



国家出版基金资助项目

“十二五”国家重点图书出版规划项目

交通运输建设科技丛书·公路基础设施建设与养护

A analysis of Highways' Damage
in the Wenchuan Earthquake

汶川地震 公路震害分析



桥梁与隧道
Bridge and Tunnel

庄卫林 陈乐生 等 编著



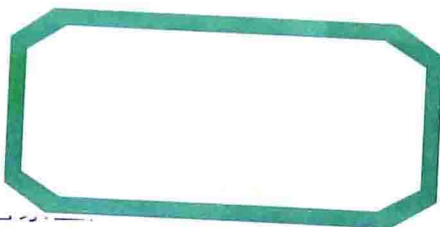
人民交通出版社
China Communications Press



国家出版基

“十二五”重点出版工程

交通运输建设科技丛书·公路基础设施建设与养护



汶川地震公路震害分析

桥梁与隧道

庄卫林 陈乐生 等 编著



人民交通出版社
China Communications Press

内 容 提 要

本书依托交通运输部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”，介绍汶川地震公路桥梁和隧道典型震害的机理。本书分为两篇，共计13章和8个附录。第一篇为第1章至第7章，介绍公路桥梁震害分析及其对策，主要包括：桥梁震害概述，地震地质灾害对桥梁的影响分析及对策，简支梁桥、连续梁桥、拱桥和连续刚构桥的震害机理分析及抗震设计对策；第二篇为第8章至第13章，介绍公路隧道震害分析及其对策，主要包括：隧道洞口段、断层破碎带段和普通段隧道结构震害机理分析，公路隧道抗震设防对策等。附录中详细给出了研究中的试验方法、试验过程、试验结果，对于采用数值模拟分析的部分详细给出了计算模型的建立方法和计算结果，供读者参考。

本书可供桥梁与隧道建设人员学习使用，也可相关专业研究者和关注者提供借鉴。

图书在版编目（CIP）数据

汶川地震公路震害分析. 桥梁与隧道 / 庄卫林等编
著. —北京：人民交通出版社，2013.11
(交通运输建设科技丛书·公路基础设施建设与养护)
ISBN 978-7-114-10960-7

I. ①汶… II. ①庄… III. ①公路桥—地震灾害—调查研究—汶川县—2008 ②公路隧道—地震灾害—调查研究—汶川县—2008 IV. ① P316.271.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2013）第 254640 号

国家出版基金资助项目

“十二五”国家重点图书出版规划项目

交通运输建设科技丛书·公路基础设施建设与养护

书 名：汶川地震公路震害分析 桥梁与隧道

著 作 者：庄卫林 陈乐生 等

责任编辑：曲 乐 王文华

出版发行：人民交通出版社

地 址：（100011）北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址：<http://www.ccpress.com.cn>

销售电话：（010）59757973

总 经 销：人民交通出版社发行部

经 销：各地新华书店

印 刷：北京盛通印刷股份有限公司

开 本：787×1092 1/16

印 张：18

字 数：460 千

版 次：2013 年 11 月 第 1 版

印 次：2013 年 11 月 第 1 次印刷

书 号：ISBN 978-7-114-10960-7

定 价：53.00 元

（有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换）

交通运输建设科技丛书编审委员会

主 任：赵冲久

副主任：李祖平 洪晓枫 罗 强

委 员：赵之忠 林 强 付光琼 石宝林 张劲泉 费维军
关昌余 张华庆 蒋树屏 沙爱民 郑健龙 唐伯明
孙立军 王 炜 张喜刚 吴 澎 韩 敏

《汶川地震公路震害分析》主要著作者

庄卫林	陈乐生	裴向军	马洪生	刘振宇	林国进
程 强	唐永建	向 波	张建经	王明年	李建中
唐光武	王克海	赵灿辉	陈 强	曲宏略	王 联
杨长卫	吉随旺	李玉文	黄润秋	袁进科	朱学雷
黄 浩	胡建新	朱长安			

总 序

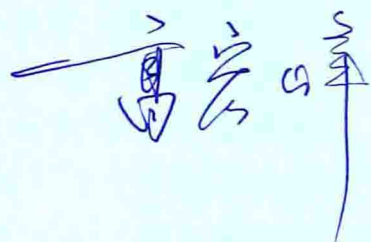
“十一五”以来，交通运输行业深入贯彻落实科学发展观，加快转变发展方式，大力推进交通运输事业又好又快发展。到2010年年底，全国公路通车总里程突破400万公里，从改革开放之初的世界第七位跃居第二位，其中高速公路通车里程达到7.4万公里，居世界第二位；公路货运量从世界第六位跃居第一位；内河通航里程、港口货物和集装箱吞吐量均居世界第一。交通运输事业的快速发展不仅在应对国际金融危机、保持经济平稳较快发展等方面发挥了重要作用，而且为改善民生、促进社会和谐作出了积极贡献。

长期以来，部党组始终把科技创新作为推进交通运输发展的重要动力，坚持科技工作面向交通运输发展主战场，加大科技投入，强化科技管理，推进产学研相结合，开展重大科技研发和创新能力建设，取得了显著成效。通过广大科技工作者的不懈努力，在多年冻土、沙漠等特殊地质地区公路建设技术，特大跨径桥梁建设技术，特长隧道建设技术和深水航道整治技术等方面取得重大突破和创新，获得了一系列具有国际领先水平的重大科技成果，显著提升了行业自主创新能力，有力支撑了重大工程建设，培养和造就了一批高素质的科技人才，为发展现代交通运输业奠定了坚实基础。同时，部积极探索科技成果推广的新途径，通过实施科技示范工程，开展材料节约与循环利用专项行动计划，发布科技成果推广目录等多种方式，推动了科技成果更多更快地向现实生产力转化，营造了交通运输发展主动依靠科技创新，科技创新更加贴近交通运输发展的良好氛围。

组织出版《交通运输建设科技丛书》，是深入实施科技强交战略，加大科技成果推广应用的又一重要举措。该丛书共分为公路基础设施建设与养护、水运基础设施建设与养护、安全与应急保障、运输服务和绿色交通等领域，将汇集交通运输建设科技项目研究形成的具有较高学术和应用价值的优秀专著。丛书的逐年出版和不断丰富，将有助于集中展示交通运输建设重大科技成果，传承科技创新文化，体现交通运输行业科技人员的智慧，促进高层次的技术交流、学术传播和专业人才培养，并逐渐成为科技成果转化的重要载体。

“十二五”期是加快转变发展方式、发展现代交通运输业的关键时期。深

入实施科技强交战略，是一项关系全局的基础性、引领性工程。希望广大交通运输科技工作者进一步增强做好交通运输科技工作的责任感和紧迫感，团结一致，协力攻坚，努力开创交通运输科技工作新局面，为交通运输全面、协调和可持续发展作出新的更大贡献！

A handwritten signature in blue ink, reading '高宏斌' (Gao Hongbin). The signature is stylized, with the first character '高' being particularly prominent and the last character '斌' having a long, vertical stroke extending downwards.

2011年12月6日

前 言

2008年5月12日14时28分,四川省汶川县发生了里氏8.0级特大地震。这是新中国成立以来破坏性最强、波及范围最广、救灾难度最大的一次特大自然灾害。公路基础设施在此次地震中受到严重的破坏,路基被掩埋和淹没、桥梁垮塌、隧道受损,通往灾区的公路一度完全中断,给抢险救灾带来极大的困难。

地震震害调查是人们认识地震、研究工程抗震技术最直接的方法,是恢复重建的必需工作,也是为防震减灾工作提供宝贵基础资料的有效手段。“5·12”汶川地震发生后,交通运输部各级领导亲赴灾区,在指导公路抗震救灾和公路抢通工作的同时,要求将公路震害详细、客观地记录下来作为史料保存,并加以深入研究。

为此,交通运输部科技司及西部交通建设科技项目管理中心相继启动公路抗震救灾系列科研项目,形成“汶川地震灾后重建公路抗震减灾关键技术研究”重大专项。通过近三年的研究,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”于2011年5月通过交通运输部西部交通建设科技项目管理中心组织的鉴定验收。该项目研究针对“5·12”汶川地震灾区公路震害开展系统调查,以文字、图片及数据库方式完整保存公路震害史料,建立基于地理信息系统、可供查询的公路震害数据库,在大量震害统计分析基础上借助振动台模型试验、数值模拟、理论分析等方法进行典型震害机理分析,并结合公路震损特点评价设防标准适宜性,提出抗震设防对策及建议。

汶川地震公路震害调查范围覆盖四川、甘肃、陕西三省重灾区、极重灾区内的所有高速公路和国省干线,以及部分具有典型震害特征的县乡道路,共47条,总长约7 074km。调查工作量:937个公路沿线地质灾害点,600余条实测地质剖面,1 488个路基震害点,2 207座桥梁,56座隧道,拍摄收集公路震害照片50 000余张。

在公路震害调查中,四川省交通运输厅公路规划勘察设计研究院牵头负责四川省境内,甘肃省公路管理局牵头负责甘肃省境内,陕西省公路局牵头负责陕西省境内,最后由四川省交通运输厅公路规划勘察设计研究院牵头汇总所有调查资料。

为给公路抗震减灾能力研究提供基础资料,并为相关研究者和关注者提供借鉴,项目组分阶段整理研究成果,于2009年5月出版《汶川地震公路震害图集》,2012年5月出版《汶川地震公路震害调查》(共四册),现又将公路震害机理分析的主要成果整理形成《汶川地震公路震害分析》(共两册)。

《汶川地震公路震害分析》按专业分为地质灾害与路基、桥梁与隧道两分

册。本书为《桥梁与隧道》分册，分两篇，共计13章和8个附录。第一篇为第1章至第7章，介绍公路桥梁震害分析及其对策，主要包括：桥梁震害概述，地震地质灾害对桥梁的影响分析及对策，简支梁桥、连续梁桥、拱桥和连续刚构桥的震害机理分析及抗震设计对策；第二篇为第8章至第13章，介绍公路隧道震害分析及其对策，主要包括：隧道洞口段、断层破碎带段和普通段隧道结构震害机理分析，公路隧道抗震设防对策等。附录中详细给出了研究中的试验方法、试验过程、试验结果，对于采用数值模拟分析的部分详细给出了计算模型的建立方法和计算结果，供读者参考。

《汶川地震公路震害分析》一书是集体智慧的结晶，众多专家学者参与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”项目中的公路震害机理分析工作，他们分别是：四川省交通运输厅的陈乐生、朱学雷、黄浩等，四川省交通运输厅公路规划勘察设计研究院的唐永建、庄卫林、吉随旺、李玉文、向波、程强、马洪生、刘振宇、林国进、蒋劲松、王道雄、王联、陈强、张斌、李勇、贾为易、徐兵、苗宇、朱长安、王维嘉、陈贵红、郑金龙、田尚志、周永江、吴世贵、李本伟、贺智功等，西南交通大学的王明年、赵灿辉、张建经、于丽、崔光耀、曲宏略、杨长卫、周德培、冯君、肖世国、廖燚、杨涛、马涛、韩鹏飞、范洪海、张炳焜、罗宏川、张欣心、徐华、马耀先、刘强、司长亮、李勇、赵岑、侯家庆、罗乐等，成都理工大学的裴向军、黄润秋、袁进科、许强、冯文凯、付顺等，交通运输部公路科学研究院的王克海、李茜、韦韩等，重庆交通科研设计院的唐光武、胡建新、兰海燕等，以及同济大学的李建中等。

全书由庄卫林、陈乐生审阅并统稿，各章节分工如下：第1~7章、附录A~E主要由四川省交通运输厅的陈乐生，四川省交通运输厅公路规划勘察设计研究院的庄卫林、刘振宇，西南交通大学的赵灿辉，同济大学的李建中，重庆交通科研设计院的唐光武，交通运输部公路科学研究院的王克海等执笔编写；第8~13章、附录F~H主要由四川省交通运输厅公路规划勘察设计研究院的林国进、朱长安、王维嘉和西南交通大学的王明年、于丽、崔光耀等执笔编写。同时，唐永建、李玉文、李建中、唐光武、王克海、向波、李海清等同志也参与了本书的审阅。

本书的编写得到了交通运输部、西部交通建设科技项目管理中心、四川省交通运输厅等单位各级领导的关心、帮助和指导，人民交通出版社也为本书的出版给予热忱关怀，谨此致谢！

限于编著者水平，加之时间仓促，书中不足之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

编著者

2013年6月

目 录

第一篇 桥 梁

第 1 章 桥梁震害概述	003
1.1 汶川地震桥梁震害概述	003
1.2 简支梁桥震害概述	005
1.3 连续梁桥震害概述	006
1.4 拱桥震害概述	007
1.5 连续刚构桥震害概述	008
第 2 章 地震地质灾害影响分析	010
2.1 地震地质灾害对公路桥梁影响概述	010
2.2 受地震地质灾害危害桥梁分布区域	010
2.3 地震地质灾害对桥梁的主要破坏形式及分析	011
2.4 高烈度山区桥梁地震地质灾害防治对策	015
第 3 章 简支梁桥震害机理分析	017
3.1 简支梁桥震害类型	017
3.2 板式橡胶支座的作用	021
3.3 主梁落梁分析	026
3.4 挡块的作用	029
3.5 对板式橡胶支座简支梁桥抗震性能的再认识	034
3.6 几个问题的讨论	034
3.7 抗震对策	038
第 4 章 连续梁桥震害机理分析	039
4.1 连续梁桥震害类型及特征	039
4.2 连续梁桥典型震害特征分析	041
4.3 桥墩形式对震害的影响	052
4.4 抗震对策	055
第 5 章 拱桥震害机理分析	057
5.1 拱桥震害类型	057
5.2 圯工拱桥震害机理分析	059
5.3 钢筋混凝土拱桥震害机理分析	067
5.4 抗震对策	069

第 6 章 连续刚构桥震害机理分析	070
6.1 连续刚构桥震害类型	070
6.2 连续刚构桥震害特征分析	073
6.3 抗震对策	080
第 7 章 桥梁震害机理分析小结	081
7.1 设防标准和设计方法	081
7.2 地震超载	082
7.3 构造措施	082
本篇参考文献	084

第二篇 隧 道

第 8 章 概述	089
8.1 汶川地震公路隧道震害综述	089
8.2 汶川地震公路隧道震害特点	094
8.3 隧道震害机理研究现状	095
第 9 章 隧道洞口段震害分析	098
9.1 洞外次生震害分析	098
9.2 洞口段衬砌震害分析	106
9.3 本章小结	117
第 10 章 隧道断层破碎带段结构震害分析	118
10.1 震害类型	118
10.2 震害分析	118
10.3 现场震害情况	129
10.4 本章小结	131
第 11 章 隧道普通段结构震害分析	132
11.1 震害类型	132
11.2 震害分析	132
11.3 现场震害情况	137
11.4 本章小结	139
第 12 章 公路隧道抗震设防对策	140
12.1 洞口段抗震设防对策	140
12.2 断层破碎带段隧道结构抗震设防对策	141
12.3 普通段隧道抗震设防对策	143
12.4 本章小结	143
第 13 章 隧道震害机理分析小结	144
13.1 设防标准和设计方法	144

13.2 震害机理	145
13.3 设防区段和抗震对策	145
本篇参考文献	147
附录 A 简支梁桥震害计算分析	148
A.1 计算模型	148
A.2 地震动参数	155
A.3 纵向响应动力增量分析	156
A.4 横向响应分析	160
A.5 桥面连续分析	165
A.6 小结	170
附录 B 简支梁震害机理振动台试验	171
B.1 概述	171
B.2 试验模型	171
附录 C 抗震制动墩计算分析	192
C.1 计算模型	192
C.2 计算结果分析	193
附录 D 挡块破坏机理试验研究	195
D.1 模型试件设计	195
D.2 加载和测试	197
D.3 试验结果及分析	200
D.4 小结	208
附录 E 拱桥震害计算分析	209
E.1 结构概况	209
E.2 结构模型和地震动参数	211
E.3 计算结果及分析	218
E.4 小结	244
附录 F 隧道震害分类	246
F.1 隧道拱墙震害类型	246
F.2 隧道底部震害类型	248
附录 G 隧道震害分级及震害统计	249
G.1 隧道震害分级	249
G.2 隧道震害统计及震害特征	251
G.3 隧道震害总体特点	265
附录 H 对《公路工程抗震设计规范》(JTJ 004—89) 中隧道条款的有关建议	268
索引	271

Contents

Part 1 Bridge

Chapter 1	Introduction	003
1.1	Outline of seismic damage of Wenchuan earthquake	003
1.2	Outline of seismic damage of simply supported beam bridges	005
1.3	Outline of seismic damage of continuous beam bridges	006
1.4	Outline of seismic damage of arch bridges	007
1.5	Outline of continuous rigid frame bridges	008
Chapter 2	Seismic geological disaster analysis	010
2.1	Review of bridge damage by seismic geological disaster	010
2.2	Distribution region of bridges suffered from seismic geological disaster	010
2.3	The main damage forms as seismic geological disaster and analysis	011
2.4	Protective countermeasures of bridges, in high intensity, suffered from seismic geological disaster	015
Chapter 3	Seismic damage mechanism of simply supported beam bridges	017
3.1	Seismic damage forms of simply supported beam bridges	017
3.2	Function of plate rubber bearing	021
3.3	Falling beam analysis of main beam	026
3.4	The role of the block	029
3.5	Recognition of anti-seismic property for simply supported beam bridge with plate-rubber bearing	034
3.6	Discussion on several problems	034
3.7	Aseismatic countermeasures	038
Chapter 4	Seismic damage mechanism of continuous beam bridges	039
4.1	Seismic damage forms and features of continuous beam bridges	039
4.2	Analysis to typical seismic damage characteristics of continuous beam bridges	041
4.3	Pier forms influence on seismic damage	052
4.4	Aseismatic countermeasures	055
Chapter 5	Seismic damage mechanism of arch bridges	057
5.1	Seismic damage forms of arch bridges	057
5.2	Seismic damage mechanism analysis of masonry arch bridges	059
5.3	Seismic damage mechanism analysis of reinforced concrete arch bridges	067

5.4 Aseismatic countermeasures	069
Chapter 6 Seismic damage mechanism of continuous rigid-frame bridges	070
6.1 Seismic damage forms of continuous rigid-frame bridges	070
6.2 Seismic damage features of continuous rigid-frame bridges	073
6.3 Aseismatic countermeasures	080
Chapter 7 Summary on seismic damage mechanism	081
7.1 Fortification criterion and design method	081
7.2 Earthquake overload	082
7.3 Structure measures	082
Reference	084

Part 2 Tunnel

Chapter 8 Introduction	089
8.1 Outline of tunnel seismic damage of Wenchuan earthquake	089
8.2 Seismic damage characteristics of highway tunnel in Wenchuan earthquake	094
8.3 The study actuality of tunnel seismic disaster analysis	095
Chapter 9 Seismic opening section structure disaster analysis	098
9.1 Seismic outside structure disaster analysis	098
9.2 Seismic opening section lining disaster analysis	106
9.3 Preliminary summary	117
Chapter 10 Seismic tunnel structure disaster analysis in fault fracture zone	118
10.1 Seismic damage type	118
10.2 Seismic disaster analysis	118
10.3 Situation of field seismic disaster	129
10.4 Preliminary summary	131
Chapter 11 Seismic tunnel structure disaster analysis of normal section	132
11.1 Seismic damage type	132
11.2 Seismic disaster analysis	132
11.3 Situations of field seismic disaster	137
11.4 Preliminary summary	139
Chapter 12 Solution of highway tunnel seismic fortification	140
12.1 Solution of opening section structure seismic fortification	140
12.2 Solution of tunnel structure in fault fracture zone seismic fortification	141
12.3 Solution of tunnel in normal zone seismic fortification	143
12.4 Preliminary summary	143
Chapter 13 Summary on tunnel seismic damage mechanism	144
13.1 Fortification criterion and design method	144



13.2	Seismic damage mechanism	145
13.3	Fortification section and aseismatic countermeasures	145
Reference		147
Appendix A	The seismic damage calculation analysis of simply supported beam bridge	148
A.1	Calculation model	148
A.2	Seismic oscillation parameters	155
A.3	Longitudinal response dynamic increment analysis	156
A.4	Transverse response analysis	160
A.5	Bridge deck continuous analysis	165
A.6	Summary	170
Appendix B	Shaking table test of simply supported beam about seismic damage mechanism	171
B.1	Summarize	171
B.2	Test model	171
Appendix C	Aseismic braking pier calculation analysis	192
C.1	Calculation model	192
C.2	Calculation results analysis	193
Appendix D	Block damage mechanism test investigation	195
D.1	Model test-piece design	195
D.2	Loading and test	197
D.3	Test results and analysis	200
D.4	Summary	208
Appendix E	Seismic damage calculation analysis of arch bridge	209
E.1	Structure general situation	209
E.2	Structure model and seismic oscillation parameters	211
E.3	Calculation results and analysis	218
E.4	Summary	244
Appendix F	Classification of tunnel seismic damage	246
F.1	Seismic damage type of tunnel arch	246
F.2	Seismic damage type of tunnel bottom	248
Appendix G	Highway tunnel earthquake damage classification and statistics	249
G.1	Tunnel earthquake damage grading	249
G.2	Highway tunnel earthquake damage statistics and disaster characteristics	251
G.3	Proportion of tunnels in different degrees seismic intensity areas	265
Appendix H	The proposal for the clauses of <i>Highway Engineering Seismic Design Code</i> (JTJ 004—89)	268
Index		271

第一篇 桥梁

Part 1 Bridge



