

荒漠区沥青路面拱胀病害特征调查与成因分析

苏宏强¹, 罗锦波^{2*}, 王华涛², 汪波¹, 王勇¹, 张铮¹, 朱世煜³

¹中国葛洲坝集团市政工程有限公司, 湖北 宜昌

²长安大学公路学院, 陕西 西安

³安徽建筑大学土木工程学院, 安徽 合肥

收稿日期: 2025年8月14日; 录用日期: 2025年9月12日; 发布日期: 2025年9月25日

摘要

针对南疆干旱荒漠区沥青路面拱胀病害问题, 以G30₁₂阿克苏至喀什高速公路为研究对象, 综合采用现场调查、钻芯取样、全断面挖探、温度监测及室内试验等方法, 系统分析了病害特征及成因机制。结果表明: 拱胀病害主要分布于极端温差显著、盐渍化严重的干旱半荒漠区, 具有显著季节性特征, 夏季为高发期; 病害表现为水泥稳定砾石基层的横向或Z字形隆起, 基层以下结构相对完好; 拱胀处基层芯样强度显著降低, SO₄²⁻含量超标, 盐分垂直分布呈路基土 > 下基层 > 上基层的浓度梯度特征; 拱胀病害是由温差导致的“热胀”和硫酸盐侵蚀引发的“盐胀”共同作用所致。

关键词

道路工程, 水泥稳定砾石基层, 路面拱胀, 拱胀病害调查, 成因分析

Characteristic Investigation and Cause Analysis of Asphalt Pavement Arching and Swelling Diseases in Desert Areas

Hongqiang Su¹, Jinbo Luo^{2*}, Huatao Wang², Bo Wang¹, Yong Wang¹, Zheng Zhang¹, Shiyu Zhu³

¹Gezhouba Group Municipal Engineering Co., Ltd., Yichang Hubei

²School of Highway, Chang'an University, Xi'an Shaanxi

³College of Civil Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei Anhui

Received: Aug. 14th, 2025; accepted: Sep. 12th, 2025; published: Sep. 25th, 2025

*通讯作者。

文章引用: 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. DOI: 10.12677/ojtt.2025.145067

Abstract

In view of the arid desert area of southern Xinjiang asphalt pavement arching and swelling disease problem, this study takes G30₁₂ Aksu to Kashgar highway as the research object, adopts on-site investigation, drilling core sampling, full-section excavation and temperature monitoring methods, combined with indoor tests to systematically analyze the characteristics of the disease and the causes of the disease. The results indicate that: arching/swelling primarily occurs in arid semi-desert areas featuring extreme temperature differentials and severe salinization, exhibiting marked seasonality with peak incidence during summer. The disorder manifests as transverse or Z-shaped upheavals within the cement-stabilized gravel base course, while subbase and subgrade structures remain relatively intact. Core samples from affected areas show significantly reduced strength, excessive SO_4^{2-} content, and a vertical concentration gradient of soluble salts: subgrade > lower base > upper base. The arching/swelling pathology results from the synergistic effects of “thermal expansion” induced by temperature differentials and “salt expansion” caused by sulfate erosion.

Keywords

Road Engineering, Cement Stabilized Gravel Subgrade, Pavement Arching, Arching Disease Investigation, Cause Analysis

Copyright © 2025 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

近年来,新疆等干旱荒漠区沥青路面频繁出现拱胀病害,表现为横向间断性隆起,形成类似“搓板路”的形态,严重威胁行车安全与路面耐久性。初步推断此类病害与西北干旱荒漠区独特的气候(温度、湿度)及土壤条件密切相关,但其具体成因机制尚未完全明晰。

现有关于沥青路面拱胀机理的研究多从单一因素切入。姚爱玲[1]指出内蒙古额济纳旗地区水稳基层高温拱起是导致路面拱胀的主要因素;张宏等[2]强调了盐胀作用对路面横向拱胀的重要影响;黄河清[3]认为施工与运营期温差导致的热膨胀是拱胀的关键诱因;田秋林等[4]调查发现摊铺方式对拱胀影响显著;谢红战[5]基于阿拉善地区高等级公路的现场调查,发现高温导致的水稳基层温度应力与路基盐胀效应共同引发路面拱起;冯瑞玲等[6]进一步从微观层面证实了硫酸盐侵蚀是导致水稳基层膨胀破坏的关键因素。

上述研究表明,即使在同一地区,不同道路的拱胀成因也可能存在差异,且现有研究多侧重单因素分析,缺乏系统性研究方法及对拱胀灾害综合致灾机制的研究。鉴于此,本文聚焦新疆拱胀高发区,综合运用现场调查、钻芯取样、全断面挖探、温度监测及室内试验等多维度手段,系统分析荒漠区沥青路面拱胀病害的特征及成因机制,旨在为拱胀病害的有效防治提供科学依据,保障沥青路面长期性能与交通安全。

2. 路面拱胀病害特征调查

2.1. 项目概况及沿线气象水文资料

本次调研依托阿克苏地区拱胀病害最为严重的 G30₁₂ 阿克苏至喀什高速公路。调研路段为双向四车

道，设计车速 120 km/h，路基宽度 28 m。全线路基均采用砾类土填筑，路面结构采用 4 cm 中粒式 SBS 改性沥青混凝土表面层 + 5 cm 中粒式沥青混凝土中面层 + 7 cm 粗粒式沥青混凝土下面层 + 1 cm 沥青表面处治下封层 + 32 cm 的 4.5%~5%水泥稳定砂砾基层 + 15~34 cm 的天然砂砾底基层。水泥稳定砾石基层均采用骨架密实型混合料。

阿喀公路位于南疆塔里木盆地的西南部，属典型的温带大陆性气候。根据气象站近 3 年观测数据，沿线区域年平均高温 23.8℃~26.3℃，月平均高温出现在 7 月，极端高温达 42.0℃。年平均低温-8.2℃~-9.0℃，月平均最低气温出现在 1 月，极端低温达-27.6℃，极端温度差达 32.8℃~34.5℃。沿线区域雨季集中在每年 5~8 月，年平均降雨量仅为 35.5~60.8 mm，而年平均蒸发量约为 1896.5~2751.6 mm。同时，调研区域浅层地下水受溶质迁移影响，矿化度普遍较高，多属 IV 类咸水，图 1 所示[7]，加剧了周边土体及筑路材料的盐渍化风险。

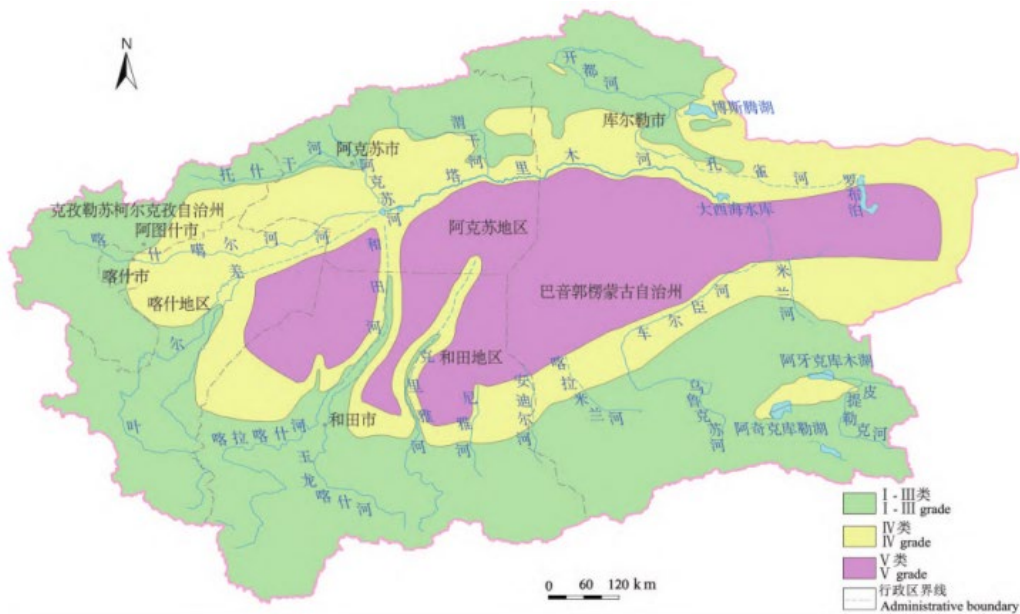


Figure 1. Spatial distribution of groundwater quality types in Southern Xinjiang
图 1. 南疆地下水水质分布

2.2. 路面拱胀病害特征调查分析

Table 1. Arch expansion quantity statistics along the Aksu-Kashgar section of the G3012 Expressway
表 1. G3012 阿克苏至喀什高速公路拱胀数量统计

项目标段	病害调查桩号	累计长度(km)	病害数量(道)	病害路段每公里 平均病害道数(道)	病害路段每公里 最多病害道数(道)
一标	左幅 K961~K967	67	79	1.18	5
	左幅 K972~K977				
	左幅 K995~K1004				
	右幅 K960~K1007				
二标	左幅 K1042~K1125	121	324	2.68	9
	右幅 K1045~K1083				

G30₁₂ 阿克苏至喀什高速公路路段拱胀病害集中分布在 K1075+000~K1095+000, 拱胀高度 1~7 cm, 其中高度在 2~5 cm 的占 90%以上, 拱胀宽度 50~200 cm。拱胀沿纵向分布段落、间距变化较大, 最小不足 2 m, 最大超过 1 km, 具体调查桩号及拱胀分布位置见表 1。病害形貌以沿横向一字形隆起贯穿隆起为主(占 90%), 部分路段有少量 Z 字形隆起, 如图 2 所示。部分铣刨处理路段出现复发上拱。



Figure 2. Upheaving distress along the Aksu-Kashi section of the G30₁₂ Expressway
图 2. G30₁₂ 阿克苏至喀什高速公路拱胀病害

2.3. 道路结构使用情况调查分析



(a) 沥青面层芯样表面存在不均匀孔洞



(b) 洞内存在破碎松散芯样无法取出

Figure 3. Core drilling results from the G30₁₂ Aksu-Kashgar Expressway
图 3. G30₁₂ 阿克苏至喀什高速公路钻芯情况

为获取道路原状结构信息, 选取典型路段进行钻芯挖探。在各路段钻取水稳砂砾基层芯样 10 处, 包括 6 处病害路段与 4 处非病害路段。钻芯过程发现沥青面层间粘结性和整体性较好, 仅个别芯样表面存在不均匀孔洞现象, 且沥青面层在拱胀处厚度整体低于病害处的沥青面层厚度。而水稳基层普遍出现破

碎松散的现象，其完整率均低于 25%，表明其结构完整性已严重受损。由于基层破碎松散，基层材料的粘结性能明显降低，多数芯样难以完整取出，如图 3 所示。

选取 4 处拱胀路段开展路肩挖探，其路面结构使用情况如图 4 所示。发现路面拱胀主要发生于上基层，面层结构完好，水稳层上部出现拱起脱空，下部则基本完好。拱胀区域微隆起 2~4 cm，且上基层在逆行车方向被挤压抬高，由于错动滑移及应力集中导致形成 40~60 cm 宽的破碎带。部分拱胀处水稳层顶部松散，层间粘结差。底基层及路基填筑材料以天然砂砾为主，压实度中等，含水率约 4.0%，整体处于干燥状态。



Figure 4. Trenching investigation results along the Aksu-Kashgar section of the G3012 Expressway
图 4. G3012 阿克苏至喀什高速公路挖探情况

3. 拱胀病害路段芯样检测与分析

3.1. 道路盐分检测与分析

对拱胀高发段 K1082+130 和 K1076+860 不同深度基层芯样及路基土进行易溶盐离子浓度测试，样品阴离子和阳离子检测结果分别如表 2、表 3 所示。

Table 2. Anion test results of samples from different pavement layers

表 2. 道路不同层位样品阴离子检测结果

桩号	距拱胀处的水平距离(m)	层位	Cl ⁻ (%)	SO ₄ ²⁻ (%)	CO ₃ ²⁻ (%)	HCO ₃ ⁻ (%)
K1082+130	5	下基层	0.047	0.246	0.033	0.016
	2	下基层	0.055	0.255	0.03	0.01
	0	路基土	0.043	0.896	0.04	0.007
	0	下基层	0.058	0.79	0.02	0.009
	0	上基层	0.061	0.395	0.01	0.012
K1076+860	5	下基层	0.018	0.117	0.034	0.005
	0	路基土	0.003	0.603	0.04	0.008
	0	下基层	0.018	0.489	0.042	0.004
	0	上基层	0.006	0.375	0.035	0.008
	5	下基层	0.04	0.133	0.028	0.008

Table 3. Cation test results of samples from different pavement layers
表 3. 道路不同层位样品阳离子检测结果

桩号	距拱胀处的水平距离(m)	层位	Ca ²⁺ (%)	K ⁺ (%)	Mg ²⁺ (%)	Na ⁺ (%)	总离子浓度(%)
K1082+130	5	下基层	0.0781	0.0084	0.0036	0.008	0.4401
	2	下基层	0.0511	0.0128	0.0029	0.02	0.4368
	0	路基土	0.2103	0.0066	0.0058	0.0002	1.2089
	0	下基层	0.0967	0.012	0.0006	0.0296	1.0159
	0	上基层	0.121	0.0048	0.0004	0.0135	0.6177
K1076+860	5	下基层	0.0747	0.0155	0.0003	0.0379	0.3024
	0	路基土	0.243	0.0255	0.0004	0.0746	0.9975
	0	下基层	0.1843	0.0041	0.0019	0.0108	0.7541
	0	上基层	0.096	0.0177	0.0006	0.0521	0.5904
	5	下基层	0.0998	0.0136	0.0004	0.0406	0.3634

由表可知,拱胀病害处的所有基层样品离子浓度均在 0.36%~1.02%的范围内,远超规范标准的 0.25%。进一步分析盐分的分布规律,水平方向来看,拱胀发生处的各层位盐分含量明显高于邻近区域,表明拱胀发生与盐分富集密切相关;垂直方向来看,盐分呈现路基土 > 下基层 > 上基层的浓度梯度,为离子自下而上迁移提供了必要条件。

3.2. 环境土样盐分检测与分析

在 G30₁₂ 路段下行线典型拱胀桩号 K1082+250 处,分层采集环境土样进行易溶盐检测,阴、阳离子检测结果见表 4、表 5,并依据《公路路基设计规范》对盐渍土类型进行划分。

Table 4. Anion content analysis of undisturbed soil samples
表 4. 环境土样阴离子检测结果

深度(m)	Cl ⁻ (%)	SO ₄ ²⁻ (%)	HCO ₃ (%)	$c(\text{Cl}^-)/c(\text{SO}_4^{2-})$	盐渍土分类
0	0.285	0.279	0.016	2.76	氯盐弱盐渍土
0.05	0.349	0.27	0.02	3.5	氯盐弱盐渍土
0.25	0.357	0.377	0.018	3.28	氯盐中盐渍土
0.5	0.166	0.462	0.015	0.97	亚硫酸盐中盐渍土
1	0.14	0.815	0.019	0.46	亚硫酸盐中盐渍土

Table 5. Cation content analysis of undisturbed soil samples
表 5. 环境土样阳离子检测结果

深度(m)	Ca ²⁺ (%)	K ⁺ (%)	Mg ²⁺ (%)	Na ⁺ (%)
0	0.06	0.022	0.006	0.142
0.05	0.058	0.007	0.004	0.087
0.25	0.074	0.006	0.019	0.127
0.5	0.043	0.002	0.017	0.046
1	0.22	0.007	0.003	0.083

结果显示,研究路段环境土体中存在显著的可溶性盐富集现象。该地区盐渍土中以氯盐和硫酸盐为主,表层以氯盐为主,深层以硫酸盐为主,离子总量随深度增加呈上升趋势。结合内蒙古、甘肃等地研究,拱胀病害分布与盐渍土区域高度重合,表明道路两侧可溶性盐与病害发生密切相关。

3.3. 基层芯样强度测试与分析

拱胀处与非拱胀处芯样无侧限抗压强度结果见表 6。拱胀处芯样强度较低(约 2.8~7.9 MPa),未拱胀处强度较高(约 11.5~14.3 MPa),平均降幅约 55.77%。部分拱胀处芯样虽无可见裂缝或明显破坏,强度亦明显降低,表明强度劣化并非单纯由挤压破坏所致,盐分侵蚀导致材料性能退化亦是重要因素。

Table 6. Unconfined compressive strength of base course core samples by road section
表 6. 各路段基层芯样无侧限抗压强度

路段名称	是否发生拱胀病害	桩号	无侧限抗压强度(MPa)
G30 ₁₂ 阿克苏至喀什高速公路	是	K1062+175	6.7
		K1062+176	2.8
		K1069+063	3.9
		K1076+900	5.7
		K1076+900	7.7
	否	K1082+287	7.9
		K1062+185	11.5
		K1069+073	13.6
		K1076+910	12.9
		K1082+297	14.3

4. 路面拱胀原因分析

综合上述病害调查、结构挖深、芯样检测与环境特征分析,南疆荒漠区沥青路面产生的拱胀病害是由“热胀”和“盐胀”共同作用引起的。

4.1. 极端温差导致的“热胀”

拱胀病害在春季升温期数量与高度均增加,至夏季高温期达到峰值;秋冬降温期则减弱。由于水泥稳定混合料属于温度敏感性材料,温度变化易引发较大变形,导致水稳基层在春夏膨胀、秋冬收缩。这表明温度在病害发生发展中起关键作用,大温差产生的温度应力是导致拱胀的直接力学诱因。

依据水稳基层温度应力理论[8],温度变化时水稳基层材料产生的温度应力可按式(1)进行计算:

$$\sigma = E \cdot \alpha \cdot \Delta T \tag{1}$$

式中, σ 为温度应力(MPa);

E 为水稳基层的抗压模量(MPa);

ΔT 为温差($^{\circ}\text{C}$);

α 为水稳基层的温度膨胀系数($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)。

由式(1)可知,地区温差、材料模量及温度膨胀系数均与水稳基层的温度应力成正比。为了对拱胀机理进行深化与定量化分析,通过室内试验获取了水泥稳定砾石基层材料的关键热物理力学参数,其中抗

压模量 $E = 1500 \text{ MPa}$ 、温度膨胀系数 $\alpha = 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ，抗拉强度 $\sigma_t = 0.6 \text{ MPa}$ ，并基于调研路段路面结构内部实测的极端温差 ($\Delta T_{\max} \approx 35^{\circ}\text{C}$)，依据温度应力理论公式(1)进行估算，表明季节性温度变化产生的热应力可达 0.53 MPa ，已接近材料的抗拉强度极限，从定量角度证实了“热胀”是导致基层损伤的直接力学诱因。深处大陆中心地带的干旱荒漠区极端路表温差显著，由此引发的水稳基层变形量被放大，产生巨大内应力，最终导致膨胀挤压与变形破坏。南疆及内蒙古、甘肃等拱胀高发区均位于干旱半荒漠区，印证了温度及温差的关键作用。

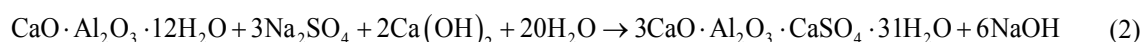
4.2. 盐分物理结晶膨胀

离子检测结果表明基层富含硫酸盐，尤以硫酸钠(Na_2SO_4)为主。而硫酸钠对水泥基材料物理结晶破坏显著，其破坏机理可归为3类：(1) 固相体积膨胀：无水盐 Na_2SO_4 转化为 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (芒硝)时，固相体积膨胀约 314%；(2) 盐水化压，无水盐 Na_2SO_4 吸水溶解过程产生渗透压力引起破坏；(3) 盐结晶压：过饱和溶液中析出的盐分晶体生长产生巨大压力[9]-[11]。这三种机制均源于 Na_2SO_4 物理变化过程产生的内应力，进而导致破坏。其典型特征是：初期盐结晶填充孔隙，起密实增强作用；当孔隙饱和后，晶体持续生长富集，引发材料膨胀破坏。

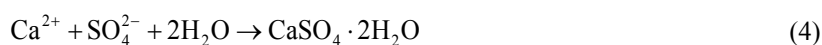
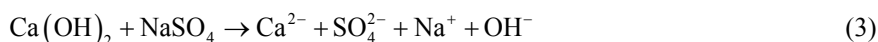
4.3. 盐分化学侵蚀膨胀

盐分化学侵蚀引起的膨胀本质是水泥水化产物与可溶性盐发生化学反应生成二次钙矾石、石膏和碳硫硅钙石等膨胀性产物。

硫酸根离子与水泥水化产物(如水化铝酸钙)反应生成二次钙矾石(Aft)，反应方程如式(2)所示。二次钙矾石溶解度极低，结合大量水分子后固相体积显著增大，呈针状结晶在含铝固相表面析出。受水泥石孔壁约束，晶体持续生长产生结晶压，在水稳材料内部引起较大的内应力，导致膨胀破坏[12]。温度升高加速离子迁移与碰撞，促进溶质传递与钙矾石晶核形成。在 $20^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$ 区间，钙矾石生成速率随温度升高而加快，最佳形成温度为 $40^{\circ}\text{C} \sim 50^{\circ}\text{C}$ [13]-[15]。南疆夏季基层顶面最高温度可达 50°C 以上，为钙矾石大量形成提供极佳条件，加剧夏季拱胀。



当侵蚀溶液中 SO_4^{2-} 浓度大于 1000 mg/L 且毛细孔为饱和石灰溶液填充时，除生成钙矾石外，还会析出石膏($\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$)。在弱碱环境下，硫酸盐侵蚀主要产物为二水石膏，在致密的水泥石中产生膨胀，导致棱角开裂、表层脱落及逐层侵蚀[16] [17]。XRD 分析检测到石膏存在，表明其侵蚀作用亦不可忽视。相关反应如式(3)、式(4)所示：



4.3.1. SEM 微观形貌分析

为进一步验证道路基层中的水泥水化产物是否与存在的易溶盐发生化学反应并生成相关产物，采用 JSM 7610 FPlus 扫描电镜观察拱胀处基层芯样的微观形貌，观测结果如图 5 所示。

图 5(a)显示集料表面及集料间空隙处有大量针棒状钙矾石分布，较小空隙处尤为密集，表明盐分与水泥水化产物反应在基层空隙内生成钙矾石；图 5(b)可以看到絮状 C-S-H 凝胶及针棒状钙矾石、硫酸钠晶体共存；图 5(c)可观察到集料表面及钙矾石周围存在大量圆球状未水化的水泥颗粒。图 5(d)左上角出现了不规则半透明多面体，推测为 Na_2SO_4 晶体。大量针棒状钙矾石的发现与前文分析结果相吻合，证实了水泥水化产物与硫酸盐发生了化学反应。

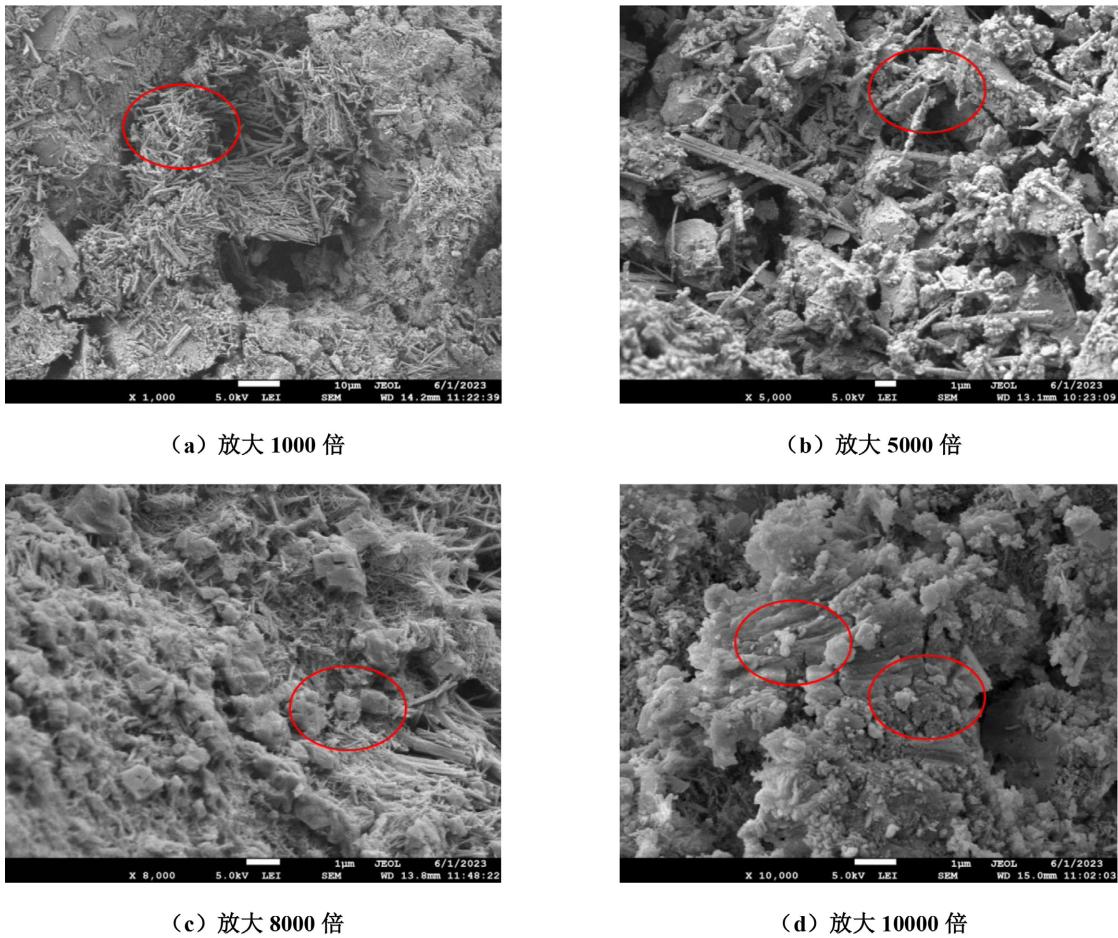


Figure 5. SEM images of base core samples at arching site
图 5. 拱胀处基层芯样 SEM 图像

4.3.2. XRD 物相分析

使用 D8 ADVANCE X 射线粉末衍射仪对拱胀处基层芯样进行 XRD 物相分析, 结果如图 6 所示。检测结果发现存在含量显著的钙矾石、碳硫硅钙石以及石膏, 均为硫酸盐侵蚀特征产物, 未检出 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 衍射峰, 表明导致膨胀及性能劣化的主要化学反应消耗了氢氧化钙。这进一步证实该地区水稳基层已发生显著的硫酸盐化学侵蚀。

综上所述, 拱胀病害主要由温度与盐分因素耦合导致。极端温差导致材料内部温度应力剧增; 盐分则通过物理结晶和与水泥水化产物的化学反应产生膨胀应力, 并显著削弱基层力学强度。夏季高温同时加剧了温度应力和盐化学侵蚀速率, 导致病害高发。

5. 结论

(1) 拱胀病害集中发生于干旱半荒漠及盐渍土地区, 具有昼夜温差大、地下水及土壤盐渍化严重等特征。病害呈现显著季节性, 夏季为高发期。病害主要表现为水泥稳定砂砾基层的横向或 Z 字形隆起, 隆起高度集中在 2~5 cm, 基层以下结构相对完好。

(2) 拱胀病害的本质是水稳基层的破坏。与非病害路段相比, 拱胀处基层芯样平均无侧限抗压强度降低 55.77%, 且结构松散破碎; 病害处盐分含量 0.36%~1.02%, 远超规范标准的 0.25%, 并呈现明显的垂直梯度分布(路基土 > 下基层 > 上基层), 驱动盐分自下而上迁移富集。

(3) 南疆荒漠区沥青路面的拱胀病害是“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,共同作用于水稳基层,导致其力学强度劣化、体积膨胀,最终引发拱起破坏。夏季高温同时加剧了温度应力和盐化学侵蚀速率,故成为病害高发期。因此严格控制基层材料盐分含量、采用抗硫酸盐侵蚀材料及在结构设计中充分考虑温度应力的影响,是后续防治荒漠区拱胀病害的核心方向。

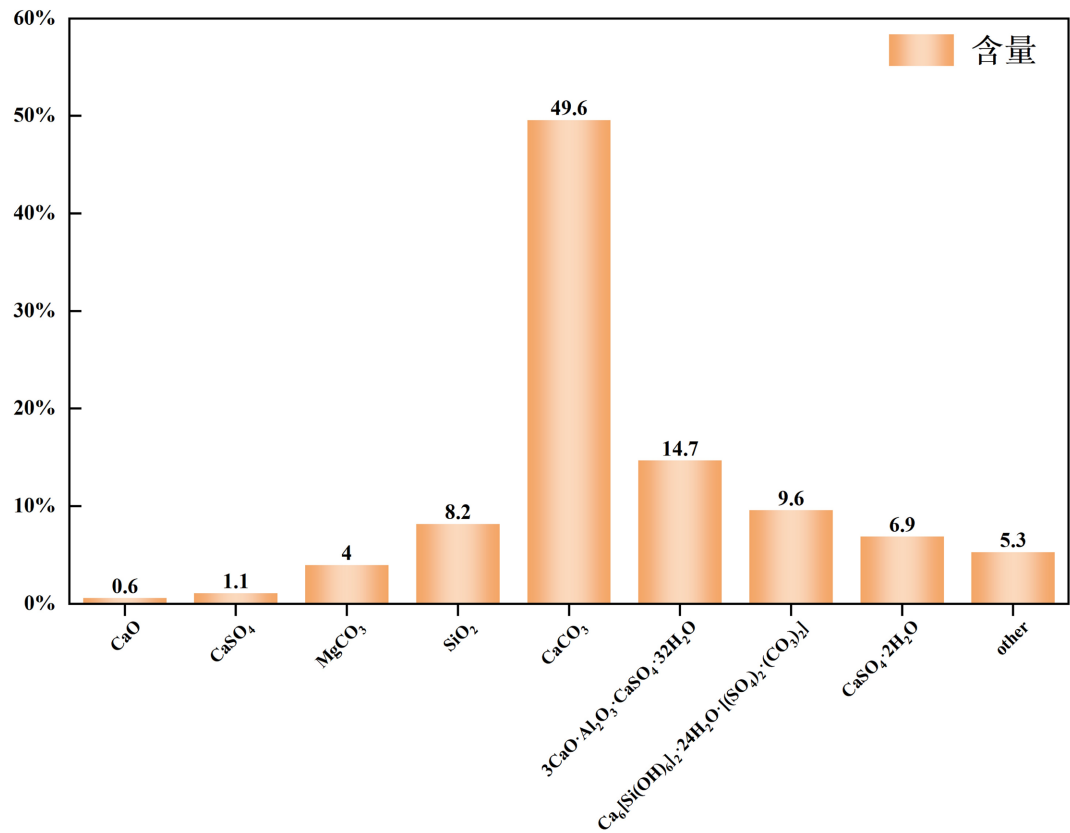


Figure 6. XRD phase analysis of base core sample at arching site
图 6. 拱胀处基层芯样 XRD 物相分析

基金项目

新疆交通设计院公司科研基金(KY2022080901); 新疆交通运输厅 2022 年度交通运输行业科技项目(2022-ZD-017); 新疆交通规划勘察设计研究院有限公司科研项目(KY2022042502)。

参考文献

- [1] 姚爱玲, 王军伟, 李志涛, 等. 内蒙古额济纳旗水稳碎石基层沥青路面拱起开裂的原因分析[J]. 公路工程, 2018, 43(6): 56-61.
- [2] 张宏, 王智远, 张海龙, 等. 阿拉善额济纳地区公路盐胀病害成因分析[J]. 安全与环境学报, 2015, 15(6): 151-154.
- [3] 黄河清. 西部地区某高速公路水泥稳定碎石基层拱胀原因分析[J]. 工程与建设, 2017, 31(1): 79-80, 86.
- [4] 田秋林, 钟诚, 王选仓, 等. 温度及含盐量对水泥稳定基层拱胀影响研究[J]. 公路, 2020, 65(4): 63-68.
- [5] 谢红战. 沙漠戈壁地区水泥稳定碎石基层沥青路面拱胀机理分析及处治建议[J]. 公路工程, 2019, 44(5): 180-187.
- [6] 冯瑞玲, 王随柱, 吴立坚, 等. 新疆硫酸盐渍土地区沥青路面鼓胀变形机理研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(9):

- 1739-1745.
- [7] 尹立河, 张俊, 姜军, 等. 南疆地区水资源问题与对策建议[J]. 中国地质, 2023, 50(1): 1-12.
- [8] 赵昕, 沙爱民, 洪斌. 半刚性基层拱胀现象的力学分析[J]. 公路交通科技, 2008(4): 42-46.
- [9] 周凤玺, 杨金银, 巨文涛, 等. 粗颗粒硫酸盐渍土水盐迁移规律及变形特性研究[J]. 冰川冻土, 2024, 46(1): 199-210.
- [10] 张明亮, 亢景付, 杨荣伟. 干湿循环下硫酸盐对水泥基孔隙材料的侵蚀破坏综述[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(10): 3150-3161.
- [11] 杨全兵, 杨钱荣. 硫酸钠盐结晶对混凝土破坏的影响[J]. 硅酸盐学报, 2007(7): 877-880, 885.
- [12] 亢景富. 混凝土硫酸盐侵蚀研究中的几个基本问题[J]. 混凝土, 1995(3): 9-18.
- [13] 张文生, 张金山, 叶家元, 等. 合成条件对钙矾石形貌的影响[J]. 硅酸盐学报, 2017, 45(5): 631-638.
- [14] 李好茜, 乔秀臣. 外部因素对钙矾石晶体结构及形貌的影响综述[J]. 硅酸盐通报, 2023, 42(1): 31-47.
- [15] 蓝俊康. 由液相 SO_4^{2-} 浓度的变化解译钙矾石的热稳定性[J]. 桂林工学院学报, 2004(4): 480-482.
- [16] 王金川, 陈登. 水灰比和硫酸钠浓度对水泥基材料劣化过程的影响[J]. 混凝土与水泥制品, 2021(7): 21-25.
- [17] 杨旭光, 李燕, 孙道胜, 等. 弱碱硫酸盐侵蚀下水泥石产物二水石膏相的研究[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(5): 1515-1519.