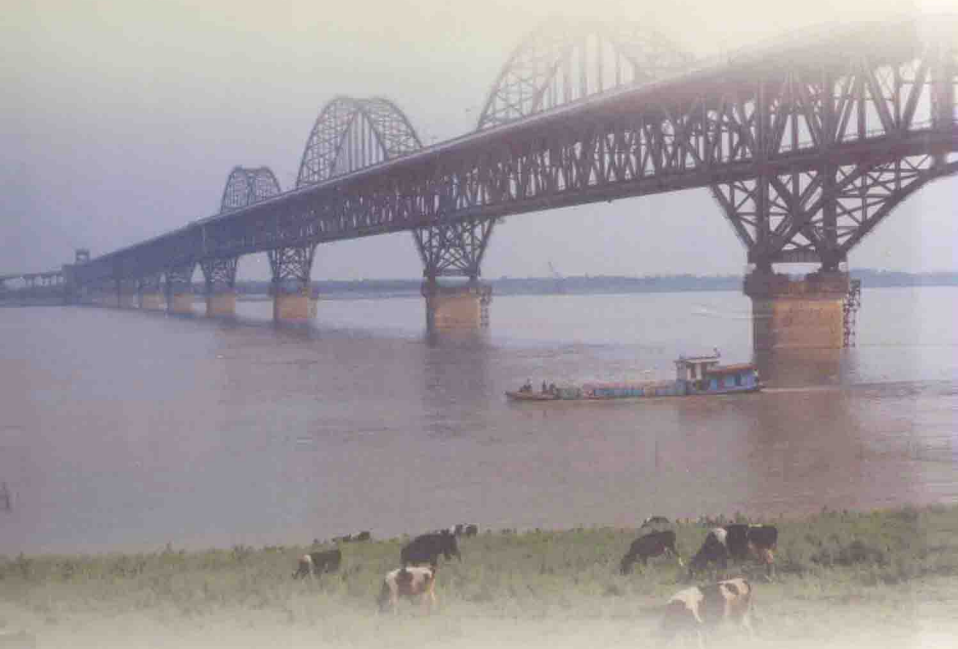


西部交通建设科技项目等资助



桥梁抗震研究 (第二版)

王克海 编著



中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

桥梁抗震研究

(第二版)

王克海 编著

中国铁道出版社

2014年·北京

内 容 简 介

本书详尽介绍了我国地震活动情况、国内外桥梁震害资料、基于性能的抗震设计概念,综述了桥梁抗震计算与抗震评价方法,用实例形式阐述了梁桥的抗震分析技术,结合本书作者攻读硕士、博士学位期间的研究成果阐述了斜拉桥抗震与减震技术,结合实例介绍了高墩桥梁抗震分析方法及减震技术措施,详细比较了国内外几个主要的桥梁抗震规范,详细论述了桩-土-结构相互作用的研究方法和桥梁抗震加固技术,简要介绍了作者开发的桥梁抗震可视化软件,最后介绍了作者对桥梁抗震所涉及一些问题的思考与建议。

本书可供桥梁设计、科研人员使用,也可作为桥梁专业在校师生等人的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

桥梁抗震研究/王克海编著. —2版. —北京:
中国铁道出版社, 2014. 3
ISBN 978-7-113-18012-6

I. ①桥… II. ①王… III. ①桥梁结构-防震
设计-研究 IV. ①U442.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 023240 号

书 名: 桥梁抗震研究(第二版)
作 者: 王克海

策 划: 张 悦
责任编辑: 张 悦
封面设计: 马利 王镜夷
责任校对: 龚长江
责任印制: 陆宁 高春晓

出版发行: 中国铁道出版社(100054, 北京市西城区右安门西街 8 号)
网 址: <http://www.tdpress.com>
印 刷: 中国铁道出版社印刷厂
开 本: 850 mm×1 168 mm 1/32 印张: 22.25 字数: 562 千
版 本: 2007 年 6 月第 1 版 2014 年 3 月第 2 版第 1 次印刷
书 号: ISBN 978-7-113-18012-6
定 价: 70.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版图书, 如有印制质量问题, 请与本社读者服务部联系调换。
发行部电话(010)51873174; 打击盗版举报电话(010)51873659, 传真(010)63549480

第二版前言

本书的第一版成稿于 2006 年底,2007 年 6 月出版,2013 年售罄。2008 年发生了汶川地震,之后作者一年之内 17 次去四川调研、咨询等,2010 年又发生了玉树地震,作者也有机会两次去灾区参加调研、咨询,对这两次地震的调研、咨询,以及 2007 年后从事的桥梁抗震课题的研究,使作者对桥梁抗震的认识得到深化。本书第一版出版后,作者有幸主持了国家自然科学基金项目“碳纤维-聚丙烯纤维混凝土桥墩的抗震性能研究”、国际科技合作项目“高烈度地震区公路结构物震害与恢复重建技术研究”、西部交通建设科技项目“公路桥梁抗震设计新技术研究”及《公路桥梁抗震性能评价细则》的编制;参加了西部交通建设科技项目“汶川地震公路震害评估、机理分析及设防标准评价”和“高烈度地震区中小跨径公路桥梁抗震设计关键技术研究”。这些研究的一些成果、一些作者的新观点想在第二版时与读者分享。

本书第二版对第一章增加了 2005 年后我国的地震活动概述及作者对地震动区划图的新认识;第二章增加了 2005 年后桥梁震害资料,特别是汶川地震和玉树地震的一些桥梁震害以及作者对震害的新思考;第三章、第四章基本保持了第一版的内容;第五章增加了作者对基于性能认识的一些新观点;第六章结合作者对中小跨径桥梁抗震的认识做了修改;第七章主要是作者在攻读硕士、博士学位期间的研究成果,基本没有修改;第八章做了简单修改;第九章~第十二章基本保持了第一版的内容;增加第十三章:桥梁抗震中若干问题的思考与建议。

本书第二版稿的编写过程中,常菲菲硕士生协助我整理了第一章、第二章的稿件;李冲博士生协助我整理了第五章、第六章、第八章的稿件;惠迎新博士生也协助整理了部分稿件。本书得到自然科学基金(50778085)、科技部国际科技合作项目(2009DFA82480)、西部交通建设科技项目(200231800028、2009318223094、200831800098、2009318000096)及交通运输部标准项目(JTG-C-201012)的资助,在此一并致谢。

由于作者学识有限,不当之处在所难免,恳请读者批评指正(邮箱:kehawang@263.net 或 kh.wang@rioh.cn 或 QQ:235988147)。

王克海

2013年11月于北京

第一版前言

我国位于世界上两大地震带——环太平洋地震带和亚欧地震带之间,是全球大陆区域中最活跃的地震区之一。目前我国经济建设迅速发展,同时也带动了公路工程、铁路工程及市政工程等的发展,可以说当今世界上最大的土木工程建设在中国。在公路、铁路、市政工程等中,桥梁是生命线工程,国内外大量震害资料一再证明了桥梁抗震研究的重要意义。

作者 1989 年师从著名抗震专家朱晞教授攻读硕士、博士学位,开始进入桥梁抗震领域,之后有机会于 1999 年师从著名抗震专家范立础院士做博士后研究工作。2001 年到交通部公路科学研究院工作,很荣幸有机会作为第二承担单位项目负责人完成了交通部“西部交通建设科技项目——桥梁抗震性能评价及抗震加固技术研究”其中两个子项目(本课题共五个子课题)的研究,同时完成了 20 余座桥梁设计中的抗震咨询项目。本书是在总结作者上述几个阶段的研究成果的基础上完成的,全书共分 12 章,第 1 章简要介绍了我国的地震活动情况;第 2 章简要介绍了国内外一些大地震中桥梁的震害情况;第 3 章从不同角度叙述了地震工程学的发展状况;第 4 章综述了桥梁抗震计算与抗震评价方法;第 5 章介绍了基于性能的抗震设计;第 6 章分析了梁桥的抗震实例;第 7 章介绍了斜拉桥抗震与减震研究,本章融入了作者攻读硕士、博士学位期间的研究成果;第 8 章介绍了高墩抗震分析及减震措施研究;第 9 章介绍了国内外几个桥梁抗震规范的比较;第 10 章介绍了桩-土-结构动力相互作用;第 11 章介绍了桥梁抗震加固技术;第 12 章主要介绍桥梁抗震可视化的思路和作者组织开发的“桥梁抗震可视化智能系统”。本书一些章节有作者的体会和见解,一些是作者多年来从事抗震研究的研究成果,作者希望本书能

为从事土木工程科研、教学、设计、施工人员提供一些指导和帮助。

作者衷心感谢著名抗震专家朱晞教授和范立础院士两位恩师的悉心指导和辛勤培养。感谢同事李茜硕士协助整理了全书的稿件,韦韩硕士整理了第12章的稿件,季金文硕士整理了第6章的稿件。感谢交通部公路科学研究院的院领导、科教处领导、道桥部领导对我工作的支持。

我想借本书出版之机感谢我妻子十多年来对我学业和工作的支持。

由于作者学识有限,偏见、疏忽、不当之处在所难免,恳请读者批评指正(邮箱:kehaiwang@263.net 或 kh.wang@rioh.cn)。

特别需要说明的是:本书的出版得到西部交通建设科技项目和交通部公路科学研究院创新基金的资助。

王克海

2006年12月于北京

目 录

第 1 章 全国地震活动概况	1
1.1 全国地震活动的基本特征	1
1.2 1949~1981 年全国地震活动的概况分析	4
1.2.1 地震活动基本特征	4
1.2.2 地震灾害情况	6
1.3 1982 年以来全国地震活动概况	8
1.4 本章小结	33
第 2 章 桥梁震害	37
2.1 典型地震及桥梁震害	37
2.1.1 1923 年日本关东大地震	37
2.1.2 1960 年智利地震	39
2.1.3 1976 年唐山地震	40
2.1.4 1989 年美国 Loma Prieta 地震	59
2.1.5 1994 年美国 Northridge 地震	68
2.1.6 1995 年日本阪神地震	75
2.1.7 1999 年土耳其地震	86
2.1.8 1999 年中国台湾集集地震	88
2.1.9 2004 年日本新潟地震	94
2.1.10 2007 年秘鲁地震	96
2.1.11 2008 年汶川地震中的桥梁震害	107
2.1.12 2010 年玉树地震中的桥梁震害	111
2.1.13 2010 年智利地震	113
2.1.14 2010 年墨西哥地震	118
2.1.15 2010 年新西兰地震	125
2.1.16 其他地震中的桥梁震害	129

2.2	桥梁震害内因	136
2.2.1	桥梁上部结构震害	136
2.2.2	桥梁支座震害	136
2.2.3	桥梁下部结构震害	137
2.2.4	桥梁基础震害	137
2.3	本章小结	137
第3章	国内外地震工程学的发展历程	141
3.1	地震工程学发展的几个阶段	141
3.1.1	第一阶段——地震工程学发展的萌芽阶段	141
3.1.2	第二阶段——地震工程学发展的成熟阶段	143
3.1.3	第三阶段——地震工程学发展的扩展阶段	145
3.1.4	其他划分	148
3.2	现阶段地震工程学发展情况	149
3.3	我国地震工程学发展研究	160
3.3.1	创建阶段	160
3.3.2	发展阶段	161
3.3.3	横向发展阶段	163
3.4	国内外生命线地震工程的研究	165
3.5	本章小结	168
第4章	桥梁抗震计算与抗震性能评价方法综述	174
4.1	结构抗震动力学基本概念	174
4.1.1	运动方程	174
4.1.2	结构动力特性	176
4.2	桥梁结构地震反应分析方法	178
4.2.1	静力阶段	179
4.2.2	反应谱法	182
4.2.3	动态时程分析法	192
4.2.4	随机振动方法	207
4.2.5	分析和设计方法总结	209
4.3	桥梁抗震性能评估及分析方法	211

4.3.1	确定加固优先权	211
4.3.2	结构抗震性能评估分析	213
4.4	非线性静力弹塑性分析	214
4.4.1	能力谱方法	214
4.4.2	位移影响系数法	218
4.4.3	适应谱 Pushover 方法	220
4.4.4	模态 Pushover 分析方法	222
4.4.5	基于模态分析的 Pushover 方法	225
4.5	本章小结	235
第 5 章	基于性能的抗震设计	240
5.1	基于性能的抗震设计基本概念	241
5.1.1	定义	241
5.1.2	研究内容	242
5.1.3	特点	245
5.2	基于性能的抗震设防标准和方法	245
5.2.1	国外抗震设防标准	245
5.2.2	国内抗震设防标准	247
5.2.3	基于性能的抗震设计方法	249
5.3	中小跨径梁桥基于性能的抗震设计方法	260
5.3.1	国内外桥梁体系、震害与规范	260
5.3.2	考虑支座摩擦滑移的抗震设计方法	269
5.3.3	美、日与中国桥梁支座检算规定	273
5.3.4	结构性能破坏模式	276
5.3.5	我国中小跨径桥梁抗震性能设计	276
5.4	基于性能(多水平性能目标)的既有桥梁抗震性能 评价	280
5.5	本章小结	282
第 6 章	梁桥抗震分析实例	286
6.1	梁桥结构特点	286
6.1.1	简支梁桥结构特点	286

6.1.2	连续梁桥结构特点	287
6.1.3	连续刚构桥结构特点	288
6.2	梁桥震害特点及其原因分析	289
6.3	中小跨径梁桥抗震设计方法	292
6.3.1	桥梁抗震设计理念	292
6.3.2	抗震设防标准	293
6.3.3	抗震设计流程	294
6.4	简支梁桥抗震分析	295
6.4.1	简支梁桥地震反应实例	295
6.4.2	简支梁桥有限元建模	308
6.4.3	简支梁桥抗震设计及构造措施	311
6.5	连续梁桥抗震分析	314
6.5.1	连续梁桥地震反应实例	314
6.5.2	连续梁桥抗震设计及构造措施	342
6.5.3	连续梁桥有限元建模	344
6.6	连续刚构桥抗震分析	347
6.6.1	实例一	347
6.6.2	实例二	351
6.6.3	连续刚构桥抗震设计及构造措施	360
6.6.4	连续刚构桥的抗震特点	361
6.7	本章小结	362
第7章	斜拉桥抗震分析及减震研究	365
7.1	斜拉桥的历史与发展概况	365
7.2	斜拉桥几何非线性分析方法	377
7.2.1	斜拉索非线性刚度矩阵	378
7.2.2	描述梁-柱效应的刚度矩阵	380
7.2.3	描述大变形的刚度矩阵	392
7.2.4	斜拉桥几何非线性有限元方程的数值解法	392
7.2.5	斜拉桥几何非线性静力分析过程	393
7.2.6	实例分析	395

7.3 斜拉桥结构动力分析	398
7.3.1 斜拉桥结构自振特性分析	399
7.3.2 斜拉桥结构一致激励的地震反应分析	406
7.3.3 斜拉桥结构多支承激励的地震响应分析	423
7.4 斜拉桥结构减震技术	431
7.4.1 被动控制	431
7.4.2 主动控制	439
7.4.3 斜拉桥结构基于模态分析的减震控制	443
7.4.4 非线性结构的滑动状态控制	466
7.5 本章小结	470
第8章 高墩桥梁的地震反应研究	474
8.1 高墩桥梁建设概况	474
8.2 高墩桥梁地震反应分析方法	477
8.2.1 高墩桥梁动力反应谱分析	477
8.2.2 高墩桥梁动态时程分析法	478
8.2.3 考虑 P- Δ 效应的高墩抗震计算	479
8.3 高墩桥梁地震反应	481
8.3.1 高墩桥梁地震反应特点	481
8.3.2 工程实例	482
8.4 高墩桥梁合理抗震型式	492
8.4.1 高桥墩常用型式	492
8.4.2 工程实例	493
8.5 本章小结	510
第9章 国内外桥梁抗震规范的介绍	515
9.1 抗震性能设防目标	515
9.2 设计地震动	521
9.2.1 地震动区划	521
9.2.2 场地分类	523
9.2.3 地震设计谱	524
9.2.4 阻尼修正	533

9.3	地震反应分析和计算方法	535
9.4	延性设计	544
9.5	约束和减震、耗能设计	554
9.6	本章小结	555
第 10 章	桩-土-结构动力相互作用	557
10.1	土-结构动力相互作用的概念及发展阶段	557
10.2	土-结构动力相互作用的分析方法	559
10.3	桩-土-结构动力相互作用机理	561
10.3.1	土体响应	563
10.3.2	运动响应	564
10.3.3	惯性响应	564
10.3.4	分析方法	564
10.3.5	桩-土-结构动力相互作用的集中质量法	581
10.4	本章小结	589
第 11 章	桥梁抗震加固技术	593
11.1	桥梁结构抗震加固的概念	593
11.1.1	桥梁结构主要震害	593
11.1.2	国内外抗震加固情况	594
11.2	上部结构抗震加固方法	598
11.2.1	支座与伸缩缝的加固措施	598
11.2.2	上部结构抗弯能力的加固措施	610
11.2.3	上部结构抗震加固实例	612
11.3	桥墩、盖梁和节点的加固方法	614
11.3.1	混凝土墩的加固方法	614
11.3.2	盖梁的加固方法	626
11.3.3	桥墩抗震加固实例	631
11.4	基础的加固方法	634
11.4.1	承台	634
11.4.2	桥台	638
11.5	不良地质区桥梁的加固措施	640

11.5.1	横跨或靠近断层的桥梁	640
11.5.2	位于或靠近不稳定边坡的桥梁	641
11.5.3	位于可液化土层上的桥梁	641
11.5.4	不良地质区桥梁抗震加固实例	644
11.6	运用抗震保护系统的加固方法	645
11.6.1	减隔震原理	645
11.6.2	设计目的	648
11.6.3	适合使用隔震系统的桥梁	648
11.6.4	桥梁位移	649
11.7	本章小结	649
第 12 章	桥梁抗震计算可视化	652
12.1	计算机仿真和科学计算的可视化技术	652
12.1.1	改善建模环境	654
12.1.2	一体化仿真环境	654
12.1.3	仿真数据库	654
12.1.4	动 画	655
12.1.5	实现仿真结果分析到建模的自动回馈	656
12.1.6	基于信息处理的仿真	656
12.2	桥梁抗震软件开发技术	658
12.2.1	国内外桥梁 CAD 现状	659
12.2.2	面向对象的程序设计	660
12.2.3	软件构件对象模型	662
12.2.4	ActiveX Automation 技术	663
12.2.5	工程数据库管理系统	664
12.3	BAS 系统总体介绍	664
12.4	BAS 系统前处理介绍	667
12.4.1	几何建模生成有限元模型	667
12.4.2	直接建立有限元模型	669
12.4.3	建立截面	672
12.4.4	与 AutoCAD 的无缝接合	674

12.5	BAS 后处理介绍	676
12.5.1	输出形式	676
12.5.2	输出内容	677
12.6	算例	678
12.7	几点体会	680
第 13 章	桥梁抗震中若干问题的思考与建议	683
13.1	关于正确认识和使用地震动区划图的思考与建议	683
13.2	中小跨径桥梁抗震设计理念	687
13.3	关于地震模拟振动台试验的思考与建议	688
13.4	关于获取实桥强震记录的思考与建议	689
13.5	关于橡胶支座抗震性能的思考与建议	690
13.6	关于小跨径拱桥抗震问题的思考	691
13.7	关于计算机模拟地震动实验室建设的思路	691
13.8	建议注意国内外规范中混凝土强度的换算关系	693
13.9	关于在规范中桥梁重要性分类的建议	694
13.10	关于在规范中统一抗震构造措施的建议	694

(每一章的参考文献见于该章末处)

第 1 章 全国地震活动概况

我国位于世界上两大地震带,即环太平洋和亚欧地震带之间,是全球大陆地区中最活跃的地震区之一。地震在空间上往往沿着构造活动带呈带状分布,形成地震带。全国境内有 23 个地震带,东部主要有郯城—庐江地震带、河北平原地震带、陕西汾渭地震带、燕山—渤海地震带、东南沿海地震带;西部主要有北天山地震带、南天山地震带、祁连山地震带、昆仑山地震带、喜马拉雅山地震带;中部有斜穿大陆腹地的南北地震带。另外还有我国台湾地区地震带,属西太平洋地震带的一部分。有史以来,全国地震活动频繁。据历史记录,破坏性地震数以千计,造成了严重的灾害,在水、旱、震、风、虫、雹和瘟疫等七大自然灾害中占很大的比重。纵观近两千多年全国地震活动情况,具有频次高、强度大且分布广的基本特点。本章将对全国地震活动的基本特性及 1949 年以来的地震活动特点以及震害情况作简要综述。

1.1 全国地震活动的基本特征

(1) 全国地震活动具有频次高、强度大的特点

我国历史上关于地震的记载十分丰富。但是由于不同历史时期、不同地区发展程度的不同,地震记载的详尽程度亦不相同。例如,公元 1500 年以前的记载不多,主要集中在黄河中下游和长江中下游地区,明代开始才较为丰富,公元 1900 年以前,我国西部地区的记载仍然较少。1900 年至今的 100 余年,特别是 20 世纪 30 年代以来,由于有了地震记录仪,我国地震资料已趋于完整和系统化。

根据上述情况,20 世纪以前的地震资料均以历史文献记载及部分考察为主,而 20 世纪以来的地震资料,则以仪器记录和现场

考察为主,两个阶段资料的完整情况有着明显差异(特别是对6级以下的中强地震)。分别统计1900年前后全国地震活动的基本情况,其结果如下:

1900年以前有记录的地震:共发生8级以上地震8次,最大地震为1668年在山东莒县、郯城间发生的8.5级地震;7.0~7.9级地震32次;6.0~6.9级地震144次;4.75级以上地震共581次。

1900~1988年共发生8级以上地震9次,其中大陆7次,台湾地区2次,最大地震为1950年发生在西藏察隅附近的8.6级地震和1920年发生在宁夏海原的8.5级地震;7.0~7.9级地震94次,其中,大陆59次,台湾地区34次;6.0~6.9级地震446次,其中,大陆271次,台湾地区175次;共发生4.75级以上地震约3756次。

1989~2000年未发生8级地震;共发生7级以上地震11次,其中大陆及近海发生7次,台湾地区4次;6级以上地震共106次,其中,大陆及近海发生66次;5级以上地震发生528次,其中,大陆及近海发生32次。

按上述统计结果,20世纪以来,全国7级以上地震的年平均发生率为1.14次/年,其中,大陆为0.73次/年,台湾地区为0.4次/年;6级以上地震的年平均发生率为5.52次/年,其中,大陆为3.37次/年,台湾地区为2.15次/年。

从上述情况不难看出,全国地震活动具有频次高、强度大的特点。与全球地震活动相比,我国强震活动占较大的比例。例如,1897~1977年期间,全球共发生7级以上地震1529次,平均每年发生18.9次,其中我国约占6.5%,而在全球陆地的地震中,我国强震所占的比例明显增大,约占 $1/4 \sim 1/3$ 。

我国的地震分布十分广泛(见图1-1)。除浙江、贵州两省外,其他各省和自治区皆有6级以上强震发生,其中的18个省和自治区均发生过7级以上大震,占全国的60%;台湾地区是我国地震活动频繁发生的地区之一,在1901~1988年全国549次6级以上地震