

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2017.04.004

盐渍土地区道面混凝土盐冻侵蚀研究

谢宇晨¹, 翁兴中¹, 张俊¹, 万希存², 高倩³

(1. 空军工程大学 航空航天工程学院, 陕西 西安 710038; 2. 空军北京设计室, 北京 100022;
3. 江苏海事职业技术学院, 江苏 南京 210000)

摘要: 为了研究盐渍土地区道面混凝土的盐冻侵蚀规律, 对盐渍土地区机场道面典型的破坏状况进行了调查。发现典型破坏形态有强度损失、表面剥蚀、黑斑等, 其原因是面层混凝土受到了盐的侵蚀。为了研究其破坏机理, 在此基础上进行了盐冻试验。结果表明: 在相同冻融循环次数作用下, 随着硫酸盐浓度的提高, 混凝土的强度和动弹模量下降速度加快; 在相同硫酸盐浓度中, 随着冻融循环次数增加, 混凝土的破坏程度加深, 冻融100次时, 混凝土弯拉强度下降值和动弹模量下降值分别达到55%和60%, 发生严重破坏; 提高混凝土强度对道面混凝土耐盐冻作用改善不明显。因此不建议采用提高混凝土强度等高成本措施来实现混凝土道面板盐冻侵蚀防治, 根据相关工程经验提出了设置隔断层的方法, 以便于工程应用。

关键词: 道路工程; 混凝土道面; 盐冻试验; 混凝土盐冻侵蚀; 盐渍土

中图分类号: U416.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2017)04-0025-07

Study on Salt-frost Erosion of Pavement Concrete in Salty Soil Area

XIE Yu-chen¹, WENG Xing-zhong¹, ZHANG Jun¹, WAN Xi-cun², GAO Qian³

(1. School of Aeronautical and Astronautical Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an Shaanxi 710038, China;
2. Air Force Design Institute of Beijing, Beijing 100022, China; 3. Jiangsu Maritime Institute, Nanjing Jiangsu 210000, China)

Abstract: In order to explore the salt-frost erosion rule of pavement concrete in salty soil area, an investigation on the typical damage conditions of airport pavement in salty soil area is carried out. It shows that the typical failure characteristics include strength reduction, concrete surface erosion, blackspot and so on. The reason is that the concrete pavement has been eroded by salt. A salt freezing experiment is carried out to figure out the mechanism of its failure. The result shows that (1) Under the same number of freezing-thawing cycles, with the increase of sulfate concentration, the decrease speeds of concrete strength and dynamic elastic modulus are accelerated. (2) The breakage degree of concrete is deepened with the increase of number of freezing-thawing cycles in the same sulfate concentration. When the number of freezing-thawing cycles is 100, the decrease values of concrete flexural-tensile strength and dynamic elastic modulus reach 55% and 60% respectively, and heavy damage happens. (3) Salt tolerance and freezing tolerance of concrete are not improved obviously by increasing concrete strength. Therefore, high-cost measures like increase of concrete strength are not suggested to realize salt and frozen erosion control for concrete pavement slabs. The method of setting up the partition layer is put forward according to relevant engineering experience, which is convenient for engineering application.

Key words: road engineering; concrete pavement; salt freezing experiment; concrete salt-frost erosion; salty soil

收稿日期: 2016-05-17

作者简介: 谢宇晨(1994-), 男, 陕西咸阳人, 硕士研究生. (kgdxye@163.com)

0 引言

西北地区是我国盐渍土分布最广泛的地区,大量的盐渍土对机场道面的耐久性有很大的影响,容易造成道面板鼓胀、断板、错台、混凝土侵蚀等破坏。其中盐冻侵蚀是造成道面板面层破坏的主要原因。西北地区昼夜温差大、相对湿度低、低温持续时间长,导致混凝土长期处于干湿交替和冻融循环作用之下,加速了道面板面层混凝土的破坏^[1]。在机场道面方面,张俊等^[2]研究了道面各结构层的损坏机理和盐渍土的膨胀特性^[3];温小平等研究了道面基层的抗硫酸盐侵蚀性能。在混凝土材料方面,张云清等^[4-11]研究了盐冻条件下混凝土结构表面的损伤规律和混凝土的破坏、劣化机理。这些研究多集中于单种盐对混凝土的侵蚀,对多种盐各自产生的破坏没有进行系统分析。在防盐冻的措施方面,主要是通过提高混凝土强度等级和添加外加剂等^[12],但该方法成本较高,效果欠佳。调查发现,机场道面混凝土由于盐冻而发生破坏的现象比较普遍^[13-14],因此需要针对道面混凝土在盐冻条件下的特性展开进一步研究。

本文从道面面层混凝土的损坏特征入手,通过现场调查取样对损坏形态进行分析,再针对引起面层破坏的因素——氯盐和硫酸盐,分别进行两种盐溶液侵蚀混凝土的冻融循环试验,分别对硫酸盐引起的混凝土破坏和氯盐引起的黑斑、脱落等现象的原因和机理进行详细研究,同时对比不同强度等级混凝土的耐盐冻性能,改变通过提高混凝土强度等级防盐冻的思路,并从全新的角度提出防盐冻措施,即通过设置隔断层等方法减少混凝土面层的侵蚀破坏。

1 道面混凝土盐冻破坏特征

通过对西北盐渍土地区机场的实地调查和分析,发现机场道面的破坏形态主要有鼓胀、断板、错台、裂缝、表面剥蚀、表面裂缝、黑斑等。由于盐胀引起的鼓胀、挤胀、错台等破坏在以前的研究中多有涉及,在此主要侧重于盐冻引起的道面混凝土破坏。盐渍土地区的机场水泥混凝土道面板,一方面受到盐渍土中的硫酸盐在道面板底部对混凝土的侵蚀;另一方面也受到冬季除冰盐在冻融循环作用下的剥蚀等破坏。此外,盐渍土地区的粗骨料中含有的可溶盐会使混凝土道面混凝土产生黑斑。

道面混凝土的主要破坏形态主要有以下3种。

(1) 混凝土强度损失

水泥石的复杂形成过程导致混凝土内部不可避免地存在着微裂纹和缺陷,这种结构性质对混凝土的变形破坏等力学特性有很大程度的影响。与基层接触的道面板底层混凝土长期处于盐冻作用之下,会造成混凝土表层砂浆脱落,进而腐蚀混凝土内部的水泥石,造成结构松散、部分骨料脱落,不同程度地破坏混凝土材料的微细观结构,造成混凝土强度下降和结构破坏,致使混凝土弱化,影响混凝土的耐久性,破坏严重时还会导致混凝土板厚度减小,加之在荷载的作用下混凝土劣化速度加剧,使混凝土板极易发生开裂等破坏。

(2) 混凝土表层剥蚀

道面混凝土表层产生明显的剥蚀破坏如图1所示,开始破坏时,混凝土表面出现直径为2~3 mm的小片剥落。随着时间延长,剥落量和剥落面积增大,使集料暴露,一经剥蚀,破坏的速率会不断加快,长此以往会对飞机起降安全造成不利影响。

(3) 混凝土表层黑斑

机场道面混凝土表层产生1~3 cm黑斑,且伴有白色结晶物析出,如图2所示。同时会导致道面产生细小的裂缝、孔洞、局部混凝土表面剥落等现象。对混凝土松散颗粒取样融水进行分析,溶液中 Na^+ 和 Cl^- 含量较高,初步断定盐的主要成分为NaCl。

以上由盐冻引起的破坏都在不同程度上影响了道面混凝土的耐久性,并给飞机的起降造成了影响,因此应对道面防盐冻特性展开进一步试验研究,探究道面盐冻机理及对混凝土的影响规律。



图1 混凝土表层剥蚀

Fig. 1 Concrete surface denudation

2 原材料及试验方法

2.1 原材料及试件制备

水泥为新疆和静水泥厂生产的42.5(R)普通硅酸盐水泥,其主要性能指标见表1。



图2 混凝土表层黑斑

Fig. 2 Concrete surface blackspot

表1 试验用 42.5 (R) 水泥主要性能指标

Tab. 1 Main performance indexes of 42.5 (R) cement for experiment

水泥性能指标	密度/ (g · cm ⁻³)	标准稠度/%	安定性	细度 (80 μm)/%	凝结时间/ min	抗压强度/ MPa	抗折强度/ MPa
					初凝 终凝	3 d 28 d	3 d 28 d
实测值	3.12	26	合格	0.9	210 380	24.7 49.5	4.6 8.9

细集料采用玉龙喀什河Ⅱ区中砂,级配合格,细度模数2.7。粗集料采用卵石破碎石,5~20 mm和20~40 mm两种级配。

根据《军用机场场道工程施工及验收规范》(GJB 1112A—2004),道面混凝土配合比设计要求为:抗弯拉强度等级5 MPa,和易性要求维勃稠度15~20 s;耐久性要求为:水灰比(水胶比)一般不大于0.46,水泥用量不小于300 kg/m³。本次试验的混凝土配合比设计见表2。

表2 混凝土配合比

Tab. 2 Mix proportion of concrete

材料	水泥	用水量	砂	卵石破碎石	
				5~20 mm	20~40 mm
含量/(g · cm ⁻³)	320	147	627	538	789

将混凝土进行机械搅拌,在振动台上振捣成型100 mm × 100 mm × 400 mm 小梁试件,24 h后拆模,放入标准养护箱中养护28 d。

2.2 试验方法

为对比混凝土在不同盐溶液浓度侵蚀下的性能,根据《混凝土结构耐久性设计与施工指南》(CCES01—2004)对混凝土的腐蚀程度的分级规定,分别采用硫酸根浓度为200, 800, 6 000, 50 000 mg/L的侵蚀溶液模拟轻微、中等、严重、非常严重几种侵蚀程度,并设立纯净水作为对照组。将养护28 d后的试件放入溶液中进行侵蚀,溶液体积40 000 L,侵蚀时间12 h,侵蚀温度设为(20 ± 3) °C。侵蚀后

取出放入冻融循环试验机,按照《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》(JTG E30—2005)中的水泥混凝土抗冻性试验方法(快冻法)进行混凝土冻融循环试验。试件中心温度控制在(-17 ± 1) °C,冻结时间6 h,冻结后的试件再次放入溶液中进行侵蚀,18 h为1个冻融循环周期。部分试件只放入水和硫酸钠溶液中进行侵蚀(硫酸钠溶液浓度分别为200, 800, 6 000, 50 000 mg/L),不做冻融循环,以便对比分析。在达到预定的侵蚀和冻融次数(0, 25, 50, 75, 100, 125, 200次)后,取出试件,拭干表面,计算质量损失率和相对动弹模量值,进行混凝土抗弯拉强度试验。

为探究提高强度等级对混凝土耐盐冻性能的作用,使用52.5(R)普通硅酸盐水泥进行盐溶液侵蚀和冻融试验,控制硫酸盐溶液浓度为50 000 mg/L,最大循环次数为100次,测定抗弯拉强度,与前者进行对比。

混凝土试件的相对动弹性模量计算式为:

$$P_n = \frac{f_n^2}{f_0^2} \times 100\%, \quad (1)$$

式中, P_n 为 n 次冻融循环后的件相对动弹性模量,以3个试件的平均值计算; f_n^2 为 n 次冻融循环后试件的横向基频; f_0^2 为试件冻融循环前测得的试件横向基频初始值。

混凝土试件冻融后的质量损失率按下式计算:

$$\Delta W_n = \frac{G_0 - G_n}{G_0} \times 100\%, \quad (2)$$

式中, W_n 为 n 次冻融循环后的试件质量损失率,以3个试件的平均值计算; G_0 为冻融循环试验前的试件质量; G_n 为 n 次冻融循环后试件质量。

为探究道面黑斑的成因,确定其破坏机理,采用工程所用砂、石、水泥按工程配合比配制混凝土,在混凝土中埋置少量盐黏结岩石(盐成分主要为NaCl),另外用砂、水泥拌制砂浆,在砂浆中埋置少量盐黏结岩石,制成试件,1组静置用于观察,1组放入质量分数为5%的NaCl溶液中进行单面冻融循环试验,用以模拟冬季除冰盐及附着于道面表层的氯盐对道面混凝土的破坏作用,冻融完成后静置一段时间,观察破坏现象。

3 试验结果及分析

3.1 混凝土硫酸盐侵蚀冻融试验

为了对比分析,将自然养护28 d后的4组试件单独浸泡在不同浓度的硫酸钠溶液中,经过85 d后,

测试各组试件的抗弯拉强度。在不同硫酸盐浓度和冻融循环次数情况下,试件抗弯拉强度下降值如图3所示。

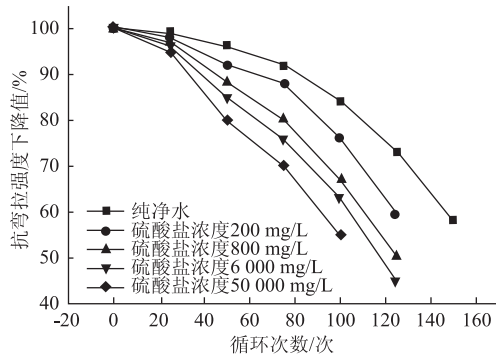


图3 混凝土弯拉强度下降值随硫酸盐浓度和冻融循环次数变化规律

Fig. 3 Decrease values of concrete flexural-tensile strength varying with sulfate concentration and freeze-thaw cycles

从图3可以看出,与纯净水浸泡情况下相比,混凝土受硫酸盐腐蚀情况下的强度下降比较明显;在相同次数的冻融循环作用下,不同硫酸盐浓度对混凝土的腐蚀效应不同,随着硫酸盐浓度的增加,混凝土的抗弯拉强度下降速率越快,在硫酸盐浓度为50 000 mg/L,循环100次时,抗弯强度下降至未经盐冻情况下的55%,说明盐溶液浓度对混凝土抗弯拉强度影响相当明显;在相同硫酸盐浓度的情况下,当循环次数较少时,混凝土抗弯拉强度下降值变化不明显,随着冻融循环次数的增加,混凝土的抗弯拉强度不断降低。

测试各组试件的相对动弹性模量。在不同硫酸盐浓度和不同冻融循环次数情况下,试件的相对动弹性模量下降值如图4所示。

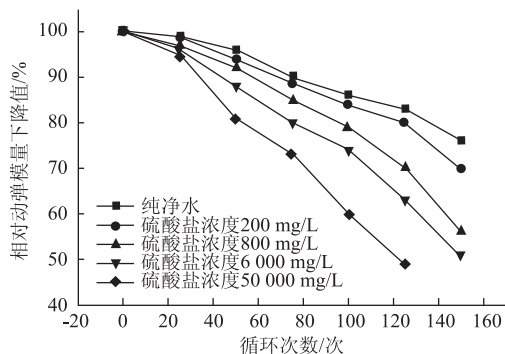


图4 相对动弹性模量下降值随硫酸盐浓度和冻融循环次数变化规律

Fig. 4 Decrease values of relative dynamic modulus varying with sulfate concentration and freeze-thaw cycles

从图4可以看出,与弯拉强度下降值的变化规律类似,不同浓度的硫酸钠溶液对混凝土相对动弹性模量的影响程度不同,不同循环次数也对其有不同的影响效果,且硫酸钠对混凝土相对动弹性模量的影响与其浓度成正比。

在质量损失方面,冻融初始阶段混凝土基本没有质量损失,表面无剥落现象。随着冻融次数的增加,混凝土表面发生剥落现象,剥落面积及深度不断增大,质量损失逐渐增加。质量损失随循环次数增加的变化状况如图5所示。

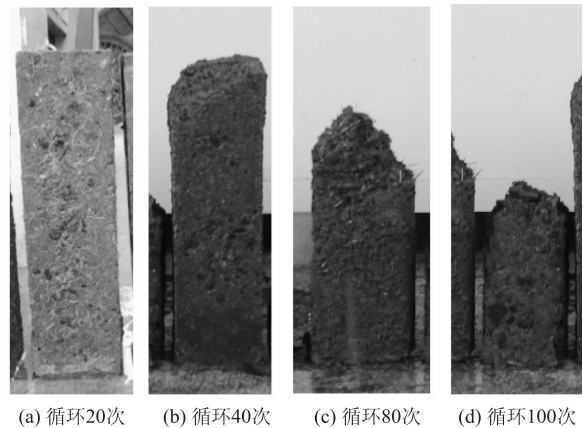
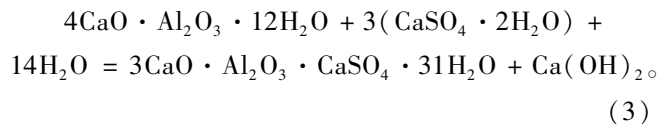


图5 质量损失状况

Fig. 5 Mass loss status

对于硫酸盐的腐蚀,其实质是膨胀性化学腐蚀。硫酸盐与水泥石中的氢氧化钙发生作用生成硫酸钙,硫酸钙与水泥石中的固态水化铝酸钙作用生成比原来体积大1.5倍以上的三硫型水化硫铝酸钙(钙矾石),化学反应式为:



钙矾石导致体积膨胀,使已硬化的水泥石内部产生很大的内应力。当膨胀内应力超过混凝土抗拉强度时引起混凝土破坏,首先是混凝土表面开裂软化,裂缝又促使含有硫酸盐和其他离子的侵蚀性水渗透,进一步加剧混凝土破坏,同时也影响到水泥水化物的黏结性能,最终影响到其强度。

根据美国学者 T. C. Powerse 提出的膨胀压和渗透压理论^[15]可知,吸水饱和的混凝土在其冻融过程中遭受的破坏应力主要由两部分组成。其一,当混凝土中的毛细孔水在某负温下发生物态变化,由水转变成冰,体积膨胀9%,在孔周围的微观结构中产生拉应力;其二,当毛细孔水结成冰时,由凝胶孔

中过冷水在混凝土微观结构中的迁移和重分布引起渗管压。凝胶孔水形成冰核的温度在 -78°C 以下, 因而由冰与过冷水的饱和蒸气压差和过冷水之间的盐分浓度差引起水分迁移而形成渗透压。另外, 凝胶不断增大, 形成更大膨胀压力, 当混凝土受冻时, 这两种压力会损伤混凝土的内部微观结构, 只有当经过反复多次冻融循环后, 损伤逐步积累、不断扩大, 发展成互相连通的裂缝, 使混凝土的强度逐步降低, 最后完全丧失。

由于混凝土形成过程的特殊性, 其内部存在的初始内部微孔隙和微裂纹等缺陷在硫酸盐和冻融双重作用下, 加剧了混凝土内部这些缺陷的弱化作用。这是因为经过反复冻融循环以后, 混凝土内部损伤逐步积累不断扩大, 发展成互相连通的裂缝, 而此时硫酸盐溶液的侵蚀致使这些裂缝不断损伤和扩展, 由于硫酸盐腐蚀和冻融循环二者的共同作用, 加速了混凝土的弱化和强度损失。

3.2 高强度混凝土盐冻性能对比试验

测试 52.5(R) 普通硅酸盐水泥成型试件经硫酸盐侵蚀和冻融后的抗弯拉强度, 并与普通混凝土试验结果进行对比, 结果如图 6 所示。

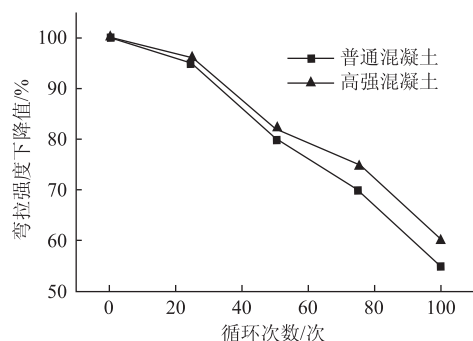


图 6 不同强度混凝土弯拉强度下降值

Fig. 6 Decrease of flexural tensile strengths of concrete with different strengths

从图 6 可知, 普通混凝土与高强混凝土在 $50\,000\text{ mg/L}$ 硫酸盐溶液中侵蚀冻融作用下的弯拉强度下降值变化规律类似, 相同循环次数下的弯拉强度有较小的提高幅度, 总体上比较接近, 在冻融循环 100 次时, 高强混凝土弯拉强度下降值达到 60%, 接近普通混凝土的 55%。因此, 提高混凝土强度对增强盐冻性能的作用不明显。

3.3 氯盐侵蚀冻融试验

将成型试件在实验室静置两天后, 混凝土试件和砂浆试件都出现了类似道面混凝土的黑斑, 黑斑位置对应于埋置盐粘结岩石的位置, 如图 7、图 8 所

示。由此可以确定混凝土道面黑斑是由盐粘结岩石溶解生成 NaCl 进入砂浆层引起的。

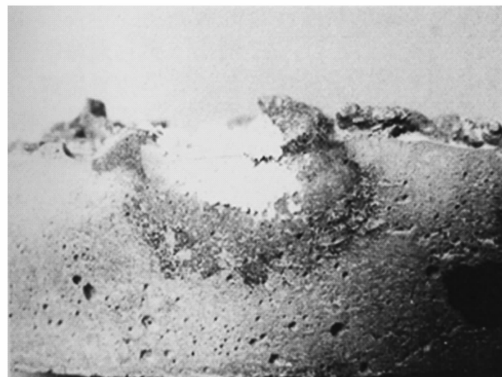


图 7 混凝土试件

Fig. 7 Concrete specimen

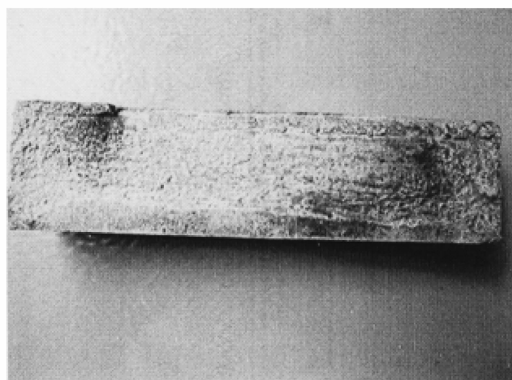


图 8 砂浆试件

Fig. 8 Mortar specimen

经过 5% NaCl 溶液侵蚀冻融循环 100 次, 试件表面出现孔洞, 有局部混凝土表层脱落现象, 如图 9 所示。

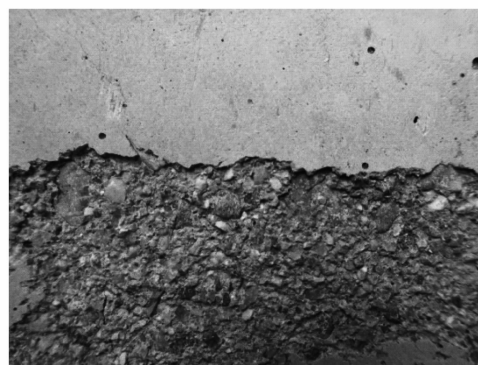


图 9 NaCl 溶液中冻融循环 100 次状态

Fig. 9 State of 100 freeze-thaw cycles in NaCl solution

混凝土本身不与 NaCl 发生化学反应导致破坏, 而在 NaCl 溶液中进行冻融循环的混凝土, 一方面受

到温度不断变化的影响,导致表面出现开裂剥落现象;另一方面,渗入混凝土中的盐在静置过程中水分蒸发,发生结晶现象,产生结晶压力,容易在混凝土薄弱处发生应力集中现象,导致混凝土表面出现孔洞剥落等缺陷,长此以往,混凝土会发生更程度的破坏。分析试验结果可以确定,盐渍土地区混凝土道面板的破坏主要由硫酸盐、氯盐侵蚀冻融引起,其中硫酸盐主要作用于面层与基层接触面,随着时间的推移,混凝土的破坏程度逐渐变大;氯盐进入道面的途径主要是冬季道面除冰和风沙携带,在与冻融循环的耦合作用下使混凝土产生剥落和孔洞,对道面的正常使用也有较大程度的影响。

4 防盐冻建议及隔断层设置

西北盐渍土地区昼夜温差大、低温时间长,决定了机场道面板混凝土长期受盐腐蚀和冻融循环的共同作用,容易产生破坏。为此,针对混凝土道面板防盐冻腐蚀提出如下建议:(1)可通过设置隔断层阻断硫酸盐上升,以限制土基中的硫酸盐通过毛细作用上升到道面板底部;(2)控制垫层和基层中盐的含量,最好采用非盐渍土作为垫层和基层,以减少硫酸盐与混凝土道面底部的接触机会;(3)从道面结构方面着手,尽可能减少硫酸盐上升到道面板底部的可能性,使道面板免受硫酸盐的侵蚀;(4)对于氯盐腐蚀,在控制好骨料含盐量和限制盐与混凝土的接触等方面,应采取相应措施(如用纯净水浸泡骨料、掺加引气剂等)来减少引起的破坏。

现有的防盐冻措施多采用提高混凝土强度等级、掺加外加剂等方法实现,但根据以上试验结果及工程实践经验,这些措施不能有效地减弱混凝土的盐冻破坏且成本较高。设置隔断层是一种可有效减少盐冻破坏的措施。盐渍土地区降水量小、蒸发量大,由毛细作用引起的水分上升要远大于降水引起的水分下渗,盐分随着水分上升到道面板底部积聚,对混凝土产生破坏作用。为了阻止盐分的迁移,必须阻断水分的迁移。隔断层就是通过阻断水分的上升通道,达到减少盐分侵入的手段。

对隔断层材料的选择,根据毛细作用原理可知,颗粒组成的孔隙越大,毛细上升高度就越小。粉质土的吸水性强,含盐时会导致土体膨胀,毛细作用强烈,细粒土和砂类土粒径较小,孔隙小,也会产生较强的毛细作用,都不宜作为隔断层材料。对含不同类型和粒径土的毛细上升高度的试验结果表明,5 mm 以下粒径土对毛细管水的上升高度有显著影

响,减少 5 mm 粒径土的含量可有效解决水分的毛细上升,故选用卵石和砂砾石作为隔断层。该材料孔隙大,5 mm 以下粒径土比例小,可以有效减少毛细水上升。在对施工现场的卵石和砂砾石进行多次筛分后,得到其平均级配范围,如表 3 和表 4 所示。为便于取材和施工,按此级配设置隔断层,类似工程也可采用该级配范围进行施工。

表 3 卵石颗粒级配

Tab. 3 Gradation of cobble stone granules							
筛孔尺寸/mm	40	50	60	80	100	200	300
筛余量/%	95 ~ 100	—	75 ~ 100	—	—	0 ~ 50	0 ~ 5

表 4 砂砾石颗粒级配

Tab. 4 Gradation of gravel granules										
筛孔尺寸/ mm	60	50	40	30	20	10	5	2	0.5	0.075
通过质量 百分比/%	100	90 ~ 100	85 ~ 95	—	60 ~ 80	40 ~ 65	27 ~ 50	15 ~ 35	10 ~ 24	4 ~ 10

隔断层的设置可以有效减少土基中盐分的上升,达到隔离盐的效果。此外,还应严格控制基层和垫层的盐分含量,减少盐和混凝土面层的接触机会,达到防盐冻破坏的目的。

5 结论

(1) 西北盐渍土地区机场混凝土道面板面层长期受到盐的侵蚀和冻融循环作用,产生诸多复杂破坏。混凝土的强度损失、质量损失主要由面层底部硫酸盐与水泥石发生反应膨胀、盐侵蚀和冻融的共同作用造成;表面剥蚀孔洞等由温度变化冲击、盐在混凝土浅层结晶膨胀造成;黑斑是由 NaCl 进入混凝土砂浆层造成。

(2) 硫酸盐和冻融循环作用对混凝土的影响表现为:低浓度硫酸盐和冻融循环次数对混凝土强度、动弹模量及质量损失影响较小;随着硫酸盐浓度和冻融循环次数的增加,混凝土在两种因素共同作用下的破坏程度逐渐加剧,在最大浓度溶液中混凝土弯拉强度下降值达到 55%。

(3) 提高混凝土强度对于改善耐盐冻侵蚀性能的作用不明显,而且会增加生产成本。实践证明:设置卵石和砂砾石作为隔断层可以有效阻断盐分上升,减少盐渍土环境中道面板硫酸盐冻融侵蚀破坏;对于氯盐引起的盐冻破坏,应该严格控制材料中的含盐量,达到减少剥蚀等破坏的目的。

参考文献:

References:

- [1] 翁兴中,蔡良才. 机场道面设计 [M]. 北京:人民交通出版社,2007.
WENG Xing-zhong, CAI Liang-cai. Airport Pavement Design [M]. Beijing: China Communications Press, 2007.
- [2] 张俊,翁兴中,刘军忠,等. 和田地区道面损坏机理与盐渍土工程特性研究 [J]. 中外公路,2014,10(5): 54-57.
ZHANG Jun, WENG Xing-zhong, LIU Jun-zhong, et al. Study on Pavement Damage Mechanism and Engineering Characteristics of Saline Soil in Hetian Area [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2014, 10(5): 54-57.
- [3] 温小平,翁兴中,张俊,等. 道面基层抗硫酸盐侵蚀性能及防范措施 [J]. 公路交通科技,2015,32(9): 36-40.
WEN Xiao-ping, WENG Xing-zhong, ZHANG Jun, et al. Characteristics of Sulfate Corrosion Resistance of Pavement Base and Precaution Measures [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32(9): 36-40.
- [4] 张云清,余红发,王甲春. 盐冻条件下混凝土结构表面的损伤规律研究 [J]. 中国公路学报,2009,22(4): 57-63.
ZHANG Yun-qing, YU Hong-fa, WANG Jia-chun. Study of Surface Damage Rule of Concrete Structure Exposed to Salt Freezing Condition [J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(4): 57-63.
- [5] 郑晓宁,刁波,孙洋,等. 混合侵蚀与冻融循环作用下混凝土力学性能劣化机理研究 [J]. 建筑结构学报,2010,31(2): 111-116.
ZHENG Xiao-ning, DIAO Bo, SUN Yang, et al. Study of Deterioration Mechanism of Concrete in Multi-aggressive and Freeze-thaw Environment [J]. Journal of Building Structure, 2010, 31(2): 111-116.
- [6] 王小生,章洪庆,薛明,等. 盐渍土地区道路病害与防治 [J]. 同济大学学报:自然科学版,2003,31(10): 1178-1182.
WANG Xiao-sheng, ZHANG Hong-qing, XUE Ming, et al. Road Disease and Treatment in Saline Soil Area [J]. Journal of Tongji University: Natural Science Edition, 2003, 31(10): 1178-1182.
- [7] 洪锦祥,缪昌文,黄卫,等. 冻融损伤对混凝土疲劳性能的影响 [J]. 土木工程学报,2012,45(6): 83-88.
HONG Jin-xiang, MIAO Chang-wen, HUANG Wei, et al. Influence of Freeze-thaw Damage on the Fatigue Life of Concrete [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(6): 83-88.
- [8] 任旭晨,万小梅,赵铁军. 混凝土冻融及盐冻劣化机理研究进展及模型综述 [J]. 混凝土,2012(9): 15-18.
REN Xu-chen, WAN Xiao-mei, ZHAO Tie-jun. Review of Mechanism and Mathematical Model for Salt Scaling and Freezing-thawing Damage of Concrete [J]. Concrete, 2012(9): 15-18.
- [9] 季辉,杨全兵. 含盐环境中混凝土的破坏研究 [J]. 公路交通科技,2011,28(11): 39-42.
JI Hui, YANG Quan-bing. Deterioration of Concrete Exposed to Salt Environment [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28(11): 39-42.
- [10] TULLIANI J M, MONTANARO L, ALFREDO N, et al. Sulfate Attack of Concrete Building Foundations Induced by Sewage Waters [J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32(6): 843-849.
- [11] MONTEIRO P J M, KURTIS K E. Time to Failure for Concrete Exposed to Severe Sulfate Attack [J]. Cement and Concrete Research, 2003, 33(7): 987-993.
- [12] 赵霄龙,卫军,巴恒静. 高性能混凝土在盐溶液中的抗冻性 [J]. 建筑材料学报,2004,7(1): 85-88.
ZHAO Xiao-long, WEI Jun, BA Heng-jing. Frost Resistance of High Performance Concrete in Salt Solution [J]. Journal of Building Materials, 2004, 7(1): 85-88.
- [13] 齐勇,翁兴中,杨鑫,等. 氯盐对水泥混凝土道面的损害及防治 [J]. 四川建筑科学研究,2009,35(2): 202-204.
QI Yong, WENG Xing-zhong, YANG Xin, et al. The Damage of Chloride to Cement Concrete Pavement and the Method of Prevention [J]. Sichuan Building Science, 2009, 35(2): 202-204.
- [14] 杨全兵. 盐及融雪剂种类对混凝土剥蚀破坏影响的研究 [J]. 建筑材料学报,2006,9(4): 464-467.
YANG Quan-bing. Effects of Salt and Snow-thawing Agent Types on Salt-scaling Damage of Concrete [J]. Journal of Building Materials, 2006, 9(4): 464-467.
- [15] POWERS T C. Void Spacing as a Basis for Producing Air-entrained Concrete [J]. Portland Cement Assoc R & D Lab Bull, 1954, 50(9): 741-760.