

基于本地土壤改良的铁路边坡高稳定性生态护坡技术研究

祁革强¹ 岳峰¹ 王哲峰² 冯汉卿¹ 董刚¹

1 大秦铁路股份有限公司侯马北工务段 2 中国铁路太原局集团有限公司

DOI:10.32629/etd.v6i5.16842

[摘要] 针对太原铁路局侯马北工务段上内区段尚未应用生态护坡的现状,本文以本地原状土为研究对象,构建“保水剂-团粒剂-草纤维”协同喷播体系,开展配合比优化与抗冲刷性能评估。通过含水率与直剪试验得出最佳配合比,继而在多角度模型箱内进行降雨冲刷试验,最终以土壤流失量与坡面形态为核心指标进行统计判别。试验结果表明:最优喷播生态基质配比为干土:水:保水剂:团粒剂:草纤维=2000g:600g:2g:3g:25g,使近表层黏聚力由13.2kPa提高至28.35kPa、内摩擦角由4.9°提高至11.4°;1:1坡面的土壤流失量与沟蚀程度高于1:1.5,7.5cm的基质厚度可显著降低流失并抑制片蚀和细沟现象发生,雨强10mm/min导致的流失量显著高于5mm/min。本研究所提出的基质配比和喷播体系,可为铁路边坡稳定-耐久-生态的一体化防护提供可靠的理论参考。

[关键词] 生态护坡; 喷播基质; 保水剂; 团粒剂; 草纤维

中图分类号: F062.2 **文献标识码:** A

Seismic Performance Analysis of Complicated Joints in Ultra Limit Steel Structures Under Rare Earthquake

Geqiang Qi¹ Feng Yue¹ Zhefeng Wang² Hanqing Feng¹ Gang Dong¹

1 Daqin Railway Co. Ltd., North Houma Railway Maintains Department

2 China Railway Taiyuan Group Co. Ltd.

[Abstract] To address the absence of ecological slope protection along the Shangnei segment of the Houma North Maintenance Section (Taiyuan Railway Bureau), this study develops a native-soil-based hydroseeding system that synergistically integrates a water-retaining agent, a soil aggregating agent, and grass fibers. The optimal matrix formulation was first screened by water-content retention and direct shear tests, and then verified in a multi-angle adjustable slope model box under controlled rainfall. Soil loss and surface morphology were used as core response indicators for statistical analysis. Results show that the optimal mix ratio of the hydroseeding matrix is dry soil: water: water-retaining agent: aggregating agent: grass fibers = 2000 g:600 g:2 g:3 g:25 g, which increases near-surface cohesion from 13.2 kPa to 28.35 kPa and friction angle from 4.9° to 11.4°. Under identical thickness and rainfall intensity, the 1:1 slope exhibits greater soil loss and more pronounced rill development than the 1:1.5 slope; increasing matrix thickness from 5 cm to 7.5 cm significantly reduces soil loss and suppresses sheet/rill erosion, while further thickening to 10 cm yields limited marginal gains; at fixed slope and thickness, a rainfall intensity of 10 mm·min⁻¹ produces significantly higher soil loss than 5 mm·min⁻¹. The proposed matrix composition and hydroseeding scheme provide an in-situ parameter set and technical basis for integrated stability-durability-ecology protection of railway slopes.

[Key words] Ecological slope protection; Spray-applied substrate; Water-retaining agent; Aggregate-forming agent; Grass fiber

引言

我国铁路建设显著改善了居住和交通条件,但也不可避免地打破原有生态格局,改变坡面土体的汇流过程^[1]。我国中西部沿线不少边坡裸露或植被稀疏,降雨在短距离汇流后集中冲刷

坡面表层,易由片蚀发展为细沟、沟蚀,并诱发浅层滑坡或局部坍塌,长期将威胁路基稳定与行车安全^[2-3]。常见的刚性或半刚性护坡虽能抑制早期风化和小规模落石,但随着时间推移,常出现表层硬化、入渗减少、地表径流增大^[4-5]。因此,仅仅依靠传

统的坡面防护技术难以同时满足铁路运营对稳定性、耐久性和生态性的综合要求。

根据铁路边坡生态护坡需求, 现有研究在本地土中合理添加保水剂、团粒剂与草纤维等外掺材料, 能够显著提升土体的水分保持、内部结构、抗剪和抗冲刷性能, 同时还可促进植被恢复。张小庆^[6]在喷播基质中添加了0.3%的保水剂, 改善基质的孔隙结构、提升抗冲与抗剪能力并提高了出苗表现, 耐早期延长。李嘉宝等学者^[7]发现, 在喷播过程中, 泥浆基质会与高次团粒剂发生团粒反应, 形成一种具有强稳定性的土壤基础, 可以有效减缓水土流失, 为植物的生长、生态的恢复奠定基础。Masi E. B. 等学者^[8]通过回顾浅层滑坡稳定性的研究发现, 根系加固已成为边坡稳定性分析的热点, 采用喷播基质进行边坡治理对生态恢复具有重要的意义。

为满足铁路运营对“稳定-耐久-生态”一体化的性能要求, 本文在现有喷播技术与改性土研究的基础上, 以太原铁路局侯马北工务段上内区段原状土为工程背景, 构建了“保水剂-团粒剂-草纤维”协同的喷播基质体系, 提出配比与喷播厚度的工程建议, 为实际工程提供可靠参考。

1 工程概况

1.1 项目背景

以太原铁路局侯马北工务段上内区段为工程背景。坡面表层以黄色细粒-碎石混合土为主, 局部基底浅色硬土层裸露; 整体坡率偏陡, 个别路段接近1:1, 并设置有施工平台与便道。区段周边为运营线路与居民区混合环境。施工窗口与作业强度受行车组织与环保约束, 要求护坡技术具备成型快、对既有结构扰动小、在暴雨与干湿交替下保持抗冲刷与抗剪性能, 并兼顾景观与养护成本。

1.2 原状土采样与基本物性

为获取喷播配方与厚度设计所需的基本参数, 在现场边坡的上-中-下三段代表位置布设采样点, 优先选择近表层覆土连续的区域。采样避开降雨与强蒸发时段, 样品现场双层密封并贴附编号与坐标信息, 48h内入室试验; 用于细粒分析与界限含水率的样品低温避光保存, 防止水分与有机质变化。根据规范进行两次平行测定, 原状土含水率为18.4%, 平行偏差为0.52%, 小于最大允许平行偏差; 原状土密度为2.02g/cm³, 原状土密度偏差为0.01g/cm³, 满足规范要求。

1.3 喷播生态基质的材料组成

本研究的喷播生态基质以本地土为骨架, 辅以保水剂、团粒剂与草纤维构建“保水-结构-加筋”的协同体系: 保水剂在孔隙中形成可逆“微型水库”, 提高田间持水量与供水连续性, 减缓干湿循环导致结构软化与收缩; 团粒剂通过架桥与包覆促使细颗粒稳定团聚, 增大平均团聚体粒径并提升界面黏结与黏聚力, 从而降低可搬运细粒与起泥概率; 草纤维作为离散短纤维在表层形成三维微加筋网, 依靠咬合作用提高抗拉与抗剪强度及残余承载, 削弱表层冲切, 并为种子定植提供附着与遮蔽微环境。三者协同可在喷播成型后快速构建连续致密的近表层复合

体, 与原状土形成稳定界面, 兼顾早期抗冲刷与中长期植被恢复, 满足铁路边坡生态防护对可施工性与耐久性的双重需求。

2 试验方案

2.1 生态护坡配比试验

为研究各外掺组分对基质性能的影响, 本节在干土质量为2000g、目标含水率30%的前提下, 分别设置保水剂浓度梯度(0.5: 300、1: 300、2: 300)、团粒剂母液浓度梯度(0.75: 300、1.5: 300、4.5: 300), 以及草纤维掺量梯度(5g、15g、25g)。

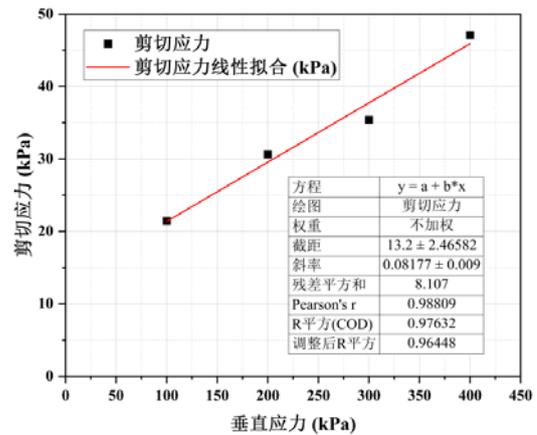
2.2 多角度模型箱降雨冲刷试验

装置由金属箱体、可调角支架、沉渣系统与上置喷淋系统构成, 可在同一时段并行开展多工况对比, 减少环境波动带来的偏差。喷淋系统通过稳压与流量控制实现目标雨强。

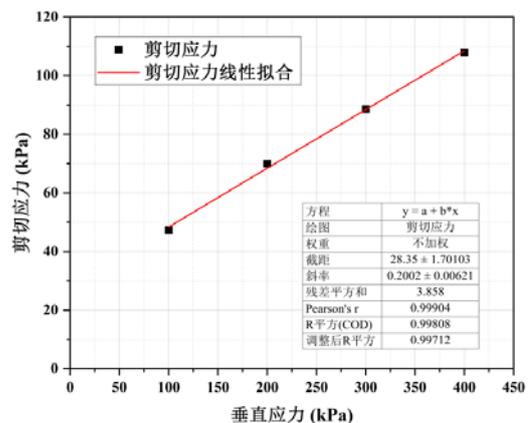
在清理并统一糙度的箱体内铺设喷播基质, 分层摊铺至设计厚度(5、7.5、10 cm), 边界设短挡板以抑制侧向失土。喷播后静置至含水率趋于稳定, 再进行降雨试验。坡率取铁路现场代表值1:1、1:1.5; 雨强取5mm/min、10mm/min; 每组工况设置不少于3个平行试件以评估重复性。

3 试验结果

3.1 基质最佳配比分析



(a) 原状土抗剪强度曲线



(b) 最佳配合比基质抗剪强度曲线

图1 基质抗剪强度比较

试验结果表明,综合保水性能与力学性能,“保水剂1:300、团粒剂1.5:300、草纤维25g”的基质表现最优。相较原状土,其黏聚力由13.2kPa提升至28.35kPa,增幅约114.8%;内摩擦角由 4.9° 提高至 11.4° ,增幅约132.7%,如图1所示。保水剂在1:300浓度时效果最佳,低于该水平吸释水调节不足;高于该水平则因局部水膜与充气孔隙增加,导致剪切界面润滑、致密度下降,强度收益递减;团粒剂以1.5:300为最优,过低难以形成稳定团聚体,过高易生成脆性膜并削弱基质与原状土界面黏结;草纤维掺量以25g为宜,进一步增加至35g出现“纤维团聚”的离析现象。因此,确定喷播生态基质的推荐初步配比为:干土:水:保水剂:团粒剂:草纤维=2000g:600g:2g:3g:25g。

3.2 基质抗冲刷稳定性分析

5mm/min雨强时,1:1与1:1.5坡率下,5cm、7.5cm、10cm厚基质层冲刷后,土壤流失量分别为441.2g与339.3g、245.57g与147.21g、408.23g与310.08g;10mm/min雨强时,1:1与1:1.5坡率下,5cm、7.5cm、10cm厚基质层冲刷后,土壤流失量分别为502.8g与345.4g、478.15g与416.75g、686.22g与637.74g。基质的干密度为 $1815\text{kg}/\text{m}^3$,基质流失率最高仅为0.61%,说明基质具有很强的抗侵蚀性。相比之下,5cm原状土在1:1.5边坡的降雨冲刷过程中早期即出现局部失稳与塌陷,整体抗冲刷能力与结构完整性明显劣于改性基质;而不同厚度的基质在两种坡率与两级雨强下均表现出稳定的抗冲刷能力,其中7.5cm兼具防护效果与成本优势,性价比最佳。坡面降雨冲刷形态如图2所示。

在相同厚度与雨强条件下,试验结果表明,1:1坡率较1:1.5坡率的土壤流失量更大、沟蚀更易发生。随坡面变缓,基质层的抗冲刷性能提高,表层侵蚀减轻。基质厚度试验结果表明,由5cm增至7.5cm可显著降低流失量并抑制片蚀或细沟,继续增至10cm的边际收益有限,材料利用效率下降,综合经济性与效能以7.5cm最优。雨强对比中,10mm/min的流失量显著高于5mm/min,雨强升高会放大近表层水动力剪切并诱发更强冲刷。



(a) 5cm原状土

(b) 7.5cm基质

图2 降雨冲刷坡面形态

4 结论

基于侯马北工务段上的本地土壤,本研究构建了“保水剂-团粒剂-草纤维”协同喷播体系,完成配合比优化与多角度模型箱降雨冲刷试验,得到如下结论:

(1) 基于保水性和力学性能双指标的综合评估,确定最优喷播生态基质配比为干土:水:保水剂:团粒剂:草纤维=2000g:600g:2g:3g:25g,可将原状土黏聚力由13.2kPa提高至28.35kPa、内摩擦角由 4.9° 提高至 11.4° ,显著提升土壤的近表层强度。

(2) 在相同基质厚度与雨强条件下,1:1坡面的土壤流失量与沟蚀发育程度均高于1:1.5坡面,表明在1:1-1:1.5坡度范围内,随坡面变缓基质的抗冲刷能力提高。

(3) 基质厚度由5cm增加至7.5cm可显著降低流失并抑制片蚀或细沟现象;当进一步增厚至10cm的边际效益有限。综合工程效果与材料利用率,推荐的喷播基质厚度为7.5cm。

(4) 在相同厚度与坡率条件下,10mm/min降雨导致的土壤流失量显著高于5mm/min,说明雨强升高会削弱基质的抗冲刷性能并加剧表层侵蚀。

[参考文献]

- [1]姜莉.复杂艰险山区铁路项目管理创新研究[J].高速铁路技术,2025,16(3):56-61.
- [2]李泽闯,尹智艺,耿翔宇.降雨诱发分散土边坡失稳破坏特性及预报研究[J/OL].岩土工程学报,1-11[2025-09-08].
- [3]王珊珊,吕刚,董亮,等.极端暴雨作用下排土场边坡细沟侵蚀过程模拟研究[J].水土保持研究,2025,32(4):18-25.
- [4]尧俊凯,叶阳升,王鹏程,等.硫酸盐侵蚀水泥改良路基段上拱研究[J].岩土工程学报,2019,41(04):782-788.
- [5]高建,冯瑞玲,屈磊,等.硫酸盐侵蚀水泥稳定级配碎石膨胀变形计算方法[J].铁道学报,2025,47(08):171-181.
- [6]张小庆.保水剂不同配比在岩壁复绿基质中的应用研究[D].南京林业大学,2010.
- [7]李嘉宝,刘云亮,张旭,等.边坡生态修复技术研究[J].人民黄河,2025,47(S1):90-91.
- [8]Masi EB, Segoni S, Tofani V. Root Reinforcement in Slope Stability Models: A Review. Geosciences. 2021;11(5):212.

作者简介:

祁革强(1967--),男,山西运城人,高级工程师,研究方向:铁路工程防冲减灾。