

交通荷载下高原公路翻浆病害机理与处治对策

张军辉¹, 陈志德¹, 高峰^{1,2*}, 纳启财², 马鹏飞³, 肖林³

(1.长沙理工大学 公路工程教育部重点实验室, 湖南长沙 410114; 2.青海省交通控股集团有限公司 科技信息部, 青海 西宁 810021; 3.青海省高速公路养护服务有限公司 工程技术部, 青海 西宁 810021)

摘要: 交通荷载下路基结构动水力响应及颗粒迁移特性是揭示翻浆病害形成机理和演化机制的基础与关键。该文通过开展动荷载下分层砾石-砂粉土柱试验, 探究了翻浆状态下细粒迁移的驱动机制。试验结果表明: 泥浆晃动造成砾石层内交替出现了正、负值压力梯度, 该振荡压力梯度有效增强下部砂粉土层孔隙渗流, 随后为细粒迁移提供了必要的动水力条件。细粒迁移导致泥浆浊度增大至稳定值, 撤去动力加载泥浆, 细粒很快发生沉降并填充在砾石孔隙中形成泥化夹层, 从而显著降低砾石-砂粉土柱的竖向渗透性。结合青海省G0615德马高速公路(花石峡至久治段)翻浆病害处治工程实践, 发现降雨融雪水分从沥青面层入渗为病害重要诱因, 这些水分甚至在基层内产生“水包”。车辆通过时路面结构层挤压变形, 水稳基层中泥浆沿裂隙向上冒出并造成砂砾料逐渐发生侵蚀破坏。考虑施工难度、经济成本和青藏高原生态环境保护要求, 根据病害等级和危害程度不同, 分别采用了注浆修补封闭法和开挖铣刨封闭法进行病害处治。上述方法在加固封闭水稳基层、降低路面渗透性等方面发挥了积极作用。相关研究为认识翻浆病害发展规律、提升病害处治能力及推动高原公路高品质养护提供了有益借鉴。

关键词: 翻浆冒泥; 抽吸效应; 性能劣化; 病害处治; 高原公路

中图分类号: U416

文献标志码: A

Mechanism of Mud Pumping on Plateau Highway under Traffic Loads and Its Treatment Strategy

ZHANG Junhui¹, CHEN Zhide¹, GAO Feng^{1,2*}, NA Qicai², MA Pengfei³, XIAO Lin³

(1.Key Laboratory of Highway Engineering, Ministry of Education, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China; 2.Science and Technology Information Department, Qinghai Transportation Holding Group Co., Ltd., Xining, Qinghai 810021, China; 3.Engineering Technology Department, Qinghai Expressway Maintenance Service Co., Ltd., Xining, Qinghai 810021, China)

Abstract: The dynamic hydraulic response and particle migration of subgrade structures under traffic loads are fundamental to reveal the formation and development mechanisms of mud pumping. The driving mechanism of fine particle migration in the mud pumping state was explored by conducting laboratory tests on layered gravel-sandy silt columns under dynamic loads. The results show that the slurry sloshing causes alternating positive and negative pressure gradients within the gravel layer. This oscillating pressure gradient enhances the pore permeability in the underlying sandy silt layer, providing the necessary hydrodynamic conditions for fine particle migration. Fine particle migration increases the slurry turbidity to a stable value. Upon the removal of dynamic slurry loading, the fine particles quickly settle and fill the gravel pores, forming a muddy interlayer, which significantly reduces the vertical permeability of the gravel-sandy slit column. Based on the engineering practice of treating mud pumping on the G0615 Dema Expressway (Huashixia to Jiuzhi Section) in Qinghai

收稿日期: 2025-01-20(修改稿)

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(编号: 52308438); 湖南省自然科学基金青年基金资助项目(编号: 2023JJ40035); 湖南省公路先进建养技术国际科技创新合作基地开放基金资助项目(编号: kfj220801); 公路工程教育部重点实验室开放基金资助项目(编号: kfj2405)

作者简介: 张军辉, 男, 博士, 教授. E-mail: zjhseu@csust.edu.cn

*通信作者: 高峰, 男, 博士, 特聘教授. E-mail: gao-feng@csust.edu.cn

Province, it was found that an important driver for mud pumping formation is the infiltration of rainfall and snowmelt water through the asphalt surface layer, and this water can even form “water pockets” within the subbase. When vehicles pass, the deformation of the pavement structural layers causes the slurry in the pores of the water-stable base layer to be squeezed upward through cracks, leading to continuous erosion and damage to the gravel materials. By considering construction difficulty, economic costs, and the ecological environmental protection requirements of the Qinghai–Xizang Plateau, different treatment methods such as grouting repair and sealing, as well as milling and sealing were adopted, respectively based on the severity and level of the hazard. These methods have played a positive role in sealing and reinforcing the water-stable base layer and reducing pavement permeability. The research provides valuable insights for understanding the development patterns of mud pumping, effectively enhancing the treatment capabilities and promoting high-quality maintenance of plateau highways.

Keywords: mud pumping; pumping effect; performance degradation; disease treatment; plateau highway

0 引言

“交通运输安全与应急保障”“重大设施寿命预测技术”“复杂系统、灾变形成及其预测控制”等涉及交通基础设施全寿期安全保障与综合性能提升相关专题已列为中国《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020)》优先发展主题或前沿技术或基础研究^[1]。作为中国西部重要省份,2024年底青海省公路通车总里程达9.1万km,高速(含一级)公路里程达5 150 km,实现所有市州、76%的县城通高速公路,可以预见未来高原公路养护需求将大幅度增长^[2]。

唧泥翻浆作为在役公路常见病害之一,其往往造成基层结构裂损、路面坑槽脏污、服役性能变差以及运营安全隐患突出^[3]。每年公路有关部门需要投入大量人力、物力开展病害检测和处治工作,并逐渐形成了以防水排泥为核心的处治措施。然而,相关措施在公路建成初期能够发挥良好作用,但中长期防治效果则不甚理想,如铺设土工织物能在有限时间内控制翻浆却不能彻底阻断泥浆流动^[4],不少路段运营一段时间后翻浆再次发作。根本原因在于,对翻浆病害形成机理及防控技术研究尚不完善,导致制定防治措施时带有一定的盲目性。

翻浆发展具有隐蔽性、渐进性、周期不规律,难预测等特点,且与道路结构、填料类型、交通荷载和水分补给条件等内外因素密切相关^[5],围绕病害形成机理问题长期吸引国内外交通岩土领域专家的关注。翻浆病害发生和发展包括交通荷载下公路岩土结构动水力特征及细粒固-液相变迁过程^[6]。Alobaidi等^[7]较早提出了翻浆形成必备条件:①高含水量填料;②充足的细粒;③行车动荷载。当填料

处于高饱和状态时,行车动荷载下填料因排水不畅而累积超孔隙水压力,且在车辆驶过超孔隙水压力逐渐消散,从而不利于保持填料内部稳定性^[8]。为了弄清泥浆迁移的驱动机制,Sheng等^[9]提出了行车动荷载下抽吸效应,但围绕抽吸成因并未给出详细阐述;Zhang等^[10]发现行车动荷载下填料内超孔隙水压力发生振荡现象,进而分析了振荡超孔隙水压梯度与泥浆浊度发展之间的关联;Gao等^[11]研究了抽吸效应下填料内部稳定性问题,提出了翻浆过程更接近内部侵蚀而非土液化;Hayashi等^[12]、Duong等^[13]、Wang等^[14]、张升等^[15]先后发现超孔压梯度能够增强水与细颗粒的运移能力,但现有研究普遍关注单调循环加载,极少关注颗粒破碎、冷热-干湿循环等多场耦合作用下翻浆机制。

土中细粒与水之间相互作用是翻浆发展的来源和条件。在数值计算方面,Sibille等^[16]采用DEM生成颗粒和LBM程序构造孔隙流体,探讨了动水力作用下细粒脱离的微观过程;Zhou等^[17]研究了颗粒的粒径和体积分数、液体的流速和流量等因素对颗粒运动状态的影响;Bedrikovetsky等^[18]描述了流体拖拽下细粒脱离、附着和迁移特征,为判别细粒运动规律提供了理论参考。然而不同学者往往采用不同的颗粒生成方法、颗粒参数与接触模型,造成结果验证困难且离散性较大;Wank等^[19]发现在单一粒径的粗粒很难出现翻浆,但适当增加细颗粒含量,动力加载下颗粒悬浮概率会明显增大;Aw^[20]统计了8种翻浆冒泥土的物理性质,发现中、低塑性粉土最易发生翻浆,因为这类土通常具有畅通的渗流通道;冷伍明等^[21]分析了国内外61个翻浆冒泥土的物理状态指标,提出的综合评价指标为填料选择提供了依据;Chawla等^[22]研究了土工合成材料在加固基层以及对

翻浆病害的控制效果。在中国北方及青藏高寒地区,通过铺设高热阻的保温层能够降低冻融翻浆发生风险^[23]。大量工程实践表明:上述病害的处治效果并不理想,且现有处治措施缺乏科学、合理的选择标准,也造成处治效果评价难、成本不可控、能源资源浪费等问题。

基于此,本文围绕中国青藏高原公路长期存在的翻浆问题,以及着眼未来公路高品质建养的重大需求,考虑填料特性、结构特点及服役环境规律,开展了交通荷载下翻浆病害机理与处治对策研究。通过在室内再现动荷载下路基翻浆过程,调查了振荡超孔隙水压和泥浆浊度增长之间的内在关联,阐明了泥浆晃动对土中细粒运动的驱动机制。结合青海省G0615德马高速公路(花石峡至久治段)翻浆病害处治实践,从查明病害水源成因、病害程度评价与处治方案选择优化等方面分析了防控翻浆病害的有效途径。相关成果对认识翻浆病害发展规律、指导翻浆防控工作,以及提升中国公路路基路面结构设计方法和养护技术具有重要的理论意义和工程价值。

1 翻浆病害室内试验

1.1 试验系统及材料

翻浆冒泥模型试验系统包括竖向加载、水位控制和数据采集装置等,详细的结构组成与功能介绍可从先前的研究报告获取^[15]。本次试验采用从试样表面施加动荷载和底部补水方式还原路基承受的水-应力赋存条件。试验材料包括砾石和砂粉土,级配组成如图1所示。砾石体积质量为2.64,最大和最小孔隙比为0.78和0.56,其主要成分为高强度玄武岩,在动力加载下未发生颗粒破碎;砂粉土体积质量为2.68,最大和最小孔隙比为0.69和0.42,细粒含量(粒径小于0.075 mm)为14%,这些粉细粒填充在砂砾组成的骨架孔隙内,渗流条件下易发生运移侵蚀,属于翻浆冒泥土的级配范围^[24]。

1.2 试验设计及荷载

采用分层装填压实法制作试样,上部砾石层的初始压实度为95%,孔隙比为0.6;砂粉土层初始压实度为90%、干密度为1.85 g/cm³。试样直径180 mm,超过砾石平均粒径的10倍,能够较好地克服尺寸效应^[25]。分层砾石-砂粉土柱是真实路床的简化模型,自上而下分别代表路床基层和路基层,目的是突显翻浆过程颗粒运动。试验水位高度为400 mm,即整

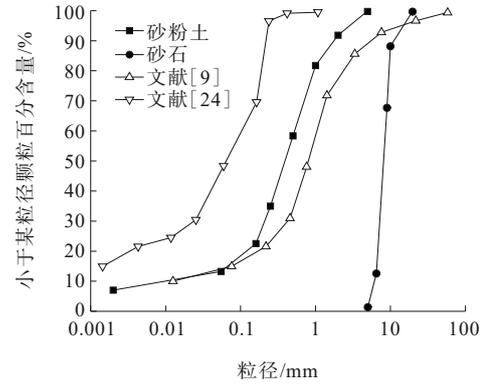


图1 试验材料的级配组成

Figure 1 Gradation composition of test materials

个试样在加载过程中完全被浸没。沿试样竖向安装了5个采集层,每一层包括DMTY型土压力盒(量程:0~100 kPa)、DMTY型孔隙水压力计(量程:-30~30 kPa)和Ec-5湿度计(量程:0~100% VWC),所有传感器在安装前均通过了严格校准以确保测试结果准确性,如图2所示。结合先前的车辆轴重及路基动应力测试结果^[26-27],确定了动力加载的控制性强度参数如下:平均应力 σ_m 为32 kPa,动应力幅值 σ_d 为10 kPa,加载频率 f 为10 Hz。相比于真实的交通荷载,本次试验动力加载类型为单向循环加载,即不考虑因真实车身运行振动和路线不平整而引起的加载跳动。试验期间室内温度保持为(20±2) °C,进一步确保数据的准确性。

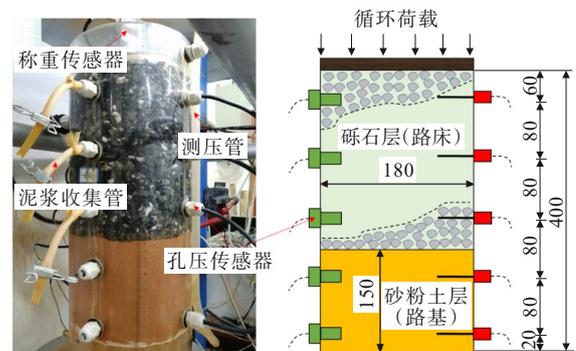


图2 加载前试样照片与结构示意图(单位:mm)

Figure 2 Specimen photos and structure before loading (unit: mm)

2 结果与讨论

2.1 砾石层中动水力响应

饱和砾石层在不同深度处的超孔隙水压力随时间的变化规律如图3所示。超孔隙水压力是用瞬时孔隙水压力减去相应深度的初始静水压力。试验结

果表明:循环荷载下砾石层内超孔隙水压力呈现出明显的振荡现象,且振荡超孔隙水压力始终分布在初始静水压力线的两侧,即正、负超孔隙水压力交替出现在同一砾石层深度。由于砾石层内部存在很多相互连通的大孔隙,细颗粒向上迁移造成原本清澈的孔隙流体逐渐变成泥浆,循环荷载下这些泥浆会晃动,在泥浆液表面处能观察到起伏变化的波高,由此影响分层砾石-砂粉土柱的动水力响应。根据描述流体运动的伯努利方程可知,液体晃动速度将影响超孔隙水压力的振动幅值和振动频率^[28]。当泥浆内某点处的晃动速度越大,表明该位置的静水头就越小;当晃动引起液面波高响应增大,此时超孔隙水压力的振动幅值也趋于增大。因此,在试样表面上施加的循环荷载是诱发泥浆晃动并造成超孔隙水压力振荡的原因。当停止施加循环荷载,砾石层内的泥浆晃动很快消失,此时孔隙水压力恢复为静水压力,即超孔隙水压力降为0。

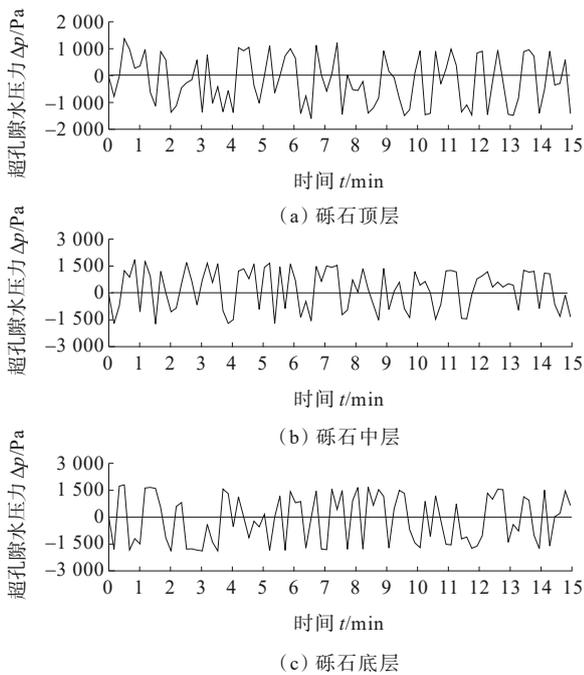


图3 砾石层不同深度处超孔隙水压力随时间的变化
Figure 3 Variation of excess pore pressure with time at different gravel layer depths

2.2 抽吸效应形成机理

根据振荡超孔隙水压力的分析结果,定义超孔隙水压力梯度*i*表征循环荷载引起的饱和砾石层动水力响应,由此探究分层砾石-砂粉土试样中颗粒迁移的驱动机制。超孔隙水压力梯度计算式如下:

$$i = \frac{\Delta p_a - \Delta p_b}{\gamma_w h} \quad (1)$$

式中: Δp_a 和 Δp_b 为在砾石层深度*a*和*b*处的瞬时振荡超孔隙水压力(Pa); γ_w 为孔隙流体的重度,取10 kN/m³; *h*为深度*a*和*b*两点之间的竖向间距(m)。

基于此,利用加载过程中砾石表层和底层的振荡超孔隙水压力,计算整个饱和砾石层内压力梯度时变特征,结果如图4所示。试验结果表明:压力梯度随时间呈现出起伏的振荡性,且振荡的压力梯度值也始终分布在“零”梯度线两侧,从而导致正、负压力梯度交替出现在泥浆液中。需要指出,压力梯度为矢量,其正、负号仅代表其作用方向。砾石-砂粉土接触面作为泥浆晃动的底边界,且与下部砂粉土孔隙贯通,压力梯度能够通过泥浆液传递并施加在砂粉土层表面,效果如同一个“水泵”,不仅增强了砂粉土层内部孔隙流动,同时孔隙流速和流动方向随正、负压力梯度交替出现而不断变化,还降低了砂粉土层的内部稳定性。结合压力梯度的方向定义,正值压力梯度将对土中细粒施加向下渗透力,而负值压力梯度则产生向上拖拽力。在砂粉土表层,当渗流速度超过细粒临界流化速度^[29],即拖拽力打破细粒原本静力平衡状态后,这些细粒就会被孔隙渗流裹挟而发生悬浮和迁移运动,从而为翻浆孕育和发展提供了物质来源。细粒在土孔隙中起动的复杂力和能量综合作用的结果,受成分、比表面积、孔隙结构等影响,有关细粒运动特征描述还需要结合细观测试来确定。

2.3 泥浆浊度时空演化规律

不施加循环荷载所有土颗粒都保持静止状态,清晰的砾石-砂粉土接触面长期存在。施加循环荷

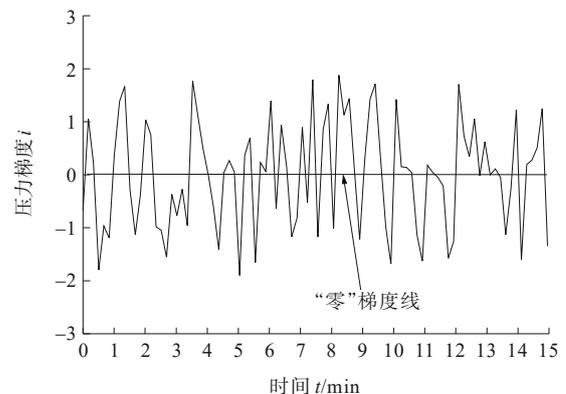


图4 砾石层内压力梯度随时间变化
Figure 4 Variation of pressure gradient in gravel layer with time

载后细粒向上迁移,并在砾石层悬浮而形成泥浆(图5)。随着加载次数增加,土中更多的细粒进入上部砾石层内。不难看出,细粒迁移速度、迁移量和迁移长度是决定泥浆浊度时空分布及演化规律的重要因素(浊度被定义为单位体积泥浆液中所含的悬浮细粒质量)。停止施加循环荷载,泥浆中悬浮细粒在重力下发生沉降,并逐渐沉积在砾石底层形成一个低渗透泥化夹层。先前研究认为,泥化夹层的出现归因于动力加载下碎石颗粒挤压进入土表层而形成^[30],通过对比试验前后的试样高度变化,能够发现泥浆中的细粒沉积更易于促使泥化夹层发展,沉积的细粒越多则泥化夹层越厚。泥化夹层的出现直接影响整个试样的竖向渗透性。经测试,渗透系数 k 由试验前的 7.0×10^{-6} m/s变成试验后的 5.2×10^{-7} m/s。在真实的翻浆路段,土中细粒迁移和沉积同样会造成路床排水能力降低,意味着雨季更易出现路床积水,为翻浆病害发展提供了更加适宜的孕育条件^[31]。分层砾石-砂粉土柱试样总沉降量为4.5 mm,即竖向应变仅为试样高度的1.1%,因此在讨论翻浆驱动机制时可忽略沉降变形的影响。

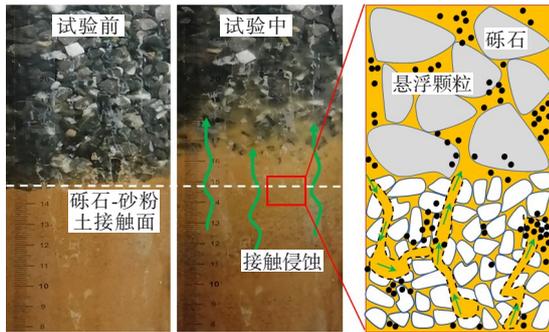


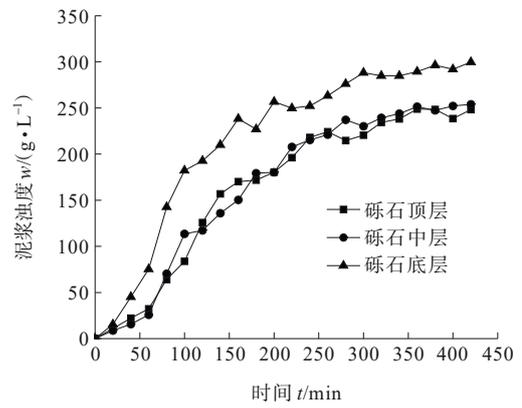
图5 抽吸效应诱发水-质迁移翻浆形成示意图

Figure 5 Mud pumping induced by pumping effect causing fluid and particle migration

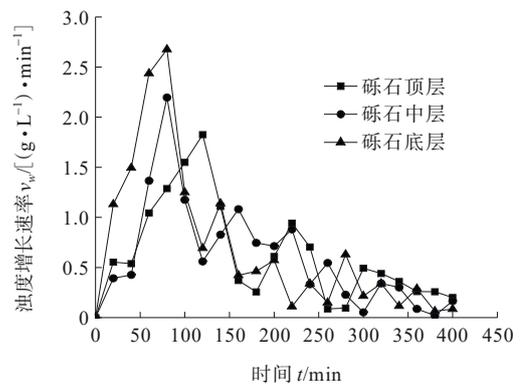
砾石层不同深度处泥浆浊度随时间的变化,如图6所示。

由图6试验结果可知:泥浆浊度的增长速率呈现减小趋势,且最终增长至一个稳定浊度。在颗粒向上迁移过程中,一些较粗颗粒会堵塞在砾石孔隙,尽管细颗粒能够穿过砾石底层并保持向上迁移运动,但是逐渐变窄的孔隙通道增大了颗粒向上迁移的阻力,因此在同一时刻砾石底层的泥浆浊度普遍会超过砾石中、上层的泥浆浊度。同时,从泥浆浊度定义中可以看到,颗粒迁移的速度和规模影响泥浆浊度

的演变特性。在迁移的初始阶段,较多的细颗粒在抽吸效应下以较高速度发生迁移运动。而随着颗粒迁移的进行,在砂粉土表层中可侵蚀的细颗粒含量逐渐降低,从而导致泥浆浊度趋于一个稳定值。泥浆浊度的时空演变特性反映出抽吸效应仅能造成其影响深度范围内的细颗粒发生侵蚀和迁移,而更深层的颗粒则较难进入碎石层中。砂粉土的级配、压实度、渗透性以及动荷载强度均影响侵蚀影响深度,该侵蚀深度的确定对定量评估翻浆冒泥引起的路基劣化程度具有重要价值。



(a) 泥浆浊度



(b) 泥浆浊度增长速率

图6 砾石层内泥浆参数时变曲线

Figure 6 Time-varying curve of slurry parameters in gravel layer

通过上述研究,笔者认为翻浆形成机理为:防排水措施不良的路床路基发生积水,在交通荷载激励下积水晃动诱发超孔隙水压力梯度,由此促使土中孔隙渗流驱动细粒发生迁移。颗粒沉积造成路床排水能力变差,特别是在雨季,积水为形成更强的抽吸效应提供了有利条件。上述过程循环往复,最终诱发翻浆病害。除降雨融雪入渗外,地下水位上升同

样可能造成道路内部积水,为有效处治病害,必须严控道路内部水含量和通过路表封闭防水,以及在路基层设置防水层,均可在一定程度上缓解翻浆病害发生。

3 翻浆病害处治对策

3.1 工程概况

青藏高原是中国面积最大、世界海拔最高的高原,被称为“世界屋脊”、地球“第三极”。近年来受全球气候变化影响,青藏高原地区在役公路工程病害呈现频发特征、规模和危害性也不断扩大,包括路基冻融沉陷翻浆、路面开裂坑槽等问题,严重威胁高原交通运输安全,迫切需要掌握高寒高海拔地区公路病害特征和服役状态,并针对病害开展及时有效的处治防控工作。本次翻浆病害处治工程位于青海省德令哈—马尔康高速公路(简称“德马高速”),该路是京藏高速(G6)联络线德令哈—康定高速公路(G0615)的重要组成部分,于2013年8月开工建设。2017年11月13日,德马高速公路青海省花石峡至久治段全线通车,该段西起果洛藏族自治州玛多县花石峡镇,东至果洛藏族自治州久治县,途经玛多、玛沁、甘德、久治4县10个乡镇,线路全长389 km,平均海拔4 150 m。由于青藏高原气候严寒、不良地质及冻土发育、水文条件复杂等因素,德马高速花久段在设计、施工、运营各阶段,均遇到了高原工程建设中不可回避的冻害问题。自建成通车运营以来,局部路段冻融沉陷、唧泥翻浆反复发作,特别是在山坡过水路段,翻浆病害更加严重,养护大队对其组织过多次修补,花费大量人力物力但始终未解决问题(图7)。

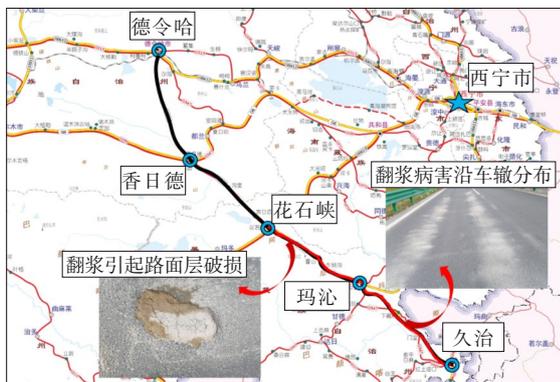


图7 G0615德马高速(花石峡至久治段)翻浆实地调研
Figure 7 Field investigation on mud pumping on G0615 Dema Expressway (Huashixia to Jiuzhi Section)

3.2 病害发育特征

开展病害现场调研分析是研究病害成因与发展规律的基础,进而提出科学有效的处治措施。笔者发现翻浆病害路段普遍存在沥青面层级配不良、离析严重和裂隙发育等特点,且翻浆主要出现在行车道的车辙线处,在超车道和硬路肩的病害较少。翻浆间距1~3 m,翻浆物质包括矿粉、粉黏土和其他细粒,根据路基路面设计方案推测,上述翻浆物质主要来自水泥稳定砂砾基层和底基层,少量来自路基表层。为进一步弄清翻浆对路基路面结构的危害,在实地调研中开展了钻芯取样(图8)。多次钻芯发现行车道路面结构层之间几乎不具备黏结性,沥青路面甚至因过于松散而无法完整取芯。原设计水稳基层厚度为35 cm,但在部分严重翻浆路段取芯发现水稳基层厚度最薄,仅为15 cm左右,表明翻浆过程的侵蚀效应已造成大量水稳基层砂砾料发生流失,同时在水稳基层和底基砂砾层处有大量水分或泥浆涌出,表明可能已形成了弥散在底基层的“水包”。当钻探深度继续增加,可以发现路基土因含水量增加而呈现明显的湿化软化现象。

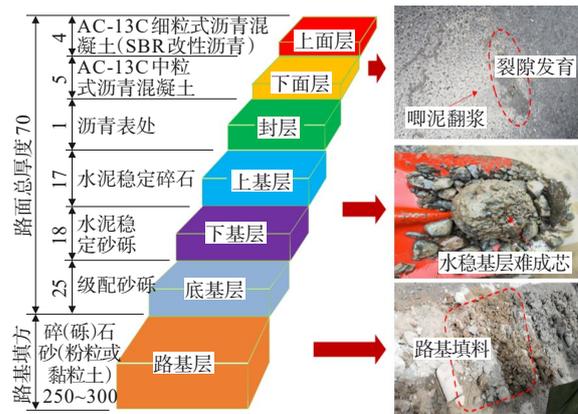


图8 G0615德马高速结构设计方案与病害取芯调查(单位:cm)

Figure 8 G0615 Dema Expressway structure design scheme and disease coring investigation (unit: cm)

为查明病害路段结构内部的水分来源,特别是道路中分带是否存在渗水通道,实地调研时对严重病害点处中分带进行了开挖检测。开挖检测结果显示:中分带底部防水土工布较为完好,很少有水分会自中分带向两侧道路横向流动。因此,德马高速花久段翻浆病害主要成因为:路面结构层施工质量控制不佳,部分路段沥青混凝土级配不良且离析严重,

复杂气候环境和交通荷载耦合下造成裂隙发育,降雨融雪在路表产生积水并沿裂缝入渗,从而造成材料性能变差和内部积水。由于水稳基层内含有矿粉等细粒,它们往往充填在骨架结构组成的孔隙当中,容易悬浮分散到水中并形成泥浆。当车辆通过时,路面结构层发生挤压变形,水稳基层孔隙中泥浆沿裂隙向上“冒”出并形成翻浆(图9)。

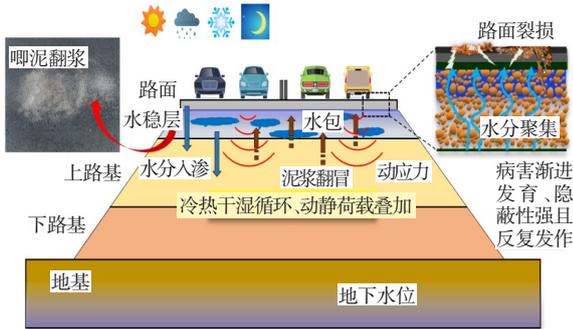


图9 复杂运营环境增大道路翻浆病害发生风险示意图
Figure 9 Mud pumping risk increased by complex operating environment

3.3 处治思路与方案

正确分析病害成因是科学制定处治方案和处治施工的基础和前提。翻浆是因水而生,所以病害处治的有效途径是封闭面层,加固水稳基层,提高路基强度,降低路面渗透性,使内部积水能够快速排出并切断降雨融雪下渗路径,避免水分再次侵入水稳基层和路基层^[32]。考虑到青藏高原地区生态环境脆弱、保护要求高,特殊的地理位置和地质条件给病害处治提出了更高要求。针对在役公路病害处治方案的选择,还应充分考虑经济性、可行性及技术资源配置等方面因素。在病害处治设计阶段,充分考虑水文地质、气候环境和施工工期等特点,设计合理的路基路面结构材料与施工工艺,达到既能满足道路施工质量控制要求,又能改善路域排水条件,从而实现有效预防翻浆病害。

G0615德马高速花久段穿越阿尼玛卿雪山,形成了很多低洼积水、承压水和山坡过水等不良路段,这些路段翻浆病害“久治不愈”。根据翻浆病害发展程度和危害影响,提出了适用于高寒高海拔地区道路翻浆病害处治思路与方法(图10)。当沥青混凝土面层仅出现轻微破损、开裂,积水积泥未明显造成水稳基层破坏,则被诊断为轻度翻浆,采用注浆修补封闭法加固水稳基层和修复沥青面层;当沥青混凝土路

面层出现明显破损、裂隙发育程度高,坑槽积水积泥脏污路面,且水稳基层因翻浆出现明显的侵蚀破坏,则被诊断为重度翻浆,采用开挖铣刨封闭法清除积泥、重铺水稳基层和沥青面层,以期实现处治翻浆病害。

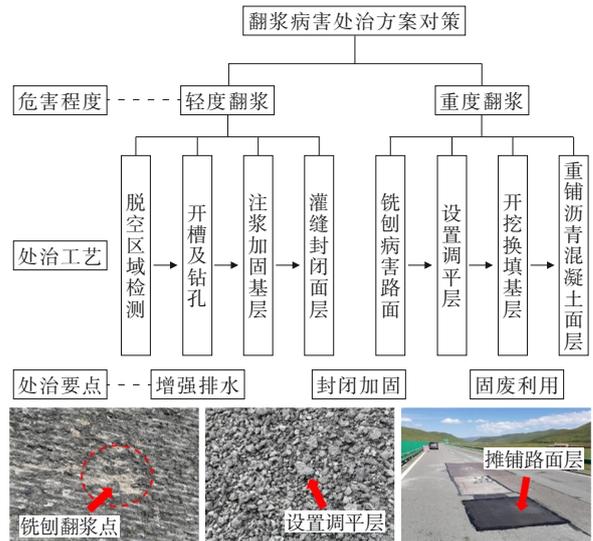


图10 高原公路翻浆病害处治思路与方案
Figure 10 Approach and solution for treating mud pumping on plateau highway

注浆处治翻浆在工程实践中长期被使用并取得了较好效果^[33],主要工艺包括首先查明道路结构内部脱空和积水区域,将基底虚渣和积水清理干净;注浆孔钻至水稳基层底部,将水泥基浆液拌和均匀,不得出现离析现象;实时调控注浆压力和注浆流量,使水稳基层固结、软弱基层挤密形成固结体,按规定养生直至水泥基浆液凝固达到设计强度后恢复通车。对于开挖铣刨封闭法处治重度翻浆,需要铣刨整个原路面层,并挖除路床40~50 cm深度范围内的填土,挖出的路床土移至外侧边坡;根据路面标高设计要求,采用破碎铣刨料掺级配砾石回填设置调平层,尽量减少暴露时间,依次回铺18.0 cm水泥稳定碎石下基层+17.0 cm水泥稳定砂砾上基层+1.0 cm沥青同步碎石封层等结构层并恢复边坡防护。病害发生在山坡过水断面等不良路段,辅以设置中央分隔带排水管以改善排水情况,之后进行铣刨重铺处治。在铣刨过程中发现路面结构存在贯通裂缝等病害时,与修补坑槽相同,采用矩形开挖修补且各边垂直或平行道路中线,用以增强新老路面结构层的界面黏合^[34]。良好的道路排水系统是防止水分侵入和预

防翻浆的重要措施^[35],对此采取在路槽下设置横向盲沟,及时排出春融化冻的多余水分;根据路侧坡脚、分离式路基中间积水情况,增设边沟或排水沟;为防止边坡水下渗,增设拦水带+急流槽,用以完善排水系统。施工期间正值高原雨季,基于上述防排水措施,可观察到积水从路肩顺畅排出,封闭效果较好(图11)。



图 11 G0615 德马高速翻浆病害处治前后的照片

Figure 11 Mud pumping before and after treatment on G0615 Dema Expressway

病害处治过程严格遵循“生态优先,绿色发展”的理念^[36],并贯彻“应用尽用”的原则,对于开挖废弃物充分资源化回收利用,采用沥青铣刨料替代砂砾材料回填调平,这样不仅避免了废弃物堆积,还降低了新材料开采和运输成本。根据道路翻浆等级和危害程度,采用了差异化的处治思路和方案,包括注浆修补和铣刨重铺技术,实现了填充路基路面结构内脱空区域,清除“水包”并提高承载力,防止道路翻浆病害发作并提升结构韧性。

当前翻浆试验、现场测试与处治施工的初步工作对开展更深入的病害机理与靶向处治研究具有启发作用。高寒高海拔地区气候环境季节性差异显著,尤其是冻融循环、温度波动及降水融雪等对路基路面稳定耐久性的影响大^[37]。因此,需要构建大温差和强冻融极端环境下的翻浆孕育模型,阐明高原道路病害形成过程与致灾机制,为建立病害等级评价方法和评价标准提供理论支撑;研制具备全天时、全天候、大范围和高精度的病害检测系统,实现准确掌握道路病害空间分布、形态特征和演化趋势,研发病害协同处治技术并开展应用示范,加强处治效果和路用性能后评价研究,从而为制定最优处治决策提供决策依据。

4 结论

本文以青藏高原地区公路翻浆病害处治需求为导向,综合采用室内试验和现场测试等方法,探究了高原暖湿化背景下道路翻浆形成机理与处治对策。主要结论如下:

(1) 泥浆晃动所形成的振荡超孔压梯度是诱发翻浆病害形成的重要驱动因素。从饱和砾石-砂粉土柱测试结果可见,动荷载下饱和砾石层泥浆晃动造成了超孔隙水压力呈现持续振荡特点,由此造成正、负压力梯度交替出现。该压力梯度增强砂粉土表层内的孔隙渗流,并当渗流施加在细粒表面上的拖拽力打破原本的静力平衡状态时,这些细粒被孔隙渗流裹挟而产生脱离、悬浮和迁移流动。

(2) 颗粒迁移进入上部砾石层形成泥浆,在动荷载下泥浆浊度首先快速增长而后逐渐达到稳定值,这归结为砂粉土表层内的细粒含量在持续降低。明确不同抽吸强度下土体侵蚀深度将为定量评估翻浆发展与危害影响提供了重要线索。翻浆还造成饱和砾石-砂粉土柱的竖向渗透性显著降低,特别是无动力加载时,由于颗粒沉降造成在砾石底层形成低渗透的泥化夹层。基于诱发翻浆所需的富水条件,全方位结构封闭在今后公路设计建造中须被重视。

(3) 结合 G0615 德马高速公路翻浆病害处治工程,利用现场勘查测试,发现翻浆物质包括矿粉、粉黏土和其他细粒,在水泥稳定砂砾基层和底基层发生了明显的侵蚀破坏;病害路段沥青面层普遍级配不良、离析严重且裂隙发育,导致降雨融雪水分下渗并聚集在路床基层是病害发生的重要诱因。按病害发育和危害程度,制定了注浆修补封闭和开挖铣刨封闭法处治,成功遏制了病害的反复发作。从高原生态环境保护、施工难度、经济成本和处治效果等方面论述了当前处治技术的优势和不足,为今后加强高原公路翻浆病害致灾机制与靶向处治领域研究指明了方向。

参考文献:

References:

- [1] 中华人民共和国国务院.国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)(中华人民共和国国务院)[J].经济管理文摘,2006(4):4-19.

- The State Council, People's Republic of China (PRC). National medium and long-term science and technology development plan outline(2006—2020)(The State Council, People's Republic of China (PRC)) [J]. *Economy and Management Digest*,2006(4):4-19.
- [2] 徐变银. 青海省所有市州和76%的县城通高速公路[EB/OL]. 西海都市报,2024-12-25.
XU Bianyin. All cities and counties in Qinghai Province and 76% of the county highway[EB/OL]. *Xihai Metropolis Daily*,2024-12-25.
- [3] ZHANG S, SHENG D C, ZHAO G T, et al. Analysis of frost heave mechanisms in a high-speed railway embankment [J]. *Canadian Geotechnical Journal*,2016,53(3):520-529.
- [4] KERMANI B, XIAO M, STOFFELS S M, et al. Reduction of subgrade fines migration into subbase of flexible pavement using geotextile[J]. *Geotextiles and Geomembranes*,2018, 46(4):377-383.
- [5] 郑健龙,刘绍平,胡惠仁. 公路路基湿度计算理论研究进展[J]. *中外公路*,2023,43(1):1-10.
ZHENG Jianlong, LIU Shaoping, HU Hui ren. The calculation theory of humidity for subgrade: A perspective review[J]. *Journal of China & Foreign Highway*,2023, 43(1):1-10.
- [6] NGUYEN T T, INDRARATNA B, KELLY, R, et al. Mud pumping under railtracks: Mechanisms, assessments and solutions[J]. *Australian Geomechanics Journal*,2019,54(4): 59-80.
- [7] ALOBAIDI I, HOARE D J. Mechanisms of pumping at the subgrade-subbase interface of highway pavements[J]. *Geosynthetics International*,1999,6(4):241-259.
- [8] ALOBAIDI I, HOARE D J. The development of pore water pressure at the subgrade-subbase interface of a highway pavement and its effect on pumping of fines[J]. *Geotextiles and Geomembranes*,1996,14(2):111-135.
- [9] SHENG D C, ZHANG S, YU Z W, et al. Assessing frost susceptibility of soils using PCHeave[J]. *Cold Regions Science and Technology*,2013,95:27-38.
- [10] ZHANG S, GAO F, HE X Z, et al. Experimental study of particle migration under cyclic loading: Effects of load frequency and load magnitude[J]. *Acta Geotechnica*,2021, 16(2):367-380.
- [11] GAO F, HE X Z, ZHANG S. Pumping effect of rainfall-induced excess pore pressure on particle migration[J]. *Transportation Geotechnics*,2021,31:100669.
- [12] HAYASHI S, SHAHU J T. Mud pumping problem in tunnels on erosive soil deposits[J]. *Géotechnique*,2000,50(4):393-408.
- [13] DUONG T V, CUI Y J, TANG A M, et al. Investigating the mud pumping and interlayer creation phenomena in railway sub-structure[J]. *Engineering Geology*,2014, 171: 45-58.
- [14] WANG T F, LUO Q, LIU M S, et al. Physical modeling of train-induced mud pumping in substructure beneath ballastless slab track[J]. *Transportation Geotechnics*,2020, 23:100332.
- [15] 张升,高峰,陈琪磊,等. 砂-粉土混合料在列车荷载作用下细颗粒迁移机制试验[J]. *岩土力学*,2020,41(5):1591-1598.
ZHANG Sheng, GAO Feng, CHEN Qilei, et al. Experimental study of fine particles migration mechanism of sand-silt mixtures under train load[J]. *Rock and Soil Mechanics*,2020,41(5):1591-1598.
- [16] SIBILLE L, LOMINÉ F, POUILLAIN P, et al. Internal erosion in granular media: Direct numerical simulations and energy interpretation[J]. *Hydrological Processes*,2015, 29(9):2149-2163.
- [17] ZHOU K, HOU J, SUN Q C, et al. A study on particle suspension flow and permeability impairment in porous media using LBM-DEM-IMB simulation method[J]. *Transport in Porous Media*,2018,124(3):681-698.
- [18] BEDRIKOVETSKY P, CARUSO N. Analytical model for fines migration during water injection[J]. *Transport in Porous Media*,2014,101(2):161-189.
- [19] WANK J R, GEORGE S M, WEIMER A W. Vibro-fluidization of fine boron nitride powder at low pressure [J]. *Powder Technology*,2001,121(2/3):195-204.
- [20] AW E S. Low cost monitoring system to diagnose problematic rail bed: Case study of mud pumping site[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology,2007.
- [21] 冷伍明,粟雨,滕继东,等. 易发生翻浆冒泥的细粒土物理状态指标分析与评判[J]. *铁道学报*,2018,40(1):116-122.
LENG Wuming, SU Yu, TENG Jidong, et al. Analysis and evaluation on physical characteristics of fine-grained soils prone to mud pumping[J]. *Journal of the China Railway Society*,2018,40(1):116-122.
- [22] CHAWLA S, SHAHU J T. Reinforcement and mud-pumping benefits of geosynthetics in railway tracks: Numerical analysis[J]. *Geotextiles and Geomembranes*,2016,44(3):344-357.
- [23] ZHANG M Y, ZHANG J M, LAI Y M. Numerical analysis for critical height of railway embankment in permafrost regions of Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Cold Regions Science and Technology*,2005,41(2):111-120.
- [24] TASALLOTI A, MARSHALL A M, HERON C M, et al. Geocellular railway drainage systems: Physical and numerical modelling[J]. *Transportation Geotechnics*,2020, 22:100299.
- [25] CUI Y J, DUONG T V, TANG A M, et al. Investigation of the hydro-mechanical behaviour of fouled ballast[J]. *Journal of Zhejiang University-Science A (Applied Physics & Engineering)*,2013,14(4):244-255.
- [26] AN L S, ZHANG F, GENG Y C, et al. Field measurement of dynamic compressive stress response of pavement-subgrade induced by moving heavy-duty trucks[J]. *Shock and Vibration*,2018,2018(1):1956906.
- [27] CHEN X B, ZHANG J S, WANG X. Full-scale field testing

- on a highway composite pavement dynamic responses[J]. *Transportation Geotechnics*,2015,4:13-27.
- [28] AKHAVAN HEJAZI F S, KHAN MOHAMMADI M. Investigation on sloshing response of water rectangular tanks under horizontal and vertical near fault seismic excitations[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2019,116:637-653.
- [29] NGUYEN T T, INDRARATNA B. Fluidization of soil under increasing seepage flow: An energy perspective through CFD-DEM coupling[J]. *Granular Matter*, 2022, 24(3):80.
- [30] DUONG T V, CUI Y J, TANG A M, et al. Effect of fine particles on the hydraulic behavior of interlayer soil in railway substructure[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2014,51(7):735-746.
- [31] CAI Y, XU L R, LIU W Z, et al. Field test study on the dynamic response of the cement-improved expansive soil subgrade of a heavy-haul railway[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*,2020,128:105878.
- [32] 王小生,章洪庆,薛明,等.盐渍土地区道路病害与防治[J]. *同济大学学报(自然科学版)*,2003,31(10):1178-1182.
WANG Xiaosheng, ZHANG Hongqing, XUE Ming, et al. Road disease and treatment in saline soil area[J]. *Journal of Tongji University*,2003,31(10):1178-1182.
- [33] 边学成,李书豪,万章博,等.路基注浆对高速铁路轨道-路基体系动力特性的影响[J]. *振动与冲击*,2022,41(4): 294-302.
- BIAN Xuecheng, LI Shuhao, WAN Zhangbo, et al. Influence of injection remediation on dynamic behaviors of a high-speed railway track-subgrade system[J]. *Journal of Vibration and Shock*,2022,41(4):294-302.
- [34] 张军辉,郑健龙.沥青路面面层摊铺和碾压工艺[J]. *中外公路*,2011,31(3):54-57.
ZHANG Junhui, ZHENG Jianlong. Paving and rolling technology of asphalt pavement surface layer[J]. *Journal of China & Foreign Highway*,2011,31(3):54-57.
- [35] 聂如松,冷伍明,粟雨,等.基床翻浆冒泥土的物理力学性质[J]. *西南交通大学学报*,2018,53(2):286-295.
NIE Rusong, LENG Wuming, SU Yu, et al. Physical and mechanical properties of mud pumping soils in railway subgrade bed[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2018,53(2):286-295.
- [36] 张正一,王朝辉,张廉,等.中国绿色公路建设与评估技术[J]. *长安大学学报(自然科学版)*,2018,38(5):76-86.
ZHANG Zhengyi, WANG Chaohui, ZHANG Lian, et al. Construction and assessment technology of green road in China[J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*,2018,38(5):76-86.
- [37] 高峰,曾宪璋,钟闻华,等.多年冻土区道路工程病害处治技术研究进展与展望[J]. *中外公路*,2024,44(5):1-16.
GAO Feng, ZENG Xianzhang, ZHONG Wenhua, et al. Progress and prospects of road engineering disease treatment technology in permafrost regions[J]. *Journal of China & Foreign Highway*,2024,44(5):1-16.