

文章编号:1671-8879(2013)02-0033-05

# 冻融循环作用对石灰改良黏土侧限回弹模量的影响

王海鹏<sup>1</sup>, 韩春鹏<sup>2</sup>

(1. 东北林业大学 工程咨询设计研究院, 黑龙江 哈尔滨 150040;

2. 东北林业大学 土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

**摘 要:**为研究石灰改良黏土经冻融循环作用后其回弹模量的变化规律,对不同石灰掺量最佳含水量下的土体进行了试验研究。试验结果表明:在掺灰剂量 8% 以下时,土体随掺灰剂量的增大其回弹模量逐渐增大,掺灰后的土体随着冻融循环的次数增加回弹模量逐渐减小;经历第一次冻融循环后的模量衰减幅度较大,经历 6 次冻融循环后其回弹模量值逐渐趋于稳定,各级掺量下的石灰土经冻融后模量衰减比例均小于素土;对于不同压实度下的土体,冻融循环下回弹模量衰减趋势大体相同,与未冻融土体相比,衰减值在 30% 左右。

**关键词:**道路工程;冻融循环;石灰改良黏土;回弹模量

**中图分类号:**U416.1

**文献标志码:**A

## Effect of freeze and thaw on confined resilient modulus of improved lime-soil

WANG Hai-peng<sup>1</sup>, HAN Chun-peng<sup>2</sup>

(1. School of Engineering Consulting & Design, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China; 2. School of Civil Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

**Abstract:** To research resilient modulus changing law of lime modified soil with freeze and thaw, the experiment was carried out under different ratios of lime to soil and the optimum moisture content. The results indicate that when ratio of lime to soil is under 8%, the higher the ratio of lime to soil, the bigger the resilient modulus of lime modified soil, and the more the cycle times of freeze and thaw, the less the resilient modulus; the decay amplitude of resilient modulus is the largest after the first time of freeze and thaw, and the resilient modulus after 6 times of freeze and thaw is gradually close to stability; under every ratio of lime to soil, the decay amplitude of lime-soil resilient modulus after freeze and thaw is lower than that of soil; for lime-soils with different compactedness, decay trends about resilient moduli of lime-soil are roughly the same, and after freeze and thaw, the decay amplitude of resilient modulus is about 30% compared with lime-soil without freeze and thaw. 2 tabs, 4 figs, 12 refs.

**Key words:** road engineering; freeze and thaw; lime modified soil; resilient modulus

收稿日期:2012-03-10

基金项目:交通运输部科技项目(2011 319 812 020);中央高校基本科研业务费专项资金项目(DL11BB07)

作者简介:王海鹏(1979-),男,黑龙江北安人,工程师,E-mail:12375292@qq.com。

## 0 引言

石灰作为一种建筑材料,掺加在路基土中能够起到减水、增强、加固的效果,且价格经济,所以在公路工程建设当中得到广泛应用。黏性土中加入适量石灰,可降低其塑性、改善土颗粒的黏附性。当石灰掺量为 3%~8% 时,石灰改良土的最大干密度和最优含水量的变化幅度较小,且其强度随石灰掺量的增大而增大<sup>[1]</sup>;而回弹模量作为土基弹性模量的简化和修正,是路基设计中的主要强度参数,道路工程的设计、施工及验收都把路基的回弹模量作为一个非常重要的指标,石灰土路基回弹模量随土张力减小、饱和度增大而增大<sup>[2]</sup>。在中国北方地区,冬季寒冷,夏季炎热,路基土体必然因气候变化而受到冻融的作用,土体的强度特性在冻结与融化状态时具有较大的差异,经过反复冻融的土体,其内部微观结构将发生变化,强度也随之发生改变,冻融作用改变了土的结构,反复冻融不仅破坏了土颗粒间的联结力,使土颗粒重新排列,冻融过程会使土体沉降变形增加,路基可能产生失稳<sup>[3-7]</sup>;由于冻融作用降低了土体的强度,土体的回弹模量随着冻融循环次数的增加逐渐衰减,影响了路基的使用功能<sup>[8-11]</sup>。目前,针对反复冻融作用对石灰黏土回弹模量的影响方面的研究还很少,不同石灰掺量的土体经冻融作用后其模量变化还没有定性及定量的研究,所以测定石灰土在冻融循环作用下回弹模量的变化是非常有必要的工作。为此,本文对不同石灰掺量最佳含水量下的土体进行了试验研究,得出了具有工程实用价值的结论。

## 1 试验方案设计

### 1.1 试验材料

试验土体为低液限黏土,取自黑龙江省鸡西—讷河公路 K546+550 处取土场处,取样深度为 1.5 m,其基本物理指标见表 1。

表 1 试验土体基本物理指标

Tab. 1 Physical indices of soil

试验土体	土粒密度 $\rho_s$ / ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	天然含水 率 $w$ /%	液限 $w_L$ /%	塑限 $w_p$ /%	塑性指 数 $I_p$
低液限黏土	2.73	28.4	44.8	23.8	21

石灰产自哈尔滨市阿城区,消解后其有效 CaO、MgO 含量(质量分数)为 56%,属于三级灰。

### 1.2 试验方法

本试验所用试件按照《公路土工试验规程》

(JTG E40—2007)中规定,尺寸为  $\Phi 10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ ,采用静压法成型,通常对于路基土掺灰剂量一般不大于 8%,结合路基填土实际工程应用及要求,分别对素土及 2%、4%、6%、8% 这 4 个掺量(质量分数)的石灰改良黏土进行试验,同时考虑不同填土高度路基压实度的要求,对 96%、93%、90% 的 3 个压实度水平的试验土体进行回弹模量的测试,结合路基受环境温度条件影响下的特征,设计了 1 次、3 次、6 次及 10 次冻融循环作用,并与未受冻融循环作用的土体试验结果进行比较,探求冻融循环对不同掺灰剂量、不同压实度特征下路基土体回弹模量产生的影响。

将风干土及石灰分别过 2 mm 和 0.5 mm 筛子,按上述掺量分别配比土样。按照不同掺灰剂量,不同压实度、最佳含水量分别制作试件后,在标准温湿度下养生 28 d 后进行冻融循环,试验中其冻融循环温度控制范围为  $-15 \text{ }^{\circ}\text{C} \sim 15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,每个冻融循环为 12 h,其中从  $15 \text{ }^{\circ}\text{C}$  降至  $-15 \text{ }^{\circ}\text{C}$  为 4 h,然后保持  $-15 \text{ }^{\circ}\text{C}$  恒温 2 h,再用 4 h 从  $-15 \text{ }^{\circ}\text{C}$  上升至  $15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,保持  $15 \text{ }^{\circ}\text{C}$  恒温 2 h,同时配以一同体养生试件,内部布设温度传感器,随时监测土体内部温度。最佳含水率、96% 压实度各石灰掺量土体经 10 次冻融循环后质量损失率见表 2。

表 2 各掺灰剂量土体经 10 次冻融循环后质量损失率

Tab. 2 Quality loss rates after 10 times of freezing and thawing under different ratios of lime to soil

掺灰剂量 /%	0	2	4	6	8
质量损失率 /%	16.5	10.1	7.8	7.3	5.1

从表 2 中可以看出,除掺灰剂量 4% 和 6% 经冻融后质量损失率比较接近外,土体大致呈现掺灰剂量越大,质量损失率越小的规律。

试验采用顶面法测定土体的静态回弹模量,回弹模量计算式为

$$E = \frac{\pi PD}{4l} (1 - \mu^2)$$

式中: $E$  为回弹模量(MPa); $P$  为承载板上的单位应力(MPa); $D$  为承载板直径(mm),取 50 mm; $l$  为相应于单位压力的回弹变形(mm), $l$  等于加载读数减去卸载读数; $\mu$  为泊松比,取 0.35。

## 2 试验结果分析

### 2.1 回弹模量与掺灰剂量的关系

下页图 1 所示为素土及各级掺灰剂量土体在压实度为 96%、最佳含水量下,养生 28 d 后土体的回弹模量。从图 1 可看出,随着掺灰剂量的增加,其土

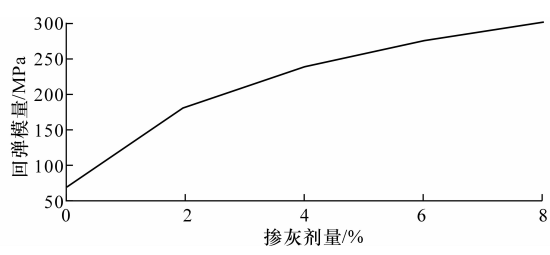


图 1 回弹模量与掺灰剂量的关系

Fig. 1 Relation of resilient modulus and the ratio of lime to soil

体回弹模量逐渐增加。各掺灰剂量的土体的回弹模量均大于规范中高速公路及一级公路路基土体回弹模量要高于 30 MPa 的要求。其中,与素土相比,掺灰剂量为 2% 的土样其回弹模量增长 160.4%,达到了 182.45 MPa,说明掺灰大幅度提高了土体的强度。而当掺灰剂量继续增加时,其增长幅度趋缓并基本趋于线性趋势,掺灰剂量每增加 2 个百分点,土体回弹模量增加约 30~40 MPa。其原因主要是由于石灰土强度形成的机理所决定的。黏土中掺入一定量的石灰,在最佳含水率下经过均匀拌和压实后,其内部将发生离子交换、火山灰反应和石灰本身的碳化与结晶等物理化学变化,土体内部多个单个土粒聚成了小团粒,构成了凝胶团聚结构,而结晶作用增强了土粒的胶结作用,形成了网架结构。随着龄期的继续增长,胶凝结构层加厚,结晶的网架结构加密,形成了胶凝-结晶的网状混合结构,石灰土结构刚度不断增加,回弹模量得到大幅提高<sup>[12]</sup>。

2.2 回弹模量与冻融循环的关系

土体在冻融循环作用下,其回弹模量逐渐减小,图 2(a)为各掺灰剂量在最佳含水率下,压实度为 96% 土体的回弹模量与冻融循环次数的趋势图。可以看出各石灰掺量的土体,其回弹模量均随着冻融循环次数的增加而降低,冻融循环 10 次后,掺灰剂量 0%、2%、4%、6%、8% 的土体其回弹模量降低幅度分别为未经冻融循环土体的 40.3%、32.8%、30.0%、32.2%、33.2%;掺灰土体模量衰减率比未掺灰的土体要低,说明掺灰起到了增强的效果。其中,第一次冻融循环后土体回弹模量衰减幅度最大,其各级掺量降低幅度分别为 21.0%、19.7%、15.6%、18.0% 和 17.6%,占 10 次冻融循环土样回弹模量总衰减率的一半左右。经历 3 次冻融循环后各石灰掺量回弹模量总衰减率为 31.1%、27.5%、24.0%、27.9%、26.2%,占总衰减率 3/4 以上。而随着冻融循环次数的进一步增加,土体回弹模量值不断降低,但其降低幅度逐渐减小,当土体经受了 6 次冻融循环后,回弹模量衰减幅度逐渐减小,至 10

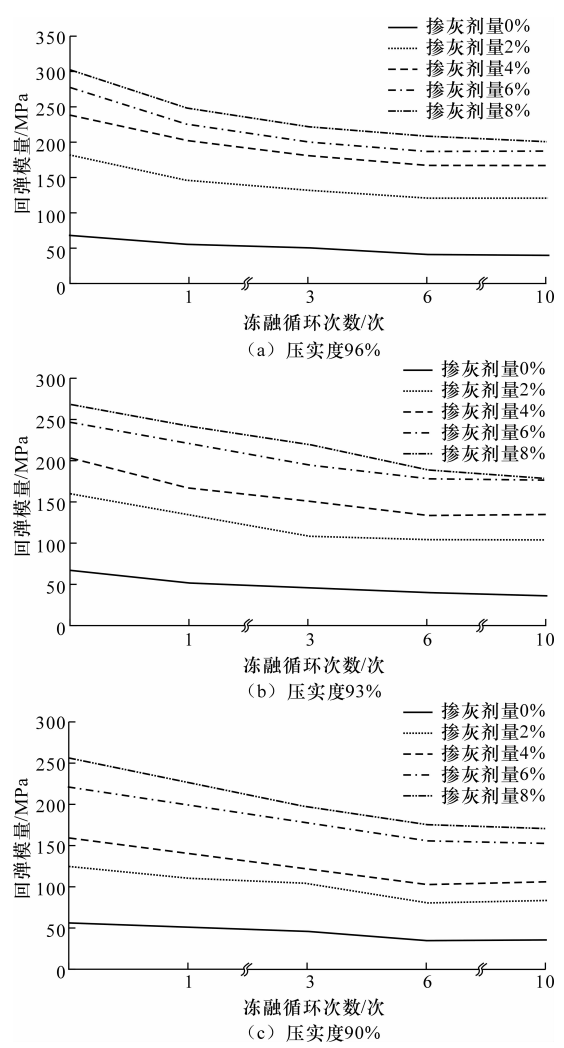


图 2 回弹模量与冻融循环次数的关系

Fig. 2 Relation between resilient moduli and times of freeze and thaw

次冻融循环后,其回弹模量值变化不大。试验说明,土体在经过多次冻融循环后,土体模量逐渐趋于稳定。冻融循环改变了土体内部结构与颗粒排列方式,从而改变了土体的力学性能。分析其主要原因,未经历冻融循环的土体处于致密状态,当温度降至冰点以下时,土体内部自由水发生冻结,冻结后的水分发生迁移且体积增大,土体局部由于水分的相变而引发的孔隙率变大,部分破坏了土体胶凝-结晶的网状混合结构,降低了土体的强度。再次经历冻融循环时,由于在第一次循环时其孔隙率已经增大,为水分冻结体积膨胀提供了空间,故土体强度衰减率比第一次冻融循环要小,经过多次冻融循环后,土体内部由于水分相变引起孔隙率的增大已经充分发展,土体结构趋于稳定,故再次经历冻融循环时土体强度损失有限,至 6 次以上冻融循环时,土体回弹模量变化很小。

掺灰后的土体经冻融循环作用后其最后模量衰减比例均小于素土模量衰减比例,说明掺灰能够部分提高土体的抗冻融性能,主要由于掺灰后土体最佳含水率较素土虽有所提高,但其水分主要是以化合物和结合水的形式存在,以自由水形式存在较少,故在冻融时对土体结构的破坏较小,且由于土体掺灰形成的网状混合结构,其胶体性质及团粒结构部分抑制了土体在冻融循环过程中由于水分相变所引起对土体结构的破坏作用,故其模量衰减较素土降低。由于其掺灰后模量的绝对值较大,所以衰减后土体仍具有较高的模量值,对于提高路基稳定性具有十分重要的意义。

通过图 2 可以看出,压实度越大的土体其回弹模量越大,经冻融后各掺灰剂量土体也遵循这样一个规律,回弹模量随冻融循环次数的增加而不断降低,不同压实度强度衰减趋势大体相同(图 2(b)和图 2(c))。从经冻融 1 次后土体回弹模量的衰减量来看(图 3),在相同掺灰剂量下,土体均呈现出压实度越大,经历第 1 次冻融循环后的回弹模量损失越大,各压实度下的土体经 1 次冻融循环后其回弹模量值均损失较大。分析其原因,由于压实度大的土体孔隙较小,经过冻融作用后,其土体结构破坏较压实度小的土体严重,故其模量衰减较大。经过 10 次冻融后(图 4),仍体现出压实度越大回弹模量衰减值越大的规律,且随着掺灰剂量的增大,其衰减值也随之增大。在相同掺灰剂量下,土体均呈现出压实度越大,第 1 次冻融循环后的回弹模量损失越大。分析其原因,由于压实度大的土体其孔隙比较小,在经过冻融作用后,其土体结构破坏较压实度小的土体严重,故其模量衰减较大,而经过 10 次冻融后,模量损失值未体现出明显规律。

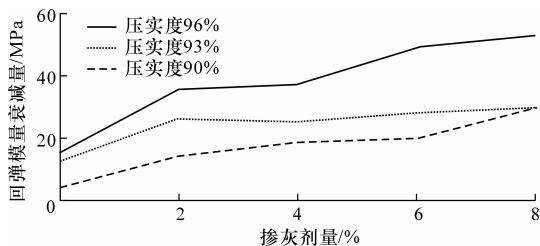


图 3 1 次冻融循环后土体的回弹模量衰减量

Fig. 3 Damping resilient modulus after one time of freeze and thaw

### 3 结 语

(1)在掺灰剂量 8% 以下时,掺灰土的回弹模量随掺灰剂量的增加而增加,并且基本呈线性增长

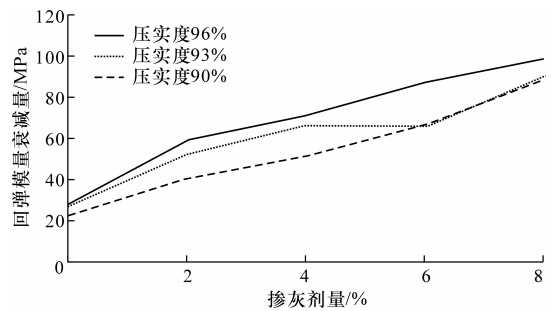


图 4 10 次冻融循环后土体的回弹模量衰减量

Fig. 4 Damping resilient modulus after 10 times of freeze and thaw

趋势。

(2)经冻融循环后,各掺灰剂量土体回弹模量均随冻融循环次数的增加而减小,且掺灰后回弹模量的衰减比例小于素土的衰减比例,土体在前 3 次冻融循环后其回弹模量衰减较大,当循环次数达到 6 次后,其回弹模量的值趋于稳定。

(3)不同压实度的掺灰土体,其回弹模量经冻融循环变化的趋势基本相同,掺灰对于土体的抗冻融性有部分提升,但其主要作用还是对土体自身的强度提高。

### 参考文献:

#### References:

- [1] 徐 勇,张婉琴,宫全美,等.石灰土作为铁路路基填料的研究[J].岩石力学与工程学报,2001,20(增1): 1015-1017.  
XU Yong,ZHANG Wan-qin,GONG Quan-mei,et al. Study on line soil used as railroad bed packing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001,20(S1):1015-1017. (in Chinese)
- [2] 谢华昌,吴海平,凌建明.湿度和吸力对处治土路基回弹模量的影响[J].中国公路学报,2001,14(增): 19-21.  
XIE Hua-chang,WU Hai-ping,LING Jian-ming. Influence of moisture content and suction on modulus of pavement subgrade[J]. China Journal of Highway and Transport, 2001,14(S):19-21. (in Chinese)
- [3] 梁 波,张贵生,刘德仁.冻融循环条件下土的融沉性质试验研究[J].岩土工程学报,2006,28(10): 1213-1217.  
LIANG Bo,ZHANG Gui-sheng,LIU De-ren. Experimental study on thawing subsidence characters of permafrost under frost heaving and thawing circulation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006,28(10):1213-1217. (in Chinese)

- [4] Chamberlain E J, Gow A J. Effect of freezing and thawing on the permeability and structure of soils[J]. Engineering Geology, 1979, 13(1): 73-92.
  - [5] 李国玉, 马巍, 穆彦虎, 等. 冻融循环对压实黄土湿陷变形影响的过程和机制[J]. 中国公路学报, 2011, 24(5): 1-5, 10.  
LI Guo-yu, MA Wei, MU Yan-hu, et al. Process and mechanism of impact of freezing and thawing cycle on collapse deformation of compacted loess[J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(5): 1-5, 10. (in Chinese)
  - [6] 侯曙光, 沙爱民. 土体冻融过程温度场与位移场耦合分析[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2009, 29(5): 26-29.  
HOU Shu-guang, SHA Ai-min. Temperature-displacement field coupling analysis in freeze-thaw process of soil[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2009, 29(5): 26-29. (in Chinese)
  - [7] 牛富俊, 马巍, 吴青柏. 青藏铁路主要冻土路基工程热稳定性及主要冻融灾害[J]. 地球科学与环境学报, 2011, 33(2): 196-206.  
NIU Fu-jun, MA Wei, WU Qing-bai. Thermal stability of roadbeds of the Qinghai-Tibet railway in permafrost regions and the main freezing-thawing hazards[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2011, 33(2): 196-206. (in Chinese)
  - [8] 靳德武, 牛富俊, 陈志新, 等. 冻土斜坡模型试验相似分析[J]. 地球科学与环境学报, 2004, 26(1): 29-32.
  - [9] 毛雪松, 侯仲杰, 王威娜. 基于含水量和冻融循环的重塑土回弹模量试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增2): 3585-3590.  
MAO Xue-song, HOU Zhong-jie, WANG Wei-na. Experimental research on resilient modulus of remolded soil based on water content and freeze-thaw cycles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(S2): 3585-3590. (in Chinese)
  - [10] Lee W, Bohra N C, Altschaeffl A G, White T D. Resilient modulus of cohesive soils and the effect of freeze-thaw[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1995, 32(4): 559-568.
  - [11] 齐吉琳, 程国栋, Vermeer P A. 冻融作用对土工程性质影响的研究现状[J]. 地球科学展, 2005, 20(8): 887-894.  
QI Ji-lin, CHENG Guo-dong, Vermeer P A. State-of-the-art of influence of freeze-thaw on engineering properties of soils[J]. Advance in Earth Science, 2005, 20(8): 887-894. (in Chinese)
  - [12] 贺建清. 石灰改良土路基填料的动力特性及应用研究[D]. 长沙: 中南大学, 2005.  
HE Jian-qing. Study on the dynamic properties of limesoil roadbed filling and its applications[D]. Changsha: Central South University. (in Chinese)

南京理工大学, 2008.

TANG Hai-chang. The durability analysis of concrete subjected to sulfate attack[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2008. (in Chinese)

- [8] 过镇海, 时旭东. 钢筋混凝土原理与分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.  
GUO Zhen-hai, SHI Xu-dong. Principle and analysis of reinforced concrete[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003. (in Chinese)
- [9] 关博文, 刘开平, 陈拴发, 等. 水镁石纤维路面混凝土路用性能[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2012, 32(1): 26-30.  
GUAN Bo-wen, LIU Kai-ping, CHEN Shuan-fa, et al. Road performance of brucite fiber reinforced pavement concrete[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2012, 32(1): 26-30. (in Chinese)