

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Brooker E.W., Ireland H.O. Earth pressures at rest related to stress history // Canadian Geotechnical Journal. – 1965. – V. 2. – № 1. – P. 1–15.
2. Jáky J. A nyugalmi nyomás tenyezője (The coefficient of earth pressure at rest) // Magyar Mérnök és Építész Egylet Közlönye (Journal for Society of Hungarian Architects and Engineers). – 1944. – October. – P. 355–358.
3. Mayne P.W., Kulhawy F.H. K_0 -OCR relationships in soil // Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE. – 1982. – V. 108. – GT6. – P. 851–872.
4. Bolton M.D. Geotechnical stress analysis for bridge and abutment design. Contractor Report 270. Crowthorne: Transport and Road Research Laboratory, (1991). [Электронный ресурс]. – режим доступа: http://www-civ.eng.cam.ac.uk/geotech_new/MDB_Publications%20by%20Topic/D%20Design.html. – 01.11.2009.
5. Simpson B. Retaining structures: displacement and design // Geotechnique. – 1992. – V. 42. – № 4. – P. 541–576.
6. Alpan I. The Empirical Evaluation of the Coefficient K_0 and K_{0R} // Soils and Foundations. – 1967. – V. 7. – № 1. – P. 31–40.
7. Průška M.J. Effect of initial stress on the stress-strain relation // Proceedings of the 8th Intern. Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Moscow. – 1973. – V. 4. – P. 26–28.
8. Schmidt B. Discussion of 'Earth pressures at rest related to stress history' by Brooker & Ireland (1965) // Canadian Geotechnical Journal. – 1966. – V. 3. – № 4. – P. 239–242.
9. Meyerhof G.G. Bearing capacity and settlement of pile foundations // Journal of Geotechnical Engineering, ASCE. – 1976. – V. 102. – GT3. – P. 197–228.
10. Shohet D.C. Prediction of in-situ horizontal stresses in clay soils from the measurement of undrained shear strength, plasticity index and vertical effective stress // Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE. – 1995. – V. 13. – P. 206–214.
11. Sivakumar V., Doran I.G., Graham J., Navaneethan T. Relationship between K_0 and overconsolidation ratio: a theoretical approach // Geotechnique. – 2001. – V. 52. – № 3. – P. 225–230.
12. Wroth C.P. In situ measurement of initial stresses and deformation characteristics // Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE. – 1975. – V. 2. – P. 181–230.
13. Casagrande A. The determination of the pre-consolidation load and its practical significance // Proc. of the 1st Intern. Soil Mechanics and Foundation Engineering Conf. – Cambridge, Mass., 22-26 June 1936. Ed. by A. Casagrande. – 1936. – V. 3. – P. 60–64.
14. Schwarz A. Einfluss des Primärspannungszustandes auf die Belastung von Tunnelinnenschalen. – München: Technische Universität München, 2004. – 116 S.
15. Brinkgreve R.B.J., et.al. PLAXIS – Finite Element Code for Soil and Rock Analysis. 2D Version 8. – The Netherlands. Rotterdam: A.A. Balkema, 1997. – 200 p.

Поступила 03.11.2009 г.

УДК 624.131

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СОЗДАНИЯ РАСЧЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ ГРУНТОВЫХ ОСНОВАНИЙ

Л.А. Строкова

Томский политехнический университет

E-mail: geyer@tpu.ru

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.

Ключевые слова:

Напряженно-деформированное состояние, методология, расчетная модель.

Key words:

Stress-strain state, methodology, calculation model.

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 допустимом уровне риска достижения основанием предельных состояний и последствий.

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 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 под-

земных 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. Очевидно, инженер должен обладать достаточными теоретическими знаниями, опытом, инженерной интуицией, чтобы правильно выбрать соответствующую математическую модель системы, которую ему необходимо исследовать.

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 или с имеющейся об объекте информацией, или проводится эксперимент и его результаты сопоставляются с расчетными.

Современные программные комплексы 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. В журнальных публикациях, докладах демонстрируются возможности программ, решения отдельных тестовых задач, которые имеют скорее рекламный характер и не определяют области достоверного применения программы. 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.

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, гипопругости, идеальной упругопластичности, пластичности с упрочнением (изотропным, кинематическим и смешанным), гиперпластичности, гипопластичности, вязкоупругости, вязкопластичности, вязко-гипопластичности, и соответственно множество уравнений, объясняющих различные аспекты поведения грунтов. В программе MARS используется порядка 30 определяющих уравнений для материалов, в ABAQUS их уже порядка 200. 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 [1]. В этой классификации произведена разбивка объема понятия «определяющие соотношения» на различные разряды по видоизменению такого признака «Наличие и характер деформаций при изменении напряжений»: выделены три класса – упругость, пластичность, вязкость с указанием характерных особенностей каждого класса.

В работе T. Schanz [2] идеи G. Gudehus 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 P.V. Lade [3], который описал типы и компоненты определяющих уравнений, предложил классифицировать определяющие уравнения на 3 категории по совершенству описания раз-

личных эффектов поведения грунта при нагрузках, возможности определения параметров традиционными экспериментами.

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 материалы [3] для 31 модели, охарактеризованные 18 признаками. Разведочный анализ проводился алгоритмом «Дерево решений» аналитического пакета Deductor.

Вначале был проведен корреляционный анализ данных, который позволил отобрать значимые для классификации признаки. Далее, имеющиеся 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 [4].

Фильтр для несвязных дисперсных грунтов позволил классифицировать только 4 модели из 15: Гука, 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: Drucker-Prager; Гука; 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: Drucker-Prager; Гука; Plaxis Hardening; Darve; Fuzzy Set Plasticity. Было отобрано 5 решающих правил и 4 значимых фактора.

То обстоятельство, что не все модели были отобраны этим алгоритмом, объясняется специфичностью и уникальностью условий, при которых конкретная модель поведения грунта была сформулирована. И наоборот, не случайно, алгоритм «дерево решений» наиболее часто отбирал закон Гука, упруго-пластические модели с изотропным упрочнением Plaxis Hardening и Cam Clay. И в практике, эти модели широко используют из-за их универсальности, достоверного отображения условий работы грунта в основании.

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 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 не регламентированная).

Использование в расчетах сложных определяющих уравнений зачастую требуют сложного дорогостоящего оборудования, при этом методика выполнения лабораторных работ не всегда является общепризнанной, закрепленной в нормативных документах. Количество необходимых для расчетов параметров варьирует 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 полугодия 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 [5] с разной степенью детальности изложены методики прямого определения параметров: для сцепления, угла внутреннего трения (только некоторые неосвещенные в отечественных нормативах особенности обработки данных многоступенчатых трехосных испытаний); определение дополнительных параметров моделей, таких, как коэффициент бокового давления грунта в состоянии покоя K_0 , угол дилатансии ψ , модулей Юнга при первичном нагружении, разгрузке – повторном нагружении, показателя степени кривизны компрессионной кривой (более подробно).

Для совершенствования процедуры создания расчетной модели рекомендуется внести в нормативные документы и рекомендации по проектированию оснований типичные значения и методики определения вышеперечисленных параметров грунтов.

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 метропо-

литена, рассчитанные в программном комплексе «PLAXIS» [6–9] 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 (МС) при прочих равных условиях [10]. Из этих трех признана менее подходящей для расчетов модель МС. 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.

Иногда достаточно одного прогона модели, чтобы выбрать определяющее уравнение. Так, например, при имитации трехосных испытаний в качестве определяющих уравнений были использованы две модели программного комплекса PLAXIS: HS – упругопластическая модель с изотропным упрочнением (*hardening soil*) и модель HSS (*hardening soil with small – strain stiffness*), учитывающая нелинейность модуля сдвига в области малых деформаций. Расчеты по обеим моделям HS и HSS дали в целом хорошее совпадение, причем HSS – дает полное совпадение при малых уровнях деформаций (до 3 %), а HS – при деформациях от 2 до 5 %.

Трудности и многократные прогоны модели появляются при назначении параметра по интервальной оценке показателя, например, модуля деформации. Так, при компрессионном испытании было установлено, что модуль деформации тугопластичной глины 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 [11].

Имитация компрессионных испытаний осуществлялась 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 [12].

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.

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 значимость тех или иных параметров для системы в целом, узнать, 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 [13]. 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 ν , 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, принятая за 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, в сравнении с песками. 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 наблюдение за ходом строительства и эксплуатации объекта для подтверждения результатов моделирования. Накопление мониторинговых данных позволит скорректировать назначенные трудноопределимые параметры.

Цикл проведенных работ может служить основой для разработки комплексной системы стандартизации по созданию расчетных моделей оснований. Он включает следующие элементы системы (рисунок): 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; анализ 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 и назначение параметров сооружения.

Наши предложения по созданию нормативных документов по 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) непрерывными 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 вводных; 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.



Рисунок. Порядок процедур создания цифровой расчетной модели

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gudehus G. A comparison of some constitutive laws for soils under radially symmetric loading and unloading // Proc. 3th Int. Conf. Num. Meth. Geom. – Aachen: Balkema, 1979. – P. 1305–1323.
2. 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.
3. 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. – V. 128. – P. 1–34.
4. Строкова Л.А. Использование алгоритма «дерева решений» в систематизации определяющих уравнений для грунтов // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 314. – № 5. – С. 101–105.
5. Строкова Л.А. Определение параметров для численного моделирования поведения грунтов // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 313. – № 1. – С. 69–74.
6. Brinkgreve R.B.J., et al. PLAXIS, 2D Version 8. – Rotterdam: Balkema, 1997. – 200 p.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. Строкова Л.А. Моделирование оседания поверхности при проходке туннеля щитовым способом // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 312. – № 1. – С. 45–50.
11. Строкова Л.А. Калибровка модулей упругости для упругопластической модели путем моделирования лабораторных испытаний // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 315. – № 1. – С. 87–92.
12. Ohde J. Zur Theorie der Druckverteilung im Baugrund // Der Bauingenieur. – 1939. – № 20. – H. 33/34. – S. 451–459.
13. Строкова Л.А. Анализ чувствительности параметров при численном моделировании поведения грунтов // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 313. – № 1. – С. 64–68.

Поступила 08.12.2009 г.