

CHANGDI
DIZHEN
FANYING
FENXI
DAOLUN

场地地震反应 分析导论

白建方 编著

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

场地地震反应分析导论

白建方 编著

中 国 铁 道 出 版 社

2 0 1 0 年 · 北 京

内 容 简 介

本书系统地介绍了场地地震反应分析领域内有代表性的计算方法。

全书共分7章:绪论,场地地震反应分析中几类典型问题,一维场地模型地震反应分析,二维场地模型地震反应分析,三维场地模型地震反应分析的并行有限元方法,场地随机地震反应分析,场地地震反应分析中的常用软件。

本书可供从事土木工程防震减灾研究、区域性地震区划和地震安全性评价工作的工程人员和地震工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

场地地震反应分析导论/白建方编著. —北京:中国铁道出版社,2010.4

ISBN 978-7-113-10996-7

I. ①场… II. ①白… III. ①工程地震—地震反应分析 IV. ①P315.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 011159 号

书 名:场地地震反应分析导论
作 者:白建方 编著

策划编辑:江新锡

责任编辑:徐 艳

电话:010-63549495

电子信箱:xy810@eyou.com

编辑助理:陈小刚

封面设计:冯龙彬

责任校对:张玉华

责任印制:李 佳

出版发行:中国铁道出版社(100054,北京市宣武区右安门西街8号)

网 址:<http://www.tdpress.com>

印 刷:三河市华丰印刷厂

版 次:2010年4月第1版 2010年4月第1次印刷

开 本:787mm×1092mm 1/16 印张:16.25 字数:395千

书 号:ISBN 978-7-113-10996-7

定 价:35.00元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社读者服务部调换。

电 话:市电(010)51873170,路电(021)73170(发行部)

打击盗版举报电话:市电(010)63549504,路电(021)73187

前言

我国属于多地震国家,地震引起的建筑物和工程设施的倒塌和破坏导致了大量人员伤亡和经济损失。在历次震害调查中,经常会发现烈度异常现象,即某个局部地区的震害比其周围地区明显的重或轻的现象。烈度异常是由于局部地区的工程地质条件与周围地区有显著的差异引起的。这些工程地质条件包括地形、地貌、覆盖层的生成年代、厚度、土的软硬、地下水位的埋深等。通常,覆盖层是由几层土层组成。一般把覆盖层的组成、每层土的厚度、软硬叫做场地的土层条件。不同的场地土层条件是导致烈度异常的主要原因。

大震害及国际研究动态表明,目前对场地在地震作用下的性态远没有认识充分,岩土地震工程的研究水平与工程结构的抗震设计要求相比处于落后状态,对许多基本问题尚缺乏合理的分析方法,其中的很多问题是工程上急需解决的。一方面,作为地震波的传播介质,场地土的分布和动力特性对强地震动有着很大的影响,很大程度上决定着工程结构的地震动输入;另一方面,土体作为工程结构的地基,以及土坝、码头、岸堤、挡土墙等土工构筑物和天然边坡的材料,其变形和强度对结构的地震破坏影响非常大,在很多情况下甚至起着决定性作用。因此复杂场地的土层地震反应分析对确定上部结构的地震动输入模式和进行抗震安全性评价均具有重要意义。

本书系统地介绍了国内外在场地地震反应分析领域中有代表性的一些计算方法。全书主要内容包括:

第1章绪论部分介绍了场地地震反应分析的意义以及目前国内外在该领域的研究现状,并给出了进行场地地震反应分析的流程图。第2章集中介绍了几类在场地地震反应分析中常遇到的问题以及相应的处理手段,包括人工边界条件、土的动力本构模型、基岩地震动的选择以及土的阻尼问题。第3章至第5章属于场地的确定性研究方法,分别按场地的特点来组织内容。其中第3章介绍的是一维场地模型地震反应分析中常用到的解析法、半解析法和数值方法,数值方法中分别给出了时域内和频域内的不同解法。第4章介绍了二维场地模型的地震反应分析,分别给出了时域内不同地震波输入方式下土层反应的求解以及频域内场地地震反应分析的计算原理和步骤。第5章介绍了三维场地地震反应分析的并行有限元方法,分别介绍了计算原理、串行程序的设计和并行程序的实现。第6章集中介绍了场地的随机地震反应分析中几类有代表性的解法。最后在第7章对场地地震反应分析中常用的几种软件进行了介绍,既包括通用的有限元软件,也包括专业的土层分析计算程序。

本书的特点:一是针对性强,即仅对场地土层在地震作用下的求解方法进行了介绍;二是注重实用性。对场地进行地震反应分析的方法有很多,本书仅选择了其中比较成熟,便于应用到实际的一些方法进行了详细的介绍。在介绍每种方法时不仅给出了计算原理,还尽可能地给出了相应的计算步骤,以利于研究人员在实际中的应用。

在撰写本书的过程中,参阅并引用了同行的一些重要研究成果,书中部分内容得到了国家自然科学基金重点项目(编号:50538050)、河北省教育厅专项基金的支持,作者所在单位石家庄铁道学院为本书的编写工作创造了良好的外部环境;本书在出版过程中还得到了中国铁道出版社的大力帮助,在此一并表示深深的谢意。最后需要特别感谢的是我的博士生导师楼梦麟教授,先生孜孜不倦、严谨求实的治学风格,严于律己、谦逊和蔼的待人态度,使我看到了真正的学者风范。人生中有幸追随恩师三年,幸莫大焉!

作者虽多年从事地震领域的科研与教学工作,但限于水平和知识面的局限性,书中不免有疏漏之处,敬请读者批评指正。

白建方
2010年1月

目录>>>

第1章 绪 论	1
1.1 场地地震反应分析意义	1
1.2 场地地震反应分析研究现状	2
1.3 场地地震反应分析流程	4
参考文献	6
第2章 场地地震反应分析中几类典型问题	8
2.1 人工边界条件	8
2.2 土的动力本构模型	16
2.3 基岩地震动	24
2.4 土体的阻尼模型	27
2.5 本章小结	29
参考文献	30
第3章 一维场地模型地震反应分析	31
3.1 场地动力特性的测定与估算	31
3.2 一维场地模型地震反应分析的解析方法	34
3.3 变参数土层地震反应分析的半解析方法——直接模态摄动法	43
3.4 水平成层场地地震反应的时域分析法	47
3.5 水平成层场地地震反应的频域分析法	49
3.6 本章小结	57
参考文献	58
第4章 二维场地模型地震反应分析	59
4.1 土层地震反应分析的基本方程	59
4.2 动力方程的求解	61
4.3 土层时域分析中的阻尼矩阵	69
4.4 行波输入时有限元网格的划分原则	77
4.5 场地地震反应的频域分析法	81
4.6 本章小结	84
参考文献	85

第 5 章 三维场地模型地震反应分析的并行有限元方法	86
5.1 理论基础	86
5.2 一致输入下土层地震反应分析的约束子结构法	99
5.3 行波输入下土层地震反应分析的约束子结构法	112
5.4 串行有限元程序的面向对象分析与实现	115
5.5 并行有限元程序的面向对象分析与实现	123
5.6 程序性能测试与评价	135
5.7 土层有限元建模的两个问题研究	143
5.8 实际场地的并行有限元分析	147
5.9 本章小结	159
参考文献	160
第 6 章 场地随机地震反应分析	163
6.1 层状土层随机地震反应分析	163
6.2 基于模态摄动法的层状土层随机地震反应近似解法	174
6.3 基于虚拟激励法的场地随机地震反应近似解法	177
6.4 非线性土层复合随机振动的研究	179
6.5 本章小结	198
参考文献	199
第 7 章 场地地震反应分析中的常用软件	201
7.1 有限元方法和 CAE 技术	201
7.2 MSC 系列大型通用有限元软件介绍	202
7.3 ANSYS 程序及其并行计算功能的二次开发	206
7.4 一维土层地震反应线性化计算程序 LSSRLI-1. FOR	221
7.5 二维土层地震反应有限元计算程序 SR2D	223
7.6 三维土层地震反应分析并行有限元程序 ParaSR3D	232
7.7 本章小结	238
参考文献	239
附录 A 三维场地面向对象有限元程序主要类的接口	240
附录 B 上海铁路南站站房建筑工程勘察的静力触探分层参数表	246
附录 C 协均方差矩阵的相关结构分解	250
附录 D 一维等效线性化土层地震反应计算程序框图	251

第1章 绪 论

1.1 场地地震反应分析意义

我国属于多地震国家,对于我国的地震灾害,有一个“4,3,2”的说法,即占全球约 1/4 的人口承受了约 1/3 的大陆地震和约 1/2 的地震死亡人数^[1]。2008 年 5 月 12 日发生在我国四川省汶川县的 8.0 级特大地震,更是建国以来破坏性最强、波及范围最广的一次地震,地震强度超过了 1976 年的唐山大地震,造成近 7 万人遇难,4 万人受伤,累计受灾人数 4 555 万人,破坏特别严重的地区超过 10 万平方千米^[2]。地震灾害不仅导致了大量人员伤亡,而且导致了人类赖以生存环境的破坏。在目前地震短期预报尚无法取得突破性进展的情况下,提高工程结构的抗震水平则显得尤为重要。为此,不仅需要了解工程结构本身在地震作用下的表现,还需要对承载结构的地基或场地尤其是复杂场地在地震下的表现给予足够重视。一方面,土体作为土木建筑结构的地基,以及土坝、码头、岸堤、挡土墙等土工构筑物 and 天然边坡的材料,其变形和强度对结构的地震破坏影响非常大,在很多情况下甚至起着决定作用;另一方面,作为地震波的传播介质,场地土的分布和动力特性对强地震动有着很大的影响,很大程度上决定着工程结构的地震动输入。

概括起来,进行场地地震反应分析的意义反映在以下两方面:第一,它有助于进行地震动的分析,如从基岩地震动考虑局部地形地质影响后计算地表土层的地震动参数或地震动特性,以解决日臻完善、精细的上部结构抗震分析方法与相对粗糙的地震动输入模型之间的矛盾。第二,研究地基本身的抗震性能,如砂土液化、土体地震永久变形等,为地震动小区划的制定提供依据。

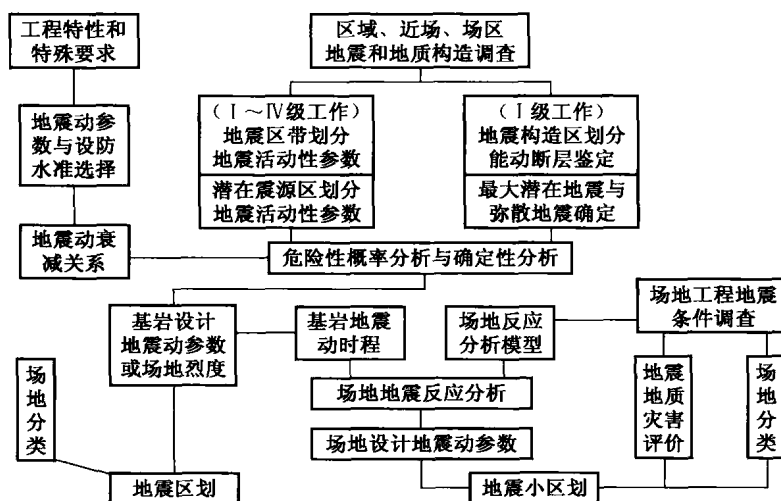


图 1.1 场地地震反应分析与地震安评工作其他环节的关系

图 1.1 反映了场地地震反应分析在地震安全性评价(地震安评)工作中的位置以及与其他各相关研究领域的关系^[3]。

1.2 场地地震反应分析研究现状

大震害及国际研究动态表明,对场地、地基性态远没有认识充分,岩土地震工程的研究水平与工程结构的抗震设计要求相比仍处于落后状态,对许多基本问题尚缺乏研究和合理分析方法,其中的很多问题是工程上急需解决的^[4]。由于场地反应分析的对象是土壤,和结构相比,它具有以下明显的特点:第一,土具有强烈的非线性。在地震作用下土体很快进入非线性阶段,这种非线性必须以某种适当的本构模型给予考虑^[5];第二,和结构尺寸相比,可以认为场地土壤向地下是没有边界的,因而在地震反应分析中必须考虑到这种半无限空间的特性,从而产生了半无限空间模拟、人工边界和几何扩散阻尼这样的问题^[6];第三,土中含有空气和水,属于非饱和的三相介质或饱和的二相介质,因此在场动力反应分析中又派生出了总应力法和有效应力法等问题^[7]。由此可见,进行复杂场地的土层地震反应分析涉及的因素很多,涉及面也很广,因此该领域既是当前岩土地震工程研究中的一个重点同时也是一个难点。

国内外学者在对土层的地震反应分析研究中遵循了由简单到复杂,由粗略到精细的发展轨迹。较早出现的是线弹性分析方法,随着对土性研究的加深及对场地效应估计精度要求的提高,研究人员又提出了等效线性化分析方法及具有清晰物理意义的非线性积分方法,并且基于动应力-动应变非线性滞回模型的所谓真非线性分析方法也逐步受到重视。从最早的线性总应力法,逐步发展为基于非线性有限元法基础上的有效应力动力分析方法和采用复杂弹塑性模型并考虑水土耦合作用的动力分析方法^[8],从一维问题发展到二维、三维问题。从确定性分析发展到随机性分析。下面简要介绍一下不同土层模型下的研究成果。

1.2.1 水平成层土层的地震反应分析

对于某些局部范围内场地条件较为均匀的简单情况,可以将场地介质模型简化为成层土层模型,这一模型属于一维场地模型。

Idriss 和 Seed 等(1968)用一维剪切梁模型求解剪切模量为常数的场地土及剪切模量沿深度按幂函数变化的场地土水平振动特性和地震反应^[9]。Wolf(1989)将土层简化模拟成截面积按指数函数随深度增加、符合材料力学原理的竖向杆件,研究了匀质自由场地土层的竖向振动^[10];Davis(1995)、Zhao(1996)等人将剪切模量沿深度按幂函数分布的场地土层等效成剪切模量沿深度按线性分布的场地土层,并对其进行了地面振动分析^[11];Zhao(1997)后又进行了剪切模量沿深度按幂函数分布的自由场地土的横向振动研究,并采用模态分析方法探讨了场地的等效模态辐射阻尼^[12]。

自从 Idriss 和 Seed 应用一维剪切波动方程求解土层水平振动特性和地震反应以来,国内在该模型基础上,对不同类型土层的动力特性和地震反应进行了大量分析。熊建国等(1986)分析了分层均匀土层的自振特性^[13]。栾茂田等(1992)直接运用分离变量方法对基岩上的水平成层非均质地基给出了自振特性和地震动力反应的解析解答^[14]。高玉峰等(1999)给出了在时间域内层状地基一维土层地震反应完全解析解,该解析解把地基简化为土柱,采用弹性元件和粘滞元件来模拟土的应力-应变关系^[15];楼梦麟(1997)则在土层一维剪切波动方程的基

基础上,利用均匀层状地基剪切振动模态函数,结合模态摄动原理,建立了一个求解变系数波动方程的近似方法。该方法将一个复杂的变系数二阶微分方程的求解转化为线性代数方程组的迭代求解,适用于任何变系数土层动力特性求解和地震反应分析^[16]。

除上述这些解析或半解析法外,针对一维场地模型,陈国兴等以南京深软场地为例,利用数值计算方法系统研究了水平成层场地的地震效应及其影响因素:包括采用不同本构模型的影响,软弱表层土、软弱夹层土、互层土等对场地地震效应的影响,场地条件、输入地震动力特性对场地地震效应的影响以及地震动输入界面的选取对场地地震效应的影响等,得出许多有工程参考价值的结论^[17-19]。

对于一维问题,许多学者还从随机的角度进行了研究。尤其近年来,李杰、陈建兵采用概率密度演化方法^[20],林家浩、张亚辉采用虚拟激励法^[21],楼梦麟、范么清采用直接模态摄动法^[22],均对水平成层场地随机地震反应分析问题进行了一系列的研究,不仅丰富了该领域的研究方法,还推动了土层随机地震反应分析逐步走向工程实用。

1.2.2 横向非均匀场地土层的地震反应分析

对于具有横向非均匀性的场地,一维地震反应分析方法将不再适用,需采用二维或三维地震反应分析方法。二维方法适用于土体沿竖向和一个水平方向变化明显而沿另一个水平方向变化不明显(可视为无变化)的场地地震反应分析。

采用解析方法分析复杂地形的地震反应,目前仅能得到很小一部分问题的解^[23]。Trifunac 和 Wong, Wong 和 Jennings 利用解析和半解析法研究了平面 SH 波在半圆形、半椭圆形等峡谷中的散射现象,得到了这些具有规则峡谷形态对于 SH 波散射影响的一些规律。袁晓铭和廖振鹏针对弹性半空间表面任意圆弧型凸起和凹陷边界两种出平面散射模型,概述了一种波函数展开法,很好地解答了对平面 SH 波的散射问题。吕晓棠和刘殿魁利用 Green 函数、复变函数及多极坐标法研究了浅埋裂纹附近的半圆形凸起地形对附近 SH 波的散射问题,讨论了裂纹对地表位移幅值的影响^[24]。

对于实际地形来说,其几何形态通常很不规则,其介质也是非均匀的,而且在强震下土体通常已进入非线性。此时采用前述解析方法将很难得到问题的解,因而对于实际复杂地形其地震反应分析通常借助于数值解。用数值方法分析场地地震反应时,首先遇到的一个问题是人工边界条件如何确定。人工边界是对无限连续介质进行有限化处理时,在介质中人为引入的虚拟边界。人工边界条件就是该边界上节点所需满足的人为边界条件,用于模拟切除的无限域影响。建立人工边界的方法,可广义地分为两大类:精确边界和局部边界。精确边界使人工边界满足无限域内土介质的场方程、物理条件和无穷远辐射条件,如边界元法、无穷元法。这类边界在有限元意义上是精确的。这类方法最大的缺点是使人工边界处所有的节点运动耦联^[3]。而局部边界的显著特征是其良好的实用性,人工边界任一节点的运动与其他节点(除临近节点外)解耦,其缺点是不满足向无穷远逸射的辐射条件。局部边界因其实用性强而获得较多的研究与应用。近半个世纪以来,国内外对人工边界条件进行了广泛而深入的研究,基于各种不同的思想提出了许多人工边界条件。实际上,人工边界最简单的处理方法就是避开边界条件问题,取人工边界至结构物的距离足够远,以使在人工边界处波的衰减趋近于零。这种处理方法被称为远置人工边界。楼梦麟和林皋根据平面应变中的波动方程,分析了不同激振频率下,波在传递过程中能量的衰减规律。分析表明,由于土介质的阻尼作用,设在较远处的人

工边界上的波动反射影响较小^[25]。楼梦麟和潘旦光在文献[26]与[27]中分别研究了一致输入和行波输入下二维场地模型远置人工边界的取值范围与场地深度的关系。

进行土层地震反应的数值分析时,可以采用有限元或有限元与其他技术相结合的方法。在采用有限元与其他技术相结合的方法时,通常是近场用有限元划分,远场则用其他方法来模拟,譬如边界元、无穷元等等。林皋和关飞采用半平面格林函数方法,借助于边界元和有限元的混合方法,研究了SH、P和SV型地震波在半平面地形突变处的散射问题^[28]。Bettes提出了一种映射无穷元,映射无穷元的特点是先建立单元在整体坐标系与局部坐标系的映射关系,然后在局部坐标系中进行分析^[29]。赵崇斌和张楚汉等利用有限元与无穷元耦合模型,导出了一种从无穷元与有限元交界面上进行地震波输入的方法^[30]。这种方法可以方便的求解均匀或成层地基在地震时的场地反应。金峰、张楚汉和王光纶利用有限元—无穷元—边界元耦合模型求解了半椭圆河谷上沉积土的地震响应^[31]。Song和Wolf则提出了映射边界有限元法。这种方法结合了边界元和有限元的优点,其本质特征是基于有限元的边界元方法,由此可以得到半无限土域的半解析解^[32]。这一类方法特点是对于某一类特定问题可以具备较高的计算精度,但对于其他土层反应分析问题不具有普适性,也就是特殊问题需特殊分析,可编程性差一些。

陈国兴等采用二维有限元方法研究了深软场地的弹塑性地震反应分析^[33],采用分时段等效线性有效应力法研究了动水压力的影响及砂土液化问题^[34],在虚拟激励法基础上,提出了一种场地地震反应随机分析的简化方法^[35]。

采用二维数值计算模型,楼梦麟、潘旦光等研究了上海地区土层地震反应分析中的几个典型问题,包括一致输入和多点输入地震反应的比较、基岩面倾角对地震反应的影响、不同假想基岩面的影响、土层动力参数变异性带来的影响等问题^[4,36,37]。

理论上来说,场地的土层地震反应分析问题属于三维问题,对于水平两个方向地形、地质变化不均匀的场地来说,应该采用三维模型。由于涉及到庞大的计算量,目前利用三维方法对土层进行地震反应分析的研究尚不多见。楼梦麟、白建方等提出了将动力子结构方法引入到土层地震反应分析领域的研究思路,对其中涉及到的一些问题提出了具体的解决办法,比如行波输入下有限元网格划分问题、动力子结构中多点输入的实现问题等等^[38-41]。

1.3 场地地震反应分析流程

一个具体的工程场地或城市场地,都是由一定的岩土体所构成,其中以松散土体最为多见。来自于震源的地震波,经过场地岩体、土体的滤波、放大,最后作用到工程。不同场地有不同地质环境,同一场地也有不同的地质环境,即所谓场地构成的不均一性。由不同地质环境下形成的岩土体构成的各种场地既有成因上的差别,也有物质组成、岩相结构、状态及物理力学(包括动力学)性质上的差别。作为地震波的传播介质,这些场地的差别必然会导致对地震波的传播、滤波和放大等效应,从而出现在不同场地地质条件下不同的地震反应特点。场地地震反应分析就是在搞清场地地质环境的基础上,应用地震波在介质中传播的基本理论与岩土体动力性状相适应的数学、物理模型对不同地质环境下地震动特点进行定量研究,并对各种场地地质条件下可能出现的地震反应做出预测,为不同地质环境条件下结构设计、震害预测提供地震反应方面的依据。因此,场地地震反应分析实质上是场地地震动预测问题,也是制定地震小

区划的一种基本手段和方法^[1]。

进行场地地震反应分析的具体目标是:根据场地地震反应特点进行场地地震反应分区;确定不同场地地质条件下设计反应谱;提供不同场地地质条件下地震动时程曲线,主要为加速度时程曲线。

如何通过场地地震反应分析,达到上述具体目标,这里有方法手段问题,也有实现的思路问题。通过前面对国内外研究现状的介绍,可以发现,在土层的地震反应分析领域,其研究手段无外乎以下三种:理论分析、试验研究和数值计算。随着计算机技术的发展以及考虑到土层自身的复杂性,数值计算越来越引起人们的重视。首先,对于实际场地这种几何形状和物理特性都很复杂的研究对象来说,用纯理论的方法很难获得解析解;其次,对于复杂场地进行足尺室内试验的可能性不存在,采用缩尺模型后,由于边界条件很难模拟且某些相似条件无法满足,则多少会影响到试验结果的适用范围。而现场试验则往往是针对具体工程进行的,作为对理论或数值计算的验证意义重大,但难以靠现场试验总结出适用于绝大多数场地的定性的规律,同时试验费用也相当高。基于上述考虑,目前在进行该领域的研究中,数值计算成为了主流方法,其中又以有限单元法为使用的最多的方法。

利用数值方法进行场地地震反应分析的具体思路是:

(1)把场地地震工程地质单元作为一个“结构体”,由场地地质特征和场地动力学特性来表示“结构体”特征,把来自震源、在大尺度范围传播的地震波作为输入,研究“结构体”的地震动效应,以地震反应谱或地震动时程作为场地地震反应输出。

(2)场地地震反应涉及到震源、波传播介质和场地地质环境三个方面。为了分析简便,可以分为两步,第一步先确定场地岩石地震动,作为现场输入;第二步根据“结构体”地震反应特征来确定场地地震动输出。

(3)以场地地质及其动力性质和震害经验为基础的场地地震工程地质单元是场地最小地震反应分析的单位,因此,在进行场地地震反应分析以前,应先进行场地地震工程地质单元划分。

(4)以场地地震工程地质单元的地震反应分析的结果(输出)为基础,结合场地基本地质环境和工程的使用,对地质单元地震反应进行归类与合并,以确定出场地地震反应的最终结果,实现场地地震反应分析具体目标,并作为场地地震反应分区——地震小区划的基础。

对于上述思路,可用场地地震反应分析流程图(图 1.2)来表示。

从图 1.2 可以看出,场地地震反应研究,主要由下列三部分组成:

(1)确定场地基岩地震动,它是场地地震反应分析的输入。这里涉及到输入地震波的选择、输入基岩面的等问题。

(2)场地地震单元及其动力性质研究,它是场地地震反应分析的具体对象——结构体,是建立地震反应分析模型的基础。此处涉及到土体的人工边界、土的动力本构关系、阻尼模型等问题。

(3)场地地震反应计算。把输入送到结构体,输出反映场地特征、满足一定目的的地震动,完成整个场地地震反应分析研究,也就是具体的场地地震反应计算的各种方法。

对于第(1)、(2)部分涉及的内容本书将在第 2 章仅引入一些成熟的理论和方法。第(3)部分则是本书介绍的重点。

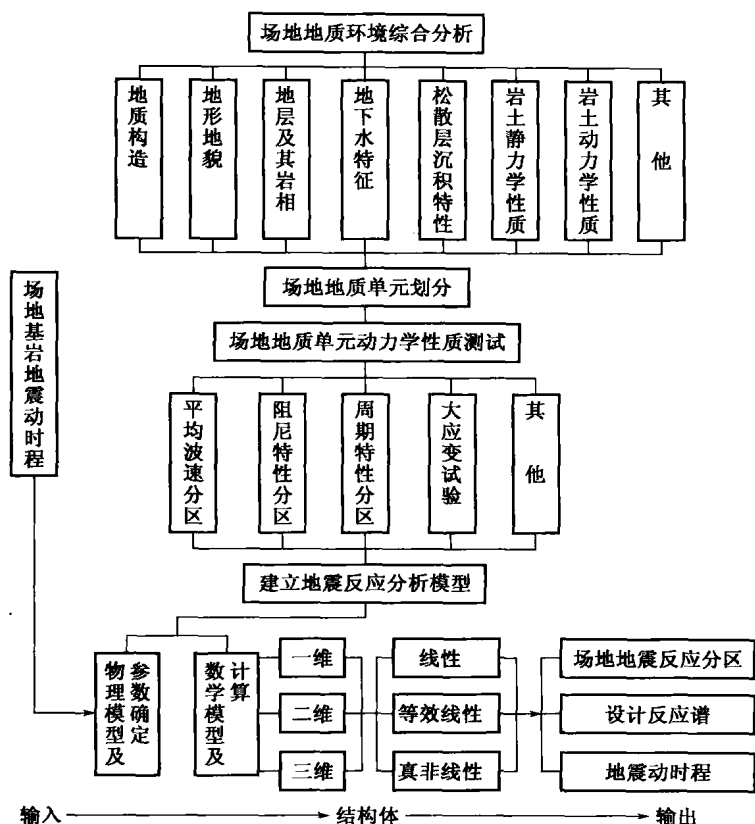


图 1.2 场地地震反应分析流程框图

参 考 文 献

- [1] 蒋溥,戴丽思. 工程地震学概论[M]. 北京:地震出版社,1993.
- [2] 于文,葛学礼,朱立新. 四川汶川 8.0 级地震都江堰周边村镇房屋震害分析[J]. 工程抗震与加固改造, 2008,30(4):45—49.
- [3] 上海市地震局,同济大学. 上海市地震动参数区划[M]. 北京:地震出版社,2004.
- [4] 陈国兴. 岩土地震工程学[M]. 北京:科学出版社,2007.
- [5] 谢定义. 土动力学[M]. 西安:西安交通大学出版社,1989.
- [6] 廖振鹏. 工程波动理论导论[M]. 第 2 版. 北京:科学出版社,2002.
- [7] 龚晓南. 土工计算机分析[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2000.
- [8] 任慧. 场地动力反应的理论分析与场地土动力特性试验研究[D]. 长沙:湖南大学,2005.
- [9] Idriss I. M., Seed H. B. Seismic response of horizontal soil layers[J]. Journal of the Soil mechanics and Foundations Division, ASCE, 1968, 94(4):1003—1031.
- [10] Wolf J. P. Dynamic soil-structure interaction[M]. Englewood Cliffs, Inc., Prentice-Hall, New Jersey, 1985.
- [11] Davis R. Effects of weathering on site response[J]. Earthquake Engineering and Structure Dynamics, 1995, 24(2):301—309.
- [12] Zhao J. X. Estimating modal parameters for a simple soft-soil site having a linear distribution of shear wave velocity with depth[J]. Earthquake Engineering and Structure Dynamics, 1996, 25(2): 163—178.

- [13] 熊建国,许贻燕. 分层土自振特性分析[J]. 地震工程与工程振动,1986,6(4):21—35.
- [14] 栾茂田,金崇磐,林皋. 非均质地基振动特性及地震反应分析[J]. 大连理工大学出版社,1992,32(1):81—87.
- [15] 高玉峰,金建新,谢康和. 成层地基一维土层地震反应解析解[J]. 岩土工程学报,1999,21(4):498—500.
- [16] 楼梦麟. 变参数土层的动力特性和地震反应分析[J]. 同济大学学报,1997,25(2):155—160.
- [17] 陈国兴,陈继华. 软弱土层的厚度及埋深对深厚软弱场地地震效应的影响[J]. 世界地震工程,2004,20(3):68—75.
- [18] 陈继华,陈国兴,史国龙. 深厚软弱土场地地震反应特性研究[J]. 防灾减灾工程学报,2004,24(2):131—138.
- [19] 陈国兴,陈继华. 地震动输入界面的选取对深软场地地震效应的影响[J]. 世界地震工程,2005,21(2):36—43.
- [20] 李杰,陈建兵. 随机结构非线性动力反应的概率密度演化分析[J]. 力学学报,2003,35(6):716—722.
- [21] 林家浩,张亚辉. 随机振动的虚拟激励法[M]. 北京:科学出版社,2004.
- [22] 范么清. 非线性复合随机振动方法研究及其工程应用[D]. 上海:同济大学土木工程学院,2007.
- [23] 薄景山. 土层地震反应分析方法比较研究[D]. 北京:中国地震局工程力学研究所,2004.
- [24] 吕晓棠,刘殿魁. SH波作用下浅埋裂纹附近半圆形凸起的地震动[J]. 地震工程与工程振动,2008,28(3):16—23.
- [25] 楼梦麟,林皋. 粘弹性地基中人工边界的波反射效应[J]. 水利学报,1986,17(6):20—30.
- [26] 楼梦麟,潘旦光,范立础. 土层地震反应分析中侧向人工边界的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版),2003,31(7):757—761.
- [27] 潘旦光,楼梦麟,董聪. 土层地震行波反应分析中侧向人工边界的影响[J]. 岩土工程学报,2005,27(3):308—312.
- [28] 林皋,关飞. 用边界元法研究地震波在不规则地形处的散射问题[J]. 大连理工大学学报,1990,30(2):145—152.
- [29] Bettess P. Infinite elements[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1977 (11):53—64.
- [30] 赵崇斌,张楚汉,王光纶,张光斗. 用无穷元研究土层特性对场地地震反应的影响[J]. 水利水运科学研究,1988(1):31—63.
- [31] 金峰,张楚汉和王光纶. 半椭圆河谷上沉积层地震响应研究[J]. 清华大学学报,1993,33(5):23—30.
- [32] Song. Ch, Wolf. J. P. Consistent infinitesimal finite-element cell method; three dimensional vector wave equation[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1996, 39: 2189—2208.
- [33] 庄海洋,陈国兴,朱定华. 土体动力黏弹塑性记忆型嵌套面本构模型及其验证[J]. 岩土工程学报,2006,28(10):1267—1272.
- [34] 陈国兴,谢君斐,韩炜等. 土体地震反应分析的简化有效应力法[J]. 地震工程与工程振动,1995,15(2):52—61.
- [35] 陈国兴,谢君斐,张克绪. 土坝地震性能二维随机分析方法[J]. 地震工程与工程振动,1994,14(3):81—90.
- [36] 楼梦麟,严国香,沈建文等. 上海软土动力参数变异性对土层地震反应的影响[J]. 岩土力学,2004,25(9):1368—1372.
- [37] 潘旦光. 复杂场地的土层地震反应分析[D]. 上海:同济大学土木工程学院,2003.
- [38] 白建方. 复杂场地土层地震反应分析的并行有限元方法[D]. 上海:同济大学土木工程学院,2007.
- [39] 白建方,楼梦麟. 基于动力子结构方法的场地地震反应分析方法[J]. 震灾防御技术,2008,3(2):145—154.
- [40] 白建方,楼梦麟. 考虑局部非线性的复杂场地地震反应分析的约束模态综合法[A]. 第16届全国结构工程学术会议论文集(第Ⅲ册)[C]. 北京新闻出版局批准出版,2007,14—19.
- [41] 白建方,楼梦麟. 复杂场地土层有限元建模的两个问题研究[J]. 岩土工程界,2008,11(9):27—30.

第2章 场地地震反应分析中几类典型问题

2.1 人工边界条件

用有限元法分析场地地震反应时,需从半无限的地球介质中切取感兴趣的有限计算区域。在切取的边界上需建立人工边界以模拟连续介质的辐射阻尼,以保证非均匀土介质中产生的散射波从有限计算区域内部穿过人工边界而不发生反射。因此,人工边界是对无限连续介质进行有限化处理时,在介质中人为引入的虚拟边界。人工边界条件就是该边界上结点所需要满足的人为边界条件,用于模拟切除的无限域影响。人工边界条件理论上应当实现对原连续介质的精确模拟,保证波在人工边界处的传播特性与原连续介质一致,使波通过人工边界时无反射效应,发生完全的透射或被人工边界完全吸收。人工边界条件对无限域模拟的准确与否将直接影响近场波动数值模拟的精度。因此,人工边界条件的研究具有重要意义。

建立人工边界的方法,可广义地分为两大类:精确边界和局部边界。第一类方法使人工边界满足无限土介质的场方程、物理边界条件和无穷远辐射条件,如边界元法、无限元法、这类边界在有限元意义上是精确的,并能设置在不规则构造物和周围介质的界面上。这类方法最大的缺点是使人工边界所有的节点运动耦联。而局部边界的显著特征是其良好的实用性,人工边界任一点的运动与其他节点(除邻近节点外)解耦,其缺点是不满足向无穷远逸射的辐射条件。局部边界因其实用性强而获得较多的研究与应用。这类方法的研究思路有三种:一是从物理波动方程传播性质出发;二是从单侧波动解的微分方程直接离散;三是从阻尼吸能的概念出发,建立边界点应力与速度的关系。

近40年来,国内外对人工边界条件进行了广泛而深入的研究,基于各种不同的思想提出了许多人工边界方法。应用较多的人工边界有以下几种:透射边界、黏性边界、一致边界、Simth叠加边界、旁轴边界、Higdon边界、黏弹性边界等,但到目前为止,还没有一种得到科学界、工程界广泛认可,性能良好、计算简便的人工边界条件。这里仅对应用比较普遍的几类边界条件予以较详细的阐述。

2.1.1 透射边界^[1]

在实际的土介质中人工边界并不存在,建立这一虚拟人工边界最自然的办法是直接边界上模拟波从有限计算模型的内部穿过人工边界向外透射的过程。设某一入射波以视速度 c_x 沿 x 轴从左侧射向人工边界点 O ,入射波以视波速 c_x 沿 x 轴的视传播可以表示为:

$$u(t, x) = f(c_x t - x) \quad (2-1)$$

式中, $u(t, x)$ 为点 x 在 t 时刻的位移; $f(*)$ 为波动自变量 $c_x t - x$ 的任一函数。

由式(2-1)可知 u 为波动自变量 $c_x t - x$ 的函数,因此:

$$u(t + \Delta t, x) = u(t, x - c_x \Delta t) \quad (2-2)$$

式中, Δt 为时间步距。

式(2-2)表明入射波以视波速 c_x 沿 x 轴的视传播可以通过用点 $x - c_x \Delta t$ 在 t 时刻的位移替换点 x 在 $t + \Delta t$ 时刻的位移来模拟。

由于视速度 c_x 是未知的,为此,假定入射波的物理视速度 c_x 为人工波速 c_a 所替换,则式(2-2)可写成

$$u(t + \Delta t, x) = u(t, x - c_a \Delta t) + \Delta u(t + \Delta t, x) \quad (2-3)$$

式(2-2)的误差项可表示为

$$\Delta u(t + \Delta t, x) = u(t + \Delta t, x) - u(t, x - c_a \Delta t) \quad (2-4)$$

将式(2-1)代入式(2-4)可知,对于给定的 c_x, c_a 和 Δt ,此误差项为 $c_x t - x$ 的函数。此处是导出多次透射公式的关键。若给定 c_x, c_a 和 Δt ,则此误差项可写成

$$\Delta u(t + \Delta t, x) = f_1(c_x t - x) \quad (2-5)$$

式中, $f_1(*)$ 为波动自变量 $c_x t - x$ 的函数。

式(2-5)表明, $\Delta u(t + \Delta t, x)$ 也是以相同波速 c_x 沿 x 轴传播的波。基于这一观察并仿效式(2-3),误差波 $\Delta u(c_x t - x)$ 可以表示成

$$\Delta u(t + \Delta t, x) = \Delta u(t, x - c_a \Delta t) + \Delta^2 u(t + \Delta t, x) \quad (2-6)$$

将式(2-4)中的 t 和 x 分别换为 $t - \Delta t$ 和 $x - c_a \Delta t$,则得

$$\Delta u(t, x - c_a \Delta t) = u(t, x - c_a \Delta t) - u(t - \Delta t, x - 2c_a \Delta t) \quad (2-7)$$

而式(2-6)的误差项为

$$\Delta^2 u(t + \Delta t, x) = \Delta u(t + \Delta t, x) - \Delta u(t, x - c_a \Delta t) \quad (2-8)$$

将式(2-6)代入式(2-3)可得

$$u(t + \Delta t, x) = u(t, x - c_a \Delta t) + \Delta u(t, x - c_a \Delta t) + \Delta^2 u(t + \Delta t, x) \quad (2-9)$$

容易看出, $\Delta^2 u(t + \Delta t, x)$ 仍然是波动自变量 $c_x t - x$ 的函数,而且用类似方式引入的高阶误差项 $\Delta^3 u(t + \Delta t, x) \dots$ 均为波动自变量 $c_x t - x$ 的函数。因此,式(2-9)可以写成一般形式:

$$u(t + \Delta t, x) = u(t, x - c_a \Delta t) + \sum_{m=1}^{N-1} \Delta^m u(t, x - c_a \Delta t) + \Delta^N u(t + \Delta t, x) \quad (2-10)$$

$$\Delta^m u(t, x - c_a \Delta t) = \Delta^{m-1} u(t, x - c_a \Delta t) - \Delta^{m-1} u(t - \Delta t, x - 2c_a \Delta t) \quad (2-11)$$

$$\Delta^N u(t + \Delta t, x) = \Delta^{N-1} u(t + \Delta t, x) - \Delta^{N-1} u(t, x - c_a \Delta t) \quad (2-12)$$

设人工边界点 O 为 x 轴的原点 $x=0$,在计算区(负 x 轴)上离散计算点(图 2.1 中“•”)的坐标为 $x = -jc_a \Delta t, t = p\Delta t, j$ 和 p 为整数,记

$$u_j^p = u(p\Delta t, -jc_a \Delta t) \quad (2-13)$$

$$\Delta^m u_j^p = \Delta^m u(p\Delta t, -jc_a \Delta t) \quad (2-14)$$

略去式(2-10)的误差项 $\Delta^N u(t + \Delta t, x)$,并利用式(2-13)和式(2-14)的记号,则式(2-10)成为一个离散的局部人工边界条件:

$$u_0^{p+1} = u_1^p + \sum_{m=1}^{N-1} \Delta^m u_1^p \quad (2-15)$$

由误差波的定义式(2-14)和(2-11),可以证明:

$$\Delta^m u_1^p = \sum_{j=1}^{m+1} (-1)^{j+1} C_{j-1}^m u_j^{p+1-j} \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (2-16)$$

式中二项式系数为

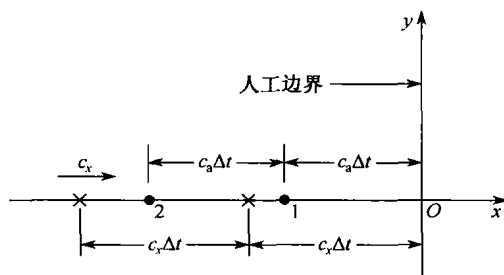


图 2.1 推导多次透射公式的几何关系

$$C_j^m = \frac{m!}{(m-j)! j!} \quad (2-17)$$

将式(2-16)代入式(2-15)可得

$$u_0^{p+1} = \sum_{j=1}^N (-1)^{j+1} C_j^N u_j^{p+1-j} \quad (2-18)$$

这就是 N 阶多次透射公式。一般意义上,式(2-18)中 u_j^p 应理解为入射波总位移矢量或此矢量的一个位移分量在计算点 $x = -j c_a \Delta t$ 和时刻 $t = p \Delta t$ 的取值。多次透射公式的显著特征是它完全由一个可以调节的参数(人工波速 c_a)控制,而与入射波表达式的具体细节无关。

对于稳态波动,设

$$u_j^p = U_j e^{i\omega p \Delta t} \quad (2-19)$$

式中, U_j 为计算点 j 的振动幅值。

将式(2-19)代入式(2-18),可得频域多次透射公式如下:

$$U_0 = \sum_{j=1}^N (-1)^{j+1} C_j^N a^{-j} U_j \quad (2-20)$$

式中

$$a = e^{i\omega \Delta t} \quad (2-21)$$

多次透射公式(2-21)是用计算点的位移表示的,但计算点 $x = -j c_a \Delta t$ (图 2.1 中“•”点)与有限元的离散节点 $x = -n \Delta x$ (图 2.1 中“×”点)一般不重合,为了使式(2-18)直接用于有限元计算,需要将计算点位移 $u_j^p = u(p \Delta t, -j c_a \Delta t)$ 用节点位移 $u_i^p = u(p \Delta t, -i \Delta x)$ 表示出来。这可以用多种内插方法实现。这里,将用一种具有二阶精度的三点内插方法说明多次透射公式的实用形式。一阶透射所需 u_1^p 可用以下插值公式求得

$$u_1^p = \sum_{k=1}^3 t_{1,k} u_{k-1}^p \quad (2-22)$$

式中

$$t_{1,1} = \frac{(2-s)(1-s)}{2} \quad (2-23a)$$

$$t_{1,2} = s(2-s) \quad (2-23b)$$

$$t_{1,3} = \frac{s(s-1)}{2} \quad (2-23c)$$

$$s = \frac{c_a \Delta t}{\Delta x} \quad (2-23d)$$

对于二阶透射,除 u_1^p 外,还需用插值方法确定 u_2^{p-1} 。为此,先用类似式(2-22)的公式求得 $(p-1)\Delta t$ 时刻在计算点 $x = -c_a \Delta t$, $-\Delta x - c_a \Delta t$ 和 $-2\Delta x - c_a \Delta t$ 的位移,再用这三个位移值内插 u_2^{p-1} ,由此得到如下内插公式:

$$u_2^{p-1} = \sum_{k=1}^5 t_{2,k} u_{k-1}^{p-1} \quad (2-24)$$

式中

$$t_{2,1} = t_{1,1}^2, \quad t_{2,2} = 2t_{1,1}t_{1,2}, \quad t_{2,3} = 2t_{1,1}t_{1,3} + t_{1,2}^2, \quad t_{2,4} = 2t_{1,2}t_{1,3}, \quad t_{2,5} = t_{1,3}^2$$

将以上内插方法推广,式(2-18)包括的计算点位移可用式(2-25)确定:

$$u_j^{p+1-j} = \{T\}_j \{u\}_j \quad j=1, 2, \dots, N \quad (2-25a)$$