

酸盐腐蚀性能。由此可知,纳米 SiO<sub>2</sub> 是一种良好的多孔介质材料改性物质,但其在硫酸盐渍土中的应用和研究鲜有报道。

该文通过室内试验研究含盐量变化对充分洗盐后的硫酸盐渍土物理特性的影响规律,并向不同含盐量盐渍土中掺入纳米 SiO<sub>2</sub> 以研究其对盐渍土物理特性的改性效果和固化机理,对比分析新型改良材料纳米 SiO<sub>2</sub> 与传统建筑材料的盐胀抑制效果,为盐渍土地区工程建设提供参考。

1 试验方法

1.1 试验材料

以西北河西走廊地区具有代表性的硫酸盐渍土为研究对象,土样为粉质黏土(含水量为 18.5%,干密度为 1.70 g/cm<sup>3</sup>)。为研究硫酸钠含量变化对盐渍土物理特性影响规律,首先对盐渍土进行脱盐处理,用去离子水浸泡天然盐渍土样并充分搅拌,水变清澈后再换水浸泡,如此重复 10 余次。将脱盐后的土样置于 105 ℃ 的温度下烘干,并统一碾碎,对碾碎后的土样进行粒组分析,结果见表 1,试验用纳米 SiO<sub>2</sub> 规格指标见表 2。

表 1 土粒级配百分比

粒径/mm	百分含量/%	粒径/mm	百分含量/%
2~1	4.1	0.25~0.075	24.0
1~0.5	52.3	<0.075	8.0
0.5~0.25	11.6		

表 2 纳米 SiO<sub>2</sub> 规格指标

性质	单位	指标
含量	%	≥99.5
平均粒径	nm	30±10
比表面积	m <sup>2</sup> /g	150~300
堆积密度	g/cm <sup>3</sup>	0.057

1.2 试验方案

1.2.1 液塑限试验

液塑限试验试样配比见表 3,共 48 个试样。试样制备好后立即装入密封袋并闷料 24 h,使试样中的盐分和水分分布均匀,试验采用液限和塑限联合测定法,试验装置为数显式土壤液塑限联合测定仪。

1.2.2 直剪试验

含盐量和纳米 SiO<sub>2</sub> 含量配比见表 4,共 12 个试样。在电动等应变直剪仪中,将闷料后的试样依次置

于 50、100、200、300 kPa 的垂直荷载下进行直剪试验,剪切速率为 4 mm/min。

表 3 液塑限试验试样配比

试样编号	含盐量/%	纳米 SiO <sub>2</sub> 含量/%	含水率/%
1~24	0,0.5,1,2,3,4	0	16,20,24,28
25~36	1	1,2,3	16,20,24,28
37~48	3	1,2,3	16,20,24,28

表 4 直剪试验试样配比

试样编号	含盐量/%	纳米 SiO <sub>2</sub> 含量/%	含水率/%
1~6	0,0.5,2,3,4	0	18.5
7~9	1	1,2,3	18.5
10~12	3	1,2,3	18.5

1.2.3 击实试验

击实试验试样配比见表 5,每种不同含盐量和 SiO<sub>2</sub> 掺量下的土样分别加入不同含量蒸馏水而设置成 6 个不同含水率,依次从 12% 到 22%(以 2% 的含水率递增),共 72 个试样,采用轻型击实法在多功能电动击实仪中将闷料后的试样击实,每个土样分 3 层击实,每层 27 击。

表 5 击实试验试样配比

试样编号	含盐量/%	纳米 SiO <sub>2</sub> 含量/%	含水率/%
1~36	0,0.5,1,2,3,4	0	12,14,16,18,20,22
37~54	1	1,2,3	12,14,16,18,20,22
55~72	3	1,2,3	12,14,16,18,20,22

1.2.4 渗透试验

渗透试验试样配比见表 6,将闷料后的试样装入 TST-55 型渗透仪中进行变水头渗透试验,干密度控制为 1.5 g/cm<sup>3</sup>,具体试验步骤及渗透系数计算公式参见文献[24]中的变水头渗透试验。

表 6 渗透试验试样配比

试样编号	含盐量/%	纳米 SiO <sub>2</sub> 含量/%	含水率/%
1~6	0,0.5,1,2,3,4	0	18.5
7~11	3	0.5,1,2,3,4	18.5

1.2.5 盐胀试验

将闷料后的试样装入到特制的有机玻璃容器中,干密度控制为该种土样的最大干密度,插入位移测量器并密封容器,将容器放置到程式恒湿恒温试验箱中进行降温试验,初始温度控制为 30 ℃,最终温度为 0 ℃,降温速率为 0.1 ℃/min,试样配比见表 7。

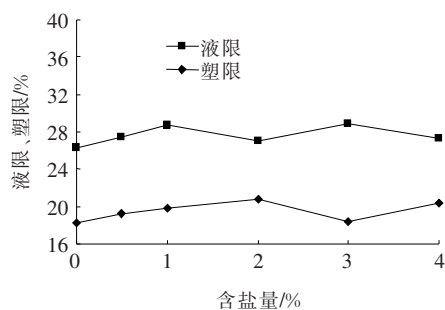
表 7 盐胀试验试样配比

试样编号	含盐量/%	纳米 SiO <sub>2</sub> 含量/%	含水率/%
1~7	0,0.5,1,1.5,2,2.5,3	0	18.5
8~11	0,1,2,3	2	18.5

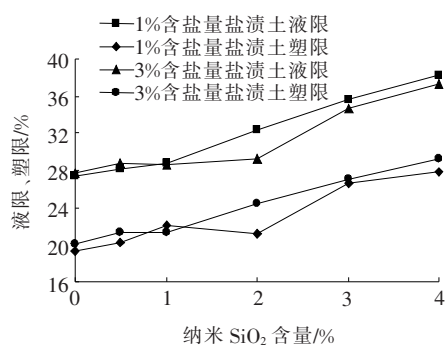
## 2 试验结果与分析

### 2.1 液塑限

硫酸盐渍土的液限和塑限均随着含盐量的增加而微弱增大[图 1(a)]。相对而言,纳米 SiO<sub>2</sub> 则会对盐渍土液塑限产生较大影响。如图 1(b)所示,1%和 3%含盐量盐渍土液塑限均随着纳米 SiO<sub>2</sub> 掺入量的增加而增大,并在纳米 SiO<sub>2</sub> 掺加量为 4%时达到最大值。1%含盐量盐渍土液塑限最大增幅为 40%和 44.8%;3%含盐量盐渍土液塑限最大增幅为 34.8%和 45.5%。



(a) 盐渍土液塑限与含盐量变化关系

(b) 盐渍土液塑限与纳米 SiO<sub>2</sub> 含量变化关系图 1 盐渍土液塑限与含盐量、纳米 SiO<sub>2</sub> 含量变化关系

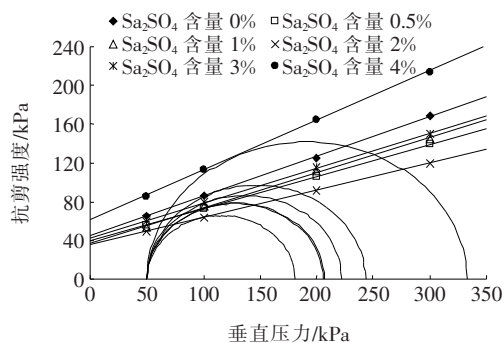
### 2.2 硫酸盐渍土强度

#### 2.2.1 硫酸钠含量对盐渍土强度的影响

硫酸盐渍土抗剪强度随含盐量增加表现出先减小后增大的变化特征图。根据图 2(a)的盐渍土强度包线图,相对于不含盐土,0.5%、1%、2%、3%含盐量盐渍土的抗剪强度均有不同程度降低。当垂直压力从

50 kPa 到 300 kPa 的变化过程中,2%含盐量盐渍土的抗剪强度降幅最大,依次下降了 24.6%、25.6%、26.4%、28.6%;但 4%含盐量盐渍土抗剪强度则比不含盐土分别提升了 30.8%、31.4%、32.0%、27.4%,因为多余的盐以盐晶体的形式析出,盐晶体作为固体颗粒的一部分起到填充土中孔隙作用,同时,盐晶构成了盐渍土的一部分骨架从而增大抗剪强度。

由图 2(a)中莫尔应力圆可知,在保持最小主应力  $\sigma_3$  为 50 kPa 不变时,最大主应力  $\sigma_1$  随含盐量先减小后增大,表明盐渍土抗压能力先降低后提高,所以,硫酸盐渍土的黏聚力和内摩擦角随含盐量的增加同样表现出先减小后增大的变化特征[图 2(b)],4%含盐量盐渍土的黏聚力和内摩擦角均超过不含盐土,增幅分别达到 36.3%和 22.3%。



(a) 莫尔应力圆

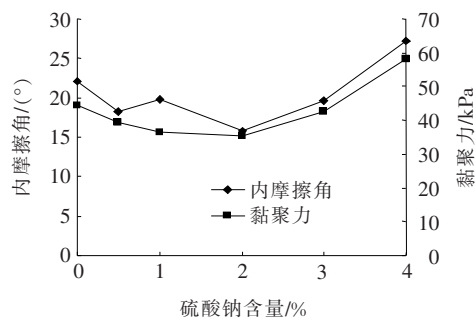
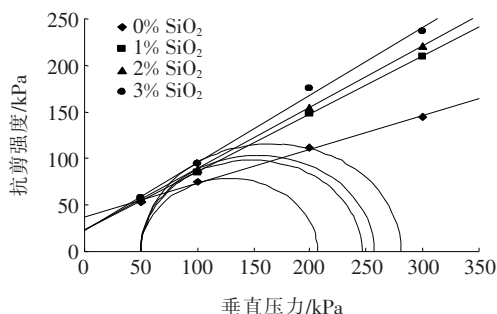
(b) 内摩擦角、黏聚力与 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 含量关系

图 2 抗剪强度、莫尔应力圆和剪系数与硫酸钠含量变化关系

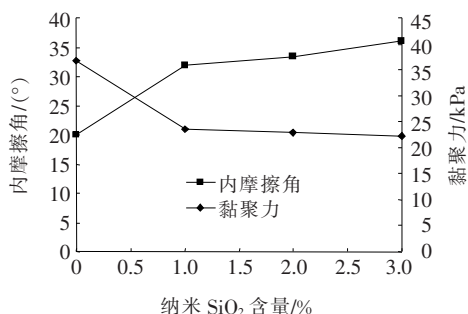
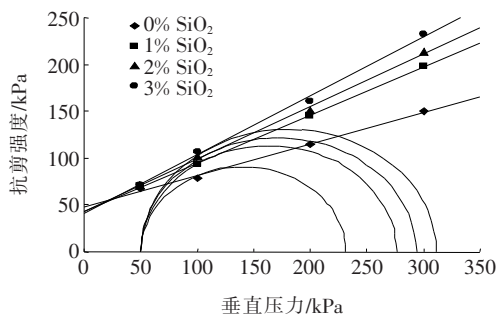
#### 2.2.2 纳米 SiO<sub>2</sub> 对盐渍土强度影响

纳米 SiO<sub>2</sub> 对硫酸盐渍土抗剪强度的提升效果显著,当盐渍土中纳米 SiO<sub>2</sub> 含量依次为 1%、2%、3%时,土体抗剪强度和抗压能力呈逐步增大趋势,在纳米 SiO<sub>2</sub> 含量达到最大掺入量 3%时,含盐量为 1%和 3%的盐渍土在 300 kPa 垂直荷载下抗剪强度分别提升了 63.4%和 54.7%[图 3(a)、(c)]。

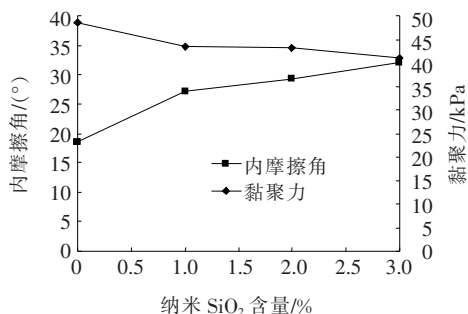
图 3(b)、(d)分别表示不同含盐量盐渍土的黏聚力和内摩擦角在纳米 SiO<sub>2</sub> 掺入量增加时的变化特征。



(a) 莫尔应力圆(含盐量 1%)

(b) 黏聚力、内摩擦角与纳米 SiO<sub>2</sub> 含量关系(含盐量 1%)

(c) 莫尔应力圆(含盐量 3%)

(d) 黏聚力、内摩擦角与纳米 SiO<sub>2</sub> 含量关系含盐量 3%图 3 不同含盐量盐渍土抗剪强度及剪切系数与纳米 SiO<sub>2</sub> 含量变化关系

1%含盐量盐渍土的黏聚力呈下降趋势,内摩擦角则呈上升趋势,在纳米 SiO<sub>2</sub> 掺入量为 3%时黏聚力下降了 64.1%,内摩擦角上升了 80.2%[图 3(b)]。当含盐量增大时,随着纳米 SiO<sub>2</sub> 的掺入,土体黏聚力同样呈下降趋势,最大降幅为 15.6%,相对而言,内摩擦角上升幅度则较大,最大为 58.1%[图 3(d)]。

上述结果表明:在不同含盐量盐渍土中掺入纳米 SiO<sub>2</sub> 后土体黏聚力均有不同程度降低,但内摩擦角均有较大幅度提升,黏性土的抗剪强度由黏聚力和内摩擦角决定,由于黏聚力减小的幅度小于内摩擦角增大的幅度,故总体表现为抗剪强度的显著增大。

### 2.3 干密度变化规律

不同含盐量盐渍土的击实曲线(图 4)表明,相比于不含盐土,含盐土的击实曲线较为尖凸,土体最优含水量有所减小,盐渍土击实曲线整体随着含盐量的增加呈上升趋势。当含盐量为 0.5%、1%、2%、3%、4%时,盐渍土最大干密度依次提升了 0.9%、2.5%、2.7%、4.8%、4.4%。

在盐渍土试样中加入纳米 SiO<sub>2</sub> 后,盐渍土的击实特性会受到较大影响(图 5)。不同含盐量盐渍土击实曲线变化趋势相近,其最优含水率均随着纳米 SiO<sub>2</sub> 掺入量的增大而增大,最大干密度则有显著下降;当含盐量一定时,随着纳米 SiO<sub>2</sub> 掺入量的增加,特定含水量下盐渍土干密度呈递减趋势,曲线峰值则逐渐向右移

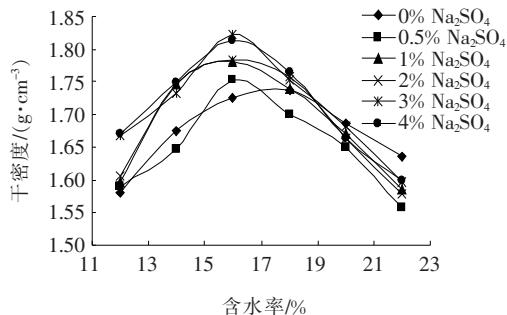


图 4 不同含盐量硫酸盐渍土击实曲线

动。1%和 3%含盐量盐渍土在纳米 SiO<sub>2</sub> 掺入量为 1%、2%、3%时,最大干密度分别依次下降了 4.2%、6.0%、13.5%和 3.9%、6.7%、17.7%。

### 2.4 渗透系数

含盐量和纳米 SiO<sub>2</sub> 含量的增加,均会造成盐渍土渗透系数变差。如图 6(a)所示,黏土渗透系数随含盐量增大而逐渐下降,1%~4%含盐量盐渍土渗透系数分别下降了 6.4%、16.7%、25.6%、41.0%。根据图 6(b)可知:3%含盐量盐渍土渗透系数随纳米 SiO<sub>2</sub> 含量增加而下降明显,随着纳米 SiO<sub>2</sub> 含量从 1%增加到 4%,渗透系数分别下降了 14.0%、19.3%、54.4%、68.4%,即纳米 SiO<sub>2</sub> 对降低盐渍土渗透系数效果显著。

### 2.5 盐胀抑制

在 32.4℃以下,随着温度降低,硫酸钠溶液溶解度迅速下降,并伴随着十水硫酸钠晶体的析出[图 7(a)]。

所以,硫酸盐渍土盐胀率随着含盐量增加而增大[图 7 (b)],3%含盐量的盐渍土盐胀率达到最大 0.579%。但

当掺入 2%含量的纳米 SiO<sub>2</sub> 后,盐渍土盐胀得到明显抑制,可见,纳米 SiO<sub>2</sub> 抑制盐胀效果显著。

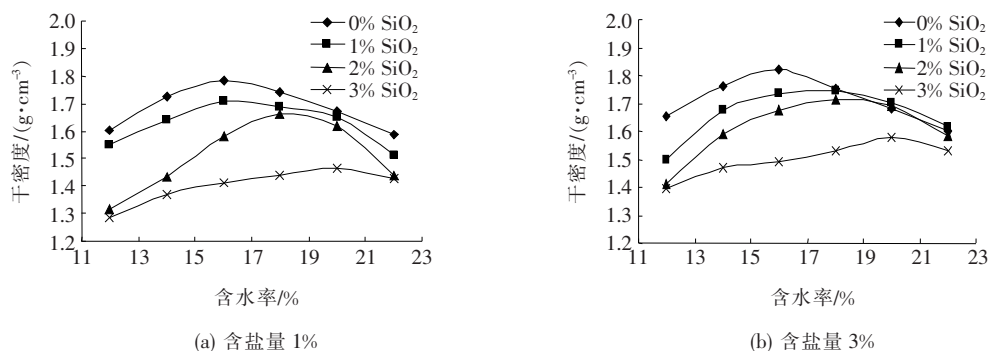


图 5 不同含盐量与不同纳米 SiO<sub>2</sub> 掺入量下盐渍土击实曲线

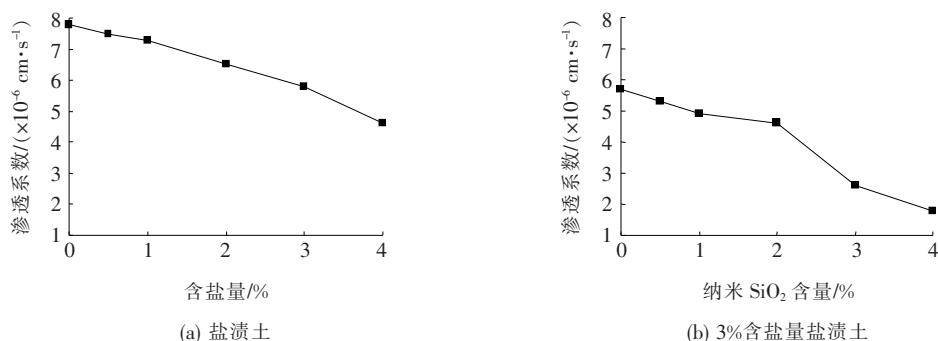


图 6 含纳米 SiO<sub>2</sub> 和硫酸钠盐渍土渗透系数与含盐量的关系曲线

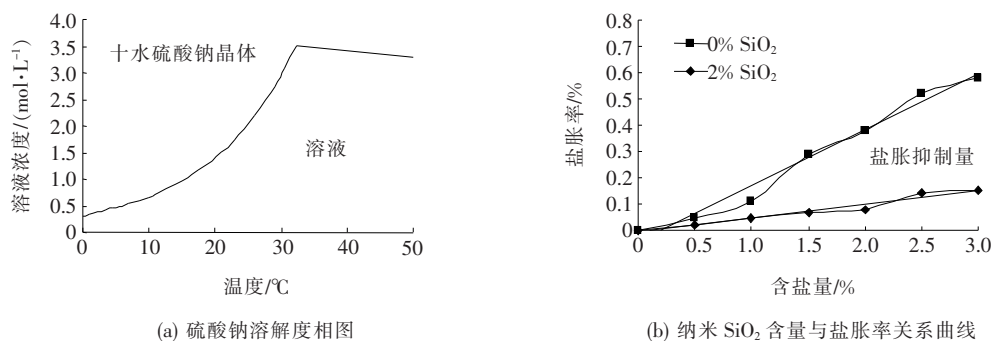


图 7 硫酸钠溶解度相图及纳米 SiO<sub>2</sub> 抑制盐胀图

### 3 讨论

#### 3.1 盐渍土物理特性与含盐量关系

可溶盐硫酸钠的存在,使得黏土颗粒附近溶液中充满钠离子,钠离子具有吸水性即水化,水化钠离子被带负电的黏粒吸引而在其表面形成较厚的反离子层,黏粒的扩散层厚度增大,使得土体吸附弱结合水增多,液塑限增大。

较厚的反离子层一方面导致黏粒间的距离增大,土体黏聚力减小;另一方面导致土颗粒间内摩擦角减小,

故盐渍土抗剪强度减小。但含盐量较大时,黏粒附近溶液中的一个硫酸钠分子会结合 10 个水分子,析出  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  晶体并带走大量水分,黏粒表面反离子层厚度变薄,并且析出的盐晶会填充土中空隙,充当部分骨架,表现为黏聚力、内摩擦角以及抗剪强度的增大。

伴随着含盐量增大时土粒间内摩擦角减小,则有利于土颗粒受力时的相对错动,在相同击实功条件下,盐渍土更加密实,干密度增大;但含盐量过大时会析出盐晶体,消耗大量土中空隙水,土颗粒表面水膜变薄,不利于相对错动,干密度减小。盐渍土干密度的增大及盐晶体的析出则导致土中空隙的体积减小,空隙连



通性减弱,盐渍土渗透性降低。

### 3.2 纳米 $\text{SiO}_2$ 改变盐渍土物理特性

图 8(a)、(b)表明,相比于非纳米土,纳米土样中有大量以纳米  $\text{SiO}_2$  为核形成的黏土聚团。这些大小不一的黏土聚团分散于土体孔隙中,减小了土中孔隙的孔径,土中孔隙的连通性变差,从而降低了盐渍土的渗透系数。

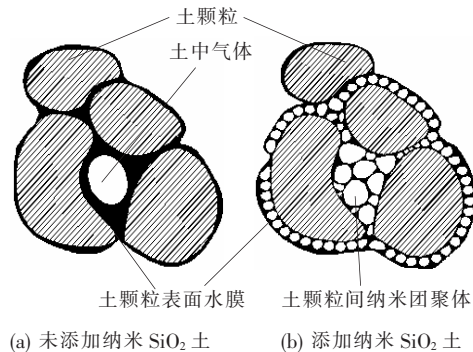


图 8 纳米土与非纳米土对比

纳米  $\text{SiO}_2$  密度较小,堆积密度仅为  $0.057 \text{ g/cm}^3$ 。随着其掺入量的增大,土颗粒单位体积含量逐渐减少,以纳米  $\text{SiO}_2$  为核形成的黏土聚团增多,土样呈现蓬松状,且土体较干燥,难以被击实,故最大干密度随着掺入量的增加而减小。

## 4 结论

根据对硫酸盐渍土进行的物理特性、盐胀测试及改良试验,得出以下结论:

(1) 随着硫酸钠盐渍土含盐量的增加,其液塑限总体呈现增大的特征,但增幅较小;最大干密度逐渐增大,但在含盐量大于 3% 后,会有盐晶体析出导致最大干密度减小。

(2) 黏聚力、内摩擦角和抗剪强度随含盐量增大均呈现先减小后增大的变化特征;但盐渍土渗透系数却随着盐分增多而减小。

(3) 纳米  $\text{SiO}_2$  会显著提高硫酸盐渍土的液塑限、抗剪强度,但同时也会造成盐渍土干密度迅速降低。

(4) 添加纳米  $\text{SiO}_2$ ,减小了土中渗透系数,使得盐胀被有效抑制。

### 参考文献:

[1] GB 50021—2001 岩土工程勘察规范[S].  
[2] 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,2003(10).  
[3] 邴慧,何平.不同冻结方式下盐渍土水盐重分布规律的试

验研究[J].岩土力学,2011(8).

[4] 包卫星,张莎莎.路用砂类盐渍土盐胀及融陷特性试验研究[J].岩土工程学报,2016(4).  
[5] 任秀玲,张文,刘昕,等.西北地区盐渍土盐胀特性研究进展与思考[J].土壤通报,2016(1).  
[6] 文桃,曹亚鹏,应赛,等.多次冻融循环下硫酸盐渍土盐—冻胀特性试验研究[J].中外公路,2018(2).  
[7] 徐学祖,王家澄,张立新.冻土物理学[M].北京:科学出版社,2001.  
[8] 张飞,胡小庆,刘亚薇,等.含盐量对硫酸盐渍土抗剪强度影响试验研究[J].铁道建筑,2014(6).  
[9] 付江涛,栗岳洲,胡夏嵩,等.含盐量对亚硫酸盐渍土抗剪强度影响的试验[J].农业工程学报,2016(6).  
[10] 文桃,米海珍,杨鹏,等.硫酸盐渍土击实性能及影响因素试验研究[J].岩土力学,2015(7).  
[11] 张伟,陈正汉,黄雪峰,等.硫酸盐渍土的力学和细观特性试验研究[J].建筑科学,2012(1).  
[12] 文桃,米海珍,马连生,等.硫酸钠盐渍土击实特性与压实度评价试验研究[J].岩土力学,2016(12).  
[13] 邴慧,武俊杰,邓津.黄土状盐渍土洗盐前后物理力学性质的变化[J].冰川冻土,2011(4).  
[14] 钱晓明,张卫兵,郑子昂,等.冻融条件下硫酸盐渍土强度特性试验研究[J].中外公路,2018(1).  
[15] 陈炜韬,王鹰,王明年,等.冻融循环对盐渍土黏聚力影响的试验研究[J].岩土力学,2007(11).  
[16] 邓友生,何平,周成林,等.含盐土渗透系数变化特征的试验研究[J].冰川冻土,2006(5).  
[17] 吴道勇,赖远明,马勤国,等.季节冻土区水盐迁移及土体变形特性模型试验研究[J].岩土力学,2016(2).  
[18] 肖泽岸,赖远明,尤哲敏.冻融循环作用下含盐量对  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  土体变形特性影响的试验研究[J].岩土工程学报,2017(5).  
[19] TAHA M R,TAHA O M E. Influence of Nano—Material on the Expansive and Shrinkage Soil Behavior[J]. Journal of Nanoparticle Research,2012,14(10):13.  
[20] Liu Mingle,Zhou Zonghui,Zhang Xiuzhi, et al. The Synergistic Effect of Nano—Silica with Blast Furnace Slag in Cement Based Materials[J]. Construction and Building Materials,2016. 126: 624—631.  
[21] Ren Xiaochuan, Hu Kai. Effect of Nano—Silica on the Physical and Mechanical Properties of Silty Clay[J]. Nanoscience and Nano—Technology Letters, 2014, 6(11): 1 010—1 013.  
[22] 黄娟,韩雪.纳米改性路用混凝土抗盐冻性能试验研究[J].中外公路,2018(2).  
[23] 张洪亮,王黎,赵金东.盐渍土地区混凝土结构的耐硫酸盐腐蚀研究[J].中外公路,2016(3).  
[24] 袁聚云,徐超,赵春风.土工试验与原位测试[M].上海:同济大学出版社,2004.