

地下结构 抗震

■ 郑永来 杨林德 编著
李文艺 周 健

同济大学出版社



土木工程系列丛书

地下结构抗震

郑永来 杨林德 等编著
李文艺 周 健

同济大学出版社

内容提要

本书主要论述地下结构震害及其特点、地下结构抗震计算与设计方法、地下结构抗震构造措施等,具体包括地下结构抗震概论、地下结构震害、地震与地震区划、地震作用下土的动力特性及土层动力响应计算、土-结构体系的动力相互作用、岩上中的应力波、动力计算的边界、地下结构抗震计算方法、地下结构抗震模型实验以及抗震设计原则与构造措施等。本书包含了作者近年来在该领域内的研究成果,并结合我国的实际示例介绍了地下结构抗震原理及其分析计算方法。

本书可供从事抗震工程的设计、研究人员参考,亦可作为高等院校土建专业、地下结构专业研究生及高年级学生的教学参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

地下结构抗震/郑永来等编著. —上海:同济大学出版社, 2005. 8

(土木工程系列丛书)

ISBN 7-5608-2952-X

I. 地… II. 郑… III. 地下工程 抗震设计
IV. TU92

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 029686 号

· 土木工程系列丛书 ·

地下结构抗震

编 著 郑永来 杨林德 李文艺 周 健 等

责任编辑 郝 达 责任校对 杨江淮 封面设计 李志云

出 版 行 同济大学出版社

(上海四平路 1239 号 邮编 200092 电话 021-65985622)

经 销 全国各地新华书店

印 刷 同济大学印刷厂印刷

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 16.5

字 数 422000

印 数 1 3100

版 次 2005 年 8 月第 1 版 2005 年 8 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 7-5608-2952-X/TU·609

定 价 25.00 元

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换

序 言 一

地震是困扰人类的一大自然灾害。减轻因地震造成的生命财产损失的途径主要是工程抗震。第二次世界大战结束后的半个世纪以来,随着科学技术和工程建设的突飞猛进,地震工程的理论和实践得到了很大的发展,人们已经能够对高度复杂的结构体系运用电子计算机作出非线性地震反应的理论分析计算,并以大型模拟地震振动台的试验作为辅助和检验,从而建立了能较好反映实际的工程抗震设计方法。由此,许多对抗震安全度要求很高的建筑物,如超高层建筑、核电站、大跨度桥梁等,都得以成功兴建并蓬勃发展,其中的不少工程已经经受了地震的考验。应该说这方面的进步和成就是很大的。

然而,就在最近的二十余年来,全球发生的许多大地震仍然造成了大量严重的工程破坏和惨重的生命财产损失,例如,1976年的我国唐山地震、1994年的美国诺斯雷奇地震、1995年的日本阪神地震等。其中,要特别指出的是地下结构的震害问题。地下结构物一旦发生严重震害,不仅可能对其附近的地面构筑物造成影响,而且其本身修复困难而又代价昂贵,更为严重的是,它的破坏还会危及城市生命线工程的安全。虽然,面对这种巨大的自然破坏力,人为的工程设计仍难于确保万无一失,但是,对地下工程破坏现象的许多研究已表明,毁灭性震害还是有可能避免和防范的,前车之鉴给予人们丰富而深刻的教训和启示,以进一步开展有关的研究工作和改进工程抗震设计方法。

本书作者们长期从事地下结构抗震、土动力学以及地震工程等方面的学科研究,做了许多地下结构的抗震分析和设计研究,积累了不少新的成果和经验,此有意编印付梓,可以填补在系统介绍地下结构抗震理论与实践方面的研究空缺,并为这一学科领域的研究生、教师和相关领域的研究、设计人员提供阅读与参考,相信本书的出版将会有助于促进地下结构抗震工程有关科学技术和设计研究工作的发展。是为序。

中国科学院院士

孙 钧

2005 年仲春

序 言 二

地下结构在城市建设、交通运输、能源开发和国防工程等方面获得广泛应用。随着工农业生产的发展和城市化程度的提高,地下结构的重要性日益明显。目前,在世界范围内地下空间开发利用的热潮正方兴未艾。我国大部分地区为地震设防区,随着地下结构建设规模的扩大,地下结构的抗震安全对于人民生命财产的保障以及城市生活的正常运行有着极为重要的意义。

地下结构地震响应的特点与地面结构有很大的不同。地下结构受到周围岩土介质很强的约束作用,在地震作用下自振特性表现得不很明显。地下结构的地震响应主要受周边岩土介质的相对变形所控制。

历史上发生的多次大地震使地下结构遭受到一定程度的震害。而且,这种震害往往不易发现,同时修复困难,增加了问题的复杂性。国内外现有抗震设计规范、标准关于地下结构抗震设计的内容相对都比较简略,难以适应地震区地下结构建设的发展。同济大学编写的《地下结构抗震》一书,对地下结构的震害、地震波特性、抗震设计方法和抗震措施作了比较全面系统的介绍,相信会对从事地下结构抗震设计和研究的读者们有所帮助,并将促进我国地下结构抗震设计水平的提高。

中国科学院院士



2005 年 4 月

前 言

20 世纪五六十年代以后,随着各国经济建设的发展,城市化进程加速,为解决城市建设中的各种问题,地下空间开发逐渐得到重视,地下结构的建设也逐渐增多,如地铁、地下停车场、地下街、各种地下管线等。地下结构的抗震设计也进入人们的视野,各类地下结构的设计计算中开始考虑地震的影响。1995 年以前,抗震工程学者曾指出:关于地下结构,虽然迄今尚无严重震害事例,但从地下结构受震破坏的经验来看,可以设想这类结构今后仍有出现震害的可能,设计时对此应有必要的充分准备。数年后,此话不幸而言中。1995 年神户地震(亦称日本兵库县南部地震)中,神户市许多地下结构受到了不同程度的破坏,特别是部分地铁车站和区间隧道受到严重破坏,其中,大开站最为严重,一半以上的中柱完全倒塌,导致顶板坍塌和上覆土层大量沉降,最大沉降量达 2.5m 之多。由此引起了人们对地下结构抗震设计研究的重视。

对地面结构和地下结构来说,虽然结构的自振特性与地基振动场对结构动力反应产生重要影响,但对地面结构来说,结构的形状、质量、刚度的变化,即其自振特性的变化,对结构反应的影响很大,可以引起质的变化;对地下结构来说,对反应起主要作用的因素是地基的运动特性,结构形状的改变,而结构的自振特性一般来说对反应的影响相对较小,只引起量的变化。因此,在当前所进行的研究工作中,对地面结构而言,结构自振特性的研究占有很大的比重,而对地下结构而言,地基地震动的研究则占比较大的比重。

近年来,地下结构抗震方面的文献资料数量激增,内容丰富,涉及广泛,但研究的层次和角度不同。有研究震害预测的,有研究工程抗震设计的,有从事理论探讨和试验研究的,至于讨论问题的观点和见解,也不可能千篇一律。面对这一情况,作者结合自身所作的有关研究工作,力求从大量文献中找出具有相对共识的共同规律,使从事抗震设计的工作者或研究者通过本书了解当前地下结构抗震问题的发展现状和水平,地下结构抗震设计的主要特点和关键所在,以及认识和处理这些问题的基本设计原则和计算方法。

全书共十章,包括地下结构抗震概论(杨林德、郑永来)、地下结构震害(郑永来、杨林德)、地震与地震区划(李文艺)、地震作用下土的动力特性及土层动力响应计算(周健、贾敏才)、土-结构体系的动力相互作用(胡向东)、岩土中的应力波(黄茂松)、动力计算的边界(郑永来)、地下结构抗震设计计算方法(郑永来、马险峰)、地下结构抗震模型实验(季倩倩)、抗震设计原则和构造措施(杨林德)。韩文星、杨柳峰、陈一等为本书的文字输入和插图做了大量的工作。

本书由同济大学冯紫良教授主审,审稿中提出许多宝贵意见,作者在此深表感谢。

限于我们的水平和知识面的局限性,书中难免有疏漏乃至错误之处,敬请读者批评指正。

作 者

于同济大学地下建筑与工程系

2005 年 3 月

目 录

序言一

序言二

前 言

第一章 地下结构抗震概论..... (1)

第一节 引言..... (1)

第二节 地下结构地震反应的特点..... (3)

第三节 地下结构抗震分析方法的分类..... (3)

参考文献..... (9)

第二章 地下结构震害 (10)

第一节 引言 (10)

第二节 地下铁道的震害 (11)

第三节 地下管道震害 (26)

第四节 其他地下结构的震害 (44)

第五节 小结 (51)

参考文献 (51)

第三章 地震与地震区划 (53)

第一节 引言 (53)

第二节 地震成因与地震类型 (53)

第三节 地震波与地震观测 (56)

第四节 震源、震级和震中..... (57)

第五节 地震宏观破坏现象与震害 (57)

第六节 地震烈度与震害指数 (59)

第七节 烈度衰减规律 (61)

第八章 场地因素对烈度影响 (66)

第九章 中国的地震与地震区划 (68)

第十章 地下结构抗震计算地震输入波的确定方法 (70)

参考文献 (73)

第四章 地震作用下土的动力特性及土层动力响应计算	(74)
第一节 引言	(74)
第二节 土的动力本构模型	(75)
第三节 土的液化	(87)
第四节 地震作用下土层的动力响应计算	(98)
参考文献	(109)
第五章 土-结构体系的动力相互作用	(111)
第一节 引言	(111)
第二节 土-结构相互作用体系运动方程	(111)
第三节 运动方程的求解方法	(114)
参考文献	(121)
第六章 岩土中的应力波	(122)
第一节 引言	(122)
第二节 应力和应变	(122)
第三节 虎克定律	(123)
第四节 杆件中的弹性应力波	(124)
第五节 无限弹性介质中的应力波	(133)
第六节 半无限弹性介质中的应力波	(139)
第七节 弹性波振幅随距离的衰减	(146)
第八节 地震波在岩土介质中传播特点	(147)
参考文献	(148)
第七章 动力计算的边界	(150)
第一节 引言	(150)
第二节 等效粘性边界	(150)
第三节 能量传递边界	(157)
参考文献	(161)
第八章 地下结构抗震设计计算方法	(162)
第一节 引言	(162)
第二节 横断面抗震计算方法	(164)
第三节 纵向抗震计算方法	(197)

第四节	三维有限元整体动力计算法·····	(205)
参考文献	·····	(209)
第九章	地下结构抗震模型实验·····	(210)
第一节	概述·····	(210)
第二节	模拟地震振动台试验系统·····	(210)
第三节	振动台模型试验相似模型的选择·····	(212)
第四节	模型的制作与安装·····	(215)
第五节	传感器的选择和布置·····	(219)
第六节	模拟地震的输入·····	(221)
第七节	数据的采集与处理·····	(222)
第八节	实例介绍·····	(223)
参考文献	·····	(227)
第十章	抗震设计原则和构造措施·····	(229)
第一节	引言·····	(229)
第二节	地下结构抗震设计的基本原则·····	(229)
第三节	现浇整体钢筋混凝土结构的抗震设计原则·····	(229)
第四节	装配式钢筋混凝土结构的设计原则·····	(231)
第五节	地下结构的纵向抗震缝和不同结构的结合部·····	(232)
参考文献	·····	(233)
附录:地震学大事记(典故及展望)	·····	(234)

第一章 地下结构抗震概论

第一节 引言

我国是世界上的多地震国家之一。图 1.1 为我国地震活动带分布示意图(包括 1966~1976 年八大地震位置),它大致划分为六个地震活动区:①台湾及其附近海域;②喜马拉雅山脉地震活动区;③南北地震带;④天山地震活动区;⑤华北地震活动区;⑥东南沿海地震活动区。以 1966 年至 1976 年观测,我国大陆发生的八大地震均具有强度大、频度高、震源浅的特点。以地质构造上看,都是断裂剧烈活动的地区。近年来,我国的地震活动较为频繁,因而,城市抗震防灾尤为重要。

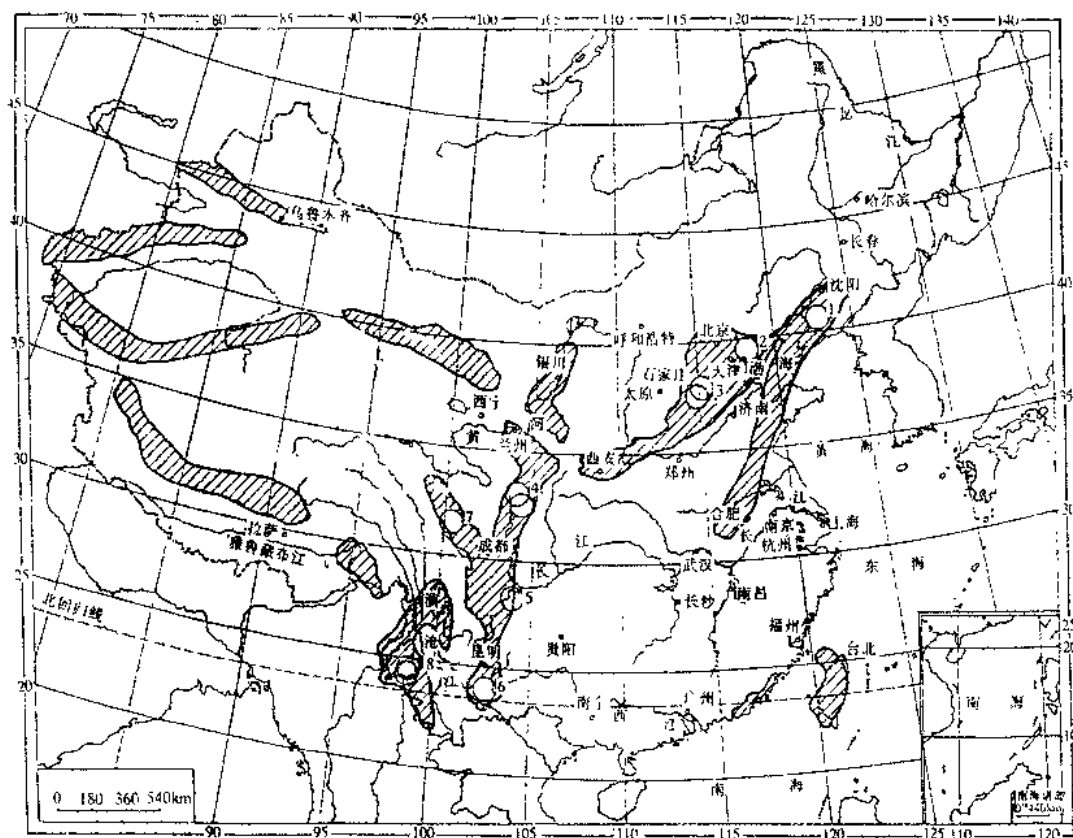


图 1.1 我国地震活动带分布示意图(包括 1966~1976 年八大地震位置)

注:引自文献[27]

- 1—海城地震(1975, M7.3);2—唐山地震(1976, M7.8);3—邢台地震(1966, M6.8);4—松潘地震(1976, M7.2)
5—昭通地震(1975, M7.1);6—通海地震(1970, M7.7);7—炉霍地震(1973, M7.9);8—龙陵地震(1976, M7.4)

随着社会经济的发展,人口逐渐聚集于城市,目前全世界的半数人口集中在不到 0.7% 的陆地面积上,1000 万以上人口的城市达到 25 个。世界上多次破坏性地震都集中在城市。1906 年美国旧金山大地震(M8.3),1923 年日本关东大地震(M8.2),1960 年智利南部大地震(M8.5),1964 年美国阿拉斯加大地震(M8.4),1968 年日本十胜冲大地震(M8.0),1976 年中国唐山大地震(M7.8),1989 年美国洛马普里埃地震(M7.0),1994 年诺斯雷奇地震(M6.7),1995 年日本阪神大地震(M7.2)。这些城市在地震中均遭到严重的、甚至毁灭性的破坏,经济损失惨重。地震灾害不仅是因其巨大的能量造成大量地面构筑物和各种设施的破坏与倒塌,而且也造成诸如地下生命线工程等地下结构和设施的破坏和塌陷,并由此造成次生灾害,产生巨大的间接经济损失。图 1.2 为 1960 年以来大地震所造成的经济损失,反映出年均经济损失每十年几乎翻一番,个别的地震灾害的经济损失更是巨大,如 1995 年阪神地震,它的总损失达 1000 亿美元。

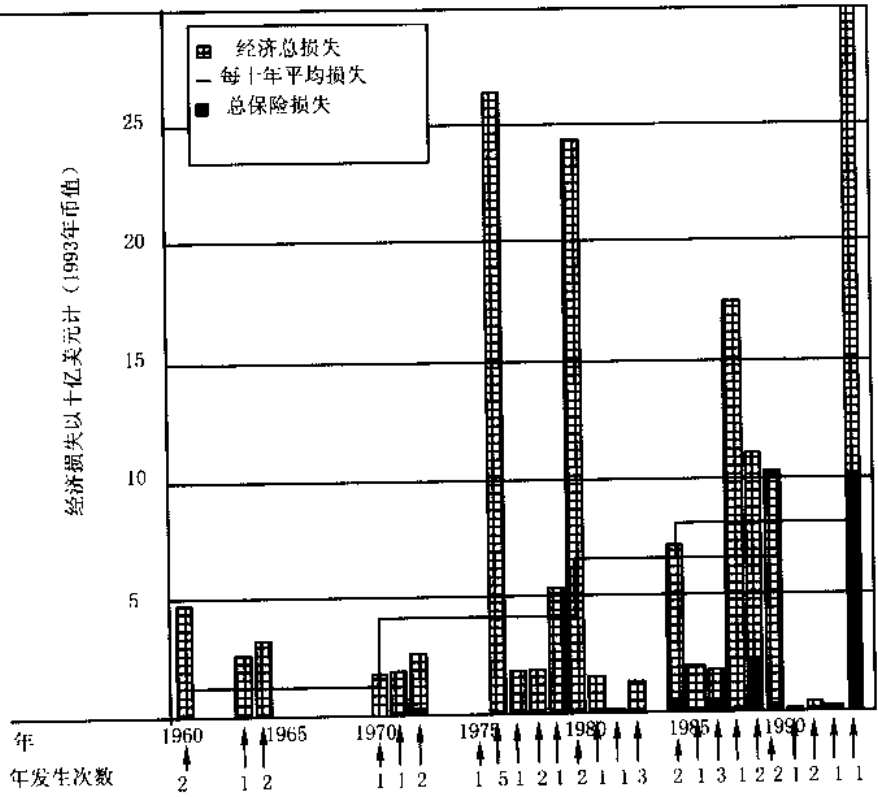


图 1.2 1960 年以来重大地震灾害损失

近年来,为拓展城市空间,地下空间的发展日益受到重视。地下结构在水利水电、公路、铁路交通运输以及城市建设中获得广泛应用,地下结构在地震时的安全问题对于人民生命财产的保障以及城市生活的正常运行有极为重要的意义。近年来,地下结构的抗震分析方法得到了很大的发展,有关文献大量涌现,但这些文献一般多从不同的角度进行论述,还很少见到对这种结构的特点及其分析方法进行全面论述的文章。笔者根据自己所进行的工作、国际交流以及对有关文献研究中的体会,试图对地下结构抗震分析的求解方法与途径作一个概括性的初步分析。

第二节 地下结构地震反应的特点

在地震作用下,地下结构与地面结构的振动特性有很大的不同。二者作对比如下^[1]:

(1) 地下结构的振动变形受周围地基土壤的约束作用显著,结构的动力反应一般不明显表现出自振特性的影响。地面结构的动力反应则明显表现出自振特性,特别是低价模态的影响。

(2) 地下结构的对周围地基地震动的影响一般很小(指地下结构的尺寸相对于地震波长的比例较小的情况),而地面结构的存在则对该处自由场的地震动发生较大的扰动。

(3) 地下结构的振动形态受地震波入射方向变化的影响很大。地震波的入射方向发生不大的变化,地下结构各点的变形和应力可以发生较大的变化。地面结构的振动形态受地震波入射方向的影响相对较小,例如,即使如拱坝这样的半埋设结构,也只有正对称和反对称两种基本振动形态,地震波入射方向在某一范围内变化时,主要只发生正对称的振动,在另一范围内变化时,主要只发生反对称振动。

(4) 地下结构在振动中各点的相位差别十分明显。地面结构各点在振动中的相位差不很明显。

(5) 一般而言,地下结构在振动中的主要应变与地震加速度大小的联系不很明显,但与周围岩土介质在地震作用下的应变或变形的关系密切。对地面结构来说,地震加速度则是影响结构动力反应大小的一个重要因素。

(6) 地下结构的地震反应随埋深发生的变化不很明显。对地面结构来说,埋深是影响地震反应大小的一个重要因素。

(7) 对地下结构和地面结构来说,它们与地基的相互作用都对它们的动力反应产生重要影响,但影响的方式和影响的程度则是不相同的。

总的看来,对地面结构和地下结构来说,虽然结构的自振特性与地基振动场对结构动力反应产生重要影响,但对地面结构来说,结构的形状、质量、刚度的变化,即其自振特性的变化,对结构反应的影响很大,可以引起质的变化;而对地下结构来说,对反应起主要作用的因素是地基的运动特性,一般来说,结构形状的改变,对反应的影响相对较小,仅产生量的变化。因此,在当前所进行的研究工作中,对地面结构来说,结构自振特性的研究占很大的比重,而对地下结构来说,地基地震动的研究则占比较大的比重。

第三节 地下结构抗震分析方法的分类

地下结构和地面结构动力反应特点的不同,决定了它们抗震分析方法的不同。但是,在20世纪六七十年代以前,地下结构的抗震设计基本上还沿用地面结构的抗震设计方法,只是在70年代以后,地下结构的抗震设计才逐步形成了本身独立的体系。

值得指出的是,20世纪60年代美国制定BART隧道的抗震设计标准(1969年)具有开创性意义。日本对于沉埋隧道的抗震从理论和试验等方面进行过深入的研究和探讨,取得了丰硕的成果,并从20世纪70年代后期以来地下结构的抗震设计方法在水道、沉埋隧洞以及核电厂等的抗震设计规范中得到了体现。前苏联对塔什干等城市地下铁道从抗震计算结

构形式到构造措施等方面进行了许多有价值的工作。

地下结构抗震分析方法,早期借鉴地面结构抗震设计的简化方法静力法,包括地震系数法(又称拟静力法、惯性力法)和反应位移法。这是一般地下结构抗震设计时所采用的实用方法。而对于埋设于软弱地层中的重要地下结构(如地下铁道),往往进行地震响应动力分析和动力模型试验分析。下面我们在地下结构抗震分析方法的分类基础上,对各种方法作简要介绍。

地下结构抗震问题分析方法按类型可分为原型观测、模型实验和理论分析三种,而理论分析方法按不同分类标准又可进一步细分。下面将分别予以简述。

一、原型观测

原型观测法就是通过实测地下隧道结构在地震时的动力特性来了解其地震响应特点。严格地讲,由于地震后土体与结构物的变形是一个场的概念,而模型试验却很难模拟这一点,所以原型观测成为地下隧道结构抗震研究中必不可少的手段之一^[18]。它主要包括震害调查和现场试验两大类。震害调查往往是在地震结束后才开始进行的,因而受观测时间、手段和条件等的限制,但是震害是最真实的“原型试验”的结果,因此一直受到人们的重视。目前这方面的资料收集正在不断地增加,尤其是1995年日本阪神大地震发生后,进行了广泛的震害调查,收集了大量有益的资料。但震害调查很难对地震过程中的动力响应进行量测,也无法控制地震波的输入机制和边界条件,更无法主动地改变各种因素,从而对某一现象进行有目的、多角度的研究。故有时就不得不借助于现场试验,它可以在一定程度上弥补这一缺陷^[17]。

二、模型实验

随着地下结构抗震稳定性问题日益受到关注,土-地下结构相互作用的研究不断深入,已经建立了地下结构地震响应的计算方法。但是不同研究者采用不同的简化方法,建立了不同的计算方法,取得的结果也各不相同,为了验证理论计算模型的合理性和分析土-结构动力相互作用的机制,模型试验开始成为一种不可缺少的试验技术。

该法一般是通过激震实验来研究地下结构的响应特性。它可以分为人工震源实验和振动台实验。一般而言,由于前者较难反映结构的非线性性及地基断裂等因素对隧道结构地震反应的影响,故用得不多。而振动台实验则可以较好地处理这方面的问题,因此被广泛采用。通过实验,人们可以更好地掌握地下隧道结构的工作特性,进而为抗震分析的理论发展奠定基础。该法在实验区域的选择和地基特性的模拟方面还有待进一步研究。

三、理论分析

目前,地下结构抗震理论分析方法名目繁多^[1,2],而且有些称谓未必完全恰当。可将理论分析方法按解析法或数值法的应用程度,大致分为解析法、半解析法、半数值法和数值法,而这几种方法里一般又可细分为二至三种方法,见图1.3。也可将理论分析方法按分析对象的空间考虑情况,大致分为横断面抗震计算方法、纵向抗震计算方法和三维有限元整体动力算法,这将在第八章作详细介绍。本章按前一种分类方法,对理论分析的每种细分方法作简要介绍。

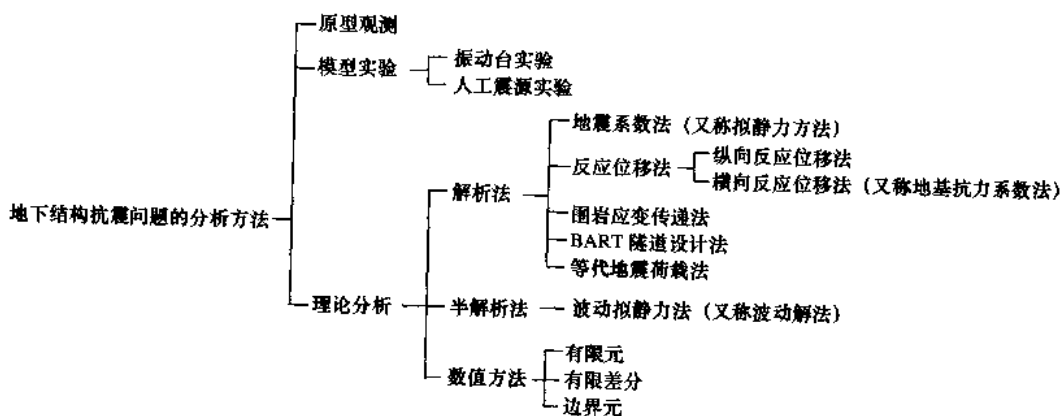


图 1.3 地下结构抗震问题分析方法的类型

(一) 地震系数法^[8]

又称为静力法、惯性力法或拟静力法。

最早在 1899 年,日本大房森吉提出静力法的概念。它假设结构物各个部分与地震动有相同的振动。此时,结构物上只作用着地面运动加速度 $\ddot{\delta}_g$ 乘上结构物质量 M 所产生的惯性力,把惯性力视为静力作用与结构物作抗震计算。地震惯性力 F 的计算公式为

$$F = \frac{\tau}{g} Q = K_c Q \quad (1.1)$$

式中 Q ——结构物的重量;

τ ——作用于结构的地震加速度;

g ——重力加速度;

K_c ——地面运动加速度峰值与重力加速度 g 的比值,即地震系数,由地震烈度确定。

这种方法用于地面结构时,将随时间变化的地震力用等代的静地震荷载或静地层位移代替,然后再用静力计算模型分析地震荷载。该法计算的结构内力,其量值一般偏大于动力响应分析值。

地下结构中,纵向尺寸远大于横向尺寸的线形结构的横断面抗震计算、地下储油罐的抗震设计中,也可用该方法。这时作为地震荷载,不仅要考虑由于结构物自重引起的惯性力,还要考虑上覆土的惯性力影响,地震时的动土压力,以及内部动水压力等。地震时动土压力的计算中多采用物部·冈部公式,该公式中考虑了设计加速度等,但其结果与实际地震中观测到的动土压力结果有较大的差别,仍存在的问题。另外,对于大深度地下结构,地震加速度在其深度方向的分布往往决定了计算结果,因此地层中的地震加速度的分布如何进行考虑也是一个问题。

在计算刚度特大、变形甚小的地下结构时,地震系数法至今仍被采用。^[4,5,8]

(二) 反应位移法^[1,4,8]

反应位移法(Response displace)在有的文献^[1,4,8]里也译为“响应位移法”、“反应变位法”或“响应变位法”。该法可分为纵向反应位移法和横向反应位移法^[8]。后者在有的文献中称之为地基抗力系数法^[9]。

该方法的基本考虑是,在地震时地下结构的变形受周围地层变形的控制,底层变形的一部分传给结构,使结构产生应变、应力和内力。

对于纵向反应位移法,其方法是在求得结构组成所在深度的震动位移的情况下,计算地层沿结构纵轴的最大拉伸应变和最大弯曲应变。用应变传递比 α 和 β 来考虑土壤应变传递到结构上的递减,并由此得到结构纵轴的轴向应变和弯曲应变。

对于横向反应位移法,则是首先求得结构断面所在深度位置的震动位移(或称地层位移)情况下,周围地层对结构变形的约束作用简化为弹簧,然后将上述水平位移强迫静态地作用于地下结构侧向弹簧上(考虑周围地基的弹性约束);其次,按地震反应分析求得的最大加速度分布确定结构上的水平惯性力载荷和动水压力(可采用地震系数法进行计算);最后,将地震反应分析求得的最大水平剪应力施加于结构的顶部,将水平剪应力与结构上惯性力之和施加于结构底面进行结构本身地震反应计算。进而用静力法确定结构横断面中地震所产生的内力。本方法为日本核电厂耐震设计技术指南所采用,以进行取水建筑埋设或半埋设结构的抗震设计。

(三) 围岩应变传递法^[1]

地下管道、海底隧道、地下油库等的地震观测结果表明,地下结构地震时应变的波形与周围岩土介质地震应变波形几乎完全相似。根据地震波动场分析的基本思想,可以建立地下结构的地震应变关系式:

$$\epsilon_s = \alpha \epsilon_0 \quad (1.2)$$

式中 ϵ_s ——地下结构的地震应变;

ϵ_0 ——没有洞穴或地下结构影响的周围岩土介质的地震应变;

α ——应变传递率系数,可以将 α 看作是一个静态系数,它和地震动的频率和波长无关,只随地下结构的形状、刚度以及周围岩土介质的刚度而变化,通过静力有限元分析确定。

(四) BART 隧道设计法^[1,6]

BART 隧道设计法是美国 20 世纪 60 年代末修建旧金山海湾地区的快速运输系统(简称 BART)中所建立的地下结构抗震设计准则。该法假定土体在地震期间不会丧失完整性,且只考虑地震作用下隧道结构的振动效应。其总体的指导思想是在抗震设计中,给结构提供有效的韧性来吸收土体强加给结构的变形,同时又不丧失其承受静载的能力,而不是以特定的单元去抵抗其变形。

该法认为,隧道结构应设计成能够适应地层的弯曲变形,此时结构的最大单元应变应根据波与结构斜交的情况得出。

(五) 等代地震荷载法^[3,10~16]

这种方法旨在对地铁车站和区间隧道衬砌结构的设计,建立用于计算地震响应的等代结构力学方法,并力求将动力问题的计算简化为等效静力问题的求解。

该法将地震荷载的作用简化为施加于结构上的水平向静力等代地震荷载,重力作用下地基对结构的作用简化为施加在结构上的约束和荷载。由有限元动力计算模型得出结构的内力后,将其与设计地震荷载作用下的结构的最大合内力响应作对比,并将二者十分接近时的等代地震荷载作为该概率水准下的等代地震荷载。

一般情况下,地下结构设计中应予考虑的内力有弯矩、轴力和剪力等三种。对这三种内力进行分析时,一定概率水准下将有三个不同的等代地震荷载值,由此导致计算过程复杂化。鉴于地下结构设计中截面设计的控制因素通常主要是弯矩,其次才是轴力和剪力,因而可主要根据弯矩确定等代地震荷载,并以其为基础对轴力和剪力引入修正系数,可同时确定等代地震荷载作用下的衬砌结构的动内力-弯矩及修正后的轴力和剪力。

与此同时,地铁车站结构属于形式复杂的超静定框架结构,因而即使仅考虑弯矩,也难满足使在等代地震荷载作用下,车站结构各构件的内力与地震荷载作用下的最大合内力均十分接近。据研究的计算结果^[19],地铁车站结构的底板承受的弯矩最大,而中柱是最危险的构件,因而这种方法主要根据底板和中柱的弯矩确定地铁车站结构的等代地震荷载,并以其为基础对其他构件的弯矩和所有构件的轴力和剪力引入修正系数,从而同时确定等代地震荷载作用下的车站结构的合内力。

(六) 波动拟静力法^[1,2,8]

这一方法在有的文献中,也称为波动解法^[11],对圆的隧道,也称之为圆形隧道弹性理论接触问题的准静态解^[8]。该法由前苏联学者福季耶娃提出。

该法认为,对于波长大于隧道洞径三倍的 P 波及 S 波,只要隧道埋深大于洞径三倍,长度大于洞径五倍,就可将地震反应的动力学问题用围岩在无穷远处承受一定荷载的弹性力学的平面问题的方法解答。若假定围岩介质属线弹性体,则地震作用时引起隧道围岩的应力及衬砌内力的计算,可归结为有加固孔口周围应力集中的线弹性理论动力学问题的求解。这也是一种拟静力方法。

(七) 数值方法

将场地地基土、基础与结构各个部分看作一个整体一起计算,从而得到结构与土体的动力反应的分析方法,可考虑土体的非均质性和非线性等动力特性。在考虑地基土的非线性特性的情况下,解析方法难以求解结构与地基在地震动载荷作用下的反应,通常采用数值法,主要有:有限元法、有限差分法、离散元法、边界元法及其杂交法等。这里对有限元法、有限差分法、离散元法和边界元法等略作介绍。

有限元方法将整个土-结构体系进行有限元离散化并计算动力反应的分析方法,它可以解决非均质性和非线性问题,但需要引入人工边界以反映有限计算域外的无限域对计算区域的作用。Krauthammer 等^[17](1989)采用有限元方法研究了土-结构接触面对地下混凝土结构的动力响应的影响。刘晶波等^[18](1998)建立了结构-地基动力相互作用分析的直接有限元方法,该方法不但可以较好地模拟半无限地基的辐射阻尼,也能模拟远场地球介质的弹性恢复性能。Borja 等^[19](1999)采用有限元方法对台湾莲花地震时场地上的加速度响应进行了数值模拟。廖红建等^[20](2001)采用有限元方法研究了轴对称体形和近似轴对称体形的地基-结构体系的共同作用,并针对 1976 年唐山地震波及天津市两个不同震害区域的地震情况,进行了地面地震反应和地基-结构相互作用时结构底部地震反应的分析验证。

有限差分法同样可以解决体系的非均质性和非线性问题。该法需要引入人工边界以反映有限计算域外的无限域对计算区域的作用。Szavits 等^[21](1999)采用有限差分法研究了深基坑土钉墙支护的变形。Joyner 用其研究地面运动的非线性响应问题。王明样等^[22](2003)基于总应力动力分析法,运用二维显式有限差分法对某大坝在地震荷载作用下的动

力响应进行模拟分析。分别考虑了水平、竖向地震荷载以及两个方面的耦合和不同水位深度对大坝动力特性的影响,得到了大坝在地震荷载作用下液化区域和位移矢量的分布趋势。刘文韬(2003)采用有限差分法研究了脉冲载荷下岩石介质中一维应变波的传播规律,着重分析了本构模型及其参数对一维应变波在岩石类损伤软化介质中演化规律的影响,并通过两种模型(弹塑性模型和含损伤弹塑性模型)的对比分析,揭示了岩石类脆性材料中应力波传播的主要特点。

Cundall 在 20 世纪 70 年代初提出离散元方法,他假定岩体由互相切割的刚性块体组成,从刚体动力学出发,以显式松弛法进行迭代计算,可分析岩体的大变形和失稳过程。王光纶等(1994)将离散元方法用于分析地震作用下的边坡稳定性分析,并通过实验研究计算参数的选取。陶连金等(1998)认为在原岩应力作用下处于稳定状态的地下洞室,在动载荷作用下就可能失稳破坏,并采用动力离散元法对一个大断面地下洞室在地震载荷作用下的动力影响及围岩稳定性进行了分析,模拟出围岩失稳和破坏的全过程,研究节理岩体中洞室围岩变形和破坏机制。张丽华等(2002)采用动力离散元法分析了大型地下洞室群在地震作用下的动力响应,认为地下结构并不能完全免于震害,高烈度地震对于节理岩体中的地下结构有明显影响。

边界元法自动满足远场的辐射条件,无需引入人工边界,同时能把一个二维或三维积分问题变成一个一维或二维积分问题。Dominguez 将边界元法用于求解二维与三维地基的动力刚度与波动响应;Wolf^[25]发展了将频域地基动力刚度转换为时域动力刚度的方法;Niwa 等采用频域边界元方法研究地下结构与围岩的相互作用问题,Manolis 等采用时域边界元方法对地下结构与围岩的相互作用进行了研究。张楚汉等(2000)采用时域边界元方法来研究某电站地下厂房在地震波作用下的动力响应,通过求解地下厂房的位移响应和应力响应并比较地基介质的各向异性程度、入射波的角度及频率对波动响应的影响,获得了对工程具有重要参考价值的规律。张玉红等(2001)依据外力作用下两相饱和地介质动力响应的基本角及饱和土与结构动力相互作用影响函数,应用边界元方法建立了地震动作用下,两相介质饱和土中桩基动力阻抗函数分析模型,研究地震动作用下饱和土与基础结构动力相互作用。李楠等^[23](2003)应用时域边界元法,研究了单侧接触埋置结构与瞬态 SH 波的动力相互作用。认为当入射 SH 波足够强时,界面会出现局部滑移并假设摩擦遵守库仑定理,并计算了埋置矩形结构与瞬态 SH 波的动力相互作用问题。

有限元法、有限差分法和离散元法在解决几何形状复杂和非均质、非线性问题方面比较优越,而边界元在解决均质、线性无限和半无限介质问题方面比较优越,所以研究人员开始采用耦合法或杂交法。杨小礼等^[24](2000)采用有限元与无限元耦合方法讨论交通隧道在地震波作用下震动反应问题,并考虑地基土的非线性与层状性。运用等效线性模型处理土的非线性,Newmark- β 求解动态平衡方程。金峰等^[25](2001)利用离散元-边界元耦合模型对溪洛渡工程地下厂洞室群静、动力响应进行了分析,认为离散元模型能够很好地模拟地下洞室群的变形,通过与边界的耦合,可以模拟辐射阻尼的影响,由于辐射阻尼的影响,地下洞室群的地震响应比地面结构小很多。吴健等(2002)用有限元、边界元和无限边界元在时域内的耦合模型分析了溪洛渡拱坝的动力响应,在分析中考虑了无限地基辐射阻尼,结果表明辐射阻尼对拱坝的动力响应有显著的影响。