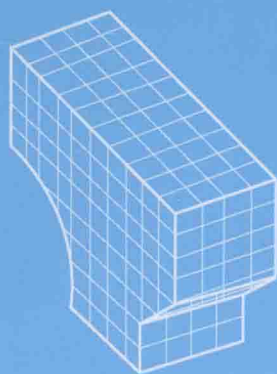


王占飞 隋伟宁 赵中华 著

基于性能的桥梁抗震设计 理论与实践



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



王占飞 隋伟宁 赵中华 著

基于性能的桥梁抗震设计 理论与实践



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

我国是世界上地震活动最活跃，地震灾害最大的国家之一。2008年5月汶川地震的发生，桥梁倒塌致使地震后交通中断，人民的生命财产损失惨重。加强桥梁抗震设计势在必行。本书作为桥梁抗震设计的专著，首先从性能设计在桥梁抗震设计中的发展，多级水准设防和多性能目标的确立，结构分析、损伤评价指标及抗震设计评价方法等方面论述了基于性能桥梁抗震设计的基本理论，然后按照抗震设计评价方法分别论述了延性抗震设计、Pushover分析抗震设计、静—动力分析相结合抗震设计及动力分析抗震设计。本书结合了作者在国内外进行科研取得的成果，介绍了桥梁抗震设计的最新发展。

本书既可供从事桥梁设计、研究的专业工程技术人员使用，也可作为高等院校研究生相关专业课程的参考用书。

图书在版编目（CIP）数据

基于性能的桥梁抗震设计理论与实践 / 王占飞，隋伟宁，赵中华著. — 北京：中国水利水电出版社，2013.10

ISBN 978-7-5170-1368-6

I. ①基… II. ①王… ②隋… ③赵… III. ①桥梁工程—抗震设计 IV. ①U442.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第261493号

书 名	基于性能的桥梁抗震设计理论与实践
作 者	王占飞 隋伟宁 赵中华 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	北京嘉恒彩色印刷有限责任公司
规 格	184mm×260mm 16开本 15.5印张 368千字
版 次	2013年10月第1版 2013年10月第1次印刷
定 价	45.00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

序



进入 21 世纪，我国的经济得到了快速发展，土木工程建设项目达到了空前规模。本世纪头 10 年，在建筑方面，建筑高度超过 300m 的高层已达十几幢，投入使用的上海金茂大厦，台北国际金融中心，广州东西塔等建筑高度都超过了 500m。在桥梁方面，2004 年建成的丹河大桥为主跨 146m 的圬工拱桥，2008 年建成的苏通大桥为主跨 1088m 的斜拉桥，2009 年建成通车的重庆朝天门大桥为主跨 552m 的钢桁架拱桥，这些桥梁均为该种桥梁类型的世界第一跨度的桥梁。

但是，随着社会的进步，人类所面临的自然灾害也随之频繁发生。其中地震灾害给人类带来的损失越来越惨重。如 2004 年印度尼西亚 7.9 级地震引起海啸，造成大量基础设施损坏，房屋倒塌，20 多万人死亡，损失惨重。2008 年中国汶川地震（8.0 级），造成桥梁房屋倒塌，8 万多人死亡或失踪，直接经济损失达 8451 亿元人民币，是我国除唐山地震后又一损失惨重的震害。2011 年日本发生 9.0 级东日本大地震，引发海啸，导致核泄漏事故，不但造成了惨重的人员伤亡和经济损失，同时也带来了深刻的社会问题。

为此，让社会越来越重视房屋建筑工程，交通等生命线工程抗震。对于桥梁抗震设计我国在 2008 年，2012 年先后由交通部和住建部出台了《公路桥梁抗震设计细则》和《城市桥梁抗震设计规范》等规范，提出了与房屋建筑抗震同样流程的两阶段抗震设计，并首次提出了基于性能的桥梁抗震设计理念。这为我国桥梁抗震提供了重要的依据和保障。

本书积累了作者在国外留学的研究成果、回国后主持和参加的科研项目等，并结合相关桥梁建设抗震分析的实际工程，撰写而成。专著的主要内容包括基于性能的桥梁抗震设计发展历程、基于性能的抗震设计评价指标与评价方法、利用延性抗震设计进行一座 5 跨连续桥梁抗震设计，探讨了基于静力 Pushover 分析的适用性，提出了静—动力分析相结合的桥梁抗震设计方法，并利用非线性动力时程分析探讨了各种类型桥墩的抗震性能及评价，具有较高的学术价值，并能为实际桥梁工程抗震设计提供参考。

千人计划 国家特聘专家教授

博士

2013 年 6 月

前言



我国是世界上地震活动最活跃，地震灾害最大的国家之一。2008年5月汶川地震的发生，桥梁倒塌致使地震后交通中断，人民的生命财产损失惨重。之后在我国的交通运输及城市的桥梁建设方面，执行了更严格的桥梁抗震设计。交通部与住建部先后出台了《公路桥梁抗震设计细则》（JTG/T B02—01—2008）以及《城市桥梁抗震设计规范》（CJJ 166—2011），提出了两级抗震设防、两阶段抗震设计。可以看出，从国家到行业越来越重视桥梁的防震减灾工作，加强桥梁抗震设计势在必行。

本书是在该背景下，结合作者在日本留学攻读博士学位期间所做的关于桥梁抗震方面的研究成果及回国后在桥梁工程抗震方面的研究与教学基础上，编写而成。

全书共有6章，第1章介绍了性能设计在桥梁抗震中的发展概况、多级水准设防和多性能目标的确立以及性能抗震设计评价流程等内容；第2章介绍了基于性能的桥梁抗震设计评价指标及抗震评价方法；第3章以一座5跨连续梁桥的抗震设计为例详实的介绍了桥梁延性抗震设计方法及评价；第4章结合实际工程讲述基于Pushover分析的抗震设计在3跨预应力刚构桥的应用；第5章介绍了基于静—动力分析相结合的抗震设计方法在钢结构桥墩抗震设计中的应用及需要解决的问题；第6章以5跨连续梁桥为模型，研究多种类型桥墩在地震动作用下的非线性动力反应，动力时程分析方法在整体桥梁抗震设计中的适用性。

全书由王占飞编写和统稿。沈阳建筑大学隋伟宁负责第3章内容的整理工作，沈阳城市建设学院赵中华负责第5章内容的整理工作，第4章内容由庞辉的硕士论文构成，全书的图表整理由廖晶、吴权等研究生完成。

在本书的编写过程中，得到了中组部千人计划、国家特聘专家、沈阳建筑大学赵唯坚教授，辽宁省超高超限建筑抗震审查委员会委员、国家新世纪百千万人才工程国家级人选、沈阳建筑大学李帼昌教授的大力支持，赵唯坚教授为本书作序，特此致谢。同时也非常感谢中国水利水电出版社杨薇编辑的大力支持。

由于编者水平有限，书中难免有谬误之处，敬请读者批评指正。

王占飞

2013年6月

目 录

序

前言

第1章 基于性能的桥梁抗震设计	1
1.1 性能设计	1
1.1.1 性能设计的由来	1
1.1.2 结构上性能设计的理念及含义	1
1.1.3 结构上性能设计的优点	2
1.1.4 结构上性能设计与当前设计方法的关系	2
1.1.5 性能设计在各国建筑行业的发展状况	3
1.1.6 基于性能的桥梁结构抗震设计背景	4
1.2 基于性能抗震设计的多级水准设防和多性能目标	5
1.2.1 多级水准抗震设防和多性能抗震目标的关系	6
1.2.2 多级水准抗震设防	6
1.2.3 多性能抗震目标	10
1.3 基于性能的桥梁抗震分析指标及流程	11
1.3.1 结构动力反应分析指标 $\{R\}$	11
1.3.2 桥梁结构构件损伤指标 $\{D_m\}$	13
1.3.3 桥梁结构体系损伤指标 $\{D_s\}$	13
1.3.4 结构所持有的抗震性能指标 $\{P\}$	15
1.3.5 基于性能的桥梁抗震设计发展趋势	15
1.4 本书主要内容	16
第2章 基于性能的桥梁抗震设计评价指标与方法	17
2.1 基于性能的桥梁抗震评价指标	17
2.1.1 基于承载力的抗震评价	17
2.1.2 基于变形的抗震评价指标	22
2.1.3 基于性能点的抗震评价	24
2.2 基于性能的桥梁抗震评价方法	25
2.2.1 基于延性的抗震评价方法	25
2.2.2 基于 Pushover 分析的抗震评价	30
2.2.3 静—动力分析相结合的抗震评价	36

2.2.4	非线性动力时程分析抗震评价	42
2.2.5	各抗震性能评价方法适用条件	44
第3章	基于性能的延性抗震设计工程实践	46
3.1	桥梁概况及抗震设计流程	46
3.1.1	桥梁上部结构	46
3.1.2	桥梁下部结构	46
3.1.3	上部结构传递的竖向荷载	47
3.1.4	重要程度及地震区域划分	47
3.1.5	场地地质条件	47
3.1.6	桥梁及桥墩布置	48
3.1.7	桥梁抗震设计流程	49
3.2	震度法抗震设计	51
3.2.1	E1地震作用下固有周期、设计水平地震动及桥梁重量计算	51
3.2.2	桩基础稳定计算	62
3.2.3	桥墩各部位设计	65
3.2.4	桩的设计计算	73
3.3	地震时保有水平抗力抗震设计	75
3.3.1	E2地震作用下固有周期、设计水平地震动及桥梁重量计算	75
3.3.2	桥墩安全性能评价	83
3.3.3	桩基础安全性验算	93
3.3.4	承台安全性验算	108
3.4	支座设计	113
3.4.1	设计条件	113
3.4.2	橡胶支座设计	114
3.4.3	橡胶支座安装部位详细设计	126
3.5	支座垫板设计	135
3.6	防落桥装置设计	136
3.6.1	主梁搭接桥台长度 S_E 计算	137
3.6.2	主梁端部伸缩缝宽度计算	137
3.6.3	防落梁结构设计	137
3.6.4	伸缩装置移动量计算	144
3.6.5	桥台支座固定部位设计	144
3.6.6	其他防止落桥构造设计算例	146
第4章	基于 Pushover 分析的刚构桥抗震性能评价	149
4.1	刚构桥概述与固有值分析	149
4.1.1	刚构桥及模型概述	149

4.1.2 固有值分析及结果	151
4.2 基于 Pushover 分析的刚构桥抗震评价	153
4.2.1 Pushover 分析方法的加载方式	153
4.2.2 Pushover 分析结果	153
4.2.3 基于 Pushover 分析的抗震性能评价	154
4.2.4 小结	163
4.3 基于 Pushover 分析抗震评价适用性验证	163
4.3.1 输入的地震波	164
4.3.2 桥墩根部及桥墩上部单元类型及非线性本构关系	164
4.3.3 分析方法及阻尼设置	165
4.3.4 动力时程分析结果	165
4.3.5 Pushover 分析抗震性能评价与动力时程分析抗震性能评价对比	175
4.3.6 小结	177
第 5 章 静—动力分析相结合方法在钢结构桥墩抗震性能评价中的研究与应用	178
5.1 十字形补强钢桥墩极限应变研究	180
5.1.1 十字形加劲肋补强箱型截面钢桥墩的极限应变公式	180
5.1.2 十字形加劲肋补强圆形截面钢桥墩的极限应变公式	187
5.2 验证由极限应变公式推导极限位移的合理性	192
5.2.1 分析模型和参数	192
5.2.2 加载方法	194
5.2.3 由极限应变推导极限位移	194
5.2.4 极限位移作为极限状态的合理性	196
5.3 静—动力分析相结合法进行十字形补强钢桥墩抗震性能评价适用性	196
5.3.1 动力分析模型	197
5.3.2 地震波的输入	198
5.3.3 分析结果和抗震评价方法的比较	198
5.3.4 小结	203
第 6 章 动力时程分析在整体桥梁抗震性能评价中的研究与应用	204
6.1 连续高架桥模型	204
6.1.1 上部构造概述	204
6.1.2 桥墩概况	206
6.1.3 高架桥中桥墩类型	207
6.2 模型建立与固有值分析	209
6.2.1 高架桥模型建立	209
6.2.2 地震波输入	213
6.2.3 特征值分析及结果	213

6.3 非线性动力时程分析与抗震性能评价	220
6.3.1 桥纵向分析结果与抗震评价	220
6.3.2 桥横向分析结果以及抗震评价	225
6.3.3 小结	233
参考文献	235

第 1 章 基于性能的桥梁抗震设计

1.1 性能设计

1.1.1 性能设计的由来

性能设计的由来与国际标准化组织 (ISO) 制定统一标准席卷世界各国有密切的关系。早在 1981 年国际标准化组织 (ISO) 在制定政府采购协议、GATT (*General Agreement on Tariffs and Trade*, 关贸总协定) 东京多边贸易谈判中, 提出适用《政府采购协议》的商品在 1981 年开始生效。之后, 从商品扩展到服务业, 1996 年该协议被 WTO (世界贸易组织) 协议所收录。《政府采购协议》第 6 条“技术规格”第 1 款项规定: “采购单位拟定、采用或通用的技术规格, 是为了说明货物或服务的特性, 如质量、性能、安全、大小、符号、术语、包装、标志、标签或生产工艺与方法, 以及规定评估程序的有关要求, 不得对国际贸易造成不必要的障碍。”并且在第 2 款项中规定: “采购单位在制定技术规格时, 通常情况: (a) 应依照性能, 而不是按设计或描述特征制定标准; (b) 应根据现有国际标准, 没有国际标准的按国家技术规定 (本协议所称技术规定, 是指说明产品或服务特点或其相关工艺与生产方法的文件, 包括适用的强制性行政规定。这些文件也可以包括或单独说明适用产品、服务、工艺或生产方法的专门术语、符号、包装、标志或标签等要求)、公认的国家标准 (本协议所称标准, 是指经过主管部门核准的文件中, 对共同及经常性使用的产品、服务或相关工艺、生产方法规定的规则、准则或特征, 但没有强制性。标准还可以包括或单独说明适用产品、服务、工艺或生产方法的专门术语、符号、包装、标志或标签等要求) 或建筑规定。”^[1]

由此看出, 关于国际交流合作的技术标准, 在整合国际规格的同时, 力求采用性能评价指标对技术标准进行规范统一, 这使得性能设计成为国际间经济技术交流的主潮流, 并逐步得到了各国的认可和重视。

1.1.2 结构上性能设计的理念及含义

结构设计原意是“如何实现结构所要求功能”的一种行为。按此理解, 从实现结构性能/功能的角度出发, 无论哪种结构设计都属于性能设计。但是, 哪种设计方法才算是基于性能设计的方法呢? 例如建筑、桥梁结构抗震设计, 如果明确了一个抗震目标, 如“在罕遇地震 (如汶川地震) 作用下, 保证结构不倒塌且安全”, 就可以说是基于性能的抗震设计吗? 或是把“在某假定的地震动作用下, 保持结构的功能 (例如, 保证生命安全或者保持交通通行功能)”作为功能目标而被规定下来, 就是基于性能的抗震设计吗? 从这一点看, 每位设计人员对基于性能抗震设计方法的理解是不同的。

那么什么是性能设计, 其含义如何? 在建筑桥梁结构上所谓基于性能设计是指在明确



设计性能目标的基础上,为了实现这个性能目标的所有设计总称。换句话说,就是把以前显示的、隐式的结构性能要求及其评价方法进行明确化和系统化的设计,即为性能设计^[2]。但这时要求的结构性能和评价方法必须是科学的、合理的。

与性能设计相关的词汇有“规定性能”、“性能评价”、“明确性能标准”、“规定性能标准”等。规定性能是指在规范条文中明确规定结构性能的设计方法。在制定设计方法时,只规定性能目标,而结构是否能够达到性能目标的验算评价方法则委托给设计人员(该种设计方法称为广义性能设计)。这样,设计人员在设计时有可选择的空间,设计更加灵活。但是在目前状况下,这种广义的性能设计方法还得不到应用(例如在结构抗震设计方面),这主要是因为目前还没有达到只规定性能目标就能进行抗震设计的水平。为此,在规范中规定性能目标的同时,也需要规定验证其性能目标的方法。

1.1.3 结构上性能设计的优点

结构上,从当前设计方法(即规格规定型设计)的缺点角度来分析,更容易说明基于性能设计方法的优点。当前设计方法所依据的“○○应用△△强度以上的材料”或“间距设置须小于××cm以下”的规范条文,只规定应当使用的材料、形状及尺寸,而性能设计方法不仅规定“○○应用△△强度以上的材料”或“间距设置须小于××cm以下”的目的,而且明确基于这一目的所期待的性能。

虽然当前设计方法的原则也是为了达成某种功能,但是目前的规定只适用于某种结构和某种材料,同时为了完善不明确、不明的性能目标,从安全角度出发,按照偏于保守的规定进行设计。这种设计方法显然不适用于新型结构和新型材料应用。并且,在以计算数值为设计依据的时代,设计人员有时并不清楚为什么需要这些规定,只能机械地套用规范条文。

当前结构设计方法(即规格规定型设计)由于规定的是结构使用的材料、形状和尺寸等,在具体设计时容易理解和把握,在设计时不需要高水平的设计人员,在进行评审时只要按照规范标准很容易进行审查。但缺点是:①根据这种设计方法进行设计,当新材料和新结构出现时,新材料和新结构很难得到推广和应用。这主要是因为当前的设计方法没有明确规定应该实现的性能目标;②缺乏替代性,阻碍技术的更新和进步;③由于各个国家结构设计规范规定的内容存在很大的差异,国际间的技术交流和沟通存在较大困难。

与之相比,性能设计自由、灵活,明确应该实现的性能目标,较容易适应新技术、新材料在工程实际中的推广应用,同时性能设计也提供了国际间技术交流合作的基础和平台。但性能设计方法也有其不足的一面,即在结构审查和适用性判断时需要较高的技术,并且在设计时需要高水平的设计人员^[2]。

1.1.4 结构上性能设计与当前设计方法的关系

性能设计与当前设计方法(规格规定型设计)的关系以图1.1所示的阶层图来加以说明。

图1.1中“目的”指的是设计标准中社会要求的目标(如在地震作用下,结构要保证人民的生命安全、尽量减少经济财产损失等即为社会要求结构设计达到的目标)。“功能要求”是指为了实现上述目的而要求的结构功能(如抗震设计中说的“小震不坏,中震可

修，大震不倒”的三水准设计原则)。“性能要求”是指为了实现结构的功能要求，规定性能标准和验证方法（如在抗震设计中，要求结构在小震作用下，结构构件不容许进入塑性区域；在中震作用下，容许结构某些耗能构件进入塑性区域、容许一定的损伤，但不容许破坏；在大震作用下，不容许主要受力构件达到极限状态，保证结构不出现倒塌）。上述规定是强制性的。“验证方法”是指验证能实现结构功能的方法。“适用规格规定型设计条文”是指满足结构功能要求

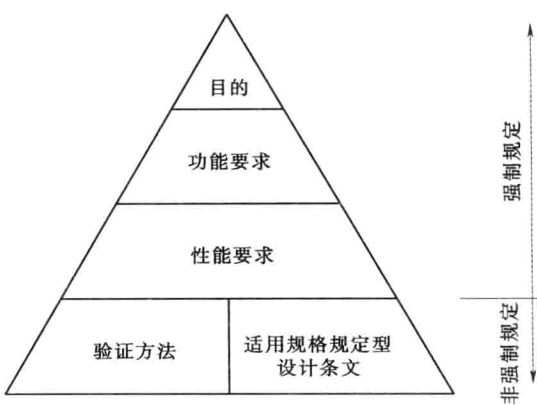


图 1.1 性能设计与当前设计方法的关系

而给出的具体“解”、验证方法和适用规格规定型设计条文，在法律上不具有强制性，需要随着技术的进步、科学研究不断探明和发展，进行修订和增减。

上述这个阶层图在当前很多结构设计规范中，性能的规定和构造的规定混在一起。而基于性能设计在规范中，明确性能目标和要求的同时，也明确和规范性能设计的层次，如图 1.1 所示。从这个意义上讲，性能设计并不是全新的设计方法，而是目前抗震设计的延伸，它进一步明确和细化了结构设计评价内容及方法，形成更详细、更完整的结构抗震设计体系。

但在采用基于性能的抗震设计时，也有种担心，即缺乏能够运用这种设计方法进行抗震设计的技术人员、没有建立具体的评价方法和体系，容易导致由于设计人员的不同设计结果存在较大差异，很难验证其适用性。为了解决这种忧虑，需要完善基于性能抗震设计体系中的评价方法及相应的设计条文。

1.1.5 性能设计在各国建筑行业的发展状况

为了技术革新和扩大经济贸易，北欧建筑标准委员会（NKB）在 1963 年开始研究协调北欧各国的建筑标准。1972 年，为了保证北欧各国劳动力流动和扩大建筑业及相关产品的贸易，NKB 制定了实行计划。在各过程中，为了理解和修订各国的建筑标准，把建筑标准分成 5 个层次，NKB 称之为水准系统（见表 1.1）^[3]。这是性能设计按层次划分的最初方案，对欧美建筑标准层次化思想影响深远。

表 1.1 NKB 建筑标准水准系统

水 准	定 义
水准 1 目的	社会以及社会成员认为建筑物所持有目标的一般性论述
水准 2 功能要求	为了明确水准 1，规定的一般目标在专业中特定目的和意图，同时按照功能项目和原则分类
水准 3 性能要求标准	为了实现水准 2，规定的每个功能，制定性能要求标准
水准 4 验证	性能要求标准适用性的验证方法
水准 5 具体的解决方法案例	符合要求而进行的具体设计方法



其后大致发展如下：1978年，欧洲经济委员会（ECE）根据北欧的水准系统进行了多方面研究，对水准1~3进行了强制性的规定，对水准4~5没有进行强制性的规定，以这个方针为基础制定了建筑标准模型。

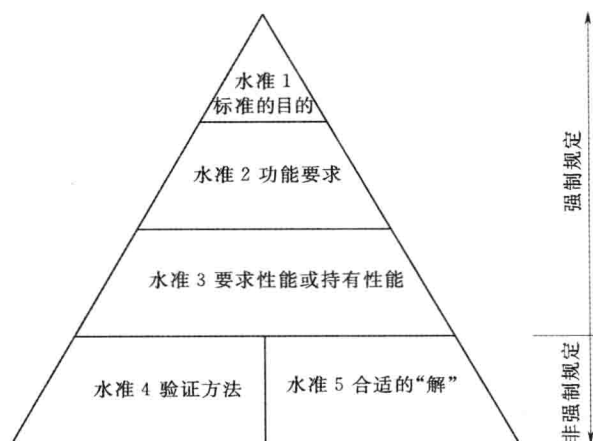


图 1.2 NZBC 水准分层图

在英国，多数采用规格规定型的建筑标准。但从 20 世纪 70 年代后期，规格规定形式的建筑标准在建筑界中的活力开始降低。1984 年，英国制定了新的建筑法，放弃了规格规定型建筑设计标准，改为简洁的建筑设计标准，确立了基于性能的设计体系，旧的建筑设计标准已经失去了原有的地位。

在新西兰，从 1986 年开始研发基于性能设计，统一建筑规范，1990 年提出了 NZBC 建筑设计方法草案，如图 1.2 所示，分为 5 个阶段，与表

1.1 所示的 NKB 建筑标准水准系统大体一致^[4]。

在美国，以前各州和自治体都各自制定了独立的建筑标准，注重地方形式的建筑规格体系。目前正尝试研发统一的建筑设计标准，制定性能设计方法和体系。

关于抗震设计，美国加利福尼亚州结构技术协会（SEADC）根据 Vision2000 提议的以性能矩阵为基础建立了基于性能的抗震设计方法。在该设计方法中，详细介绍了根据不同的地震力大小制定相应的性能目标，并建立了与之相适应的设计分析方法。这种抗震设计方法，是在地震作用下探明建筑物的动力行为而制定的抗震技术框架，也未偏离性能设计的宗旨和方针。换句话说，作为设计目标，明确抗震性能要求，抗震设计方法采用基于规格规定型进行抗震设计，我们把这种抗震设计方法称为基于性能规定型抗震设计（狭义上的性能设计，本书下文所讲的基于性能的抗震设计属于这种狭义的性能设计）。

1.1.6 基于性能的桥梁结构抗震设计背景

基于性能抗震设计近年来备受关注的主要原因是 1989 年美国旧金山地震、1994 年美国北岭地震、1995 年日本神户地震及 2008 年中国汶川地震等，给人类带来了巨大震害。在世界各国，建筑桥梁抗震设计的基本原则首先考虑在罕遇地震作用下，保证人们的生命安全，防止结构倒塌，容许结构发生或多或少的损伤。其实，在地震中，保证人们生命的安全是必须的（即满足单一的抗震性能），但如果结构发生了过大损伤的话，修复时需要花费庞大的费用，这也使得有些业主质疑为什么还采取单一抗震性能目标的抗震设计。

同时，对于医院等建筑物，即使建筑物避免了倒塌，但如果医院里的医疗设施发生了巨大破坏，将会扩大地震对人类以及物品的灾害。再比如对于桥梁的抗震设计，即使避免桥梁发生落梁等的破坏，但在地震后丧失了桥梁所具有的交通功能，其带来的间接损失可能会远远大于桥梁本身的直接损失。因此，在抗震设计中应该考虑灾后重建期间丧失交通功能及其带来的影响，以及灾后桥梁加固或新建所需的费用等。即桥梁抗震设计不单单要



保证人们的生命安全,同时也需要考虑结构的损伤及其带来的各种可能发生的费用和社会影响。在此基础上,需要具有更高层次认识的设计,这也是基于性能设计备受关注的-一个原因。

基于性能的抗震设计体系已经建立完成,但在当前状况下该方法还没有应用到桥梁工程实践。因此,为了使该设计方法应用于工程实践,在世界范围内研究开发基于性能抗震设计的范例显得十分重要。

基于性能的抗震设计方法最初是美国的 V. V. Bertero 博士和 R. Sharpe 博士提出的,2000 年汇总到加州抗震设计 Vision2000 中^[5]。基于性能的抗震设计其宗旨是结构设计要确实满足假定地震动作用下所制定的结构性能要求。为此,重要的是,当结构遇到某种地震时,需要高精度地分析结构晃动程度、结构损伤情况(需求性能分析)以及确实满足限制结构摇晃和损伤为目的设计要求(即结构所持有的功能)。

结构的需求性能用 D (demand),结构持有的功能用 C (capacity) 表示,结构设计的基本公式为

$$D \leq C \quad (1.1)$$

但是,受目前对地震发生机理认识所限,当发生超过设计地震动的地震,该结构是否还能继续按照原来的设计目标进行抗震是防震减灾中的重要课题。如果采用如式(1.1)不等式的方式进行抗震评价或设计,就不能表达结构在受力过程中所持有的性能,也就不能分析超过假定地震动作用时,结构能否保护人们的生命安全,也就失去基于性能设计的宗旨。

因此,为了更清晰地实现基于性能的抗震设计,可以采用如下公式,即采用明确的系数法来进行设计。

$$D = \alpha C \quad (1.2)$$

以式(1.2)为基础,为了能够清晰地描述设计结构的性能状态,进行抗震评价,需要在不同地震动作用下高精度分析结构如何摇晃及结构损伤程度,直至结构倒塌。也就是说,基于性能的抗震设计需要清晰地确定结构性能要求目标及与之相适应的高精度、合理的结构分析方法和手段。

1.2 基于性能抗震设计的多级水准设防和多性能目标

如第 1.1 节所说,单一水准的抗震设防虽然能够有效地防止结构在罕遇地震作用下倒塌,但一旦发生地震,由于不能准确预估结构的损伤,有时会给业主、人类社会等带来巨大的经济损失,给震后桥梁建筑的重建或修复工作带来巨大的阻碍,会严重影响在防震减灾中起到重要作用的交通、通信、医疗机关等生命线工程的正常运营。

基于性能的抗震设计又一重要宗旨,就是由原来单一水准的设防、单一抗震目标向多级水准设防、多个抗震性能目标发展。

这种抗震设计思想在世界各国建筑结构抗震设计中被系统地研究,并在建筑结构抗震设计规范中有相应的条文规定。例如,在我国《建筑结构抗震设计规范》(GB 50011—2010)中采用了三水准设防、两阶段设计的方法^[6],即第一阶段设计取第一设防水准地震



动参数计算结构的弹性地震作用标准值和相应的地震作用效应,进行构件截面的承载力验算;第二阶段设计取第三水准的地震动参数进行结构薄弱部位的弹塑性层间变形验算,并采取相应的构造措施。其抗震性能目标为“小震不坏,中震可修,大震不倒”的三水准设计原则。

与之相比,我国在桥梁抗震设计方面提出多级水准设防、多个性能目标的抗震设计方法较晚,2006年、2008年和2011年先后出台执行的《铁路工程桥梁抗震设计规范》、《公路桥梁抗震设计细则》和《城市桥梁抗震设计规范》中,才提出了多水准设防和多性能目标的抗震设计思想,但具体的抗震设计流程及抗震安全评价方法还有待于研究和发展^[7-9]。

下面就各国在基于性能的桥梁抗震设计多级水准设防和多性能目标的有关规定进行简单介绍。

1.2.1 多级水准抗震设防和多性能抗震目标的关系

性能目标可以有多种表达形式。目前在国际上比较广泛流行的是在中震、小震时保持建筑物的功能,在罕遇地震时保证结构不倒塌的第二阶段性能目标形式。因此,在抗震设计中作为抗震目标是由中小地震动和罕遇地震动构成 2×1 地震动列阵 $\{G\}$ 。中小地震动和罕遇地震动所对应的性能目标构成了 2×1 抗震性能列阵 $\{P\}$,两者之间的关系可以用下面的公式表示:

$$\{P\} = [M_{PC}]\{G\} \quad (1.3)$$

这里 $[M_{PC}]$ 是 2×2 的矩阵,以下称之为性能矩阵。

在式(1.3)中, $\{P\}$ 和 $\{G\}$ 不是由数字组成的列阵,而是由多级水准抗震性能目标和地震动大小、地震危险程度等概念所构成的列阵。因此,性能矩阵 $[M_{PC}]$ 与普通的数值矩阵不同,是表示 $\{P\}$ 和 $\{G\}$ 之间关系的矩阵,在下面基于性能抗震设计流程的论述中都是表达相同的意思。并且在式(1.3)中 $\{P\}$ 和 $\{G\}$ 实际上不仅限于 2×1 的列阵,在地震动列阵 $\{G\}$ 中有必要考虑近震和远震、地震等级(规模)以及地震发生的概率等。同时,其表现方法也可以有多种多样的指标,如加速度反应谱、速度反应谱、最大加速度、最大速度等。在多水准抗震性能目标中,不单单描述保持结构功能和防止结构倒塌等抗震性能目标,可以更细致、更复杂地规定结构的抗震性能目标,如灾后重建时如何修复、多大程度的修复费用可以接受、人们的生命保证以及受伤可能出现的概率等。因此,性能矩阵 $[M_{PC}]$ 可以用 $M \times N$ 的一般表达式表示。

1.2.2 多级水准抗震设防

在多级水准抗震设防地震动选取方面,我国和其他国家在这方面的规定略有不同,但都同样表达了上面所论述的观点。例如,在我国《公路桥梁抗震设计细则》(JTG/T B02-01-2008)中体现了多水准抗震性能目标,即将原来单水准扩展到双水准抗震设计,地震动大小列阵 $\{G\}$ 表达为 $E1$ 地震作用和 $E2$ 地震作用,定义分别为:工程场地重现期较短的地震作用称为 $E1$ 地震作用;工程场地重现期较长的地震作用称为 $E2$ 地震作用。这里所说的重现期较短和重现期较长是个较模糊的说法,一般认为, $E1$ 地震作用指的是中小地震动, $E2$ 地震作用指的是罕遇地震。在美国公路桥梁抗震设计规范 AASHTO LRFD 中,地震动大小列阵指的是设计地震(地震重现周期为475年)和最大地震



(地震重现周期约为 2500 年)^[10]。新西兰的桥梁抗震设计规范中,地震动大小列阵指的是设计地震动(地震重现周期为 450 年)和根据桥梁的重要性在设计地震动上乘以大于 1 的系数^[11]。在日本 2002 版的公路桥梁抗震规范中,地震动大小列阵指水准 1 地震动(桥梁使用期间地震发生概率较高的地震动)和水准 2 地震动(桥梁使用期间地震发生概率较低的地震动),而水准 2 地震动按照地震类型又分为海洋型地震动和城市直下型地震动^[12,13]。

在桥梁抗震设计中,我国及国外在多水准抗震设计时,地震作用(水平设计反应谱)取值计算公式多种多样,但都反映了多水准的抗震设防思想。下面以我国和日本公路桥梁抗震中关于多水准抗震设防各设计地震动取值为例进行说明。

1.2.2.1 我国公路桥梁抗震设计细则,多水准地震动取值

以简单桥梁反应谱法抗震设计为例。在我国《公路桥梁抗震设计细则》(JTG/T B02-01-2008)中,水平设计反应谱的计算公式如式(1.4)所示,其反应谱如图 1.3 所示。

$$S_a = \begin{cases} S_{\max}(5.5T + 0.45) & T \leq 0.1s \\ S_{\max} & 0.1s < T \leq T_g \\ S_{\max}\left(\frac{T_g}{T}\right) & T_g \leq T \end{cases} \quad (1.4)$$

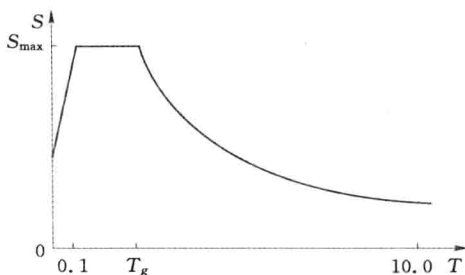


图 1.3 公路桥梁抗震设计反应谱

式中, T_g 为特征周期, s; T 为结构自振周期, s; $S_{\max}$ 为水平设计加速度反应谱最大值。

特征周期 T_g 根据建筑场地类型和地震区划图进行调整,取值见表 1.2。

表 1.2 设计加速度反应谱特征周期调整表

区划图上的特征周期 (s)	场 地 类 型			
	I	II	III	IV
0.35	0.25	0.35	0.45	0.65
0.40	0.30	0.40	0.55	0.75
0.45	0.35	0.45	0.65	0.90

水平设计加速度反应谱最大值 $S_{\max}$ 由下式确定:

$$S_{\max} = 2.25C_i C_s C_D A \quad (1.5)$$

$$C_D = 1 + \frac{0.05 - \xi}{0.06 + 1.7\xi} \geq 0.55 \quad (1.6)$$

式中, C_i 为抗震重要性系数,既考虑了桥梁重要程度的影响,又考虑了地震动大小。以 A 类桥梁为例, E1 地震作用时 C_i 取 1.0; 在 E2 地震作用时 C_i 取 1.7,见表 1.3; C_s 为场地系数,见表 1.4; C_D 为阻尼调整系数(与结构相关的系数),与结构阻尼比 ξ 的关系如式(1.6)所示,当 $\xi=0.05$, $C_D=1.0$; A 为水平向设计基本地震动加速度峰值,与桥梁抗震设防基本烈度的关系,见表 1.5。



表 1.3

各类桥梁的抗震重要性系数 C_i

桥梁分类	E1 地震作用	E2 地震作用
A 类	1.0	1.7
B 类	0.43 (0.5)	1.3 (1.7)
C 类	0.34	1.0
D 类	0.23	—

表 1.4

场地系数 C_s

抗震设防烈度 场地类型	6	7		8		9
	0.05g	0.1g	0.15g	0.2g	0.3g	0.4g
I	1.2	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9
II	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
III	1.1	1.3	1.2	1.2	1.0	1.0
IV	1.2	1.4	1.3	1.3	1.0	0.9

表 1.5

抗震设防基本烈度和水平向设计基本地震动加速度峰值 A

抗震设防烈度	6	7	8	9
A	0.05g	0.10(0.15)g	0.20(0.30)g	0.40g

如果我们知道桥梁建设的地区、桥梁的重要程度、材料以及建设场地类型和结构的周期,就能计算出 S_a 。例如,在沈阳建设一座桥梁,桥梁的重要程度为 A 类,材料采用混凝土,建设场地类型为 II 类,结构的周期 T 为 0.5s。根据我国地震烈度分布,沈阳为 7 度设防,查表 1.5 可知, $A=0.10g$, 则该桥在进行抗震设计时,在 E1 地震作用下 $S_a=2.25C_iC_sC_DA(T_g/T)=2.25\times 1.0\times 1.0\times 1.0\times 0.10(0.35/0.5)=0.158g$ ($C_i=1.0$, $C_s=1.0$, $C_D=1.0$, $A=0.1g$, $T_g=0.35s$, $T=0.5s$); 在 E2 地震动作用下: $S_a=2.25C_iC_sC_DA(T_g/T)=2.25\times 1.7\times 1.0\times 1.0\times 0.10(0.35/0.5)=0.268g$ ($C_i=1.7$, $C_s=1.0$, $C_D=1.0$, $A=0.1g$, $T_g=0.35s$, $T=0.5s$), 其中 g 为重力加速度 $g=9.8\text{m/s}^2=980\text{cm/s}^2=980\text{gal}$ (加里)。

1.2.2.2 日本公路桥梁抗震设计规范,多水准设防地震动取值

在日本 2002 版《公路桥梁抗震设计规范》(日语为《道路桥梁示方书 V 抗震设计篇》)中,对地震动的大小取值分两个设计阶段:第一设计阶段,采用的是第 I 水准地震动作用下的抗震设计;第二设计阶段,采用的是第 II 水准地震动作用下的抗震设计。其中第 II 水准地震动根据地震类型,分为第 II 水准海洋型地震动和第 II 水准城市直下型地震动。两个阶段地震动大小的计算公式如下:

$$\left. \begin{aligned} S &= C_Z C_D S_0 \\ S_1 &= C_Z C_D S_{10} \\ S_2 &= C_Z C_D S_{20} \end{aligned} \right\} \quad (1.7)$$