

梁兴文 著

结构抗震性能设计 理论与方法



科学出版社

结构抗震性能设计理论与方法

梁兴文 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书较全面系统地阐述了结构抗震性能设计的理念、理论框架和基本方法,主要内容包括:结构抗震性能设计的理论框架和实现性能设计理念的主要方法;结构静力弹塑性分析方法;框架结构、框架-剪力墙结构、剪力墙结构、带加强层高层建筑结构和消能减震结构基于性能的抗震设计方法。其中,钢筋混凝土结构的设计谱方法、多性能目标控制设计方法、考虑高振型影响的直接基于位移的抗震设计方法、基于剪力墙结构顶点位移角限值的剪力墙截面变形能力设计方法等内容为本书作者提出。

本书可供结构工程、防灾减灾工程及防护工程专业的研究生以及土木工程专业的高年级学生参考,也可供从事工程设计的人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

结构抗震性能设计理论与方法/梁兴文著. —北京:科学出版社,2011.3

ISBN 978-7-03-030248-9

I. ①结… II. ①梁… 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 021707 号

责任编辑:刘宝莉 陈 婕 / 责任校对:朱光兰

责任印制:赵 博 / 封面设计:鑫联必升

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>

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011 年 3 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2011 年 3 月第一次印刷 印张: 20

印数: 1—3 000 字数: 388 000

定价: 50.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

我国现行规范的抗震设计方法是基于力的设计方法,此方法在保障生命安全方面有一定的可靠性,但却不能控制地震造成的损失。因此,20世纪90年代,美国、日本学者率先提出了基于结构性能的抗震设计思想。同期,作者及其研究生也开展了相关研究。我国新修订的国家标准《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)和行业标准《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ 3—2010)也将基于结构性能的抗震设计方法纳入其中。为了对近十余年来的研究成果进行总结,同时也为新规范的颁布提供背景材料,作者撰写了本书。

本书内容基于国家自然科学基金项目“高性能混凝土剪力墙地震破坏机理及性能设计理论研究”(50678146)、高等学校博士学科点专项科研项目“高强型钢高性能混凝土剪力墙性能设计理论与方法”(20070703002)、陕西省自然科学基金项目“钢筋混凝土结构基于位移的抗震设计理论与方法研究”(2001C26)和陕西省教育厅专项科研计划项目“高层建筑结构基于性能的抗震设计理论与方法”(05JK236)等研究成果。全书共7章,内容安排如下:

第1章阐述了现行抗震设计方法存在的问题以及基于性能的抗震设计方法的发展,将基于位移的抗震设计方法分为基于变形校核的设计方法、基于变形能力计算的设计方法和基于规定变形的的设计方法。

第2章论述了等效单自由度体系的转换、直接基于位移的抗震设计方法、基于变形校核和基于变形能力计算的抗震设计方法等。本章除了介绍国际上几种主要的性能抗震设计方法(如直接基于位移的方法、能力谱法等)外,还介绍了我国新修订的《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)推荐的性能设计方法以及作者所在课题组提出的钢筋混凝土结构抗震性能的设计谱方法,此种设计谱方法可以计算混凝土结构在中震、大震作用下的弹塑性位移。

第3章论述了结构静力弹塑性分析的基本原理、实施方法以及改进方法,如适时谱推覆分析方法、模态推覆分析方法,以及作者所在课题组对静力弹塑性分析方法的几点改进等。

第4章分别介绍了框架结构和框架-剪力墙结构直接基于性能的抗震设计方法,包括基于损伤控制极限状态的设计方法、作者提出的多性能目标控制设计方法和考虑高振型影响的设计方法。此外,本章还对框架结构层间目标侧移的确定方法进行了深入探讨。

第5章介绍了高层建筑剪力墙结构基于性能的抗震设计理论与方法,包括作

者所做的高性能混凝土剪力墙性能设计理论的试验研究结果、剪力墙塑性铰区受剪承载力计算方法、剪力墙结构有害层间侧移的计算公式和目标层间侧移的确定方法、剪力墙结构直接基于位移的抗震设计方法和抗震性能评估方法、高层建筑结构考虑高振型影响的基于位移的抗震性能评估方法以及剪力墙截面变形能力设计方法。

第6章介绍了带加强层高层建筑结构基于性能的抗震设计方法,包括加强层刚度的合理取值、带加强层高层建筑结构性能水准划分和评价指标、地震力的简化计算、带加强层高层建筑结构直接基于位移的抗震设计和基于能力谱法的抗震设计方法等。

第7章介绍了消能减震结构基于性能的抗震设计方法,包括黏滞阻尼器、黏弹性阻尼器、摩擦阻尼器和金属屈服阻尼器的力学性能,消能减震结构的性能水平划分及评价指标,以及消能减震结构直接基于位移的设计方法、附加黏滞阻尼器结构基于改进能力谱法的抗震设计方法等。

本书涉及的研究成果是作者与研究生共同完成的。研究生包括博士研究生黄雅捷、叶艳霞、邓明科、刘清山、李方圆、李波、杨克家、辛力、白亮、崔晓玲、马恺泽、李艳等,硕士研究生田野、瞿岳前、张伟、蒋建、张思海、李林、谢俊强、黄思林、田士峰、胡双平、陈立建、吴继伟、吴琴峰、文保军、张倩、赵风雷、李萍、张涛、杨红楼、方林、赵花静、张军、李菲菲、同盈等。在本书撰写过程中,邓明科、杨克家和李波分别撰写了第5、6、7章。资深教授童岳先生审阅了本书初稿,并提出了宝贵的修改意见。在此,对所有为此书付出努力和辛劳的人表示衷心的感谢。

由于作者水平所限,书中难免存在不妥之处,敬请读者批评指正。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 问题的提出	1
1.1.1 抗震设计方法的演变	1
1.1.2 基于力的设计方法存在的问题	3
1.1.3 基于性能的抗震设计方法的提出	4
1.2 基于位移的抗震设计方法的发展	5
1.2.1 基于变形校核的设计方法	5
1.2.2 基于变形能力计算的设计方法	5
1.2.3 基于规定变形的的设计方法	5
参考文献	6
第 2 章 结构性能抗震设计理论与方法	7
2.1 结构性能抗震设计的理论框架	7
2.1.1 地震设防水准	7
2.1.2 建筑物的性能水准	8
2.1.3 结构性能目标	10
2.1.4 实现结构抗震性能目标的设计方法	12
2.2 等效单自由度体系	12
2.2.1 等效质量、等效位移和等效刚度	12
2.2.2 等效周期和等效阻尼比	15
2.3 直接基于位移的抗震设计方法	16
2.3.1 基本思路及步骤	16
2.3.2 几点补充说明	18
2.4 基于变形校核的设计方法	20
2.4.1 能力谱法	20
2.4.2 我国抗震设计规范建议的性能设计方法	23
2.4.3 钢筋混凝土结构抗震性能的设计谱方法	28
2.5 基于变形能力计算的设计方法	41
2.5.1 罗文斌、钱稼茹建议的方法	41
2.5.2 钱稼茹、徐福江建议的方法	43

2.5.3 吕西林、周定松等建议的方法	44
参考文献	44
第3章 结构静力弹塑性分析	46
3.1 基本原理和方法	46
3.1.1 静力弹塑性分析方法的基本假定	46
3.1.2 目标位移	47
3.1.3 水平荷载的加载模式	48
3.1.4 实施步骤	50
3.2 适应谱推覆分析方法	51
3.3 模态推覆分析方法	52
3.3.1 单自由度弹性体系的地震反应	52
3.3.2 多自由度弹性体系的地震反应及推覆分析	52
3.3.3 多自由度非弹性体系的地震反应及推覆分析	55
3.3.4 对模态推覆分析方法的几点改进	57
参考文献	63
第4章 框架和框架-剪力墙结构基于性能的抗震设计	64
4.1 结构性能水平划分及评价指标	64
4.2 框架结构直接基于位移的抗震设计	65
4.2.1 基于损伤控制极限状态的设计	65
4.2.2 多性能目标控制设计	67
4.2.3 框架结构考虑高振型影响的设计方法	75
4.2.4 框架结构层间屈服位移的计算	81
4.3 框架-剪力墙结构直接基于位移的抗震设计	85
4.3.1 框架-剪力墙结构的初步设计	85
4.3.2 基于损伤控制极限状态的设计	87
4.3.3 多性能目标控制设计	89
4.3.4 框架-剪力墙结构考虑高振型影响的设计方法	92
参考文献	93
第5章 剪力墙结构基于性能的抗震设计	95
5.1 引言	95
5.2 高性能混凝土剪力墙性能设计理论的试验研究	95
5.2.1 试验研究思路	95
5.2.2 试验概况	96
5.2.3 荷载-位移滞回曲线	99
5.2.4 性能指标	101

5.2.5 试验研究的主要结论	106
5.3 剪力墙截面承载力分析	107
5.3.1 剪力墙正截面承载力	107
5.3.2 剪力墙塑性铰区受剪承载力	113
5.3.3 剪力墙斜截面受剪承载力	121
5.4 剪力墙结构的层间侧移分析	124
5.4.1 结构的侧移与变形控制	124
5.4.2 剪力墙结构的层间变形	126
5.4.3 剪力墙结构的变形控制	131
5.5 混凝土剪力墙结构直接基于位移的抗震设计	131
5.5.1 基于损伤控制极限状态的设计	131
5.5.2 多性能目标控制设计	133
5.6 混凝土剪力墙结构考虑高振型影响的基于位移的抗震设计	134
5.6.1 概述	134
5.6.2 考虑高振型影响的剪力墙结构直接基于位移的抗震设计方法	135
5.6.3 剪力墙结构的弹性刚度选取	137
5.6.4 剪力墙结构设计地震力取值	138
5.6.5 算例及分析	143
5.7 基于位移的抗震性能评估	148
5.7.1 单自由结构性能评估方法	148
5.7.2 剪力墙结构性能评估	151
5.7.3 高层建筑结构基于位移的抗震性能评估	153
5.8 剪力墙截面变形能力设计	157
5.8.1 基于位移延性的剪力墙截面变形能力设计	157
5.8.2 基于剪力墙顶点位移角的剪力墙截面变形能力设计	158
5.8.3 基于塑性转角需求的剪力墙边缘构件设计	165
参考文献	171
第6章 带加强层高层建筑结构基于性能的抗震设计	175
6.1 引言	175
6.1.1 带加强层高层建筑结构	175
6.1.2 简化静力模型及待研究的问题	175
6.1.3 基于结构性能的抗震设计	176
6.2 带加强层高层建筑结构的受力性能及加强层刚度限值	176
6.2.1 简化模型的静力分析	176
6.2.2 静力分析模型及其原型	178

6.2.3	结构受力性能的影响因素分析	180
6.2.4	对结构内力的影响分析	185
6.2.5	时程分析	189
6.2.6	小结	190
6.3	带加强层高层建筑结构的性能水准划分及评价指标	191
6.3.1	概述	191
6.3.2	性能水准的划分	192
6.3.3	带加强层高层建筑结构的层间侧移	193
6.3.4	性能水准的量化	196
6.3.5	小结	202
6.4	带加强层高层建筑结构地震力的简化计算	203
6.4.1	振型分解反应谱法	203
6.4.2	带加强层结构的特点	204
6.4.3	多自由度与单自由度体系的等效原理	205
6.4.4	等效地震作用的计算步骤	209
6.4.5	计算实例	210
6.4.6	小结	218
6.5	带加强层高层建筑结构直接基于位移的抗震设计	219
6.5.1	直接基于位移抗震设计的关键问题	219
6.5.2	结构的目标侧移模式	221
6.5.3	直接基于位移的抗震设计步骤	227
6.5.4	算例	228
6.5.5	小结	243
6.6	带加强层高层建筑结构基于能力谱法的抗震设计	244
6.6.1	能力谱法的几个问题	244
6.6.2	模态推覆分析振型数量	246
6.6.3	带加强层结构基于能力谱法的抗震设计步骤	247
6.6.4	算例	248
6.6.5	小结	259
	参考文献	260
第7章	消能减震结构基于性能的抗震设计	262
7.1	引言	262
7.1.1	传统抗震理论	262
7.1.2	结构控制理论	262
7.1.3	结构控制方法	263

7.2 阻尼器的力学特性及基本参数	265
7.2.1 消能装置的类型和性能	265
7.2.2 各种消能装置的恢复力模型	269
7.3 消能减震结构直接基于位移的抗震设计	270
7.3.1 消能装置等效线性化基本原理	271
7.3.2 消能减震结构基于位移的设计流程	277
7.4 消能减震结构基于能力谱法的抗震设计	279
7.4.1 推覆分析中侧向力分布模式	280
7.4.2 满足性能目标所需的附加阻尼比	281
7.4.3 结构中附加阻尼器的分布	281
7.4.4 设计流程	282
7.4.5 实例分析	283
7.5 消能减震结构的抗震性能评估	289
7.5.1 建筑抗震性能评估的4种方法	289
7.5.2 消能减震结构的4种评估方法	293
参考文献	306

第 1 章 绪 论

1.1 问题的提出

1.1.1 抗震设计方法的演变

现行各国抗震设计规范一般采用基于力的设计方法,这种方法又可分为静力法和反应谱法。静力法产生于 20 世纪初期,是最早的结构抗震设计方法。在 20 世纪初美国旧金山、意大利墨西拿等地的几次大地震中,人们注意到地震产生的水平惯性力对结构的破坏作用,提出把地震作用看成作用在建筑物上的一个总水平力,该水平力取建筑物总重量乘以一个地震系数。意大利都灵大学应用力学教授 Panetti 建议,一层建筑物的设计地震水平力可取上部重量的 $1/10$,而二层和三层建筑物的设计地震水平力可取上部重量的 $1/12$ 。这是最早的将水平地震力量化的建筑抗震设计方法。日本关东大地震后,1924 年,日本都市建筑规范首次增加的抗震设计规定中取地震系数为 0.1。1927 年美国 UBC 规范第一版也采用静力法,地震系数也取 0.1。静力法没有考虑结构的动力效应,即认为结构在地震作用下,随地面做整体水平刚体运动,其运动加速度等于地面运动加速度,由此产生的水平惯性力为建筑物重力与地震系数的乘积,并沿建筑物高度均匀分布。考虑到不同地区地震强度的差别,设计中选用的地面运动加速度按不同地震烈度分区给出。

从结构动力学的观点来分析,地震作用下结构的动力效应,即结构上质点的地震反应加速度,不同于地面运动加速度,而与结构自振周期和阻尼比等有关。采用动力学方法可以求得不同周期单自由度弹性体系质点的加速度反应。以结构质点的地震加速度反应为纵坐标,以结构的自振周期为横坐标,所得到的关系曲线称为地震加速度反应谱,以此来计算地震引起的结构上的水平惯性力更为合理,这就是反应谱法。对于多自由度体系,可以采用振型分解法来确定结构的总地震力。

反应谱法的发展与地震地面运动记录直接相关。1923 年,美国研制出第一台强震地面运动记录仪,并在随后的几十年间成功记录到许多强震记录,其中包括 1940 年的 El Centro 和 1952 年的 Taft 等多条著名的强震地面运动记录。1943 年 Biot 发表了以实际地震记录求得的加速度反应谱。20 世纪 50~70 年代,以美国的 Housner、Newmark 和 Clough 为代表的一批学者,在此基础上又进行了大量的研究工作,为结构动力学和地震工程学的发展做出了重要贡献,奠定了现代反应谱

抗震设计理论的基础。然而,静力法和早期的反应谱法都是以惯性力的形式来反映地震作用,并按弹性方法计算结构地震作用效应,当遭遇超过设计烈度的地震作用时,结构进入弹塑性状态,这种方法显然无法应用。同时,在由静力法向反应谱法过渡的过程中,人们发现短周期结构加速度谱值比静力法中的地震系数大一倍以上,这使人们无法解释以前按静力法设计的建筑物如何能够经受得住强烈地震作用。

为解决由静力法向反应谱法的过渡问题,以美国 UBC 规范为代表,通过地震力折减系数 R 将反应谱法得到的加速度反应值 a_m 降低到与静力法水平地震相当的设计地震加速度值 a_d , 即 $a_d = a_m/R$, 其中,地震力折减系数 R 对延性较差的结构取值较小,对延性较好的结构取值较高。尽管最初利用地震力折减系数 R 将加速度反应降下来只是经验性的,但人们已经意识到应根据结构的延性性质不同来取不同的地震力折减系数。这就是考虑结构延性对结构抗震能力贡献的最早形式。

对延性重要性的认识经历了一个长期的过程。在确定和研究地震力折减系数 R 的过程中,Housner 和 Newmark 分别从两个角度提出了各自的看法。Housner 认为考虑地震力折减系数 R 的原因有:每一次地震中可能包括若干次大小不等的显著反应,其中,较小的反应可能出现多次,而较大的地震反应可能只出现一次^[1];此外,某些地震峰值反应的时间可能很短,震害表明这种脉冲式地震作用带来的震害相对较小;基于这一观点,形成了现在考虑地震重现期的抗震设防目标。随着研究的深入,Newmark 认识到结构的非弹性变形能力可使结构在较小的屈服承载力情况下经受更大的地震作用。由于结构进入非弹性状态即意味着结构损伤和遭受一定程度的破坏,从而形成了现在的基于损伤的抗震设计方法,并促使人们对结构的非弹性地震反应进行研究。而进一步采用能量观点对此进行研究的结果,则形成现在的基于能量的抗震设计方法。

由于结构非弹性地震反应分析的困难,只能根据震害经验采取必要的构造措施来保证结构自身的非弹性变形能力,以适应和满足结构非弹性地震反应的需求。而结构的抗震设计方法仍采用小震下按弹性反应谱计算的地震力来确定结构的承载力。与考虑地震重现期的抗震设防目标相结合,采用反应谱的基于力和构造保证延性的设计方法成为目前各国抗震设计规范的主要方法。应该说这种设计方法是在对结构非弹性地震反应尚无法准确预知情况下的一种以力设计为主的方法。

20 世纪 70 年代后期,新西兰的 Paulay 和 Park 提出了保证钢筋混凝土结构具有足够弹塑性变形能力的力设计方法^[2,3]。该方法是基于非弹性性能对结构抗震能力贡献的理解和超静定结构在地震作用下实现具有延性破坏机制的控制思想提出的,可有效保证和达到结构抗震设防目标,同时又使设计做到经济合理。力设计方法的核心包括如下几个部分:

(1) 引导框架结构或框架-剪力墙(核心筒)结构在地震作用下形成梁铰机构,即控制塑性变形能力大的梁端先于柱端出现塑性铰,即所谓“强柱弱梁”。

(2) 避免构件(梁、柱、墙)剪力较大的部位在梁端达到塑性变形能力极限之前发生非延性破坏,控制脆性破坏形式的发生,即所谓“强剪弱弯”。

(3) 通过各种构造措施保证将出现较大塑性变形的部位具有所需要的非弹性变形能力。

到20世纪80年代,各国规范均在不同程度上采用了能力设计方法的思路。能力设计方法的关键在于将控制概念引入结构抗震设计,有目的的引导结构破坏机制,避免不合理的破坏形态。该方法不仅使结构抗震性能和能力更易于掌握,同时也使抗震设计变得更为简便明确,即后来在抗震概念设计中提出的主动抗震设计思想。

1.1.2 基于力的设计方法存在的问题

基于力的设计方法一般采用下述设计步骤:

(1) 结构方案设计,包括结构布置、确定构件截面尺寸和选用材料等,由此可确定结构的刚度。

(2) 根据建筑物的质量和刚度,计算结构的弹性自振周期,并由弹性加速度反应谱确定结构的最大加速度和相应的水平地震作用。

(3) 选取结构的延性水平,从而确定地震力折减系数,并对第(2)步所得的弹性地震力进行折减,得到设计用地震力。选取的延性水平越高,地震力折减系数越大,设计用地震力越小,结构在相应地震作用下的损伤越严重。因此,应根据结构类型和重要性等选择合适的延性水平。

以上是国外规范所采用的方法,如美国 UBC 规范。我国抗震设计规范直接给出与设防烈度相应的小震的地震动参数,约为基本地震加速度值的 $1/3$,即地震力折减系数约为 3。

(4) 用弹性理论计算结构在设计用地震力作用下的内力和位移,并进行层间弹性位移验算。若结构在地震作用下的层间弹性位移不满足要求,则返回第(1)步重新计算。否则,将地震内力与相应的重力荷载内力进行组合,得到构件截面内力设计值,据此进行构件截面承载力设计。

(5) 对结构潜在的塑性区域进行详细的构造设计,或采用能力设计方法对结构的地震破坏模式进行控制。

(6) 对于重要结构,应按与基本烈度相应的罕遇烈度的地震动参数计算水平地震作用及相应的层间弹塑性位移,并对层间弹塑性位移进行验算。若不满足要求,则返回第(4)步,修改构件截面承载力,直至满足为止。

由上述设计过程来看,这种方法存在下列问题:

(1) 基于力的设计是根据初始设定的结构刚度计算自振周期和地震力,并将地震力在各抗侧力构件之间分配。实际上,随着非弹性变形的出现,结构刚度是变

化的,所以地震力并非定值。

(2) 按初始刚度在各构件之间分配地震力,是假定各构件在地震中同时达到屈服,但这个假定对许多结构不成立。

(3) 对同一结构中的所有构件和材料,采用相同的地震力折减系数或延性系数,这在许多情况下是不符合实际的。

1.1.3 基于性能的抗震设计方法的提出

尽管基于力的设计方法存在一些问题,但多年来的抗震设计实践证明,采用基于力的设计方法,并结合能力设计原理和有效的抗震构造措施,可以达到原来所预定的抗震设防目标。然而,20世纪90年代发生在一些发达国家现代化大城市的地震,人员伤亡虽然很少,一些设备和装修投资很高的建筑物虽然没有倒塌,但因结构损伤过大,所造成的经济损失却十分巨大。例如,1994年1月美国西海岸洛杉矶地区的地震,震级仅为6.7级,死亡57人,而由于建筑物损坏造成1.5万人无家可归,经济损失达170亿美元。1995年1月日本阪神地震,7.2级,死亡6430人(大多是旧建筑物倒塌造成),但经济损失却高达960亿美元。因此,在现代化充分发展的今天,研究人员意识到单纯强调结构在地震下不严重破坏和不倒塌,已不是一种完善的抗震设计思想,不能适应现代工程结构的抗震需求。在这样的背景下,美国和日本学者提出了基于性能的抗震设计(performance-based seismic design, PBSDB)思想。美国应用技术委员会ATC-33(1992)率先将基于位移的设计思想引入结构的抗震加固;美国联邦紧急管理厅资助的国家地震减灾项目NEHRP提出了结构基于位移的抗震评估及加固方法,并于1997年出版了《房屋抗震加固指南》(FEMA 273/274)^[4,5];ATC-40(1996)和加州结构工程师协会1995年公布的SEAOC 2000都引入了基于位移的抗震设计方法^[6];美国国际规范委员会(ICC)1997年出版的《国际建筑规范2000(草案)》[IBC2000(Draft)]强调了与结构性能/位移设计有关的内容。我国也于2004年颁布了中国工程建设标准化协会标准《建筑工程性态设计通则》(CECS 160:2004)^[7],新修订的国家标准《建筑抗震设计规范》(GB 50011-2010)^[8]也增加了建筑抗震性能设计条文。

基于性能设计的基本思想就是使所设计的工程结构在使用期间满足各种预定的性能目标要求,而具体性能要求可根据建筑物和结构的重要性确定。对于结构工程师来说,可明确描述结构性能状态的物理量主要有:力、位移(刚度)、速度、加速度、能量和损伤。基于性能设计要求能够给出结构在不同强度地震作用下,这些结构性能指标的反应值(需求值)以及结构自身的能力值,尤其是当结构进入非弹性阶段时。由于用力(承载力)作为单独的指标难以全面描述结构的非弹性性能及破损状态,而用能量和损伤指标又难以进行实际应用,因此,目前基于性能的抗震设计方法的研究主要用位移指标对结构的抗震性能进行控制,这称为基于位移的

抗震设计方法(displacement based seismic design, DBSD)。

1.2 基于位移的抗震设计方法的发展

由于基于力的设计方法存在一些缺陷,许多学者对这种方法进行了改进,提出了一些新的设计方法。

1.2.1 基于变形校核的设计方法

基于变形校核的设计方法仍采用基于力的设计方法进行结构设计,然后用静力弹塑性分析方法或时程分析方法计算已设计结构的弹塑性变形需求,使其不超过规范规定的弹塑性变形限值。我国现行抗震设计规范就采用此法。

1.2.2 基于变形能力计算的设计方法

基于变形能力计算的设计方法(deformation capacity-calculation based design)采用基于力的设计方法进行结构构件承载力设计,然后用静力弹塑性分析方法或时程分析方法计算已设计结构构件控制截面的弹塑性变形需求,如构件端部截面转角或曲率需求,最后根据构件截面约束钢筋数量和构造与弹塑性变形需求之间的关系,确定横向约束钢筋的数量和构造。

此法前期的计算仍采用基于力的设计方法,但后期根据给定地震水准下结构构件截面的弹塑性变形需求,对构件进行截面变形能力设计,使结构满足预期的变形能力要求。此法一般不需要对整个结构体系进行调整,而是对结构局部采取适当的构造措施,使其满足变形需求。

1.2.3 基于规定变形的设计方法

基于规定变形的设计方法(deformation-specification based design)是预先设定一个结构变形状态,然后设计结构,使结构在给定的地震水准下实现规定的变形状态。由于结构的变形值直接与其损伤程度相关,所以采用此法设计相当于设计了一个规定的损伤程度的结构。按此法进行设计,不同的结构将具有相同的倒塌和损伤风险。

按照采用的刚度来进行分类,此法可分为以下两种:

(1) 采用屈服前的初始弹性刚度。其中,屈服位移 u_y 由构件截面和结构几何尺寸确定,不需要预先已知其强度;位移需求 u_d 由规范规定的侧移限值和建筑物的几何尺寸确定。假定屈服强度 V ,则初始刚度 $K = V/u_y$;然后,由初始刚度计算结构的自振周期和位移需求,将位移需求与规范规定的侧移限值进行比较,调整结构的强度直至弹性位移需求等于规范规定的侧移限值;最后,将结构总强度按经验

方法分配给各抗侧力构件,而不是按侧向刚度分配。

此法需要迭代运算,以修正初始刚度和强度使结构达到期望的位移值。另外,此法需要利用现有的弹性与非弹性位移之间的关系(如等位移法、等能量法等),以及采用弹性阻尼假定(这个假定是不成立的)。

(2) 采用最大位移处的割线刚度和最大反应处的等效黏滞阻尼。此法一开始就选定目标位移,以目标位移为依据确定所需要的基底剪力,对结构进行刚度和强度设计,使结构能在设计地震水准下达到目标位移所需要的刚度和强度,最后对结构做构造处理使其有能力实现目标位移。

参 考 文 献

- [1] Housner G W. Behavior of structures during earthquakes[J]. ASCE, 1959, (EM4): 109—129.
- [2] Paulay T, Priestley M J N. Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1992.
- [3] Paulay T, Park R, Priestley M J N. Reinforced concrete beam-column joints under seismic actions [J]. ACI Journal, 1978, 25(11):585—593.
- [4] FEMA 273. NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings [S]. Washington DC: Federal Emergency Management Agency, ASCE, 1997.
- [5] FEMA 274. NEHRP Commentary on the NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings [S]. Washington DC: Federal Emergency Management Agency, ASCE, 1997.
- [6] SEAOC. Performance-Based Seismic Engineering of Buildings[R]. Vision 2000 Committee. Sacramento: Structural Engineers Association of California, 1995.
- [7] 建筑工程性态设计通则(CECS 160:2004)[S]. 北京:中国计划出版社,2004.
- [8] 建筑抗震设计规范(GB 50011—2010)[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.

第 2 章 结构性能抗震设计理论与方法

2.1 结构性能抗震设计的理论框架

基于结构性能的抗震设计是指,使所设计和建造的工程结构在各种可能遇到的地震作用下的反应和破坏程度均在设计预期要求的范围内,不仅能保证生命安全,而且能使经济损失最小。这种抗震设计方法实质上是一种企图控制结构的变形、破坏状态和反应的设计,它除了需要确定地震设防水准外,还需要确定结构的性能水准和性能目标。

2.1.1 地震设防水准

基于性能的抗震设计要求能对建筑物寿命期间可能发生的地震所造成的破坏进行控制。地震风险水平是未来可能作用于建筑场地的地震作用的大小,也称为地震设防水准。从建筑抗震设计的角度来看,所谓地震危险性是指某一场点(或某一区域)在一定时期内可能遭受到的最大地震破坏影响,它可以用地震烈度或地面运动参数来表示。从概率意义上说,地震危险性是一种概率,即在某一给定场点上的一定年限内,最大地面运动超过某一特定强度的概率。它可以用年超越概率或它的倒数(即重现期)表示。设防地震水准直接关系到建筑物的抗震安全性和遭受地震破坏的危险性程度,因此,在基于位移的抗震设计理论中,地震设防水准的选择占有非常重要的地位。表 2.1 和表 2.2 分别给出了我国抗震规范(GB 50011—2001)^[1]采用的地震设防水准和美国联邦紧急救援署(Federal Emergency Management Agency, FEMA)^[2]、加州结构工程师协会(SEAOC)^[3]建议的地震设防水准。另外,鉴于地震具有很大的不确定性,基于性能的抗震设计需要估计各种水准的地震影响,包括近场地震的影响。我国抗震规范规定,对处于发震断裂带两侧 10km 以内的结构,应计入近场影响。

表 2.1 我国抗震规范采用的地震设防水准

地震设防水准	50 年超越概率/%	重现期/a
多遇烈度地震(小震)	63.2	50
设防烈度地震(中震)	10	475
罕遇烈度地震(大震)	2~3	1642~2475