

力学

现代工程技术的支柱

XIANDAI GONGCHENG JISHU DE
ZHIZHU

● 赵光恒 主编

河海大学出版社

力学——现代工程技术的支柱

赵光恒 主编

河海大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

力学——现代工程技术的支柱/赵光恒主编. —南京:
河海大学出版社, 2001. 12

ISBN 7 - 5630 - 1165 - X/O · 79

I. 力... II. 赵... III. 力学 IV. 03

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 095946 号

出 版 河海大学出版社
地 址 南京市西康路 1 号(邮编 210098)
电 话 (025)3737852(总编室)
(025)3722833(发行部)
经 销 江苏省新华书店
印 刷 丹阳市教育印刷厂
开 本 850 毫米×1168 毫米 1/32
印 张 15
字 数 403000
版 次 2001 年 12 月第 1 版
印 次 2001 年 12 月第 1 次印刷
定 价 48.00 元

《力学—现代工程技术的支柱》编委会

主 编： 赵光恒

编委会：（以姓氏笔画为序）

王良国 王惠民 任青文 邬 萱

吴文龙 吴锤结 宋逸先 汪凤泉

苏 虹 姜弘道 赵光恒 洪晓林

胡海岩 涂善东 谈志高 郭小明

章定国 蒋 桐 谢和平 缪协兴

前 言

千禧之始,世纪之交,江苏省力学学会跨过了40周年的历程。为了庆贺不惑,交流研究成果,放眼展望未来,特邀请学会会员撰文汇编成这本《力学—现代工程技术的支柱》。本书编入论文共计30篇,内容涉及应用力学的多个工程学科,包括:岩土工程力学(3篇)、船舶与海洋工程(3篇)、航空与机电工程(3篇)、土木建筑工程(4篇)、地震工程(3篇)、水利工程(2篇)、爆炸与防护工程(2篇)、新材料力学性态(2篇)、生物工程力学(2篇)、力学理论与分析方法(3篇),以及化工过程、林产工业、包装工程等(3篇)。这些论文既展示了江苏省力学界同仁近期在力学应用研究与发展上取得的成绩,同时也反映了力学为工程建设所作出的贡献。

力学是阐述与研究数、理、化、天、地、生各门基础学科不可缺少的基本工具,更是各种门类工程学科的坚强支柱。编者期望本书的出版能促进我们将力学与工程建设更紧密地结合起来,为江苏的科技腾飞和力学的兴旺发展作出更大的贡献。

由于本书汇稿、编印时间较为仓促,书中存在诸多欠缺之处,恳请读者鉴谅和指正。

《力学—现代工程技术的支柱》编者

2001年10月

目
录

前 言

岩 土 工 程 力 学

- 关于计算岩土力学发展前景的几点看法 沈珠江(1)
 土动力学研究进展 刘汉龙 高玉峰(8)
 采动岩体中的渗流问题 缪协兴(34)

船 舶 与 海 洋 工 程

- 世纪之交船舶结构力学研究展望 吴有生(45)
 船舶与海洋工程中的力学问题 彭如海(67)
 海上浮式结构动力分析中的若干力学问题
 孙芦忠 严建国(85)

航 空 与 机 电 工 程

- 机械动力学的发展与挑战 胡海岩(95)
 微电子与微机电系统(MEMS)中的现代力学
 测试技术 何小元(125)
 飞机结构强度要求的发展 黄维扬(135)

土木建筑工程

- 力学在高层建筑岩土工程中的应用
..... 宰金珉 梅国雄(148)
- 结构机理与力学计算 丁大钧(167)
- 计算力学在土建工程中的应用与发展
..... 蒋 桐 董 军(197)
- 力学在索桥结构体系中的应用 ... 张 南 罗 韧(217)

地震工程

- 建设工程的地震安全性及其相关力学问题
..... 杨伟林(228)
- 土体—结构体系抗震性能分析方法
..... 陈国兴 宰金珉(242)
- 一种智能 TMD 结构的减震分析 刘 平(250)

水利工程

- 大型水利水电工程中的力学问题 任青文(258)
- 计算流体动力学在泵站流道水力设计中的
应用 陆林广(283)

爆炸与防护工程

- 力学与爆炸 齐世福 龙源等(298)
- 力学在现代防护工程中的应用 ... 尹放林 李洪卿(307)

新材料力学性能

- 粒子填充高聚物材料增韧机理与
微损伤演化研究进展 陈建康 黄筑平(316)

纳米结构材料及其力学性能	陈志刚(341)
--------------------	----------

生 物 工 程 力 学

叶轮式人工心脏研究的若干力学问题	钱坤喜 曾培等(353)
植物生物流体力学及其应用	孙一源(364)

力学理论与分析方法

基于区间数学的结构不确定性分析方法	夏仕锋 姜弘道(376)
湍流研究的低维动力系统方法	吴锤结(385)
约束 Hamilton 系统的 Lie 对称性与守恒量	张 毅(421)

化 工 过 程

过程工业中的力学技术	涂善东 凌 祥 周昌玉(429)
------------------	------------------

林 产 工 业

力学在林产工业中应用与展望	陈 宁 王泉中 刘秀娟(454)
---------------------	------------------

包 装 工 程

现代包装力学	王志伟(459)
--------------	----------

关于计算岩土力学发展前景的几点看法

沈珠江

■ 前 言

有限元法在我国普及的初期,许多工程师对数值分析能否解决实际问题曾抱着怀疑的态度,但是不少有识的技术领导还是给予了热情的支持。记得 20 世纪 80 年代初,在组织三峡深水围堰第一轮多单位协作分析计算时,长江水利委员会司兆乐总工曾提出计算分析结果能达到“精确定性、粗略定量”的目标。到今天,虽然不能说这一目标已完全实现,但对相当一部分岩土工程来说,做到这一点已没有困难。当然,岩土工程的设计和施工在今后相当长的时期内仍需要工程师们的经验,但是,在科学技术飞速发展的今天,数值分析技术必将越来越成为人们必须依赖的工具。

同样,在岩土力学研究中,计算也已成为和实验一样不可或缺的手段。在某些特殊情况下,数值模拟甚至可以代替实验。而离心模型试验与数值模拟的相互配合,已经成为解决岩土工程问题的一个重大研究方向。

本文将就 21 世纪岩土工程数值分析的发展前景提出一些看法,基于作者专业知识的局限,重点探讨土力学问题的数值分析问题。

■ 大型工程的数值模型

大型工程不仅投资大,而且工程安全往往对国计民生有重大影响,数值分析已成为论证其安全性的一个重要手段。下面

举几个例子。

一、三峡深水围堰

三峡深水围堰设计阶段曾进行过两轮由众多单位参加的数值分析。第一轮计算在 1985 ~ 1987 年期间进行,当时的主要结论是防渗墙顶部的最大位移可能达 1 m。墙底嵌入基岩处则可能产生较大的拉应力而断裂。第二轮计算在三峡工程开工后于 1993 ~ 1995 年期间进行,此时的设计方案已作了一些改动,特别是吸取了第一阶段的研究成果,把刚性混凝土防渗墙改成塑性混凝土防渗墙,同时围堰主体的风化砂的计算参数也有一定的提高。最后得出墙顶最大位移在 36.7 ~ 51.0 cm 之间,防渗墙底部拉应力大大降低,从而基本上是安全的结论。围堰竣工后已经过 1998 年洪水的考验,实际墙顶最大位移为 56.7 cm。

二、鲁布革心墙堆石坝

鲁布革坝是我国改革开放后第一座按现代技术设计的 100 m 级心墙堆石坝。该坝也组织过众多单位参加两轮计算。第一轮在设计阶段 1984 ~ 1985 年期间进行,第二轮则在 1987 ~ 1988 年期间进行,此时坝体已大部填筑完成,计算参数根据实际填筑情况重新测定。第一轮计算得出最大沉降量在 93 ~ 161 cm 之间,第二轮则有所减小,实测值为 60.5 cm。

三、上海外环线越江隧道格构式挡墙

外环线沉管隧道两翼格构式挡墙最大高度达 40 m 以上,开挖过程中的稳定和变形是令人担心的。为此进行了三维有限元分析。此格构墙形状十分复杂,计算中布置了 22 612 个结点。计算得出开挖结束时面朝江方向的最大位移为 15.3 cm,岸上加载且逢低潮位时进一步增大到 21.7 cm。由于计算参数是根据经验假定的,上述计算结果的可信度不会很高,但在说明安全

性大体上可以保证的同时,计算结果显示了格构墙整体呈复杂的扭转变形和混凝土墙中存在明显的拉应力区,为设计时合理布置钢筋提供了依据。

以上几个算例说明,按目前的岩土力学水平,要使计算误差低于 10% 尚是奢望,但是,如果排除施工条件与原计划相差过远的情况,预测的位移误差控制在 50% 以内是可以达到的,应力的误差则可能更大一些,但是对工程造成危害的拉应力区的位置则大体上是可信的。

■ 复杂问题的数值模拟

实践表明,目前计算岩土力学的水平还只能应付简单的加荷过程和简单的研究对象,相当多的实际问题尚无法进行数值分析,其中某些问题的数值模拟随着研究的深入在近期可能取得重要的进展。下面分两类问题作一些说明。

3

一、复杂加荷条件

① 应力路线转折和主应力轴旋转,其中相对简单的如水库蓄水期的主应力轴偏转问题目前已取得一些进展,但风浪荷载下海床中主应力轴旋转而引起的砂土液化问题则尚在摸索之中。

② 反复荷载下土的液化问题,目前只能作粗略的估计(平均过程理论),如何进行精细的模拟(波动过程理论)尚在探索之中。

③ 爆炸等动力荷载下的砂土液化和粘土流动,目前还很少有人进行数值模拟的尝试,今后应加强研究。

二、复杂的研究对象

① 结构性粘土的数值模拟正在取得进展。长期以来,人们

对常见的天然软粘土的 R 形压缩曲线 (图 1) 无法进行分析。笔者建议的结构性模型已为这类问题的解决提供了必要的条件。

② 与非饱和土的有关问题,如黄土的湿陷,膨胀土的湿胀和冻土的融陷,随着 20 世纪 90 年代初,非饱和土固结方程的建立,已经可以对黄土和膨胀土进行初步的计算。冻土问题涉及相变,更复杂一些,但近几年来也已取得一定的进展。

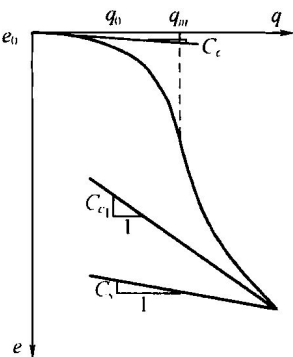


图 1 R 形压缩曲线

③ 渐进破坏过程的模拟,这是岩土力学中难度最大的一个问题,尽管近年来这方面的论文很多,提出的种种理论和分析方法难以统计,但所有的研究对象只限于试样中剪切带形成问题,暂时还看不到应用于解决实际工程问题的前景。

④ 土与结构共同作用,这是一个老问题,尽管已经有一些比较成熟的计算方法,但不能说问题已圆满解决,特别是接触面的处理方法。随着近年来土工合成材料和锚碇加固技术的大量应用,这方面新出现和要求解决的问题很多。

■ 地质现象的数值模拟

到目前为止,除了大范围的地壳运动以外,地质学家对地层的研究大多限于定性的描述。就岩土工程界来说,如果能通过数值模拟了解建筑工地附近的局部地质过程,对工程的设计和施工无疑具有积极的意义。下面就目前有可能着手进行的三个任务提出一些看法。



一、初始地应力的模拟

初始地应力分布对岩土变形的计算结果有重大影响。岩石力学界已有一些论文探讨从少量实测地应力值推算当地的地质过程。土力学界亦早已知道,假定不同的初始侧压力系数算出的开挖位移将有很大差别。但这方面的研究还很少,今后需要加大力度。

二、风化过程的模拟

风化过程发生在地表附近岩层中,除了因地质过程失去上部覆盖层而引起卸荷这一力学因素外,还与温度循环和湿度循环等物理因素及雨水淋溶和地下水侵蚀等化学因素有关。同样的现象也发生在硬粘土中,在这里干湿循环引起的地表龟裂无疑对其力学性质的劣化起着决定性的作用。由于问题的复杂性,目前似还无人尝试过对风化过程的数值模拟。这一工作无论对深入了解风化过程本身还是在风化区进行工程建设,均是十分有意义的,新一代的岩土力学工作者应当义不容辞地挑起这一担子。

5

三、硬壳层形成过程的数值模拟

水下沉积的软土层表面往往有一硬壳层。软土地基设计和施工中利用好这一硬壳层,无论对节约投资和保证工程安全均有重大意义。硬壳层的形成与地表出露引起的水分蒸发有关,目前也似无人专门对此进行过研究。

■ 碎化过程的数值模拟

岩土工程中经常需要对地层进行开挖。挖方引起的岩土材料劣化现象已越来越受到注意。前不久国内有人提出建立岩石力学新分支的主张以专门研究挖方引起的问题,并把这一新分

研究 AC 的破坏过程而另立一个分支。但是,人们也应当重视他们的意见,即 AC 过程和 AB 过程有重大的不同,后者往往伴随着岩体中裂缝开展和不断破碎的劣化过程。如果把自然条件下岩层的劣化过程称之为风化,则为了区别起见,不妨把人工开挖所引起的劣化过程称之为碎化。硬粘土层中进行开挖同样会遇到碎化过程,对这一过程进行数值模拟正是岩土力学工作者当前面临的重大挑战。

The figure consists of four vertically stacked rectangular panels, labeled q_1 , q_2 , q_3 , and q_4 on the left. Each panel shows a network of cracks (represented by black lines) within a material. The cracks are subjected to horizontal shear stress, indicated by arrows on the left and right boundaries of each panel.
 - Panel q_1 : Shows a uniform, isotropic network of polygonal cells.
 - Panel q_2 : Shows the beginning of elongation and orientation of the cells.
 - Panel q_3 : Shows more pronounced elongation and the formation of some larger, more irregular cells.
 - Panel q_4 : Shows a highly elongated and oriented network of cracks, with many small, narrow cells and some larger, more complex shapes.

在土力学中,笔者曾针对结构性粘土提出一个可以描述碎化过程的砌块体模型(图3)。这一模型认为土体的塑性

变形由两部分组成,一部分源于块体之间的滑移,可以通过传统的屈服函数描述,另一部分则由块体的破碎引起,可以通过引入一个新的损伤函数求得。这一模型是否可以推广用于分析岩体的碎化过程,尚有待研究。

■ 结 语

计算岩土力学的研究,分计算方法和计算模型两个方面。为了完成前面提出的任务,当然两个方面都需要研究。由于涉及的往往是强非线性问题和多变量耦合问题,计算结果的精度和稳定性也是必须关心的,所以计算方法的研究也是很重要的。但是应当说,计算岩土力学的核心问题是本构模型。尽管岩土材料的本构模型研究已有 30 年以上的历史,但至今尚未摆脱传统弹塑性理论的框框。建立起符合岩土材料自身特点的本构模型。岩土力学界在这一问题上正在取得共识。本构模型研究取得突破的前景已经在望,相信在今后 20 ~ 30 年内,计算岩土力学一定会取得令人瞩目的进展。

(作者单位:南京水利科学研究院;清华大学水利水电工程系。)

土动力学研究进展

刘汉龙 高玉峰

1961年,我国岩土学科创始人黄文熙先生率先发表有关饱和砂土地基及土坡液化稳定分析成果^[1],标志着土动力学这门学科在我国的兴起。1964年日本新潟地震、1971年美国圣费尔南多地震和1976年我国唐山地震等,许多实践课题促进了这门学科的迅速发展,使其在国民经济建设中发挥着愈来愈大的作用。1995年,日本神户大地震等使土动力学和岩土地震工程的研究达到了一个新的高潮,取得了丰硕的成果。土动力学是研究地震、波浪及机器基础等动荷载作用下土体的动变形、动强度和稳定的一门学科。本文就目前国内外土体动力本构模型、动力分析和土工动力测试的研究作一个简要的归纳和评述。

土体动力本构模型研究

饱和砂土的本构理论、数值计算和测试技术三个方面是相辅相成的。动荷载下饱和砂土体动力特性研究初期,测试技术极其简陋,试验条件与对实际地质条件和荷载条件的模拟与实际情况相去甚远,由此产生的动荷载下饱和砂土体动力特性的认识甚是肤浅和片面,在试验基础上建立的模型则对实际情况作了很多的简化和假定,动本构关系的描述很简单,同时由于计算理论和方法的落后与限制,使得模型处于简单拟合的阶段,模型参数的确定也极其粗糙。后来,随着试验技术的改进和发展,模拟实际状态越来越接近,人们对动荷载下饱和砂土体动力特

性的认识越来越深刻和全面,同时由于不同学科间的相互渗透和计算理论的完善,特别是以有限元方法为代表的数值计算方法和计算机技术的高速发展,为模型技术的发展起了不可估量的推动作用,使得对实际情况动荷载下饱和砂土体动力特性的描述也越来越精确。饱和砂土实际动本构关系是极其复杂的,它在不同的荷载条件、土性条件及排水条件下会表现出极不相同的动本构特性。要建立一个能够适用于各种不同条件的动本构模型的普遍形式是不切实际的,其切实的方法是对于不同工程问题,应该根据土体的不同要求和具体条件,有选择地舍弃部分次要因素,保留所有主要因素,建立一个能够反映实际情况的动本构模型。目前具体建立的动本构模型已多达数十个,大致可分为两类,即粘弹性理论和弹塑性理论。

一、粘弹性理论

自 1968 年 Seed 提出用等价线性方法近似考虑土的非线性以来,粘弹性理论已有了较大的发展。在土体的动力反应分析中,常用的粘弹性理论有等效线性模型和曼辛型非线性模型两大类。前者把土体视为粘弹性材料,不寻求滞回曲线的具体数学表达式,而是给出等效弹性模量和等效阻尼比随剪应变幅值和有效应力状态变化的表达式;后者则根据不同的加载条件、卸载和再加载条件直接给出动应力-应变的表达式。在给出初始加载条件下的动应力-应变关系式(骨干曲线方程)后,再利用曼辛二倍法得出卸荷和再加荷条件下的动应力应变关系,以构成滞回曲线方程。Hardin-Drnevich 模型^[2]、Ramberg-Osgood 模型^[3]、双线性模型及一些组合曲线模型均属于等效线性模型。

一般的粘弹性模型不能计算永久变形,为此, Martin 等人根据等应变反复单剪试验结果,提出了循环荷载作用下永久体积应变的增量公式^[4]。其后,日本学者八木、大冈和石桥等分别由等应力动单剪试验及扭剪仪各自提出了计算永久体积应变增