

DOI: 10.11779/CJGE201504005

冻融及细粒含量对粗粒土力学性质影响的试验研究

卜建清^{1, 2}, 王天亮^{1, 2*}

(1. 石家庄铁道大学土木工程学院, 河北 石家庄 050043; 2. 石家庄铁道大学道路与铁道工程安全保障部共建教育部重点实验室, 河北 石家庄 050043)

摘要: 以粗粒土填料在冻土地区铁路路基中的应用和推广为研究背景, 针对冻融作用及细粒含量对粗粒土填筑路基稳定性的影响, 通过室内三轴试验深入研究和分析了冻融次数、细粒含量以及围压对粗粒土试样强度特性的影响规律。研究结果表明, 随着细粒含量的增加, 粗粒土的应力应变曲线由冻融前的应变软化现象过渡到冻融后的应变硬化现象; 同时, 随着细粒含量的增加, 未经历冻融时, 细粒土的黏结性有效地提高了粗粒土的剪切强度, 而经历冻融后, 细粒土的冻胀性反而削弱了粗粒土的剪切强度; 粗粒土的剪切强度和抗剪强度指标随冻融次数的增加而减小并在经历6次冻融后达到稳定状态; 围压的“围箍”作用有效地提高了粗粒土的抗剪强度; 通过讨论和分析, 建议冻土区铁路路基粗粒土填料的合理细粒含量为5%, 并将粗粒土填料经历6次冻融后的力学指标作为工程设计值。

关键词: 粗粒土; 冻融循环; 细粒含量; 应力-应变关系; 抗剪强度指标

中图分类号: TU411.8 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2015)04-0608-07

作者简介: 卜建清(1968-), 男, 河北阳原人, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事桥梁、路基工程等方面的研究与教学工作。E-mail: wangtl@stdu.edu.cn。

Influences of freeze-thaw and fines content on mechanical properties of coarse-grained soil

BU Jian-qing^{1, 2}, WANG Tian-liang^{1, 2}

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 2. Key Laboratory of Roads and Railway Engineering Safety Control of Ministry of Education, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: For the promotion and application of coarse-grained soil fillings in the railway subgrade in frozen regions, the shear strength properties of coarse-grained soil with fines content under freeze-thaw cycles are directly related to the subgrade stability. The influencing rules of freeze-thaw cycles, fines content and confining pressure on the shear strength properties of coarse-grained soil are therefore thoroughly studied and analyzed in laboratory tests. The results show that with the increasing increment of fines content, the stress-strain curve of coarse-grained soil changes from strain-softening before freeze-thaw cycles to strain-hardening after freeze-thaw cycles. With the increasing of fines content, the cohesion function of fines effectively enhances the shear strength of coarse-grained soil before freeze-thaw cycles, but the frost heave properties of fines decrease the shear strength of coarse-grained soil after freeze-thaw cycles. The shear strength indexes of coarse-grained soil decrease and then are steady after 6 freeze-thaw cycles. The confining pressure effectively enhances the shear strength of coarse-grained soil. Finally, the reasonable fines content of 5% is recommended for the railway subgrade coarse-grained soil fillings in frozen regions, and the mechanical indexes of the 6th freeze-thaw cycle are suggested for the engineering design values.

Key words: coarse-grained soil; freeze-thaw cycle; fines content; stress-strain relationship; shear strength index

0 引言

粗粒土通常是指由圆砾土、角砾土、砾砂、粗砂等组成的无黏性混合土, 因具有吸水性差、透水性好、填筑密度大、沉降变形小、弱冻胀性、承载力高等工程特性, 在土石坝^[1-6]、公路路基^[7-8]、建筑地基处理^[9]等工程建设中得到了广泛的应用, 尤其是在寒冷地区铁路路基中的应用逐渐得到了人们的认可^[10]。其中, 细粒含量是影响粗粒土在寒冷地区路基中应用的一

个关键指标^[11-12], 中国铁路路基相关技术规范中要求粗粒土中的细粒含量应控制在合理的范围内, 以保证粗粒土填料在具有弱冻胀性的同时, 还具有较好的压

基金项目: 国家自然科学基金项目(51208320); 河北省自然科学基金项目(E2013210040); 中国铁路总公司科研课题(2014G003-F); 河北省高校拔尖人才项目(BJ2014050)

收稿日期: 2014-04-15

*通讯作者

实性能^[13], 这也直接影响着粗粒土填料的强度特性。此外, 已有的大量工程实践和研究结果表明^[14], 寒冷地区的反复冻胀、融沉作用以及由此引起的土体强度弱化也是造成该类地区工程构筑物损伤破坏、冻害频发的主要原因。因此, 研究反复冻融及细粒含量对粗粒土强度特性的影响规律对粗粒土在寒冷地区合理使用具有重要的工程实际意义。

粗粒土作为土石坝填筑材料的应用和相关研究比较早, 多集中在粗粒土加载条件下的强度和变形特性^[1-2]、回弹特性^[3]、颗粒破碎特性^[4]、渗透变形特性^[5]以及本构关系^[6]研究等方面, 积累了大量研究成果和工程经验, 为粗粒土在铁路、公路等工程中的应用起到了一定的借鉴作用。针对粗粒土在铁路、公路中的应用和研究, 多集中在粗粒土的施工工艺及质量控制技术研究方面^[15], 而在粗粒土力学性质研究方面则相对较少, 周小军等^[7]通过室内三轴试验, 认为粗粒土的应力应变关系曲线呈现应变硬化现象; 蒋建清等^[16]分析了土工织物层数、含水率和压实度对粗粒土应力应变关系、强度和变形特性的影响规律; 陈晓斌等^[17]通过自制的粗粒土单轴流变仪分析了红砂岩粗粒土的流变特性。然而, 上述研究均未考虑冻融和细粒含量对粗粒土强度特性的影响, 针对粗粒土在寒冷地区的应用研究大多着重在冻胀特性方面^[11-13, 18], 就多次冻融后粗粒土的强度特性的研究较少^[8], 且并未考虑细粒含量的影响。

综上所述, 揭示温度变化和细粒含量对粗粒土路基强度的影响程度和规律是寒冷地区路基粗粒土填筑亟待解决的问题。为此, 本文采用 GDS 动静三轴仪和高低温冻融试验箱, 研究不同冻融次数和细粒含量对粗粒土强度特性的影响规律, 为冻土区粗粒土填筑路基提供技术指导。

1 试验材料及方案设计

试验材料来自哈(尔滨)—齐(齐哈尔)客运专线某土料堆填场, 该粗粒土为天然沉积的细圆砾土, 颗粒圆滑, 少有棱角, 强度高, 不易破碎, 最大粒径为 40 mm, 大于 2 mm 颗粒占总质量的 72.61%, 小于 0.075 mm 颗粒占总质量的 6.65%, 属 B 组填料。三轴试验试样直径 $D=101$ mm, 高度 $H=200$ mm, 为消除尺寸效应和保证该粗粒土中细粒含量不变, 对其采用等量替代法(其中, 等量替代法适用于超粒径土颗粒含量不大于 50% 的土体, 其将大于 5 mm 的粒径与仪器所允许的最大粒径之间的土颗粒按照质量百分比等量替换超粒径土颗粒, 替代前后细粒土含量不变)对原级配进行缩尺得到试验用粗粒土(颗粒级配曲线

见图 1), 等量替代后粗粒土的最大粒径为 20 mm, 最大干密度为 2.08 g/cm^3 , 最优含水率为 6.5%。

粗粒土试样中所掺加细粒土的液限为 29.1%, 塑限为 21.0%, 塑性指数为 8.1, 粉土土质, 属于强冻胀敏感性土质, 其颗粒级配曲线如图 2 所示。

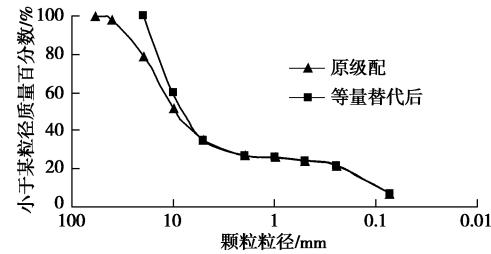


图 1 细圆砾土的颗粒粒径级配曲线

Fig. 1 Grain-size curves of fine and round gravel soil

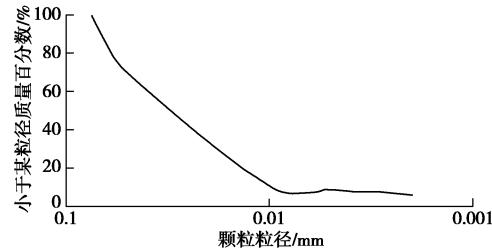


图 2 细粒土的颗粒粒径级配曲线

Fig. 2 Grain-size curve of fines

为研究细粒含量对粗粒土力学性质的影响, 首先去掉粗粒土土样中的细粒土, 按质量百分比掺加图 2 中的细粒土, 细粒土含量分别为 0%, 1%, 3%, 5% 和 7%, 不同细粒含量下粗粒土的最大干密度和最优含水率见表 1, 压实度控制为 95%, 含水率按最优含水率配制。

表 1 不同细粒含量下粗粒土的最大干密度和最优含水率

Table 1 Results of maximum dry density and optimum water content under different fines contents

细粒含量/%	0	1	3	5	7
最优含水率/%	6.0	6.2	6.4	6.4	6.5
最大干密度/(g/cm^3)	2.15	2.17	2.18	2.2	2.21

三轴试验的试样采用击实法制样, 分 5 层装料击实成型, 为防止土颗粒散落和水分挥发, 制样时在试样底部放一塑料薄膜, 制样完成后套上橡皮膜, 然后进行多次冻融试验。在冻融试验过程中, 结合现场土体内部温度实测结果, 本试验冷却温度为 -15°C , 融化温度为 15°C ; 此次为封闭条件下的冻融试验, 即冻融过程中无外界水源补给; 冻融过程在高低温试验箱内进行, -15°C 下冷却 12 h, 然后在 15°C 下融化 12 h, 此过程为一个冻融循环周期, 冻融循环次数为 0, 1, 3, 6, 10, 15 次。经历冻融后, 试样的高度和直径均增大, 其中试样高度变化率最大为 0.38%, 直径变化

率最大为 0.24%。

将达到设定冻融次数的试样取出, 然后进行不固结不排水三轴剪切试验。三轴剪切试验采用应变控制, 围压分别为 50, 100, 150 kPa, 加载速率为 0.4 mm/min, 控制应变为 5%, 试验过程中实时记录荷载、位移等参数的变化。

2 试验结果与分析

2.1 应力应变特性

(1) 冻融循环的影响

图 3~5 分别为不同冻融次数条件下粗粒土的应力应变关系曲线 (由于试验数据较多, 此处仅列出粗粒土中细粒含量为 0%, 3% 和 7% 的应力应变曲线; 图中 FT 表示试样所经历的冻融次数, 即 FT0 表示试样经历了 0 次冻融循环)。从图中曲线可以看出, 强烈的冻结、融化作用对粗粒土力学特性的影响十分显著, 在同一应力水平下, 经历较多冻融次数的粗粒土试样将产生较大的应变。

此外, 当细粒土含量较低时 (细粒含量小于 5%),

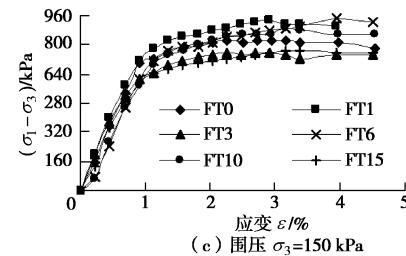
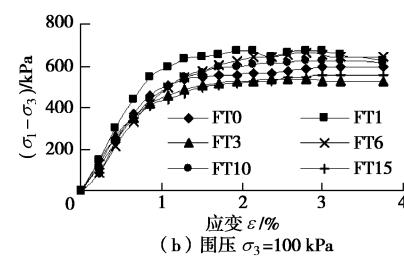
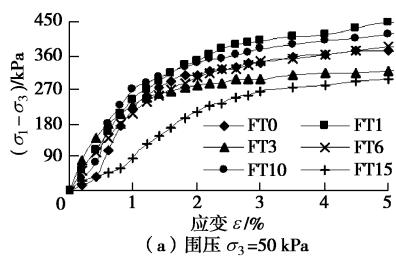


图 3 不同冻融次数下粗粒土的应力应变曲线 (细粒含量 0%)

Fig. 3 Curves of stress-strain under different freeze-thaw cycles (fines content of 0%)

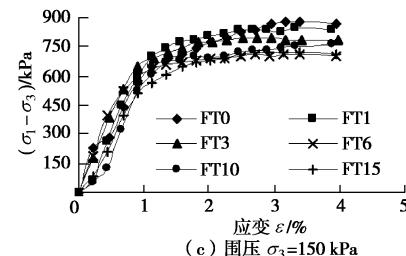
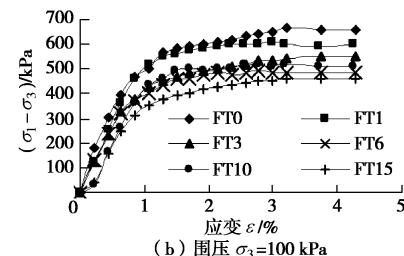
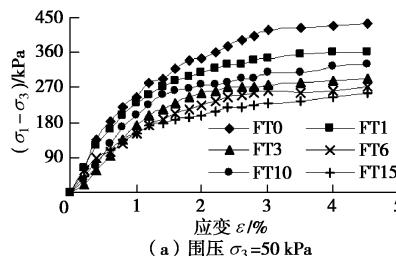


图 4 不同冻融次数下粗粒土的应力应变曲线 (细粒含量 3%)

Fig. 4 Curves of stress-strain under different freeze-thaw cycles (fines content of 3%)

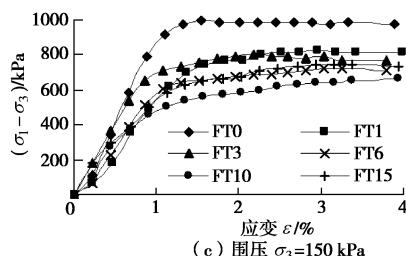
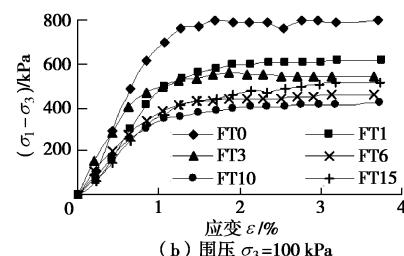
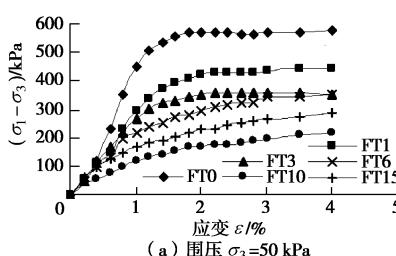


图 5 不同冻融次数下粗粒土的应力应变曲线 (细粒含量 7%)

Fig. 5 Curves of stress-strain under different freeze-thaw cycles (fines content of 7%)

冻融前后粗粒土试样的应力应变关系曲线均呈现应变硬化的现象; 而当细粒土含量较高时, 粗粒土试样的应力应变曲线由冻融前的应变软化状态逐渐过渡到冻融后的应变硬化状态。

随着试验围压的增大, 粗粒土试样的极限强度增大, 初始弹性模量也相应的增大, 即围压的“围箍”作用使得试样内部土颗粒之间的接触不断加密, 土颗粒之间的骨架作用逐渐增大, 有效应力逐渐增加。

(2) 细粒含量的影响

图 6~8 分别为不同细粒含量条件下粗粒土的应力应变关系曲线 (由于试验数据较多, 此处仅列出冻融次数为 0, 6 和 15 次的应力应变曲线; 图中 FC 表示细粒含量, 即 FC0 表示粗粒土试样中 0.075 mm 以下细粒土含量为 0%)。从图中曲线可以看出, 对于未冻融和经历较少冻融次数的试样 (见图 6, 7), 细粒含量对粗粒土试样的力学性质的影响十分显著。随着细粒含量的增加, 粗粒土试样的极限强度均有较大幅度的提升, 同时, 粗粒土试样的应力应变关系曲线逐

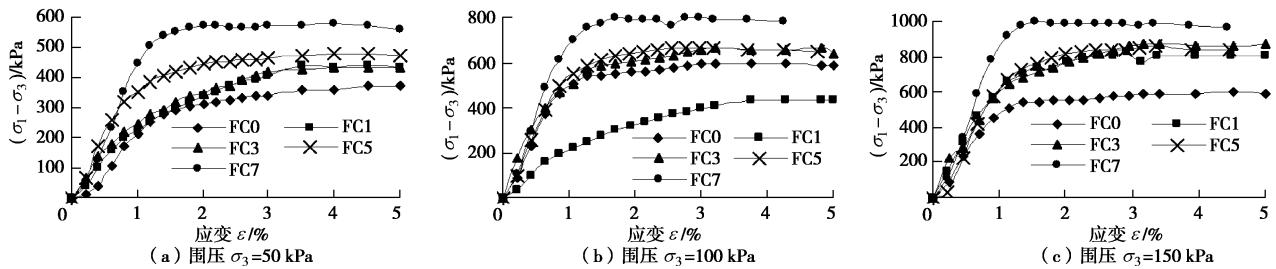


图 6 不同细粒含量下粗粒土的应力应变曲线 (冻融 0 次)

Fig. 6 Curves of stress-strain with different fines contents (without freeze-thaw cycles)

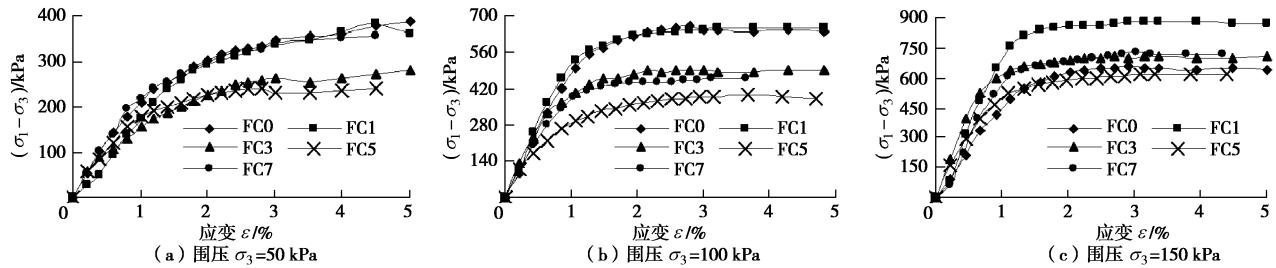


图 7 不同细粒含量下粗粒土的应力应变曲线 (冻融 6 次)

Fig. 7 Curves of stress-strain with different fines contents (6 freeze-thaw cycles)

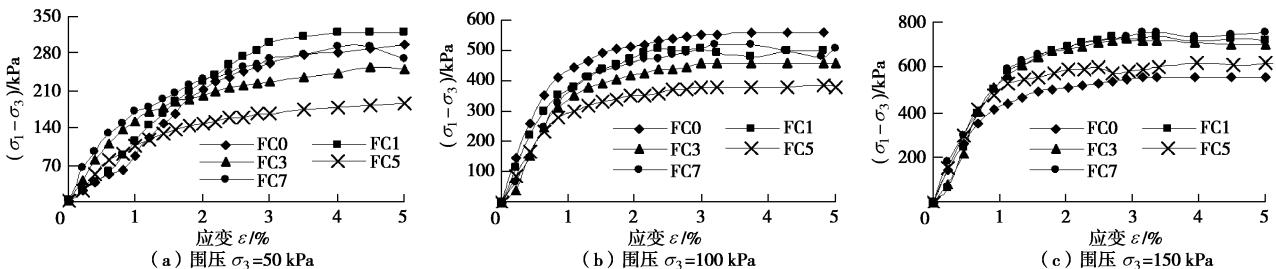


图 8 不同细粒含量下粗粒土的应力应变曲线 (冻融 15 次)

Fig. 8 Curves of stress-strain with different fines contents (15 freeze-thaw cycles)

渐由应变硬化状态过渡到应变软化状态; 当经历较多次冻融循环作用后(见图 8), 细粒含量对粗粒土试样力学性质的影响程度逐渐降低, 随着细粒含量的增加, 粗粒土试样极限强度提升幅度较未经历冻融时减小并趋于稳定状态。

2.2 剪切强度

图 9 为不同细粒含量下粗粒土剪切强度与冻融次数的关系曲线(由于试验数据较多, 此处仅列出细粒含量为 0%, 3% 和 7% 的数据曲线)。从图 9 中曲线可以看出, 当粗粒土试样中细粒含量为 0% 时, 粗粒土试样的剪切强度随冻融次数的增加呈现上下波动起伏变化, 即冻融对粗粒土剪切强度的影响不显著, 但总体上呈现下降的趋势(见图 9 (a)); 随着粗粒土试样中细粒含量的增加(见图 9 (c)), 粗粒土试样的剪切强度随冻融次数的增加呈现指数形式衰减, 并在经历 6 次冻融后达到稳定状态。这主要是由于所掺加的细粒土具有较高的冻胀敏感性, 随着细粒含量的增

加, 细粒土的冻胀敏感性逐渐占据主导地位, 改变了粗粒土试样的内部结构^[13, 18]; 而在经历多次冻融后, 冻融分选和土颗粒的自重作用使得细小土颗粒回落填充大颗粒孔隙, 整个土体结构塌陷, 土体密实度增大^[8], 冻结和融化作用减弱, 粗粒土试样剪切强度逐渐趋于稳定状态。

图 10 为不同冻融次数下粗粒土剪切强度与细粒含量的关系曲线(由于试验数据较多, 此处仅列出冻融次数为 0, 6 和 15 次的数据曲线)。从图中曲线可以看出, 当粗粒土试样未经历冻融作用时, 由于细粒土的黏聚作用, 使得粗粒土试样的剪切强度随着细粒含量的增加基本上成线性增大, 也就是说, 较高的细粒含量会有效地提高粗粒土的承载能力(见图 10 (a)); 经历冻融作用后, 由于细粒土的冻胀敏感性较高, 粗粒土试样的剪切强度随着细粒含量的增加而呈现减小的趋势(见图 10 (c))。

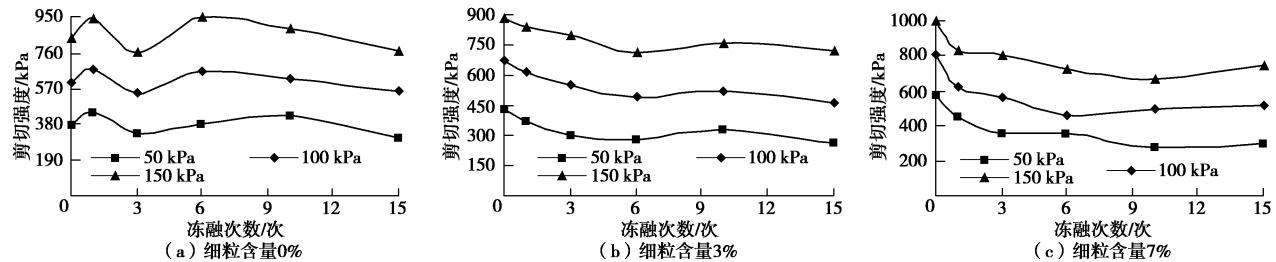


图 9 不同细粒含量下粗粒土剪切强度与冻融次数的关系

Fig. 9 Relationship between shear strength and freeze-thaw cycles with different fines contents

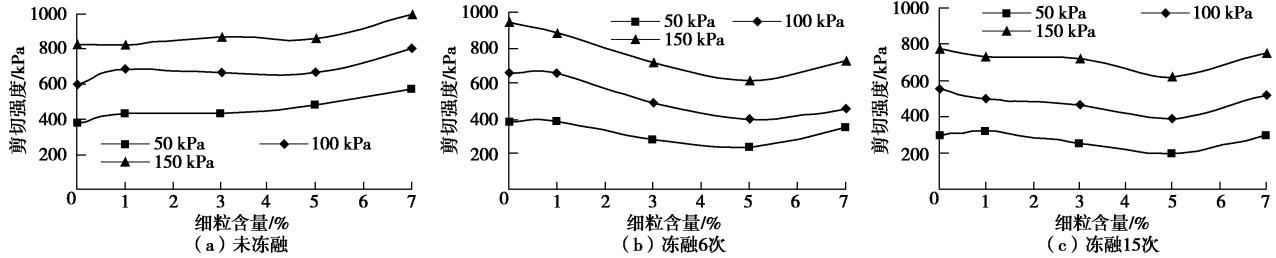


图 10 不同冻融次数下粗粒土剪切强度与细粒含量的关系

Fig. 10 Curves of shear strength vs. fines content under different freeze-thaw cycles

2.3 抗剪强度指标

图 11 给出了不同细粒含量条件下粗粒土试样黏聚力、内摩擦角与冻融次数的变化关系(图中 FC 表示细粒含量, 即 FC0 表示粗粒土试样中 0.075 mm 以下细粒土含量为 0%)。从图中可以看出, 粗粒土试样的黏聚力和内摩擦角随冻融次数的增加均存在不同程度的衰减, 且在经历 6 次冻融后趋于稳定。这说明随着冻融次数的增加, 粗粒土试样逐渐由冻胀变为融陷, 即土体结构逐渐由“体胀”变为“体缩”, 试样的密实度增大, 抗剪强度指标随冻融次数的变化趋于稳定^[8]。

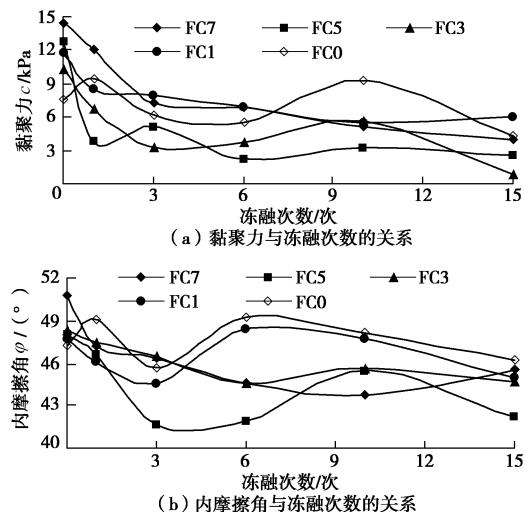


图 11 不同细粒含量下黏聚力、内摩擦角与冻融次数的关系

Fig. 11 Relationship among cohesion, internal friction angle and freeze-thaw cycle with different fines contents

图 12 给出了不同冻融次数条件下粗粒土试样黏聚力、内摩擦角与细粒含量的变化关系(图中 FT 表示试样所经历的冻融次数, 即 FT0 表示试样经历了 0 次冻融循环)。从图中可以看出, 当粗粒土试样未经历冻融作用时(见图 12 中的 FT0 曲线), 粗粒土试样的抗剪强度指标, 尤其是黏聚力指标随着细粒含量的增加呈现明显增大的趋势, 细粒土的黏聚作用有效地提高了粗粒土的黏聚力; 但是, 强烈的冻结和融化作用使得粗粒土的抗剪强度指标随着细粒含量的增加呈现明显减小的趋势。即在冻土地区反复冻融作用下, 粗粒土试样的抗剪强度并非一味的随着细粒含量的增加而增大, 而是存在一个最合理的细粒含量。

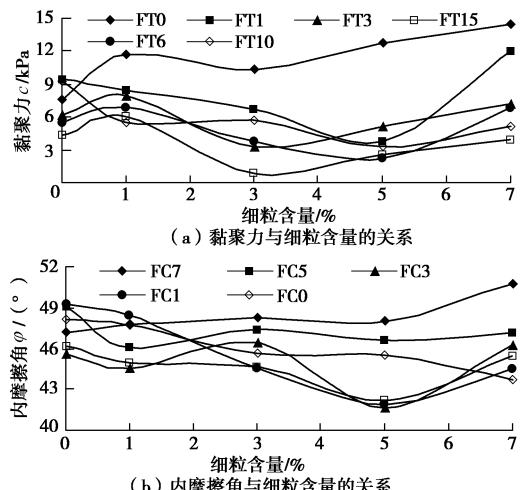


图 12 不同冻融次数下黏聚力、内摩擦角与细粒含量的关系

Fig. 12 Relationship among cohesion, internal friction angle and fines content under different freeze-thaw cycles

3 最大细粒含量的讨论

通过上述研究可以发现, 在非冻土地区, 细粒含量的增加可以有效地提高粗粒土的压实性和承载能力, 而在冻土地区, 冻融作用对粗粒土力学性质的影响则不容忽视。文献[13]采用粗粒土试样的压实性和冻胀率两个指标, 讨论确定了当细粒含量为 9%时, 粗粒土填筑的路基既能满足较好的压实效果又能满足填料冻胀率小于 1%的要求, 然而并未考虑冻融及细粒含量双重作用下粗粒土的强度特性变化规律, 即未对冻融和细粒含量双重作用下粗粒土的强度和变形特性进行统一的研究和分析。

从图 13, 14 可以看出, 当细粒含量为 5%~7% 时, 粗粒土试样的干密度在 2.0 g/cm^3 左右, 处于一个较大值范围; 同时, 粗粒土试样的冻胀率也均小于 1%^[13]。结合本文的研究成果, 当细粒含量处于 5%~7% 范围内时, 粗粒土的强度受冻融作用的影响相对较小; 并考虑路基粗粒土填料填筑过程中的破碎情况, 本文建议冻土地区铁路路基粗粒土填料的合理细粒含量为 5%, 并建议将经历 6 次冻融后粗粒土的力学指标作为工程设计参考值。

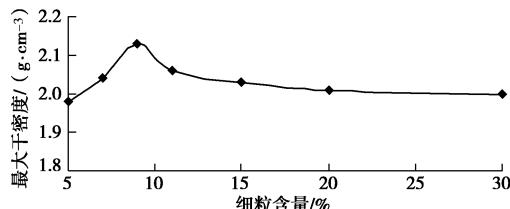


图 13 最大干密度与细粒含量的关系曲线

Fig. 13 Relationship between maximum dry density and fines content

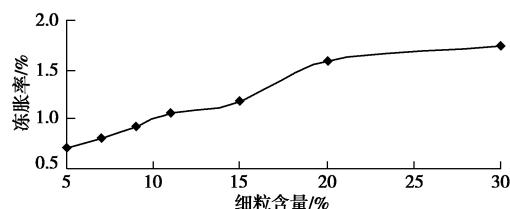


图 14 细粒含量与土样冻胀率的关系曲线

Fig. 14 Relationship between fines content and frost-heave ratio

4 结 论

(1) 随着细粒含量的增加, 粗粒土试样的应力应变曲线由冻融前的应变软化现象过渡到冻融后的应变硬化现象。细粒含量对粗粒土试样强度特性的影响程度与冻融循环次数的多少密切相关。围压的“围箍”作用可以有效地提高粗粒土的抗剪强度。

(2) 未经历冻融作用时, 由于细粒土的黏聚作用, 细粒含量的增加可以有效地提高粗粒土试样的剪切强度; 经历冻融后, 由于细粒土的冻胀性, 细粒含量的增加反而会削弱粗粒土试样的剪切强度。

(3) 当细粒含量较小时, 粗粒土试样剪切强度受冻融循环作用的影响较小; 随着细粒含量的增加, 剪切强度则随冻融次数的增加而减小, 并在经历 6 次冻融后达到稳定。

(4) 粗粒土的黏聚力和内摩擦角随冻融次数的增加而减小并在经历 6 次冻融后达到稳定, 而随细粒含量的增加并非一味的增大, 与冻融作用密切相关。

(5) 考虑冻融及细粒含量对粗粒土强度、变形和压实效果的影响, 以及压实过程中粗颗粒的破碎现象, 建议冻土地区铁路路基粗粒土填料的合理细粒含量为 5%, 并将经历 6 次冻融后粗粒土的力学指标作为工程设计参考值。

参 考 文 献:

- [1] 朱俊高, 吉恩跃, 方智荣, 等. 粗粒土等压固结与 K_0 固结三轴试验比较[J]. 防灾减灾工程学报, 2013, 33(4): 394~398. (ZHU Jun-gao, JI En-yue, FANG Zhi-rong, et al. Comparison of triaxial tests with K_0 -consolidated and isotropically consolidated specimens of coarse grained soil[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2013, 33(4): 394~398. (in Chinese))
- [2] 褚福永, 朱俊高, 贾华, 等. 粗粒土卸载—再加载力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(4): 1061~1066. (CHU Fu-yong, ZHU Jun-gao, JIA Hua, et al. Experimental study of mechanical behaviour of coarse-grained soil in unloading and reloading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(4): 1061~1066. (in Chinese))
- [3] 朱俊高, 王元龙, 贾华, 等. 粗粒土回弹特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(6): 950~954. (ZHU Jun-gao, WANG Yuan-long, JIA Hua, et al. Experimental study on resilience behaviour of coarse grained soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(6): 950~954. (in Chinese))
- [4] 王光进, 杨春和, 张超, 等. 粗粒含量对散体岩土颗粒破碎及强度特性试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3649~3654. (WANG Guang-jin, YANG Chun-he, ZHANG Chao, et al. Experimental research on particle breakage and strength characteristics of rock and soil materials with different coarse-grain contents[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(12): 3649~3654. (in Chinese))

- [5] 蒋中明, 王 为, 冯树荣, 等. 应力状态下含黏粗粒土渗透变形特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(1): 98 - 104. (JIANG Zhong-ming, WANG Wei, FENG Shu-rong, et al. Experimental study on influence of stress on seepage failure characteristics of coarse grained soil with cohesive particles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(1): 98 - 104. (in Chinese))
- [6] 徐 明, 宋二祥. 粗粒土的一种应变硬化模型[J]. 岩土力学, 2010, **31**(9): 2967 - 2973. (XU Ming, SONG Er-xiang. A strain hardening model for rockfills[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(9): 2967 - 2973. (in Chinese))
- [7] 周小军, 邹 强, 向灵芝. 粗粒土应力 - 应变特征试验[J]. 西南科技大学学报, 2012, **27**(4): 40 - 43. (ZHOU Xiao-jun, ZOU Qiang, XIANG Ling-zhi. Mechanical study on the coarse-grained soil using laboratory triaxial test[J]. Journal of Southwest University of Science and Technology, 2012, **27**(4): 40 - 43. (in Chinese))
- [8] 张莎莎, 杨晓华. 粗粒盐渍土大型冻融循环剪切试验[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2012, **32**(3): 11 - 16. (ZHANG Sha-sha, YANG Xiao-hua. Large shear test on coarse saline soil with freeze-thaw cycle[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science), 2012, **32**(3): 11 - 16. (in Chinese))
- [9] 王光进, 杨春和, 张 超, 等. 粗粒土三轴试验数值模拟与试样颗粒初始架构初探[J]. 岩土力学, 2011, **32**(2): 585 - 592. (WANG Guang-jin, YANG Chun-he, ZHANG Chao, et al. Numerical simulation triaxial tests for coarse-grained soil and preliminary study of initial fabric of sample grain[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(2): 585 - 592. (in Chinese))
- [10] 陈 坚, 罗 强, 陈 占, 等. 客运专线基床底层砾石土填料物理力学性质试验研究[J]. 铁道学报, 2011, **33**(7): 91 - 97. (CHEN Jian, LUO Qiang, CHEN Zhan, et al. Experimental research on physical and mechanical properties of gravelly soil filling the base course of the subgrade bed of passenger dedicated line[J]. Journal of the China Railway Society, 2011, **33**(7): 91 - 97. (in Chinese))
- [11] KONRAD J M, LEMIEUX N. Influence of fines on frost heave characteristics of a well-graded base-course material[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2005, **42**(2): 515 - 527.
- [12] 张以晨, 李 欣, 张喜发, 等. 季冻区公路路基粗粒土的冻胀敏感性及分类研究[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(10): 1522 - 1526. (ZHANG Yi-chen, LI Xin, ZHANG Xi-fa, et al. Research on frost heave susceptibility and classification of coarse grained soil of highway subgrade in seasonally frozen ground region[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(10): 1522 - 1526. (in Chinese))
- [13] 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**(3): 359 - 365. (WANG Tian-liang, YUE Zu-run. Influence of fines content on frost heaving properties of coarse grained soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(3): 359 - 365. (in Chinese))
- [14] 铁道部第三勘测设计研究院. 冻土工程[M]. 北京:中国铁道出版社, 1994. (The Third Railway Survey & Design Institute. Permafrost engineering[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1994. (in Chinese))
- [15] 柴贺军, 陈谦应, 孔祥臣, 等. 土石混填路基修筑技术研究综述[J]. 岩土力学, 2004, **25**(6): 1005 - 1010. (CHAI He-jun, CHEN Qian-ying, KONG Xiang-chen, et al. Overview of soil-stone high embankment construction study[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, **25**(6): 1005 - 1010. (in Chinese))
- [16] 蒋建清, 杨果林, 李 眇, 等. 格宾网加筋红砂岩粗粒土的强度和变形特性[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(7): 1079 - 1086. (JIANG Jian-qing, YANG Guo-lin, LI Yun, et al. Strength and deformation characteristics of red-sandstone granular soil reinforced with gabion mesh[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(7): 1079 - 1086. (in Chinese))
- [17] 陈晓斌, 张家生, 封志鹏. 红砂岩粗粒土流变工程特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(3): 601 - 607. (CHEN Xiao-bin, ZHANG Jia-sheng, FENG Zhi-peng. Experimental study on rheological engineering properties of coarsely granular red sandstone soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(3): 601 - 607. (in Chinese))
- [18] YUE Zu-run, WANG T L, MA C, et al. Frost heave control of fine round gravel fillings in deep seasonal frozen regions[J]. Science in Cold and Arid Regions, 2013, **5**(4): 425 - 432.