

DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20220609001

文章编号: 1672-9331(2023)06-0017-10

引用格式: 肖杰, 何光锋, 常锦, 等. AT固化粉土无侧限抗压强度及耐冻融性能研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2023, 20(6): 17-26.

Citation: XIAO Jie, HE Guangfeng, CHANG Jin, et al. Study on unconfined compressive strength and freeze-thaw resistance of AT-solidified silty soil[J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2023, 20(6): 17-26.

AT固化粉土无侧限抗压强度及耐冻融性能研究

肖杰¹, 何光锋^{1,3}, 常锦², 林佳毅¹

(1. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 长沙学院 土木工程学院, 湖南 长沙 410022;
3. 广西新发展交通集团有限公司, 广西 南宁 530029)

摘要:【目的】解决东北地区低液限粉土路基出现的翻浆、冻胀等不良工程问题。【方法】采用一种基于水玻璃的新型三聚磷酸铝(aluminum tripolyphosphate, AT)固化剂对低液限粉土进行改良。对AT固化土开展无侧限抗压强度试验,并将养护了28 d的AT固化土与水玻璃固化土进行对比;开展冻融循环试验,通过X射线衍射(X-ray diffraction, XRD)与扫描电镜(scanning electron microscope, SEM)试验进一步探究了AT固化土强度形成及耐冻融性能的微观机理。【结果】AT固化土的无侧限抗压强度随固化剂掺量、压实度及养护龄期的增加而升高;不同固化剂掺量的AT固化土的无侧限抗压强度在7次冻融循环后趋于平稳;与水玻璃相比,AT固化剂能产生更多的凝胶物质,反应所产生的硅酸凝胶、硅酸铝盐等能有效改善粉土的耐水性能,增大其无侧限抗压强度。【结论】与水玻璃相比,AT固化剂更能提高粉土的耐冻融性能,AT固化土具有更好的力学性能。

关键词: 三聚磷酸铝固化剂; 低液限粉土; 水玻璃; 无侧限抗压强度; 冻融循环; 微观机理

中图分类号: U416

文献标志码: A

0 引言

低塑性、低强度、低饱和含水率等特性使粉土路基的稳定性受毛细水影响很大,透水能力及黏聚力弱的粉土路基容易发生液化,粉土液化会对地面建筑物产生巨大的危害,而采取工程措施改良土体性质是避免工程结构破坏的有效措施^[1-3]。季节性冰冻地区分布广泛,季节性冻融粉土路基易产生冻胀、翻浆等破坏,如采用弃土换填,则会对环境造成污染,增加工程建设成本,因此对土壤进行改良和提高季节性冻融区粉土路基的耐冻融性能具有很大的实际意义^[4-5]。

水玻璃具有黏聚力高、来源广、价格低、无毒且污染小等优点,非常符合建设绿色环保工程的理念^[6]。水玻璃用于改良土体早有研究,且已取得了一些研究成果^[7-15]。近几年来,许多学者开展了水玻璃联合其他材料增强粉土力学性能方面的

研究^[15-19],如朱文旺等^[16]研究发现石灰联合水玻璃对粉土的改良效果良好;崔伟等^[17]使用水泥、石灰、水玻璃、黏土等改性材料联合改良低液限粉土,发现掺量较小的水玻璃就能大幅度提高粉土的抗压强度;董金梅等^[18]发现聚丙烯酰胺(polyacrylamide, PAM)联合硅酸钠能明显提高粉土的力学性能,使粉土的水稳定性得到了加强;CUI等^[19]发现纳米二氧化硅可通过凝胶键的合并填充土壤颗粒间的孔隙,从而改善粉土的黏聚力。

用普通的水玻璃加固粉土绿色环保,可增强粉土的黏聚力和胶结能力,但是存在着固化反应不完全和老化的问题,即随着储存时间的增长,粉土的黏聚力和胶结能力会变弱,因而固化后的粉土强度得不到保障^[10]。目前,往水玻璃中掺加固化剂或者对水玻璃进行改性的效果不够理想,有些固化剂材料还会对人体和环境产生危害,同时存在工程应用困难的问题^[20]。因此,水玻璃的改性研究受到部分学者的关注^[20-21],他们通过研究

收稿日期: 2022-06-09; 修回日期: 2022-07-13; 接受日期: 2022-07-16

基金项目: 湖南省科技计划项目(2018TP2038); 中交第四公路工程有限公司项目(20190810000)

通信作者: 肖杰(1981—)(ORCID: 0000-0001-8323-7756), 男, 副教授, 主要从事特殊路基稳定与加固方面的研究。

E-mail: xiaojie324@csust.edu.cn

发现高聚合度缩合磷酸铝能提高水玻璃胶泥的强度^[21],而聚合磷酸铝水玻璃固化剂具有无毒、生产过程无污染、易凝、不会早凝等优点^[22]。因此本文对新型三聚磷酸铝(aluminum tripolyphosphate, AT)固化剂和水玻璃改良土的无侧限抗压强度和耐冻融特性进行研究。

本文采用AT固化剂改良低液限粉土,研究不同固化剂掺量、水玻璃模数、压实度及养护龄期对AT固化土试样无侧限抗压强度的影响,在养护28 d后,将AT固化土试样的无侧限抗压强度与水玻璃固化土试样的进行对比分析;模拟吉林松原当地的冻融条件,对用两种固化剂固化的低液限粉土

的耐冻融特性进行对比分析,用微观试验分析其强度形成机理,探讨AT固化剂对低液限粉土试样无侧限抗压强度与耐冻融特性的影响。

1 材料与试验

1.1 原材料

试验用土取自吉林省松原市乾安县内G503平交处,其基本物理指标见表1。固化剂采用模数为2.5、3.3的AT固化剂(主要成分为水玻璃、三聚磷酸铝和磷酸硅)。

表1 低液限粉土的基本物理指标

Table 1 Basic physical indexes of low liquid limit silt

含水率/%	最大干密度 $\rho_d/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	比重	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_p/\%$	塑性指数 I_p	砂粒含量/%	粉粒含量/%	黏粒含量/%
16	1.87	2.63	21.5	12.2	9.3	7.96	84.33	7

1.2 试样制备

按照规范《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E51—2009)中圆柱形试样的制作方法制备试样,其规格为 $\varnothing 50\text{ mm}\times 50\text{ mm}$,如图1所示。脱模后将试样置于室内通风干燥处自然养护(温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$,湿度在 $70\%\pm 5\%$)。



图1 固化低液限粉土试样

Fig. 1 Solidified low liquid limit silt samples

1.3 试验方案

无侧限抗压强度试验:根据《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)的要求,采用应变控制式无

侧限抗压强度仪,按照细粒土无侧限抗压强度试验步骤进行试验,试验方案见表2。

冻融循环试验:模拟吉林松原当地的冻融条件,参考吉林当地春季日均最低气温 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和春季日均最高气温 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$,将试样冻结、融化温度分别设定为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。将试样置于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的恒温冰柜内冻结12 h后,再将其置于 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的恒温烘箱中融化12 h,如此为1次冻融循环试验,共做10次冻融循环试验。记录每次试验的试样质量并测量试样体积变化,在冻融循环次数为1、5、7、10次时,分别对试样进行无侧限抗压强度试验。

X射线衍射(X-ray diffraction, XRD)试验:分别对素土、5%水玻璃固化土、5%AT固化土进行试验分析,测定和判断土体中新增的矿物组成成分,以便于对比分析。试验样品均取自无侧限抗压强度试验后试样的中间部分。

扫描电镜(scanning electron microscope, SEM)试验:选取冻融循环试验前和10次冻融循环试验后的试样,均放大1 000倍进行对比分析。

表2 无侧限抗压强度试验方案

Table 2 The unconfined compressive strength test scheme

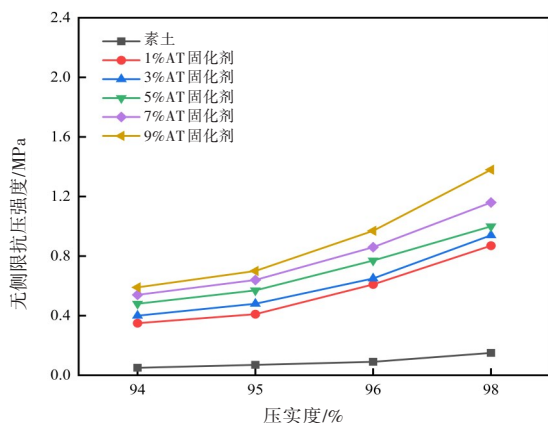
试样	固化剂模数	压实度/%	AT固化剂掺量/%	水玻璃掺量/%	养护龄期/d
AT固化土	2.5	94、95、96、98	1、3、5、7、9		3、7、28
	3.3				28
素土		94、95、96、98			
水玻璃固化土	2.5	94、95、96、98		1、3、5、7、9	28
	3.3				

2 固化土无侧限抗压强度及其微观结构特征

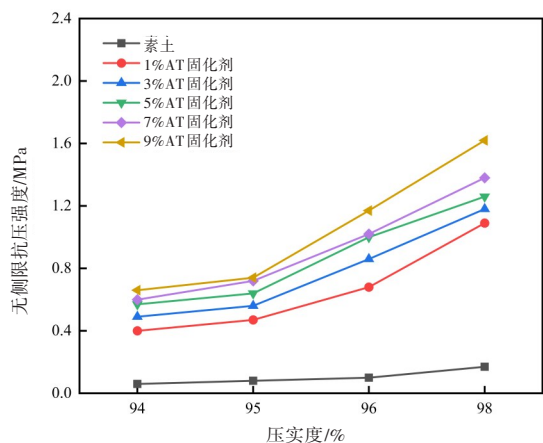
2.1 AT固化剂掺量及压实度对固化土无侧限抗压强度的影响

采用水玻璃模数为2.5的AT固化剂,对不同压实度(94%、95%、96%、98%)、不同养护龄期(3、7、28 d)的固化土试样进行无侧限抗压强度试验,结果如图2所示。

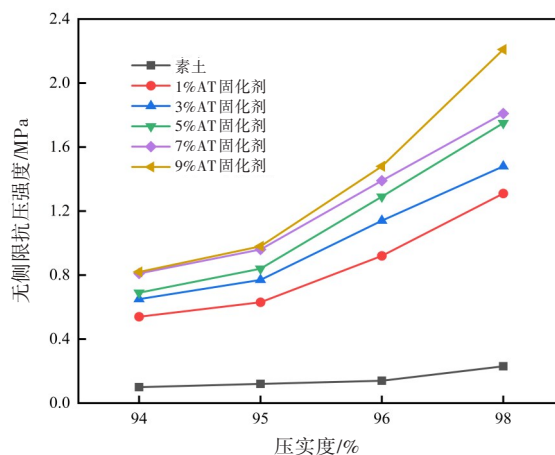
由图2可知,试样的无侧限抗压强度随AT固化剂掺量、压实度、养护龄期的增加而增加,当压实度低于96%时,AT固化剂掺量对试样的无侧限抗压强度的影响较小;当压实度大于96%时,试样的无侧限抗压强度显著增大。以AT固化剂掺量为5%、养护28 d后的试样为例,98%压实度试样的无侧限抗压强度分别是94%、95%、96%压实度试样的2.70、2.26、1.49倍。养护龄期对试样的无侧限抗压强度的增长至关重要,试样的无侧限抗压强度随龄期的增长而增大。当压实度高于96%时,随着龄期的增长,试样的无侧限抗压强度



(a) 养护龄期为3 d



(b) 养护龄期为7 d



(c) 养护龄期为28 d

图2 不同养护龄期AT固化土无侧限抗压强度与压实度的关系

Fig. 2 Relationship between unconfined compressive strength and compaction degree of AT-solidified soil at different curing ages

提升得更显著。以AT固化剂掺量为5%的试样为例,养护28 d后压实度为94%试样的无侧限抗压强度分别是养护7、3 d后的1.08、1.28倍;养护28 d后压实度为96%试样的无侧限抗压强度分别是养护7、3 d后的1.29、1.50倍。

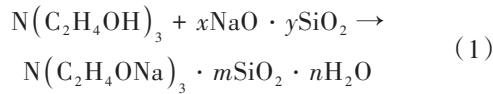
2.2 养护28 d后水玻璃、AT固化土试样无侧限抗压强度对比

养护28 d后固化土试样的无侧限抗压强度达到了最大,对AT、水玻璃固化土试样进行无侧限抗压强度试验,结果如图3所示。

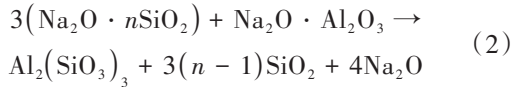
由图3可知,水玻璃和AT固化剂可使低液限粉土试样的无侧限抗压强度有不同程度的提高,两种模数下水玻璃、AT固化土试样的无侧限抗压强度随着压实度及固化剂掺量的增大而增大。当压实度达到96%后,固化剂掺量对试样的无侧限抗压强度影响明显,但在模数、压实度及固化剂掺量相同的情况下,AT固化土试样的无侧限抗压强度都比水玻璃固化土试样的大得多。以固化剂掺量为5%、压实度为96%的固化土试样为例,当固化剂模数为3.3、2.5时,AT固化土试样的无侧限抗压强度分别为水玻璃固化土试样的3.09、3.49倍,说明AT固化剂的改性效果比水玻璃的更好。

与水玻璃相比,AT固化剂的作用机理除水玻璃的脱水结晶外,还与水玻璃和三乙醇胺反应生成的复合晶体,以及水玻璃和偏铝酸钠反应生成的硅酸与硅酸铝盐有关。

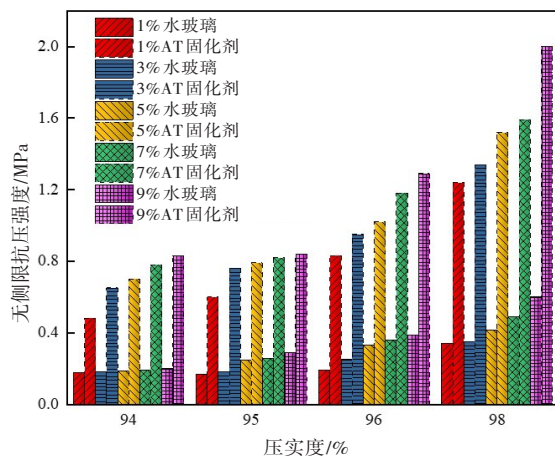
其中,水玻璃与三乙醇胺之间的反应:



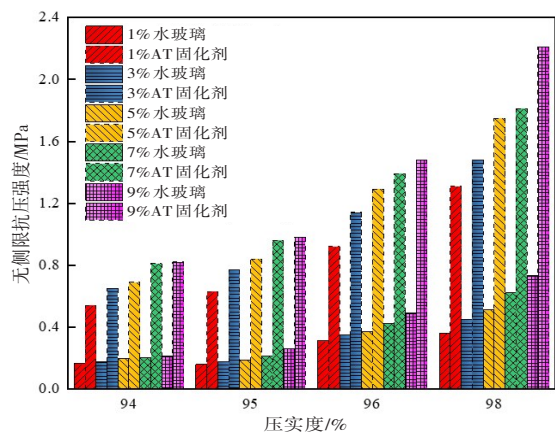
水玻璃与偏铝酸钠在酸性条件下发生的反应:



硅酸中的水分蒸发后,可得到一种多孔的干燥固态凝胶,即常见的二氧化硅凝胶(简称硅胶)。硅胶能够起到胶结土颗粒,提高试样强度的作用。硅酸铝盐则为黏土的主要成分,能够增强低液限粉土的黏聚力,使土样表面不至于因水分蒸发而脱落,有效提高了土体的完整性。



(a) 模数为 3.3



(b) 模数为 2.5

图3 不同模数下水玻璃、AT固化土养护28 d后无侧限抗压强度与压实度的关系

Fig. 3 Relationship between unconfined compressive strength and compaction degree of water glass and AT-solidified soil curing for 28 days under different modules

2.3 养护28 d后不同模数AT固化土试样无侧限抗压强度对比

图4所示为AT固化土养护28 d后无侧限抗压强度与压实度的关系。由图4可知,固化剂模数为2.5的AT固化土具有更高的无侧限抗压强度。这是由于模数较高的固化土,其 Na^+ 含量较低,在硅胶中 Na^+ 的存在能细化基本离子。粒子之间的黏结机制分为表面联结和桥联结两种。由纯硅酸构成的硅胶的一般粒子比较粗大,粒子之间仅存在表面联结,因此其联结强度比钠硅凝胶的低。

固化剂模数越大,固化剂越难溶于水,进而导致施工困难。因此,用模数为2.5的AT固化剂改良低液限粉土效果更好。为保证施工质量,宜采用模数为2.5的AT固化剂。

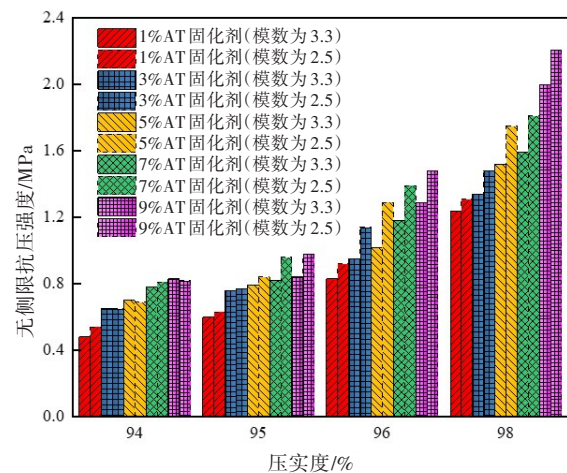


图4 AT固化土养护28 d后无侧限抗压强度与压实度的关系

Fig. 4 Relationship between unconfined compressive strength and compaction degree of AT-solidified soil curing for 28 days

2.4 X射线衍射结果分析

图5所示为素土、5%水玻璃(模数2.5)固化土和5%AT(模数2.5)固化土试样在压实度为96%、养护28 d情况下的3种XRD谱。

试验用土含砂量较大。从图5可看出构成低液限粉土的主要成分为石英、钠长石、微斜长石等。对5%水玻璃固化土而言,钠水玻璃的主要成分为硅酸钠,因为水玻璃溶液的复杂性,硅酸钠实际的表达式为 $\text{Na}_2(\text{H}_2\text{SiO}_4)$ 和 $\text{Na}_2(\text{H}_3\text{SiO}_4)$ 。由于含 SiO_3^{2-} 的盐类比含 $\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$ 和 H_3SiO_4^+ 的盐类要少,且所用5%水玻璃的 Na^+ 含量并不高,钠水玻璃发生反应形成强度后的主要物质为硅酸凝胶。因此,在X射线衍射中,素土与5%水玻璃固化低液

限粉土的图像差别不大。

AT固化剂中的磷酸硅、三聚磷酸钠、偏铝酸钠等添加剂分别与水玻璃反应后生成的主要物质为 $\text{Al}_2(\text{SiO}_3)_3$ 、 AlPO_4 等化合物,还有一些与 Ca^{2+} 、 Na^{+} 生成的化合物,即 $(\text{Na}, \text{Ca})\text{Al}(\text{Si}, \text{Al})_3\text{O}_8$ 。为提高AT固化土的耐水性能,磷酸硅化合物中的 H^{+} 取代了水玻璃

溶液中大量的 Na^{+} ,因而AT固化土试样中含 Na^{+} 的化合物的量较水玻璃试样中的少,见式(4)~(5)。在XRD谱中,与水玻璃固化土相比,AT固化土中微斜长石及石英等成分的波形有明显下降趋势。

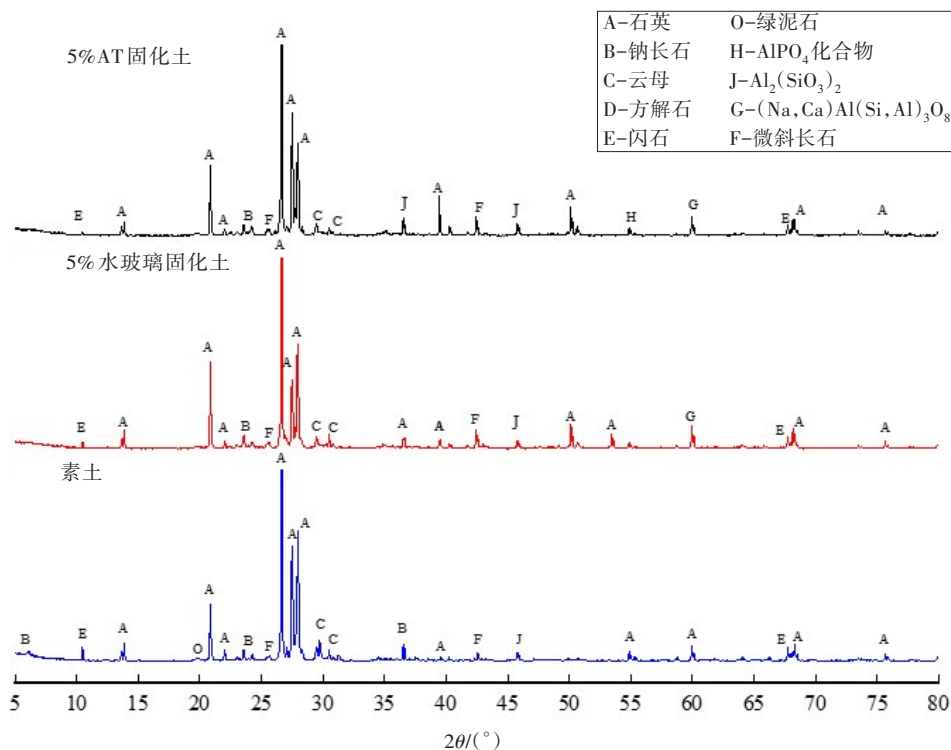
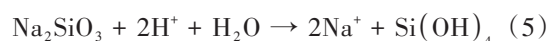
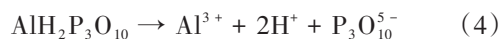


图5 3种样品的XRD谱

Fig. 5 XRD spectra of three samples

3 耐冻融试验研究

3.1 体积胀缩试验

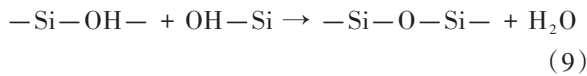
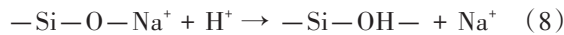
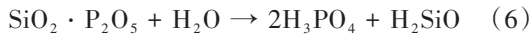
根据无侧限抗压强度试验的分析结果,采用模数为2.5的固化剂,按照压实度96%制备试样。将试样养护28 d后再进行冻融循环试验。不同冻融循环次数下试样的体积变化如图6所示。

根据图6可知,固化剂的掺量对试样的体积变化有很大的影响,1%固化剂掺量下的水玻璃及AT固化土试样的耐冻融性能均较差;当固化剂掺量达到5%时,试样体积的变化幅度才变小;随着水玻璃和AT固化剂掺量的增大,冻融循环对试样体积变化的影响逐渐变小。

与水玻璃固化土相比,AT固化土的耐冻融性能更好。水玻璃固化土强度源自硅酸凝胶的脱

水结晶^[23]。从水玻璃凝胶的吸湿机理可知,钠水玻璃可重新发生水合作用,即基体中的 Na^{+} 与 OH^{-} 吸收水分并侵蚀基体,导致硅氧键断裂并重新溶解。在冻融循环过程中,水玻璃固化土试样在不断地失去和获得水分子,因而所形成的强度是不稳定的。所以若要改善水玻璃凝胶的吸湿性,就要减少基体中易吸收水分的 Na^{+} 与 OH^{-} 。由于 Na^{+} 的亲水性要比 OH^{-} 的强,且其吸湿性取决于 Na^{+} 的数量,因此改善水玻璃凝胶吸湿性的关键在于 Na^{+} 。而在水玻璃凝胶中无法避免 Na^{+} 的存在,降低水玻璃凝胶吸湿性的方法主要有两种,一是取代亲水的 Na^{+} ,二是屏蔽亲水的 Na^{+} 。只要添加相应固化剂,用疏水的基团或离子代替 Na^{+} ,或者增大水玻璃的模数以减少 Na^{+} 的相对含量,最终减弱 Na^{+} 的吸湿性,这样就达到了改善水玻璃凝胶吸湿性的目的。AT固化土抵抗体积收缩的能力主要

源自磷酸硅溶液,其具体的防水机理为:



从式(6)~(9)可以看出,AT固化剂的防水机理是使用 H^+ 代替易引起水解的 Na^+ 。如果固化剂释放 H^+ 的速度过快,会不利于硅胶形成链状聚合物,导致凝聚不均匀,最终使固化后的硅酸盐材料不具备单一的均匀结构,部分吸水离子或化合物残留在硅胶结构中导致硅胶强度降低。因此,需要严格控制 H^+ 的释放速度。

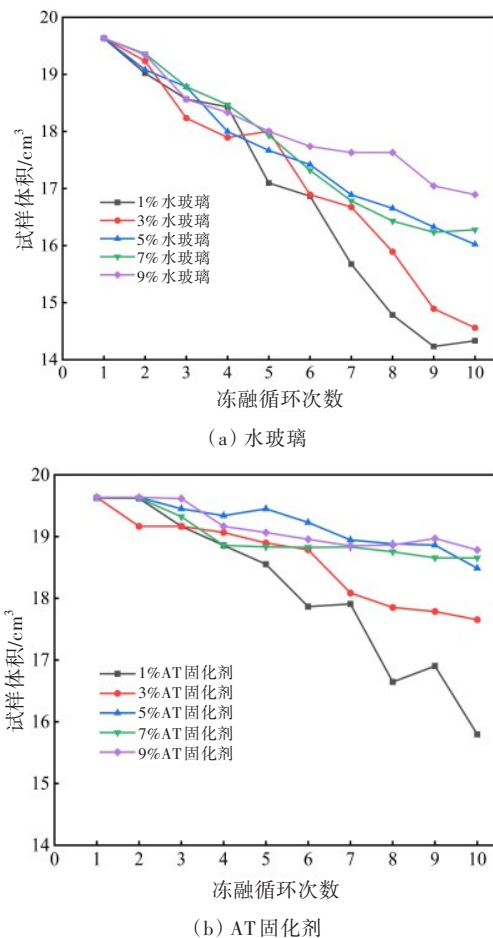


图6 固化土体积随冻融循环次数的变化

Fig. 6 The change of solidified soil volume with the number of freeze-thaw cycles

3.2 质量损失试验

在5次冻融循环后,试样质量才开始明显下降。因此对5、7、10次冻融循环后试样的质量变化进行分析,结果如图7所示。

由图7可知,随着水玻璃、AT固化剂掺量的增

大,试样质量损失率基本在不断降低,且AT固化土的质量损失情况要比水玻璃固化土的好。以掺量5%为例(冻融循环10次),水玻璃固化土的质量损失率约是相同掺量下AT固化土的2倍。

在冻融循环过程中,土体内部的孔隙水压力受温度、冻结速率以及土质等因素的影响较大。在5次冻融循环后,试样质量开始大幅下降。这是由于冻结时试样的初始含水率比最佳含水率小,水分子凝结在试样表面,试样质量增大。在冻结过程中,试样内部温度高于其表层温度,而在融化过程中,试样表层温度高于其内部温度,试样的孔隙水压力随着温度的循环变化而发生着周期性的变化。因此,在冻结过程中,孔隙水压力不断下降,基质吸力不断增加;而在融化过程中,孔隙水压力不断增大,基质吸力不断减弱。温度、孔隙水压力和基质吸力的不断变化,使试样中水分子的分布及冻胀程度不再均匀,进而破坏了土颗粒之间的连接,使土颗粒之间的黏聚力降低。在融化过程中,冻胀土体中的水结晶体融化成水分,而水分流失又使得土体变得疏松,最终试样因表面脱落、掉皮、掉角等而质量下降^[24]。

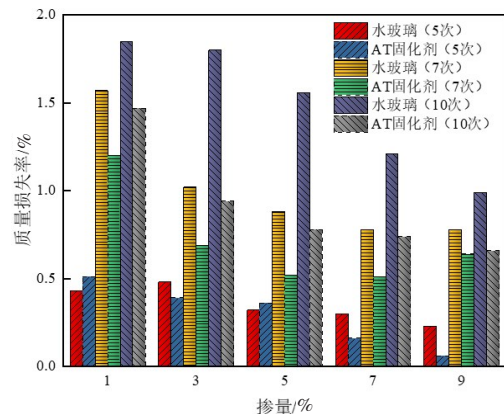


图7 冻融循环后试样的质量变化

Fig. 7 Mass change of samples after freeze-thaw cycles

3.3 冻融循环后的无侧限抗压强度试验

由前文可知,只有当压实度高于96%时,模数为2.5的AT固化剂的改良效果才更好,此时随着AT固化剂掺量的增加,固化土试样在强度方面才表现良好。因此,本研究对固化剂模数为2.5、压实度为96%、养护了28 d的水玻璃和AT固化土试样进行冻融循环对比试验。不同冻融循环次数后的无侧限抗压强度结果如图8所示。

由图8可知,AT固化土的耐冻融性能比水玻璃固化土的更好。当掺量为1%、3%、5%、7%、9%

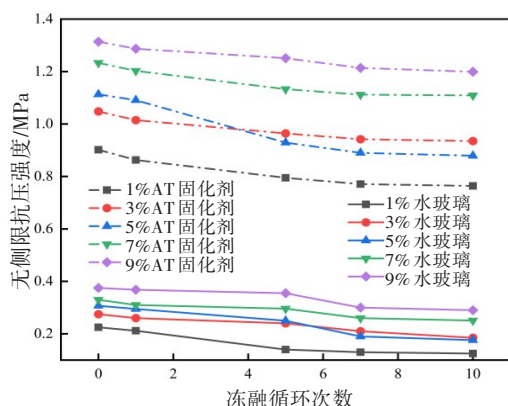


图8 固化土无侧限抗压强度与冻融循环次数的关系

Fig. 8 Relationship between unconfined compressive strength of solidified soil and number of freeze-thaw cycles

时,冻融循环为0次的AT固化土的无侧限抗压强度分别是相应掺量水玻璃固化土的3.99、3.75、3.64、3.72、3.49倍;当冻融循环为10次时,前者分别是后者的5.83、5.10、5.63、4.50、4.13倍。

两种固化土的无侧限抗压强度都随着冻融循环次数的增加而减小。这是因为冻融循环会使试样中的水分重新分布,当试样内部温度高于试样外部温度时,水分子会向试样外部移动,而当试样外部温度高于试样内部温度时,水分子会向试样内部移动,水分的冻结和迁移过程会破坏试样的内部结构,导致试样的稳定性下降;此外,从土体

孔隙角度来讲,当试样冻结时,孔隙中的水分冻结成冰晶并填充了孔隙,土体的含水率越高,冰晶占据的孔隙空间就越大,土体的孔隙率就越小。在冰晶融化时,孔隙逐渐变空,但在水分冻结过程中部分中小孔隙容积增大,导致冻融循环后试样的整体孔隙率增大,多次的冻融循环使这种现象更加明显。孔隙率的增大使试样的结构变得疏松,土颗粒间的黏聚力也逐渐降低,因而试样的无侧限抗压强度有所降低。

3.4 扫描电镜试验

由冻融循环试验结果可知,当固化剂掺量为5%时,AT固化剂对试样强度、土体结构完整性及耐久性的提高尤为明显,故可将5%作为耐冻融循环的最佳掺量。图9为素土、5%水玻璃固化土和5%AT固化土试样冻融循环前后的SEM图像。

通过对比图9(a)、9(c)、9(e)可知,AT固化剂能产生更多的凝胶物质来增强土颗粒之间的黏聚力。上述3种土体试样在经历10次冻融循环后,土颗粒及土颗粒之间的过渡段出现了数量不等的裂缝,其中素土中裂缝数量最多,土体结构受冻融循环的影响最大;水玻璃固化土中的裂缝数量比素土中的少,胶结物质黏附在土颗粒表面,而裂缝已贯穿整个土颗粒;AT固化土的土体结构最为完整,如图9(b)、9(d)、9(f)所示。

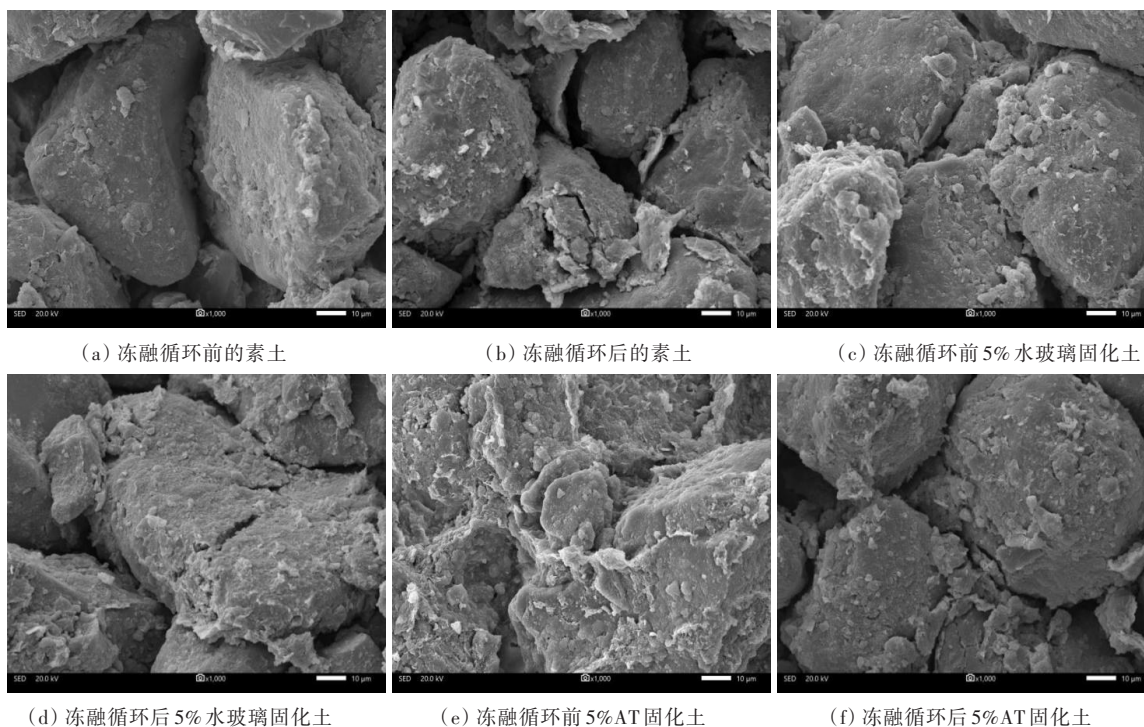


图9 放大1 000倍后的SEM图像

Fig. 9 SEM images after 1 000 times magnification

AT固化剂改善低液限粉土耐冻融性能的机理可分为两个方面:一方面 P_2O_5 以磷氧四面体 $[PO_4]$ 的形式掺入硅氧四面体 $[SiO_4]$ 后,与 SiO_2 共同形成了网络结构,这从一定程度上提高了水玻璃的黏结强度;另一方面,在碱性环境中,缩合磷酸铝缓慢水解释放出了氢离子,氢离子打破了体系的平衡,与碱性环境中的氢氧根离子相结合,促使反应不断进行。在固化过程中水分蒸发有所减少,体系中大量的硅酸凝胶逐渐缩合成“—Si—O—Si—”网状结构,并将土颗粒紧紧包裹其中,缩合磷酸铝释放出的氢离子和水玻璃中的游离碱金属离子结合成一种不溶于水的复盐,从而将游离的碱金属离子固定住,这样形成的凝胶坚硬且具有良好的耐水性。AT固化剂中的高聚物类表面活性剂能改变土颗粒表面的亲水性质,其利用聚合物的交联形成立体结构并包裹、胶结土颗粒。胶结物质能够在一定程度上保留住大颗粒上剥落的破碎物质,还能够填补因小颗粒破碎形成的孔隙,因此AT固化剂在一定程度上能够有效提高冻融循环后土体的耐久性及其完整性。

4 结论

1) AT固化土的无侧限抗压强度随着固化剂掺量、压实度及养护龄期的增加而增加,在压实度低于96%时,增大固化剂掺量对无侧限抗压强度的影响不大,在压实度达到96%之后,试样无侧限抗压强度提高得尤为明显。

2) AT固化剂及水玻璃都能使低液限粉土的无侧限抗压强度得以提高,但当模数、压实度及固化剂掺量相同时,AT固化土的无侧限抗压强度比水玻璃固化土的大得多。

3) 与水玻璃固化土相比,AT固化土的耐冻融性能更强;在冻融循环10次后,掺量为5%的AT固化土的无侧限抗压强度为相同掺量的水玻璃固化土的5.63倍。

4) SEM及XRD试验结果表明,与水玻璃相比,AT固化剂能产生更多的凝胶物质,致使试样颗粒更致密。AT固化剂所形成的强度除来自硅酸凝胶脱水结晶外,反应所形成的 $N(C_2H_4ONa)_3 \cdot mSiO_2 \cdot nH_2O$ 晶体、硅酸凝胶、硅酸盐胶体、硅酸铝盐能进一步改善低液限粉土的水稳定性,提高土体的强度。

[参考文献]

- [1] 刘铭杰,彭丽云.改良粉土在高速公路路基中的适用性研究[J].建筑结构,2020,50(增刊2):809-814.
LIU Mingjie, PENG Liyun. Study on the applicability of improved silt in highway subgrade [J]. Building Structure, 2020, 50(sup 2): 809-814.
- [2] 朱志铎,彭宇一,张文超,等.高等级公路粉土路基毛细水处治的试验研究[J].岩土工程学报,2011,33(增刊1):52-55.
ZHU Zhiduo, PENG Yuyi, ZHANG Wenchao, et al. Experimental study on capillary water in silty subgrade of highway [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(sup 1): 52-55.
- [3] 朱登元,管延华.毛细水作用对粉土路基稳定性的影响[J].山东大学学报(工学版),2012,42(1):93-98.
ZHU Dengyuan, GUAN Yanhua. The influence of capillary water action on the embankment stability of a silt embankment [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2012, 42(1): 93-98.
- [4] 王海波,赵志峰,张甜.季节性冻融对滞洪区改良路基性能的影响[J].南京林业大学学报(自然科学版),2016,40(3):156-162.DOI: 10.3969/j.issn.1000-2006.2016.03.026.
WANG Haibo, ZHAO Zhifeng, ZHANG Tian. Performance of improved soil subgrade under freeze-thaw cycles in flood retarding basin [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2016, 40(3): 156-162. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2006.2016.03.026.
- [5] KRAINIUKOV A, LIU J K, KRAVCHENKO E, et al. Performance of silty sand reinforced with aqueous solution of polyvinyl alcohol subjected to freeze-thaw cycles[J]. Cold Regions Science and Technology, 2020, 174: 103054. DOI: 10.1016/j.coldregions.2020.103054.
- [6] 李夏,徐军哲,刘人太,等.新型酸性水玻璃注浆材料的研究与应用[J].隧道建设,2017,37(10):1296-1302.
LI Xia, XU Junzhe, LIU Rentai, et al. Study and application of a new acid water glass grouting material [J]. Tunnel Construction, 2017, 37(10): 1296-1302.
- [7] 吕擎峰,申贝,王生新,等.水玻璃固化硫酸盐渍土强度特性及固化机制研究[J].岩土力学,2016,37(3):687-693,727.DOI: 10.16285/j.rsm.2016.03.010.
LYU Qingfeng, SHEN Bei, WANG Shengxin, et al. Strength characteristics and solidification mechanism of sulphate salty soil solidified with sodium silicate [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(3): 687-693, 727. DOI: 10.16285/j.rsm.2016.03.010.
- [8] 鲍捷,方祥位,申春妮,等.电场作用下水玻璃改良膨胀土正交试验研究[J].地下空间与工程学报,2019,15(6):1630-1638.

- BAO Jie, FANG Xiangwei, SHEN Chunni, et al. Orthogonal test study on the improvement of expansive soil by sodium silicate under electric field[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(6): 1630-1638.
- [9] 周超云,汪时机,李贤,等.水玻璃和玻璃纤维联合改良砂质黏性紫色土抗剪强度研究[J].土壤学报,2019, 56(3):592-601.DOI:10.11766/trxb201807090330.
- ZHOU Chaoyun, WANG Shiji, LI Xian, et al. Shearing strength of sandy clayey purple soil reinforced with sodium silicate and glass fiber in combination[J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, 56(3): 592-601. DOI: 10.11766/trxb201807090330.
- [10] 杨磊.水玻璃复配改良膨胀土的试验研究[J].水力发电,2015,41(4):91-94.
- YANG Lei. Experimental study on the modification of expansive soil with sodium silicate compounds [J]. Water Power, 2015, 41(4): 91-94.
- [11] 吕擎峰,孟惠芳,王生新,等.改性水玻璃固化盐渍土强度及冻融循环耐久性试验研究[J].北京工业大学学报,2017,43(1):108-112. DOI: 10.11936/bjtxb2016070045.
- LYU Qingfeng, MENG Huifang, WANG Shengxin, et al. Research of strength and freezing-thawing durability of saline soil solidified by modified sodium silicate[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2017, 43(1): 108-112. DOI: 10.11936/bjtxb2016070045.
- [12] 康靖宇,王保田,单熠博,等.水玻璃改良膨胀土的室内试验研究[J].科学技术与工程,2019,19(5):267-271.DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2019.05.041.
- KANG Jingyu, WANG Baotian, SHAN Yibo, et al. Experimental study on the improvement of expansive soil by sodium silicate [J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(5): 267-271. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2019.05.041.
- [13] 陈辉.水玻璃固化硫酸盐渍土三轴试验研究[D].兰州:兰州大学,2018.
- CHEN Hui. Study on triaxial tests of water glass solidified sulphuric acid saline soil [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2018.
- [14] 孙婧,陈海洋,刘畅,等.极旱荒漠区超氯盐渍土固化的试验研究[J].信阳师范学院学报(自然科学版),2018,31(2):281-285. DOI: 10.3969/j.issn.1003-0972.2018.02.021.
- SUN Jing, CHEN Haiyang, LIU Chang, et al. Experimental study on curing of ultra-chloride saline soil in arid desertification area [J]. Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition), 2018, 31(2): 281-285. DOI: 10.3969/j.issn.1003-0972.2018.02.021.
- [15] HUANG Z J, ZHOU Q H, LIU Z J, et al. Study on unconfined compressive strength of zinc contaminated soil solidified by magnesium phosphate cement under acid rain [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 719(4): 042033. DOI: 10.1088/1755-1315/719/4/042033.
- [16] 朱文旺,张文慧,姜冲,等.石灰和水玻璃共同改良粉土试验研究[J].长江科学院院报,2017,34(10):91-94. DOI: 10.11988/ckyyb.20160708.
- ZHU Wenwang, ZHANG Wenhui, JIANG Chong, et al. Experimental study on silt improved by lime and sodium silicate [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2017, 34(10): 91-94. DOI: 10.11988/ckyyb.20160708.
- [17] 崔伟,吕高航,刘春阳.低液限粉土的力学性能改善及试验分析[J].科学技术与工程,2018,18(8):302-306. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2018.08.050.
- CUI Wei, LYU Gaohang, LIU Chunyang. Experimental analysis on mechanical properties improvement of low liquid limit silt [J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(8): 302-306. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2018.08.050.
- [18] 董金梅,朱华,边疆,等.高分子材料改性粉土力学特性试验研究及机制探讨[J].岩石力学与工程学报,2014,33(增刊2):4326-4333. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2014.s2.117.
- DONG Jinmei, ZHU Hua, BIAN Jiang, et al. Experimental research on mechanics characteristics and mechanism of silty soil modified by polymer material [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(sup 2): 4326-4333. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2014.s2.117.
- [19] CUI H Z, JIN Z Y, BAO X H, et al. Effect of carbon fiber and nanosilica on shear properties of silty soil and the mechanisms [J]. Construction and Building Materials, 2018, 189: 286-295. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.08.181.
- [20] 荣驰,陈卫忠,袁敬强,等.新型水玻璃-酯类注浆材料及其固沙体特性研究[J].岩土力学,2020,41(6):2034-2042. DOI: 10.16285/j.rsm.2019.1388.
- RONG Chi, CHEN Weizhong, YUAN Jingqiang, et al. Study on new sodium silicate-ester grouting material and its properties of grouted-sand [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(6): 2034-2042. DOI: 10.16285/j.rsm.2019.1388.
- [21] 杨杰.固相法制备高聚合度缩合磷酸铝及其在水玻璃胶泥中的应用研究[D].南宁:广西大学,2012.
- YANG Jie. Study on solid phase preparation of high degree of polymerization of condensed aluminum phosphate and its application in sodium silicate cement [D]. Nanning: Guangxi University, 2012.
- [22] 袁爱群,黄平.聚合磷酸铝水玻璃固化剂及应用[J].

- 四川化工与腐蚀控制, 1999, 2(3): 9-11.
- YUAN Aiqun, HUANG Ping. Polyaluminum phosphate sodium silicate curing agent and its application [J]. Sichuan Chemical Industry, 1999, 2(3): 9-11.
- [23] 杜天玲, 刘英, 于咏妍, 等. 水玻璃对粉煤灰矿渣地聚合物强度的影响及激发机理[J]. 公路交通科技, 2021, 38(1): 41-49. DOI: 10.3969/j. issn. 1002-0268.2021.01.006.
- DU Tianling, LIU Ying, YU Yongyan, et al. Influence of sodium silicate on fly ash slag geopolymer strength and stimulating mechanism [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2021, 38(1): 41-49. DOI: 10.3969/j. issn. 1002-0268.2021.01.006.
- [24] 郭洁, 彭晖. 矿渣-偏高岭土聚物抗压强度影响因素研究[J]. 交通科学与工程, 2022, 38(3): 33-39. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022.03.007.
- GUO Jie, PENG Hui. Study on the influence factors of compressive strength of slag-metakaolin-based geopolymer [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2022, 38(3): 33-39. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022.03.007.

Study on unconfined compressive strength and freeze-thaw resistance of AT-solidified silty soil

XIAO Jie¹, HE Guangfeng^{1,3}, CHANG Jin², LIN Jiayi¹

(1. School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

2. School of Civil Engineering, Changsha University, Changsha 410022, China;

3. Guangxi New Development Traffic Group Co., Ltd., Nanning 530029, China)

Abstract: [Purposes] The paper aims to solve the poor engineering problems such as slurry turning and frost heave in the low liquid limit silt roadbed in the Northeast China. [Methods] A new type of aluminum tripolyphosphate (AT) curing agent based on water glass was used to improve the low liquid limit silt. The unconfined compressive strength test was carried out on the AT-solidified soil and compared with the water glass-solidified soil under the condition of curing for 28 days. Simultaneously, the freeze-thaw cycle test was carried out. Additionally, X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscope test (SEM) further explored the microscopic mechanism of its strength formation and freeze-thaw resistance. [Findings] The unconfined compressive strength of AT-solidified soil increases with the increase of the curing agent content, the compaction degree and the curing age; the unconfined compressive strength of AT-solidified soil with different curing agent contents tends to be stable after 7 times of the freeze-thaw cycle; compared with water glass, AT curing agent can produce more silicic acid gel and aluminum silicate produced by the reaction can effectively improve the water resistance and the unconfined compressive strength of the silt. [Conclusions] Compared with water glass, AT curing agent can improve the freeze-thaw resistance of silt, and AT-solidified soil has better mechanical properties.

Key words: aluminum tripolyphosphate curing agent; low liquid limit silt; water glass; unconfined compressive strength; freeze-thaw cycle; microscopic mechanism

Manuscript received: 2022-06-09; **revised:** 2022-07-13; **accepted:** 2022-07-16

Foundation item: Project (2018TP2038) supported by Hunan Science and Technology Program; Project (20190810000) supported by CCCC Fourth Highway Engineering Bureau Co., Ltd.

Corresponding author: XIAO Jie (1981—)(ORCID: 0000-0001-8323-7756), male, associate professor, research interesting: special soil roadbed stabilization and reinforcement. E-mail: xiaojie324@csust.edu.cn

(责任编辑:石月珍;校对:刘平;英文编辑:吴高桥)