

文章编号:1671-6833(2014)04-0009-05

冻融循环对不同含水率粗粒土回弹模量的影响

陈忠达¹, 陈冬根^{1,2}, 陈建兵², 董元宏², 张 苛¹

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065)

摘 要: 多年冻土区路基、路面病害与路基下伏多年冻土融化变形有关的同时也与冻融循环作用致使的路基强度弱化有关. 为研究冻融循环作用对寒区典型粗粒土填料强度的影响, 开展多次冻融循环作用对不同含水率粗粒土回弹模量影响的试验研究, 系统的验证冻融循环次数和含水率两个因素对土体回弹模量的影响. 研究表明: 冻融循环作用和含水率对粗粒土试件回弹模量均有一定的弱化作用, 且两者均不可忽视, 但粗粒土在含水率增大的过程中, 回弹模量并不是表现为快速衰减, 这可能与粗粒土中粗粒料形成的骨架结构有关.

关键词: 多年冻土; 回弹模量; 含水率; 冻融循环

中图分类号: U414 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.04.003

0 引言

多年冻土地区道路工程的稳定性主要是路基的稳定性, 除路基下伏多年冻土融化造成的融沉变形之外, 路基填料经过多次冻融循环作用后的强度损伤也是道路产生病害的主要原因^[1-3]. 我国公路路基设计规范规定, 多年冻土区优先采用卵石土或碎石土(以下简称粗粒土)作为填料^[4], 但在具体的工程应用中发现采用粗粒土作为路基填料时仍然存在吸湿冻胀问题^[5-6], 不免会引起路基体强度的损伤, 从而影响多年冻土区道路的安全舒适运营. 因此, 研究冻融循环作用对粗粒土的影响对多年冻土地区道路稳定性具有重要的理论指导作用.

关于冻融循环对路基填料工程、力学性质的影响, 国内外学者做了相应的研究工作, 取得了一定的研究成果. Chamberlain^[7]针对 4 种不同塑性指数的黏性土, 进行了不同围压下的 3 次冻融循环试验, 得到了土体孔隙比和渗透性均变大的规律; 杨成松^[8]通过补水的冻融循环试验, 研究发现青藏砂质黏土和轻亚黏土的干密度经历多次冻融循环后趋于某一定值, 且含水率比初始含水率大; 王大雁^[9]通过三轴试验发现反复的冻融循环

作用改变了青藏黏土的性状, 力学参数逐渐减小, 直至稳定, 土体最终走向新的稳定动态平衡状态; 宋春霞^[10]通过对兰州黄土进行冻融循环试验发现, 冻融循环对不同干容重的土体具有强化和弱化的双重作用, 相同冻结温度梯度下, 随着土样干容重的增大, 冻融后前期固结压力和黏聚力具有先增大后减小的规律; 李国玉^[11]开展了补水条件下压实黄土的冻融循环试验, 研究了冻融循环作用对压实黄土的水分分布、变形、干密度等工程地质特性的影响; 毛雪松^[12]凭借回弹模量试验, 认为相比冻融循环次数, 含水率是影响西安地区黄土回弹模量的主要因素.

综上所述, 冻融循环作用对路基土体工程性质的削弱是个不争的事实, 但对于多年冻土地区粗粒土填料的影响鲜有研究. 因此, 笔者通过对青海省共和至结古高等级公路施工工地典型粗粒土路基填料展开研究, 以期为后期青藏高原高速公路路基填料选择提供指导.

1 试验方案

1.1 土样物理性质

试验土样取自青海省共和至结古高等级公路

收稿日期: 2014-03-05; 修订日期: 2014-05-07

基金项目: 国家“973”计划资助项目(2012CB026106); 国家科技支撑计划资助项目(2014BAG05B00); 交通运输部应用基础研究资助项目(2012-319-495-030)

通信作者: 陈冬根(1988-), 男, 安徽安庆人, 工程师, 硕士研究生, 主要从事路基工程的研究, E-mail: cdgchd1988@163.com.

路基施工填料料场,通过对上述路基填料进行颗粒分析试验,确定冻土区路基填料颗粒级配,级配如图 1 所示,土样颗粒直径 5 mm 以上粗粒土部分天然密度为 2.65 g/cm³,5 mm 以下粗粒土部分天然密度为 2.58 g/cm³;细料部分液限为 29.3%,塑限为 21%,塑性指数为 8.3%,属于冻胀性强的粉土土质。

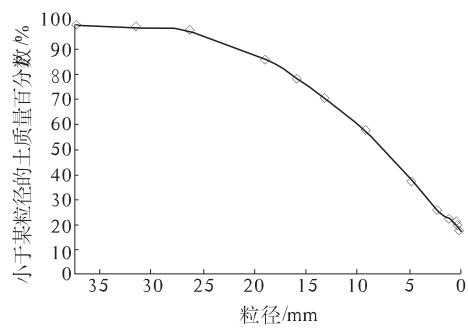


图 1 土样颗粒级配曲线
Fig. 1 Soil particle size distribution curve

1.2 试验方法及方案

路基填料回弹模量采用强度仪法测定,考虑粗粒土最大粒径的影响,试件采用圆柱体试件,直径为 15.2 cm,高度为 12 cm,在成型方式上采用静压一次性成型.回弹模量按照下式进行计算。

$$E = \frac{\pi D \sum P_i}{4 \sum l_i} (1 - u^2).$$
 (1)

式中: E 为回弹模量,MPa; D 为承载板直径,取 50 mm; P_i 为 i 级荷载下承载板的单位压力,MPa; l_i 为 i 级荷载对应单位压力下的回弹变形,mm; μ 为土的泊松比,取 0.25。

冻融循环试验冻结温度采用 -20℃,融化温度采用 30℃.为保证试件完全冻结、融化,试验时内设一个测温探头的平行试件,以判断试件是否冻结、融化完全,最终确定冻结时间为 12 h,融化时间同样为 12 h。

通过重型击实试验确定的该土样最大干密度和最佳含水率分别为 2.290 g/cm³,5.96%。试件按 98% 压实度成型试件,同时,将制作好的试件用塑料薄膜包好,在封闭装置中静置 7 d,最后进行试验.进行冻融循环试验时,为防治水分蒸发散失,试件采用双层塑料薄膜包裹.为了研究冻融循环作用对不同含水率粗粒土路基填料回弹模量的影响,按照 5.96%,7%,8% 3 种不同含水率制样,测试不同含水率粗粒土试件经历 0,1,2,4,6,8,10 次冻融循环次数后的回弹模量,每组试验包含 3 个试件。

2 试验结果及分析

2.1 冻融循环作用对粗粒土回弹模量的影响

冻融循环作用使冰水产生多次相变,改变了土体内部的结构和构造,从而影响土体的工程、力学性质.笔者通过对不同冻融循环次数后的粗粒土试件进行回弹模量试验,得到对应荷载下的单位压力 - 回弹变形曲线(以下称 $p-l$ 曲线),图 2 为不同含水率试件经历不同冻融循环次数后的 $p-l$ 曲线,由图 2 可知,随着冻融循环次数的增加, $p-l$ 曲线斜率呈减小的趋势,随着含水率的增加,0,1,2 次冻融循环次数后的 $p-l$ 曲线斜率衰减较为强烈,以后各次冻融循环次数后的 $p-l$ 曲线斜率衰减相对较为缓慢。

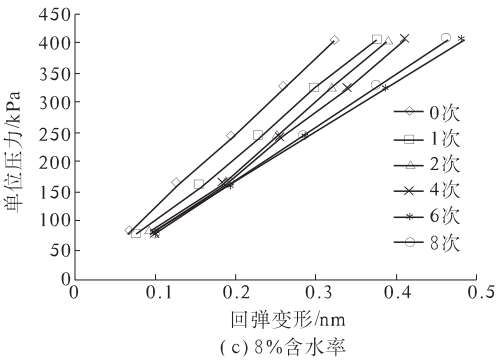
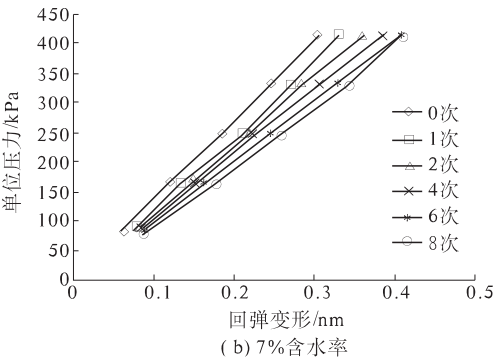
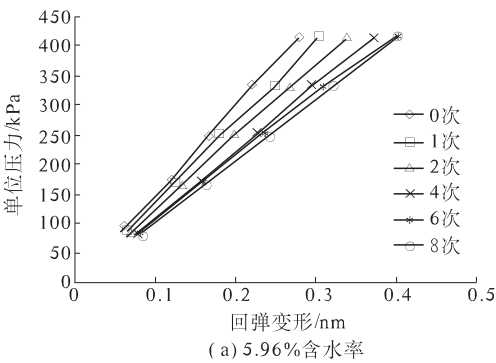


图 2 不同冻融循环次数后的 $p-l$ 曲线
Fig. 2 $p-l$ curves with different freeze thaw cycles

利用式(1)计算试件在不同冻融循环次数后的回弹模量,得到不同含水率试件回弹模量随冻融循环次数的变化曲线,如图 3 所示. 由图 3 可知,经历第 1 次冻融循环,5.96%,7%,8% 含水率试件回弹模量分别衰减 8.49%,11.42%,14.37%,第 1 次冻融循环作用对回弹模量衰减的影响随着含水率增加显得更为强烈,低含水率试件回弹模量衰减的较为均匀,到 8 次冻融循环作用后趋于稳定,而高含水率试件头次衰减较为强烈,后面几次也是基本按照较小的幅度均匀衰减,直到 10 次冻融循环次数后趋于稳定.

对于上述现象分析原因可能是:试件在成型过程中存在一定量孔隙,当含水率较低时,自由水没有充满试件土体中的孔隙,冻结作用下水变成冰体积膨胀对土体结构的破坏不是很明显,故回弹模量值表现为衰减不大,且呈均匀衰减直到稳定;试件含水率大时自由水含量较多,自由水几乎充满整个孔隙,冻结过程中水变成冰体积膨胀破坏了土体原有的结构,增加了土体的孔隙,且融化后空隙无法恢复,结构遭到破坏,黏聚力和内摩擦角降低,从而回弹模量衰减较大,由于第一次冻胀就造成了试件土体结构的永久破坏,所以高含水率试件第一次冻融衰减最大,而后,回弹模量按照较小幅度的衰减直至稳定.

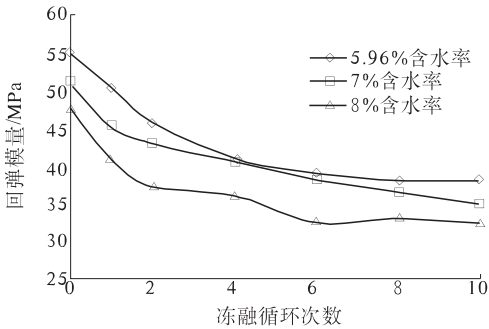


图 3 回弹模量随冻融循环次数的变化曲线
Fig.3 Variation curves of elastic modulus with freeze thaw cycles

2.2 含水率对粗粒土回弹模量的影响

水对任何工程构筑物结构都有一定的弱化作用,对于路基体而言则是造成土颗粒间黏结力的下降,进而造成破坏. 通过回弹模量试验测定不同含水率试件在 0,1,6 次冻融循环作用后的回弹模量,画出与之对应的 $p-l$ 曲线,如图 4 所示,均发现同等冻融循环次数后试件的 $p-l$ 曲线斜率随含水率的增大而减小,由图 4(c)还可以知道经历 6 次冻融循环作用后,含水率从 5.96% 增大到 7% 的过程中回弹模量几乎不衰减,从 7% 增大到 8% 的

过程中回弹模量损失的较为严重. 在含水率增大过程中,粗粒土回弹模量的衰减趋势与毛雪松^[12]所研究的西安地区黄土差异较大,是因为粗颗粒在粗粒土中形成了骨架.

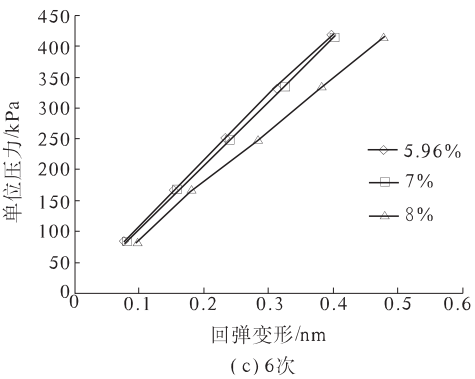
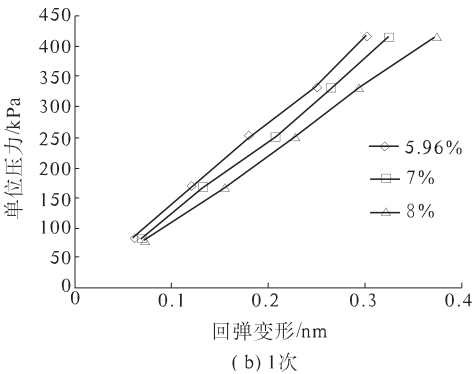
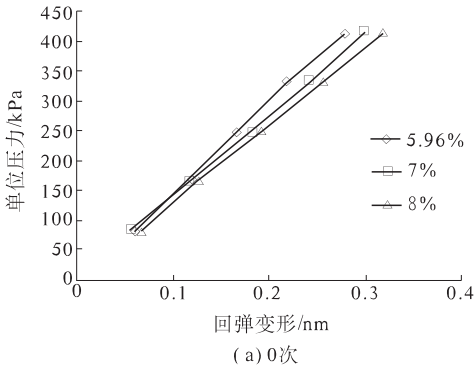


图 4 不同含水率对应的 $p-l$ 曲线
Fig.4 $p-l$ curves with different moisture content

通过对试验数据进行分析,还可以得到不同冻融循环次数后回弹模量随含水率的变化曲线,如图 5 所示. 由图 5 可知,不同冻融循环次数后,回弹模量随含水率的变化规律基本相同,都是回弹模量随含水率的增大而减小. 含水率从 5.96% 到 7% 增大的过程中,回弹模量的减小随着冻融循环次数的增加呈减弱的趋势,这点可能是随着冻融循环次数的增加,低含水率试件土体结构渐渐的趋于稳定的结果,相比低含水率试件,高含水率试件稳定需要更多的冻融循环次数.

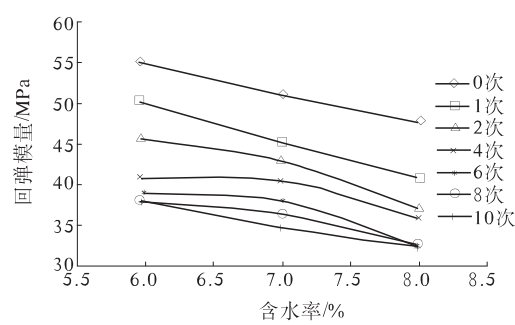


图5 回弹模量随含水率的变化曲线

Fig.5 Variation curves of elastic modulus with moisture content

分析其原因,成型得到的土体结构随着初始含水率的不同而变化,当含水率增加时,土体结构孔隙中自由水增加,这部分自由水起到了润滑作用,减小了细颗粒间的黏聚力,甚至减小了粗颗粒骨料间的内摩擦角,从而减小了阻力,故在宏观上表现为回弹模量的减少.同时,土体中的水分为自由水和结合水,自由水又分为毛细水和重力水,自由水虽然基本上不受土颗粒间的吸附作用影响,但是表面张力和重力依然决定了毛细水的存在,由于在制件的过程中粉黏粒含量和压实标准是一样的,故土颗粒对水的基质吸力基本上也是相同

的,含水率增加的过程也是不被土颗粒基质吸力控制自由水增加的过程,部分不被控制的自由水会增大土颗粒间自由水膜厚度,弱化土体的强度,从而也在宏观上表现为回弹模量的减小.

2.3 含水率、冻融循环次数对回弹模量影响的综合评价

由上述可知,含水率、冻融循环次数的增加对粗粒土强度的弱化均有一定的贡献.为进一步定量研究含水率、冻融循环次数对粗粒土填料回弹模量的影响,引入回弹模量折减系数 A .

$$A = \frac{E_0 - E_i}{E_0}.$$

(2)

式中: A 为回弹模量折减系数; E_i 为某一冻融循环次数下不同含水率土样的回弹模量、或某一含水率下不同冻融循环次数后土样的回弹模量; E_0 为未冻融土样在最佳含水率状态下的回弹模量.

由表 1 可知,含水率和冻融循环作用两种因素对粗粒土回弹模量的影响均不可忽视.未经冻融作用试件,含水率自 5.96% 增加到 8% 过程中,回弹模量衰减 13.25%;5.96% 含水率试件经历 10 次冻融循环次数后衰减 30.74%,8% 含水率试件经历 10 次冻融循环次数后衰减 41.34%.

表 1 回弹模量折减系数

Tab.1 Resilient modulus reduction coefficient

含水率/%	回弹模量折减系数 A /%						
	0	1	2	4	6	8	10
5.96	0	8.5	16.84	25.72	29.04	30.81	30.74
7	7.23	17.82	21.9	26.47	30.8	33.71	36.73
8	13.25	25.72	32.43	34.75	41.34	40.22	41.34

3 结论

笔者通过试验研究了不同含水率试件在多次冻融循环作用后回弹模量变化规律,得到了以下结论,并根据结论提出了建议.

(1)3 种含水率试件经过冻融循环作用后回弹模量减小,低含水率试件在 8 次冻融作用以后其值基本保持不变,高含水率试件则是 10 次.

(2)土样经历第 1 次冻融循环作用回弹模量的衰减随着含水率的增加而增大,可见含水率对粗粒土的影响也不可轻视.

(3)随着含水率的增大,土样回弹模量衰减相比西安地区黄土表现的较为均匀,这可能与粗粒料形成的骨架结构有关.

(4)通过综合分析冻融循环作用、含水率对回弹模量的影响,发现冻融循环次数、含水率两个因素的影响都不可忽视,故建议多年冻土区公路

路基设计时,保证优质路基填料的同时也要做好路基排水工作.

参考文献:

[1] 姚晓亮,齐吉琳,宋春霞.冻融作用对青藏粘土工程性质的影响[J].冰川冻土,2008,30(1):165-169.

[2] 于琳琳,徐学燕,邱明国.冻融作用对饱和粉质黏土抗剪性能的影响[J].岩土力学,2010,31(8):2448-2452.

[3] 董晓宏,张爱军,连江波,等.长期冻融循环引起黄土强度劣化的试验研究[J].工程地质学报,2010,18(6):887-894.

[4] 交通部公路科学研究院.JTG D30—2004 公路路基设计规范[S].北京:人民交通出版社,2004.

[5] 刘华,牛富俊,牛永红,等.季节性冻土区高速铁路路基填料及防冻层设置研究.[J].岩石力学与工程学报,2011,30(12):2549-2557.

[6] 王天亮,岳祖润.细粒含量对粗粒土冻胀特性影响

的试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(2): 359 - 364.

[7] CHAMBERLAIN E J, GOW A J. Effect of freezing and thawing on the permeability and structure of soils[J]. Engineering Geology, 1979, 13(4): 73 - 92.

[8] 杨成松, 何平, 程国栋, 等. 冻融作用对土体干容重和含水量影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(增 2): 2695 - 2699.

[9] 王大雁, 马巍, 常小晓, 等. 冻融循环作用对青藏粘土物理力学性质的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(23): 4313 - 4320.

[10] 宋春霞, 齐吉琳, 刘奉银. 冻融作用对兰州黄土力学性质的影响[J]. 岩土力学, 2008, 29(4): 1077 - 1082.

[11] 李国玉, 马巍, 李宁, 等. 冻融对压实黄土工程地质特性影响的试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2010, 8(4): 5 - 7.

[12] 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.

**Influence of Freezing-thawing Cycle
on the Modulus of Resilience of Coarse-grain Fill with Different Water Contents**

CHEN Zhong-da¹, CHEN Dong-gen^{1,2}, CHEN Jian-bing², DONG Yuan-hong², ZHANG Ke¹

(1. School of highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. First highway survey & design institute of CCCC, Xi'an 710075, China)

Abstract: The road disease in permafrost regions is related to the thawing deformation of the underlying permafrost, as well as to the weakening the embankment strength caused by freezing-thawing cycles. In this study, in order to investigate the influence of freezing-thawing cycles on the strength of coarse-grain fill, the influence of freezing-thawing cycles on the modulus of resilience of coarse-grain fill with different water contents was studied with laboratory experiments. The results showed that, both freezing-thawing cycles and water content weakened the modulus of resilience of coarse-grain soil, which could not be neglected. With the increase of water content of coarse-grain soil, the modulus of resilience did not decrease rapidly, the reason of which was related to the frame structure formed by coarse grain.

Key words: permafrost; modulus of resilience; water content; freezing-thawing cycle

(上接第 4 页)

**Behavior of FRP-concrete-steel Tube Composite Square Columns
Subjected to Cyclic Axial Compression**

WANG Dai^{1,2}, GAO Dan-ying¹, WANG Yong-zhi²

(1. Research Center for New Construction Material and Structure, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China; 2. College of Engineering Technology, Zhongzhou University, Zhengzhou 450044, China)

Abstract: Through the experiments of eight FRP-concrete-steel tube composite square columns subjected to cyclic axial compression, the effects of the loading scheme, the void ratio and the diameter-to-thickness ratio of the inner steel tube on the axial compression behavior were investigated. The test results show that the effect of loading scheme on the axial stress-strain envelope and peak load is insignificant, and ultimate state of FRP-concrete-steel tube composite square columns subjected to cyclic axial compression is very similar to that of composite square columns subjected to monotonous axial compression. Compared with the void ratio, the diameter-to-thickness ratio of the inner steel tube has apparent influence on the peak load of FRP-concrete-steel tube composite square columns subjected to cyclic axial compression.

Key words: FRP; cyclic load; axial compression test; composite column; square section