



钢桥抗震设计

Seismic Design of Steel Bridge

谢旭 唐站站 著



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

钢桥抗震设计

Seismic Design of Steel Bridge

谢 旭 唐站站 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书针对钢桥弹塑性地震反应计算方法和抗震设计方法,主要介绍地震中钢桥的破坏形式、钢桥弹塑性地震反应分析的计算模型、材料本构滞回模型、钢桥墩的结构抗震性能、地震作用方式对钢桥墩抗震性能的影响、钢拱桥的弹塑性地震反应、钢材的超低周疲劳性能及钢桥抗震性能验算方法等方面的内容。

本书可作为高等院校钢桥抗震研究方向研究生的参考书,也可供钢桥抗震设计工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

钢桥抗震设计=Seismic Design of Steel Bridge/谢旭,唐站站著. —北京:科学出版社,2019. 1

ISBN 978-7-03-059776-2

I. ①钢… II. ①谢…②唐… III. ①钢桥-防震设计 IV. ①U448.362.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 277078 号

责任编辑:牛宇锋 乔丽维 / 责任校对:王萌萌

责任印制:师艳茹 / 封面设计:钟婧如

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>

新科印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 1 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2019 年 1 月第一次印刷 印张:15 3/4

字数:307 000

定价:99.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

与混凝土桥梁相比,钢桥由于自重轻、材料延性好、强度高,在过去的强震中破坏程度相对较轻,国内外对这类结构的抗震设计方法研究历史较短。特别是我国,过去钢桥数量少,地震破坏资料匮乏,现行规范对钢桥在罕遇地震作用下的设计方法也没有明确规定,设计者在实际工程中多采用较为保守的弹性设计方法,要求桥梁在地震中保持在弹性状态。这种弹性设计方法不但不经济,而且当桥梁遭受到超过预期强度的地震作用时容易发生致命的倒塌破坏。地震灾害表明,由薄壁截面构成的钢桥在强震荷载作用下钢板局部失稳易导致结构整体抗震性能大幅降低。在1995年的日本阪神大地震中,许多钢桥因钢板局部失稳、构件整体失稳、超低周疲劳开裂等原因发生结构失效。因此,弹性理论不能保证钢桥抗震安全。

自1995年日本阪神大地震以后,以日本为主的科研机构对钢桥的地震破坏机理及抗震设计方法进行了一系列研究。2006年由日本名古屋大学宇佐美勉(Usami Tsutomu)教授主编出版了《钢桥抗震及减震设计指南》一书,该书较系统地总结了日本钢桥抗震设计的研究成果。但书中阐述的内容主要是单方向地震作用下的钢桥墩抗震设计方法,且以纤维模型的应变作为结构抗震安全的验算指标,计算精度及合理性仍有待进一步提高。自该书出版以来的十余年时间,人们在水平2方向地震作用下钢桥墩的损伤特性、结构超低周疲劳破坏特性以及钢桥抗震性能验算方法改进等方面又取得了不少新的研究进展,对钢桥地震破坏机理的认识也得到加深。因此,有必要对相关的内容再认识。

目前,国内对钢桥抗震设计方法的研究工作相对比较少,已不能满足我国钢桥迅速发展的建设需要。在这一背景下,作者所在课题组自2014年以来在国家自然科学基金面上项目(编号:51378460)的资助下,通过对既有钢桥抗震设计方法的学习,对钢桥的弹塑性地震反应计算方法、钢材的滞回本构模型、钢材的超低周疲劳性能、钢桥抗震性能评价等方面展开了一些研究工作。本书也是上述几个方面工作的体会和总结。

本书内容主要包括钢桥的地震破坏形式及计算模型、钢桥墩在单向与双向地震作用下的结构延性和承载能力特性、钢拱桥的弹塑性地震反应、钢材的超低周疲劳性能以及钢桥抗震性能验算方法。相关内容可为钢桥在强地震作用下的抗震设计、地震损伤机理分析提供参考。

在本书撰写过程中,唐站站(现工作于扬州大学)参与了各章节的撰写、修改和计算分析工作;王彤(现工作于湖州市交通运输局)对既有的修正双曲面滞回本构

模型进行了再修正,标定了 Q345 钢材的材料参数,并承担了 3.4 节和 3.5 节的初稿撰写;研究生诸葛翰卿、廖燕华、李帅领等在计算分析、数据处理、试验以及书稿编排过程给予了许多协助,在此深表谢意。

作者对宁波大学黄剑源教授长期以来的鼓励、关心和指导深表感谢。另外,特别感谢日本长大株式会社沈赤博士提供了双曲面本构模型的基础资料;感谢日本长大株式会社矢部正明博士、中国同济大学李建中教授、日本名城大学葛汉彬教授以及中国天津大学李忠献教授的帮助和指导。

由于作者水平有限,且目前钢桥的抗震设计方法也尚未成熟,书中难免存在不足之处,敬请提出宝贵意见。

谢 旭

2018 年 3 月于浙江大学

目 录

前言	
第 1 章 钢桥地震破坏形式及结构抗震性能要求	1
1.1 概述	1
1.2 钢桥结构地震损伤形式	3
1.3 桥梁结构抗震设防目标	6
1.4 钢桥抗震性能要求	9
参考文献	9
第 2 章 设计地震动	11
2.1 概述	11
2.2 地震及地震动传播的基本特征	11
2.2.1 地震机理及断层的形式	11
2.2.2 地震波的传播过程	13
2.3 场地增幅特性	14
2.3.1 简谐剪切波在单一覆盖层场地中的传播	14
2.3.2 简谐振动波在界面上的反射、透射	16
2.3.3 层状场地中简谐波的传播	17
2.3.4 场地地震运动计算	19
2.4 设计地震动参数设定	22
2.4.1 基于历史地震资料的设计地震动设定方法	22
2.4.2 考虑震源距离的场地地震动参数评估方法	25
2.5 地震动时程模拟	27
2.5.1 历史地震动记录的调整	27
2.5.2 人工地震动的模拟	28
2.6 小结	30
参考文献	30
第 3 章 结构地震反应计算模型	32
3.1 概述	32
3.2 弹塑性地震反应分析的有限元模型	33
3.2.1 弯矩-曲率模型	33
3.2.2 纤维模型	36

3.2.3 板壳模型	40
3.3 有限元模型对结构地震反应计算结果的影响	45
3.3.1 桥梁概况及计算模型	45
3.3.2 成桥状态的结构应力及自振特性比较	47
3.3.3 地震动输入及结构地震反应	49
3.4 钢材的滞回本构模型	52
3.4.1 钢材的应力-应变曲线	53
3.4.2 等向强化模型和随动强化模型	54
3.4.3 混合强化模型	54
3.4.4 双曲面模型	56
3.4.5 修正双曲面模型	58
3.4.6 改进的双曲面模型	61
3.4.7 其他滞回本构模型	65
3.5 钢材双曲面模型的材料参数	67
3.5.1 试验概况	67
3.5.2 试验结果及双曲面模型参数的测定	68
3.5.3 Q345q 钢材的滞回性能	76
3.6 小结	76
参考文献	77
第 4 章 钢桥墩的结构抗震性能	80
4.1 概述	80
4.2 钢桥墩在水平单方向地震作用下的滞回力学性能	80
4.2.1 结构参数及国外钢桥墩抗震性能验算方法	80
4.2.2 圆形桥墩的滞回力学特性	84
4.2.3 矩形桥墩的滞回力学特性	88
4.3 钢桥墩在水平 2 方向地震作用下的滞回力学特性	93
4.3.1 试验研究现状	93
4.3.2 水平 2 方向地震作用下的桥墩抗震性能评价方法	100
4.4 水平 2 方向地震作用下桥墩结构损伤特性数值分析	103
4.4.1 圆形桥墩结构的地震损伤特性及损伤域长度	104
4.4.2 矩形桥墩结构的地震损伤特性及损伤域长度	110
4.5 小结	112
参考文献	112
附录 压缩钢板的宽厚比参数	114
附 4.1 考虑弯曲变形的压缩板平衡方程	114

附 4.2 受压钢板宽厚比参数 R_R 的确定	115
附 4.3 受压钢板宽厚比参数 R_F 的确定	119
第 5 章 钢拱桥弹塑性地震反应分析算例	124
5.1 概述	124
5.2 上承式钢拱桥结构地震反应分析	125
5.2.1 计算模型	125
5.2.2 结构地震损伤特性	126
5.2.3 滞回本构模型对结构地震反应计算结果的影响	130
5.3 中承式钢拱桥结构地震反应分析	132
5.3.1 桥梁概况	132
5.3.2 计算模型	134
5.3.3 结构成桥状态下的自振特性	134
5.3.4 结构弹塑性地震反应计算结果对比	135
5.4 小结	140
参考文献	140
附录 考虑动轴力影响的杆系结构抗震性能验算方法	142
附 5.1 薄壁矩形截面柱的极限压应变	142
附 5.2 结构抗震性能验算方法	144
附 5.3 钢拱桥抗震性能验算方法	144
第 6 章 钢桥超低周疲劳破坏寿命预测	147
6.1 概述	147
6.2 钢材低周疲劳性能试验方法及性能评价	148
6.2.1 试验方法	148
6.2.2 疲劳寿命预测模型	153
6.2.3 疲劳损伤累积计算	160
6.3 Q345 钢材及焊接接头的低周疲劳性能	161
6.4 结构低周疲劳损伤评估方法	167
6.4.1 结构低周疲劳破坏的基本特征	167
6.4.2 桥墩超低周疲劳破坏验算方法	175
6.5 小结	179
参考文献	180
第 7 章 超低周疲劳的损伤力学计算方法基础	183
7.1 概述	183
7.2 超低周疲劳破坏的特征及材料微空穴扩张理论	183
7.2.1 低周和超低周疲劳破坏的特征	183

7.2.2 材料微空穴扩张模型	185
7.3 超低周疲劳破坏评价的 CVGM 模型和 DSPS 模型	187
7.4 GTN 模型和连续损伤力学模型	190
7.4.1 GTN 模型	190
7.4.2 连续损伤力学模型	192
7.5 微观损伤机制计算模型的材料参数标定	195
7.5.1 特征值长度标定	195
7.5.2 VGM 模型及 SMCS 模型的材料参数标定	197
7.5.3 CVGM 模型及 DSPS 模型的材料参数标定	201
7.5.4 GTN 模型的材料参数标定	204
7.5.5 CDM 模型的材料参数标定	205
7.6 微观损伤机制在结构延性断裂评估中的应用	207
7.6.1 微观损伤机制模型预测焊接接头及框架节点的断裂	208
7.6.2 CVGM 模型对钢桥墩墩底超低周疲劳断裂的预测	212
7.7 小结	217
参考文献	218
第 8 章 钢桥结构抗震性能验算	222
8.1 概述	222
8.2 性能设计及钢桥的抗震性能目标	223
8.2.1 性能设计	223
8.2.2 性能目标	224
8.2.3 地震作用	224
8.3 结构地震反应计算方法和计算模型	229
8.3.1 结构地震反应计算方法	229
8.3.2 结构地震反应计算模型	233
8.4 结构抗震性能验算	235
8.4.1 结构需求	235
8.4.2 能力计算	236
8.5 提高钢桥结构抗震性能的措施	241
8.6 小结	242
参考文献	243

第 1 章 钢桥地震破坏形式及结构抗震性能要求

1.1 概 述

近半个世纪以来,交通发展推动了桥梁结构抗震设计方法的进步。从第一部关于桥梁抗震设计标准诞生至今,已形成了独立于建筑结构抗震设计方法的桥梁结构抗震设计体系,该体系既体现了工程结构抗震设计中的共同特点,又反映了桥梁独有的结构动力特性和防灾对桥梁设施的震后功能要求。

受到地震灾害频繁发生的影响,美国和日本在世界上较早地建立了专门用于桥梁结构抗震设计标准体系^[1,2]。经历了 1971 年的圣费南多地震之后,美国加利福尼亚州交通局参照建筑结构抗震设计标准提出了史上第一部适用于桥梁结构抗震设计的标准。1975 年,美国国家公路与运输协会(American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO)以加利福尼亚州交通局的设计标准为基础颁布了桥梁抗震设计的国家标准(即 AASHTO 规范)。1983 年,AASHTO 规范改用美国应用技术协会在 1981 年编制的有关桥梁结构抗震的设计指南作为新的设计标准,第一次将桥梁抗震设计的地震作用分为中小地震和强地震两个级别,提出采用两阶段设计的基本思想,要求桥梁结构具有在中小地震作用下保持弹性,在强地震作用下不发生倒塌破坏的抗震性能,且规定结构的地震损伤部位仅限定于容易检查和容易修复的部位,用单自由度或者多自由度体系的反应谱方法计算结构的地震反应。此后,美国 1989 年发生了里氏 6.9 级的旧金山地震,AASHTO 规范根据桥梁结构的地震破坏特征对抗震设计方法进行了大幅度的修改,提出重视结构动力反应的设计计算方法。该标准对其他各国的桥梁抗震设计规范产生了较大的影响。

在 1964 年新潟地震之前,日本把地震作用等效为静力荷载来计算结构的地震反应;1971 年,日本道路协会颁布了第一部专门针对桥梁结构抗震设计标准,该标准规定了考虑结构动力特性、场地条件的桥梁地震反应计算方法,并提出了相关的结构抗震构造措施;1978 年,因宫城地震中有不少桥墩和支座发生了地震破坏,日本道路协会根据桥梁的地震破坏特征对设计规范相关内容进行了一些修订,强调抗震设计时考虑桥梁结构动力特性的重要性;1980 年,日本道路协会颁布的桥梁抗震设计规范对既有的地震作用计算方法又进行了若干修正;1990 年修订的桥梁抗震设计规范引入了混凝土桥梁采用两阶段抗震设防的设计方法;由于在 1995

年阪神大地震中桥梁发生了严重的地震破坏,日本道路协会结合地震破坏特征对桥梁抗震设计规范进行了大幅度的修改,全面引入了两阶段设计、多水准设防的结构抗震设计理念,强调进行弹塑性地震反应计算的重要性,并积极推行减震、隔震的结构抗震设计方法,首次规定了在小概率的强地震作用下钢桥也应进行弹塑性损伤验算的抗震设计要求。这部规范的实施对普及动力地震反应计算以及重视结构延性的抗震设计理念起到了推动作用。此外,该规范提出桥梁应具备能抵抗类似于阪神大地震中记录的近场地震作用的抗震性能要求^[1,3,4],以反映近场地震对结构的破坏作用。

1976年唐山大地震以后,我国开始重视桥梁结构的抗震设计理论研究,1977年颁布了《公路工程抗震设计规范(试行)》,1987年、1989年又分别颁布了《铁路工程抗震设计规范》(GBJ 111—1987)和《公路工程抗震设计规范》(JTJ 004—1989)。经历2008年汶川大地震以后,借鉴国外桥梁抗震设计经验对铁路和公路桥梁的抗震设计方法进行了一次较大的修订,引入了两阶段设计的抗震设计理念,要求桥梁结构受到发生频率较高的中小地震作用时不出现损伤,在发生频率较低的强地震作用下允许桥梁出现局部损伤,但地震损伤程度限定在不经修复或经过抢修可以恢复一定通行能力的程度。2012年颁布的《城市桥梁抗震设计规范》(CJJ 166—2011)也采用了两阶段设计的抗震设计理念,规定了城市桥梁应具备的结构抗震性能。

多水准设防的桥梁抗震设计方法允许结构受到发生频率低、重现期长的罕遇地震作用时可以出现一定程度的损伤。因此,在进行结构抗震设计时除了按弹性理论验算结构承载能力外,还需要进行结构弹塑性地震反应计算和结构损伤程度验算,弹塑性地震反应计算模型、计算方法、损伤评价标准是影响抗震设计结果的重要因素。迄今,国内外学者对混凝土桥梁的结构地震破坏形式、弹塑性地震反应计算模型和计算方法、极限状态和损伤指标评价等一系列问题进行了大量研究,已基本形成了较为完整的计算方法和验算标准,研究成果在各国的抗震设计规范和标准中得到了体现。与混凝土结构相比,钢结构在过去的地震中损伤程度较轻,人们对这类结构在罕遇地震作用下的计算方法以及性能要求缺乏系统研究。在1994年的美国北桥地震和1995年的日本阪神大地震中,大量钢结构发生了失稳以及超低周疲劳破坏等事先没有预料到的地震破坏形式,此后人们开始系统研究钢桥结构抗震设计方法,开展了大量的基础性研究,逐渐形成了适用于钢桥结构抗震设计的基本体系^[5]。目前,一些国家已把钢桥在罕遇地震作用下的抗震设计方法纳入设计规范,但我国现行的桥梁抗震设计规范对钢桥的弹塑性地震反应计算以及抗震性能要求还没有具体的规定,主要依靠设计人员的自行判断,多采用弹性理论设计。

近年来,我国的钢产量得到了迅速发展,粗钢产量已经占了全世界总产量的一

半以上,钢材价格的相对下降和劳动力成本的提高导致钢桥的经济竞争力上升。特别是在施工条件受到限制、工期紧的桥梁工程中,采用钢桥不但不会显著增加材料的成本,同时还会因为施工时间缩短、工厂化施工、基础工程减小、跨越能力强等有利因素使得钢桥成为优选方案。

钢桥的地震破坏特征与混凝土桥梁有非常大的差异,钢板的局部变形及局部失稳、超低周疲劳破坏是钢桥地震破坏的重要特征。尽管钢材是一种力学性能稳定的均质材料,但是模拟钢板局部失稳和超低周疲劳破坏的结构弹塑性地震反应计算分析以及确定合理的结构极限状态并不容易。因此,适用于混凝土结构的弹塑性地震反应计算方法、验算指标不能直接套用到钢桥结构的抗震设计。

本书基于上述背景,根据作者所在课题组的研究工作以及国内外相关的文献资料,阐述钢桥弹塑性地震反应计算方法以及损伤评价方法。本书主要内容包括材料滞回本构模型、结构计算模型、钢桥墩和钢拱桥地震损伤特性、钢材的超低周疲劳性能及设计方法五个方面。为了使内容具有一定的系统性,第2章和第3章简单介绍桥梁抗震设防的目标、地震作用及钢桥地震反应计算实例等方面的内容,为钢桥在强地震作用下的结构抗震设计提供参考。

1.2 钢桥结构地震损伤形式

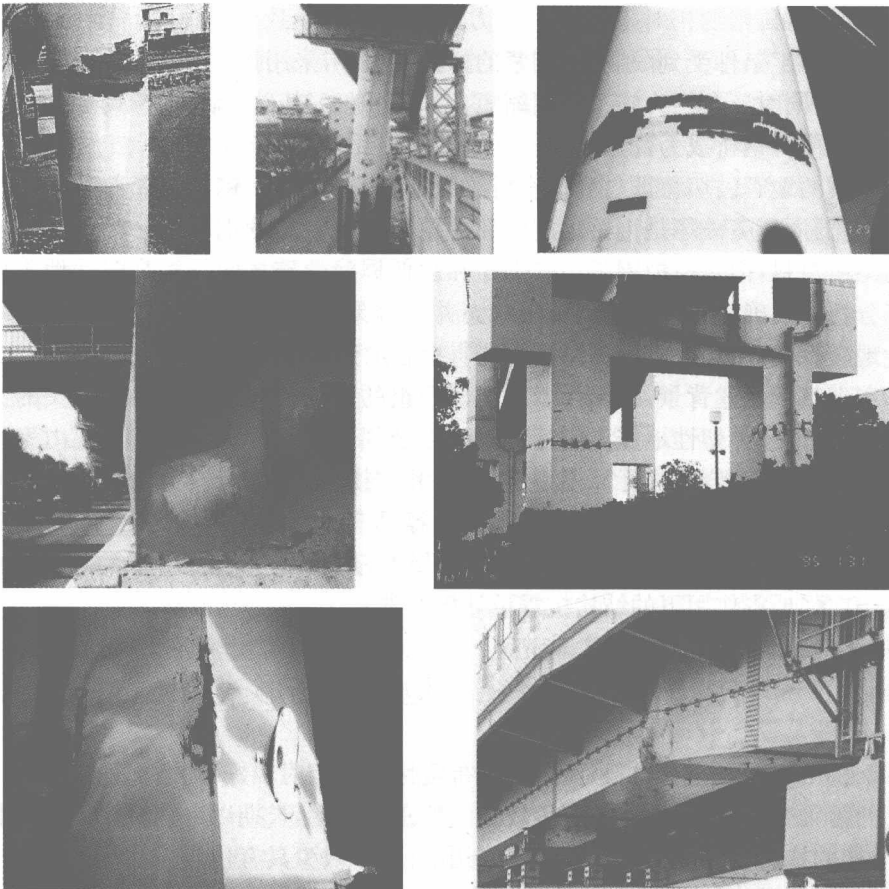
钢桥由于质量轻和材料延性好,其抗震性能也相对较好,在历史地震中除了较常见的落梁破坏外,结构破坏程度较轻。特别是我国,长期以来钢桥建设数量非常少,结构的抗震性能尚未受到强地震作用的检验,缺少具有代表性的钢桥抗震性能资料。以下根据国外的一些灾害资料介绍钢桥的地震损伤形式。

1995年1月17日,发生在日本兵库县南部的阪神大地震震级为里氏7.3级,震源深度为16km,震源位置靠近大阪和神户。地震中半数以上的钢桥墩出现了不同程度的损伤,其中有4%左右的桥梁发生倒塌或者致命破坏,10%左右的桥梁发生严重损伤^[6]。这次地震灾害表明,近场地震对钢桥具有强大的破坏作用。

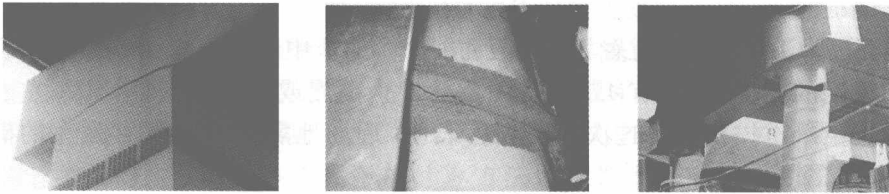
根据日本阪神大地震的灾害调查报告以及相关试验研究结果^[6-11],钢桥在地震中除了落梁破坏外,主要有图1.1所示的几种破坏形式:

- (1) 钢板在压缩或剪切荷载下发生局部失稳。
- (2) 构件整体发生失稳。
- (3) 在节点、焊接部位附近钢材发生超低周疲劳破坏。
- (4) 支座、螺栓及连梁装置的连接板因抗拉强度不足发生断裂破坏。

在上述地震破坏中,结构失稳和支座等拉伸断裂是地震中较常见的损伤形式,但超低周疲劳破坏是过去地震中极为罕见的损伤形式。



(a) 整体及局部失稳



(b) 柱端开裂以及脆性断裂



(c) 连梁装置连接板拉断或锚栓拉伸破坏等

图 1.1 钢桥地震破坏实例

2011年3月11日,在日本东北地区发生了里氏9.0级的大地震。地震的震中位置为北纬 38.1° 、东经 142.9° ,震源深度为24km,有18个地震观测点观测到的最大加速度超过 $1.0g$,筑馆观测点的三方向合成最大加速度达到 $2.7g$ 。根据地震灾害调查发现,尽管这次地震的震级非常大,由于地震动的卓越周期分布在 $0.1\sim 0.5s$,属于短周期卓越的地震运动,土木设施在地震作用下直接发生的破坏程度并不严重。但是,地震引起的海啸却导致大量桥梁支座及伸缩缝损坏,特别是钢支座地震损伤尤为显著。在这次地震中,有一座下承式钢桁架拱桥的弦杆横向支撑发生压屈失稳及节点板破坏(图1.2(a)),并有一座钢桁架桥梁在连接防落桥装置的节点板处发生拉裂、局部失稳破坏(图1.2(b))。此外,部分钢桥在端部发生构件失稳、节点板破坏及焊接部位开裂等形式的地震破坏(图1.2(c)和(d))^[12]。

根据上述地震中钢桥的破坏情况,结构抗震设计需要强度验算的内容至少应包括以下几个方面:

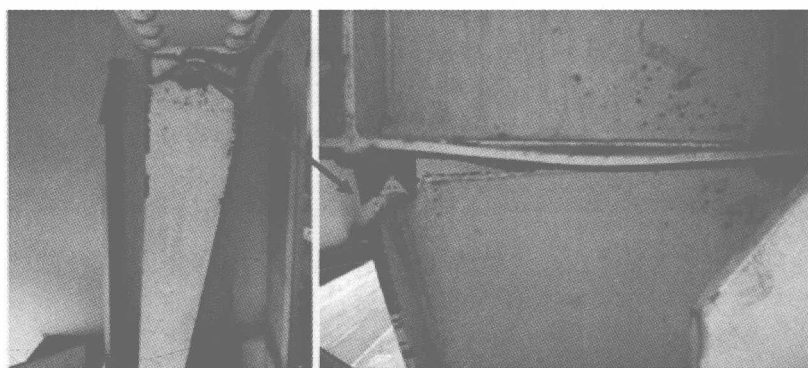
- (1) 支座、连接板等受拉部位的结构强度验算,包括母材及焊缝强度。
- (2) 钢板的局部稳定性及结构构件的整体稳定性。
- (3) 节点(特别是焊接接头)附近应力集中部位的超低周疲劳破坏性能。



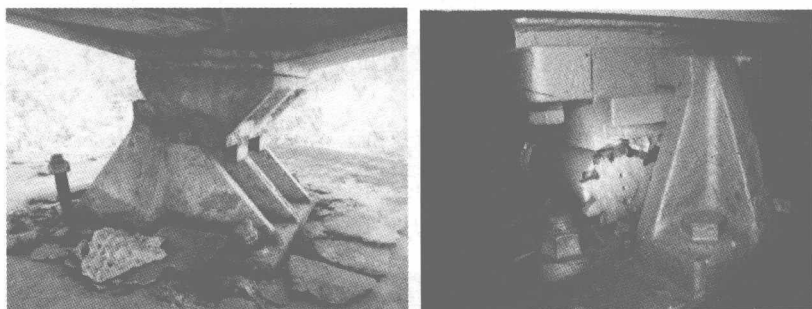
(a) 拱桥横向支撑压屈、节点板破坏



(b) 桁架桥弦杆拉伸开裂、节点板破坏



(c) 加劲肋焊缝开裂



(d) 铰支座及滚轴支座地震损伤

图 1.2 钢拱桥以及钢桁架桥地震破坏

此外,地震后的残余变形是影响结构地震后通行性能和可修复性能的重要因素,但这些损伤一般伴随着结构失稳、构件破断等其他形式的地震损伤而出现,因此当结构的上述强度得到保证时,残余变形一般也能得到控制。

1.3 桥梁结构抗震设防目标

桥梁作为重要的交通基础设施,具有建设成本高、地震后通行安全性判断困难及修复时间长的特点。因此,桥梁地震破坏不仅造成巨额的直接经济损失,同时还会因道路中断影响救灾工作的速度及灾后的恢复时间。为此,桥梁抗震设计的目标是控制结构地震损伤程度,满足震后的紧急使用要求和可修复性。抗震设计则是根据结构的震后性能要求,在确定的设计条件下提出经济、可靠的技术措施,并通过有效的手段进行性能检验的过程。

结构抗震性能要求,即抗震设防标准与外力作用及结构重要性有关,因此常用性能表格的形式表示^[5]。作为一例,表 1.1 为用表格形式表示的桥梁结构抗震性能要求,表中的行表示抗震性能要求的等级,列表示地震作用的强度,其中的元素

表示对应的桥梁类型。如表所示,结构抗震性能要求划分的主要根依据是地震作用强度和结构重要性,结构受到较小的地震作用时其使用性能不能受到影响,重要桥梁即使在强地震作用下也不应出现影响震后使用的地震损伤。

表 1.1 桥梁结构抗震性能要求一例

地震 强度	抗震性能要求			
	无损伤	轻微损伤	中等损伤	严重损伤
	可直接使用	不经修复或者简单抢修后可紧急使用	经过抢修可紧急使用	不倒塌
小震	所有桥梁	—	—	—
中震	甲~丙类桥梁	丁类桥梁	—	—
大震	甲类桥梁	乙类桥梁	丙类桥梁	丁类桥梁

对于表 1.1 中的地震作用强度,我国《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)^[13]根据重现期不同将地震划分为如下三个等级。

- (1) 小震:本地区 50 年超越概率 63% 的地震,即 50 年一遇的地震。
- (2) 中震:本地区 50 年超越概率 10% 的地震,即大约 475 年一遇的地震。
- (3) 大震:本地区 50 年超越概率 2%~3% 的地震,即 1600~2400 年一遇的地震。

其中,中震为本地区的设计地震基本烈度。我国现行抗震设计规范以地震动区划图的形式规定了各地区的基本烈度。在 6 度(地震动峰值加速度为 0.05g)及以下的地区需要进行抗震设计,而 6 度以下的地区不需要抗震设计。

表 1.1 中的结构重要性等级(甲至丁类)主要根据设施遭受地震破坏时的经济损失、社会影响及其设施对抗震救灾的作用进行划分。我国现行《建筑工程抗震设防分类标准》(GB 50223—2008)^[14]把工程结构物的重要性分为以下 4 个类别。

(1) 特殊设防类(甲类):涉及国家公共安全的重大工程、地震时可能发生严重次生灾害等特别重大灾害后果的工程。这类工程抗震设防采用的地震作用应高于本地区抗震设防烈度的要求,其值按批准的地震安全性评价结果决定。

(2) 重点设防类(乙类):地震中功能不能中断或者需要尽快恢复的生命线工程,以及地震时可能导致大量人员伤亡等重大灾害后果的工程。这类工程抗震设防采用的地震作用符合本地区抗震设防烈度的要求,抗震措施应高于本地区基本烈度的要求。

(3) 标准设防类(丙类):一般工程,除甲类、乙类、丁类以外的工程设施。这类工程抗震设防采用的地震作用和抗震措施符合本地区抗震设防烈度的要求。

(4) 适度设防类(丁类):使用上人员稀少且地震破坏不致产生次生灾害的工程(仓库等)。这类工程抗震设防采用的地震作用符合本地区抗震设防烈度的要

求,抗震措施可低于本地区基本烈度的要求(适当降低),但抗震设防烈度为 6 度时不应降低。

《公路桥梁抗震设计细则》(JTG/T B02-01—2008)^[15]把公路桥梁的重要性划分为 A~D,而《城市桥梁抗震设计规范》(CJJ 166—2001)^[16]用甲~丁表示结构重要性分类。由于公路桥梁和城市桥梁所承担的功能有所差异,重要性划分方式也不完全相同。表 1.2 为公路桥梁以及城市桥梁的重要性分类规定。

表 1.2 桥梁重要性分类

重要性分类	公路桥梁	城市桥梁
甲(A)	单跨跨径超过 150m 的特大桥	悬索桥、斜拉桥及大跨度拱桥
乙(B)	单跨跨径不超过 150m 的高速公路、一级公路上的桥梁,单跨跨径不超过 150m 的二级公路上的特大桥、大桥	除甲类桥梁以外的交通网络中枢纽位置的桥梁和城市快速路上的桥梁
丙(C)	二级公路上的中桥、小桥,单跨跨径不超过 150m 的三、四级公路上的特大桥、大桥	城市主干路、轨道交通桥梁
丁(D)	三、四级公路上的中桥、小桥	除甲、乙和丙三类桥梁以外的其他桥梁

桥梁结构抗震设防的性能目标是通过设计使结构能达到的抗震性能,一般用震后的使用性和可修复性来衡量。我国《城市桥梁抗震设计规范》规定的性能目标如表 1.3 所示,地震作用考虑 E1、E2 两个等级,相当于中震和大震两个级别。在 E1 地震作用下结构基本处于弹性阶段,在 E2 地震作用下重要桥梁处于弹性阶段,其他桥梁可以进入损伤状态。另外,公路桥梁的抗震设防目标与城市桥梁基本一致。

表 1.3 城市桥梁抗震设防目标

桥梁类别	E1 地震作用		E2 地震作用	
	震后使用要求	损伤状态	震后使用要求	损伤状态
甲	立即使用	结构总体反应在弹性范围,基本无损伤	不需修复或经简单修复可继续使用	轻微损坏
乙	立即使用	结构总体反应在弹性范围,基本无损伤	经抢修可恢复使用,永久性修复后恢复正常运营功能	有限损伤
丙	立即使用	结构总体反应在弹性范围,基本无损伤	经临时加固,可供紧急救援车辆使用	不产生严重的结构损伤
丁	立即使用	结构总体反应在弹性范围,基本无损伤	—	不致倒塌