

山区特殊地质条件下的公路路基路面设计方法

邱茜茜

中建五局第三建设有限公司, 湖南 长沙 410000

DOI:10.61369/UAID.2026020005

摘 要 : 山区地形起伏大、地质复杂, 季节冻土、阴阳坡效应等易导致路基路面冻胀、开裂等病害, 影响运营安全与寿命。本文结合实际案例区域季节冻土与阴阳坡突出的地质现状, 研究特殊地质下路基路面设计原则、技术要点与优化方法。通过现场监测与方案对比, 提出差异化 XPS 板保温防护、路面结构优化及病害防控措施, 明确设计参数。研究表明, 该方案可有效控制路基阴阳坡地温差异与冻胀变形, 提升稳定性, 可为同类工程提供技术参考, 具有工程实践价值。

关 键 词 : 山区公路; 特殊地质; 季节冻土; 路基路面设计

Design Methods for Highway Subgrade and Pavement under Special Geological Conditions in Mountainous Areas

Qiu Qianqian

The Third Construction Co., Ltd. of China Construction Fifth Engineering Division, Changsha, Hunan 410000

Abstract : Mountainous areas are characterized by significant topographical variations and complex geological conditions. Seasonal frozen soil and the effects of sunny and shady slopes can easily lead to frost heave, cracking, and other damages in subgrade and pavement, affecting operational safety and service life. This paper, based on actual case studies of regions with prominent seasonal frozen soil and sunny-shady slope effects, investigates the design principles, technical considerations, and optimization methods for subgrade and pavement under special geological conditions. Through on-site monitoring and comparative analysis of design schemes, differentiated insulation protection using XPS boards, pavement structure optimization, and disease prevention and control measures are proposed, with clear design parameters specified. Research indicates that this approach can effectively control temperature differences and frost heave deformation between sunny and shady slopes of the subgrade, enhancing stability. It provides technical references for similar projects and holds practical engineering value.

Keywords : mountainous highways; special geology; seasonal frozen soil; subgrade and pavement design

引言

我国山区面积占国土 2/3, 山区公路是区域发展核心纽带, 但季节冻土、岩土体破碎等特殊地质给路基路面设计带来挑战^[1]。季节冻土山区阴阳坡效应易导致路基横向地温失衡, 引发冻融病害, 而当前部分设计沿用常规方法, 适配性不足、病害率高^[2-4]。本文以岩昌—达部二级公路试验段为案例, 聚焦季节冻土山区地质难题, 探索科学设计方法, 解决工程痛点, 为同类工程提供借鉴。

一、山区特殊地质特征及对路基路面的影响

(一) 山区特殊地质核心类型及分布特征

结合案例区域, 重点关注季节冻土、阴阳坡效应及软岩破碎带地质。该区域为亚热带向温带过渡气候, 冬季寒冷, 季节冻土冻结期为 11 月至次年 3 月, 冻结深度 0.8~1.5m, 路基阴阳坡转换频繁, 横向地温差异显著。案例试验段 (K18+000~K18+300) 分布有季节冻土与软岩破碎带, 其中软岩破碎带长约 180m, 岩体完整性差, 抗压强度 15~28MPa, 遇水易软化; 季节冻土区阴阳坡

地温分布不均, 为病害埋下隐患。

(二) 特殊地质对路基路面的危害机制

特殊地质对路基路面的核心危害源于季节冻土冻融循环与阴阳坡效应的叠加, 具体体现在三方面: 一是季节冻土冻融危害: 冬季土体冻结产生冻胀, 春季融冰引发融沉, 导致路面开裂、错台^[5]。实测显示, K18+180 段未防护时, 阴阳坡路肩冻胀量差值最大达 2.8mm, 路基中心与阳坡路肩最大冻深差值 0.8~0.9m。二是阴阳坡效应危害: 阳坡地温高、冻深浅、冻胀小, 阴坡则相反, 横向差异导致路基受力不均, 加剧路面开裂与路基滑移,

K18+180段阴阳坡路肩地温最大相差6℃。三是软岩破碎带危害：软岩强度低、稳定性差，遇水强度下降30%~50%，易引发岩体坍塌、路基滑移及路面不规则裂缝，降低承载能力与寿命。

二、案例工程概况

本文案例选取甘肃省南部宕昌—迭部二级公路K18+000~K18+300试验段，该路段全长300m，设计车速40km/h，路基宽度8.5m，路面宽度7.5m，属于典型的季节冻土山区公路。该试验段地质条件复杂，主要分布有季节冻土与软岩破碎

带，其中季节冻土占试验段总长的70%，软岩破碎带占60%，且受山体遮挡影响，路基阴阳坡效应突出，是该公路设计与施工的重点、难点路段。

试验段所在区域年平均气温8.2℃，冬季最低气温-12.5℃，冻结期11月至次年3月，平均冻结深度1.1m；年降水量680mm，主要集中在7~9月，雨水易渗入路基，加剧冻融危害与软岩软化。该路段建成初期，未采取针对性的特殊地质设计措施，运营1年后即出现路基冻胀、路面开裂、边坡滑移等病害，病害发生率达35%，严重影响通行安全，因此对该试验段进行路基路面优化设计与改造。

表1 案例试验段基本信息表

路段桩号	长度	主要地质类型	冻结期	平均冻结深度	原有病害
K18+000~K18+120	120m	软岩破碎带 + 季节冻土	11月~次年3月	1.0m	路基滑移、路面开裂
K18+120~K18+240	120m	季节冻土（阴阳坡效应突出）	11月~次年3月	1.2m	路基冻胀、路面错台
K18+240~K18+300	60m	软岩破碎带	无明显冻结	—	边坡坍塌、路基沉降

（一）区域地质勘察设计

地质勘察是特殊地质公路设计的前提，本次采用“遥感解译+无人机航测+现场钻探+动态监测”的立体化勘察方法，全面掌握案例区域地质特征，为设计提供精准数据支撑，避免传统勘察方法效率低、精度不足的问题。通过遥感解译与无人机航测，快速识别试验段地质构造、岩性分布及地表变形，划定软岩破碎带与季节冻土的分布范围^[6-7]。进行现场钻探，共布设钻孔12个，钻孔深度8~12m，采集岩土体样本进行室内试验，确定软岩抗压强度、土体冻胀系数、含水量等核心参数。在试验段布设地温监测点6个、位移监测点4个，实时监测阴阳坡地温变化与路基变形情况，监测周期为1年（含1个完整冻结期）。勘察结果显示，软岩破碎带岩体抗压强度15~28MPa，含水量18%~22%；季节冻土区为中度冻胀土（冻胀系数0.002~0.005），阴阳坡冬季平均地温差达6℃，冻深差异0.8~0.9m，为设计提供精准支撑。

（二）路基优化设计与实施

1. 软岩破碎带路基设计

针对软岩破碎带岩体稳定性差、遇水易软化的问题，采用“换填+加筋+支挡”的综合设计方案：换填1.5~2.0m厚级配碎石土，分层压实（压实度≥94%）；换填层顶部铺设土工格栅（抗拉强度≥200kN/m）；边坡设置3~5m高C25混凝土衡重式挡土墙，基底嵌入稳定岩层0.5m以上，防止边坡坍塌与路基滑移。完工后监测显示，路基最大沉降量8mm，沉降速率≤0.5mm/d，满足要求。

2. 季节冻土区阴阳坡路基差异化设计

针对季节冻土冻融循环与阴阳坡效应的叠加危害，重点优化路基保温防护设计^[8]，提出两种新型差异化保温措施，并与传统普通措施进行对比，选择最优方案。

措施A：阴坡侧路基下半幅铺设10cm厚XPS板，阳坡侧路基下半幅铺设6cm厚XPS板，XPS板抗压强度≥250kPa，导热系数≤0.030W/(m·K)，铺设范围为路基底面至路床顶面下30cm，铺设后采用水泥砂浆固定，防止移位。

措施B：路基下满幅+阴坡坡面铺设6cm厚XPS板，XPS板

参数与措施A一致，坡面铺设后采用锚杆固定，兼顾保温与边坡防护。

传统普通措施：路基下满幅铺设8cm厚XPS板，无差异化设计。

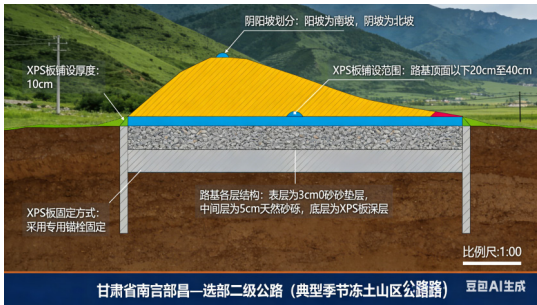


图2 季节冻土区路基XPS板保温铺设示意图

为验证三种措施的保温效果，在试验段K18+180段（阴阳坡效应最突出路段）分别布设监测点，监测冻结期内阴阳坡路基地温与冻胀量变化，监测结果如下表所示。

表2 不同保温措施下路基阴阳坡地温与冻胀量对比表

保温措施	阴坡路肩地温(℃)	阳坡路肩地温(℃)	地温差(℃)	阴坡冻胀量(mm)	阳坡冻胀量(mm)	冻胀量差值(mm)
措施A	-2.1	-0.8	1.3	3.2	1.1	2.1
措施B	-2.3	-0.9	1.4	3.5	1.3	2.2
传统普通措施	-3.8	-1.2	2.6	5.7	2.9	2.8

由表2可知，措施A和措施B均能显著减小路基阴阳坡地温差与冻胀量差值，保温效果明显优于传统普通措施。其中，措施A的地温差控制效果最佳，冻胀量差值最小，且施工成本低于措施B，因此案例试验段季节冻土区路基最终采用措施A进行保温防护设计。

3. 路基排水系统设计

结合案例区域降水特征与地质条件，构建“地表排水+地下排水”相结合的综合排水系统，一是地表排水，在路基两侧设置梯形边沟，边沟底宽0.6m，深度0.8m，沟底纵坡0.3%~0.5%，采用M7.5水泥砂浆砌筑，防止雨水冲刷路基；在边坡顶部设置截水

沟，截水沟底宽0.5m，深度0.7m，拦截坡面雨水，避免雨水渗入路基。二是地下排水，在路基换填层底部设置盲沟，盲沟间距5m，深度0.8m，采用碎石填充，外包土工布，防止泥土堵塞，及时排出地下渗水，控制路基土体含水量在12%~14%，减少冻融危害与软岩软化。

表3 案例试验段路面结构参数表

路面结构层	材料类型	厚度（cm）	核心技术参数
上面层	SBS改性沥青混凝土（AC-13C）	4	针入度（25℃）80~100（0.1mm），软化点 $\geq 60^{\circ}\text{C}$ ，低温延度（ -10°C ） $\geq 20\text{cm}$
中面层	普通沥青混凝土（AC-20C）	6	针入度（25℃）60~80（0.1mm），软化点 $\geq 45^{\circ}\text{C}$ ，低温延度（ -5°C ） $\geq 15\text{cm}$
下面层	普通沥青混凝土（AC-25C）	8	针入度（25℃）40~60（0.1mm），软化点 $\geq 43^{\circ}\text{C}$ ，低温延度（ -5°C ） $\geq 10\text{cm}$
基层	水泥稳定碎石	20	水泥剂量5%~6%，7d无侧限抗压强度 $\geq 3.5\text{MPa}$ ，压实度 $\geq 98\%$
底基层	级配碎石	22	级配符合规范要求，压实度 $\geq 96\%$

路面施工过程中，重点控制三个关键环节：一是沥青混合料的拌合与摊铺，SBS改性沥青混合料拌合温度控制在160~170℃，摊铺温度 $\geq 150^{\circ}\text{C}$ ，碾压温度 $\geq 140^{\circ}\text{C}$ ；二是水泥稳定碎石基层的养护，养护时间 $\geq 7\text{d}$ ，养护期间禁止车辆通行，确保基层强度达标；三是路面接缝处理，横向接缝采用垂直对接，纵向接缝采用热接缝，减少接缝处开裂隐患。

（四）设计效果监测与验证

路基路面优化设计施工完成后，进行为期1年的运营监测，重点监测路基沉降、路面平整度、病害发生率等指标，验证设计方案的合理性与有效性，监测结果如下。

路基监测结果：软岩破碎带路基最大沉降量为8mm，季节冻土区路基最大冻胀量为3.2mm，最大融沉量为5mm，均满足《公路路基设计规范》要求；阴阳坡路基地温差异控制在1.3℃以内，冻胀量差值控制在2.1mm以内，有效解决了阴阳坡效应带来的路基不稳定问题。

路面监测结果：路面平整度指数IRI $\leq 2.0\text{m/km}$ ，满足二级公路设计要求^[9]；路面压实度合格率达99%，厚度合格率达

（三）路面优化设计与实施

结合区域交通量、地质条件与路基设计方案，优化路面结构设计，采用“SBS改性沥青混凝土上面层+普通沥青混凝土中下面层+水泥稳定碎石基层+级配碎石底基层”的结构形式，具体结构参数与实施要点如下。

98.5%；运营1年后，路面开裂、错台等病害发生率降至2.5%，远低于改造前的35%，路面承载能力与抗冻性能显著提升。

经济性分析：案例试验段优化设计后，每公里施工成本比传统设计增加8万元，但运营期间每年的维护成本减少15万元，预计5年可收回额外投入的施工成本，兼顾了经济性与耐久性。

三、结语

本文以宕昌—迭部二级公路试验段为案例，通过系统研究得出：立体化勘察可提供精准地质支撑^[10]；阴坡10cm、阳坡6cm差异化XPS板保温措施效果优、成本低；软岩破碎带“换填+加筋+支挡”方案及优化路面结构，可有效控制病害。

本文成果适用于季节冻土与软岩破碎带山区公路，后续可结合岩溶、泥石流等更多地质类型，融入智能化技术优化设计。同时为公路设计专业本科生提供了理论结合实践的参考，助力工程实践能力提升。

参考文献

[1] 栗振锋,李素梅,主编.路基路面工程[M].人民交通出版社.2009.
[2] 汪双杰等,著.多年冻土地区公路修筑技术[M].人民交通出版社.2008.
[3] 何凡,何虹萍.山区高速公路改扩建工程路线设计要点探析[J].交通科技与管理,2024(12).
[4] 张永奇,石桥,张万茂,张栋梁.山区高速公路改扩建路基拓宽沉降控制标准研究[J].中国标准化,2023(24).
[5] 逢锦程.山区高速公路改扩建路线及路基路面设计要素研究[J].建筑机械,2023(09).
[6] 金鑫.山区公路水毁的成因及防治措施探讨[J].交通世界,2018(32).
[7] 龙继伟.贵州山区高速公路路基排水技术研究[J].四川建材,2018(10).
[8] 李阳,滕梓檬.贵州山区高速公路路基工程水毁病害综合治理措施探讨[J].北方交通,2022(09).
[9] 孙建立.公路路基路面的施工管理技术探讨[J].科技创新与应用,2017(08).
[10] 蒋焕章著.公路水文勘测设计与水毁防治[M].人民交通出版社.2002.