

工程结构的设计地震动

李英民 刘立平 著



科学出版社

工程结构的设计地震动

李英民 刘立平 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

合理的设计地震动是保证设计结果正确的必要条件,工程抗震设计中设计地震动的确定问题已经成为工程界的一大技术难题。本书主要从地震动工程特性、设计地震动模型化以及设计地震动的确定等方面对工程结构的地震动输入问题进行系统、全面的研究,涉及地震动工程特性的定量描述与估计方法、工程地震动的随机模型、地震动仿真技术、设计地震动参数的确定、地震动数据库开发等内容。

本书适用从事结构抗震相关工作的研究人员、教师和研究生。

图书在版编目(CIP)数据

工程结构的设计地震动/李英民,刘立平著. —北京:科学出版社, 2011

ISBN 978-7-03-030053-9

I. ①工… II. ①李…②刘… III. ①工程结构-抗震设计 IV. ①TU352.104

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 009919 号

责任编辑:任加林/责任校对:柏连海

责任印制:吕春珉/封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011年2月第 一 版 开本:B5 (720×1000)

2011年2月第一次印刷 印张:16 3/4

印数:1—2 000 字数:326 000

定价:56.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换<双青>)

销售部电话 010-62134988 编辑部电话 010-62137026 (BA08)

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229; 010-64034315; 13501151303

前 言

地震动输入的不确定性是结构抗震设计中最大的且具有支配作用的不确定性,同时又是结构抗震设计理论中尚未能充分了解的内容之一。为适应日益精确和完善的地震反应分析方法的需要,研究者们长期以来进行着不懈努力。本书旨在通过对地震动工程特性及现行设计地震动的认真审视,分析问题之所在,力所能及地研究其中若干问题的解决方法。书中主要开展地震动参数、地震动时程和随机模型三种地震动输入问题的研究,具体内容包括以下几个方面。

(1) 工程地震动参数的研究

系统地研究了强度包线函数、频率非平稳特性、地震动三维相关性和设计反应谱四个方面的内容。在强度包线函数方面,提出了改进的四段连续型包线模型及能量逼近估计方法,分析了持时及强度包线函数的统计特征和衰减规律,给出设计取值建议;在频率非平稳特性方面,分析了频率非平稳特性对结构弹性和弹塑性响应的影响显著性,提出用穿零率描述频率非平稳特性的近似方法,建立了穿零率的数学模型,研究了模型参数的估计方法与衰减规律,并给出各参数的设计取值建议;关于三维地震动的相关性,全面分析了三维分量峰值参数、强度包线参数、频率非平稳参数和反应谱参数的相关性,根据双随机变量一致加权原则回归各相关公式,提出三维相关设计反应谱的概念并给出建议取值;在大小震设计反应谱关系方面,指出两者应具有不同的谱形,基于三参数和双参数设计谱模型推导出两者的理论关系,并据现有反应谱衰减规律给出大震设计谱的近似估计和取值建议。以上衰减规律的研究均考虑了震级和震中距的随机性。

(2) 工程地震动的随机模型

从积分过程和微分过程的能量有限的角度提出了地震动加速度功率谱模型的基本要求,比较了常用模型的优缺点,给出了三重过滤功率谱模型的建议;分析了均匀调制过程的低频特性及其工程应用范围;分析了低阶和高阶 ARMA 模型的特性及其物理意义,指出 K-T 谱模型只是 ARMA (2, 1) 模型的特例;探讨了 ARMA 模型应用于地震动模型化研究的优越性。

(3) 工程地震动时程

收集并整理了大量实际地震动记录资料,为地震动工程特性的研究提供数据基础;采用时不变 ARMA 模型研究了拟合反应谱的人造地震波合成方法,提出了用两个独立的调制函数分别处理随机强度和频率非平稳性的简化方法;考查了 ARMA 模型阶数、频率非平稳特性和强度非平稳特性对反应谱拟合精度的影响

规律；建立了面向科研和工程应用的大型实际地震动数据库、人造波及选波系统，旨在解决目前结构抗震分析中选择输入地震波的难题。

以上研究分别提供了目前结构抗震分析所需要的三种地震动输入形式，即设计地震动参数、随机模型和实际或人造地震动加速度时程。本书最后分析了目前研究的不足，并对后续研究工作进行了展望。

感谢重庆大学的赖明教授和白绍良教授，他们是著者从事科研工作的领路人。感谢中国建筑科学研究院工程抗震研究所王亚勇研究员、国家地震局地球物理研究所胡聿贤院士、国家地震局工程力学研究所周雍年研究员、美国 NSMP 的地质学家 Porcella、新西兰地质和原子能科学研究所的 Cousins 博士和赵兴权博士、中国台湾 WenKuo-liang 博士，他们为本书提供了大量的强震记录，这些资料为本书的顺利完成创造了有利条件。感谢重庆大学黄宗明教授和长安大学刘伯权教授对作者的支持和帮助。感谢董银峰副教授、杨溥副教授、夏洪流副教授、肖明葵教授、项宗方副教授、陈昌松硕士、杨洁硕士为本书提供了资料，使本书得以完成。感谢国家自然科学基金的资助。

著 者

2010 年 9 月于重庆

目 录

前言

第一章 概论	1
1.1 地震灾害与结构抗震防灾	1
1.2 结构抗震设计与地震动输入	2
1.2.1 结构抗震设计理论的发展与地震动输入	2
1.2.2 结构抗震设计的特点	4
1.2.3 结构地震响应的分析方法与地震动输入	6
1.2.4 多种地震动输入形式之间的关系	11
1.3 工程地震动及其模型化研究	12
1.3.1 工程地震动的涵义	13
1.3.2 设计地震动的确定	13
1.3.3 工程地震动模型化研究	17
1.4 本书主要内容及安排	18
第二章 地震动的工程特性及其描述	20
2.1 地震动工程特性描述方法	21
2.1.1 地震动三要素及其描述	21
2.1.2 地震动的空间相关性及其描述	29
2.1.3 综述	30
2.2 地震动加速度时程强度包线函数的研究	32
2.2.1 关于强度包线函数的注记	33
2.2.2 强度包线函数的数学模型	35
2.2.3 强度包线函数的估计方法	39
2.2.4 持时及强度包线函数的统计特征	41
2.2.5 持时及强度包线函数的取值建议	68
2.3 地震动频率非平稳性	74
2.3.1 地震动频率非平稳特性对结构反应的显著性影响分析	74
2.3.2 地震动频率非平稳特性的描述与估计方法	85
2.3.3 地震动记录穿零率的统计特性	89
2.3.4 地震动记录穿零率参数的取值建议	94
2.4 三维地震动的相关特性及其定量描述	94

2.4.1	三维地震动峰值特性的相关性分析	95
2.4.2	三维地震动强度非平稳特性的相关性分析	107
2.4.3	三维地震动频率非平稳特性的相关性分析	116
2.5	小结	120
第三章	设计反应谱的若干问题	121
3.1	大小震设计反应谱	121
3.1.1	问题的提出	121
3.1.2	大小震设计反应谱之间关系的理论推导	122
3.1.3	大小震设计反应谱之间定量比例关系的近似估算	125
3.1.4	对大震设计反应谱取值的建议	133
3.2	长周期反应谱特性	133
3.2.1	地震动资料	134
3.2.2	长周期反应谱分组	134
3.2.3	长周期反应谱的统计分析	136
3.3	弹塑性反应谱	139
3.3.1	地震动资料	140
3.3.2	分析模型	140
3.3.3	弹塑性加速度谱及弹塑性位移谱	141
3.4	三维相关设计反应谱的研究	144
3.4.1	三维相关设计反应谱分析	145
3.4.2	三维设计反应谱的取值建议	157
3.5	小结	159
第四章	工程地震动的随机模型	161
4.1	地震动模型	161
4.1.1	地震学模型	161
4.1.2	工程学模型	166
4.1.3	地震动随机模型化研究的综述	172
4.2	对传统地震动随机模型的思考与讨论	174
4.2.1	关于地震动平稳频域模型的讨论	174
4.2.2	均匀调制过程的低频特性	187
4.3	工程地震动的 ARMA 模型	190
4.3.1	ARMA 模型的基本知识	190
4.3.2	ARMA 模型的物理解释	193
4.3.3	非平稳时间序列的 ARMA 模型处理方法	200
4.3.4	时间序列的 ARMA 模型建模方法	201

4.3.5	ARMA 模型在地震动模型化研究中的应用	203
4.3.6	ARMA 模型的优越性	204
4.4	小结	205
第五章	时程分析用输入地震动与地震动管理系统	206
5.1	实际地震动记录	206
5.1.1	数据整理	207
5.1.2	数据的取舍	207
5.1.3	数据信息参数的选择	208
5.1.4	数据分析与汇总	212
5.1.5	仅有地震动峰值的记录资料	220
5.2	人造地震波	223
5.2.1	人造地震波在抗震设计中的应用	223
5.2.2	反应谱拟合技术	224
5.2.3	基于 ARMA 模型的反应谱拟合技术	226
5.3	时程分析输入地震波的选波原则	232
5.4	强地震地面运动信息管理系统	234
5.4.1	实际地震动数据库及管理系统	235
5.4.2	人造波系统	237
5.4.3	选波系统	238
5.5	小结	239
第六章	结束语	240
6.1	主要结论	240
6.2	存在的问题及后续研究工作展望	242
主要参考文献		244

第一章 概 论

1.1 地震灾害与结构抗震防灾

地震是人类所面临的最严重自然灾害之一，有史以来所造成的生命财产的损失不可计数、不胜枚举，我国即是地震灾害最严重的国家之一，2008 年汶川大地震给我国带来了巨大的人员伤亡和财产损失；地震同时又可能是人类最缺乏理解的自然灾害，早期甚至将其视为一种超自然现象。地震灾害与其他自然灾害如风灾、水灾等的显著区别在于，几乎所有的人员伤亡和经济损失都与工程结构及构筑物的破坏密切相关。世界上 130 多次伤亡巨大的地震中，95% 以上的人员伤亡是由于未经抗震设防的建筑物倒塌所致（陈寿梁等，1988）。

目前，世界各国关于减轻地震灾害的研究主要集中在三个方面：一是控制地震对策，即通过深井注水等方式诱发不致造成破坏的小强度地震以释放积聚在发震断层附近岩体内的应变能，从而削弱未来主震的强度。这种方法一直处于探索阶段。对于我国地震活动分布范围广、地震区人口密集的实际国情，其经济投入和实用价值尚有待研究。二是地震预报对策，主要根据地震地质、地震活动性、地震前兆异常和环境因素等多方面的研究预测未来一段时期内地震可能发生的时间、地点及强度。然而，以目前的认识水平和技术水平，地震的发生是难以准确预测的，1975 年海城地震的预测工作也只不过是世界上少有的成功范例之一。即便是可以预测，至多也只能是将人员的伤亡降低到最低水平，而不可避免地造成工程结构的严重损坏或倒塌，最终仍不得不接受财产和经济的极大损失，海城地震的成功预报仍然未能避免 100 多万间房屋的倒塌和 10 多亿元的直接经济损失。因而，地震预报不能从根本上减轻地震灾害（陈寿梁等，1988），地震的成功预测从概念上讲并不能降低地震危险性，其最终目的在长远意义上仍将归结为对合理抗震结构的需求。三是抗震防灾对策，即通过工程和技术措施，保证建筑物和工程设施的抗震安全度。历次震害经验表明，凡经抗震设防的工程均较大程度地减轻了地震灾害。1966 年邢台 M7.2 地震和 1981 年邢台 M6 地震是最有力的证据：前次地震震中烈度为Ⅸ度，100 多万间房屋倒塌，死亡近 8000 人；震后的重建工作采取了凭经验制定的农房抗震措施，后次地震震中烈度约为Ⅷ度，无一房屋倒塌，无一人员死亡，堪称我国抗震史上的奇迹。江苏栗阳在 1974 年 M5.6 地震中有近 8 万间房屋倒塌，震后原样修复重建，在 1979 年 M6 地震中又有 34 万多间房屋倒塌，破坏形式与前次地震几乎没有区别。1994 年美国

Northridge 地震和 1995 年日本神户大地震 (AIJ, 1995) 等近期的震害经验也是有利的佐证, 尽管这两次地震同时也对现行的结构抗震设计理论和方法提出了许多新的研究课题。因而减轻地震灾害的更有效措施是以合理的经济投入提高新建工程和已成结构的抗震能力。

诚然, 抗震防灾对策的制定与实施必须有赖于地震预报对策的贯彻落实。对于地震防灾、减灾与抗灾救灾这一社会性行为, 结构抗震防灾作为一项根本性环节逐步得到越来越广泛的认可。但是, 对于结构抗震防灾的强调和重视绝不应成为忽视其他各环节的理由和借口。就地震预报对策而言, 工程结构的抗震设计以及已成结构的抗震鉴定与加固须建立在地震预测预报特别是中长期预报的基础上, 否则结构在使用寿命期内所可能遭遇到的地震作用水平将无法确定, 抗震结构的合理性也就无从谈起, 地震危险性分析以及地震动区划和地震动小区划甚至已成为结构抗震设计理论的一部分。

1.2 结构抗震设计与地震动输入

结构抗震设计理论涉及地震学、结构工程学等多门学科知识, 其内容可概括为地震动输入、结构模型化、结构反应分析及抗震设计原则四个部分 (霍俊荣, 1989)。地震动输入即是根据地震危险性分析的结果进行地震动区划, 对于重要的工程结构甚至还需要进行地震动小区划, 从而确定工程结构在设计基准期内具有不同超越概率的设计地震动参数; 结构模型化是指根据分析的目的和侧重点对实际工程结构进行必要的简化, 以使得分析可行, 通常的结构模型化包括结构动力分析模型 (如层模型、杆模型等) 和结构构件恢复力模型 (如二线型、三线型等) 的简化; 结构反应分析则是采取适当的计算方法分析给定结构在给定地震动输入下的响应 (内力及变形); 抗震设计原则是在经济政策指导下对震害经验、抗震原理以及工程经验的综合技术成果, 通常以技术法规的形式体现于各类工程结构的抗震设计规范中。上述四个部分内容既是结构抗震设计理论必须研究的对象, 同时又是具体工程结构抗震设计所应遵循的步骤, 四者彼此独立又相互联系, 不可或缺。

本书旨在阐明地震动输入在结构抗震设计理论的发展和结构抗震设计中的重要意义, 并从结构地震响应分析方法的现状了解工程对地震动输入的需求。

1.2.1 结构抗震设计理论的发展与地震动输入

抗震设计的第一步即是确定设计地震动 (地面运动参数或地面运动时程等), 合理的地震动输入是保证设计结果正确的必要条件。然而, 尽管结构抗震设计理论的快速发展有目共睹, 期间也经历了多次抗震设计思想和设计方法的完善与更新, 但在抗震设计理论的四大部分内容中, 地震动输入的研究却一直落后于其他

三部分内容的研究,在很大程度上决定着各时期抗震设计理论的总体水平,几乎每一次地震动工程特性的突破性认识都伴随着抗震设计方法的革新,它不仅是抗震设计理论发展的制约因素,也是促进抗震设计理论发展的重要动力之一。可以说,结构抗震设计理论的发展史同时又是人们对地震动工程特性的认识过程(李英民等,1998)。

人们对于任何事物的认识都必须经历一个从无知到感知、从浅到深、从片面到全面的发展过程。由于受到当时的认识水平与技术水平以及有限的强震观测记录资料等主客观条件的限制,地震动研究的发展也经历了这样的过程。震害经验的积累和强震观测记录的增多是促进工程地震动研究发展的两大因素。远在结构抗震尚未形成一门工程学科之前,人们对于地震动的认识只限于其强度大小,地震地面运动的强弱也只用烈度这一宏观概念来描述。后续的多数研究则集中于寻求烈度与单一地震动参数(主要是地震动幅值)之间的关系。日本地震学家大森房吉教授于本世纪初提出的震度法标志着静力学抗震设计方法的形成。但静力理论仅考虑了地震地面运动高频振动的幅值,无法考虑地震动的频谱特性与时间历程以及结构动力特性的影响。随着震害经验的积累和强震观测记录的增多,人们对地震动幅值和频谱特性及其影响因素有了更深的认识,美国地震学家 Biot 所提出的地震反应谱概念和地震工程学家 Housner 提出的标准反应谱将抗震设计理论推向了反应谱阶段。作为一种准动力理论(蒋溥等,1991)或等效静力理论,反应谱理论早已成为多数国家抗震设计规范目前采用的主要方法。它以弹性理论为基础,通过反应谱考虑了地震动幅值和频谱特性以及结构的部分动力特性(主要包括自振周期、振型和阻尼),但不能反映地震动持时的影响以及强震作用下结构的非线性行为,并不足以保证结构的抗震安全性。由于非线性问题的复杂性,之后考虑结构非线性特性而提出的弹塑性反应谱则难于应用于工程抗震设计。随着认识的进一步深入、计算机技术和结构动力试验技术的发展,以及一些重要工程和特殊复杂结构抗震设计的要求,以了解结构在整个地震动时程输入过程中的动力行为为目标的动力分析理论自 20 世纪 70 年代起发展迅速,并逐渐成为抗震设计的主要方法之一。对于地震地面运动随机性的认识,使得以随机振动理论为基础的概率设计理论近年来也有了长足的发展(牛荻涛,1991)。

同时,抗震设计理论的发展和设计思想的更新也提高了对地震动输入的要求,从而推动了地震动的深入研究。在结构动力时程分析方法和以随机振动理论为基础的概率设计理论日臻完善的现阶段,了解地震作用下结构动力反应全过程和具有概率统计意义的结构地震响应不仅是可行的,也是必要的。仅采用简化了的几项地震动参数往往达不到这一要求。数量的有限性、地区分布的不均匀性以及不可重现性(特别是某次地震记录到底在多大程度上代表了该场地上的未来地震动)等决定了强震观测记录这种单一的输入形式是远远不够的。基于合理地震

动随机模型的人造地震动则是必要的补充输入形式之一。

1.2.2 结构抗震设计的特点

地震动是非常复杂的随机过程,结构所承受的地震作用又属于动力荷载的范畴,这就决定了结构的抗震设计有别于静力设计和一般的动力设计(如结构抗风设计),有其鲜明的特点。这些特点在很大程度上源于地震动输入的特性。

1.2.2.1 结构抗震设计中的不确定性

结构所遭受的地震作用不仅与地震动特性有关,而且与结构特性特别是动力特性有关,这是地震作用与一般静力荷载的显著区别之一。早期的研究主要认识到地震动振幅和频谱特性对结构响应的影响,近三十年来更多地认识到地震动的不确定性和结构的非线性及不同的破坏阶段,研究更侧重于强震作用下滞回结构的随机响应和可靠性分析。结构抗震设计面临着许多不确定性因素,可概括为(Conte等,1990):

- 1) 地震动输入的不确定性。
- 2) 结构力学性能及几何性质的不确定性。
- 3) 结构数学计算模型的不确定性。
- 4) 动力响应分析中算法的不确定性。
- 5) 基于某些响应参数进行结构可靠性评判的不确定性。

地震动的强非规则性和随机性早已为人们所熟知,输入的不确定性是支配结构地震响应不确定性的最重要因素,Chopra和Kan(1973)、Powell和Row(1976)分析了地面运动的变化及结构模型化假定对响应不确定性的影响,指出地震动输入的不确定性具有决定性的作用。结构材料的力学性能及几何性质本身具有一定的可变性,这种固有的不确定性是无法降低的。为分析方便,需对实际结构进行模型化(包括结构动力分析模型和结构恢复力模型的确定),结构的响应根据需要可采用不同的计算方法,与此有关的不确定性可以通过模型和算法的改进予以降低,许多结构振动台试验研究和结构识别分析的结果证明了这一点。对于某一给定的结构模型,需确定用于标定结构所处状态的响应参数(或状态指标)以及破坏准则,从而评判其动力可靠度并据此进行修改和加固。这一问题一直未有定论。近年来的研究更趋于将结构的破坏归结为位移的首超破坏和塑性累积损伤共同作用的结果(刘伯权,1995)。迄今为止的各种破坏指标与准则几乎都是在特定加载制度下某种结构或子结构试验的基础上提出的,还没有一种被广泛接受,当推广应用到其他的加载形式和不同的结构类型时具有不确定性。

尽管地震动输入所包含的与震源和传播介质的随机性等有关的固有不确定性不能降低且必须接受,但与地震动模型化及参数的非完备知识等有关的不确定

性将随着强震观测数据的日益积累以及地震预测技术的提高而逐渐降低 (Reiter, 1985)。现行的抗震规范对于地震动输入的规定在某些方面存有缺陷和不足, 越来越不适应发展的要求, 强震地震学的发展已经为地震动的深入研究提供了一定的基础, 因此, 研究对结构响应具有决定作用的不确定性输入将更具现实意义。

1.2.2.2 结构抗震设计的设防原则

地震作用与其他荷载形式的区别更重要的体现在其不确定性和随机性。地震发生的时间、空间、强度乃至地震的发生过程都具有不确定性因素, 设计地震动的确定只能用概率方法处理, 工程结构在使用寿命期内是否真正遭受到与设计地震动相当的地震作用同样不得而知。高的抗震投入并非意味着肯定有高的成效, 如果说结构的静力设计可以用强度安全储备的概念来衡量的话, 抗震设计却不能完全依靠强度安全储备 (李杰等, 1992)。另一方面, 一般工程结构在强震中都不同程度地进入非线性阶段, 结构不可能强到足以抵抗任何未来的地震, 对于那种千载难逢的强震而言, 控制结构不致于倒塌的抗震设计无疑具有更大的经济效益。因此, 受地震作用不确定性和经济投入合理性的限制, 考虑结构在不同水平的地震作用下处于不同的工作状态已为工程界广泛接受, 这也是国际地震工程界已经达成一致的抗震设防原则, 只是各国的具体规定不尽不同。在此原则的基础上, 根据结构重要性程度分别采取相应的抗震设防标准。

需要指出的是, 各类工程结构因其重要性程度、地震破坏后所造成的社会和经济后果等的差异而采取不同的设防原则, 如核电设施的抗震设计不允许结构进入非线性状态, 大跨桥梁等的抗震设防原则也不同于一般建筑结构。下文所指的结构除特殊说明外均为建筑结构。

依中国《建筑抗震设计规范》(GBJ11—89) (以下简称《89 规范》) 为例。《89 规范》可以说是唐山地震后国内抗震研究所取得的一系列成果的集中体现, 是符合当时的发展水平的。规范规定了抗震设防的三个水准, 可表示为表 1.1 的

表 1.1 建筑结构抗震设防的三水准

设防水准	涵 义	设计地震动	地震重现期	要 求
第一水准	小震不坏	多遇地震 (小震) 对应的众值烈度, 超越概率 63.2%	50 年	结构处于弹性状态, 一般不损坏或无需修理仍可继续使用
第二水准	中震可修	设防烈度 (多数情况下等于基本烈度), 超越概率 10%	475 年	结构处于弹塑性状态, 可能损坏, 经一般修理或无需修理仍可使用
第三水准	大震不倒	罕遇地震 (大震) 对应的烈度, 超越概率 2%~3%	1642~2475 年	结构经弹塑性状态进入塑性状态, 破坏不可修复, 但不致倒塌或发生危及生命的严重破坏

形式(黄存汉, 1994)。为实现三水准的抗震设计思想, 采取了两阶段设计方法(表 1.2)。新颁布实施的《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010)(以下简称《10 规范》)在地震水准和两阶段设计方面依然与《89 规范》同。

表 1.2 建筑结构抗震设计的两阶段

阶 段	目 标	设计地震动	地震作用性质	要 求
第一阶段	小震不坏(隐含中震可修)	多遇地震(小震)对应的众值烈度	可变作用	计算结构的弹性地震作用及相应的地震作用效应, 采用基本组合进行承载力计算及结构构件的截面设计
第二阶段	大震不倒	罕遇地震(大震)对应的烈度	偶然作用	大多数结构通过概念设计和抗震构造措施满足第三水准的设计要求; 部分结构需采用时程分析法进行层间弹塑性变形的多波验算

可见, 抗震设防的三水准实质上就是对不同重现期设计地震动的量化以及该重现期内抗震结构所期望的动力行为的规定。各国规范处理不同水准地震动量化问题的方法不尽相同。我国规范采用以地震危险性分析(不考虑烈度小于 V 度的地震)及历史资料的统计分析为基础的概率方法确定不同超越概率的地震动。

1.2.2.3 概念设计

基于上述抗震设防原则, 抗震设计需考虑大震下结构的强非线性性能。然而, 结构在地震作用下的破坏和倒塌机制非常复杂, 目前尚未有深刻认识。由于地震作用的不确定性以及结构计算假定与实际情况的差异, 计算设计很难有效地控制结构在地震作用下的薄弱环节, 仅靠计算设计是不切实际的, 要求过分的精确计算也是不合理的。相反地, 抗震设计在很大程度上还有赖于基于震害经验的定性判断和所采取的相应技术措施, 强调概念设计是结构抗震设计的重要特色之一。这就要求工程师在进行抗震设计时, 首先着眼于结构的总体地震响应及其破坏过程灵活运用抗震设计准则, 既重视总体布置上的大原则, 又顾及到关键部位的细节, 从而从根本上提高结构的抗震能力。可以说, 计算设计与概念设计是不可分割的两个组成部分。我国现行抗震设计规范在建筑规划、建设场地、结构体型、多道抗震防线、结构整体性、非结构构件以及抗震构造措施等诸多方面提出具体要求, 体现出对概念设计的重视。这些要求又不同程度地与地震作用水平相匹配, 广义上讲仍然以地震动输入为基础。

1.2.3 结构地震响应的分析方法与地震动输入

了解需求是求得发展的重要途径之一。作为一类系统正演问题, 结构地震响

应的分析方法取决于对地震动输入特性和结构系统特性的认识、分析的目的以及理论基础的水平等,明确各类方法的适用范围和前景对于地震动输入的研究具有指导意义。

1.2.3.1 结构地震响应分析方法

结构地震响应分析方法可以分为确定性方法和非确定性方法两类。前者将地震动输入和结构均处理为确定性现象,分析的目的在于确定具体的反应时程或幅值(表 1.3);后者在广义上应考虑到客观现象的随机性、主客观交互作用所产生的模糊性和人类对客观现象认识的不完备性等三个方面因素(李杰等,1992),即使仅考虑第一因素,也应包括随机性输入下确定性结构的响应分析、确定性输入下随机性结构的响应分析以及随机性输入下随机性结构的响应分析等三方面内容。事实上,由于问题的复杂性和随机性地震动输入对结构响应的决定性作用,非确定性分析在狭义上通常仅特指随机性输入下确定性结构的响应分析,称为结构随机地震响应分析,分析的目的在于确定反应量的概率结构(表 1.4)。

表 1.3 结构确定性地震响应分析的基本方法略表

结 构	适用方法	地震动 输入	基 本 思 路	说 明
线 性	时域方法(数值 积分法或时程 分析法)	加速度 时程	将输入在时域上进行离散,在各时段内的动力问题处理为拟静力问题,采用逐步积分法求解动力方程的数值解。积分方法常用线性加速度法、Wilson- θ 法和 Newmark- β 法等	动力方程可以是增量形式,也可以是全量形式
	一般频域方法	加速度 时程(或 功率谱)	将输入在频域上进行离散,在各时段内的动力问题运用广义频域传递函数求解,叠加得出总体响应	计算繁琐,应用较少
	振 型 分 解 法	加速度 时程	将结构振动特征进行离散,结构的总地震响应表征为主导振型响应的叠加,各振型的响应可按单自由度体系采用时域方法或频域方法进行计算	对具有非黏滞比例阻尼的工程结构宜采用复模态理论
		弹性反 应谱	将结构振动特征进行离散,结构的总地震最大响应表征为主导振型最大响应按一定组合原则的叠加,各振型最大响应根据由反应谱理论确定的地震作用按静力法计算	适用范围受结构特性和输入形式的局限,但仍为最常用方法之一
	底部剪力法	弹性 反应谱	将结构第一振型的最大响应视为结构的总地震最大响应,按静力方法求解	适用范围很有限,属振型分解法的特例

续表

结 构	适用方法	地震动输入	基 本 思 路	说 明
非 线 性	时程分析法	加速度 时程	将输入在时域上进行离散,在各时段内的动力问题处理为拟静力问题,采用逐步积分法求解动力方程的数值解	与线性结构的不同在于结构动力刚度矩阵的修改。应用广泛
	简化方法	弹性反 应谱	将按振型分解反应谱法计算得的弹性地震响应,乘以由统计分析确定的经验比值或放大系数,得出非线性地震响应	适用范围极为有限
	等效线性化方法	加速度 时程	根据分析目的、结构特点等按照一定等效原则将非线性结构等效为线性结构,非线性响应的计算则转化为线性响应的计算	关键在于等效线性结构的确定。存在多种等效原则

表 1.4 结构随机性地震响应分析的基本方法略表

结 构	适用方法	地震动输入	基 本 思 路	说 明
线 性*	振型分解法	地震动随 机模型或 时程集系	将结构离散为经典振型,按单自由度体系计算各振型响应的谱密度函数和相关函数,依振型叠加得出结构总响应的概率特征	适用于比例阻尼体系
非 线 性	摄动法(小参数法)		将解过程展开为小摄动参数的幂级数,级数的每一项分别满足一个随机输入各不相同的线性微分方程,求解得出响应的概率特征	常限于小非线性问题
	等效线性化法		同确定性等效线性化法,将非线性方程组用线性方程组近似等效,等效参数通常由两组方程之差的均方值为最小通过迭代得出	近似程度随非线性程度的增强而变弱
	Markov 矢量法和 Fokker-Planck 方法		视结构状态矢量为 Markov 矢量过程,求解 Fokker-Planck 偏微分方程得出过程的转移概率密度函数,进而得出其他统计特征	为严密解法。适用于激励缺乏相关性的情形
	Wiener-Hermite 展开式法		将激励和响应展开为 Wiener-Hermite 级数,由统计正交性使随机问题化为确定性问题,求解确定性核函数方程得到响应概率特	通常仅计及级数的二阶项

续表

结构	适用方法	地震动输入	基本思路	说 明
线性或非线性的	统计近似方法	地震动加速度记录集系	依大量同一集系地震波作为输入, 采用确定性分析方法求得各地震动波输入下结构的响应, 按统计方法计算结构响应的概率特征	方法局限性较小, 问题的关键在于随机输入的处理, 是一种实用可行的方法
	Monte Carlo 法	地震动随机模型	与统计近似方法相同, 仅输入的样本函数由给定的地震动随机模型采用 Monte Carlo 法大量产生	

* 由线性传输理论, 随机激励下线性结构响应的功率谱密度函数(矩阵)/相关函数(矩阵)等于激励的功率谱密度函数(矩阵)/相关函数(矩阵)与频率响应函数(矩阵)/脉冲响应函数(矩阵)的乘积/卷积。对于结构传递函数矩阵和激励的不同处理形成了多种方法。除振型分解法外, 尚有传递矩阵法、Markov 矢量法等(Lin, 1967; 俞载道等, 1988; 王松涛等, 1997)。

表 1.3 和表 1.4 分别简要归纳了结构确定性地震响应分析和随机地震响应分析的基本方法。除此之外, 许多学者尚提出过其他一些方法。这些方法或者可以归结为表中所列基本方法针对某些特殊结构的具体应用, 或者是这些基本方法的改进和推广, 其实用性更多地受到结构特性和分析目的等的限制。鉴于结构特性对分析方法的适用性常常具有决定性作用, 表中分别又以线性和非线性结构区分各类方法。

在上述各方法中, 反应谱法成为目前各国规范用以分析结构线性响应所广泛采用的最基本方法, 一方面归因于反应谱法具有简便实用性和基本令人满意的工程精度等方面的优势, 一方面则在于迄今为止尚未有其他更合理的方法可以完全替代它, 尽管反应谱法仍然存在着明显的不足。时程分析法则已成为分析非线性响应的最常用方法, 一些国家的抗震规范已将其纳入有关条文。近年来, 结构随机地震响应分析的研究正逐步由理论向工程实用化方向发展。

比较而言, 确定性分析方法可以说已经发展到适当合理的程度, 工程应用上的困难更多地来自于地震动输入的合理确定; 随机分析方法却还面临许多问题, 工程应用上的困难更多地来自于方法本身。

1.2.3.2 结构地震响应分析所需的地震动输入形式

显然, 在结构地震响应分析方法中存在两方面特点值得注意。其一, 多种分析方法并存是切实必要的。分析目的、结构特性、所提供的输入形式以及主客观条件等, 都可能成为分析方法的选择依据。对同一结构采用不同的分析方法也是弥补单一算法不足的必要方式。其二, 多种分析方法的并存势必要求多种形式的地震动输入。归纳起来, 大致可分为以下几类。