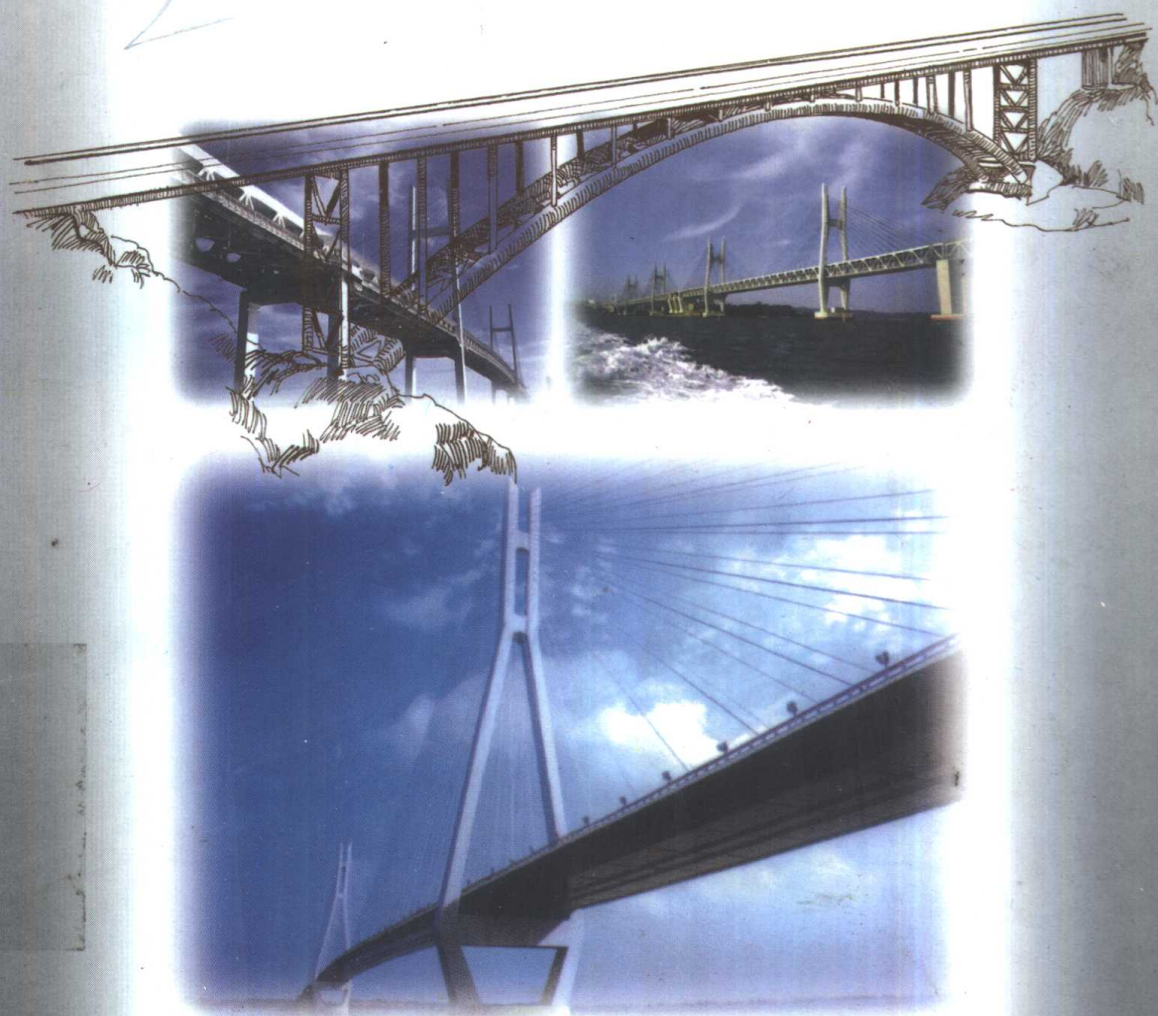




“桥梁抗震设计理论及应用”丛书之一

大跨度桥梁抗震设计

范立础 胡世德 叶爱君 著



人民交通出版社

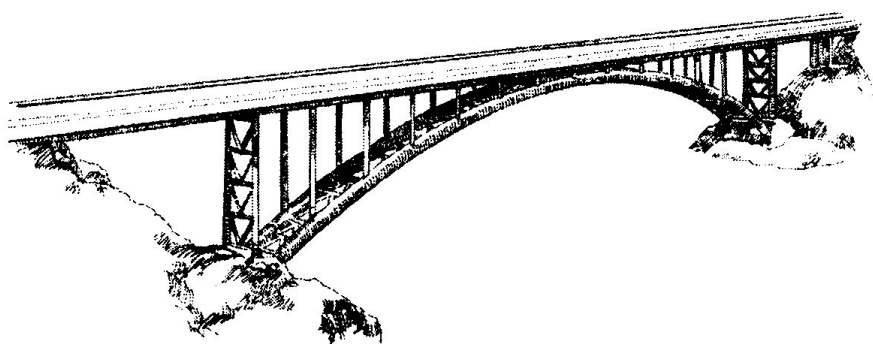


“桥梁抗震设计理论及应用”丛书之一

Dakuadu Qiaoliang Kangzhen Sheji

大跨度桥梁抗震设计

范立础 胡世德 叶爱君 著



人民交通出版社

内 容 提 要

大跨度桥梁的抗震设计目前还没有一个统一的标准。本书论述了大跨度桥梁抗震设计的基本思想、实用理论及方法,并进一步通过实例详细论述了大跨度梁桥、拱桥、斜拉桥和悬索桥的抗震设计过程。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》的理论背景材料之一。

本书可供从事大跨度桥梁抗震设计、研究和施工的工程技术人员参考,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

大跨度桥梁抗震设计/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

大跨度桥梁抗震设计

范立础 胡世德 叶爱君 著

正文设计: 于静红 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 010-64216602)

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: 8.5 字数: 228 千

2001 年 5 月 第 1 版

2001 年 5 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 · 02829

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行出版,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 引言	1
1.2 大跨度桥梁抗震设计现状	3
1.3 桥梁震害分析	4
1.4 大跨度桥梁抗震设计实用方法	7
1.5 大跨度桥梁地震反应分析	8
1.5.1 结构抗震动力学初步概念	8
1.5.2 结构地震反应分析方法	12
1.5.3 地震动输入	16
1.5.4 非线性问题	18
1.5.5 阻尼问题	24
1.5.6 地基与结构相互作用	26
1.5.7 桥梁地震反应分析程序	29
1.6 桥梁延性抗震设计及验算	30
1.7 桥梁减、隔震设计	32
参考文献	35
第二章 大跨度桥梁抗震设计实用方法	43
2.1 概述	43
2.2 桥梁抗震概念设计	44
2.3 桥梁延性抗震设计	48
2.3.1 塑性铰区横向钢筋设计	48
2.3.2 桥梁结构抗震能力分析、验算	49

2.4	桥梁减、隔震设计	55
2.5	大跨度桥梁抗震设计的辅助工具	56
	参考文献	58
第三章	地震动输入	60
3.1	概述	60
3.2	抗震设防目标	61
3.3	输入加速度时程	63
3.3.1	地震动加速度时程的选择	63
3.3.2	地震危险性分析和人工地震加速度时程生成方法	66
3.4	地震动输入模式	75
	参考文献	76
第四章	大跨度桥梁地震反应分析	77
4.1	概述	77
4.2	多点激励下的增量动力平衡方程	79
4.3	各种非线性问题及其分析方法	82
4.3.1	钢筋混凝土弹塑性梁柱单元	82
4.3.2	非线性支座单元	89
4.3.3	非线性挡块单元	96
4.4	非比例阻尼矩阵的形成	98
4.5	逐步积分法求解运动方程	100
4.6	多方向一致激励下的线性反应谱分析	102
	参考文献	105
第五章	桥梁结构抗震能力验算	107
5.1	概述	107
5.2	钢筋混凝土墩柱的抗弯能力验算	108
5.2.1	钢筋混凝土墩柱截面的强度和曲率延性计算 ..	109

5.2.2 墩柱容许的最大塑性转角	115
5.3 钢筋混凝土墩柱的抗剪能力验算	116
5.3.1 墩柱的抗剪强度	117
5.3.2 墩柱的抗剪验算	120
5.4 支座等支承连接构件的抗震验算	121
参考文献	122
第六章 桥梁结构地震反应分析程序	124
6.1 IPSABS 程序及其功能	124
6.2 IPSABS 程序的应用	126
参考文献	128
第七章 大跨度梁桥抗震设计	129
7.1 概述	129
7.2 南澳大桥抗震设计实例简介	130
7.2.1 动力计算模型	130
7.2.2 地震动输入	132
7.2.3 抗震概念设计	135
7.2.4 延性抗震设计	136
参考文献	140
第八章 大跨度拱桥的抗震设计	142
8.1 概述	142
8.2 丫髻沙特大拱桥抗震设计实例简介	144
8.2.1 地震动输入	146
8.2.2 动力计算模型	148
8.2.3 动力特性分析	149
8.2.4 地震反应分析	154
8.2.5 抗震验算	164
参考文献	167

第九章 斜拉桥抗震设计	168
9.1 概述	168
9.2 斜拉桥抗震概念设计	171
9.2.1 双塔斜拉桥方案的结构体系比选	171
9.2.2 三塔斜拉桥方案的结构体系比选	177
9.2.3 斜拉桥锚固墩、辅助墩抗震概念设计	188
9.3 南京长江二桥南汊主桥抗震设计实例简介	193
9.3.1 地震动输入	193
9.3.2 动力计算模型	197
9.3.3 动力特性分析	197
9.3.4 地震反应分析及抗震验算	204
参考文献	211
第十章 悬索桥抗震设计	213
10.1 概述	213
10.2 江苏润扬悬索桥抗震设计实例简介	216
10.2.1 地震动输入	216
10.2.2 动力计算模型	220
10.2.3 动力特性分析	225
10.2.4 方案设计阶段抗震性能初步评估	232
10.2.5 技术设计阶段抗震能力检算	235
参考文献	238
附录 桥梁动力特性汇编	240

第一章 概 论

1.1 引 言

地震,历来是严重危害人类的一大自然灾害。尤其是最近的20余年,全球发生了许多次大地震,其中多次破坏性地震都集中在城市,造成了非常惨重的生命财产损失,如1971年美国 San Fernando 地震(M6.6),1976年中国唐山大地震(M7.8),1989年美国 Loma Prieta 地震(M7.0),1994年美国 Northridge 地震(M6.7)以及1995年日本阪神大地震(M7.2)导致的城市经济总损失(以当时的币值为准)分别为:10亿美元,100亿人民币,70亿美元,200亿美元,1000亿美元。这几次地震灾害的共同特点是:由于桥梁工程遭到严重破坏,切断了震区交通生命线,造成救灾工作的巨大困难,使次生灾害加重,导致了巨大的经济损失。随着现代化城市人口的大量聚集和经济的高速发展,对交通线的依赖性越来越强,而一旦地震使交通线遭到破坏,可能导致的生命财产以及间接经济损失也将会越来越巨大。几次大地震一再显示了桥梁工程破坏的严重后果,也一再显示了桥梁工程抗震研究的重要性。在最近几次大地震中,一些所谓经过抗震设计的桥梁,在中等强度的地震作用下即遭到严重破坏,反映出以往的桥梁抗震设计规范存在着很大缺陷。因此,全世界的地震工作者纷纷对现行的抗震设计规范进行反省和修订,对结构的抗震设防标准与抗震设计原则也提出了一系列新观点。



我国是一个多地震的国家,自唐山地震以来,抗震防灾工作正日益受到重视。随着我国经济实力的增强和交通发展的需要,继上海南浦大桥、杨浦大桥、徐浦大桥、广东虎门大桥、江阴长江大桥、南京二桥、青州闽江大桥等大跨越江工程之后,又开始兴建润扬长江大桥,规划苏通长江大桥以及其他跨海工程,如长江口、渤海湾口工程。在这些特大型工程纷纷上马的同时,地震灾害近几年也在我国东北、西南和西北部频频发生。据专家们预测,我国正面临一个新的地震活跃期。尽管到目前为止,大跨度桥梁因地震毁坏并不多见,但是鉴于它们在经济、交通等各方面占据的特殊重要的地位,以及 20 世纪出现的几次惨重的地震灾害的教训,对这些重大工程,必须进行合理的抗震设防。我国已颁布了《中华人民共和国防震减灾法》,自 1998 年 3 月 1 日起施行。《防震减灾法》第十七条规定“新建、扩建、改建建设工程,必须达到抗震设防要求。重大建设工程和可能发生严重次生灾害的建设工程,必须进行地震安全性评价;并根据地震安全性评价的结果,确定抗震设防要求进行抗震设防。本法所称重大建设工程,是指对社会有重大价值或者有重大影响的工程”。第十九条规定,“建设工程必须按照抗震设防要求和抗震设计规范进行抗震设计,并按照抗震设计进行施工”。显然,要保证《防震减灾法》的有效实施,前提是要有完备的抗震设计规范。

目前,我国的桥梁抗震设计规范还很不完备。城市桥梁抗震设计没有专用规范,只能参考公路工程抗震设计规范进行。而我国现行的铁路、公路工程抗震设计规范基本上还是采用“强度设防”的概念,在延性抗震和减、隔震方面极为不足。几年前,范立础教授就已充分认识到修订桥梁抗震设计规范的迫切性,并注意到处城市桥梁的地震反应有独特之处,提出了制定“城市桥梁抗震设计规范”的建议。1998 年,范立础教授正式开始主持“城市桥梁抗震



设计规范”的制订工作。“城市桥梁抗震设计规范”的组成部分之一,也是难点之一,是“大跨度桥梁的抗震设计”。本书就是为了配合这一规范的制定而著的。

本章将在分析大跨度桥梁抗震设计现状的基础上,简述大跨度桥梁抗震设计的相关问题,力求使读者对大跨度桥梁的抗震设计有一个初略的了解。要进行正确有效的抗震设计,必须从分析桥梁的震害入手,提出一个大跨度桥梁抗震设计的实用方法,并逐一解决地震输入,地震反应分析,延性设计及验算,以及减、隔震设计等问题。

1.2 大跨度桥梁抗震设计现状

目前,国内外现有的绝大多数桥梁工程抗震设计规范只适用于中等跨径的普通桥梁,超过适用范围的大跨度桥梁的抗震设计,则无规范可循。我国公路工程抗震设计规范只适用于主跨不超过 150m 的梁桥和拱桥;我国铁路工程抗震设计规范虽没有说明跨径范围,但说明“对特殊抗震要求的建筑物和新型结构应进行专门研究设计”。1996 年美国颁布的 AASHTO 规范(第 16 版)的抗震设计篇中也规定,该规范只适用于普通钢、混凝土梁与箱梁桥,主跨不超过 150m,不适用于斜拉桥、悬索桥、拱桥以及活动式桥。1993 年的欧洲规范(EUROCODE 8)原稿中没有规定主跨范围,可适用于梁桥和斜拉桥,但拱桥和悬索桥除外。日本道路桥梁规范(抗震设计篇)“适用于跨径小于 200m 的桥梁,对超过 200m 跨径的桥梁可以参考使用本篇有关规定”。

对于大跨度桥梁的抗震设计,国内外已经进行了很多研究。日本在建设本州四国连络线时,花了近 20 年时间进行了悬索桥的抗震设计研究,汇编成《本州四国连络桥设计标准·及解说》;美国



土木工程学会斜拉桥委员会在 90 年代编制了斜拉桥设计指南,其中有斜拉桥抗震设计的若干规定,但这些规定都较粗浅,工程师们很难参照执行。在国内,虽然长期以来没有一个适用于大跨度桥梁的抗震设计规范或指南,但同济大学范立础教授领导的抗震学科组 10 余年来一直致力于大跨度桥梁的抗震设计研究,承担了我国近 30 座大桥的抗震研究工作,取得了很多科研成果。总而言之,大跨度桥梁的抗震设计目前还没有一个统一标准。

与中等跨径普通桥梁相比,大跨度桥梁的地震反应比较复杂,相应地,抗震设计也比较复杂。如高阶振型的影响比较明显,以及需要考虑多点激振和行波效应、各种复杂的非线性因素、桩—土—结构相互作用等。而另一方面,又没有可遵循的抗震设计规范。因此,大跨度桥梁的抗震设计目前还比较困难。由于国内大部分设计单位对桥梁抗震缺乏研究,只能请专业研究人员代劳,因此,从某种意义上来说,大跨度桥梁的抗震设计目前还是专业科研人员的“专利”,这是很不正常的。由于工程项目建设期短,而专业科研人员又不能参与设计,尤其是对桥梁抗震性能起决定作用的方案设计,只能被动地进行桥梁结构在地震作用下的强度变形验算,因而不能将先进的抗震设计思想充分应用于抗震设计,影响抗震设计的效果。只有工程师们亲自参与抗震设计,才能将抗震设计融入桥梁设计的各个阶段,达到预期的抗震设计效果。这才是真正的抗震设计。

1.3 桥梁震害分析

调查与分析桥梁的震害及其产生的原因是建立正确的抗震设计方法,采取有效抗震措施的科学依据。国内外地震工作者历来都很重视震害的调查研究。近 20 余年发生的几次大地震使桥梁



结构遭到严重破坏,但也使我们获得了非常宝贵的经验与教训。

国内外学者对桥梁震害的调查研究结果表明,桥梁的震害主要表现为:

● 上部结构的破坏:桥梁上部结构本身遭受震害而被毁坏的情形比较少见,往往是由于桥梁结构其他部位的毁坏而导致上部结构的破坏;

● 支承连接部位的震害:桥梁支承连接部位的震害极为常见。由于支承连接部位的破坏会引起力的传递方式的变化,从而对结构其他部位的抗震产生影响,进一步加重震害。在我国海城、唐山地震中,就有不少支座破坏以及连接措施不当引起落梁的例子。

● 下部结构和基础的震害:下部结构和基础的严重破坏是引起桥梁倒塌,并在震后难以修复使用的主要原因。除了地基毁坏的情况,桥梁墩台和基础的震害是由于受到较大的水平地震力,瞬时反复振动在相对薄弱的截面产生破坏而引起的。从大量震害实例来看,比较高柔的桥墩多为弯曲型破坏,矮粗的桥墩多为剪切型,介于两者之间的则为混合型。在 1995 年的阪神地震中,阪神高速线在神户市内的高架桥共有 18 个独柱墩剪断,长 500m 左右的梁侧向倾倒。

特别值得注意的是,在最近的几次大地震中,历来声誉较好的大跨度桥梁也有不少遭受震害的实例,主要表现为边跨脱落、支承系统以及细部结构的破坏。在 1989 年美国 Loma Prieta 地震中,奥克兰海湾大桥引桥公路桥面脱落。在 1995 年阪神地震中,位于震区的四座大跨度桥梁也发生了不同程度的震害。其中,西宫港大桥(主跨 252m 的钢系杆拱桥)第一跨引桥脱落,一座主跨 485m 的双层桥面斜拉桥边跨锚墩上的钢摇轴栓钉脱落,另一座主跨 214m 的钢拱桥发生铸钢支座移位损坏和拱上风撑屈曲破坏,而主跨