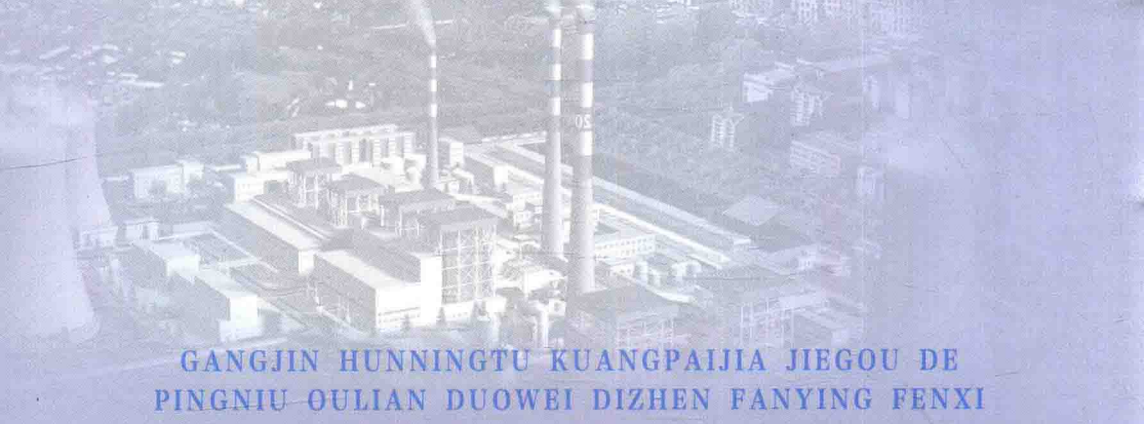




GANGJIN HUNNINGTU KUANGPAIJIA JIEGOU DE
PINGNIU QULIAN DUOWEI DIZHEN FANYING FENXI

钢筋混凝土框排架结构的 平扭耦联多维地震反应分析

白晓红 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

钢筋混凝土框排架结构的 平扭耦联多维地震反应分析

白晓红 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书系统地论述了火力发电厂主厂房中钢筋混凝土框排架结构的平扭耦联多维地震反应问题, 主要内容包括: 空间框排架结构的动力特性; 水平双向地震动作用下, 空间框排架结构的地震反应特点; 单向地震动作用与水平双向地震动作用对空间框排架结构抗震性能的影响差异; 针对空间框排架结构的不规则性, 提出结构的扭转控制措施; 建立水平双向地震作用下, 空间框排架结构的振型分解反应谱法; 结构的空間模型拟动力试验和伪静力试验简介, 对比理论分析和试验结论。

本书可作为土木工程专业的研究人员、工程技术人员以及高等院校的教师、研究生和高年级本科生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

钢筋混凝土框排架结构的平扭耦联多维地震反应分析/
白晓红著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2015. 10
ISBN 978-7-5170-3762-0

I. ①钢… II. ①白… III. ①钢筋混凝土结构—排架
结构—地震反应分析 IV. ①TU375.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第250284号

书 名	钢筋混凝土框排架结构的平扭耦联多维地震反应分析
作 者	白晓红 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	三河市鑫金马印装有限公司
规 格	170mm×240mm 16开本 11印张 210千字
版 次	2015年10月第1版 2015年10月第1次印刷
印 数	0001—1000册
定 价	35.00元

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究



在电力、冶金、矿山等钢筋混凝土工业厂房结构中，由于生产工艺的需求，在同一幢厂房中，多层除氧间、煤仓间与大跨度的单层汽机房相连，形成部分为多层、部分为单层的大空间体系，这就是设计中常见的多层框架、单层排架连成一体钢筋混凝土框排架结构体系。大型火力发电厂是重要的生命线工程，应具有较高的抗震性能，但由于重型设备或贮料仓偏置于厂房的一端，以致质心偏离结构刚心，形成空间非对称结构。特殊的生产工艺要求造成这种框排架结构体系空旷、布置复杂，空间整体性差，荷载传递路径不明确、不直接，从而导致抗震性能差。在我国，由于经济、技术方面的原因，今后相当长的时期内还不得不继续应用钢筋混凝土结构。另外，随着自动化水平的提高，主厂房体型及单机容量不断增大，主体结构的跨度、高度、相邻结构的高差，以及整体结构的不规则程度都将继续加大。因而，针对工业生产需求，研究这类特殊结构形式的抗震性能具有重要的实际意义，并且对于不规则结构的弹塑性地震反应分析也是近年来国内外研究的一个重点课题。

基于大量研究成果，各行业、部门根据自身的行业要求和结构特点，对钢筋混凝土框排架结构的设计与施工，制定出了相应行业规程，如《火力发电厂土建结构设计技术规程》(DL 5022—2012)，但总体而言，结构的安全水准偏低，与该类结构较高的抗震等级相比还需要进一步提高其抗震性能。目前，国内学者通过一系列的理论研究和震害分析已取得了许多有益的结论，但还不够全面，对于结构的不规则性及多维地震输入下的空间地震反应研究还很少涉及。由于该类结构的复杂性和专业性，目前对框排架结构的研究仍有许多问题亟待解决。

本书以已建成投产的单机容量 600MW 某火力发电厂主厂房为

原型,选取含有汽机跨、除氧间及煤仓间3跨8榀框排架空间模型进行地震反应分析,研究结构在双向地震动输入下的受力性能以及影响结构平扭耦联反应的因素。

第1章,介绍钢筋混凝土框排架结构的研究概况,以及国内外对于多维地震输入、不规则结构抗扭性能等课题的研究现状。

第2章,建立钢筋混凝土框排架结构非线性有限元模型,以及研究平面框排架、空间框排架结构的动力特性。

第3章,利用ANSYS软件的用户可编辑特性(UPFs)进行二次开发,修改构件的混凝土弹塑性材料模型,建立整体结构的空间计算模型,在不同的水平双向地震波输入下,利用APDL语言对结构进行平扭耦联的弹塑性时程分析,与结构平面模型的时程分析结果进行比较,探讨整体结构的空间性能。

第4章,通过水平单向和双向地震作用下的结构弹性和弹塑性时程分析,对比单、双向地震作用下的结构空间反应性能及扭转特性,推导结构的最不利输入方向计算公式;对比单、双向地震作用效应最大值,并将比例值进行统计,对抗震规范中相应的双向地震效应组合公式进行系数修正。

第5章,讨论结构在水平双向地震作用下的扭转变形指标,讨论影响多层偏心结构地震反应的各因素对框排架结构的影响。分析空间框排架结构的不规则性,探讨不同因素对结构的影响,提出结构的扭转控制措施。

第6章,建立双向水平地震作用下,空间框排架结构的振型分解反应谱法,选取不同振型组合方法计算结构的地震响应,提出满足计算精度要求的振型组合数目。针对抗震规范中对于振型组合方法的规定,讨论框排架结构振型间的扭转耦联效应,提出适用于此结构的振型组合方法。

第7章,介绍结构的空间模型拟动力试验和伪静力试验,对比理论分析和试验结论,为使用钢筋混凝土框排架结构的各个行业提供参考。

第8章,给出本书研究结论和需要进一步研究的问题。

本书是作者在博士研究生学习阶段及河南科技大学任教期间工作的结晶，其间得到了很多同学、朋友的帮助，特别是我的导师白国良教授以及吴涛师兄，在此对他们表示诚挚的谢意。由于作者水平有限及时间紧迫，书中难免会有错误与不足之处，恳请读者赐正。

白晓红

2015 年 7 月

于河南科技大学

目 录

MULU



前言

第 1 章 概述	1
1.1 多维地震动分量的研究	1
1.2 地震作用下扭转效应的研究	2
1.3 本书主要工作	9
参考文献	10
第 2 章 空间非线性动力分析模型的建立及动力特性分析	14
2.1 多维地震作用下空间结构动力响应分析方法	15
2.2 结构非线性地震反应分析模型	17
2.3 空间框排架结构非线性有限元模型的建立	19
2.4 输入地震波的选取	24
2.5 结构阻尼的确定	25
2.6 框排架结构的动力特性	25
2.7 主要结论	29
参考文献	30
第 3 章 空间框排架结构多维弹塑性时程分析	32
3.1 结构弹塑性地震反应	32
3.2 空间框排架结构在不同地震强度下的弹塑性受力分析	41
3.3 空间相互作用分析	52
3.4 主要结论	56
参考文献	57
第 4 章 框排架结构单双向水平地震作用效应的对比分析	59
4.1 双向水平地震反应研究现状	59
4.2 我国抗震规范对结构扭转效应计算的规定	60
4.3 双向地震动输入对结构的影响	61
4.4 框排架工程实例	62
4.5 弹塑性时程分析计算	63

4.6	单双向地震输入下结构最大地震效应对比	69
4.7	地震动斜向输入下框排架结构的地震反应分析	83
4.8	地面运动分量的相关性对结构反应的影响	86
4.9	主要结论	87
	参考文献	88
第5章	框排架结构的不规则性分析	90
5.1	平扭耦联振动分析方法的研究现状	91
5.2	结构的扭转问题	91
5.3	结构的不规则性	92
5.4	结构偏心问题	95
5.5	框排架结构体系的不规则性分析	100
5.6	双向地震作用下框排架结构扭转反应影响因素	106
5.7	立面不规则对框排架结构扭转反应的影响	112
5.8	框排架结构扭转效应的控制	114
5.9	主要结论	117
	参考文献	117
第6章	钢筋混凝土框排架结构的抗震设计方法	121
6.1	框排架结构考虑平扭耦联的振型分解反应谱法的建立	121
6.2	框排架结构的双向水平地震效应计算	128
6.3	框排架结构基于性能的抗震设计研究	134
6.4	钢筋混凝土主厂房结构设计及建议	138
6.5	主要结论	140
	参考文献	140
第7章	空间模型拟动力试验与理论分析对比	144
7.1	框排架试验介绍	144
7.2	框排架模型结构的动力特性测试与理论分析对比	150
7.3	框排架空间模型结构拟动力试验与理论分析对比	152
7.4	主要结论	160
	参考文献	160
第8章	结论与展望	163
8.1	主要结论	163
8.2	有待研究的问题	167

1.1 多维地震动分量的研究

作为一种严重的自然灾害,地震给人类造成的损失是巨大的,产生的影响是久远的。对建筑结构进行抗震设计,是减轻地震灾害的一种积极有效的方法。目前,国内外在单维地震作用研究方面已形成了比较完善的理论,建立了一套有效的抗震设计方法,并已体现在各国抗震规范中。然而,理论研究与震害经验表明,地震时的地面运动是一复杂的多维运动,包括平动分量和转动分量。结构在单维与多维地震作用下的反应不同,特别是对一些复杂工程结构(如大型水坝、海洋平台、核电站、大跨度及空间结构等),在结构抗震分析时只考虑单分量地震作用是不够的,还应考虑多分量地震作用对结构的影响。近年来,各国学者逐渐认识到对结构进行多维地震作用分析的必要性,已开展了相应的研究,并取得了一些可喜成果^[1]。

实际情况下,地震动有六维分量:3个平动分量和3个转动分量。但迄今为止,在地震观测中,大多获得的是三维平动分量,同时考虑六维地面运动的研究寥寥无几,理论研究尚处于初级阶段。这主要是由于对测量转动分量的强震仪的研究并未取得突破,研究者大多是用间接的方法从已有的平动分量来获得转动分量(常采用弹性波动理论)^[2]。其中,地震波三向平动分量及双向水平分量加绕竖轴的转动分量研究都不成熟;理论方面存在难度,如复合受力下恢复力特性的确定问题;同时,相关试验资料缺乏,如复合受力下,各维力的加、卸载比例如何确定,加、卸载是否同步,以及加载路径如何确定,这些都会对试验结果产生影响。

结构地震反应实测和震害调查表明,仅考虑地震的单向水平作用或按简化的平面模型来分析结构的反应并不能解释实际观察到的一些震害现象。1976年,天津拖拉机厂厂房遭受唐山地震影响,由于未设置柱间支撑,每根柱既是横向抗侧力构件,又是纵向抗侧力构件,地震后多数柱子发生两对角混凝土的破坏和纵筋压曲现象。而在同年宁河地震中,一些柱子又沿另一对角线方向发生同样的对角破坏,这也验证了地震波多维分量的存在。刘季^[3]早在20世纪80年代就对多维地震动复合作用下的结构反应进行了研究,建立了结构在六



维地震动非惯性系统中的运动方程,并分析了地面转动分量对结构地震反应影响的特性,李宏男^[4]对多维地震动理论和结构多维地震反应也进行了多方面的论述。

多维地震作用尤其是双向水平地震作用对于某些结构或构件的抗震设计而言是不容忽视的。文献[5]运用时程分析法对单向不规则3层框架进行研究后认为,双向地震输入下,结构顶层最大位移比单向地震输入时增加17.2%,最大层间位移角增大57.14%。文献[6]研究认为,只对结构进行单向地震动输入的计算方法只适用于简单规则结构,对于复杂结构其计算结构偏小,有时可达30%;对于非规则、偏心结构,如果不考虑双向水平地震作用将导致不合理结果的产生。文献[7]研究认为,高层建筑在双向水平地震作用下的反应是单向水平地震作用的1.2~1.6倍,国内其他研究者也得出类似的结论^[8]。

为了有效地研究结构和构件的空间地震反应,研究者大多通过多维静力加载试验、多维拟静力试验和地震模拟振动台试验来进行试验研究。在大量的双向加载情况下,构件的恢复力和滞回能力以及塑性变形能力、承载力等均与单向加载情况下的表现不同。M Seki 和 T Okada^[9]对具有钢筋混凝土柱和剪力墙的空间框架结构进行了双向拟动力试验。结果表明,与单向加载相比,双向加载下的结构响应位移显著增大,其主要抗侧力构件及剪力墙数量和位置极大地影响结构的响应位移。T Okada 等^[10]对6个强梁弱柱型框架模型进行了振动台试验,双向地震输入使模型的最大位移反应比单向地震输入时增加了1.1~2.2倍。Isamu 等^[11]完成了2个11层板柱模型框架的振动台试验,分别进行了单向地震波输入和双向地震波输入,得出了不同地震输入下结构不同的破坏形式。杜宏彪^[12]研究了由于质量偏心 and 斜向水平地震输入引起的结构空间弹塑性地震反应,通过不同种类的框排架模型结构振动台试验研究得出结论:质量偏心或双向地面运动引起的结构空间作用加剧了结构的反应,在相同激励水平下,与平面结构反应相比,结构承载力降低、位移增大,由于柱受双向弯曲作用,即使是强柱弱梁型结构,柱也会成为结构的薄弱环节。

多维地面运动对结构的影响不仅在于具有加剧结构破坏的趋势,还在于各维地震波的频谱组成和相对大小关系对结构反应也有很大的影响,各维地震波的不同组成会造成结构截然不同的破坏形式,这些均要求对结构在多维地震下的弹塑性性能进行综合研究,以期增加结构抗震的可靠性。

1.2 地震作用下扭转效应的研究

1.2.1 扭转震害

随着现代建筑的发展,突出个性特点、摆脱传统布局形式的建筑日益增



多。这类建筑体型多样，结构往往存在偏心，地震时，结构将产生明显的平扭耦联空间振动，严重影响其抗震性能。

1999 年的台湾集集地震中，许多不对称、不规则的砖混与钢筋混凝土结构都出现了类似的扭转震害特性，明显反映了地震作用下结构的扭转效应，它使建筑物抗侧力构件相对较柔的一侧剪力与位移较大，出现了较重的震害，而另一侧的震害相对较轻^[13]。表 1.1 为此次地震中不同建筑平面的破坏率对比^[14-15]。图 1.1~图 1.3 为地震中结构严重不规则、结构体系布置不合理等因素导致的破坏图示。简单紧凑平面形式的建筑，往往比复杂散乱布置形式的建筑具有更好的抗震性能。由表 1.1 可以看出，建筑平、立面不规则，结构质量、刚度分布不均匀引起的扭转振动，是造成不规则结构破坏的重要因素。

表 1.1 建筑平、立面破坏率对比

平面形状	矩形	L 形	Π 形	十形	H 形	其他
破坏率/%	85.0	4.0	8.5	0.05	0.15	2.4
立面形状	带骑楼		底层挑高	二楼悬臂	二楼退缩	其他
破坏率/%	55.6		5.6	4.4	1.3	33.1

图 1.1 为一座 9 层钢筋混凝土大楼，第 1 层和第 2 层为空旷大厅，结构竖向不规则、刚度突变，且梁柱不在同一轴线上，不能形成完整的框架抗侧力体系来有效地传递水平地震作用。地震作用下，结构产生扭转效应，建筑入口处的两根柱子分别受压、受拉折断，导致结构整体倾倒。图 1.2 所示建筑结构平面不规则，平面刚度不均匀，地震时底层倒塌，带动上部结构层层垮落。这类结构在水平地震作用下，由于结构产生严重扭转效应而破坏倒塌。图 1.3 所示为一长途汽车站底层候车大厅，结构竖向不规则，上部结构与底层刚度之比远大于 2，形成所谓“鸡腿”建筑，地震时底层完全倒塌而上部结构基本完好。

2006 年，在云南省昭通市盐津县地震中，不同类型房屋表现出不同的破坏形式。其中，框排架结构房屋的破坏主要是由于结构体系布置不甚合理所



图 1.1 竖向不规则结构破坏



图 1.2 平面不规则结构破坏

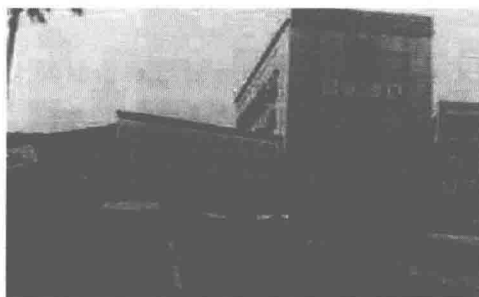


图 1.3 竖向不规则结构破坏

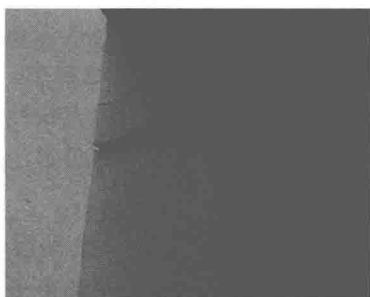


图 1.4 柱子端部破坏

致^[16]。图 1.4 为框架结构柱端破坏形式。这主要是由于结构体系布置不合理，一些房屋底层柱子为石柱，相连接的上部两层采用钢筋混凝土框架结构，交接处两种材料性能差异较大，而上部框架结构整体性较好，地震时发生整体结构侧移，在底层石柱上端与梁连接处发生剪切破坏。

1978 年的日本宫成冲地震，钢筋混凝土房屋的扭转破坏和大量 SRC 短柱破坏严重。图 1.5 为其中一幢房屋由于一端以剪力墙设置楼梯间，一端只设置柱子，造成整体结构的平面刚度布置不均匀，在地震作用下，刚度较小一端的角柱发生破坏，楼板塌落。

1964 年，美国阿拉斯加发生地震，图 1.6 为一被破坏的商业建筑，此房屋一端设置剪力墙，另一端设置预制填充墙，由于剪力墙布置不对称，整体结构平面刚度不均匀而引发扭转破坏。



图 1.5 平面不规则造成的角柱破坏



图 1.6 平面不规则破坏

2003 年，阿尔及利亚发生 6.8 级强烈地震^[17]，部分框架结构由于底层层高较高，成为整体结构的薄弱层，结构各层刚度和强度分布不均匀，导致此类房屋底层倒塌、倾斜。一些沿街框架结构房屋，结构一侧无纵墙，整体结构刚度分布不均，由于底层纵向刚度不足或扭转效应的影响，使得结构沿纵向产生倒塌。还有一些框架结构房屋，由于建筑平面复杂不对称，又没有设置抗震



缝,致使结构发生扭转破坏。

2005年,江西省九江市发生5.7级地震^[18],布置合理的框架结构房屋几乎没有产生破坏,而一些设计不合理,上刚下柔,平面上出现凹角,立面上存在突出屋面结构的不规则框架结构,还有一些在建成后局部改造成大空间房屋,致使结构局部刚度发生突变,引发结构产生扭转等形式的破坏。

1995年,在日本阪神大地震中,数百幢钢筋混凝土建筑严重破坏甚至倒塌,而其中由于刚度、质量偏心引起的扭转破坏是钢筋混凝土房屋在这次地震中出现的几类典型破坏现象之一^[19]。

1.2.2 引起扭转破坏的因素

引起结构扭转振动的因素总的说来主要有两点:地震动本身包含的转动分量以及建筑结构本身的因素。

地震波通过地面时的运动极其复杂,各点的波速、周期和相位是不同的。由于地面各点间运动的差别,使得地面的每一部分不仅产生3个正交的平动分量(1个竖向的和2个水平的分量),而且也产生3个转动分量。由于受地震观测水平所限,目前对转动分量的作用了解甚少,对于已有的一些转动分量的记录,其可靠性又难以保证。因此,对于地震运动中转动分量引起的结构扭转效应研究甚少,现有的研究主要是从理论方面进行了一些探索。当地面运动存在扭转分量时,不论结构对称与否,都会出现扭转效应,大量的震害现象也证明了这一点。结构本身的因素引起扭转主要表现在结构自身的不规则性,它所引起的扭转包含两种情况:其一,结构平面或立面布置不规则导致结构质心和刚心存在偏心(或称为静力偏心),从而引起平移扭转耦联反应;其二,由于偶然因素,包括由于施工偏差使质心及刚心位置存在不确定性、结构基础与其下部地基土或岩石地基的耦联反应存在差别、结构刚度退化不均匀及结构损伤不规则等引起结构扭转(偶然偏心)。国内外的震害经验也表明,由于结构本身的不规则导致的扭转效应是造成结构破坏的主要原因。因此,目前关于结构的扭转研究主要集中在结构自身布置不规则上,各国规范关于结构的扭转效应与抗扭设计的规定主要体现在把结构按其抗扭特点划分为规则和不规则两类,在地震反应分析方法及构造措施上分别提出要求,使结构具备相应的抗扭能力。

1.2.3 国内关于不规则结构扭转效应的研究现状

在国内,目前由于钢筋混凝土结构的非线性分析还主要处于二维平面分析阶段,对于三维结构非线性地震反应扭转作用和扭转效应分析的研究成果尚少。我国《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)基于力的两阶段抗震设计方法,对于一般建筑结构,第一阶段按众值地震进行弹性设计,第二阶段按罕



遇地震进行薄弱层抗震变形验算。目前规范只给出了一般规则结构的层间弹塑性位移简化计算方法,对于其他不规则结构,推荐采用时程分析法。

不规则结构在遭遇中等强度的地震时,其非弹性变形或结构体系的损坏是否能限制在经修复后可继续使用的范围内,以及在遭遇罕遇地震时能否不发生结构性倒塌以保证人的生命安全,也即能否满足规范所要求的抗震设防水准,还很不清楚。结构进入弹塑性状态后的延性变形能力,是结构抗震设计的重要设防标准,不同类型结构的延性性质不同,结构体系的不规则性也势必会影响整体结构的延性表现。现行抗震规范对不规则结构没有一整套完善的设计方案和设防指标规定,只是根据震害和设计经验对不规则结构的平面、立面布置提出了限制要求,以减小扭转效应,同时对底柱和角柱等受力复杂的构件的内力设计值分别乘以适当的增大系数,以考虑结构扭转可能引起的不利影响。这样做的效果究竟如何,严格说还需要通过大量结构三维非线性地震反应的定量分析,才能得到证实。

对于非对称结构的弹性反应分析,一般采用振型分解反应谱法。刘季^[20]等利用反应谱求解偏心结构在地震动双向水平分量和扭转分量作用下的反应问题,证实结构存在平移振动和扭转振动耦联的情况。

文献[21]对层高有缩进、平面不对称的不规则框架进行了振动台试验,对在地震作用下不规则框架的扭转效应进行了分析,指出双向地震作用下,角柱因双向压弯成为结构薄弱部位,竖向楼层缩进使刚度减弱层反应增大,对此类不规则框架结构应考虑扭转效应的影响。

文献[22]对钢筋混凝土空间框架进行了振动台试验,研究了质量偏心 and 双向地震作用情况下结构的地震反应,对结构的空间地震反应与平面地震反应的试验研究结果进行了对比。结果表明:对于空间反应的框架结构,即使是“强柱弱梁”型的结构,由于柱子受双向弯曲作用而成为结构的薄弱环节,现行的结构仅按平面结构在两个方向分别进行地震反应分析,而不考虑结构构件的多轴内力同时作用的塑性耦合的影响,是偏于不安全的。对于因两个方向地震力的共同作用或质量中心与刚度中心不重合引起的空间反应而导致的结构构件的破坏,应在设计中重视。

文献[4]对不规则框架在多维地震动作用下的弹塑性反应进行了分析,给出了目前主要应用的两种模型:塑性力学模型和假设弹簧模型,给出了相应的计算方法,并讨论了数值计算的相关问题。

文献[23]针对多层偏心结构弹塑性分析的特点给出空间简化的模型,并提出基于该模型的弹塑性地震反应时程分析方法。

文献[7]研究了高层建筑结构在地震作用下扭转与平移振动的耦联反应及其近似计算,分析了影响扭转效应动力增大的主要因素,并提出了扭转振动



效应的抗震设计建议。

文献 [24] 采用振型分解反应谱方法分析了结构平面形状对地震反应的影响, 计算结果表明地震作用下扭转效应对非对称结构影响极大, 地震区非对称房屋震害必然加剧, 设计此类结构必须考虑扭转效应。

魏琰等^[25]从剪切模型结构出发, 考虑二维水平地震波作用, 采用仅适用于强柱弱梁型结构的恢复力模型, 对多层偏心结构进行了弹塑性扭转反应分析。

李宏男等^[26]通过随机反应分析对多维地震动作用下非对称结构扭转耦联进行计算, 指出偏心矩对偏心结构的影响及地震动扭转分量本身的影响作用。

张寰华^[27]通过结构多维地震动作用下的随机反应分析, 指出钢筋混凝土空间框架结构在多维地震动作用下的平移-扭转耦联效应更明显。

1.2.4 国外关于不规则结构扭转效应的研究现状

不规则结构的弹塑性地震反应分析是近年来研究的一个重点课题。在国外, 关于结构非线性地震扭转效应的分析主要集中在单层简单的层间剪切结构模型上。1938年, 美国学者 Ayre R S^[28]在《美洲地震科学简报》上首次发表了关于地震作用下的偏心结构的平动、扭转耦合作用的文章。早在1994年欧洲地震工程协会就成立了“欧洲任务组 (TG8)”^[29], 其首要任务是研究结构刚度、质量和强度不对称及竖向分布不规则产生的扭转影响, 以期进一步完善抗震设计规范。但是, 由于目前在地震作用下的扭转反应研究仍不成熟, 影响因素甚多, 且各因素之间存在一定的关联性, 再加上不同的研究者采用的计算模型也不一致, 导致结构非线性扭转反应影响规律的结论并不统一, 许多研究者得出的结论差别很大, 甚至是完全矛盾的。由于国外的规范大多采用等效静力法 (考虑实际偏心和偶然偏心) 进行结构抗扭设计, 因此这些研究主要集中在等效静力法中的设计偏心矩取值问题上。总的说来, 国外规范了一些单层简单结构模型的非线性分析方法, 但缺乏真正意义上的结构三维非线性动力分析依据。

Kan^[30]研究了一种各层质心和刚心在不同竖轴上的特殊多层剪切非对称结构的弹性和弹塑性地震反应, 指出了结构在不同受力阶段的平扭耦联情况。

文献 [31] 给出了不规则框架结构考虑非弹性变形限值的简化抗震设计方法。

文献 [32] 研究了不规则结构在弹性及弹塑性阶段的扭转效应, 讨论了不同平扭频率比对结构扭转效应的影响。

文献 [33] 对不规则结构进行了考虑扭转效应动力效应的非弹性地震反应分析, 提出了有效偏心矩的概念, 并提出了相应的计算方法。



文献 [34-35] 在不规则结构的非弹性时程分析中指出, 结构刚性边构件受周期的影响程度比柔性边构件明显, 并讨论了结构设计参数 (设计偏心矩、刚度回转半径等) 对结构扭转地震效应的影响, 给出了平均意义上的参数变化规律。

文献 [36-37] 利用强度偏心矩来反映结构抗侧力构件的强度分布情况, 并以此作为结构在非弹性阶段的地震扭转反应分析指标, 指出强度偏心矩的变化会影响结构反应的屈服特性, 通过几个国家抗震规范的比较, 作者指出强度中心位于质心和刚心之间的建筑结构体系是有效、合理的体系。

文献 [38-39] 采用 push-over 方法研究了偏心结构基于可靠度和功能的抗震设计方法, 对偏心率较小、平扭耦联反应较弱的体系取得了较好的计算精度。

国外对于偏心结构扭转反应的试验研究非常有限。文献 [40-41] 对一双向地震作用下的不规则多层结构的平扭耦联反应进行全尺寸拟动力试验, 分析了地震反应的影响因素问题。

1.2.5 钢筋混凝土框排架结构研究现状

在唐山地震中^[42-43], 陡河电厂钢筋混凝土框排架主厂房部分倒塌, 造成电力供应中断。自此以后, 我国学者对火力发电厂钢筋混凝土框排架结构开始进行深入的分析与研究。

李树桢等^[44]对 20 世纪 80 年代建成投产的 5 座 300MW 机组的横向单榀钢筋混凝土框排架结构进行了弹塑性动力时程分析, 计算结果表明: 钢筋混凝土框排架主厂房基本满足抗震设防烈度的要求, 强震下个别构件可能严重破坏, 整体厂房达不到“强柱弱梁”的抗震要求。

洪柏年等^[45]对已建成的某电厂的钢筋混凝土框排架主厂房进行了弹塑性动力时程分析, 研究结果表明: 按规范计算的结果并不一定保证该类结构达到抗震目的, 建议对火力发电厂主厂房应尽量做到质量、刚度分布均匀, 避免结构中短柱的存在。

文献 [46] 对某大型钢结构工业厂房中, 一单层多跨和多层双跨、不等高连续框排架全钢结构进行了空间地震反应, 并探讨了吊车摆放位置对结构空间地震反应结果的影响。

文献 [47-48] 对一典型的钢筋混凝土超长框排架结构进行了非线性分析, 主要研究了该类结构的温度应力变形特征和伸缩缝的设置, 为实际工程提供参考。

文献 [49] 针对框排架结构中的排架部分荷载小、刚度小的特点, 提出改良的双肢柱设计方案, 以提高排架柱的纵向刚度, 减小结构位移和扭转。



文献 [50] 根据框排架承重体系的大型组合结构工业厂房的现场实测资料, 分析了其动力特性, 并对增载后的屋顶刚度进行了数值模拟分析。振动测试结果表明, 该结构振型基本为一斜直线, 在计算结构的地震反应时, 可按剪切变形为主。厂房顶部由于刚度相对于下部较小, 振型曲线有局部外甩现象, 位移相对较大。

文献 [51] 通过编制程序对某火电厂主厂房框排架结构遭遇多遇烈度、设防烈度及罕遇烈度时的地震反应进行了计算分析。随着遭遇地震时间的推后, 结构构件不断出现裂缝和塑性铰, 结构刚度下降, 相应的结构自振周期延长, 且结构大多数部位的层间位移角有较大幅度增长, 最大层间位移角的部位不变。

刘大海等^[52]采用空间计算模型对发电厂主厂房整体框排架结构抗震性能进行了分析, 建立了该类厂房在双向水平地震作用下的扭转振动计算方法。

文献 [53] 对某电厂主厂房框排架结构进行了空间地震反应分析, 通过空间结构杆件内力与平面杆件内力的比较、分析, 对横向框排架结构的空间作用调整系数进行了一些定性讨论。

文献 [54] 对一端设置山墙的框排架结构在地震作用下的扭转效应进行了研究, 结果表明: 该类框排架结构空间地震反应远大于平面模型的相应结果, 如简化为平面模型计算, 其空间作用调整系数较大。

西北电力设计院和西安建筑科技大学^[55]2000 年完成大型火力发电厂框排架纵向结构框架-抗震墙体系以及纵向带耗能支撑框架结构的拟动力试验研究, 对框排架纵向结构体系提出了初步的设计方法。

西北电力设计院和西安建筑科技大学^[56-57]2002 年完成了 16 根钢筋混凝土框排架结构柱 (其中 9 根为高强混凝土柱)、9 个变梁变柱异型平面节点和 1 个带直交梁空间节点的试验研究, 为整体结构的进一步研究提供了试验依据。

基于大量研究成果, 各行业、部门根据自身的行业要求和结构特点, 对钢筋混凝土框排架结构的设计与施工, 制定出了相应行业规程。如《火力发电厂土建结构设计技术规程》(DL 5022—2012)^[58]等。但总体而言, 结构的安全水准偏低, 与该类结构较高的抗震等级相比还需要进一步提高其抗震性能。目前, 通过一系列的理论和震害分析已取得了许多有益的结论, 但还不够全面, 对于结构的不规则性及多维地震输入下的空间地震反应研究还较少涉及。由于该类结构的复杂性和专业性, 目前对框排架结构的研究仍有许多问题有待解决。

1.3 本书主要工作

由于地震地面运动规律的复杂性和结构形式、偏心形式的多样性, 本书主