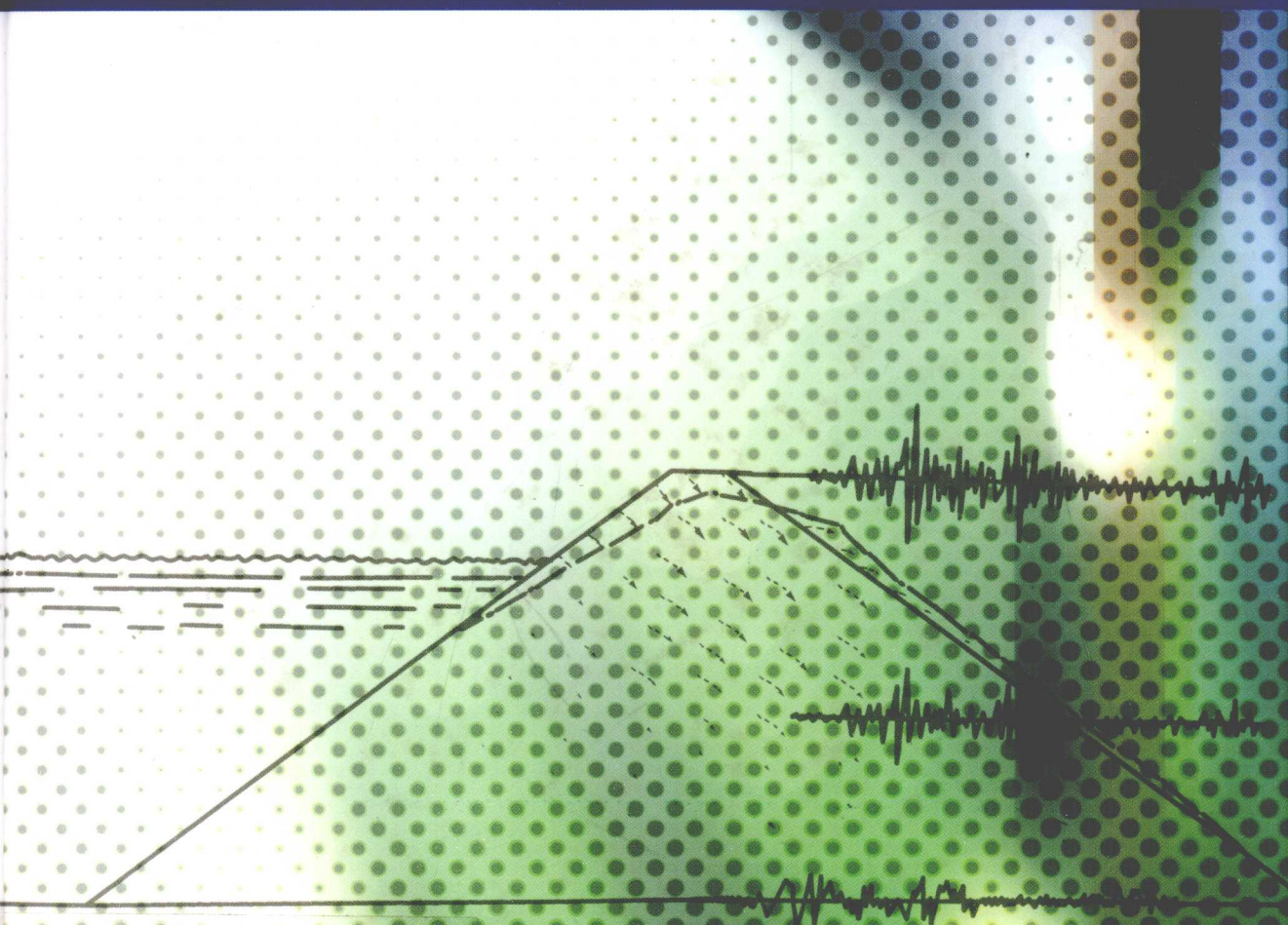




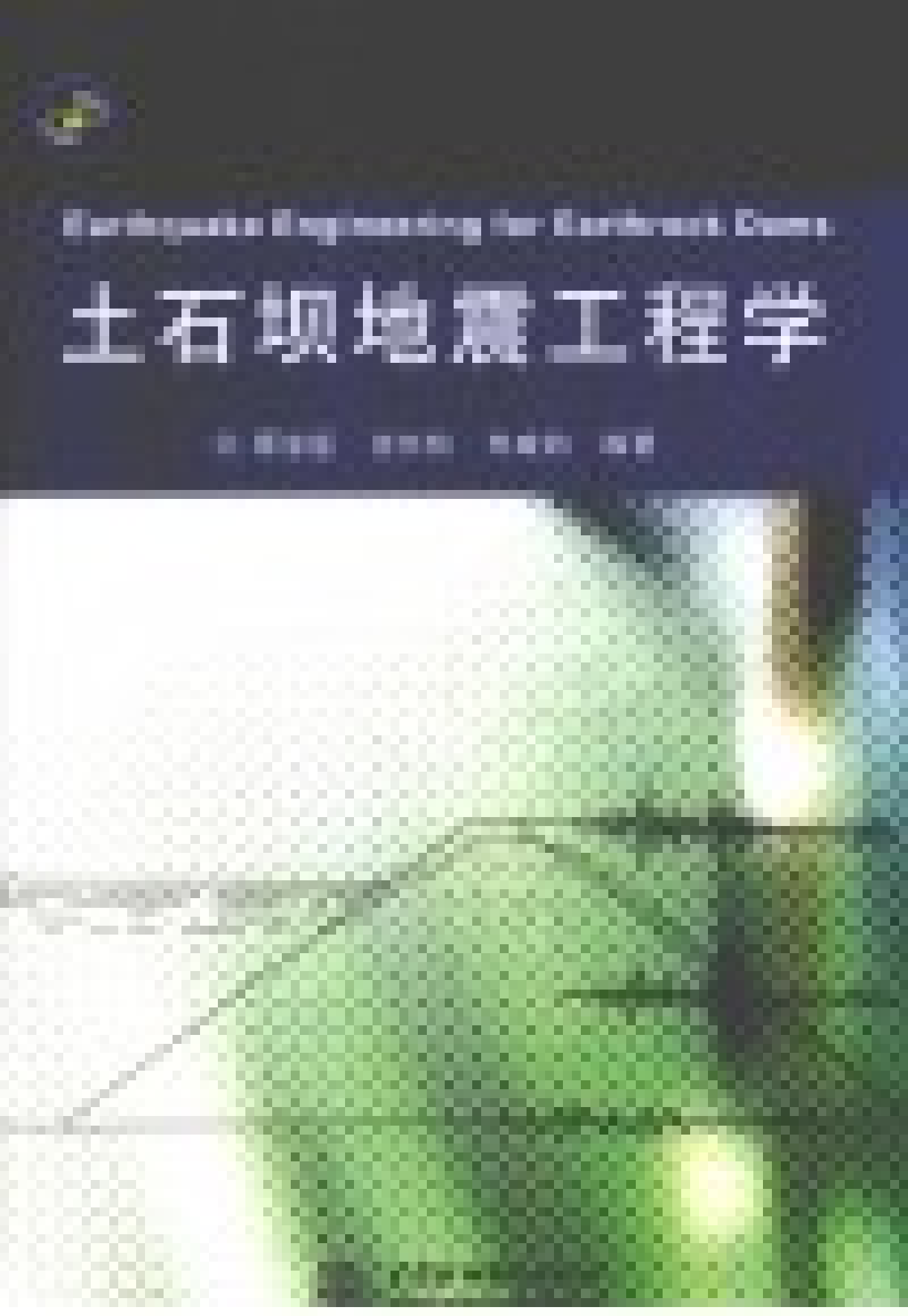
Earthquake Engineering for Earthrock Dams

土石坝地震工程学

◎ 顾淦臣 沈长松 岑威钧 编著



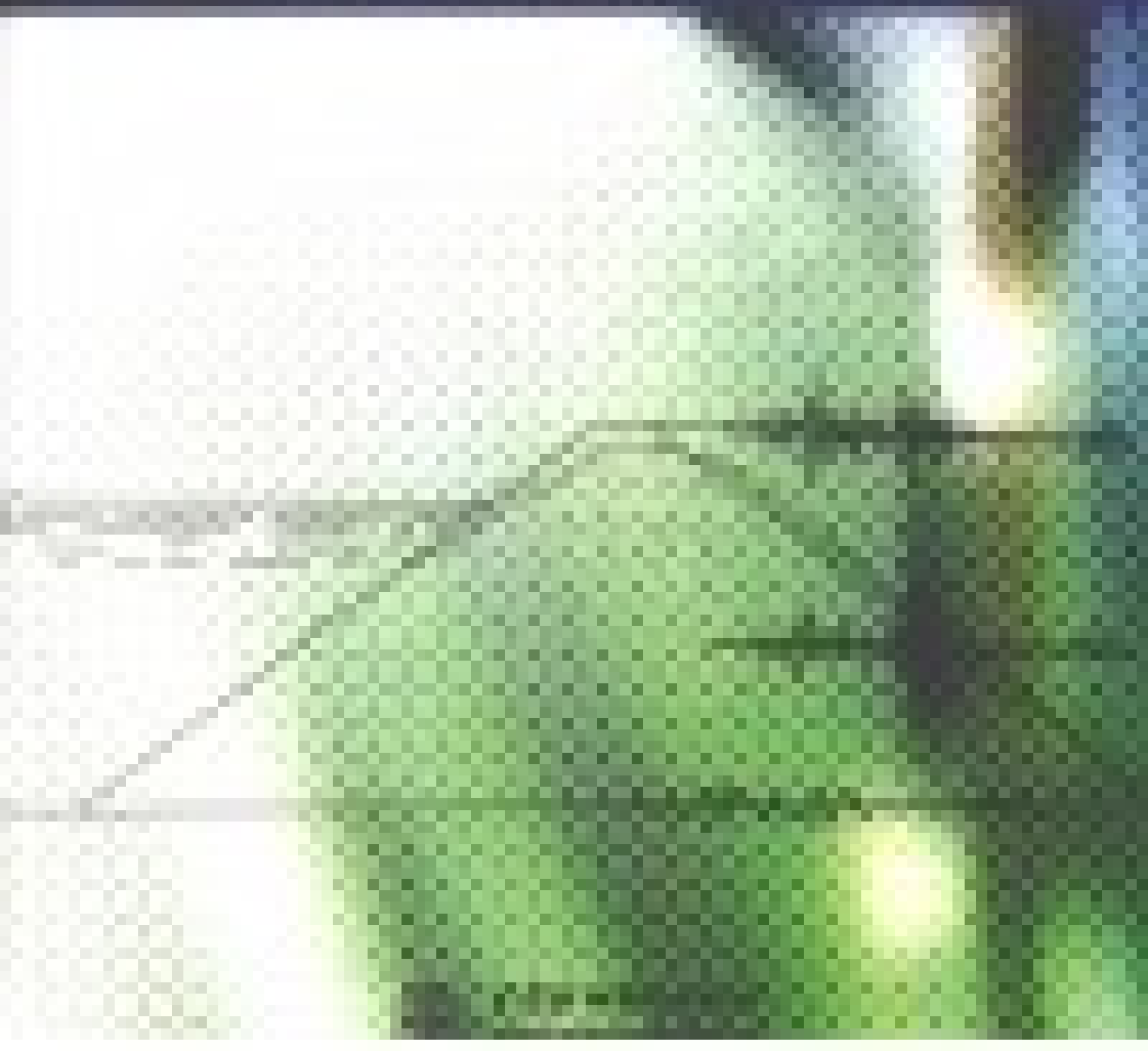
中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



Earthquake Engineering for Earthdams, Dams, and Embankments

土石坝地震工程学

王 强 编 著 王 强 编 著 王 强 编 著





水利重点科技专著出版项目
河海大学水工结构国家重点学科建设经费资助

土石坝地震工程学

◎ 顾淦臣 沈长松 岑威钧 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书是一部理论联系实际论述土石坝地震工程学的专著。书中介绍了地震的基本概念、加速度时程曲线、地震观测仪器及布设、地震反应计算基础理论等地震工程学知识。对土的动力本构模型及其参数确定、饱和砂土和软土的液化、振动孔隙水压力、永久变形、土体动力反应计算原理及土石坝的地震反应计算等进行了介绍和相关计算公式的推导,给出了多个工程计算实例。同时还阐述了不同施工设备和施工技术对提高压实度、增强抗震能力的影响。对“5·12”汶川8级强震给紫坪铺混凝土面板堆石坝和碧口心墙坝产生的影响也进行了总结分析。

本书可作为水工结构、防灾减灾工程专业研究生的教材或相关专业的教学参考书,也可作为水利水电、土木、交通工程的设计、施工、科研人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

土石坝地震工程学 / 顾淦臣, 沈长松, 岑威钧编著
— 北京: 中国水利水电出版社, 2009. 12
ISBN 978-7-5084-7119-8

I. ①土… II. ①顾… ②沈… ③岑… III. ①土石坝—地震工程 IV. ①P315.9

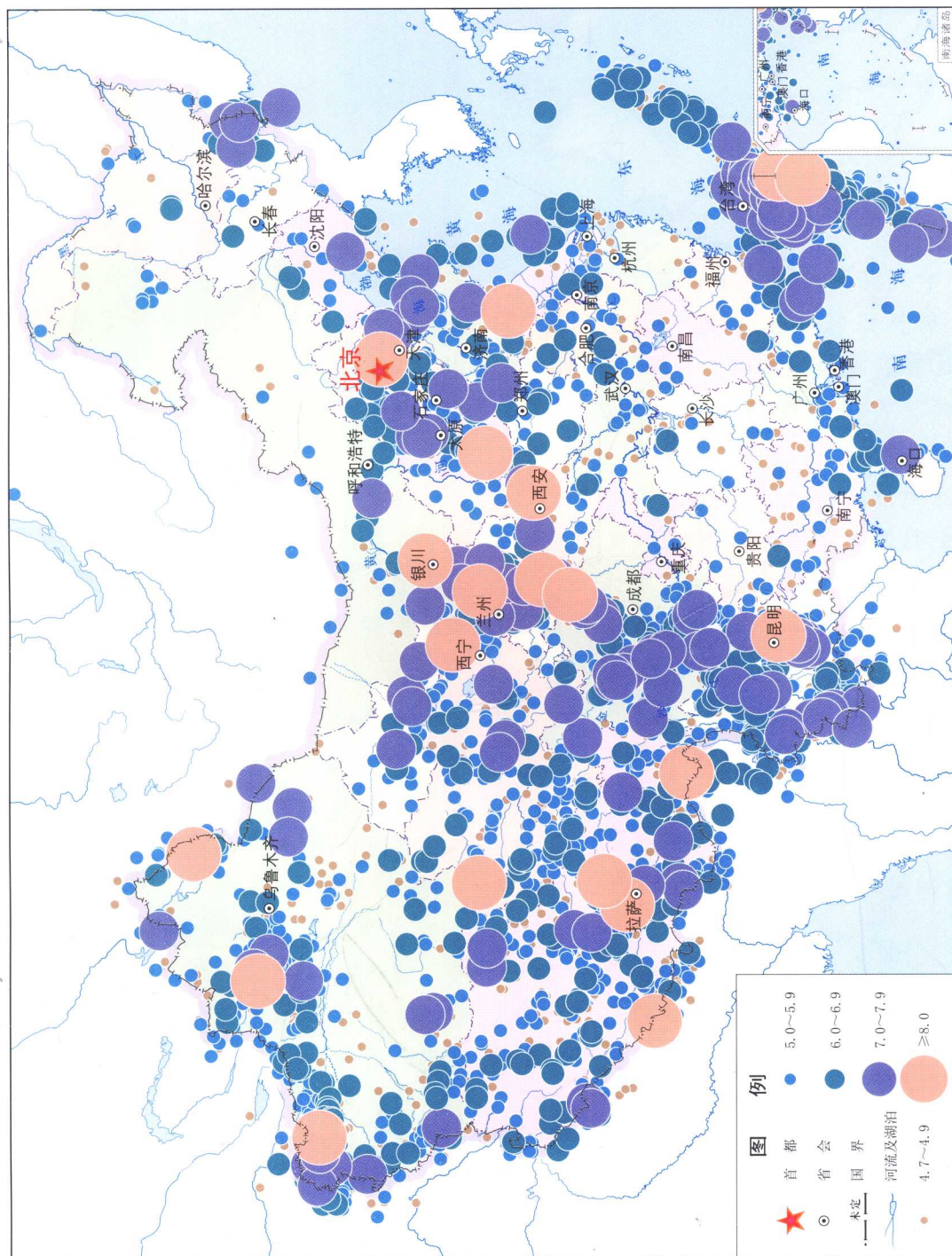
中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第241414号

审图号: GS(2009) 1345 号

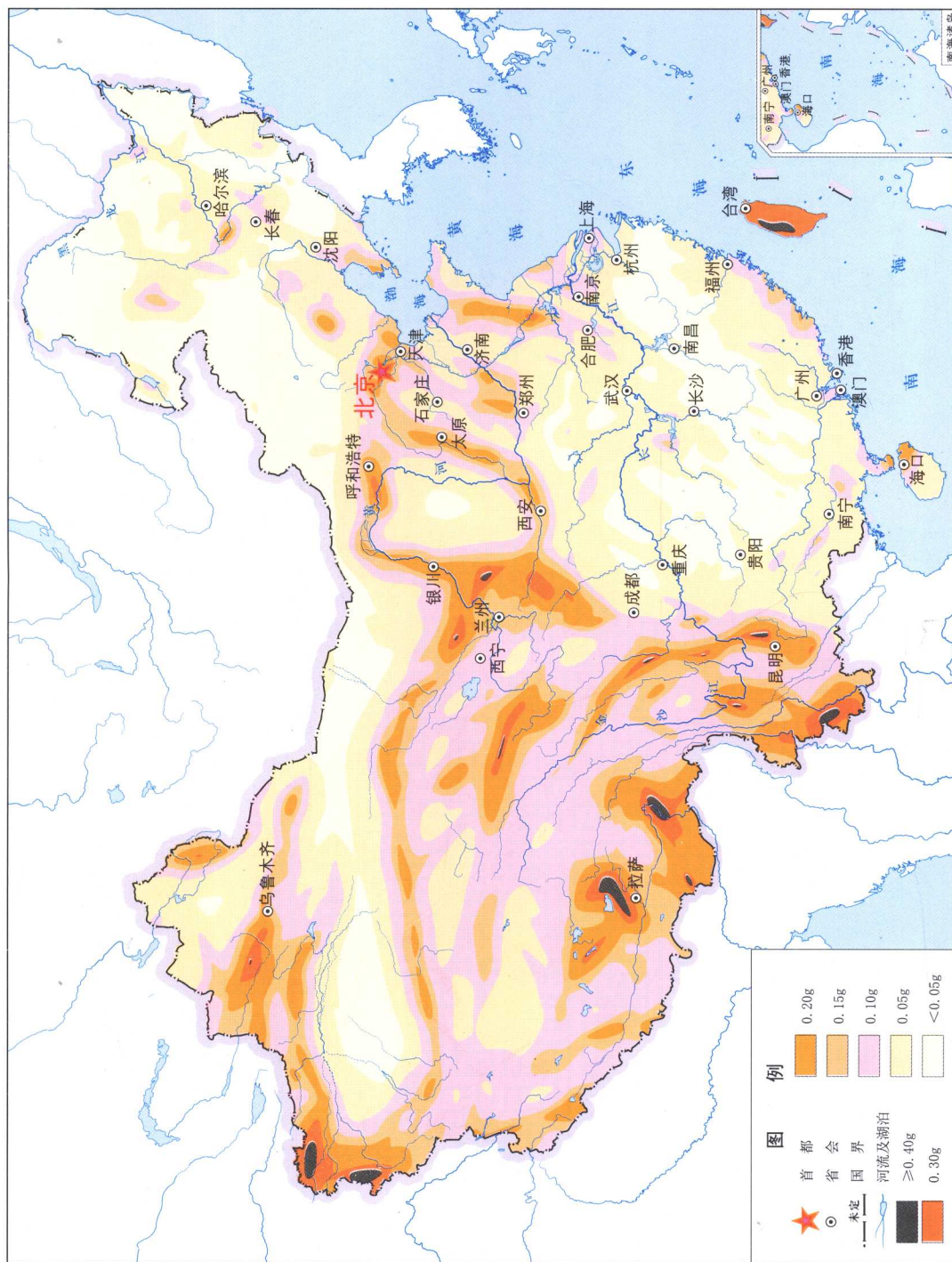
书 名	土石坝地震工程学
作 者	顾淦臣 沈长松 岑威钧 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京中科印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 26.25印张 622千字 2插图
版 次	2009年12月第1版 2009年12月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	68.00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



公元780~2005年中国地震震中分布示意图
(本图由中国地震局地球物理研究所高孟潭研究员提供)



地面地震动峰值加速度区划图

(本图由中国地震局工程力学研究所李小军研究员提供)

序

地震工程学是在地震学和结构动力学的基础上发展起来的一门新兴学科。可以用于预估地区的地震烈度及分析建筑物对地震的反应，从而改进设计，采取措施，以策工程的安全。由于工程设计需要，这门学科从创始到现在虽只有二十余年的历史，但发展却很迅速。有些重大课题还在不断地研究和推进中。

我国是世界上多地震国家之一。地震活动分布范围较广，基本烈度在Ⅵ度以上的地区占全国总面积的60%以上。有许多大中城市位于基本烈度为Ⅶ度或Ⅷ度地区。同时，我国地震震源较浅，因而地震破坏力较大。众所周知的邢台地震、通海地震、辽南地震、唐山地震等对我国经济建设造成很大的损失。

地震破坏对城市而言，可使房屋倒塌、人员伤亡、公共设施崩溃、工厂生产停顿。这种破坏仅限于当地。至若作为水库挡水建筑物的水坝水闸，其崩溃将使急浪涌波一泻千里，影响尤为重大，不能不作专门的研究和论述。土石坝的坝体和坝基常常都由散粒材料组成，其材料性能和对地震反应都很复杂。所以，土石坝比混凝土坝更易失事。因此对土石坝的地震工程研究，显得更加重要，同时也更为复杂。

本书选材精当。有关土的静力本构关系在其他专业书中有详尽介绍，本书不再重复。书中系统地介绍了地震基本知识、设计地震加速度过程线的确定、土的动力本构模型、动力非线性参数的确定，以及非线性体系的逐步数值积分法。书中还介绍了剪切楔动力分析法、集中质点动力分析法、有限元分析法。并以较大篇幅介绍了土石坝震害实例和抗震工程措施，这是已有地震工程文献中所缺乏的，堪称本书特色。

作者有坚实的理论基础和丰富的实践经验，对若干理论问题提出了新的见解。例如对斜坡饱和砂土的液化判别，提出了不同于水平地基的新概念、新方法。对前人未深入研究的非线性静弹模坝体的剪切楔动力分析理论作了

补充。

本书写法注意由浅入深，循序渐进。系统性好，实用性强。适用于工程技术人员和大专院校教师参考，同时也可作为水工建筑专业研究生的教材。

河海大学水力发电工程系名誉主任

河 海 大 学 教 授

英 国 曼 彻 斯 特 大 学 博 士

顾兆勳

一九八八年三月

本序是顾兆勳老师为河海大学出版社1989年10月出版的《土石坝地震工程》所写的，现在仍具有指导意义，所以再作为本书的序。抗日战争时，中央大学由南京迁校重庆沙坪坝，顾老师于1941~1942年给我们水利系三〇级开《水工结构》课，我们终身得益。现在顾老师已辞世9年，谨以此书纪念他。

顾淦臣

2009年6月

前言

地震工程学是一门新兴学科，这个学科的名称还只有 40 多年的历史，美国伯克利加利福尼亚大学（University of California, Berkeley）在 1965 年首先开设地震工程（Earthquake Engineering）课程。印度洛基大学（Roorkee University）在 1967 年也开设了地震工程课。我国国家地震局工程力学研究所从 20 世纪 50 年代后期起就从事地震工程的研究。20 世纪 60 年代以后，中国水利水电科学研究院开始进行混凝土坝地震反应研究、砂土液化的现场观测和室内实验，大连理工大学开始进行水工结构的振动台实验及土木结构动力实验，河海大学开始进行土动力学研究和实验，并率先开展了土石坝地震工程研究。

土石坝是最常用的坝型，约占建坝总数的 95% 以上。全世界超过 15m 高的已建土石坝有 29000 余座，其中我国拥有 15000 余座。世界上最高的土石坝超过 300m，如苏联时代建设的塔吉克斯坦境内的努列克（Hypek）土石坝，高 300m，位于Ⅸ度地震区；墨西哥奇科森（Chicoasen）堆石坝，高 263m，位于Ⅸ度地震区；小浪底斜心墙堆石坝，高 154m，透水地基混凝土防渗墙深 70m，位于Ⅷ度地震区。紫坪铺混凝土面板堆石坝，高 156m，设计时考虑基本烈度Ⅶ度，2008 年 5 月 12 日汶川大地震，坝址烈度为Ⅸ～Ⅹ度，坝顶沉陷 90cm，混凝土面板少量损坏；碧口心墙土石坝，高 105m，设计时考虑基本烈度Ⅶ $\frac{3}{4}$ 度，汶川地震中，坝址烈度为Ⅸ度，坝顶沉陷 24cm，损伤不大。这些都是由于设计正确，施工严格，所以有很好的抗震性能。

早期，土动力学和非线性动力分析尚未形成学科，计算技术尚不发达，人们对土石坝的动力性态缺乏认识。有的土石坝作了拟静力法分析，有的则未作分析。以致在受到地震作用时，有些土石坝发生滑坡、震陷、裂缝、涌浪过坝等灾害。少数土石坝因地震而溃坝。如 20 世纪 20 年代美国谢斐尔德（Sheffield）土坝，以及 50 年代柯尔曼（Colmann）土坝和罗吉斯（Rogers）土坝，都因地震而溃坝。我国尚无地震溃坝事例，但山东省王屋、冶源、黄

山等土坝,北京密云白河主坝,唐山陡河土坝,辽宁石门土坝等,都因地震而发生滑坡、震陷、裂缝等灾害。鉴于此,对坝基和坝体材料进行动力试验,并对坝基和坝体系统进行动力分析,以采取相应的抗震措施,实属必须。这就是土石坝地震工程学的任务。

美国从1964年阿拉斯加大地震以后,许多学者和技术人员对地震工程发生了广泛的兴趣,开展了很多研究工作。日本从1923年关东大地震以后,开始研究抗震工程。1964年新潟地震后,加强了土动力性质的研究。

我国1966年河北邢台地震、1970年云南通海地震、1975年辽宁海城地震、1976年河北唐山地震、2008年四川汶川地震等,都发生了重大灾害。我国政府十分重视,派出工程技术和科研人员进行灾害调查,总结震害规律。在土动力学和建筑物动力分析等方面取得了很好成绩。

世界地震工程会议第1届于1956年在美国伯克利举行。以后每3~5年举行一次,先后在日本东京(1960年)、新西兰奥克兰(1965年)、智利圣地亚哥(1969年)、意大利罗马(1974年)、印度新德里(1977年)、土耳其伊斯坦布尔(1980年)、美国旧金山(1984年)、日本东京(1988年)、西班牙马德里(1992年)、墨西哥阿卡普尔科(1996年)、新西兰奥克兰(2000年)、加拿大温哥华(2004年)和中国北京(2008年)举行。国际岩土地震工程与土动力学进展大会于1981年在美国密苏里大学举行第1届会议,1991年举行第2届会议(美国圣路易斯),1995年举行第3届会议(美国圣路易斯),2001年举行第4届会议(美国圣地亚哥)。2010年将在美国圣地亚哥举行第5届会议。

地震工程学运用地质学、地震学、结构动力学、土动力学和计算数学,研究建筑物的地震反应,建筑物和地基的相互作用,水工建筑物和水的相互作用,研究抗震和减震措施,使重要的建筑物“大震不垮,小震不坏”,保障人民的生命财产和国民经济建设。

本书第一作者于1942~1980年从事水利水电工程设计和施工,从技术员到总工程师,参与或领导设计施工的工程有甘肃省酒泉市鸳鸯池水库工程、辽宁省抚顺市大伙房水库工程,云南省以礼河梯级毛家村水电站工程、吉林省通化市鸭绿江云峰水电站工程(中朝两国合营)、辽宁省桓仁县桓仁水电站工程、甘肃省文县碧口水电站工程及黄河小浪底水利枢纽工程(初步设计)等。这些水库和水电站有的已安全经受地震考验,如大伙房水库工程安全经受1975年2月海城地震考验。碧口水电站工程安全经受1976年7月松潘平武地震考验,并于2008年5月12日经受汶川地震(坝址Ⅸ度)考验,大坝变形甚微。

本书第一作者于1981年调到华东水利学院（现河海大学）任教，编著《土石坝地震工程》作为研究生教材，接受国家“七·五”科技攻关项目——混凝土面板堆石坝动力分析，获电力工业部科研奖；完成海阳核电站水库工程的动力试验和分析及地基振动液化研究；开创新材料土工膜及复合膜的基础研究和工程应用的三维应力应变分析。

在20世纪50年代初，没有设计规范和施工规范，本书第一作者凭扎实的科学知识，于1954年首次提出重要坝砂砾石料的相对密度应达到0.83以上，次要坝要达到0.7以上，并在大伙房水库工程中实施，使大伙房坝抗御了辽南地震，丝毫不损。而密云水库白河主坝、王屋土坝、冶源土坝、黄山土坝等工程因未提出相对密度要求，砂砾料坝壳碾压不密实很松散，地震烈度不高就发生了滑坡。到1978年SDJ 10—78《水工建筑物抗震设计规范》才规定砂性土的压实标准，浸润线以上相对密度不小于0.70，浸润线以下按设计烈度大小，采用相对密度0.75~0.85，在时间上大大落后于实践。

本书理论与实践并重，作者认为：理论分析计算固然重要，施工设备、施工技术同样重要。重型碾压或夯击能使黏性土增大干密度，提高压实度。重型振动碾或重型夯击能使砂性土提高相对密度，能使堆石减小孔隙比，强夯或振冲能使软弱地基加固。这些都是土石坝系统防震减灾的重要环节。所以本书第8章和第9章介绍了这些内容，是一般地震工程书籍上没有的。

本书在顾淦臣原著基础上，第1章由沈长松教授编写，第2章至第7章由岑威钧博士（后）编写，第8章和第9章由顾淦臣教授编写。

本书谬误疏漏之处，敬请读者批评指正。

顾淦臣

2009年6月

目 录

序 前言

第 1 章 地震	1
1.1 地球的结构	1
1.2 地震的成因和类型	3
1.2.1 地震的成因	3
1.2.2 地震的类型	5
1.3 震源、震中	5
1.4 地震的活动性、地震波和地震观测	7
1.4.1 地震的活动性	7
1.4.2 地震波	10
1.4.2.1 体波	10
1.4.2.2 面波	14
1.4.2.3 地震波	16
1.4.3 地震观测	17
1.4.3.1 强震仪	17
1.4.3.2 土石坝强震监测布置	23
1.5 地震的破坏现象	26
1.5.1 地表和地基的破坏现象	26
1.5.1.1 地裂、塌陷	26
1.5.1.2 山崩、滑坡	28
1.5.1.3 液化、喷砂、冒水	29
1.5.1.4 地震泥石流	29
1.5.1.5 地震堰塞湖	29
1.5.2 建筑物的破坏现象	30
1.5.2.1 工业民用建筑物的破坏	30
1.5.2.2 水工建筑物的破坏	30
1.5.3 次生灾害	32
1.6 地震的震级	33
1.6.1 根据地震仪记录确定震级	33
1.6.2 根据断层参数确定震级	34
1.6.3 地震震级与释放能量的关系	35

1.7 地震动的最大振幅、周期、振速	36
1.8 地震烈度	37
1.8.1 基本烈度和设计烈度	41
1.8.1.1 基本烈度	41
1.8.1.2 设计烈度	43
1.8.2 抗震设计标准	43
1.9 地震加速度时程曲线	45
1.9.1 推算设计加速度时程曲线的步骤	45
1.9.2 坝址(厂址)的基岩运动最大加速度、卓越周期和地震持续时间	45
1.9.3 坝址(厂址)设计地震加速度时程曲线	48
1.10 随机地震动模型及其参数确定	50
1.10.1 随机地震动的模型及其待定参数的确定	51
1.10.1.1 平稳模型及其待定参数的确定	51
1.10.1.2 非平稳模型及其待定参数的确定	55
1.10.2 按震级、震中距和场地条件确定模型参数	57
1.10.2.1 强震记录的统计结果	57
1.10.2.2 随机地震动模型参数的确定	58
1.10.3 按地震烈度和场地条件确定模型参数	60
参考文献	62

第2章 地震反应计算基础	64
2.1 单自由度体系的自振反应和地震反应计算	64
2.1.1 自振反应	64
2.1.1.1 自振运动方程	64
2.1.1.2 阻尼力、阻尼系数、阻尼比	66
2.1.2 地震反应	68
2.1.2.1 运动方程	68
2.1.2.2 无阻尼体系的地震反应	69
2.1.2.3 有阻尼体系的地震反应	71
2.1.2.4 反应谱	74
2.2 单自由度体系地震反应计算的逐步数值积分法	79
2.2.1 线性加速度法	79
2.2.2 Wilson- θ 法	81
2.2.3 Newmark 法	83
2.2.4 非线性的单自由度体系的逐步数值积分法	84
2.2.4.1 用递推法求非线性单自由度体系的反应	85
2.2.4.2 用增量方程式求非线性单自由度体系的反应	86
2.3 多自由度体系的自振反应和地震反应计算	90
2.3.1 自振反应	90
2.3.1.1 运动方程	90

2.3.1.2	无阻尼自振频率	91
2.3.1.3	振型分析	92
2.3.1.4	振型的正交性	95
2.3.1.5	阻尼矩阵的建立	96
2.3.2	地震反应	98
2.3.2.1	正则坐标	98
2.3.2.2	运动方程	99
2.3.2.3	地震反应计算	101
2.3.2.4	振型组合方式	102
2.4	多自由度体系地震反应计算的逐步数值积分法	105
	参考文献	107

第3章 土的动力性质和动力本构模型 108

3.1	土的动应力应变关系的基本特点	108
3.2	土的线性动力本构模型	109
3.2.1	基本元件	109
3.2.2	等效线性模型	110
3.2.3	线性黏弹性模型	111
3.3	土的非线性动力本构模型	112
3.3.1	双线性模型	112
3.3.2	Ramberg - Osgood 模型及 Davidenkov 模型	113
3.3.3	Hardin - Drnevich 模型	116
3.4	土的弹塑性动力本构模型和内时动力本构模型	118
3.4.1	弹塑性模型	118
3.4.2	内时模型	122
3.5	动剪切模量和阻尼比的经验估计	122
3.5.1	G_{max} 、 τ_{max} 、 $\lambda_{eq,max}$ 的经验公式	122
3.5.2	剪切模量 G 和阻尼比 λ 的简化公式	124
3.5.2.1	砂土和砂卵石	124
3.5.2.2	饱和黏土	125
3.6	土的动参数的试验测定	126
3.6.1	室内测试	126
3.6.1.1	试验类型	126
3.6.1.2	振动三轴试验	128
3.6.1.3	共振柱试验	130
3.6.2	原位测试	133
3.6.2.1	物理勘探法	133
3.6.2.2	表面振动法	134
3.6.2.3	平板承载试验	134
	参考文献	135

第4章 饱和砂土和软土的液化	137
4.1 液化及影响因素	137
4.1.1 液化	137
4.1.2 影响因素	138
4.1.2.1 颗粒组成	138
4.1.2.2 相对密度	139
4.1.2.3 初始应力状态	141
4.1.2.4 震动强度和持续时间	143
4.2 振动液化试验	144
4.2.1 等效振动次数	144
4.2.2 循环剪切(振动液化)试验的破坏标准	146
4.2.3 几类振动液化试验	147
4.2.3.1 振动三轴试验	147
4.2.3.2 振动单剪试验	150
4.2.3.3 振动扭剪试验	152
4.2.3.4 大型振动单剪试验	153
4.3 振动孔隙水压力计算模型	156
4.3.1 应力模型	156
4.3.2 应变模型	158
4.3.3 内时模型	159
4.3.4 顾淦臣动孔压模型	160
4.4 水平地基的地震液化计算	163
4.4.1 剪应力对比法	163
4.4.2 Seed 简化法	163
4.4.3 有效应力法	167
4.5 粗判水平地基液化的方法	168
参考文献	170
第5章 地震永久变形计算方法	174
5.1 滑动体位移计算方法	174
5.1.1 Newmark 法	174
5.1.2 Makdisi - Seed 简化法	176
5.2 块体旋滑法	178
5.2.1 计算原理	178
5.2.2 计算步骤	179
5.2.3 计算实例	180
5.3 整体变形分析方法	183
5.3.1 软化模量法	183
5.3.1.1 初步近似法	183
5.3.1.2 线性修正模量法	184

5.3.1.3 非线性修正模量法	184
5.3.2 等效结点力法	185
5.3.2.1 Serff-Seed 等效结点力法	185
5.3.2.2 Taniguchi 等效惯性力法	186
5.3.3 沈珠江法	187
参考文献	193

第6章 土体动力反应计算原理..... 195

6.1 概述	195
6.2 动力反应计算控制方程	196
6.2.1 基本方程	196
6.2.2 总应力法动力控制方程	199
6.2.3 有效应力法动力控制方程	199
6.2.3.1 不排水有效应力法动力控制方程	199
6.2.3.2 排水有效应力法动力控制方程	200
6.3 边界条件及求解步骤	203
6.3.1 边界条件	203
6.3.2 求解步骤	205
6.3.2.1 总应力分析法	205
6.3.2.2 不排水有效应力法	206
6.3.2.3 排水有效应力法	206
6.4 土体有限元动力分析基础	207
6.4.1 单元的数学力学分析	207
6.4.1.1 坝体及地基单元	207
6.4.1.2 接触面单元	210
6.4.1.3 伸缩缝止水连接单元	212
6.4.1.4 局部坐标与整体坐标的转换	212
6.4.2 质量矩阵、阻尼矩阵、劲度矩阵	213
6.4.2.1 质量矩阵	213
6.4.2.2 阻尼矩阵	214
6.4.2.3 劲度矩阵	215
6.4.3 基频的计算	215
参考文献	216

第7章 土石坝地震反应计算..... 218

7.1 剪切楔法	218
7.1.1 土石坝横向地震反应计算	218
7.1.1.1 坝体 G 为常数时, 坝体地震反应计算	219
7.1.1.2 坝体 $G=G_0\left(\frac{z}{H}\right)^{\frac{1}{2}}$ 时, 坝体地震反应计算	224
7.1.1.3 利用反应谱计算地震最大反应	226

7.1.1.4	考虑动应力应变关系非线性的地震反应计算	229
7.1.1.5	非岩石坝基上的土石坝和坝基的地震反应计算	231
7.1.1.6	V形河谷土石坝横向地震反应简化计算	232
7.1.2	土石坝纵向地震反应计算	233
7.1.2.1	矩形河谷土石坝纵向地震反应计算	233
7.1.2.2	V形河谷土石坝纵向地震反应计算	237
7.2	面板堆石坝地震反应的有限元计算	239
7.2.1	筑坝材料、接触面和止水材料的静力本构模型	239
7.2.1.1	堆石料静力本构模型	239
7.2.1.2	接触面静力本构模型	243
7.2.1.3	止水材料静力本构模型	245
7.2.2	筑坝材料、接触面和止水材料的动力本构模型	246
7.2.2.1	堆石料动力本构模型	246
7.2.2.2	混凝土动力本构模型	246
7.2.2.3	接触面动力本构模型	247
7.2.2.4	止水材料动力本构模型	247
7.2.3	考虑坝水相互作用的动力平衡方程	247
7.2.3.1	不可压缩水体坝水相互作用	248
7.2.3.2	可压缩水体坝水相互作用	251
7.2.3.3	用 Westergaard 公式考虑动水压力作用	253
7.2.4	面板抗滑稳定性分析	255
7.2.5	三维有限元动力计算程序	255
7.2.6	工程实例分析	258
7.3	土质心墙(斜墙)土石坝地震反应的有限元计算	262
7.3.1	振动裂缝分析	262
7.3.1.1	裂缝发生判断准则	262
7.3.1.2	累积破损度判断法	263
7.3.2	液化分析	264
7.3.2.1	总应力法——剪应力对比法	264
7.3.2.2	有效应力法	266
7.3.3	坝体抗震稳定验算	269
7.3.3.1	总应力法(Roth W., Lee K. L., 1975)	269
7.3.3.2	有效应力法(顾淦臣, 1981)	270
7.3.4	工程实例分析	271
	参考文献	278

第 8 章 土石坝及附属建筑物的震害

282

8.1	通海地震	282
8.1.1	坝体震害类型	282
8.1.2	几座土坝震害实况	283