



Geotechnical Earthquake Engineering and
Engineering Vibration

岩土地震工程及 工程振动

张克绪 凌贤长 等/著



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

岩土地震工程及工程振动

Geotechnical Earthquake Engineering and
Engineering Vibration

张克绪 凌贤长等 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书对岩土地震工程及工程振动的基础理论和解决实际工程问题的途径、手段、方法进行较为全面系统深入的介绍。全书共 23 章;第 1~4 章讲述与岩土地震工程及工程振动有关的基本知识;第 5~13 章讲述岩土地震工程与工程振动的基础理论;第 14~18 章讲述岩土地震工程问题;第 19~23 章讲述岩土工程振动问题。

本书可供在岩土工程、地震工程和工程振动领域中从事教学、科研、设计和勘测的人员学习和参考,也可作为有关专业研究生课程的教材或参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

岩土地震工程及工程振动 = Geotechnical Earthquake Engineering and Engineering Vibration/张克绪等著. —北京:科学出版社,2016.9
ISBN 978-7-03-049672-0

I. ①岩… II. ①张… III. ①岩土工程-工程地震-研究②工程振动学-研究 IV. ①TU4②P315.9③TB123

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 201897 号

责任编辑:吴凡洁 乔丽维 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 倩 / 封面设计:天极书装

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>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 9 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2016 年 9 月第一次印刷 印张:59 1/4

字数:1 380 000

定价:298.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

顾名思义,本书讲述与岩土工程有关的地震工程及工程振动问题,对岩土地震工程及工程振动的基础理论和解决实际工程问题的途径、手段、方法进行较为全面系统深入的介绍。本书的作者均长期从事与岩土地震工程、工程振动有关的教学、研究和工程咨询工作。作者根据对岩土地震工程及工程振动学科的认识、理解和实践,构建了本书的写作体系。全书共 23 章,可分为以下四大部分。

(1) 与岩土地震工程及工程振动有关的基本知识。这部分内容主要是为初学者或未曾从事过岩土地震工程及工程振动工作的人员设置的,这些人员对从事岩土地震工程及工程振动工作所应具备的基本知识掌握可能不足。这部分内容主要包括动荷载的特性、土所受的动力作用水平与工作状态、工程地震的基本知识、土体中波传播的基础知识。

(2) 岩土地震工程及工程振动的基础理论。这部分内容主要包括:作为力学介质和工程材料的土在动荷载作用下的变形、强度、耗能特性;土的动力学计算模型;土体动力形状分析,包括应力、变形、稳定性、饱和土体中孔隙水压力;土-结构动力相互作用分析。

(3) 岩土地震工程。这部分内容讲述与岩土有关的地震工程问题,主要包括与地震小区划及场地划分有关的岩土工程问题、地基基础抗震、土工结构物抗震、近岸或跨河建筑物抗震的特殊问题、地下结构及沉埋管线抗震等。

(4) 岩土工程振动。这部分内容讲述与岩土工程有关的工程振动问题,主要包括动力机械地基基础的振动、车辆行驶引起的土体振动、波浪荷载对海底土层的作用、爆炸荷载对土体的作用、桩基力学性能的动力检测等。

本书的大部分内容曾在哈尔滨工业大学为攻读岩土工程专业方向的硕士研究生讲述过,并做过多次修改。

本书的读者对象是在岩土工程、地震工程、工程振动领域从事教学、科研、设计和勘测工作的高等学校教师、科技人员和相关专业的研究生,希望本书的出版对他们的工作和学习有所帮助。本书的写作起点较高,为了便于广大工程技术人员阅读,尽量采用易于被广大工程技术人员接受的方式由浅入深地讲述。

本书从 2010 年 5 月第一作者退休开始,历时近四年,共经历了三个写作阶段。

(1) 根据作者对这门学科的理解构建写作框架。编制写作大纲初稿,包括章节的设置和各节的写作要点。作者意识到了这一阶段工作的重要性,因此经过充分酝酿、反复修改,花了近一年的时间才完成写作大纲的初稿。

(2) 根据写作大纲分工编写各章的内容,并在编写过程中对写作大纲中某些章节的设置和写作要点做了适当的调整和修改。

(3) 修改和统稿,主要是文字上的修改和校核、图表的完善,但对个别章节的内容也做了一些调整和修改。

本书写作的分工如下:第 1、2、4~12、14、15、19、22 章由张克绪教授承担;第 3、20 章

由凌贤长教授承担;第 13、17、21 章由凌贤长教授和张克绪教授共同承担;第 16 章由唐亮博士和张克绪教授共同承担;第 18 章由汤爱萍教授承担;第 23 章由胡庆立副教授承担。

本书得到 2013 年度国家科学技术学术著作出版基金的资助,在此表示衷心的感谢。此外,感谢科学出版社和编辑为本书出版所做的大量工作和付出的劳动;感谢中国地震局工程力学研究所谢礼立院士、南京工业大学陈国兴教授和哈尔滨工业大学王伟教授对本书出版的支持和帮助;感谢凌贤长教授的许多研究生为本书的出版所付出的辛苦劳动,由于参与人员较多,恕不在此逐一列出他们的名字。

由于作者水平有限,书中难免存在不足之处,欢迎专家和广大读者予以指正。

本书的第一作者请求允许以下面一段感言作为前言的结尾:

没有想到,我以古稀之年作为第一作者完成这部著作。愿将此书献给我的老师——已故的大连理工大学章守恭教授和我的夫人——已故的中国地震局工程力学研究所王治琨副研究员。章守恭教授于我有再造之恩,他使我有机会于 1962 年投其门下攻读土力学地基基础专业(现称岩土工程专业)研究生。这段经历使我终身受益,如果没有这段经历,也许就不会有本书的问世。王治琨女士与我牵手同甘共苦走完了近半个世纪的人生旅途,此间,对我的关怀和帮助是难以言表的,我的每项工作都包含她的贡献,她一直关心本书的写作,遗憾地,她于 2013 年 2 月辞世了,没能见到本书的出版。

张克绪

2014 年元月于哈尔滨

目 录

前言

第 1 章 概述	1
1.1 动荷作用及在土体中引起的效应	1
1.2 岩土地震工程及工程振动的研究内容	1
1.3 学科的特点	2
1.4 研究途径	3
1.5 相关学科	6
1.6 学科发展的简述	6
思考题	8
第 2 章 动荷载的特点及土的工作状态	9
2.1 动荷载及其特点	9
2.2 动荷载的类型	10
2.3 有限作用次数变幅荷载的等价等幅荷载	13
2.4 土所受的动力作用水平	15
2.5 动荷作用下土的工作状态及屈服剪应变	16
2.6 动荷作用的速率效应及疲劳效应	17
2.7 动荷作用下两大类土及划分	19
思考题	20
参考文献	20
第 3 章 工程地震的基本知识	21
3.1 地震机制与成因类型	21
3.2 构造地震分布	27
3.3 震源与地震波	33
3.4 震级、震害与地震烈度	37
3.5 地面运动与衰减规律	48
3.6 地震加速度时程与频谱特性	53
3.7 地震动与地震区划	63
3.8 地震地质条件与地震活动性	78
思考题	80
参考文献	82
第 4 章 土体中波传播的基础知识	84
4.1 概述	84
4.2 土体中弹性波的基本方程	84

4.3	波的类型及波速	88
4.4	表面波	92
4.5	波的反射和折射	96
4.6	一维波传播问题	102
4.7	应力、应变、运动速度和波速之间的关系	107
4.8	土波速的现场测量	109
4.9	影响土剪切波波速的因素及确定剪切波波速的经验公式	118
	思考题	120
	参考文献	120
第5章	土的动力性能试验	121
5.1	概述	121
5.2	土的动力试验设备的组成及要求	123
5.3	土动力三轴试验	126
5.4	土共振柱试验	131
5.5	土动剪切试验	137
5.6	土动力试验方法及适用条件	141
5.7	土动力试验的计划	143
	思考题	144
	参考文献	145
第6章	土的动力学模型	146
6.1	概述	146
6.2	线性黏弹模型及适用条件	148
6.3	等效线性化模型及适用条件	163
6.4	曼辛准则下土的动弹塑性模型	175
6.5	非曼辛准则下土的动力弹塑性模型	187
6.6	土动力弹塑性模型的评论	190
	思考题	190
	参考文献	191
第7章	动荷作用下土的变形、孔隙水压力及强度性能	192
7.1	概述	192
7.2	屈服剪应变的确定	194
7.3	动剪切作用引起干砂的永久体积变形	195
7.4	在不排水动剪切作用下饱和和砂土产生的孔隙水压力	199
7.5	饱和土液化的机制及类型	217
7.6	液化和循环流动性	218
7.7	影响饱和和砂土液化的因素	220
7.8	土的动强度及影响因素	246
7.9	不排水条件下动剪切作用引起的饱和土永久偏应变	253

思考题	253
参考文献	254
第 8 章 土体的初始静应力及其对土体动力性能的影响	257
8.1 概述	257
8.2 初始静应力对土体动力分析的影响	260
8.3 水平场地地面下土体初始静应力的确定	261
8.4 地基中土体初始静应力的确定	261
8.5 斜坡及坝体中的初始静应力的确定	265
8.6 与破坏面上的静剪应力比相应的转换固结比	268
思考题	270
参考文献	270
第 9 章 土体的动力分析	272
9.1 概述	272
9.2 水平场地土层的地震反应分析——解析法	277
9.3 均质剪切楔的地震反应分析——解析法	294
9.4 水平土层和土楔地震反应的一维数值求解方程	298
9.5 一般情况下土体的地震反应数值求解方程——有限元法	304
9.6 求解土体地震反应方程的振型分解法	319
9.7 瑞利阻尼的物理意义及振型对阻尼比的影响	323
9.8 求解地震反应方程的逐步积分法	326
9.9 求解地震反应方程的频域解法	333
9.10 水平成层不均匀土体的地震反应——波传法	339
9.11 基岩地震动非一致输入时土体地震反应分析	345
9.12 土体弹塑性地震反应分析	348
9.13 黏性边界	350
9.14 土的动力学模型对地震反应分析结果的影响	356
思考题	357
参考文献	358
第 10 章 土体中饱和砂土及粉土的液化判别方法	360
10.1 概述	360
10.2 水平场地液化判别方法——Seed 简化法	363
10.3 水平场地液化判别方法——中国《建筑抗震设计规范》法	378
10.4 水平场地液化判别方法——液化势指数法	383
10.5 水平场地液化判别方法——能量法	389
10.6 水平场地液化判别方法——剪应变法	391
10.7 平面应变状态下的液化判别方法	394
10.8 饱和砂砾石液化判别	405
思考题	411

参考文献	412
第 11 章 动荷载作用下饱和土中的水土耦合作用及土体中孔隙水压力的增长和消散	
.....	413
11.1 概述	413
11.2 不排水条件下饱和土体中的孔隙水压力源函数	415
11.3 动荷载作用期间饱和土体孔隙水压力增长和消散方程	416
11.4 影响动荷载作用期间孔隙水压力的因素	420
11.5 孔隙水压力增长和消散方程的数值解法	424
11.6 土体动力分析的有效应力法	440
11.7 动荷作用停止后饱和土体中孔隙水的消散及影响	443
思考题	444
参考文献	444
第 12 章 动荷载作用下土体的永久变形	445
12.1 概述	445
12.2 动荷作用下土体永久变形的机制类型及影响	447
12.3 动偏应力作用下非饱和砂土剪缩引起的附加沉降分析	450
12.4 有限滑动引起的永久水平位移分析	453
12.5 永久应变势及其确定	461
12.6 偏应变引起的土体永久变形分析——软化模型	470
12.7 偏应变引起的土体永久变形分析——等价结点力模型	473
思考题	477
参考文献	478
第 13 章 动荷作用下土-结构的相互作用	479
13.1 概述	479
13.2 地震时土-结构相互作用机制及影响	481
13.3 地震作用下土-结构相互作用问题的分解	488
13.4 考虑土-结构相互作用的分析方法	490
13.5 土-结构相互作用分析中土体的理想化——弹性半空间无限体	501
13.6 土-结构相互作用分析中土体理想化——弹床系数法	505
13.7 土-结构相互作用分析中土体理想化——有限元法	512
13.8 地震时单桩与周围土体的相互作用	517
13.9 土-结构接触面单元及两侧相对变形	519
思考题	526
参考文献	526
第 14 章 地震小区划及建筑场地分类中岩土工程问题	527
14.1 概述	527
14.2 基本资料工作	529
14.3 地震小区划中土层的地震反应分析	533

14.4	场地分类及场地类别小区划	537
14.5	地震动小区划	541
14.6	场地饱和砂土液化危害小区划	543
14.7	斜坡场地	545
	思考题	547
	参考文献	548
第 15 章	地基基础抗震	549
15.1	概述	549
15.2	地震作用下天然地基浅基础承载力校核	554
15.3	地震引起的天然地基附加沉降的简化计算	555
15.4	桩基的抗震	565
15.5	地震时桩内力分析的拟静力法	572
15.6	考虑地基土体-基础-上部结构的相互作用的动力分析方法	586
15.7	地基基础抗震工程措施	592
15.8	桩基和土体加固对地面运动特性及场地类别的影响	594
	思考题	600
	参考文献	600
第 16 章	土坝(堤)及挡土结构的抗震	601
16.1	概述	601
16.2	土坝(堤)地震稳定性拟静力分析方法	611
16.3	土坝的等价地震系数及其确定	617
16.4	土坝(堤)地震性能的动力分析	622
16.5	土坝(堤)的震后稳定性	628
16.6	土坝应力的简化分析	631
16.7	尾矿坝的地震性能	639
16.8	地震时土压力与重力式挡土墙地震稳定性	649
16.9	以地震时墙体位移为准则的挡土墙抗震设计方法	657
	思考题	663
	参考文献	664
第 17 章	近岸与跨河建筑物的抗震问题	665
17.1	概述	665
17.2	近岸与跨河建筑的震害及其特点	666
17.3	近岸与跨河建筑物的震害机制及常规的抗震分析方法	677
17.4	地震时岸坡土体永久变形分析及影响范围确定	681
17.5	岸坡土体地震永久变形对桩的作用分析	683
17.6	岸坡土体地震永久变形对跨河与近岸建筑影响的算例	689
	思考题	693
	参考文献	693

第 18 章 地下工程与埋地管线抗震	694
18.1 震害特点及机制	694
18.2 地下结构抗震计算拟静力分析方法	702
18.3 地下结构地震分析的动力法	708
18.4 埋地管线抗震分析	712
18.5 地下工程与埋地管线抗震工程措施	720
思考题	720
参考文献	721
第 19 章 动力机械地基基础	722
19.1 概述	722
19.2 动力机械的地基基础分析体系	727
19.3 简化黏-质-弹体系及分析方法	732
19.4 刚块-均质弹性半空间体系	744
19.5 等价的集总参数体系及分析方法	755
19.6 影响地基刚度和阻抗的因素	762
19.7 冲击荷载下地基基础的振动	770
19.8 动力机械桩基基础的振动	773
19.9 动力机械地基基础振动的数值分析	776
19.10 动力机械减振及基础隔振	783
思考题	787
参考文献	788
第 20 章 列车行驶引起路基的振动	790
20.1 引言	790
20.2 路基本体工程	792
20.3 列车行驶路基振动反应现场监测	794
20.4 列车振动作用下路基土动力性能试验	799
20.5 列车行驶路基振动反应模型试验	802
20.6 列车行驶路基振动反应数值分析概述	804
20.7 第一步整体简化分析	807
20.8 第二步路基-场地土体体系细化分析	818
20.9 轨枕作用力与路基-场地土体中动应力	820
20.10 轨枕下路基土体中动应力最大值及其分布规律	831
思考题	837
参考文献	838
第 21 章 波浪荷载作用下岩土工程振动问题	840
21.1 概述	840
21.2 作用于海底面上的波浪荷载	845
21.3 在波浪荷载下海底土的动力特性	847

21.4	海洋土的剪切波波速·····	854
21.5	波浪压力对海底土层作用的半空间无限体解法·····	857
21.6	波浪压力对海底土层作用的数值分析方法·····	865
21.7	海底砂土层液化判别方法·····	870
	思考题·····	874
	参考文献·····	875
第 22 章	爆炸等冲击荷载对土体的作用 ·····	876
22.1	概述·····	876
22.2	在爆炸等冲击荷载作用下土的动力学模型及动强度·····	881
22.3	爆炸等作用引起的冲击波在饱和土体中的传播·····	889
22.4	在排水条件下考虑液-固相耦合饱和土体的动力分析 ·····	896
22.5	爆炸等冲击荷载对土体作用的分析·····	900
22.6	爆炸等冲击荷载对地下结构的作用分析·····	905
	思考题·····	906
	参考文献·····	906
第 23 章	桩基力学性能的动力检测 ·····	908
23.1	概述·····	908
23.2	单桩动刚度及阻尼比的现场检测·····	910
23.3	确定单桩承载力的动力打桩公式·····	917
23.4	单桩性能检测的 Smith 波动方程法 ·····	921
23.5	桩基承载力检测的波形拟合法·····	933
	思考题·····	934
	参考文献·····	934

第 1 章 概 述

1.1 动荷载作用及在土体中引起的效应

建筑物地基和土工结构物中的土体除受静荷载作用,还会受动荷载作用。通常,动荷载是在静荷载之上附加作用于土体的。也就是说,在动荷载作用之前土体已经受到了静荷载作用;相对而言,动荷载是附加荷载,而静荷载是初始荷载。

产生动荷载的原因是多种多样的。就工程而言,主要有如下几种:地震、动力机械运转、车辆行驶、波浪、爆炸等。虽然产生动荷载的原因不同,但是大多数动荷载是由运动的惯性力引起的。由于运动的多样性,相应的动荷载也具有不同的特性。

动荷载作用于土体之后,将使土体产生运动,在土体中每一点引起位移、速度、加速度以及附加的动应变、动应力,这些都是动荷载作用在土体中引起的效应。当动荷载作用达到一定程度时,土体可能产生不允许的附加变形或在附加的动应力下发生破坏。

但是,动荷载作用在土体中引起的效应不仅取决于动荷载的大小,还取决于在动荷载作用下土的变形和强度特性。相应地,在动荷载作用下土体是否发生不允许的附加变形或破坏,同样也取决于在动荷载作用下土的变形和强度特性。应指出,在动荷载作用下土的变形和强度特性与其静荷载作用下的特性有显著不同。

在工程设计中,不仅应保证土体在静荷载作用下的变形和稳定性满足要求,还要保证土体在静荷载和动荷载共同作用下的变形和稳定性满足要求。因此,确定在动荷载作用下土体中的效应和土的变形及强度性能是两个重要课题。动荷载作用在土体中产生的效应通常由土体或土体-结构体系的动力分析确定,而在动荷载作用下土的变形及强度性能则由土的动力试验(包括室内和现场试验)来确定。

1.2 岩土地震工程及工程振动的研究内容

从学科而言,岩土地震工程及岩土工程振动是两个学科分支。岩土地震工程是岩土工程与地震工程交叉而形成的一个学科分支;岩土工程振动则是岩土工程与工程振动交叉而形成的一个学科分支。虽然它们所涉及的动荷载类型不同,但都涉及在动荷载作用下土和土体的性能,具有相同的理论基础,而研究解决问题的途径也相似,因此本书将它们结合起来讲述。

顾名思义,岩土地震工程是研究与岩土工程有关的地震工程问题。当然这是一个很笼统的定义,但指明它所研究的主要问题比给出更精确的定义更有助于对这个学科分支的理解。具体地讲,岩土地震工程大致包含如下问题:①地震小区划和建筑场地分类中的岩土工程问题;②建筑物地基基础抗震;③土工结构抗震;④跨河及近岸建筑物抗震的岩

土工程问题;⑤地下工程及埋藏管线抗震的岩土工程问题。

岩土工程振动是研究与岩土工程有关的工程振动问题。同样,这也是一个很笼统的定义。岩土工程振动所涉及的面更为广泛,具体地讲,大致包括如下问题:①动力机械的地基基础振动;②车辆行驶引起的振动;③波浪荷载对海底土层的作用;④爆炸荷载对土体的作用;⑤桩基力学性能的动力检测。

应该指出,上述列举的岩土地震工程和工程振动问题并不是问题的全部,但应该是工程最为关注的问题。因此,本书选取这些问题作为讲述的重点内容。

很显然,岩土地震工程和工程振动所研究对象的主体应为土体。不言而喻,土体是由土组成的。因此,土和土体在岩土地震工程和工程振动的问题中具有特别重要的作用。在解决岩土地震工程和工程振动问题时,土被视为一种力学介质或工程材料,必须研究和确定它在动荷载作用下的变形、强度和耗能等性能。关于土体的作用,首先,动荷载作用引起的振动在土体中传播,在传播过程中不仅振动的幅值会发生变化,振动的频率成分也会发生变化,土体好像是放大器和滤波器,具有放大和滤波的作用;此外,土体的另一个作用是保持它所支承的或相邻的结构物以及其自身在动荷载作用下的稳定性。工程经验表明,一旦在动荷载作用下土体丧失稳定性,将会造成重大的生命和财产损失及不良的社会影响。

岩土地震工程和工程振动所研究的体系,除少数只由土体组成,大多数是由土体和结构组成的,结构建在土体之上、之侧或之中。因此,岩土地震工程和工程振动往往涉及在动荷载作用下土体与结构的相互作用。可认为,在动荷载作用下土的性能、土体的变形及稳定性,以及土体与结构相互作用是岩土地震工程及工程振动的理论基础。这些内容属于土动力学的范畴,为了深入系统地讲述岩土地震工程和工程振动,本书用了较多篇幅讲述这部分内容。

最后,必须强调,岩土地震工程和工程振动都是一个工程学科的分支,它所研究的问题都是由工程实践提出的。尽管由于问题的难度较大,要用较多和较深的数学和力学知识,但是它解决问题的途径、方法和结果必须尽量地适合和满足工程实用的要求。

1.3 学科的特点

前面已经指出,岩土地震工程及工程振动都是学科交叉而形成的学科分支,它们有许多共同的特点。

(1) 它们所研究的问题大多是 20 世纪 60 年代以后提出的一些专门工程问题。这些问题不仅新,而且难度较大。

(2) 它们都是伴随 20 世纪 60 年代开始的新技术革命而发展形成的学科分支。由于问题的难度较大,在研究和解决问题时采用了许多新知识和新手段。这方面,应特别指出如下两点:①计算机及数值分析方法的应用,使得过去不能求解的问题可以得到满足工程要求的数值解答;②新的测试设备和测试方法的采用,由计算机控制的数字采集系统及数据处理系统为动态地记录、处理试验资料和显示试验结果提供了可能。

(3) 由于岩土地震工程和工程振动分别是岩土工程与地震工程和工程振动交叉形成

的学科分支,对于研究和解决这两个学科分支的问题,一般从事岩土工程的人员往往缺乏地震工程及工程振动的知识,而一般从事地震工程及工程振动的人员又往往缺乏岩土工程的知识。因此,专门从事岩土地震工程及工程振动的人员比较少,它们是广大工程技术人员不很了解的较陌生的学科分支。

(4) 它们所研究的内容广泛,甚至可以说有些庞杂,而且所涉及的学科也很多,这一点从上述这两个学科分支所要研究的问题就可以看出来。因此,广泛深厚的基础理论和全面系统的专业知识是研究和解决岩土地震工程及工程振动问题的基础。

(5) 从前述可以看出,岩土地震工程及工程振动所涉及的主要力学介质和工程材料是土。土是由土颗粒排列形成的骨架、孔隙及孔隙中的流体组成的,它的组成决定了土的结构在动荷载作用下容易受到破坏。土的工作状态与其结构破坏的程度有关,而土的结构破坏程度则与其受力水平有关。因此,通常要将岩土地震工程及工程振动问题作为一个非线性问题来研究。当把它们作为一个非线性问题时,不可避免地要涉及如下两个问题:①土的动力学计算模型;②土体的动力非线性分析方法。这些正是解决岩土地震工程及工程振动问题的难点之一。

(6) 前面已经指出,岩土地震工程及工程振动所研究对象的主体是土体。由此,如下两个问题必须予以考虑:①土体是由物理力学性质不同的土层组成的,在建立分析体系模型时必须把土体视为非均匀体;②由于所要考虑的土体尺寸很大,相应的分析体系的规模庞大,使数值分析的计算工作量很大。这两点也给岩土地震工程及工程振动问题的解决带来了一定的困难和麻烦。

(7) 在许多情况下,在土体之上、之侧或之内建有结构,因此岩土地震工程及工程振动问题往往是一个动荷载作用下的土-结构相互作用的问题。动荷载作用或是通过土体传给结构,或是通过结构传给土体,在这种情况下,在动荷载作用下土体-结构体系的性能取决于土体-结构体系的质量和刚度的分布。这样,分析体系的规模更为庞大,而且往往是一个三维问题。由于土体和结构之间存在相互作用,在研究和解决这样的问题时,应关注整个土体-结构体系在动荷载作用下的性能,而不只是土体部分或结构部分的性能。这样,所建立的分析体系的质量和刚度分布必须与实际土体-结构体系的相符合,而不只是与土体部分或结构部分的刚度和质量的分布相符合。

(8) 岩土地震工程及工程振动与环境有密切关系。首先,动荷载本身就是一种工程环境,动荷载作用引起的振动以波的形式通过土体传播,对周围环境产生影响。如果其影响超过防护或保护标准,反过来将对工程产生制约,必须采用工程措施减少对周围环境的影响。因此,很多岩土地震工程及工程振动问题就是由环境保护提出来的。在解决岩土地震工程及工程振动问题时,不仅应满足自身变形及稳定性要求,还要满足环境保护的要求。

1.4 研究途径

和任何工程学科一样,岩土地震工程及工程振动也必须采取试验、理论分析和工程实践经验相结合的研究途径。这是由所研究问题的复杂性决定的,无论采用哪种单一的手

段都不会使问题得以恰当的解决。在此,只结合这两学科分支的特点讲述一下每种研究手段的作用及它们之间的关系。

1. 勘察及试验

由于这两个学科分支所研究的问题都与岩土工程有关,因此勘察及试验是必不可少的研究手段。勘察与试验的重要性在于为岩土地震工程及工程振动问题的研究提供必需的基础资料。由于土的多样性及土层分布的局部性,每个问题的土层条件都不相同,都应进行必要的勘察及试验。

1) 勘察

对于每个问题,勘察的工作内容不尽相同,但至少应包括如下两项工作。

(1) 查清所研究问题的土类、土层的组成,沿深度及水平方向的分布,以及地下水位等。这些是建立分析体系所必需的基础资料。

(2) 采取土样,为室内土的物理力学性能试验提供必需的试件。

2) 试验

试验包括室内试验和现场试验。室内试验可分为土性试验及模型试验,现场试验可分为原位土性试验及现场荷载试验。

(1) 室内土性试验及原位土性试验的主要工作内容是测试土的变形、强度及耗能性能。测试资料的用处是多方面的,特别值得指出的是,这些资料是研究或选择土动力学模型及确定模型参数所必需的依据。

(2) 室内模型试验及现场荷载试验的作用可以归纳为如下两点:①了解所研究体系的工作机制、破坏过程及形式,为理论分析引进必要的假定和对分析体系做必要的简化提供依据;②有些试验,特别是现场荷载试验,可以直接测试所研究体系的变形、承载和耗能特性,所确定的刚度和承载力可用于实际工程的计算。

2. 理论分析

理论分析是岩土地震工程及工程振动研究的重要手段,理论分析的结果是评估在动荷载作用下分析体系自身性能及其对周围环境影响的重要依据。由于问题的复杂性,数值模拟分析方法被广泛采用,其优点是假定和简化相对较少。尽管如此,在土的动力学模型及分析体系方面仍需做一些必要的假定及简化。

无论采用哪种分析方法,都要涉及如下一些方面:①土及结构材料动力学模型的建立及其参数的确定;②分析体系的建立;③求解方程式的建立;④求解的初始条件及边界条件的确定;⑤方程式的求解方法;⑥影响因素的研究;⑦分析结果及评估。

分析结果的评估是指对结果的正确性和可靠性做出评估,这是应用分析结果时最为关心的问题。毫无疑问,分析结果的正确性和可靠性主要取决于分析所采用的基础资料和分析方法的正确性和可靠性,即取决于上述的前五个方面。必须指出,有一个好的分析方法但没有做好基础资料工作,也不会给出正确和可靠的结果。在解决岩土地震工程及工程振动实际问题时,基础资料工作必须予以足够的重视。

评估理论分析结果的方法一般是将理论分析结果与相应的室内模型试验或现场荷载

试验的测试结果,或实际工程观测结果相比较。但应指出,这种比较是为了评估所采用的整个理论分析途径,而不是只为了评估其中的求解方法。由于在整个理论分析途径中,特别是在基础资料工作中,包含许多不确定性,可以预料理论分析结果与试验测试结果或实际工程观测结果的误差可能较大。像一般岩土工程问题那样,20%~30%的误差是可以接受的,如果误差只有百分之几,反而被怀疑了。

如前所述,由于问题的复杂性,理论分析通常采用数值模拟分析方法。现在有许多通用商业计算程序可资利用,这些程序只是提供了一个计算手段,正确恰当地使用这个手段则是一项非常重要的事情。任何一个通用商业计算程序,一般来说,使用者是不能改变的。使用者所能做的事情是模拟,包括土力学性能、分析体系、边界条件,以及荷载过程等方面的模拟。显然,做好上述诸方面的模拟是提高理论分析结果正确性和可靠性的重要手段。

特别应指出,在使用一个通用商业计算程序时,必须很好地了解该程序的功能,特别是在模拟方面的功能。所谓的通用程序,都有其局限性;由于一些岩土地震工程及工程振动问题的特殊性,所选用的通用商业程序也可能满足不了某些模拟方面的要求。在这种情况下,应对所选用的通用商业计算程序进行二次开发或扩充,但在二次开发和扩充时应注意不要破坏程序原来的功能。

数值模拟分析的一个重要缺点是不便于工程应用,特别是为一般工程师所不熟悉。在岩土地震工程和工程振动的理论研究中,发展便于工程应用的简化分析方法是一个重要的课题。一个具有工程实用价值的简化分析方法必须建立在如下基础之上。

(1) 合理的假定,使问题得以简化。

(2) 合理的简单的理论框架,以建立一个定性的计算公式。

(3) 进行充分的参数研究,以定量地确定简化计算公式中的参数。通常,参数研究由数值模拟分析或其他复杂的分析完成。

在此应指出,虽然有些研究者在这方面做了很好的工作,但由于岩土地震工程及工程振动问题的复杂性,并不是所有的问题都能建立简化分析方法。

此外,寻求精确的闭合形式的解答也是理论分析的一个重要课题。然而,目前只对某些边界条件简单的均质线弹性问题获得了解答。实际的岩土地震工程及工程振动问题一般是非均质非线性的问题,而且边界条件也很复杂,很难求得精确的闭合形式的解答。尽管如此,寻求理想情况下的简单问题的精确闭合形式的解答仍有其意义。借助求得的闭合形式的解答可以定性地研究参数的影响,并且研究得到的规律有助于定性地解释在岩土地震工程和工程振动问题中所观察的一些重要现象,深化对所研究问题的认识和理解。

3. 工程实践经验

与任何工程问题一样,总结工程实践经验也是岩土地震工程和工程振动研究的重要手段。工程实践经验的重要性体现在如下方面。

(1) 总结工程实践经验可对所研究的问题在工作机制、破坏过程以及破坏形式等方面获得定性的认识,为引进假定简化问题提供依据。

(2) 总结工程实践经验在某些情况下还可对所研究的问题获得定量的认识,并建立