

吴世明 等编著

土动力学

中国建筑工业出版社

土 动 力 学

吴世明 等编著

中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

土动力学/吴世明等编著. —北京: 中国建筑工业出版社,
2000
ISBN 7-112-04488-X

I. 土... II. 吴... III. 土动力学 IV. TU435

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 59118 号

本书系统地介绍了国内外在土动力学主要领域内的重要理论、测试技术和分析方法。

全书共十章。第一章绪论综述了有关土动力学问题的国内外研究现状,第二章和第三章论述了固体和饱和土中弹性波的传播特性,第四章介绍了动荷载作用下土的应力应变关系,第五章至第七章对土动力学常用的室内测试技术和原位测试技术作了全面的阐述,第八章和第九章论述了土工抗震理论与分析,其中包括土地震反应、变形和稳定分析以及饱和土的地震液化,第十章介绍了土与结构的动力相互作用。各章末附有参考文献,书末附有索引。

本书可作为岩土工程专业研究生教材,也可作为专业工程技术人员、科研人员和高年级本科学生的参考书。

土 动 力 学

吴世明 等编著

*

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)

新华书店经销

北京二二〇七工厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 20 $\frac{1}{4}$ 字数: 488 千字

2000 年 12 月第一版 2000 年 12 月第一次印刷

印数: 1—2000 册 定价: 48.00 元

ISBN 7-112-04488-X

TU·4016(9958)

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)

序

土动力学相对岩土工程其他分支,是一门比较年轻的学科,在中国发展起步稍晚,但从近 10 余年来所取得的成果以及在经济建设中所起的重大作用来看,也不亚于国际上经济发达国家。自 80 年代末成立中国振动学会土动力学专业委员会以来,在土动力特性、原位测试、土工建筑物抗震和动力基础等领域,活跃着老中青相结合的一大批科技工作者,他们将理论分析、试验研究与工程实践相结合,取得了一系列可喜的成绩,并与国际土动力学界进行了广泛的学术交流,为丰富土动力学理论与实践作出了贡献。

吴世明教授 80 年代初师从美国著名土动力学专家、美国国家工程院院士 F. E. Richart, Jr. 教授,从美国密执安大学获得博士学位后即回国从事岩土工程、土动力学教学与研究,培养了不少土动力学新秀,他的学术造诣在全国很有影响。自 1996 年以来,他主持全国土动力学专业委员会的工作,发挥他学术领导的才能。受土动力学专业委员会的委托编著《土动力学》一书,这是值得称道的,希望此书的出版能进一步促进我国土动力学的发展。

汪闻韶

中国科学院院士

中国振动工程学会

土动力学专业委员会名誉主任委员

2000 年 9 月 24 日于北京

前 言

1996年我受中国振动工程学会土动力学专业委员会委托编著《土动力学》一书,至今已四个年头,要编写一本既比较经典、可作为研究生教材,又要具有自身特色、且能反映当前本学科领域水平的书,实非易事。回想起20年前初次涉及土动力学情形,我受中国科学院派遣,1980年1月赴美国密执安大学(University of Michigan)。由于签证原因,我迟到了三个星期,到校注册当天,F. E. Richart, Jr. 教授就领我坐在他讲授的土动力学课堂里,当时我的土动力学知识几乎是一片空白,英文也不太好,一堂课下来没听懂多少。在美国四年寒窗,于1983年底获得博士学位,当年回国。1984年在浙江大学开设土动力学课,1986至1987年又去美国做博士后研究,之后组织课题组,从事土动力学研究,指导研究生,1998年12月移师同济大学,至今已有20余年,也算是土动力学领域一个半新不老的兵。为把这本书写好,我特地邀请了我的学生们:周健博士、教授(土的动力应力应变关系),陈云敏博士、教授(桩基的动力测试),夏唐代博士、教授(固体中的弹性波、饱和土中的弹性波),郑建国博士、教授级高级工程师(土动力特性室内试验),高广运博士、教授(土与基础的原位动力测试),于钢博士、研究员(土体与结构的动力相互作用)和黄茂松博士、教授(土体的地震反应、变形与稳定分析和饱和土的地震液化)参与有关章节的编写,最后由黄茂松博士协助统稿。本书在编写过程中力求系统、连贯,具有特色。在此对他们真诚的合作表示衷心的感谢。

由于水平有限,不足之处望能得到土动力学同仁的指正。转眼到了20世纪末,21世纪的曙光就在前头,希望在下一世纪我国土动力学有更新更大的进展。

吴世明

2000年9月19日于同济大学

目 录

序

前 言

第一章 绪 论	1
1.1 引言	1
1.2 土的动力特性	1
1.3 原位测试技术	3
1.4 室内测试技术	5
1.5 土与结构动力相互作用	6
1.6 土体的地震反应、变形与稳定分析	8
1.7 结束语	9
参考文献	9
第二章 固体中的弹性波	12
2.1 无限弹性体中波的传播	12
2.2 有限弹性体中波的传播	21
2.3 层状弹性体中平面波特性	33
参考文献	51
第三章 饱和土中的弹性波	54
3.1 饱和土中弹性波的基本方程	54
3.2 饱和土中的体波	56
3.3 饱和土中的瑞利波	59
3.4 饱和土的 Lamb 问题	70
参考文献	73
第四章 动荷载下土的应力应变关系	75
4.1 土的动应力应变关系特性	75
4.2 应力应变关系的力学模型	76
4.3 粘弹性模型	80
4.4 土的弹塑性应力应变关系	88
4.5 土的动孔隙水压力计算模式	102
4.6 结束语	106

参考文献	106
第五章 土动力特性室内试验	108
5.1 概述	108
5.2 激振与测振	111
5.3 动三轴试验	115
5.4 振动剪切试验	124
5.5 共振柱试验	127
5.6 振动台试验	132
参考文献	133
第六章 土与地基的原位动力测试	135
6.1 波速试验	135
6.2 地脉动试验	149
6.3 激振法试验	152
6.4 循环荷载板试验	157
6.5 静力触探试验(CPT)	158
6.6 标准贯入试验(SPT)	160
6.7 动力旁压试验	162
6.8 原型观测	164
6.9 振动衰减试验	165
6.10 小结	167
参考文献	168
第七章 桩基的动力测试	169
7.1 桩基动测概述	169
7.2 反射波法测试桩的完整性	172
7.3 稳态振动法测试桩的完整性	178
7.4 高应变法测试的基本原理	183
7.5 高应变法测试桩的承载力	191
参考文献	204
第八章 土体的地震反应、变形与稳定分析	206
8.1 地震的震级、烈度与基岩运动特征	206
8.2 水平土层地震反应简化分析方法	208
8.3 土坝地震反应分析的剪切楔法	212
8.4 地基地震稳定及震陷的简化分析方法	218
8.5 土坝地震稳定及变形的简化分析方法	224
8.6 挡土墙地震稳定及变形的简化分析方法	229
8.7 土体的地震反应、变形和液化分析的有限单元法	236
参考文献	243
第九章 饱和土的地震液化	250
9.1 影响土的液化势的主要因素	250
9.2 判断现场土液化的方法	256

9.3 地震的等效均匀应力循环次数的确定	263
9.4 饱和砂土地基的抗液化加固	264
参考文献	268
第十章 土体与结构的动力相互作用	271
10.1 概述	271
10.2 子结构法	272
10.3 有限元法	291
10.4 杂交法	305
参考文献	307
索 引	309

第一章 绪 论

1.1 引 言

土动力学是土力学的一个分支,是研究动荷载作用下土的变形和强度特性及土体稳定性的一门科学。作为一门发展中的科学,近年来,无论在对土的动力性质的认识还是在工程中的应用,都有新的发现和进展。计算技术和量测技术的发展,将土动力学的研究推向了一个崭新的阶段。这里将介绍土动力学的主要研究内容及其发展,包括土的动力特性、原位测试技术、室内测试技术、土与结构动力相互作用以及土体地震反应、变形与稳定分析五大部分。

1.2 土的动力特性

建筑物地基和土工建筑物在动荷载作用下发生振动,土的强度和变形特性都要受到影响,在不同动荷载下土的强度和变形各不相同,其共同特点是都将受到加荷速率和加荷次数的影响。

1.2.1 动荷载下土的应力-应变关系

动荷载下土的应力-应变关系是表征土动力学特性的基本关系,也是分析土体动力失稳过程一系列特性的重要基础。

土的动应力-应变关系的特征

循环荷载作用下土的应力-应变关系表现出非线性、滞后性和变形积累三方面的特征。骨干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;滞回曲线表示某一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,它们一起反映了应力-应变关系的全过程。

应力-应变关系的力学模型

土受力后的表现可以抽象出以下三个基本力学元件,即弹性元件、粘性元件和塑性元件,并且可用这三个元件的组合来近似地描述土的力学性能。弹性元件和塑性元件的应力-应变关系组合可得理想弹塑性模型。对于粘弹性模型,在土动力学中,只考虑滞后模型(Kelvin体)。另外还可组合成粘塑性模型(Bingham体)和双线性模型。

土动力本构关系的模型

(1)粘弹性模型:主要包括双直线模型、等效线性模型(Hardin-Drnevich模型)、Ram-

berg-Osgood模型。(2)弹塑性模型:大致可分为基于运动硬化准则的套叠屈服面模型(Mroz, 1967^[21]; Iwan, 1967^[22]; Prevost, 1977^[23]; Mroz等, 1978^[24])、边界面模型(Dafalias等, 1975^[25]; Krieg, 1975^[26]; Dafalias等, 1982^[27])、广义塑性理论(Zienkiewicz等, 1984^[28])和多机构塑性模型(Matsuoka等, 1987^[29]; Aubry等, 1982^[30])以及经典弹塑性模型。当采用粘弹性模型和经典弹塑性模型进行动力有效应力分析时,往往还需要建立动孔压的发展模型,动孔压的发展模型主要有:应力模型、应变模型、内时模型、能量模型、有效应力路径模型以及瞬态模型等。

1.2.2 砂土的液化

美国土木工程师协会岩土工程分部土动力学委员会(1979)^[31]对“液化”一词的定义是“液化—任何物质转化为液体的行为或过程。就无粘性土而言,这种由固体状态变为液体状态的转化是孔隙压力增大和有效应力减小的结果。”

三种典型的液化机理

(1) 砂沸

当一个饱和砂沉积体中的孔隙水压力由于地下水头变化而上升到等于或超过它的上覆有效压力时,该饱和砂沉积体就会发生上浮或“沸腾”现象,并且全部丧失承载能力。这个过程与砂的密实程度和体积应变无关,而是由渗透压力引起的液化。

(2) 流滑

流滑是饱和松砂的颗粒骨架在单程或剪切作用下,呈现出不可逆的体积压缩,在不排水条件下,引起孔隙水压力增大和有效应力减小,最后导致“无限度”的流动变形。

(3) 循环活动性

循环活动性主要曾被发现于相对密度较大(中密以上到紧密)的饱和无粘性土的固结不排水循环三轴或循环单剪和循环扭剪试验中。它主要与试件在循环作用中的剪缩和剪胀交替变化有关,从而形成了瞬态液化和有限度断续变形的格局。

砂土液化的预估方法

评定砂土液化的可能性,是对比促使液化方面和阻抗液化方面的某种代表性物理量的相对大小而作出判断。Casagrande(1936)^[32]提出了临界孔隙比法,认为存在一个剪切破坏时体积不发生改变,即不压实又不松胀的密度,其相应的孔隙比为临界孔隙比。Seed(1971)^[33]提出了抗液化剪应力法,是目前国内外应用最广泛的方法,它的关键在于正确确定出地震剪应力和抗液化剪应力。我国《建筑抗震设计规范》(GBJ 11—89)采用临界标准贯入击数法,该法基本上反映了影响饱和砂土振动液化的各个主要因素,且比较简单,可以和场地勘察工作同时进行。另外还有波速法和静力触探法等。文献[34-36]对砂土液化的研究现状和发展作了很全面的综述。

1.2.3 动剪切模量与阻尼比

土在动力荷载作用下的变形特性受很多因素影响,在微小应变范围内可视为弹性变形,用弹性波速法和共振柱试验测定动剪切模量与阻尼比;当应变在 10^{-4} 以上时,非线性变形性质显著,用周期加载试验测应力与应变关系曲线确定。

影响土的剪切模量与阻尼比的重要因素有剪应变幅值、平均有效应力、孔隙比和周期加

荷次数,此外还有饱和度、超固结比、周期加荷频率、土粒特征、土的结构等一些次要的因素,以下分别叙述剪切模量与阻尼比的主要影响因素和表示方法。

动剪切模量

砂土的剪切模量 G 在很大的应变范围内, $\lg G$ 与 $\lg \sigma'_m$ (σ'_m 平均有效应力) 呈直线关系 (Hardin 和 Richart, 1963)^[37], 但在不同剪应变时的斜率不同, 剪切模量随着剪应变的增大而减小。粘性土的剪切模量除了与平均有效应力、孔隙比、剪应变有关外, 还受超固结比和时间影响。粘性土试样在主固结完成后, 若保持固结压力不变, 随着时间的增长, 剪切模量将继续增大, 这种影响称为时间效应。粘性土的剪切模量也随剪应变的增大而下降, 但是不同土的曲线下降梯度是不同的。

阻尼比

地基或土工建筑物振动时, 阻尼有两大类: 一类是逸散阻尼, 由土体中积蓄的振动能量以表面波和体波 (包括剪切波和压缩波) 向四周和下方扩散引起的; 另一类是材料阻尼, 由土粒间的摩擦、孔隙水和空气的粘滞性产生。在用有限元法分析中, 已考虑了土体中的振动扩散, 故只需采用材料阻尼。砂土的阻尼比受平均有效应力的影响明显, 粘性土的阻尼比随着塑性指数 I_p 的增大而降低, 随着时间的增长而减小。各种土的阻尼比都随着剪应变的增大而增大。

1.3 原位测试技术

原位测试技术是土动力学的一个重要分支, 是土动力学在工程应用方面的重大进展。土动力特性在现场的原位测试技术, 目前在国内外应用最广泛的是: (1) 桩的动力测试; (2) 地基的动力测试; (3) 土层的波速测试。下面我们就依次来介绍这些原位测试技术的原理及方法。

1.3.1 桩的动力测试

桩基工程是地下的隐蔽工程, 因此对桩的质量和承载力的检验是个重要问题。过去传统习惯是用超声探伤或钻孔取芯来检验桩的质量, 用静力荷载试验来检验桩的承载力。但 these 方法成本高、费时、费力, 因此国内外均大力发展用动力方法来检验桩的承载力和质量。

桩的完整性和质量检测

用动力方法检验桩的完整性和质量, 有两种方法, 即频域法和时域法。前者在桩顶施加一稳态的简谐激振力 (通常是用电磁激振器) 进行扫频激振, 并用传感器测定桩顶的速度曲线, 根据实测的桩顶速度频率曲线即可判断桩的质量和完整性; 后者在桩顶施加一瞬态激振力 (常用手锤敲击), 并用传感器测得桩顶速度的时域曲线, 即可判断桩的质量和完整性, 这一方法也叫反射波法。

桩的承载力检测

用动力方法检测桩的承载力, 目前在外国都是用大应变的方法, 用得较多的是波动方程法和动静法。前者用重锤冲击桩顶使桩产生 3mm 以上的贯入度, 然后通过安装在桩上部的应变计和加速度传感器测得 $F(t)$ 和 $v(t)$, 按波动方程求得桩得极限承载力。鉴于这种方

法只能用于打入桩,故近年来又开发了后一种方法。动静法用燃烧固体燃料和压重,使桩顶受一持续时间较长的反力,使桩产生较大的贯入度,而且不使桩顶损坏,然后按刚体运动的方法,扣除惯性力和土的阻尼力,即可得到与静力荷载试验方法相同的结果。

国内开发了一种新的小应变动测桩承载力的方法,目前已得到广泛的应用,且已有国家标准(JGJ/T 93—95)。其中频域法与上述检验桩质量的方法相同,根据所得的桩顶速度频域曲线的低频段,即可确定桩的容许承载力。小应变动测法的时域法也与上述检验桩质量的方法相同,但需要求出瞬态激振下桩的基频,从而算出桩土体系的动刚度 K_d ,并由此可求出桩的容许承载力。小应变动测方法要比国外的大应变动测法成本低、效率高、覆盖面大,不仅可以用于打入桩,而且可适用于国内数量较多的灌注桩。

1.3.2 地基的动力测试

对于天然地基或人工地基承载力的测定,按照传统的规范法,只有取原状土进行室内试验,根据其物理力学指标确定其承载力或者进行现场的静力荷载试验,但前者可靠性较差,有的土无法取原状土;后者则成本高、费时、费力,建设单位很少采用。因此急需一种替代的方法。我国目前有两种动力测定地基承载力的方法,都是从桩的动测方法演变过来的。一是动荷载试验法,类似于动测桩的共振法,它是在研究各类土的动、静模量比 E_d/E_0 的基础上提出来的,然后根据规范规定的容许沉降 $[s]$,定出各类地基的容许承载力 f_0 ;另一种方法,类似于动测桩的动参数法,求出地基的抗压刚度系数 C_z 后,按我国的《动力机器基础设计规范》(GB 50040—96)反求 f_0 。

目前国外也在研究动测地基承载力的方法,美国德克萨斯 A&M 大学的 Briaud 教授(1990)^[38]提出的 WAK 试验方法,从本质上与上述国内的第一种方法相同。

1.3.3 土层的波速度测试

土层的波速度测试主要是利用物探中的地震法原理,量测弹性波在土层中传播的速度,计算土的动力变形特性参数。按其工作方式可简单地分为两大类,即钻孔法和表面法。

钻孔法

目前岩土工程中已有的钻孔法按振源和检波器的布置不同可分为跨孔法、下孔法、上孔法、孔内法和孔底法等。应用这类方法时,须在地层中钻一个或多个孔,以此测定不同深度处岩土介质的 P 波和 S 波速度以及波的衰减性质。钻孔法的原理较简单,按波传播的距离和历时即可计算波速。在计算波速时,常假定波沿直线传播,只要改变检波器或振源或两者的位置即可测定不同深度处岩土波速。

表面法

用表面法进行波动勘测时,毋须在地层中钻孔,振源、检波器均布置在地表。表面法目前主要包括折射波法、反射波法、稳态振动法和瞬态振动法,其实测数据分析均比钻孔法要复杂。折射波法试验由于测试精度不高及在下层波速小于上层波速以及含软夹层的情况下不能使用等原因,在工程中多为初步勘测之用。反射波法对测试仪器的要求较高,资料分析比较复杂,在工程中应用得不够广泛。稳态振动法能够得出地层 S 波速与深度的近似关系曲线,瞬态振动法又称表面波频谱分析法(SASW 法)。稳态和瞬态振动法统称表面波法,虽然测试深度受振源能量大小的限制,对成层勘测仍不失为一种有效方法,对于难以钻孔试验

和取样的土层尤其适用。

1.4 室内测试技术

土动力特性室内试验,是将土的试样按照要求的湿度、密度、结构和应力状态制备于一定试样容器之中,然后施加不同形式和不同强度的振动荷载作用,再量测在振动作用下试样的应力和应变,从而对土性和有关指标的变化规律作出定性和定量的判断。由于土动力问题研究的应变范围很大,需要用不同的测试方法来确定土动力计算中所用的特性参数。在室内可以做从小应变到大应变的试验。下面首先介绍各种动力试验的基本原理,然后分别介绍动三轴试验、振动剪切试验、共振柱试验、振动台试验和离心模型试验。

1.4.1 动力试验的基本原理

动力试验一般都包括激振和测振两个部分。

激振

激振的基本原理是给土样施加某种动荷载,使其尽可能地模拟实际的动力作用。室内动力试验采用的激振方法主要有四种:机械激振、电磁激振、电液激振、气动激振。

测振

土动力试验的各项物理量需由测振系统进行量测。需测振的参数总括有三大类:(1)关于应力的;(2)关于应变(位移)的;(3)关于振动性状的(如阻尼、衰减等)。被测物理量的转换、放大和记录构成了电测的基本系统,包括传感器、放大器和记录仪。其中最关键的部件是各种类型的传感器。土动力试验中常用的传感器可分为两种类型,即能量型传感器(包括磁电式和压电式)和参数型传感器(包括电阻式和电感式)。测振中宜针对各自的特点予以选用。

1.4.2 室内动力试验

动三轴试验

动三轴试验是从静三轴试验发展而来的,它利用与静三轴试验相似的轴向应力条件,通过对试样施加模拟的动主应力,同时测得试样在承受施加的动荷载作用下所表现的动态反应。这种反应是多方面的,最基本和最主要的是动应力(或动主应力比)与相应的动应变的关系($\sigma_d-\epsilon_d$ 或 $\sigma_1/\sigma_3-\epsilon_d$),动应力与相应的孔隙压力的变化关系(σ_d-u_d)。根据这几方面的指标相对关系,推求出岩土的各项动弹性参数及粘弹性参数,以及试样在模拟某种实际振动的动应力作用下表现的性状。动三轴试验的试验设备为动三轴仪。

振动剪切试验

对实际地基来说,土的振动变形大部分是由于从下卧层向上传递的剪切波引起的。为了在试验室内真实地模拟实际地基的应力条件,20世纪70年代以来,相继发展了多种振动剪切试验设备,大致上可分为振动(盒式)单剪仪和振动扭剪仪两类。

共振柱试验

共振柱试验是根据共振原理在一个圆柱形试样上进行振动,改变振动频率使其产生共

振,并借以测求试样的动弹性模量及阻尼比等参数的试验。日本阪田(Iida,1938)^[39]首先进行此方法的研究。20世纪60年代以来,使用日益广泛。Woods(1978)^[40]详细介绍了将共振柱仪用于岩土地震工程中的发展史。共振柱法是一种无损试验技术,它的优越性表现在试验的可逆性和重复性上,从而可以求得十分稳定可靠的结果。

振动台试验

振动台试验是20世纪70年代发展起来专用于土的液化性状研究的室内大型动力试验。它具有下述一些优点(Finn,1972)^[41]:(1)可以制备模拟现场 K_0 状态饱和砂的大型均匀试样;(2)在低频和平面应变的条件下,整个土样中将产生均匀的加速度,相当于现场剪切波的传播;(3)可以量出液化时大体积饱和土中实际孔隙水压力的分布;(4)在振动时能用肉眼观察试样。但制备大型试样费用很高,不同的制备方法对试验结果的影响很大(Seed,1976)^[42]。

离心模型试验

离心模型试验是一种研究土体动力特性的重要方法,它是将原型土体的尺寸按一定几何比例缩小为模型后,对其按要求的相似条件选定材料,施加静动荷载,测定出应力、应变,最后反算到原型。要寻找能够完全满足各相似条件的材料往往是困难的。如果模型与原型采用同一种材料,又会歪曲原型的实际性状,为了克服这种困难,早在40多年前就提出离心模型试验的方法。模拟地震作用的离心机要求发生足够的力,能高速加卸有效荷载,故常用压电振动系统,它可以精确地控制其幅值和持续时间。

1.5 土与结构动力相互作用

土体与结构的相互作用问题的实质是研究地基对建筑物动力反应的影响。早在20世纪30年代后期,研究人员已经认识到在地震作用下上部结构与地基是相互影响的耦连体系,应作为整体系统来研究其动力反应。Reissner(1936)^[43]关于弹性空间表面刚性圆形基础振动问题的研究(即通称的基础振动问题 Reissner 理论)奠定了土-结构动力相互作用问题研究的基础。Parmelee(1967)^[44]提出了比较合理的土-结构动力相互作用的理论计算模型,将结构和地基作为相互耦连的体系来研究其在地震作用下的动力反应,初步揭示了动力相互作用现象的一些基本规律。20世纪70年代以后,由于计算机技术的发展,为土-结构动力相互作用的研究提供了有力的分析计算手段。此外,工程建设的实际需要,大大推动了土-结构动力相互作用的研究,相互作用的计算模型及分析方法也逐步得到完善。在研究方法上大致可分为三类:理论分析法、模型试验法、原位测试法。

1.5.1 理论分析法

理论分析法是土-结构动力相互作用研究的基础。目前,分析土-结构动力相互作用时,解析法虽然仍起着一定的作用,但主要是采用数值模拟方法,其大致可分为子结构法、有限元法和杂交法三种。

子结构法

子结构法在分析土体与结构动力相互作用时是较常用的一种方法,它一般可分为两步

解决:第一步,分别求出上部结构、基础和地基的单体反应;第二步,联系各单体反应使其满足相互作用的条件,从而得到整个系统的动力反应。Wolf(1989)^[7]对该方法作了详细的论述。它的优点在于对每个子系统(结构、基础、地基)的分析,在整个问题中均可以采用最适合该局部部分的分析方法,而且在计算分析过程中可以得到有意义的中间结果,从而有助于加深对相互作用效应的理解,也有助于检验最终结果的精度。在子结构方法中,一个重要的中间环节就是确定基础的振动阻抗,它是必不可少的研究内容。

有限元法

这里指的是对整个土-结构体系进行有限元离散化计算动力反应的一种分析方法。从基本处理手法来说,与一般静力问题的有限元法是一致的,特殊之处在于如何将地基无限边界的动力问题处理成有限边界的动力问题,这一处理方法的好坏直接影响计算的精度,目前采用的人工边界有粘性边界、半无限单元、叠加边界以及透射边界等,对不同的问题应采用不同的边界处理方法。目前,在土-结构相互作用问题中,绝大多数情形都按平面应变问题处理(范敏等,1985)^[45],对于土-结构的非线性动力相互作用研究,有限元法提供了很好的分析手段。在物理非线性方面,有限元法可通过采用适当的非线性模型来模拟,在几何非线性方面,有限元可通过在土-结构界面处加设具有可反映滑移、脱开和重新结合以及非线性特性的界面单元来得到非线性有限元分析结果(扶长生等,1987)^[46]。

杂交法

杂交法(或称混合法)将两种不同方法的结合起来求解所提出的问题,它可以是解析法与数值方法间的结合,也可以是不同数值方法之间的结合。在土-结构动力相互作用问题的研究中,运用最多的是不同数值方法间的结合。这种结合大致有以下几种形式:有限元与无限元的结合,有限元与边界元的结合,有限元和边界阻抗的结合以及有限元与半解析法的结合等。

1.5.2 模型试验法

土-结构动力相互作用的研究中,最大的困难是缺乏必要的实测数据,从而使相互作用的分析存在着许多不确定性,限制了其在实际工程设计中的应用。所以,研究中一个非常重要的方面就是进行小比例尺模型的室内试验以及大比例尺模型的现场试验直至原型的试验研究。一般地讲,室内小比例尺试验比较简便易行,条件易于提供,但由于其条件过于理论化,从分析方法的可靠性的验证来说,是有局限性的。所以采用后两种途径更接近于实际。通过试验不仅可以分析相互作用的机理,而且可以为理论分析方法提供重要的验证手段。然而,大比例尺模型的现场试验需要花费大量的人力、物力和财力,所以一般只对重要的建筑物(如核电站等)进行研究。林皋(1991)^[47]对各国在土-结构动力相互作用方面典型的试验研究成果作了详细介绍。

1.5.3 原位观测法

原位观测在抗震研究中起着相当重要的作用,它不仅可以获得真实的地震记录,而且可以通过埋设或安装在建筑物内的测震记录仪得到地震对建筑物的真实反应,由此可检验设计规范 and 抗震理论。松谷辉雄等(1995)^[48]对1995年1月17日发生在日本关西兵库县南部7.2级强烈地震中的一幢超高层钢筋混凝土建筑中的地震记录以及震害情况作了详细的

报告。这些实测记录并配以测得这些记录的系统的有关特性参数(包括地基、结构),则对土-结构动力相互作用的研究将起到推动作用。

1.6 土体的地震反应、变形与稳定分析

土体动力反应分析方法是进行地基和土工建筑物抗震设计及其加固所采用的主要技术手段之一。求解土体地震反应的总应力等效线性方法、评价土体稳定性的拟静力法、估算地震永久滑动位移的 Newmark 法^[50]以及预测土坝整体永久变形的应变势方法等已在工程分析中得到了广泛的应用。与此同时,基于动力饱和和多孔介质理论和复杂弹塑性模型的排水有效应力分析技术也越来越受到重视。另外,利用与离心机模型试验成果以及现场实测结果对比来检验理论分析方法的合理性也已广泛地开展起来。

1.6.1 土体地震稳定分析的拟静力法

长期以来,对地基、挡土墙和土坡(坝)等不同边界条件下的土体进行地震稳定分析一般采用拟静力法,而这些拟静力方法大多是由静力稳定分析方法直接推广得到的。值得注意的是,如何合理地考虑地震作用的影响,还是一个有待解决的问题。地震作用的影响将包括对水平平均地震加速度系数以及屈服强度的确定。近年来对地基和土坝强震观测得到的地震记录表明,不仅实测的地基的地震最大加速度系数都大于过去设计采用的地震加速度系数,而且土坝本身也不表现为刚体,坝顶的最大反应加速度都大于坝基的地震最大加速度。因此需要通过真正的动力反应分析来取得拟静力稳定分析所需的地震加速度系数。近年来以变形作为设计控制标准的概念逐渐得到公认,尤其是体现在挡土墙的地震稳定分析中。所以如何将地震反应和变形分析与拟静力稳定分析有机地结合起来,并由此得到一些实用化的研究成果已成为当前地基和土工建筑物地震稳定分析的研究重点。至于屈服强度的确定,正如 Seed(1979)^[51]所指出的,循环荷载作用下的土体屈服强度将低于土体的静力屈服强度,其大小与应力循环的次数和频率有关,这方面的试验研究还有待加强。

1.6.2 土坝地震永久变形分析的简化方法

正如 Newmark(1965)^[50]所指出的那样,土坝稳定与否将取决于地震时引起的变形,而非最小安全系数。有关估计土坝地震永久变形的分析途径,主要分为两类:一类是就坝体中滑动体的累积滑动位移量来进行分析;另一类是就坝体整体变形来进行分析。滑动体位移分析方法是 Newmark(1965)^[50]首先提出的,近年来不少学者对 Newmark 方法进行了改进,研究重点是考虑坝体为变形体(非刚体)。另外,如何利用现有的现场实际观测成果或实例对比法进行进一步验证,应该是今后研究的重点之一。Al-Homoud 和 Tahtamoni(2000)^[52]在这方面作了非常有益的尝试,但这方面的工作显然有待于进一步加强。整体变形分析的应变势概念是由 Serff 等(1976)^[53]首先提出的,主要采用修正模量(模量软化)法和等效节点法,这两种方法都需要借助于有限单元法。修正模量法本身缺乏明确的理论基础。而等效节点法则是采用动力反应分析与静力变形分析相结合的途径,事实上如果直接在应力应变关系上考虑振动体变的影响,是可以通过一次动力分析得到土坝的整体变形的,

两者理论上是没有本质区别的。

1.6.3 土体地震反应、变形与液化的动力分析方法

地基和土坝的地震动反应分析最早是为了计算土层和坝体中地震反应加速度的分布时程曲线,以便准确估计土体中的地震惯性力。分析方法已由最早的线性剪切梁法(或称剪切楔法)逐步发展为等效线性法和弹塑性有限元法,从总应力分析方法逐步发展为不排水有效应力方法以及排水有效应力分析方法。因此,现今的地基与土坝的地震动反应分析,已不仅可以计算土体中的地震加速度分布以及时程曲线、地震动应力和动应变的分布以及时程曲线,而且还可以估计土体的地震永久变形和稳定性。文献[54-56]对土坝的动力分析方法作了很全面的综述。但无论是简化的线性剪切梁法还是复杂的弹塑性排水有效应力分析方法,都需要利用振动台和离心机模型试验加以验证,尤其是离心机模型试验验证已得到了广泛的重视,美国国家自然科学基金资助的重大项目 VELACS(VERification of Liquefaction Analysis by Centrifuge Studies,利用离心机试验验证液化分析)就是这方面工作的集中体现^[57]。

1.7 结束语

土动力学的研究需要进一步将理论分析、室内试验、现场试验、原型观测和模型试验结合起来,各取所长,互相促进,作出多途径、长时间的系统探索。在解决岩土地震工程和土动力学的各种实际工程问题中促进其发展。

参 考 文 献

- [1] Richart F E Jr, Woods R D, Hall J R. 土与基础振动. 徐攸在等译. 北京:中国建筑工业出版社,1976
- [2] 严人觉,王贻荪,韩清宇. 动力基础半空间理论概论. 北京:中国建筑工业出版社,1981
- [3] Das B M. 土动力学原理. 吴世明,顾尧章译. 杭州:浙江大学出版社,1984
- [4] Prakash S. 土动力学. 徐攸在等译. 北京:水利电力出版社,1984
- [5] 刘颖,谢君斐等. 砂土地震液化. 北京:地震出版社,1984
- [6] 谢定义. 土动力学. 西安:西安交通大学出版社,1988
- [7] Wolf J P 著. 吴世明等译. 土-结构动力相互作用. 北京:地震出版社,1989
- [8] 徐攸在,刘兴满. 桩的动测新技术. 北京:中国建筑工业出版社,1987
- [9] 张克绪,谢君斐. 土动力学. 北京:地震出版社,1989
- [10] 吴世明,唐有职,陈龙珠. 岩土工程波动勘测技术. 北京:水利电力出版社,1990
- [11] 吴世明. 土介质中的波. 北京:科学出版社,1997
- [12] 汪闻韶. 土的动力强度和液化特性. 北京:水利电力出版社,1997
- [13] 中国振动工程学会土动力学专业委员会. 土动力学工程应用实例与分析. 北京:中国建筑工业出版社,1998
- [14] 吴世明,徐攸在. 土动力学现状与发展. 岩土工程学报,1998,20(3):125-131
- [15] 杜坚,杨灿文. 土和基础的动力测试技术. 水利学报,1987,(12)