

# 硫酸盐渍土盐胀的抑制措施

屈 波<sup>1</sup>, 顾强康<sup>1</sup>, 李 强<sup>2</sup>, 连 杰<sup>1</sup>, 殷帛成<sup>1</sup>

(1. 空军工程大学 航空航天工程学院, 陕西 西安 710038;

2. 沈阳军区空军勘察设计院, 辽宁 沈阳 110015)

**摘 要:**为了降低硫酸盐渍土的盐胀性, 分别采用氯化钠和氯化钙对硫酸盐渍土进行改良试验。配制硫酸钠含量为 2%、4%、6% 的土样, 分别掺入一定量的氯化钠和氯化钙(使  $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$  为 2、4、6、8), 进行盐胀试验, 并对试验结果进行了对比分析。通过分析相同氯化钠和氯化钙掺量对不同硫酸钠含量的盐胀率的影响, 进一步验证了氯化钠和氯化钙对硫酸盐渍土盐胀性的作用机理。结果表明: 氯离子对硫酸盐渍土的盐胀性有较好的抑制效果, 并当  $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$  为 4~6 时, 效果最为明显; 当氯化钙掺量较低时, 氯化钙对硫酸盐渍土的盐胀具有双重抑制效果, 但当氯化钙掺量较高时, 由于氯化钙和硫酸钙的吸水膨胀, 抑制效果会有一定程度的减弱; 该试验结果可为实际工程中硫酸盐渍土地基的处理提供一定的参考。

**关键词:**道路工程; 硫酸盐渍土; 氯化钠; 氯化钙; 盐胀处理

**中图分类号:**U416.166

**文献标志码:**A

## Treatment for salt expansion of sulphate saline soil

QU Bo<sup>1</sup>, GU Qiang-kang<sup>1</sup>, LI Qiang<sup>2</sup>, LIAN Jie<sup>1</sup>, YIN Bo-cheng<sup>1</sup>

(1. The Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, Shaanxi, China;

2. Survey and Design Group of Shenyang Mrafs, Shenyang 110015, Liaoning, China)

**Abstract:** In order to decrease the salt expansion of sulphate saline soil, NaCl and  $\text{CaCl}_2$  were used to treat the sulphate saline soil respectively. NaCl and  $\text{CaCl}_2$  were added in the soil samples with salt content of 2%, 4% and 6% in the experiment. The amounts of NaCl and  $\text{CaCl}_2$  were based on the value of  $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$  which was at 2, 4, 6 and 8. The results were compared. Moreover, the function mechanism of NaCl and  $\text{CaCl}_2$  when they were used to treat the sulphate saline soil could be proved through analyzing the change of salt expansion of the sulphate saline soil when the salt content was different. The results show that  $\text{Cl}^-$  has a good effect and the effect is especially good when  $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$  is between 4 and 6;  $\text{CaCl}_2$  has double action when the amount of which is low; however, when the amount of  $\text{CaCl}_2$  is high, it has some side effect which is caused by the expansion of  $\text{CaCl}_2$  and  $\text{CaSO}_4$ . The results of the study can provide effective reference for the ground treatment of sulphate saline soil in the practical projects. 3 tabs, 4 figs, 15 refs.

**Key words:** road engineering; sulphate saline soil; NaCl;  $\text{CaCl}_2$ ; salt heaving treatment

# 0 引言

盐渍土是指易溶盐含量大于 0.5%,且具有吸湿、盐胀、松胀等特性的土,按含盐类型不同,盐渍土可分为氯盐渍土、亚氯盐渍土、亚硫酸盐渍土、硫酸盐渍土和碳酸盐渍土;按土中盐的含量不同,又可分为弱盐渍土、中盐渍土、强盐渍土和超盐渍土。在中国西北地区分布着大量的内陆硫酸盐渍土<sup>[1-3]</sup>。

硫酸盐渍土的盐胀作用强烈。土层中硫酸盐吸水结晶,体积增大 3.18 倍,即为硫酸盐渍土的盐胀性。当结晶溶解于溶液中,体积缩小,致使原有土体结构破坏而疏松、多孔、易遭风蚀,此即为硫酸盐渍土的松胀性。如此反复的盐胀与松胀,对交通工程造成极大危害,如路基翻浆冒泥、边坡失稳、路面开裂等。所以,研究硫酸盐渍土盐胀的处理措施十分必要。张莎莎等研究了路用粗粒盐渍土的盐胀特性,分析了影响盐渍土盐胀的主要因素为含盐量和含水量,并得出了起胀含盐量、含水量及盐胀剧变温度区间为 0℃~−5℃<sup>[4]</sup>;包卫星等就新疆喀什地区的盐渍土在冻融循环下的变形特性做了试验研究,结果表明:低液限粘土盐胀具有较好的累加性,水分重分布与盐分重分布有很好的一致性<sup>[5]</sup>;王海春等提出了利用氯化钙处理硫酸盐渍土,并分析了方案的可行性,但氯化钙掺量仅靠理论计算,没有经过试验分析<sup>[6]</sup>。针对氯化钙掺量的选取,本文主要通过硫酸盐渍土中掺入一定量的氯化钠和氯化钙,研究不同掺量的氯化钠和氯化钙对硫酸盐渍土盐胀的作用机理和抑制效果,进一步提出处理硫酸盐渍土盐胀的措施。

# 1 试验方案及土样基本性质

## 1.1 试验方案

硫酸钠( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )晶体在有足够水分的条件下,会与水结合生成含结晶水的  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ,由于这 10 个水分子的介入,使得硫酸钠体积膨胀,体积增加到 3.18 倍。一般认为,硫酸盐渍土路基产生膨胀危害的含盐量为 2%左右,达不到这个含量时,膨胀作用较小,不致影响土体密度;一旦超过这个标准,膨胀量迅速增加,其体积膨胀足以使路基的膨胀高度达到可见的程度,对路基造成危害,严重危及行车安全<sup>[7-11]</sup>。

针对含盐量超过 2%时,盐胀效果明显,所以土样的含盐量(质量分数)分别选取 2%、4%、6%。根据硫酸钠在氯盐溶液中的溶解随氯离子的溶液浓度

增加而减少的理论,试验中氯盐掺量的选取根据  $\text{Cl}^-$  与  $\text{SO}_4^{2-}$  的比值而定, $\text{Cl}^-$  与  $\text{SO}_4^{2-}$  的质量比(下文简称  $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ )分别取 2、4、6、8,以此来计算掺入氯盐的质量<sup>[12-14]</sup>。本文中的含量均为质量分数。具体的试验方案见表 1。表 1 中仅列出了含盐量为 2%的试验方案。含盐量为 4%和 6%的试验方案与 2%的相同。

表 1 试验设计方案  
Tab. 1 Experiment design

$\text{Na}_2\text{SO}_4$ 含量/%	$\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ (加 NaCl)	$\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ (加 $\text{CaCl}_2$ )
2	2	
2	4	
2	6	
2	8	
2		2
2		4
2		6
2		8

## 1.2 试验仪器

无荷盐胀试验参考《公路土工试验规程》(JTG E40—2007)进行,仪器用膨胀仪,其环刀内径为 61.8 mm,高为 20 mm<sup>[15]</sup>。其他试验仪器有:百分表、电子天平、烘箱。

## 1.3 试验步骤

### 1.3.1 土样制备

土样取自西安市东郊,黄色粘性土,天然含水量(质量分数)为 12.6%,土粒重度为 26.57 kN/m<sup>3</sup>,液限为 33.4%,塑限为 18.6%,塑性指数  $I_p$  为 14.8,液性指数  $I_L \leq 0$ 。

### 1.3.2 筛分试验

土样经风干、碾散、并过 0.5 mm 筛后,通过筛分试验的结果见表 2。

表 2 土样筛分试验数据  
Tab. 2 Boulton separation experiment data of soil samples

颗粒范围/mm	百分比/%	颗粒范围/mm	百分比/%
>0.5	0	0.050~0.010	27.0
0.50~0.25	2.6	0.010~0.005	12.9
0.25~0.10	32.7	0.005~0.002	3.6
0.100~0.074	7.9	<0.002	9.1
0.074~0.050	6.8		

### 1.3.3 试样制备及试验过程

通过击实试验,测得土样最优含水量为 14.1%,最大干密度为 1.864 g/cm<sup>3</sup>。为了增加试验的对比性,排除初始含水量的影响,试样含水量均按 14.1%拌制土样,压实度取 95%,所得土样的干密度为

1.771 g/cm<sup>3</sup>。为了增加 NaCl 和 CaCl<sub>2</sub> 处理效果的对比性,每次试验制备 9 份土样,3 个为 1 组,第 1 组加 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>,第 2 组加 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 和 NaCl,第 3 组加 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 和 CaCl<sub>2</sub>。土样拌好后,用塑料袋密封,放置 24 h,使土样水份含量充分均匀。试样制备时,先根据设计的土样干密度和含水量,计算出高 20 mm、内径 61.8 mm 试样需土质量,称重装模,用千斤顶压实至 20 mm。

试验时,在膨胀仪(固结仪)底座中置湿润的透水石 1 块,将环刀刃口一端旋在底座上,使试样底面与透水石顶面接触,土样上再依次放上透水石和承载板,最后将百分表装好,并记录百分表初始读数,然后向固结盒内注入一定量的水。24 h 后,读取百分表读数,计算膨胀率。

2 试验结果及分析

2.1 相同 Cl<sup>-</sup> 含量时 NaCl 和 CaCl<sub>2</sub> 的处理效果对比

含盐量为 2% 的各组试验的盐胀率如图 1 所示。

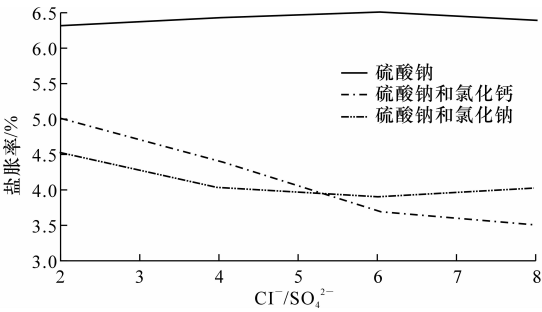


图 1 含盐量为 2% 时的盐胀率  
Fig. 1 Salt expansion ratio when salt content was 2%

从图 1 可看出,当硫酸钠含量为 2% 时,盐胀率一般为 6.3% 左右,掺入氯化钠之后,盐胀率明显降低,当 Cl<sup>-</sup>/SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 为 6 时,盐胀率减小到 3.6%,盐胀率减小 43%。掺入氯化钙后,当 Cl<sup>-</sup>/SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 在 2~4 时,氯化钙对硫酸盐渍土的抑制效果随氯化钙含量的增加而不断增强,但继续增大氯化钙的含量,抑制效果会有一定程度的减弱。图中 2 条线的交点处,Cl<sup>-</sup>/SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 为 5.3,说明当 Cl<sup>-</sup>/SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> < 5.3 时,氯化钙对硫酸盐渍土的盐胀的抑制效果优于氯化钠的抑制效果;当 Cl<sup>-</sup>/SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> > 5.3 时,氯化钠的抑制效果较好。

当含盐量分别为 4% 和 6% 时,试验结果分别如图 2、图 3 所示。

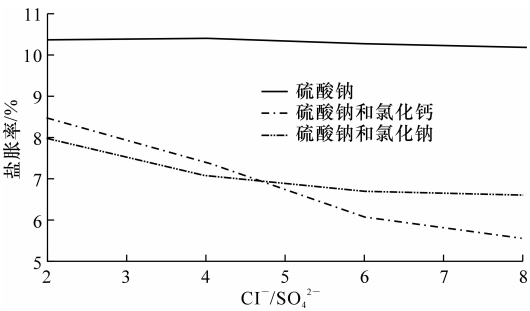


图 2 含盐量为 4% 时的盐胀率  
Fig. 2 Salt expansion ratio when salt content was 4%

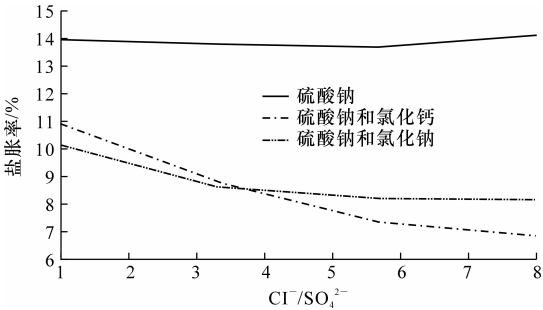
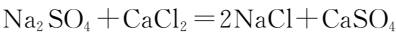


图 3 含盐量为 6% 时的盐胀率  
Fig. 3 Salt expansion ratio when salt content was 6%

从图 1~图 3 可以看出,3 组试验的结果是基本一致的。

在硫酸盐渍土中掺入氯化钠后,硫酸钠的盐胀性随着氯化钠含量的增加而不断减少,这是因为硫酸钠在氯盐溶液中的溶解度随氯盐溶液浓度的增加而减少,因为溶解度降低,所以在温度降低时,能够发生吸水膨胀的硫酸钠的量减少,盐胀率也随之减少。并且当 Cl<sup>-</sup>/SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 在 4~6 之间时,氯化钠对硫酸盐渍土盐胀的抑制效果发挥最好。之后再增加氯化钠的含量,效果增加不明显。

在硫酸盐渍土中掺入氯化钙后,硫酸钠的盐胀率随着氯化钙含量的增加呈现出先减少,后不变或有少许增加的趋势。并且在 Cl<sup>-</sup>/SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 在 2~4 之间时,效果是优于氯化钠的。这是因为氯化钙对硫酸钠的抑制有双重作用:第一是用氯盐来抑制硫酸盐的膨胀;第二是通过离子交换,使不稳定的硫酸盐转化成稳定的硫酸钙,氯化钙与硫酸钠反应生成的 CaSO<sub>4</sub> 微溶于水,性质稳定,反应方程式为



多余析出的 Ca<sup>2+</sup> 会与土中的 Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup> 进行吸附交换,吸附交换的结果是使土颗粒形成较大的土团,使土体的分散性、粘附性和膨胀性降低。所以在氯化钙含量不高时,效果优于氯化钠。但当氯化钙的含量再增加时,多余的氯化钙也会吸水结晶膨胀,

具体膨胀量见表 3。

表 3 CaCl<sub>2</sub> 吸水结晶后的体积膨胀  
Tab.3 Water absorption volume expansion  
after crystallization of CaCl<sub>2</sub>

CaCl <sub>2</sub> 吸水结晶	ΔV(%)
CaCl <sub>2</sub> →CaCl <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O	44
CaCl <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O→CaCl <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	35
CaCl <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O→CaCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	24

CaCl<sub>2</sub>→CaCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O, 体积增加量 ΔV=1.44×1.35×1.24-1=1.141, 由以上分析可得, 无水氯化钙吸收 6 个水分子时, 体积膨胀 141%。并且反应生成的硫酸钙也能吸水膨胀, CaSO<sub>4</sub>+2H<sub>2</sub>O=CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O, 有微胀性。所以, 在氯化钙含量过多时, 其对硫酸钠的盐胀抑制效果不是很理想, 在一定程度上是对氯盐抑制效果的抵消。

2.2 相同掺量的 NaCl 和 CaCl<sub>2</sub> 对不同含盐量的盐胀率的影响

3 组试验之间经过相互比较, 可以得出同一 NaCl 和 CaCl<sub>2</sub> 掺量下, 不同含盐量的土样盐胀率的变化。在硫酸钠含量为 2%, Cl<sup>-</sup>/SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>=8; 硫酸钠含量为 4%, Cl<sup>-</sup>/SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>=4 和硫酸钠含量为 6%, Cl<sup>-</sup>/SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>=2.67 时, 三者掺入氯化钠(或氯化钙)的量是相等的, 将此时氯化钠或氯化钙的含量定义为 16%。则相同掺量的 NaCl 和 CaCl<sub>2</sub> 对不同含盐量的盐胀率的影响如图 4 所示。

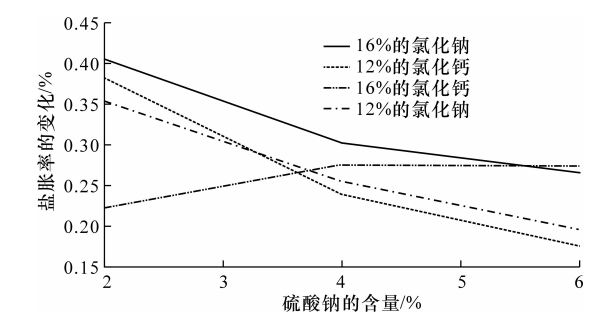


图 4 不同含盐量时盐胀率的变化

Fig. 4 Change of salt expansion ratio with salt content

从图 4 可看出, 对于同一氯化钠的掺入量, 随着硫酸钠含量的不断增加, 氯盐抑制硫酸盐膨胀的效果不断降低, 并且降低速率也不断减缓。这印证了氯盐抑制硫酸盐的膨胀的机理: 硫酸钠在氯盐溶液中其溶解度随氯盐的溶液浓度增加而减少。当硫酸钠含量不断增加, 能够溶解的硫酸钠的量占总的硫酸钠的量的百分比会不断下降, 造成氯盐对硫酸盐的溶解度的影响也相应降低, 最终反映到试验中的氯盐抑制硫酸盐的膨胀的效果不断降低。

对于氯化钙的掺入, 当掺量为 12% 时, 其对硫酸盐膨胀的抑制效果与氯化钠相似, 但当氯化钙含量增加到 16% 时, 其对不同硫酸盐含量膨胀的抑制效果呈先增加后稳定的趋势。这是因为当硫酸钠含量较少时, 不足以使氯化钙充分反应, 只能发挥氯盐对硫酸盐膨胀的抑制效果和部分 Ca<sup>2+</sup> 的抑制效果。当硫酸钠含量增加时, 氯化钙能较充分反应, 氯盐和 Ca<sup>2+</sup> 的抑制效果能充分发挥, 所以抑制效果增强。当硫酸钠含量继续增加时, 氯盐的抑制效果减弱, Ca<sup>2+</sup> 的抑制效果有一定的增强, 所以总的抑制效果变化不大。

3 结 语

(1) 试验研究表明, 含盐量在 2%~6% 时, 掺入氯化钠之后, 盐胀率明显降低, 并且当 Cl<sup>-</sup>/SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 在 4~6 之间时, 氯化钠对硫酸盐渍土的抑制效果较好; 之后再增加氯化钠的含量, 效果不明显。

(2) 在掺入氯化钙后, 当 Cl<sup>-</sup>/SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 在 2~4 时, 氯化钙对硫酸盐渍土的抑制效果随氯化钙含量的增加而不断增强, 但继续增大氯化钙的含量, 抑制效果不增强或会有一定程度的减弱; 主要因为氯化钙的吸水膨胀和硫酸钙的微胀性引起。

(3) 对于同一氯化钠的掺入量, 随着硫酸钠含量的不断增加, 氯盐抑制硫酸盐膨胀的效果不断降低, 效果的降低速率在不断减缓; 主要是因为氯盐对硫酸钠的溶解度的影响程度相对降低造成, 而氯化钙对不同硫酸盐含量膨胀的抑制效果呈先增加后稳定的趋势, 主要由氯盐和 Ca<sup>2+</sup> 对硫酸钠膨胀的抑制效果的变化引起。

(4) 试验结果可以为实际工程中盐渍土地基处理提供一定的参考, 将氯化钙的掺量设计为使 Cl<sup>-</sup>/SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 为 4~6, 并根据当地土的渗透性进行调整, 若渗透性太小, 可以考虑高压注浆技术; 但考虑到影响硫酸盐渍土盐胀的因素较多, 所以在实际工程中, 要结合当地的条件, 充分考虑处理方案的可行性和经济性, 并做试验段进行检验; 这样的化学处理法使用时应考虑其安全性, 以及氯离子的腐蚀性。该方法对于缺少垫层材料的地区, 有很好的经济效果和应用前景。

参考文献:

References:

[1] 史桃开, 徐攸在. 盐渍土地基的膨胀性[J]. 工程勘察, 1994(3): 17-21.

- SHI Tao-kai, XU You-zai. The expansibility of saline soil ground[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 1994(3): 17-21. (in Chinese)
- [2] 徐攸在. 盐渍土地基[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1993.
- XU You-zai. Saline soil ground[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1993. (in Chinese)
- [3] 周 伟, 胡文寿, 穆冬林, 等. 高山湖盆地特殊性工程岩土[J]. 地球科学与环境学报, 2006, 28(1): 65-69.
- ZHOU Wei, HU Wen-shou, MU Dong-lin, et al. Special geotechnique in lake basin on high mountain[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2006, 28(1): 65-69. (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] 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(2): 26-30.
- BAO Wei-xing, LI Zhi-nong. Testing on transmutation properties of saline soil under freezing and thawing cycles in Kashi, Xinjiang[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2008, 28(2): 26-30. (in Chinese)
- [6] 王海春, 井 浩. 硫酸盐渍土盐胀机理及抑制措施[J]. 青海师范大学学报: 自然科学版, 2006(4): 80-85.
- WANG Hai-chun, JING Hao. The salt heaving mechanism and restrain method of sulphate salty soil[J]. Journal of Qinghai Normal University: Natural Science, 2006(4): 80-85. (in Chinese)
- [7] 高江平, 杨荣尚. 含氯化钠硫酸盐渍土在单向降温时水分和盐分迁移规律的研究[J]. 西安公路交通大学学报, 1997, 17(3): 22-25.
- GAO Jiang-ping, YANG Rong-shang. Study on the moving pattern of water and salt with directional temperature lowering in sulphate salty soil containing NaCl[J]. Journal of Xi'an Highway University, 1997, 17(3): 22-25. (in Chinese)
- [8] 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)
- [9] 平树江, 李炜光, 申爱琴, 等. 黄河中下游冲积平原细粒氯盐渍土的加固机理[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2008, 28(4): 21-26.
- PING Shu-jiang, LI Wei-guang, SHEN Ai-qin, et al. Reinforcement mechanism of fine chlorine saline soil on middle and lower alluvial plains of Yellow River[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2008, 28(4): 21-26. (in Chinese)
- [10] 郭军辉, 阎长虹, 夏良斌, 等. 某一级公路路基填土膨胀性试验[J]. 地球科学与环境学报, 2007, 29(1): 85-89.
- GUO Jun-hui, YAN Chang-hong, XIA Liang-bin, et al. Experimental study on swelling property of subgrade soil in a first-class highway[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2007, 29(1): 85-89. (in Chinese)
- [11] 毛新虎. 公路膨胀土路堑边坡防护方案探讨[J]. 地球科学与环境学报, 2004, 26(4): 49-53.
- MAO Xin-hu. Discuss of cutting slope treatment project for expansive soil on highway[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2004, 26(4): 49-53. (in Chinese)
- [12] Everett D H. The thermo dynamics of frost damage to porous solids[J]. Transactions of the Faraday Society, 1961(57): 1541-1551.
- [13] Weisbrod N, Niemet M R, Rockhold M L, et al. Migration of saline solutions in variably saturated porous media[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2004, 72(1-4): 109-133.
- [14] Miyamoto S, Chacon A, Hossain M, et al. Soil salinity of urban turfareas irrigated with saline water: 1. spatial variability[J]. Landscape and Urban Planning, 2005, 71(2-4): 233-241.
- [15] JTG E40—2007, 公路土工试验规程[S].
- JTG E40—2007, Test methods of soils for highway engineering[S]. (in Chinese)