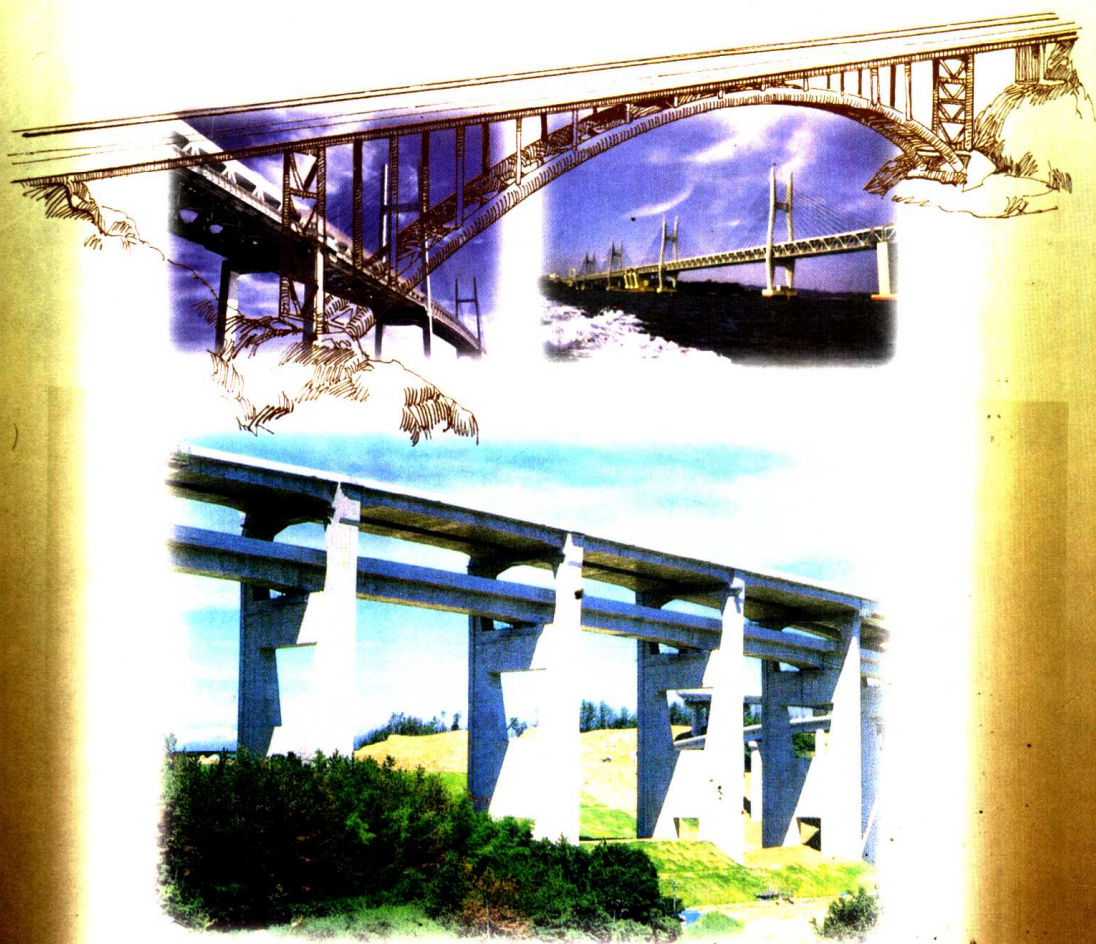




“桥梁抗震设计理论及应用”丛书之三

高架桥梁抗震设计

范立础 李建中 王君杰 著



人民交通出版社

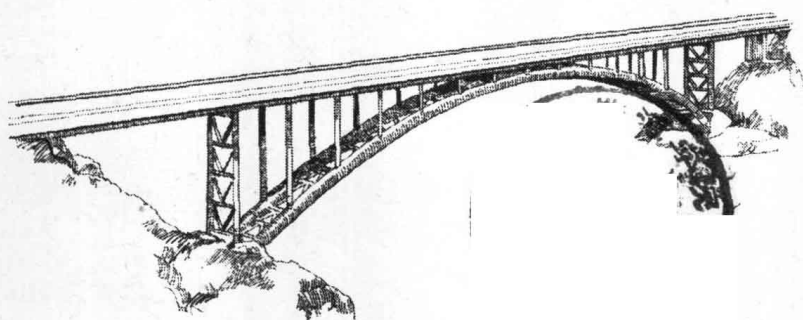


“桥梁抗震设计理论及应用”丛书之三

Gaojia Qiaoliang Kangzhen Sheji

高架桥梁抗震设计

范立础 李建中 王君杰 著



人民交通出版社

内 容 提 要

本书论述了城市高架桥梁抗震设计、评估及加固的基本概念、理论和方法。其中,重点介绍了双层高架的抗震设计方法和能力设计原则。本书介绍的内容,为作者近年来在该领域的研究成果,也是作者正在编写的《城市桥梁抗震设计规范》的理论背景材料之一。

本书可供从事抗震工程设计、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

高架桥梁抗震设计/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

高架桥梁抗震设计

范立础 李建中 王君杰 著

正文设计:王静红 责任校对:张莹 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:10.25 字数:275 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·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(性能、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 引言	1
1.1 公路和城市高架桥震害现象与教训	1
1.2 双层高架桥震害与教训	5
1.3 桥梁抗震性能的评估与加固技术研究概况	9
1.3.1 桥梁抗震性能评估及分析方法	10
1.3.2 桥梁结构抗震加固技术的研究	13
参考文献	15
第二章 高架桥抗震设计基本原则与方法	18
2.1 抗震设防原则	18
2.2 能力设计原则	19
2.3 抗震设计方法	22
参考文献	25
第三章 地震反应分析	26
3.1 概述	26
3.2 动力分析模式	27
3.2.1 轨道结构体系计算模式	27
3.2.2 板式橡胶支座、滑板支座恢复力模型	32
3.2.3 空间混凝土梁柱弹塑性单元	34
3.2.4 桩-土共同作用	36
3.2.5 后继结构及车辆荷载影响	37
3.3 反应谱方法	38
3.3.1 规范反应谱	38

3.3.2	多模态反应谱分析	41
3.3.3	反应谱组合	43
3.4	非线性地震时程反应分析	44
3.4.1	非线性因素	44
3.4.2	地面运动输入	44
3.5	地震荷载的组合	45
	参考文献	46
第四章	抗震检算	48
4.1	概述	48
4.2	墩柱的抗弯强度检算	49
4.3	墩柱塑性铰区域的转动能力与检算	49
4.3.1	无约束混凝土的应力 - 应变曲线	49
4.3.2	约束混凝土的应力 - 应变曲线	50
4.3.3	钢筋的应力 - 应变关系	55
4.3.4	钢筋混凝土截面的轴力 - 弯矩 - 曲率分析	56
4.3.5	立柱极限转动能力检算	59
4.4	支座检算	61
4.4.1	板式橡胶支座	61
4.4.2	盆式支座	61
	参考文献	62
第五章	能力保护构件的设计计算	63
5.1	概述	63
5.2	墩柱抗弯超强系数	64
5.3	立柱抗剪计算	65
5.3.1	墩柱剪力设计值	65
5.3.2	墩柱抗剪能力	66
5.3.3	墩柱抗剪强度检算	68

5.4 上下横梁设计	68
5.4.1 横梁弯矩设计值	69
5.4.2 横梁的设计剪力	70
5.4.3 横梁检算	71
5.5 基础的计算	71
参考文献	72
第六章 结构构造与抗震措施	74
6.1 墩柱结构构造措施	74
6.1.1 墩柱横向钢筋构造措施	74
6.1.2 立柱纵向钢筋构造措施	78
6.2 节点结构构造措施	79
6.2.1 节点的主拉应力和主压应力	80
6.2.2 节点中钢筋的配置	81
参考文献	83
第七章 双层高架桥抗震分析实例	84
7.1 概述	84
7.2 抗震设防标准及人工地震波的选用	84
7.3 动力特性分析	89
7.3.1 动力计算模式	89
7.3.2 动力特性分析	91
7.4 双层高架桥抗震分析结果	97
7.4.1 立柱截面的屈服强度及极限转动能力	97
7.4.2 多遇地震作用下分析结果	98
7.4.3 设计地震烈度作用下分析结果	100
7.4.4 罕遇地震作用下结构的地震反应分析结果	100
7.4.5 能力保护构件的计算	102
7.5 讨论	106

参考文献	109
第八章 钢筋混凝土高架桥横向抗震性能评估方法	110
8.1 桥梁抗震性能评估极限状态	110
8.2 塑性倒塌分析方法	112
8.2.1 桥墩的荷载—变形曲线	112
8.2.2 结构塑性倒塌分析	114
8.2.3 等效弹性地震荷载的修正	121
8.3 桥墩抗剪性能的评估	121
8.4 钢筋混凝土桥梁塑性倒塌分析实例	125
8.4.1 概述	125
8.4.2 抗震性能评估	126
8.4.3 墩底主筋锚固性能评估	131
8.4.4 考虑桩基性能时结构的抗震性能评估	132
参考文献	136
第九章 加固钢筋混凝土墩柱的抗震性能研究	138
9.1 墩柱加固技术	139
9.2 采用四种方法加固的混凝土桥墩抗震性能研究	142
9.2.1 加固试验的墩柱模型	142
9.2.2 桥墩模型加固	144
9.2.3 加固墩柱模型的破坏状态	146
9.2.4 试验结论	152
9.3 FRP 约束混凝土墩柱的抗震性能研究	153
9.3.1 FRP 材料的特点	153
9.3.2 国内外研究和应用概况	155
9.4 GFRP 管套箍钢筋混凝土墩柱的抗震性能	159
9.4.1 地震模拟振动台试验	159
9.4.2 周期反复荷载试验	188

9.4.3 结论	192
9.5 CFRP 修复的钢筋混凝土墩柱的延性性能	192
9.5.1 概述	192
9.5.2 试验模型概况	194
9.5.3 CFRP 布材缠绕粘贴工艺	195
9.5.4 试验概况	196
9.5.5 试验结果分析	196
9.5.6 试验结论	203
9.6 作者对研究结果的展望	205
参考文献	206
附录 A 双层高架桥梁抗震设计指南	210
附录 B 各国桥梁抗震设计规范的比较	230
附录 C 1995 阪神大地震后日本桥梁抗震研究动向及 抗震设计规范的改订	294

第一章 引言

1.1 公路和城市高架桥震害现象与教训

桥梁震害现象与教训是桥梁抗震理论发展的主要推动力。1971年美国圣费南多(San Fernando)地震促使美国和新西兰等国的抗震设计理论发生了巨大变化。1995年日本阪神地震后,日本对其相对保守的抗震设计规范重新进行审视,公路和铁路的抗震规范都作出较大的修改。修改的内容主要体现在设防标准、分析方法、性能目标、地面运动特性、场地效应、非线性时程分析、延性设计、减隔震设计和采用能力保护设计方法等方面。并对按以前设计理论和旧规范设计的桥梁结构进行抗震性能评估,对性能不能满足现行规范要求的结构进行抗震加固。

公路和城市高架桥震害现象在本丛书之一《桥梁延性抗震设计》第一章已有较详的描述,也可参阅作者“桥梁抗震”一书。从公路与城市高架桥破坏特点来看,破坏形式复杂多样,但主要破坏与成因有以下几种:

(1) 上部结构的落梁

- 梁墩相对位移超过墩顶支承宽度;
- 相邻跨上部结构横向反向变位所致;
- 相邻上部结构间距过小,上部结构相撞;
- 逐跨施工的连续上部结构,在近墩处有一支承牛腿连接处,在纵、竖向地震作用下,连接破坏,导致梁体折断下落(美国在



公路高架桥中常采用这种连续结构);

- 桥墩强度与变形能力不足,导致较大墩顶位移;
- 相邻上部结构的支座纵向破坏,位移过大(图 1.1);

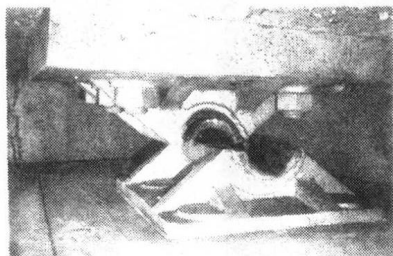
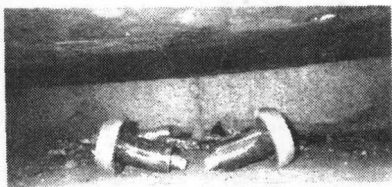


图 1.1 支座的破坏

(2) 桥梁横向倾覆

- 独柱式桥墩横向破坏;
- 砂土液化或地层不均匀震陷;

(3) 桥梁基础破坏

- 桩基折断;
- 地层震陷;

(4) 混凝土墩柱破坏

- 临界截面处弯曲强度不足;
- 承台顶面钢筋与墩身主钢筋在墩底搭接和焊接处的弱点;
- 墩身的剪切破坏,可能发生在帽梁与墩柱连接处、墩柱中部或墩柱与承台的连接处。

从以上这些破坏形式及主要原因可以看出,引起桥梁震害的原因在很大程度上是由于抗震设计方法的落后及对桥梁抗震破坏机理认识不足造成的。图 1.2 是地震破坏分析中四个主要问题,



其中的二个为“结构地震易损性(Seismic Vulnerability)”和“人为错误”。

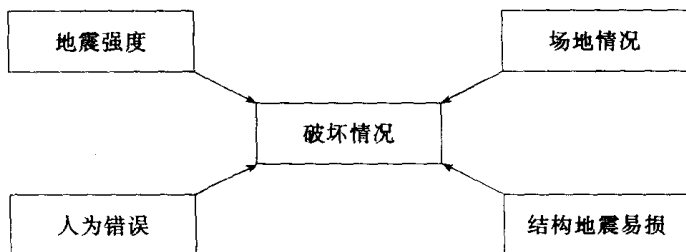


图 1.2 地震破坏分析的四个主要问题

因而,深刻的教训应包括抗震设防标准不合适,设防目标缺乏明确准则、结构构造布置、形式和设计都不利于结构抗震,结构抗震分析方法和抗震构造不当等因素。

作者在研究上海市共和新路一体化高架桥梁*抗震设计项目时,编写了相应的抗震设计指南。在抗震设计基本原则中 1.1.3 条规定了城市双层高架桥的抗震设防标准,采用三水准设防,三阶段设计,条文如下:

● 双层高架桥采用三级抗震设防,按本指南设计的双层高架桥梁,当遭受低于本地区抗震设防烈度的多遇地震(50 年超越概率 63%)作用时,一般不受损坏或不需修理仍可继续使用,此为地震水平 I;

● 当遭受相当于本地区抗震设防烈度(50 年超越概率 10%)作用时,有限损坏,经及时修理就可继续使用,此为地震水平 II;

● 当遭受高于本地区抗震设防烈度的预估罕遇地震(50 年超越概率 2%)作用时不致倒塌,此为地震水平 III。

作者在完成江阴长江公路大桥(大跨悬索桥)抗震设计研究此项目后,经多次修改,编写了悬索桥抗震设计指南,其总则中 1.3



条规定了悬索桥的抗震设防标准,也采用了三水准设防,三阶段设计,条文如下:

● 悬索桥采用三级抗震设防,按本指南设计的悬索桥,当遭受低于本地区抗震设防要求的多遇地震(100年超越概率63%)作用时,一般不受损坏或不需修理仍可继续使用,此为地震水平 I;

● 当遭受相当于本地区抗震设防要求的设计地震(100年超越概率10%)作用时,结构有损坏(上下部结构支座连接不受损伤),经及时修理就可以继续使用,此为地震水平 II;

● 当遭受高于本地区抗震设防要求的预估罕遇地震(100年超越概率2%)作用时,不致倒塌,此为地震水平 III。

二者不同处有二点,一是大跨度桥梁占交通枢纽位置,它的抗震设防水准相应提高,即基准期从50年提高到100年,其次是在地震水平 II 时,要求保证桥梁上部支座连接不受损伤,保持弹性工作范围,按能力保护设计原则设计。

各国旧规范从50年代以来,一直沿用反应谱法,采用以强度为基础的弹性抗震设计方法,因其概念明确、简单易行的优点已广泛为工程界所接受。但近20年来,地震灾害现象与教训证明单一强度设计方法使结构抗震设防目标难以实现,因为强度抗震设计分析是建立在简单的物理模型、工程实际及一系列经验系数(如结构综合影响因素等)的基础上,设计过程模糊,设计的抗震能力和地震作用对结构的效应在设计中考虑不周,对复杂、大跨结构更无法考虑一系列结构与支承边界的非线性因素、地震波相位差和桩-土-结构相互作用等问题。

因而,在进行结构抗震设计时,不但要保证结构抗震的强度,更要保证墩柱的延性性能和变形耗能的能力,构造上除要有保证强度与延性充分发挥的措施,更要在地震作用下有限位、防冲撞、整体连接的措施。