

文章编号:1005-0523(2016)05-0001-06

# 除冰液对机场道面混凝土的破坏机理研究

刘文博<sup>1</sup>,袁捷<sup>2</sup>,杨全兵<sup>3</sup>

(1.上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海 200092; 2.同济大学道路与交通工程教育部重点实验室,上海 201804;  
3.同济大学先进土木工程材料教育部重点实验室,上海 201804)

**摘要:**针对我国机场水泥混凝土道面盐冻破坏现象,采用混凝土单面浸入冻融循环试验,对混凝土在不同浓度醋酸钾除冰液下的剥落量进行统计,得出在中低浓度醋酸钾溶液中混凝土发生的盐冻破坏最严重。通过对醋酸钾溶液结冰特性和混凝土吸入溶液量测定得出,醋酸钾溶液浓度越高,混凝土吸入的溶液量越大,吸入速率越快,但同时也降低了溶液的结冰体积膨胀率,增加了冰冻所需要的时间。混凝土溶液吸入量、吸入速率和溶液结冰体积膨胀率这几个因素共同导致中低浓度的溶液发生最严重的盐冻破坏。

**关键词:**机场道面混凝土;盐冻破坏;醋酸钾除冰液;剥落量;机理分析

中图分类号:U416.216;V351.11

文献标志码:A

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2016.05.001

我国北方冬季常有雨雪天气,各大城市的最低月平均气温都低于0℃,在这种环境条件下机场道面会出现积雪结冰现象。我国机场为了保证机场的正常运行,需要喷洒机场道面除冰液用于除去跑道、滑行道和停机坪上的霜、雪和薄冰,便于扫雪车的清扫,其主要成分都是醋酸盐、甲酸盐<sup>[1]</sup>。

然而喷洒除冰液后也会对道面会产生一些问题,除冰液会渗入混凝土或积留在混凝土表面,由于天气原因会发生反复的冻融,对混凝土造成不同程度的盐冻破坏,其典型破坏现象为:水泥混凝土表面砂浆剥落脱皮,骨料暴露,形成麻面,造成道面平整度降低,影响飞机起飞降落及滑跑时稳定性和舒适性<sup>[2]</sup>。若不及时修补会造成更严重的水泥混凝土开裂,产生结构性的破坏。由于机场的特殊性,对道面上的FOD(在机场运作区域内任何可能对飞机或机场系统造成损伤的某种外来物质)有严格的要求<sup>[3]</sup>。盐冻破坏剥落的骨料会对飞机轮胎造成损伤产生安全隐患,卡在机械装置中影响航空器正常运行,被飞机发动机吸入造成发动机的损坏,严重的会造成机毁人亡的惨案<sup>[4]</sup>。因此需要对除冰液盐冻破坏进行系统的研究。

本文通过室内试验,研究醋酸钾除冰液对混凝土盐冻破坏,并对其破坏机理进行分析研究,对解决机场道面水泥混凝土盐冻破坏的问题,提高机场道面的使用寿命,保证飞行安全有着重要的意义。

## 1 试验材料及方法

### 1.1 试验原材料

本次试验水泥采用52.5普通硅酸盐水泥,碎石采用4~12mm、12~26.5mm两级配,细集料采用中粗砂,水灰比采用0.45,配合比如表1所示。

表1 配合比  
Tab.1 Mix proportion

原料	水泥	水	砂	碎石
单位用量/(kg·m <sup>-3</sup> )	370	166.5	666	1 295

收稿日期:2016-04-07

基金项目:国家自然科学基金项目(51278364);民航局重大专项课题(MHRD20130109)

作者简介:刘文博(1990—),男,硕士研究生,主要研究方向为道路与机场工程。

通讯作者:袁捷(1971—),男,副教授,博士,博士生导师,主要研究方向为道路与机场工程。

## 1.2 除冰液

根据调查,选取北京首都、上海浦东和虹桥国际机场所使用的 NW-056A 型机场道面除冰防冰液,主要成分是 50% 浓度醋酸钾水溶液,外观呈无色透明澄清液, pH 为 10.1<sup>[5]</sup>, 试验时分别配制醋酸钾浓度为 2%, 4%, 8%, 12%, 24% 的溶液。

## 1.3 冻融循环试验方法

制作尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm 的试件,成型静置 24 h 后脱模。放入标准养护室养护 28 d,盐冻循环试验前 7 d 放入 20 °C 水中进行水养护。28 d 抗折强度为 6.94 MPa;抗压强度为 56.12 MPa。

国内外进行混凝土盐冻试验方法很多,根据试件与溶液的接触方式总结起来有主要分为 3 类:混凝土试件完全浸泡在溶液中进行冻融试验;试件单面浸没溶液 4~6 mm 后进行冻融试验;试件表面覆盖 4~6 mm 的溶液进行冻融试验<sup>[6]</sup>。

评价盐冻破坏程度的参数也有很多,主要也分为 3 类:质量损失;抗折抗压强度损失;动弹模量损失。虽然在循环过程中这 3 个参数都会发生不同程度的增大,但强度和相对动弹模量是反应试件整体结构的参数,盐冻破坏更多的是造成混凝土试件表面的剥蚀,对其内部结构并没有造成太大的影响,而且盐冻破坏会造成试件表面凹凸不平,使参数测定增加了更多不可控制的因素,所以采用单位面积剥落量(试件剥落物质量, kg/试件与溶液接触的面积, m<sup>2</sup>)作为混凝土抗盐冻性能的评价指标,更加准确直观地反应盐冻破坏程度。

根据机场道面的实际状况混凝土道面是单面与除冰液接触的,并结合冻融循环仪器的使用方法,所以采用单面浸入快速冻融的方法如图 1 所示。采用 TDRF 快冻慢冻两用混凝土冻融箱,混凝土浸泡深度约为 5 mm,每个冻融循环为 6 h,融化时间为 3 h,冻结时间为 3 h,试件及溶液从室温降至 -20 °C 所用试件不得大于 2 h,从 -20 °C 升至室温所用时间不得大于 1.5 h,每隔 5 次循环对剥落物进行采集烘干及称重;采用单位面积剥落量作为混凝土抗盐冻性能的评价指标。一个试验周期为冻融循环 30 次。

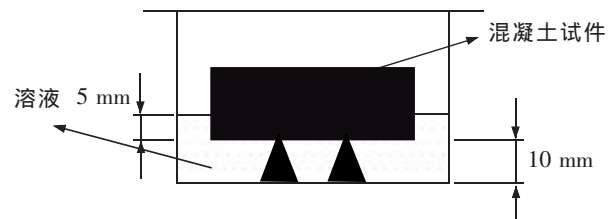


图 1 混凝土单面浸入方式

Fig.1 Single side immersion method of concrete

## 2 试验结果与分析

### 2.1 冻融循环试验结果

对混凝土在纯水和浓度为 2%, 4%, 8%, 12%, 24% 的醋酸钾溶液中冻融循环中的单位剥蚀量进行统计计算结果如图 2 所示。

试验结果表明,混凝土在 2%, 4%, 8%, 12%, 24% 浓度下的醋酸钾溶液随着冻融次数的增加,都会发生不同程度的剥落,说明发生了不同程度的盐冻破坏,其中 2%, 4%, 8%, 12% 浓度的醋酸钾溶液较为明显,呈明显的上升趋势;而在水溶液中,混凝土基本没有剥落,冻融破坏在循环次数内并没有发生。由此可以得到溶液中只要有醋酸钾盐的存在,混凝土就会出现不同程度的盐冻破坏。

试件在醋酸钾 4% 浓度溶液下剥落量最大,经过 10 次冻融循环表面就出现许多坑洞及裂纹,且表面浆体出现剥落现象,剥落量为 0.474 kg·m<sup>-2</sup>,基本上是其他浓度剥落量的两倍。冻融循环达到

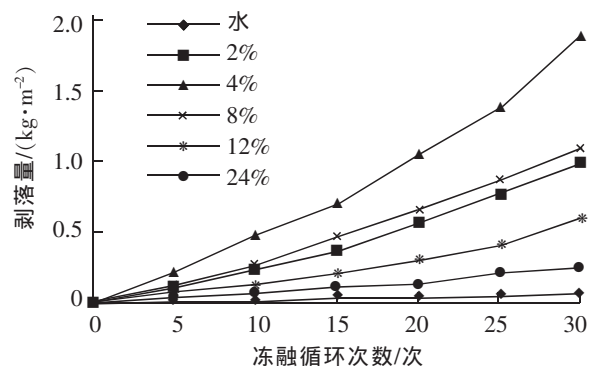


图 2 不同浓度醋酸钾溶液冻融循环中的剥落量

Fig.2 The scaled mass in the freeze-thaw cycles of potassium acetate solution at different concentrations

15 次时,表面微裂纹继续增多加深,试件表面剥落加剧,露出粗骨料。循环 20 次时,剥落量已经大于  $1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ,试件表面砂浆层已完全剥落,露出大量骨料,盐冻剥蚀现象十分严重。循环进行 30 次时,剥落量达到  $1.889 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ,表面凹凸不平。

试件在醋酸钾 2% 和 8% 浓度溶液下盐冻破坏较为一致,相对于 4% 浓度破坏较为缓慢,经过 30 次冻融循环,剥落量分别为 4% 浓度的 52.0%, 57.8%。表面也出现较严重的浆体剥落、骨料外露的情况。

试件在醋酸钾 24% 浓度溶液下,剥落现象基本没有,即使经过 30 次冻融循环,剥落量也只有  $0.25 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ,为 4% 浓度的 13%,试件仅边角处发生的较小的剥落。

统计不同浓度醋酸钾溶液下 30 次冻融循环后混凝土的剥落量结果如图 3 所示,可以看到,混凝土的剥落量开始随着盐浓度的增加而迅速增大,之后却迅速降低的现象,在中低溶度时,混凝土的盐冻剥蚀破坏最为严重,醋酸钾溶液的浓度约为 4%,低浓度和高浓度溶液盐冻破坏较小,但还是要比纯水中的冻融破坏要大,接下来对盐冻破坏的机理进行分析。

## 2.2 机理分析

最初, Powers 与 Helmuth 提出的混凝土冻融破坏的静水压假说和渗透压假说较为成功地解释了混凝土冻融破坏的机理<sup>[7-9]</sup>。近年来,杨全兵用结冰压、结冰膨胀率和内部饱水度 3 个参数直观的阐明了盐冻破坏的现象<sup>[10-12]</sup>。综上所述,针对溶液影响混凝土盐冻破坏的原因有: 溶液本身的结冰特性; 混凝土溶液吸水量。这两点共同决定了混凝土盐冻破坏严重程度。

### 2.2.1 除冰液结冰特性

首先测定溶液的结冰膨胀率。选用精度为 0.1 mL 的玻璃管,测定 20 mL 溶液在冷冻过程中的体积变化。为了防止试验期间溶液蒸发对试验结果造成影响,用约 1 mL 油覆盖在溶液上起到保护作用。之后放入  $-20 \text{ }^{\circ}\text{C}$  冰箱中进行冷冻。通过观察溶液冷冻过程中的体积变化,得到不同时间体积变化量  $\Delta V$ ,计算溶液的结冰膨胀率  $E_m$  为

$$E_m = \frac{\Delta V}{20} \times 100\%$$

在溶液冷冻过程中,醋酸钾溶液温度不断降低,试验结果如图 4 所示,无论是水溶液还是盐溶液体积均呈现先减小后增大,当完全结冰时到趋于稳定;结冰初期,在溶液温度降低至冰点之前由于热胀冷缩效应反而出现体积收缩现象,当溶液温度降低到冰点后,溶液开始结冰膨胀,由液体逐渐变为固体,体积开始增大,到溶液完全结冰后,溶液体积不再增大,趋于一个稳定值。

同时可以看出溶液由体积收缩向膨胀转换的时间,也就是结冰膨胀率由负变为正的时间随醋酸钾盐浓度的提高而增长,醋酸钾浓度为 0%, 2%, 4%, 8%, 12% 时,由收缩向膨胀转换的时间约为 10, 15, 20, 25 min 和 30 min。随着醋酸钾溶液浓度的提高,溶液体积膨胀率呈降低趋势,且体积膨胀的速度也在降低,达到体

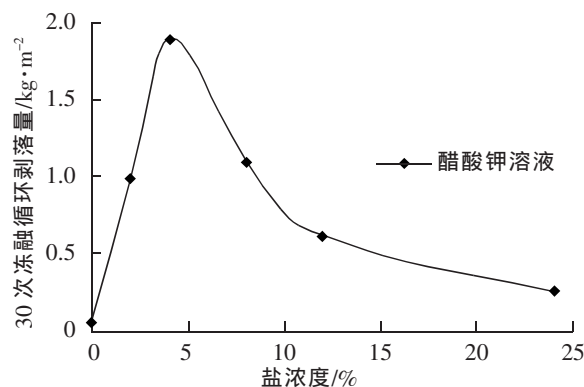


图 3 不同浓度醋酸钾溶液下 30 次冻融循环剥落量  
Fig.3 The scaled mass after 30 freeze-thaw cycles of potassium acetate solution at different concentrations

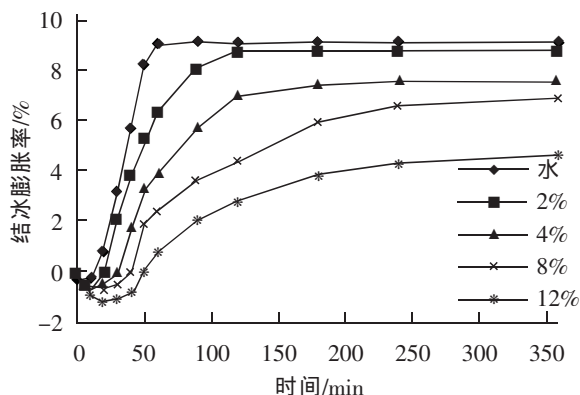


图 4 不同浓度醋酸钾溶液的实测结冰膨胀率  
Fig.4 Freezing expansion rate of potassium acetate solution at different concentrations

积稳定的时间也越长,冰冻的速度越慢,所以在冻融循环试验中溶液冻结后的持续时间会越短,从而造成的盐冻破坏就会越小。造成这种现象是由于醋酸钾溶液浓度越大,冰点越低,结冰需要更低的温度。

除此之外还可以发现随着醋酸钾浓度的升高,溶液的最大结冰膨胀率在逐渐减小,12%浓度溶液的最大结冰率仅为2%浓度溶液的52.3%,这说明溶液盐浓度越大,吸入混凝土内部的溶液冻结时体积膨胀越小,对混凝土造成的破坏越小,从而解释了冻融循环试验中,混凝土在高浓度的盐溶液中剥落量较小,且盐浓度越高对混凝土产生的破坏就越小的现象。

但是水溶液对混凝土的破坏却小于盐溶液,通过溶液的结冰特性并不能得到很好的解释,所以接下来要对混凝土冻融循环中溶液吸入量进行研究。

### 2.2.2 混凝土溶液吸入量

由于混凝土表面和内部都存在大量的肉眼不可见的微裂缝和毛细管通道,当混凝土表面有水或溶液时,都会通过表面的孔隙渗透到混凝土内部,而混凝土发生盐冻破坏的根本原因是其内部会吸入一定量的溶液<sup>[13-14]</sup>,吸入的可冻溶液用混凝土的溶液吸入量进行表征,所以混凝土的溶液吸入量( $W_s=(\text{试件吸入溶液后质量}+\text{试件剥落质量})/\text{试件初始重量}$ )作为一个分析盐冻破坏的重要参数要对其进行讨论。

1) 冻融循环条件下混凝土的溶液吸入量。分别对冻融前和25次冻融后混凝土试件在不同浓度醋酸钾溶液中的溶液吸入量进行测定,结果如表2所示。

表2 25次冻融前后混凝土试件在不同浓度醋酸钾溶液中的溶液吸入量

Tab.2 The amount of concrete solution suction in different concentrations of potassium acetate solution before and after 25 freeze-thaw cycles

醋酸钾溶液浓度/%	12	8	4	2	纯水
溶液吸入量/%	7.15	6.43	5.87	5.27	4.74

通过试验可以看出溶液醋酸钾浓度越高,溶液吸入量越大,试件中吸入的溶液质量越大,浓度12%的溶液吸入量是纯水的1.5倍。溶液在结冰的过程中因为热胀冷缩效应体积会先减小,且根据结冰膨胀率的试验可以得到结冰过程中醋酸钾浓度对溶液最大体积收缩率的影响如图5所示,盐浓度越高,溶液的最大体积收缩率逐渐提高,这主要是因为随着溶液中含盐量的增大,溶液的冰点下降,溶液由水转冰的时间推后,液体状态下的溶液由于温度下降将造成的更大的溶液体积收缩。在这个过程中,混凝土内部溶液体积减小产生的孔隙会产生负压,加快表面溶液吸入混凝土内部的速度,而且盐浓度越高,溶液由水转冰的时间越长,负压越大,从而导致吸入的溶液越多,吸入溶液的速度越快,从而解释了盐溶液造成盐冻破坏的强度和速度都要大于纯水。

2) 常温下混凝土的溶液吸入量。在常温下,溶液只能通过重力和毛细管力从混凝土表面进入内部中,由于混凝土内外的压力相近,混凝土内部孔隙中空气并不容易被挤出,所以混凝土达到平衡的时间很长,分别对常温下混凝土试件在不同浓度醋酸钾溶液中的溶液吸入量进行测定,结果如图6所示。

通过试验可以看出随着时间的推移,混凝土吸入的溶液逐渐增加直至达到平衡,并且混凝土内部溶液吸入量随着醋酸钾浓度的提高而逐渐加大,结合表2可以得到混凝土在不同浓度溶液里的冻融循环吸入溶液量会大于常温下的吸入量,这也同时说明在冻融循环条件下,试件内部的可冻溶液是会发生不断的吸进挤出,且溶液浓度越高,吸入的溶液量越多,对混凝土产生更不利的结果,发生越严重的破坏。

### 2.2.3 化学腐蚀试验

除了上述两个重要影响因素以外,还需要对除冰液对混凝土腐蚀性进行研究,判断混凝土表面浆体剥落是否和除冰液的腐蚀性有关。

制作尺寸为40 mm×40 mm×160 mm的试件。成型静置24 h后脱模,放入标准养护室养护28 d,在水中浸泡7 d后将试件取出,擦干表面水分,称重。再将试件完全浸泡在0%,25%,50%浓度的除冰液180 d后拿

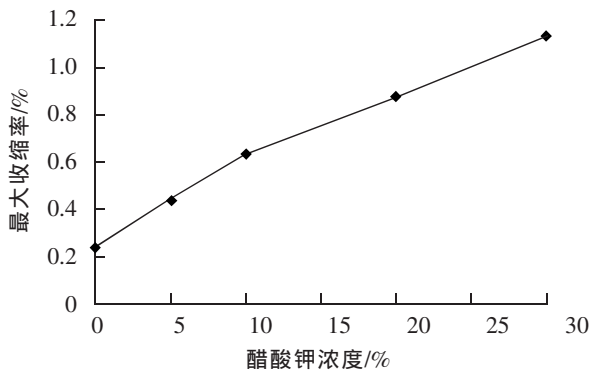


图 5 醋酸钾浓度对溶液最大体积收缩率的影响

Fig.5 Effect of potassium acetate concentration on the maximum volume shrinkage of solution

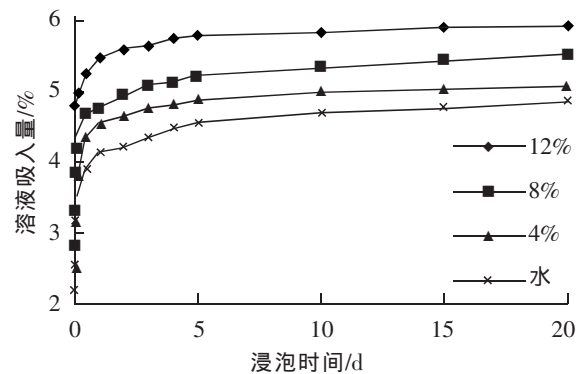


图 6 常温下混凝土试件在不同浓度醋酸钾溶液中的溶液吸入量

Fig.6 The amount of concrete solution suction in different concentrations of potassium acetate solution at ambient temperature

出试件,清除表面剥落物擦干表面水分后对试件称重,测试抗折强度,结果如表 3 所示。

表 3 化学腐蚀试验结果  
Tab.3 Chemical corrosion test results

浸泡溶液浓度/%	试件初始质量/g	浸泡 180 d 后质量/g	质量损失率/%	浸泡 180 d 抗折强度/MPa	强度损失率/%
0	609.1	611.3	-0.36	11.30	-
25	622.6	625.8	-0.51	10.27	9.12
50	612.4	614.1	-0.28	9.96	11.86

经过 180 d 的浸泡后,观察 3 组试件发现差别不大,外观都比较完整,并没有出现表面剥落现象,而且试件质量都有不同程度的增加,这可能是由于试件在水中经过 7 d 的浸泡并没有达到完全饱和的状态,吸入了少量的溶液。浸泡在盐溶液里的试件抗折强度相比于浸泡在水中的试件变化发生了不同程度的降低,浸入 25%,50%浓度溶液试件的抗折强度为浸入水中的 90.88%和 88.14%,但强度依然符合机场混凝土道面标准。所以可以推断,混凝土在盐冻循环试验中出现的表面剥落现象和醋酸盐溶液对混凝土的化学腐蚀性无关,可以不予与考虑。

#### 2.2.4 总结

结合上述三点的讨论,中低浓度的醋酸钾溶液发生最严重的盐冻破坏是因为在这个浓度范围里,溶液结冰膨胀率较大仅低于水溶液,溶液冰冻持续时间较长,混凝土对其也有较大的吸入量,溶液吸入速率也较大;而高浓度的溶液在冻融循环中吸入的溶液最多,吸入溶液的速率最大,但其结冰膨胀率却最小,溶液冰冻持续时间最短,不会对混凝土产生较大的破坏;水溶液结冰膨胀率结冰压虽然最大,但在冻融循环中混凝土吸入的溶液最少,吸入溶液的速度最慢,从而也不会发生较严重的冻融破坏。

### 3 结论

1) 经过冻融循环,混凝土的剥落量呈现随着盐溶液浓度的增加而迅速增大,之后却降低的现象,尤其在中低溶度时,混凝土的盐冻破坏最为严重,这时醋酸钾溶液的浓度约为 4%。

2) 在溶液结冰过程中,随着醋酸钾浓度的增大,吸入混凝土内部的溶液体积膨胀会减小,冻融循环试验中溶液冻结后的持续时间会越短,对混凝土造成的破坏也随之减小。

3) 无论是冻融循环还是常温下,醋酸钾溶液浓度越高,混凝土内部吸入的溶液量越多,对混凝土产生更不利的结果,发生越严重的破坏。

4) 由于盐溶液中醋酸钾的存在,其冰点相比于纯水都会下降,导致结冰膨胀的时间延后,体积收缩更明显,无论溶液中醋酸钾含量是多少,冻融过程中混凝土内部都会产生比水溶液更大的负压,加速溶液的吸入,从而造成的破坏大于纯水。

5) 对混凝土盐冻破坏而言,溶液中醋酸钾的存在提高了混凝土的溶液吸入量和吸入速度,但同时也降低了溶液的结冰膨胀率,增加了冰冻所需时间。所以混凝土溶液吸入量、吸入速率和溶液结冰膨胀率共同导致中低浓度的溶液破坏力最大,造成最严重的盐冻破坏。

#### 参考文献:

- [1] 麻海燕,余红发,白康,等. 机场道面除冰液对高性能混凝土抗冻性的影响[J]. 硅酸盐通报,2011,30(4):860-864+879.
- [2] 陈继超. 除冰剂对机场道面混凝土抗冻性能的影响[D]. 西南科技大学,2014:1-2.
- [3] FAA.AC 150/5220-24. Airport Foreign Object Debris(FOD)Detection Equipment[R],2009:1-13.
- [4] 国家民航总局机场司民航局安全技术中心. FOD 防范手册[R]. 2009:1-4.
- [5] 成都民航六维航化有限责任公司. NW-056A 机场道面除冰/防冰液产品使用说明书[R]. 成都,2016:1-4.
- [6] 贾耀东,谢永江,朱长华. 国外混凝土抗冻性控制要求和试验方法综述[J]. 混凝土,2005(6):24-28.
- [7] POWERS T C,HELMUTH R A. Theory of volume change in hardened Portland cement pastes during freezing [J]. Proceedings of the Highway Research Board,1949(32):285-297.
- [8] POWERS T C. The mechanisms of frost action in concrete(Durability of Concrete, SP-8)[R]. Detroit:ACI,1965:42-47.
- [9] FAGERLUND G. The critical degree of saturation method of assessing the freeze/thaw durability of concrete [J]. Materials and Structures,1977(10):58-65.
- [10] 杨全兵. 混凝土盐冻破坏机理( )——毛细管饱水度和结冰压[J]. 建筑材料学报,2007,10(5):522-527.
- [11] 杨全兵. 混凝土盐冻破坏机理( ):冻融饱水度和结冰压[J]. 建筑材料学报,2012(6):741-746.
- [12] 杨全兵. NaCl 对结冰膨胀率和混凝土溶液吸入量的影响[J]. 建筑材料学报,2007,10(3):266-270.
- [13] 杨全兵. 混凝土盐冻破坏——机理、材料设计与防治措施[D]. 同济大学材料科学与工程学院,2006:37-48.
- [14] 申力涛. 路面混凝土盐冻破坏机理与防治研究[D]. 河北工程大学,2011:10-12.

## Research on Failure Mechanism of Deicing Fluid in Airport Pavement Concrete

Liu Wenbo<sup>1</sup>, Yuan Jie<sup>2</sup>, Yang Quanbing<sup>3</sup>

(1.Shanghai Municipal Engineering Design General Institute(Group) Co.,Ltd.,Shanghai 200092;

2.Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804;

3.Key Laboratory of Advanced Civil Engineering Materials of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** Aiming at the salt freezing damage phenomenon of the airport cement concrete road surface in China, this paper carried out the statistical analysis of the concrete scaling mass of different concentrations potassium acetate deicing fluid by the one side immersion freeze-thaw cycle test. Results showed that the salt freezing damage of concrete in low concentration of potassium acetate solution was the most serious. By exploring of potassium acetate solution freezing behavior and concrete solution absorption, it determined that the higher concentration of potassium acetate, the larger solution of concrete inhaling and the faster the suction rate. It also proved that the lower freezing and expansion rate made the freezing time longer. The most severe salt freezing damage occurred in the low concentration solution due to the concrete solution suction, suction rate and solution freezing expansion rate.

**Key words:** airport pavement concrete; salt freezing damage; potassium acetate deicing fluid; scaled mass; mechanism analysis

(责任编辑 王建华)