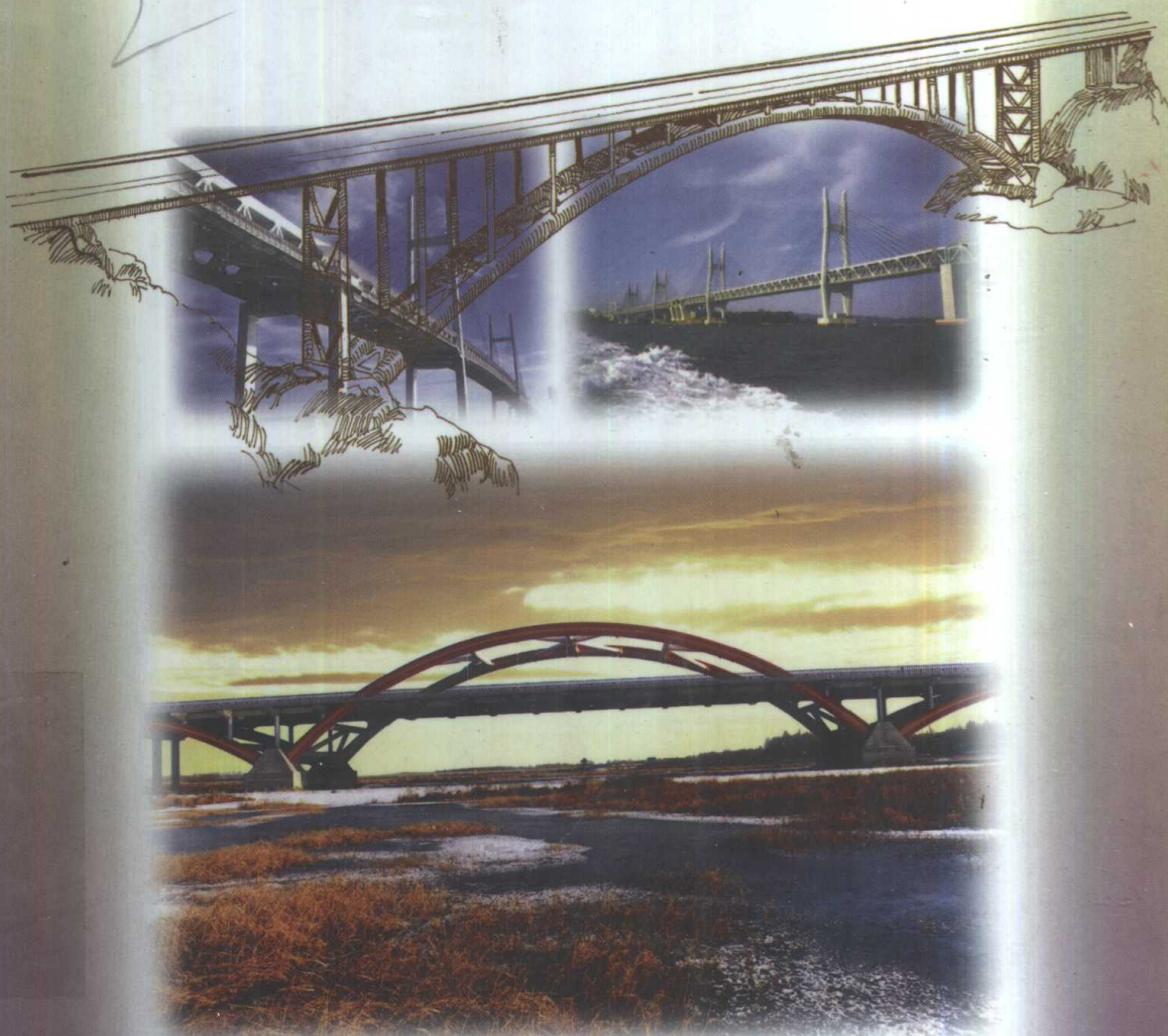




“桥梁抗震设计理论及应用”丛书之二

桥梁减隔震设计

范立础 王志强 著



人民交通出版社

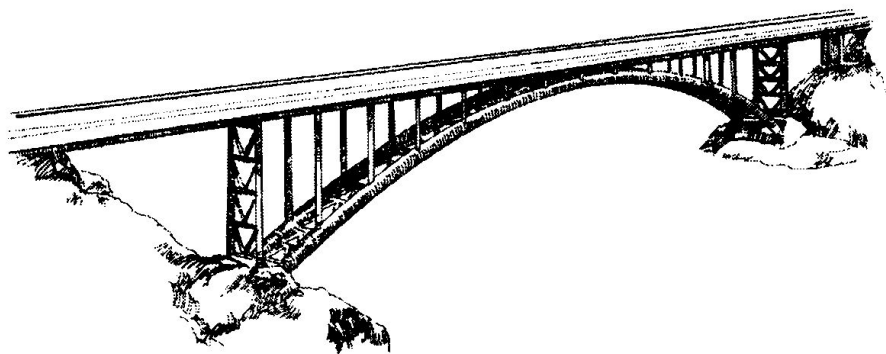


“桥梁抗震设计理论及应用”丛书之二

Qiaoliang Jiangezhen Sheji

桥梁减隔震设计

范立础 王志强 著



人民交通出版社

内 容 提 要

减隔震设计是一种能有效减轻结构在地震中遭受损坏的设计方法。书中论述了桥梁减隔震设计的基本概念、分析方法和设计过程以及当前在桥梁中应用较广的一些减隔震装置。本书介绍的内容,为作者近年来在该领域的研究成果,也是正在编写的《城市桥梁抗震设计规范》中桥梁减隔震设计条文制定的理论背景材料。

本书可供从事桥梁减隔震设计、研究的专业人士使用,也可作为高等院校桥梁专业研究生和高年级本科生的教学参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

桥梁抗震设计理论及应用/范立础等著. —北京:人民交通出版社, 2001.4

ISBN 7-114-03888-7

I. 桥... II. 范... III. 桥梁工程-抗震-设计 IV. U442.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 15690 号

桥梁减隔震设计

范立础 王志强 著

版式设计:王静红 责任校对:刘高彤 责任印制:张 凯

人民交通出版社出版发行

(100013 北京和平里东街 10 号)

各地新华书店经销

北京鑫正大印刷厂印刷

开本: 850×1168 1/32 印张: 6.75 字数: 181 千

2001 年 4 月 第 1 版

2001 年 4 月 第 1 版 第 1 次印刷

印数: 0001—3000 册 定价: 30.00 元

ISBN 7-114-03888-7

U · 028.29

序 言

国内外的地震灾害表明,震区桥梁的损坏坍塌,不仅阻碍当时的救灾行动,而且影响灾后的恢复工作。所以各方都对桥梁抗震给予十分重视。

一个国家或地区的桥梁抗震质量如何和它实行的桥梁抗震设计规范密切相关。我国的桥梁抗震设计规范制订于许多年前。可以理解,它不能反映众多新的桥梁震害的启示,未能吸收许多新的研究成果,不能适应我国当前桥梁建设的需要。各方致力于修订新的铁路桥梁和公路桥梁的抗震设计规范,并首次编写城市桥梁的抗震设计规范,是值得欢迎的。姑不置论三个规范可否统一的问题,如果它们都力求能反映客观实际,达到经济合理和相当安全的抗震目的,则三者所依据的抗震设计理论与原则无疑应当是相同的。众所周知,规范条文只使人知其然,而不知其所以然。所以常常配以说明。但是,即使如此,人们还是不能了解其理论依据,希望有更深入的阐述,以便透彻得知其所以然。

有鉴于此,范立础教授,凭借其多年从事桥梁抗震的工程实践和科学研究的经验积累,在参加修订公路桥梁抗震设计规范和负责首编城市桥梁抗震设计规范的同时,组织同济大学土木工程防灾国家重点实验室里从事

桥梁抗震研究的同事和研究生,一起编写出版《桥梁抗震设计理论与应用》丛书。

本丛书重点针对桥梁抗震的工程实践中亟待解决或回答的问题,结合震害实例,阐明当前国内外的理论研究成果和相关抗震设计方法的依据。它将有助于深入理解和正确运用我国桥梁抗震设计规范,提高我国桥梁抗震的工程实践水平,同时将有助于对桥梁抗震的学习和研究,发展我国桥梁抗震的科学技术。特为之序。

李国豪

中国科学院资深院士

中国工程院资深院士

同济大学名誉校长

2001 年 3 月

前 言

近 20 年的地震灾害经验表明,随着城市现代化的发展,交通网络在整个城市生命线抗震防灾系统中越来越重要。1997 年美国圣费南多(San Fernando)地震、1976 年中国唐山地震、1989 年美国洛马·普里埃塔(Loma Prieta)地震、1994 年美国北岭(Northridge)地震、1995 年日本的阪神地震及 1999 年台湾的集集地震均给当地的交通网络造成严重的破坏,导致直接和间接经济损失总和极为巨大,如以当时的美元币值分别计约为:10 亿、20 亿,70 亿,200 亿,1000 亿,120 亿。在此期间,各国地震工作者与结构工程师对桥梁结构抗震展开了大量的研究,都在修改或制定新的桥梁抗震设计规范。主要问题是研究涉及风险决策的工程抗震设计标准与设防目标,结构抗震设计方法,包括动力概念设计、强度设计、位移设计、延性设计、减隔震设计;最近还提出了基于性能(性态、功能)设计(Performance Based Design)的基本思想,以及行之有效的抗震措施。

同时,我国也进行了大量的研究工作,“建筑抗震设计规范”已提出修改新版,1999 年 12 月已提交了“供试设计用”稿,“公路工程抗震设计规范”也已启动修改工作,提出了修改工作大纲与编写大纲。作者受建设部委托主编首部“城市桥梁抗震设计规范”,主编单位是同济大学土木工程防灾国家重点实验室。

当前,城市桥梁抗震设计乃参照“公路工程抗震设计规范”执行,但该规范仅适用于跨径 150m 以下的梁桥与拱桥。工程师们面对城市中立交工程、曲线高架桥、轨道高架桥、主跨径大于 150m

的跨河大桥等的抗震设计无章可循。在实践工作中,有的列了专题研究,有的各自采用简化计算方法,这就导致了结构抗震设防、设计方法、安全准则不统一。同济大学土木工程防灾国家重点实验室桥梁抗震研究室在近20年中曾承担了各类城市桥梁抗震设计研究项目30余项,桥梁抗震理论研究项目10余项,获得并累积了较多理论、试验的研究成果与设计经验。同时,我们亦组织和参与了有关国际会议与学术交流,广泛收集了美国、日本、新西兰和德国在桥梁抗震领域内相关的研究资料、报告和各种规范。由于我国的规范(国标或部标)是强制性的,因而我国首编的“城市桥梁抗震设计规范”比之我国其他行业的桥梁抗震设计规范将有较大扩充和改动,诸如规范使用范围、抗震设防标准、结构抗震设计方法、性能准则和抗震验算、结构延性设计、桥梁减隔震设计和抗震措施等。规范除了条文外还附有条文说明。但有关桥梁抗震理论的近年进展与讨论,抗震设计的新思想,如多级抗震设防多阶段设计原则;延性抗震与延性设计方法、位移设计准则、桥梁减隔震设计原则和方法以及最新提出的基于性能(性态、功能)的设计思想(Performance Based Design)不可能在规范的条文说明详细介绍。此外,我们在完成30余项城市大跨桥梁(悬索桥、斜拉桥、拱桥)、城市高架桥、轨道交通高架桥和城市大型立交工程的抗震设计、分析和研究工作的过程中,在完成10余项的桥梁抗震的理论研究和科学试验的工作中,特别是在最近为编写“城市桥梁抗震设计规范”收集资料、调查研究、分析归纳、借鉴引用的实践中,深感亟需在桥梁工程界普及与提高桥梁工程抗震的科学技术知识。为此,我组织了土木工程防灾国家重点实验室桥梁抗震研究室的几位同事和我的博士生,分工执笔编写一套“桥梁抗震设计理论及应用”丛书:之一是桥梁延性抗震设计,之二是桥梁减隔震设计,之三是高架桥梁抗震设计,之四是大跨度桥梁抗震设计。

丛书编写的工程对象仅限于桥梁。丛书介绍一些基本原理,其中融合了我们的一些研究成果,也提供一些应用算例或实例。书中每章都附有主要的参考文献供读者进一步查阅和研究。丛书的各分册既有各自的独立性也有互为联系的相关性。因而,某些阐述部分可能有少量的重复,反映了不同角度的分析论述或应用。

我衷心感谢我们桥梁抗震学科组的胡世德教授、李建中教授、王君杰副教授和我的博士生卓卫东副教授(福州大学)、叶爱君讲师、王志强讲师的通力合作及杨新宝、毕桂平的工作。同时,也感谢人民交通出版社的大力支持,使这套丛书在新规范审定发行之前出版,谨献给我的老师和母校同济大学。桥梁抗震设计理论尚有不少问题处在深入研究阶段,实践应用中也尚有不少问题有待解决。本套丛书对桥梁抗震理论若干问题的讨论,难免挂一漏万、错误失当之处,敬希同行与读者批评指正。

范立础

同济大学土木工程防灾国家重点实验室

2000年10月

目 录

第一章 概论	1
1.1 抗震设计规范的发展趋势	2
1.1.1 抗震设计原则、设防水准的改进	2
1.1.2 分析方法、设计方法的改进	5
1.1.3 新的抗震技术的应用	6
1.2 隔震的概念、机理及一些实用装置	7
1.3 减隔震技术的发展	10
1.3.1 各国隔震桥梁应用的发展	12
1.3.2 我国桥梁减隔震技术的发展情况	16
1.4 隔震结构震害中的经验教训	45
1.5 桥梁减隔震设计与传统抗震设计的特点	48
1.6 隔震桥梁实例介绍	48
参考文献	52
第二章 减隔震装置力学特性及分析模型	58
2.1 分层橡胶支座	58
2.1.1 分层橡胶支座的水平刚度	59
2.1.2 分层橡胶支座的竖向刚度	62
2.1.3 分层橡胶支座竖向位移的计算	64
2.1.4 分层橡胶支座的轴压承载力	64
2.1.5 橡胶支座最大水平变形能力	66
2.1.6 橡胶支座的滚翻失稳(Rollout Stability)	67
2.2 铅芯橡胶支座(Lead Rubber Bearings)	69

2.2.1 铅芯橡胶支座等效线性化模型	71
2.2.2 铅芯橡胶隔震支座的非线性分析模型	73
2.3 滑动摩擦型减隔震支座	79
2.4 高阻尼橡胶支座	85
2.5 钢阻尼器	88
2.6 油阻尼器	91
参考文献	93
第三章 减隔震桥梁分析方法	95
3.1 各国隔震桥梁设计规范动力响应分析方法比较	96
3.1.1 欧洲 Eurocode8-Part2 规范	96
3.1.2 美国 AASHTO 规范	98
3.1.3 日本《道路桥梁示方书·同解说》	100
3.2 隔震桥梁分析方法	103
3.2.1 反应谱分析方法	104
3.2.2 非线性动力时程分析方法	108
3.2.3 非线性静力分析——能力谱方法	119
3.3 隔震桥梁和非隔震桥梁设计地震力的比较	133
参考文献	138
第四章 桥梁减隔震设计原则	140
4.1 概述	140
4.2 桥梁隔震设计的一些特点	143
4.3 桥梁隔震设计方法	144
4.3.1 概念设计	148
4.3.2 数值设计阶段	156
4.4 细部构造设计	162
参考文献	163
第五章 桥梁减隔震设计实例	166

5.1 设计实例	166
5.2 结论	178
参考文献	178
第六章 各国桥梁减隔震设计规范比较	179
6.1 Eurocode8-Part2:Bridges	179
6.2 意大利公路桥隔震指南中的有关规定	183
6.3 美国 AASHTO 标准桥梁隔震准则中的有关规定	186
6.4 日本规范免震设计规定	190
6.5 各国规范的比较	194
参考文献	196
附录 常用减隔震结构分析软件介绍	198

第一章 概 论

自从人类文明开始以来,地震灾害就不断发生,造成大量人员的伤亡以及建筑物、桥梁等结构的破坏或倒塌。1976 年我国唐山大地震(M7.8)[1][2],在瞬间造成 24 万人死亡,16 万人受伤,整个唐山市几乎全部毁坏。1989 年美国 Loma Prieta 地震(M7.1),1994 年的北岭地震(M6.7),1995 年日本的阪神大地震(M7.2),以及 1999 年的土耳其地震、台湾 9 月 21 号的集集大地震等,均造成人员较大伤亡和大量建筑物、桥梁、基础设施等的破坏、倒塌。一些地震发生在城市附近,由于基础设施、桥梁结构等的破坏,切断震区生命线,次生灾害十分严重,导致了巨大经济损失。其中,桥梁结构的破坏或倒塌及其随后产生的交通中断等问题更是引起社会和公众的注意。因此,如何建立一种安全经济可靠的抗震设计,从而可以有效抵御某种程度的不可预测的灾难性大地震,一直是结构工程抗震面临的一个持续挑战。

尽管许多抗震设计规范的最低性能目标是避免结构的倒塌发生,以确保人的生命安全,但从这几次的地震震害调查表明,结构的倒塌事件仍然存在。另外,对于一些重要的结构,如政府、医院、消防部门等的建筑物以及桥梁等在整个城市中担负生命线功能的重要结构,尽管在地震中主体结构没有遭到严重破坏,但由于内部的设施、附属物的损坏,已丧失其使用功能。这一系列的震害,充分反映出以往结构抗震设计规范的不足。这引起世界各国结构工程、地震工程等科研人员的注意,纷纷对原有相关抗震设计规范进行反省和修订,并投入大量的人力、物力进行研究,在此基础上,针



对结构的抗震设计提出一系列新的观点和新的抗震技术。目前主要集中于两个方面,即对现有规范的改进和采用新的抗震技术,这均导致抗震设计规范正经历一场大的变革。

1.1 抗震设计规范的发展趋势

在汲取震害经验、教训的基础上,伴随着对地震产生机理、地震动特性以及地震作用下各类结构动力响应特性、破坏机理、构件能力的研究及认识的加深;社会、团体组织、个人对结构在不同水准地震作用下结构预期抗震性能要求的不同和经济因素的限制,促使目前规范在各个方面需要进行改进。主要涉及几个方面。其一,设计原则、设防水准的改进;其二,分析方法、设计方法的改进;其三,新的抗震技术的应用。下面分别给予简要说明。

1.1.1 抗震设计原则、设防水准的改进

抗震设计原则和设防水准的改进,以及对结构在不同发生概率地震作用下预期性能目标的不同,由原来的单一设防水准一阶段设计逐渐改进为双水准或三水准设防两阶段设计、三阶段设计,以及多水准设防、多性能目标准则的基于结构性能的设计等。

● 单一水准设防一阶段设计

通常是指设防水准以在大地震作用下结构不发生倒塌为设计目标,从而达到保证生命安全,避免大的财产损失。该方法过去曾为许多国家的抗震设计规范所采用,但实践表明其存在许多的不足,正逐渐为多水准设防、多性能目标的设计方法所代替。我国目前的《公路工程抗震设计规范》^[3]、《铁路工程抗震设计规范》^[4]仍采用的是该方法。

● 双水准设防、三水准设防两阶段设计



近几十年来,美国、日本及我国等国家的地震工程专家先后提出了分类设防的抗震设计思想,即“小震不坏、中震可修、大震不倒”。各国根据自己的国情,制定不同的设防水准和设计阶段。我国《建筑抗震设计规范》^[5]就是采用三水准设防两阶段设计方法,即对于发生频率高、可能性大的中小地震,为了不影响使用功能,要求结构处于弹性范围工作,以强度作为破坏准则;对于发生概率小的大地震,由于经济的原因,允许结构发生塑性变形和有限度的损伤,以结构的变形作为破坏准则,以此达到“大震不倒”的要求。日本的桥梁抗震设计规范^[6]、美国在 ATC - 32^[7]项目中也建议采用两阶段设计方法。

● 三水准设防三阶段设计

对房屋建筑结构,采用三水准设防两阶段设计基本可以保证结构在小震下保持弹性、罕遇地震下不发生倒塌。两阶段设计对中震设防水准性能并没要求校核,而是隐含满足要求。对于重要桥梁,由于没有校核在中震(对应于现有抗震设计规范为设计地震)下结构的抗震性能,这有可能导致在发生该水准地震作用时,结构并没有倒塌,但一些连接装置(如支座、伸缩装置等)损伤严重,结构不能保持正常运营功能,达不到原有的设计目标(一些研究已表明,一些结构构件的设计,往往是由该设计阶段控制)。因此,在由范立础教授主编的我国首部“城市桥梁抗震设计规范”的征求意见稿中,建议采用三水准设防三阶段设计的方法,即对应三个设防水准,分别校核各自的设计指标,保证设计满足三个设防水准的要求。

● 多水准设防、多性能目标的基于性能的抗震设计

在经历了 Loma Prieta、Northridge、阪神大地震后^{[8][9]},震害表明目前的抗震规范对于保护生命安全方面还是相当有效的。但这些近似属于中等强度的地震,由于其震中接近于人口密集的城市,



导致大量基础设施的破坏,分别造成的经济损失为 70 亿、200 亿、1000 亿美元之多,这对于地震活跃区是不可接受的,官方、公众等机构组织均要求提出更有效的抗震措施。鉴于此,在大量研究及汲取过去经验教训的基础上,提出了近年来重点研究的基于结构抗震性能的抗震设计方法,如 Vision2000、ATC - 40^{[10][11][12][13][14]}等,且越来越多的学者认同将来的抗震设计应是基于性能的抗震设计,但目前关于基于性能设计的含义及设计方法的具体应用还存在许多分歧和难点。从基于性能设计的定义来看,具有如下一些特点:首先对应不同设防水准,不同的结构,提出相应的性能目标;其次,提供了供社会团体、业主根据自己的需求选择结构在相应地震下性能目标的机会;进而设计人员根据所选定的预期性能目标进行设计,使结构在设计地震下的响应满足预期的抗震性能目标。由此可知,基于结构性能的抗震设计是一个十分理想的目标,通过采用该方法使设计的结构更经济、合理,且对应于不同的设防水准结构的性能是可预知的。但要实现基于性能的抗震设计过程,目前仍需要在以下一些方面进行大量的研究^{[15][16]}:一、不同场地、不同超越概率设计地震的确定;二、性能目标——性能水平的定量描述,大多数情况下,性能目标的描述是借助于一些定性的术语给出的,如“倒塌”、“生命安全”、“维持一定的使用功能”、“完全保持正常使用功能”等,但用于工程设计时,工程人员需要的是可用于设计的由工程术语明确表达的性能指标,如强度、变形、延性等,而这二者之间的对应关系,目前还没有得到很好的解决,仍需进行大量的研究;三、在设计和性能校核过程中,涉及需求计算与能力计算的各个方面,目前仍有许多方面值得研究,如不同设计阶段所适宜采用的分析方法和与之相协调的分析模型的建立、不同性能水平下结构构件、附属物以及整个结构体系各力学参数的定量计算等。



1.1.2 分析方法、设计方法的改进

● 分析方法的改进

过去抗震设计规范主要采用的分析方法以静力法、反应谱方法为主,而以非线性动力时程分析方法为辅。随着对地震机理认识的加深以及结构抗震理论研究的积累及相关条件的成熟,一些规范针对不同的分析情况给出不同的分析方法,不仅包括静力法和反应谱方法,并将非线性静力分析方法^{[17][18]}、非线性动力方程分析方法作为一种常规的分析方法予以引入,且针对不同的分析方法对结构分析模型^[19]的建立也给出一些必要的规定。

● 设计方法的改进

过去,大多数抗震设计规范是依据结构构件的强度,将地震力当做静荷载考虑来进行抗震设计的,且仍是目前许多设计规范采用的设计方法。近年来,一些学者针对该设计方法的不足提出了一个改进的方法,通常称之为延性抗震设计方法。虽然延性设计的依据仍是构件的强度,但是需要校核构件的延性能力满足设计(强度、变形)要求。这个方法目前正为许多新修订的规范所接受。

出于经济因素的考虑,许多规范在设计地震作用下允许结构发生塑性屈服变形。这种情况下,强度已不适合作为衡量结构性能的指标,而只对脆性构件或不允许发生非弹性响应的构件才适用。针对基于强度设计的不足,一些学者提出了基于位移的设计方法。基于位移的设计,其设计变量是结构的变形或构件发生的应变等,而构件强度等参数为最终的设计结果。该方法在 50 年代就有人提出^[20],但直到最近才由 Priestley^{[21][22]}、Moehle^{[23][24]}等人将其进一步发展,使其能成为可以使用的设计方法。

此外,一些学者^{[25][26][27]}还提出基于能量的设计方法,该方法是以输入结构的能量为设计依据,将结构设计的能够吸收从地面



输入的能量而不致破坏。目前有许多人对此进行了研究,但还没有达到实用阶段。

除上述设计方法外,还有一个目前正为世界各国规范所逐渐接受的抗震设计方法,这就是能力设计方法^{[28][29][30]}。之所以没有将其归入上述分类中,是因为该方法可与上述任何一种设计方法结合,而形成一种有效的抗震设计方法。该方法的定义是,对于结构的非弹性响应设计,首先布置可能出现塑性铰的位置,使结构屈服后形成一个合理的耗能机构;对塑性铰区进行专门的设计,以提供足够的延性能力,对于其他非塑性铰区,根据塑性铰所具有的超强强度,确定被保护构件的设计强度,从而保证被保护构件在结构塑性铰形成后仍保持弹性。

能力设计方法是结构动力概念设计的一种体现,它的主要优点是设计人员可对结构在屈服时、屈服后的性状给予合理的控制,即结构屈服后的性能是按照设计人员的意图出现的,这是传统抗震设计方法所达不到的。此外,根据能力设计方法设计的结构具有很好的韧性,对结构避免倒塌发生提供很高的保护能力,同时也降低了结构对许多不确定因素的敏感性。

1.1.3 新的抗震技术的应用

传统结构抗震设计方法是依靠增加结构构件自身的强度、变形能力来抗震的。该方法中,容许很大的地震能量从地面传递给结构,而抗震设计主要考虑的问题就是如何为结构提供抵抗这种地震作用的能力。尽管通过适当选择塑性铰的位置和仔细设计构件的细部构造可以确保结构的整体性和防止结构倒塌的发生,但结构构件的损伤是不可避免的。近几十年来,为了提高结构的抗震性能,一些研究人员提出一些新的抗震技术,主要包括减隔震技术、被动控制技术、主动控制技术及混合控制技术等。减隔震技术