



铁路路基与支挡结构 工程抗震

杨果林 林宇亮 杨 啸 著



科学出版社



杨果林,男,汉族,1963年1月出生,湖南省桃江县人,中共党员,工学博士、博士后,中南大学(土木工程学院)二级教授,博士生导师。至2014年底,主持并完成国家、省(部)级科研项目40多项;获得国家、省(部)级科技奖等11项;获得并转让专利10余项;出版专著7部、教材2部;在国内外权威刊物上发表学术论文180多篇,其中80多篇被SCI、EI等收录;已指导毕业博士生、硕士生40多名。主要从事研究领域:岩土工程、道路与铁道工程、结构工程。



林宇亮,男,汉族,1985年4月出生,江西上饶人,工学博士、博士后、教授,中南大学硕士生导师。主持国家自然科学基金、中国博士后科学基金、湖南省自然科学基金等科研项目8项,参加国家级和省部级科研项目10余项。发表学术论文40篇,其中SCI收录7篇,EI收录21篇。申请和授权专利3项,软件著作权1项。主要研究方向为路基与支挡结构、土压力计算方法、边坡稳定性、岩土地震学等。



杨 啸,男,1988年10月出生,湖南湘潭人,2011年获澳大利亚 Monash University 一等荣誉学士学位和中南大学土木工程专业学士学位。2015年获澳大利亚 Monash University 博士学位,主要从事结构工程专业。参加科研项目10多项,在国内外权威刊物上发表论文20多篇,获得专利4项,出版专著2部。



铁路路基与支挡结构工程抗震

杨果林 林宇亮 杨 啸 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书结合汶川地震等地震灾害诱发的铁路、公路路基与支挡结构的破坏模式,针对地震高烈度区复杂地质条件山区铁路建设这一工程实际难题,通过现场调研、振动台模型试验、数值分析、理论分析等手段,对路基与支挡结构抗震动力特性及其抗震设计方法开展研究。包括:对汶川地震公路、铁路路基与支挡结构进行现场震害调研与分析;开展铁路路基边坡、支挡结构-基覆边坡、支挡结构-顺层岩质边坡以及加筋土挡墙地震动力响应特性振动台试验;对支挡结构-基覆边坡、支挡结构-顺层边坡进行数值模拟分析;基于塑性极限分析上限定理,推导地震土压力上限解;研究基覆边坡支挡结构地震位移模式;对比和分析国内外支挡结构抗震规范和抗震设计方法;研究多级锚杆挡墙静动稳定性分析与抗震设计方法。研究成果可为铁路和公路路基震害防治提供依据,为复杂地质条件山区铁路建设支挡结构选型与抗震设计提供参考,部分研究成果已纳入《铁路工程抗震设计规范》修订中。

本书可供从事岩土工程、道路与铁道工程、结构工程抗震的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

铁路路基与支挡结构工程抗震/杨果林,林宇亮,杨啸著. —北京:科学出版社, 2015.9

ISBN 978-7-03-045868-1

I. ①铁… II. ①杨… ②林… ③杨… III. ①铁路路基-支挡结构-防震设计 IV. ①U213.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 231578 号

责任编辑:刘凤娟 / 责任校对:彭 涛

责任印制:张 伟 / 封面设计:陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 12 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2015 年 12 月第一次印刷 印张:32 1/2

字数:643 000

定价:189.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

我国地处环太平洋地震带与欧亚地震带之间,是世界上大陆地震最活跃、地震灾害最严重的国家之一。2008年5月12日汶川地震,由于部分路基与边坡支挡未设防或防护不足,发生大规模的路基震陷、边坡滑落崩坍、支挡失效等灾害,给人民生命财产安全带来巨大损失。汶川特大地震对路基、边坡支挡结构的抗震性能提出了新的挑战。研究地震区地震作用下路基与支挡结构的动力响应,选取合理的路基与支挡结构形式,修订当前的抗震设计行业规范显得十分迫切。

本书以山区大瑞铁路工程建设为背景,依托原铁道部科技开发计划项目“高陡边坡特殊支挡工程抗震技术研究”(编号:2008G028-D)和“铁路路基工程抗震设计标准与方法研究”(编号:2008G010-A);国家自然科学基金项目“高速铁路路基长期动力稳定性评价方法研究”(编号:51278499)、“高速铁路路膨胀土路堑新型基床结构研究”(编号:51478484)、“挡墙黏性土地震土压力非线性分布的分析方法研究”(编号:51308551);湖南省自然科学基金项目“挡墙地震动土压力非线性分布的分析方法研究”(编号:13JJ4017)。采取现场调研、理论分析、振动台模型试验、数值模拟等方法,开展如下的主要研究工作:汶川地震路基及支挡结构震陷现场调查;铁路路堤地震响应振动台试验;支挡结构-加筋挡墙试验研究;支挡结构-边坡振动台模型试验;支挡结构地震动位移模式;边坡支挡结构的数值模拟分析;多级支挡结构地震土压力的极限分析;支挡结构抗震设计方法等。研究成果将为修订《铁路工程抗震设计规范》提供依据,并为地震地区支挡结构提出总体效果最优的不同类型的支挡结构组合体系。

本书是在课题组林宇亮、文畅平、李昀的博士学位论文,易岳林、何丽平、钟正的硕士学位论文,以及课题研究成果报告的基础上整理而成的,在形成过程中申权博士做了大量的整理工作,在此表示感谢!

作者在完成本书过程中,得到了原铁道部、国家自然科学基金委员会的大力支持;得到了中国中铁二院工程集团有限责任公司冯俊德、薛元、王智猛、李建国,成都铁路局绵阳、自贡、西昌等工务段,招商局重庆交通科研设计院有限公司张又进、唐光武,西南交通大学张建经、姚令侃,中国科学院力学研究所李世海、冯春等的通力合作,在此表示感谢!

杨果林

2015年6月2日

目 录

前言

第 1 章 综述	1
1.1 引言	1
1.2 地震响应特性的理论分析方法	3
1.2.1 剪切条分法	4
1.2.2 集中质量法	4
1.2.3 数值分析方法	4
1.3 地震响应特性的模型试验	6
1.3.1 振动台模型试验	6
1.3.2 动力离心模型试验	8
1.3.3 爆炸模型试验	9
1.4 地震作用下土体的永久变形	9
1.4.1 土体永久变形机制和计算方法	9
1.4.2 地震作用下的震陷变形	11
1.4.3 震陷计算及评价	15
1.4.4 震陷防治处理措施	16
1.5 支挡结构抗震设计研究	17
1.5.1 支挡结构的位移控制	17
1.5.2 支挡结构的强度控制	18
1.5.3 动力模型试验	20
1.6 边坡地震动力稳定性	21
1.6.1 地震稳定性评价方法的分类	21
1.6.2 边坡地震稳定性的确定性分析方法	23
参考文献	26
第 2 章 汶川地震路基及支挡结构震害调查	42
2.1 地震区路堤震害调查	42

2.1.1 汶川地震概况	43
2.1.2 汶川地震路基震陷调查	45
2.1.3 加筋土路堤震害情况	56
2.2 地震区支挡结构震害调查	58
2.2.1 汶川地震公路支挡结构实震表现	58
2.2.2 汶川地震铁路支挡结构实震表现	64
2.2.3 其他地震中支挡结构实震表现	66
参考文献	68
第3章 铁路路堤边坡地震响应振动台试验	70
3.1 铁路路堤边坡振动台模型试验设计	70
3.1.1 振动台主要技术指标	71
3.1.2 模型试验相似关系设计	72
3.1.3 模型试验填料及其物理力学特性	76
3.1.4 铁路路堤边坡模型设计	81
3.1.5 试验加载方案	89
3.2 铁路路堤边坡地震动力反应与数值模拟	93
3.2.1 铁路路堤动力特性分析	93
3.2.2 铁路路堤边坡地震动力反应特性	98
3.2.3 路堤边坡地震残余变形	116
3.2.4 路堤边坡破坏与抗震性能	120
3.2.5 振动台试验的数值模拟验证	122
3.3 不同压实度及加筋路堤边坡的地震动力反应分析	135
3.3.1 不同压实度路堤边坡动力特性分析	135
3.3.2 不同压实度路堤边坡地震动力反应分析	137
3.3.3 不同压实度路堤边坡地震残余变形	155
3.3.4 不同压实度路堤边坡地震动力反应的数值模拟对比研究	160
3.3.5 加筋路堤边坡动力特性分析	173
3.3.6 加筋路堤边坡地震动力反应分析	174
3.3.7 加筋路堤边坡地震残余变形	186
3.3.8 加筋路堤边坡地震动力反应的数值模拟对比研究	189
参考文献	200

第 4 章 支挡结构-加筋挡墙试验研究	201
4.1 概述	201
4.2 筋材拉伸力学特性	202
4.2.1 拉伸试验概况	203
4.2.2 筋材拉伸力学特性分析	204
4.2.3 拉伸曲线模拟	208
4.2.4 筋材在约束条件下的变形方程	212
4.3 筋土界面摩擦特性	213
4.3.1 筋土界面摩擦特性试验方法	213
4.3.2 筋材的拉拔试验概况	215
4.3.3 拉拔试验结果与分析	217
4.4 新型加筋土结构及其抗震动力特性	221
4.4.1 新型加筋土结构的动变形特性与动力分析	221
4.4.2 新型加筋土结构的地震动力响应	230
参考文献	237
第 5 章 支挡结构-边坡振动台模型试验	240
5.1 概述	240
5.2 支挡结构-边坡地震动力特性大型振动台模型试验设计	242
5.2.1 相似关系设计	242
5.2.2 试验设备及其主要特性参数	244
5.2.3 试验方案设计	244
5.2.4 试验材料	248
5.2.5 模型制作与传感器安装	251
5.2.6 地震波的选取与试验加载方案	257
5.3 支挡结构-基覆边坡地震动力特性	259
5.3.1 模型地震动力特性分析	261
5.3.2 加速度动力响应特性	265
5.3.3 动位移响应特性	289
5.3.4 动土压力响应特性	299
5.3.5 锚杆动应变响应特性	307
5.4 支挡结构-顺层岩质边坡动力特性	311

5.4.1	模型地震动力特性分析	311
5.4.2	加速度动力响应特性	314
5.4.3	动位移响应特性	338
5.4.4	动土压力响应特性	352
5.4.5	锚杆动应变响应特性	363
参考文献		369
第6章 支挡结构地震动位移模式		373
6.1	概述	373
6.2	模型试验动位移计布设	374
6.3	重力式挡墙地震动位移模式	376
6.3.1	地震动位移响应特性	376
6.3.2	地震动永久位移与动位移模式分析	377
6.4	桩板式挡墙地震动位移模式	381
6.4.1	地震动位移响应特性	381
6.4.2	地震动永久位移与动位移模式分析	382
6.5	格构式框架结构地震动位移模式	386
6.5.1	地震动位移响应特性	386
6.5.2	地震动永久位移与动位移模式分析	388
6.5.3	组合体系中框架结构地震动位移模式分析	391
参考文献		393
第7章 边坡支挡结构的数值模拟分析		395
7.1	FLAC3D 软件及数值模拟模型的建立	395
7.1.1	数值模拟模型的建立	395
7.1.2	数值模拟内容	404
7.2	顺层边坡数值模拟结果分析	405
7.2.1	双向汶川波作用下支挡结构动力响应	405
7.2.2	不同方向汶川波作用下支挡结构动力响应	414
7.2.3	不同倾角顺层边坡支挡结构的动力响应	418
7.3	基覆边坡数值模拟结果分析	421
7.3.1	基覆边坡第一组振动台试验数值模拟结果分析	421
7.3.2	基覆边坡第二组振动台试验数值模拟结果分析	429

7.3.3 基覆边坡第三组振动台试验数值模拟结果分析	435
参考文献	440
第8章 多级支挡结构地震土压力的极限分析	441
8.1 概述	441
8.2 塑性极限分析上限定理	441
8.3 塑性极限分析能耗计算	443
8.3.1 外力功率	444
8.3.2 内能耗散功率	445
8.4 地震土压力上限解	448
8.4.1 地震主动土压力上限解	448
8.4.2 地震被动土压力上限解	449
8.4.3 基于强度折减技术的地震土压力上限解	451
8.5 地震主动土压力系数的影响因素分析	452
8.6 实例计算与分析	460
参考文献	464
第9章 支挡结构抗震设计方法	467
9.1 国外抗震规范支挡结构抗震设计方法	467
9.1.1 日本规范	467
9.1.2 欧洲规范	469
9.1.3 新西兰规范	473
9.1.4 美国规范	477
9.2 国内抗震规范支挡结构抗震设计方法	478
9.2.1 公路规范	478
9.2.2 铁路规范	480
9.3 多级锚杆挡墙支护高边坡静动稳定性分析与抗震设计方法	482
9.3.1 极限分析上限法	482
9.3.2 基本假定	483
9.3.3 破坏机构	484
9.3.4 能耗计算	485
9.3.5 基于强度折减技术的静动稳定性分析	490
9.3.6 参数敏感性分析	492

9.3.7 抗震设计方法与实例分析 495

9.4 锚杆挡墙与重力式挡墙组合静动稳定性分析与抗震设计方法 499

9.4.1 破坏机构 499

9.4.2 能耗计算 500

9.4.3 静动稳定性分析 501

9.4.4 参数敏感性分析 502

9.4.5 抗震设计方法与实例分析 503

9.5 锚杆挡墙与桩板式挡墙组合静动稳定性分析与抗震设计方法 504

9.5.1 破坏机构 504

9.5.2 能耗计算 505

9.5.3 静动稳定性分析 506

9.5.4 参数敏感性分析 507

9.5.5 抗震设计方法与实例分析 509

参考文献..... 509

第 1 章 综 述

1.1 引 言

地震是一种全球性的、具有瞬时突发性的自然现象。从地震发生位置的地理环境上看,全球地震可分为海洋地震和大陆地震两大类,其中海洋地震约占 85%,大陆地震约占 15%。但由于大陆是全球人类主要的聚居地,所以地球上的地震灾害绝大部分来自大陆地震。地震在全球范围内造成的灾害是巨大的。1994 年,美国洛杉矶发生 6.7 级地震,1340 人死亡,约 1.5 万人受伤,直接经济损失 200 亿美元;1995 年,日本阪神发生 7.2 级地震,6432 人死亡,43792 人受伤,直接经济损失 830 亿美元;1999 年,土耳其伊兹米特发生 7.4 级地震,约 1.7 万人死亡,2.64 万人受伤,直接经济损失 200 亿美元;1999 年,中国台湾集集发生 7.6 级地震,2470 多人死亡,1.13 万余人受伤,直接经济损失 118 亿美元;2003 年,伊朗巴姆城发生 6.3 级地震,4 万余人死亡,2 万余人受伤,2 万余间房屋倒塌,伊朗具有 2500 多年历史的著名古迹巴姆古城遭到严重破坏。最近几年,全球范围内高强度地震频发。2010 年 1 月 12 日,海地发生 7.3 级地震,预计死亡人数达到 20 万;2010 年 2 月 27 日,智利发生了 8.8 级特大地震,其后连续发生多次强余震,并引发海啸,波及阿根廷等多个邻国。

我国地处环太平洋地震带与欧亚地震带之间,受太平洋板块、印度洋板块和菲律宾宾板块的挤压,地震活动频繁而又强烈,是世界上大陆地震最活跃、地震灾害最严重的国家之一。我国的地震活动具有频率高、强度大、震源浅、分布范围广、伤亡严重等特点。自公元前 1177 年至公元 1969 年,除资料不确切外,共发生里氏震级 $M \geq 5.0$ 地震 2097 次(部分数据为史料推断);1970 年至 2007 年年底,中国(含边界附近)共发生 $M \geq 5.0$ 地震 4500 余次。20 世纪以来,我国共发生 6 级及以上地震近 800 次,遍布除贵州、浙江两省和香港特别行政区以外所有的省、自治区、直辖市,其中 7 级及以上的地震 100 次,约占世界 7 级及以上地震的 1/10;8 级以上地震 10 次;全球共发生 M_s (面波震级)8.5 级及以上的特大地震 4 次,其中 2 次发生在中国,分别是 1920 年宁夏海原 8.5 级地震和 1950 年西藏察隅-墨脱 8.6 级地震。自有史料记载以来,我国发生 $M \geq 8.0$ 的特大地震已有 18 次,如表 1-1 所示。

表 1-1 中国 $M \geq 8.0$ 地震基本信息表

序号	发震时间	地名 (部分为古地名)	纬度/(°)	经度/(°)	震级 (部分为推算震级)
1	1303 年 9 月 17 日	山西 赵城、洪洞	36.3	111.7	8
2	1556 年 1 月 23 日	陕西 华县	34.5	109.7	8
3	1604 年 12 月 19 日	福建 泉州海外	25.0	119.5	8
4	1668 年 7 月 25 日	山东 郯城、莒县	35.3	118.6	8.5
5	1679 年 9 月 2 日	河北 三河、平谷	40.0	117.0	8
6	1739 年 1 月 3 日	宁夏 银川、平罗	38.9	106.5	8
7	1833 年 9 月 6 日	云南 嵩明	25.2	103.0	8
8	1902 年 8 月 22 日	新疆 阿图什	40.0	76.5	8.3
9	1906 年 12 月 23 日	新疆 玛纳斯	43.9	85.6	8
10	1920 年 6 月 5 日	台湾 花莲海外	23.5	122.7	8
11	1920 年 12 月 16 日	宁夏 海原	36.5	105.7	8.5
12	1927 年 5 月 23 日	甘肃 古浪	37.6	102.6	8
13	1931 年 8 月 11 日	宁夏 银川、平罗	38.9	106.5	8
14	1950 年 8 月 15 日	西藏 察隅-墨脱	28.4	96.7	8.6
15	1951 年 11 月 18 日	西藏 当雄	31.1	91.4	8
16	1972 年 1 月 25 日	台湾 新港东 海中	23.0	122.3	8
17	2001 年 11 月 14 日	新疆 若羌、青海交界	36.2	90.9	8.1
18	2008 年 5 月 12 日	四川 汶川县	31.0	103.4	8.0

注:本表数据来源于中国地震网

我国的国土面积上,7 度以上的高烈度区覆盖了一半的国土,其中包括 23 个省会城市和 2/3 的百万以上人口大城市。我国目前居住在农村的 8 亿人口中,有 6.5 亿人居住在地震高烈度区^[1,2]。我国强震及地震带分布如图 1-1 所示。

另外,我国作为发展中国家,人口稠密,且建筑物抗震能力低,我国的地震灾害可谓全球之最。据不完全统计,20 世纪全球因地震而死亡的人数为 110 万人,其中我国就占 55 万人之多,占全球的 50%。20 世纪后半叶以来,我国地震死亡人数占同期我国所有自然灾害死亡人数的 50%。进入 21 世纪后,2008 年 5 月 12 日,我国四川省汶川县发生里氏 8.0 级特大地震,全国受灾总面积约 50 万 km²,其中极重灾区、重灾区面积 13 万 km²,受灾群众 4625 万多人,69227 人遇难,17923 人失踪,37 万多人受伤,直接经济损失达 8451 亿元。这也是新中国成立以来规模最大、受灾面积最广、伤亡最为惨重的一次地震。

如果能实现地震预报,防患于未然,人民的生命财产安全则能得到很大的保障。但是从世界范围来说,地震预报是一个非常复杂的科学问题,目前对地震孕育发生的

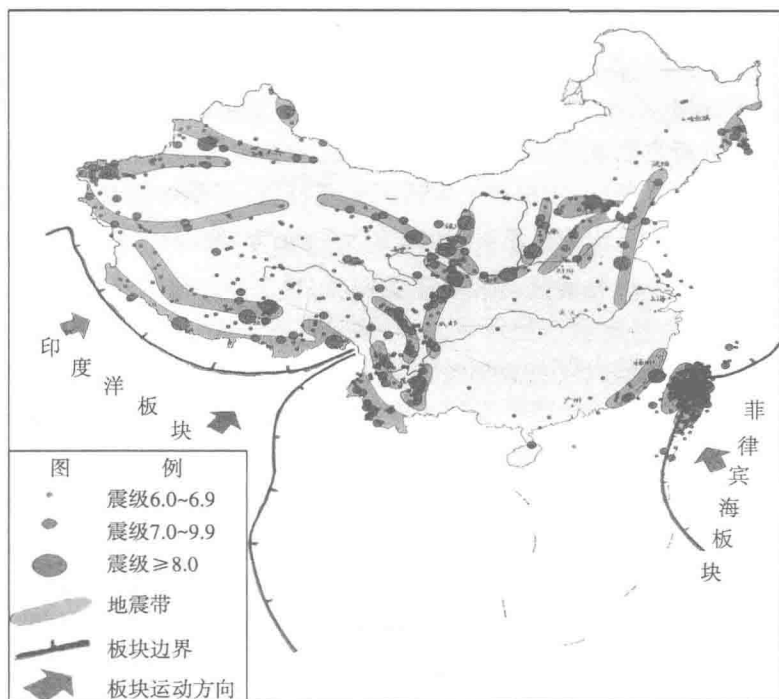


图 1-1 中国强震及地震带分布图

(上图因分辨率有限,我国的钓鱼岛、赤尾岛和东沙群岛等没有标出)

物理机理和错综复杂的前兆现象的认识还非常肤浅,基本上处于经验性认识阶段。因此,作为地球科学的前沿课题,地震预报仍然是当前世界性的科学难题。我国的地震预报是1966年以邢台地震为起源,在全国范围内逐步发展起来的。我国目前的地震预报水平状况大体可以这样概括:我国对地震孕育发生的原理、规律有所认识,但还没有完全认识;能够对某些类型的地震作出一定程度的预报,但还不能预报所有的地震;作出较大时间尺度的中长期预报已有一定的可信度,但短期预报的成功率还相对较低。

在巨大的地震灾害面前,加之地震预报的局限性,修正已有抗震设计方法,经济合理地进行构筑物抗震设防显得十分必要。地震灾害的综合调查报告表明,破坏性地震造成的人员伤亡和经济财产损失主要是由建筑物的倒塌、损毁等因素造成的。在“5·12”汶川地震中,建筑物抗震设防的不足或不达标也是造成巨大生命财产损失的一大“元凶”。目前,研究构筑物的地震动力反应特性、合理地进行构筑物抗震设防已成为减轻地震灾害有效、可行的方法之一。

1.2 地震响应特性的理论分析方法

岩土结构物地震反应特性的分析方法经历了从拟静力法(pseudo-static method)

到土体仿真地震分析方法,从总应力法到考虑土的液化和软化的有效应力法,从线性分析到非线性以及弹塑性分析方法,从确定性分析到考虑随机地震的非确定性分析,从一维问题到二维、三维岩土构筑物抗震分析的发展历程^[3,4]。关于岩土构筑物的地震响应理论分析方法概括起来主要有三大类:①剪切条分法,通过弹性介质的剪切振动微分方程和边界条件,求出岩土结构的地震反应;②集中质量法,把岩土结构看成由若干个集中质量组成的体系,用动力学的方法求出地震反应;③数值计算方法。

1.2.1 剪切条分法

剪切条分法最早是由 Mononobe 等^[5]在进行土坝地震动力响应计算分析时提出来的。一维黏弹性剪切条分法可得到土地地震反应的闭合解,对其进行参数研究是很方便的,因此在过去几十年里受到了一些学者和工程师的欢迎,剪切条分模型也被推荐为多层房屋、土层等结构抗震分析的理想化分析模型。尽管如此,剪切条分法既没有考虑边界变化、土料不同等情况,也不能得到同一水平截面上不同部位的动力响应。因此,很多学者对剪切条分法作了补充和完善,主要包括^[6-14]:①非均质土层构筑物地震反应的剪切条分模型;②考虑横向和竖向激励土工构筑物地震反应分析模型;③基于多维边界条件,能用于分析复杂形状的动力响应剪切条分模型;④考虑土体-结构相互作用的动力响应分析模型;⑤将剪切条分法与土的非线性动力分析技术相结合的岩土构筑物非线性地震动力响应分析方法;⑥构筑物随机振动的剪切条分模型;⑦考虑多相介质耦合的地震响应分析模型。

1.2.2 集中质量法

集中质量法就是将剪切振动的土柱质量集中到若干个点上,然后按多质点体系进行反应分析。Seed 等^[15]首先采用集中质量法研究了水平层状场地的地震响应问题,并采用振型分析法求解系统的运动方程。Martin 和 Seed^[16]基于集中质量法的“MASH”程序对垂直入射剪切波的水平层状场地响应进行了非线性分析。Finn 等^[17,18]基于集中质量法采用“DEARA”程序对土层的地震响应及地震液化问题进行了研究。刘曾武等^[19]采用集中质量法研究了场地土层的周期特性,通过对各种常见场地地质剖面分析,总结了土层固有周期的特点。文献^[20]提到 Idriss 等为研究土层分层数对求解精度的影响,把集中质量法按不同分层情况的求解结果同剪切梁法作了比较,得到了分层数与精度的关系。邓亚虹等^[21]在集中质量法的基础上发展了基于一致质量矩阵的一致质量法,分析了土层剪切模量分布、土层层厚分布以及覆盖层总厚度对场地自振频率的影响。

1.2.3 数值分析方法

通常数值分析方法可以考虑复杂地形、土的非线性、非均质性、弹塑性及土中孔

隙水等诸多因素的影响,并能深入分析土的动力特性及土体各部分的动力反应,因此数值分析方法已经成为动力分析中最重要的分析方法。目前,国内外对岩土构筑物抗震分析常采用的数值分析方法有有限元法、有限差分法等。以这些方法为手段,很多计算软件已经被开发应用,并趋于成熟。

1. 有限元法

Clough 和 Chopra^[22]首先将有限元法应用于土石坝地震动力响应分析。采用有限元法分析坝体的地震动力响应时,初期曾采用线性黏弹性模型表示土的应力应变关系,用振型叠加法求解动力方程。后来,引入了非线性黏弹性模型和弹塑性模型,这些本构模型与有限元法相结合,发展了弹性分析方法、等效线性分析方法、真非线性分析方法以及弹塑性动力特性分析方法等。

等价线性分析方法是目前进行土体动力分析最为广泛的方法之一。等价线性分析方法将土体视为黏弹性体,采用等效剪切模量和等效阻尼比来反映土体动应力应变关系的非线性和滞后性,并通过土工试验获得剪切模量和等效黏性阻尼比随动应变幅的变化表达式,然后通过多次线性计算,反复迭代,使等效参数与剪应变水平相协调,由此获得近似的非线性解答。这种方法具有概念明确、应用方便等优点,但不能反映土体的变形累计。沈珠江^[23]指出,一个完整的等效黏弹性模型应包括平均剪切模量、阻尼比、残余剪应变、残余体积应变等计算公式,这样的黏弹性理论既能用于振动孔隙水压力的增长、消散计算及液化分析,同时也能估算土体的地震变形。因此,一些学者将等效黏弹性本构模型与振动孔隙水压力增长模式和残余应变计算模式相结合来计算振动孔隙水压力和地震永久变形^[24]。

另一类与等价线性分析方法同时发展起来的方法为真非线性分析方法。它直接采用描述土在不同加载条件下的应力应变关系对动力方程进行逐步数值积分求解,且在每一增量过程中依靠某种迭代格式取得符合规定加载路径的“真实”应力与变形状态。由于真非线性分析方法能反映土在循环或瞬时荷载作用下的动态响应而受到了很大的关注。而沈珠江^[25]则认为,对于土体性质完全取决于剪切模量的无体积变形材料,真非线性理论无疑比等价黏弹性理论更为合理,但对于体积变形有决定意义的砂土液化变形问题,真非线性理论是否优于等价黏弹性理论就值得讨论。

当土体应变量级达到 10^{-4} 时,土体将处于弹塑性状态,此时地震反应分析若能采用土体弹塑性本构模型的有限元动力分析方法,在理论上是更为合理的。文献[4]指出王志良曾将基于 Dafalias 低塑性界面理论而建立的弹塑性模型同有限元程序结合,对一个一维问题进行了地震反应分析。日本学者 Iai 等^[26]将多重剪切机构塑性模型结合动力有限元程序,计算了日本神户、钏路冲等大地震中遭受破坏的港工结构物,计算结果与震后实测情况吻合得很好。而在国内,这方面的研究工作还处于初始阶段。

另外,有限元动力分析一个很重要的问题在于如何将土体结构无限边界处理成

有限边界,这一处理的好坏直接影响计算的精度。目前采用的边界条件主要有一致边界、透射边界、黏性边界、黏弹性边界、旁轴边界、Smith 边界、Higdon 边界等。

2. 有限差分法

目前在岩土工程领域具有代表性的有限差分程序为美国 Itasca 咨询公司推出的商业化软件 FLAC(fast Lagrangian analysis of continua)/FLAC3D。FLAC/FLAC3D 采用显式差分法求解微分方程。对于显式法,非线性本构关系与线性本构关系并无算法上的区别,根据已知应变增量,可以很方便地求得应力增量并跟踪系统的演化过程。在处理大变形问题时,由于每一时步变形很小,所以可采用小变形本构关系,将各时步的变形叠加得到大变形,这也就避免了推导并应用大变形本构关系遇到的麻烦。另外,FLAC/FLAC3D 即使在模拟静力系统时,也采用动态运动方程进行求解,可以很好地模拟物理上的不稳定过程。正是由于上述优点,FLAC/FLAC3D 在岩土工程领域得到了广泛的应用,并已有不少学者将其应用于边坡、坝体、墩基和桩基、挡墙、地下结构以及考虑土体-结构相互作用的地震反应分析中。

3. 其他方法

应用于岩土地震反应分析的数值分析方法还有离散元法、边界元法、非连续变性方法(DDA)、流行元法以及各种方法之间的耦合。

1.3 地震响应特性的模型试验

模型试验具有直观性,可以在很短时间内再现实际需要几年或几十年时间观测的结果,为实际工程提供重要的参考价值。因此,在一些国家的设计规范中,明确规定了要以模型试验作为论证设计方案或提供设计参数的手段。目前,岩土构筑物地震反应特性研究的试验手段主要有振动台模型试验、动力离心模型试验和爆炸模型试验等。

1.3.1 振动台模型试验

振动台模型试验相似关系设计和边界条件模拟是能否实现试验室真实重演构筑物地震破坏现象的重要内容。模型试验相似设计的理论依据为相似三大定理。在相似设计中,通常考察包括几何条件、物理条件、边界条件、初始条件等单值条件的物理量,建立起物理量的相似准则,根据相似第三定理,如果相似准则在数值上相等,则现象相似。在岩土构筑物振动台模型试验相似设计中,不仅需要考虑重力场问题,还需要考虑土体动力非线性等因素,相似设计也更为复杂。林皋等^[27]提出了结构动力模型试验结构振动相似设计和重力相似设计的一些技巧,对岩土构筑物振动台模型试验相似设计有很大参考价值。吕西林和陈跃庆^[28]针对土体-结构相互作用的振动台试验相似设计做了诸多有意义的研究工作。凌贤长等^[29]对液化场地土体-结构物动