

DOI: 10.11779/CJGE202109020

# 新疆硫酸盐渍土地区沥青路面鼓胀变形机理研究

冯瑞玲<sup>1,2</sup>, 王随柱<sup>3</sup>, 吴立坚<sup>4</sup>, 陆奂材<sup>1</sup>, 沈宇鹏<sup>1,2</sup>

(1. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 北京市轨道交通线路安全与防灾工程技术研究中心, 北京 100044;

3. 新疆生产建设兵团公路科学技术研究所, 新疆 乌鲁木齐 830000; 4. 交通运输部公路科学研究院, 北京 100088)

**摘要:** 依托新疆阿克苏地区的两条公路, 在进行公路路面鼓胀病害调查的基础上, 选择 4 个典型病害部位开挖试坑, 观察了路面结构层中损坏的情况, 同时取样测试了基层及路基填料的含盐量、矿物成分、pH 值等, 分析了两条公路路面鼓胀病害的产生机理。研究结果表明: 公路 A (省道) 路面基层中的离子以  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  为主, 因此发生了钙矾石型硫酸盐侵蚀。公路 B (国道) 路面基层中  $\text{Ca}^{2+}$  含量较高, 同时含有一定量  $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{CO}_3^{2-}$ , 因此发生了硅灰石膏型硫酸盐侵蚀。此外, 夏季高温条件、水泥中碱含量超标等都加剧了两种硫酸盐侵蚀的发生。最后, 根据两条公路病害产生机理, 提出了硫酸盐渍土地区路面鼓胀病害的预防措施。

**关键词:** 硫酸盐渍土; 沥青路面; 半刚性基层; 鼓胀变形; 硫酸盐侵蚀

中图分类号: TU411.08

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2021)09-1739-07

**作者简介:** 冯瑞玲(1976—), 女, 副教授, 主要从事岩土工程、路基工程等方面的教学和科研工作。E-mail: rlfeng@bjtu.edu.cn。

## Bulging deformation mechanism of asphalt pavement in sulfate saline soil areas of Xinjiang

FENG Rui-ling<sup>1,2</sup>, WANG Sui-zhu<sup>3</sup>, WU Li-jian<sup>4</sup>, LU Huan-cai<sup>1</sup>, SHEN Yu-peng<sup>1,2</sup>

(1. College of Civil and Architecture Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Beijing Engineering Research

Center of Rail Transit Safety and Disaster Prevention, Beijing 100044, China; 3. Institute of Highway Science and Technology, Xinjiang

Production and Construction Corps, Urumqi 830000, China; 4. Research Institute of Highway (RIOH), Ministry of Transport, Beijing

100088, China)

**Abstract:** Based on two highways in Aksu prefecture of Xinjiang, four typical diseased sections are selected to excavate test pits on the basis of investigating bulging diseases of highways, the damage of structure layer pavement is observed, the salt content, mineral composition and pH value of base and subgrade fill are sampled and tested, and the mechanism of pavement diseases of the two highways is analyzed. The results show that the ions in the base course of Highway A (Provincial Highway) are mainly  $\text{SO}_4^{2-}$  and  $\text{Ca}^{2+}$ , so a chemical reaction takes place and Ettringite is formed. The content of  $\text{Ca}^{2+}$  in the base course of Highway B (National Highway) is high, and it also contains a certain amount of  $\text{SO}_4^{2-}$  and  $\text{CO}_3^{2-}$ , so a chemical reaction takes place and Wollastonite gypsum is formed. In addition, the high temperature in summer and the alkali content in cement exceed the standard, accelerate the occurrence of two kinds of sulfate erosion. Finally, according to the mechanism of the two highway diseases, the preventive measures for bulging diseases of highways in the sulfate saline soil areas are put forward.

**Key words:** sulphate saline soil; asphalt pavement; semi-rigid base; bulging deformation; sulfate attack

## 0 引言

近几年来, 新疆、内蒙古、甘肃等硫酸盐渍土地区的公路频繁出现明显的路面鼓胀变形<sup>[1-2]</sup>, 如图 1 所示。

对于硫酸盐渍土地区采用水泥、石灰等钙基改良土, 引起公路、铁路等工程产生膨胀的问题, 从 20 世纪 90 年代, 国外学者便开展了相关的研究。Raymond

等报道了格鲁吉亚 3.5 公里公路在施工后 6 个月内, 在水泥稳定基层中发生了大量膨胀变形, 取样检测表明钙矾石引起的土体体积变化是导致上拱和横向外拱的主要原因<sup>[3]</sup>。美国德克萨斯州 82 号公路、美国奥克拉荷马、达拉斯地区的 67 号和 I-635 号公路等都有

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (51778048)

收稿日期: 2020-12-30

石灰改良土被硫酸盐侵蚀形成钙矾石引起膨胀的类似问题<sup>[4-6]</sup>。McCarthy 等在英国 Oxford、Lias、Gault 等区域现场工点发现了不同成分的钙基添加剂（水泥、石灰等）被硫酸盐侵蚀膨胀的现象<sup>[7]</sup>。



图1 路面鼓胀变形

Fig. 1 Deformation and swelling of pavement

针对路面鼓胀病害，国内学者开展了相关研究。王军伟<sup>[1]</sup>提出内蒙古沙漠戈壁地区水泥稳定碎石基层沥青路面的拱起开裂病害主要是由基层的高温拱胀引起的。张海龙<sup>[2]</sup>提出路面横向隆起病害主要由路基盐胀作用和基层的热胀作用引起。许刚<sup>[8]</sup>针对以水泥稳定砂砾作为基层的道路在硫酸盐环境下路面鼓包的现象，提出了用级配砾石和级配碎石（柔性基层）替代水泥稳定砂砾（半刚性基层）的处治方法。蒲翠玲等<sup>[9-10]</sup>针对盐渍化的半刚性基层，提出在强度满足设计要求时，尽量选用二灰稳定土基层。沙爱民提出硫酸钠含量是稳定土强度发展与体积变化的内在决定因素<sup>[11]</sup>。高艳龙等<sup>[12]</sup>、胡江洋等<sup>[13]</sup>从理论上分析了高含硫量粉煤灰导致路面基层膨胀开裂、强度降低进而产生破坏的机理，但未进行生成产物的测试验证。宋亮等<sup>[14]</sup>基于硫酸盐结晶膨胀理论，提出了水泥稳定基层混合料中硫酸盐含量的合理控制范围。尧俊凯等<sup>[15]</sup>指出硫酸盐侵蚀水泥改良填料产生膨胀变形是路基上拱的主要成因。应赛等<sup>[16]</sup>提出了盐渍土冻结过程中的两种特征温度的理论计算模型，并与试验结果进行了对比。

目前中国对硫酸盐渍土地区沥青路面鼓胀变形的研究主要集中在硫酸盐结晶盐胀、温度膨胀、干缩、处治措施等方面。鉴于此，本文依托新疆硫酸盐渍土地区两条公路出现的鼓胀病害，在调研病害概况、地质环境、原材料特性等的基础上，取样进行了含盐量、矿物成分分析等，明确了路面鼓胀的机理，分析了硫酸盐侵蚀水泥稳定基层的反应条件及预防措施。

## 1 路面鼓胀病害调查

本次病害调查路段位于新疆兵团农三师（阿克苏地区的图木舒克市），为季节性冻土分布区，最大冻土深度为 69 cm。硫酸盐渍土发育，易溶盐含量范围为 0.804%~4.51%，为硫酸盐中—强盐渍土。

### 1.1 农三师公路 A（省道）病害调查

农三师公路 A 为省道，二级公路，路面结构从上到下依次为：4 cm 沥青混凝土路面，20 cm 水泥稳定砂砾基层。该公路 2015 年 8 月建成通车后 4 年内多次发生了开裂、鼓胀变形，并进行了养护维修，但问题仍未得到解决，如图 2、3 所示。

从图 2 中可以看出：K20+150 断面路肩部位基层顶面局部出现了基层松散的情况（图 2（b）），同时基层底面处有 7 cm 高的脱空，从路肩部位向道路中线延伸的脱空深度约为 1.8 m。无论是松散基层填料还是块状基层材料表面均发白（图 2（c），2（d））。

从图 3 中可以看出：K17+330 断面路面结构、路基各层次分明，未见基层材料松散或脱空现象，但基层材料表面仍然发白。

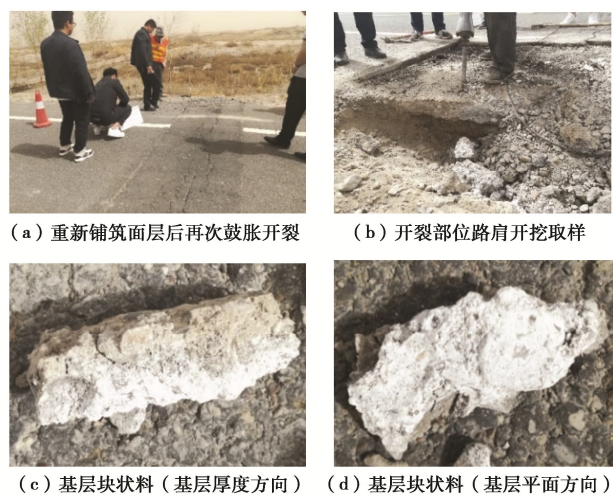


图2 公路 A（省道）K20+150 断面

Fig. 2 Cross-section in K20+150 of Highway A (Provincial Highway)



图3 公路 A（省道）K17+330 断面开裂部位路肩开挖取样

Fig. 3 Cross-section in K17+330 of Highway A (Provincial Highway)

### 1.2 农三师公路 B（国道）病害调查

农三师公路 B 为国道，二级公路，2016 年 4 月建成通车。路面结构自上而下依次为：4 cm 中粒式沥青混凝土上面层+6 cm 中粒式沥青混凝土下面层+1 cm 下封层+25 cm 水泥稳定砂砾基层+35 cm 级配砾石底基层。通车 3 年来发生了严重的路面鼓胀变形，如图 4 所示。

从图 4（a）中可以看出：该断面硬路肩处最大鼓

胀量 9 cm, 靠近中心线部位的隆起量为 5 cm。基层有松散的情况, 但基层下方无空洞, 路面上无裂缝。

从图 4 (b) 中可以看出: K36+210 断面处硬路肩及靠近硬路肩的一条车道整体发生了鼓胀变形, 路面上无裂缝。硬路肩外侧开挖后发现基层底部与底基层顶面脱空, 脱空高度为 5 cm, 从硬路肩向道路中线的脱空深度为 2 m, 空洞中有松散基层材料, 空洞处最薄的板结状态的水泥稳定砂砾基层厚度由原来的 25 cm 变成了 10 cm。



图 4 公路 B (国道) 试坑开挖情况

Fig. 4 Cross-section of Highway B (National Highway)

对比分析可知: 公路 A 发生鼓胀变形的同时在路面上出现了横向裂缝, 公路 B 虽然产生了显著的鼓胀变形, 但是在路面上未见到横向裂缝。究其原因虽然两条公路均为二级公路, 但是公路 A 仅铺筑了 4 cm 厚的沥青混凝土面层, 厚度较小, 因此基层较小的鼓胀变形就会导致面层被拉裂。而公路 B 铺筑了 10 cm 厚的沥青混凝土面层, 由于面层厚度较大, 其抵抗基层鼓胀开裂的能力较强, 因此虽然基层产生了较大的鼓胀变形, 但在调查时路面未见开裂。

## 2 路面鼓胀原因分析

在新疆阿克苏地区, 可能引起路面鼓胀变形的原因有冻胀、热膨胀、硫酸盐侵蚀、基层碱集料反应等。

### 2.1 冻胀

调查路段路面鼓胀在冬季较低, 在夏季高温时逐渐升高。因此可以排除冻胀引起路面鼓胀的原因。

### 2.2 热膨胀

调查路段中夏季高温季节鼓胀变形加剧, 说明高温或高温差有可能引起路面结构中产生温度应力, 导致路面鼓胀变形<sup>[1-2]</sup>。为此调查了新疆农三师附近同样存在高温及高温差地区的高速公路病害情况, 附近地区的高速公路也有鼓胀现象, 但病害程度不及图木舒克市附近的公路严重, 说明温度升高虽然能使路面鼓胀病害加剧, 但高温或高温差并不是产生路面鼓胀病害的唯一原因或主要原因。

### 2.3 硫酸盐侵蚀引起鼓胀变形

硫酸盐对路面结构中半刚性基层的侵蚀分为物理

结晶和化学侵蚀两种, 当条件具备时, 两种类型的侵蚀可能同时发生<sup>[17-18]</sup>。

调查路段处于硫酸盐渍土地区, 因此需要通过矿物成分分析等方式确定是否发生了硫酸盐侵蚀以及发生了何种硫酸盐侵蚀。

## 2.4 基层碱骨料反应引起鼓胀变形

碱骨料反应是半刚性基层原材料中可溶性碱 ( $\text{Na}_2\text{O}$  或  $\text{K}_2\text{O}$ ) 与骨料中的活性成分在半刚性基层硬化后发生化学反应, 生成物吸水膨胀致使基层鼓胀、开裂, 这种现象被称为碱骨料反应<sup>[19]</sup>。

图 5 为公路 A、公路 B 试坑中基层材料取样照片。从图中可以看出: 基层骨料剖面未产生明显的反应环和反应边, 路面表面未出现网状裂缝, 加之两条公路出现鼓胀的时间均为 3 a 左右, 因此可以推断这两条公路出现鼓胀病害的主要原因并非碱骨料反应。



图 5 试坑中基层骨料

Fig. 5 Base aggregates in test pits of highways

由上述分析可知, 农三师公路 A (省道)、公路 B (国道) 产生严重的路面鼓胀变形的原因可能是硫酸盐侵蚀, 同时高温及高温差又加剧了这些反应的发生。

## 3 硫酸盐侵蚀分析

### 3.1 取样位置

为了深入剖析调查路段路面鼓胀机理, 在两条公路的开挖部位取样进行了含盐量、矿物成分分析、PH 值的测试, 三项测试分别参照《公路土工试验规程: JTG 3430—2020》、《转靶多晶体 X 射线衍射方法通则: JY/T 009—1996》、《土壤检测: NY/T 1121.2—2006》中的相关规定执行。各个断面的试坑取样位置见图 6, 7。

### 3.2 试验结果分析

#### (1) 公路 A (省道) 基层硫酸盐侵蚀分析

对公路 A 病害部位试坑取样的含盐量测试结果见表 1, 矿物成分、PH 值检测结果见图 8。

从表 1 中可以看出: 病害部位基层及路基材料均以硫酸盐中盐渍土为主, 这为硫酸盐侵蚀的发生提供了外部环境条件。

从图 8 (a) 中可以看出: 公路 A 基层混合料的矿物成分以石英、方解石为主, 路基填料的矿物成分与



基层混合料的矿物成分大体相同。但是，在挖探的两个断面的基层混合料中均发现了钙矾石（1，2，5 号样），而路基填料（3，4 号样）中未发现钙矾石。在所有检测样品中均未发现硅灰石膏。

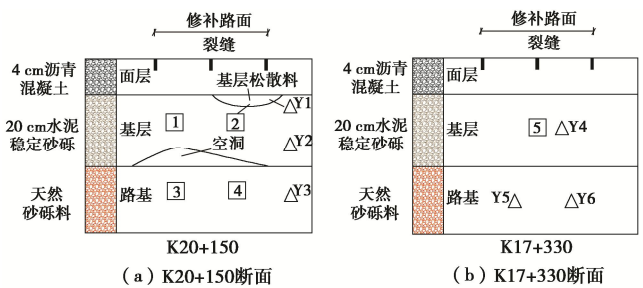


图 6 公路 A 取样位置示意图

Fig. 6 Schematic diagram of sampling location of Highway A  
(图中□表示取样完成了含盐量、XRD、pH 值测试；△表示取样完成了含盐量测试)

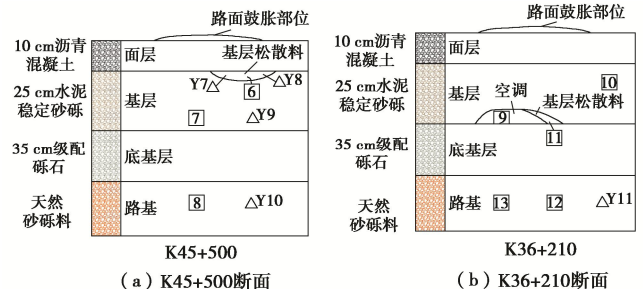


图 7 公路 B 取样位置示意图

Fig. 7 Schematic diagram of sampling location of Highway B  
(图中□表示取样完成了含盐量、XRD、pH 值测试；△表示取样完成了含盐量测试)

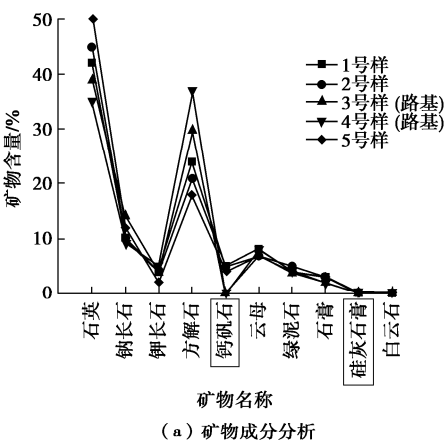
表 1 公路 A 病害部位含盐量测试结果

Table 1 Test results of salt content in diseased parts of Highway A				
取样位置	试样编号	Cl <sup>-</sup> /SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	含盐量/%	盐渍土名称
K20+150	1	0.018	1.002	硫酸盐中盐渍土
	2	0.038	0.677	硫酸盐中盐渍土
	3	0.048	0.709	硫酸盐中盐渍土
	4	0.103	0.383	硫酸盐中盐渍土
	Y1	0.090	0.428	硫酸盐中盐渍土
	Y2	0.035	0.355	硫酸盐中盐渍土
	Y3	0.061	0.588	硫酸盐中盐渍土
K17+330	5	0.201	1.705	硫酸盐中盐渍土
	Y4	0.101	2.041	硫酸盐强盐渍土
	Y5	0.067	0.717	硫酸盐中盐渍土
	Y6	0.068	1.447	硫酸盐中盐渍土

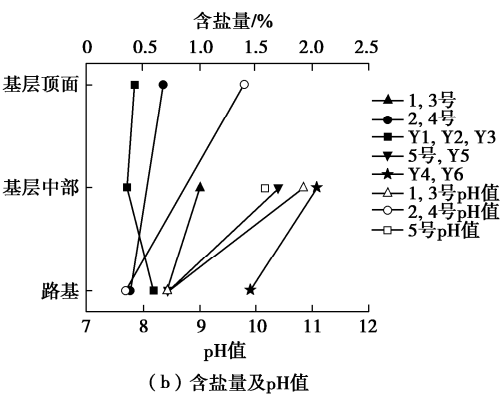
同时，图 8（b）的测试结果也表明：基层中的含盐量范围为 0.355%~2.041%，大部分含盐量均较高且非常不均匀；基层中的 pH 值范围为 9.79~10.84，表现出了较强的碱性。由此判断公路 A 基层发生的硫酸盐化学侵蚀以钙矾石型侵蚀为主<sup>[15, 17]</sup>。

Mehta 等<sup>[20]</sup>研究表明，当侵蚀溶液 pH 值小于 11.5~120 时，钙矾石将继续与硫酸盐反应，生成石

膏。因此，钙矾石能否在侵蚀溶液中稳定存在取决于侵蚀溶液的 pH 值。在公路 A 的病害部位，虽然其 pH 值及含盐量均满足生成石膏的条件，但由于基层中石膏的含量与路基中石膏含量接近，因此可以认为基层中的石膏为原材料中所含有的。



(a) 矿物成分分析



(b) 含盐量及 pH 值

图 8 公路 A 病害部位测试结果

Fig. 8 Test results of diseased parts of Highway A

(2) 公路 B（国道）基层硫酸盐侵蚀分析

对公路 B 病害部位试坑取样的含盐量测试结果见表 2，矿物成分、pH 值检测结果见图 9。

从表 2 中可以看出：病害部位基层及路基材料均以硫酸盐、亚硫酸盐中盐渍土为主，这同样为硫酸盐侵蚀的发生提供了外部环境条件。

从图 9（a）中可以看出：公路 B 基层混合料的矿物成分以方解石、白云石为主，路基填料的矿物成分与基层混合料的矿物成分大体相同。但是，在两个断面的基层混合料中均发现了硅灰石膏（6，7，9，10，11 号样），而路基填料（8，12，13 号样）中未发现硅灰石膏。在所有检测样品中均未发现钙矾石。同时，图 9（b）的测试结果也表明：基层中的含盐量范围为 1.352%~2.827%，含盐量很高且非常不均匀；基层中的 PH 值范围为 8.83~11.68，表现出了较强的碱性。由此判断公路 B 基层发生的硫酸盐化学侵蚀以硅灰石膏（ $\text{Ca}_3\text{SiSO}_4\text{CO}_3(\text{OH})_6 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ）侵蚀为主<sup>[10, 17]</sup>。

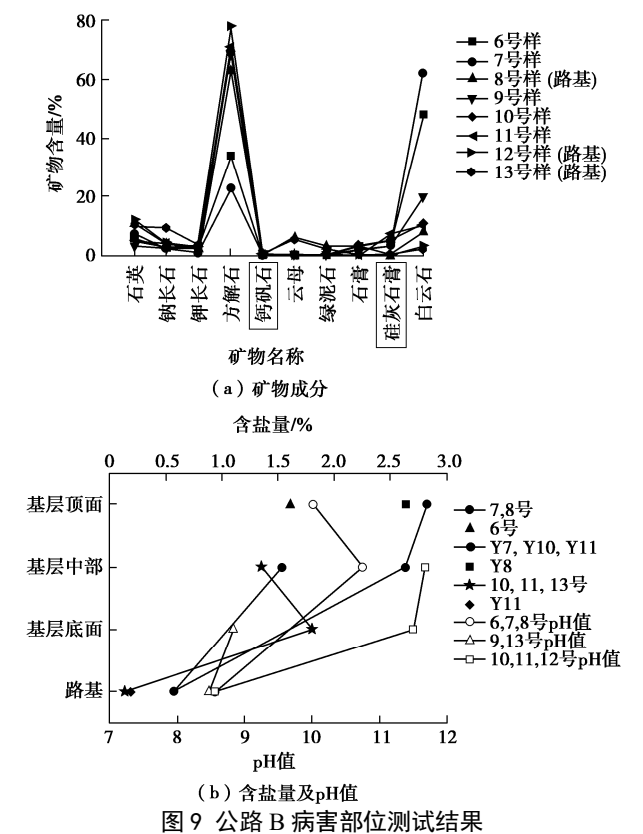


图 9 公路 B 病害部位测试结果

Fig. 9 Test results of diseased parts of Highway B

表 2 公路 B 病害部位含盐量测试结果

Table 2 Test results of salt content in diseased parts of Highway B

取样位置	试样编号	Cl <sup>-</sup> /SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	含盐量/%	盐渍土名称
K45+500	6	0.670	1.614	亚硫酸盐中盐渍土
	7	0.407	1.533	亚硫酸盐中盐渍土
	8	0.111	0.570	硫酸盐中盐渍土
	Y7	0.416	2.827	亚硫酸盐强盐渍土
	Y8	0.444	2.635	亚硫酸盐强盐渍土
	Y9	11.417	2.637	氯盐中盐渍土
	Y10	0.095	0.568	硫酸盐中盐渍土
K36+210	坡脚外原状土	0.181	7.838	硫酸盐过盐渍土
	10	0.262	1.352	硫酸盐中盐渍土
	11	0.209	1.806	硫酸盐中盐渍土
	13	0.518	0.135	亚硫酸盐非盐渍土
	Y11	0.475	0.184	亚硫酸盐非盐渍土

公路 B 基层侵蚀产物中未发现钙矾石，且其侵蚀发生在通车 3 年内，因此可以推断出该公路基层侵蚀以直接生成硅灰石膏侵蚀为主。硅灰石膏是无任何胶结性的泥状体，在 K36+210 断面的空洞中出现了松散的基层材料也可以充分说明发生了硅灰石膏侵蚀。

综上可知：农三师的两条硫酸盐渍土地区的公路，虽然都发生了硫酸盐侵蚀水泥稳定基层的情况，但二者的侵蚀机理不同，公路 A 主要发生的是钙矾石型硫酸盐侵蚀，而公路 B 则主要发生的是硅灰石膏型硫酸盐侵蚀。

(3) 两条公路硫酸盐侵蚀机理不同的原因分析

为了分析公路 A 和公路 B 硫酸盐侵蚀机理不同的原因，将两条公路试坑取样测得的盐分中各种离子的种类及含量绘制成曲线图，见图 10，11。

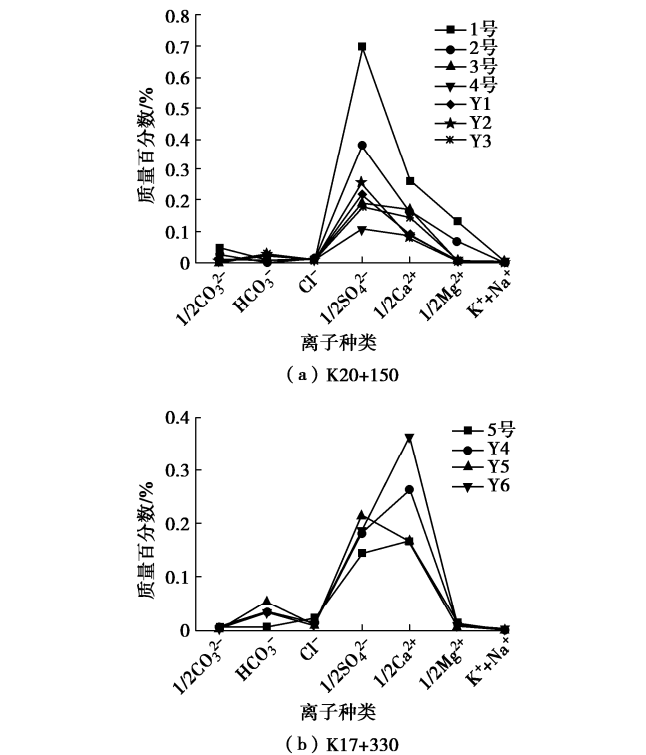


图 10 公路 A（省道）试坑中盐分离子种类及含量

Fig. 10 Types and contents of salt separators in Highway A (Provincial Highway) test pit

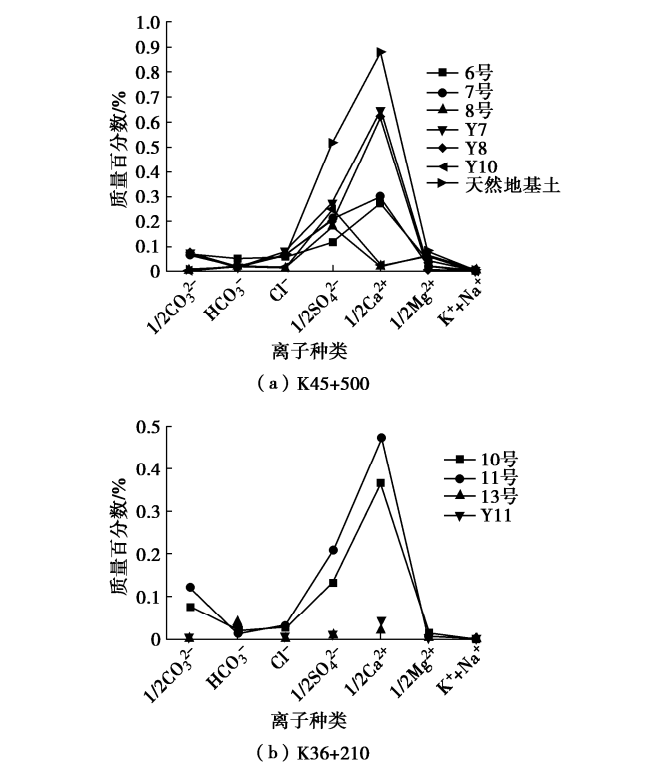


图 11 公路 B（国道）试坑中盐分离子种类及含量

Fig. 11 Types and contents of salt separators in test pit of Highway B (National Highway)

从表 1, 2, 图 10, 11 中可以看出: 虽然两条公路病害部位取样均以硫酸盐、亚硫酸盐中盐渍土为主, 但其中离子的种类及含量存在较大差别。

公路 A 试坑盐分中的离子以  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  为主, 因此在硫酸盐侵蚀的过程中主要发生的是  $\text{SO}_4^{2-}$  带来的钙矾石型硫酸盐侵蚀。同时, 由于 K20+150 断面处大部分测点的  $\text{SO}_4^{2-}$  含量为 0.18%~0.38%, 而 K17+330 断面处大部分测点的  $\text{SO}_4^{2-}$  含量为 0.14%~0.22%, K20+150 断面处的  $\text{SO}_4^{2-}$  含量高于 K17+330 断面处的  $\text{SO}_4^{2-}$  含量, 因此 K20+150 断面基层侵蚀更严重, 出现了松散的情况, 而 K17+330 断面处基层完整性仍然较好。

公路 B 试坑盐分中  $\text{Ca}^{2+}$  含量很高, 同时含有一定量的  $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{CO}_3^{2-}$ , 这为发生硅灰石膏型硫酸盐侵蚀提供了充足的  $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{Ca}^{2+}$ 。

#### 4 基层中硫酸盐和碱的来源

由上述分析可知, 公路 A、B 在运营 3~4 年时, 基层材料中的含盐量均较高, 加之处在碱性比较强的环境中, 因而发生了硫酸盐侵蚀水泥水化产物导致路面鼓胀变形的病害。

综合分析《公路路面基层施工技术细则: JTGF20—2015》等规范发现, 目前中国对路面基层粗集料的技术要求包括压碎值、针片状颗粒含量以及 0.075 mm 以下粉尘含量, 对细集料规定了塑性指数、有机质含量以及硫酸盐含量, 但是并未提出粗集料的含盐量要求以及基层混合料的总含盐量要求<sup>[21]</sup>, 而在施工过程中粗集料、拌合用水都可能带来盐分, 加之路基及地基盐分迁移等, 可能使得在施工及运营过程中基层混合料的总含盐量超标, 进而出现硫酸盐侵蚀半刚性基层的病害。

此外, 对新疆阿克苏地区水泥厂生产的水泥的碱含量等参数进行了抽检。结果表明阿克苏地区水泥厂生产的水泥的碱含量分别为 0.73% 和 0.7%, 超过了规范规定值 ( $\leq 0.60\%$ ), 这为半刚性基层发生硫酸盐侵蚀提供了额外的碱性环境。

#### 5 路面鼓胀预防措施

根据上述病害机理分析, 在硫酸盐渍土地区预防半刚性基层病害的措施可从以下 7 个方面展开: ①严格控制基层粗骨料、细骨料各自的含盐量及拌合后混合物的总含盐量; ②严格控制拌合用水的矿化程度; ③严格控制水泥中的碱含量, 尽量采用低碱水泥; ④采用高抗硫水泥或低铝酸钙水泥; ⑤采取隔断措施, 阻止路基、地基中的盐分向基层中迁移; ⑥采取隔

水、防水措施, 切断硫酸盐侵蚀的必备条件; ⑦采用级配砂砾石、级配碎石、沥青稳定碎石等柔性材料代替半刚性基层材料。

#### 6 结 论

通过对新疆硫酸盐渍土地区两条公路出现的鼓胀病害部位取样进行含盐量、矿物成分分析、pH 值测试, 明确了这两条公路路面鼓胀变形机理:

(1) 公路 A 试坑盐分中的离子以  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  为主, 因此发生了钙矾石型硫酸盐侵蚀。

(2) 公路 B 试坑盐分中  $\text{Ca}^{2+}$  含量很高, 同时含有一定量的  $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{CO}_3^{2-}$ , 因此发生了硅灰石膏型硫酸盐侵蚀。

(3) 高温及水泥中碱含量超标加剧了两种硫酸盐侵蚀的发生。

(4) 提出了预防沥青路面半刚性基层鼓胀变形的措施。

#### 参考文献:

- [1] 王军伟. 水泥稳定碎石基层沥青路面拱起开裂研究[D]. 西安: 长安大学, 2017. (WANG Jun-wei. Research on Expansion Cracking of Asphalt Pavement by Cement Stabilized Macadam Base[D]. Xi'an: Chang'an University, 2017. (in Chinese))
- [2] 张海龙. 沙漠区沥青混凝土路面横向隆起成因及力学分析[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2018. (ZHANG Hai-long. The Cause and Mechanical Analysis on the Transverse Uplift of Asphalt Concrete Pavement in Desert Area[D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2018. (in Chinese))
- [3] ROLLINGS R S, BURKES J P, ROLLINGS M P. Sulfate attack on cement-stabilized sand[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2000, **125**(5): 364 - 372.
- [4] CHEN D H, HARRIS P, SCULLION T, et al. Forensic investigation of a sulfate-heaved project in Texas[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2005, **19**(4): 324 - 330.
- [5] DURAN D R. Case study: heave potential associated with ettringite formation in lime treated materials for an Aurora, Colorado, roadway[C]// Biennial Geotechnical Seminar, 2010, Denver.
- [6] AMANDA G A, ONDRA M D, WASSIM T, et al. Sulfate induced heave in Oklahoma soils due to lime stabilization[C]// Characterization, Monitoring, and Modeling of Geosystems, 2008, Geocongress New Orleans.
- [7] MCCARTHY M J, CSETENYI L J, SACHDEVA A, et al. Fly

- ash influences on sulfate heave in lime-stabilised soils[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 2012, **165**(3): 147 - 158.
- [8] 许刚. 硫酸盐环境下水稳基层的病害分析及防治措施[J]. 山西建筑, 2017, **43**(1): 162 - 164. (XU Gang. On disease analysis of moisture base under sulfate environment and its prevention measures[J]. Shanxi Architecture, 2017, **43**(1): 162 - 164. (in Chinese))
- [9] 蒲翠玲. 盐渍化半刚性基层材料强度与变形规律研究[D]. 西安: 长安大学, 2008. (PU Cui-ling. Study on the Intensity and Law Out of Shape of the Semi-Rigid Material Intensity at the Basic Level of Salty Soil[D]. Xi'an: Chang'an University, 2008. (in Chinese))
- [10] 高江平, 蒲翠玲, 赵永祥, 等. 含硫酸盐的半刚性基层材料干缩性能试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2010, **42**(3): 323 - 328. (GAO Jiang-ping, PU Cui-ling, ZHAO Yong-xiang, et al. Experimental study on the dry shrinking performance of the semi-rigid material intensity at the basic level of sulfate salty soil[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Nature Science Edition), 2010, **42**(3): 323 - 328. (in Chinese))
- [11] 沙爱民, 许永明, 刘文锁, 等. 掺有硫酸钠石灰类稳定土的强度与体积变化[J]. 岩土工程学报, 1998, **20**(1): 34 - 38. (SHA Ai-min, XU Yong-ming, LIU Wen-suo, et al. Strength and volume change of lime-stabilized soils with sodium sulphate[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, **20**(1): 34 - 38. (in Chinese))
- [12] 高艳龙, 黄莘, 刘峰. 高含硫粉煤灰对二灰基层膨胀开裂的影响与分析[J]. 重庆交通学院学报, 2005, **24**(5): 53 - 55. (GAO Yan-long, HUANG Xin, LIU Feng. The influence and analyse of fly ash with high sulphur content on expansion cracks of lime-fly ash base[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2005, **24**(5): 53 - 55. (in Chinese))
- [13] 胡江洋, 毛君, 张浩, 等. 环保脱硫型粉煤灰对水泥粉煤灰稳定基层膨胀开裂的破坏机理研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, **13**(1): 69 - 73. (HU Jiang-yang, MAO Jun, ZHANG Hao, et al. Environmental protection desulfurization fly ash on the destruction mechanism of expansion crack on the base of the cement fly-ash stabilized[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2016, **13**(1): 69 - 73. (in Chinese))
- [14] 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. (SONG Liang, WANG Xuan-chang. Salt heaving deformation rule and mechanism of cement stabilized base of saline areas in Xinjiang[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2019, **36**(7): 20 - 28. (in Chinese))
- [15] 尧俊凯, 叶阳升, 王鹏程, 等. 硫酸盐侵蚀水泥改良路基段上拱研究[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(4): 782 - 788. (YAO Jun-kai, YE Yang-sheng, WANG Peng-cheng, et al. Subgrade heave of sulfate attacking on cement-stabilized filler[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(4): 782 - 788. (in Chinese))
- [16] 应赛, 周凤玺, 文桃, 等. 盐渍土冻结过程中的特征温度研究[J]. 岩土工程学报, 2021, **41**(1): 53 - 61. (YING Sai, ZHOU Feng-xi, WEN Tao, et al. Characteristic temperatures of saline soil during freezing[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, **41**(1): 53 - 61. (in Chinese))
- [17] 田林杰. 盐渍土地区水泥基材抗硫酸盐侵蚀宏观性能及微观结构研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2017. (TIAN Lin-jie. Study on Macroscopic Properties and Microstructure of Cement-Based Materials of Sulfate Corrosion Resistance in Saline Soil Area[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2017. (in Chinese))
- [18] 孙彬, 王景贤, 周燕, 等. 冻融循环、硫酸盐侵蚀和碱骨料反应的混凝土损伤鉴别方法[J]. 建筑科学, 2011, **27**(增刊 1): 29 - 36. (SUN Bin, WANG Jing-xian, ZHOU Yan, et al. Identification method for damages due to freeze-thaw sulfate attack and alkali-aggregate reaction[J]. Building Science, 2011, **27**(S1): 29 - 36. (in Chinese))
- [19] 殷强. 混凝土碱—骨料反应检测方法和碱活性的预防措施[D]. 成都: 西南交通大学, 2006. (YIN Qiang. The Testing Method and Suppressing Measure of Alkali Aggregate Reaction[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006. (in Chinese))
- [20] MEHTA P Kumar. Sulfate attack on concrete separating myths from reality[J]. Concrete International, 2000, **22**(8): 57 - 59.
- [21] 公路路面基层施工技术细则: JTG F20—2015[S]. 2015. (Technical Guidelines for Construction of Highway Roadbases: JTG F20—2015[S]. 2015. (in Chinese))