

2.5 250 2502.5 12550 250 2502.5 200 1190

面板坝大型振动台模型试验与动力分析

刘小生 王钟宁 汪小刚 赵剑明 刘启旺 著

5.271



1.4



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn



知识产权出版社

www.cnipr.com.cn

内容提要

本书系统介绍了作者在国家“九五”重点科技攻关计划中有关面板坝大型振动台模型试验与动力分析方面的研究成果。内容包括:根据土石料的静、动力特性,探索建立了面板坝振动台模型试验的相似律,探讨了面板坝大型振动台模型试验的方法和测试技术;利用具有世界先进水平的大型三向模拟地震振动台进行了大量二维断面模型、三维整体面板坝振动模型试验;模型坝设计中考虑了多项影响因素,研究了各项因素对试验结果的影响;得到了模型坝的动态特性及各项地震反应性状,为改进和验证面板坝地震动力反应分析方法提供了全面系统的基本资料。采用等效线性法对不同模型坝和不同试验方案进行了二维、三维地震动力反应分析,经过与模型试验结果比较分析,验证和改进了面板坝等效线性动力计算方法。开发了适应于面板坝结构特性的三维真非线性有效应力地震动力反应分析方法和计算程序;方法考虑了剪切残余应变和体积残余应变的影响,可直接得到地震残余变形及有关裂缝、滑坡和液化的评价结果;对三维整体模型和不同试验方案进行地震动力反应分析,将计算结果与相应振动台模型试验结果进行比较分析,进行验证和完善。将经过模型试验验证和改进的方法及程序用于实际工程的地震动力反应分析,并提出了有效的抗震工程措施。

本书主要为从事土石坝及其他土工建筑物抗震设计、科研的科技工作者提供参考,也可供相关专业的研究生学习使用。

选题策划:阳 森 黄勇忠 E-mail: yangsanshui@vip.sina.com

责任编辑:阳 森 黄勇忠

图书在版编目(CIP)数据

面板坝大型振动台模型试验与动力分析 / 刘小生等著. —
北京:中国水利水电出版社:知识产权出版社, 2005

ISBN 7-5084-0533-1

I. 面... II. 刘... III. ①混凝土面板堆石坝—振
动试验台—模型试验②混凝土面板堆石坝—动力学分析
IV. TV641.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第017417号

面板坝大型振动台模型试验与动力分析

刘小生 王钟宁 汪小刚 赵剑明 刘启旺 著

中国水利水电出版社 出版发行 (北京市西城区三里河路6号;电话:010-68331835 68357319)
知识产权出版社 (北京市海淀区马甸南村1号;电话、传真:010-82000893)

全国各地新华书店和相关出版物销售网点经销

中国水利水电出版社微机排版中心排版

北京市兴怀印刷厂印刷

787mm×1092mm 16开 15.5印张 368千字

2005年5月第1版 2005年5月第1次印刷

印数:0001—2000册

定价:35.00元

ISBN 7-5084-0533-1
TV.111

版权所有 侵权必究

如有印装质量问题,可寄中国水利水电出版社营销中心调换
(邮政编码 100044,电子邮件:sales@waterpub.com.cn)

序

随着我国西部开发中水利水电工程建设的展开,有关混凝土面板堆石坝的抗震安全问题益见重要。该书是对“九五”国家重点科技攻关项目“200m高混凝土面板堆石坝研究”中“强震区面板坝大型振动台模型试验及动力分析”专题研究成果的报道。

首先在土石料静、动力特性试验研究的基础上,研究了高、低应力状态下土石料的静、动力应力应变关系的相似性,推导出了一套面板坝大型振动台土石料模型试验相似律,并探讨了其适应范围。同时探索了用大型振动台模型试验研究面板坝动力特性和地震动力反应性状的方法和试验技术。

采用大型三向地震模拟振动台进行了面板坝的二维断面和三维整体模型试验。在模型设计中,考虑了模型尺寸、坝肩端部约束和坝体填筑密度的影响,试验时考虑了输入地震波的类型、强度、输入方向和多向输入等的影响,系统、全面地得到的模型面板坝的动力特性、地震动力反应性状和破坏机理等及其随各影响因素的变化规律等资料,可用以检验和改善已有面板坝地震动力分析方法和计算程序。

该书在已有成果基础上,研制了面板坝三维等效线性地震动力分析方法和计算程序,并系统采用模型土石料低应力实测静、动力特性参数和实测台面地震波,对不同模型坝和振动试验方案进行地震动力反应分析,将计算结果与相应振动台模型试验结果进行比较分析,改善了分析方法和计算程序,检验了等效线性分析方法的合理性和适用性。

该书专门研究开发了适应于面板坝结构特性的三维真非线性有效应力地震动力反应分析方法和计算程序。其中考虑了剪切残余应变和体积残余应变的影响,可直接得到地震残余变形以及有关裂缝、滑坡和液化的评价结果;采用模型土石料低应力状态下实测的静、动力特性参数和模型试验台面输入地震波,对三维整体模型和不同试验方案进行地震动力反应分析,将计算结果与相应振动台模型试验结果进行比较分析,进

行检验和改善。在计算模式、分析方法及计算程序功能等方面均有所创新。

该书作者们大都具有多年从事面板堆石坝抗震科研工作的经验，其研究成果反映了他们在这方面的新探索和新发展，可供同行工程技术人员参考。

中国科学院院士

汪闻韶

2005年3月

于北京

前 言

本书系统叙述和全面总结了作者在国家“九五”重点科技攻关中有关面板坝大型振动台模型试验及动力分析方面的研究成果。内容包括：根据坝体土石料的静、动力特性，探索建立了面板坝振动台模型试验的相似律，探讨了面板坝大型振动台模型试验的方法和测试技术；利用具有世界先进水平的大型三向模拟地震振动台进行了大量二维断面、三维整体面板坝振动台模型试验，模型坝设计中考虑了多项影响因素，研究了各项因素对试验结果的影响，得到了模型坝的动态特性及各项地震反应性状，为改进和验证面板坝动力反应分析方法提供了全面系统的基本资料；采用等效线性法对不同模型坝和不同试验方案进行了三维地震动力反应分析，经过与模型试验结果比较分析，验证和改进了面板坝等效线性动力计算方法；开发了适应于面板坝结构特性的三维真非线性有效应力地震动力反应分析方法和计算程序；方法考虑了剪切残余应变和体积残余应变的影响，可直接得到地震残余变形以及有关裂缝、滑坡和液化的评价结果；将经过模型试验验证和改进的面板坝等效线性地震动力计算方法和真非线性有效应力地震动力反应分析方法用于实际工程的计算分析，并提出了有效的抗震工程措施。

本书共分9章。第1章主要对国内外有关土石坝振动台模型试验和动力分析研究的现状和发展趋势进行了总结评述；第2章主要介绍了面板坝振动台模型试验的相似律、试验方法和测试技术；第3章介绍了有关面板坝模型的动力特性大型振动台试验结果及应用；第4章介绍了有关面板坝模型的动力加速度、面板应力和应变及坝体残余变形等地震反应性状的大型振动台试验结果及应用；第5章介绍了面板坝等效线性地震动力反应分析方法的模型试验比较、验证和改进；第6章介绍了等效线性动力分析方法在黑泉水库面板坝工程地震动力反应分析和安全评价上的应用；第7章为面板坝三维真非线性有效应力动力分析方法的研制、验证；第8章为三维真非线性有效应力动力分析方法在紫坪铺水库

面板坝工程地震动力反应分析和安全评价上的应用；第9章为成果总结及需进一步研究的问题。

本书第1章和第9章由刘小生、王钟宁、赵剑明、汪小刚和刘启旺编写；第2章、第3章和第4章由刘小生、王钟宁、汪小刚和刘启旺编写；第5章和第6章，由王钟宁、刘小生、汪小刚和刘启旺编写；第7章和第8章，由赵剑明、刘小生和汪小刚编写；全书由刘小生统稿。参加本研究工作的还有：中国水利水电科学研究院的王昆耀、陈宁、王济、禹莹、魏力、王全柱和梁文杰；青海省黑泉水库工程建设管理局的沈靖国、张江甫、李强和李佩琰；青海省水利水电勘测设计研究院的袁辉、宋永杰和张新；北京工业大学的马怀发；广西电力工业勘察设计研究院的刘风秋等。

本研究是在国家“九五”重点科技攻关计划支持下完成的，工作中得到了中国水利水电科学研究院汪闻韶院士、常亚屏教授和陈厚群院士及中国水力发电工程学会蒋国澄教授的指导，汪闻韶院士还在百忙中为本书作序，在此一并谨向他们表示衷心的感谢。

由于著者水平有限，书中当有错误和不足之处，欢迎批评指正。

著者

2004年10月

于北京

Abstract

The research advancement with regard to large scale shaking table model tests and dynamic analysis of CFRD, obtained in a special program sponsored by The State Ninth-Five Science and Technology Plan, namely Large-scale Shaking Table Tests and Dynamic Analysis on CFRD in Strong Seismic Area, is presented in this book. Based on soil static and dynamic properties, the similitude rules of shaking table model test of CFRD are preliminarily established. A lot of shaking table model tests is conducted with an advanced large-scale 3 - D shaking table, to investigate the dynamic characteristics and seismic response behaviors of the model dams of a CFRD, in the design of which some factors affecting the testing results are taken into account. The test results can be used to examine and improve the dynamic analysis methods. The equivalent linear analysis method is examined and improved by computing the seismic response of model dam according to the model test data. A 3 - D authentic nonlinear effective stress analysis method for seismic response of CFRD is developed, in which both residual shear strain and residual volumetric strain are considered. With the authentic nonlinear method, the earthquake-induced permanent deformation, possibility of crack, slope stability and liquefaction potential can be evaluated directly. The seismic analysis of two CFRD projects is performed with these verified methods, and the effective earthquake protective measures for these dams are proposed.

This book comprises nine chapters. Chapter 1 gives an overall review on the research state and development of shaking table model test and dynamic analysis of CFRD. Chapter 2 introduces the similitude rules, test methods and technology of shaking table model test of CFRD. Chapter 3 describes the dynamic characteristics of model dams. Chapter 4 introduces the seismic response behaviors of model dams, such as acceleration, stress, strain and earthquake-induced permanent deformation. Chapter 5 introduces the comparison, verification and improvement of equivalent linear analysis method according to the model test data. Chapter 6 introduces the application of equivalent linear analysis method in seismic analysis and safety evaluation of Heiquan CFRD Project, located in Qinghai province of China. Chapter 7 presents the development and verification of a 3 - D authentic nonlinear effective stress seismic response analysis method of CFRD. Chapter 8 introduces the application of the authentic nonlinear effective stress method in seismic response analysis and safety evaluation of Zipingpu CFRD project, located in Sichuan province of China. Chapter 9 summarizes the advancement and problems for further research.

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究现状及发展趋势	1
1.1.1 动力分析方面	1
1.1.2 模型试验方面	2
1.2 研究目标、内容和技术路线	3
参考文献	5
第 2 章 大型振动台模型试验	6
2.1 模型设计和制作	6
2.1.1 黑泉水库面板坝设计情况	6
2.1.2 大型振动台主要特性、参数及设备性能简介	8
2.1.3 面板坝振动模型的一般相似律	9
2.1.4 面板坝振动台土石料模型的相似律	14
2.1.5 模型设计	20
2.1.6 模型制作	21
2.2 振动台模型试验	25
2.2.1 试验方案和模型尺寸	25
2.2.2 试验测试	33
2.3 结语	38
参考文献	39
第 3 章 面板坝模型的动力特性	40
3.1 试验分析原理	40
3.2 三维整体模型的基本试验结果	41
3.3 二维断面模型的基本试验结果	47
3.4 影响模型坝动力特性的几个因素	51
3.4.1 先期振动	51
3.4.2 坝体填筑密度	54
3.4.3 激励波类型	55
3.4.4 激励波幅值	57

3.4.5 多向振动输入	60
3.4.6 坝肩端部约束	60
3.5 三维整体模型试验结果确定土石料动力参数	61
3.6 原型面板坝动力特性的推算	62
3.7 结语	64
参考文献	65
第4章 面板坝模型的地震动力反应性状	66
4.1 加速度反应	66
4.1.1 三维整体模型的基本试验结果	66
4.1.2 二维断面模型的基本试验结果	70
4.1.3 影响加速度反应的几个因素	75
4.2 面板的应变和应力反应	82
4.2.1 三维整体模型的基本试验结果	82
4.2.2 二维断面模型的基本试验结果	86
4.2.3 影响面板应变和应力的几个因素	89
4.2.4 原型坝面板的应变和应力反应	98
4.3 面板坝的位移、破坏及抗震性能	100
4.3.1 地震残余变形的试验结果和分析	100
4.3.2 模型坝的破坏	104
4.3.3 面板坝的抗震性能	106
4.4 结语	107
参考文献	109
第5章 面板坝三维等效线性分析方法的模型验证	110
5.1 计算程序与计算参数	110
5.1.1 计算程序与计算方法	110
5.1.2 计算参数	112
5.2 二维断面模型的计算分析	113
5.2.1 计算模型的端部约束条件	114
5.2.2 接触面单元的作用及其参数的影响	116
5.2.3 模型的计算结果与比较分析	119
5.2.4 小结	126
5.3 三维整体模型的计算分析	126
5.3.1 计算的基本条件与主要结果	126
5.3.2 系统的基本频率	128
5.3.3 加速度的放大倍数	130
5.3.4 坝体的应变与应力	136
5.3.5 小结	140

5.4 结语	141
参考文献	143
第 6 章 黑泉水库面板坝的动力反应分析与安全评价	144
6.1 有限元静力计算	144
6.1.1 计算程序与计算方法	144
6.1.2 计算参数	148
6.1.3 计算结果及分析	149
6.1.4 与观测资料的比较	151
6.2 有限元动力计算	154
6.2.1 计算参数	154
6.2.2 设计地震动	156
6.2.3 计算结果及分析	156
6.3 坝体安全评价	172
6.3.1 坝坡的抗震稳定分析	172
6.3.2 混凝土面板的强度校核	174
6.3.3 坝基砂砾料的抗震安全评价	174
6.4 结语	175
参考文献	176
第 7 章 面板坝三维真非线性动力反应分析方法与验证	177
7.1 面板坝动力反应分析的研究进展与发展趋势	177
7.2 面板坝三维真非线性有效应力地震反应分析方法	179
7.2.1 土石料本构模型的确定	179
7.2.2 单元型式以及接触面和接缝的模拟	183
7.2.3 振动孔隙水压力	186
7.2.4 考虑孔隙水压力扩散和消散的有效应力有限元方程	187
7.2.5 动力反应分析方法的算法和步骤	191
7.2.6 关于动水压力	192
7.2.7 残余变形模式	192
7.2.8 抗震稳定性分析	195
7.3 典型坝例的地震反应分析及相关研究	197
7.3.1 黏土心墙砂壳坝算例	197
7.3.2 面板堆石坝算例	200
7.3.3 有关三维真非线性有效应力地震反应分析的若干结论	203
7.4 分析方法的模型试验验证	204
7.4.1 三维整体模型坝的计算模型及网格划分	204
7.4.2 动力分析计算结果与对比分析	206
7.4.3 对比验证及小结	207

7.5 结语	209
参考文献	211
第 8 章 紫坪铺面板坝三维真非线性有效应力地震反应分析与评价	214
8.1 工程概况	214
8.2 单元剖分及计算参数	214
8.3 输入地震波	218
8.4 地震反应计算结果	218
8.4.1 加速度反应	218
8.4.2 堆石应力反应及坝体单元抗震安全系数	220
8.4.3 面板应力反应及接缝位移	221
8.4.4 坝基覆盖层液化可能性	221
8.4.5 坝体地震残余变形	223
8.4.6 面板及下游坡的抗震稳定性	223
8.5 结语	224
参考文献	226
第 9 章 研究成果与结论	227
9.1 主要成果	227
9.2 主要结论	228
9.2.1 关于面板坝抗震设计方法	228
9.2.2 关于地震反应性状及抗震工程措施	229
9.3 有待进一步研究的问题	229

Contents

Preface by academician Wang Wenshao

Preface by author

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Research state and development	1
1.1.1 Dynamic analysis	1
1.1.2 model test	2
1.2 Research object and approach	3
Reference	5
Chapter 2 Large-scale shaking table model tests	6
2.1 The design and make of model	6
2.1.1 Introduction of Heiquan CFRD	6
2.1.2 Specification of large-scale shaking table	8
2.1.3 General similitude rules of shaking model test of CFRD	9
2.1.4 Similitude rules of CFRD for soil-model	14
2.1.5 Design of model	20
2.1.6 Make of model	21
2.2 shaking table model test	25
2.2.1 Test program	25
2.2.2 Testing	33
2.3 Conclusions	38
Reference	39
Chapter 3 The dynamic characteristics of model dam	40
3.1 Test Principle	40
3.2 Test results of 3 - D integer model	41
3.3 Test results of 2 - D section model	47
3.4 Several factors affecting dynamic characteristics	51
3.4.1 Vibration in advance	51
3.4.2 Fill density of dam	54
3.4.3 Type of actuating wave	55
3.4.4 Amplitude of actuating wave	57
3.4.5 Multi-direction input	60
3.4.6 End boundary restriction	60
3.5 Determining soil dynamic parameter based on 3-D model test	61

3.6	Dynamic characteristic calculating of prototype CFRD	62
3.7	Conclusions	64
	Reference	65
Chapter 4	The seismic response behaviors of model dam	66
4.1	Acceleration response	66
4.1.1	Test results of 3 - D integer model	66
4.1.2	Test results of 2 - D section model	70
4.1.3	Several factors affecting acceleration response	75
4.2	Strain and stress response of concrete face	82
4.2.1	Test results of 3 - D integer model	82
4.2.2	Test results of 2 - D section model	86
4.2.3	Several factors affecting strain and stress response	89
4.2.4	Strain and stress response of prototype CFRD	98
4.3	Displacement, failure and anti-seismic capability	100
4.3.1	Analysis of earthquake-induced permanent deformation	100
4.3.2	Failure of model dam	104
4.3.3	Anti-seismic capability of CFRD	106
4.4	Conclusions	107
	Reference	109
Chapter 5	Examination of 3 - D equivalent linear analysis method	110
5.1	Computing program and parameters	110
5.1.1	Computing program and method	110
5.1.2	Computing parameters	112
5.2	Calculation and analysis of 2 - D section model	113
5.2.1	End boundary restriction	114
5.2.2	Function of interface element and effect of parameters	116
5.2.3	Results and analysis	119
5.2.4	Brief summary	126
5.3	Calculation and analysis of 3 - D integer model	126
5.3.1	Calculation condition and results	126
5.3.2	Fundamental frequency of system	128
5.3.3	Amplification ratio of acceleration	130
5.3.4	Stress and strain of dam	136
5.3.5	Brief summary	140
5.4	Conclusions	141
	Reference	143
Chapter 6	Seismic analysis and safety evaluation of Heiquan CFRD project	144
6.1	Static FEM analysis	144
6.1.1	Computing program and method	144

6.1.2	Computing parameters	148
6.1.3	Results and analysis	149
6.1.4	Comparison with observed data	151
6.2	Dynamic FEM analysis	154
6.2.1	Computing parameters	154
6.2.2	Design earthquake motion	156
6.2.3	Results and analysis	156
6.3	Safety evaluation of dam	172
6.3.1	Seismic stability of dam slope	172
6.3.2	Strength check of concrete face	174
6.3.3	Seismic safety evaluation of foundation	174
6.4	Conclusions	175
	Reference	176

Chapter 7 Development and verification of 3 - D authentic nonlinear effective stress

	seismic response analysis method of CFRD	177
7.1	Research state and development of dynamic analysis of CFRD	177
7.2	3 - D authentic nonlinear effective stress seismic response analysis method	179
7.2.1	Constitutive model of soil	179
7.2.2	Element type and simulation of interface and joint	183
7.2.3	Pore water pressure due to vibration	186
7.2.4	Effective stress FEM equation considering the dissipation and diffusion of seismic pore water pressure	187
7.2.5	Arithmetic and process of dynamic analysis	191
7.2.6	Hydrodynamic pressure	192
7.2.7	Earthquake - induced permanent deformation	192
7.2.8	Seismic stability analysis	195
7.3	Seismic response analysis and study of typical dams	197
7.3.1	Clay core wall rockfill dam	197
7.3.2	Concrete face rockfill dam	200
7.3.3	Conclusion of 3 - D authentic nonlinear effective stress seismic response analysis	203
7.4	Verification of authentic nonlinear method by model test	204
7.4.1	FEM model and mesh of 3 - D model dam	204
7.4.2	Results and analysis	206
7.4.3	Verification and conclusion	207
7.5	Conclusions	209
	Reference	211

Chapter 8 3 - D authentic nonlinear effective stress seismic analysis and safety

	evaluation of Zipingpu CFRD project	214
--	--	-----

8.1	Introduction of Zipingpu CFRD	214
8.2	FEM mesh and parameters	214
8.3	Input earthquake wave	218
8.4	Seismic analysis results	218
8.4.1	Acceleration response	218
8.4.2	Stress response and element seismic safety factor of dam	220
8.4.3	Stress response and joint displacements of concrete face	221
8.4.4	Liquefaction potential of dam foundation	221
8.4.5	Earthquake - induced permanent deformation of dam	223
8.4.6	Seismic stability of concrete face and downstream slope of dam	223
8.5	Conclusions	224
	Reference	226
Chapter 9	Advancement and conclusion	227
9.1	Advancement	227
9.2	Conclusions	228
9.2.1	Conclusions about seismic design of CFRD	228
9.2.2	Conclusions about seismic behaviors and anti - seismic measures	229
9.3	Problems for further research	229

第 1 章 绪 论

1.1 研究现状及发展趋势

自 20 世纪 80 年代以来,混凝土面板堆石坝(以下简称面板坝)在我国发展很快。至 90 年代末,我国已建成的面板坝有 30 多座,在建和拟建的就更多,其中坝高超过 100m 的就有 20 多座。而且,相当数量的混凝土面板堆石坝位于强震区。例如,在建的大桥面板坝,坝高近 100m,坝址基本地震烈度为 8 度,按 9 度设防;拟建的吉林台水库面板坝,坝高 157m,位于地震烈度为 8.2 度的强震区;紫坪铺面板坝,坝高 156m,场地基本地震烈度为 7 度,按 8 度设防;大柳树面板坝,坝高 163.5m,设计地震动峰值加速度 2.39m/s^2 ,相当于 8 度的强震;青海黑泉面板坝,坝高 123m,基本地震烈度为 7 度,按 8.2 度设防。这些位于强震区、坝高在 100m 级的高面板坝,均存在严重的抗震问题。同时,随着对我国西南、西北等强震区水电资源的大开发,其中,面板坝又是推广的坝型,面板坝(特别是高面板坝)的抗震问题将更加突出。

目前面板坝的设计基本上还是经验性的,很大程度上以工程类比及工程师们的经验和判断为基础。而事实上,绝大多数已建面板坝均位于中、低地震强度的地区,而且迄今尚无一座面板坝经受过强烈地震作用。因此,国内外均缺乏面板坝抗震设计的工程经验,而对在强地震作用下特别是高面板坝的动力特性、工作性状和安全性,尚存在疑虑^[1~3]。

面板坝的抗震研究已引起国内外学者的关注。在我国,“七五”、“八五”期间都曾将面板坝抗震列为国家重点科技攻关的重要内容,主要在坝体堆石体粗粒材料的动力特性及其测试技术方面取得进展^[4],在面板坝地震动力反应分析方法方面,建立了初步的计算模式、计算方法,开发了计算程序,并对一些实际面板坝进行了地震动力反应分析计算,在地震动力反应特性、破坏机理和抗震措施等方面取得了初步认识和结论^[5,6]。但总的看来,由于面板坝的抗震问题十分复杂,特别是缺乏强震区面板坝的实际地震震害观测资料和强震记录,使得地震动力反应计算模式、分析方法和计算程序无法得到有效验证,严重地阻碍了面板坝抗震设计水平的提高。

1.1.1 动力分析方面

近几十年来,国内外关于面板坝动力计算方面的研究已经取得了长足的进展,主要采用有限元法和等效线性模式,计算中一般不考虑基岩与坝体之间的动力相互作用。

在国外,Seed 的工作^[7]是比较有代表性的,他采用等效线性计算模式,对面板及面板与堆石之间相互作用等未作特殊处理,而且不考虑库水对坝体的影响。对面板坝典型剖面进行了二维计算,除得到坝体地震加速度反应外,还根据改进的 Newmark 滑块位移法

对下游坝坡的可能残余变形进行分析。Bureau 等人则采用干燥堆石料的弹塑性摩尔-库仑模型,并根据堆石料的摩擦角随着有效应力的变化曲线定义了一个变化的屈服面,并引进了液体单元和液固接触面单元,亦进行了实际工程的二维动力计算^[8]。

在国内,历经“七五”、“八五”国家科技攻关,对面板坝地震动力分析方法研究较多,亦较深入。河海大学顾淦臣等于 20 世纪 80 年代初开始^[9],陆续开发了二维、三维等效线性模式的地震动力反应分析程序^[10,11]。分析中,考虑了面板材料的动力非线性,在面板与堆石之间设置了接触面单元,以考虑面板与堆石体间的相互作用;在面板竖直缝和周边缝设置了连接单元,以模拟其压紧和张开情况;对坝水相互作用问题,分别考虑了附加质量矩阵、可压缩水体和 Westergaard 公式三种动水压力影响的比较^[12]。此外,还对面板与垫层之间的抗滑稳定和下游坝坡的抗滑稳定等分析方法进行了改进。同时,大连理工大学的韩国城和孔宪京等人亦开发出了三维等效线性模式的三维计算程序,除考虑上述因素外,还采用改进的谷口荣一的剪切永久变形模式和基于等效结点应力概念的整体法分析了面板堆石坝的地震残余变形^[13,14]。南京水利科学研究所的沈珠江和陈生水等根据破碎后的堆石料振动三轴试验中体积动态变化过程,提出了一个计算堆石坝地震永久变形的模式,并编制了相应的等效线性计算程序^[15]。中国水利水电科学研究院与大连理工大学合作,在滑动体分析法的基础上,提出了面板坝地震永久变形的计算方法^[16]。同时,作者们还分别对典型或实际面板坝进行了地震动力反应分析,研究了面板坝的地震动力性状及破坏机理,并对各种面板坝抗震结构和工程措施效果进行研究^[17],均取得了初步认识和结论。

由于面板坝堆石料的强非线性,采用等效线性模式的计算方法不能得到坝体地震动力反应的真实过程,不能反映应力路径和各向异性等的影响,亦不能直接得到地震残余变形。因此,面板坝真非线性地震动力反应分析成为今后的发展方向之一。“八五”期间,汪闻韶和李万红曾采用黏弹塑性模式,编制了适应覆盖层防渗墙上土石坝的二维真非线性地震动力反应分析程序^[18],应用到心墙土石坝,计算结果与实际地震震害资料比较一致^[19],根据面板坝的特点,进一步发展和完善这种方法在理论和实践上都是非常有意义的。此外,由于面板坝大多修建在高山峡谷之中,三维效应显著,还需要研制和开发面板坝的三维真非线性地震反应分析方法和程序。

而需要特别指出的是,由于缺乏强震区面板坝的实际地震震害资料和强地震记录,无论是等效线性模式或真非线性模式的计算方法和计算程序均无法得到有效验证,严重地阻碍了面板坝抗震设计水平的提高。

1.1.2 模型试验方面

由于面板坝实际震害和记录资料很少,特别是缺乏强震区高面板坝的资料。同时,人工振源的原型坝振动试验,虽有所尝试,但由于振动能量的限制,与实际情况尚有很大差异。模型试验虽刚刚起步,但很有发展前景。

在国外,目前只有日本进行过少量试验,如有贺义明等采用花岗岩碎石料填筑了坝高为 100cm 的二维模型坝,面板为 5mm 厚的氯乙烯板,台面输入激励为单向固定频率并逐级增大的正弦波。主要研究了面板和库水等因素对模型坝加速度反应和坝体破坏机理的影