

文章编号:1671-8879(2015)03-0053-06

## 硫酸盐渍土定量增湿盐胀特性试验

顾强康<sup>1</sup>, 屈 波<sup>1</sup>, 张仁义<sup>1</sup>, 钟 毅<sup>2</sup>, 刘 静<sup>2</sup>, 刘 露<sup>2</sup>

(1. 空军工程大学 机场建筑工程系, 陕西 西安 710038; 2. 95666 部队, 四川 成都 610041)

**摘 要:**为了分析硫酸盐渍土在定量增湿条件下的盐胀特性,设计制作了定量增湿盐胀试验装置,通过室内试验得到不同含盐量、不同干密度和不同上覆荷载条件下重塑硫酸盐渍土的定量增湿盐胀曲线。研究表明:含盐量越高增湿盐胀变形越大,盐渍土的剧烈盐胀含水量上限在 11%~16%之间;干密度越大增湿盐胀越大,干密度每增加 0.1 g/cm<sup>3</sup>,总盐胀率增加 1.1%~2.9%;上覆荷载越大盐胀越小,在 0~25 kPa 范围内,上覆荷载每增加 10 kPa,土样盐胀率减小约 3.6%,25~50 kPa 的上覆荷载将盐胀率抑制在 2.1%左右。试验结果的综合分析表明:机场换填宜用细颗粒非盐渍土,慎用细颗粒弱盐渍土,建议换填深度取 0.75~2 m;依据土基工作含水量与剧烈盐胀含水量上限的对比,建议将盐渍土土基处理分成 2 类。

**关键词:**道路工程;机场;盐渍土;盐胀;定量增湿;地基处理;换填法

**中图分类号:**U416.166; TU470

**文献标志码:**A

## Salt-heaving characteristics of sulphate saline soil under quantitative humidifying

GU Qiang-kang<sup>1</sup>, QU Bo<sup>1</sup>, ZHANG Ren-yi<sup>1</sup>, ZHONG Yi<sup>2</sup>, LIU Jing<sup>2</sup>, LIU Lu<sup>2</sup>

(1. Department of Airdrome Construction Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, Shaanxi, China; 2. 95666 Troops, Chengdu 610041, Sichuan, China)

**Abstract:** To analyze the characteristics of salt-heaving of sulphate saline soil under quantitative humidifying, an equipment for quantitative humidifying salt-heaving was made. The curves of quantitative humidifying salt expansion under different dry densities, different salt contents, and different loads were gotten. Experimental results indicate that: the salt expansion increases with the increase of the salinity, and the moisture toplimit of severe salt expansion is between 11% and 16%; the salt expansion increases with the increase of dry density, and when dry density increases every 0.1 g/cm<sup>3</sup>, the total salt expansion rate increases 1.1% to 2.9%; the salt expansion decreases with the increase of load, and within the range of 0 to 25 kPa, when the load increases every 10 kPa, the total salt expansion rate decreases 3.6%, but when the load changes from 25 to 50 kPa, the total salt expansion rate is about 2.1%. Comprehensive analysis of experimental results show that: in the replacement of airdrome construction engineering it's appropriate to adopt thin plain soil, and thin grain slight saline soil should be adopted cautiously, and the depth of replacement should be controlled within the range of 0.75 to 2 meter; based on the contrast between the moisture content in work condition and the moisture toplimit of

收稿日期:2014-11-20

基金项目:军队科研项目(BKJ11J)

作者简介:顾强康(1965-),男,浙江宁波人,教授,博士研究生导师,E-mail:gqk65927@163.com。

severe salt expansion, the ground treatment of saline soil should be divided into two types. 7 figs, 11 refs.

**Key words:** road engineering; airport; saline soil; salt-heaving; quantitative humidifying; ground treatment; replacement technique

0 引言

在西北盐渍土地区,盐胀、盐溶和腐蚀是机场面临的主要土基病害,其中以硫酸盐渍土的盐胀对道面的危害最大。乌鲁木齐机场、喀什机场、和田机场和敦煌机场都出现过不同程度的盐渍土病害。与公路路面铺筑在路堤上不同,机场跑道与两侧的土面区几乎没有高差,降雨时无道面覆盖的土面区土基吸收更多的水分,由于土壤的非饱和和特性,土面区土基吸收的过多水分会向机场道面下土基中入渗,同时携带盐分向道面下土基中运动和富集。一旦硫酸盐在道面下土基中富集超过一定程度,水分的入渗便会引发土基的增湿盐胀,导致机场跑道道面错台、不平整甚至结构破坏。

高江平等研究了冻融条件下盐渍土的盐胀特性<sup>[1-4]</sup>;陈炜韬等对冻融后盐渍土的强度进行了试验分析<sup>[5]</sup>;包卫星等对冻融与增湿耦合作用下的盐渍土盐胀特性进行了试验研究<sup>[6-7]</sup>;吴爱红等通过试验研究了重塑盐渍土的增湿盐胀<sup>[8]</sup>。目前关于冻融条件下盐渍土盐胀特性的研究较多,在增湿盐胀特性方面的研究也取得了一些有益的成果,但关于定量增湿条件下盐渍土的盐胀特性研究极少涉及。

针对机场地势的特点,为了研究硫酸盐渍土的定量增湿盐胀特性,本文设计了一套专门的试验装置,通过试验研究了含盐量、干密度和上覆荷载对硫酸盐渍土定量增湿盐胀的影响。并依据对试验结果的分析,讨论了机场盐渍土土基处理相关问题。

1 试验装置简介

定量增湿盐胀试验装置着重解决 2 个问题:其一是定量增湿控制土样含水量;其二是防止水分在土样表面蒸发,以确保增湿量的准确。试验装置示意图如图 1 所示。

试验装置由钢制套筒、上下压头、密封橡胶圈和透明橡胶管这 4 个部分组成。钢制套筒内径为 79.8 mm,高度为 60 mm,壁厚 5 mm。上下压头的直径为 78 mm,高度为 20 mm。O 型密封橡胶圈安装在上下压头中部的槽内。上压头的中部铣 1/4 球窝用于加载。在上压头设置 M8 mm 的进水孔,用于试验时密封固定储水的透明塑料。为了防止盐渍

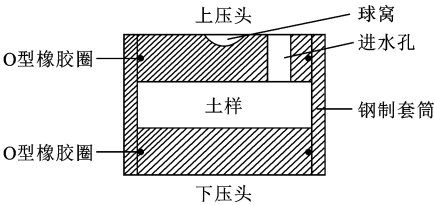


图 1 定量增湿盐胀试验装置  
Fig. 1 Test apparatus of quantitative humidifying salt heaving

土对金属部件的电化学腐蚀(原电池反应),对整套试验装置的金属部件进行电镀锌处理。

土样的高度为 2 cm,截面积为 50 cm<sup>2</sup>,重塑土样在钢制套筒中直接压实成形,原状土样削样后压入套筒中。

2 试验简介

2.1 黄土性质

盐渍土采用素土与硫酸钠粉末拌和的方法制成。试验用素土为西安黄土,按照《公路土工试验规程》(JTJ 051—93)<sup>[9]</sup>测得塑限平均值为 24.6,液限平均值为 32.5,塑性指数定为 7.9,颗粒密度为 2.70 g/cm<sup>3</sup>。重型击实试验结果如图 2 所示,素土的最优含水量为 14.1%,最大干密度为 18.30 g/cm<sup>3</sup>。

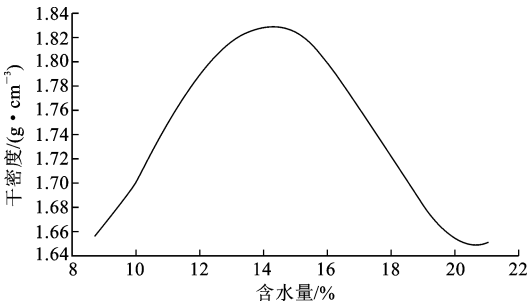


图 2 黄土重型击实试验曲线  
Fig. 2 Experimental curve of heavy compaction test of loess

2.2 试验方案

整个增湿盐胀试验分为 3 组:第 1 组,分析含盐量对定量增湿盐胀的影响,土样干密度分别取 1.40、1.60、1.80 g/cm<sup>3</sup>,含盐量分别为 0、0.5%、1%、2%、4%这 5 个等级;第 2 组,分析干密度对定量增湿盐胀的影响,试验含盐量分别取 0.5%、1%、2%,干密度分别为 1.40、1.50、1.60、1.70 和 1.80 g/cm<sup>3</sup> 这 5 个干密度等级;第 3 组,分析上覆荷载对定量增湿盐胀的

影响,试验干密度为  $1.60\text{ g/cm}^3$ ,含盐量为  $2\%$ ,上覆荷载分别为  $0,12.5,25,50$  和  $100\text{ kPa}$  这 5 个等级。

将素土碾碎过筛后烘干,通过控制素土与硫酸钠粉末的质量比制成不同含盐量的盐渍土,在钢制套筒中压实制成设定的干密度盐渍土土样。试验装置安装好后,在塑料管中每次加入  $2\text{ mL}$  蒸馏水,待水渗入到土样中  $6\text{ h}$  后,认为水分在土样中分布均匀,记录土样变形量并重新加水  $2\text{ mL}$ 。

### 3 试验结果与分析

自行设计制作的增湿试验装置与常规膨胀仪配合,进行无载条件下增湿盐胀试验,结果如图 3、图 4 所示。利用常规压缩仪杠杆系统对增湿试验装置中的盐渍土土样施加荷载,进行不同上覆荷载条件下的增湿盐胀试验,结果如图 5 所示。

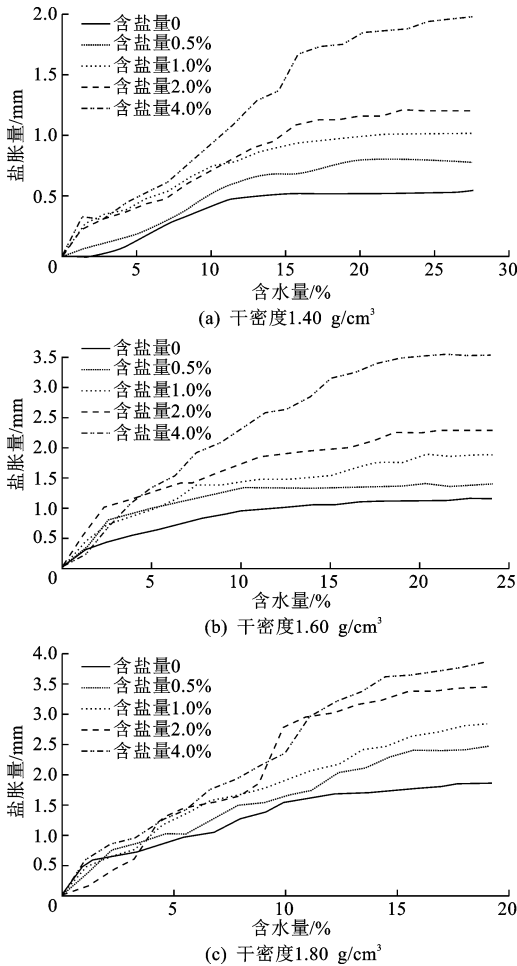


图 3 不同含盐量下盐胀增湿曲线

Fig. 3 Curves of quantitative humidifying salt heaving under different salt contents

#### 3.1 含盐量对定量增湿盐胀特性的影响

图 3(a)表明, $1.40\text{ g/cm}^3$  的素土样增湿初期出

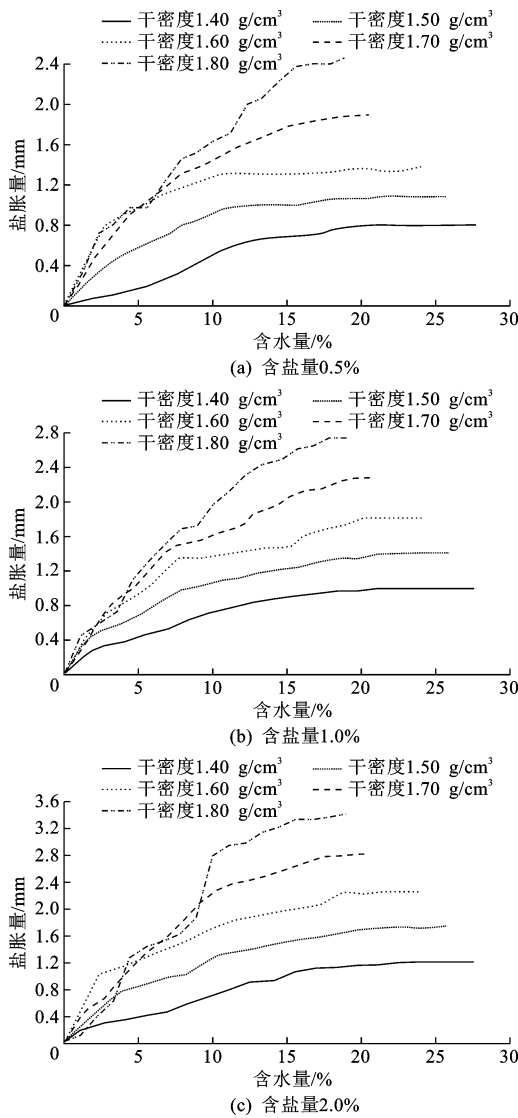


图 4 不同干密度下定量增湿盐胀曲线

Fig. 4 Curves of quantitative humidifying salt heaving under different dry density

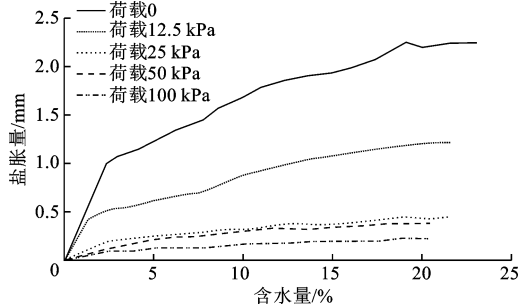


图 5 不同荷载下盐胀定量增湿盐胀曲线

Fig. 5 Curves of quantitative humidifying salt heaving under different loads

现收缩现象,这时由于土样干密度小,增湿初期发生湿化现象。试验表明素土在增湿情况下发生膨胀,分析原因:一是水分子进入矿物晶格层间引起土体

的膨胀;二是土颗粒表面双电层互斥作用引起水在土颗粒周围富集引起土的膨胀。盐渍土的增湿盐胀变形还包含素土的增湿膨胀变形。素土在含水量 0~11% 范围内膨胀增长快。

试验结果表明,随着含盐量增大,土样盐胀量越大。土样含盐量越高,可吸水结晶的硫酸钠越多,盐胀效果越明显。增湿过程中,土颗粒周围的水膜不断增厚使得土颗粒之间的摩擦作用对盐胀的抑制作用不断降低,同时盐分的结晶和土颗粒的吸水引发膨胀。随着含水量的增加,土样盐胀呈现先快速增长后缓慢增长的趋势。将盐胀快速增长阶段对应的含水量区间定义为剧烈盐胀含水量区间,盐胀增长 2 个阶段的分界含水量称为剧烈盐胀含水量上限。由图 3 可知,盐渍土的剧烈盐胀含水量上限在 11%~16% 之间。

部分土样在增湿后期出现了微弱盐溶现象。试验主要是分析盐胀特性,试验后期盐胀基本稳定,而且每增湿 2 mL 土样变形稳定所需时间长,超过 5~7 d,故未继续增湿。干密度  $1.40 \text{ g/cm}^3$  增湿到含水量 27.1%、干密度  $1.60 \text{ g/cm}^3$  增湿到含水量 23.8%、干密度  $1.80 \text{ g/cm}^3$  增湿到含水量 18.9%,试验结果表明,含水量小于 18.9% 时盐渍土的盐溶现象不明显。

### 3.2 干密度对定量增湿盐胀特性的影响

干密度增大对盐胀有 2 个方面的影响:第一,增大盐胀,干密度的增大降低了土体孔隙,同时导致土体颗粒之间的微小孔隙增多,使得硫酸盐的吸水盐胀有更多的着力点;第二,抑制盐胀,干密度增大使得土颗粒结合更为紧密,导致土颗粒之间的相互作用力更大,进而抑制土颗粒之间位置的调整。

从总增湿盐胀的角度来看,相同含盐量的盐渍土,干密度越大,总盐胀量越大,结果表明干密度增加对盐胀的增大作用强于对盐胀的抑制作用。干密度每增加  $0.1 \text{ g/cm}^3$ ,总盐胀率增加 1.1%~2.9%。

### 3.3 上覆荷载对定量增湿盐胀特性的影响

上覆荷载抑制盐胀的方式有 2 种:其一,增加了土颗粒之间的接触应力,通过加强土颗粒之间的摩擦作用抑制盐胀;其二,完全侧限下的土样盐胀使得土颗粒存在一个竖向运动的趋势,上覆荷载通过限制土颗粒竖向运动来抑制盐胀。

试验结果表明,上覆荷载越大,土样的盐胀越小。0 kPa 荷载作用下土样盐胀率为 11.2%,25 kPa 荷载作用下盐胀率下降到 2.3%,在 0~25 kPa 范围内,上覆荷载增幅与盐胀抑制效果呈线性关系,

荷载每增加 10 kPa,盐胀率减少 3.6%。当上覆荷载从 25 kPa 增加到 100 kPa 时,盐胀率仅减少 1.2%,该荷载范围内,上覆荷载增加对土样盐胀抑制的加强作用不明显。

## 4 关于机场盐渍土土基处理的讨论

### 4.1 机场盐渍土土基的换填处理

换填是机场盐渍土土基处理的常用方法。以处理后土基盐胀不危害道面结构为原则,机场盐渍土换填处理需解决 3 方面问题:一是换填层以下土基的盐胀被其上层的自重有效抑制,即确定换填深度;二是换填层不会出现过大的盐胀变形,即确定换填土含盐量标准;三是盐分不会向换填层富集,即设置阻水阻盐隔断层。

#### 4.1.1 换填处理深度

由有载盐胀试验可得干密度  $1.60 \text{ g/cm}^3$  和含盐量 2% 土样在不同上覆荷载作用下的最大盐胀率,如图 6 所示。

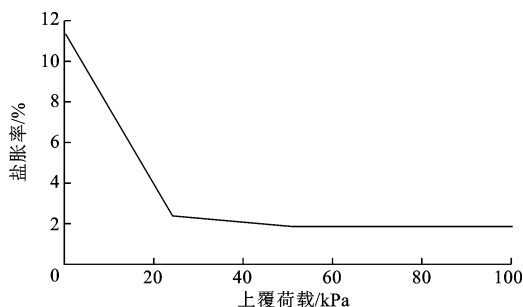


图 6 不同荷载作用下最大盐胀率

Fig. 6 Maximum salt heaving rates under different loads

由图 6 可知,上覆荷载越大对盐胀的抑制效果越强。但过大上覆荷载标准意味着土基换填深度的增加,故机场换填深度确定应兼顾换填层下土基盐胀的抑制效果与工程量。25 kPa 上覆荷载作用下土样的最大盐胀率为 2.3%,50 kPa 作用下土基最大盐胀率为 1.9%,100 kPa 作用下土样的最大盐胀率为 1.1%。考虑道面结构层的自重 10 kPa,土基重度按  $10 \text{ kPa/m}$  计,上覆荷载从 25 kPa 增加到 100 kPa,等效的换填深度从 0.75 m 增加到 4.5 m 时,最大盐胀率仅降低约 1.2%。25~50 kPa 的上覆荷载可将土基盐胀率抑制到 2.1% 左右,大幅增加换填深度才能略微增强对换填层下土基盐胀的抑制效果,故建议机场盐渍土换填深度取为 0.75~2 m,挖方区和场地条件好时取小值,填方区和场地条件不利时取大值。

### 4.1.2 换填料含盐量

目前机场方面对换填料的含盐量控制还没有统一的规定。公路方面文献规定高级和一级公路路基 0~0.8 m 的范围换填非盐渍土<sup>[10-11]</sup>,0.8~1.5 m 可换填粗粒弱硫酸盐渍土,1.5 m 以下可换填中粗粒弱盐渍土和细粒弱盐渍土。

参考公路方面控制含盐量的填料深度,鉴于机场道面对土基不均匀沉降要求严格,取机场道面下 2 m 深度范围土基来讨论换填含盐量的控制问题。道面下 2 m 范围内土基所受的上覆荷载在 10~50 kPa 范围内。图 6 表明,在 25~50 kPa 范围内,土基的盐胀变化不大,约为 2.1%,而在 0~25 kPa 范围内,土基的盐胀率从 11.2%降低到 2.3%。按分层总和法的原理,由图 6 可得道面下 2 m 范围内土基的平均盐胀率约为 3.4%,约为无载盐胀率的 0.3 倍。机场土基的密实度在 90%~98%之间,将干密度 1.60 g/cm<sup>3</sup> 和 1.80 g/cm<sup>3</sup> 盐渍土的无载盐胀率乘以 0.3,估算道面下 2 m 范围内不同含盐量土基的最大盐胀率,结果如图 7 所示。

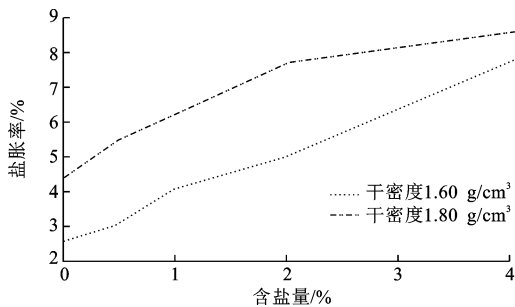


图 7 不同含盐量下最大盐胀率  
Fig. 7 Maximum salt heaving rates under different salt contents

土基不均匀变形超过 4.5‰会导致机场道面板的破坏,机场土基不均匀变形一般控制在 1.5‰以下。由图 7 可知,含盐量 0.5% 土基的盐胀率为素土的 1.20~1.26 倍,含盐量 1% 土基的盐胀率为素土的 1.45~1.62 倍。换填层的含盐量越低,土基的增湿盐胀变形越小,发生过大不均匀变形的可能性越低。鉴于机场对不均匀沉降要求严格,建议机场换填尽量用细颗粒非盐渍土,慎用细颗粒弱中盐渍土。

### 4.1.3 隔断层设置

盐分向换填层土基的迁移和富集需要时间,如果在机场使用寿命内盐分的富集不足以危害道面结构,便不用设置隔断层阻止盐分迁移。但是目前对盐分富集时间的计算理论和方法研究尚不充分,图

7 表明一旦盐分在换填层中富集,土基的增湿盐胀将急剧增加,故盐渍土地区机场应设置隔断层阻止盐分向换填土基的富集,鉴于机场地势的特点,还应重视水平隔断层的设置。

常用的止水隔断有砂砾石隔断和防水土工织物隔断 2 种。砂砾石隔断是在土基中形成局部大孔隙使水分在土基中不能联通,以阻断盐分迁移的路径。防水土工织物隔断是在土基中形成局部致密层,以阻断水分和盐分的迁移。

## 4.2 盐渍土土基处理分类

地下水埋深、降雨和大气蒸发影响土基的工作始含水量(增湿盐胀的起始含水量)。增湿盐胀试验结果表明,土基起始含水量不同,可能发生的增湿盐胀量不同。盐渍土的强烈盐胀含水量上限为 11%~16%,从土基增湿的角度可将盐渍土土基处理分成 2 类:

(1)土基工作含水量小于剧烈盐胀含水量上限

由于土基工作含水量较小,雨水和地表水入渗可能引起道面下土基发生较大增湿盐胀,盐分在道面下土基富集会加剧土基的增湿盐胀病害,故此类情况下盐渍土处理以防止道面下土基盐胀为重点,采用换填后设置隔断层或者物理化学加固的方法处理土基。

(2)土基工作含水量大于剧烈盐胀含水量上限

由于土基工作含水量较大,试验结果表明不同含盐量和干密度盐渍土因增湿引发的盐胀较小。此时土基的含水量高,盐渍土处理应重点防止土基冻胀和融陷,并考虑与冻融耦合的盐胀盐溶作用。

## 5 结 语

(1)为了研究盐渍土的定量增湿盐胀特性,设计制作了定量增湿盐胀装置,测得了不同干密度、不同含盐量和不同上覆荷载条件下盐渍土的定量增湿盐胀曲线。

(2)含盐量越高,盐胀变形越大,盐渍土的剧烈盐胀含水量上限在 11%~16%之间。干密度增加,促进盐胀率增大,干密度每增加 0.1 g/cm<sup>3</sup>,总盐胀率增加 1.1%~2.9%。上覆荷载越大盐胀率越小,在 0~25 kPa 范围内,上覆荷载每增加 10 kPa,土样盐胀率减小 3.6%,25~50 kPa 的上覆荷载能够有效地抑制盐胀。

(3)通过对定量增湿盐胀试验分析,认为机场换填宜用非盐渍土,慎用细颗粒弱盐渍土,建议换填深度取为 0.75~2 m,并且机场应重视水平向和竖向

隔断层的设置。

(4)依据试验结果将盐渍土处理划分为 2 类,当土基工作含水量大于强烈盐胀含水量上限时,盐渍土土基处理以防止土基盐胀为重点;当土基工作含水量小于强烈盐胀含水量上限时,土基处理以防止冻胀冻融—盐胀盐溶耦合为重点。

(5)本文通过室内试验研究了细颗粒硫酸盐渍土的定量增湿盐胀特性,在粗颗粒硫酸盐渍土的定量增湿盐胀特性和盐渍土的室外增湿盐胀特性等方面,还有待更多的研究。

## 参考文献:

## References:

- [1] 高江平,吴家惠.硫酸盐渍土盐胀特性的单因素影响规律研究[J].岩土工程学报,1997,19(1):37-42.  
GAO Jiang-ping, WU Jia-hui. Study on laws of the single factor effect upon heaving properties of the supplant salty soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, 19(1): 37-42. (in Chinese)
- [2] 李世芳.冰冻盐渍土地区公路盐胀和冻胀综合病害[J].筑路机械与施工机械化,2009,26(2):60-63.  
LI Shi-fang. Salt and frost heaving composite diseases of frozen saline soil area[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2009, 26(2): 60-63. (in Chinese)
- [3] 冯忠居,乌延玲,成超,等.板块状盐渍土盐溶和盐胀特性研究[J].岩土工程学报,2010,32(9):1439-1442.  
FENG Zhong-ju, WU Yan-ling, CHENG Chao, et al. Salt-dissolution and salt-heaving characteristics of platelike saline soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(9): 1439-1442. (in Chinese)
- [4] 张莎莎,杨晓华,谢永利,等.路用粗粒盐渍土盐胀特性[J].长安大学学报:自然科学版,2009,29(1):20-25.  
ZHANG Sha-sha, YANG Xiao-hua, XIE Yong-li, et al. Salt-expansion laws of coarse-grained salty soil in road subgrade[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2009, 29(1): 20-25. (in Chinese)
- [5] 陈炜韬.冻融循环对盐渍土黏聚力影响的试验研究

[J].岩土力学,2007,28(11):2343-2347.

CHEN Wei-tao. Testing study on influence of freezing and thawing circulation on saline soil's cohesion[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(11): 2343-2347. (in Chinese)

- [6] 包卫星,杨晓华,谢永利,等.典型天然盐渍土多次冻融循环盐胀试验研究[J].岩土工程学报,2006,28(11):1991-1995.

BAO Wei-xing, YANG Xiao-hua, XIE Yong-li, et al. Research on salt expansion of representative crude saline soil under freezing and thawing cycles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(11): 1991-1995. (in Chinese)

- [7] 包卫星,李志农.喀什地区不同盐渍土冻融变形特性试验[J].长安大学学报:自然科学版,2008,28(3):26-30.

BAO Wei-xing, LI Zhi-nong. Testing on transmutation properties of saline soil under freezing and thawing cycles in kashi[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2008, 28(3): 26-30. (in Chinese)

- [8] 吴爱红,蔡良才,顾强康.硫酸盐渍土机场地基处理换填覆重法研究[J].岩土力学,2010,31(12):3880-3886.  
WU Ai-hong, CAI Liang-cai, GU Qiang-kang. Research on ground treatment of airport with sulphate saline soil by heavy cover replacement technique[J]. Rock and Soil Mechanics 2010, 31(12): 3880-3886. (in Chinese)

- [9] JTJ 051—93,公路土工试验规程[S].  
JTJ 051—93, Test methods of soils for highway engineering[S]. (in Chinese)

- [10] 冯忠居.特殊地区基础工程[M].北京:人民交通出版社,2008.

FENG Zhong-ju. Foundation engineering in special areas[M]. Beijing: China Communications Press, 2008. (in Chinese)

- [11] 新疆公路学会.盐渍土地区公路设计与施工指南[M].北京:人民交通出版社,2006.

Xinjiang Highway & Transportation Society. Technical guidelines for highway design and construction in the saline soil regions[M]. Beijing: China Communications Press, 2006. (in Chinese)