

文章编号: 1674—8247(2022)04—0068—07
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2022.04.011

山区铁路支挡结构安全保障与韧性提升

魏永幸

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘 要:文章针对山区铁路常用的 5 类支挡结构,围绕支挡结构安全风险识别评估、支挡结构极限状态设计、支挡结构安全性能提升开展了系统的试验研究,提出了支挡结构安全风险“四层次、多手段”量化识别与评估方法,构建了以“风险识别—量化评估—综合防控”为核心的支挡结构安全风险识别与防控技术体系,建立了基于风险识别、参数自洽的支挡结构极限状态设计方法,形成了山区铁路支挡结构安全保障与韧性提升成套技术,支撑了西南山区沪昆、贵广、成贵等 7 000 多公里铁路建设。文章成果可为山区铁路(公路)建设提供指导和借鉴。

关键词:支挡结构;安全风险;量化识别;韧性提升;技术体系

中图分类号:U213.1+5 **文献标志码:**A

Safety Guarantee and Resilience Improvement of Railway Retaining Structure in Mountainous Areas

WEI Yongxing

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: For five types of retaining structures commonly used in mountain railways, this paper carried out systematic experimental research on safety risk identification and evaluation of retaining structures, limit state design of retaining structures, and safety performance improvement of retaining structures. It puts forward a “four-level, multi-means” quantitative identification and evaluation method for safety risks of retaining structures, and constructs a technical system of safety risk identification and prevention and control of retaining structures with “risk identification-quantitative evaluation-comprehensive prevention and control” as the core. This paper further establishes the limit state design method of retaining structure based on risk identification and parameter self-consistency, and forms a complete set of technologies for safety guarantee and toughness improvement of railway retaining structure in mountainous areas, which supports the construction of more than 7,000 kilometers of railways in southwest mountainous areas such as Shanghai-Kunming, Guiyang-Guangzhou, and Chengdu-Guiyang railways. The results of this paper can provide guidance and reference for the construction of railways (highways) in mountain areas.

Key words: retaining structure; safety risk; quantitative identification; resilience improvement; technical system

1 概述

支挡结构广泛应用于山区铁路(公路)工程,其安

全受环境、地质、水文、技术、材料等多因素,以及勘察、设计、施工、维护等多环节影响。然而,支挡结构安全事故(问题)时有发生,支挡结构安全风险也一直存在

收稿日期:2022-06-07

作者简介:魏永幸(1964-),男,教授级高级工程师,四川省工程勘察设计大师。

引文格式:魏永幸. 山区铁路支挡结构安全保障与韧性提升[J]. 高速铁路技术,2022,13(4):68-74.

WEI Yongxing. Safety Guarantee and Resilience Improvement of Railway Retaining Structure in Mountainous Areas[J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(4):68-74.

识别难、评估难、防控难的突出问题。如何量化识别评估支挡结构的安全风险,并从工程建设源头(即工程设计环节)做好支挡结构安全风险防控,保障支挡结构安全、提升支挡结构安全韧性,做到安全可靠、经济合理,是山区铁路(公路)建设一直面临的技术挑战和亟待解决的技术难题。

中铁二院工程集团有限责任公司联合西南交通大学,历时十余年,围绕支挡结构安全风险识别评估、支挡结构极限状态设计、支挡结构安全性能提升开展了系统的试验研究^[1-7],构建了以“风险识别-量化评估-综合防控”为核心的支挡结构安全风险识别与防控技术体系,建立了基于风险识别、参数自洽的支挡结构极限状态设计方法,形成了山区铁路支挡结构安全保障与韧性提升成套技术^[8-14],支撑了西南山区沪昆、贵广、成贵等7 000多公里铁路建设。本文简要介绍了山区铁路支挡结构安全保障与韧性提升的工作思路、相关研究工作和取得的主要创新成果。

2 支挡结构安全的总体要求、实现路径与技术路线

2.1 支挡结构安全的总体要求

作为铁路(公路)工程重要组成部分,支挡结构最根本目的、也是最基本的要求是保障铁路(公路)的运输畅通。针对具体的工程而言,其最基本的安全要求有两点:一是必须保持结构的长期稳定。支挡结构一旦失稳,会造成边坡垮塌、路基沉陷,严重时中断铁路(公路)运营,造成巨大的经济损失和不良影响。二是结构变形应控制在许可范围,应不影响铁路(公路)的正常使用。支挡结构如出现过大的变形,会影响铁路(公路)的正常使用,引起限速,严重时需停止运营进行维修。

对于山区铁路,由于地形、地质及环境极为复杂,支挡结构设置及使用环境复杂多样,这也导致影响支挡结构安全的风险因素众多。目前,限于认知水平,支挡结构在全生命周期内的安全风险尚难以完全消除,因而相关研究常聚焦于增强支挡结构风险承受能力,以期将风险发生时支挡结构安全受到的影响降到最小。支挡结构抵御和承受安全风险的能力,可称为支挡结构的安全韧性^[15]。

综上,山区铁路支挡结构安全的内涵,除保持长期稳定和控制结构变形外,还应包括提升结构抵御和承受安全风险的能力,使支挡结构具有足够的安全韧性。

换言之,作为铁路(公路)工程重要组成部分,支挡结构安全的总体要求应包括3个方面:确保稳定、控制变形和提升韧性。

2.2 支挡结构安全的实现路径与技术路线

(1)实现路径:围绕支挡结构安全保障与韧性提升的关键难题和技术痛点,以突破理论方法、解决关键技术和形成成套技术为目标,结合工程建设,持续开展相关课题研究与工程实践,不断总结提升,从而形成支挡结构安全保障与韧性提升技术体系。

(2)技术关键:突破支挡结构安全风险量化识别的技术难题,构建一套科学、实用、好用的支挡结构安全风险识别与防控技术体系,为支挡结构安全风险全面系统防控奠定理论基础;将风险管理与支挡结构极限状态设计相融合,建立基于风险识别、参数自洽的支挡结构极限状态设计方法,提高设计的针对性、有效性、可靠性,从工程建设源头保障支挡结构安全、提升支挡结构安全韧性;针对支挡结构安全的痛点、难点,研发山区铁路支挡结构安全保障与韧性提升的新结构、新技术、新工艺,形成了山区铁路支挡结构安全保障与韧性提升成套技术。

(3)技术路线:实现山区铁路支挡结构安全保障与韧性提升的技术路线如图1所示。

3 支挡结构安全风险识别

3.1 支挡结构面临的风险及其识别

常见的山区铁路支挡可归为5类:刚性支挡、半刚性支挡、加筋支挡、锚拉支挡和锚固桩复合支挡,各类支挡结构的特征和技术要点如表1所示。

支挡结构具有以下共同特点:(1)采用人工方法构筑于露天环境。支挡结构设置环境复杂多样,常面临暴雨、洪水以及滑坡、岩堆、顺层、高烈度地震等特殊、超常荷载作用;同时,支挡结构建造环节多,且一般采用人工结合机械的方法构筑,施工质量的控制十分重要。(2)属于岩土工程。岩土体的非均匀性、非线性、高时空变异性等特点都导致保证支挡结构安全性和可靠性有较大难度。(3)使用年限100年。支挡结构面临的风险因素众多,如何保证支挡结构的超长生命周期的安全稳定是重大挑战之一。(4)承受列车动荷载。布设于路肩的铁路支挡结构还需承受列车动荷载的作用。

以上山区铁路支挡结构的特点决定了其安全控制极为复杂,考虑到山区复杂地形地质和自然环境、荷载

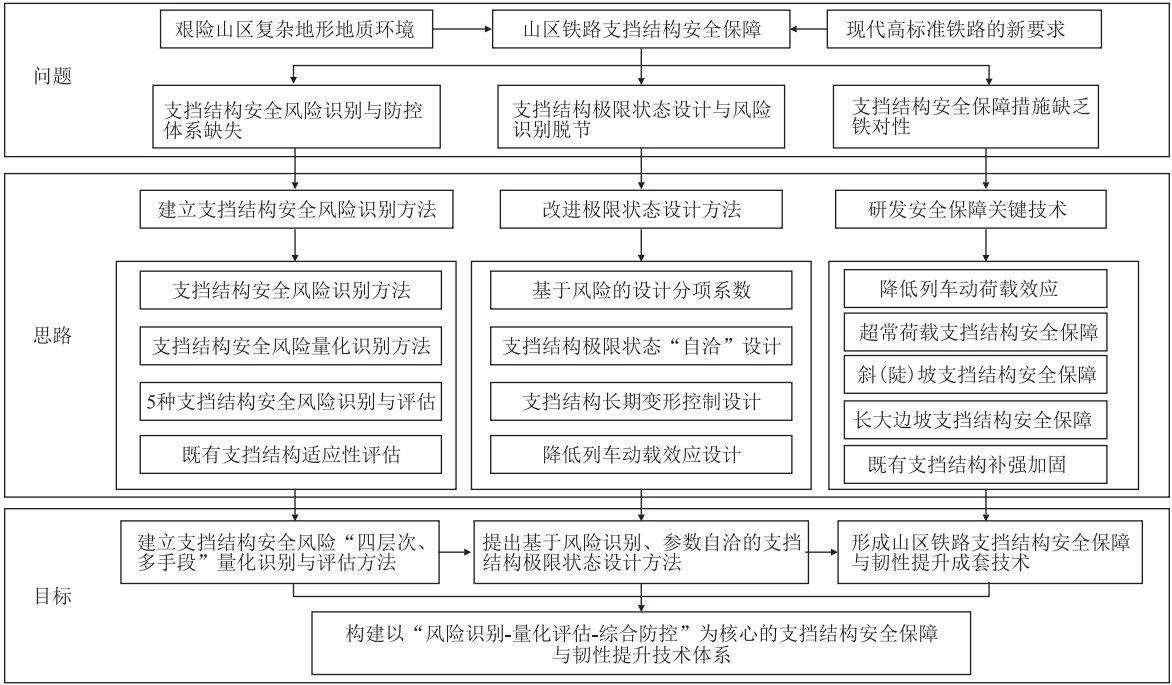


图 1 山区支挡结构安全保障与韧性提升的技术路线图

表 1 常见 5 类山区铁路支挡特征与技术要点表

序号	支挡结构类型	支挡结构型式	支挡结构特征及其技术要点
1	刚性支挡	1. 重力式挡墙 2. 衡重式挡墙 3. 卸荷板式挡墙 4. 托盘式挡墙	1. 以支挡结构自身的重力平衡岩土压力或下滑力 2. 支挡结构刚度较大,设计中忽略其自身的变形
2	半刚性支挡	1. 悬臂式挡土墙 2. 扶壁式挡土墙 3. 槽型挡土墙	1. 以支挡结构及附属结构的填土来平衡岩土压力或下滑力 2. 支挡结构具有一定的刚度,荷载作用会产生一定的变形,需根据需要进行控制
3	加筋支挡	1. 加筋土挡墙 2. 土钉墙	1. 依靠筋材于岩土体的相互作用形成加筋岩土体 2. 由加筋岩土体平衡岩土压力 3. 筋材需满足强度、变形、耐久性等要求
4	锚拉支挡	1. 锚杆挡土墙 2. 锚定板挡土墙 3. 锚索框架梁(板) 4. 锚索桩	1. 依靠锚固于稳定地层的锚杆(索)提供的拉力来平衡岩土压力或下滑力 2. 锚杆(索)提供的拉力受锚固地层、锚固方式等影响 3. 外锚结构将锚杆(索)提供的拉力转换为压力作用于岩土体或下滑体 4. 锚杆(索)满足强度、变形、耐久性等要求
5	锚固桩复合支挡	1. 抗滑桩 2. 桩板式挡土墙 3. 桩墙复合结构 4. 桩基托梁挡土墙	1. 依靠锚固于稳定地层的桩提供侧向阻滑力来平衡岩土压力或下滑力 2. 侧向阻滑力受锚固地层、锚固深度等影响 3. 桩体受岩土压力或下滑力作用会产生挠曲变形,应根据需要进行限制

条件变化等的影响,支挡结构安全还将面临一系列新的技术挑战,如列车动荷载对支挡结构安全的影响、高速铁路“高平顺、高稳定、高可靠”对支挡结构长期变形控制提出的新要求以及既有支挡结构是否满足运营要求等。

支挡结构安全风险可从环境、技术、材料 3 个层次进行识别。从影响支挡结构安全的因素分析可能导致的风险事件称为正向分析,而从已知的支挡结构可能的风险事件入手分析导致风险发生的因素称为反向分析。支挡结构安全风险因素可归纳为 3 类 14 种,如表 2 所示。

表 2 影响支挡结构安全的风险因素表

因素分类	风险因素
环境	1. 支挡结构的地质环境及其特性 2. 地基稳定性 3. 气象与水文条件 4. 作用于支挡结构的荷载 5. 支挡结构周边环境
技术	1. 支挡工程施工顺序 2. 支挡结构施工工艺 3. 支挡结构防排水施工工艺 4. 支挡结构的作用与抗力计算 5. 支挡结构稳定分析 6. 支挡结构变形分析
材料	1. 支挡结构材料性能及参数 2. 支挡结构形状及尺寸 3. 支挡结构耐久性

3.2 支挡结构风险量化识别

支挡结构风险识别的方法可分为定性分析和量化分析。基于相关研究,归纳总结了支挡结构安全风险“四层次、多手段”量化识别方法。量化识别可分为以下4个层次:

(1)采用“层析分析+专家打分法”确定主控风险或主控风险因素。对识别出的风险事件或某一风险事件的风险因素,采用“层析分析+专家打分法”,从风险发生的可能性大小、风险发生造成的损失大小等维度,对风险(事件或因素)进行量化打分,并给出风险或风险因素的排序,从而确定主控风险或主控风险因素。

(2)支挡结构设计检算及参数敏感性分析。依据技术规范推荐的模型、公式等进行支挡结构设计检算,并进行参数敏感性分析,从而优化和调整设计参数。

(3)支挡结构仿真分析。对于复杂环境或复杂结构中的支挡结构,除进行设计检算及参数敏感性分析外,还应进行支挡结构仿真分析,从环境变化对支挡结构安全的影响、结构对环境的适应性等方面进行系统分析,发现支挡结构安全薄弱环节、关键部位、关键构件等,以便做出相应的改进。

(4)支挡结构试验测试。包括模型试验、部件试验以及现场测试等,旨在通过试验测试对设计进行验证和评估。

3.3 既有支挡安全评估

针对上个世纪90年代以前修建的铁路支挡标准低、因自然营力作用而出现不同程度劣化和病害的问题,开展了铁路既有支挡护坡病害整治对策研究,提出了既有支挡结构安全风险评估方法,即在现场勘察、测试,以及理论计算分析的基础上进行既有支挡结构安全风险评估,将既有支挡结构安全风险等级分为“稳定、基本稳定、欠稳定、不稳定”四级。不同等级风险下既有支挡结构的安全系数取值如表3所示。

表3 既有支挡安全风险等级划分及稳定系数取值表

安全风险等级	稳定	基本稳定	欠稳定	不稳定
稳定安全系数	≥1.3	1.05~1.3	1.0~1.05	≤1.0

3.4 支挡结构安全风险识别与防控技术体系

山区铁路支挡结构安全风险识别与防控,从山区地形地质环境、现代铁路高标准要求出发,从环境、技术、材料3个维度,围绕确保稳定、控制变形、提升韧性3个目标,综合应用风险定性、量化识别等方法对风险进行识别评估,由此形成支挡结构安全风险库、对策表

以及安全保障与韧性提升技术,如图2所示。

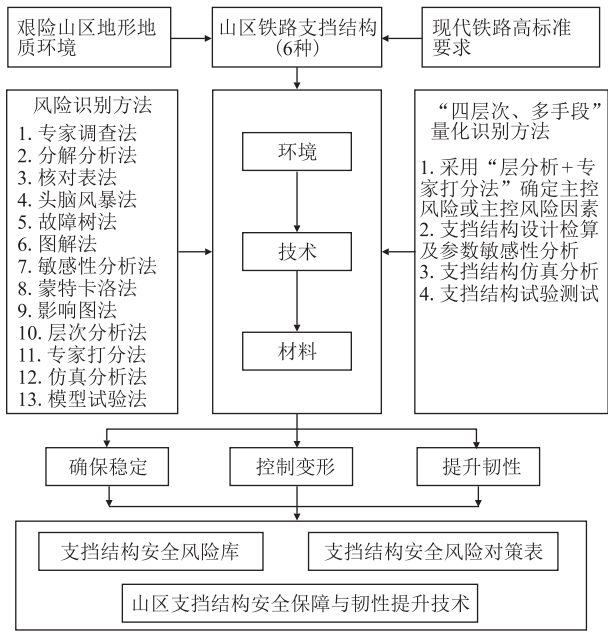


图2 山区铁路支挡结构安全风险识别与防控技术体系图

4 支挡结构极限状态设计

4.1 基于风险控制的设计分项系数

合理确定支挡结构的设计分项系数可使支挡结构各类作用和效应处于同一可靠度,避免出现系统短板、不安全或不经济等问题。因此,调整相应的设计分项系数可提高防范主控风险因素技术措施的可靠性。为此,将风险等级系数引入支挡结构极限状态设计中,一、二、三级风险等级系数分别取1.1、1.05和1.0。

4.2 基于可靠性指标匹配(自治)的设计参数优化

支挡结构的极限状态设计研究与工程实践的结果表明:支挡结构各设计参数间的相关性对支挡结构极限状态设计的可靠度有较为显著的影响。

支挡结构极限设计涉及的荷载、作用、抗力等设计参数,有的具有物理的相关性,有的具有结果的相关性。此外,支挡结构极限状态设计的可靠性指标还须满足指标匹配(自治)规律,即:持续设计状况的可靠性指标应大于短暂设计状况,短暂设计状况的可靠性指标大于偶然设计状况,而偶尔设计状况的可靠性指标与地震设计状况相当。若设计参数选取不当,则可能造成相关结果与“自治”规律不符。基于上述研究,提出了基于参数“自治”的支挡结构极限状态设计方法,其核心要义是:支挡结构极限状态设计应首先进行设计参数相关性分析,从而确定“自治”匹配的参数。

4.3 支挡结构长期稳定性

铁路支挡结构的设计使用年限为100年,考虑到高速铁路“高平顺、高稳定、高可靠”的特点,如何保证高速铁路的支挡结构的长期稳定是目前亟待解决的难题之一。采用室内土工试验、离心模型试验、有限元分析、现场测试以及理论分析等手段,对桩板式挡土墙基于变形控制的受力特性、锚固桩侧向位移与路基面沉降映射关系、锚固桩侧向位移时间效应等进行了研究,结果表明:为满足高速铁路对支挡结构变形及长期稳定的要求,桩板墙地基变形应控制在快速稳定状态,必须将桩前地基土体应力水平 λ_i 控制在15%以内,锚固桩转角控制在 10^{-3} rad以内。基于以上结果,提出了基于长期变形状态评价的高速铁路路肩(堤)桩板墙设计方法。

4.4 动荷载对支挡结构安全性能的影响

随着列车速度的提高,车辆对线下基础的动荷载作用不断加强,同时,列车动荷载对支挡结构安全性的影响也不断增加。为此,开展了列车动荷载作用对支挡结构安全影响的试验研究,揭示了列车动荷载产生的动土压力随墙高和荷载作用距离的分布规律,结果表明:动荷载作用影响深度约为2.5 m;荷载作用距离越远,墙背土压力越小;动荷载对衡重式挡土墙上墙的中下部影响较大。基于上述列车动荷载加载实验结果,提出了优化结构来提高支挡承载能力和改变布设方式以降低动荷载影响等支挡结构安全保障措施和韧性提升对策。

5 支挡结构安全保障与韧性提升关键技术

5.1 降低动荷载效应

从降低动荷载效应和提升结构安全韧性方面,提出了支挡结构布设优化方案,如图3所示,主要通过适当外移将支挡结构布设在列车动载影响范围之外。

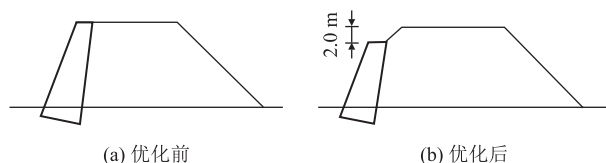


图3 考虑列车动载循环作用的路基支挡布设横断面优化图

5.2 超常荷载支挡结构安全保障

(1) 承受超常荷载特殊支挡结构

对于高大边坡处治和巨型滑坡治理,常规处置措

施是采用抗滑桩、挡土墙,或增大支挡结构尺寸、增加支挡结构刚度。然而,此类措施不仅会显著增加工程造价,且对于高大边坡和巨型滑坡,其工程可靠性也难以保证。因此,研发了针对高大边坡和巨型滑坡处理的超常荷载特殊支挡结构,包括承受大推力的框架式抗滑桩、椅式桩板墙,适用于软弱地基的桩基础悬臂挡土墙等。提出的承受超常荷载的特殊支挡结构,不但实现了保持稳定、控制变形等基本要求,还显著提升了结构的安全韧性。

(2) 高大支挡结构后背填土加筋改良

对于高大支挡结构,为有效控制支挡结构的侧向变形,降低支挡结构安全风险,设计采用了限制支挡结构后背填土侧向变形的构造措施,如后背填土采用加筋土——竖向间隔一定高度水平铺设土工格栅,后背填土采用改良土——掺3%水泥改良提高其稳定性。

支挡结构后背填土加筋或改良可起到减小或控制作用于支挡结构的土压力的作用,工程中的常规替代方案是增加支挡结构的尺寸。相较而言,支挡结构后背填土加筋或改良方案属减少风险因素的主动控制,其可靠度远高于增加结构尺寸方案。

(3) 高烈度地震锚索(杆)减震消能

“5·12”汶川地震震害调查表明,强震区边坡锚索加固的效果总体良好,但局部也出现锚索锚头脱落、损伤的情况。高烈度地震区的支挡结构应采取减轻强震作用的措施。为此,研发了高烈度地震区锚索(杆)减震消能结构,遭遇强震时可吸收地震作用,起到保护锚索(杆)的作用。

5.3 斜(陡)坡支挡结构安全保障

(1) 斜(陡)坡地段路基支挡

在斜(陡)坡地段,坡度的影响使得支挡结构安全难以保障。通过试验研究,提出了考虑斜坡效应的重力式挡土墙基坑最小禁边宽度确定方法和桩板式挡土墙锚固桩锚固点确定方法,保障了斜(陡)坡重力式挡土墙和桩板式挡土墙的结构安全。研发了适用于斜(陡)坡地段的桩基托梁挡土墙、锚索桩基托梁挡土墙、桩基托梁基础加筋土挡土墙等创新结构,如图4所示。以上结构克服了重力式挡土墙和桩板式挡土墙的不足,有效保障了斜(陡)坡支挡结构安全,提升了支挡结构安全韧性。

(2) 斜坡软弱地基路堤侧向约束桩

与水平软弱地基不同,斜坡软弱地基在路堤荷载作用下易出现向下坡一侧的地基变形,从而引发路堤坍塌。基于相关试验研究,提出了以侧向约束(桩)为

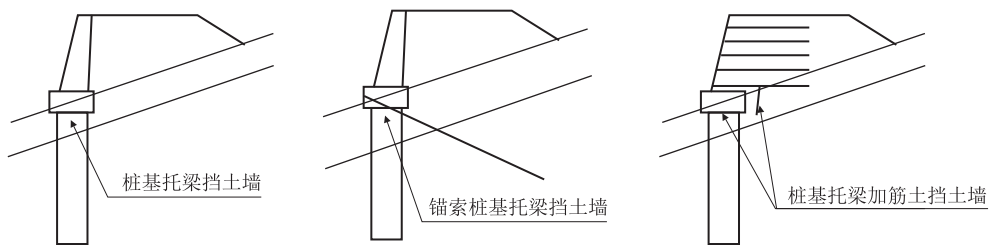


图4 斜(陡)坡地段桩基托梁基础挡土墙图

主的斜坡软弱地基路堤“防滑－控沉”技术(如图5所示)及其设计方法。侧向约束桩限制了斜坡软弱地基侧向变形,确保了斜坡软弱地基路堤的稳定。若仅采用地基处理而不采用侧向约束桩,则极有可能因地基处理未达预期而出现斜坡软弱地基路堤变形和坍塌。与单一的地基处理方案比较,以侧向约束桩为主的“防滑－控沉”技术,彻底消除了斜坡软弱地基侧向变形的风险,从而极大地提升了斜坡软弱地基路堤安全可靠,即侧向约束桩显著提升了斜坡软弱地基路堤安全韧性。

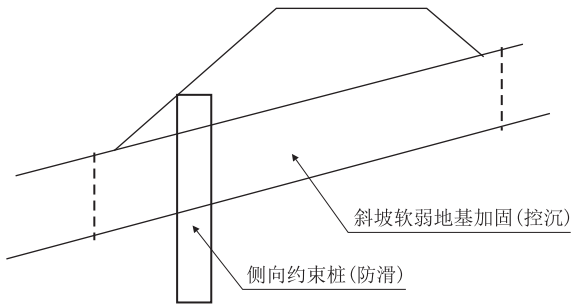


图5 斜坡软弱地基路堤“防滑－控沉”技术图

5.4 长大边坡支挡结构安全保障

通常将坡长较长、规模较大的边坡称为长大边坡。

与常规尺寸边坡不同,长大边坡的破坏通常存在分级失稳、渐次失稳现象,既存在单级边坡破坏或失稳,也存在多级边坡整体失稳破坏的可能^[16]。目前,西南地区及邻近复杂艰险山区修建铁路(公路)正在加速实施,面临的长大边坡问题也愈发突出。由上文可知,长大边坡支挡结构设计不仅要高速重视结构安全风险的识别,更要高度关注结构的安全韧性。

基于相关试验研究及工程实践经验总结,提出了“分级加固防护”、“锚固桩坡脚预加固”、“固脚强腰”等长大边坡设计理念,并形成了一系列长大边坡支挡结构安全保障和韧性提升技术,包括长大边坡坡脚锚索抗滑桩计算模型及设计方法、多排抗滑桩分担受力模型及设计方法、多级锚索(杆)框架梁协同受力模型及设计方法等。

5.5 既有支挡结构补强加固

针对既有铁路支挡劣化和病害,开展了既有支挡结构安全评估方法和补强加固技术研究,发明了既有支挡结构补强加固设计方法,并提出了注浆改良结构后背岩土、帮宽补强支挡结构、增设抗滑桩或锚索等“三类六种”既有支挡结构补强加固技术,如图6所示。

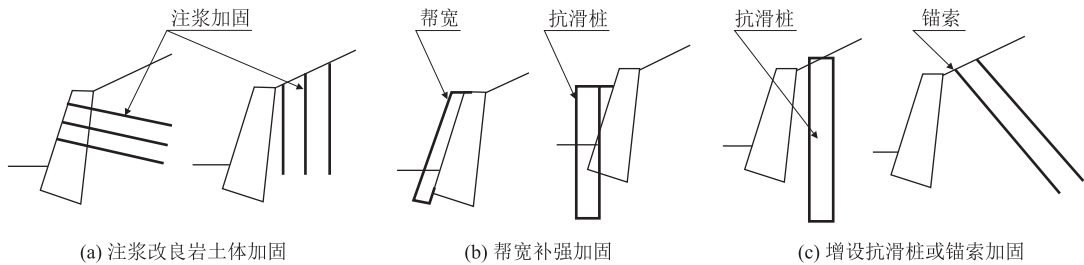


图6 “三类六种”既有支挡结构补强加固技术图

6 结论与建议

山区铁路支挡结构作为铁路基础设施的重要组成部分,其结构安全的根本目标是保障铁路(公路)运输畅通,其总体要求是:确保稳定、控制变形和提升韧性。中铁二院工程集团有限责任公司联合西南交通大学,

围绕支挡结构安全保障与韧性提升的关键难题、技术痛点,以突破理论方法、解决关键技术、形成成套技术为目标,结合工程建设,持续开展相关课题研究与工程实践,不断总结提升,构建了支挡结构安全保障与韧性提升技术体系,取得以下主要创新成果:

(1)提出了支挡结构安全风险“多层次、多手段”

量化识别与评估方法,建立山区铁路常用支挡结构安全风险库、对策表,构建了以“风险识别—量化评估—综合防控”为核心的支挡结构安全风险识别与防控技术体系,为支挡结构安全风险的全面系统防控奠定了理论基础。

(2)提出了支挡结构风险因素分项系数设计通式、可靠性指标匹配(自洽)的分项系数计算方法、支挡结构极限状态自洽设计程式,建立了基于风险识别、参数自洽的支挡结构极限状态设计方法,为设计源头防控支挡结构安全风险提供技术保障。

(3)发明了降低高速列车动载影响、控制路基长期变形、承受超常荷载、适用于陡坡路基的多种支挡结构新形式,提出了既有支挡结构补强加固技术,形成了山区铁路支挡结构安全保障、韧性提升成套技术,有效提升了支挡结构安全性能,有力支撑了西南山区铁路建设。

参考文献:

[1] 中铁二院工程集团有限责任公司. 影响支挡结构安全性因素分析[R]. 成都:中铁二院工程集团有限责任公司,2005.
China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd. Analysis of Factors Affecting the Safety of Retaining Structure[R]. Chengdu: China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., 2005.

[2] 中铁二院工程集团有限责任公司. 支挡结构可靠度研究[R]. 成都:中铁二院工程集团有限责任公司,2007.
China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd. Study of the Reliability of Retaining Structure[R]. Chengdu: China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., 2007.

[3] 中铁二院工程集团有限责任公司,西南交通大学. 西南山区铁路路基工程设计风险识别与防护对策研究[R]. 成都:中铁二院工程集团有限责任公司,2012.
China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd. Study on Risk Identification and Protection Countermeasures for Railway Subgrade Engineering Design in the Southwest Mountainous Area[R]. Chengdu: China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., 2012.

[4] 中铁二院工程集团有限责任公司. 铁路路基支挡结构极限状态设计方法研究[R]. 成都:中铁二院工程集团有限责任公司,2014.
China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd. Study on Limit State Design Method of Railway Subgrade Retaining Structure[R]. Chengdu: China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., 2014.

[5] 中铁二院工程集团有限责任公司. 铁路路基支挡结构极限状态及自洽性相关问题研究[R]. 成都:中铁二院工程集团有限责任公司,2017.
China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd. Study on Limit State and Self-coordination of Railway Subgrade Retaining Structure[R]. Chengdu: China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., 2017.

[6] 中铁二院工程集团有限责任公司. 高速铁路陡坡路基桩板式挡墙变形控制研究[R]. 成都:中铁二院工程集团有限责任公司,2017.

China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd. Deformation Control and Research on the Pile-sheet Retaining Wall of Subgrade of Steep Slope for High-speed Railway[R]. Chengdu: China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., 2017.

[7] 中铁二院工程集团有限责任公司. 铁路既有有线支挡护坡病害整治对策研究[R]. 成都:中铁二院工程集团有限责任公司,2017.
China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd. Study on Treatment Countermeasures for Retaining Slope Disease of the Existing Railway Lines[R]. Chengdu: China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., 2017.

[8] 魏永幸,等. 斜坡软弱地基填方工程技术研究与实践[M]. 北京:人民交通出版,2011.
WEI Yongxing, et al. Study and Practice of Filling Engineering Technology for Slope Soft Foundation[M]. Beijing: People's Transportation Publishing, 2011.

[9] 魏永幸,等. 路基工程风险识别与防范[M]. 北京:人民交通出版,2014.
WEI Yongxing, et al. Risk Identification and Prevention of Subgrade Works[M]. Beijing: People's Transportation Publishing, 2014.

[10] 魏永幸,等. 支挡结构设计的可靠性[M]. 北京:人民交通出版,2017.
WEI Yongxing, et al. Reliability of Retaining Structure Design[M]. Beijing: People's Transportation Publishing, 2017.

[11] 魏永幸,等. 支挡结构极限状态设计指南[M]. 北京:人民交通出版,2020.
WEI Yongxing, et al. Guide for Limit State dDesign of Retaining Structures[M]. Beijing: People's Transportation Publishing, 2020.

[12] 姚裕春,魏永幸,等. 一种高烈度地震区锚索减震结构. 中国, CN201820760221.2[P]. 2018-12-11.
YAO Yuchun, WEI Yongxing, et al. A Shock Absorption Structure for Anchor Cable in High-intensity Seismal Areas. China, CN201820760221.2[P]. 2018-12-11.

[13] 魏永幸,刘会娟,王占盛,等. 支挡结构安全风险识别与防控研究[J]. 高速铁路技术, 2022, 13(1): 1-6.
WEI Yongxing, LIU Huijuan, WANG Zhansheng, et al. Study on Identification and Prevention of Safety Risks of Retaining Structures[J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(1): 1-6.

[14] 魏永幸,王占盛,罗一农,等. 支挡结构安全风险识别与设计参数自洽[J]. 高速铁路技术, 2022, 13(2): 25-30.
WEI Yongxing, WANG Zhansheng, LUO Yinong, et al. Study on Identification of Safety Risks of Retaining Structures and Self-Consistency of Design Parameters[J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(2): 25-30.

[15] 汪洋,黄金辉,付姗姗,等. 系统安全的思维转型:风险与韧性的比较研究[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(1): 62-68.
WANG Yang, HUANG Jinhui, FU Shanshan, et al. A Shift in Paradigm for System Safety: Comparative Study of Risk and Resilience[J]. China Safety Science Journal, 2018, 28(1): 62-68.

[16] 魏永幸,邱燕玲. 基于破坏机理与破坏模式的道路边坡分类浅析[J]. 中国勘察设计, 2019(2): 80-82.
WEI Yongxing, QIU Yanling. A brief Analysis of Road Slope Classification Based on Failure Mechanism and Failure Mode[J]. China Engineering & Consulting, 2019(2): 80-82.