

WILEY

地震工程中的 计算岩土力学

Computational Geomechanics with
Special Reference to Earthquake Engineering

[威尔士] O. C. Zienkiewicz

[英格兰] A. H. C. Chan

[西班牙] M. Pastor

[意大利] B. A. Schrefler

[日本] T. Shiomi

著

李宏恩 牛志伟 刘晓青

何勇军 张丽彬

译



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

JOHN WILEY & SONS

水利部土石坝破坏机理与预防控制技术重点实验室
南京水利科学研究院出版基金

资助

地震工程中的 计算岩土力学

Computational Geomechanics with
Special Reference to Earthquake Engineering

[威尔士] O. C. Zienkiewicz

[英格兰] A. H. C. Chan

[西班牙] M. Pastor

[意大利] B. A. Schrefler

[日本] T. Shiomi

著



李宏恩 牛志伟 刘晓青

何勇军 张丽彬

译



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

JOHN WILEY & SONS

内 容 提 要

本书全面阐述了地震工程中的计算岩土力学的基础理论、数值模拟方法、试验验证、工程应用、程序编写等方面内容,针对地震工程问题,全书呈现了该领域的众多新方法与新进展,并将计算岩土力学的理论与有限元计算方法同实际地震工程问题紧密联系,是一本极具实用价值的计算岩土力学工具书。

本书可供从事防震减灾相关专业的设计、施工、科研人员参考,也可作为水利水电工程、岩土工程等专业教学参考用书。

版 权 声 明

本书中文简体中文字版专有翻译出版权由 John Wiley & Son, Inc 公司授予中国水利水电出版社。未经许可,不得以任何手段和形式复制或抄袭本书内容。本书封底贴有 Wiley 防伪标签,无标签者不得销售。

北京市版权局著作权合同登记号:01-2018-2867

图书在版编目(CIP)数据

地震工程中的计算岩土力学 / (威尔士) O. C. 辛克维茨 (O. C. Zienkiewicz) 等著; 李宏恩等译. — 北京: 中国水利水电出版社, 2018. 6

书名原文: Computational Geomechanics with Special Reference to Earthquake Engineering
ISBN 978-7-5170-6555-5

I. ①地… II. ①O… ②李… III. ①工程地震—计算力学—岩土力学 IV. ①P315.9

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第140564号

书 名	地震工程中的计算岩土力学 DIZHEN GONGCHENG ZHONG DE JISUAN YANTU LIXUE [威尔士] O. C. Zienkiewicz [英格兰] A. H. C. Chan
作 者	[西班牙] M. Pastor 著 [意大利] B. A. Schrefler [日本] T. Shiomi
出版发行	李宏恩 牛志伟 刘晓青 何勇军 张丽彬 译 中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn
经 售	电话: (010) 68367658 (营销中心) 北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	天津嘉恒印务有限公司
规 格	170mm×240mm 16开本 21.75印张 414千字
版 次	2018年6月第1版 2018年6月第1次印刷
印 数	0001—1000册
定 价	78.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

译者序

O. C. Zienkiewicz 先生是计算岩土力学及有限元数值方法研究的著名先驱之一，由他和 A. H. C. Chan 教授、M. Pastor 教授、B. A. Schrefler 教授及 T. Shiomi 教授等学者撰写的《Computational Geomechanics—with Special Reference to Earthquake Engineering》（《地震工程中的计算岩土力学》）一书，是岩土数值计算领域的一本巨著。本书出版于 1999 年，对地震工程中的计算岩土力学进行了全面阐述，涉及有限元基本理论、饱和与非饱和多孔介质理论、广义塑性力学及其土体本构模型、静动力问题数值模拟、离心机试验验证、经典地震工程问题正反演分析、人工边界等特殊问题等方面，全方位展示了地震工程中的计算岩土力学所涵盖的基础理论、数值模拟方法、试验验证、工程应用、程序编写等的各个层面，是一本非常有价值的计算岩土力学工具书。全书图文并茂，资料详实，富有可读性，不但充分反映了有限单元法在计算岩土力学领域应用的诸多传统知识，而且针对地震工程问题，在最大程度上为读者呈现了该领域的众多新方法与新进展；更进一步地，作者还将相关理论成果（如广义塑性力学及著名的 Pastor - Zienkiewicz - III 本构模型等）应用于圣费尔南多坝受地震作用而破坏、日本新潟地震工程液化等工程因地震破坏实例的数值模拟中，将计算岩土力学的理论与有限元计算方法同现实中的地震工程问题紧密联系起来，从而使读者对地震工程中的计算岩土力学有了进一步的理解和思考。

由于本书篇幅较长，本团队历经两年时间才得以顺利翻译完成。具体分工是：刘晓青完成前言、第 1 章、第 2 章、第 5 章的翻译工作；李宏恩、张丽彬完成第 3 章、第 4 章、第 7 章的翻译工作；牛

志伟完成第6章、第8章、第9章、附录的翻译工作；翻译工作完成后，由何勇军、李宏恩、张丽彬对全书逐字逐句进行了审校，力图做到“信、达、雅”，并确保全书术语和语言风格的统一。此外，武锐、李天华、刘坤、刘庆晶、张英豪、邢洋阳、郑慧娟、王若灿等硕士研究生参与了本书部分内容翻译以及大量文献资料的收集和整理工作。

在本书的翻译过程中，得到了以 M. Pastor 教授为代表的原著作者的鼎力支持，使得这本译著能够最终付梓，对此深表谢意。同时本书的出版得到了南京水利科学研究院、河海大学以及水利部土石坝破坏机理与防控技术重点实验室的大力支持，以及国家重点研发计划项目（2016YFC0401809）、国家自然科学基金项目（51579154）的资助，谨表衷心感谢。中国水利水电出版社吴娟、沈晓飞等多位编辑同志为本书的顺利出版付出了大量的心血和汗水，在此一并感谢。

因译者学识与时间所限，书中难免还存在疏漏之处，当请广大读者指正。

译者

2018年5月

于南京清凉山麓

原著前言

FOREWORD

土体有效应力概念已在土力学领域获得广泛认可，但在实际预测和工程计算中，基于传统总应力的方法仍在沿用。20 世纪 70 年代早期，作者（第一作者）开始应用数值方法模拟一般的土力学问题，特别是土动力学问题。作者逐渐清晰地认识到，只有摒弃总应力法才能获得土体特性的真实预测。基本模型应考虑土骨架与孔隙水的耦合作用。事实上，当土体受到如地震中出现的循环荷载时，土体的软化和“液化”现象只能通过考虑这种“两相”介质特性和定量分析进行解释，且土体的真实特性必须通过复杂的计算获得。常应用于静力学的简单极限法已不再适用。

由于广大从业人员和工科学生迄今只能通过分散于众多期刊和会议的文献获得有关计算方法基础，因此现在有必要通过一本书进行集中介绍。本书正是试图为满足这种需求提供一个便捷的途径。

本书的多作者机制不仅保证了出版速度，而且由此介绍了研究团队的各位成员。他们在过去十年把精力都集中在对可供从业人员和研究人员使用的实用计算机代码项目的开发上。

自 1975 年，在斯旺西（大学）和世界其他地方，包括学生和同行在内的大量科研工作者投身于建立数值模拟预测基础研究中，这项工作主要基于比奥在 20 世纪 40 年代早期引入的有效应力概念。然而，一些工程师在进行地震响应分析时仍继续使用总应力方法计算，并时常采用线性逼近，这类简化通常无效并可能导致错误的预测结果。

近年来，离心机实验使一些涉及土体静力学和动力学的问题研究成为可能，并提供了一系列有用的基准预测值（试验成果），这使

两相介质法模拟的验证得以实现，且发现数值计算与实验成果非常吻合。1993年在戴维斯加州大学举行的研讨会是一个非常重要的里程碑，这次研讨会汇报了由美国国家科学基金会赞助的 VELACS 项目^①（通过离心机研究验证液化分析）的试验成果。

本书通过对有效应力完整的展示，表明两相介质法是可行的，并且这将是未来工程计算和重要土力学问题特性预测的基础。本书展示了其中部分验证算例，并展示了一些能够描述实际应用的程序实例。

在数值模拟研究的过程中，岩土材料——土体，在部分孔隙充满空气时通常显著地表现为不完全饱和状态。这种局部饱和导致负孔隙水压力的出现，并使得一些非黏性土出现了“表观的”（“假”）凝聚力。这种现象可能出现于加载初期或在动荷载过程中不断积聚。因此我们将这种现象融入于本书所展示的处理方法中，从而使该方法的适用性更为广泛。

尽管本书作者众多，但我们努力提供尽可能一致的方法，并自始至终使用同样的符号、风格和思维。

本书前三章提出了饱和与非饱和多孔介质理论，从而建立了解决土力学问题的总体基础。

在开始数值模拟之前，第4章论述了土体特性的定量描述方法，这对实现数值计算至关重要。本章有必要使用较长篇幅，因为从简单的塑性模型开始直到如广义塑性力学、临界土力学等专题都在本章有所体现，这对全面描述土体特性是非常必要的。

在第4章还介绍了一个经简化的硬化模型，当引入简单的经典塑性力学理论后，该模型实现了在静力或拟静力问题应用中对土体液化和循环流动特性现象的真实连续地模拟（第5章），并通过离心机动力实验对模型计算成果进行验证（第6章），最后在第7章实现地震中工程的实际应用。

在第8章，解决一些比较专业的问题，虽然这不是必须的，但

① <http://www.princeton.edu/~dynaflow/radu/soil/velacs/>

有助于改进通用程序。本章介绍了不可压缩性、辐射阻尼和网格自适应精细剖分的特殊处理方法。

本书作者通过应用 SWANDYNE 程序介绍了土体在静力和动力情况下的各种解答。该程序的一个类似衍生版本同样可用，在本书最后（第 9 章）概略介绍了一个 SWANDYNE 的简化版本，读者可通过下述网址 <http://www.bham.ac.uk/CivEng/swandyne/index.htm> 获得其可执行版本。

CONTENTS

目录

译者序

原著前言

第 1 章 概述及有效应力的概念	1
1.1 概述	1
1.2 土体及其他孔隙介质的性质：为何全变形分析是唯一有效的途径 ...	3
1.3 饱和及部分饱和介质中的有效应力概念	5
1.3.1 存在孔隙的单一流体	5
1.3.2 有效应力的另一种解法	6
1.3.3 存在于两种（或更多）孔隙流体、部分饱和介质中的有效应力	10
参考文献	12
第 2 章 动力情况下土体—孔隙流体相互作用控制方程	15
2.1 概述	15
2.2 单一孔隙流（水）的完全饱和特性	16
2.2.1 平衡方程与质量平衡（ $\mathbf{u}$, $\mathbf{w}$ 及 p ）	16
2.2.2 简化的方程组（ $\mathbf{u}-p$ 形式）	21
2.2.3 各种近似方法的有效性	23
2.3 忽略大气压力（ $p_a=0$ ）后的部分饱和特性	26
2.3.1 在实际分析中需要考虑部分饱和问题的原因	26
2.3.2 部分饱和条件下方程的修正	27
2.4 考虑空气流动（ $p_a \geq 0$ ）的部分饱和介质特性	30
2.4.1 包含空气流动的控制方程	30
2.4.2 控制方程	30

2.5 基于复合混合理论的微分方程	32
2.5.1 运动方程	33
2.5.2 微观平衡方程	34
2.5.3 宏观平衡方程	35
2.5.4 本构方程	36
2.5.5 一般场方程	37
2.5.6 术语	39
2.6 结论	41
参考文献	41
第3章 有限元离散和控制方程的解法	45
3.1 有限元离散步骤	45
3.2 适用于一般岩土力学有限元程序的 $\mathbf{u}-p$ 格式离散	47
3.2.1 一般控制方程概述	47
3.2.2 控制方程在空间上的离散	49
3.2.3 控制方程在时间上的离散	50
3.2.4 瞬态解(固结、静力解、排水非耦合、不排水) 的一般适用性	56
3.2.5 通过线性等效量说明的数值方程结构	59
3.2.6 阻尼矩阵	60
3.3 $\mathbf{u}-\mathbf{U}$ 格式的离散与其显式解	60
3.3.1 控制方程	60
3.3.2 离散方程及显式格式	62
3.3.3 基于线性等效量形式的数值方程结构(亦即 3.2.5)	62
3.4 理论: 方程的张量形式	66
3.5 结论	68
参考文献	68
第4章 本构关系——塑性力学	73
4.1 引言	73
4.2 广义塑性力学理论框架	74
4.2.1 试验方面	74
4.2.2 广义塑性力学	75
4.2.3 经典塑性力学理论	79
4.3 临界状态模型	93
4.3.1 引言	93

4.3.2 正常固结黏土的临界状态模型	94
4.3.3 适用于沙土的临界状态模型	105
4.4 改进模型	110
4.4.1 引言	110
4.4.2 黏土的广义塑性本构模型	114
4.4.3 沙土的广义塑性模型	121
4.4.4 各向异性	134
4.5 修正的致密化模型	141
4.5.1 考虑循环活动性的致密化模型	141
参考文献	146
第5章 静力、固结及部分饱和和动力问题的实例	153
5.1 概述	153
5.2 静力问题	154
5.2.1 算例 (a): 无约束—小约束条件	154
5.2.2 算例 (b): 具有约束变形的介质问题	156
5.2.3 算例 (c): 强约束—不排水特性	157
5.2.4 算例 (d): π 截面屈服准则的影响	162
5.3 垂直土柱等温排水	163
5.4 从地下含水层中抽水而产生沉降的模拟	167
5.5 含水层中的气体储存情况模拟	169
5.6 置于部分饱和土体上的柔性基础	172
5.7 小应变与有限变形公式之间的固结与动力结果比较	175
5.7.1 完全饱和和土柱的固结	175
5.7.2 完全饱和和部分饱和土柱的固结	176
5.7.3 完全饱和和部分饱和情况下的二维土层固结	178
5.7.4 地震荷载下的完全饱和土柱	179
5.7.5 在自重和水平地震荷载作用下垂直边坡的弹塑性大应变特征	183
5.8 结论	185
参考文献	185
第6章 数值预测模型的离心机试验验证	188
6.1 介绍	188
6.2 离心机模拟的缩尺定律	189
6.3 委内瑞拉一个原型堤缩尺模型的离心机试验	191
6.4 VELACS 项目	200

6.4.1 一般分析流程	204
6.4.2 确定数值模型中的每个参数的精确方法	205
6.4.3 层状剪切箱模型	206
6.4.4 Pastor - Zienkiewicz mark III 模型的参数确定	207
6.5 与 VELACS 离心机试验的对比	207
6.5.1 模型简介	207
6.5.2 试验和计算预测的对比	212
6.6 挡土墙的离心机试验	214
6.7 结论	217
参考文献	217
第 7 章 预测应用与反演分析	222
7.1 引言	222
7.2 神户人工岛多向加载影响下液化问题模拟	223
7.2.1 导论	223
7.2.2 人工岛观测到的多向荷载及其液化现象的数值模拟	224
7.3 基于新潟地震液化特性模拟对初始（剪切）应力影响的解释	232
7.3.1 初始剪切应力的影响	233
7.4 岸墙失稳与对策	235
7.4.1 边界条件与建模	236
7.4.2 结果和讨论	238
7.5 圣费尔南多下坝失稳	241
7.6 某土石坝的液化破坏机制（N 坝）	248
7.6.1 分析对象	248
7.6.2 地震动输入	249
7.6.3 边界条件与建模	250
7.6.4 计算结果	252
7.6.5 小结	253
7.7 1964 年新潟地震的液化破坏	254
7.7.1 计算结果	257
7.8 常规土与改良土层的相互作用	259
7.8.1 地震动输入	261
7.8.2 地震荷载下的安全性	263
7.8.3 小结	267
参考文献	267

第 8 章 分析和计算的专题讨论：辐射边界、自适应有限元网格	
加密和不可压缩特性	270
8.1 概述	270
8.2 地震动输入与辐射边界	270
8.2.1 指定地震动：绝对和相对位移	270
8.2.2 辐射边界条件：一维问题公式	273
8.2.3 辐射边界条件：二维问题处理	275
8.2.4 地震动输入和辐射边界——结语	277
8.3 改进精度的自适应网格加密和局部现象的捕获	279
8.3.1 自适应加密概述	279
8.3.2 局部失稳与应变软化：可能的非唯一性数值解	283
8.4 不可压缩材料混合插值函数的稳定化求解方法	286
8.4.1 不排水不可压缩材料特性的问题	286
8.4.2 速度校正，稳定化处理	287
8.4.3 举例说明分割算子过程的有效性	289
8.4.4 稳定化算法成功的原因	291
参考文献	293
第 9 章 饱和多孔介质静态和动态有限元分析的计算程序	296
9.1 概述	296
9.2 DIANA - SWANDYNE II 程序概述	296
9.3 DIANA - SWANDYNE II 中的主要程序说明	298
9.3.1 最高级别程序	298
9.3.2 控制数据与材料数据的子程序	299
9.3.3 网格数据输入的子程序	301
9.3.4 用于分析的主控制子程序	302
9.3.5 单元矩阵的形成和残差计算的子程序	304
9.4 主要辅助子程序	306
9.5 本构模型子程序	308
9.5.1 标准的本构模型接口子程序 CONSTI	308
9.5.2 用于一般扩散的本构模型	309
9.5.3 其他实现的模型	310
9.6 系统相关的子程序	310
参考文献	311
附录 9A 在 SM2D 中实现新模型	313

9A.1	与主要程序的接口	314
9A.2	仅用于输入的变量	314
9A.3	输入和输出变量	316
9A.4	仅用于输出的变量	317
9A.5	ISWDP 分支	318
9A.6	公共退出	321
9A.7	错误退出	321
9A.8	目前的一些进展情况	321
9A.9	另一算例的实现	322

第 1 章

概述及有效应力的概念

1.1 概 述

工程技术人员在设计如堤防、大坝或建筑物地基等结构时应该能对其在各种可能出现的荷载条件下抵抗倒塌或超大变形的能力进行预估。这种预估有时会用在承受人为条件的自然土体或露头岩石的安全性判断上。最具典型意义的实例是 1963 年 10 月 9 日意大利瓦依昂 (Vajont) 水库中巨大山体滑坡带来的灾难性垮塌 (漫顶) (Müller, 1965)。图 1.1 展示了该事件的破坏范围和遭受地面运动后的横截面情况。

上述事件根本原因可以说是“压垮骆驼的最后一根稻草”——山体滑坡冲进水库中引起了漫顶。从本质上说，整个过程是静态或准静态的，直到最后时刻运动着的大体积土石方获得一个很大的速度后滚入水库，排开的水体翻过大坝冲向下游导致了 Longarone 地区约 4000 人死亡。

这种以较小规模滑坡形式出现在堤坝中的静态失稳现象得到了工程技术人员的密切关注。然而，频频发生的由地震引起的动力影响更加惊人且难以预测。

图 1.2 描述了在 1971 年洛杉矶地震中损坏的圣费尔南多坝 (下坝) (Lower San Fernando dam) 的动力问题 (Seed, 1979; Seed 等, 1975)。因为地震时水库水位低于坝顶 10.5m，这次事故很幸运地没有造成人员伤亡，也没有发生漫顶事故，否则漫坝引起的大洪水将袭击人口稠密的洛杉矶地区并带来巨大灾难。

很明显，上述两个事件均涉及孔隙水压力与土骨架的相互作用问题，也许这种相互作用因具有特殊性而未能引起人们的即刻关注。上述现象的出现是因为土体与流体的混合物在如地震等作用的周期运动过程中力学性能“弱化”的缘故。正是由于这种“弱化”而非整体的加速度力导致了圣费尔南多下坝出现坍塌。在地震的过程中，孔隙水压力增加，而固相颗粒间的力和强度均减小了。

这种现象是有据可查的，并且在某些情况下，随着强度降低到几近于零而

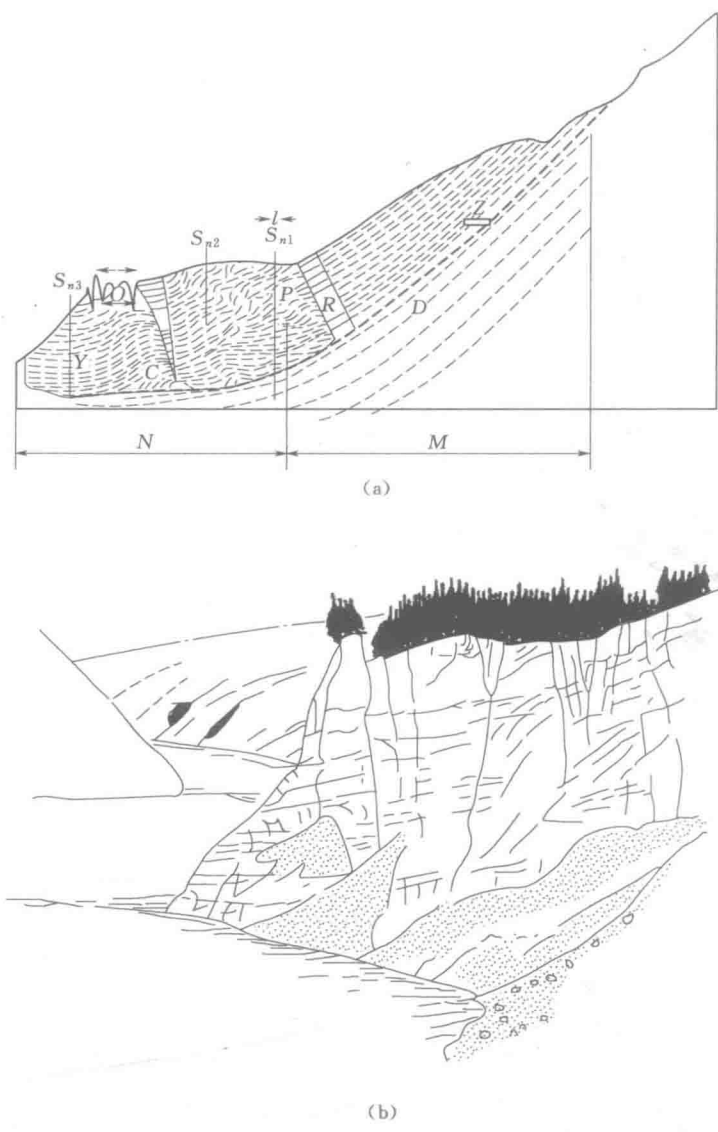


图 1.1 瓦依昂 (Vajont) 水库于 1963 年 10 月 9 日失事 (照片 1 为滑坡实景照片)
(a) 假设的滑动面; (b) 滑坡的坡底 (Müller, 1965)

土体几乎表现出液体的特征，这种现象被称为土体液化。照片 2 为 1964 年日本新潟地震后建筑物的情况。很显然，在地震运动过程中建筑物好像发生了“浮起”。

本书将讨论出现在土体中的静力、拟静力和动力问题的本质和细节，并说明基于有限元的数值计算如何有效地定量分析这些问题。

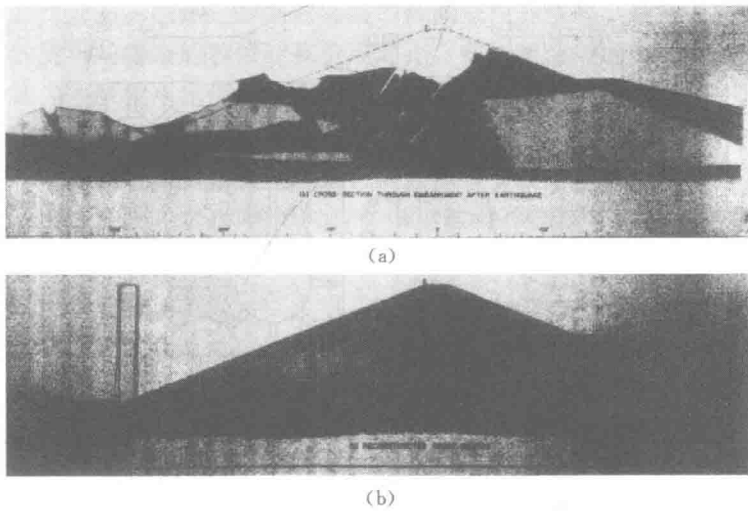


图 1.2 经受 1971 年地震的圣费尔南多下坝破坏及重建情况
(来源于 Seed, 1979)

(a) 地震后坝体横断面；(b) 重建后的坝体横断面

1.2 土体及其他孔隙介质的性质： 为何全变形分析是唯一有效的途径

对于结构力学中的单相介质来说，用相对简单的方法对最终（失稳）的荷载进行预估是有可能的（至少针对静力问题）。静力条件下这种简单的极限荷载计算方法经常被使用，但这种解决问题的途径并非普遍有效。对于土动力学问题来说，用这种简化方法根本不合适。

上述问题的原因在于，孔隙被液体填充的土体或者类似于岩石（如混凝土）的结构性质不能由单相介质的特性来描述。事实上，如图 1.3 所示的孔隙材料是否可用连续介质力学来求解是一个悬而未决的问题，此处将用两种全然不同的材料来予以说明。第一种材料为非水泥的、彼此颗粒松散接触的粒状结构；第二种材料为带有孔隙的固体物质，其中的孔隙通过狭窄的通道相互连接。

从图 1.3 可知，对用连续介质处理问题的可能性的质疑，其答案是不言而喻的。但是当与颗粒或孔隙的大小相比，只要所关注的尺寸和所谓的“无穷小” dx 、 dy 是足够大的，那么连续介质的性质成立是显而易见的。然而，颗粒间的作用力将受到单一流体压力 p 的巨大影响（或 p_1 、 p_2 等，如果存在两种或多种流体的话）。坚硬、多孔材料可能会引起变形或破坏的强度仅由压力