

doi:10.3969/j.issn.1674-4764.2012.05.017

## 冻融对 AS 型固化剂改良土工程特性的影响

王天亮<sup>1a,1b</sup>, 张丽玲<sup>2</sup>, 刘尧军<sup>1a,1b</sup>, 卜建清<sup>1a,1b</sup>

(1. 石家庄铁道大学 a. 土木工程学院; b. 道路与铁道工程安全保障省部共建教育部重点实验室, 石家庄 050043;

2. 天大卓然设计院, 石家庄 050040)

**摘要:**通过室内动静三轴试验,研究了 Aught-Set(AS)型土壤固化剂改良土的抗冻融耐久性,分析了 AS 型固化剂改良土的应力应变关系、静强度、动模量和临界动应力与龄期、冻融次数以及冷却温度等影响因素的相互关系。结果表明,试样的 7 d 无侧限抗压强度达到 28 d 的 75%;AS 型固化剂改良土的应力-应变关系为应变软化型曲线,呈脆性破坏形式;其静强度、临界动应力以及动回弹模量均随冻融次数增加呈指数形式衰减,且经历 6 次冻融后均趋于稳定;同一动应力水平下,冻融作用使得试样的累积塑性变形由变形稳定状态向变形破坏过渡;试样在经历多次冻融循环以后,负温越低对试样的力学特性影响越小。

**关键词:**冻融循环;AS 型土壤固化剂;应力应变关系;临界动应力;动模量

**中图分类号:**TU411.8 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2012)05-0109-07

## Influences on Engineering Properties of AS Firming Agent Modified Soil by Freeze-thaw Cycles

WANG Tianliang<sup>1a,1b</sup>, ZHANG Liling<sup>2</sup>, LIU Yaojun<sup>1a,1b</sup>, BU Jianqing<sup>1a,1b</sup>

(1a. School of Civil Engineering, 1b. Key Laboratory of Roads and Railway Engineering Safety Control of Ministry of Education,

Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, P. R. China;

2. Tianda Zhuoran Design Office, Shijiazhuang 050040, P. R. China)

**Abstract:** To study the freeze-thaw durability of Aught-Set (AS) firming agent modified soil, a series of triaxial tests were conducted. The mutual relationships between stress-strain relationship, static strength, dynamic modulus and critical dynamic stress of AS firming agent modified soil and curing time, freeze-thaw cycles, cooling temperature were deeply analyzed. The results show that the unconfined compressive strength of 7 d is 75% than that of 28 d. The stress-strain curves of AS firming-agent modified soil are strain-softening and in brittle failure shape. The static strength, critical dynamic stress and resilient modulus decrease in exponential form with the increase of freeze-thaw cycles, and after 6 cycles of freezing and thawing, the trend is stable. Under the same dynamic stress, the cumulative plastic strain of samples develop from stable state to failure because of freezing and thawing. After many times of freeze-thaw cycles, the lower the negative temperature, the little influence on the mechanic properties.

**Key words:** freezing and thawing cycles; Aught-Set soil firming agent; stress-strain; critical dynamical stress; dynamic modulus

收稿日期:2011-07-03

基金项目:国家科技支撑计划(2012BAG05B00);国家自然科学基金项目(51178281,51208320)

作者简介:王天亮(1981-),男,博士,主要从事道路与铁路路基研究,(E-mail)wangtl@stdu.edu.cn。

土壤固化剂是在常温下能够直接胶结土壤颗粒表面或能够与粘土矿物反应生成胶凝物质的土壤硬化剂。由于其具有较高性价比、高效低耗以及节约能源的特性,被广泛应用于道路基层<sup>[1-2]</sup>、渠道防渗<sup>[3]</sup>和水利工程<sup>[4]</sup>等领域。国外在固化剂的应用和研究方面已趋于成熟,研究对象包括各种水泥和石灰添加剂<sup>[5-6]</sup>、废物再利用<sup>[7]</sup>、新型土壤固化剂<sup>[8]</sup>。中国对固化剂的应用起步较晚,固化剂多以引进为主<sup>[2,9-10]</sup>,但是由于气候与土壤条件以及依据的技术规范不同,多数液体固化剂不能直接使用<sup>[11]</sup>,影响了土壤固化剂的进一步推广。因此,确定固化剂的使用条件、应用方法以及地域适用性是非常有必要的。

由于季节性冻土地区特殊的气候环境,该地区的土壤表现出独特的性质,给公路、铁路等工程建设带来不利的影响,在路基土中加入土壤固化剂来改善其抗冻性,对实际应用具有重要的意义。笔者以高液限黏性土为研究对象,研究了冻融后 AS 型固化剂改良土的静动力特性,探讨了土壤固化剂的抗冻融耐久性。

## 1 试验过程

### 1.1 试验材料

1.1.1 土样的物理性质 土样取自哈大客运专线鞍山某土料堆填场,根据《土工试验规程》(GB/T 50123—1999)中的有关要求,对土样进行了颗粒粒径分析、液塑限测定及击实试验,将其定为高液限黏性土质。液限 48.6%,塑限 21.5%,塑性指数 27.1,最优含水率 18.1%,最大干密度为 1.80 g/cm<sup>3</sup>。其颗粒粒径分析见图 1。

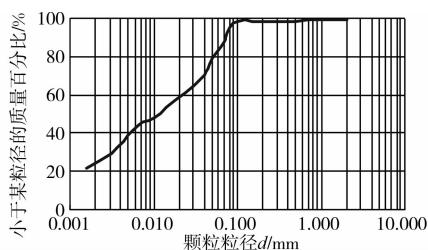


图 1 素土颗粒粒径分布曲线

1.1.2 AS 型土壤固化剂 Aught-Set(奥特赛特)土壤固化剂是以水泥基为基础的由大量无机材料(水泥熟料、粉煤灰、矿渣、石膏、石灰、铁渣、硫酸铝钾、硅酸钠、氟化钠、碳酸钠等以及能与土壤活性物质起反应的氧化镁、氯化钙、氯化铁、明矾、磷酸等)和有机材料(如柠檬酸、聚丙烯酰胺、三乙醇胺等)混合而成的胶凝性材料,即该土壤固化剂由固体固化剂和液体固化剂 2 种材料组成。

### 1.2 试样制备

当配制土样时,先将固体固化剂按掺入比 3% 的量加入土中拌合均匀待用。然后将液体固化剂按照 1:200 的比例放入所需的水中,搅拌均匀。最后将经过稀释后的固化剂水溶液掺入到混合料中,拌合均匀,闷料 2~4 h 后便可以开始制备试样。按照试验规程,所有三轴试样均按 95% 的压实度控制干密度,利用三瓣饱和器分 5 层击实而成,试样高度  $H = 80$  mm,直径  $D = 39.1$  mm,含水量为 19.31%,放在保湿缸中进行常温养护。

### 1.3 试样方法

待试样养护完成后,进行室内冻融循环试验。参照季节性冻土区的温度变化,采用 5 组冻融循环温度,即冷却温度  $T_c$  分别为 -20、-15、-10、-5 和 -2 °C,融化温度均为 15 °C。为防止冻融过程中试样水分损失,将每个试样用塑料薄膜封闭好后放于冻融箱内,冷却时在恒温冷冻箱内养护 12 h,融化时在 5 °C 的恒温箱中养护 12 h,此过程为一个冻融循环周期。冻融循环周期次数  $N_{ft}$  为 0、1、3、6、10 次,前期研究表明 8~12 次循环就可以满足研究冻融对强度等力学性质影响的要求<sup>[12]</sup>。达到冻融循环周期次数后取出部分试样进行试验,剩余试样继续做冻融循环试验。

试验分别在 MTS810 土动三轴仪和 GDS 非饱和土三轴仪上进行。MTS810 土动三轴仪采用应力控制式单循环加载方式,振动频率  $f = 4$  Hz,动荷载以半正弦波的形式输入,最小动应力幅值从 250 kPa 逐步提高,直至达到使试样破坏的动应力,围压为 20 kPa;GDS 非饱和土三轴仪为应变控制式,进行无侧限抗压强度试验和常规三轴试验,围压为 20 kPa,加载速率为 0.5 mm/min,控制应变为 5%。数据采集均由与仪器相匹配的自动数据采集系统完成,所采集的数据包括时间、荷载、围压、孔压和位移。

## 2 AS 固化剂土的力学性状分析

### 2.1 无侧限抗压强度试验

对养护 3、7、14、28 d 的 3% AS 固化剂改良土进行无侧限抗压强度试验,得到固化剂改良土的无侧限抗压强度随龄期变化曲线,见图 2。

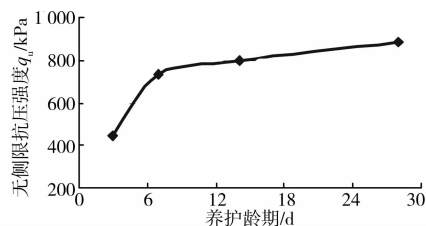


图 2 AS 固化剂土无侧限抗压强度随龄期的变化关系

由图 2 可以看出,3%AS 固化剂改良土的无侧限抗压强度随着龄期的增加而不断增长。无侧限抗压强度前 7 d 的增长速率较快,但强度增加的速率随龄期延长逐渐变缓。7 d 的无侧限抗压强度是 732 kPa,28 d 的是 982 kPa,7 d 的无侧向抗压强度达到 28 d 强度的 75%。同时,为研究龄期和冻融次数的相互关系,图 3 给出了 7 d 和 28 d 养护龄期试样的无侧限抗压强度与冻融次数的变化关系。试样的 7 d 和 28 d 养护强度随冻融次数的增加而减小,在经历 6 次冻融后的变化趋势趋于稳定状态。由此可知,7 d 强度可以满足施工的要求,考虑到试验量较大,在随后的试验中均采用 7 d 养护的试样。

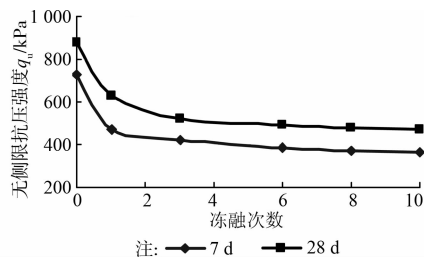


图 3 AS 固化剂土无侧限抗压强度随冻融次数的变化关系

2.2 应力应变关系曲线

图 4 为冷却温度  $-15^{\circ}\text{C}$  时不同冻融次数下固化剂改良土的应力应变关系曲线,  $N_{\text{ft}}$  为冻融循环次数。在一定围压下,随着剪应变增大,AS 固化剂改良土应力应变曲线出现明显的峰值,峰值后强度降低明显,为应变软化型曲线,试样呈脆性破坏形式,而素土为应变硬化型曲线,呈塑性破坏形式。同时,冻融作用对曲线的影响非常明显,随着冻融次数的增加,曲线的峰值点和初始切线模量均随之减小,但当达到 6 次冻融作用后,应力应变关系曲线基本重合。

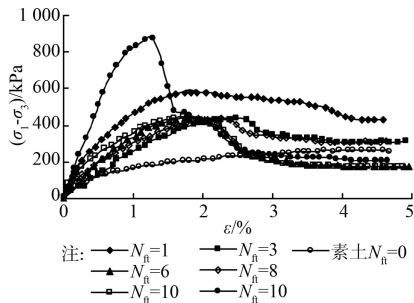


图 4 不同冻融次数下的应力应变关系曲线  
( $T_c = -15^{\circ}\text{C}$ ,  $\sigma_3 = 20 \text{ kPa}$ )

图 5 为 6 次冻融循环下不同冷却温度的固化剂改良土的应力应变关系曲线,围压  $\sigma_3$  为 20 kPa。在一定的冻融次数下,固化剂改良土的应力应变关系曲线的峰值点和初始切线模量均随冷却温度的降低

而降低,同时,随着温度的降低,经过冻融循环后的固化剂改良土脆性逐渐减弱。当冷却温度低于  $-5^{\circ}\text{C}$  后,温度不再起主要作用。

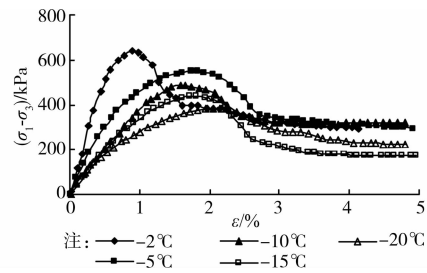


图 5 不同冷却温度下的应力应变关系曲线 ( $N_{\text{ft}} = 6$ )

2.3 静强度

研究者普遍认为,冻融作用会降低土的强度,主要是由于土中水的冻结增大了土体的孔隙体积,当孔隙冰融化时,有些已增大的孔隙无法恢复到原始状态,从而使土体疏松,土颗粒之间的粘结力降低,但多次冻融是否会使得土的强度继续下降还有待于研究。笔者就未冻融土、冻融 1、3、6、8、10 次的结果进行了分析。对于以脆性破坏的土样,取应力-应变关系曲线的峰值点作为土样的峰值抗剪强度。

图 6 和图 7 分别为 AS 固化剂改良土的静强度随冻融次数以及冷却温度的变化规律。固化剂改良土的静强度随冻融次数的增加呈指数形式衰减,当达到一定冻融次数后达到稳定状态,在冷却温度高于  $-5^{\circ}\text{C}$  达到稳定状态的次数是 6 次,而低于  $-5^{\circ}\text{C}$  的稳定次数是 3 次。第一次冻融作用对改良土的影响

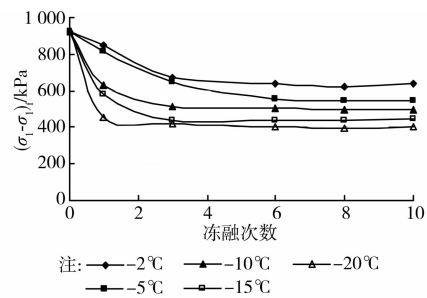


图 6 固化剂土静强度随冻融次数的变化关系  
( $\sigma_3 = 20 \text{ kPa}$ )

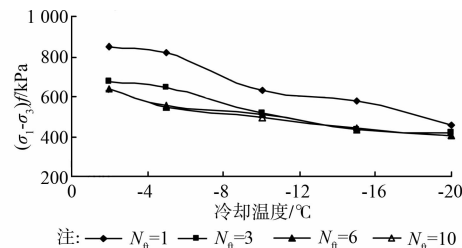


图 7 固化剂土静强度随冷却温度的变化关系 ( $\sigma_3 = 20 \text{ kPa}$ )

响显著,因冷却温度的不同,降低幅度在 10%~50%之间,如图 6 和图 7 所示。在第一次冻融作用下,固化剂改良土的静强度与冷却温度存在良好的线性关系,而当经历多次冻融作用后,随着冷却温度的降低,静强度变化趋于稳定状态。

3 AS 固化剂土的动力特性分析

3.1 变形特性

图 8 为循环三轴试验过程的动应力加载曲线,图 9 为动应力  $\sigma_d$  分别为 240、350 kPa 时的 AS 固化剂改良土试样的动应力-应变关系对比曲线。从图 8 可以看出,施加在试样的动应力波形符合试验前设定的加载形状,即为半正弦(haversine)波。从图 9 可以看出,循环荷载作用下试样产生明显的滞回圈,并逐渐产生累积应变,且变形增长率随加载次数增加逐渐减小。变形稳定试样与变形破坏试样的动应力-应变关系差别较大,对于稳定试样,循环荷载作用 20 周后动应力-应变滞回圈的面积变小,表明试样变形已接近弹性,累积应变趋于稳定,见图 9(a);但对于破坏试样,循环荷载作用 20 周后滞回圈的面积逐渐变大,表明试样发生脆性变形破坏,见图 9(b)。

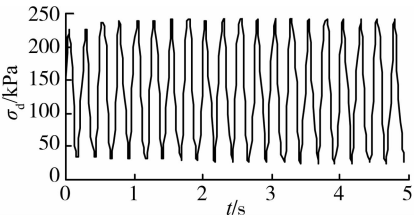


图 8 循环加载过程中的动应力曲线(循环加载 20 周)

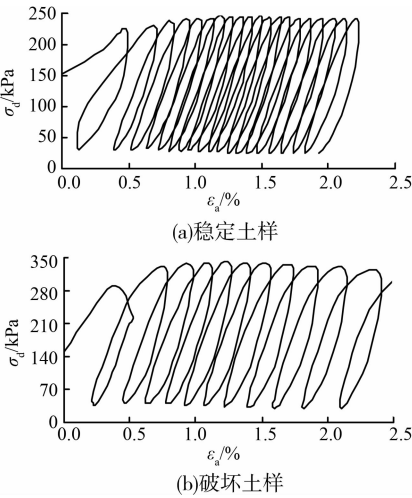


图 9 试样的动应力-应变关系

图 10 为素土在不同动应力水平下的累积塑性应变  $\epsilon_p$  与振动次数的半对数  $\lg N$  关系曲线;图 11

和图 12 分别为冷却温度  $T_c$  为  $-5$ 、 $-20$   $^{\circ}\text{C}$  时不同冻融次数下 AS 固化剂改良土的累积塑性应变  $\epsilon_p$  与振动次数的半对数  $\lg N$  关系曲线。由图 10 可知,素土的累积塑性变形随振次的增加呈增加趋势,为塑性破坏形式,在动应力水平小于某值时,累积变形增加趋势变缓;在动应力水平大于某值时,变形不断增大直至破坏,可见存在一个临界状态值。由图 11 和图 12 可知,当动应力超过试样的临界值时,土样的累积塑性变形初期发展较慢,当循环荷载作用到一定振动次数后,出现应变转折点,土样变形开始急剧增大,在随后很少的振动次数范围内就达到破坏,表现出明显的脆性破坏特征。同时,在相同动应力水平下,经历较少冻融次数时,固化剂改良土试样的累积塑性应变较小,基本上为弹性应变;随着冻融次数的增加,变形在经历一定振动次数后急剧增大并破坏,表现出脆性破坏特征,且随着冷却温度的降低,试样达到破坏所需的冻融次数减少,如冷却温度  $-5$   $^{\circ}\text{C}$  时是 8 次,而  $-20$   $^{\circ}\text{C}$  时是 6 次。

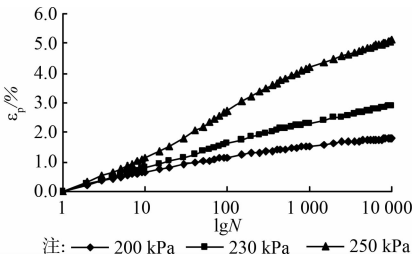


图 10 不同动应力下素土的  $\epsilon_p$ - $\lg N$  曲线 ( $\sigma_3 = 20$  kPa)

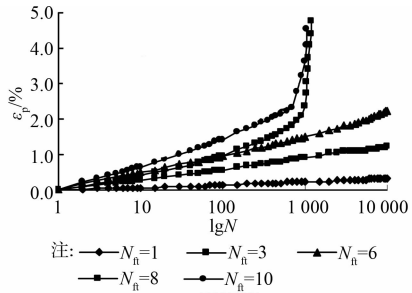


图 11 不同冻融次数下固化剂土的  $\epsilon_p$ - $\lg N$  曲线 ( $\sigma_3 = 20$  kPa,  $\sigma_d = 450$  kPa,  $T_c = -5$   $^{\circ}\text{C}$ )

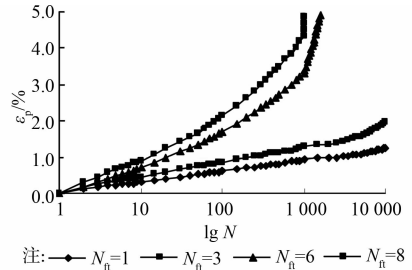


图 12 不同冻融次数下固化剂土的  $\epsilon_p$ - $\lg N$  曲线 ( $\sigma_3 = 20$  kPa,  $\sigma_d = 300$  kPa,  $T_c = -20$   $^{\circ}\text{C}$ )

### 3.2 临界动应力

根据每次试验得到的  $\epsilon_p - \lg N$  典型曲线,判别试样是趋于强化、破坏还是临界状态,并绘出由所有的临界点回归得到的区分破坏点和未破坏点的直线,即为临界状态线,从而获得土样的临界动应力<sup>[13]</sup>。图13为不同冷却温度下AS固化剂改良土的临界动应力与冻融次数的关系曲线。由图可以看出,相同冷却温度和围压下固化剂改良土的临界动应力随冻融循环次数的增加呈指数形式衰减,  $-2$ 、 $-5$   $^{\circ}\text{C}$  时在经历6次冻融循环后基本趋于稳定,而低于  $-10$   $^{\circ}\text{C}$  后达到稳定的冻融次数为3次,即多次冻融循环作用使得石灰土内部结构变化趋于动态平衡状态。

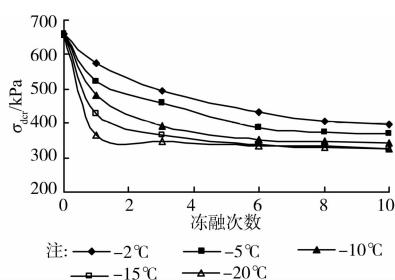


图13 AS固化剂土的临界动应力与冻融次数关系曲线 ( $\sigma_3 = 20$  kPa)

为更好的研究冻融作用对固化剂改良土的影响规律,在此引入临界动应力衰减率  $\eta$ 。冻融循环临界动应力衰减率反映了冻融循环作用对固化剂改良土临界动应力的影响程度,其定义为改良土冻融前后临界动应力之比。

$$\eta = \frac{\sigma_{dcrb} - \sigma_{dcrd}}{\sigma_{dcrb}} \times 100\% \quad (1)$$

式中,  $\sigma_{dcrb}$  为未冻融土的临界动应力;  $\sigma_{dcrd}$  为冻融循环后土的临界动应力。

依据式(1),图14为不同冻融次数下AS固化剂改良土的临界动应力衰减率与冷却温度的关系。由图可知,衰减系数  $\eta$  能够更直观地反映冻融循环对土试样临界动应力的影响程度,具有工程普适性,指导工程实践。临界动应力衰减率随冷却温度的降低而增加,随着冻融次数的增加,衰减率的增加幅度逐渐减小。同时,相同冷却温度下,衰减率随冻融次数的增加而增大,且随着冷却温度的降低,其增大幅度逐渐减小,如  $-2$   $^{\circ}\text{C}$  时,衰减率随冻融次数的增加幅度为30%;而在  $-20$   $^{\circ}\text{C}$  时,增加幅度仅为5%。

### 3.3 动回弹模量

图15为不同动应力幅值下AS固化剂改良土土样回弹模量与加载次数的关系曲线,图16为不同冻融次数下固化剂土回弹模量随累积应变的变化曲

线。分析图线可知,加载初期,回弹模量随着振动次数以及累积应变的增加而迅速降低,当振动次数超过10次后或者应变超过1.0%时,回弹模量变化趋于稳定。在同一动应力水平和相同应变值下,回弹模量随冻融次数的增加而降低,而当冻融次数超过6次后,回弹模量不再减小,趋于稳定状态。

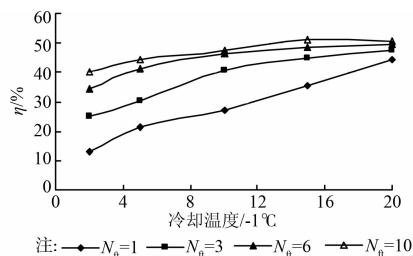


图14 临界动应力衰减率与冷却温度的关系曲线 ( $\sigma_3 = 20$  kPa)

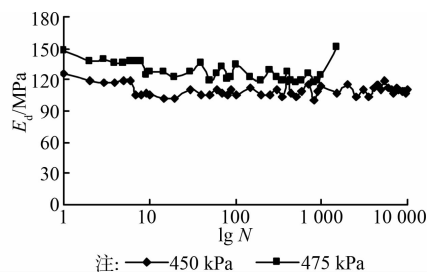


图15 不同动应力幅值下回弹模量与加载次数的关系 ( $\sigma_3 = 20$  kPa,  $N_{ft} = 3$ ,  $T_c = -5$   $^{\circ}\text{C}$ )

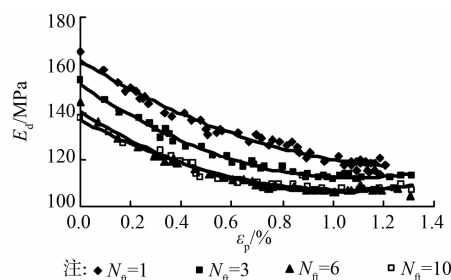


图16 不同冻融次数下回弹模量随累积应变变化曲线 ( $\sigma_3 = 20$  kPa,  $\sigma_d = 450$  kPa,  $T_c = -5$   $^{\circ}\text{C}$ )

由文献可知<sup>[14]</sup>,路基土的回弹模量一般取循环三轴试验中某级应力状态下应变速率达到稳定后的数值。图17为动荷载作用20次时,不同冷却温度下固化剂改良土的回弹模量  $E_{dmax}$  与冻融次数的关系曲线。由图可知,在同一冷却温度下,固化剂改良土的回弹模量随冻融次数增加而降低,第一次冻融作用对其影响非常明显,当经历6次冻融作用后,变化趋势趋于稳定,这与前面有关静强度和临界动应力的分析结果是一致的,因此,在实际工程中可以考虑采用固化剂改良土经历6次冻融作用后的力学指标<sup>[15]</sup>。



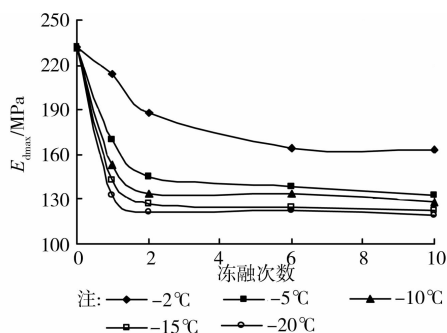


图 17 回弹模量与冻融次数的关系 ( $\sigma_3 = 20 \text{ kPa}$ )

## 4 AS 型土壤固化剂加固机理

将一定量的 AS 型土壤固化剂掺入土壤中,经搅拌、压实、淋水和自然养护等处理后,固化剂本身部分成分水化反应生成硅酸钙、铝酸钙等胶凝性物质,使粘土颗粒表面形成凝结硬化壳。同时,固化剂与土壤混合后,将过多的水分在反应中“夺取”,生成含 32 个结晶水的钙矾石针状结晶体  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ,将土壤中大量的自由水以结晶水的形式固定下来。而且,与水作用产生大量的  $\text{Ca}^{2+}$ ,以及激发素中含有的高价阳离子,如  $\text{Fe}^{3+}$ 、 $\text{Al}^{3+}$  等,由于具有较高的离子强度,与土颗粒中的  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^+$  进行离子交换作用,使得粘土胶团表面  $\xi$  电位降低,胶团所吸附的双电层减薄,电解质浓度增强、颗粒趋于凝聚,清除土壤内的液相和气相,生成的硫酸钙结晶,体积膨胀而进一步填充孔隙,同时与针状结晶相互交叉,形成链状和网状结构而紧密结合,另外 AS 系列土壤固化剂能阻断或破坏土层中的毛细管结构,从而提高了地基的强度、耐久性和抗冻性。

总之,土壤固化剂是在与土壤细微颗粒接触时发生各种物理和化学反应,使界面形成牢固的多结晶聚集体,从而改变颗粒界面的接触,新形成的化学结构表现出优异的力学强度和其他性能。

## 5 结 论

在大量三轴试验和冻融循环试验的基础上,分析了冻融次数、冷却温度对 AS 型土壤固化剂改良土力学特性的影响,得出了如下结论:

1) 3% AS 固化剂改良土的 7 d 无侧限抗压强度达到 28 d 强度的 75%,有效地缩短了工期。

2) AS 型固化剂改良土的应力应变关系为应变软化型曲线,呈脆性破坏形式。通过分析动应力-应变关系,可以将试样分为变形稳定和变形破坏 2 种形式。在同一动应力水平下,随着冻融次数的增加,试样的累积塑性变形由变形稳定状态向变形破坏发展。

3) AS 型固化剂改良土的静强度、临界动应力以及动回弹模量均随冻融次数的增加而降低,且第一次冻融对其影响非常明显,且当经历 6 次冻融后趋于稳定,因此,在实际工程中可考虑采用固化剂改良土冻融 6 次后的力学指标。

4) AS 型土壤固化剂通过与土中的矿物和水分发生一系列的水化反应、置换水反应以及离子交换等化学过程,提高了土体的抗渗性、整体强度和抗冻融耐久性。

## 参考文献:

- [1] Oduola R O. Studies on a cement kiln dust-stabilized low-strength soil for road pavement construction in eastern Nigeria [C]//Green Streets and Highways 2010: An Interactive Conference on the State of the Art and How to Achieve Sustainable Outcomes, Denver, 2010. [S. l.]: American Society of Civil Engineers, 2010: 449-460.
- [2] 戴文婷,陈瑶,陈星. BS-100 型土壤固化剂在季冻区的路用性能试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(8): 2257-2261.  
DAI Wenting, CHEN Yao, CHEN Xing. Test study on road performance of soils stabilized by BS-100 model stabilizer in seasonally frozen region [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(8): 2257-2261.
- [3] 张海燕,张传森,李元婷,等. 采用土壤固化剂改善渠道基土性能初探[J]. 水利与建筑工程学报, 2003, 1(2): 38-40.  
ZHANG Haiyan, ZHANG Chuansen, LI Yuanling, et al. Elementary study on consolidator used to improve capability of channel bedsoil [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2003, 1(2): 38-40.
- [4] Liu S T, Cao W D, Gao X C, et al. Experimental study on soil stabilized with firming agent and lime [C]//GeoHunan International Conference: Challenges and Recent Advances in Pavement Technologies and Transportation Geotechnics, Changsha, 2009. [S. l.]: American Society of Civil Engineers, 2009: 154-160.
- [5] 雷胜友,惠会清. 固化液改良膨胀土性能的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(5): 612-615.  
LEI Shengyou, HUI Huiqing. Experimental investigation on the properties of expansive soil improved by chemical liquid [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(5): 612-615.
- [6] 方祥位,孙树国,陈正汗,等. GT 型土壤固化剂改良土的工程特性研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(9): 1545-

1548.  
FANG Xiangwei, SUN Shuguo, CHEN Zhenghan, et al. Study on engineering properties of improved soil by GT soil firming agent [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(9): 1545-1548.
- [7] Carlson K, Sariosseiri F, Muhunthan B. Engineering properties of cement kiln dust-modified soils in Western Washington State [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2011, 29: 1-8.
- [8] Saboundjian S. Subbase treatment using EMC2 soil stabilizer-final report 1997-2001 [R]. Juneau: Alaska Department of Transportation and Public Facilities, Research and Technology Transfer, 2002.
- [9] 樊恒辉,高建恩,吴普特,等. 基于黄土物理化学性质变化的固化土强度影响因素分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(7): 1996-2000.  
FAN Henghui, GAO Jianen, WU Pute, et al. Analysis of influence factors for soilidified soil strength based on change of physicochemical properties of loess [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(7): 1996-2000.
- [10] 刘清秉,项伟,崔德山,等. 离子土固化剂改良膨胀土的机理研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(4): 648-654.  
LIU Qingbing, XIANG Wei, CUI Deshan, et al. Mechanism of expansive soil improved by ionic soil stabilizer [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(4): 648-654.
- [11] Qu Q, Zhang X G, Yi N P. The experimental study on strength of subgrade soil treated with liquid stabilizer [J]. Advanced Materials Research, 2011 (194/195/196): 985-988.
- [12] Liu J K, Wang T L, Tian Y H. Experimental study of the dynamic properties of cement-and lime-modified clay soils subjected to freeze-thaw cycles [J]. Cold Regions Science and Technology, 2010, 61(1): 29-33.
- [13] Heath D L, Shenton M J, Sparrow, R W, et al. Design of conventional rail track foundation [C]// Proceedings of the Institute of Civil Engineering, 1972. [S. l. s. n], 1972: 251-267.
- [14] Li D, Selig E T. Resilient modulus for fine-grained subgrade soil [J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1994, 120(6): 939-957.
- [15] Wang D Y, Ma W, Niu Y, et al. Effects of cyclic freezing and thawing on mechanical properties of Qinghai-Tibet clay [J]. Cold Regions Science and Technology, 2007, 48: 34-43.

(编辑 薛婧媛)

(上接第108页)

- Kon-no S, Imaizumi T, Yamamoto K, et al. Experimental study on high-rise building with lower floor composed of SRC structure. Part1: Outline of the tests about deformation capacity of SRC columns [C]// Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Kyushu, 1998. [s. l. s. n.], 1998: 1029-1030.
- [13] 伍凯. 低周反复荷载下 SRC-RC 转换柱基本力学行为与抗震性能研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2010.
- [14] Li J H, Xue J Y, Zhao H T. Experimental study on slip behavior between shaped steel and concrete in SRC columns under cyclic reversed loading [J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology: Nature Science Edition, 2008, 40(3): 348-353.
- [15] 李晓莉,常玉珍,吴敏哲. 异形柱和短肢剪力墙的轴压比限值比较分析[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版, 2010, 42(4): 504-508.  
LI Xiaoli, CHANG Yuzhen, WU Minzhe. Comparative analysis on the axial compression ratio limit of the special - shape column and the short - shear wall [J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology: Nature Science Edition, 2010, 42(4): 504-508.
- [16] 郑文忠,王琨. 型钢混凝土梁-角钢混凝土柱框架抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(3): 49-60.  
ZHENG Wenzhong, WANG Kun. Study of seismic performance of frame structures of steel reinforced concrete beams and angle-steel concrete columns [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(3): 49-60.
- [17] 刘阳,郭子雄,欧阳文俊,等. 核心型钢混凝土柱抗震性能及轴压比限值试验研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(6): 47-66.  
LIU Yang, GUO Zixiong, OUYANG Wenjun, et al. Experimental study of the seismic behavior and axial compression ratio limit of CSRC columns [J]. China Civil Engineering Journal. 2010, 43(6): 47-66.
- [18] JGJ 138-2001 型钢混凝土组合结构技术规程[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2002.

(编辑 郭飞)