

岩土工程新进展丛书

主编 吴世明 周 健 杨 挺

土动力学理论与计算

周 健 白 冰 徐建平 编著



中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

岩土工程新进展丛书/吴世明等主编. —北京:中国
建筑工业出版社, 2001. 1

ISBN 7-112-04520-7

I. 岩… II. 吴… III. 岩土工程-研究 IV. TU4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 73677 号

近年来,土动力学在理论研究和数值计算等方面均取得了很大的发展。本书是一部反映该领域部分研究成果和发展概况的专著。本书在参考国内外学者大量研究成果的基础上,主要汇总了作者近些年来研究成果。

全书共分 8 章,具体内容如下:土动力特性研究的意义、现状及其方法、土的动力特性及其液化、土的动孔隙水压力及动残余应变、土的动力本构模型、土的动力反应分析方法、砂土地震液化计算方法及计算实例、地震永久变形计算方法及计算实例、土工构造物抗震计算方法及计算实例。

本书可供建筑、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:田启明
蔡华民

岩土工程新进展丛书

主编 吴世明 周健 杨挺

土动力学理论与计算

周健 白冰 徐建平 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

北京市彩桥印刷厂印刷

*

开本:787×1092 毫米 1/16 印张:15¼ 字数:380 千字

2001 年 1 月第一版 2001 年 1 月第一次印刷

印数:1—1,500 册 定价:102.00 元(共三册)

ISBN 7-112-04520-7
TU·4028 (9970)

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

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稳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。多年来,世界各国学者在土石坝、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已取得了大量的研究成果。此外,地基土在其它动力荷载作用下的强度及变形问题也得到极大的重视,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作用下的稳定问题,软基上路堤在交通荷载作用下的变形问题,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、冲击荷载作用下地基土的变形性状等。

近年来,土动力学除在理论研究方面取得长足的进展外,在数值模拟和计算方面也取得了较大的发展,已发展了多种土的动力本构模型。除确定性的分析方法之外,以地震响应分析方法、随机振动分析方法、动力可靠性为基础的动力分析方法也得到很大的发展。而现有的土力学方面的专著对这方面的最新研究成果介绍得还较少。本书在参考国内外学者大量研究成果的基础上,主要结合作者近年来的理论研究成果和工程实践编著成本书,反映了该领域的部分研究成果和发展概况。

全书共分8章,具体内容如下:第1章介绍土动力特性研究的意义、现状及其方法,并介绍土动力学数值计算在随机振动理论及地震振动系统可靠性的一些情况。第2章介绍土的动力特性及其液化,包括地震液化研究现状、砂土地震液化分析的总应力法、周期荷载作用下饱和砂土的性状和粘性土的动强度。第3章介绍土的动孔隙水压力及动残余应变、孔隙水压力发展的概率分析方法、周期荷载作用下粘性土的变形和孔压,特别介绍了冲击荷载作用下饱和软粘土的一些性状。第4章介绍土的动力本构模型和新近的

一些发展概况。第5章介绍土的动力反应分析方法,主要包括有效应力分析方法、弹塑性动力分析方法及非饱和土动力分析方法。第6章介绍砂土地震液化计算方法及计算实例,也包括概率方法及其它一些新的方法。第7章介绍地震永久变形计算方法及随机地震作用下永久变形计算方法和算例。第8章介绍土工构造物抗震计算方法及其抗震稳定分析的随机可靠性,并对厚覆盖层软土地层的动力反应、软土地层隧道和地铁车站抗震稳定分析等几个工程问题进行了计算分析。

本书第4章由周健、白冰和徐建平编著。其余各章由周健和白冰编著,并负责统一全稿。贾敏才参加了第5章部分内容的编写工作,董鹏参加了第8章部分内容的编写工作。

本书承蒙同济大学王天龙教授于百忙之中认真审阅原稿,并提出了不少宝贵意见和建议,作者在此表示衷心的感谢。编著者所在课题组的董鹏、陈华剑、贾敏才、池永等同志在本书绘图及校对工作中付出了大量辛勤劳动,在此深表感谢。本书部分内容得到上海市建设技术发展基金和建设部基金资助。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。

由于作者才疏学浅,不妥之处在所难免,恳请各位专家和广大读者批评指正。

编著者
2000年9月

第1章 绪 论

1.1 土动力特性研究的意义

随着社会和经济的迅速发展,人口愈来愈集中于城市。世界上的多次破坏性地震都集中于城市,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年日本阪神大地震等。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。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。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,易燃气体泄漏等大量次生灾害。可见,随着城市现代化与经济的高速发展,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。地震所造成的巨大破坏促使从事地震工程的研究人员和岩土工作者必须进行更为深入的研究,充分利用现有地震调查资料,最大限度地运用现代试验技术、分析方法和计算理论对现有和即将建设的工程建筑物及设施的抗震性能进行准确评估和预测,进而指导抗震设计并采取必要的减震防灾措施。

我国地处环太平洋地震带和喜马拉雅—地中海地震带之间,是一个多地震的国家,本世纪以来多次发生强烈地震,如唐山地震、海城地震、邢台地震、营口地震、云南武定县地震和云南丽江地震等,给人们造成了重大的生命和财产损失,对人民的生存和发展造成了严重的威胁。近年来,我国大陆发生的地震有增多的趋势,且具有强度大、频率高、震源浅的特点。随着我国经济的高速发展及城市人口的集中,城市抗震防灾问题日显突出。由于城市抗震防灾问题所涉及的研究内容广泛,如何针对地震荷载安全经济地进行设计、施工是抗震防灾首要的问题。

土动力学问题是土工基础的一项重要内容。多年来,世界各国学者在土石坝、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,推动了土动力学及地震工程学的研究和发展。除地震作用下土及土-结构物动力特性的研究之外,地基土在其它动力荷载作用下的强度及变形问题也得到极大的重视,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作用下的稳定问题,软基上路堤在交通荷载作用下的变形问题,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。可见,现阶段对土在各种动力荷载作用下力

学性状的研究仍具有十分重要的学术意义和工程意义。

1.2 土动力特性研究的现状及其方法

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、机器基础的振动等诸方面。如 30 年代前后日本、德国、苏联开展的机器基础振动设计方面的系统研究。Casagrande 研究了加荷时间对土动力强度的影响。Taylor 和 Whitman 则研究了应变速率对土强度的影响。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。70 年代, 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、汪闻韶从五六十年代起即对土的动力强度和液化特性进行了系统而深入的研究。

70 年代, 随着近海重力式石油平台的大量兴建, 研究者们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。另一方面, 周期荷载作用下粘性土性状的研究也取得较多的成果, Andersen 等人应北海重力式石油平台建设的需要曾对 Drammen 粘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 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 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 及其同事们的工作, 后来 Kawakami 和 Ogawa、Yamanouchi 和 Aoto 以及 Luo 等也继续了这项工作。进入 80 年代, 这项工作进一步深入, Yasuhara 等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 的研究则集中在排水条件下考虑固结影响的变形计算。

近年来, 各国学者从不同的方向对土动力学进行了深入研究。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本构关系模型是土动力学研究的基本问题, 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与土石坝、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最重要、最复杂的方面, 由于涉及到上部结构、下部地基及其组成材料和远场地面运动等多种因素, 是结构动力学和土动力学中最为复杂的课题, 一直引起结构工程师和岩土工程师的注意。

在以往的地震反应分析中, 地震作用一般以水平剪切为主, 因此按 Serff 假设可以将水平面近似作为最大剪应力作用面, 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的破坏形式表明竖向地震作用产生的破坏是相当大的。1995 年 1 月 17 日发生的日本阪神大地震中, 有许多结构的破坏是由于竖向地震作用引起的。例如, 地震对开挖式施工的地铁工程就造成了严重的震害, 有的因柱子被压碎而造成地面塌陷。日本大林组技术研究所对三宫段尚未压塌的结构进行了分析, 结果表明, 柱子中间部位破坏, 显然是由竖向地震造成的。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

震设计是不够安全的。这方面已引起学者们的重视。

关于土的动力性质及其基本理论可以概括为以下几个方面。

(1) 土的动力特征及其描述

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其影响,不仅表现出与静荷载作用下不同的特性,而且还因动荷载的加荷速率和加荷次数表现出显著的强度及变形差异。

动荷载作用下的应力-应变关系是表征土动力性质的基本关系,也是分析土体动力失稳过程等一系列特性的依据。由于土具有明显的各向异性,加之土中水的影响,使土的动力应力-应变关系表现出非线性、滞后性及变形积累等三种特征。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;滞回曲线表示某一个应力循环内各时刻剪应力与剪应变之间的关系,反映了应变与应力的滞后性。骨干曲线与滞回曲线共同反映了土体应力-应变全过程。

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。动剪切模量与阻尼比是两个很重要的表征土动力性质的参数。土在动力荷载作用下的变形特性受很多因素影响,在应变值很小时($<10^{-4}$),可作为弹性变形,常用弹性波速法和共振柱试验测定动剪切模量与阻尼比;当应变值较大时($>10^{-4}$),非线性变形性质表现显著,用周期循环加载试验测应力~应变曲线来确定动力参数。

影响土的动剪切模量与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、土粒特性、土的结构性等因素。各种主要因素对剪切模量及阻尼比的影响规律大致如下:

在很大的应变范围内,土的动剪切模量 G 与平均有效应力 σ_0 的幂函数成线性关系,但对不同的剪应变, $\lg G - \lg \sigma_0$ 曲线有不同的斜率。剪切模量随着剪应变的增加而减少,对于不同的土,曲线斜率也不同。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,还受超固结比影响,并且表现出时间效应,即粘性土试样在固结已经完成后的次固结阶段,随着时间增长,剪切模量会继续增长。

地基及土工结构振动时,阻尼有两类:一类是逸散阻尼,由于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;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引起。在用有限元法进行地震响应分析中,已经考虑了振动能量的扩散,故仅采用材料阻尼。无粘性土的阻尼比受有效应力的影响明显,粘性土的阻尼比随着塑性指数 I_p 的增加而降低,随着时间增长而减少。各种土的阻尼比都随着剪应变的增加而增加。

(2) 地基土的液化问题

自1964年日本新潟地震和美国阿拉斯加地震以来,液化问题得到了逐步认识和日益重视。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。美国土木工程师协会岩土工程分部土动力学委员会对“液化”的定义是:任何物质转化为液体的行为和过程。就无粘性土及粘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。地基土的液化主要受土性条件、初始应力条件、动荷载条件、排水条件等因素的影响。目前,一般将土的液化机理概括为砂沸、流滑和循环流动性三种形式。

判定地基土的液化可能性,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定的。Gasagrande(1932年)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变化,既不压缩也不膨胀的密度,其相应的孔隙比就是临界孔隙比。Macjioh.H.H(1970年)提出了临界加速度法。Seed(1971年)提出的抗液化剪应力法,是目前国内外广泛应用的方法。使用该方法的关键是正确确定地基地震剪应力响应过程及地基土的抗液化应力。

近年来,对地震液化的研究表现出一些新的特点:①与以往注重实验室工作相比,近期更侧重于实例分析、现场测试研究;②与过去强调孔压上升规律研究相比,自由场地的地面变形估计和液化对建筑物及生命线设施的影响愈来愈受到重视;③离心模型试验已成为一个主要且行之有效的工具,可实用于研究液化机理,并可以对地面变形和液化影响各种结构设施进行定量评价;④基于随机理论对液化破坏进行可靠性评估,这是个新的研究方向,大多数学者从两方面入手,一是从地基土性的空间变异性和试验参数的不确定性进行,另一个是从地震发生及地震激励的随机性进行,但能够将二者结合起来的研究成果至今不多。

另一方面,土的动力特性测试技术也得到较大发展。土动力测试技术可分为原位的和室内的。原位测试技术包括:①震法勘测(跨孔法是其中之一);②采用振荡器的表面波测试法;③低频循环加载测试法;④动力旁压仪测试法;⑤根据地震记录,用反演分析法计算;此外还有一些简便易行的方法如,SPT试验、CPT试验、地震静力触探试验(SCPT)、电测技术等。

工程设计中最主要的动力参数是动剪切模量和阻尼比。现场测定动剪切模量的方法较多,但由于现场取样扰动,一般现场测定值比室内测定值偏大。地层波速度是推算动剪切模量的重要参数,其原位测试技术近30年来迅速发展,已提出的方法有:跨孔法、下孔法、上孔法、孔内法、孔底法、折射波法、反射波法、稳态振动法、瞬态振动法(SASW法)。

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主应力,同时测得试样在动荷载作用下所表现出的动态响应,根据这几方面指标的关系,推算岩土材料的各项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所表现的性状。②振动剪切试验。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,70年代以来相继出现了振动(盒式)单剪仪和振动扭剪仪。③共振柱试验。根据共振原理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70年代发展起来的,最初应用于研究土层液化性状的大型室内动力试验。它可以模拟现场 K_0 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,并可直接观测孔隙水压力及振动变形。⑤离心模型试验。采用模型试验方法,需将原型岩土体的尺寸按一定几何比例缩小为模型后,再对其按所要求的相似条件选定材料,施加荷载,测定出应力、应变,最后反算到原型。要寻找能够完全满足各种相似条件的材料往往很困难,而若选用与原型相同的材料,又会歪曲原型的实际性状。90年代以来,国内外拥有动力离心模型试验的研究机构迅速增多。仅欧美、日本等国已拥有20多台动力土工离心模型试验机。美国国家科学基金会于1989年至1994年,历时五载,投资350万美元,资助了一项称之为液化问题数值分析方法的离心模型试验验证的重大科学研究项目。

该研究项目解决了一系列动力土工离心模型试验技术问题,如采用粘滞系数大的液体替代水来解决惯性和固结耦合的时间比尺问题;研制了电液伺服等激振装置,实现了高频率、高速度和高峰值动力的输入;开发了刚性边壁吸收的模型箱和等效剪切梁式迭环模型箱,减少了模型应力场、应变场和地震波的失真。当然,动力土工离心模型试验技术也存在一些问题,如模型激振频率较原型高几倍会引起原型并不存在的惯性效应,采用粘滞性较大的液体替代水也改变了土的阻尼特性等。迄今为止,动力土工离心模型试验一般为一维加速度输入,二维、三维地震加速度的输入设备还处于开发阶段。最近,模拟双向振动的离心机已在香港科技大学研制成功并投入使用,为研究地震响应规律提供了先进的手段。

1.3 土动力学数值计算的基本方法和特点

近年来,土动力学除在理论研究方面取得长足的进展外,在数值模拟和计算方面也取得了较大的发展,已发展了多种土的动力本构模型。如按弹性、塑性和粘弹性进行分类,则根据所研究具体问题的不同可采用不同的本构模型。弹性模型使用方便,可用于土体应变变量小的情况。动荷载作用下土体的塑性会增大,简化分析中常用塑性模型。考虑土体在荷载作用下的时间效应时,可使用粘性模型。

(1) 弹性本构模型

弹性本构模型有三个明显的特征:①应变的弹性或可逆性;②应力与应变一一对应关系;③与应力或应变路径的无关性。线性弹性本构关系的应力与应变可表示为:

$$\begin{cases} \sigma_{ij} = D_{ijkl}^e \epsilon_{kl} \\ \epsilon_{ij} = C_{ijkl}^e \sigma_{kl} \end{cases} \quad (1.1)$$

式中, D_{ijkl}^e 、 C_{ijkl}^e 为四阶弹性系数张量,每一个分量都是以弹性系数表示的常数。

如将岩土体视为弹性材料,则采用非线性弹性本构关系来模拟,才比较近似实际。非线性弹性本构关系包括 Cauchy 型模型、Green 超弹性(Hyperelastic)模型和次弹性(Hypoelastic)或增量型模型三种形式。

① Cauchy 型模型。Cauchy 为全量型弹性模型,即当前的应力(应变)总量张量唯一地取决于当前的应变(应力)张量总量,其本构关系表达式为:

$$\begin{cases} \sigma_{ij} = f_{ij}(\epsilon_{mn}) \\ \epsilon_{ij} = F_{ij}(\sigma_{mn}) \end{cases} \quad (1.2)$$

Cauchy 弹性模型具有如下一些特点,即应力与应变可以互换,且与路径无关;对于一定的应力状态而言,可能没有唯一对应的应变能密度函数,即某些加载卸载循环中可能违背能量守恒原理;弹性割线刚度矩阵和柔度矩阵一般不对称。

② Green 超弹性模型。Cauchy 弹性模型不能保证应力(或应变)与应力能(或应变能)唯一对应,Green 超弹性模型假定:材料在一定的应力或应变状态下具有唯一的能量密度函数 $\Omega(\sigma_{ij})$ 或 $\omega(\epsilon_{ij})$,且二阶可微。Green 弹性本构关系为:

$$\begin{cases} \epsilon_{ij} = \frac{\partial \Omega}{\partial \sigma_{ij}} \\ \sigma_{ij} = \frac{\partial \omega}{\partial \epsilon_{ij}} \end{cases} \quad (1.3)$$

Green 超弹性本构关系具有特征:①应力与应变可逆,且与路径无关,能量密度函数 $\Omega(\sigma_{ij})$ 或 $\omega(\epsilon_{ij})$ 亦可逆;②能反映材料的非线性、剪胀性、压硬性以及材料的 Bauschinger 效应;③弹性矩阵一般不对称;④材料常数多,且没有明确的物理意义。

Cauchy 型与 Green 型本构关系主要应用于随机或比例加载情况,当比例加载时 Green 超弹性等同于塑性全量理论或形变理论。

③ 次弹性(Hypoelastic)或增量型模型。为反映岩土材料本构关系与应力路径的关系,提出了次弹性本构关系,放松了对应力总量与应变总量唯一对应的要求。采用应力或应变路径在增量意义上的最小弹性性质,增量本构关系为:

$$\begin{cases} d\sigma_{ij} = D_{ijkl}^{\epsilon}(\epsilon_{mn})d\epsilon_{kl} \\ d\epsilon_{ij} = C_{ijkl}^{\sigma}(\sigma_{mn})d\sigma_{kl} \end{cases} \quad (1.4)$$

式中, D_{ijkl}^{ϵ} 、 C_{ijkl}^{σ} 分别为与应变或应力路径有关的切线刚度矩阵、切线柔度矩阵。次弹性模型的特征是:①与路径相关性;②应力与应变具有增量意义上的可逆性;③次弹性材料有可能违背热力学能量原理;④一般的次弹性模型的材料参数比较多,且没有明确的物理意义,需要较多的试验数据来确定。

Duncan-Chang 双曲线型模型和 I-K 模型就属于次弹性模型。Duncan-Chang 模型于 1970 年提出,R. L. Kondner 发现可以用双曲线来拟合三轴压缩试验中的偏应力差与轴向应变之间的关系曲线,Duncan 等在有限元法分析中将广泛采用的应力应变曲线,以函数方程表示为:

$$q = \frac{\epsilon}{a + b\epsilon} \quad (1.5)$$

式中, a 、 b 是由试验测得的参数。

平面应变问题中,以弹性模量 E_t 和弹性体积模量 K_t 构成本构关系式 $\{\Delta\sigma\} = [D(\sigma, \epsilon)]\{\Delta\epsilon\}$ 中的刚度矩阵 $[D(\sigma, \epsilon)]$ 为:

$$[D(\sigma, \epsilon)] = \frac{3K_t}{9K_t - E_t} \begin{bmatrix} 3K_t + E_t & 3K_t - E_t & 0 \\ 3K_t - E_t & 3K_t + E_t & 0 \\ 0 & 0 & E_t \end{bmatrix} \quad (1.6)$$

式中, E_t 应根据应力水平的大小来取值。当土体单元的最大剪应力 τ_{\max} 大于该土体单元前期最大剪应力 τ_{\max}^0 时, E_t 取加荷切线模量; $\tau_{\max} < \tau_{\max}^0$ 时, E_t 取卸荷再加荷切线模量。

Duncan-Chang 模型考虑了土体的非线性特点,所需参数可以通过常规三轴试验得到,但未考虑中主应力、剪胀性等因素。

1976 年 Izumi, Kamemura 提出了 I-K 次弹性模型。该模型考虑岩土体剪胀性,忽略了压硬性,由此得到的刚度矩阵或柔度矩阵不对称。定义切线剪切模量 G_t 、切线剪胀模量 H_t 、切线体积模量 K_t 分别为:

$$K_t = \frac{d\sigma_m}{3d\epsilon_{m1}}, G_t = \frac{d\tau_{oct}}{d\gamma_{oct}}, H_t = \frac{d\tau_{oct}}{d\epsilon_{m2}} \quad (1.7)$$

增量本构关系表述为:

$$d\epsilon_{ij} = \frac{1}{2G_t} d\sigma_{ij} + \left(\frac{1}{9K_t} - \frac{1}{6G_t} \right) d\sigma_{kk} \delta_{ij} + \frac{S_{mn} d\sigma_{mn}}{9H_t \tau_{oct}} \delta_{ij} \quad (1.8)$$

(2) 弹塑性本构模型

弹塑性本构关系来源于 R.Hill(1950)提出的塑性理论的概念,对于塑性变形需要三方面的假设:破坏准则或屈服准则、硬化准则、流动法则。不同的弹塑性模型,这三个假设的具体形式不同。

广义 Mises 模型(Drucker-Prager 模型)的屈服准则为:

$$f(p, \sqrt{J_2}) = 3\sqrt{J_2}\alpha p - k = 0 \quad (1.9)$$

本构关系表达式 $d\sigma_{ij} = D_{ijkl}^e d\epsilon_{kl}$ 中的弹塑性刚度矩阵为:

$$D_{ijkl}^e = \left(K - \frac{2}{3}G \right) \delta_{ij}\delta_{kl} + 2G\delta_{ik}\delta_{jl} - \frac{-3\alpha K\delta_{ij} + GS_{ij}/\sqrt{J_2}}{9\alpha^2 K + G} \left(-3\alpha K\delta_{kl} + \frac{GS_{kl}}{\sqrt{J_2}} \right) \quad (1.10)$$

广义 Mises 模型提出于 1952 年,它采用简单的方法处理了静水压力 p 对屈服及强度的影响;同时考虑了岩土体材料的剪胀性;所需参数少、计算简便。但它没有反映出岩土材料的拉压强度不同、应力 Lode 角对塑性流动的影响等因素。

剑桥模型由 Roscoe 教授于 1958~1963 年提出,我国学者魏汝龙根据能量原理和正交法则,得出剑桥模型是魏汝龙模型的特殊情况,魏汝龙模型的屈服面方程:

$$f(p, q) = \left(\frac{p - \gamma p_c}{\alpha} \right)^2 + \left(\frac{q}{\beta} \right)^2 - p_c^2 \quad (1.11)$$

式中, p_c 为固结压力, α 、 β 、 γ 是确定屈服面形状的参数。该模型为等向硬化的弹塑性模型,模型考虑了岩土材料的静水压力屈服性、压硬性、剪切引起体积变形(剪胀性和剪缩性),所需试验参数少,应用方便。但它们都采用了 Mohr-Coulomb 破坏准则,没有考虑中主应力的影响;没有反映平均球应力增加引起强度的增长;破坏面有尖角,尖角处塑性应变增量的方向难以确定;诸多工程实例证明这两种模型对正常固结或弱超固结土比较适用。

Lade-Duncan 模型包括一个特殊的破坏(屈服)准则、一个非关联流动法则以及无粘性土的经验硬化准则。该模型可模拟普通三轴试验与真三轴试验的实测性态,所需参数可通过普通三轴试验获取。模型考虑了中主应力、岩土材料的剪胀性和压硬性以及拉压异性等的影响。但是该模型是单一屈服面模型,且仅适用正常固结土和砂土,对超固结土和岩石不适用。

Lade 于 1977~1979 年提出了 lade 双曲屈服面模型,该模型为了反映比例加载时产生的屈服现象及克服 Lade-Duncan 模型直线锥面屈服面产生过大的剪胀,将屈服面改为曲面锥形屈服面,并在锥面开口端增加了一个球形的帽子屈服面,以考虑岩土材料在静水压力作用下的屈服特性以及材料的剪缩性。

(3) 粘塑性本构模型

岩土体材料的应力应变关系除了具有弹性、塑性关系之外,还表现出与时间因素有关的粘滞性,即松弛、蠕变与流动。用连续体力学的概念可以阐明土性的时间效应,用弹性粘塑性的概念可获得土骨架的有效应力与应变速率的关系。

粘弹性模型认为土的总应变 ϵ 是弹性应变 ϵ_e 与粘性应变 ϵ_c 这两部分之和。本构关系方程为:

$$\{\sigma\} = [D]^e \{\{\epsilon\} - \{\epsilon_c\}\} \quad (1.12)$$

式中, $[D]^e$ 为土体弹性本构关系方程的刚度矩阵。

将粘性应变视为初应变,粘弹性问题就归结为具有初应变的弹性问题。

粘弹塑性模型认为总应变 ϵ 由三部分组成:

$$\epsilon = \epsilon_e + \epsilon_c + \epsilon_p \quad (1.13)$$

式中, ϵ_p 为塑性变形。本构关系方程为:

$$\{\sigma\} = [D]^{\text{ep}} \{ \{\epsilon\} - \{\epsilon_c\} \} \quad (1.14)$$

式中, $[D]^{\text{ep}}$ 为土体弹塑性本构关系方程的刚度矩阵。仍将粘性应变视为初应变,粘弹塑性问题就归结为具有初应变的弹塑性问题。

计算粘性应变 ϵ_c 的力学模型主要是由弹簧和阻尼器组合构成的 Maxwell 模型、Voigt 模型、Burgers 模型、Kelvin-Voigt 模型等。

1.4 随机振动理论及地震振动系统的可靠性

除确定性的分析方法之外,以地震响应分析方法、随机振动分析方法、动力可靠性为基础的 动力分析方法也得到很大的发展,主要包括以下一些内容。

(1) 地震响应分析的一般方法

地基受地震荷载作用的动力响应分析方法可分为两类:一类是确定性分析方法,指地震时基岩运动的加速度 $\ddot{x}_g(t)$ 是时间 t 的已知确定性函数,在 $\ddot{x}_g(t)$ 作用下,求上覆地层及地面结构物的动力响应 $y(t)$,所求得的 $y(t)$ 亦为时间 t 的确定性函数。另一类是非确定性分析方法,包括概率论及模糊论的分析方法。其中概率论的分析方法是指:不认为地震时基岩加速度是确定性函数,而是一个作为空间 u 、时间 t 的函数,即随机场 $\ddot{X}_g(u, t)$,实际工程分析中,往往忽略空间上的差异而将其简化为一个随机过程 $\ddot{X}_g(t)$,故而须用随机振动理论求解地基及结构的动力随机响应。

鉴于目前强震仪的精度,地震时基岩的位移波、速度波难以测定,当前已测得的地震记录几乎都是加速度波,因而进行地震响应分析的输入(激励)信息通常是加速度波。地震加速度波形非常复杂,其振幅、频谱、持续时间等特征受震源、传播过程、地质条件等多重因素影响,而且人类对这些影响因素与地震特征因素之间的定量关系尚不清楚。现已获得的强震记录,不仅不同地震的地震记录差异颇大,即便同一震源,不同地点的地震加速度曲线 $\ddot{x}_g(t)$ 亦表现出极大的空间差异性。故而地基及结构的地震响应即是随机事件亦是模糊事件,采用概率论与模糊论相结合的方法求解动力响应是合理的。

现行的工程抗震设计方法,即响应谱方法,是对过去的地震加速度记录进行数理统计分析,在此基础上按确定性分析方法求解响应谱,尽管它部分考虑了地震作用的随机性(例如,求平均响应谱就是出于这种考虑),但基本上仍旧属于确定性的分析方法。由于实际地震记录离散性大,平均响应谱所根据的地震记录又太少,而且仅有其平均值,故不能全面体现问题的离散性和设计取值的可靠性,例如,对 EL-Centro 地震记录来说地基及结构是安全的,但对未来的地震记录而言未必能保证其安全。故此不能认为响应谱方法是一个满意的方法。

实际的地震加速度曲线是一个非平稳过程,大体上可分为:“开始阶段”、“强震阶段”、“衰减阶段”三个部分。大部分地震加速度曲线在振动比较强烈的“强震阶段”相对较平稳,

而弹性振动体系的峰值响应亦大多发生在“强震阶段”所处的时间段内,正由于此,在简化的地震响应分析中,常将地震加速度过程简化为平稳随机过程,实例表明这种分析是能够满足一般工程的精度要求的。

一般常用的平稳随机过程地震模型有:平稳脉冲随机过程模型、白噪声随机过程模型、过滤白噪声随机过程模型、平稳高斯随机过程模型等等。早期的研究多是平稳脉冲随机过程模型。白噪声随机过程模型在数学上处理简单,分析随机响应亦方便。60年代发展起来的过滤白噪声模型对白噪声模型作了改进,更加符合实际情况。

平稳随机过程地震模型仅仅适用于弹性振动系统,一旦系统中出现塑性区,就必须采用非平稳随机过程地震模型,进行弹塑性响应分析。常用的非平稳随机过程地震模型有:非平稳脉冲系列和散粒噪声模型、非平稳高斯过程模型、过滤散粒噪声模型、过滤非平稳高斯过程模型、Shinozuka地震模型、分段平稳随机过程模型等。

迄今为止,一般假定整个地基或整个基础作同样的振动,对具有很大基础的结构(如坝)、大跨度多支撑结构(如桥梁、地下管线)、长的地下结构(如地铁)等,这种假设是不合适的,一般会导致对结构物响应的偏保守估计。因此,对该类结构,应将地震运动模型简化为随机场,用空间—频率互谱密度来描述。

(2) 确定性系统的随机分析方法

对振动系统最简单的处理方法是假设系统是线弹性的。依据叠加原理,线性系统的动态特性还可以用系统对典型激励的响应来描述,脉冲响应矩阵与频率响应矩阵是最常用的两种,此时不变线性系统还可用模态(固有频率与振型)来描述。脉冲响应矩阵、频率响应矩阵及模态可由给定的运动微分方程求得,亦可由实验直接测得。可以证明各种描述方法是等价的。在随机振动中,对应于线性系统的每一种描述方法,都有一种或多种预测随机响应的方法,各种方法各有千秋。预测方法的选择取决于系统的动态特性是由何种方式给出,也取决于所求响应的内容及其精度。

近20年来,对于随机动力荷载作用下的结构非线性响应的研究受到重视。这是由于,从安全和经济的角度考虑,一方面需要计算极限承载能力,另一方面对一些概率不大的强烈荷载作用时,应当允许结构响应进入非线性或塑性状态。现行抗震设计规范明确规定:抗震结构的设计原则是“小震不坏,中震可修,大震不倒”。所谓中震可修和大震不倒,即指结构在使用期限内出现概率不大的基本烈度地震和罕遇地震时允许结构进入非线性、塑性阶段。非线性响应分析及其可靠度分析是极为复杂的。目前流行的分析方法大多是近似方法,这些方法大致分为五类:Fokker-Planck-Колмогоров法(简称FPK法)、等效线性化法、摄动法、振型分析法、数值模拟法。

随机振动理论中,激励与响应的关系以随机微分方程表示。随机过程与随机场的微积分有三种,第一种是样本微积分,它基于随机过程与随机场为样本函数之集合的定义,在处理现实问题时,这种微积分最为合理,但是由于数学上的困难,这种方法很难推广实用;第二种是伊藤($It\hat{o}$)微积分,它是专门处理马尔柯夫型随机过程与随机场而发展起来的,目前的随机微分方程与随机稳定理论中大多是采用这种微积分;第三种是 P 阶微积分,或 L^P -微积分。均方微积分是其中的特殊情形,该方法:①用二阶矩定义,而二阶矩是工程问题中最为关注的数字特征;②推导与应用步骤基本与普通确定性函数的微积分相同;③对高斯随机过程或高斯随机场,可从均方微积分的性质推导出样本微积分的性质,所以均方微积分方法应

用颇广。

矩函数微分方程法,简称矩方程法,是预测线性及非线性系统的随机响应统计量的一种常用方法。其原理是,将描述线性及非线性系统随机振动的随机微分方程、边界条件及初始条件转换为响应与激励的矩函数所满足的确定性微分方程、边界条件及初始条件,然后在确定性的边界条件及初始条件下求解确定性的矩方程,由此得到所需响应统计量。这种方法首先为 Wang 与 Uhlenbeck 所求,他们在 FPK 方程的基础上,推导并求解了离散线性系统对白噪声响应的方差矩阵所满足的代数 ЛЯПУНОВ 方程。

(3) 非确定性系统的随机分析方法

实际工程中,许多结构系统的材料特性(弹性模量、泊松比)、几何尺寸等是空间坐标的函数,称这种结构为随机结构。描述随机结构运动过程的振动微分方程是具有空间随机变系数的偏微分方程。对这种结构系统用解析方法预测系统响应的统计量是很困难的,目前行之有效的数值计算方法是随机有限元法。

随机有限元法是将确定性的有限元与概率方法(一次二阶矩法、Monte Carlo 法)相结合的方法。70 年代初,Corhol 提出了有限元与一次二阶矩法相结合的思想,至 80 年代初 Hisadn、Nakagiri 对此进行了较为系统的研究,包括静力分析、独立特征值问题及含有随机阻尼的结构振动分析等。一次二阶矩法有限元,目前主要用于静力分析及随机特征值问题,用于随机结构的动力响应分析尚未成功。Monte Carlo 有限元的基本思想是,根据参数的分布特征,产生伪随机数,每一次试算中,变系数微分方程转化为常系数微分方程,即将求解随机结构动力响应统计量的问题,转化为求解确定性结构动力响应统计量的问题,使问题得到简化。

随机结构的参数一般是空间坐标的随机函数,它们可模型化为随机场。当一个结构含几个相关的随机参数时,它们可模型化为一个矢量随机场。作用于系统的随机动荷载(激励)也可模型化为随机场。在随机有限元分析中,需将随机场离散化。迄今,有三种离散化方法。

第 1 种是最早亦最简单的方法,取场在有限元节点上的随机变量代表该单元的场,每单元内的随机场被认为是完全相关的。两单元间场的相关性由单元中点的随机变量间的协方差来近似描述。

第 2 种方法是,单元上的随机场由场在单元节点上的随机变量通过形函数进行插值得到。随机场的相关特性由节点随机变量的协方差矩阵来近似描述,由于在估计刚度矩阵及其变动率时计算繁杂,这种方法较少被采用。

第 3 种方法是,单元上的随机场由场在单元上的局部平均值来代表,随机场的相关特性由局部平面的协方差矩阵来近似描述。该方法与确定性有限元法中假定每单元的材料为均质是一致的,并且在收敛性方面优于第一种方法。

(4) 动力可靠性分析方法

可靠性的研究始于本世纪 30~40 年代,对于工程中的不确定现象,早在 1926 年 Mayer 指出安全因子 K (亦称安全系数或强度储备)具有随机性。航空工业首先对结构进行可靠性分析,Freudenthal 于 1947 年将可靠性分析方法引入土木工程领域,其后土木工程的可靠性分析的数学理论有了很大发展。目前,以二次矩模式为基础的结构可靠性分析方法已进入实用化阶段,并成为制定相关行业规范的理论依据。

动力可靠性理论是由随机振动理论发展起来的一门新兴学科,是结合动力学理论与概率论方法,来研究系统在随机动荷载作用下的可靠性。随机振动系统的动力可靠性以复杂的形式依赖于动态系统的特性、激励性质及大小、安全区的构造、系统的初始及边界条件。动力可靠性分析的内容涉及:①系统动力破坏(或失效)机理、准则及机制;②系统参数的统计识别或统计推断;③荷载的统计特征;④动力响应分析的概率分析;⑤基于某种破坏(或失效)准则的可靠性分析。

动力可靠性理论的发展历史较短,所涉及的问题十分复杂和广泛,许多问题的解决常依赖于过分简化的计算模型,例如将多自由度体系简化为单自由度体系或一个起主要作用的振型分量,而系统的破坏机制采用首次穿越破坏模型或累积疲劳损伤破坏模型。但随着研究的进一步深入,相信这一理论将得到迅速的发展和应用。

第2章 土的动力特性及其液化

2.1 地震液化研究现状

2.1.1 地震液化研究发展概况

土的动力强度及其液化特性的研究是土动力学领域中的一项重要内容。液化现象一般是指饱和砂土在振动荷载作用下,其抗剪强度完全丧失而失去稳定的现象。早在1936年,Casagrande就曾试图用临界孔隙比的概念解释砂土的液化现象。后来,马斯洛夫(1954)根据砂土的振动压密试验结果,提出了临界加速度的概念,并建立了一套饱和砂土稳定性动力破坏的渗透理论。前者主要以直剪或三轴剪切试验结果作为依据,而后者则是将一装满饱和砂土的圆筒置于振动台上进行振动液化试验。50年代末,在黄文熙教授的倡导下,用振动三轴仪进行砂土液化研究的方法日益受到重视^[2],并开展了大量的试验研究工作,取得了丰硕的成果。60年代以来,振动三轴试验技术逐渐在国内外得到普及,现已成为一项常规的试验方法。

利用振动三轴试验可以测定饱和砂土在排水及不排水条件下孔隙水压力的变化,从而可以用有效应力的概念去解释砂土的液化特性。在这一方面,汪闻韶^{[1],[3]}(1962)等作了许多开拓性的工作,较早提出了饱和砂土振动孔隙水压力的扩散及消散规律,并在后来的研究中作了进一步的改进^[4](1981),将马斯洛夫的一维动力渗透理论扩展到三维问题。60年代以来,世界范围内地震活动的频繁发生,特别是1964年日本新泻地震和美国阿拉斯加地震所引起的大规模的饱和砂土地基及大量建筑物的液化和失稳破坏极大地推动了对土的液化特性的深入研究及土动力学学科的迅速发展。Seed和Lee^[5](1966)发表了采用振动三轴试验模拟饱和砂层在地震波水平循环剪切作用下砂土地震液化的定量分析结果。Seed和Lee在其研究中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。之后,关于砂土地震液化及与地震液化密切相关的振动孔隙水压力变化规律的研究在国外得到迅速发展。这其中,有代表性的如Martin和Finn^[6](1975)、Finn^[7](1981)、Seed和Idriss^[8](1983)等人的系统研究。70年代后期,Casagrande重新调整了他以前提出的“临界孔隙比”的概念和试验方法,又提出“流动结构”及“稳态抗剪强度”等概念。沿着这一思路,Castro^[9](1977)、Dobry(1984)、Poulous^[10](1985)等人作了系统的研究工作。以上的研究工作体现了当今对饱和砂土振动液化问题(如液化机理的认识、液化的研究途径、液化的试验方法及液化的计算等方面)还存在着两种明显不同的观点。

关于地震液化分析方法,除已广泛采用的总应力法外,考虑孔压增长和消散的有效应力法及弹塑性动力分析方法也得到广泛研究。研究的内容也从较早的一维地震液化问题发展到二维及三维问题,从简单规则荷载作用条件下的试验研究发展到考虑多向振动、复杂应力

路径的不规则荷载作用条件下的试验研究,从多种类型的单纯室内试验研究发展到考虑现场实际条件的原位测试研究,从室内循环试验研究到能利用动力离心模型试验技术再现地震响应,继而研究其液化特性的研究。

继 50 年代黄文熙、汪闻韶等人开创性的研究工作以后,特别是我国相继发生的邢台、海城和唐山大地震后许多实际课题的广泛提出,使得我国岩土工程界在砂土振动液化等领域的研究也取得了很大进展,其中包括砂土振动孔隙水压力的产生和消散问题的理论研究及其在工程计算中的广泛应用,如刘颖^[11]、沈珠江^[12]、徐志英^[13]、谢定义^[14]、魏汝龙^[15]、周健^[16]、刘汉龙^[17]等人的研究工作。

迄今为止,土的液化特性的研究已日益深入和广泛,但由于地震液化机理及其影响因素的复杂性,也由于地震发生的频繁性及其不可预测性,因此对土液化特性的认识还远远不够,仍是一个值得岩土工程界十分重视的研究课题。

2.1.2 地震液化机理及其影响因素

土体的液化机理及其影响因素一直是液化研究中的一个重点和难点。Casagrande (1936)早期曾用临界孔隙比的概念解释砂土的液化现象,而 Seed 和 Lee(1966)则用孔压值作为判断砂土是否发生液化的依据,认为液化是由于饱和砂土在振动或循环荷载作用下孔隙水压力上升并导致强度完全丧失而造成土体的失稳和破坏。后来,Casagrande(1979)通过试验研究了“实际液化”(actual liquefaction)和“循环液化”(cyclic liquefaction)在物理意义上的区别,并提出了“流动结构”、“稳态变形”及“稳态抗剪强度”的概念。所谓稳态变形是指土体在一定法向有效应力和一定剪切应力作用下产生的常体积和等速率剪切变形的状态。此时的剪应力即为稳态强度。可以看出,这一观点比 Seed 等人提出的“初始液化”的观点更加切合解决土体液化的实际工程问题。

关于饱和砂土的液化机理大致可归纳为循环活动性(cyclic mobility)、流滑(flow slide)和砂沸(sand boil)三种类型^[18]。

(1) 循环活动性。循环活动性是指在循环剪切过程中,由于土体积剪缩和剪胀的交替作用而引起孔隙水压力反复升降而造成的间歇性液化和有限制的流动变形现象,它主要发生在中密和较密的饱和无粘性土中。Seed 等^[5](1966)在其早期所进行的饱和密砂固结不排水循环三轴试验中证明了这一现象的存在,发现试样仅在循环荷载作用的某些时刻出现孔隙水压力等于周围固结压力的情况,此时有效应力 $\sigma'_{3c} = 0$, 出现瞬态液化现象。这一现象随后被其他学者所证实。循环荷载作用初期的累积剪缩(伴随孔隙水压力的持续上升)及后期的加载剪胀和卸载剪缩的交替作用便形成了通常所称的循环活动性。循环活动性的产生不仅与砂土的密实程度有关,而且还与周围固结压力大小、主应力比、循环动应力幅及荷载循环次数等因素密切相关。研究表明,对于较密实的饱和砂土(如相对密度达 0.7),在适当的条件下也会出现“初始液化”,并出现有限度的流动。

Seed 等^[5]在其研究中还给出了出现初始液化时循环剪应力比与循环次数间的相互关系,这一关系后来被广泛应用于饱和砂土振动液化的判别中。并与相对密度、标准贯入试验、静力触探试验及地震震级建立了较多的经验关系。然而需要指出,即使在同一密度和同一周围固结压力下,这一关系与试样的制备方法也有密切的关系,而并不是唯一的。Yoshimi^[21](1984)对新泻密砂所进行的试验表明,原状样与重塑样的试验结果有显著差别,说明