

土木工程专业
研究生教学用书

工程结构抗震分析

*Aseismic Analysis of
Engineering Structures*

李爱群 丁幼亮 编



高等教育出版社

土木工程专业
研究生教学用书

工程结构抗震分析

Gongcheng Jiegou Kangzhen Fenxi

李爱群 丁幼亮 编



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

内容简介

本书以启发式教学为目标,着力介绍了土木工程学科抗震分析的基本理论、方法和观点,激发学生的学习兴趣和引导由书本内容引申到课外相关书籍阅读,对感兴趣的观点进行思考、论证和剖析,达到夯实理论基础、拓宽知识面的目的。

本书系统地介绍了工程结构抗震分析的基本理论与方法。全书共9章,主要内容有:绪论、结构动力学基础、强震地面运动、地震作用下的结构动力方程、反应谱分析法、弹性时程分析法、循环反复荷载作用下钢筋混凝土材料及构件的性能、弹塑性时程分析法和静力弹塑性分析法等。

本书可作为土木工程、工程力学等专业研究生及本科生的教材,也可供土木工程领域从事研究、设计等工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程结构抗震分析/李爱群,丁幼亮编. —北京:高等教育出版社,2010.1

ISBN 978-7-04-028321-1

I. 工… II. ①李…②丁… III. 工程结构:抗震结构-结构分析-高等学校-教材 IV. TU352.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第220801号

策划编辑 水渊 责任编辑 赵向东 封面设计 张楠
版式设计 范晓红 责任校对 殷然 责任印制 朱学忠

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-58581118
社 址	北京市西城区德外大街4号	咨询电话	400-810-0598
邮政编码	100120	网 址	http://www.hep.edu.cn
总 机	010-58581000		http://www.hep.com.cn
经 销	蓝色畅想图书发行有限公司	网上订购	http://www.landaco.com
印 刷	北京明月印务有限责任公司		http://www.landaco.com.cn
		畅想教育	http://www.widedu.com
开 本	787×960 1/16	版 次	2010年1月第1版
印 张	10.75	印 次	2010年1月第1次印刷
字 数	190 000	定 价	17.60元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 28321-00

前 言

本书作为“工程结构抗震分析”课程的研究生教材,共分9章,较系统地介绍了工程结构抗震分析的基本理论与方法。第1章介绍了工程结构抗震分析方法的发展过程。第2章介绍了结构动力学基础,包括多自由度体系的自由振动、受迫振动以及随机振动分析方法。第3章介绍了强震地面运动,包括强震地面运动的特性及其随机过程模型。第4章介绍了地震作用下的结构动力方程,包括一维地震动输入、多维地震动输入以及多点地震动输入时的结构动力方程。第5章介绍了反应谱分析法,包括地震反应谱和振型分解反应谱法。第6章介绍了弹性时程分析法,包括逐步积分法、振型叠加时程分析法和地震波的选取。第7章介绍了循环反复荷载作用下钢筋混凝土材料及构件的性能,包括结构抗震试验方法、钢筋混凝土材料的性能和钢筋混凝土构件的滞回性能。第8章介绍了弹塑性时程分析法,包括恢复力模型、弹塑性刚度矩阵以及弹塑性时程分析的一般过程。第9章介绍了静力弹塑性时程分析法,包括基于性态的抗震设计思想、静力弹塑性分析(Pushover)法和基于Pushover分析的结构抗震分析。

本书突出启发式教学的特点,在有限的篇幅内重点介绍“工程结构抗震分析”课程所涉及的主要理论、方法和发展轨迹,不求在课本上将所有的知识介绍完全,但求激发学生的兴趣和热情,鼓励学生在课外进行延伸学习和思考。

本书在编写过程中,参考了大量工程结构抗震分析的教材和论著,在此谨向这些编著者致以诚挚的谢意。本书的出版得到了东南大学研究生院的大力支持,特此致谢。

东南大学张志强副教授和王浩博士对本书的完成作出了重要贡献,同时,东南大学建筑工程抗震与减振研究中心程文灏教授、叶继红教授、陈忠范教授、徐赵东教授、黄镇副教授、徐明副教授、潘金龙副教授、郭彤副教授、陆飞博士和研究生们也对本书作出了贡献,在此特别向他们由衷地表示感谢。

限于水平,不妥之处在所难免,恳请广大同行及读者批评指正。

编者

2009年5月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 地震与地震震害	1
1.2 结构抗震分析的必要性	6
1.3 结构抗震分析的发展过程	7
1.3.1 概述	7
1.3.2 静力分析法	8
1.3.3 反应谱分析法	9
1.3.4 时程分析法	11
1.3.5 静力弹塑性分析法	11
第 2 章 结构动力学基础	13
2.1 多自由度体系的振动方程	13
2.2 多自由度体系的自由振动	15
2.2.1 自由振动方程及其解	15
2.2.2 主振型的正交性	16
2.2.3 主振型矩阵	17
2.2.4 自由振动的近似计算	18
2.2.4.1 子空间迭代法	18
2.2.4.2 里兹向量直接叠加法	22
2.3 多自由度体系受迫振动的时域分析法	24
2.3.1 直接解法	24
2.3.2 振型叠加法	24
2.3.3 关于阻尼的补充讨论	26
2.3.3.1 等效黏滞阻尼的概念	26
2.3.3.2 结构阻尼矩阵	28
2.3.3.3 比例阻尼体系和非比例阻尼体系	29
2.4 多自由度体系受迫振动的频域分析法	31
2.4.1 频域传递函数	31
2.4.2 频域分析法	32

2.5	多自由度体系的随机振动分析	34
2.5.1	随机过程及其统计特征	34
2.5.2	单自由度体系的随机振动分析	38
2.5.3	多自由度体系的随机振动分析	40
第3章	强震地面运动	42
3.1	地震波与强震观测	42
3.1.1	地震波	42
3.1.2	强震观测	43
3.2	强震地面运动的特性	48
3.2.1	地震动幅值特性	48
3.2.2	地震动频谱特性	49
3.2.3	地震动持时特性	51
3.3	地震动的随机过程模型	52
3.3.1	地震动加速度过程的频域模型	52
3.3.2	地震动加速度过程的时域模型	53
3.3.3	人造地震动的模拟	55
第4章	地震作用下的结构动力方程	56
4.1	结构离散化方法	56
4.1.1	集中质量法	56
4.1.2	广义坐标法	56
4.1.3	有限单元法	57
4.2	建立结构动力平衡方程的基本方法	58
4.2.1	达朗贝尔原理法	58
4.2.2	拉格朗日方程法	59
4.2.3	哈密顿原理法	61
4.3	地震动输入时的结构动力方程	63
4.3.1	一维地震动输入	63
4.3.2	多维地震动输入	65
4.3.3	多点地震动输入	68
第5章	反应谱分析法	71
5.1	单自由度体系的地震反应	71
5.2	地震反应谱	73
5.2.1	地震反应谱	73
5.2.2	反应谱形状特征及影响因素	76

5.3	抗震设计反应谱	78
5.4	振型分解反应谱法	81
5.4.1	基本原理	81
5.4.2	地震作用与作用效应	83
5.4.3	振型组合公式的推导	84
第6章	弹性时程分析法	88
6.1	概述	88
6.2	线性加速度法	90
6.3	Wilson- θ 法	92
6.4	Newmark- β 法	93
6.5	增量积分方程的拟静力法	94
6.6	算法的精度	97
6.7	振型叠加时程分析法	99
6.8	地震波的选取	100
第7章	循环反复荷载作用下钢筋混凝土材料及构件的性能	103
7.1	结构抗震试验方法概述	103
7.1.1	结构伪静力试验	103
7.1.2	结构拟动力试验	103
7.1.3	结构模拟地震振动台试验	105
7.2	钢筋混凝土材料性能	106
7.2.1	钢材	106
7.2.1.1	钢材的强度和变形	106
7.2.1.2	应变速率对钢筋强度和变形的影响	107
7.2.1.3	钢筋的应力软化	107
7.2.2	混凝土	109
7.2.2.1	混凝土的应力-应变曲线	109
7.2.2.2	应变速率对混凝土峰值应力及应变的影响	109
7.2.2.3	应变速率及循环反复荷载对钢筋与混凝土黏结强度的影响	109
7.3	钢筋混凝土构件的滞回性能	110
7.3.1	滞回曲线的一般特点	110
7.3.2	钢筋混凝土梁	112
7.3.3	钢筋混凝土柱	113
7.3.3.1	长柱	114
7.3.3.2	短柱	117

7.3.4	钢筋混凝土受扭构件	118
7.3.5	钢筋混凝土梁、柱节点	121
7.3.6	钢筋混凝土剪力墙	121
7.3.7	钢筋与混凝土的黏结-滑移	123
第8章	弹塑性时程分析法	124
8.1	恢复力模型	124
8.1.1	单轴恢复力模型	124
8.1.1.1	双线型模型	124
8.1.1.2	三线型模型	127
8.1.1.3	曲线型模型	130
8.1.2	双轴恢复力模型	131
8.2	结构的振动模型	134
8.2.1	层模型	134
8.2.2	杆系模型	135
8.2.2.1	单分量模型	135
8.2.2.2	双分量模型	137
8.2.2.3	三分量模型	139
8.2.2.4	多弹簧模型	139
8.3	弹塑性时程分析的一般过程	140
8.3.1	结构动力方程	140
8.3.2	恢复力模型的拐点处理	141
8.3.3	一般分析过程	142
第9章	静力弹塑性分析法	143
9.1	基于性态的抗震设计思想	143
9.1.1	概述	143
9.1.2	地震设防水准	144
9.1.3	结构抗震性态水准和目标	144
9.1.4	基于性态的抗震设计方法	146
9.2	静力弹塑性分析(Pushover)法	147
9.2.1	基本假定	148
9.2.2	水平加载模式	148
9.2.3	Pushover分析的一般步骤	150
9.3	基于Pushover分析的结构抗震分析	152
9.3.1	结构的能力谱	152
9.3.2	结构的地震需求谱	154
9.3.3	目标位移与结构性能评估	156

9.3.3.1 能力谱法	156
9.3.3.2 等效位移系数法	157
参考文献	160

第1章 绪 论

1.1 地震与地震震害

地震是危及人民生命财产的突发式自然灾害,而我国是世界上多地震国家之一,地震活动频繁并时有较大震级的地震发生。在20世纪内,震级等于或大于7.8级的强地震发生了多次,且均有强度大、频度高、震源浅的特点。例如,1976年7月28日的河北唐山大地震,震级7.8级,死亡达24万余人,强震区内的住宅、工业厂房与设备、城市建设、交通运输、水电设施等都遭到极其严重的破坏。2008年5月12号的四川汶川8.0级大地震,更是新中国成立以来破坏性最强、波及范围最广的一次地震。这些震害给国家和人民的生命财产造成了巨大损失。在世界其他地方,地震造成的灾害同样是十分严重的。1923年日本关东地震,仅东京、横滨两市,死亡人数即达10万余人。1960年智利地震、1967年委内瑞拉加拉加斯地震、1994年美国北岭地震、1995年日本阪神地震等多次地震,也都造成惨痛的后果。究其原因,主要是强烈地震所具有的随机性和破坏性的特点,以及破坏或倒塌建筑物尚不具备足够的抗震能力。

据调查,唐山大地震,唐山市区内90%以上房屋彻底倒塌;1985年墨西哥地震,远离震中三百多公里的墨西哥城,就有三百多幢楼房倒塌或严重破坏;1988年亚美尼亚地震,位于震中的Spitak市全城毁灭,距震中40 km的Lenakan市也有约75%的建筑物毁坏。表1.1.1不完全统计了1923年以来历次对建筑物影响较大的地震,每一次地震都造成大量建筑的破坏,其破坏状况除了再现其他多次地震中所共有的规律之外,也都具有一些各自的特点。因此,有必要在充分吸取历史地震经验和教训的基础上,结合现代技术,在基本理论、计算方法和构造措施等多方面,研究改进工程结构抗震设计技术,不断地提升工程抗震领域的整体技术水平。

表 1.1.1 1923 年以来国内外大地震概况

时间	地点	震级	地震动特性	建筑震害特点
1923. 9. 1	日本关东	7	—	大火次生灾害严重,钢筋混凝土结构破坏率比其他类型结构小,一座 8 层钢筋混凝土框架倒塌
1940. 11. 10	罗马尼亚 乌兰恰地区	7.4	—	布加勒斯特一座 13 层钢筋混凝土框架完全倒塌
1948. 6. 28	日本福井	7.2	最大地面加速度 0.3g,持续时间 30 s 以上	一座 8 层钢筋混凝土框架毁坏
1957. 7. 28	墨西哥 墨西哥城	7.6	最大地面加速度 0.05 ~ 0.1g,卓越 周期 2.5 s 左右	5 层以上建筑物震害较大,11 ~ 16 层建筑物损坏率最高。55 座 8 层以上建筑物中,11 座钢筋混凝土结构破坏。23 层和 42 层两座建筑无损,反映出地震动卓越周期对建筑物震害的影响
1963. 7. 26	南斯拉夫 斯普利里	6	冲击性地震,持续 时间短,最大加速 度估计为 0.3g	4 层以下砖结构破坏严重,13 ~ 14 层钢筋混凝土结构仅有部分受害。凡是各层都有维护墙的框架结构破坏轻,凡是上层有填充墙而底层无填充墙的框架破坏严重
1964. 3. 27	美国 阿拉斯加	8.4	持时 2.5 ~ 4 min, 估计地面卓越周 期 0.5 s,地面加速 度 0.4g	大多数建筑经抗震设防,但地面加速度比规范规定大好几倍,长周期影响突出,高层破坏多。28 座预应力钢筋混凝土建筑中,6 座严重破坏,其中四季大楼完全倒塌。砂土液化引起大面积滑坡,非结构构件破坏所造成的经济损失大
1964. 7. 5	日本 新潟	7.4	最大地面加速度 0.16g,持续时间 2.5 min	主要由砂土液化引起震害,44% 建筑受到程度不同的破坏,一幢 4 层公寓倾倒 80°,一幢 4 层商店倾倒 19°,且下沉 1.5 m。采用打入密实砂桩基础的建筑几无震害,设置地下室的建筑震害很轻

续表

时间	地点	震级	地震动特性	建筑震害特点
1967. 7. 29	委内瑞拉 加拉加斯	6. 5	在 LosPalos 区, 地面加速度 0. 06 ~ 0. 08g, 地面卓越周期 0. 2 ~ 1 s; 在 Caraballeda 区, 地面加速度 0. 1 ~ 0. 3g	烈度不高, 但高层建筑损坏很多。冲击层厚度超过 160 m 的地区, 高层建筑破坏率急剧上升, 在岩石或浅冲击层上, 高层建筑大部分未损坏
1968. 5. 16	日本 十胜冲	7. 9	最大加速度 0. 18 ~ 0. 28g, 持续时间 80 s	钢筋混凝土柱破坏较多, 其中短柱剪切破坏现象突出, 引起对短柱的注意, 开始进行研究
1971. 7. 9	美国 圣费南多	6. 6	最大加速度 0. 1 ~ 0. 2g	取得了 200 多个强震记录, 测得 20 层高层建筑顶部最大加速度是地面加速度的 1. 5 ~ 2 倍。3 座高层建筑 (14、38、42 层) 有轻微破坏, Olive View 医院的 6 层病房楼严重破坏, 显示出刚度突变对抗震不利
1972. 12. 22	尼加拉瓜 马那瓜	6. 5	最大加速度: 东西向 0. 39g; 南北向 0. 34g; 竖向 0. 33g。0. 2g 加速度振动持续了 5 s, 随后有长周期振动出现	70% 以上建筑物倒塌或严重损坏, 3 座钢筋混凝土高层建筑损坏, 具有典型意义。钢筋混凝土芯筒-框架体系高层建筑的抗震性能良好, 非结构构件破坏很大
1975. 4. 21	日本 大分	6. 4	最大加速度: 东西向 0. 65g; 南北向 0. 049g; 竖向 0. 028g	无高层建筑损坏。在同一建筑中长短柱混合, 会加剧建筑物损坏。地基变形、沉陷造成建筑损坏
1977. 3. 5	罗马尼亚 布加勒斯特	7. 2	持续时间 80 s, 18 s 以前以竖向振动为主	33 座高层框架结构倒塌, 其中 31 座为旧建筑, 多数刚度不均匀, 2 座新建筑都是底层商店、上层住宅建筑。剪力墙结构仅有一座 11 层建筑由于施工质量不好而倒塌, 剪力墙结构破坏率小

续表

时间	地点	震级	地震动特性	建筑震害特点
1978.2.20	日本 宫成冲	6.7	—	大部分建筑未按抗震设计,与十胜冲地震破坏相似。8层以下建筑破坏多,仙台市3座8~9层型钢混凝土结构楼房的短柱、窗间墙、窗下墙破坏严重,未经计算的钢筋混凝土墙体发生剪切破坏
1978.6.12	日本 宫成冲	7.5	东北大学9层建筑记录地面加速度0.25g	同上。3~6层框架结构底层柱剪切破坏,6~9层框架结构中未经计算的现浇钢筋混凝土外墙剪切裂缝多,长柱基本无破坏
1978.6.20	希腊 萨洛尼卡	6.5	最大加速度:东西向0.148g;南北向0.16g;竖向0.13g。卓越周期0.3~0.5s	严重震害区域在软土冲击层上。底层刚度小的建筑震害严重,具有剪力墙的建筑震害轻。许多建筑在两端破坏,没有缝的建筑物震害轻微。20%建筑物有非结构性破坏
1976.7.28	中国 唐山	7.8	烈度为:震中唐山11度,丰南10度,宁河、汉沽8.5度,塘沽、天津8度	震中区砖石混合结构全部倒塌。塘沽一座13层框架倒塌,天津一座11层框架填充墙破坏严重,个别角柱损坏,北京高层建筑碰撞较多。有剪力墙的高层建筑和经过抗震设计的建筑破坏少
1985.9.19	墨西哥 墨西哥城	8.1	地震持续时间60s,其中超过0.1g的振动有20s,最大为0.18g。26s以后又有一次能量释放。卓越周期2s	软土冲击层卓越周期长,引起类共振,造成10~20层建筑物破坏严重,30~40层建筑物基本无破坏。板柱结构倒塌很多,设计地震力太小。房屋竖向刚度突变处破坏严重,平面不规则建筑破坏严重

续表

时间	地点	震级	地震动特性	建筑震害特点
1988.12.7	亚美尼亚 斯皮达克 (Spitak)	6.8	震中为 Spitak, 震源深 5 ~ 20 km。Leninakan 的土壤软, 仅 25% 建筑物得以保存	震中区大部分 4 ~ 5 层砌体及空心板建筑没有水平及竖向联系倒塌。其他城市预制钢筋混凝土框-剪结构倒塌较多, 未设计延性结构, 预制空心板上无现浇层, 钢筋搭接不够
1989.10.17	美国 洛马普里埃塔 (Loma Prieta)	7.1	持续时间 15 s, 震中地面加速度 0.64g (水平) 和 0.66g (竖向), Oklan 地区地面加速度 0.08 ~ 0.29g	建筑破坏较大的是距震中 90 km 处的旧金山地区, 主要是软土地基造成多层砌体建筑破坏。海湾大桥及 Oklan 地区双层高速公路破坏严重
1994.1.17	美国 北岭	6.8	震中以南 7 km 处记录地震加速度峰值为 1.82g (水平) 和 1.18g (竖向), 洛杉矶市距离震中 36 km, 记录地震水平加速度峰值为 0.5g。震动约 60 s, 其中 10 ~ 30 s 为强烈震动	是城市人口密集地区的较大地震, 建筑损坏及经济损失大。未经延性设计的钢筋混凝土框架柱被剪坏, 按现代设计要求设计的一幢停车库破坏。钢结构没有倒塌, 表面未发现问题, 但经过仔细检查, 发现许多钢梁和钢柱焊接节点开裂, 严重威胁建筑安全, 这个现象引起广泛关注, 引起梁柱节点研究改进的热潮
1995.1.17	日本 阪神	7.2	最大加速度: 水平向 0.818g 和 0.617g; 竖向 0.332g。卓越周期 0.8 ~ 1.0 s。持时 15 ~ 20 s	神户震害严重, 震害集中在旧式木结构、不规则或质量差的建筑, 特别是底层空旷的住宅破坏严重, 有些建筑的中间楼层整层塌落, 形成中间薄弱层破坏。按新抗震标准设计的建筑或经过审查的高层建筑基本没有损坏

续表

时间	地点	震级	地震动特性	建筑震害特点
1999.9.21	中国台湾 集集	7.6	中部断层长83 km, 地面错动最大为垂直 11 m, 水平 10 m。最大加速度 0.989g, 震动持时 25 s	南投建筑破坏严重, 全县 186 所中、小学, 全毁 30 所。台北也有许多建筑物破坏, 特别是民居建筑破坏较多
1999.8.17	土耳其	7.4	在 900 km 长的 North Anatolian 断层上发生断裂, 震中地表高差 2.3 m	4~7 层框架结构破坏和倒塌多, 地基液化影响大。钢筋混凝土结构箍筋不足, 且锚固不够。有剪力墙的建筑未见破坏
2008.5.12	中国 汶川	8.0	逆冲式断裂(断裂带长约 300 km, 断裂带破裂持续时间约 120 min), 最大加速度近 1g, 余震强(6 级以上余震 8 次)	震中区破坏比率: 城区建筑倒塌少量, 严重破坏 15%, 中等破坏 40%, 轻微破坏 40%; 村镇民居 1~3 层大量倒塌

1.2 结构抗震分析的必要性

结构抗震分析是指以结构动力学为基础, 计算和分析结构在地震动输入下的地震反应。结构的地震反应取决于地震动、地基、基础和上部结构的特性, 特别是结构动力特性。随着人们对地震动和结构动力特性认识程度的加深, 结构抗震分析的水平也在不断深入和提高。然而, 至今结构抗震分析, 特别是非线性结构抗震分析, 仍是在许多假定条件下进行的。这些假定与实际情况之间可能存在着较大的出入。首先是地震动的估计, 由于地震的不确定性和复杂性, 可能出现成倍的误差。例如, 预报某地可能发生的 7 级地震并不一定发生, 未预报的地区又可能发生较大震级的地震, 如唐山大地震。其次, 对结构的动力特性和动力响应的估计也可能有不小的误差, 如 50% 左右或更多, 特别是非线性特性。这些误差都会反映在结构地震反应分析结果中。

但是, 这样的误差并不能否认结构抗震分析的必要性。因为结构地震反应

分析中所考虑的许多因素,如地震动的频谱和持时、结构的延性等,其重要性和真实性都是经过多次实践反复证实了的。特别要注意的是,不能用一次地震的结果来否定或肯定某一个认识,或评定某一种理论的优劣,而需要根据多次地震的大量事实,做出统计意义上的分析和评价。因此,结构抗震分析的目标是揭示结构在地震作用下的真实响应和性能,并使得按照现有地震反应分析方法设计出的结构,在概率意义上更为合理,更符合实际情况,具有更一致的安全概率。大量事实说明,经过抗震设计的工程要远比未经过抗震设计的工程优越;按照新的现代抗震理论设计的工程要比按照旧有理论设计的优越。所以,对结构进行适当的线性、非线性抗震分析,并在此基础上进行结构与构件的抗震设计是完全必要的。

1.3 结构抗震分析的发展过程

1.3.1 概述

结构抗震分析理论的发展大致分为静力、反应谱和动力阶段,在动力阶段又可分为弹性和弹塑性(或非线性)阶段。

1900年日本学者大森房吉提出了震度法概念,将地震作用简化为静力,取重量的0.1倍为水平地震作用,这是抗震设计初始阶段采用的方法,称为静力法。

20世纪30年代美国受到日本地震工程研究的启发,开展了强地震动加速度时程的观测和记录,1940年5月18日取得了具有典型强地震动特性的El Centro记录(最大水平加速度为0.34g,附近的地震烈度为8度)。到40年代,美国已经取得了不少有工程意义的地震记录,丰富了人们对地震动工程特性的认识,从而促进了抗震设计理论的发展。40年代初,美国学者Biot明确提出采用地震记录计算反应谱的概念。50年代初,Housner将此设想加以实现,并应用于抗震设计,使抗震理论进入了反应谱阶段。这是抗震分析计算方法的第二阶段。由于反应谱理论正确而简单地反映了地震动的特性,并根据强震观测资料提出了实用的数据,在国际上得到了广泛的承认。到50年代,这一抗震理论已基本取代了震度法,并且成为世界各国所通用的方法。虽然在较长的应用过程中有许多改进和新发展,但反应谱方法的基本理论一直沿用至今。

20世纪50年代末期,Housner实现了地震反应的动力计算方法,并将其成功应用于墨西哥城的拉丁美洲大厦设计,在1958年的墨西哥大地震中,墨西哥城遭受严重震害,而拉丁美洲大厦的良好表现,促使人们开始重视地震反应的直接动力计算方法,又称为时程分析法。从20世纪60年代到70年代,地震反应

动力分析方法得到了广泛研究和发展,从弹性时程分析法发展到弹塑性时程分析法,在工程设计应用和科学研究中,取得了显著的成绩。这是抗震分析计算方法发展的第三阶段。时程分析方法应用于抗震设计,主要是作为反应谱方法进行设计的补充手段。日本从20世纪60年代开始,首先要求在高度大于60 m的高层建筑结构中,应用弹塑性时程分析方法对设计结果进行检验。我国在1989抗震规范中提出了两阶段设计的要求,第一阶段是设计阶段,以反应谱方法作为设计地震作用的计算方法;第二阶段是设计校核阶段,要求用弹塑性时程分析方法进行变形验算,要求层间位移小于倒塌极限,要求进行第二阶段验算的只限于少数建筑结构。

由于抗震分析理论的发展,在抗震设计的概念上也逐步发生变化,静力方法和最初的反应谱方法主要的目的是计算结构的内力,并设计构件,达到承载力要求,可称之为基于承载力的抗震设计方法。随着震害调查、分析的不断深入,加深了人们对地震造成建筑物破坏原因的认识,结构的塑性变形可以消耗地震能力,具有延性的结构变形可以有效地抵抗地震,而结构的变形能力不足又是结构破坏和倒塌的重要原因,在此基础上提出了基于承载力和延性的抗震设计概念,即以反应谱理论为基础,以三水准设防为目标,以构件极限承载力设计保证结构承载力,以构造措施保证结构延性的完整的抗震设计方法。基于承载力和延性的抗震设计方法的逐步完善和成熟依靠了弹性和弹塑性时程分析法这一手段,通过弹塑性时程分析,对结构在地震作用下的“延性要求”进行了研究,建立了结构屈服机制和强柱弱梁等重要设计概念。近10多年来,基于性态的抗震设计方法成为人们研究的热点,并取得了进展。它要求在不同水准的地震作用下,直接以结构的性态和表现作为设计目标,在同一个地区和城市,不同的建筑可以根据业主要求达到不同的性态目标,如正常使用、生命安全、设备安全、防止倒塌等。现行的“小震不坏、中震可修、大震不倒”的三水准目标已经在一定程度上具备了基于性态抗震设计的思想,然而不同的是,基于性态的抗震设计方法需要定量地评估结构的性能,因而也需要更为可靠的定量计算方法。在设计阶段仍然需要应用反应谱方法,而地震反应的时程分析法和静力弹塑性分析法(又称为推覆分析法)是目前技术比较成熟、可以获得结构性态和表现的两种主要定量计算方法。

结构抗震分析方法的发展阶段以及与抗震设计方法间的关系归纳如图1.3.1所示。

1.3.2 静力分析法

水平静力抗震理论创始于意大利,发展于日本。1900年左右,日本学者大森房吉、佐野利器、物部长穗、末广恭二等对其发展作出了重要贡献。大森房吉