



岩土工程抗震大型复杂试验设计理论及关键技术应用

框架锚索及其组合支护结构 加固边坡的地震动特性研究

付晓 马洪生 张建经 ● 编著



西安交通大学出版社

图书在版编目 (C I P) 数据

框架锚索及其组合支护结构加固边坡的地震动特性研究 /付晓, 马洪生, 张建经编著. —成都: 西南交通大学出版社, 2020.9

(岩土工程抗震大型复杂试验设计理论及关键技术应用)

国家出版基金项目

ISBN 978-7-5643-7628-4

I. ①框… II. ①付… ②马… ③张… III. ①公路路基—锚固—框架梁—边坡加固—地震反应分析 IV. ①U418.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2020) 第 174001 号

国家出版基金项目

岩土工程抗震大型复杂试验设计理论及关键技术应用

Kuangjia Maosuo ji Qi Zuhe Zhihu Jiegou Jiagu Bianpo de Dizhendong Texing Yanjiu
框架锚索及其组合支护结构加固边坡的地震动特性研究

付晓 马洪生 张建经 编著

出 版 人	王建琼
策 划 编 辑	张 雪
责 任 编 辑	姜锡伟
封 面 设 计	何东琳设计工作室
出 版 发 行	西南交通大学出版社 (四川省成都市金牛区二环路北一段 111 号 西南交通大学创新大厦 21 楼)
发行部电话	028-87600564 028-87600533
邮 政 编 码	610031
网 址	http://www.xnjdcbs.com
印 刷	四川玖艺呈现印刷有限公司
成 品 尺 寸	170 mm × 230 mm
印 张	13.25
字 数	239 千
版 次	2020 年 9 月第 1 版
印 次	2020 年 9 月第 1 次
书 号	ISBN 978-7-5643-7628-4
定 价	82.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前言 PREFACE

岩土锚固是通过埋设在地层中的锚杆，将结构物与地层紧紧地连锁在一起，依靠锚杆与周围地层的抗剪强度承受结构物传递的拉力或使地层自身得到加固，以保持结构物和岩土体的稳定。作为一种经济、有效的方法，岩土锚固技术已广泛应用于边坡稳定等工程。“5·12”汶川地震和“4·20”芦山地震震害调查均显示框架锚索及框架锚索-抗滑桩组合支护结构形式具有良好的抗震性能，但由于目前对其抗震机理的认识不足，使其在高烈度地震区复合支护结构的合理选型应用中受到限制。鉴于此，作者整理了在攻读博士学位期间课题组对框架锚索及其组合支护结构的科研成果形成本书，以与广大科研工作者和工程师交流分享。本书主要包括以下内容：

(1) 认识评价路基、边坡与支挡结构抗震性能最直观准确的方法是震害调查，基于汶川地震震害调查资料归纳总结了公路沿线的震害特点及其影响因素，丰富了震害调查数据库，为高烈度地震区支挡结构的合理选型提供了初步判别依据。

(2) 锚固边坡体的抗震效果主要取决于岩土体-锚固体之间的黏结强度，而锚固体体系在动荷载和静荷载作用下的力学机制不同，目前抗震设计仍沿用的静力安全系数控制方法明显存在不足。本书利用室内模型试验研究了岩锚体系在重复荷载作用下的力学特性和黏结性能，提出了位移控制设计的原则，并基于框架锚索加固边坡的振动台模型试验重现了地震时框架-锚索-边坡的动力响应特性，提出了框架锚索加固边坡的抗震设计方法。

(3) 在地形高差显著地段工程中，框架锚索-抗滑桩支护措施得到了广泛应用，但其结构复杂、受力机制不明确，目前对其在地

震荷载作用下的受力特性研究少有人涉及。本书基于原型边坡概化的地质体模型，开展了大型振动台模型试验，研究了抗滑桩-锚索-边坡体系的动力响应特性，提出了锚索轴力地震响应的分区特性与锚索-抗滑桩的协同受力机制。另外，从能量分析角度提出了复杂组合支护结构的抗震设计方法。

本书内容不仅对正确进行框架锚索加固边坡的抗震设计、完善结构-岩土动力相互作用理论及指导岩土工程实践具有重要意义，还能帮助人们深化框架锚索加固边坡体的抗震特点和规律性的认识，完善工程抗震设计技术规范，最大限度地节约工程设计造价，提高公路、铁路工程框架锚索结构的抗震技术服务水平。

本书的成果是在西南交通大学和福州大学结构工程实验室中完成的；在开展各个振动台试验的过程中，中国核动力西南研究设计院和福州大学土木工程学院地震台实验室给予了大力的支持：在此对他们多年的支持表示衷心的感谢。此外还要感谢四川省交通运输厅公路规划勘察设计研究院、核工业西南勘察设计研究院在研究成果应用方面给予的大力支持。由于作者水平有限，书中定会有疏漏和欠妥之处，敬请读者不吝指正。

作者

2018年6月

目录 CONTENTS



1 汶川地震路基及边坡震害调查	001
1.1 “5·12”汶川特大地震概述	001
1.2 汶川地震公路震害调查	007
1.3 汶川地震公路边坡震害	011
1.4 汶川地震公路路基挡土墙震害	036
2 锚固体动荷载试验研究	050
2.1 试验简介	050
2.2 试验成果分析	055
3 框架锚索加固边坡的振动台试验研究	066
3.1 振动台模型试验介绍	066
3.2 边坡位移响应特性	078
3.3 锚索轴力响应特性	096
3.4 加速度响应特性	102
3.5 试验宏观现象	119
4 框架锚索加固边坡的抗震设计方法	124
4.1 锚索动轴力计算方法研究	124
4.2 边坡稳定性分析的能量方法	145
4.3 边坡稳定性分析参数研究	158
5 框架锚索-抗滑桩加固边坡的振动台试验研究	162
5.1 振动台模型试验介绍	162

5.2	支护结构动力响应特性	172
5.3	边坡体动力响应特性	184
5.4	边坡地震损伤识别方法	187
6	框架锚索-抗滑桩加固边坡的抗震设计方法	191
6.1	加固边坡抗震设计计算方法	191
6.2	加固边坡抗震设计流程	201
6.3	与振动台试验结果比较	204
	参考文献	205

1

汶川地震路基及 边坡震害调查

认识评价路基、边坡及支挡结构抗震性能最直接、可靠的方法是震害调查，调查也可用于检验分析理论、模型试验和数值计算结果的正确性。针对国内外发生的多次地震，许多学者开展了现场震害调查分析工作，但限于样本数量不多，所得到的震害一般性规律较少。因此，充分利用“5·12”汶川地震灾区大量的路基及边坡震害作为地震动力性能研究的天然试验场，进一步开展汶川地震灾区路基及边坡震害调查研究，可充实和丰富我国西部高烈度地震区的抗震资料，对促进、完善和优化西部高烈度高山峡谷地形条件下公路建设中支挡结构的抗震设计方法具有重大的工程意义和科学价值。

1.1 “5·12”汶川特大地震概述

发生于2008年5月12日14时28分的汶川地震，震中位于四川省阿坝藏族自治州汶川县映秀镇与漩口镇交界处。根据中国地震局的数据，此次地震的面波震级达 $M_s8.0$ ，地震烈度达到XI度，地震波及大半个中国及亚洲多个国家和地区。“5·12”汶川地震严重破坏地区超过10万平方千米，其中，极重灾区共10个县（市），较重灾区共41个县（市、区），一般灾区共186个县（市、区），具体见表1.1所示。伤亡人数超过10万，是中华人民共和国成立以来破坏力最大的地震，也是唐山大地震后伤亡最严重的一次地震。

表 1.1 汶川地震灾区范围一览

范围类别	省份	县（市、区）
极重灾区 （10个）	四川省	汶川县、北川县、绵竹市、什邡市、青川县、茂县、安县、都江堰市、平武县、彭州市
重灾区 （41个）	四川省 （29个）	理县、江油市、广元市利州区、广元市朝天区、旺苍县、梓潼县、绵阳市游仙区、德阳市旌阳区、小金县、绵阳市涪

续表

范围类别	省份	县(市、区)
重灾区 (41个)	四川省 (29个)	城区、罗江县、黑水县、崇州市、剑阁县、三台县、阆中市、盐亭县、松潘县、苍溪县、芦山县、中江县、广元市元坝区、大邑县、宝兴县、南江县、广汉市、汉源县、石棉县、九寨沟县
	甘肃省 (8个)	文县、陇南市武都区、康县、成县、徽县、西和县、两当县、舟曲县
	陕西省 (4个)	宁强县、略阳县、勉县、宝鸡市陈仓区

四川省公路交通基础设施在此次地震中受到严重破坏,损失约 583 亿元,地震导致的次生地质灾害如崩塌、落石、滑坡等非常发育,造成的路基掩埋、桥梁垮塌、隧道受损见图 1.1~图 1.10 所示。通往极重灾区的公路一度完全中断,给抢险救灾带来了极大的困难。



图 1.1 震中震害航拍照片(映秀)



图 1.2 原水平状的路面抬高 3 m、右旋 1 m 破坏



图 1.3 崩塌砸断桥梁、掩埋路基



图 1.4 隧道洞口及路基震害

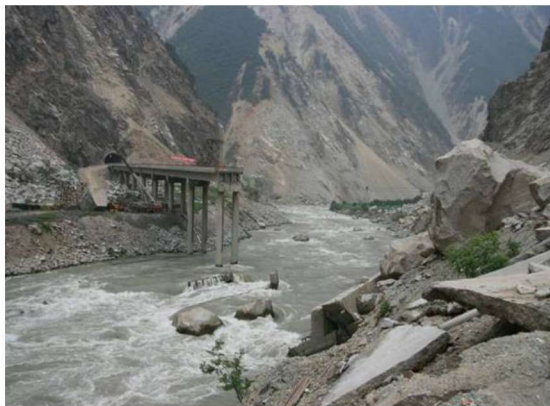


图 1.5 桥梁被落石砸断



图 1.6 崩塌砸断桥梁



图 1.7 落石砸坏车辆、掩埋路面



图 1.8 路基坍塌



图 1.9 路基滑动路面破坏



图 1.10 被巨石砸坏的路面

“5·12”汶川地震及余震与龙门山断裂带有关，具体见图 1.11 所示。龙门山构造带呈 $N40^{\circ} \sim 50^{\circ}E$ 方向斜贯区域，长约 500 km，断面西倾，倾角不定，是一条区域性的活动断裂带。该断裂带主要由茂县—汶川断裂、北川—映秀断裂、彭县—灌县断裂等三条主干断裂组成宽 30 ~ 40 km 的冲断带。“5·12”汶川地震的地表破裂主要发生在北川—映秀断裂上，另外，彭县—灌县断裂在汶川地震中形成了长 70 多千米的地表破裂。

映秀牛眠沟为“5·12”汶川地震的宏观震中，地震直接引发山体破碎形成大量岩体碎屑流，并沿沟道刮铲、碰撞、下泄，松散物质一直堆积于牛眠沟沟口，具体见图 1.12 ~ 图 1.14 所示。

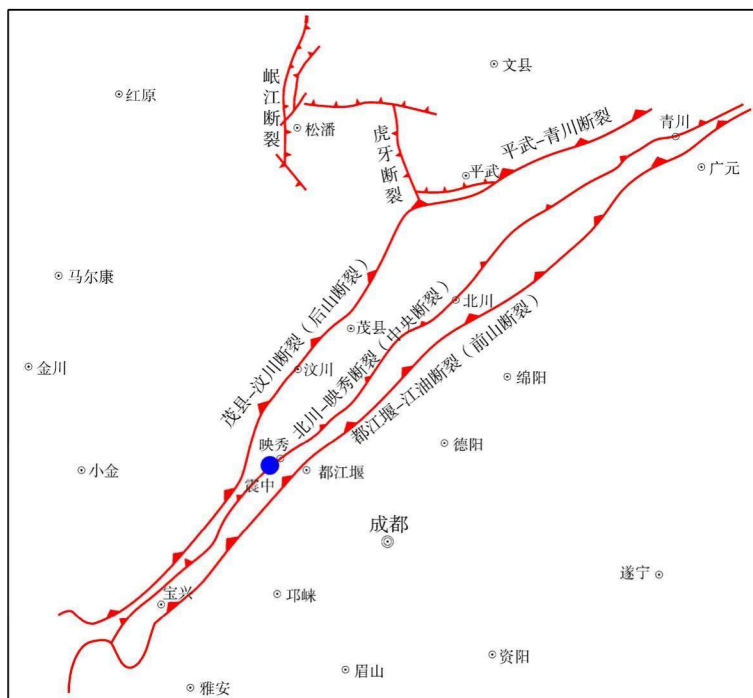


图 1.11 龙门山断裂示意

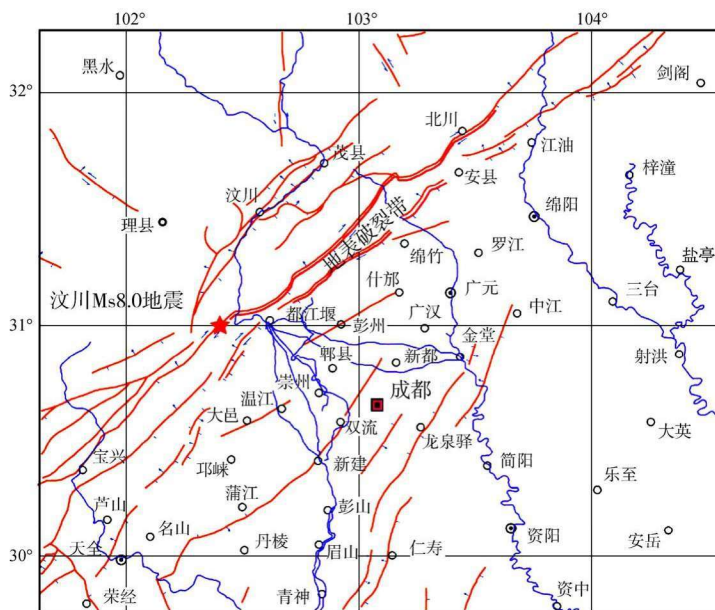


图 1.12 地表破裂示意 (图内地表破裂采用双线示意)



图 1.13 汶川地震宏观震中及碎屑流



(a) 宏观震中 (线条为发震断裂示意)

(b) 碎屑流沿沟道下泄

图 1.14 汶川地震震中震害 (崩塌碎屑流) 现场照片

1.2 汶川地震公路震害调查

1.2.1 震害调查范围

“5·12”汶川地震发生后，四川、甘肃、陕西相关技术人员对通往地震

极重、重灾区公路进行了应急调查和检测。他们对灾区国省干道等约 7 081 km 路段进行了路基震害调查，范围主要包括：

(1) 四川省 VII ~ XI 烈度区内的成都、德阳、绵阳、广元、甘孜州、阿坝州等区域。调查以国道、省道为主，国道涉及国道 108、212、213 和 317 共计 4 条线路，省道包括省道 105、106、302 和 303 等 7 条线路。

(2) 陕西省 VI ~ VIII 烈度区内的汉中、宝鸡、咸阳等区域。调查线路共计 10 余段，国道包括国道 108、210、310 和 316 共计 4 条线路，省道包括省道 104、210、211、212、306、309 以及姜眉公路眉太段 7 条线路。

(3) 甘肃省区域内，主要对 G212（宕昌至罐子沟段，长 316 km）典型路基震害进行了统计和分析，对其中 24 处路基震害进行了重点分析和归类。

1.2.2 震害调查方法

调查组在充分收集前期应急调查、检测评估等阶段震害资料的基础上，对极重、重灾区路基路面震害进行了详细调查。调查资料包括震害工点的踏勘、特征数据测量、素描和影像资料四个部分。具体步骤如下：

(1) 资料收集：收集极重、重灾区公路的建设年代、公路等级、抗震设防烈度、震害工点的施工设计图和竣工资料等。

(2) 现场调查方法：利用卷尺、皮尺、相机、罗盘、定位仪、测距仪等仪器和工具，现场沿路线逐段调查并记录填表，同时利用相机等记录影像，具体见图 1.15 所示。调查时已加固恢复的工点，则对原有震害资料进行收集。



图 1.15 现场调查照片

路基震害调查内容主要细化如下：

(1) 一般路基震害调查：主要对路基开裂、沉陷、滑移等破坏类型进行

分类、确定损毁度及分布范围。

(2) 防护支挡结构震害调查：主要确定抗滑桩、重力式挡墙、加筋土挡墙、锚固框架、锚杆锚索挂网喷混凝土、主动网、被动网等防护支挡结构在地震作用下的震害特点。

(3) 路基工程结构的现场检测：主要对具有明显震害的抗滑桩、桩板墙、框架梁锚头处的预应力锚索结构等在现场进行外观调查和检测。

1.2.3 路基震害调查分类

按路基的组成类型及路基部位，路基震害可分成路基本体震害、边坡震害、支挡结构震害三类，具体见图 1.16 所示。现场调查对这三类震害进行了统计。

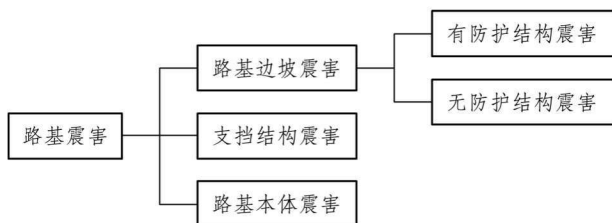


图 1.16 路基震害类型

以早期震害分级为参考基础，经现场评估路基工点的实际震害损毁情况，结合地震后公路的实际使用功能等因素，经综合分析后，调查组提出了震害程度分级标准。震害程度分级标准主要包括轻微破坏、中度破坏、严重破坏、完全损毁共四级，对应不同的震损程度，以 A、B、C、D 表示。各震害等级下的防护支挡结构震害特征详见表 1.2 所示。

表 1.2 防护支挡结构震害等级

等级	震害特征
A0 基本完好	无震害或是基本完好
A 轻微破坏	挡墙震害不明显，震害面积（开裂长度）小于挡墙面积（长度）的 10%，没有丧失支挡功能，震害无须修补，可暂时使用
B 中度破坏	挡墙震害较明显，震害面积（长度）占挡墙面积（长度）的 10%~30%，墙顶位移明显，震后需进行局部修复
C 严重破坏	挡墙震害明显，震害面积（长度）占挡墙面积（长度）的 30%~60%，墙顶位移量较大，挡墙失稳，震后需立即进行修复
D 完全损毁	该段挡墙完全破坏，震后需重新修筑挡墙

路基本体震害程度等级划分详见表 1.3 所示。

表 1.3 路基本体震害等级

等级	震害特征
A0 基本完好	无震害或是基本完好
A 轻微破坏	路基表面无明显震害，路面有细微裂缝、轻微凹陷鼓胀现象，不影响正常使用，震后暂时无须修补
B 中度破坏	路基表面震害较明显，路面有开裂错台、凹凸鼓胀现象，裂缝宽度小于 10 cm，路堤边缘有小范围垮塌现象，路堤边坡落石剥落至路面，造成行车不便，经简单处理能顺利通车
C 严重破坏	路基表面震害明显，路面开裂明显，路面错台严重，裂缝宽度大于 10 cm，路面凹凸鼓胀导致路面损坏，路堤边缘部分垮塌，边坡崩塌落石砸落至路面，边坡滑坡掩埋路面，行车空间狭小或无法通行，能步行通过，经过一定时间清理才能恢复通车
D 完全损毁	路基表面震害剧烈，开裂、错台，凹凸鼓胀导致路基彻底失效，路基大部分垮塌、侧移，边坡崩塌落石砸落堆积路面，砸坏路基并堵塞道路，边坡滑坡掩埋路基，无法通行，经过长时间清理才能恢复通车

路基边坡震害程度等级划分详见表 1.4 所示。

表 1.4 路基边坡震害等级

等级	震害特征
A0 基本完好	无震害或是基本完好
A 轻微破坏	(1) 边坡防护结构震害不明显，震害面积小于结构面积的 5%，震后没有影响边坡防护功能，震后暂时无须修补；(2) 无防护边坡没有明显的滑坡、崩塌，有小部分滑塌、溜坍现象，没有对支挡结构和路基本体造成损害，且处于稳定状态，不影响通车
B 中度破坏	(1) 边坡防护结构震害较明显，震害面积占结构面积的 5%~20%，局部防护结构功能被削弱，震后需进行局部修复；(2) 无防护边坡有滑坡、崩塌现象，对支挡结构造成了损害，对路基本体小范围造成了损伤，经过路面简单处理能顺利通车
C 严重破坏	(1) 边坡防护结构震害明显，震害面积占结构面积的 20%~50%，防护结构遭到震害，局部功能失效，滑塌体震害支挡结构和路基本体，影响正常通车，震后需立即进行修复；(2) 无防护边坡滑坡、崩塌现象较严重，砸毁或整体掩埋支挡结构和路基，造成无法通车，经过一定时间清理才能通车
D 完全损毁	(1) 边坡防护结构震害剧烈，震害面积占结构面的 50%以上，防护功能失效，滑塌砸毁或掩埋支挡结构和路基本体，造成无法通车，经过一定时间清理才能通车，震后需立即重新加固；(2) 无防护边坡产生大规模滑坡、崩塌现象，砸毁并整体掩埋支挡结构和路基本体，堵塞河道造成堰塞湖，造成无法通车，经过长时间清理或者改道才能通车

调查组总计调查了公路路基震害 1488 处，其中：路基本体震害 579 处，边坡震害 534 处，防护支挡结构震害 375 处。路基震害类型见表 1.5 所示。

表 1.5 路基震害类型

路基本体	直接破坏	1. 路基沉陷；2. 路面开裂；3. 路基坍塌；4. 路基错台；5. 路面隆起	
	间接破坏	边坡滑塌及泥石流掩埋路基	
支挡结构	直接震害	1. 墙体垮塌；2. 墙面变形开裂；3. 墙体倾覆；4. 墙体剪断	
	间接震害	1. 边坡垮塌掩埋挡墙；2. 落石砸坏挡墙；3. 挡墙随路基下沉	
边坡	防护结构 震害类型 (间接震害)	1. 剥落	
		2. 垮塌	
		3. 局部鼓胀变形毁坏	
	4. 主动网 破坏	1) 主动网整体拔出；2) 局部锚杆拔出；3) 网被冲破；4) 碎石流挤出；5) 整体掩埋、整体倾覆	
	5. 锚杆(索) 框架破坏	1) 锚杆(索)封头脱落；2) 锚杆(索)锚头失效；3) 锚杆(索)拉断；4) 锚杆(索)预应力损失；5) 框架梁及结点断裂；6) 框架梁表皮开裂；7) 框架梁底部脱空；8) 框架梁鼓胀；9) 框架梁整体滑移	
无防护结构 边坡震害类型 (直接震害)	1. 岩质边坡	1) 崩塌性滑坡；2) 崩塌；3) 落石	
	2. 土质边坡	1) 土质边坡滑坡；2) 土质边坡表层溜坍；3) 边坡表层碎落	

1.3 汶川地震公路边坡震害

1.3.1 边坡震害分布

根据路基震害程度分级标准统计，路基震害程度主要为轻度破坏和中度