

土的动力特性及应用

TU DE DONGLI TEXING JI YINGYONG

白 冰 编著

中国建筑工程出版社

责任编辑：杨 允 王 梅
封面设计：[设计]



建工出版社微信



经销单位：各地新华书店、建筑书店

网络销售：本社网址 <http://www.cabp.com.cn>

中国建筑出版在线 <http://www.cabplink.com>

中国建筑书店 <http://www.china-building.com.cn>

本社淘宝天猫商城 <http://zgjzgycbs.tmall.com>

博库书城 <http://www.bookuu.com>

图书销售分类：建筑结构与岩土工程 (S20)

ISBN 978-7-112-18178-0



(27404) 定价：45.00 元

土的动力特性及应用

白 冰 编著

中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

土的动力特性及应用/白冰编著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2015.9

ISBN 978-7-112-18178-0

I. ①土… II. ①白… III. ①土动力学-研究 IV. ①TU435

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 123169 号

土的动力特性是岩土工程领域的一个重要的研究方向。本书结合编著者的研究和教学实践,并参阅了大量的国内外有关文献,对土的动力特性及其应用进行了较为全面的介绍和阐述,同时也介绍了近年来国内外的一些重要研究成果。

全书共分9章,具体内容如下:绪论、典型动力荷载作用下土中应力状态的特点、土介质中波的传播、土的动应力-应变关系及其描述、土的动剪切模量和阻尼比、动力荷载作用下黏性土的变形和强度、动力荷载作用下黏性土的固结特征、饱和土的地震液化及其判别、土的动力特性测试技术及进展。

本书力图提供一本便于土动力学基本特性学习和研究的较为全面的参考书,可以作为岩土工程等专业研究生土动力学方面的教材,也可供土木、建筑、水利、交通等部门的勘察、设计、施工及科研人员和高等学校有关专业师生参考。

责任编辑:杨 允 王 梅

责任设计:张 虹

责任校对:李美娜 姜小莲

土的动力特性及应用

白 冰 编著

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京科地亚盟排版公司制版

北京建筑工业印刷厂印刷

*

开本:787×1092 毫米 1/16 印张:17 $\frac{3}{4}$ 字数:343 千字

2016年1月第一版 2016年1月第一次印刷

定价:45.00 元

ISBN 978-7-112-18178-0

(27404)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题,可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

土的动力特性的研究是岩土工程学科的一个重要的分支学科。随着我国经济的高速发展、超高层建筑的兴起和城市人口的大量集中以及大型输油管道、天然气管道、超高压电力设备、隧道工程等重要生命线工程的建设和完成,地震造成的灾害显得更为突出。因此抗震及防灾减灾问题将成为地震工程学以及岩土工程学等领域大力开展的研究方向。不但如此,地基土在高速铁路荷载、交通荷载、波浪荷载等其他动力荷载作用下的变形及强度问题也逐渐得到重视,获得了大量的研究成果。本书结合编著者的研究和教学实践,并参阅了大量的国内外有关文献,对土的动力特性研究的一些基本问题进行了介绍和阐述,同时也尽量反映近年来国内外的一些重要研究成果。

本书内容丰富,除涉及了大量的土的动力特性的试验研究成果外,还特别强调其实用性和可读性,力图提供一本便于土动力学基本特性研究和教学的较为全面且简明扼要的参考书。

全书共分9章,具体内容如下:第1章为绪论,主要对土的动力特性研究的意义、特点和方法进行了简单的概述,也介绍了土动力学数值计算的基本方法,希望给读者提供一个较为全面的研究框架;第2章介绍地震作用、交通荷载和波浪荷载等典型动力荷载作用下应力状态和应力路径的特点;第3章介绍弹性介质中以及饱和多孔介质中波的传播理论,给出几种典型波的传播形式和特点;第4章主要介绍土的动应力-应变关系及其描述方法,包括基本特点、动剪切模量和阻尼比的基本概念、影响因素及其变化机理;第5章介绍土的动剪切模量和阻尼比的变化规律,主要根据大量室内外试验资料对各种土类的初始剪切模量的变化特征及剪切模量和阻尼比随剪切应变变化的规律进行阐述,特别强调了土体的扰动对其动力特性参数的影响;第6章介绍动力荷载作用下黏性土的变形和强度,分析了瞬态荷载以及循环荷载作用下黏性土的变形机理及其刚度的衰减特征,简述了黏性土动强度的定义及不同荷载形式作用下土的强度特征,此外还讨论了循环荷载作用下黏性土的破坏准则;第7章介绍动力荷载作用下黏性土的固结特征及其影响效应,对周期荷载作用下软黏土的变形和孔压特征、软黏土永久变形计算方法进行介绍,此外还结合编著者的研究成果,就冲击荷载作用下饱和软黏土的性状及其再固结特性进行讨论;第8章介绍砂性土的地震液化问题,包括砂土振动液化的概念、机理和判别、地震液化分析的总应力法及可液化地基加固的基

本思路；第9章介绍土的动力特性测试技术的基本方法及近年来的一些进展，为土的动力特性的研究提供了必要的基础。

本书由北京交通大学白冰教授编著。自2003年以来，本书初稿作为北京交通大学岩土工程专业、隧道与地下工程专业以及道路与铁道工程专业硕士和博士研究生土动力学课程教学的主要内容已讲授过多遍，历经12载，并在教学过程中不断加以完善。

本书的编写和出版得到国家重点基础研究发展计划（973计划）项目“高水压越江海长大盾构隧道工程安全的基础研究”（编号2015CB057800）的资助。部分书稿承蒙北京交通大学赵成刚教授和北京建筑大学戚承志教授审阅，张鸿儒教授、袁大军教授、陈文化教授、李涛教授、齐吉琳教授和李伟华教授也提出不少宝贵意见和建议，作者在此表示衷心感谢。还要感谢北京交通大学土木建筑工程学院的资助和杨庆山教授的大力支持。此外，本书引用了国内外许多学者的研究成果和资料，在此一并表示诚挚的谢意。

感谢我的博士生郭志光、许韬和研究生杨光昌、翟振乾、王加庆等在本书出版过程中所做的部分绘图和校对工作，也特别感谢本书编辑杨允所做的辛勤劳动。

编著者



2015年5月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 土动力特性研究的意义	1
1.1.1 地震危害	1
1.1.2 其他动力问题	2
1.2 土动力特性研究的特点及其方法	2
1.2.1 研究历程	2
1.2.2 动力荷载的类型及动力特性研究的特点	4
1.2.3 土的动力特性测试技术	6
1.3 土的动力本构模型和数值计算	7
1.4 随机振动理论及地震振动系统的可靠性	9
第 2 章 典型动力荷载作用下土中应力状态的特点	12
2.1 概述	12
2.2 地震荷载作用下循环应力的特点	12
2.3 交通荷载作用下循环应力的特点	17
2.4 波浪荷载作用下循环应力的特点	20
2.5 冲击荷载作用下土中应力的特点	22
参考文献	26
第 3 章 土介质中波的传播	28
3.1 概述	28
3.2 三维弹性介质中波的传播	28
3.2.1 弹性介质中的运动方程	28
3.2.2 应力波方程及波的种类	32
3.2.3 球形空腔及柱形空腔内表面作用波动力的情况	34
3.3 半无限弹性介质中波的传播	39
3.3.1 平面简谐波的传播特征	39
3.3.2 半无限空间中平面波的传播	41
3.4 土介质中波传播的几种典型情况	47
3.4.1 成层土中波的反射和折射	47
3.4.2 黏弹性介质中波的传播	48

3.5 饱和多孔介质中波的传播	49
3.5.1 动力控制方程	49
3.5.2 饱和土中波的传播速度	51
3.5.3 饱和土中的瑞利波	53
参考文献	55
第4章 土的动应力-应变关系及其描述	56
4.1 概述	56
4.2 土的动应力-应变关系的基本特点	57
4.2.1 土的动应力-应变关系的特点	57
4.2.2 动剪切模量和阻尼比的基本概念	58
4.2.3 骨架曲线的描述	59
4.2.4 滞回曲线的描述	60
4.3 应力-应变关系的力学模型	67
4.3.1 基本力学模型	67
4.3.2 组合模型简介	69
4.4 土的黏弹性线性动力模型	73
4.4.1 黏弹性模型的一般形式	73
4.4.2 黏弹性线性动力模型	74
4.5 土的黏弹性非线性动力模型	76
4.5.1 双线性模型	76
4.5.2 Ramberg-Osgood 模型	77
4.5.3 Hardin-Drnevich 模型	79
4.6 土的弹塑性模型简介	81
参考文献	86
第5章 土的动剪切模量和阻尼比	88
5.1 概述	88
5.2 剪切模量和阻尼比变化规律	88
5.2.1 砂性土的剪切模量和阻尼比	88
5.2.2 黏性土的剪切模量和阻尼比	95
5.2.3 粗砾料的剪切模量和阻尼比	102
5.3 初始剪切模量的时间效应及其估算	109
5.4 现场条件下剪切模量和阻尼比的确定	111
5.4.1 现场初始剪切模量的测定及其特点	112
5.4.2 标准贯入试验确定初始剪切模量	114
5.4.3 现场条件下剪切模量和阻尼比演化过程的估算	115

5.5 塑性指数对剪切模量和阻尼比特征的影响	118
5.5.1 动剪切模量和阻尼比随塑性指数的变化规律	118
5.5.2 塑性指数对阻尼比影响机理分析	121
5.5.3 用塑性指数描述土的动本构参数	122
参考文献	122
第6章 动力荷载作用下黏性土的变形和强度	126
6.1 概述	126
6.2 室内试验时动力荷载的施加方式	126
6.3 瞬态荷载作用下黏性土的变形和强度	128
6.3.1 瞬态荷载作用下土的变形特征	128
6.3.2 瞬态荷载作用下土的强度特征	131
6.4 循环荷载作用下黏性土的变形及刚度衰减特征	132
6.4.1 循环荷载作用下黏性土的变形特征和刚度衰减	132
6.4.2 循环荷载作用下刚度衰减的估算	134
6.4.3 循环荷载作用下刚度衰减的门槛值	137
6.5 黏性土的动强度及其变化规律	138
6.5.1 黏性土动强度的定义及特征	138
6.5.2 静荷载和动荷载综合作用下的强度特性	140
6.5.3 黏性土动强度的影响因素	142
6.5.4 不规则地震波作用下黏性土的强度特征	145
6.6 循环荷载作用下黏性土的破坏准则	147
参考文献	149
第7章 动力荷载作用下黏性土的固结特征	152
7.1 概述	152
7.2 周期荷载作用对黏性土力学特性的影响	153
7.2.1 周期荷载作用下黏性土变形和孔压的影响因素	153
7.2.2 周期荷载作用历史对黏性土性状的影响	154
7.3 周期荷载作用下黏性土孔压和变形计算模型	156
7.3.1 黏性土孔压计算模式	156
7.3.2 黏性土残余变形计算模式	159
7.3.3 黏性土残余变形计算方法	160
7.4 冲击荷载作用下饱和软黏土的再固结性状	162
7.4.1 饱和软黏土的再固结性状	162
7.4.2 冲击荷载作用下软黏土变形估算	169
7.4.3 冲击荷载作用下软黏土强度估算	172

7.5 周期荷载作用下饱和黏性土的固结理论	180
参考文献	182
第8章 饱和土的地震液化及其判别	187
8.1 概述	187
8.2 砂土振动液化的概念及机理	188
8.2.1 地震液化的概念	188
8.2.2 地震液化的影响因素	189
8.2.3 地震液化机理的进一步研究	193
8.3 动力荷载作用下砂土的孔隙水压力及计算模式	195
8.3.1 动荷载作用下的孔隙水压力及固结特征	195
8.3.2 孔隙水压力发展的几个模型	197
8.4 地震液化研究途径及分析方法	203
8.5 地震液化分析的总应力法	205
8.5.1 剪应力对比法	206
8.5.2 Seed 的简化法	208
8.5.3 二维及三维总应力法	212
8.6 现场原位测试方法判别砂土的液化	214
8.6.1 标准贯入试验	214
8.6.2 静力触探试验	215
8.6.3 剪切波速法	216
8.7 液化地基土的加固措施及理论	217
8.7.1 液化地基土的加固措施	217
8.7.2 碎石桩加固地基后的抗液化性能分析	218
参考文献	220
第9章 土的动力特性测试技术及进展	224
9.1 概述	224
9.2 室内动力特性试验的一般原理和技术	225
9.2.1 动力特性试验的一般原理	225
9.2.2 试验荷载施加方式	228
9.2.3 振动量测系统	231
9.2.4 土样剪切波速的测定	235
9.3 循环三轴剪切试验	238
9.3.1 循环三轴剪切试验原理	238
9.3.2 循环三轴试验方法	241
9.3.3 循环三轴剪切试验仪的类型和发展	244

9.4 循环单剪试验	246
9.5 周期扭转剪切试验	247
9.6 共振柱试验	249
9.6.1 一端固定一端自由的共振柱试验	249
9.6.2 一端固定一端有约束的共振柱试验	252
9.7 振动台和动力离心模型试验	254
9.7.1 振动台试验	254
9.7.2 离心模型试验	256
9.8 地基刚度系数和阻尼比测试	257
9.8.1 强迫振动试验	257
9.8.2 自由振动试验	262
9.9 原位动力测试技术简介	263
9.9.1 循环荷载板试验	263
9.9.2 现场剪切波速的测定	264
9.9.3 表面波法测定地层的剪切波速	267
9.9.4 反射波法和折射波法测定地层的剪切波速	269
参考文献	270

第 1 章 绪 论

1.1 土动力特性研究的意义

1.1.1 地震危害

20 世纪 60 年代以来,世界范围内地震活动频繁,特别是 1964 年日本新泻地震、美国阿拉斯加地震引起的饱和砂土液化和地基失效造成结构的大规模破坏极大地推动了人们对土体地震失稳破坏的认识。地震作用释放出的巨大能量不但直接造成建筑物及设施的大量破坏,而且其次生灾害造成的损失也十分巨大。例如,1906 年美国旧金山大地震、1923 年日本关东大地震、1960 年智利南部地震、1964 年美国阿拉斯加大地震、1968 年日本十胜冲大地震、1976 年中国唐山大地震、1989 年美国洛马普里埃塔地震、1994 年美国诺斯雷齐地震、1995 年日本阪神大地震、2010 年海地太子港地震、2010 年智利圣地亚哥西地震、2011 年日本福岛大地震等均给人类造成了巨大的灾难。

1995 年 1 月 17 日日本阪神大地震(兵库县南部地震)中,仅仅只有 20 几秒的地面振动,却给神户市带来了毁灭性的灾难。地震导致新干线、高速公路、高架铁路、地铁、桥梁等大量倒塌或倾斜;煤气、水、电、电话等生命线严重破坏;高层及中高层建筑物底部或中部被剪断;大量的木质结构住宅遭到破坏;港口码头仓库发生下沉或倾斜,大面积土地发生侧向流动、砂土液化。此外,地震还导致 500 余次大火,造成易燃气体泄漏等大量次生灾害。2010 年智利圣地亚哥西 8.8 级大地震引发的海啸波及日本、中国台湾等。2011 年日本福岛 9.0 级大地震被认为是 1923 年关东大地震以来最严重的地震之一,所引发的海啸造成福岛核电站泄漏,引起严重环境灾难。

由于我国地处环太平洋地震带和喜马拉雅-地中海地震带之间,历史上是一个多地震的国家。20 世纪以来,已多次发生过强烈地震,如唐山地震、海城地震、邢台地震、营口地震、云南武定地震和云南丽山地震等,造成了重大的生命和财产损失。近年来,我国大陆发生的地震有增多的趋势,例如 2008 年 5 月发生在四川的汶川大地震震级达 8.0 级、2010 年 4 月发生在青海的玉树大地震震级达 7.1 级,以及 2014 年 8 月云南昭通市鲁甸县地震。这类地震具有强度大、频率高、震源浅的特点,破坏性也非常大。目前,随着我国经济的

高速发展、超高层建筑的兴起和城市人口的大量集中以及大型输油管道、天然气管道、超高压电力设备等重要生命线的建设和完成,地震造成的灾害显得更为突出,因此抗震防灾减灾问题将成为地震工程学以及岩土工程学等领域大力开展的研究课题。

1.1.2 其他动力问题

除地震作用下土及土-结构物动力特性的研究之外,地基土在其他动力荷载作用下的强度及变形问题也是一个重要的研究课题,例如机器基础的振动、近海结构物在波浪荷载作用下的动力响应分析;输电线路基础、高层建筑物基础、大型桥梁基础在风荷载作用下的稳定问题;软基上路堤在交通荷载作用下的变形和稳定问题;城市轨道交通及高速列车荷载运行条件下对周边地基土和建筑物的振动影响及其环境评价;振动打桩等施工对周边环境的影响;油罐地基在充水、排水的反复加卸荷作用下的稳定和变形问题等。此外,在爆炸冲击荷载作用下防护工程的安全性问题或利用这类荷载来作为地基加固处理手段等问题也是近年来研究的热点课题。

目前,利用大规模数值计算分析复杂地基系统动力相互作用问题(如深水长大盾构隧道与地基作用)已成为一个热点课题,此时需要考虑岩土-结构界面接触状态、衬砌结构类型等对水下隧道结构非线性地震响应的影响规律,并最终建立复杂地层中深水长大隧道抗震性能设计理论和评价方法。

可见,现阶段对土在各种动力荷载作用下力学性状的研究具有十分重要的学术意义和工程意义。

1.2 土动力特性研究的特点及其方法

1.2.1 研究历程

动力荷载作用下岩土介质力学特性的研究由来已久,早期的研究主要集中在爆炸冲击荷载、地震作用、基础的振动等方面,大致分为下面几个阶段。

20 世纪 30 年代前后,日本、德国、苏联开展了机器基础振动设计方面的系统研究。

20 世纪 40 年代后期,以核能爆炸冲击荷载作用下巴拿马运河边坡稳定和安全为工程背景,哈佛大学 Casagrande 等对冲击荷载作用下土的动力特性进行了大量的试验研究和理论分析,积累了丰富的资料,并重点讨论了加荷时间对土动力强度的影响;麻省理工学院 Taylor 和 Whitman 则研制了一种可以控制不同轴向应变速率的高速加荷试验机和相应的量测系统,并重点研究了应变速率对土强度的影响。

20 世纪 60 年代,对地震作用下地基土和结构稳定的研究得到重视,发展为土动力学的一个重要组成部分。关于砂土液化,Casagrande 曾试图用临界孔隙比的概念解释砂土的液化现象;后来 Seed 和 Lee 以孔压值作为判断砂土是否发生液化的依据,并提出其后被广泛引用的“初始液化”的概念;后来,Casagrande 重新调整了以前提出的“临界孔隙比”的概念和试验方法,提出“流动结构”的概念。我国学者黄文熙、汪闻韶早期对土的动力强度和液化特性进行了系统而深入的研究。近年来,我国学者在土石坝、挡土结构物、地下结构物、地铁和隧道、高层建筑物的抗震稳定方面取得了大量的研究成果。结合上海地铁建设的需要,周健等(2000)对地震作用下深厚软土地区的动力响应及地铁车站结构的抗震稳定性进行了研究,考虑了软土地层内孔隙水压力增长和消散的影响,取得了一些有价值的研究成果。

20 世纪 70 年代,随着近海重力式石油平台的大量兴建,研究者的注意力集中在波浪等周期荷载作用下砂土液化的可能性和液化强度等问题,后来又注意到了孔隙水压力消散的影响,如 Lee (1975)、Seed 等 (1977) 的成果。另一方面,周期荷载作用下黏性土性状的研究也取得较多的成果,Andersen 等 (1980) 应北海重力式石油平台建设的需要曾对 Drammen 黏土进行了系统而广泛的研究,分析了诸如试验方式、剪应力幅值、超固结比等因素的影响,而 Matsui (1980) 的研究则较多地关注了孔隙水压力的发展变化,分析了残余孔压与剪应变之间的相互关系以及循环荷载作用历史对剪切特性的影响。Baligh (1978) 曾给出一个较为完善的循环荷载作用下的固结理论。

低路堤在交通荷载作用下的变形特性也早已引起人们的重视。较早的如 Seed (1958) 及其同事们的工作,后来 Kawakami 和 Ogawa (1965)、Yamanouchi 和 Aoto (1969) 以及 Luo 等 (1973) 也继续了这项工作。进入 20 世纪 80 年代,这项工作进一步深入,Yasuhara 等 (1983) 提出了一个排水循环荷载作用下土体变形的近似预测方法,Fujiwara (1985) 的研究则集中在排水条件下考虑固结影响的变形计算。

20 世纪 90 年代以来,动力固结法加固不良地基及饱和软土地基的机理研究在我国得到较大的重视,为此开展了一定的冲击荷载作用下砂性土、黄土及饱和软黏土的室内外试验研究和理论分析(白冰等,1998),从而拓宽了土的动力特性研究的范畴。

在以往的地震反应分析及相关理论中,一般认为地震作用主要以水平剪切为主,并将水平面近似作为最大剪应力的作用面,地震产生的破坏就是在这些水平动剪应力作用下产生的。然而,日本阪神等地震表明,竖向地震波作用产生的破坏也是相当大的,许多结构的破坏是由于纵向地震波作用引起的。例如 1995 年 1 月 17 日发生的日本阪神大地震中,地震对开挖式施工的地铁工程就造成了严重

的震害，其原因是柱子被压碎而造成地面塌陷引起的。可见，在以往的抗震设计中，只考虑水平剪切的作用对工程抗震设计可能是不够安全的，这一方面已引起学者们的重视。

进入 21 世纪，针对深水盾构隧道地基场地的特点，建立能够考虑地震波速率和循环效应及高水压作用下土体力学特性的弹塑性本构模型以及在考虑液-固-气三相耦合的基础上多相多孔岩土介质的非线性波动规律，最终揭示地震作用下深水层与地基土体动力相互作用的机理研究已得到重视。

1.2.2 动力荷载的类型及动力特性研究的特点

1. 动力荷载的类型

土的动力特性是指由随时间不断变化的外力（即动力荷载）而引起的土的力学响应和现象，它与静力荷载作用下土的特性有显著差异。动力荷载的主要特征一般包括振动幅值、振动频率、持续时间和波形等几个方面，并可大致分为下面的几种类型：

（1）冲击荷载。冲击荷载是一种作用时间短而强度较大的单调脉冲荷载，作用力上升很快，作用时间大致为 $10^{-3} \sim 10^{-2}$ s。强夯荷载即是一种典型的形式（图 1.1a）。

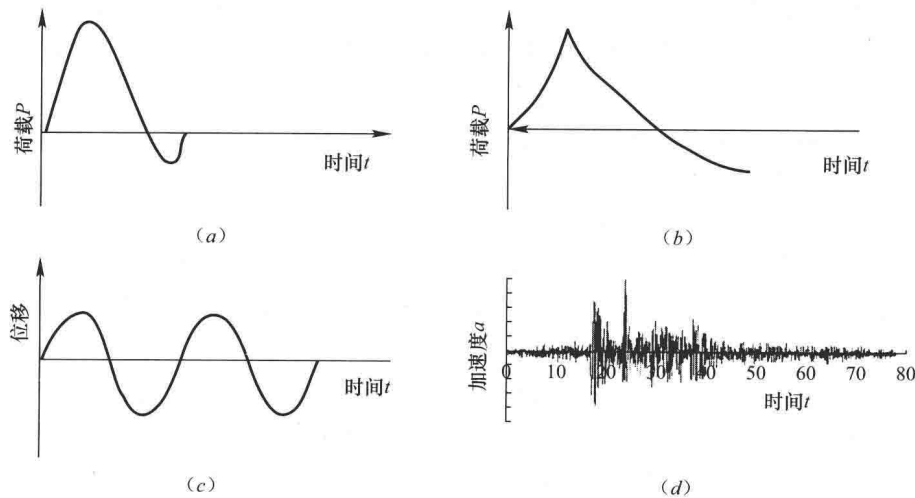


图 1.1 动力荷载的类型

(a) 冲击荷载；(b) 爆炸荷载；(c) 周期荷载；(d) 地震荷载

（2）爆炸荷载。爆炸荷载实际上也是一种冲击型作用形式（图 1.1b）。它可在 2~4ms 之间上升到峰值，然后很快衰减并可能会出现负值。

（3）周期荷载。由周期作用的外力或振动机械产生的往复循环的荷载

(图 1.1c), 其振动周期和振动幅值可以是已知的, 其应变值较小 (如 10^{-5}) 而往返次数较大。作用频率随荷载的特点而有较大差异, 一般为 $10\sim 60\text{Hz}$, 作用时间较长。动力机器基础的振动、振动打桩、施工压密、交通荷载、波浪荷载等均是其中典型的形式。

(4) 地震荷载。地震荷载是由地层深处产生的一种无规律的往复作用的荷载形式 (图 1.1d), 其作用周期和振动幅值不断变化。每一个脉冲周期约为 $0.1\sim 3.0\text{ms}$, 荷载持续时间一般在 $0.02\sim 1.0\text{s}$ 。

由于不同动力荷载类型的变化规律及应力量级不同, 在土中产生的应变值级及发展规律也有很大差别。对于冲击荷载或爆炸荷载而言, 根据脉冲能量的大小及传递距离的差异, 土体可能处于弹性、弹塑性或塑性范围。而对于地震荷载而言, 根据震级的不同, 土体也可能处于弹性、弹塑性或塑性范围。因此, 土的动力特性的研究所包含的内容十分广泛和复杂, 必须根据不同的动力荷载的特点采取不同的分析方法, 尽可能模拟动力荷载的实际情况, 在有关的计算中也应采用不同的计算理论和模型。

2. 研究内容和特点

近年来, 各国学者从不同的领域和方向对土的动力特性进行了深入研究。这些研究的主要内容包括: 土的动力特性和本构关系; 地震液化势与地面破坏; 动土压力和挡土结构的抗震设计; 土-结构动力相互作用; 土坡和土坝的抗震稳定性; 周期或瞬态荷载作用下土的变形和强度问题等方面。

其中, 土的动力变形和强度特性及其应力-应变本构关系的描述是土动力学研究的基本问题, 也是分析土体动力失稳过程等一系列特性的依据。骨架曲线与滞回曲线共同反映了土体应力-应变全过程, 其中骨架曲线表示最大剪应力与最大剪应变之间的关系, 反映了动应力-应变的非线性, 而滞回曲线则表示某一点应力循环内各时刻剪应力与剪应变之间的关系, 反映了应变对应力的滞后性。

实际应用中, 需要用某种数学或物理的模型来描述土在动荷载作用下的应力-应变关系。动剪切模量和阻尼比是两个很重要的表征土动力性质的参数。一般而言, 土在动力荷载作用下的变形特性受很多因素影响, 当应变值很小时 (如小于 10^{-4}), 可作为弹性变形问题来考虑, 常用弹性波速法或共振柱试验测定动剪切模量与阻尼比; 而当应变值较大时 (如大于 10^{-4}), 非线性变形性质将十分显著, 常用周期循环加载试验测定的应力-应变曲线来确定土的动力参数。

研究表明, 影响土的动剪切模量和阻尼比的主要因素有剪切应力幅值、平均有效应力、孔隙比、周期加载次数, 此外还有周期荷载的频率、饱和度、超固结比、土粒矿物成分、土的结构性等因素, 具体内容将在后面有关章节中进行详细的讨论。

事实上, 土的动力响应分析理论和计算方法是进行场地地震危险性评价及土

石坝、土坡乃至尾矿堆筑体和废弃物填埋体及其加固所采用的主要手段之一。土与结构的动力相互作用问题是地震工程中的一个重要方面。而且,由于这一问题涉及上部结构、下部地基及其组成材料和远场地面运动等多种因素,从而也是结构动力学和土动力学中最为复杂的课题之一,是土的动力特性研究的具体应用。

自1964年日本新潟地震和美国阿拉斯加地震以来,地基土的液化问题得到了日益重视。液化是造成场地地震损害的首要原因之一,地震引起的地基失事约50%起因于液化,并认为液化机理可以表现为砂沸、流滑和循环活动性三种形式。就无黏性土及黏粒含量较少的粉土而言,这种由固态向液态的转化是孔隙水压力增大而有效应力降低的结果。一般而言,影响地基土液化的因素可归结为土性条件、初始应力条件、动荷载条件、排水条件等,因此土的动力特性的研究也是液化机理研究及其液化灾害防治的前提。

1.2.3 土的动力特性测试技术

土动力特性测试技术是研究土的动力特性的必要手段,一般包括室内测试技术和现场测试技术两个方面,下面作简单概述。

室内测试技术包括:

(1) 循环三轴试验。利用与静三轴试验相似的轴对称应力条件,通过对试样施加模拟的动应力,同时测定试样在动荷载作用下所表现出的动态响应,从而给出岩土材料的动力参数以及试样在模拟某种实际振动条件的动应力作用下所表现的性状。

(2) 振动剪切试验。一般认为,地震作用引起地基土的动力变形主要是由于从下卧层向上传播的剪切波引起的。为了模拟这种动力条件,20世纪70年代以来相继出现了振动单剪仪和振动扭剪仪。

(3) 共振柱试验。根据共振原理在对圆柱形试样施加激振,改变激振频率使试样产生共振,并借此推求试样动弹性模量及阻尼比等参数。共振柱试验是无损试验技术,其优越性表现在试验可逆、可重复,从而可以得到稳定的测试数据。

(4) 振动台试验。振动台试验是20世纪70年代发展起来的大型室内动力试验装置,最初用来研究土层的液化性状。它可以模拟现场侧限条件的大型均匀试样,也可以模拟地层受剪切波作用的现场动应力条件,并可直接观测土的孔隙水压力及振动变形情况。

(5) 离心模型试验。采用模型试验方法,将原型岩土体的尺寸按一定几何比例缩小,再对其按所要求的相似条件选定材料。施加模拟的荷载,并测定出应力、应变及孔压等特征,最后再反算到原型土体。需要指出,要寻找能够完全满足各种相似条件的材料往往是很困难的,而如果选用与原型相同的材料,又会歪曲原型的实际性状,从而成为动力离心模型试验的一个难点课题。