

序

随着我国交通运输网向西部拓展，众多线路穿越高烈度山区，常常面临隧道下穿滑坡问题。这些区域地形地质条件复杂，地震作用隧道下穿滑坡的地震波传播互馈机制和空间动力耦合效应尚不明确，给隧道的建设和运营带来极大挑战，使其面临世界罕见的工程病害问题。强烈的构造运动、频繁的地震活动势必给隧道工程带来不利影响，特别是围岩质量差或地层条件复杂的隧道跨滑坡地段。地震作用下隧道洞口段极易出现边坡或者古滑坡滑塌失稳，对建设者提出更加严苛的要求。因此，探究隧道工程建设和运营过程中蕴含的科学问题，对提升复杂艰险山区高速铁路和公路隧道建设的技术水平具有重要意义。

针对我国极端复杂条件隧道建设领域的“卡脖子”现象，中铁西北科学研究院有限公司联合兰州交通大学等单位科技人员进行持续深入的研究，积累了丰富的经验。本书作者结合多年的科研和实践经验，兼顾理论研究和方法实施，经过不断总结、提炼与优化，著成该书。纵阅全书，其突出特点和可借鉴之处主要如下：

- (1) 基于工程地质分析原理，综合考虑“坡体结构、灾变诱发因素、隧道与滑坡的空间组合关系”，制订“隧道-滑坡体系”典型模式分类细则；
- (2) 揭示高烈度区隧道下穿滑坡体系从局域到全域的渐进累积变形特征和成灾模式；
- (3) 提出高烈度区隧道下穿滑坡体系空间动力耦合系统结构损伤评价方法；
- (4) 建立高烈度区隧道下穿滑坡体系典型模式的设计计算方法；
- (5) 构建基于动力刚度匹配基的隧道衬砌减隔震结构精准设计方法，丰富了高烈度区隧道下穿滑坡体系综合防治技术。

高烈度区坡体病害地段陆路交通基础建设工程可能涉及隧道-滑坡的设计、病害整治等问题。该书不仅具有很强的实用价值，而且为改进和提高相关的学术理论和工程技术水平提供参考资料，特为之作序。



原甘肃省地震局局长 王兰民

前 言

滑坡是一种危害极大的灾害，衬砌开裂变形等病害是困扰山岭隧道工程顺利建设和安全运营的突出问题。考虑工程建设和运营过程中隧道和坡体变形具有紧密的相互作用关系，本书提出“隧道-滑坡体系”，指出该体系具有近距离穿越风险大、多场效应耦合突出、环境效应往复叠加、变形和稳定性控制难度大等显著特点。随着我国交通干线穿越复杂艰险山区，越来越多的隧道在西部高烈度区建造，常常面临隧道下穿滑坡问题。受潜在地震作用的影响，尚没有完全认知的新型隧道-滑坡体系类型，孕育机理更加复杂特殊，超出了目前学科认识水平，没有可以直接吸收的经验，所以亟待探究这些工程建设和运营过程中所蕴含的科学问题。

受潜在地震作用和地形地质条件的限制，在建川藏铁路和已建宝兰客运专线、兰新高铁、仁沐新高速马边支线和武罐高速公路等重点项目的隧道工程建设和运营面临世界罕见的工程病害问题。地震诱发滑坡复活引起的隧道-滑坡体系相互作用成为亟待解决的关键科学问题。针对我国极端复杂条件下隧道工程建设领域的瓶颈难题，中铁西北科学研究院有限公司与兰州交通大学合作，通过典型工程实例调研、振动台试验、数值计算和理论计算等手段，开展了高烈度区隧道下穿滑坡体系地震波传播规律及空间变形特征、空间动力耦合系统结构损伤评价方法、衬砌结构荷载和变形及安全下穿距离理论解析、衬砌减隔震技术及抗震型防治结构设计的系统研究，并将有关成果汇总，撰写为本书。本书目的在于使隧道设计工作者能尽早发现设计方案不足，减少类似地震诱发滑坡而造成隧道破坏的事故重现。希望本书对提高复杂艰险高烈度区隧道-滑坡工程防治水平和滑坡地段隧道设计施工有所裨益，对提高复杂艰险山区高速铁路和公路隧道建设的科技水平产生积极意义。

本书共 6 章，第 1 章是绪论，重点介绍高烈度区隧道-滑坡体系发展概况与研究进展；第 2 章是高烈度区隧道下穿滑坡体系模型概化及振动台试验设计和有限元模型建立，重点介绍基于工程地质分析原理的“隧道-滑坡体系”典型模式分类细则与地质力学物理模型构建方法；第 3 章是隧道下穿滑坡体系的地震波传播特性及空间变形特征，重点介绍利用理论分析、振动台试验和动力有限元计算等多元手段，分析隧道下穿滑坡体系从局域到全域的渐进累积变形特征和动力破坏失稳模式；第 4 章是隧道下穿滑坡体系空间动力耦合系统结构损伤评价方法，

重点介绍基于弹塑性效应的地震累积损伤评价指标,即塑性效应指数(PEC),基于能量效应的艾里阿斯烈度动力损伤放大效应评价指标 M_a ,基于频谱幅值的对数正态分布结构动力损伤水平相关性评价指标 LDC,适用于在复杂动力环境下对衬砌结构损伤状态进行定量评价;第5章是高烈度区隧道下穿滑坡体系衬砌结构荷载和变形及最小安全下穿距离理论解析,重点介绍水平地震附加荷载作用的滑坡推力计算方法和隧道-围岩动力相互作用(LSRDI)的子结构-反应位移地震作用计算方法,提出高烈度区隧道结构荷载和变形的理论解,构建高烈度区隧道最小安全下穿距离计算方法;第6章是高烈度区隧道下穿滑坡体系的衬砌减隔震技术及抗震型防治结构设计,重点介绍基于动力刚度匹配基的隧道衬砌减隔震结构精准设计方法和消能组合式新型多锚点圆桩加固技术,为隧道工程在复杂地质条件和动力环境下的建设与运营保驾护航。

本书具有以下特点:①在近百例隧道-滑坡工程案例统计、综合分析的基础上,通过不同类型的系统研究,给科技工作者提供参考,实用性强,避免了理论性、概括性内容多而实例少的弊病;②相关理论来自振动台试验实测和数值计算验证,且拟推广到工程应用中,具有较强的科学性和实用性;③在总结前人研究成果的基础上,介绍近几年新的研究和实践成果,可反映当前国内的前沿水平。

本书各章撰写分工如下:第1章,吴红刚;第2章,牌立芳、吴红刚、马惠民;第3章,吴红刚、马惠民、高岩;第4章,牌立芳、马惠民;第5章,牌立芳、吴红刚、马惠民;第6章,吴红刚、牌立芳、高岩。本书由吴红刚正高级工程师、牌立芳副教授具体组织撰写,李永强教授级高工、王旭教授和陶志刚教授提出部分修改意见和建议,王兰民研究员主审。

本书撰写过程中,得到西南交通大学杨涛教授、杨兵副教授,兰州交通大学严松宏教授、赖天文教授、梁庆国教授、张熙胤教授,中国铁道科学研究院集团有限公司张玉芳研究员,中铁科学研究院集团有限公司廖小平研究员,兰州大学谌文武教授,兰州理工大学朱彦鹏教授,甘肃省交通规划勘察设计院股份有限公司袁永新教授级高工,中铁九局集团有限公司衣忠强高级工程师的指导和支持;孙远武、赖国泉、杨昊天、尹威江、张瑞琦、魏文斌、董占林、关伟、刘旭、梁戡、单宇昂、马雅清、岳融雪、佑任杰、张宇、韦洪、马至刚等为本书振动台试验和数值计算进行了相关基础准备和数据测试工作。书中参考并引用了国内外许多专家学者的研究成果和资料。在此,对所有相关人员和支撑本书出版的学者表示衷心的感谢!

本书紧密结合当前山岭地区交通建设中遇到的隧道-滑坡工程实践,以实用为宗旨,以提炼和推广新理论、新方法、新技术,总结与介绍成熟的工程经验、工程实践与工程运用为目的,既重视理论的阐述与推理,又强调方法的掌握与运用。本书资料丰富、内容翔实且新颖,其研究成果可为高烈度区隧道-滑坡体系

的破坏模式预测及工程安全治理评价提供理论支撑，为类似隧道工程的选线地灾评估和滑坡灾害整治提供技术支撑，助力于解决我国极端复杂条件下工程建设领域的瓶颈难题，将在交通、市政、水利和国防等领域有广泛的应用前景。

由于作者水平有限，书中难免存在不足之处，敬请广大读者批评指正。

作 者

2025 年 4 月

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 高烈度区隧道-滑坡体系发展概况	1
1.2 高烈度区隧道-滑坡体系研究进展	4
1.2.1 隧道-滑坡体系静力学领域研究历程	4
1.2.2 隧道-滑坡体系地震波传播互馈机制	6
1.2.3 隧道-滑坡体系空间动力耦合效应及损伤评价方法	7
1.2.4 隧道-滑坡体系衬砌结构荷载和变形及安全距离	9
1.2.5 隧道-滑坡体系抗减震防治技术	11
1.2.6 亟待解决的问题	12
1.3 本书内容及特点	13
参考文献	14
第 2 章 高烈度区隧道下穿滑坡体系模型概化、振动台试验设计和 有限元模型建立	21
2.1 隧道下穿滑坡体系类型划分及地质力学物理模型建立	21
2.1.1 基于工程地质分析原理的隧道-滑坡体系类型划分	21
2.1.2 基于工程地质分析原理的隧道下穿滑坡体系地质力学物理模型简化	26
2.1.3 隧道下穿滑坡体系典型模式振动台模型概化	35
2.2 振动台试验设计	42
2.2.1 振动台概况	43
2.2.2 模型相似设计及相似材料选择	46
2.2.3 传感器选取及试验模型制作	51
2.3 有限元模型建立	57
2.3.1 PLAXIS 2D 有限元软件简介	57
2.3.2 模型界面设计	58
2.3.3 动力计算步骤	62
2.4 本章小结	62
参考文献	63

第3章 隧道下穿滑坡体系的地震波传播特性及空间变形特征	66
3.1 隧道下穿主滑面典型模式的地震波传播特性及空间变形特征	66
3.1.1 地震波选择及加载工况设计	66
3.1.2 地震作用下衬砌结构动力响应时域特性	69
3.1.3 地震作用下衬砌结构动力响应频域特性	75
3.1.4 隧道下穿主滑面典型模式的空间受力变形模式	77
3.2 隧道下穿牵引段滑面典型模式的地震波传播特性及空间变形特征	80
3.2.1 地震波选择及加载工况设计	80
3.2.2 地震作用下衬砌结构动力响应时域特性	81
3.2.3 地震作用下衬砌结构动力响应频域特性	85
3.2.4 隧道下穿牵引段滑面典型模式的空间受力变形模式	87
3.3 隧道横穿主滑面典型模式的地震波传播特性及空间变形特征	90
3.3.1 地震波选择及加载工况设计	90
3.3.2 地震作用下衬砌结构动力响应时域特性	91
3.3.3 地震作用下衬砌结构动力响应频域特性	95
3.3.4 隧道横穿主滑面典型模式的空间受力变形模式	97
3.4 隧道横穿牵引段滑面典型模式的地震波传播特性及空间变形特征	100
3.4.1 地震波选择及加载工况设计	100
3.4.2 地震作用下衬砌结构动力响应时域特性	101
3.4.3 地震作用下衬砌结构动力响应频域特性	105
3.4.4 隧道横穿牵引段滑面典型模式的空间受力变形模式	106
3.5 本章小结	109
参考文献	110
第4章 隧道下穿滑坡体系空间动力耦合系统结构损伤评价	112
4.1 基于弹塑性效应的隧道衬砌地震累积损伤评价	113
4.1.1 隧道衬砌地震累积损伤评价指标	114
4.1.2 隧道横穿主滑面空间动力耦合系统地震累积损伤 PEC 评价	119
4.1.3 隧道横穿牵引段滑面空间动力耦合系统地震累积损伤 PEC 评价	121
4.2 基于能量效应的隧道衬砌结构损伤评价	123
4.2.1 基于能量效应的艾里斯烈度动力损伤放大效应评价指标	124
4.2.2 隧道横穿主滑面空间动力耦合系统 M_{fa} 损伤评价	125
4.2.3 隧道横穿牵引段滑面空间动力耦合系统 M_{fa} 损伤评价	128
4.3 基于频谱差异的隧道衬砌结构损伤水平相关性评价	132
4.3.1 基于频谱幅值的对数正态分布结构动力损伤水平相关性评价指标	133

4.3.2 隧道下穿主滑面空间动力耦合系统损伤水平相关性评价	135
4.3.3 隧道下穿牵引段滑面空间动力耦合系统损伤水平相关性评价	141
4.4 本章小结	147
参考文献	148
第 5 章 高烈度区隧道下穿滑坡体系最小安全下穿距离计算	149
5.1 基于水平地震附加荷载作用的滑坡推力计算	150
5.1.1 经典力学的传递系数法滑坡推力计算	150
5.1.2 基于地震波传播时域特性的附加水平地震力计算	151
5.1.3 基于地震波传播时域特性的附加滑坡推力计算	153
5.2 子结构-反应位移地震作用计算	154
5.2.1 经典反应位移法地震作用计算	155
5.2.2 基于土-结构相互作用分析的子结构地震作用计算	156
5.2.3 基于 LSRDI 效应的子结构-反应位移地震作用计算	157
5.3 高烈度区隧道结构荷载和变形的理论解	159
5.3.1 隧道横穿基岩典型力学模式理论解	159
5.3.2 隧道横穿滑体典型力学模式理论解	166
5.3.3 隧道横穿滑面典型力学模式理论解	169
5.4 高烈度区隧道最小安全下穿距离计算	172
5.4.1 隧洞施工径向扰动深度	172
5.4.2 松动岩土体的挤压带拱高	178
5.4.3 最小安全下穿距离	180
5.5 本章小结	181
参考文献	182
第 6 章 高烈度区隧道下穿滑坡体系的衬砌减隔震技术 及抗震型防治结构设计	183
6.1 岩土地震工程 DGS-100 振动台研发及可靠性验证	185
6.1.1 DGS-100 动态试验加载全数字伺服控制系统研发	185
6.1.2 地震模拟振动台系统组成及工作可靠性检算	187
6.1.3 地震模拟试验台振动伺服油缸工作参数核定及设备可靠性评价	189
6.1.4 振动台设备地基基础处理及可靠性评价	192
6.2 高烈度区隧道下穿滑坡典型模式衬砌减震层优化设计效果评价	200
6.2.1 基于刚度匹配原则的隧道衬砌减震层设计	200
6.2.2 振动台试验设计	209
6.2.3 不同加载序列衬砌结构加速度响应减震效果评价方法	217
6.2.4 不同加载序列衬砌结构动应变响应减震效果评价方法	226

6.3 新型多锚点锚索圆桩加固高烈度区隧道横穿滑面典型模式的 抗震性能评估	236
6.3.1 新型多锚点锚索圆桩抗震结构设计优化	236
6.3.2 振动台试验设计	239
6.3.3 不同加载序列多锚点锚索圆桩加速度响应抗震效果评价方法	248
6.3.4 不同加载序列多锚点锚索圆桩动应变响应抗震效果评价方法	257
6.4 本章小结	268
参考文献	269

第1章 绪 论

随着我国经济的高速发展,交通运输网逐步向西部山区拓展,众多交通干线穿越西部高烈度山区,桥隧占比急剧攀升^[1]。我国山区地形地质条件复杂,地质灾害频发。隧道作为交通线路的控制性工程,在高烈度区选线时常常遇到无法规避的滑坡等地质灾害。当线路不得不以隧道形式穿越滑坡地段时,地震诱发滑坡复活引起隧道下穿滑坡体系的相互作用机理与综合防治技术将会成为隧道工程建设和运营面临的复杂工程病害问题。潜在震害区滑坡地段修建隧道,与单纯的地震-滑坡问题和隧道-地震问题存在本质区别,必须将三者看成一个整体进行研究,分析三者之间的相互作用关系。地震诱发滑坡复活引起的隧道-滑坡体系相互作用将成为科学界面临的罕见难题,将给隧道工程建设和运营带来更多世界性的重大挑战。



扫码查看
本章彩图

本书结合中铁西北科学研究院有限公司(简称中铁西北院)、兰州交通大学 60 余年铁路建设核心技术攻关的硕果积淀,以及数十年交通地质灾害致灾机理研究及防治经验,重点探讨地震作用下隧道-滑坡体系的变形特征与相互作用机理、隧道下穿滑坡体系的工程安全评价及变形控制技术等几方面的问题。

1.1 高烈度区隧道-滑坡体系发展概况

2018 年 10 月 29 日~2023 年 10 月 29 日,我国共发生 4 级以上地震 848 次,其中 4.0~4.9 级 678 次,5.0~5.9 级 142 次,6.0~6.9 级 27 次,7.0 级以上 1 次,最大地震是 2021 年 5 月 22 日在青海果洛州玛多县发生的 7.4 级地震。

我国地处欧亚地震带和环太平洋地震带这两个活跃的地震带上,是一个地震频发的国家。20 世纪以来,我国经历了四个地震活跃期,目前正在经历第五个地震活跃期^[2]。近段时间在欧亚地震带(西南、西北地区)地球内部活动强烈,地震活动频繁。

在山区特别是高烈度区复杂环境下,地质结构复杂,地质环境脆弱,修建隧道交通基础设施等重大工程,将会不可避免地遇到滑坡等灾害。我国滑坡灾害分布广泛。除原有山区复杂环境崩滑灾害外,隧道工程建设扰动及地震作用诱发的滑坡灾害问题也日益突出,其数量之多、规模之大、灾害之严重、处治之困难,

世界罕见。

目前,高烈度区复杂环境下交通隧道重大工程滑坡灾害防控存在以下三大工程技术难题。

(1) 灾害机理认识不清。复杂环境下交通隧道重大工程的滑坡灾害地形地质条件千差万别,共性少、个性突出。在项目实施前,相关的地质勘察设计规范不成熟,前期勘察工作不足或不当,导致对滑坡灾害机理认识不清,尤其是对滑坡地质体坡体结构与地震作用影响认识不足,难以事先避开复杂不良地质体,造成交通隧道重大工程巨大浪费与安全隐患。

(2) 灾害风险评估体系不完善。交通隧道工程建设的全寿命周期理念已被广泛接受,滑坡等典型边坡灾害作为重大工程建设安全防控的重点,有其形成、发展、发生、消亡的过程。认识灾害发生的演变过程,尤其是地震作用触发隐患,是“科学主动防控”的前提。这就需要结合交通隧道工程建设各阶段特点开展针对性风险评估,即勘察设计阶段的灾害预测评估,施工阶段施工安全风险评估及运营阶段的安全后评估。

(3) 灾害防治技术亟须提升。占支挡加固工程总量 60%以上的滑坡灾害锚固工程,其化学稳定性、与锚固结构有关的地震锚固性能可靠性、施工质量隐患三大技术难题尚未完全解决,工程界普遍担忧其长期安全可靠性,亟须开发地震作用下安全耐久的锚固新技术。

根据规划,2021~2035 年,我国公路、铁路、矿山等重大工程建设仍持续增长,且越来越多的重大工程逐渐从建设阶段转入运维阶段。当前我国交通事业正值蓬勃发展时期。

改革开放以来,我国铁路隧道建设取得长足发展。截至 2022 年底,我国铁路营业里程达到 15.5 万 km,其中,投入运营的铁路隧道 17873 座、总长 21987km;投入运营的高速铁路总长超过 4.2 万 km,共建成高速铁路隧道 4178 座、总长 7032km,其中,长度大于 10km 的高速铁路特长隧道 105 座、总长约 1339km;投入运营的特长铁路隧道共 259 座、总长约 3498km,其中,长度 20km 以上的特长铁路隧道 12 座、总长约 283km^[3]。我国铁路隧道 1979 年与 2022 年发展情况对比如图 1-1 所示。

截至 2022 年底,我国公路总里程达到 535 万 km,其中高速公路通车里程 17.7 万 km,稳居世界第一^[4]。近年来,我国公路隧道建设规模不断扩大,成为隧道通车里程最长、规模最大的国家之一。截至 2022 年底,我国公路隧道共有 24850 座、总长 26784.3km,其中特长隧道 1752 座、总长 7951.1km,长隧道 6715 座、总长 11728.2km^[5]。我国公路隧道 2009 年和 2022 年发展情况对比如图 1-2 所示。

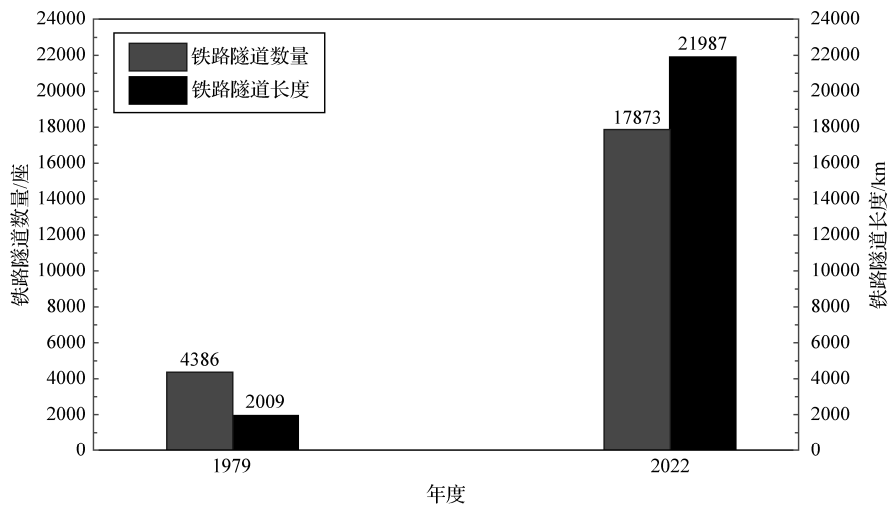


图 1-1 我国铁路隧道 1979 年与 2022 年发展情况对比^[3,6](截至 2022 年底)(扫码查看彩图)

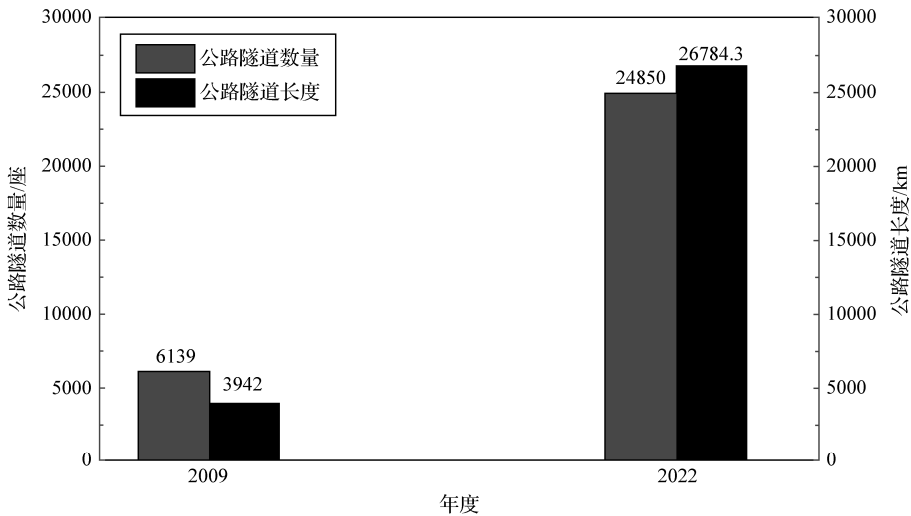


图 1-2 我国公路隧道 2009 年和 2022 年发展情况对比^[5,7](截至 2022 年底)(扫码查看彩图)

通常情况下隧道工程震害比房屋、桥梁等地面建筑轻微^[8]，但随着地下结构数量的增多，其震害问题受到越来越多关注。在强震下，隧道地下工程震害依然比较突出。表 1-1 列举了国内外部分隧道震害调查结果。

表 1-1 国内外部分隧道震害调查结果

序号	年份	震害实例	震级	隧道位置	隧道破坏情况		国别
					数量/座	破坏形式	
1	1923	关东大地震 ^[9]	7.9 级	隧道距震中较近，均未穿越断层	25	拱部和边墙坍塌，衬砌开裂和变形错动，洞门破坏等	日本

续表							
序号	年份	震害实例	震级	隧道位置	隧道破坏情况		国别
					数量/座	破坏形式	
2	1930	北伊豆大地震 ^[9]	7.0 级	隧洞横穿丹那山断层	1	主隧道边墙数处裂缝	日本
3	1952	加州克恩郡大地震 ^[10]	7.3 级	位于白狼断层破碎带	4	边墙被压溃, 透顶坍塌, 衬砌断裂剥落	美国
4	1999	集集大地震	7.6 级	隧道距震中较近	57	衬砌混凝土块龟裂、掉落, 甚至钢筋弯曲等	中国
5	2008	汶川地震 ^[11]	8.0 级	穿越活断层或断层破碎带, 岩体结构面较发育	110	洞口边仰坡垮塌, 衬砌环向、纵向和斜向开裂, 二衬坍塌, 仰拱隆起	中国

对隧道震害资料的收集, 国内外学者已经做了很多工作。1995 年日本阪神 7.3 级地震后, Demachi 等^[12]对各类已建或正在修建隧道的破坏特征情况进行了分类调研, 发现围岩质量差、高烈度区的隧道结构破坏情况较为严重; Konagai 等^[13]对日本岩手县一座铁路隧道进行多次地震观测, 得到围岩加速度和衬砌结构应变等现场记录; 崔光耀等^[14]对汶川地震后 40 座公路隧道洞口段震害部位和比例进行统计分析, 发现隧道洞口边仰坡崩塌、滑坡和洞口段衬砌结构损坏占一半以上。目前原型观测主要以隧道震后调研为主, 分析隧道衬砌结构的震害形态及其变形机理, 对正确采取衬砌结构的抗震措施及高烈度区修建隧道工程具有重要意义。

近年来, 全球各地地震频发。根据山东省地震局的相关记录, 2022 年我国 5.0 级以上地震达 53 次之多(主要发生在西南和西北地区), 强震发生相对频繁。地震灾害将成为我国交通行业今后面临的最主要地质灾害之一。川藏铁路、西成铁路等超级工程, 楚大高速公路、仁沐新高速马边支线、渭武高速公路、宝兰客运专线、兰新高铁和武罐高速公路等重点工程受地形地质条件的限制, 均处于高烈度区^[15]。地震作用成为影响隧道工程抗震设防目标确定的主导因素。在高烈度区隧道建设和运营中面临世界罕见的工程病害问题。地震作用下隧道-滑坡体系的地震波传播互馈机制和空间动力耦合效应尚不明确, 没有可以直接吸收的国内外经验, 对建设者提出了更加严苛的要求, 因此亟待探究这些隧道工程建设和运营过程所蕴含的科学问题。

1.2 高烈度区隧道-滑坡体系研究进展

1.2.1 隧道-滑坡体系静力学领域研究历程

交通隧道工程建设时, 要尽量避免经过滑坡与其他斜坡变形区^[16]。一方面,

一些滑坡或不稳定斜坡在勘察、施工阶段难以识别,或受山地地形等条件限制,隧道工程地质选线时往往要经过滑坡与其他斜坡变形区^[17]。另一方面,稳定或无明显变形的边坡在隧道施工扰动和地震地质演化作用下易发生较大变形,甚至发展为滑坡^[18]。许多滑坡与其他斜坡变形场地的隧道工程演变为“隧道-滑坡”问题,使得隧道衬砌结构出现不同程度的病害,影响甚至中断隧道的正常运行。隧道-滑坡相互作用引起的问题日益突出,已成为地下工程的热点问题^[19]。

国内外学者对滑坡或不稳定斜坡区隧道工程的研究重点聚集在衬砌损伤变形及破坏特征、滑坡体与隧道相互作用机制及隧道衬砌结构病害治理举措等方面。基于极限分析, Mollon 等^[20]提出一种新的二维破坏机制来确定开挖面的临界坍塌压力; Kitagawa 等^[21]研究地下工程开挖过程引起的坍塌、顶板塌陷、底鼓等地质灾害的围岩结构和力学特性; 马惠民^[17]、张鲁新等^[22]、毛坚强等^[23]综合分析了山区铁路干线多处滑坡导致隧道衬砌结构变形开裂的机理,总结了在滑坡条件下不同段隧道衬砌结构的开裂特征; Chiu 等^[24]通过现场调查获得了隧道衬砌结构裂缝的全面记录,利用 2008~2015 年的高分辨率衬砌断面图像,获取了某山区隧道在边坡变形影响下的详细变化; Shalabi^[25]、黄生文等^[26]、杨长城^[27]、贾明辉^[28]、杨小礼等^[29]、郭乾^[30]、张靓^[31]、周文皎^[32]等学者基于隧道-滑坡的典型工程案例,通过现场调查、数值计算、理论分析和现场监测等研究手段,重点分析了滑坡体失稳与隧道变形之间的相互作用问题。

随着研究人员对隧道-滑坡体系相互作用变形机理认识的逐渐深入,针对该复杂体系防治措施的研究步伐也越来越快。许多学者根据实际工程案例提出了不同的隧道-滑坡体系加固设计方案。陶志平^[33]、牌立芳等^[34]研究了抗滑桩加固隧道-滑坡病害的效用和对策,并提出了抗滑桩加固隧道-滑坡病害的应用范畴及妥善的布桩形式; 张伟等^[35]以宝天高速公路码头隧道洞口滑坡为典型案例,通过非线性有限元分析,揭示了隧道衬砌结构与滑坡变形区的分布特征并给出了对应的治理措施; 邓荣贵等^[36]以巨厚滑体内隧道衬砌结构为典型案例,辅以抗滑桩和锚索加固措施,与隧道衬砌结构自成一体,提出了一种滑坡区隧道-锚索-抗滑桩组合自锚式加固体系; 许志樟^[37]以漳龙高速公路隧道滑坡为典型案例,提出采用截水沟-水平孔排水与抗滑桩相结合的整治方案; 尹静^[38]对滑坡区隧道-锚索-抗滑桩组合自锚式加固结构进行深入分析,揭示了滑坡区隧道-锚索-抗滑桩组合自锚式加固结构的协同工作性能; 谭红^[39]以赣龙铁路马蹄径隧道滑坡为典型案例,对其变形机理和稳定性进行评价分析,综合提出了削方减载+预应力锚索、抗滑桩+明洞的整治方案。

滑坡是山岭地区隧道建设过程中最常遇到的一种复杂的地质灾害之一,很多时候隧道将不得不临近乃至直接穿越滑坡变形区。隧道穿越斜坡区赋存古老滑坡体或具备滑坡形成的条件,隧道施工开挖或运营期遇到暴雨、地震等自然灾害时

极易诱发古老滑坡体复活或造成新滑坡产生,继而引起隧道衬砌结构变形,致使交通线路无法正常施工及安全运营。因此,隧道等地下结构并非绝对安全,其抗震性能亦需要引起足够重视。

1.2.2 隧道-滑坡体系地震波传播互馈机制

1.2.2.1 坡体对地震波传播规律的影响

地表起伏使地震波在近地表传播变得异常复杂。地表散射以及体波和面波相互转化、地表降低波速带使得地震波出现频带变窄、频率降低情况^[40]。在地表地形与岩土体内部地震波传播的研究及应用方面,石油探测、采矿和岩土爆破等领域的介入较早^[41-45]。

学者逐渐意识到不均匀地层,尤其是断层等对地震波传播的影响。Walter 等^[46]和 Marra 等^[47]通过尤卡断层地下核爆记录数据分析了断层对近场地震波传播的影响,认为断层主要影响地震波传播的频率。国内学者也在这方面进行了持续研究,主要集中在结构面和破碎带中地震波的传播规律研究。梁建文和韩红霞^[48-49]利用有限元方法研究了断层破碎带对地震波放大作用的基本规律和非线性放大的影响;万志清等^[50]通过模型试验从能量角度阐述了地震波的运动学特征,发现埋藏基岩面对地震波传播产生汇聚与发散作用;王大伟^[51]及 Wang 等^[52]用理论分析和数值方法探讨了断层对地震波传播的影响。

言志信等^[53]、江学良等^[54]基于含连拱隧道软弱围岩边坡振动台试验,分析得到软弱围岩边坡在岩体分界面处的加速度响应尤为显著,岩体极易失稳;王树明^[55]对黄土边坡进行了大型振动台试验并采用 Midas-GTS 有限元软件进行模拟计算,发现黄土边坡的加速度放大效应随坡高呈非线性增大变化;李果^[56]及宋丹青等^[57]通过大型振动台试验的研究手段,研究了软岩顺层、反倾,硬岩顺层、反倾这四类边坡结构的地震动力响应,揭示了不同边坡结构内地震波传播特性及其破坏特征;刘汉香等^[58]利用振动台试验,结合离散元数值模拟对典型反倾层状岩质边坡进行了分析,结果表明地震波频率对边坡的变形破坏有显著影响。

关于地震-滑坡方面的研究,国内外研究学者逐渐向滑坡内部地震波传播和动力响应特征方面寻求解释。Paola 等^[59]和 Vincenzo 等^[60]通过实测振动响应,对滑坡内地震波传播速度进行了研究;涂杰文等^[61]、李磊^[62]通过振动台试验和离心机试验,考虑输入波特性,分析了滑带对地震波的吸收作用。

复杂近地表斜坡中地震波的传播特性重点强调波传播与介质关系。国内外许多研究学者对该领域进行了长期研究,地震波在近地表斜坡内的传播理论取得重大发展。学者研究发现,不同坡体构造类型、不同坡体材料及不同地层岩性等对地震波传播特性产生的影响具有明显的差异性,针对地震波在坡体中的传播特性

在多因素影响作用下的动力响应差异仍需深入研究。

1.2.2.2 隧道结构对地震波传播规律的影响

宏观的地震响应分析结果表明,通常地下结构在地震作用下随周围土体一起振动,隧道衬砌结构动力响应和围岩基本相似^[63-64]。但是,在隧道衬砌结构局部损伤和抗震稳定性分析时,却不能忽略隧道衬砌结构区域特征对地震波传播的影响。

Mohsen 等^[65]、Abdel 等^[66]、Hatzigeorgiou 等^[67]对地震作用下隧道-围岩动力相互作用进行了综合研究;胡鸿运等^[68-69]建立了适用于顺层岩体隧道的波动分析方法,就顺层地层隧道地震响应非对称或反对称的显著性与岩层倾角、岩层各向异性强度的关系进行了探讨;Xu 等^[70]提出了地下圆形隧道衬砌结构在入射平面 P 波作用下的动力响应波动方程系列解,研究得到了不同因素对圆形隧道衬砌结构的影响,包括入射频率、入射角、埋深、岩石条件和衬砌刚度;赵华^[71]将频域内间接边界元法与傅里叶时频变换相结合,研究发现地铁隧道对地表地震波传播具有显著的非线性放大作用。程选生等^[72]及鲁得文等^[73]通过大型振动台试验,研究了黄土区隧道衬砌结构的加速度动力响应放大效应,发现黄土隧道衬砌结构的动力响应与地震动强度、持时及频谱特性有关。

通过上述研究发现,目前学者对隧道结构的动力响应研究主要关注地震波在传播过程中对地震动参数及隧道结构的影响。其中,地震动参数的影响包括地震动强度、地震持时以及地震波频谱特性等,隧道衬砌结构的影响包括隧道埋深、隧道衬砌结构类型、围岩条件等。研究隧道结构区域特征对地震波传播的影响,可为后续高烈度区隧道下穿滑坡的动力响应研究提供基础参考。

1.2.3 隧道-滑坡体系空间动力耦合效应及损伤评价方法

1.2.3.1 基于振动台试验的隧道与滑坡动力响应研究

出现病害的工程体系都有各自工程条件下启动、发育、成型等阶段发展的特征,采用合理的研究和分析方法,可确定其所在阶段病害的机理和发展趋势。地震的发生具有随机性,因此研究地震作用下自然坡体和工程结构的动力响应、抗震性能和稳定性时,振动台试验是一种较为科学、便捷和可信度高的研究手段。

目前对隧道衬砌结构动力响应的研究重点集中于隧道横跨断层区、隧道埋深、隧道-围岩相互作用及隧道洞口边仰坡等^[74-78]。李林等^[74]分析了不同隧道埋深和不同入射波频率对地表水平加速度的影响规律。研究结果表明,随着隧道埋深的增大,其对地表加速度峰值的影响变小,洞周 5 倍隧道半径范围内近似呈线性递增;李延涛等^[77]通过隧道-土-相邻上部结构体系振动台试验,得到隧道-土-相邻上部结构相互作用区的土体加速度明显大于同高度处土体加速度;Lei 等^[79]模拟三个不同偏压

角非对称荷载模型隧道开挖,探究衬砌和围岩的破坏机理,总结其失效过程为局部运动→深侧拉伸区域表面裂纹→滑移向深处发展;Hu 等^[80]通过薄弱夹层的模型测试和数值模拟,分析了两种模型在岩石压力、位移、裂缝和应变等方面的差异。牌立芳等^[81]通过振动台试验研究得到了地震作用隧道下穿滑坡典型类型的失稳机理和成灾模式;Gomes 等^[82]运用动力分析法揭示了土层与刚度比对圆形隧道衬砌结构地震响应的影响;Geni^[83]通过有限元计算发现,在地震波幅值大于 0.5g 情况下,隧道进洞仰坡及洞口段 20~50m 范围极易产生重大损坏。

振动台试验目前已成为研究地震作用对滑坡启动机制和地震波在滑坡中传播等的主要手段。朱雷等^[84]利用振动台试验和数值计算方法对斜坡变形破坏过程的控制作用进行了研究;Chen 等^[85]利用小型振动台试验研究了水平和垂直向地震波影响下的颗粒状滑坡沉积物的特征;黄润秋等^[86]通过振动台试验,揭示了反倾、顺倾两种结构岩质边坡在强震条件下的地震动力响应,并总结了它们的破坏模式;Wei 等^[87]通过振动台试验,研究了地震对沉积物中的扰动现象,该现象是地震触发湖相沉积物液化并流动而产生的。

当前采用振动台试验对隧道和滑坡单体的研究相对较多,取得了很多有价值的研究成果。但是,将隧道-滑坡视为一个系统,进行振动台试验,获得坡体、隧道结构和滑面周围的动力响应特征,总结体系的变形破坏模式还未见报道。

1.2.3.2 地震作用下隧道衬砌结构损伤评价方法

地震作用下隧道衬砌结构损伤形式主要包含变形、开裂、压溃和错台等^[2]。隧道衬砌结构如果开裂损伤,不仅难以修复,而且影响隧道的正常运行,导致衬砌结构及照明、通风等各种辅助设备侵蚀损坏。如果衬砌结构发生损坏,就会降低其有效厚度,从而降低结构安全性和可靠性。随着结构损伤的不断发展,衬砌结构最终会失效损坏,危及公共行车安全^[88]。

1989 年 10 月 17 日美国加州洛马·普雷塔(Loma Prieta)地震(7.1 级)和 1994 年美国北岭(Northridge)地震(6.7 级)发生后,基于性能的地震工程(performance based earthquake engineering, PBEE)抗震设计方法逐渐为大多数人所接受,并得到广泛应用^[89-90]。在 PBEE 抗震设计方法中,地震动强度指标(seismic intensity index, SII)是影响计算结果精度最重要的环节之一,也是联系地震作用与结构响应之间的纽带。鉴于地震动的随机过程性与结构损伤状态的繁杂性,明确一个综合反映 SII 大小的指标用于结构损伤分析,成为岩土和结构工程领域抗震分析所面临的亟待解决的关键技术问题。

国内外学者针对不同 SII 与结构损伤评价相关性开展了许多研究。Riddell^[91]以单自由度系统(single degree of freedom system, SDOFS)为研究对象,对 23 个 SII 与弹性和非弹性变形需求、输入能、滞回能以及非线性响应 4 个结构响应变量进

行研究, 结果表明: 没有一个指标同时适用于加速度、速度和位移三个反应谱敏感区, 加速度型 SII 仅适用于加速度敏感区, 速度型 SII 仅适用于速度敏感区, 位移型 SII 仅适用于位移敏感区; 张成明等^[92]基于整体式非线性动力时程分析法, 建立了圆形隧道-围岩相互作用二维有限元模型, 以衬砌横断面整体压缩损伤指数(compression damage index)和拉伸损伤指数(tensile damage index)作为结构损伤指标评估隧道衬砌结构损伤状态, 对比分析工程中常用的 20 种 SII 在圆形隧道衬砌结构损伤评价中的适用性; 叶列平等^[93]参考先前学者的相关成果, 总结归纳当前主要的 33 个 SII, 基于弹塑性 SDOFS 和多自由度系统(multi-degree of freedom system, MDOFS)的代表性地震响应指标, 分析得到了不同 SII 与不同结构地震响应指标之间的相关性; Mehanny 等^[94]将非线性时程分析结果与特定场地的危险曲线相结合, 建立了计算结构超过其倒塌极限状态的年平均概率方程, 提出了一种评估框架结构地震倒塌性能的方法; 张艺欣等^[95]基于大量高层钢筋混凝土(reinforced concrete, RC)框架结构增量动力分析结果, 揭示了谱加速度指标 $S_a(T)$ 随弹性反应谱周期 T 的变化规律, 提出了一种综合考虑该类结构地震反应分析特点的多周期平均谱加速度指标。除此之外, Zhong 等^[96]、Padgett 等^[97]对桥梁结构的 SII 评价进行了研究; Kostinakis 等^[98]、Elenas^[99]和卢啸等^[100]对房屋结构的 SII 评价进行了研究; 邱意坤等^[101]对高耸结构的 SII 评价进行了研究; Hariri-Ardebili 等^[102]对水坝结构的 SII 评价进行了研究。

通过上述研究发现, 关于地震作用各类大型地面结构评价指标的研究主要集中在桥梁结构、房屋结构、高耸结构和水坝结构等方面。对于地下结构, 特别是隧道衬砌结构等地震动强度评价指标研究相对较少。隧道等地下结构由于受到周围围岩的约束, 地震反应特性与地上结构存在明显不同, 其地震响应主要受控于周围岩土体的变形。因此, 对于各类型 SII 在地下结构的适用性仍有待考证。

1.2.4 隧道-滑坡体系衬砌结构荷载和变形及安全距离

1.2.4.1 隧道-滑坡衬砌结构荷载和变形

对隧址区隧道衬砌结构开挖造成的围岩应力分布及变形, 国内外学者做了许多研究。白运洲^[103]以某大跨度隧道工程为依托, 基于模型试验的研究手段, 得到了断层破碎带围岩条件下大跨度隧道衬砌结构荷载分布与变形特性以及初衬与二衬结构的分担荷载比; Verruijt^[104-105]通过理论分析给出了具有一定变形的圆形隧道弹性半平面问题的解析解, 解析使用复变量, 用保角映射到一个圆环上, 应力函数的洛朗级数展开系数可通过解析和数值计算结合来确定; 宋浩然等^[106-107]通过复函数法, 借助 Verruijt 保角映射公式, 以半无限平面映射为圆环, 使用解析函数将圆环域复势函数展开为洛朗级数, 借助地表和洞周边界条件, 并利用收敛环

展开求解,从而得到浅埋隧道在地表荷载和围岩自重下的围岩应力场。

关于地震作用下隧道衬砌的剪切荷载变形、位移、内力等动力响应,国内外学者也开展了大量研究。王鹏^[108]以骡坪隧道为例,利用快速拉格朗日分析连续体3D(FLAC^{3D})对地震荷载作用下该隧道衬砌在不同埋深情况下的位移、振动速度变化特征及规律进行了详细的动力分析;隋来才^[109]考虑地震剪切荷载,用等效圆环法求得盾构隧道衬砌的等效刚度系数,并通过实例求得地震剪切荷载下的等效刚度系数;Wang等^[110]用弹性动力学相关理论描述衬砌结构的动力响应,发现衬砌结构环向应力分布不均,最大和最小环向应力值位于隧道拱顶和仰拱;陈艺丹^[111]依托某铁路隧道,研究了软弱夹层处隧道衬砌的地震动力响应规律,通过分析衬砌拱顶、拱腰、拱脚以及拱底位置的加速度、位移、主应力及内力等数据,得到衬砌的动力响应规律以及衬砌结构的安全系数。

通过上述研究可以发现,关于静力学方面隧道衬砌的荷载和变形研究主要集中在隧道衬砌开挖造成的周围围岩应力分布;关于地震作用下隧道衬砌的荷载和变形研究主要集中在地震作用和围岩影响二者耦合;关于地震、隧道、滑坡三者耦合作用下的衬砌结构荷载和变形理论解尚未见到相关文献报道。

1.2.4.2 安全距离计算方法

关于安全距离的研究及应用开始于煤矿领域,且主要集中在巷道和安全顶板在垂直、水平方向的安全距离,以及巷道与断层、路基等建构筑物的安全距离。李传磊等^[112]采用理论分析、FLAC^{3D}数值模拟和现场实测的方法,确定了两垂直重叠巷道的最小安全距离和支护方案;程世贵^[113]综合经典土力学和松动圈理念确定出井底车场附近巷道至 F_{12} 断层影响带之间的最小安全距离;汪锋等^[114]采用数值计算和现场监测相结合的方法,定义了动应力边界线,研究了顶板巷道变形的原因以及如何设计保护煤柱高度。

隧道下穿滑坡时,隧道与滑面的安全距离成为工程选线隧道设计时的重要参数。在隧道-滑坡体系的研究中,中铁西北科学研究院有限公司(原国家铁路局科学研究院西北分院)曾依托“坡体病害地段隧道变形机理及其防治技术”科研项目^[115],对滑坡与隧道相互作用方面的理论、模型试验等开展了大量的研究,而后基于对此类工程认识的逐渐深入,几代科技人员一直对此进行持续深入的研究,开展了大量隧道-滑坡体系的工程实践、模型试验、数值计算和理论分析。吴红刚等^[116-117]在理论方面推导了静力状态下最小安全下穿距离;Zhang等^[118]基于滑移线理论推导了隧道开挖对围岩扰动范围公式,得出隧道正交穿越滑坡体的最小安全下穿距离的解析表达式,但仅限于静力学范畴。

关于隧址区动力学方面的安全距离界限问题,陈林杰^[119]综合理论分析、数值