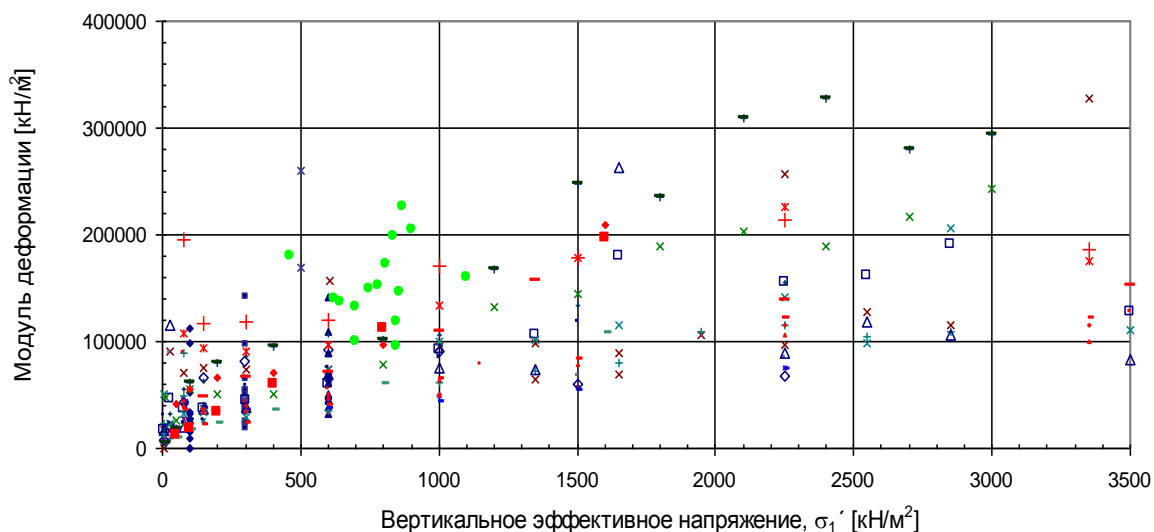
Условиями для окончания тестирования модели на соответствие являются достигнутая точность решения и скорость сходимости решений.

Трудности и многократные прогоны модели появляются при назначении параметра по интервальной оценке показателя, например, модуля деформации. Например, на рис. 1 представлен изменение модуля деформации миоценовой молассовой полутвердой глины по данным компрессионных,  $K_0$ -трехосных и полевых испытаний (дилатометром). Технология назначения единственного значения для расчета осадки не регламентирована. Нами предлагается выполнять моделирование экспериментальных работ для обоснования назначаемых в расчетах параметров грунта.

Так, при компрессионном испытании было установлено, что модуль деформации глины тугопластичной изменяется в интервале 2,2...10,1 МПа в интервале нагрузок 2...250 кПа при первом нагружении и 6,0...75,4 МПа при повторном нагружении [5].

Имитация компрессионных испытаний осуществлялось при помощи упруго-пластической модели с изотропным упрочнением PLAXIS Hardening Soil. Эта модель требует назначения 3-х параметров упругости (вместо одного модуля деформации, годного для аналитической модели), а именно: модуля упругости при первичном нагружении  $E_{50}$ , модуля упругости при разгрузке - вторичном нагружении  $E_{ur}$  и параметра  $Ohde$   $m$ , описывающего степень кривизны компрессионной кривой [11].

Варьирование позволило обоснованно назначить эти 3 параметра:  $E_{50}=5$  МПа,  $E_{ur}=35$  МПа,  $m=0,8$ . При этих значениях отклонения расчетной и реальной компрессионной кривой минимальны.



**Рис. 1. Разброс значений модуля деформации полутвердой глины по данным компрессионных,  $K_0$ -трехосных и полевых испытаний (дилатометром)**

Описанная методика калибровки параметров по данным лабораторных испытаний может быть использована при подготовке рекомендаций по созданию цифровых расчетных моделей.

*Процедура «Тестирование расчетных моделей»*

Для увеличения точности решения приходится рассматривать множество расчетных схем с варьированием входных параметров – это приводит к значительным затратам времени и финансов для рассмотрения каждого из вариантов.

Поэтому для оптимизации процесса составления цифровой расчетной схемы разумно определить самые чувствительные параметры. Анализ чувствительности позволяет оценить насколько важны те или иные параметры для системы в целом, насколько корректно решение задачи, к каким параметрам чувствительно найденное решение. Кроме этого, на основании расчета можно построить упрощенную модель системы. Как можно выполнить анализ чувствительности, представлено в [5]. Анализ чувствительности был проведен для расчета котлована с применением ограждающей заанкерной стенки. Была составлена 21 расчетная схема с вариацией типа грунта (глина или песок), коэффициента бокового давления при отсутствии боковых деформаций  $K_0$ , коэффициент Пуассона  $\nu$ , начальной и изгибающей жесткости стены. Для расчетов применялась модель Hardening Soil (PLAXIS). Выходными параметрами расчетов являются эффективные горизонтальные напряжения в грунтовом массиве позади стенки и горизонтальные смещения стенки.

В качестве эталонов были приняты расчеты, выполненные для двух типов геологического разреза в условиях нормальной консолидации и первоначальной жесткости стены. По каждому варианту расчета определена площадь под графиком кривой, приняв ее параметр чувствительности выходных параметров к изменению входного параметра. Найден вариант с наибольшим отклонением выходных параметров (вариант наихудшего случая). Установлено, что присутствие в разрезе глин, претерпевших в геологическое время более высокое напряжение, чем современное, приводит к значительному увеличению смещений, чем при

присутствии песков. Увеличение коэффициента бокового давления при отсутствии боковых деформаций  $K_0$  для песчаного разреза сопровождается значительным увеличением горизонтальных эффективных напряжений, по сравнению с глинистым.

Следовательно, анализ чувствительности параметров является полезным инструментом для тестирования расчетных моделей. Простая оценка площади графиков напряжений и деформаций или величины осадки в зависимости от модуля упругости и т.п. способна обнаружить влияние входных параметров на результаты расчета. Назначение входных параметров с оценкой чувствительности позволяет уменьшить трудозатраты на расчеты при сохранении точности вычислений, а также провести оптимизацию базовых параметров при экспериментальном определении свойств грунтов. Важным моментом применения модели является наблюдения за ходом строительства и эксплуатации объекта для подтверждения результатов моделирования. Накопление мониторинговых данных позволит скорректировать назначенные трудноопределимые параметры.

Таким образом, цикл проведенных работ может служить основой для разработки комплексной системы стандартизации по созданию расчетных моделей оснований.

Он включает следующие элементы системы: выбор возможного предельного состояния грунтового массива, подходящего определяющего уравнения в зависимости от типа грунтовых условий и предполагаемых предельных состояний основания; определение параметров стандартными и нестандартными методами; выявление соответствия определяющего уравнения грунта методом моделирования лабораторных испытаний; калибровка параметров; выполнение анализа чувствительности выходных параметров к изменению входных параметров; окончательное назначение параметров и расчет предельного состояния; сравнение с предельно-допустимыми значениями расчетного сопротивления грунта основания, предельными деформациями, назначение параметров сооружения.

Наши предложения по созданию нормативных документов о цифровой расчетной модели:

- 1) в нормативные документы (своды правил или рекомендации) по проектированию оснований должны быть внесены типичные значения и методики определения некоторых параметров грунтов таких, как коэффициент бокового давления  $K_0$ , угол дилатансии, и др.;
- 2) особое внимание в документах необходимо уделить классификации определяющих уравнений грунтов, что внесет единообразие в расчеты;
- 3) неизменными этапами создания и применения цифровой расчетной модели должны быть имитация лабораторных и полевых испытаний и мониторинг за осуществлением проекта.

Таким образом, разработка нормативных документов по созданию и применению цифровых расчетных моделей позволит существенно уменьшить трудозатраты и временные ресурсы на этапе разработки расчетной модели; сократить неопределенности в установлении параметров грунтов при лабораторных испытаниях и при назначении их в качестве входных; в целом будет способствовать улучшению качества проектирования; сокращению сроков подготовки специалистов к работе с программными комплексами.

Направлениями для дальнейших исследований являются: пополнение базы данных по определяющим уравнениям грунтов; оптимальное планирование вычислительного эксперимента при калибровке параметров; методики тестирования моделей.

### Литература

8. Болдырев Г.Г. Методы определения механических свойств грунтов. Состояние вопроса [Текст]: монография / Г.Г. Болдырев. – Пенза: ПГУАС, 2008. – 696 с.
9. Строкова Л.А. Использование алгоритма «дерева решений» в систематизации определяющих уравнений для грунтов // Известия Томского политехнического университета. 2009. Т. 314. № 5. С. 101–105.
10. Строкова Л.А. Определение параметров для численного моделирования поведения грунтов // Известия Томского политехнического университета. 2008. Т. 313. № 1. С. 69–74.
11. Строкова Л.А. Моделирование оседания поверхности при проходке туннеля щитовым способом // Известия Томского политехнического университета. 2008. Т. 312. № 1. С. 45–50.
12. Строкова Л.А. Анализ чувствительности параметров при численном моделировании поведения грунтов // Известия Томского политехнического университета. 2008. Т. 313. № 1. С. 64–68.
13. Brinkgreve R.B.J. et al. PLAXIS, 2D Version 8. Rotterdam: Balkema, 1997. 200 p.
14. Brinkgreve R.B.J. Selection of soil models and parameters for geotechnical engineering application // Soil Constitutive Models: Evaluation, Selection, and Calibration. / Ed. J.A. Yamamuro, V.N. Kaliakin. – American Society of Civil Engineers, 2005. V. 128. P. 69–98.
15. Duncan J.M., Chang C.-Y. Nonlinear analysis of stress and strain in soils // ASCE Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. 1970. V. 96(SM5). P. 1629–1653.
16. Gudehus G. A comparison of some constitutive laws for soils under radially symmetric loading and unloading / Proc. 3<sup>th</sup> Int. Conf. Num. Meth. Geom. – Aachen: Balkema, 1979. P. 1305–1323.
17. Lade P.V. Overview and evaluation of constitutive models // Soil Constitutive Models: Evaluation, Selection, and Calibration. Ed. J.A. Yamamuro, V.N. Kaliakin. – American Society of Civil Engineers, 2005. Vol. 128. P. 1–34
18. Ohde J. Zur Theorie der Druckverteilung im Baugrund // Der Bauingenieur. 1939. № 20. H. 33/34. S. 451–459.
19. Rowe P. The stress-dilatancy relation for static equilibrium of an assembly of particles in contact // Proceedings of the Royal Society of London. 1962. V. 269. P.500–527.
20. Schanz T. Aktuelle Entwicklungen bei Standsicherheits- und Verformungs-berechnungen in der Geotechnik /Empfehlungen des Arbeitskreises 1.6 Numerik in der Geotechnik // Geotechnik. 2006. № 1(29). P. 13–28.
21. Schanz T. Zur Modellierung des mechanischen Verhaltens von Reibungsmaterialien // Mitt. Inst. für Geotechnik 45. Universität Stuttgart. Stuttgart, 1998. 152 p.
22. Schanz T., Vermeer P.A., Bonnier P.G. The Hardening-Soil Model: Formulation and verification // Beyond 2000 in Computational Geotechnics. Rotterdam: Balkema, 1999. P. 281–290.

## КАРСТ СЕВЕРА РУССКОЙ ПЛИТЫ (В ПРЕДЕЛАХ ТЕРРИТОРИИ ВОЛОГОДСКОЙ ОБЛАСТИ)

А.И. Труфанов, В.И. Чернышов, Н.К. Максимова

*Вологодский государственный университет, Россия, Вологда. Email: trufanov\_ai@mail.ru*

**Аннотация.** Приводятся некоторые результаты комплексных исследований карста в пределах территории Вологодской области. По результатам анализа геолого-гидрогеологических материалов охарактеризованы этапы формирования карста. Полевые работы и дешифрирование топо-и аэрофотоматериалов позволили определить плотность проявления поверхностного карста на некоторых площадях западного и восточного карстовых районов. Приводятся данные о подземном и поверхностном проявлении карста.

**Abstract.** Some results of comprehensive studies of karst within the territory of the Vologda region. According to the analysis of geological and hydrogeological materials are given the stages of formation of karst. The field work and interpretation of aerial photographs and topographic possible to determine the density of the surface manifestations of karst in some areas of western and eastern regions karst. The data on the surface and underground karst.

Проявления карста на данной территории в виде периодически исчезающих карстовых озёр, а также карстовых провалов и воронок известно давно. О них