

对岩土工程数值分析的几点思考

龚晓南

(浙江大学 岩土工程研究所, 杭州 310058)

摘 要: 首先, 介绍了笔者对我国岩土工程数值分析现状的调查结果及分析, 然后, 分析了采用连续介质力学分析岩土工程问题的关键, 并讨论分析了岩土本构理论发展现状, 提出对岩土本构理论发展方向的思考, 最后对数值分析在岩土工程分析中的地位作了分析。分析表明, 岩土工程数值分析结果是岩土工程师在岩土工程分析过程中进行综合判断的重要依据之一; 采用连续介质力学模型求解岩土工程问题的关键是如何建立岩土的工程实用本构方程; 建立多个工程实用本构方程结合积累大量工程经验才能促使数值方法在岩土工程中由用于定性分析转变到定量分析。

关 键 词: 岩土工程; 连续介质力学; 数值分析; 本构理论; 本构模型

中图分类号: TU452

文献标识码: A

Reflections on numerical analysis of geotechnical engineering

GONG Xiao-nan

(Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: The investigation report about the application of numerical analysis of geotechnical engineering in China was introduced firstly. Then the key of analyzing geotechnical problems with continuum mechanics and the current situation of geotechnical constitutive theory were discussed; the developing directions of geotechnical constitutive theory was put forward. Finally, the status of numerical simulation in the geotechnical engineering was evaluated. Through above discussions it can be concluded that, the result of numerical analysis is one of the most important back ground for the engineering judgment of geotechnical engineers in the geotechnical engineering analysis; the key of analyzing geotechnical problems with continuum mechanics is to establish simple and practical engineering constitutive model. Establishing many simple and practical engineering constitutive models and accumulating a lot of engineering experience, numerical analysis can be used in geotechnical engineering from qualitative to quantitative.

Key words: geotechnical engineering; continuum mechanics; numerical analysis; constitutive theory; constitutive model

1 引 言

1982 年, 中国力学学会、中国土木工程学会、中国水利学会和中国建筑学会在广西南宁联合召开我国第 1 届岩土力学数值与解析方法学术讨论会。那次盛会距今已有 30 年, 黄文熙、卢肇钧、汪闻韶、曾国熙、钱家欢、郑大同等众多岩土工程界著名老前辈参加, 这足以说明我国学术界对发展岩土力学数值分析与解析分析方法的重视。

众所周知, 在 Terzaghi 的土力学中变形计算视土体为弹性体, 稳定分析中视土体为刚塑性体, 变形计算和稳定分析是截然分开的, 于是人们试图建立现代土力学, 并计划在现代土力学中采用统一的应力-应变-强度关系, 进而将变形计算和稳定分析

统一起来。这一设想非常令人鼓舞, 而实现这一设想离不开岩土力学数值分析理论的发展。然而, 土力学近 30 年的发展表明将变形计算和稳定分析统一起来的道路非常艰难!

本文首先介绍笔者对我国岩土工程数值分析现状的调查结果, 然后就岩土工程分析中的关键问题, 如何发展岩土本构理论和数值分析在岩土工程分析中的地位这 3 个问题提出粗浅的看法。

2 现状调查结果分析

笔者受《第 10 届岩土力学数值与解析方法讨论会》组委会邀请作特邀报告, 会前特意对我国岩土工程数值分析的现状作了调查。调查方式以电子邮件表格填答为主, 少数当面发表格填答。截止

2010 年 10 月 25 日, 笔者共收回 139 份调查问卷, 来自不少于 28 个地区, 其中上海 16 份、北京 15 份、南京 12 份、天津 3 份、香港 1 份、USA 1 份、台湾 5 份、武汉 7 份、杭州 26 份、厦门 2 份、福州 4 份、绍兴 1 份、广州 4 份、深圳 7 份、太原 1 份、沈阳 2 份、西安 3 份、重庆 2 份、成都 2 份、青岛 3 份、郑州 1 份、长沙 4 份、石家庄 1 份、兰州 3 份、南宁 1 份、包头 2 份、合肥 2 份、海口 5 份、未填地址的 3 份。

被调查人的年龄组成为

| | |
|------------|------|
| 30 岁以下的 | 29 人 |
| 30 ~ 50 岁的 | 89 人 |
| 50 岁以上的 | 21 人 |

被调查人的职业分布为

| | |
|----------|------|
| 博士研究生 | 9 人 |
| 高校教师 | 67 人 |
| 科研单位研究人员 | 21 人 |
| 工程单位技术人员 | 42 人 |

被调查人中经常从事数值计算分析的经历

| | |
|------|------|
| 经常从事 | 79 人 |
| 偶尔从事 | 59 人 |
| 没有从事 | 1 人 |

下面是对几个问题的调查结果:

数值分析在岩土工程分析中的地位, 认为(限填 1 项):

| | |
|------|---------------|
| 非常重要 | 53 人, 占 38.1% |
| 重要 | 73 人, 占 52.5% |
| 一般 | 13 人, 占 9.4% |
| 不需要 | 0 人 |

数值分析中的关键问题 (限填 1 ~ 2 项):

| | |
|--------|-------|
| 分析方法 | 26 人 |
| 本构模型 | 83 人 |
| 参数测定 | 114 人 |
| 边界条件模拟 | 28 人 |
| 计算分析技巧 | 14 人 |

哪几种数值分析方法较适用于岩土工程分析 (最多填 3 项) ?

| | |
|------------|-------|
| 解析法 | 41 人 |
| 有限单元法 | 137 人 |
| 有限差分法 | 60 人 |
| 离散单元法 | 30 人 |
| 边界元法 | 18 人 |
| 无网格法 | 5 人 |
| 非连续变形法 DDA | 15 人 |
| 数值流形元 NMM | 2 人 |

进一步提高岩土数值分析能力需要解决的关键问题 (最多填 2 项):

| | |
|--------------|-------|
| 发展新的分析方法 | 32 人 |
| 建立新的本构模型 | 49 人 |
| 本构模型参数测定 | 112 人 |
| 提高计算机计算速度和容量 | 11 人 |
| 商用大型计算软件 | 22 人 |

你完成的工程设计取值主要来自 (无工程设计经历可不填):

| | |
|-------|------|
| 经验公式法 | 50 人 |
| 数值计算法 | 32 人 |
| 解析计算法 | 5 人 |
| 综合判断法 | 78 人 |

你对岩土工程数值分析发展的建议 (可不填也可详述)

在这次调查中, 有 53 位同行专家对岩土工程数值分析发展提出了建议, 有的只是短短一行, 有的长达几页, 有的是看法, 有的是建议, 但是看得出来他们很认真, 畅所欲言。笔者对所提建议只是从格式上作了统一编排, 除了隐去提出建议的同行专家的姓名外, 其他未作任何增减, 以力保原汁原味, 并将它们形成《调查中 53 位同行专家对岩土工程数值分析发展的建议》^[1]一文, 供参考。

3 岩土工程分析中的关键问题

岩土工程分析中人们常常将用简化的物理模型去描述复杂的工程问题, 再将其转化为数学问题并用数学方法求解。一个很典型的例子是, 饱和软黏土地基大面积堆载作用下的沉降问题被简化为 Terzaghi 一维固结物理模型, 再转化为 Terzaghi 固结方程求解。

采用连续介质力学模型求解工程问题一般包括下述方程: 运动微分方程式 (包括动力和静力分析两大类); 几何方程 (包括小应变分析和大应变分析两大类); 本构方程 (即力学本构方程)。

对一具体工程问题, 根据具体的边界条件和初始条件求解上述方程即可得到解答, 对复杂的工程问题, 一般需采用数值分析法求解。对不同的工程问题采用连续介质力学模型求解, 所用的运动微分方程式和几何方程是相同的, 不同的是本构方程、边界条件和初始条件。当材料为线性弹性体, 本构方程为广义虎克定律。

将岩土材料视为多相体, 采用连续介质力学模型分析岩土工程问题一般包括下述方程^[2]: 运动微分方程式 (包括动力和静力分析两大类); 总应

力 = 有效应力 + 孔隙压力 (有效应力原理); 连续方程 (总体积变化为各相体积变化之和); 几何方程, 包括小应变分析和大应变分析两大类; 本构方程, 即力学和渗流本构方程。

将多相体与单相体比较, 基本方程多了 2 个, 即有效应力原理和连续方程, 且本构方程中多了渗流本构方程。对不同的岩土工程问题, 基本方程中运动微分方程式、有效应力原理、连续方程和几何方程的表达式是相同的, 不同的是本构方程。对一具体岩土工程问题, 根据具体的边界条件和初始条件求解上述方程即可得到解答, 一般需采用数值分析法求解。从上面分析可知, 采用连续介质力学模型分析不同的岩土工程问题时, 不同的是本构模型、边界条件和初始条件。对一个具体的岩土工程问题, 边界条件和初始条件是容易确定的, 而岩土体的应力-应变关系十分复杂, 采用的本构模型及参数对计算结果影响极大。

采用连续介质力学模型分析岩土工程问题一般需采用数值分析法求解, 有限单元法对各种边界条件和初始条件, 采用的各类本构方程都有较大的适应性。土的应力-应变关系十分复杂, 自 Roscoe 和他的学生建立剑桥模型至今已近半个世纪, 理论上已提出数百个本构方程, 但得到工程应用认可的极少, 或者说还没有。从这个角度讲, 采用连续介质力学模型求解岩土工程问题的关键问题是如何建立岩土材料的工程实用本构方程。

4 如何发展岩土本构理论的思考

Janbu 认为, 反映作用与效应之间的关系称为本构关系, 力学中的虎克定律、电学中的欧姆定律、渗流学中的达西定律等反映的都是最简单的本构关系。岩土是自然、历史的产物, 具有下述特性^[3]: 土体性质区域性强, 即使同一场地同一层土, 沿深度和水平方向变化也很复杂; 岩土体中的初始应力场复杂且难以测定; 土是多相体, 一般由固相、液相和气相三相组成, 土体中的三相有时很难区分, 而且处不同状态时, 土的三相之间可以相互转化。土中水的状态又十分复杂; 土体具有结构性, 与土的矿物成分、形成历史、应力历史和环境条件等因素有关, 十分复杂; 土的强度、变形和渗透特性测定困难。岩土体的应力-应变关系与应力路径、加荷速率、应力水平、成分、结构、状态等有关, 土还具有剪胀性、各向异性等, 因此, 岩土体的本构关系十分复杂。至今人们建立的土体的本构模型类别有弹性模型、刚塑性模型、非线性弹性模型、弹塑性

模型、黏弹性模型、黏弹塑性模型、边界面模型、内时模型、多重屈服面模型、损伤模型、结构性模型等等^[4]。已建立的本构模型多达数百个, 但得到工程师认可的极少, 或者说还没有。从 20 世纪 60 年代初起, 对土体本构模型研究逐步走向高峰, 然后进入现在的低谷状态, 从满怀信心进入迷惑不解的状态。由上一节的分析可知, 本构模型是采用连续介质力学模型求解岩土工程问题的关键, 回避它是不可能的。岩土材料工程性质复杂, 建立通用的本构模型看来也不可能。怎么办? 怎么走出困境? 这是我们必须面对的难题。

笔者认为^[3], 对土体本构模型研究应分为两大类, 科学型模型的研究和工程实用性模型的研究。科学型模型重在揭示、反映某些特殊规律, 如土的剪胀性、主应力轴旋转的影响等。该类模型也不能求全面, 一个模型能反映一个或几个特殊规律即为好模型。从事科学型模型研究是少数人, 是科学家。工程实用性模型更不能求全面、通用, 工程实用性模型应简单、实用, 参数少且易测定, 能反映主要规律, 能抓住主要矛盾, 参数少且易测定即为好模型。工程实用性模型重在能够应用于具体工程分析, 多数人应从事工程实用性模型研究。研究中应重视工程类别 (基坑工程、路堤工程、建筑工程等)、土类 (黏性土、砂土和黄土等) 和区域性 (上海黏土、杭州黏土和湛江黏土等) 的特性的影响, 如建立适用于基坑工程分析的杭州黏土本构模型, 适用于道路工程沉降分析的陕西黄土本构模型和适用建筑工程沉降分析的上海黏土本构模型等。工程实用性模型研究还要重视地区经验的积累。

采用考虑工程类别、土类和区域性特性影响的工程实用本构模型, 应用连续介质力学理论, 并结合地区经验进行岩土工程数值分析可能是发展方向。

5 数值分析在岩土工程分析中的地位

下面从岩土材料特性、岩土工程与结构工程有限元分析误差来源分析比较和岩土工程分析方法三方面来分析数值分析在岩土工程分析中的地位。

前面已经提到岩土材料是自然、历史的产物, 工程特性区域性强, 岩土体中的初始应力场复杂且难以测定, 土是多相体, 土体中的三相有时很难区分, 土中水的状态又十分复杂。岩土体的应力-应变关系与应力路径、加荷速率、应力水平、成份、结构、状态等有关, 岩土体的本构关系十分复杂。至今尚无工程师普遍认可的工程实用的本构模型, 而采用

连续介质力学模型求解岩土工程问题的关键问题是如何建立工程实用的岩土本构方程,这是应面对的现状,也是考虑数值分析在岩土工程分析中的地位时必须重视的现实情况。

结构工程所用材料多为钢筋混凝土、钢材等,材料均匀性好,由此产生的误差小,而岩土工程材料为岩土,均匀性差,由此产生的误差大。在几何模拟方面,对结构工程的梁、板和柱进行单独分析,误差很小,但对复杂结构,节点模拟处理不好可能产生较大误差。对岩土工程,若存在两种材料的界面,界面模拟误差较大。在本构关系方面,结构工程所用材料的本构关系较简单,可用线性关系,可能产生的误差小,而岩土材料的本构关系很复杂,由所用本构模型产生的误差大;在模型参数测定方面,结构工程所用材料的模型参数容易测定,由此产生的误差小,而岩土工程材料的模型参数不容易测定,由此产生的误差大。结构工程中一般初始应力小,某些特殊情况,如钢结构焊接热应力,影响范围小,岩土工程中岩土体中初始应力大且测定难,对数值分析影响大,特别对非线性分析影响更大。结构工程分析常采用线性本构关系,线性分析误差小。岩土工程分析常采用非线性本构关系,非线性分析常需要迭代,迭代分析可能产生的误差大。在结构工程和岩土工程分析中,若边界条件较复杂,均可能产生较大误差。相比较而言,多数结构工程边界条件不是很复杂,而多数岩土工程边界条件复杂。以上比较分析汇总如表 1 所列。

表 1 岩土工程与结构工程有限元分析误差来源分析
Table 1 Comparison of errors sources in finite element analysis between geotechnical engineering and structural engineering

| 误差来源 | 结构工程 | 岩土工程 |
|-------|------------------------|------------------------|
| 材料均匀性 | 较均匀,误差小 | 不可见因素多,误差大 |
| 几何模拟 | 节点模拟可能产生较大误差 | 界面模拟误差较大 |
| 本构关系 | 较简单,可用线性关系 可能产生的误差小 | 很复杂,所用本构模型 可能产生的误差大 |
| 模型参数 | 容易测定,误差小 | 不易测定,误差大 |
| 初始应力 | 初始应力小,影响也小 | 初始应力大且测定难,影响大 |
| 分析方法 | 线性分析误差较小 | 非线性分析误差可能较大 |
| 边界条件 | 较复杂,可能产生较大误差 | 较复杂,可能产生较大误差 |

由以上的分析可知,结构工程有限元分析误差来源少,可能产生的误差小,而岩土工程有限元分析误差来源多,可能产生的误差大。笔者认为,对结构工程,处理好边界条件和节点处几何模拟,有限元数值分析可用于定量分析;对岩土工程,有限元数值分析目前只能用于定性分析。

对岩土工程的分析,笔者认为首先要详细掌握工程地质条件、土的工程性质、土力学基本概念、工程经验,在此基础上采用经验公式法、数值分析法和解析分析法进行计算分析。在计算分析中要因地制宜,抓主要矛盾,具体问题具体分析,宜粗不宜细、宜简不宜繁。然后,在计算分析基础上,结合工程经验类比,进行综合判断,最后进行岩土工程设计。在岩土工程分析过程中,数值分析结果是提供工程师进行综合判断的主要依据之一。岩土工程分析过程如图 1 所示。

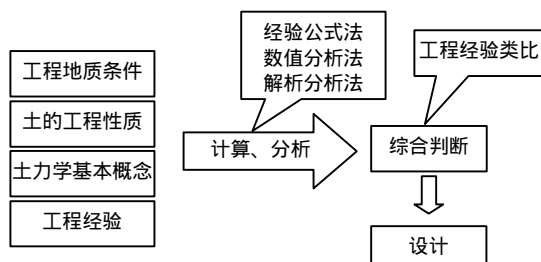


图 1 岩土工程分析过程

Fig.1 Analytical process of geotechnical engineering

根据对岩土材料特性的分析和对岩土工程与结构工程有限元分析误差来源的分析比较,可以认为岩土工程数值分析目前只能用于定性分析。通过对岩土工程分析过程的分析,可以认为岩土工程数值分析结果是岩土工程师在岩土工程分析过程中进行综合判断的重要依据之一。岩土工程数值分析主要用于复杂岩土工程问题的定性分析。

6 结 论

通过对我国岩土工程数值分析现状的调查研究 and 上述分析,笔者对岩土工程数值和解析分析的思考意见如下:

(1) 基于对岩土工程分析对象 岩土材料特性的分析,并考虑岩土工程初始条件和边界条件的复杂性,岩土工程分析很少能得到解析解,而目前岩土工程数值分析只能用于定性分析。所以,岩土工程设计要重视概念设计,重视岩土工程师的综合判断。岩土工程数值分析结果是岩土工程师在岩土工程分析过程中进行综合判断的重要依据之一。

(2) 自 Roscoe 和他的学生建立剑桥模型至今已近半个世纪,各国学者已提出数百个本构方程,但得到工程应用认可的极少,或者说还没有。从这个角度讲采用连续介质力学模型求解岩土工程问题的关键问题是如何建立岩土的工程实用本构方程。

(3) 本构模型及参数测定是岩土工程分析中的

关键问题，避不开又难解决。笔者认为，建立考虑工程类别、土类和区域性特性影响的工程实用本构模型是岩土工程数值分析发展的方向。工程实用本构模型的参数应少、易测定、且有利于工程经验的积累。多建立几个工程实用本构模型，结合积累大量的工程经验，才能促进岩土工程数值分析在岩土工程分析中的应用，才能由只能用于定性分析逐步发展到可用于定量分析。

(4) 岩土工程师在充分掌握分析工程地质资料、了解土的工程性质基础上，采用合理的物理数学模型，通过多种方法进行计算分析，然后结合工程经验进行综合判断，提出设计依据。在岩土工程计算分析中应坚持因地制宜、抓主要矛盾、宜粗不宜细、宜简不宜繁的原则。

参 考 文 献

[1] 龚晓南. 岩土工程数值分析现状调查中 53 位同行专家

对岩土工程数值分析发展的建议[J]. 地基处理, 2010, 21(4): 40 - 45.

GONG Xiao-nan. A survey report: the actuality of numerical analysis in Chinese geotechnical engineering[J]. **Ground Improvement**, 2010, 21(4): 40 - 45.

[2] 龚晓南, 叶黔元, 徐日庆. 工程材料本构方程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1995.

[3] 龚晓南. 土塑性力学(第二版)[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1999.

[4] 龚晓南. 21 世纪岩土工程发展展望[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(2): 238 - 242.

GONG Xiao-nan. Prospects for the development of geotechnical engineering in the 21st century[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2000, 22(2): 238 - 242.

回眸《岩土力学》2010 年

2010 年《岩土力学》的远程投稿系统 <http://ytlx.whrsm.ac.cn/> 正式运行，全年注册投稿 2 352 篇。投稿、审稿、录用、刊发、统计等流程均在该系统上完成。2010 年正刊(31 卷)1 - 12 期刊载论文 668 篇，总页码 4 032 页，其中 2010 第 1 期为西安理工大学主办的全国西部特殊土与工程学术会议刊发论文 21 篇；第 12 期为地面专业委员会举办的第四届岩土力学与工程前沿论坛 2010 学术交流会 推荐录用并刊发的论文 18 篇。2010 年出版 2 期增刊，刊载论文 152 篇，页码 920 页，其中增刊 1 载文 69 篇，增刊 2 载文 83 篇，分别来自第二届全国工程安全与防护学术会议、第三届中国水利水电岩土力学与工程学术讨论会、第十届全国岩土力学数值分析与解析方法研讨会、2010 年城市地质环境与可持续发展论坛等选送。2010 年全年正刊、增刊共计载文 820 篇，总页码 4 952 页。

2010 年 EI 检索 763 篇，其中 1 - 11 期检索 611 篇(除去讨论稿件)，增刊 152 篇，收录率均为 100%。

据 2010 年版中国科技期刊引证报告(核心版)，《岩土力学》2009 年正刊载文量 674 篇，总被引频次为 3 435，影响因子为 0.731，在力学类期刊中总被引频次排名继续位居第 1；影响因子排名位上升至第 2，学科综合排名第 2，统计源科技期刊中综合总排名为 144，上升至 87 位；论文基金比为 0.73，机构分布数为 155 个。

《岩土力学》入选 2009 年中国百种杰出学术期刊，这是本刊首获殊荣。同时，《岩土力学》有 2 篇论文(赵尚毅、刘金龙)被评为 2009 年中国百篇最具影响国内学术论文。

由湖北省新闻出版局、湖北省期刊协会举办的第七届湖北优秀期刊奖、优秀期刊编辑奖评选，2009 年《岩土力学》被评为湖北省第 7 届优秀期刊，其中 1 名编辑荣获湖北省优秀期刊编辑奖。这个奖项每 2 年评选一次，《岩土力学》已连续 3 届被评为湖北省优秀期刊。

2010 年 11 月 6 日，《岩土力学》第七届编委会第三次会议在浙江温州召开，来自全国各地的数十名编委和编辑部成员出席了会议。会议得到温州大学的大力支持，取得圆满成功。

新年伊始，《岩土力学》编辑部将继续努力，为岩土力学学科的发展作出新贡献。