第 18 卷　第 34 期　2018 年 12 月
1671—1815(2018)034-0221-05

科　学　技　术　与　工　程
Science Technology and Engineering

Vol. 18　No. 34　Dec. 2018
© 2018　Sci. Tech. Engrg.

引用格式:刘熙媛, 赵　玮, 马占海, 等. 水泥改良黄土在冻融循环作用下的渗透性能[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(34): 221—225
Liu Xiyuan, Zhao Wei, Ma Zhanhai, et al. Permeability of cement modified loess under freezing-thawing cycle[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(34): 221—225

水泥改良黄土在冻融循环作用下的渗透性能

刘熙媛[1]　赵　玮[1]　马占海[2]　马印怀[2]

(河北工业大学土木与交通学院[1],天津 300401;河北省高速公路延崇筹建处[2],怀来 075400)

摘　要　为满足高速公路品质工程和绿色公路“零弃方”的建设要求,充分利用挖方路段的湿陷性黄土,采用室内试验研究水泥改良黄土在冻融循环作用下渗透性能的变化规律。对延崇高速河北段沿线黄土加入不同掺入量的水泥,进行了冻融循环试验和渗透试验。结果表明:反复冻融循环作用强烈影响着水泥改良黄土的渗透性;水泥对黄土颗粒结构有改造作用,从而提高了黄土的抗渗性和抗冻性;从工程的经济性以及提升黄土抗渗性和抗冻性角度,建议水泥掺入量为 5% ~8%。

关键词　水泥改良黄土　　冻融循环　　渗透性　　抗冻性

中图法分类号　TU411.4;　　**文献标志码**　B

中国黄土主要分布在西北和华北地区,分布面积约 63.1 万平方公里,约占中国国土总面积的 6.6%[1]。黄土以其分布广、多孔隙、垂直节理发育等特点闻名于世,同时也具有渗透性、湿陷性强等特性[2],常常会引起工程危害,更严重的可能会引发工程事故。近年来,学者们[3—5]开展了较多不同材料改良黄土的力学特性研究。渗透性是黄土物理力学特性的重要组成部分。关于黄土渗透性研究方面,国内外专家学者们取得了较为丰富的成果。中国黄土地区降雨量少,一般以非饱和土居多。李萍等以陇东高原马兰黄土为试验对象,得到非饱和黄土渗透系数与基质吸力或含水率的关系[6]。邵继钢通过对西安北郊黄土的研究,认为影响黄土渗透速度的主要因素是水头高度、含水量、表面张力、吸附力等[7]。王辉等认为干密度的变化对渗透系数影响较大,并且随着干密度的增加,渗透系数有减小的趋势[8]。除此之外,黄土的渗透性也会随着黄土孔隙率的增大而增大[9,10]。

中国华北地区是典型的季节性冻土地区,冬季寒冷,昼夜温差大。在反复的冻融循环作用下,常常会引起黄土地区的地质灾害。因此,研究冻融循环对黄土力学特性的影响显得尤为重要。王宁等在平凉至定西高速公路现场观测和室内试验结果表明,导致季节冻土区黄土路堑边坡剥落的主要原因之一是冻融循环作用[11]。冻融循环作用会使原状黄土与重塑黄土的干密度变小[12],孔隙比增大,渗透性增强;而且渗透系数随冻融次数增加均先增大然后趋于稳定[13]。通过对黄土不同次数的冻融循环试验得出,冻融后黄土抗剪强度会降低,黏聚力和内摩擦角均减小[14],压缩系数增大,压缩模量减小[15]。

纵观以上研究成果大多为陕西或甘肃的黄土,对河北黄土的研究很少。同时,对于在冻融循环作用下的改良黄土的渗透性能影响方面研究较少。因此,现基于延崇高速品质工程和绿色工程“零弃方”的建设要求,对河北张家口地区黄土采用水泥进行改良,研究冻融循环作用对水泥改良黄土渗透性能的影响。在保证防水性能的基础上,将水泥改良黄土用于灰土封层,为季节性冻土地区的黄土路堑边坡以及路堤边坡防渗层的设计和施工提供技术依据。

1　试验方案

1.1　冻融循环试验及渗透试验

试验首先对水泥改良黄土进行冻融循环试验。通过 DR—2A 型冻融试验箱实现,保证箱体的环境温度控制在一定温度下,精度可以达到 0.1 ℃。参照河北省张家口市冬季常规温度变化,设置冻结温度为 -20 ℃,融解温度为 20 ℃。将制备好的不同配合比的水泥改良黄土标记后放入箱体,冻融循环 3、5、10、15 次,每次冻结和融解均为 12 h。

冻融循环结束后对试样进行抽真空饱和,按照土工试验规程标准进行变水头渗透试验。试验采用南 55—2 型变水头渗透试验仪,因此直接用高 H = 40 mm、内径 D = 61.8 mm 的标准环刀分层压实制

2018 年 7 月 24 日收到

第一作者简介:刘熙媛(1973—),女,博士,副教授,硕士研究生导师。E-mail: zw930912@163.com。

样,以93%的压实度控制干密度。试验需设置一组平行试验,两次试验结果相差在允许平行差值内取其算术平均值为最后结果,否则继续试验直至符合要求为止。变水头渗透试验的渗透系数按照式(1)计算:

$$k = 2.3\frac{al}{At}\lg\frac{h_1}{h_2} \tag{1}$$

式(1)中:k 为试样渗透系数,cm/s;a 为变水头管的内径面积,cm^2;2.3 为 ln 和 lg 的换算系数;L 为试样高度,cm;t 为时间,s;h_1 为开始时水头,cm;h_2 为终止时水头,cm。

1.2 黄土试样性质及制备

黄土试验土样取自延庆至崇礼高速公路河北段主线(K22 +700 ~ K29 +600),原状土主要物理指标列于表1。

表1 原状土的主要物理指标

Table 1 Physical indices of undisturbed soil

液限/%	塑限/%	塑性指数	最佳含水率/%	最大干密度/(g·cm^{-3})
20.8	13.2	7.6	10.58	1.95

试验采用42.5级普通硅酸盐水泥对黄土进行改良,水泥掺入量按质量百分比计,即水泥质量与干土质量之比的百分数。结合前人研究成果,改良黄土按3%、5%、8%、10%四种水泥掺入量进行配制。黄土在制备土样前要粉碎过2 mm标准筛除去大颗粒,加入水搅拌均匀后"闷料"一夜,再加入确定掺入量的水泥进行制样。水泥遇水就会开始水化作用,从加入水到压实制样间隔的试验越长,水泥的水化作用和结硬程度就越大,所以在加入水泥拌和后1 h内要进行制样。

为控制所制备试样的压实度,满足实际工程施工的要求,采用轻型击实试验得出重塑土和四种水泥改良黄土的最大干密度和最优含水率,试验结果如图1所示。结果表明,水泥改良黄土和素土的最大干密度相差不多。水泥改良黄土的最优含水率在水泥掺入量为3%和5%时接近素土,当水泥掺入量大于5%后,其最优含水率随水泥掺入量的增加而缓慢增加,如图2所示。

2 渗透试验结果分析

2.1 未冻融黄土的渗透系数随水泥掺量变化规律

改良土的渗透系数与水泥掺入量的关系如图3所示,可以看出,在未冻融情况下,随着水泥掺量的增加,水泥改良黄土的渗透系数表现出一定规律的减小。水泥掺量增加至3%时,渗透系数的减小幅度不明显,随着掺量继续从3%增加至8%,渗透系

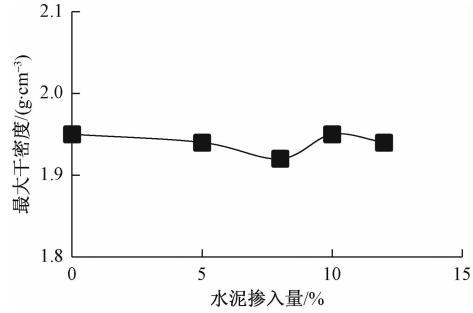

图1 最大干密度与水泥掺入量的关系

Fig. 1 Relationship between maximum dry density and cement content of cement soil

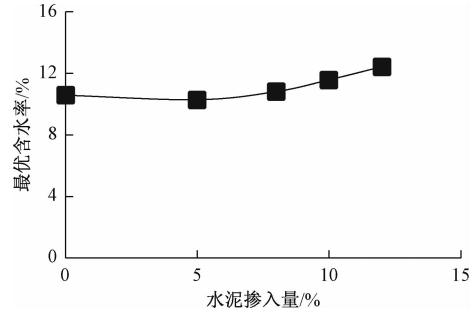

图2 最优含水率与水泥掺入量的关系

Fig. 2 Relationship between optinal water content and cement content of cement soil

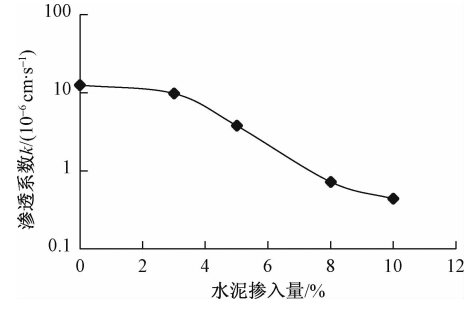

图3 渗透系数与水泥掺入量的关系

Fig. 3 Relationship between permeability coefficient and cement content of cement soil

数变化曲线变陡,渗透系数减小的幅度增大。而当掺量再继续增加时,曲线斜率逐渐平缓。

这一变化规律产生的原因是当黄土中掺入水泥后,水泥与土以及土中孔隙水发生了一系列复杂的物理化学反应。其中水泥与水反应后形成的胶状物会与土粒表面的金属离子进行吸附交换,形成大颗粒的聚合土团,土团彼此间链接后使得水泥土结构化,减小了土间孔隙率,从而降低了渗透系数。

当水泥掺入量小于3%时渗透系数变化量较小,主要因为水泥水化初期形成的胶状物较少,还不足以充满土体孔隙。而当水泥掺入量大于8%时变化斜率趋于平缓,是因为随着水泥掺入量的增加,孔

隙被充分填满,增加的水泥反应物不能有效地减少水泥土的渗透系数。因此,水泥改良黄土中最合适的水泥掺入量为5% ~8%。

2.2　未改良土的渗透系数随冻融循环次数变化规律

图4表示的是未改良黄土的渗透系数与冻融循环次数的关系,由图4可知,在反复冻融循环后,未改良黄土的渗透系数随着冻融循环次数的增加呈上升趋势。其中冻融循环10次之前,上升趋势较为明显。循环10次之后,上升斜率变得平缓。

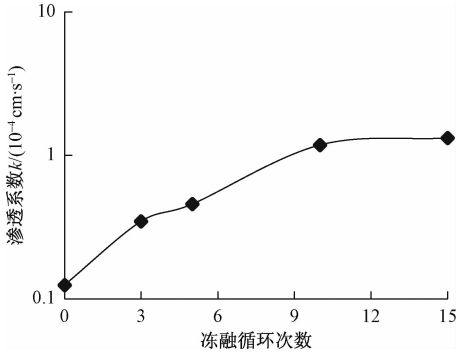

图4　渗透系数与冻融循环次数的关系

Fig. 4　Relationship between permeability coefficient and freezing-thawing cycles

其原因是土体在经过反复冻融循环后,土颗粒和骨架会有一定程度上的破坏,使土体原有的聚合体状态分散,大的土体聚合体在冻融作用下变小,土颗粒之间孔隙变大,进而使得渗透系数变大。而土的渗透系数增大幅度在冻融循环次数达到10次后有明显的变缓趋势,这是因为冻融循环作用对土体结构的改造作用变缓,土体孔隙的变化不再剧烈。

2.3　水泥改良黄土的渗透系数与冻融循环次数及掺入量的关系

不同掺入量的水泥改良黄土的渗透系数与冻融循环次数的关系如图5所示,由图5可知,随着冻融循环次数的增加,每种掺入量的水泥改良黄土的渗透系数都有增大的趋势,当冻融循环到达10次后,渗透系数增大的趋势明显变缓。即在10次冻融循环后,水泥改良黄土的渗透系数趋于稳定。

绘制出在10次冻融循环作用下未改良黄土和4种不同掺入量水泥改良黄土的渗透系数变化曲线如图6所示。由图6可知,在冻融循环10次条件下,水泥改良黄土的渗透系数随着水泥掺入量的增加而减小,而且在掺入量达到8%时,曲线出现拐点,曲线斜率变小。再一次验证了掺入水泥能提升改良黄土的抗渗透性能,且在水泥掺量达到8%后,提升效果减弱。由此可得,在冻融循环条件下,水泥改良黄土中合适的水泥掺入量为5% ~8%。

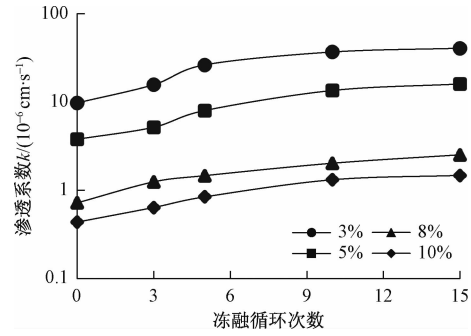

图5　水泥土渗透系数与冻融循环次数的关系

Fig. 5　Relationship between soil-cement permeability coefficient and freezing-thawing cycles

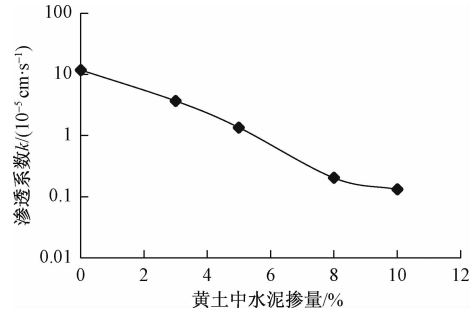

图6　渗透系数与水泥掺量的关系

Fig. 6　Relationship between permeability coefficient and cement content of cement soil

2.4　水泥对改良黄土抗冻融能力的影响

未改良黄土与改良土黄土的渗透系数变化都在10次冻融循环后趋于平缓,且5%与8%的改良黄土对抗渗性能提升方面更为明显。因此,在未冻融循环与冻融循环10次后两种工况下,选用5%及8%的水泥改良黄土对比对应工况下未改良黄土渗透系数,得出渗透系数减小的百分率,由式(2)进行计算:

$$p_b^a = \frac{k_b^0 - k_b^a}{k_b^0} \tag{2}$$

式(2)中:a 为水泥掺入量,%;b 为冻融循环次数;k_b^a 为水泥掺入量为 a% 的水泥改良黄土在 b 次冻融循环下的渗透系数,cm/s;k_b^0 为素土在 b 次冻融循环下的渗透系数,cm/s;p_b^a 为水泥掺入量从0增加到 a% 后的水泥改良黄土在 b 次冻融循环作用下渗透系数减小的百分率,%。计算结果如表2及图7所示。

由表2可知,在冻融循环10次后,水泥掺入量为5%的改良黄土的渗透系数比进行10次冻融循环而未加入水泥的黄土的渗透系数减小了88.6%。而未进行冻融循环情况下的这一数值为69.6%。即冻融循环10次后水泥对黄土的抗渗性能提升效

表 2 改良黄土冻融前后水泥掺入量的增加对渗透系数的影响

Table 2 Effect of increased cement admixture on the permeability coefficient of frozen loess before and after freezing and thawing

项目	试验结果	项目	试验结果
$k_0^0/(\mathrm{cm\cdot s^{-1}})$	1.25×10^{-5}	$k_{10}^0/(\mathrm{cm\cdot s^{-1}})$	1.18×10^{-4}
$k_0^5/(\mathrm{cm\cdot s^{-1}})$	3.79×10^{-6}	$k_{10}^5/(\mathrm{cm\cdot s^{-1}})$	1.35×10^{-5}
$k_0^8/(\mathrm{cm\cdot s^{-1}})$	7.23×10^{-7}	$k_{10}^8/(\mathrm{cm\cdot s^{-1}})$	2.03×10^{-6}
$p_0^5/\%$	69.6	$p_{10}^5/\%$	88.6
$p_0^8/\%$	94.2	$p_{10}^8/\%$	98.3

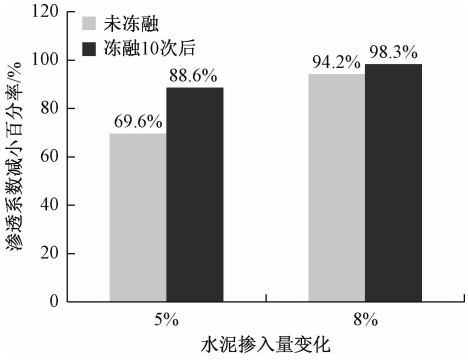

图 7 渗透系数随水泥掺入量的变化率

Fig. 7 Permeability coefficient changing ratios varying with cement content of cement soil

果优于未进行冻融循环。

造成这一结果的原因,主要是未改良黄土在经过冻融循环后,土体内部结构损伤严重。而加入水泥进行改良后,水泥与土中水进行水解与水化反应,反应生成各种水化产物,增加了土颗粒之间的相互黏结力,即对土体结构进行一定程度的重塑,使其表现出抵抗冻结和融解的性能。也就是说,冻融循环后水泥对土体提供的抗冻性对改良黄土抗渗性的提升做出了积极的贡献。

由图 7 可知,当水泥掺量为 8% 时,冻融循环后渗透系数减小的百分率也略高于没有进行冻融循环的改良黄土。

3 结论

对水泥改良黄土进行了冻融循环试验和渗透试验,得出以下结论。

(1)水泥改良黄土较未改良黄土的抗渗性能增加,且改良黄土的渗透系数与水泥掺入量有明显的关系。5% ~8% 的水泥掺入量为最优掺入量,继续提高水泥掺入量不能有效地提升黄土抗渗性能。

(2)冻融循环次数的增加会降低未改良黄土和水泥改良黄土的抗渗性能。当冻融循环到达 10 次后,渗透系数增大的趋势明显变缓。

(3)掺入量为 5% 和 8% 的水泥改良黄土抵抗冻融循环的能力优于未改良黄土,水泥表现出一定的抗冻性。

综上所述,建议在季节性冻土地区的黄土路堑边坡以及路堤边坡防渗层的设计和施工中,改良黄土的水泥掺入量采用 5% ~8% 可以得到较好的抗渗性和抗冻性,经济性合理。

参 考 文 献

1 姜旺恒. 黄土路基填料强度及变形性质研究. 西安: 长安大学, 2004
Jiang Wangheng. Study on strength and deformation properties of loess roadbed filler. Xi'an: Chang'an University, 2004

2 岩土工程手册编写委员会. 岩土工程手册. 北京: 中国建筑工业出版社, 1996
Editor Group of Handbook of Geotechnical Engineering. Handbook of geotechnical engineering. Beijing: China Architecture and Building Press, 1996

3 王银梅, 高立成. 黄土化学改良试验研究. 工程地质学报, 2012; 20(6): 1071—1077
Wang Yinmei, Gao Licheng. Experimental research on chemical improvement of loess. Journal of Engineering Geology, 2012; 20(6): 1071—1077

4 周建基, 梁收运, 张帆宇, 等. 石灰改良黄土的工程特性试验研究. 铁道建筑, 2014;(9): 105—108
Zhou Jianji, Liang Shouyun, Zhang Fanyu, *et al.* Experimental study on engineering properties of lime-modified loess. Railway Engineering, 2014;(9): 105—108

5 李志清, 余文龙, 范林峰, 等. 改良黄土强度特性与工程处置试验研究. 工程地质学报, 2011; 19(1): 116—121
Li Zhiqing, Yu Wenlong, Fan Linfeng, *et al.* Experimental research on strength characteristics and engineering treatment of improved loess soil. Journal of Engineering Geology,2011; 19(1): 116—121

6 李 萍, 李同录, 王 红, 等. 非饱和黄土土-水特征曲线与渗透系数 Childs & Collis-Geroge 模型预测. 岩土力学, 2013; 34(增刊 2): 184—189
Li Ping, Li Tonglu, Wang Hong, *et al.* Soil-water characteristic curve and permeability perdiction on Childs & Collis-Geroge model of unsaturated loess. Rock and Soil Mechanics, 2013; 34(S2): 184—189

7 邵继钢. 西安黄土渗透试验研究. 西安: 长安大学, 2017
Shao Jigang. Study on loess permeability test in Xi'an. Xi'an: Chang'an University, 2017

8 王 辉, 岳祖润, 叶朝良. 原状黄土及重塑黄土渗透特性的试验研究. 石家庄铁道学院学报, 2009; 22(2): 20—22
Wang Hui, Yue Zurun, Ye Chaoliang. Experimental study on permeability characteristics of undisturbed loess and remolded loess. Journal of Shijiazhuang Tiedao University, 2009; 22(2): 20—22

9 梁 燕, 谢永利, 刘保健, 等. 非饱和黄土渗透性的试验研究. 水文地质工程地质, 2006;(2): 27—30
Liang Yan, Xie Yongli, Liu Baojian, *et al.* Experimental study on permeability of unsaturated loess. Hydrogeology & Engineering Geology, 2006;(2): 27—30

10 杨　博, 张虎元, 赵天宇, 等. 改性黄土渗透性与孔隙结构的依存关系. 水文地质工程地质, 2011; 38(6): 96—101
Yang Bo, Zhang Huyuan, Zhao Tianyu, *et al*. Dependence of permeability and pore structure of modified loess. Hydrogeology & Engineering Geology, 2011; 38(6): 96—101

11 王　宁, 毛云程, 张得文, 等. 冻融循环对季节冻土区黄土路堑边坡的影响. 公路交通科技(应用技术版), 2011; 7(4): 79—84
Wang Ning, Mao Yuncheng, Zhang Dewen, *et al*. Effect of freezing and thawing cycle on loess cut slope in seasonal frozen soil region. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011; 7(4): 79—84

12 肖东辉, 冯文杰, 张　泽, 等. 冻融循环对兰州黄土渗透性变化的影响. 冰川冻土, 2014; 36(5): 1192—1198
Xiao Donghui, Feng Wenjie, Zhang Ze, *et al*. Effect of freezing and thawing cycle on permeability change of Lanzhou loess. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014; 36(5): 1192—1198

13 许　健, 王掌权, 任建威, 等. 原状与重塑黄土冻融过程渗透特性对比试验研究. 工程地质学报, 2017; 25(2): 292—299
Xu Jian, Wang Zhangquan, Ren Jianwei, *et al*. Comparative experimental study on permeability of undisturbed and remolded loess under freezing and thawing condition. Journal of Engineering Geology, 2017; 25(2): 292—299

14 武　丹, 巨玉文. 冻融循环对黄土路基填料抗剪强度影响的实验研究. 中国科技论文, 2017; 12(1): 118—120
Wu Dan, Ju Yuwen. Experimental study on the effect of freeze-thaw cycles on shear strength of fillers for loess subgrade. China Science Paper, 2017; 12(1): 118—120

15 师华强, 倪万魁, 刘　魁, 等. 冻融循环作用对黄土压缩性的影响. 水文地质工程地质, 2012; 39(3): 45—48
Shi Huaqiang, Ni Wankui, Liu Kui, *et al*. Effect of freezing and thawing cycle on compressibility of loess. Hydrogeology & Engineering Geology, 2012; 39(3): 45—48

Permeability of Cement Modified Loess under Freezing-Thawing Cycle

LIU Xi-yuan[1], ZHAO Wei[1], MA Zhan-hai[2], MA Yin-huai[2]
(School of Civil Engineering and Transportation, Hebei University of Technology[1], Tianjin 300401, China;
Hebei Province Expressway Yanchong Construction Office[2], Huailai 075400, China)

[**Abstract**] In order to meet the construction requirements of expressway quality engineering and green road "zero abandonment", and make full use of the collapsible loess in the excavation section, the variation of the permeability of cement modified loess under freezing-thawing cycles is studied using laboratory tests. The freeze-thawing cycle test and the penetration test are carried out on cements with different blending amounts in the loess along the Yanchong Expressway. The results show that the repeated freeze-thawing cycles influence strongly the permeability of cement modified loess. Cement has a modification effect on loess grain structure, which improves the impermeability and frost resistance of loess. From the perspective of the economics of the project and the improvement of the impermeability and frost resistance of the loess, it is recommended that the cement content be 5% ~8%.

[**Key words**] cement modified loess　freeze-thawing cycle　permeability　frost resistance