

石灰土冻胀特性试验研究

Experimental study on frost heaving behaviors of lime soil

张立新^{1,2}, 王家澄²

(1. 北京师范大学 遥感与 GIS 研究中心 资源与环境科学系, 北京 100875; 2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所
冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 为考察石灰土在冻结状态下的物理力学性质, 对不同石灰含量的石灰土的冻胀特性进行了试验研究。试验结果表明, 石灰土的孔隙度和导水系数随着石灰含量的增加不断减小, 而黏聚力则不断增加。在这种情况下, 石灰土的冻胀率随着石灰含量的增加呈现显著减小的趋势。综合其它有关因素, 从防止冻胀的角度来看, 石灰含量的最优值约为 12% ~ 15% 左右。

关键词: 冻胀; 石灰土; 冻结过程

中图分类号: TU 445

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2002)03-0336-04

作者简介: 张立新(1966-), 男, 河北人, 研究员。2000 年于中国科学院兰州冰川冻土研究所获博士学位, 现为北京师范大学遥感中心在站博士后, 主要从事寒区环境与工程、冻土工程、工程地质勘察等方面的科研工作。

ZHANG Li-xin^{1,2}, WANG Jia-cheng¹

(1. Research Center for Remote Sensing and GIS, Department of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou 730000, China)

Abstract: This paper is concerned with the physico-mechanical properties of lime soil during freezing process. By experiment the frost heaving behaviors of lime soil with different lime content are studied. The test results show that the porosity and hydraulic conductivity of lime soil decrease and the cohesion strength increases with increasing of lime content. Thus, the amount of frost heaving of lime soil is much smaller than that of pure soil. The optimum lime content is about 12% - 15%. It is concluded that mixing of lime with soil has noticeable influence on the freezing behaviors of soil and causes a restraint on the frost heaving.

Key words: frost heaving; lime soil; freezing process

1 概 论^{*}

与未冻结土体相比, 冻土的工程性质要复杂得多。其中最重要的原因是土体在冻结过程中有冰的形成。冰的形成往往导致土体体积增大和内部水分的重新分布, 这使得土体的力学性质变得极不稳定。已有的研究工作表明, 季节性的冻融交替导致了大量寒区工程的破坏(徐学祖等, 1995)^[1]。由于土体中水分的重分布和冰透镜体的形成与温度和温度梯度及其变化紧密相关, 同时又受到土质、地下水位等因素的影响, 而土体的冻胀主要是由冰透镜体的形成所引起, 因此影响水分迁移和成冰的因素也就是影响土体冻胀和有关工程性质的因素。许多研究工作针对土体的类型、含水率、含盐量、密度、温度, 以及外部荷载等等因素与土体冻胀量的关系开展了广泛的考察(Wang 等, 1995; Chamberlian, 1983; 徐学祖等, 1987; Ishizaki and Nishio, 1985; Akgawa, 2000)^[2~6]。基于以上研究, 工程专家成功发明了一系列防止土体冻胀的实用措施。其中一种措施是以改变土体的组成和结构为核心, 通过添加一定比例的水泥或熟石灰减小土体的孔隙和导水能力, 增加黏聚力, 以达到减小冻胀量的目的(Feng et al. 1993)^[7]。

石灰是一种廉价的建筑材料, 广泛应用于地基改良。与土混合后, 石灰土对土颗粒有明显的胶结作用, 这种胶结作用使地基土的强度特性大为改善。研究表明, 当石灰土的重量含量低于 12% 时, 地基的强度随石灰的含量增加而增大, 最大强度可以达到未加石灰土的 50 倍左右。当石灰含量超过 12% 后, 混合土的强度基本不再增大(Broms, 1986)^[8]。以上研究仅限于未冻结土体。土体冻结以后, 伴随冰的形成和水分重分布过程的发生, 石灰对土的强度的影响变得趋于复杂。除关注石灰与土混合后的强度问题之外, 冻结过程中冻胀的发育问题也值得关注。本文所描述的试验研究表明, 石灰土的加入是抑制土体冻胀发育的有效措施, 从效果和成本来看, 有较好的应用推广价值。

2 样品与试验

样品取自东北某铁路货运场, 深度范围为 0~150 cm, 取样间隔为 20 cm。该处冬季最低气温可达 -35℃, 年平均气温为 3℃左右, 季节冻结深度约为 205 cm。由于该地区土层以细颗粒土为主, 且地下水

* 基金项目: 冻土工程国家重点实验室基金和博士后基金资助
收稿日期: 2001-09-24

位较高, 因此冻融作用的破坏对建筑工程的威胁非常大, 往往造成工程直接破坏, 或减少工程正常运转的寿命, 造成巨大损失。

在 0~ 150 cm 深度范围内, 土层颗粒组成变化较小, 可视作均质, 平均含水率为 23. 07%。冻结前取样时地下水位深度为 200 cm。土样的基本性质如表 1 所示。

表 1 土体的基本性质

Table 1 Basic properties of the soil

粒度组成/ %			w_0	V_d	w_L	w_P
> 0. 05 mm 0. 05~ 0. 005 mm< 0. 005 mm/ %			/(g·cm ⁻³) / % / % / %			
7. 2	73. 5	19. 3	23. 07	1. 63	28. 05	18. 60

注: w_0 为 0 至 150 cm 深度内的平均含水率; V_d 为干容重; w_L 为液限; w_P 为塑限。

试验的目的是考察不同石灰含量的混合土样在冻结过程中的水分迁移和冻胀规律, 以确定抑制冻胀的最佳石灰含量, 以满足工程的需要。试验使用了传统的冻胀观测装置, 如图 1 所示。

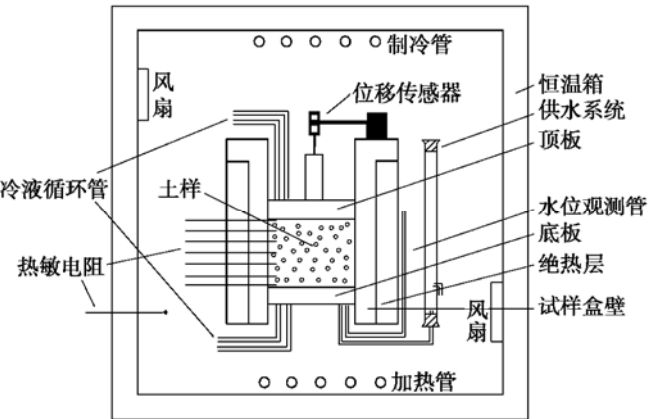


图 1 冻胀观测试验装置示意图

Fig. 1 Investigation device of frost heaving

试验样品分为 3 组: 第 1 组是原装样品, 取自两个深度, 保持原有的结构、干容重和含水率; 第 2 组为扰动样品, 依照对应原装样品的含水率和密度人工配制; 第 3 组为石灰土样品, 对应第 1 和第 2 组中样品的含水率和密度, 配制不同石灰含量的混合土样品。

原装样品现场取样后迅速封存在蜡封容器中, 以免水分散失。按照观测装置的样品尺寸要求, 试验前用土样刀刮削成直径 10 cm、高度 5 cm 的圆柱状样品。样品制作完成后, 测量和计算样品的体积、重量、初始含水率和干密度等参数, 并对结构进行描述。将样品用塑料薄膜包裹待测。

扰动样品采用内部直径 10 cm 的圆柱状模具制作。依照设计的高度、干密度和含水率, 制作了两个样品。样品在相同的密封条件下养护 10 d, 以确保样品内部水分的均匀分布。

石灰土样品由石灰和土的混合物组成。首先按比例要求将干燥的熟石灰粉加到碾碎的干土中, 充分混合。然后按含水率要求加入蒸馏水, 进一步混合。采取制作扰动样品的同样步骤, 制作完成 10 个石灰土样品。样品在同样的条件下养护 28 d。表 2 列出了样品的基本情况。

表 2 样品汇总

Table 2 Summary of the samples

编号	样品状态	高度 / cm	直径 / cm	含水率 / %	干容重 / (g·cm ⁻³)	V_d 石灰含量 / %	养护期 / d
TU1	原状土	5. 0	10. 0	17. 60	1. 66	0	—
TU2	原状土	5. 0	10. 0	17. 33	1. 67	0	—
TD1	扰动土	5. 0	10. 0	17. 71	1. 63	0	10
TD2	扰动土	5. 0	10. 0	17. 58	1. 63	0	10
TL1	石灰土	5. 0	10. 0	17. 61	1. 66	3	28
TL2	石灰土	5. 0	10. 0	17. 60	1. 66	3	28
TL3	石灰土	5. 0	10. 0	17. 63	1. 66	6	28
TL4	石灰土	5. 0	10. 0	17. 63	1. 66	6	28
TL5	石灰土	5. 0	10. 0	17. 63	1. 66	9	28
TL6	石灰土	5. 0	10. 0	17. 63	1. 66	9	28
TL7	石灰土	5. 0	10. 0	17. 63	1. 66	12	28
TL8	石灰土	5. 0	10. 0	17. 63	1. 66	12	28
TL9	石灰土	5. 0	10. 0	17. 63	1. 66	15	28
TL10	石灰土	5. 0	10. 0	17. 63	1. 66	15	28

进行样品冻胀观测试验时, 参图 1 所示装置, 将样品放置在恒温箱内。热敏电阻温度探头安装在试样容器的外壁上, 探头水平插入样品内部约 3 cm, 沿轴向布设的温度探头间隔为 1 cm。试样容器外壁包裹 10 cm 厚的海绵绝热材料。变形传感器设置在样品顶部, 记录轴向变形。样品的顶板和底板温度利用高精度的冷浴, 通过打入循环冷液进行控制。按照试验设计, 调节冷浴循环液温度即可达到需要的样品端面温度。为了克服过冷现象, 试验开始时首先将冻结端的冷液温度设定为- 12℃左右, 迅速打入顶面循环板中, 15 min 后将温度调至试验设定温度。样品剖面温度、冻胀变形量和补水量等数据定时自动采集或观测。试验后样品在低温室沿轴向切成薄片, 测定含水率、密度等有关参数。

3 结果与讨论

3. 1 孔隙度与黏聚力

冻胀源自土体冻结过程中水分的重分布, 尤其是冰分凝作用。因此冻胀量的大小主要决定于冻结过程中土体内部水分迁移和冰的分凝状况。而影响水分迁移和冰分凝状况的一个主要因素是土体的结构构造。熟石灰的加入, 与土壤中水分发生化学作用, 在土粒间生成有较强胶结作用的碳酸钙, 导致土体孔隙度减小,

黏聚力增大,在某种程度上改变了土体的内部构造。土体孔隙度的减小,使孔隙之间的连通性降低,降低了水分迁移的能力,同时黏聚力的增大,导致冰的晶体在形成和生长发育过程中需要克服的颗粒间力变大,起到了抑制冰晶分凝生长的作用。此外,由于黏聚力引起的压力势为正值,且当该压力势大于未冻水势的绝对值时,未冻水将被挤出。因此,黏聚力的增大将减少补水量和冻胀(王家澄,1996)^[9]。表3列出了不同石灰含量的石灰土的孔隙度、导水系数以及黏聚力的变化情况。

表3 土及石灰土的孔隙度和黏聚力

Table 3 Porosity and cohesion strength of soil and lime soil

编号	样品状态	干容重 γ_d /($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	石灰含量 / %	孔隙度 / %	导水系数 /($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	黏聚力 / MPa
TU1	原状土	1.66	0	26.82	7.39×10^{-6}	0.090
TD1	扰动土	1.63	0	22.17	3.25×10^{-6}	0.058
TL1	石灰土	1.66	3	19.31	1.31×10^{-6}	0.116
TL3	石灰土	1.66	6	16.78	5.26×10^{-7}	0.253
TL5	石灰土	1.66	9	11.38	3.19×10^{-7}	0.389
TL7	石灰土	1.66	12	10.50	2.72×10^{-7}	0.414
TL9	石灰土	1.66	15	9.79	2.55×10^{-7}	0.431

3.2 水分迁移与冻胀

正如上面所述,石灰的加入改变了土壤的结构构造特征。这种特征的变化有利于减小土体冻结过程中的冻胀量。显然确定最佳的石灰含量是一个关键问题。为此,在受控条件下,针对原状土、扰动土和石灰土的冻胀发育规律进行了试验。样品的温度边界条件由冷浴控制,顶底板温度分别控制在 -4.5°C 和 1.0°C 。样品试验仓温度恒定在 1.0°C 。关于水分条件,考虑了两种情况:一是所谓的开放系统,即土样下端面有一恒定水位的补给水源;另一种则为封闭系统,无水源补给。试验持续时间为72 h。图2和图3显示了不含石灰的原状土和扰动土对应开放和封闭两种系统的冻胀发育情况。

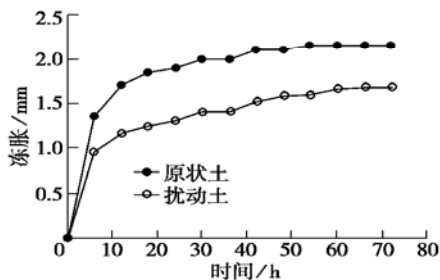


图2 封闭系统中原状和扰动土体的冻胀量

Fig. 2 Frost heaving of disturbed and undisturbed soil in closed system

在封闭系统中,由于冰的分凝没有持续的水源补给,大部分的孔隙水为原地冻结。原地冻结引起的体

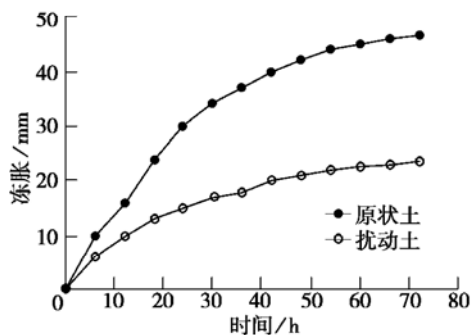


图3 开放系统中原状和扰动土体的冻胀量

Fig. 3 Frost heaving of disturbed and undisturbed soil in open system

积形变基本被未饱和的孔隙所吸收。同时,在温度梯度作用下由未冻端进入已冻端的少量水分迁移也会引起相对较大的形变,但由于总的水量受到限制,一般情况下,冻胀量并不显著。另外从图2中可发现,在相同的边界条件下,扰动土要小于非扰动土的冻胀量,其最可能的原因是扰动土破坏了原状土的孔隙连通结构,影响了水分迁移。

在开放系统中,地下水成为稳定的水源补给。当土体自上而下冻结时,冰透镜体在冻土端形成并不断发育,在充足水源补给的情况下,冰的集中分凝导致显著冻胀的发生,且冻胀量随着冻结深度的发展而不断增加。在本次试验中,在原状土试样中曾形成厚达15 mm的纯冰层。毫无疑问,如此之厚的冰层的形成对工程建设来说是巨大的潜在威胁。与封闭系统类似,在开放系统中,扰动土的冻胀量也小于原状土(见图3)。

对于石灰土,在同样的边界条件下,对应不同的石灰含量,冻胀均不同程度地受到抑制。在两种系统中,冻胀量随石灰含量的增加而减小(见图4和图5)。尤其在开放系统中,石灰对土体冻胀的抑制作用十分显著。基于前人的研究工作(Broms, 1986)^[8],结合试验结果,可以得出石灰含量在12%~15%之间是抑制冻胀发育的最佳含量。表4列出了开放和封闭系统下不同样品在冻结过程中的变形率。试验对应设定的温度边界条件持续了72 h。

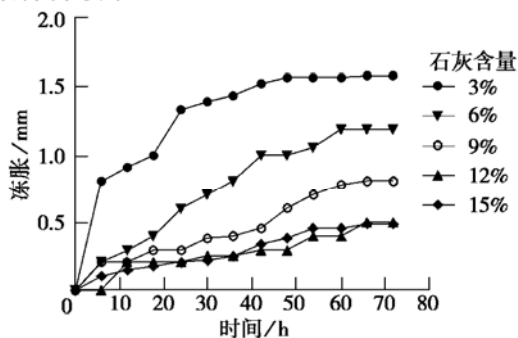


图4 封闭系统中石灰土的冻胀量

Fig. 4 Frost heaving of lime soil in closed system

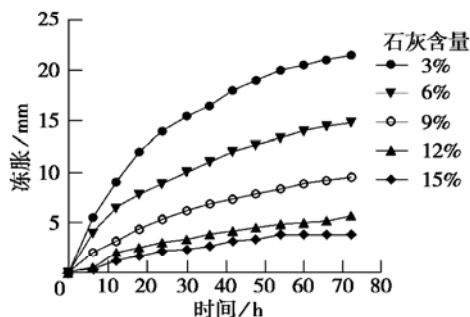


图5 开放系统中石灰土的冻胀量

Fig. 5 Frost heaving of lime soil in open system

表4 土及石灰土的冻胀率

Table 4 Frost heaving ratio of soil and lime soil samples

编号	样品状态	石灰含量 / %	顶板温度 / °C	底板温度 / °C	系统	变形量 / mm	冻胀率 / %
TU1	原状土	0	-4.51	1.02	封闭	2.15	4.30
TU2	原状土	0	-4.48	0.89	开放	46.50	93.0
TD1	扰动土	0	-4.50	0.78	封闭	1.68	3.36
TD2	扰动土	0	-4.52	1.00	开放	23.50	47.0
TL1	石灰土	3	-4.51	0.97	封闭	1.58	3.16
TL2	石灰土	3	-4.39	0.86	开放	21.50	43.0
TL3	石灰土	6	-4.46	1.03	封闭	1.19	2.38
TL4	石灰土	6	-4.62	1.10	开放	14.80	29.6
TL5	石灰土	9	-4.48	1.00	封闭	0.80	1.60
TL6	石灰土	9	-4.53	1.00	开放	9.50	19.0
TL7	石灰土	12	-4.50	0.98	封闭	0.50	1.00
TL8	石灰土	12	-5.49	1.04	开放	5.68	11.36
TL9	石灰土	15	-4.51	1.01	封闭	0.48	0.96
TL10	石灰土	15	-4.46	0.95	开放	3.85	7.70

通过比较封闭和开放系统中在冻结作用下原状土、扰动土和石灰土的冻胀率,发现石灰的加入是抑制土体冻胀的有效措施。从表4看到,12%石灰含量的石灰土的冻胀量在开放系统中仅为同等条件下的原状土冻胀量的12.2%。可见,石灰对冻胀的抑制作用非常显著。

4 结 论

(1) 在有充分地下水补给的条件下,即所谓的开放系统中,原状土的冻胀率大于扰动土的冻胀率。影响冻

胀率的土体参数主要包括孔隙度、导水系数和黏聚力。

(2) 在一定范围内随着石灰含量的增加,土体的孔隙度和导水系数减小,黏聚力增加。在这种情况下,石灰土的冻胀率显著小于同等条件下非石灰土的冻胀率,即石灰的加入对土体冻胀的抑制作用十分显著。对于试验中采用的土质,抑制冻胀的最佳石灰含量约为12%~15%。

参考文献:

- [1] Xu X Z, Wang J C, Zhang L X, et al. Mechanism of Frost Heaving and Salt Expansion of Soils[M]. Beijing: Science Press of China, 1995. 77-93.
- [2] 王家澄, 徐学祖, 张立新, 等. 土类对冻结过程中成冰及冷生构造发育影响的试验研究[J]. 冰川冻土, 1995, 17(1): 16-22.
- [3] Chamberlain E J. Frost heaving of saline soils[A]. Proceedings of the 4th International Conference on Permafrost[C]. Washington DC: National Academy Press, 1983. 121-126.
- [4] Xu X Z, Oliphant J L, Tice A R. Factors affecting water migration in frozen soil[J]. CRREL Report, 1987, 9: 16.
- [5] Ishizaki T, Nishio N. Experimental study of final ice lens growth in partially frozen saturated soil[A]. Proceedings of 4th International Symposium on Ground Freezing: Vol 1[C]. Rotterdam: A A Balkema, 1985. 71-78.
- [6] Akgawa S. A method for controlling stationary frost heaving[A]. Proceedings of 9th International Symposium on Ground Freezing and Frost Action in Soils: Vol 1[C]. Rotterdam: A A Balkema, 2000. 63-68.
- [7] Feng K, et al. Mechanism of the attenuation of strength for loess cement under freezing and thawing[A]. Proceedings of the 6th International Conference on Permafrost: Vol 1[C]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 1993. 768-772.
- [8] Broms B. Slope protection and deep excavation with lime and cement soil column[J]. Journal of Geoenvironment, 1986, 8(6): 17-21(Chinese translation).
- [9] Wang J, Xu X Z, et al. Influences of temperature and pressure on ice formation and cryogenic structure of freezing soils[J]. Journal of Cryosphere, 1996, 2: 87-92.

本刊网站公布稿件信息启事

为便于读者了解本刊稿件的动态信息,充分利用网络快捷的优势,自2002年起,本刊网站将不定期公布到稿、选稿和退稿等。公布上述信息的本刊网址为 <http://ytgc.chinajournal.net.cn>, 读者可以充分利用该网站上的相关公告, 查询到稿、选

稿和退稿信息。本刊编辑部的书面通知函件照常寄发给读者, 网站信息如有出入, 以书面通知为准。本刊编辑部联系电话 025-5829553, 5829556, E-mail: ge@njhri.edu.cn。

本刊编辑部