

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2023.0016

MA Ling, PENG Liyun, LIU Dexin, et al. Experimental study on the frost-heaving characteristics of lime-modified silt[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2023, 45(1):212-221. [马玲, 彭丽云, 刘德欣, 等. 石灰改良粉土的冻胀特性试验研究[J]. 冰川冻土, 2023, 45(1): 212-221.]

# 石灰改良粉土的冻胀特性试验研究

马玲<sup>1</sup>, 彭丽云<sup>2</sup>, 刘德欣<sup>3</sup>, 齐吉琳<sup>2</sup>

(1. 北方民族大学 土木工程学院, 宁夏 银川 750021; 2. 北京建筑大学 土木与交通工程学院, 北京 100044;  
3. 清华大学建筑设计研究院有限公司, 北京 100084)

**摘要:** 粉土因毛细水发育表现出较强冻胀特性, 在冻土区建设中需关注其冻害问题。土中掺入石灰是一种常见的化学土质改良方法, 但石灰对粉土的冻胀特性影响尚不清晰。为研究石灰改良粉土的冻胀特性和效果, 进行了开敞系统下的一维冻胀试验, 分析不同掺灰量下的温度场、变形场和水分场变化规律和机理。研究发现: 土样随掺灰量增大, 其冻结深度先增大后减小, 冻胀量和补水量持续减小, 而冻胀率先减小后增大, 各指标呈不同变化规律, 冻胀特性复杂; 一定条件下提高掺灰量可减小冻结深度和冻胀量直至低于素土, 土样抗冻性提高; 而随着掺灰量变化, 石灰改良粉土的冻胀率始终高于素土, 土样抗冻性改良不显著。因此, 在实际工程中, 不能仅通过单一指标评价石灰改良粉土的效果, 需结合冻结深度、冻胀量和冻胀率三个指标, 综合评价石灰对粉土抗冻性的改良效果。

**关键词:** 粉土; 冻胀特性; 石灰改良; 冻结深度; 冻胀率

**中图分类号:** P642.14 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2023)01-0212-10

## 0 引言

粉土在我国长江中下游地区及沿海地区广泛分布, 其性质介于黏性土和砂土之间, 级配不良, 黏聚力较低, 水稳定性差, 毛细水发育, 冻胀敏感性较强<sup>[1-2]</sup>。大量研究表明<sup>[3]</sup>, 冻胀主要是由水分迁移引起的。在有粉土分布的季节冻土区, 地下水补给充足的情况下, 水分在吸力作用下向粉土内部迁移并冻结, 逐渐发育成冻胀病害, 严重影响当地公路、铁路及房建等工程<sup>[4-6]</sup>。随着工程建设的大量开展, 粉土冻胀性对工程的影响也逐渐被关注<sup>[7]</sup>。

长期工程实践表明, 换填方法虽从根本上解决了冻胀问题, 但因成本较高不宜选用, 而对地基土进行土质改良则是行之有效且经济适用的方法<sup>[8-9]</sup>。化学改良多在土中掺入化学改性剂, 可提高土体强度和耐久性。常用改性剂有石灰、水泥、矿渣、沥青等无机结合料以及一些高分子固化剂<sup>[10-11]</sup>。对于冻土而言, 除了化学改良土强度和水

稳定方面, 还需关注化学改性剂的掺入对冻胀的影响, 对此各国学者进行了相应研究。邓友生等<sup>[12]</sup>通过冻胀试验研究发现, 高分子有机材料可以阻断土体孔隙之间的联系, 减小土样水分迁移, 从而减小土体冻胀。赵世运等<sup>[13]</sup>对含细粉土的级配碎石进行冻胀试验研究发现, 水泥掺量5%以上时, 级配碎石由细粉土引起的冻胀基本消除, 其冻胀率小于0.2%。李思齐等<sup>[14]</sup>研究了添加水泥对粉质黏土冻胀融沉的影响, 试验证明一定水泥掺比下冻土的冻胀融沉受到抑制。以上研究都属于化学加固方法, 研究结果表明化学改良方法基本上都能一定程度上提高土体抗冻性。而在这些化学改良方法中, 从经济角度考虑, 石灰价格低廉, 具有增强、加固土体的作用, 是工程中广泛应用的地基改良方法。石灰对土强度和水稳定性改良方面, 李萍<sup>[15]</sup>对黄土进行室内贯入试验, 试验结果表明掺入石灰具有显著提高黄土强度和水稳定性的作用, 但掺灰量过大

收稿日期: 2022-10-31; 修订日期: 2023-01-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(42172299; 41972279); 宁夏自然科学基金项目(2021AAC03218)资助

作者简介: 马玲, 讲师, 主要从事岩土工程与特殊土力学研究. E-mail: maling0692@mails.jlu.edu.cn

通信作者: 齐吉琳, 教授, 主要从事寒区岩土工程和特殊土力学研究. E-mail: jilinqi@bucea.edu.cn

存在自由灰导致土样不均匀从而强度降低的问题,故存在最佳掺灰量;黄凯<sup>[16]</sup>通过数值模拟研究了不同掺灰量下路基对荷载的响应,综合考虑改良效果和经济学,认为上路床粉土的最佳掺灰量为6%。常温条件下,石灰在土体强度和水稳定性方面具有较好的改良效果。另外,一些学者也开展了石灰改良土抗冻性的研究<sup>[17~20]</sup>。韩春鹏等<sup>[17]</sup>通过室内冻胀试验研究了石灰改良黏土的冻胀特性,发现冻胀起始温度与掺灰量无关,但起始冻胀含水量与掺灰量有关,石灰的掺入在一定程度上能抑制土体冻胀。张立新<sup>[18]</sup>等通过粉质黏土的冻胀试验研究发现,随着石灰含量的增加,改良土的冻胀率不断减小,最优防冻胀掺量为12%~15%。王翰越等<sup>[19]</sup>通过冻胀率试验和冻融循环试验研究了石灰改良黄土路基填料抗冻性能,认为提高石灰剂量可有效改善试样抗冻性能。以上研究在石灰改良黏土、黄土和粉质黏土的冻胀特性方面取得一定进展,但对于石灰改良粉土的冻胀特性鲜有涉及。因此,需针对石灰改良粉土的效果和冻胀特性开展相应的

试验研究。

本文以华北地区广泛分布的黄河冲积粉土为研究对象,进行开放条件下的一维冻结试验,研究不同掺灰量影响下的粉土冻胀特性和抗冻性改良效果,以期为季节冻土区与粉土相关的工程冻胀病害提供依据。

## 1 试验方案

### 1.1 试验材料

#### 1.1.1 土样

试验采用华北地区广泛分布的黄河冲积粉土,其物理性质参数见表1。根据《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)<sup>[21]</sup>,判定该土为级配不良的低液限粉土。力学试验表明,该粉土的黏聚力为8.59 kPa,内摩擦角为25.9°。由物理力学性质测定可知,该粉土级配不良、黏聚力低、水稳定性差。另外,该粉土的粉粒含量非常高,在补水充分的情况下具有较强的冻胀性<sup>[20]</sup>,需改良后才可应用于工程实际。

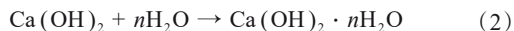
表1 试验用土物理性质

Table 1 Physical properties of the soil

最优含水率/%	最大干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	颗粒级配/%						塑限/%	液限/%	塑性指数	不均匀系数C <sub>u</sub>	曲率系数C <sub>c</sub>
		细砾	粗砂	中砂	细砂	粉粒	黏粒					
		5~2mm	2~0.5mm	0.5~0.25mm	0.25~0.075mm	0.075~0.005mm	≤0.005mm					
14.6	1.742	1.74	1.86	1.21	2.12	92.88	0.19	16.7	20.3	3.6	3.15	2.86

#### 1.1.2 石灰

本试验所用石灰为熟石灰,主要成分为氢氧化钙[Ca(OH)<sub>2</sub>],粒径范围为0.0075~0.0095 mm<sup>[22]</sup>,粒径较小,比表面积较大,表面能较高,吸力较大。石灰在土中发生以下化学反应:



土中掺入石灰后遇到空气发生化学反应(式1),氢氧化钙[Ca(OH)<sub>2</sub>]与空气中的二氧化碳(CO<sub>2</sub>)发生反应产生不溶于水的碳酸钙(CaCO<sub>3</sub>)和水(H<sub>2</sub>O),化学反应过程中的放热影响土的冻胀;另外一些石灰还会与水反应(式2),氢氧化钙[Ca(OH)<sub>2</sub>]结合周围水分子,形成碳酸钙结晶水合物,一定程度能减少水分迁移并影响冻胀过程。

### 1.2 试验仪器

试验装置主要由试样筒、温度控制系统、补水系统以及监测系统组成(图1)。试样筒由有机玻璃

筒(内径20 cm、壁厚1 cm和高14 cm)和连接温控系统的顶、底板组成。两头温度控制系统由杭州雪中炭公司生产的恒温箱(控温精度为±0.2℃)、美国Thermo Scientific公司生产的循环水浴(控温精度为±0.01℃,控温范围为-20~+100℃)、绝热二氧化硅气凝胶毯组成。补水系统为试验筒底板与马氏补水瓶(量程为380 mL)相连组成。监测系统由位移传感器(精度为±0.001 mm)、高精度温度探头(精度为±0.001℃)、Data Taker 80数据采集仪和补水量由重量传感器(精度为±1 mL)组成。

### 1.3 试验设计

为研究石灰掺量对土体冻胀的影响,设计了不同掺灰量的冻胀试验,具体方案见表2。为保证土样初始含水率一致,控制试验中所有土样的含水率为14.6%。为了获得较大冻胀量便于分析比较,本试验采用较小的温度梯度设置试验,其顶端冷却温度为-3℃,底端为+1℃。根据《公路路基设计规范》

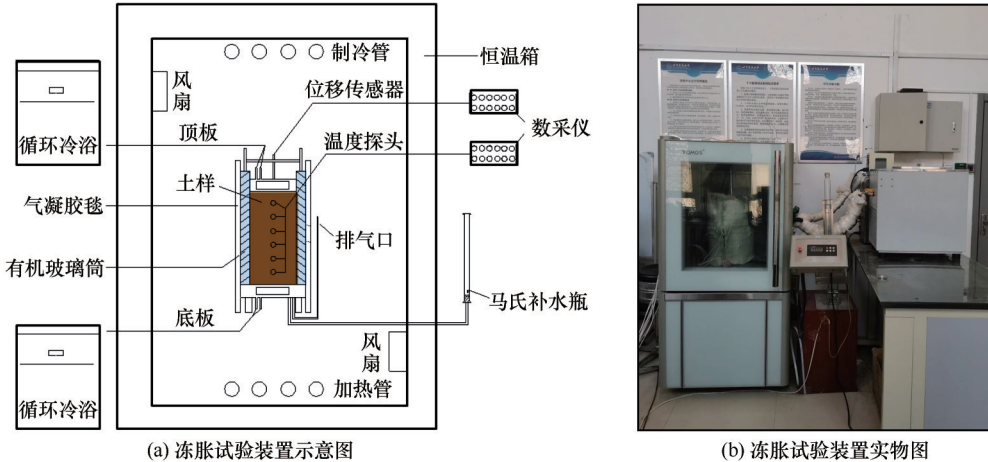


图 1 冻胀试验装置  
Fig. 1 diagram of frost heaving test device: schematic diagram of frost heaving test device (a);  
entity diagram of frost heaving test device (b)

表 2 冻胀试验方案

Table 2 Program of the frost heaving tests

土样(编号)	掺灰量 $c/\%$	顶(底)板 温度/ $^{\circ}\text{C}$	含水量/ $\%$	压实度
素土(S1)	0	-3(+1)	14.6	0.9
改良土(MS1~MS4)	3、6、10、15	-3(+1)	14.6	0.9

(JTG D30—2015)<sup>[23]</sup>对路床和土质路基压实度规定,制备土样的压实度为0.90。

1.4 试验方法

1.4.1 试样制备

按试验设计的含水量和石灰配比,依次将石灰和水加入土中拌和均匀,在室温下密封静置24 h。将配制好的土料分三层装入试样筒内击实,各层接触面进行刨毛处理,制备成圆柱体土样。每组制备两个试样,进行平行试验。

1.4.2 试样安装

将试样筒置于恒温箱中,顶部安装位移传感器,内部每2 cm布置温度探头,二氧化硅气凝胶毯包裹在试样筒的外侧。调节马氏补水瓶的自由液面和试样筒底部补水孔齐平,之后卡住马氏补水瓶的进水管、出水管。

1.4.3 试样冻结

循环冷浴、恒温箱温度为1 $^{\circ}\text{C}$ ,试样温度降至1 $^{\circ}\text{C}$ 后恒温24 h,使土样各处温度均匀。之后调节与试样筒顶板相连的循环冷浴,使其温度降至试验设计的顶端冷却温度(-3 $^{\circ}\text{C}$ ),并打开马氏补水瓶的进水管、出水管。该过程中利用监测系统记录相应数据。

1.4.4 试样含水量测定

试样冻结完成,沿其高度方向每隔2 cm切割分层,每层各取3个样品,用烘干法测量土样含水率,求其平均值。

2 试验结果与分析

在其他试验条件(含水率14.6%、压实度0.90、顶底端温度分别为-3 $^{\circ}\text{C}$ 和1 $^{\circ}\text{C}$ )相同的情况下,改变石灰掺量(0.3%、6%、10%、15%),测得不同掺灰量粉土在冻结过程中的温度、冻胀位移、水分补给量,以及冻结完成后的含水量分布。下面对数据进行分析,研究不同石灰掺量下粉土的冻胀特性及规律。

2.1 温度场分析

2.1.1 掺灰量对温度场的影响

土体冻结过程中不同高度处温度随时间的变化过程如图2所示。由图2可见,冻结过程中0~30 h,掺灰量 $c=0$ 的素土S1相对于其他石灰改良土MS1~MS4温度变化较快,更快达到温度稳定状态;30~96 h,素土的-2.5~-1.5 $^{\circ}\text{C}$ 等温线分布于顶端的0~4 cm处,而MS1~MS4石灰改良土的-2.5~-1.5 $^{\circ}\text{C}$ 等温线分布于顶端的0~2 cm处。同时,改良土的等温线分布较素土密集,表明其温度变化梯度较小。由此可知,掺灰起到降低冻结速率,延迟达到冻结稳定状态的效果。

2.1.2 掺灰量对冻结深度的影响

粉土冻结温度试验测得石灰掺量为0.3%、6%、10%、15%土样的临界相变温度分别为-0.11 $^{\circ}\text{C}$ 、-0.13 $^{\circ}\text{C}$ 、-0.20 $^{\circ}\text{C}$ 、-0.21 $^{\circ}\text{C}$ ,据此将该温度等值线



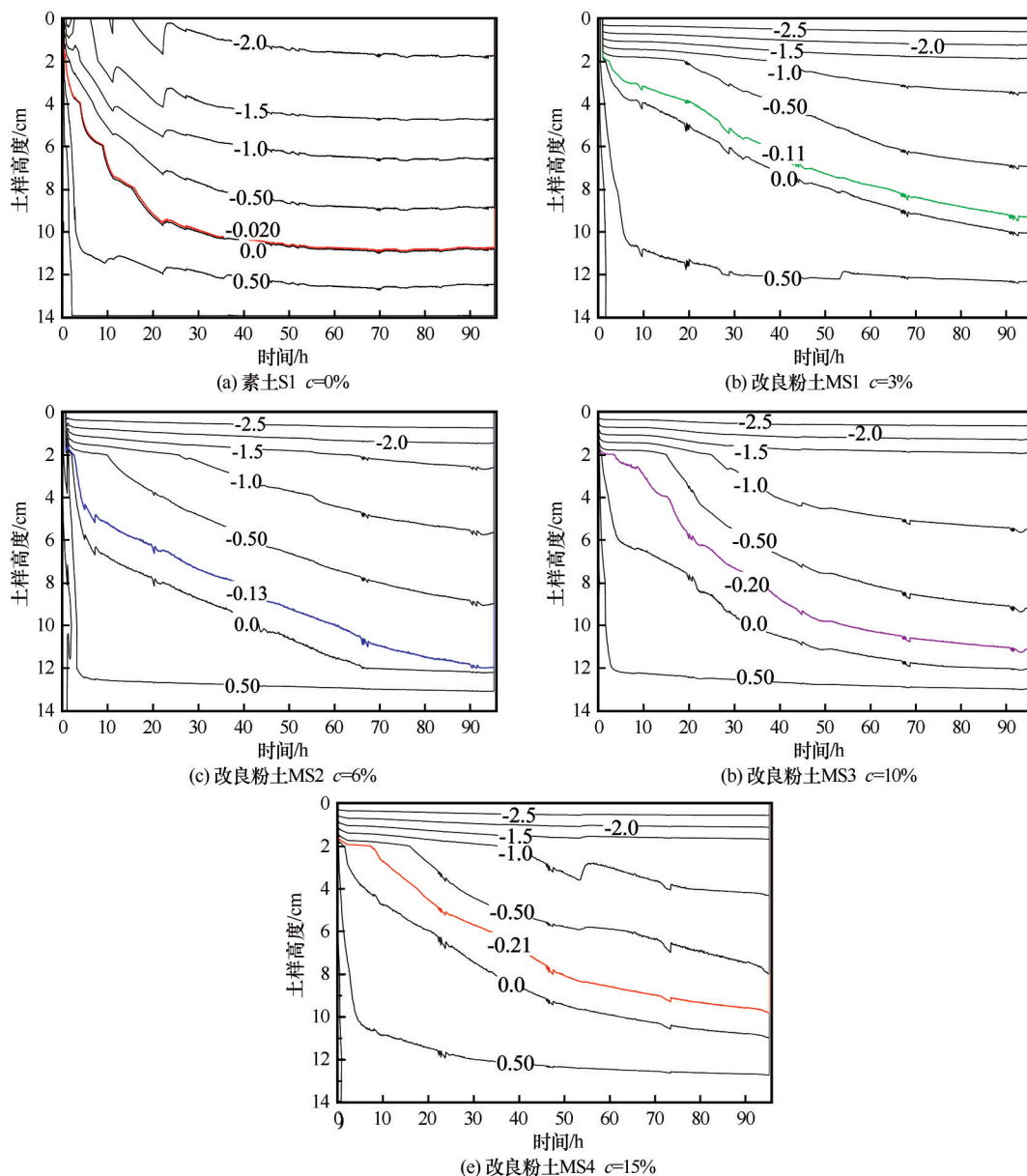


图2 不同石灰掺量下土样温度变化过程(彩色等温线表示相应土样的冻结温度)

Fig. 2 Temperature changes of soil samples added with different lime content (The temperature isotherms marked with red, green, blue, pink, and light red denote the related freezing temperature of soil samples): plain soil, S1  $c=0\%$  (a); modified silty soil, MS1  $c=3\%$  (b); modified silty soil, MS2  $c=6\%$  (c); modified silty soil, MS3  $c=10\%$  (d); modified silty soil, MS4  $c=15\%$  (e)

所对应的深度确定为相应石灰掺量粉土的冻结深度。图3为不同掺灰量的土样冻结深度随时间的变化过程曲线。

从图3可知,不同掺灰量土样冻结深度变化规律相似,大致可分为三个阶段,即快速冻结阶段、过渡阶段、冻结稳定阶段。0~30 h处于快速冻结阶段,冻结深度急剧下降,此时土样冻结深度可占到最大冻结深度70%以上;30~50 h处于过渡阶段,冻结速率逐渐减小;大约100 h冻结趋于稳定,土样冻结速

率趋近于0,此时达到最大冻结深度。由图3可获取冻结稳定后的土样最大冻结深度( $H_{\max}$ )随石灰掺量 $c$ 而变化(图4)。图4中,土样最大冻结深度随石灰掺量的增加呈先增大后减小的趋势,存在石灰掺量临界值 $c=6.4\%$ 。当石灰掺量小于临界值时,土样冻结深度随石灰掺量的增加而增大;当石灰掺量大于临界值时,土样冻结深度随石灰掺量的增加而减小。另外,在中间掺灰量( $c=4.3\%\sim 11.5\%$ )时,改良土的冻结深度大于素土;在低掺灰量( $c=0\%\sim 4.3\%$ )

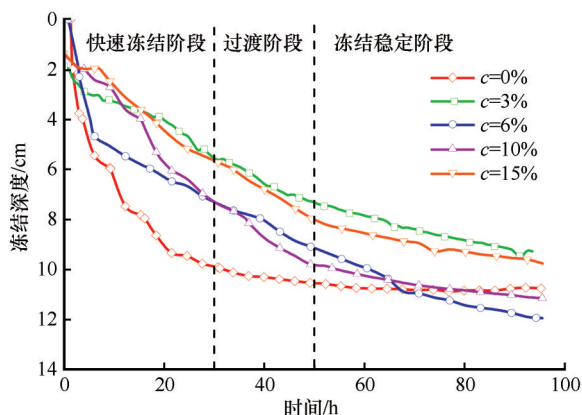


图3 不同掺灰量下土样冻结深度变化过程

Fig. 3 Changes of freezing depth for the soil depth samples added with different lime content

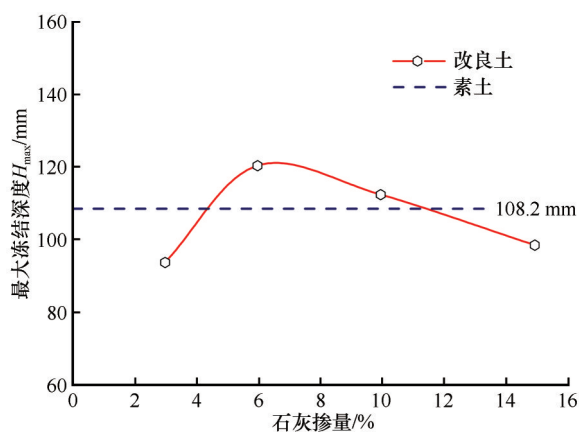


图4 最大冻结深度随掺灰量的变化曲线

Fig. 4 The curve of maximum freezing depth vs. lime content

和高掺灰量( $c > 11.5\%$ )时,改良土的冻结深度小于素土。

## 2.2 变形场分析

### 2.2.1 掺灰量对冻胀量的影响

通过试样顶部位移传感器记录的变形量,可知不同掺灰量下粉土的冻胀量随时间关系曲线(图5)。当石灰掺量一定时,土样冻胀量随时间增长而不断增大,最终趋于稳定。在0~20 h时间段内,土样冻胀量增长较快;此后,冻胀速率迅速减小,直至趋于稳定;不同掺灰量下土样的最终冻胀量差异较大。

不同掺灰量下的土样冻胀量随时间的变化可用下式来表示:

$$h_f = a(1 - e^{-t/20}) \quad (3)$$

式中: $h_f$ 为冻胀量(mm); $t$ 为冻结时间(h); $a$ 为试验参数,与土的性质及边界条件有关。

掺灰量为0%、3%、6%、10%、15%的改良土样最

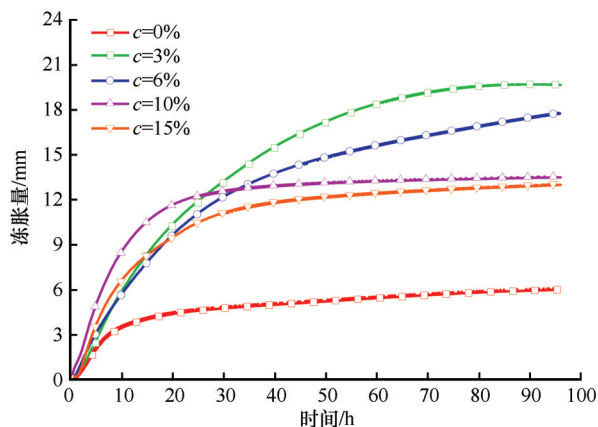


图5 不同掺灰量下粉土冻胀量

Fig. 5 Frost heave development vs. time

终冻胀量 $h'$ 分别为5.99 mm、19.7 mm、17.8 mm、13.5 mm、13.0 mm,进行数据分析发现,土样的冻胀量与石灰掺量有很强的负线性相关性,即在试验范围内石灰掺量越大,土样的冻胀量越小(图6)。

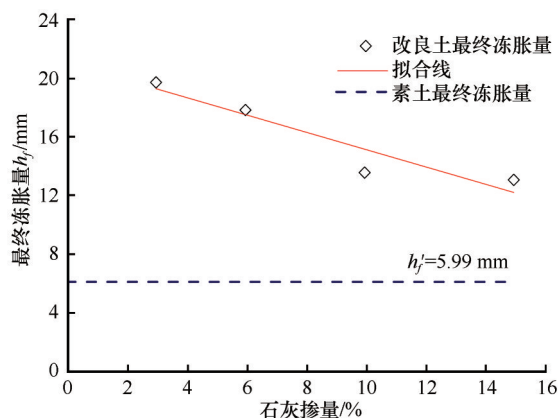


图6 冻胀量随掺灰量的变化曲线

Fig. 6 The curve of frost heaving amount vs. lime content

经分析得到如下线性回归方程:

$$h'_f = 21.05 - 0.59c \quad (4)$$

式中: $h'_f$ 为最终冻胀量(mm); $c$ 为石灰掺量(%)。相关系数为0.83,相关程度较高。

式(4)为式(3)的边界条件, $t$ 无限增大, $h$ 无限趋近于 $h'$ 。即 $a$ 从数值上等于各实验条件下的最终冻胀量 $h'$ 。因此,可得石灰改良土冻胀预测模型:

$$h_f = 21.05(1 - e^{-t/20}) + 0.59c(e^{-t/20} - 1) \quad (5)$$

通过式5计算不同掺灰量下冻胀量曲线,比较计算值与实测值,发现二者曲线相近。因此,该冻胀预测模型适用于低液限粉土的石灰改良后冻胀量预测。根据模型计算可知,当 $c > 25.5\%$ 时,土样的最终冻胀量将小于素土的最终冻胀量。

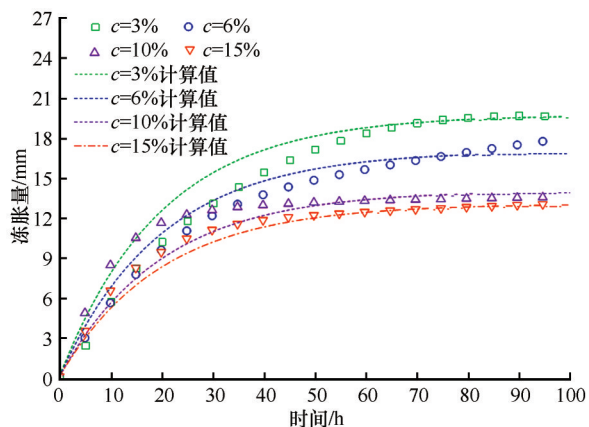


图7 冻胀量计算值与实测值比较

Fig. 7 The comparison between calculated value and measured value of frost heaving

### 2.2.2 掺灰量对冻胀率的影响

冻胀率也是评价土体冻胀性的重要指标,可通过以下公式获得:

$$\eta_t = \Delta h / \Delta H_f \quad (6)$$

式中: $\eta_t$ 为冻胀率(%); $\Delta h$ 为冻胀量增量(mm); $\Delta H_f$ 为冻结深度增量(mm)。

由式(6)计算出不同掺灰量下的最终冻胀率,可得二者的关系曲线如图8所示。分析图8可知:改良土的冻胀率随石灰含量的增加呈先降低后升高的趋势,存在最佳掺灰量临界值;素土的冻胀率为5.5%,改良土的冻胀率分别为20.7%、14.8%、12.1%、13.2%,根据《冻土地区建筑地基基础设计规范》(JGJ 118—2011)<sup>[24]</sup>,素土为强冻胀土,改良土均为特强冻胀土。

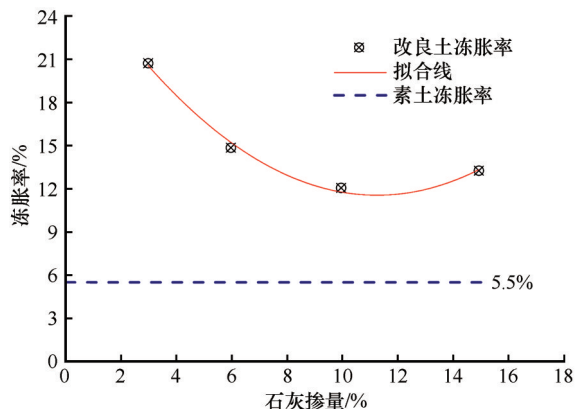


图8 冻胀率与掺灰量的关系

Fig. 8 Relationship between frost heave rate and lime content

## 2.3 水分场分析

### 2.3.1 掺灰量对补水量的影响

通过对冻结过程中的水分补给量数据记录,可

得不同掺灰量下土体补水量曲线(图9)。补水量均随时间延长而不断增大。在快速冻结阶段,补水速度较大,之后水分入流量增速减缓,进入冻结过渡区;随着时间的延长,补水速度继续减小,并趋近于0,土样冻结进入稳定阶段。冻结稳定后,五种掺灰量下,土补水量分别为851 mL、1 253 mL、1 182 mL、1 124 mL、1 055 mL。图10为不同掺灰量下补水量变化。由图10可知,随掺灰量的增加补水量减少,这与土体冻胀量和掺灰量的关系是一致的,证明石灰量逐渐增多后,土粒间孔隙逐渐被填满,土体内部分水分迁移逐渐减小。

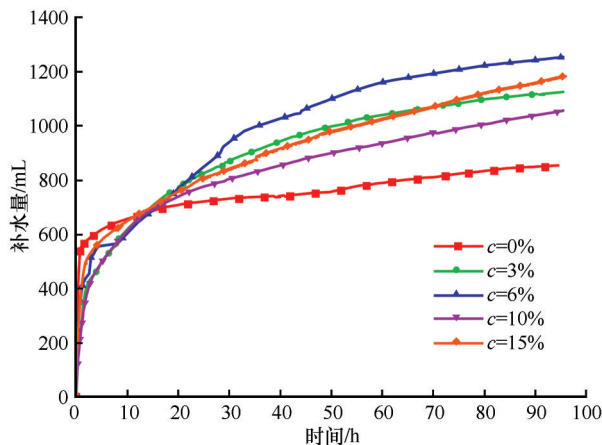


图9 不同石灰掺量下土样水分入流量变化曲线

Fig. 9 Water inflow curve of soil samples with different lime content

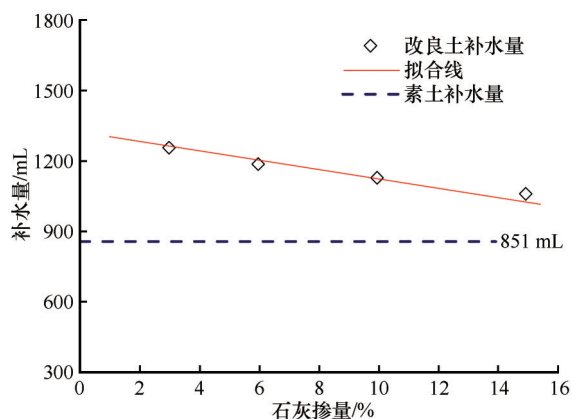


图10 补水量随掺灰量的变化曲线

Fig. 10 The curve of supplement water amount vs. lime content

### 2.3.2 掺灰量对冻后土样含水率分布的影响

图11为试样冻结后与冻结前的含水率沿土柱高度的分布情况。其中,阴影线表示不同掺灰量土样冻结锋面集中分布区域,黑色线表示各试样的初



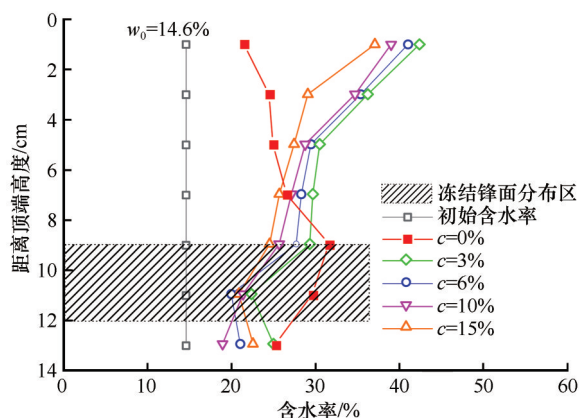


图 11 不同石灰掺量下的土样含水率随高度的变化

Fig. 11 Variation of soil moisture content of the soil samples added with different lime content

始含水率,其余分别代表不同掺灰量的土体冻结完成后的含水率。由图 11 可知:改良土锋面以上的冻结区内,随着掺灰量的增大土样不同高度的含水量均减小,证明石灰量增多逐渐降低了冻结区的水分迁移;素土和改良土含水率分布转折点都出现在冻结锋面附近,但规律完全相反。素土的含水率在冻结锋面以下随高度变小而增大,冻结锋面以上又逐渐减小,而改良土正好相反,证明在石灰掺入改变了原本的土质结构配比,继而影响了水分迁移。

综上所述,可总结以下两点:(1)采用石灰对该土质进行改良,随掺灰量增大,土样冻结深度先增大后减小,最终冻胀量和补水量持续减小,而最终冻胀率先减小后增大,三个指标规律不一致,故粉土掺灰后表现出复杂的冻胀特性;(2)冻结深度在中间掺灰量下( $c=4.3\%\sim 11.5\%$ )大于素土,只有在低掺灰量( $c=0\%\sim 4.3\%$ )和高掺灰量( $c>11.5\%$ )时,改良土的冻结深度小于素土。当 $c>25.5\%$ 时,土样的最终冻胀量小于素土的最终冻胀量。改良土的冻胀率均高于素土。由此可知,一定条件下提高掺灰量可减小冻结深度和冻胀量,但冻胀率始终高于素土。因此,在实际工程中,不能仅通过单一指标评价石灰改良粉土的效果,需结合冻结深度、冻胀量和冻胀率三个指标,综合评价石灰对粉土抗冻性的改良效果。

### 3 机理分析

#### 3.1 改良土冻结深度变化规律的机理分析

改良土最终冻结深度随着掺灰量的增大呈先增大后减小的趋势,该变化规律是导热率和石灰反应放热双向调节的结果(图 12)。当掺灰量较小时,

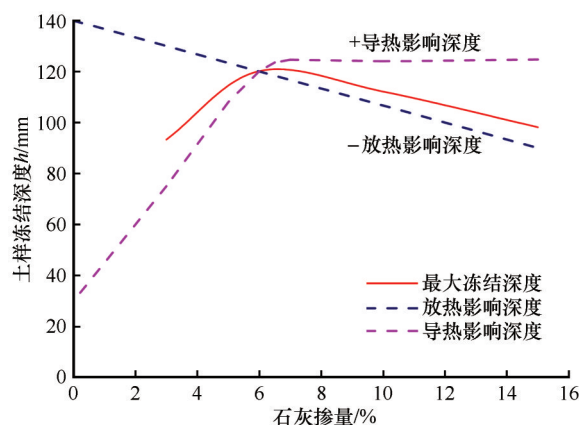


图 12 导热率和石灰反应放热双向调节示意图

Fig. 12 Schematic diagram of bidirectional regulation of thermal conductivity and lime reaction release heat

粉土内部孔隙逐渐被填充,导热率增大的速率大于石灰反应潜热增大的速率,因此,土样上部冷端温度传递较远,即最终冻结深度增大;当掺灰量增大到一定程度,孔隙完全被填充,导热率达到最大,随着石灰量继续增大,导热率不变,石灰反应放热持续增大,因此,放热阻止低温下移,导致高掺灰量下冻结深度反而减小。

#### 3.2 改良土冻胀量和补水量变化规律的机理分析

改良土的最终冻胀量和补水量均随掺灰量的增大而减小,二者变化规律相统一。土的冻胀最主要的原因是水分迁移,水分迁移的必要条件是有水源补给。因此,在试验条件下随着掺灰量的增大,石灰逐渐填充了粉土的孔隙,阻断了水分迁移的通道,补水量减小,使得冻胀量随之减小。

#### 3.3 改良土冻胀率变化规律的机理分析

冻胀率的定义是冻胀量比冻结深度,当掺灰量低于一定临界值时,随着掺灰量增加,冻胀量减小但冻结深度增大,故冻胀率减小;当超过一定临界值时,冻结深度也开始减小,且减小速率大于冻胀量,二者比值即冻胀率反而增大。因此,随着掺灰量增大,冻胀率整体呈现先减小后增大的趋势。而改良土的冻胀率高于素土的原因主要有以下方面:

##### 3.3.1 添加石灰后吸水量增大

氢氧化钙具有很强的吸湿性,会吸收土体水分,此外,氢氧化钙自身的结晶作用,以及部分未完全消解的氧化钙均会与土体中的水分进行反应,因此外界会有更多的水分补充进土体,引起石灰土冻胀量较素土增长多。

##### 3.3.2 一定掺灰量下毛细力增强

该试验土样粉粒粒组( $0.075\sim 0.005\text{ mm}$ )占比

92.88%, 氢氧化钙粒径范围为 0.0095~0.0075 mm。粉土在一定掺灰量下孔隙未填满, 但由于石灰的存在毛细作用增强, 冻结时孔隙毛细水和外界补水会源源不断地向冻结锋面迁移, 引起大于素土的冻胀量。

### 3.3.3 一定掺灰下导热系数改变

熟石灰掺入土体中会发生碳酸化和自行结晶作用, 导致土体孔隙度减小。矿物骨架的导热系数远远大于气相填充物的导热系数, 而顶端冷却温度相同, 所以冻结时间相同时, 石灰土温度梯度大于素土, 诱导水分迁移, 增大补水量, 产生较大的冻胀量。

综上, 粉土中加入石灰后冻胀特性复杂且冻胀率大于素土。由机理分析可知, 出现该情况是低液限砂质粉土的粒径级配、石灰粒径大小及石灰化学性质等因素综合影响的结果。

## 4 结论

本文通过冻胀试验, 研究石灰改良冻结粉土不同掺灰条件下的温度场、变形场和水分场分布规律, 分析相应的变化机理。得出以下结论:

(1) 采用石灰对该土质进行改良, 改良后的土样随掺灰量增大, 冻结深度先增大后减小, 最终冻胀量和补水量持续减小, 而最终冻胀率先减小后增大, 三个指标规律不一致。因此, 粉土掺灰后表现出复杂的冻胀特性。

(2) 冻结深度在中间掺灰量下 ( $c=4.3\%\sim 11.5\%$ ) 大于素土, 只有在低掺灰量 ( $c=0\%\sim 4.3\%$ ) 和高掺灰量 ( $c>11.5\%$ ) 时, 改良土的冻结深度小于素土。当  $c>25.5\%$  时, 土样的最终冻胀量小于素土的最终冻胀量。改良土的冻胀率均高于素土。由此可知, 一定条件下提高掺灰量可减小冻结深度和冻胀量, 但冻胀率始终高于素土。因此, 在实际工程中, 不能仅通过单一指标评价石灰改良粉土的效果, 需结合冻结深度、冻胀量和冻胀率三个指标, 综合评价石灰对粉土抗冻性的改良效果。

(3) 粉土中加入石灰后冻胀特性复杂且冻胀率大于素土。由机理分析可知, 出现该情况是低液限粉土的粒径级配、石灰粒径大小及石灰化学性质等因素综合影响的结果。

石灰改良土体是工程中常见的提高强度、水稳定性的化学改良方式, 对于大部分土质的抗冻性有一定提高。但通过本试验研究发现, 石灰对于低液

限粉土的冻胀特性影响复杂。因此, 在实际冻土区工程中, 需综合评价石灰改良粉土的改良效果。同时, 本文建立了石灰改良土冻胀预测模型, 可为研究低液限粉土石灰改良过程中冻胀规律和效果评估提供参考。

## 参考文献 (References):

- [1] Xu Xuezu, Wang Jiacheng, Zhang Lixin. Frozen soil physics [M]. Beijing: Science Press, 2001: 208-216. [徐学祖, 王家澄, 张立新. 冻土物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 208-216.]
- [2] Zhou Qiaoyong, Xiong Baolin, Yang Guangqing, et al. Microstructure of low liquid limit silt[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(Suppl 2): 439-444. [周乔勇, 熊保林, 杨广庆, 等. 低液限粉土微观结构试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊2): 439-444.]
- [3] Taber S. Frost heaving[J]. Journal Geology, 1929, 37(5): 428-461.
- [4] Qi Jilin, Ma Wei. State-of-art of research on mechanical properties of frozen soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(1): 133-143. [齐吉琳, 马巍. 冻土的力学性质及研究现状[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 133-143.]
- [5] Wei Houzhen, Zhou Jiazuo, Wei Changfu, et al. Experimental study of water migration in saturated freezing silty soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(9): 2547-2552. [魏厚振, 周家作, 韦昌富, 等. 饱和粉土冻结过程中的水分迁移试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(9): 2547-2552.]
- [6] Jones R H, Lomas K J. The frost susceptibility of granular materials[C]//Proceedings of the 4th International Conference on Permafrost, Fairbanks, Alaska, 1983: 17-22.
- [7] Zhou Jiazuo, Wei Changfu, Li Dongqing, et al. Experimental study and numerical simulation to the process of frost heave in saturated silt[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(2): 487-495. [周家作, 韦昌富, 李东庆, 等. 饱和粉土冻胀过程试验研究及数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(2): 487-495.]
- [8] Wu Libo, Qi Wei, Niu Fujun, et al. A review of studies on roadbed frozen damage and countermeasures in seasonal frozen ground regions in China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(5): 1283-1293. [武立波, 祁伟, 牛富俊, 等. 我国季节性冻土区公路路基冻害及其防治研究进展[J]. 冰川冻土, 2015, 37(5): 1283-1293.]
- [9] Su Qun. The principle and prevention countermeasure of subgrade soil heaving in Northeast Region [J]. Journal of Heilongjiang Institute of Technology, 2001, 15(1): 2-4. [苏群. 东北地区路基土冻胀机理与防治对策[J]. 黑龙江工程学院学报, 2001, 15(1): 2-4.]
- [10] Eskisar T, Altun S, Kalipcilar I. Assessment of strength development and freeze-thaw performance of cement treated clays at different water contents[J]. Cold Regions Science and Technology, 2015, 111: 50-59.
- [11] Gow A J, Davidson D T, Sheeler J B. Relative effects of chlorides, lignosulfonates and molasses on properties of a soil-aggregate mix [J]. Highway Research Board Bulletin, 1961, 282: 66-83.
- [12] Deng Yousheng, Ma Wei, He Ping, et al. Study of soil-reinforce effect and frost-heaving prevention effect of additive[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(6): 644-647. [邓友生, 马巍, 何平, 等. 添加剂对土体的加固作用及



- 冻胀防治研究[J]. 冰川冻土, 2003, 25(6): 644-647. ]
- [13] Zhao Shiyun, Yang Yanke, Li Fuhai, et al. Research on cement-modified frost heave characteristics of high-speed railway subgrade[J]. Journal of the China Railway Society, 2014, 36(5): 71-75. [赵世运, 杨彦克, 李福海, 等. 高速铁路路基冻胀特性水泥掺入的改性研究[J]. 铁道学报, 2014, 36(5): 71-75. ]
- [14] Li Siqu, Yang Ping, Zhang Ting, et al. Experimental study on frost heave and thaw settlement properties of silty clay cement-improved soil [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(4): 1-8. [李思齐, 杨平, 张婷, 等. 粉质黏土水泥土冻胀融沉特性研究[J]. 冰川冻土, 2021, 43(4): 1-8. ]
- [15] Li Ping, Kong Jiangwei, Zhang Yuxiu, et al. Experiment of CBR value of loess subgrade improved with quick lime and its application[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2010, 36(2): 105-109. [李萍, 孔江伟, 张玉秀, 等. 生石灰提高黄土路基CBR值的试验与应用[J]. 兰州理工大学学报, 2010, 36(2): 105-109. ]
- [16] Huang Kai, Fu Hongyuan, Liu Ningbo. Research on the frost-heaving effect of lime to silty soil subgrade[J]. Highways and Automotive Applications, 2009(1): 80-83. [黄凯, 付宏渊, 刘宁波. 石灰对上路床粉土的固化稳定效果研究[J]. 公路与汽运, 2009(1): 80-83. ]
- [17] Han Chunpeng, He Dongpo, Jia Yanmin, et al. Frost heave properties of lime modified subgrade soil [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2013, 33(3): 27-31. [韩春鹏, 何东坡, 贾艳敏, 等. 石灰改良路基土的冻胀特性[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2013, 33(3): 27-31. ]
- [18] Zhang Lixin, Wang Jiacheng. Experimental study on frost heaving behaviors of lime soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(3): 336-339. [张立新, 王家澄. 石灰土冻胀特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(3): 336-339. ]
- [19] Wang Hanyue, Jiang Yingjun. Analysis of frost resistance performance of lime improved loess roadbed filler[J]. China Sciencepaper, 2021, 15(2): 154-159. [王翰越, 蒋应军. 石灰改良黄土路基填料抗冻性能分析[J]. 中国科技论文, 2021, 15(2): 154-159. ]
- [20] Peng Liyun, Liu Dexin, Liu Mingjie, et al. Research on freezing temperature of silt reinforced with wheat straw and lime[J]. Highway, 2021(5): 49-54. [彭丽云, 刘德欣, 刘铭杰, 等. 麦秸秆加筋石灰粉土冻结温度试验研究[J]. 公路, 2021(5): 49-54. ]
- [21] Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of building foundation: GB 50007—2011 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2011. [中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑地基基础设计规范: GB 50007—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011. ]
- [22] Wang Tianliang, Liu Jiankun, Tian Yahu. Static properties of cement and lime-modified soil subjected to freeze-thaw cycles [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(1): 193-198. [王天亮, 刘建坤, 田亚护. 冻融作用下水泥及石灰改良土静力特性研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(1): 193-198. ]
- [23] Ministry of Transport of the People's Republic of China. Specifications for design of highway subgrade: JTG D30—2015[S]. Beijing: China Communications Press, 2015. [中华人民共和国交通运输部. 公路路基设计规范: JTG D30—2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015. ]
- [24] Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of soil and foundation of building in frozen soil region: JGJ 118—2011 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2011. [中华人民共和国住房和城乡建设部. 冻土地区建筑地基基础设计规范: JGJ 118—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011. ]

## Experimental study on the frost-heaving characteristics of lime-modified silt

MA Ling<sup>1</sup>, PENG Liyun<sup>2</sup>, LIU Dexin<sup>3</sup>, QI Jilin<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, North Minzu University, Yinchuan 750021, China; 2. School of Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 3. Architectural Design & Research Institute of Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Special attention should be paid to the frost heave due to silt's high capillary water content in permafrost engineering. The mechanism of lime improvement is not clear on frost resistance in silt areas. A series of one-dimensional frost heave tests to the frost heaving characteristics of lime-modified silt were carried out in an open system. The effects of different lime content on frost-heaving characteristics of silt were studied. The results show that the freezing depth of soil samples first increases and then decreases with the increase of ash content, the final frost-heave capacity and additional water amount decrease, and the frost-heaving ratio decreases first and then increases. The indexes exhibit different change rules, and the frost-heaving characteristics are complex. Under certain conditions, increasing the ash content can reduce the freezing depth and frost heave amount, while the frost heave rate of the lime-modified silt is always higher than that of plain soil. Therefore, it is necessary to comprehensively evaluate the improvement effect of lime on the frost resistance of silty soil by combining the three indexes of freezing depth, frost heave amount, and frost heave rate instead of a single indicator in specific projects.

**Key words:** silt; frost heaving characteristics; lime improvement; frost heaving depth; frost heaving rate

(责任编辑: 罗栋梁)