

文章编号:1671-8879(2009)01-0020-06

## 路用粗粒盐渍土盐胀特性

张莎莎<sup>1</sup>, 杨晓华<sup>1</sup>, 谢永利<sup>1</sup>, 戴志仁<sup>2</sup>

(1. 长安大学公路学院, 陕西西安 710064; 2. 同济大学土木工程学院, 上海 200092)

**摘要:**为了研究粗粒盐渍土在不同条件下的盐胀特性及其作为路基填料的适用性,采用均匀设计法组织试验,在不同含水量、含盐量(质量分数)、温度及上覆荷载条件下,进行了粗粒盐渍土盐胀特性的试验研究。试验结果表明:影响粗粒盐渍土盐胀变形特性的主要控制因素是含盐量和含水量;随着含盐量和含水量的增加,粗粒盐渍土盐胀量不断增大;上覆荷载对粗粒盐渍土的盐胀有很强的抑制作用;在降温过程中,粗粒盐渍土有可能出现体缩现象;粗粒盐渍土起胀含盐量约为 0.2%,起胀温度区间为 5℃~0℃,盐胀剧变温度区间为 0℃~-5℃。

**关键词:**道路工程;粗颗粒盐渍土;均匀设计;盐胀

**中图分类号:**U416.166 **文献标志码:**A

### Salt-expansion laws of coarse-grained salty soil in road subgrade

ZHANG Sha-sha<sup>1</sup>, YANG Xiao-hua<sup>1</sup>, XIE Yong-li<sup>1</sup>, DAI Zhi-ren<sup>2</sup>

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;

2. School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** In order to research characteristics of salt-expansion and the applicability of coarse-grained salty soil in road subgrade, the salt-expansion experiment for coarse-grained salty soil was carried out by uniform design under different conditions of water content, salt content, temperature and pressure. The results show that: the main factors of influencing deformation properties of coarse-grained salty soil are water content and salt content; the amount of salt-expansion is increased gradually with the increasing of water content and salt content; the cover load has strong inhibitory effect on salt-expansion; the coarse-grained salty soil may produce soil shrinkage in cooling process; the salt content of starting salt-expansion is 0.2%; the temperature range of starting salt-expansion is from 5℃ to 0℃; the sensitive temperature range of salt-expansion is from 0℃ to -5℃. 7 tabs, 10 figs, 7 refs.

**Key words:** road engineering; coarse-grained salty soil; uniform design; salt-expansion

## 0 引言

盐渍土地区公路病害主要有盐胀、翻浆、溶陷和腐蚀等类型。高含盐量(质量分数)地区,特别是在

高地下水位地区,盐分能降低路面强度、减弱封层作用,从而导致路面破坏。迄今为止,通过对盐渍土盐胀的研究,人们对细粒硫酸盐渍土的性质已有较全面地认识,并逐步形成了较为完善的盐渍土盐胀理

收稿日期:2008-02-20

基金项目:国家西部交通建设科技项目(2003 318 797 50)

作者简介:张莎莎(1982-),女,山西运城人,工学博士研究生,E-mail:zss\_lx@126.com.

论<sup>[1-2]</sup>,但是对粗颗粒盐渍土的研究甚少。中国西北大部分地区有广阔的粗颗粒盐渍土,高等级公路在粗颗粒盐渍土地区的迅猛发展,使得粗颗粒盐渍土的工程特性、路基填料的可用性及分类评判标准等问题随之出现。为此,本文对粗颗粒盐渍土的盐胀理论和减小盐渍土病害进行了探讨,做了进一步的实践积累和理论研究。

## 1 试验方案设计及试样基本工程性质

### 1.1 试验方案设计

根据文献[3]的规定,砂类土因其中的细粒含量(质量分数)不同,可分为砂、含细粒土砂和细粒土质砂 3 种。本文分别取含细粒土质量分数的极限值为 15%和 50%,分别研究含细粒土砂及细粒土质砂的盐胀特性,并对细粒土不同含量造成的不同盐胀起胀趋势进行分析。

试验安排采用均匀设计法,分别配制含细粒土砂及细粒土质砂素土后,再添加纯净的化学分析纯硫酸钠盐分,配制制成不同含盐量(质量分数)水平的砂类硫酸盐渍土。试验因素含盐量分为 12 个水平,质量分数依据文献[3],以砂类土中的粒径小于 1 mm 的细粒填土为百分基数。上覆荷载共分 6 个水平,主要依据文献[4],最大荷载为 50.24 kPa,初始干密度的最大值为最大干密度的 97%,含水量(质量分数)依据最佳含水量划分为 4 个水平。具体试验如表 1、表 2 所示;试验装置如图 1 所示。采用不同荷载压力单次降温盐胀试验,单次降温过程为(土体顶端温度/土体底端温度)25 °C/25 °C→5 °C/5 °C→0 °C/5 °C→-5 °C/0 °C→-10 °C/0 °C→-15 °C/-5 °C→-20 °C/-5 °C,每单次降温过程持续 12 h,共历时 84 h。为了使试样的边界条件与自然条件相似,在试样筒周围包裹保温材料,防止试样与周围环境的热交换,使土样在降温时同一水平面上的温度保持一致<sup>[5-6]</sup>。将已养生 24 h 的料在 25 °C 条件下成型,分 8 次均匀装入高 32 cm、内径 10 cm 的有机玻璃筒中,单向击实到所需干密度,制成大尺寸模型试样,然后在 24 h 后进行盐胀试验。

### 1.2 试样基本工程性质

土样采自连云港—霍尔果斯国道主干线嘉峪关—安西段一级公路沿线的某取料场的天然粗颗粒盐渍土。将这些天然粗颗粒盐渍土均匀拌和,用土壤筛筛出粒径为  $d$  ( $2\text{ mm} \geq d > 0.074\text{ mm}$ ) 的粗颗粒土,并将筛出的土进行洗盐处理,经多次自来水和 3 次蒸馏水的洗盐烘干,减小其他盐分对结果的不确

表 1 含细粒土砂试验方案

水平编号	因素			
	含盐量/ %	上覆荷载/ kPa	初始干密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	含水量/ %
1	0.3	18.98	1.88	12
2	0.6	27.36	1.96	12
3	0.9	40.94	2.05	12
4	1.2	50.24	1.88	10
5	1.5	8.74	1.96	10
6	1.8	27.36	2.05	10
7	2.1	33.87	1.84	8
8	2.4	50.24	1.92	8
9	2.7	8.74	2.00	8
10	3.0	18.98	1.84	6
11	3.3	33.87	1.92	6
12	3.6	40.94	2.00	6

均匀度偏差  $D=0.2954$

表 2 细粒土质砂试验方案

水平编号	因素			
	含盐量/ %	上覆荷载/ kPa	初始干密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	含水量/ %
1	0.3	18.98	1.96	13
2	0.6	27.36	2.04	13
3	0.9	40.94	2.13	13
4	1.2	50.24	1.96	11
5	1.5	8.74	2.04	11
6	1.8	27.36	2.13	11
7	2.1	33.87	1.91	9
8	2.4	50.24	2.00	9
9	2.7	8.74	2.09	9
10	3.0	18.98	1.91	7
11	3.3	33.87	2.00	7
12	3.6	40.94	2.09	7

均匀度偏差  $D=0.2954$

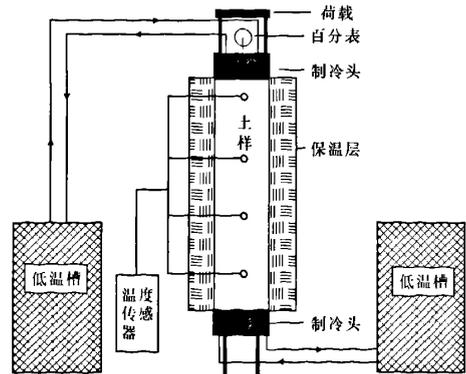


图 1 试验装置

定性;然后在室温条件下添加天然黄土作为细粒填料,分别制成含细粒土砂和细粒土质砂。配好素土

后,根据文献[3],采用重型标准击实,得到含细粒土砂和细粒土质砂素土的最大干密度及最佳含水量分别为:2.11 g/cm<sup>3</sup>、9.6%;2.198 g/cm<sup>3</sup>、10.3%<sup>[7]</sup>。其他基本参数见表3~表5。

表3 黄土基本参数

含水量/ %	天然密度/ (kN·m <sup>-3</sup> )	干密度/ (kN·m <sup>-3</sup> )	孔隙 比	液限/ %	塑限/ %	塑性 指数
15.65	19.7	16.89	0.574	29.0	17.51	11.49

表4 黄土细集料的化学成分(质量分数) %

CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	含盐量
0.75	3.29	1.70	0	0.55	0.54	7.10

表5 天然粗颗粒盐渍土筛分结果

粒径/mm	40~20	20~10	10~5	5~2	2~1	1.0~0.5	0.50~0.25	0.250~0.074	<0.074
通过率/%	2.63	10.49	13.33	13.22	6.91	12.59	17.38	18.23	5.22

表6 含细粒土砂盐渍土盐胀结果

水平编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
盐胀量/mm	0.498	0.839	0.492	0.712	0.921	2.478	0.880	0.492	0.931	1.226	1.525	1.099

小,初始干密度较大,含水量最接近最佳含水量。盐胀量最小值分别出现在第3、第8水平处,两者有不同的含盐量、初始干密度及含水量,但是最终盐胀量较小。其主要特点为上覆荷载压力都较大,分别为40.94 kPa和50.24 kPa。当含盐量超过3.0%时,无论其他条件如何,盐胀量都超过1 mm。

单次降温条件下第1、第3水平盐胀过程曲线如图2、图3所示。

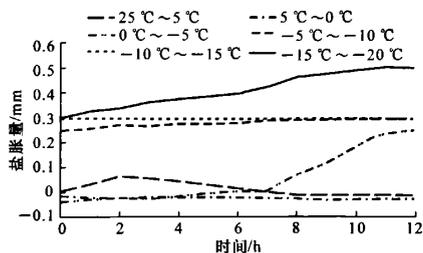


图2 含细粒土砂第1水平的盐胀过程曲线

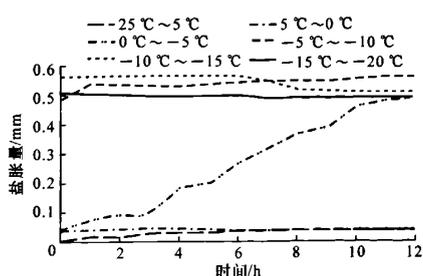


图3 含细粒土砂第3水平的盐胀过程曲线

第1水平盐胀过程曲线在25℃~5℃降温区间初期盐胀量逐渐增长,2 h后盐胀量开始减小。因为该水平盐渍土孔隙率较大,初始盐结晶体一部

## 2 试验结果及分析

### 2.1 含细粒土砂盐渍土盐胀结果及分析

含细粒土砂盐渍土在单次降温条件下的盐胀试验结果见表6。由表6可以看出,随着含盐量的增加,在上覆荷载压力较小、含水量较大的条件下,盐胀量持续增长。但是随着上覆荷载压力的增加及含水率的减小,含盐量的促进作用却有所降低。

对试验结果分析可知,盐胀量最大值出现在第6水平,此水平含盐量并非最大,上覆荷载压力比较

分被孔隙吸收,一部分结晶盐胀破坏了土体结构,促使土体在自重及上覆荷载压力作用下下陷。随着温度逐渐降低和时间的增长,在经历了一些降温区间盐晶体的积累后,土体更深部分及其他大量硫酸钠盐开始盐胀结晶,以填充孔隙,继而使盐胀量持续增长。第3水平盐胀过程曲线在起初两个降温区间里盐胀量增长非常缓慢,由于上覆荷载压力增大,盐渍土体主要处于荷载压力和盐胀力双重作用下;在0℃~-5℃降温区间盐胀结晶活跃,盐胀力大于荷载压力,盐胀量增长迅速,几乎完成了总盐胀量的70%;其后几个降温区间内盐结晶基本完成,盐胀量增长非常缓慢,处于基本平稳状态。

单次降温条件下第6水平盐胀过程曲线见图4。

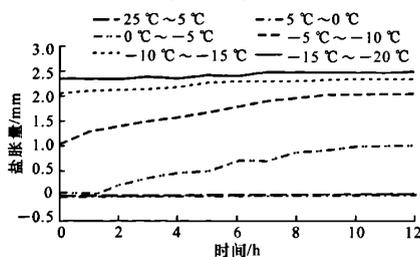


图4 含细粒土砂第6水平的盐胀过程曲线

在上覆荷载压力和盐胀力双重作用下,第6水平盐渍土盐胀过程曲线在前两个降温区间里基本没有变化,芒硝晶体大量填充于土体孔隙中,盐胀量增长非常缓慢;在0℃~-10℃的降温区间盐胀量增长迅速,完成了盐胀量的95%,这个区间是该盐渍土的盐胀活跃温度;在最后两个降温区间里,盐胀量增长缓慢,基本平稳。

单次降温条件下第 8、第 12 水平盐胀过程曲线如图 5、图 6 所示。

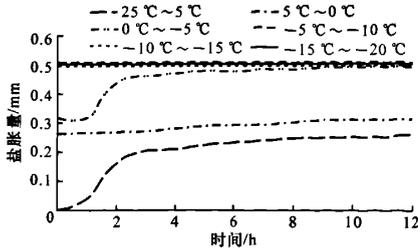


图 5 含细粒土砂第 8 水平的盐胀过程曲线

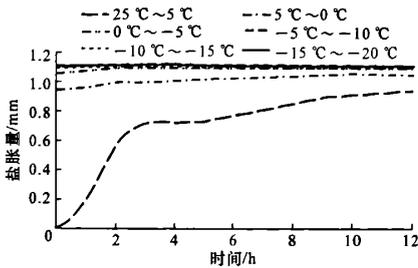


图 6 含细粒土砂第 12 水平的盐胀过程曲线

第 8 水平盐胀过程曲线在 25℃~5℃、0℃~-5℃降温区间盐胀量增长迅速,基本完成了总盐胀量的 90%以上;在-10℃~-20℃降温过程中并未发生盐胀。第 12 水平盐胀过程曲线在 25℃~

5℃的降温区间盐胀量增长达到总盐胀量的 80%以上,以后的降温过程中基本未发生盐胀。这两个水平虽然都有较大的上覆荷载压力,但是由于含盐量都较大,盐渍土中硫酸钠吸水结晶产生的盐胀力大于荷载压力,都表现出了较强的盐胀量增长趋势。但由于含水量都较小,在降温中期,硫酸钠结晶所需水分补给不足,所以盐胀量增长基本稳定。

### 2.2 细粒土质砂盐渍土盐胀结果及分析

细粒土质砂盐渍土在单次降温条件下的盐胀试验结果见表 7。

由表 7 可看出,随着含盐量的增加,在上覆荷载较小、含水量较大的条件下,盐胀量持续增加。但随着上覆荷载压力的增加及含水量的减小,含盐量的促进作用有所降低。

对试验结果分析可知,盐胀量最大值出现在第 5 水平,与其他水平相比,主要特点是上覆荷载压力小,初始干密度为最大干密度的 93%,含水量接近最佳含水量,含盐量处于中等水平。盐胀量最小值出现在第 7 水平,其主要特点是含水量较小,初始干密度仅为最大干密度的 87%,盐渍土体的孔隙度很大,盐结晶时,大部分填充于土体孔隙中,盐胀表现不明显。

表 7 细粒土质砂盐渍土盐胀结果

水平编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
盐胀量/mm	0.666	0.667	1.266	0.967	1.308	1.255	0.272	0.575	0.786	0.785	0.870	0.556

细粒土质砂单次降温条件下第 1、第 5 水平盐胀过程曲线如图 7、图 8 所示。

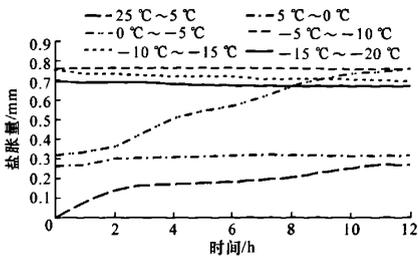


图 7 细粒土质砂第 1 水平的盐胀过程曲线

第 1 水平中并未出现像含细粒土砂在前两个降温区间盐胀增长缓慢的情况。主要是因为细粒土质砂的细粒土含量增大,孔隙度相对减小,芒硝晶体促使土的体积增长。盐胀量增长主要区间是 0℃~-5℃,此区间盐胀量基本完成了总盐胀量的 90%以上;最后两个降温区间内,盐胀量不再增长,而是盐渍土体开始下陷。主要原因是在前 3 个降温区间盐胀量增长很大,基本完成了所有硫酸钠的吸水结

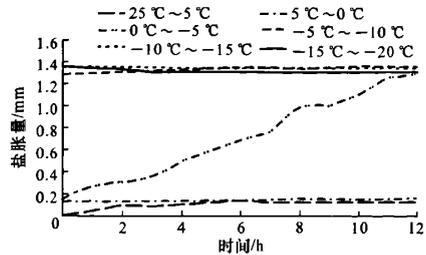


图 8 细粒土质砂第 5 水平的盐胀过程曲线

晶;并且盐胀结晶破坏了原有土体结构,而土体初始压实度也比较小,盐胀结晶不再继续,在上覆荷载压力下,土体开始下陷。第 5 水平盐渍土在前两个降温区间内盐胀量增长缓慢,盐胀量主要增长区间为 0℃~-5℃,基本完成了总盐胀量的 95%,其后的降温区间盐胀基本停滞,最后盐胀土体稍有下陷。

细粒土质砂单次降温条件下第 8、第 11 水平盐胀过程曲线如图 9、图 10(见下页)所示。

细粒土质砂第 8、第 11 水平盐胀过程曲线在 25℃~5℃的降温区间盐胀量增长都很大,为总盐胀

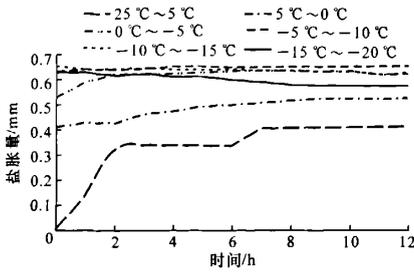


图9 细粒土质砂第8水平的盐胀过程曲线

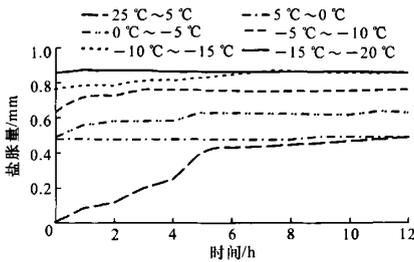


图10 细粒土质砂第11水平的盐胀过程曲线

量的50%以上,以后的盐胀量增长比较缓慢。在上覆荷载压力较大的情况下,含盐量增大时,盐渍土结晶产生的盐胀力较大,而含水量都比较小;在第1个降温区间内硫酸钠吸水结晶就消耗了大部分土体中的结合水,在以后的降温区间内结合水分很小,补充硫酸钠结晶所需要的水分不足,所以盐胀量很小。

### 3 细粒土不同含量对盐胀量的影响

粗颗粒硫酸盐渍土,尤其是砂石类盐渍土,常呈现架空的点接触或胶结接触,具有不稳定的结构性,其孔隙度大。这类土体在温度降低的过程中,硫酸钠盐开始吸水结晶,产生盐胀。结晶盐一部分填充于土体中的孔隙,即结晶盐被孔隙吸收;一部分结晶盐则破坏了土体的结构,使结构具有不稳定性。在温度逐渐降低的过程中,粗颗粒硫酸盐渍土盐胀发展缓慢,部分土体甚至会在某一降温区间内发生土体体积缩减现象,即体缩现象。

从细粒土不同含量来看,细粒含量占到土总质量的50%时,细粒土质砂盐胀过程中的体缩现象主要出现在最后两个降温区间;细粒土含量仅占土总质量的15%时,含细粒土砂盐胀过程中的体缩现象发生在前两个降温区间及最后一个降温区间;并且细粒土含量越少越容易发生体缩。

当初始干密度较大时,盐渍土起胀温度都比较低。如含细粒土砂第3~第6水平,细粒土质砂第5、第6水平,这些土样的初始干密度均为最大干密度的93%以上。

依据盐胀试验结果,经多次不同形式拟合,进行非线性回归分析,得到含细粒土砂和细粒土质砂的盐胀公式分别为

$$Y = -170.356 + 8.206X_1 + 10.666X_3 - 2.607X_1^2 - 4.08 \times 10^{-2}X_2^2 + 0.772X_1^3 - 3.33 \times 10^{-2}X_4^3 + 3.802 \times 10^{-4}X_2^3 - 1.60 \times 10^{-2}X_3^3 - 0.325X_1 \cdot X_4 + 0.539X_3X_4 - 3.58 \times 10^{-3}X_1X_2 + 2.205 \times 10^{-2}X_2X_4 + 5.392 \times 10^{-2}X_2X_3$$

$$R^2 = 0.849 \quad (1)$$

$$Y' = -12.490 + 4.28X_1' - 9.24 \times 10^{-2}X_2' + 1.493 \cdot X_3' - 0.761X_1' - 3.011X_2'^2 - 6.63 \times 10^{-3}X_3'^2 + 0.460X_1'^3 + 8.936 \times 10^{-5}X_2'^3 - 5.91 \times 10^{-4}X_3'^3 + 3.096 \times 10^{-3}X_4'^3 + 8.62 \times 10^{-2}X_1'X_4' - 3.63 \times 10^{-2}X_3'X_4' + 1.56 \times 10^{-2}X_1'X_2' + 1.49 \times 10^{-2}X_2'X_4' + 7.678 \times 10^{-4}X_2'X_3'$$

$$R^2 = 0.900 \quad (2)$$

式中: $Y, Y'$ 分别为含细粒土砂和细粒土质砂的盐胀率(%); $X_1, X_1'$ 分别为含细粒土砂和细粒土质砂的含盐量(%); $X_2, X_2'$ 分别为含细粒土砂和细粒土质砂的上覆荷载(kPa); $X_3, X_3'$ 分别为含细粒土砂和细粒土质砂的初始干密度( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ ); $X_4, X_4'$ 分别为含细粒土砂和细粒土质砂的含水率(%); $R^2$ 为相关系数。

经试验验证,式(1)、式(2)与所做试验结果基本拟合。分别把含细粒土砂和细粒土质砂的最佳含水量、最大干密度及50 kPa的上覆荷载代入式(1)、式(2)中,可以发现,当含盐量较小时,细粒土质砂的盐胀率要比含细粒土砂的盐胀率大;当含盐量超过1.4%时,随着含盐量的增大,含细粒土砂的盐胀率反而超过细粒土质砂。在相似情况下,在50 kPa的上覆荷载、压实度0.93和含水量取最佳含水量时,起胀含盐量两者都约为0.2%,并且细粒土质砂的盐胀率随着含水率的增大而增大。

### 4 结语

(1)在相似情况下,在50 kPa的上覆荷载、压实度93%和含水量取最佳含水量时,2种砂类土的起胀含盐量均约为0.2%,细粒土质砂的盐胀率随着含水量的增大而增大。砂类土中,细颗粒含量高的比含量低的发生体缩现象的概率小,土体下陷量基本都为15%左右。

(2)单次降温盐胀过程中,砂类硫酸盐渍土主要盐胀活跃区间为0℃~5℃。

(3)粗颗粒盐渍土中,细粒土含量越小,越应注

意土的体缩现象,即使是硫酸盐渍土,在温度降低的过程中也会发生土体下陷。所以,在实际工程中,对于粗颗粒硫酸盐渍土一定要提高土体的压实度,保证路基正常使用。

参考文献:

References:

[ 1 ] 徐攸在. 盐渍土地基[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1993.

[ 2 ] 徐学祖. 土体冻胀和盐胀机理[M]. 北京:科学出版社,1995.

[ 3 ] JTJ 051—93,公路土工试验规程[S].

[ 4 ] JTJ B01—2003,公路工程技术标准[S].

[ 5 ] 包卫星,杨晓华,谢永利. 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. Re-

(上接第 9 页)

施工过程中安全性能的重要指标,在塔河系列沥青产品生产工艺改进、完善的过程中和提高沥青性能时应给予较多的关注。

4 结 语

(1)针对塔河直馏沥青化学组分的欠缺,采用富芳烃馏份油和丁苯类聚合物等材料进行调整,使塔河 90# 沥青性质得到明显改善,产品针入度指数较高,低温延度较大,抗热老化性较理想,性能分级的适用温度区间较宽,性能优良。

(2)高沥青质含量决定了 5 种塔河沥青都具有优良的高温性能,但同时也决定了塔河 90# 沥青的低温性能相对不理想,可以通过改性剂来改善低温性能;低含蜡量和高沥青质含量决定了 5 种塔河沥青的感温性能都较好;但同时决定了基质沥青的低温粘性及柔性较低,疲劳性能不理想,只能在沥青生产工艺环节通过改性和优化调和成分的方法改善。

(3)分析了技改措施、市政专用沥青生产工艺和 SBR、SBS 改性方法对沥青产品性能的影响,为沥青生产企业改进沥青生产工艺、提高沥青产品质量提供了重要的理论依据。

参考文献:

References:

[ 1 ] Jack S Y. Guideline for asphalt refiners and supplies [R]. Washington DC; Strategic Highway Research Program(A-686),1994.

search on salt expansion of representative crude saline soil under freezing and thawing cycles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(11): 1991-1995.

[ 6 ] 李 芳,李 斌,陈 建. 中国公路盐渍土的分区方案[J]. 长安大学学报:自然科学版,2006,26(6):12-14, 89.

LI Fang, LI Bin, CHEN Jian. Highway-related dividing scheme of salty soil[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2006, 26(6): 12-14, 89.

[ 7 ] 李志农,金昌宁. 新疆典型土类路基干压试验[J]. 中国公路学报,2007,20(2):23-28.

LI Zhi-nong, JIN Chang-ning. Test on dry compaction of typical earth subgrade in Xinjiang[J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(2): 23-28.

[ 2 ] Puzinauskas V P. Properties of asphalt cements[J]. Association of Asphalt Paving Technologists, 1979, 48: 646-710.

[ 3 ] Peterson J C, Robertson R E, Branthaver J F, et al. Binder characterization and evaluation volume 4: test methods[R]. Washington DC; Strategic Highway Research Program(A-370),1994.

[ 4 ] 董瑞琨,孙立军. 考虑老化的沥青结合料低温感温性能指标[J]. 中国公路学报,2006,19(4):34-39.

DONG Rui-kun, SUN Li-jun. Low temperature susceptibility indexes of asphalt binder with different aging degree[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(4): 34-39.

[ 5 ] 张争奇,梁晓莉,李 平. 沥青老化性能评价方法[J]. 交通运输工程学报,2005,5(1):1-5.

ZHANG Zheng-qi, LIANG Xiao-li, LI Ping. Evaluation method of asphalt aging properties[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2005, 5(1): 1-5.

[ 6 ] 景彦平. 沥青组分划分方法[J]. 长安大学学报:自然科学版,2005,25(3):33-36.

JING Yan-ping. Asphalt component methodology[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2005, 25(3): 33-36.

[ 7 ] 程国香,郭皎河,沈本贤,等. 塔河原油特性及其沥青产品性能评价[J]. 石油沥青,2005,19(4):5-10.

CHENG Guo-xiang, GUO Jiao-he, SHEN Ben-xian, et al. The properties of Tahe crude oil and performance evaluation on paving asphalt from it[J]. Petroleum Asphalt, 2005, 19(4): 5-10.

[ 8 ] JTG F40—2004,公路沥青路面施工技术规范[S].