

干旱荒漠区公路升级改造既有路面性能检测评价与病害机理研究

——以G217线天山神秘大峡谷至库车段为例

马永香^{1,2}, 张 棵^{1,2}

¹新疆交勘致远工程科技有限公司, 新疆 乌鲁木齐

²新疆维吾尔自治区公路智能检测与管护实验室, 新疆 乌鲁木齐

收稿日期: 2026年5月19日; 录用日期: 2026年7月2日; 发布日期: 2026年7月14日

摘 要

为科学评价南疆干旱荒漠区既有公路路面技术状况, 合理制定升级改造方案, 以G217线天山神秘大峡谷至库车公路升级改造项目为依托, 采用路面损坏自动化检测、钻芯取样、探坑开挖、落锤式弯沉仪(FWD)、动力锥贯入仪(DCP)及落球式回弹模量测试仪等多种检测手段, 对K1021 + 600~K1080 + 146段58.54 km既有路面进行了系统的技术状况检测与评价。基于检测结果, 结合南疆干旱区大温差、盐渍土分布广泛等环境特征, 深入分析了既有路面病害类型、分布规律及其成因机理。结果表明: 全线PCI平均值为85.2, 评定为“良”; RQI平均值为93.4, 评定为“优”; RDI平均值为96.42, 评定为“优”; SCI平均值为83.4, 评定为“良”。路面主要病害为横向裂缝, 且裂缝多贯穿沥青面层和水泥稳定砂砾基层, 呈现典型的半刚性基层反射裂缝特征; 部分路段存在龟裂、块状裂缝及局部沉陷。路床CBR平均值为75.47%, 路基回弹模量平均值为268.85 MPa。探坑检测发现局部路段路床填料存在硫酸盐弱盐渍土, 盐胀作用对基层结构稳定性构成潜在威胁。基于ABAQUS有限元模型的温度应力与干缩/温缩应力分析表明, 水稳基层底部在干缩和温缩耦合作用下的最大拉应力达1.10 MPa, 超过材料的典型抗拉强度, 从力学角度验证了裂缝的成因。盐渍土路段呈现“低回弹模量 - 高裂缝密度 - 低PCI”的耦合特征, 盐胀作用通过削弱路基承载力和诱发基层开裂对路面性能产生显著负面影响。基于多指标综合评价结果, 提出了针对性的路面升级改造技术对策, 包括裂缝处治、基层修复、结构补强及材料优化等措施, 为南疆干旱荒漠区类似公路升级改造工程提供了技术参考。

关键词

公路工程, 升级改造, 路面检测, 病害评价, 裂缝机理, 盐渍土, 南疆干旱区

Performance Detection, Evaluation and Disease Mechanism Study of Existing Pavement for Highway Upgrade and Reconstruction in Arid Desert Area

—A Case Study of G217 from Tianshan Grand Canyon to Kuqa Section

Yongxiang Ma^{1,2}, Ke Zhang^{1,2}

¹Xinjiang Jiaokan Zhiyuan Engineering Technology Co., Ltd., Urumqi Xinjiang

²Xinjiang Uygur Autonomous Region Highway Intelligent Detection and Maintenance Laboratory, Urumqi Xinjiang

Received: May 19, 2026; accepted: July 2, 2026; published: July 14, 2026

Abstract

To scientifically evaluate the technical condition of existing highway pavement in the arid desert area of southern Xinjiang and reasonably formulate upgrade and reconstruction plans, this study takes the G217 Tianshan Grand Canyon to Kuqa highway upgrade project as the basis. Multiple detection methods including automatic pavement distress detection, core drilling, test pit excavation, Falling Weight Deflectometer (FWD), Dynamic Cone Penetrometer (DCP), and Ball-type Resilient Modulus Tester were employed to conduct systematic technical condition detection and evaluation for the 58.54 km existing pavement from K1021 + 600 to K1080 + 146. Based on the detection results, combined with environmental characteristics such as large temperature differences and widespread saline soil distribution in the arid region of southern Xinjiang, the types, distribution patterns and formation mechanisms of existing pavement diseases were thoroughly analyzed. The results show that: the average PCI is 85.2 (rated “Good”); the average RQI is 93.4 (rated “Excellent”); the average RDI is 96.42 (rated “Excellent”); and the average SCI is 83.4 (rated “Good”). The main pavement distress is transverse cracks, which mostly penetrate through the asphalt surface layer and cement-stabilized gravel base layer, showing typical reflection crack characteristics of semi-rigid base. Some sections have alligator cracking, block cracking and local depression. The average CBR of roadbed is 75.47%, and the average resilient modulus is 268.85 MPa. Test pit detection revealed weak sulfate saline soil in the roadbed fill of some local sections, and salt expansion poses a potential threat to the stability of the base structure. Finite element analysis based on ABAQUS showed that the maximum tensile stress at the bottom of cement-stabilized base under combined drying and thermal shrinkage reached 1.10 MPa, exceeding the typical tensile strength of the material and validating the crack mechanism from a mechanical perspective. Saline soil sections exhibited a coupling characteristic of “low resilient modulus—high crack density—low PCI,” with salt expansion significantly affecting pavement performance through subgrade bearing capacity reduction and base layer cracking. Based on multi-index comprehensive evaluation results, targeted technical countermeasures for pavement upgrade and reconstruction were proposed, including crack treatment, base repair, structural reinforcement and material optimization, providing technical reference for similar highway upgrade projects in the arid desert area of southern Xinjiang.

Keywords

Highway Engineering, Upgrade and Reconstruction, Pavement Detection, Disease Evaluation, Crack Mechanism, Saline Soil, Southern Xinjiang Arid Area

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

国道 217 线(独库公路)是新疆路网规划“六横六纵七枢纽八通道”公路主骨架战略的重要组成部分,是阿克苏地区境内的重要通县国道干线公路。本项目研究路段为 G217 线末端天山神秘大峡谷至库车段(K1021+600~K1080+146),全长 58.54 km,地处阿克苏地区库车市、拜城县境内,由阿克苏公路管理局沙雅县公路管理分局管养。该路段采用二级公路标准建设,设计速度 80 km/h,路基宽度 12 m,路面宽度 10.5 m,路面结构为沥青混凝土面层 + 水泥稳定砂砾基层 + 天然砂砾底基层/路基填料的典型半刚性基层路面结构。

随着西部大开发战略的深入推进及新疆旅游业的蓬勃发展,独库公路作为“中国最美公路”之一,交通量逐年攀升,既有二级公路的通行能力与服务水平已难以满足当前及远期交通发展需求。同时,该路段运营时间较长,受南疆干旱荒漠区极端气候条件(夏季高温、冬季严寒、昼夜温差大、强紫外线辐射)、盐渍土分布、重载交通及复杂地形地质条件等多因素耦合作用,路面出现了不同程度的裂缝、沉陷、龟裂等病害,严重影响了行车安全性和舒适性。因此,对该路段进行升级改造已迫在眉睫。

既有路面的科学检测与准确评价是升级改造工程设计的基础和前提。郝灵恩等[1]针对高速公路改扩建工程既有路面检测评价技术展开研究,指出改扩建工程对既有路面的检测目的与养护维修存在本质区别,前者重在评价旧路承载能力并为病害处治和补强设计提供依据。袁阳等[2]建立了既有沥青路面技术状况综合评价体系,采用模糊数学方法对路面使用性能进行综合评价。熊可维等[3]针对新疆地区极端温差条件,开展了抗裂沥青材料及其路用性能研究,提出了复合抗裂改性沥青的优化配比方案。宋亮等[4]通过室内盐胀试验系统研究了新疆盐渍土地区水泥稳定基层材料的盐胀变形规律,揭示了硫酸盐含量、环境湿度与温度对基层膨胀变形的耦合影响机制。朱自成等[5]依托国道 109 和国道 318 西藏境路段,系统研究了高寒高海拔地区沥青路面病害类型及机理,提出了适用于特殊气候区的路面性能评价指标与方法。苏宏强等[6]针对 G3012 阿克苏至喀什高速公路拱胀病害进行了系统调查,揭示了“热胀”与“盐胀”协同作用的破坏机理。

然而,现有研究多集中于高速公路或高寒高海拔地区,针对南疆干旱荒漠区二级公路升级改造的既有路面性能检测评价与病害机理的综合研究仍相对不足。本文以 G217 线天山神秘大峡谷至库车段为研究对象,综合运用多种检测手段,系统评价既有路面技术状况,深入分析路面病害特征与成因机理,并提出针对性的升级改造技术对策,旨在为南疆干旱荒漠区既有公路升级改造提供科学依据和技术参考。

2. 工程概况与检测方法

2.1. 工程概况

G217 线天山神秘大峡谷至库车公路升级改造项目路段起点位于 K1021+600 处,终点位于 K1080+146 处,路线全长 58.54 km。该路段位于天山南麓、塔里木盆地北缘,地貌类型以低山丘陵和山前冲洪积

平原为主, 海拔高程在 1200~2200 m 之间。项目区属于典型的大陆性暖温带干旱气候, 年均气温 10.8℃, 极端最高气温 41.5℃, 极端最低气温 -28.1℃, 年降水量仅为 50~80 mm, 年蒸发量高达 2800~3200 mm, 昼夜温差大, 太阳辐射强。沿线广泛分布盐渍土, 地下水位较深, 土壤以砾质土和砂土为主。

原路面采用沥青混凝土路面结构, 经多年运营及多次养护维修, 路面结构层情况较为复杂。根据钻芯检测结果, 全线路面沥青面层分为单层和双层两种情况, 沥青上面层平均厚度 46.48 mm (变化范围 26~85 mm), 水稳上基层平均厚度 180.79 mm (变化范围 118~270 mm), 厚度变异系数分别为 23.5%和 14.5%, 表明路面结构层厚度波动较大, 与历年分段养护维修历史密切相关。

2.2. 检测依据与内容

本次检测依据《公路技术状况评定标准》(JTG 5210-2018)、《公路沥青路面养护设计规范》(JTG 5421-2018)、《公路路基路面现场测试规程》(JTG 3450-2019)、《公路沥青路面设计规范》(JTG D50-2017)等现行规范标准执行[7]-[10]。检测内容包括: 路面损坏状况指数(PCI)、路面行驶质量指数(RQI)、路面车辙深度指数(RDI)、路面结构强度指数(PSSI)、路基技术状况指数(SCI)、路面结构完整性检测(钻芯取样)、探坑检测及室内材料试验等。

2.3. 检测设备与方法

(1) 路面损坏、平整度及车辙检测: 采用多功能路况快速检测系统 CICS (LP-I 型), 自动采集路面损坏、国际平整度指数(IRI)及车辙深度(RD), 检测里程 117.092 km (上下行双幅)。

(2) 路面结构强度检测: 采用落锤式弯沉仪(FWD, SHN-FWD-MV 型), 每 20 m 检测一点弯沉, 测定路表弯沉值并反算路面结构层模量。

(3) 路面结构完整性检测: 采用 HZ-20A 型钻孔取芯机, 在设计路段典型位置钻取 $\Phi 150$ mm 芯样, 共 60 处, 测定各结构层厚度、层间黏结状态, 并进行室内材料性能试验。钻芯布点遵循以下原则: ① 代表性原则——根据自动化检测得到的 PCI 分布数据, 在不同路况等级(“优”“良”“中”“次”)路段分别布点, 确保各等级路段均有芯样覆盖, 其中“中”和“次”路段布点密度适当加密; ② 典型性原则——在横向裂缝、龟裂、块状裂缝、纵向裂缝等主要病害处以及路面完好处分别取芯, 以对比分析病害部位与完好部位的结构差异; ③ 均匀性原则——沿路线纵向大致均匀分布, 兼顾不同地理单元(低山丘陵段、山前冲洪积平原段)和不同运营年限路段的覆盖。通过上述布点策略, 钻芯取样能够较为全面地反映全线路面结构的真实状况。

(4) 探坑检测: 采用人工坑探方式, 选取 10 处典型位置开挖 100 cm $\times$ 100 cm 探坑至路床底部, 观测各结构层状况, 测定结构层厚度, 并取样进行压实度、含水率、颗粒分析、液塑限及易溶盐含量试验。探坑布点遵循以下原则: ① 路况对应原则——根据 PCI 评定结果, 在不同路况等级路段均衡布设, 重点覆盖 PCI 值较低且伴有明显路基病害(如边坡坍塌、排水不畅)的段落; ② 地理单元覆盖原则——综合考虑沿线地貌类型(低山丘陵段、山前冲洪积平原段)和土质分布特征, 确保不同地理单元均有探坑代表; ③ 病害关联原则——在自动化检测发现的异常点(如 IRI 突变、弯沉异常)附近以及钻芯揭示的层间黏结不良段落布设探坑, 以探明路面结构内部状况; ④ 盐渍土针对性原则——参考沿线地质资料, 在 suspected 盐渍土分布段落加密布设, 以验证和查明盐渍土的类型、分布范围和含盐量。10 处探坑中, 低山丘陵段布设 4 处, 山前冲洪积平原段布设 6 处; 对应“良”等级路段 4 处、“中”等级路段 5 处、“次”等级路段 1 处, 实现了对不同路况等级和地理单元的较好覆盖。

(5) 路基性能检测: 在探坑路床顶面采用动力锥贯入仪(DCP)测定现场 CBR 值, 采用落球式回弹模量测试仪(SFB-RMT)测定路基回弹模量。

(6) 室内材料试验：对钻取的水稳基层芯样进行无侧限抗压强度试验；对沥青面层芯样进行沥青含量、矿料级配及劈裂强度试验；对探坑填料进行含水率、易溶盐、击实、液塑限及颗粒分析试验。

3. 既有路面技术状况检测与分析

3.1. 路面损坏状况评价

根据《公路技术状况评定标准》(JTG 5210-2018)，对路面破损调查数据进行每公里统计计算，得到 PCI 评定结果。上行线每公里 PCI 平均值为 85.5，评定为“良”；其中评定为“优”的段落 16 km，占比 27.12%， “良”的段落 30 km，占比 50.85%， “中”的段落 12 km，占比 20.34%， “次”的段落 1 km，占比 1.69%。下行线每公里 PCI 平均值为 85.0，评定为“良”；其中“优”段落 4 km，占比 6.78%， “良”段落 52 km，占比 88.14%， “中”段落 3 km，占比 5.08%。全线平均 PCI 值为 85.2，评定为“良”。

从桩号分布来看，K1021+600~K1062+000 段路面状况相对较好，PCI 值多处于“优”和“良”等级；而 K1062+000~K1080+160 段路面状况明显较差，PCI 值多降至“中”甚至“次”等级，该段落病害密度和严重程度显著增加，与运营年限增长、重载交通累积损伤及局部地质条件差异密切相关。为进一步揭示路面使用性能与结构承载能力在空间上的耦合关系，本研究将 PCI、IRI、FWD 反算的路基回弹模量及水稳基层无侧限抗压强度等数据进行沿程融合展示。结果表明：在 K1062+000 以后段落，PCI 值的下降趋势与路基回弹模量的降低和水稳基层强度的衰减在空间上具有较好的一致性，印证了结构能力劣化是导致使用性能下降的根本原因之一；而 IRI 的局部突变点往往与横向裂缝密集段或探坑揭示的层间黏结不良位置相对应。这种多源数据的空间叠加分析，有助于更精准地识别病害主因，为分段处治方案的制定提供依据。G217 线多指标空间融合如图 1 所示，沿程叠加展示 PCI、IRI、路基回弹模量及水稳基层强度的空间变化，揭示结构能力与使用性能的耦合关系；虚线为路段分段界线，背景色区分不同路况等级区间。

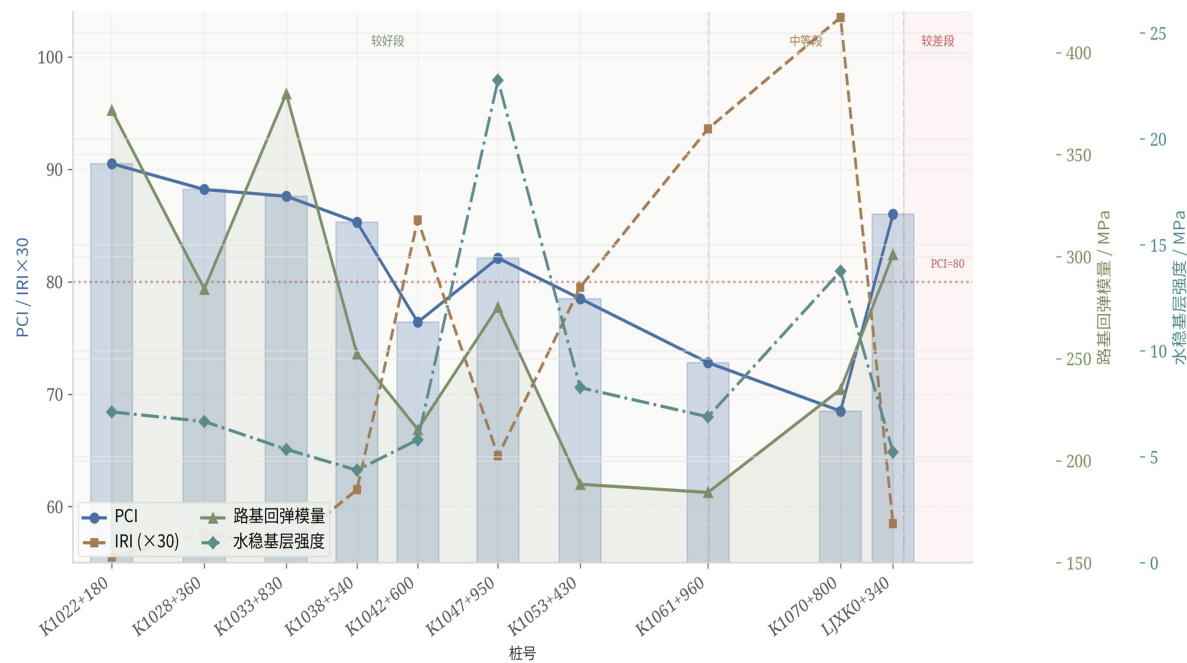


Figure 1. Spatial fusion profile of multiple pavement indices along G217 route

图 1. G217 线多指标空间融合剖面图

路面病害类型以横向裂缝最为突出, 其次为龟裂、块状裂缝和纵向裂缝。横向裂缝多呈等间距分布, 间距 10~30 m 不等, 裂缝宽度 2~8 mm, 部分贯穿整个行车道宽度。龟裂主要分布于轮迹带区域, 多伴随有车辙和沉陷, 表明路面结构层存在局部强度不足。块状裂缝多出现在路面服役年限较长的路段, 与沥青老化和疲劳损伤有关。纵向裂缝主要分布于路基边缘或填挖交界路段, 与路基不均匀沉降相关。G217 线路面损坏状况指数如图 2 所示。

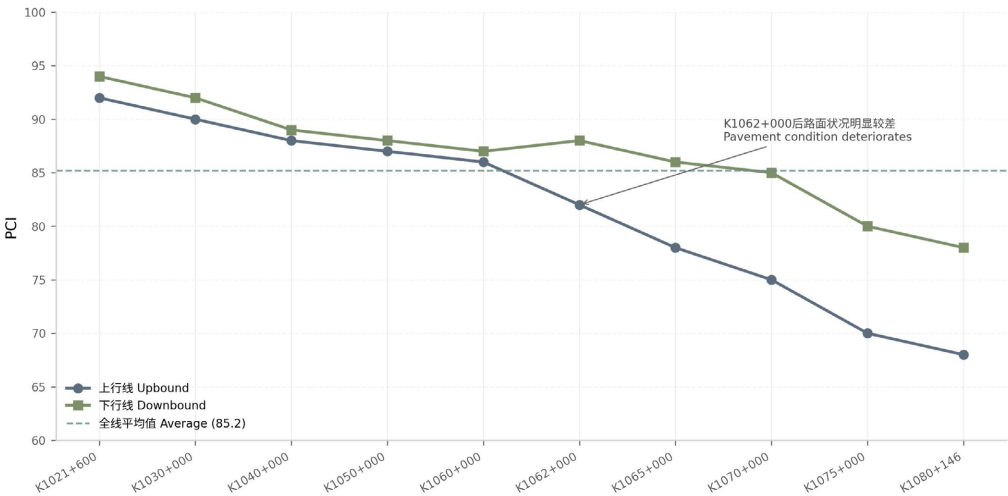


Figure 2. PCI distribution along G217 Route
图 2. G217 线路面损坏状况指数(PCI)沿程分布

3.2. 路面行驶质量与车辙评价

路面行驶质量采用路面行驶质量指数(RQI)作为评价指标, 由国际平整度指数(IRI)计算得出。检测结果表明: 上行线 IRI 平均值为 2.22 m/km, RQI 平均值为 92.75; 下行线 IRI 平均值为 1.95 m/km, RQI 平均值为 94.08。全线路面行驶质量评价处于“优”~“良”段, 下行线路面行驶质量略优于上行线。

车辙深度检测结果显示: 上行线 RD 平均值为 3.91 mm, RDI 平均值为 96.09; 下行线 RD 平均值为 3.21 mm, RDI 平均值为 96.75; 全幅 RD 平均值为 3.56 mm, RDI 平均值为 96.42, 评定为“优”。整体而言, 全线路面车辙深度相对较小, 表明沥青面层高温稳定性尚可, 但局部轮迹带区域存在车辙发展趋势, 需引起重视。路面技术状况检测统计结果及技术状况指数对比见表 1、图 3。

Table 1. Pavement technical condition detection statistics
表 1. 路面技术状况检测统计结果

检测指标	方向	最小值	最大值	平均值
PCI	上行线	67.6	95.8	85.5
	下行线	77.6	94.9	85.0
	全幅	—	—	85.2
RQI	上行线	76.54	96.36	92.75
	下行线	83.85	96.56	94.08
RDI	上行线	91.47	98.07	96.09
	下行线	86.94	98.45	96.75
	全幅	—	—	96.42
SCI	全幅	65	100	83.4

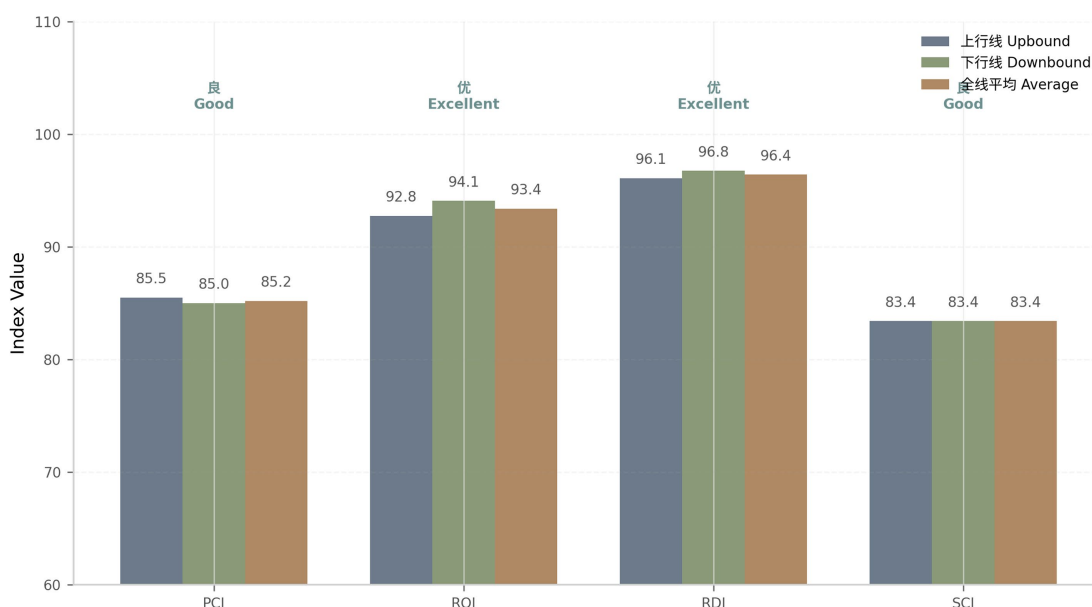


Figure 3. Comparison of pavement technical condition indices

图 3. 路面技术状况指数对比

3.3. 路基技术状况评价

路基技术状况检测采用人工调查方式,对边坡坍塌、水毁冲沟、路基构造物损坏、路缘石缺损、路基沉降、排水不畅等损坏类型进行调查评价。结果显示:全幅路基损坏状况指数 SCI 平均值为 83.4, 评定为“良”。其中 SCI 评价为“优”的段落 6 km, 占比 10.17%;“良”的段落 43 km, 占比 72.88%;“中”的段落 20 km, 占比 15.25%;“次”的段落 2 km, 占比 3.39%。

路基损坏主要表现为局部路缘石缺损、边坡浅层坍塌及排水设施淤塞,未发生影响行车安全的严重路基病害。但在 K1028+000~K1029+000、K1056+000~K1057+000 及 K1063+000~K1065+000 等段落,SCI 值降至“次”等级,主要原因为边坡坍塌和路基沉降,需结合边坡防护和排水系统改造进行综合处治。

3.4. 路面结构完整性检测

3.4.1. 钻芯取样分析

全线共钻取芯样 60 处(含工可阶段引用数据 3 处),芯样情况统计表明:完好处取芯,沥青面层芯样整体基本较完整,水稳芯样多数基本完好,个别段落芯样底部出现破损;病害处(横向裂缝、龟裂、块状裂缝、纵向裂缝)取芯,沥青芯样均沿裂缝处贯穿断裂或完全松散破碎,基层芯样均沿裂缝贯穿断裂。

芯样厚度统计分析显示,沥青上面层平均厚度 46.48 mm,最小 26 mm,最大 85 mm,标准差 10.944 mm,变异系数 23.5%,厚度离散性较大,反映了历年养护加铺的历史。水稳上基层平均厚度 180.79 mm,最小 118 mm,最大 270 mm,标准差 26.206 mm,变异系数 14.5%。值得注意的是,部分病害处芯样显示基层存在双层结构(上基层 + 下基层),总厚度达 250~290 mm,与养护补强历史有关。

3.4.2. 路面材料室内试验

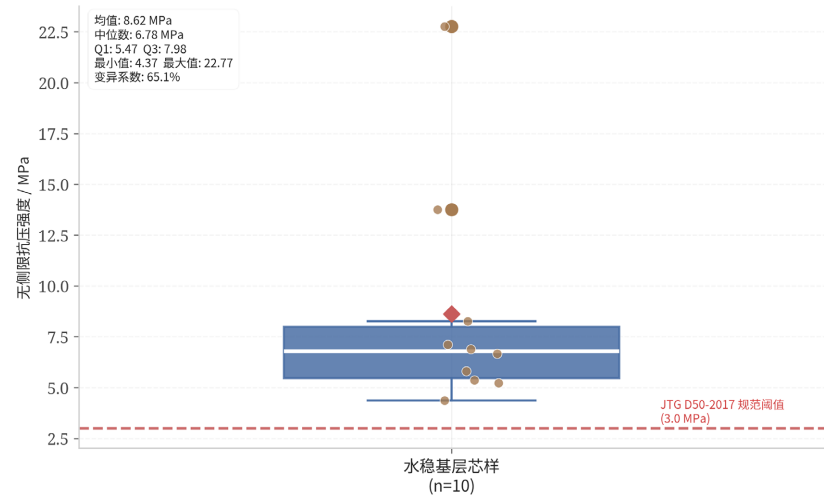
(1) 水稳基层无侧限抗压强度:对 10 处较完好芯样进行试验,结果见表 2 及图 4。抗压强度最小值 4.37 MPa,最大值 22.77 MPa,平均值 8.33 MPa,变异系数 68.3%。强度离散性较大,表明不同路段、不

同施工时期的水泥稳定砂砾基层质量差异显著。K1047 + 600 处芯样强度高达 22.77 MPa，表明该段落基层水泥含量可能偏高或养护条件较好；而 K1044 + 780 处强度仅 4.37 MPa，低于规范要求，基层整体性较差，存在结构性破坏风险。

(2) 沥青混合料性能试验：对 10 处沥青面层芯样进行抽提试验，测得沥青含量为 3.99%~4.42%，平均约 4.15%。矿料级配试验表明，各检测点级配曲线基本处于规范允许范围内，但细集料含量偏多、粗集料骨架嵌挤作用不足，可能影响沥青混合料的高温抗车辙性能和疲劳耐久性。劈裂强度试验结果显示，沥青面层劈裂强度为 0.57~0.83 MPa，平均 0.72 MPa，与沥青含量和空隙率密切相关。

Table 2. Unconfined compressive strength test results of cement-stabilized base core samples
表 2. 水稳基层芯样无侧限抗压强度试验结果

序号	桩号	路幅	抗压强度/MPa
1	K1055 + 700	上行线	5.81
2	K1022 + 500	上行线	7.12
3	K1054 + 300	上行线	6.89
4	K1024 + 970	上行线	6.67
5	K1044 + 780	上行线	4.37
6	K1047 + 600	上行线	22.77
7	K1046 + 460	上行线	5.23
8	K1045 + 100	上行线	5.36
9	K1029 + 050	下行线	13.76
10	K1052 + 900	上行线	8.27



(箱形图反映强度数据的离散程度和分布特征；图中标注了 JTG D50-2017 规范要求的最低强度 3.0 MPa 阈值线)

Figure 4. Unconfined compressive strength of cement-stabilized base core samples
图 4. 水稳基层芯样无侧限抗压强度分布

3.5. 探坑检测与路基性能评价

3.5.1. 探坑结构层观测

共选取 10 处位置进行坑探，其中 9 处选在完好处，1 处选在横向裂缝处。探坑观测结果表明：沥青

面层整体状况基本较好, 个别段落粘结较差、剥落严重。基层均为水泥稳定砂砾, 板结状况较好。底基层与路基填料之间无明显分层, 底基层填料多为天然砂砾, 土体呈黄褐色, 以次棱角砾为主, 粒径分布欠均匀, 存在少量超粒径颗粒。路基填料底部多为细粒土, 土体呈土黄色或红褐色, 骨架颗粒含量较少。

在 K1042+600 处探坑发现, 该段落存在新铺面层与原路面面层的双层结构, 新铺面层厚度 56 mm, 原路面面层厚度 45 mm, 基层为两层水稳结构(新基层 185 mm + 原基层 130 mm), 反映了该段落曾经历过罩面养护维修。但原路面水稳层板结较差, 存在层间黏结不良问题, 为后续病害发展埋下隐患。

3.5.2. 路床力学性能

采用 DCP 测定路床顶面 CBR 值, 结果见表 3 及图 5。10 个探坑路床现场 CBR 最小值为 63.22%, 最大值为 101.97%, 平均值为 75.47%, 均满足二级公路路床 CBR≥60%的要求。但不同测点之间差异明显, K1061+960 和 K1053+430 处 CBR 值分别为 63.22%和 63.58%, 接近规范下限, 表明局部路段路床密实度或填料质量存在不足。

Table 3. CBR and resilient modulus test results of roadbed
表 3. 路床现场 CBR 及回弹模量检测结果

序号	桩号	位置	CBR/%	回弹模量/MPa
1	K1022+180	上行线	95.17	371.92
2	K1028+360	下行线	76.57	284.20
3	K1033+830	下行线	101.97	379.96
4	K1038+540	下行线	68.90	252.50
5	K1042+600	下行线	65.08	215.39
6	K1047+950	下行线	70.41	275.34
7	K1053+430	上行线	63.58	188.52
8	K1061+960	下行线	63.22	184.50
9	K1070+800	下行线	67.25	234.99
10	LJXK0+340	上行线	82.58	301.18

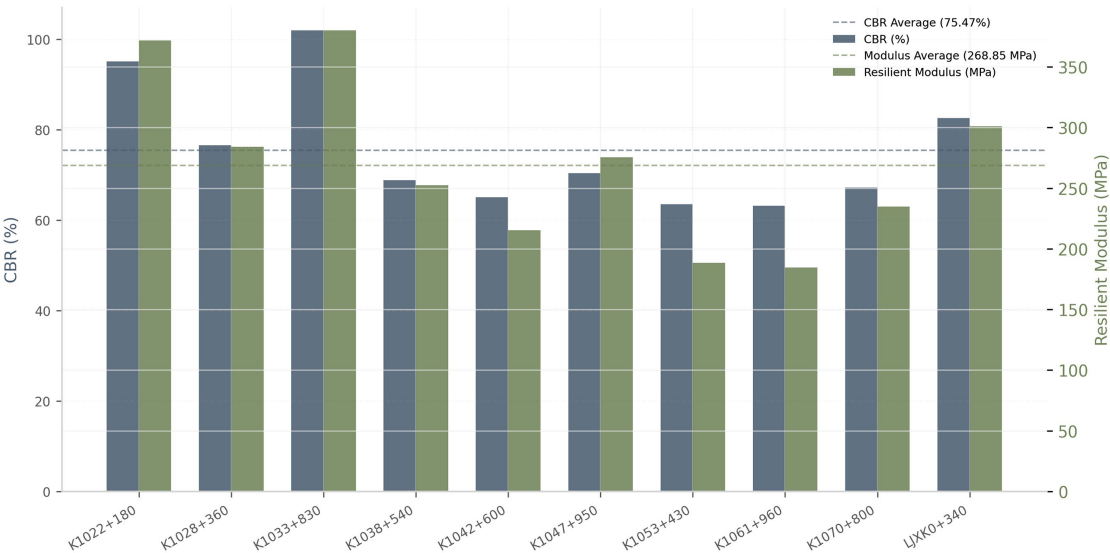


Figure 5. CBR and resilient modulus test results of roadbed
图 5. 路床 CBR 与回弹模量检测结果

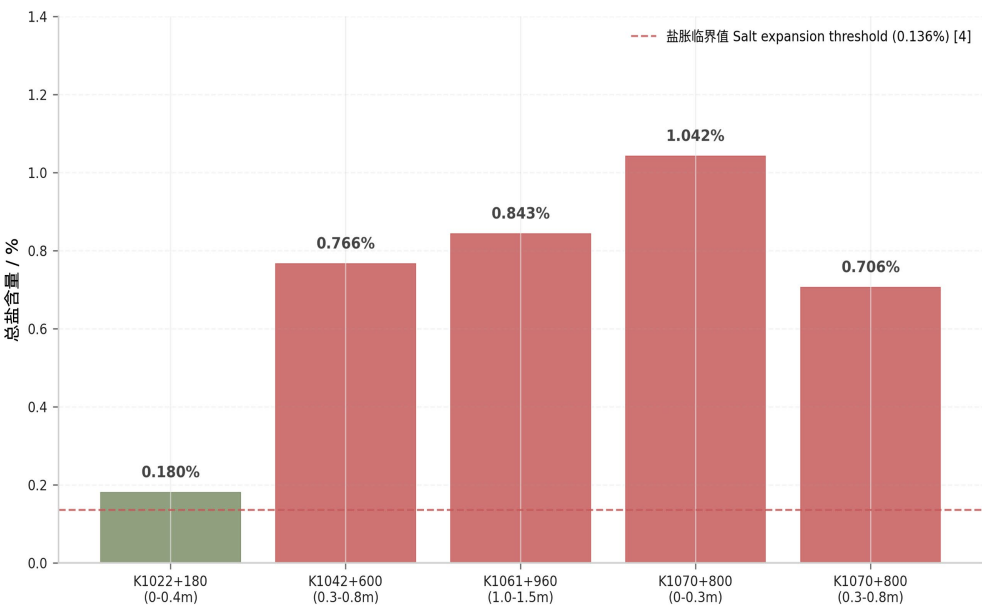
采用落球仪测定路基回弹模量, 结果见表 3。10 个探坑路基回弹模量范围为 184.50~379.96 MPa, 平均值为 268.85 MPa。根据《公路沥青路面设计规范》(JTG D50-2017), 二级公路干燥中湿状态下路基顶面回弹模量最小值为 40 MPa, 检测结果均满足要求。但 K1061+960、K1053+430、K1042+600 等段落回弹模量低于 220 MPa, 处于相对较低水平, 可能与路基填料细粒土含量较高、压实度不均匀有关。

3.5.3. 路床填料盐渍化特征

对探坑取出的路床填料进行易溶盐含量检测, 结果见表 4 及图 6。检测发现, 大部分路段总盐含量在 0.12%~0.18%之间, 属于非盐渍土范畴。但在 K1042+600 (0.3~0.8 m 深度总盐含量 0.766%)、K1061+960 (1.0~1.5 m 深度总盐含量 0.843%)及 K1070+800 (0~0.3 m 深度总盐含量 1.042%, 0.3~0.8 m 深度总盐含量 0.706%)等段落, 检测出硫酸盐弱盐渍土或亚硫酸盐弱盐渍土。

Table 4. Soluble salt content detection results (partial)
表 4. 易溶盐含量检测结果(部分)

桩号位置	深度范围/m	总盐含量/%	盐渍土分类
K1022+180	0~0.4	0.180	非盐渍土
K1042+600	0.3~0.8	0.766	亚硫酸盐弱盐渍土
K1061+960	1.0~1.5	0.843	亚硫酸盐弱盐渍土
K1070+800	0~0.3	1.042	硫酸盐弱盐渍土
K1070+800	0.3~0.8	0.706	硫酸盐弱盐渍土

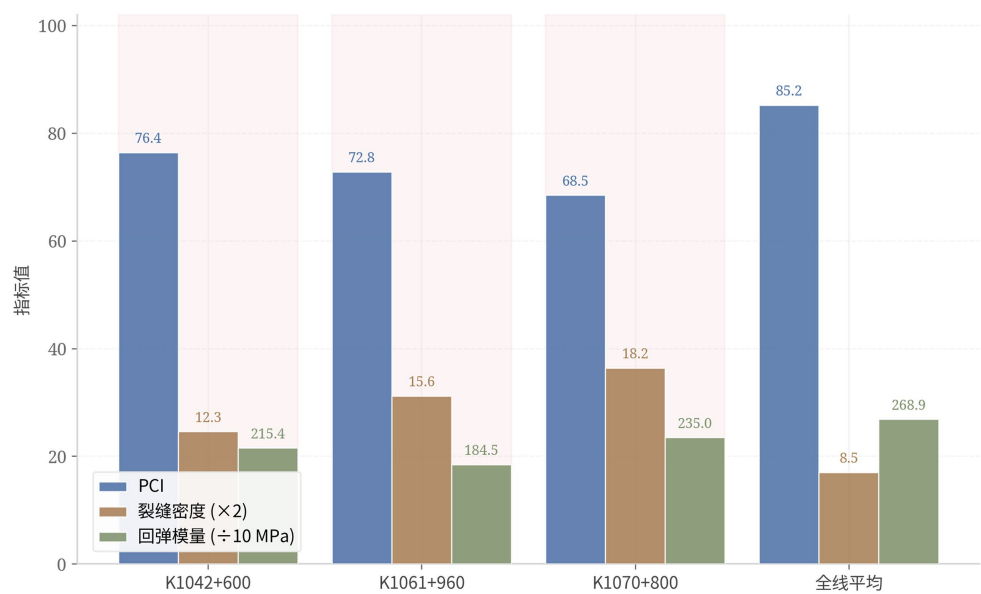


(注: 图中 0.136%阈值为宋亮等[4]通过室内盐胀试验确定的水泥稳定基层材料硫酸盐含量临界值, 超过此值盐胀变形量随温度降低而显著增大; 该阈值适用于新疆硫酸盐渍土地区水泥稳定类基层材料, 判断依据为易溶盐中 SO_4^{2-} 含量)

Figure 6. Soluble salt content detection results of roadbed fill
图 6. 路床填料易溶盐含量检测结果

根据宋亮等[4]的研究成果, 当水泥稳定基层材料中硫酸盐含量超过 0.136%时, 盐胀变形量将随温度降低而显著增大。本项目部分路段路床及底基层填料的硫酸盐含量已超过该阈值, 在季节性温度变化作

用下, 盐分结晶膨胀产生的内应力将向上传递至水稳基层, 可能导致基层拱胀开裂, 进而引发沥青面层反射裂缝。这一发现对理解本项目路面病害成因及制定升级改造方案具有重要意义。为进一步定量揭示盐渍土分布与路面病害之间的关联性, 本研究将探坑检测到的盐渍土桩号位置、路基回弹模量实测值与对应路段的 PCI 值、横向裂缝密度进行了相关性分析, 结果见图 7。结果表明: 3 处检测到硫酸盐弱盐渍土的探坑位置(K1042+600、K1061+960、K1070+800)对应路段的 PCI 值分别为 76.4、72.8 和 68.5, 均低于全线平均值 85.2; 对应路段的横向裂缝密度分别为 12.3 条/km、15.6 条/km 和 18.2 条/km, 显著高于全线平均裂缝密度(约 8.5 条/km)。同时, 这 3 处探坑的路基回弹模量实测值分别为 215.39 MPa、184.50 MPa 和 234.99 MPa, 均低于全线平均值 268.85 MPa。上述数据表明, 盐渍土路段呈现出“低回弹模量 - 高裂缝密度 - 低 PCI”的耦合特征, 盐胀作用通过削弱路基承载能力和诱发基层开裂两条路径, 对路面使用性能产生显著的负面影响。这一关联性分析为盐渍土路段的特殊处治提供了数据支撑。



(3 处硫酸盐弱盐渍土探坑位置的 PCI、横向裂缝密度与路基回弹模量对比, 揭示“低回弹模量 - 高裂缝密度 - 低 PCI”的耦合特征)

Figure 7. Multi-index correlation analysis of saline soil sections
图 7. 盐渍土路段多指标关联分析

4. 路面病害特征与成因机理分析

4.1. 主要病害类型及分布特征

根据现场调查和自动化检测结果, G217 线该路段沥青路面主要病害类型及分布见图 8, 其特征如下:

(1) 横向裂缝: 为最主要病害类型, 约占裂缝类病害总数的 70%以上。横向裂缝多垂直或近于垂直于道路中线, 呈等间距分布, 间距 10~30 m, 与半刚性基层的典型裂缝间距一致。裂缝宽度一般 2~6 mm, 严重者达 8 mm 以上, 多贯穿整个行车道。钻芯结果显示, 横向裂缝处沥青面层和水泥稳定砂砾基层均沿裂缝贯穿断裂, 表明裂缝已穿透整个路面结构层, 属于结构性裂缝。

(2) 龟裂: 主要分布于行车道轮迹带区域, 呈网状交织形态, 面积 0.5~5 m² 不等, 多伴随有沉陷和车辙, 属于疲劳开裂的晚期形态。龟裂路段的 PCI 值多处于“中”或“次”等级。

(3) 块状裂缝: 裂缝间距 0.3~3 m, 面积 0.1~10 m², 主要出现于路面服役年限较长、沥青老化严重的

段落, 与沥青结合料低温劲度增大、变形能力下降有关。

(4) 纵向裂缝: 主要分布于路基边缘、填挖交界处及桥梁搭板附近, 长度数米至数十米不等, 多与路基不均匀沉降、边坡稳定性不足或横向压实度差异有关。

(5) 沉陷与坑槽: 分布较少, 多发生在龟裂严重段落, 由雨水下渗、基层软化及行车荷载唧泥作用导致。

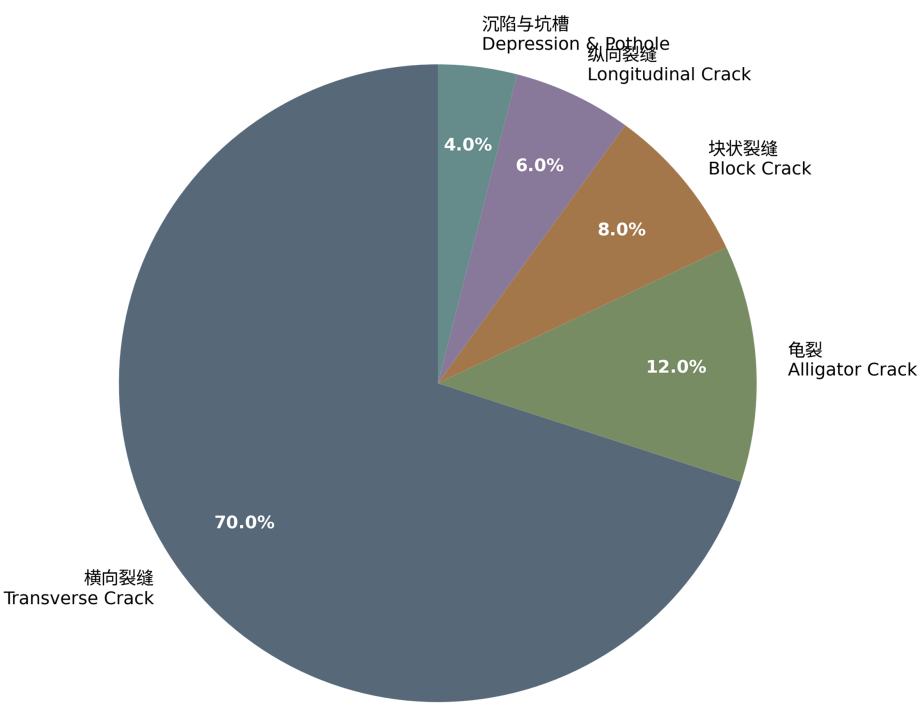


Figure 8. Distribution of pavement disease types
图 8. 路面病害类型分布

4.2. 横向裂缝成因机理分析

横向裂缝是本项目最主要的路面病害, 其成因机理可从以下几个方面进行分析。

4.2.1. 半刚性基层反射裂缝

本项目路面采用水泥稳定砂砾半刚性基层, 该类型基层具有强度高、刚度大、整体性好等优点, 但干缩和温缩特性显著。水泥稳定材料在凝结硬化过程中产生化学收缩, 在干燥环境中产生干燥收缩, 在温度变化时产生温度收缩。由于基层与面层之间的黏结作用, 基层收缩变形受到面层的约束, 在基层底部产生拉应力。当拉应力超过基层材料的抗拉强度时, 基层开裂。基层裂缝在温度变化和行车荷载的反复作用下, 逐渐向上反射至沥青面层, 形成反射裂缝[11]-[13]。

钻芯检测结果证实了这一机理: 病害处取芯时, 沥青面层和水稳基层均沿同一裂缝位置贯穿断裂, 裂缝在竖向呈连续性分布, 典型反射裂缝特征明显。横向裂缝的等间距分布规律(10~30 m)也与半刚性基层收缩裂缝的理论间距相吻合。

4.2.2. 温度应力疲劳作用

南疆干旱荒漠区昼夜温差极大, 夏季路表昼夜温差可达 30℃ 以上, 冬季昼夜温差亦可达 20℃ 左右。沥青面层为温度敏感性材料, 在昼夜温差循环作用下产生周期性温度应力。白天高温时沥青黏度降低、

变形能力增强; 夜间低温时沥青劲度增大、收缩变形受限。日复一日的温度循环使沥青面层经历疲劳损伤累积, 尤其在冬季急剧降温时, 温度应力可能超过沥青混合料的抗拉强度, 产生低温收缩裂缝[14][15]。

熊可维等[3]研究表明, 新疆地区极端温差条件下, 沥青路面的温度疲劳损伤显著加剧。本项目采用的普通基质沥青低温性能一般, 在 repeated thermal cycling 作用下易于产生疲劳开裂。

4.2.3. 盐胀作用的结构损伤

如前所述, 本项目局部路段路床及底基层填料中存在硫酸盐弱盐渍土。根据宋亮等[4]的研究, 含硫酸钠盐渍土在温度降低过程中, Na_2SO_4 溶解度减小并结晶析出 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (芒硝), 固相体积膨胀约 314%, 在材料内部产生膨胀应力。当膨胀力大于微观颗粒间的联结力时, 颗粒间距增大, 宏观上表现为膨胀变形。苏宏强等[6]进一步研究指出, 南疆荒漠区沥青路面拱胀病害是“热胀”与“盐胀”协同作用的结果: 极端温差引发的热应力与硫酸盐侵蚀产生的膨胀应力相互叠加, 导致基层力学强度劣化、体积膨胀, 最终引发路面拱起和开裂。

本项目虽未见明显拱胀病害, 但部分路段路床盐渍土的存在构成了潜在威胁。在季节性冻融循环和昼夜温差作用下, 盐分反复结晶-溶解, 对底基层及基层底部产生持续的物理侵蚀和膨胀损伤, 降低了结构层的整体性和承载能力, 加速了反射裂缝的发展和扩展。

4.2.4. 层间黏结不良

钻芯和探坑检测发现, 部分路段沥青面层与水稳基层之间、上下基层之间存在黏结不良现象。层间黏结不良削弱了路面结构的整体受荷性能, 在行车荷载作用下, 各结构层之间产生相对滑移和剪切变形, 应力集中现象加剧, 促进了裂缝的萌生和扩展。层间黏结不良的原因主要包括: 施工时层间污染、黏层油洒布不均匀或用量不足、养护维修时新旧界面处理不当等[16][17]。

4.2.5. 基于有限元模型的温度应力与干缩/温缩应力分析

为定量论证横向裂缝的力学成因, 本研究采用 ABAQUS 有限元软件建立了路面结构二维轴对称模型, 模拟了半刚性基层在温度荷载和干缩效应作用下的应力响应。模型几何参数依据钻芯检测结果确定: 沥青面层厚度 46 mm, 水稳基层厚度 181 mm, 底基层厚度 200 mm。材料参数方面, 沥青面层采用弹性模量 1200 MPa (20℃)、泊松比 0.35; 水稳基层弹性模量取芯样实测平均值 8000 MPa、泊松比 0.20; 底基层弹性模量 200 MPa、泊松比 0.35。温度荷载依据项目区近 10 年气象数据统计确定: 夏季路表最高温度取 58℃, 冬季最低温度取 -20℃, 昼夜温差按 30℃考虑。干缩应变依据水泥稳定砂砾的室内试验结果, 取干燥收缩系数 $50 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。

有限元分析结果表明: ① 在冬季极端低温条件下, 沥青面层表面的最大温度拉应力可达 1.85 MPa, 已接近普通基质沥青混合料的抗拉强度(约 2.0 MPa), 考虑材料老化后强度折减, 存在开裂风险; ② 水稳基层底部的最大干缩拉应力在干燥环境下可达 0.68 MPa, 当叠加温度收缩应力(约 0.42 MPa)后, 总拉应力达 1.10 MPa, 已超过水泥稳定砂砾的典型抗拉强度(0.5~1.0 MPa), 这是导致基层开裂的主要原因; ③ 在层间黏结不良的界面处, 由于层间接触刚度降低, 应力集中系数可达 1.5~2.0, 显著加速了裂缝的向上反射。上述有限元分析结果与现场检测发现的横向裂缝呈等间距分布(10~30 m)、裂缝贯穿整个结构层等特征高度吻合, 从力学角度进一步验证了横向裂缝是半刚性基层干缩/温缩应力超限与温度应力疲劳耦合作用的结果。

4.3. 其他病害成因分析

龟裂和块状裂缝主要与路面结构疲劳损伤和沥青老化有关。运营多年的沥青路面在行车荷载反复弯拉作用和紫外线辐射老化作用下, 沥青结合料逐渐变硬变脆, 混合料疲劳寿命下降。当累积损伤达到临

界值时, 路面出现龟裂, 进而发展为块状裂缝和坑槽。

纵向裂缝主要与路基因素有关。本项目部分路段位于山前冲洪积扇区, 地形起伏较大, 存在填挖交界和半填半挖路段。若路基填筑时横向压实不均匀、台阶处理不规范或边坡排水不畅, 在行车荷载和地下水作用下, 路基产生不均匀沉降, 进而诱发路面纵向裂缝[18]。

4.4. 与国内外研究成果的对比及本研究的特殊性讨论

为进一步明确本研究的科学贡献, 有必要将 G217 线该路段的病害特征与引言中提及的其他地区研究成果进行系统性对比。郝灵恩等[1]针对高速公路改扩建的研究表明, 高速公路因设计标准高、结构层厚度大、材料性能要求严格, 其既有路面病害以疲劳开裂和车辙为主, 裂缝间距通常为 30~50 m, 远大于本研究观测到的 10~30 m 间距, 反映出二级公路在交通荷载和环境因素耦合作用下的病害发展更为迅速。朱自成等[5]对高寒高海拔地区(如西藏国道 109、318)的研究发现, 该区域路面病害以冻融开裂和紫外线老化为主, 裂缝形态多呈不规则网状分布, 与南疆干旱区以规则等间距横向裂缝为主的特征存在显著差异, 这主要归因于两地主导破坏因素的不同: 高寒地区以冻融循环为控制因素, 而南疆地区以温差应力和盐胀作用为主导。苏宏强等[6]对 G3012 高速公路拱胀病害的研究虽揭示了“热胀”与“盐胀”协同破坏机理, 但该研究对象为交通量大、重载比例高的高速公路, 拱胀病害表现为显著的结构性隆起; 而本研究对象为二级公路, 虽未出现明显拱胀, 但盐胀作用已以反射裂缝的形式对路面结构造成渐进性损伤, 两者在破坏模式上存在本质区别。

上述对比分析揭示了南疆干旱荒漠区二级公路在病害模式、主控因素和发展规律方面的特殊性: ① 与高速公路相比, 二级公路因设计荷载低、结构层偏薄, 对温度应力和盐胀作用更为敏感, 裂缝出现更早、间距更小; ② 与高寒地区相比, 南疆地区无显著冻融循环, 但昼夜温差更大、蒸发量更高, 导致干缩和温缩效应更为突出; ③ 与同为盐渍土区的高速公路相比, 二级公路的交通荷载较轻, 盐胀破坏尚未表现为拱胀, 而是以反射裂缝的形式逐步积累, 具有更强的隐蔽性和累积性。因此, 针对南疆干旱荒漠区二级公路的升级改造, 不能简单套用高速公路或高寒地区的处治经验, 而应充分考虑其独特的环境耦合作用机制, 采取针对性的检测评价方法和处治技术策略。这正是本研究的核心科学贡献所在。

4.5. 研究局限性

尽管本研究综合运用了多种检测手段和分析方法, 对 G217 线该路段既有路面性能进行了系统评价, 但仍存在以下局限性: ① 检测时间方面的局限——本次检测仅在特定季节进行, 未能获取路面性能在不同季节的完整变化数据, 特别是温度应力和盐胀作用的季节性差异未能充分捕捉; ② 纵向追踪数据的缺乏——本研究为断面式检测评价, 缺少该路段历年检测数据的纵向追踪分析, 难以精确量化病害的演化速率; ③ 有限元模型的简化——有限元分析采用了二维轴对称模型和简化的材料本构关系, 未考虑层间接触的非线性特性和材料参数沿路线的不均匀性, 应力计算结果存在一定的近似性; ④ 盐渍土关联分析的样本量——由于探坑检测数量(10 处)和钻芯数量(60 处)的限制, 盐渍土与路面病害关联分析的统计显著性有待进一步扩大样本量后验证; ⑤ 结构承载力验证的不足——本研究虽基于 FWD 弯沉数据进行了结构层模量反算, 但尚未结合弯沉结果进行完整的结构承载能力验算, 这是后续研究需要补充的内容。上述局限性在后续研究中将通过长期监测、扩大检测样本和深化数值模拟等手段逐步克服。

5. 既有路面升级改造技术对策

5.1. 升级改造原则

基于上述检测结果与病害机理分析, G217 线该路段升级改造应遵循以下原则:

(1) 充分利用原则: 在确保路面结构承载能力和使用寿命的前提下, 尽可能保留和利用既有路面结构层, 降低工程造价和资源消耗。

(2) 针对性处治原则: 根据路面技术状况评价结果和病害成因分析, 对不同路段、不同病害类型采取差异化的处治措施, 避免“一刀切”。

(3) 结构补强原则: 针对结构承载能力不足或病害严重的路段, 通过加铺、换填或注浆等方式进行结构补强, 提升整体承载能力。

(4) 适应环境原则: 充分考虑南疆干旱荒漠区极端气候和盐渍土环境特征, 选用耐候性好、抗裂性能强的材料和结构形式, 提高路面适应性和耐久性。

5.2. 分段处治方案

根据 PCI 分布规律和病害严重程度, 将全线划分为三个段落, 分别制定处治方案:

(1) K1021+600~K1062+000 段(较好段): 该段落 PCI 多为“优”或“良”, 路面整体状况较好。建议以预防性养护为主, 对局部裂缝进行灌缝封闭, 对轻微车辙路段进行微表处或超薄罩面, 延缓病害发展, 维持路面使用性能。

(2) K1062+000~K1075+000 段(中等段): 该段落 PCI 多为“中”, 病害较为发育。建议对裂缝进行开槽灌缝或贴缝处理, 对龟裂和块状裂缝严重路段进行铣刨重铺, 铣刨深度至基层顶面, 重新铺筑沥青面层; 对基层强度不足路段进行基层补强或更换。

(3) K1075+000~K1080+160 段(较差段): 该段落 PCI 降至“次”等级, 病害严重且密集。建议进行结构性修复, 铣刨全部沥青面层, 对基层进行修复或更换, 重新铺筑新的路面结构层。对盐渍土路段, 应在底基层与路基之间设置隔盐层或采用风积沙等非盐渍土换填, 阻断盐分迁移通道。

5.3. 裂缝处治技术

针对本项目最主要的横向裂缝病害, 建议采用分级处治策略:

(1) 轻度裂缝(宽度 < 3 mm): 采用热沥青灌缝或贴缝带封闭, 防止雨水下渗。

(2) 中度裂缝(宽度 3~6 mm): 采用开槽灌缝工艺, 槽宽 10~15 mm、槽深 15~20 mm, 填充高黏度改性沥青灌缝胶或橡胶沥青, 确保灌缝材料与原路面良好黏结。

(3) 重度裂缝(宽度 > 6 mm 或贯穿结构层): 采用局部铣刨重铺方案, 铣刨范围应超出裂缝两侧各 0.5 m, 深度至基层顶面或基层内部, 清除松散材料后, 采用沥青碎石或乳化沥青碎石回填并重新铺筑面层。对于裂缝密集路段, 建议采用玻纤格栅或土工布加铺, 抑制反射裂缝再生[19][20]。

5.4. 盐渍土路段特殊处治

针对探坑检测发现的硫酸盐弱盐渍土路段, 应采取以下特殊处治措施:

(1) 路基处理: 对路床硫酸盐含量超标的段落, 采用非盐渍土换填处理, 换填厚度不小于 0.8 m, 并保证换填料压实度满足规范要求。在路基与底基层之间设置土工布或复合土工膜隔盐层, 阻断毛细水上升通道, 防止盐分向上迁移富集[21]。

(2) 基层材料控制: 严格控制水泥稳定基层原材料中的硫酸盐含量, 对进场砂砾料进行易溶盐检测, 确保 SO_4^{2-} 含量不超过规范限值(0.25%)。必要时采用水洗或掺加石灰等方式降低原料含盐量[4]。

(3) 结构优化: 在盐渍土路段, 可考虑采用级配碎石柔性基层替代水泥稳定半刚性基层, 消除半刚性基层的温缩和干缩裂缝源, 从根本上减少反射裂缝的发生。柔性基层虽整体刚度较低, 但与沥青面层模量匹配性更好, 且耐盐蚀性能优于水泥稳定材料[22]。

5.5. 结构补强设计建议

根据既有路面结构检测数据和升级改造后交通量预测, 建议采用以下典型路面结构:

(1) 一般路段: 4 cm AC-13C 细粒式改性沥青混凝土上面层 + 6 cm AC-20C 中粒式沥青混凝土下面层 + 20 cm 水泥稳定砂砾基层 + 20 cm 级配砂砾底基层。在沥青面层与基层之间设置 SBS 改性沥青同步碎石封层, 增强层间黏结。

(2) 盐渍土路段: 4 cm AC-13C 细粒式改性沥青混凝土上面层 + 6 cm AC-20C 中粒式沥青混凝土下面层 + 18 cm 级配碎石基层 + 18 cm 水泥稳定砂砾底基层 + 20 cm 风积砂或碎石隔盐层。采用柔性基层减少反射裂缝, 底基层以下设置隔盐层阻断盐分迁移。

(3) 重载交通及陡坡路段: 在上述结构基础上, 适当增加沥青面层或基层厚度, 或采用大粒径透水性沥青混合料(LSPM)作为柔性基层, 提高结构抗疲劳性能和排水能力[23]。

5.6. 材料优化建议

结合南疆干旱荒漠区极端气候特征, 建议对路面材料进行以下优化:

(1) 沥青结合料: 采用 SBS 改性沥青或复合抗裂改性沥青, 提高高温抗车辙性能和低温抗裂性能。参考熊可维等[3]的研究成果, 复合抗裂改性沥青的低温延度较普通 SBS 改性沥青提升 78%, 弹性恢复性能提升 11%, PG 等级可达 PG-34, 更适合新疆大温差环境。

(2) 沥青混合料: 面层采用骨架密实型级配, 适当增加粗集料含量, 增强嵌挤作用; 控制空隙率在 3%~5%之间, 兼顾耐久性和水稳定性。在改性沥青中掺加适量抗剥落剂, 提高沥青与集料的黏附性, 防止水损害[24]。

(3) 基层材料: 水泥稳定基层应采用骨架密实型级配, 控制水泥剂量在 4%~5%之间, 避免水泥剂量过高导致干缩和温缩加剧。加强养生管理, 保证基层在铺筑面层前达到设计强度并减少含水率, 降低收缩变形[25]。

6. 结论

(1) 通过对 G217 线天山神秘大峡谷至库车段 58.54 km 既有路面进行系统检测, 全线 PCI 平均值为 85.2 (“良”)、RQI 平均值为 93.4 (“优”)、RDI 平均值为 96.42 (“优”)、SCI 平均值为 83.4 (“良”)。路面整体技术状况尚可, 但存在明显的段落差异, K1062 + 000~K1080 + 160 段路面状况明显较差。

(2) 路面主要病害为横向裂缝, 约占裂缝类病害总数的 70%以上, 且多贯穿沥青面层和水稳基层, 属于典型的半刚性基层反射裂缝。基于 ABAQUS 有限元模型的应力分析表明, 水稳基层底部在干缩与温缩耦合作用下的最大拉应力达 1.10 MPa, 超过材料典型抗拉强度(0.5~1.0 MPa), 是基层开裂的主要力学原因; 沥青面层在极端温差条件下的温度拉应力达 1.85 MPa, 接近材料抗拉强度极限。病害成因是半刚性基层收缩、温度应力疲劳、层间黏结不良及局部盐胀作用等多因素耦合的结果。

(3) 钻芯和探坑检测揭示了路面结构层的复杂性: 沥青面层厚度变异系数达 23.5%, 基层无侧限抗压强度变异系数达 68.3%, 反映了历年分段养护维修导致结构层性能差异显著。局部路段路床填料存在硫酸盐弱盐渍土, 盐渍土路段呈现 “低回弹模量 - 高裂缝密度 - 低 PCI” 的耦合特征, 盐胀作用对基层结构稳定性构成潜在威胁。与其他地区对比分析表明, 南疆干旱荒漠区二级公路的病害模式、主控因素和发展规律具有显著特殊性, 不能简单套用高速公路或高寒地区的处治经验。

(4) 基于多指标综合评价结果和病害机理分析, 提出了分段处治、裂缝分级处治、盐渍土路段特殊处治及材料优化等综合升级改造技术对策。建议对较好段以预防性养护为主, 中等段进行铣刨重铺和基层修复, 较差段进行结构性修复并设置隔盐层。

(5) 本研究成果可为南疆干旱荒漠区既有二级公路升级改造工程的检测评价、病害诊断和处治设计提供技术参考。后续应结合弯沉检测结果进一步验证路面结构承载能力, 并开展废旧路面材料再生利用研究, 实现绿色低碳改造。同时应认识到本研究存在的局限性: 检测为特定季节的断面式数据, 缺少纵向追踪; 有限元模型做了必要的简化假设; 盐渍土与路面病害关联分析的样本量有待扩大。未来研究可通过长期监测和扩大检测样本进一步验证和完善本研究的结论。

致 谢

感谢新疆交勘致远工程科技有限公司对本研究项目的技术支持, 感谢 G217 线天山神秘大峡谷至库车公路升级改造项目各参建单位在检测期间的配合与协助。

基金项目

新疆维吾尔自治区科技计划项目(2021B01005); 新疆维吾尔自治区科技计划项目(2025LQ03008); 乌鲁木齐市科技计划项目(B241017002)。

参考文献

- [1] 郝灵恩. 高速公路改扩建既有路面检测评价关键技术研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2017.
- [2] 袁阳. 高速公路改扩建既有沥青路面技术状况综合评价体系研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2024.
- [3] 熊可维. 适用于新疆地区的抗裂沥青材料及其路用性能研究[D]: [硕士学位论文]. 邯郸: 河北工程大学, 2025.
- [4] 宋亮, 王选仓. 新疆盐渍土地区水泥稳定基层盐胀变形规律及机理[J]. 公路交通科技, 2019, 36(7): 20-28.
- [5] 朱自成. 高寒高海拔地区沥青路面病害机理与防治技术研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2018.
- [6] 苏宏强, 罗锦波, 王华涛, 汪波, 王勇, 张铮, 朱世煜. 荒漠区沥青路面拱胀病害特征调查与成因分析[J]. 交通技术, 2025, 14(5): 671-681.
- [7] 中华人民共和国交通运输部. JTG 5210-2018 公路技术状况评定标准[S]. 北京: 人民交通出版社, 2018.
- [8] 中华人民共和国交通运输部. JTG 5421-2018 公路沥青路面养护设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2018.
- [9] 中华人民共和国交通运输部. JTG 3450-2019 公路路基路面现场测试规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2019.
- [10] 中华人民共和国交通运输部. JTG D50-2017 公路沥青路面设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2017.
- [11] 朱俊清, 尹逸群, 马涛, 等. 半刚性基层沥青路面横向裂缝成因诊断综述[J]. 交通运输工程学报, 2025, 25(3): 12-32.
- [12] 陈晓瑛, 尹利华. 基于弯沉检测的水泥混凝土路面板底脱空评价方法[J]. 公路, 2011(11): 143-147.
- [13] 刘景琦, 张耀南, 康建芳, 等. 基于多智能体协同的高寒山区道路结冰数据工程预警[J]. 数据与计算发展前沿(中英文), 2026, 8(2): 40-53.
- [14] 温小平, 翁兴中, 张俊, 等. 新疆地区粗颗粒盐渍土毛细水上升和隔断层隔断效果研究[J]. 公路交通科技, 2015, 32(5): 56-60+67.
- [15] 朱春生, 郝智晨, 员兰, 等. 芯吸排水管作用下盐渍土路基水盐迁移特征[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2025, 43(5): 549-559.
- [16] 崔晓乾. G30 喀-叶-墨高速公路既有路面利用及建设方案设计研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2018.
- [17] 李润武. 中亚造山带北山地区早-中新生代岩浆岩时空分布及其构造-成矿意义[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国地质大学(北京), 2024.
- [18] 白奇玉, 王斌. 独库 G217 巩乃斯至库车段崩塌灾害分布及风险评估[J]. 地下水, 2022, 44(1): 187-190+227.
- [19] 汪为巍, 杨保存, 王荣. 南疆盐渍土地区城区道路病害规律研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(S1): 253-258.
- [20] 宿松亚. 新型防裂基布在新疆公路养护工程中应用效果研究[D]: [硕士学位论文]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2021.
- [21] 任秀玲, 张文, 刘昕, 等. 西北地区盐渍土盐胀特性研究进展与思考[J]. 土壤通报, 2016, 47(1): 246-252.

- [22] 万旭升, 廖孟柯, 杜立群. 温度对硫酸钠盐渍土盐胀影响的试验研究[J]. 公路交通科技, 2016, 33(8): 44-50.
- [23] 杨鹏, 朱彦鹏, 曹亚鹏, 等. 含水率单次递减条件下粗颗粒硫酸盐渍土盐胀的室内模拟试验[J]. 岩土力学, 2017, 38(10): 2909-2915.
- [24] 张莎莎, 杨晓华, 戴志仁. 基于均匀设计的砾类硫酸盐渍土盐胀特性试验研究[J]. 公路交通科技, 2009, 26(5): 29-34.
- [25] 牛玺荣, 李志农, 高江平. 盐渍土盐胀特性与机理研究进展[J]. 土壤通报, 2008(1): 163-168.