

结构多维抗震理论

设计方法

李宏男 著



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

结构多维抗震理论与设计方法

李宏男 著

科学出版社

1998

内 容 简 介

本书是一本学术专著,除介绍一些与本书内容有关的必备知识外,系统论述了工程结构在多维地震动作用下的分析方法和抗震设计问题。主要内容包
括:多维地震动理论,非对称结构在多维地震动作用下的弹性扭转振动,弹塑性扭转振动和随机地震反应,高层建筑和高耸结构在水平与摇摆地震动作用下的反应,以及工程结构在多维地震动作用下的抗震设计方法。

本书读者对象为从事土木建筑专业的研究和设计人员、高等院校的教师、研究生和高年级学生。

图书在版编目(CIP)数据

结构多维抗震理论与设计方法/李宏男著.-北京:科学出版社,1998.10

ISBN 7-03-006958-7

I. 结… II. 李… III. ①抗震结构,多维-建筑理论②抗震结构,多维-结构设计 IV. TU352.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 23358 号

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

新世纪印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1998 年 11 月第 一 版 开本:850×1168 1/32

1998 年 11 月第一次印刷 印张:6 3/4

印数:1—1 600 字数:153 000

定价:16.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

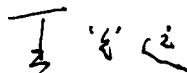
序

无论从理论分析还是从震害现象看,在抗震结构的设计中,必须考虑地震动的多维性,在多维地震动作用下的结构反应是平-扭耦联的空间振动.由于这方面的工作难度较大,研究历史不长,有很多问题没有很好地解决,各国抗震规范都还没有给出考虑多维地震动作用的结构抗震计算与设计方法.随着重大生命线工程和复杂工程的兴建(如核电站、海洋平台、大型水坝等),需要对结构的抗震分析与设计考虑得更精细、更全面一些,这一问题已引起了越来越多学者的极大重视.到目前为止已取得了一些研究成果,散见于各类文献中,但还没有一本系统介绍这方面研究成果的专著.

作者自从1985年起,便开始从事多维地震动及结构多维地震反应分析的研究工作,在多维地震动理论、结构多维随机振动及地震反应分析、结构在多维地震动作用下的抗震设计方法等方面取得了一系列的研究成果,在这一领域做出了可贵的贡献.本书从理论和工程实际入手,以作者的研究成果为主线,并纳入了目前世界上有关方面的最新研究成果,是一本内容丰富,自成系统的专著.

我衷心祝贺科学出版社出版这本专著,并相信该书的出版必将对结构抗震分析与设计的研究工作起到重大的推动作用.

中国工程院院士



1998年4月

前 言

地震是地球上的生命面临的最大的自然灾害之一。一次大地震造成的瞬时之间的破坏,给人们造成了很大的心理上的恐惧。事实上,造成死亡的直接原因主要是由地震引起的建筑物倒塌所造成的。因此,要求当今社会做好两方面的工作,地震预报和地震工程的研究。

但是,即使是成功地进行了地震预报,也不能免除地震灾害。因为即使全部人员安全撤离,决定社会生活水平之一的建筑物是不能迁移的,它们的破坏将造成灾难性的损失。这方面的灾害只能由抗震结构的设计和建造来减轻。工程结构抗震是地震工程学的主要任务之一。

工程结构抗震成为一门工程学科是本世纪 20 年代左右的事,至今约有 70 多年的历史了。在此期间结构抗震理论的发展经历了静力理论、反应谱理论、动力理论和减震控制理论四个阶段。特别是自从 1956 年举行的第一届地震工程会议以来,结构抗震理论有了很大发展。目前,这方面的研究有如下特点:在工程建设中考虑抗震验算并为此而制定的各种抗震规范越来越多;近代结构的震害经验开始增多;新的理论研究和试验研究越来越接近实际情况;计算技术基本可以满足工程中提出的计算要求。

随着震害经验的不断积累,人们逐渐认识到,地震时的地面运动是多维的,有时会产生扭转振动破坏(不论是对称结构,还是偏心结构),震害现象也证实了这一点。如 1976 年唐山地震时,丰润县化肥库对称的砖烟囱顶部顺时针向扭转。唐钢压钢厂 30m 砖烟囱顶部扭转。1975 年海城地震时,海城农电办公楼砖混结构(二层,局部三层),地震时由于房屋体形不对称增加了扭转的影响,西侧底层山墙严重开裂,墙角外倾,交叉裂缝达 10cm。唐山市合成化学厂砒碲套用工段厂房,其结构平面的一个方向是两跨

三柱，另一个方向是一层和二层为三跨四柱，三层和四层为两跨三柱，这就造成了明显的刚度不对称，产生了扭转振动的现象，框架在高度方向结构突变处边角柱断裂。

以上事实说明，在进行结构的抗震分析时仅仅考虑单分量地震动作用是不够的，还应考虑多分量对结构的影响。因此，本书从理论和工程实际入手，对多维地震动理论和结构多维地震反应进行了多方面的论述，主要以作者在该方面的研究成果为主线，补充了一些当前世界上的最新研究成果和相关知识，主要内容包括：第一章论述了多维地震动理论，首先阐述了地震动是多维的观点，然后介绍了目前关于地震动转动分量的研究现状，给出了作者提出的推算地震动转动分量（包括扭转分量和摇摆分量）时程方法和转动分量的功率谱统一数学模型。第二章论述了偏心结构在多维地震动作用下的弹性扭转振动问题，介绍了不同种类型偏心结构的计算模型、振动方程的推演以及多维地震反应计算方法。第三章论述了建筑结构弹塑性扭转振动问题，介绍了目前应用的主要两种模型：塑性力学模型和假设弹簧模型，给出了相应的计算方法，最后讨论了数值计算中的若干问题。第四章论述了结构多维随机地震反应分析问题，首先介绍一些随机振动基础知识，然后给出了地震工程中应用的地震动随机模型。在结构多维随机反应分析方法中，重点论述了作者提出的“结构多维随机振动的振型加速度法”。第五章论述了高层建筑与高耸结构在复合地震动作用下的随机反应分析。第六章论述了结构在多维地震动作用下的抗震设计方法，在评价几种近似方法的基础上，建议了建筑结构考虑多维地震动影响的抗震设计实用方法。

力图反映地震动的实际作用方式和结构反应的主要特性，力图理论与实际相结合，是本书的两个基本出发点。

我要感谢中国工程院院士王光远教授和谢礼立研究员、我的导师中国科学院院士林皋教授推荐本书出版，还要感谢我的导师王前信教授对我多年研究工作的指导。本书研究工作得到国家自然科学基金委员会和建设部、国家教委资助优秀年轻教师基金和

辽宁省优秀青年科研人才培养基金的资助，在此表示衷心感谢。

由于作者水平所限，书中必有疏漏及错误之处，衷心希望读者批评指正。

李宏男

1998年3月 于沈阳

目 录

序

前言

第一章 多维地震动	(1)
1.1 地震动概说	(1)
1.2 地震动特性	(5)
1.2.1 地震动幅值特性	(6)
1.2.2 地震动频谱特性	(8)
1.2.3 地震动持时特性	(10)
1.3 地震动转动分量的研究现状	(12)
1.3.1 引言	(12)
1.3.2 转动分量的弹性波动理论法	(13)
1.3.3 转动分量的两点差法	(20)
1.3.4 转动分量的强震观测	(21)
1.3.5 小结	(22)
1.4 地震动转动分量的时程	(22)
1.4.1 体波情况	(22)
1.4.2 面波情况	(30)
1.4.3 地震动分量的坐标变换	(31)
1.5 地震动转动分量的随机模型	(32)
1.5.1 转动功率谱的数学模型	(33)
1.5.2 工程应用的谱参数统计	(35)
参考文献.....	(37)
 第二章 多维地震动作用下偏心结构弹性扭转振动	(40)
2.1 引言	(40)
2.2 具有刚性楼盖结构的平扭耦联振动	(41)

2.2.1	单层结构体系	(41)
2.2.2	多层结构体系	(49)
2.2.3	振型和振型参与系数	(60)
2.3	弹性楼盖简单体型结构的平扭耦联振动	(62)
2.3.1	结构振动模型	(62)
2.3.2	振动方程	(63)
2.3.3	振型和振型参与系数	(65)
2.4	弹性楼盖复杂体型结构的平扭耦联振动	(66)
2.4.1	结构振动模型	(66)
2.4.2	振动方程	(68)
2.4.3	振型和振型参与系数	(71)
2.5	地震反应计算	(72)
2.5.1	振型分解法	(72)
2.5.2	逐步积分法	(72)
2.6	偏心结构的数值计算	(78)
	参考文献	(80)

第三章 结构多维弹塑性地震反应 (81)

3.1	引言	(81)
3.2	构件单元分析	(81)
3.2.1	塑性力学模型	(81)
3.2.2	柱端假设弹簧模型	(89)
3.3	整体结构的动力分析	(91)
3.3.1	振动方程	(91)
3.3.2	一般计算过程	(92)
3.3.3	数值计算中的若干问题处理	(92)
3.3.4	数值算例	(94)
	参考文献	(95)

第四章 结构多维随机地震反应 (97)

4.1 引言	(97)
4.2 随机振动基础知识	(97)
4.2.1 随机过程	(97)
4.2.2 随机过程的概率结构	(98)
4.2.3 随机过程的数字特征	(99)
4.2.4 常用的数字特征运算规则	(106)
4.2.5 谱参数及其物理意义	(108)
4.2.6 几种重要的随机过程	(110)
4.3 地震动的随机模型	(115)
4.4 多维地震动作用下结构的随机反应	(121)
4.4.1 多维随机振动的振型位移法	(121)
4.4.2 多维随机振动的振型加速度法	(124)
4.5 地震动各分量间的谱矩阵	(127)
4.6 结构动力可靠性分析	(132)
参考文献	(133)

第五章 高层与高耸结构在水平与摇摆地震动作用下的

随机反应

5.1 引言	(135)
5.2 可连续化的高层建筑与高耸结构	(135)
5.2.1 结构振动方程	(135)
5.2.2 振动方程的解耦	(136)
5.2.3 结构均方反应	(138)
5.2.4 例子	(139)
5.3 输电塔高耸结构	(140)
5.3.1 纵向地震动作用情形	(140)
5.3.2 侧向地震动作用情形	(144)
参考文献	(146)

第六章 结构多维抗震设计的反应谱方法

6.1 问题的提出	(148)
6.2 地震反应谱和设计反应谱	(149)
6.2.1 地震反应谱	(149)
6.2.2 设计反应谱	(156)
6.3 单分量输入下的振型分解反应谱法	(161)
6.3.1 忽略各振型间相关性的方法	(161)
6.3.2 考虑各振型相关性的方法	(162)
6.4 多分量输入下的反应谱法	(168)
6.4.1 一般组合公式	(168)
6.4.2 仅考虑双向水平与扭转输入的公式	(170)
6.4.3 几种多维组合方法比较	(171)
参考文献	(175)
附录 1	(178)
附录 2	(179)
附录 3	(179)

CONTENTS

Preface

Introduction

Chapter 1 Multi-Dimensional Seismic Ground Motions

.....	(1)
1.1 Outline of Ground Motion	(1)
1.2 Characteristics of Ground Motion	(5)
1.2.1 Amplitude Characteristics of Ground Motion	(6)
1.2.2 Spectral Characteristics of Ground Motion	(8)
1.2.3 Duration Characteristics of Ground Motion	(10)
1.3 Research Review on Rotational Component of Ground Motion	(12)
1.3.1 Introduction	(12)
1.3.2 Method for Elastic Wave Theory of Rotational Component	(13)
1.3.3 Differential Method for Rotational Component ...	(20)
1.3.4 Strong-Motion Measurement of Rotational Compo- nent	(21)
1.3.5 Concluding Remarks	(22)
1.4 Time History of Seismic Rotational Component	(22)
1.4.1 Situation of Body Wave	(22)
1.4.2 Situation of Surface Wave	(30)
1.4.3 Coordinate Transform of Seismic Component	(31)

1. 5	Stochastic Model for Seismic Rotational Component	··· (32)
1. 5. 1	Mathematical Model for Rotational Power Spectra	·········· (33)
1. 5. 2	Spectral Parameters for Engineering Application	·········· (35)
References	··········	(37)

Chapter 2 Elastic-Torsional Vibration of Eccentric Structures to Multiple Earthquake Excitations

2. 1	Introduction	·········· (40)
2. 2	Lateral-Torsional Coupled Vibration of Structures with Rigid Floor	·········· (41)
2. 2. 1	Single-Story Structure	·········· (41)
2. 2. 2	Multi-Story Structure	·········· (49)
2. 2. 3	Mode-Shape and Modal Participation Efficient	··· (60)
2. 3	Lateral-Torsional Coupled Vibration of Simple Shape Structures with Elastic Floor	·········· (62)
2. 3. 1	Vibration Model for Structure	·········· (62)
2. 3. 2	Equation of Motion	·········· (63)
2. 3. 3	Mode-Shape and Modal Participation Efficient	··· (65)
2. 4	Lateral - Torsional Coupled Vibration of Complicated Shape Structures with Elastic Floor	·········· (66)
2. 4. 1	Vibration Model for Structure	·········· (66)
2. 4. 2	Equation of Motion	·········· (68)
2. 4. 3	Mode-Shape and Modal Participation Efficient	··· (71)
2. 5	Calculation of Seismic Response	·········· (72)
2. 5. 1	Modal Combination Approach	·········· (72)
2. 5. 2	Step-by-Step Integration Approach	·········· (72)
2. 6	Numerical Example	·········· (78)

References	(80)
------------------	--------

Chapter 3 Elastic-Plastic Seismic Response of

Structures to Multiple Earthquake Excita-

tions	(81)
-------------	--------

3.1 Introduction	(81)
3.2 Element Analysis of Structural Member	(81)
3.2.1 Plastic Mechanical Model	(81)
3.2.2 Spring Model Proposed at Column End	(89)
3.3 Dynamic Analysis of Structures	(91)
3.3.1 Equation of Motion	(91)
3.3.2 Process of General Computation	(92)
3.3.3 Some Problems in Numerical Calculation	(92)
3.3.4 Numerical Example	(94)
References	(95)

Chapter 4 Random Seismic Response of Structures to

Multiple Seismic Inputs	(97)
-------------------------------	--------

4.1 Introduction	(97)
4.2 General Knowledge on Random Vibration	(97)
4.2.1 Stochastic Process	(97)
4.2.2 Probability Structure of Stochastic Process	(98)
4.2.3 Statistical Feature of Stochastic Process	(99)
4.2.4 Operation Rules for Common Statistical Feature of Stochastic Process	(106)
4.2.5 Spectral Parameters and Their Physical Meanings	(108)
4.2.6 Several Important Stochastic Processes	(110)
4.3 Random Model for Seismic Ground Motion	(115)
4.4 Random Response of Structures to Multi-Dimensional	

Inputs	(121)
4. 4. 1 Modal Displacement Method of Multiple Random Vibration	(121)
4. 4. 2 Modal Acceleration Method of Multiple Random Vibration	(124)
4. 5 Spectral Matrix of Component Correlation of Ground Motion	(127)
4. 6 Dynamic Reliability Analysis of Structures	(132)
References	(133)

Chapter 5 Random Response of Tall Buildings and Highrise Structures to Horizontal and Rocking Ground Motions

5. 1 Introduction	(135)
5. 2 Continued Tall Buildings and Highrise Structures	(135)
5. 2. 1 Equation of Motion	(135)
5. 2. 2 Decomposition for Equation of motion	(136)
5. 2. 3 Variance Response of Strucure	(138)
5. 2. 4 Example	(139)
5. 3 Transmission Tower	(140)
5. 3. 1 Situation under Action of Longitudinal Ground Motion	(140)
5. 3. 2 Situation under Action of Lateral Ground Mo- tion	(144)
References	(146)

Chapter 6 Response Spectral Method for Earthquake Resistant Design of Structures to Multiple Seismic Ground Motion

6. 1	Introduction	(148)
6. 2	Seismic Response Spectrum and Design Spectrum	(149)
6. 2. 1	Seismic Response Spectrum	(149)
6. 2. 2	Design Spectrum	(156)
6. 3	Response Spectral Approach for Single Component Input	(161)
6. 3. 1	Combination Approach Without Correlation between Modes	(161)
6. 3. 2	Combination Approach with Correlation between Modes	(162)
6. 4	Response Spectral Approach for Multiple Compon- ent Inputs	(168)
6. 4. 1	General Combination Formula	(168)
6. 4. 2	Combination Formula Considering Double Horiz- ontal and Torsional Inputs	(170)
6. 4. 3	Comparison between Several Combinations Approaches for Multiple Inputs	(171)
References		(175)
Appendix 1		(178)
Appendix 2		(178)
Appendix 3		(179)

第一章 多维地震动

1.1 地震动概说

地震属于一种自然现象,按其成因通常可分为三种类型:火山地震、塌陷地震和构造地震。由于前两种地震释放能量相对较小,波及范围也很小。而构造地震破坏性大,发生频繁,影响面广,约占破坏性地震总量的95%以上。因此,在地震工程中主要研究构造地震对地面和工程结构的影响及其防御措施。构造地震通常简称地震。

地震的形成,是由于地球内部总是在不停地运动着,在其运动过程中始终存在着巨大的能量,地壳中的岩层在这些能量引发的巨大力的作用下,使处于原始状态的岩层发生变形。当作用力仅能使岩层产生弯曲变形而没有丧失其连续性时,岩层只产生褶皱,但当作用力超过岩层所能承受的程度时,岩层产生断裂和错动。在这种地壳岩层构造状态的变化过程中,岩层处在复杂的地应力作用状态之下。随着地壳运动的不断变化,地应力的作用超过某处岩层的极限强度时,岩层就会发生突然断裂和错动,从而引起振动,并以弹性波的形式传到地表,形成了地震。岩层发生断裂和错动的地方称为震源。由于岩层的破裂往往是由一系列裂缝组成的破碎地带,整个破碎地带的岩层不可能同时达到平衡,因此在一次强烈地震(主震)之后,岩层的变形还将继续进行调整,从而形成一系列余震。

地震动是由震源释放出来的地震波引起的地表附近土层的振动,它是工程结构抗震计算与设计的主要依据。地震波是一种弹性波,它包含在地球内部传播的体波和只在地表附近传播的面