

DOI: 10.7672/sgjs2026100114

高原高海拔区水泥稳定碎石层边部质量控制*

雷峰娃,马 帅,吕志鹏

(中交一公局西北工程有限公司,陕西 西安 710100)

[摘要] 针对高原高海拔地区低温、低气压、强风及冻融循环等恶劣环境导致的水泥稳定碎石层边部易出现塌边、离析和水分快速流失等质量方面的问题。构建集振动拌合、全流程防离析、智能补水和自适应支护为一体的协同施工技术体系,通过变频振动拌合与动态协同补水技术增强混合料均匀性及含水率稳定性;采用九宫格分流、双向螺旋布料和弹性挡板密封措施构建全过程梯度防离析控制链;基于多参数动态耦合模型开发智能补水系统,实现边部含水率精准闭环控制;设计高密度可调式模板支护与钢钎锚固结构,提升边部抗变形能力及成型质量。工程应用结果表明,该技术有效降低了返工率及材料的损耗。

[关键词] 公路工程;高海拔;碎石层;质量控制;防离析

[中图分类号] U416.21

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)10-0114-05

Edge Quality Control of Cement-stabilized Macadam Layer in Plateau High-altitude Areas

LEI Fengwa, MA Shuai, LÜ Zhipeng

(Northwest Engineering Co., Ltd., of China First Highway Engineering Co., Ltd.,
Xi'an, Shaanxi 710100, China)

Abstract: In response to the quality issues of collapse, segregation, and rapid loss of moisture at the edges of cement stabilized crushed stone layers caused by harsh environments such as low temperature, low pressure, strong winds, and freeze-thaw cycles in high-altitude areas of the plateau. A collaborative construction technology system integrating vibration mixing, whole process anti-segregation, intelligent water replenishment and adaptive support is constructed. The uniformity and moisture content stability of the mixture are enhanced by frequency conversion vibration mixing and dynamic collaborative water replenishment technology. The whole process gradient anti-segregation control chain is constructed by using nine-grid shunt, two-way spiral cloth and elastic baffle sealing measures. Based on the multi-parameter dynamic coupling model, the intelligent water replenishment system is developed to realize the precise closed-loop control of the edge moisture content. The high-density adjustable formwork support and steel brazing anchorage structure are designed to improve the deformation resistance and forming quality of the edge. The engineering application results show that the technology effectively reduces the rework rate and material loss.

Keywords: road engineering; high-altitude; crushed stone layer; quality control; anti-segregation

0 引言

水泥稳定碎石层是公路半刚性基层中的关键结构层,其施工质量直接影响道路的整体承载能力和长期服役性能。高海拔高原地区(平均海拔 $\geq$

3 000m)具有低温、低气压、大风(平均风力4~5级,最大能到8级)等典型环境特征,导致该地区水泥稳定碎石层施工面临特有的技术难题:低温加上低气压延缓了水泥水化反应,导致强度形成缓慢;大风加快了混合料表层水分的流失,打破其含水量的平衡,频繁的冻胀与融沉循环,对结构稳定性提出了更高要求。风力驱动水分流失具体情况如表1所示。

* 中交一公局集团有限公司高原高海拔低等级公路技术研究(xbgs-ygj-2024-008)

[作者简介] 雷峰娃,高级工程师,总工程师, E-mail: 81942076@qq.com

[收稿日期] 2025-10-18

表 1 风力驱动水分流失

Table 1 Wind-driven moisture loss		
暴露时 长/h	含水率损 失范围/%	影响因素
0.5	1.8~2.5	强风扰动(4~5级)加速表层水分蒸发,混合料暴露初期失水速率达峰值
1.0	3.2~4.6	持续风力叠加高原低气压环境,水分扩散速率较平原提升约40%
2.0	5.5~7.3	蒸发累积效应显著,边部区域因风力集中可达损失上限

当前高原环境构建的边部质量控制技术体系尚不健全。传统人工补水方式效率低且均匀性差,难以应对高原蒸发快、渗透难的特性;模板支护体系多采用平原地区既有的固定结构,未充分考虑冻融循环给地基稳定性带来的影响,可能引发边部松散、掉粒,甚至塌边等质量问题。

S326 卓尼至碌曲公路合作界至阿拉乡段工程恰好地处甘南藏族自治州高原核心区(平均海拔3 024m)。基于项目形成一套集振动拌合、全流程防离析、智能补水及自适应支护于一体的施工工法,本文旨在系统阐明该体系针对高原环境特征的设计理念,说明各子系统的协同作用机理,通过工程实际应用数据,分析其在质量改进、效率保障及成本控制方面的综合成效。

1 技术方案

为从系统层面解决上述高原施工难题,构建由振动拌合、全流程防离析、智能补水与自适应支护4个子系统组成的协同技术体系架构,各子系统既各自独立又相互联系,实现从材料制备到成型支护的质量控制闭环。

1.1 振动拌合技术体系

本体系旨在从源头解决高原低压、强风环境下混合料易发生离析与含水率不均的问题,采用集成式变频振动与动态补水协同控制。

1) 变频振动拌缸系统设计

针对高原低气压环境下集料颗粒间相互作用力变化、传统固定频率振动难以实现最优分散的状况。本研究突破性地引入伺服电机驱动的变频振动拌缸,通过离散元(DEM)模拟开展参数寻优,分析不同振动频率对颗粒分散度造成的影响。模拟结果如图1所示。由图1可知,在18~22Hz频率区间中,混合料颗粒的分散度维持在92%以上的最佳水平,显著优于其他频率段。根据仿真结论,制定振动参数的动态调整策略:针对5~30mm连续级配的碎石,拌合全程基准振动频率为18~22Hz(可用20~22Hz打散团聚水泥粉体、细化水泥颗粒部分),

拌合振幅固定选用3~5mm。拌缸中安装3组螺旋导料板,让混合料形成“螺旋上升→自由下落”的复合运动路径,显著延长了集料与水泥接触的时间,增进了空间分布的均匀性。工程实践表明,该动态变频振动策略使水泥结团率由传统工艺的8%~12%降低到2%以下,从根源上抑制了因高原低压环境而加剧的颗粒分离趋势。

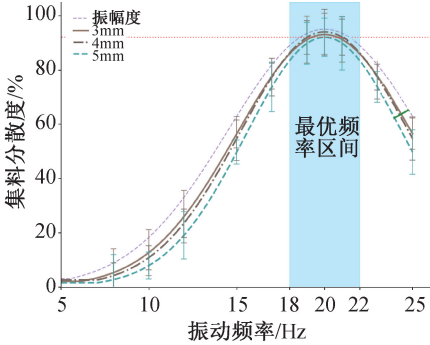


图 1 DEM 模拟不同频率下的颗粒分散度
Fig.1 DEM simulation of particle dispersion degree at different frequencies

2) 动态协同补水系统集成

为应对高原强风带来的快速、不匀称失水,本系统于拌合阶段构建监测、调控、复核的闭环动态补水机制,在拌缸过水管道加装喷洒梁,在出料口增添雾化喷水系统(见图2)。运用高精度湿度传感器实时开展监测,含水率低于最佳值时,自动开启补水动作,补水量调节精度为±0.5%,响应时长≤2s,该措施保障了混合料出厂时含水率高度均匀,为后续摊铺边部智能补水系统的稳定运行奠定了牢固基础,共同保障全流程含水率变异系数维持在0.8%以下。



图 2 喷洒梁雾化喷水系统
Fig.2 Spray beam atomizing water system

3) 搅拌轴与叶片组合优化

为实现拌缸内混合料整体均匀化,对搅拌装置进行针对性的强化处理,把搅拌轴延伸至2.8m覆盖全断面;采用“双段式”设计(前段轴径为120mm,后段100mm)以减少端部积料;叶片采用4组反向螺旋叶片与2组搅拌齿的组合:螺距200mm的反向叶片把边部物料推往中心,达到宏观匀质效果;搅拌齿(齿高30mm)负责破碎微小的水泥团块。搅拌

35~40s 后,细集料对粗集料的裹覆比例可达 95%以上,较传统工艺提升 12%~15%。这一优化显著增强了混合料的结构均匀性与抗离析能力,为将摊铺后级配变异系数控制在 $\leq 8\%$ 提供了关键前提。

1.2 全流程防离析控制技术体系

构建覆盖出料、输送、摊铺全链条的立体防离析屏障,以系统处理高原强风环境中边部集料飞散与级配离析的问题,并在 S326 卓尼至碌曲公路合作界至阿拉乡段工程成功应用。

1) 出料口防离析结构

针对拌合站出料时因重力势能转化引起的骨料动能差异,及高原侧风造成粗集料飞溅进一步加剧的问题,在出料口添加九宫格分流框架,集成弧形导流挡板。该组合结构形成了分割缓冲、导向扩散的双重防离析举措:九宫格框架把混合料流在物理层面分割成多个独立下料单元,有效限制垂直掉落高度,消除因大落差导致的骨料分离现象;弧形挡板对分束后的料流开展二次引导与水平扩散,让料流分布轨迹实现均匀化,防止粗集料因惯性扎堆往一侧滚落或受侧风影响飞散。该举措从根本上抑制了纵向带状离析及风致集料飞散,为后续摊铺供给级配稳定的混合料,有效减少了混合料离析产生的浪费,节约材料成本 27.3 万元。

2) 摊铺机螺旋优化

传统单向螺旋布料器高原摊铺易因宽度方向送料不平均造成横向离析,边部缺料现象受强风影响特别明显,本项目对摊铺机的核心输料系统进行针对性改造,使螺旋布料器半径增大为 60cm,同时把转速减小到 25r/min。这一“大半径、低转速”的组合办法,主要目的为减小离心力,使混合料更平稳、均匀地输往全宽范围。在减速箱两侧装反向螺旋叶片,由此形成了别具一格的“双向补料”机制。此优化能保证混合料持续、均匀地填充摊铺槽两侧,尤其是风力影响最大值的边部区域,有效处理了传统工艺因单向送料引起的横向离析与边部缺料问题,保障摊铺断面级配一致性。

3) 弹性挡板自适应调节

摊铺过程中,摊铺机前挡板与承层间的缝隙,往往成为粗集料滚落的通道,导致出现竖向离析,尤其是基层存在不平整状况时,问题愈发严重。本项目设计了一种动态自适应的密封解决途径:在前挡板位置安装了高度可调(5~10cm)的弹性橡胶板。该弹性挡板系统可依据地面的微小起伏实现贴合,在摊铺机前挡板下缘出料前沿构成一个柔性动态的密封界面,很好地阻止了粗骨料在摊铺机移

动时从底板下方滚出并汇集于摊铺层表面或边部,从而明显遏制了由此引发的竖向离析,形成了覆盖混合料流动全程的梯度防离析体系,最终使摊铺后级配变异系数 $\leq 8\%$ 、边部离析率从 12.3%降低到 3.1%。

1.3 动态耦合智能补水系统

本系统整合了动态模型、精准传感与快速执行机构,成功应用于 S326 卓尼至碌曲公路合作界至阿拉乡段工程。

1.3.1 速度-流量动态联动控制

在摊铺机熨平板后方集成一体化补水装置,核心搭载“摊铺速度-风力等级-补水量”动态映射模型,建立补水量公式:

$$Q = Q_0(1 + 0.2V_w)V_p/V_{p0} \tag{1}$$

式中: Q 为实时补水量(L/m); Q_0 为基准补水量(3L/m,对应摊铺速度 2km/h、4 级风); V_w 为风力等级; V_p 为实际摊铺速度(km/h); V_{p0} 为基准摊铺速度(2km/h)。

采用电磁流量计(测量范围 0.5~10L/m,精度 $\pm 0.1\text{L/m}$)实时采集流量数据,实现补水量动态调节响应时间 $\leq 2\text{s}$,确保风速每变化 1 级、摊铺速度每波动 0.3km/h 时,补水量偏差 $\leq \pm 0.05\text{L/m}$ 。

1.3.2 湿度-双阀协同精准调控

1) 多维度湿度监测:分别监测边部内侧、中部、外侧(距边部 10,20,30cm)的实时含水率,实现了对水分二维分布状态的监控。

2) 双阀分级调控:采用“主阀(DN15)粗调+微调阀(DN8)精补”的二级架构,主阀根据动态模型实施前馈控制,微调阀依据 3 组传感器的反馈数据进行精准补偿,调节精度达 $\pm 0.05\text{L/m}$,该协同机制含水率偏差严格控制在 $\pm 0.5\%$ 内。

3) 异常预警机制:若任一监测点的含水率持续 30s 偏离设定值 $\pm 0.5\%$,自动触发声光报警,有效抵御“过补”或“欠补”导致的质量问题,提升了施工合格率。

1.3.3 模块化适配

为保障该先进系统在高原复杂施工环境中的高效运用与快速推广,装置采用“螺栓连接、整体吊装”的模块化设计理念,整套装置(含底座、水箱、阀门、管路及传感器)可由现场 2 名工人 10min 内完成快速拆装操作(见图 3)。这种可移植特性与适配性,解决了高原项目设备调度频繁、有效施工窗口期短的问题,极大地提高了设备的利用效率及施工组织灵活度。

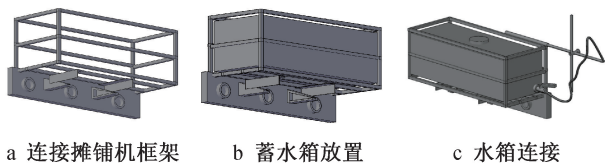


图3 摊铺机装拆

Fig. 3 Paver assembly and disassembly

1.4 自适应模板支护技术体系

为解决高原高海拔地区水泥稳定碎石层边部施工因地基冻融循环、强风扰动及碾压震动造成模板侧向位移、倾覆乃至塌边等突出问题,本体系在传统支护工艺的基础上开展系统性加固与创新,形成了空间约束、动态适应、逐层增强的复合支护方案。

1) 高密度可调式支撑结构

针对传统支护横向间距(常为3m)过大导致的模板纵向挠曲和局部失稳问题,本体系实施了结构加密与高度可调节的集成化设计,优化横向支撑杆的布置间距,加密至1.5m,明显强化了模板沿纵向的连续支撑刚度。支撑杆集成了螺纹微调螺杆机构,使其具备垂直方向±10cm的高度调节能力,能精准适配15~30cm的摊铺厚度标准,实现“一模多用”的高兼容适应性目标;可于施工初期及施工过程中对模板高程做微调补偿,有效抵消地基不均匀沉降或冻胀引发的初始变形,从而从根本上抑制了由模板线形不佳诱发的边部压实不均和塌边风险。

2) 钢钎锚固与传力增强机制

为抵御摊铺、碾压过程所产生的持续动态侧向压力及可能的地基土体冻胀力,本体系引入深层主动锚固技术。在下层已成型的水泥稳定碎石层或路基中,开钻深度≥30cm的锚固孔穴,然后植入φ16高强度螺纹钢钎。钢钎上部与横向通长角钢焊接形成刚性连接节点,把模板承受的侧向土压力及摊铺机和压路机的振动力通过角钢-钢钎构建的刚性传力路径,径直、有效地传递到下层更稳固的结构体中;该锚固体系的侧向抗压承载力不低于50kN/m,提升了支护系统抵御水平位移与抗倾覆的能力,是保障边部线条顺直、避免整体滑动的基础。模板支设效果如图4所示。

3) 中分带区域对撑补强体系

在道路中分带、桥头等双侧摊铺情形下临空面较大的特殊薄弱地段,常规单侧支护难以平衡不对称的摊铺荷载,较易引起模板朝内偏移或塌腰现象。本体系设置可调式空间对撑补强系统,此对撑杆件利用两端的螺纹结构连接到两侧模板的支撑体系上。转动杆件即可精准调节其长度,实现对两



图4 模板支设效果

Fig. 4 Template support setup effect

侧模板的共同顶撑,与钢钎锚固、角钢主结构构成了空间静定支撑体系,有效分配且抵消不对称荷载,避免模板于特殊部位出现局部不稳定或整体位置偏移,实现了全线边侧质量的均匀一致。

4) 分层施工中的支撑递推逻辑

针对水泥稳定碎石层常分为底基层、基层两次摊铺的情况,本体系设计了具有累积增强效应的递推式支撑工艺。在开展底基层摊铺过程中,按上述方法把支护体系安装并锚固好;在实施上一层基层施工时,其模板支护系统可把已成型且强度高的底基层作为锚固基础,实施新一轮的钻孔、打进钢钎、连接角钢作业。分层施工造成支护系统的整体刚度与稳定性随施工进度逐层增大,在重复荷载的作用下,可连续、可靠地保证每个结构层边缘的密实度与设计形状,实现了支撑资源的循环高效运用及工程质量过程的可控性。

2 技术效果

2.1 可靠性

1) 针对风力驱动水分快速非均匀流失,本体系开发了动态补偿式智能补水系统,创建摊铺速度、风力等级、补水量动态模型,集成双阀调控与红外传感器反馈,实现补水量3~4L/m的精准供给,同时实现边部含水率偏差≤±0.5%的稳定把控,该技术把边部压实度合格率从传统工艺的82%显著提升到98.5%,消除了因人工补水不均引起的压实度离散问题。

2) 针对混合料离析严重,本体系通过出料口缓冲、摊铺机螺旋优化、弹性挡板密封实施三级梯度控制,使摊铺后的混合料级配变异系数稳定控制在8%以下,边部离析率由12.3%降至3.1%。这一质量控制水平的提升,保证了结构的均匀性,更直接降低了因离析产生的材料浪费和修补工作量。

3) 针对模板支护失稳与塌边,采用高密度可调支撑和钢钎锚固组合体系,通过提高模板纵向连续性进而引入深层锚固传力,从系统角度提升了支护结构对高原冻胀及施工振动的适应性能。边部塌边发生率控制在1.5%,支撑体系的拆卸效率提升30%,提高了成型质量的一次合格水准,降低了返工

频次;高速度的装拆操作契合了高原短暂的有效施工时段,缩短总工期。

4)针对低温水化失衡与压实不足,通过振动拌合技术体系优化材料级配并精细控制拌合与碾压工艺参数,确保混合料在高原低温环境下的水化反应充分性与压实可行性。为各专项技术措施的有效实施提供了均匀、稳定的材料基础,是整个体系可靠运行的起点。

2.2 应用效果

新技术体系在高原高海拔环境下与传统工艺的综合性能对比如表 2 所示。

表 2 高原环境适应性效益对比

Table 2 Benefit comparison of high-altitude environment adaptability			
指标	传统工艺	新型工艺	提升幅度/%
边部离析率/%	12.3	2.4	80.5
压实度合格率/%	82.0	98.5	20.1
28d 强度标准差/MPa	0.45	0.27	40.0
单日施工长度/m	400	500	25.0
返工率/%	7.5	2.0	73.3

1) 人工费用成本分析

本技术体系通过系统性的技术创新,优化施工组织模式与人力配置,实现人工成本缩减,从根本上削减了对低效、重复劳动岗位的依赖,具体如表 3 所示。

表 3 人员成本分析

Table 3 Personnel cost analysis				
项目	传统工艺	新型工艺	每日人工费/元	节约成本/元
现场管理人员	3	2	500	15 000
摊铺机操作工	4	4	350	0
边部补水工	3	0	350	31 500
质量问题修复工	3	0	350	31 500
运输辅助工	3	3	350	0
碾压工	8	8	350	0
合计	—	—	—	78 000

2) 设备机具成本分析

本技术体系在设备机具方面的经济效益主要体现在通过工艺的优化和可靠性的增强实现综合使用成本降低,而非简单地削减设备台套数,具体如表 4 所示。由表 4 可知,新旧工艺核心施工机械的配置数量始终一致,这反映出本体系的核心是赋能现有装备,而非替代。

3) 材料成本分析

本项目的成功应用,节约了材料成本上,其根本原因是通过系统性的质量控制,显著降低了施工过程中的无谓损耗和缺陷修复,新型工艺把边部离

表 4 设备机具成本分析

Table 4 Equipment and tooling cost analysis				
项目	传统工艺用量	新型工艺用量	单价/元	合计/元
摊铺机	1	1	80 000	80 000
双钢轮压路机	1	1	30 000	30 000
轮胎压路机	1	1	18 000	18 000
单钢轮振动压路机	2	2	16 000	32 000
机械改造费用	1	1	-2 000	-2 000
合计	—	—	—	158 000

析率从 12.3%降到 2.4%,同时让塌边发生率稳定在极低的层级,这两项关键质量指标获提升,直接表明因混合料离析造成的级配失效浪费及因边部坍塌产生的额外修补材料被减到最少,节约成本达 27.3 万元,该体系不只是提升了工程实体质量,进一步从源头把控材料损耗情况,把质量效益转换成经济效益,实现了从粗放式消耗到精细化管控的根本性转变。

3 结语

本研究针对高原高海拔环境下水泥稳定碎石层边部质量控制的共性问题,研发集振动拌合、全流程防离析、智能补水、自适应支护四位一体的核心工法体系。该技术体系采用动态变频振动及协同补水技术,从根本上保证混合料的均匀性及含水率稳定;构建全过程梯度防离析控制链,采用九宫格分流、双向螺旋布料及弹性挡板密封等技术,显著抑制了施工阶段的各类离析现象;研发一套基于多参数动态耦合模型的智能补水系统,实现了边部含水率的精准闭环管控,代替了效能差、不均匀的人工补水方式;规划了高密度可调、深层牢固锚固的自适应模板支护体系,明显增强了边部结构的成型质量与抗变形本领,有效杜绝了塌边状况。

参考文献:

[1] 王琛. 高海拔公路工程水泥稳定碎石层试验检测技术探究[J/OL]. 城市建设理论研究(电子版),2024(22):147-149.
WANG C. Exploration on test and detection technology of cement stabilized macadam layer in high altitude highway engineering[J/OL]. Theoretical research in urban construction, 2024(22):147-149.
[2] 王争军,胡军伟,柯文豪,等. 考虑养生期水化热影响的高海拔地区水泥稳定碎石层温度分布研究[J]. 公路工程,2024,49(1):144-150,183.
WANG Z J, HU J W, KE W H, et al. Study on temperature distribution of cement stabilized macadam condidering curing time in high altitude area[J]. Highway engineering, 2024,49(1):144-150,183.
[3] 刘春雨,郑传峰. 高寒高海拔地区沥青路面季节性损伤对比分析[J]. 公路工程,2018,43(6):62-67.

subways;taking Nantong subway construction as an example[J]. Journal of safety science and technology, 2024, 20 (S1): 195-201.

[5] 张宇航,戎思达,李慧,等. 基于动态监测与事故树分析的超大深基坑风险分析方法研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2023,19(9):89-95.

ZHANG Y H,RONG S D,LI H,et al. Research on risk analysis method of super-large deep foundation pit based on dynamic monitoring and fault tree analysis [J]. Journal of safety science and technology,2023,19(9):89-95.

[6] 刘波,王凯强,黄晃,等. 地铁深基坑工程风险模糊层次分析研究[J]. 地下空间与工程学报,2015,11(S1):257-264.

LIU B, WANG K Q, HUANG M, et al. Research on fuzzy hierarchical risk assessment of metro deep excavation pit [J]. Chinese journal of underground space and engineering,2015,11 (S1):257-264.

[7] 程敏,王倩露,林慧龙,等. 基于改进 FMEA 法的深基坑施工风险评价[J]. 土木工程与管理学报,2018,35(1):54-59,72.

CHENG M,WANG Q L,LIN H L,et al. Risk assessment of the deep foundation pit based on the improved FMEA method [J]. Journal of civil engineering and management,2018,35 (1): 54-59,72.

[8] 陈蓉芳,姜安民,董彦辰,等. 基于熵权可拓模型的深大基坑施工风险评估 [J]. 数学的实践与认识, 2019, 49 (2): 311-320.

CHEN R F,JIANG A M,DONG Y C,et al. Construction risk assessment of deep and large foundation pit based on entropy weight extension model[J]. Mathematics in practice and theory, 2019,49(2):311-320.

[9] 陈绍清,熊思斯,何朝远,等. 地铁深基坑坍塌事故安全风险分析[J]. 安全与环境学报,2020,20(1):52-58.

CHEN S Q,XIONG S S,HE C Y,et al. Safety risk analysis for the deep foundation pit collapse accidents in the subway construction system[J]. Journal of safety and environment,2020,20(1):52-58.

[10] 张振中. 基于改进 AHP-熵值法的地铁车站深基坑施工风险评估[J]. 现代隧道技术,2022,59(S2):13-21.

ZHANG Z Z. Risk assessment of deep foundation pit construction in metro stations based on improved AHP and entropy value algorithm [J]. Modern tunnelling technology, 2022, 59 (S2): 13-21.

[11] 吴波,杜君,温小栋,等. 基于改进熵权-DEMATEL-ISM 的富水软土层深基坑施工安全风险评估[J]. 中国安全生产科学技术,2023,19(10):106-114.

WU B,DU J,WEN X D,et al. Safety risk assessment of deep foundation pit construction in water-rich soft soil layer based on entropy weight-DEMATEL-ISM[J]. Journal of safety science and technology,2023,19(10):106-114.

[12] LIU S H,SONG Z P,ZHANG Y,et al. Risk assessment of deep excavation construction based on combined weighting and nonlinear FAHP [J]. Frontiers in earth science, 2023, 11:1204721.

[13] MOMENI E,POORMOOSAVIAN M,SALMANI TEHRANI H,et al. Reliability analysis and risk assessment of deep excavations using random-set finite element method and event tree technique [J]. Transportation geotechnics,2021,29:100560.

[14] 张姣. 熵权分析方法在深基坑工程风险评估中的应用研究 [J]. 铁道建筑,2011,51(1):43-45.

ZHANG J. Application of entropy weight analysis method in risk assessment of deep foundation pit engineering [J]. Railway engineering,2011,51(1):43-45.

[15] 孙可,王俊明,戴煜坤. 基于模糊层次分析法的基坑健康状态定量评价[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版),2021,35(6):107-112.

SUN K, WANG J M, DAI Y K. Quantitative evaluation of foundation pit health based on fuzzy-AHP method [J]. Journal of Jiangsu university of science and technology (natural science edition),2021,35(6):107-112.

[16] 时林丰,谢建斌,刘克文,等. 基于灰色关联度理论的钢管支护桩沉桩位移[J]. 山东科技大学学报(自然科学版),2019,38(1):32-39.

SHI L F,XIE J B,LIU K W,et al. Displacement of steel pipe supporting piles based on grey relational theory [J]. Journal of Shandong university of science and technology (natural science), 2019,38(1):32-39.

[17] 张耀洪,武玉山,马玉龙,等. 地下连续墙防绕流水囊设计与施工[J]. 施工技术(中英文),2024,53(10):84-88,137.

ZHANG Y H,WU Y S,MA Y L,et al. Design and construction of anti-flow around water sac for underground diaphragm wall [J]. Construction technology,2024,53(10):84-88,137.

(上接第 118 页)

LIU C Y,ZHENG C F. Contrastive analysis of seasonal damage of asphalt pavement in alpine high altitude area [J]. Highway engineering,2018,43(6):62-67.

[4] 张震. 高寒高海拔地区级配碎石路用性能研究 [D]. 西安:长安大学,2017.

ZHANG Z. Study on performance characteristics of graded crushed stone in cold region [D]. Xi'an: Changan University,2017.

[5] 何成勇. 云南高海拔地区级配碎石基层材料组成及性能研究 [D]. 重庆:重庆交通大学,2008.

HE C Y. Research on graded gravel basic material composition and performance in high-altitude region of Yunnan [D]. Chongqing:Chongqing Jiaotong University,2008.

[6] 王兴超. 水泥稳定碎石基层中预设缩缝技术研究与应 [J]. 施工技术(中英文),2025,54(23):122-125,131.

WANG X C. Research and application of preset shrinkage joint technology in cement stabilized macadam base [J]. Construction technology,2025,54(23):122-125,131.