

# 框架梁锚固边坡支护结构研究进展综述

张军辉,周勤伟,黎峰,张石平

(长沙理工大学 交通运输工程学院,湖南 长沙 410114)

**摘要:**该文综述了国内外边坡支护加固工程中框架梁锚固结构的研究现状,主要对结构设计、模型试验、现场施工3个方面的成果进行简要总结和分析。通过归纳分析发现:当前框架梁锚固结构设计有一定局限性,需要形成普适性的设计理论和方法;框架梁锚固边坡支护结构的模型试验受限于试验设备和条件,尚无法大规模开展;框架梁锚固结构施工质量控制要点和标准还不够明确,缺乏完善的框架梁施工工艺,需要从人、物、环、管等角度对施工安全风险开展系统研究;框架梁锚固结构与装配式结构的结合应用值得进一步研究。

**关键词:**边坡支护工程;框架梁锚固结构;结构设计;模型试验;现场施工

**中图分类号:**U416.1+4

**文献标志码:**A

## 0 引言

中国是典型的地质灾害多发国家,每年发生上万起各类灾害,造成巨大的经济损失和人员伤亡。在众多地质灾害中,滑坡、崩塌占70%左右,其中土质边坡灾害约占滑坡总数的70%<sup>[1]</sup>。根据《国家公路网规划(2013—2030年)》的总体战略布局,在“云贵川”等地区的高山峡谷地形中修建高速公路已成必然,不可避免地带来大量高填路堤和深挖路堑的形成。这些地区公路建设存在边坡开挖、地表水集聚和水文条件多变等问题,极大地影响路基性能<sup>[2]</sup>和边坡稳定性<sup>[3]</sup>,边坡因失稳形成的滑坡、崩塌屡见不鲜。

边坡治理问题一直都是灾害治理的重要任务,对路堑边坡进行及时有效的加固与支护可以有效地降低滑坡和崩塌的风险,因此边坡支护工程已成为公路建设领域的重要研究对象和研究热点。边坡治理方案与支护手段主要经历了削方减载、支挡结构、坡体加固等不同阶段和结构形式<sup>[4]</sup>。目前,锚杆(索)框架梁作为一种综合防护设施结构,已成为边坡支护加固的重要措施和手段,其支护可靠性与力学特性被众多学者广泛研究<sup>[5-9]</sup>。

框架梁锚固结构由贴坡安放的钢筋混凝土梁或

者预应力混凝土结构和打入坡体的锚杆(索)组成,通过锚杆(索)的主动张拉及框架梁的框箍作用能够在边坡发生较大位移之前主动约束边坡土体的变形。目前框架梁锚固结构的施工大多采用传统的现浇方法,需要多名技术工人与多种机械现场协同施工,存在支护时效性差、混凝土质量难保障、变形难协调、工序复杂、安全风险大、施工成本高等问题。本文从结构设计、模型试验、现场施工3个方面,对当前框架梁锚固边坡支护结构的研究现状进行简要介绍与评述,可为进一步完善框架梁锚固边坡支护结构体系的研究提供参考。

## 1 结构设计研究现状

对框架梁锚固边坡加固的工程结构设计,现有学者主要从灌浆体锚固力、锚索(杆)的空间布置形式、框架梁的内力分布等方面开展研究和计算。

### 1.1 灌浆体锚固力

通常运用传统极限平衡法确定滑坡推力,依据锚索(杆)锚固力与变形体下滑力平衡的原则确定单根锚索(杆)锚固力的大小。Lutz等<sup>[10]</sup>深入探讨了荷载在锚杆与灌浆体界面之间的传递机制,指出锚杆体表面的光滑与否直接导致两者之间结合力及其黏

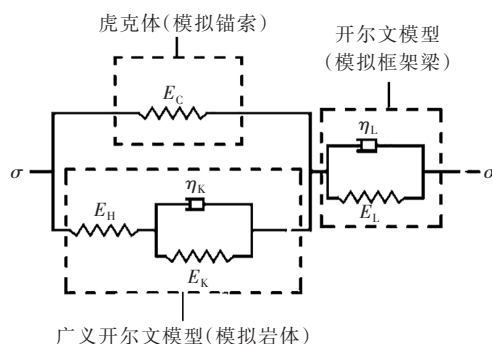
结强度的不同;黄明华等<sup>[11]</sup>借助提出的剪切滑移模型分析了拉拔全过程锚杆锚固段的受力特征,并用实测数据进行了对比验证,从而为拉力型锚杆的受力分析和设计提供理论参考。

Shi等<sup>[12]</sup>认为锚索和框架梁的组合结构安全可靠,但是锚索锚固力损失现象普遍存在,对加固效果影响很大,建立了一种考虑锚索、岩体和框架梁相互作用的耦合计算模型[图1(a)],用以准确预测结构的锚固力损失规律和程度,并通过现场检测验证其可靠性;陈拓等<sup>[13]</sup>建立了考虑强卸荷作用下高边坡工程中锚索锚固力的耦合变化模型[图1(b)],推导了锚固力长期变化的理论方程;韩爱民等<sup>[14]</sup>利用数值模拟,研究了锚杆框架梁支护边坡加固系统的受力特点和设计参数的敏感性等问题,指出系统的支护力学响应包含两个阶段,即张拉和稳定工作,后一阶段坡脚处框架梁和锚杆的内力都会明显增大,设计时应考虑此因素给结构稳定可能造成的不利影响。

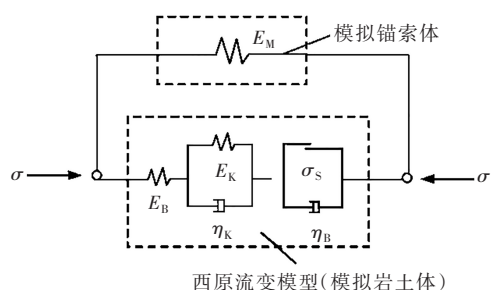
## 1.2 锚杆(索)空间布置形式

锚杆(索)空间布置形式主要包括锚杆(索)长度、间距、锚固角度等,是框架梁锚固结构设计重点考虑的因素。不少学者运用极限平衡法、强度折减法理论方法,通过数值模拟等手段,就这些因素对支护边坡安全系数的影响规律开展研究,为锚杆(索)空间布局的参数设计提供参考,主要结论如表1所示。不同研究得到的结果基本相同,各因素的影响规律具体表现为:在一定范围内,安全系数与锚杆长度正相关,与锚杆间距负相关,边坡安全系数随倾角的增加先增大后减小,锚固长度和锚固角度存在最优值,边坡中下部应力和位移较大,此区域应该作

为加固设计重点对象。



(a) 考虑锚索、岩体和框架梁相互作用<sup>[12]</sup>



(b) 考虑强卸荷作用<sup>[13]</sup>

注:  $E_B$  为瞬时弹性模量;  $E_K$  为黏弹性模量;  $\eta_L, \eta_K, \eta_B$  为黏滞系数;  $\sigma_s$  为长期强度;  $E_M$  为模拟锚索体的模量

图1 锚固力损失耦合计算模型

## 1.3 框架梁内力分布

框架梁内力分布是锚固力与梁底反力共同作用的结果,研究其规律应综合考虑锚杆(索)拉力和坡体反力的相互作用。传统的刚性梁法<sup>[21]</sup>将框架梁的刚度看作无限大,将坡体反力视为呈均匀直线分布作用在梁上的荷载[图2(a)],并且把横梁和纵梁看作相互独立的连续梁处理。然而实际工程中地质条件的差异,刚性梁法的计算结果与真实内力分布存在

表1 锚杆(索)空间布置形式影响研究

研究者	考虑因素	主要结论
林杭等 <sup>[15-16]</sup>	锚杆长度、倾角	边坡安全系数随锚杆长度的增大呈现先增大后基本保持不变的趋势,随锚杆倾角的增大呈现先增大后减小的趋势,存在有效锚固长度和最优锚固角,锚杆倾角越大对应的有效锚固长度越小,最优锚固角随锚杆长度的增大而线性减小
何忠明等 <sup>[17]</sup>	锚杆长度、间距、倾角	安全系数随锚杆长度增加非线性增大且存在上限值,随锚杆间距增大非线性减小,随倾角增大先增大后减小
唐湖北等 <sup>[18]</sup>	锚固长度、角度、位置	不同长度的锚杆其最佳锚固角度均为 20° 左右,锚杆布设在边坡中下部对安全系数影响最大
廖峻等 <sup>[19]</sup>	锚杆长度、倾角	存在一个界限长度,当锚固长度大于这个值,安全系数受倾角的影响明显增大,数值计算得出的最优锚杆倾角比传统方法大 10° 左右
Yang 等 <sup>[20]</sup>	锚索位置、长度	根据应力场和位移场可以确定锚索最佳锚固方案,优化锚索布置;在边坡高应力、大位移的区域进行强加固的效果较好

差距,因此限制了其在实际工程中的应用。而基于Winkler假定的弹性地基梁法认为坡面任一点的反力与框架梁垂直于坡面的位移成正比<sup>[21]</sup>,即反力并非均匀的直线分布形式[图2(b)]。

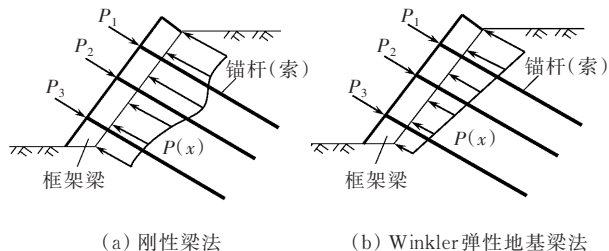


图2 框架梁分布计算模型<sup>[21]</sup>

夏雄等<sup>[22]</sup>采用两种方法(连续梁法和Winkler弹性地基梁法)分别计算框架梁的内力,发现后者的结果与实际更吻合,说明Winkler弹性地基梁法能够较好地解决刚性梁法结果与实际内力分布不匹配的问题;马洪生等<sup>[23]</sup>依托实际工程案例,比较几种框架梁内力计算方法的准确性及适用性,同时对地基反力系数、框架梁截面尺寸、悬臂端长度等进行参数影响研究;陈国周等<sup>[24]</sup>基于Winkler假定,推导了边坡框架梁内力的简化计算公式,并应用到实际工程中;张葆永等<sup>[25]</sup>运用Plaxis软件分析复理石区软岩边坡的支护稳定性,进而计算获得施工各阶段框架梁的应力、应变分布。此外,框架梁内力分布还涉及锚固力荷载分配的研究,目前多按照静力平衡和变形协调的两大原则将锚固力进行分配<sup>[21,26]</sup>。

## 2 模型试验研究现状

模型试验能直观地反映边坡在动荷载作用下的变形和破坏特性,研究各类边坡在地震作用下失稳破坏模式与形成机理的室内模型试验主要有振动台模型试验和离心模型试验。

### 2.1 振动台模型试验

振动台模型试验(图3)可操作性较强,且模型制作周期较短,还可以灵活地控制地震动幅值、震动方向和传感器布置位置等试验所需条件<sup>[27]</sup>。因其可直观地呈现结构变形过程,并采集到大量可靠的数据,受到广大学者和试验研究人员的采用。

Clough等<sup>[29]</sup>在20世纪50年代就使用振动台对边坡的抗震稳定性进行了试验研究;李振生等<sup>[28]</sup>对



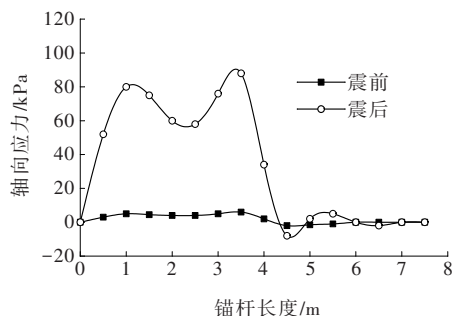
图3 振动台与模型箱<sup>[28]</sup>

不同陡倾岩质边坡开展了振动台试验研究,探究多重因素(荷载类型、频率、振幅和激振方向)综合影响下边坡稳定性的变化,发现在软硬岩界面处存在复杂的震动波场,这是由于各种应力波相互叠加形成;黄润秋等<sup>[30]</sup>利用振动台探究层状岩质边坡在强震下的动力响应规律,发现边坡震动响应的高程效应和结构效应显著,同时揭示了不同岩质边坡的普遍失稳破坏形式;郝建斌等<sup>[31]</sup>通过振动台试验对锚杆格构支护边坡的动力特性进行分析,发现低频正弦波的频率较接近边坡的自振频率,坡体加速的动力响应越明显,边坡的相对位移则越大,因此,格构梁受到的力越大,动应变值相应增大。

针对框架梁锚固结构开展的振动台试验还不多见。Lin等<sup>[32]</sup>通过振动台试验研究土质边坡在锚杆框架结构支护下的抗震性能[图4(a)],结果表明:水平与竖向加速度放大效应随输入加速度增大明显增



(a) 试验模型



(b) 锚杆轴向应力变化

图4 锚杆框架梁振动台模型试验及其结果<sup>[32]</sup>



加,地震荷载使锚杆在自由区内的轴向应力大大增加,在锚固区迅速减小并趋于零[图 4(b)]。

## 2.2 离心模型试验

振动台试验由于无法模拟结构实际自重应力场情况,通常造成试验结果与实际动力响应有较大偏差,而土工离心机模型试验(图 5)可以克服这一缺点。离心模型试验过程更真实地反映原型边坡的应力场条件,揭示实际自重应力条件下的动力响应,对边坡施加体力,具有更显著的优越性<sup>[33]</sup>,使得研究人员对土体动力变形和破坏发展过程的认识更深入,因而得到了广泛应用。

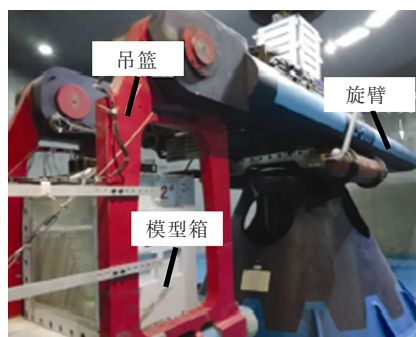
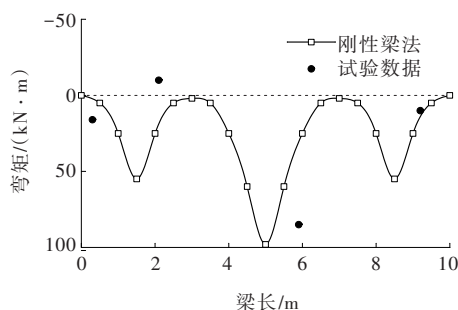


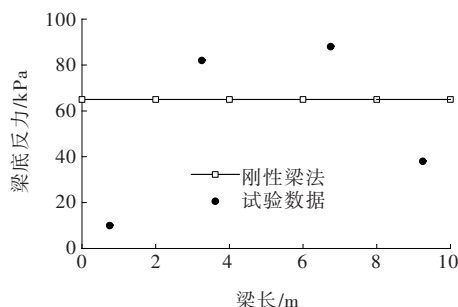
图 5 土工离心机<sup>[33]</sup>

Charles 等<sup>[34]</sup>进行了在正弦波输入双向地震作用下的松填坝边坡离心动力模型试验,分析得出了坝体的抗震稳定性;于玉贞等<sup>[35]</sup>研究了 EL Centro 地震波下砂土质边坡的动力响应结果,发现响应自下而上逐渐增大,自表面向内部逐渐减小,坡体自下而上存在地震响应放大效应;张嘎等<sup>[36]</sup>利用土工织物对土坡加筋,进行离心模型试验,得到土工织物加筋材料对边坡变形及破坏的影响规律;张琬等<sup>[37]</sup>基于离心模型试验成果,对不同坡高和坡度加筋土边坡建立有限元模型并计算安全系数,表明坡度对筋材拉力分布影响要显著大于坡高,随坡度增大,筋材最大受力区域由边坡中部逐渐向底部转移;陈凌伟等<sup>[38]</sup>对高陡加筋边坡开展离心模型试验,根据结果推荐在边坡下部范围内对筋材加密,优化筋材的应力分布,可以有效提高边坡稳定性。

关于框架梁锚固结构的离心模型试验成果目前较为匮乏。马洪生等<sup>[39]</sup>完成了预应力锚索框架边坡加固结构的离心模型试验,结果反映了梁同时处于拉压状态的受力特征(图 6),并指出不能为了简化计算,将地基反力视为简单的均匀或线性分布,可以通过其结果验证锚索框架梁的设计计算理论。



(a) 弯矩试验与理论计算结果



(b) 反力试验与理论计算结果

图 6 锚索框架梁离心模型试验研究<sup>[39]</sup>

## 3 现场施工研究现状

### 3.1 施工工艺

施工工艺直接关系到工程结构能否从理论设计走向现场施工,一批学者对框架梁锚固结构的现场施工流程进行了总结,并针对具体工程遇到的关键技术难题和质量控制要点进行了探讨,主要研究成果如表 2 所示。不同学者对于框架梁锚固结构的现场施工流程达成了一些共识和总结,主要包括边坡开挖、锚杆(索)施工、框架梁施工几方面。其中,锚杆(索)施工包括钻孔、清孔、杆体打入、注浆、张拉锁定、封锚等工序,框架梁施工分为钢筋与模板安装、混凝土浇筑、养护拆模等步骤,施工流程已趋于成熟。但是也应注意,各研究提出的施工技术要点各异,针对的角度和考虑的方面存在差别,导致施工质量控制手段和标准的匮乏。

### 3.2 施工安全

除了对结构施工工艺的总结,施工过程的安全性也是框架梁锚固边坡支护结构现场施工的研究热点,主要有施工安全风险评估、施工期边坡稳定性、支护结构受力情况等研究,相关成果如表 3 所示。施工安全风险评估方法众多,应用较为广泛的有《高速公路路堑高边坡工程施工安全风险评估指南》中推

表2 框架梁锚固结构施工工艺研究

研究者	施工流程	施工质量控制要点
刘文斌 <sup>[40]</sup>	搭设脚手架,锚杆钻孔,清孔和验孔,锚杆插入,灌注水泥砂浆,开挖框架梁基础,制安钢筋与模板,浇筑混凝土,养护施工	—
李浩 <sup>[41]</sup>	石质路堑施工,锚索框架梁工程施工,液压客土喷播植草防护施工,锚杆镀锌网植草防护施工,边坡监测管施工	跟管钻进技术、孔位偏移处理、克服抗拔试验条件不足
王力杰 <sup>[42]</sup>	锚索孔钻凿,锚索制安,静压注浆,二次劈裂注浆,框架梁、紧箍头以及锚墩施工,张拉与锁定,锚索防护	施工期渗水、塌孔与卡钻、淤泥中成孔等
韩峰 <sup>[43]</sup>	边坡开挖,测量放线,脚手架搭设,锚杆施工,框架梁施工	—
杨杰 <sup>[44]</sup>	施工准备,锚孔钻造,锚筋制安,锚孔注浆,锚筋张拉锁定,锚孔验收封锚	防止孔壁坍塌、卡钻,排气、排渣、排水以保证注浆饱满密实
周勇等 <sup>[45]</sup>	—	修坡放线、锚杆灌浆、预应力施加、超开挖等

表3 框架梁锚固结构施工安全研究

研究方面	研究者	研究方法 with 结论
施工安全风险 评估	罗竞等 <sup>[46]</sup>	基于常用的指标体系法和专家调查法,对路堑边坡施工安全风险进行评估分析
	邹国庆等 <sup>[47]</sup>	提出考虑地质分类的公路路堑边坡施工安全评估方法,编制了常见边坡评价指标排序与权重系数的推荐表
	吴忠广等 <sup>[48]</sup>	建立了高边坡施工安全风险评估指标体系,应用统计分析的方法界定风险分级标准,提出较完善的高边坡施工安全总体风险评估方法
稳定性 分析	张勇慧等 <sup>[49]</sup>	分析岩质边坡的特点,选取合适指标,将模糊综合评判和层次分析两种方法结合,建立了公路岩质边坡的稳定性分级模型
	龚峻松等 <sup>[50]</sup>	采用极限平衡法和有限元法对深挖路堑边坡在施工过程中各个工况下的安全系数、位移场进行了对比分析,发现边坡的施工期稳定性主要与挖方高度、边坡坡面坡度、地层地形差异等因素有关
结构受力	苏杭等 <sup>[51]</sup>	通过室内试验模拟多级边坡锚索框架的施工过程,明确定义了开挖松弛区和预压区,认为引起结构受力变化的直接原因是影响区重叠效应
	李忠等 <sup>[52]</sup>	考虑支护结构体系对边坡开挖与加固施工过程稳定性的影响,基于开挖全过程中锚杆拉力智能优化计算模型,实现了边坡在预应力锚杆框架施工过程中稳定性的即时动态分析与评价

荐的指标体系法和专家调查法,两者都是依据《指南》中提出的5类11级指标进行评估,一些学者对指标体系法评估结果受主观影响较大的问题,进一步考虑地质条件、施工方案、施工管理等因素,提出各种修正优化的评估模型与方法,使安全风险评估结果更客观真实。另一部分学者重点研究施工期边坡的稳定性和结构受力分析,采用极限分析法、有限元法、室内模型试验等方式,探究边坡稳定性在施工过程中的变化与影响因素,建立各种稳定性、框架梁与锚杆受力等计算模型,保证支护结构的安全可靠与边坡的稳定。

4 评述与展望

目前对框架梁锚固边坡支护结构的研究在结构设计、模型试验、现场施工等方面取得了一些成果与

进展。锚固力主要考虑荷载传递机制、拉拔受力特点、锚固力长期损失等因素进行设计,支护加固效果受锚固长度、间距、角度等因素的影响较大,Winkler弹性地基模型是目前普遍认可的框架梁内力分布计算方法;离心模型试验和振动台模型试验能够模拟边坡在真实应力水平和地震荷载作用下的变形特性,是研究其动力响应和抗震性能的有效试验手段;对于框架梁锚固结构施工流程和内容已经提出了成熟的技术手段,施工期边坡开挖与支护过程的总体风险评估具备较明确的研究方法和成果。

另一方面,目前研究中存在的一些不足之处与改进方向:不同学者提出的结构设计方法与计算模型各异,在特殊地质条件(如寒区、特殊土)地区的适应性尚存在疑问,各自的适用对象依然有局限性,普适性的设计理论和方法研究需要进一步开展;模型试验对象多为均质的原状土边坡或加筋土处置边

坡,模型试验设备尺寸相较实际工程也小得多,对于锚杆(索)和框架梁的尺寸也要相应地进行调整,通常还涉及到相似材料的优选,可以作为下一步试验研究的重点;诸如混凝土坍落度、锚杆施工技术、预应力施加等现场施工质量控制要点和标准还缺少明确的可靠成果,施工安全研究侧重于框架梁结构的安全性、可靠性与边坡稳定性的分析,因此施工工艺亟须完善,边坡支护过程安全风险有待从人、物、环、管等角度进行系统研究。

此外,目前在各类基建行业,尤其在房屋建筑、路桥建设与基坑支护工程中,装配式结构都得到了广泛应用。在国家与地方政府的支持下,中国形成了如装配式剪力墙、装配式框架结构等多种形式的建筑技术标准,完成了如《装配式混凝土结构技术规程》等相应技术规程的编制<sup>[53]</sup>。装配式结构安全、快速、经济的特点与当前边坡支护工程的需求相吻合,但装配式结构在边坡支护工程中的应用还鲜有报道,二者的结合尚缺少理论设计与现场应用的研究基础,将装配式结构大规模应用到边坡支护工程有一定的工程价值,值得对其结构设计、模型试验、现场施工等方面开展相关研究。

## 5 结论

本文回顾了国内外对框架梁锚固边坡支护结构的研究内容与取得的一系列成果,并针对现有的研究问题进行了讨论与展望,主要结论如下:

(1) 在结构设计方面,目前对结构锚固性能和边坡加固效果的影响因素及其作用机理形成了比较深刻的认识,但各种设计方法与计算模型的适用性还需验证,需要开展普适性设计理论和方法的系统性研究。

(2) 在模型试验方面,对象多集中于原状土边坡或加筋土处置边坡,受限于试验设备和条件,对框架梁锚固边坡支护结构动力响应与抗震性能的模型试验还不能大规模普及开展,尺寸、相似材料等应该是进一步研究突破的重点。

(3) 在现场施工方面,框架梁锚固结构施工流程和内容已经较为成熟,但施工质量控制要点和标准还不够明确,应形成完善的施工工艺体系。目前施工安全的研究重点在总体风险评估和结构安全与边坡稳定上,建议系统地从人、物、环、管等角度对边坡防护施工安全风险进行研究。

(4) 装配式结构为框架梁锚固边坡支护结构提供了新的发展方向和研究思路,二者的结合尚缺少理论设计与现场应用的研究基础,值得开展探索性研究,深化相关认识。

## 参考文献:

- [1] 李媛,孟晖,董颖,等.中国地质灾害类型及其特征:基于全国县市地质灾害调查成果分析[J].中国地质灾害与防治学报,2004,15(2):29-34.
- [2] 张军辉,邓宗煌,刘杰,等.南方湿热地区既有路基快速检测方法研究[J].中外公路,2019,39(6):6-10.
- [3] ZHANG J H, LI F, ZENG L, et al. Numerical simulation of the moisture migration of unsaturated clay embankments in southern China considering stress state[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 80 (1): 11-24.
- [4] 罗丽娟,赵法锁.滑坡防治工程措施研究现状与应用综述[J].自然灾害学报,2009,18(4):158-164.
- [5] 付晓,张建经,周立荣.多级框架锚索和抗滑桩联合作用下边坡抗震性能的振动台试验研究[J].岩土力学,2017,38(2):462-470.
- [6] 付晓,张建经,廖蔚茗,等.组合支护结构加固高边坡的地震动响应特性研究[J].岩石力学与工程学报,2017,36(4): 831-842.
- [7] 董建华,代涛,董旭光,等.框架锚杆锚固寒区边坡的多场耦合分析[J].中国公路学报,2018,31(2):133-143.
- [8] 叶帅华,时铁磊,龚晓南,等.框架预应力锚杆加固多级高边坡地震响应数值分析[J].岩土工程学报,2018,40(S1):153-158.
- [9] 孙国栋,董旭光,田文通,等.框架锚杆支护多年冻土边坡的稳定性计算方法[J].防灾减灾工程学报,2019,39(1):124-131.
- [10] LUTZ L A, GERGELY P. Mechanics of bond and slip of deformed bars in concrete[J]. Journal of the American Concrete Institute, 1967, 64(11): 711-721.
- [11] 黄明华,李嘉成,赵明华,等.层状地基中锚杆拉拔荷载传递非线性分析[J].中国公路学报,2019,32(1):12-20,56.
- [12] SHI K Y, WU X P, LIU Z, et al. Coupled calculation model for anchoring force loss in a slope reinforced by a frame beam and anchor cables[J]. Engineering Geology, 2019, 260: 105245.
- [13] 陈拓,陈国庆,黄润秋,等.考虑高边坡强卸荷的锚索锚固力耦合变化模型[J].岩土力学,2018,39(11):4125-4132.
- [14] 韩爱民,李建国,肖军华,等.预应力锚杆框架梁的支护力学行为研究[J].岩土力学,2010,31(9):2894-2900.
- [15] 林杭,曹平.锚杆长度对边坡稳定性影响的数值分析[J].岩土工程学报,2009,31(3):470-474.
- [16] 林杭,钟文文,熊威,等.锚杆长度与边坡坡率对最优锚固角的影响[J].岩土工程学报,2014,36(S2):7-11.



- [17] 何忠明,林杭.节理岩体边坡稳定性的锚杆支护影响分析[J].公路交通科技,2010,27(11):8-12,19.
- [18] 唐湖北,蒋华春,黄伟.锚杆支护方式对边坡稳定性的影响研究[J].公路工程,2012,37(1):61-64.
- [19] 廖峻,李江腾,郝瑞卿,等.顺层岩质边坡稳定性及预应力锚杆加固研究[J].中南大学学报(自然科学版),2014,45(1):231-236.
- [20] YANG G H,ZHONG Z H,ZHANG Y C,et al.Optimal design of anchor cables for slope reinforcement based on stress and displacement fields[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering,2015,7(4):411-420.
- [21] 杨明,胡厚田,卢才金,等.路堑土质边坡加固中预应力锚索框架的内力计算[J].岩石力学与工程学报,2002,21(9):1383-1386.
- [22] 夏雄,周德培.Winkler弹性地基上预应力锚索地梁内力的计算方法[J].铁道标准设计,2005,49(1):46-48.
- [23] 马洪生,黄志毅.公路边坡锚索框架梁内力计算及参数影响分析[J].路基工程,2015(3):38-41.
- [24] 陈国周,王建春,林智勇.边坡框架梁文克尔简化计算方法及工程应用[J].地质力学学报,2018,24(6):822-827.
- [25] 张葆永,凤跃森.基于Plaxis的复理石边坡预应力锚索框架梁设计[J].中外公路,2020,40(S2):55-60.
- [26] 田亚护,刘建坤,张玉芳.预应力锚索框架内力计算的有限差分法[J].北京交通大学学报,2007,31(4):22-25.
- [27] 陈新民,沈建,魏平,等.下蜀土边坡地震稳定性的大型振动台试验研究(I):模型试验设计[J].防灾减灾工程学报,2010,30(5):497-502.
- [28] 李振生,巨能攀,侯伟龙,等.陡倾层状岩质边坡动力响应大型振动台模型试验研究[J].工程地质学报,2012,20(2):242-248.
- [29] CLOUGH R W,PIRTZ D.Earthquake resistance of rock-fill dams[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division,1956,82(2):1-26.
- [30] 黄润秋,李果,巨能攀.层状岩体斜坡强震动力响应的振动台试验[J].岩石力学与工程学报,2013,32(5):865-875.
- [31] 郝建斌,李金和,程涛,等.锚杆格构支护边坡振动台模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2015,34(2):293-304.
- [32] LIN Y L, LI Y X, YANG G L, et al. Experimental and numerical study on the seismic behavior of anchoring frame beam supporting soil slope on rock mass[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering,2017,98(1):12-23.
- [33] 黄达,马昊,孟秋杰,等.软硬互层岩质反倾边坡弯曲倾倒离心模型试验与数值模拟研究[J].岩土工程学报,2020,42(7):1286-1295.
- [34] NG Charles W W, LI X S, VAN LAAK Paul A, et al. Centrifuge modeling of loose fill embankment subjected to uni-axial and bi-axial earthquakes[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering,2004,24(4):305-318.
- [35] 于玉贞,邓丽军,李荣建.砂土边坡地震动力响应离心模型试验[J].清华大学学报(自然科学版),2007,47(6):789-792.
- [36] 张嘎,王爱霞,张建民,等.土工织物加筋土坡变形和破坏过程的离心模型试验[J].清华大学学报(自然科学版),2008,48(12):2057-2060.
- [37] 张琬,许强,陈建峰,等.加筋土边坡筋材拉力分布与分区[J].交通运输工程学报,2017,17(6):28-35.
- [38] 陈凌伟,李从安,刘伟,等.高陡加筋边坡离心模型数值模拟[J].长江科学院院报,2020,37(12):92-97.
- [39] 马洪生,庄卫林,范刚,等.预应力锚索框架加固边坡的离心机模型试验研究[J].四川建筑科学研究,2015,41(5):55-59.
- [40] 刘文斌.锚杆框架梁护坡施工技术在公路工程中的应用[J].交通世界,2018(15):40-41.
- [41] 李浩.公路工程高边坡施工技术的实践应用[J].福建交通科技,2020(4):21-24.
- [42] 王力杰.预应力锚索框架梁施工技术与特殊情况处理[J].公路交通科技(应用技术版),2018,14(12):78-80.
- [43] 韩峰.锚杆框架梁在高边坡防护中的应用分析[J].中国标准化,2019(10):113-114.
- [44] 杨杰.高速公路路堑边坡加固预应力锚索施工技术与质量控制[J].岩石力学与工程学报,2003,22(S2):2759-2764.
- [45] 周勇,朱彦鹏,叶帅华.框架预应力锚杆柔性边坡支护结构设计和施工中的若干问题探讨[J].岩土力学,2011,32(S2):437-443.
- [46] 罗竞,周富华,黄梦昌.公路路堑边坡施工安全总体风险评估方法优化研究[J].路基工程,2018(6):56-61.
- [47] 邹国庆,潘世强.考虑地质分类的高速公路路堑高边坡施工安全风险评估方法及应用研究[J].湖南交通科技,2021,47(2):66-69.
- [48] 吴忠广,王海燕,陶连金,等.高速公路高边坡施工安全总体风险评估方法[J].中国安全科学学报,2014,24(12):124-129.
- [49] 张勇慧,李红旭,盛谦,等.基于模糊综合评判的公路岩质边坡稳定性分级研究[J].岩土力学,2010,31(10):3151-3156.
- [50] 龚峻松,程轶康,吴小文,等.基于有限元法与极限平衡法的山区深挖路堑边坡施工安全性分析[J].中外公路,2016,36(4):51-55.
- [51] 苏杭,周海清,武松.多级边坡施工效应的模型试验研究[J].岩土力学,2017,38(8):2261-2269.
- [52] 李忠,陈思阳,朱彦鹏,等.基于开挖过程稳定性的框架预应力锚杆边坡加固计算方法研究[J].岩石力学与工程学报,2014,33(S1):2964-2970.
- [53] 王俊,赵基达,胡宗羽.我国建筑工业化发展现状与思考[J].土木工程学报,2016,49(5):1-8.