

文章编号: 1673-9469 (2018) 01-0066-05

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2018.01.015

水泥改良西藏林芝地区粉土路用性能试验研究

施海建^{1,2}, 张福海^{1,2}, 袁赛峰³, 袁明月^{1,2}

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏南京 210098; 2. 河海大学江苏省岩土工程技术工程研究中心, 江苏南京 210098; 3. 浙江省嘉善县建设工程质量监督站, 浙江嘉兴 314000)

摘要: 为解决西藏林芝地区路基填料问题, 对林芝地区粉土进行水泥改良处理并进行击实试验、CBR 试验、无侧限抗压强度试验和冻胀融沉试验, 研究不同水泥掺量对改良土的最大干密度、最优含水率、CBR 值以及冻融循环下改良土的物理力学性质的影响。试验结果表明: 不同掺量的水泥改良粉土的最优含水率几乎不变, 最大干密度随掺量增加缓慢增大; 在冻融循环作用下水泥改良粉土仍为脆性破坏模式, 水泥改良粉土的第 5 次冻融后和第 10 次冻融后的单轴应力应变曲线几乎趋于重合, 在实际工程中可以以冻融循环 5 次后的强度作为水泥改良土的设计参考强度; 在考虑冻融循环作用下, 西藏林芝深厚粉土区域二级公路上路床粉土填料的最优水泥掺量为 4% 以上。

关键词: 水泥; 粉土; 冻融循环; 强度; 路基

中图分类号: TU411

文献标志码: A

Experimental study on performance of silt road in Linzhi area

SHI Haijian^{1,2}, ZHANG Fuhai^{1,2}, YUAN Saifeng³, YUAN Mingyue^{1,2}

(1. Key Laboratory for Geotechnical Engineering of Ministry of Water Resource, Nanjing 210098 China;
2. Research Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. Jiashan, Zhejiang Province Construction Quality Supervision Station, 350001, China)

Abstract: In order to solve the problem of roadbed packing in Linzhi area of Tibet, the silt is improved by cement in the area. The maximum dry density, the optimum water cut rate, the CBR value and the physical properties of the modified soil under different freezing and thawing cycles are studied by the compaction test, the CBR test, the unconfined compressive strength test and the frost heave sedimentation test. The results show that: The optimum moisture content of cement with different content is almost constant, and the maximum dry density increases slowly with the increase of content; Under the action of freeze-thaw cycle, the cement improved silt is still brittle failure mode, and the uniaxial stress-strain curve of the cement-modified silt is almost coincident, so in the actual project the strength of the cement frozen after 5 times can be taken as a modified soil design reference strength; Considering the effect of freeze-thaw cycle, the optimal cement content of the silt filler on the secondary road of Linzhi deep silty area in Tibet is more than 4%.

Key words: Cement silt Freeze-thaw cycles Strength properties Subgrade

随着“一带一路”战略的实施, 西藏地区基础设施建设步伐加快, 其中道路的建设对于地区经济发展与文化交流至关重要, 然而西藏地区广泛分布的粉土给公路建设带来了巨大麻烦, 由于粉土具有失水成灰、吸水成泥的显著不良特征, 且粉粒含量较多

而黏粒和粗粒含量相对较少, 在路基填筑时由于难以压实、CBR 值较低以及无侧限抗压强度较小常常被弃置或改良。常用的处理方法有物理改良^[1]、化学改良^[2-5]以及加强粉土路基的排水和隔水。此外, 西藏地区年温差大和冬季昼夜温差大的独特气候对

收稿日期: 2017-10-10

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51778211); 江苏省科技计划项目(BK20171434)

作者简介: 施海建(1993-), 男, 江苏南通人, 硕士, 研究方向为软土及地基处理。

区域粉土的性质有较大影响^[6]，因此开展该地区路基粉土的力学特性研究及如何进行改良使其路用性能满足要求具有十分重要的意义。本文提出利用水泥改良该区域粉土，通过试验以确定合适水泥掺量使其满足公路路基填土的要求。

1 试验研究方法

1.1 土的基本性质

本次实验用西藏林芝地区八一镇比日神山山脚下的坡积粉土，取土深度为土层表面以下1~2 m处，其中粘粒($d < 0.005$ mm)含量占8.8%，粉粒(0.005~0.075 mm)的含量占74.7%，具体物理力学性质指标见表1。本文选用海螺牌32.5普通硅酸盐水泥，初凝时间为4 h，符合规范要求^[7]。

1.2 试验思路与设计

本文首先对不同掺量(0%、2%、4%、6%、8%)水泥改良粉土进行击实试验，以确定不同掺量水泥改良粉土的最优含水率和最大干密度，然后制作对应含水率和干密度的试样进行水稳定性试验、CBR试验和无侧限抗压强度试验，以及考虑冻融循环作用下无侧限抗压强度试验。目的是分析获得不同水泥含量在不同冻融循环次数作用下的力学特性和水泥最佳配合比。其中冻融循环设定为先将养护28 d的试样密封放在-20℃的低温箱中，冷冻12 h，之后将试样取出，放在20℃的养护箱中融化12 h，此为一个循环。

2 试验结果与分析

2.1 压实特性试验研究

素土和不同掺量(2%、4%、6%、8%)水泥改良粉土击实试验如图1。水泥改良粉土的最优含水率基本稳定在17.5%左右，最大干密度随着水泥掺量的增加，呈现微弱的增长。即从2%掺量时的1.71 g/cm³，4%掺量时为1.72 g/cm³，6%掺量时为1.72 g/cm³，在水泥掺量为8%时，达到1.73 g/cm³。因此，获得素土和不同掺量(2%、4%、6%)的水泥改良粉土最优含水率为17.5%。

2.2 CBR 试验结果分析

由于在实际的路基施工完成后，路基一般不会出现立即浸水饱和现象，而是需要几天甚至数月才可能完全浸水饱和。因此，为了模拟真实工况下的水泥改良粉土的CBR值增长情况，在本次试验时采用先将改良粉土试件气养3 d，之后再浸水养护4 d。

在改良土击实试验的数据基础上，对90%、93%、96%三种压实度以及2%、4%、6%共3种掺量的改良土进行浸水CBR实验，以评价改良粉土的CBR值。由表2可知不处理粉土在96%压实度的情况下，CBR值也只有4.9%，不能满足二级公路填方路基上路床CBR值 $\geq 6\%$ 的要求，因此必须采取措施。

由图2可知在相同压实度条件下，改良粉土的CBR值与水泥掺量有良好的线性关系。表现为不同压实度的改良粉土CBR值均随水泥掺量的增长呈现线性增长。由图3可知，在相同掺量条件下，改良

表1 土的基本物理性质指标

Tab.1 Results of physical behaviors of soil specimens

天然含水率 /%	有机质含量 /%	易溶盐含量 /%	液限 W_L /%	塑限 W_P /%	塑性指数 I_p	比重 G_s
13~24	0.71	0.018	31.5	22	9.5	2.63

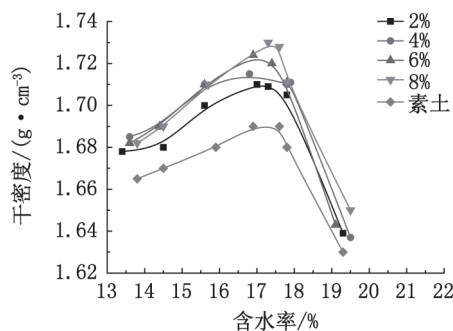


图1 不同掺量水泥改良粉土击实曲线

Fig.1 Concrete compaction curve of different dosage cement

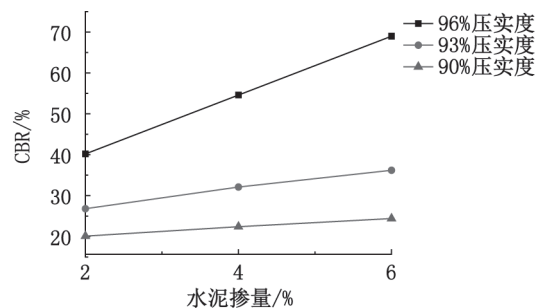


图2 CBR 随水泥掺量的变化规律

Fig.2 Variation of CBR with cement content

粉土的 CBR 值随压实度的增长而显著增长, 增长速率越来越快。水泥掺量越高的改良粉土, 在同压实度段, 其曲线越陡, 即水泥掺量越高, 其 CBR 值增长越快。90%、93% 压实度的改良粉土即使掺入 6% 的水泥, 其 CBR 值 24.4%、36.2% 也小于掺量 2%, 压实度 96% 改良粉土的 CBR 值 40.2%。这表明, 在水泥改良粉土的压实度和水泥掺量两个控制指标中, 压实度对 CBR 值的影响更大。因此, 在实际水泥改良粉土施工中, 压实度是更为重要的控制指标。

2.3 无侧向抗压强度试验

无侧限抗压强度是路基填料的一项重要指标。基于以上击实和 CBR 试验, 制作含水率为 17.5%, 相对压实度为 96%, 掺量分别为 0%、2%、4%、6%、8% 的水泥改良粉土经过 7 d 标准养护后, 进行浸水 24 h 后的无侧限抗压强度试验。

其中纯粉土试样由于入水 10 min 内完全崩解, 未进行浸水 24 h; 掺量 2% 改良粉土浸水 24 h 后只有极个别试样出现轻微颗粒剥落的现象; 掺量 4% 及以上的改良粉土试样未发生明显的软化或颗粒剥落情况。得到水泥改良粉土的无侧限抗压强度随水泥掺量的增长规律如图 4。无侧限抗压强度随水泥掺量的增加而呈线性增长, 在掺量达到 4% 时, 改良粉土的 7 d 龄期无侧限抗压强度达到 0.815 MPa,

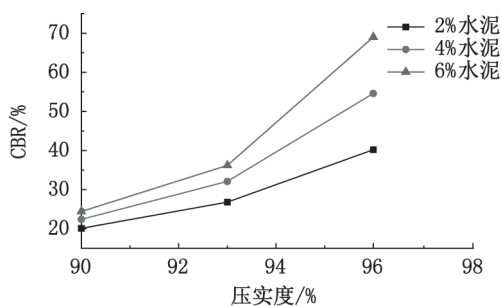


图3 CBR 值随压实度的变化规律

Fig.3 Variation of CBR with compaction

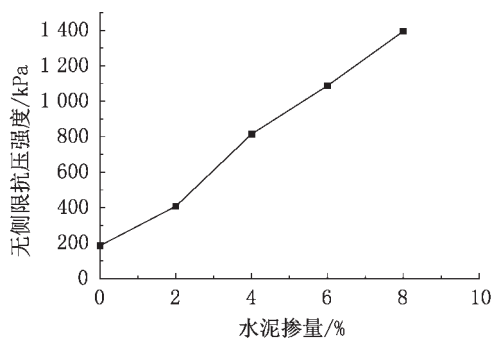


图4 强度随掺量的变化规律

Fig.4 Variation of strength with cement content

满足二级公路改良粉土底基层 7 d 无侧限抗压强度 ≥ 0.8 MPa 的要求。

2.4 考虑冻融循环的力学特性试验研究

为了探讨冻融循环对水泥改良粉土强度的影响, 本文通过对不同掺量水泥改良粉土经 28 d 养护后, 进行不同冻融循环, 最后在万能试验机上进行无侧限抗压强度试验。

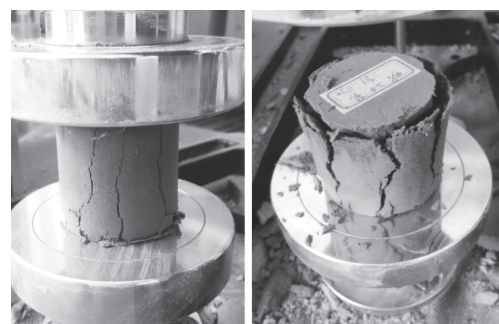
2.4.1 融循环作用对不同掺量水泥改良粉土应力应变的影响

通过观察水泥改良粉土在无侧限抗压强度试验中的破坏规律, 可以发现试样的破坏过程如下: 在低应变加载下, 试样处于弹性阶段; 随着正向压应力的增大, 试样产生塑性变形; 在达到峰值强度后, 内部的微弱裂隙快速变大, 颗粒发生错动, 在外观上看, 即为图 5(a) 试样表面的纵向裂缝; 随着应力的进一步增大, 表面裂缝越来越大, 试样顶部形成典型的“锥型破坏”, 这是一种明显的脆性破坏模式, 如图 5(b)。

从图 6、图 7、图 8 可以看出, 水泥掺量 2%、4% 或 6% 的试样随着冻融循环次数的增长, 改良粉土的无侧限抗压强度逐渐降低, 10 次时最低, 但和冻融 5 次试样相比, 应力应变曲线趋于重合。因此, 建议在实际工程中可以以冻融循环 5 次后的强度作为水泥改良粉土的设计参考强度。如果以应变达到 5%(2.5 mm) 时应力应变曲线上对应的应力作为残余强度, 在相同掺量条件下, 未冻融改良粉土的残余强度比冻融后的大。

2.4.2 冻融循环对水泥改良粉土静载峰值强度影响

通过试验可以得出水泥改良粉土经过不同次数的冻融循环后其静载峰值强度如图 9。由图可知, 经过第 1 次冻融循环后其强度衰减最明显, 平均强



(a) 试样产生裂缝

(b) 试样被压碎

图5 加载过程中的破坏形态

Fig.5 Damage during loading

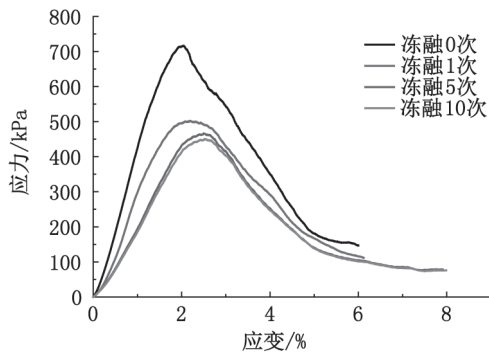


图 6 含 2% 水泥粉土的单轴应力应变曲线

Fig.6 Uniaxial stress-strain curve with 2% cement silt

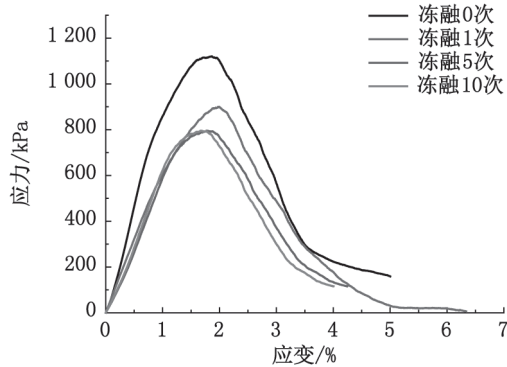


图 7 含 4% 水泥粉土的单轴应力应变曲线

Fig.7 Uniaxial stress-strain curve with 4% cement silt

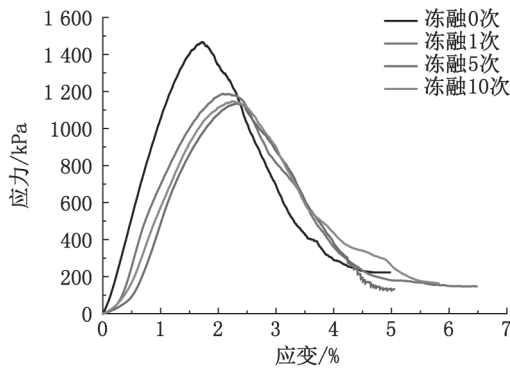


图 8 含 6% 水泥粉土的单轴应力应变曲线

Fig.8 Uniaxial stress-strain curve with 6% cement silt

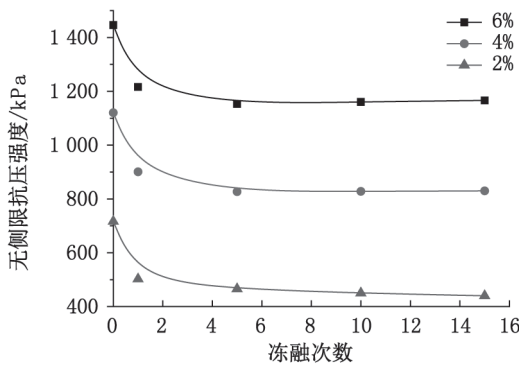


图 9 改良粉土经不同冻融次数后的峰值强度

Fig.9 Peak intensity of modified silt by different freezing and thawing times

度衰减均在 200 kPa 以上。5 次冻融循环后强度基本都趋于稳定，强度衰减均变化不大。对于掺量 2% 试样，在冻融循环 15 次时，强度仍有降低，而 4%、6% 试样在冻融 5 次后均开始有微弱的反弹出现（曲线反翘），这说明掺量较高时，试样 28 d 龄期时水泥改良粉土的水化反应仍在进行，使试样强度在经受冻融作用后强度有轻微的“自愈合”现象，但这种水化反应导致的强度增长已经极为缓慢，这与文献^[8]的结论类似。

2.4.3 水泥改良粉土抗冻性能与水泥掺量的关系

本文采用计算水泥改良粉土的抗冻性能公式^[7]：

$$BDR_{\alpha} = \frac{R_{\min}}{R_0} \times 100\%$$

其中 BDR_{α} 为掺量 α 时改良土的抗冻性指数； R_0 为 28 d 龄期未冻融的无侧限抗压峰值强度； R_{\min} 为 28 d 龄期在 15 次冻融循环过程中峰值强度的最小值。

通过计算得出不同掺量的水泥改良粉土的抗冻性指数变化如图 10。水泥改良粉土的抗冻性能在 3% 掺量时抗冻指数 BDR_{α} 为 61.4%，4% 掺量时为 73.8%，5% 时为 78.2%，6% 时为 79.7%，即随掺量的增加， BDR_{α} 逐渐增长，但增长趋势逐渐趋缓。这是由于水泥水化生成的结晶物使土体形成抗冻性能较散体颗粒结构强的骨架结构，掺量越高，骨架结构之间的联结越紧密，导致胶结作用越强，即抗冻性能越强。

2.4.4 冻融循环对水泥改良粉土回弹模量的影响

回弹模量是表征水泥土在受到正向压力时产生变形，且在正向压力卸载后，能够完全恢复的一段变形所对应的模量。在无侧限抗压强度试验的应力-应变曲线上，其表现为峰值应力前的某一段直线阶段。考虑到水泥改良粉土应力应变曲线在应变为 0%~0.5% 这一段也趋近弹性变形的直线段，为了计算简便，本文以 0.5% 应变所对应的变形模量，作

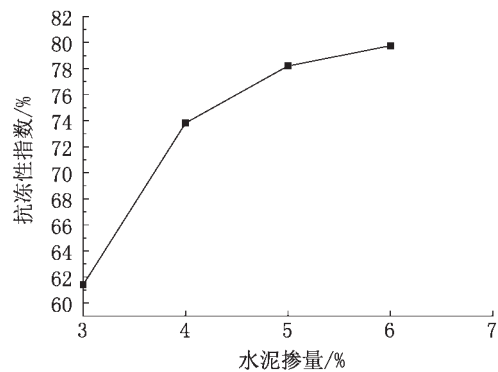


图 10 抗冻性指数随水泥掺量的变化规律

Fig.11 Variation law of frost resistance index with cement content

为水泥改良粉土的回弹模量。计算出的不同冻融循环次数后改良粉土的回弹模量的变化如图 11。

由图 11 可以看出,随着冻融次数的增加,水泥改良粉土的回弹模量逐渐降低,从第 5 次冻融开始降低越来越缓,几乎不变。随着掺量的增加,回弹模量降低越少。

2.4.5 冻融循环对改良粉土冻胀率和融沉率的影响

图 12 和图 13 分别给出了水泥掺量为 4% 改良粉土的冻胀率和融沉率随冻融次数变化规律,由图可知在掺入 4% 水泥时,试样的相对最大冻胀率出现在第 1 次冻胀时,为 0.57%。之后的第 2 次冻胀,冻胀率减小到只有 0.22%,其后环比冻胀率逐次减弱,至第 7 次时,几乎稳定在 0 左右。而试样的相对最大和最大融沉率出现在第 1 次融沉时,最大值 0.25%,后面的第 2 次融沉,融沉率降低至 0.15%,之后逐次降低,直至第 4 次基本稳定,至第 7 次不再融沉。同时得出,在密封不给水的条件下,可以以第 1 次的冻胀率和融沉率作为设计参数,水泥掺量为 4% 时可满足路基填料冻胀率小于 1% 的规定。

3 结语

1) 不同掺量的水泥改良粉土的最优含水率几乎不变,最大干密度随掺量增加缓慢增大。

2) 西藏地区不处理的粉土的 CBR 不能满足二级公路填方路基上路床 $CBR \geq 6\%$ 的要求。

3) 在冻融循环作用下水泥改良粉土仍为脆性破坏模式,在实际工程可以以冻融循环 5 次后的强度作为水泥改良土的设计参考强度。

4) 结合强度试验和冻胀融沉试验结果,4% 以上掺量的水泥改良粉土能够满足规范对路基填料水稳定性、CBR 值、无侧限抗压强度和冻胀融沉率的要求。

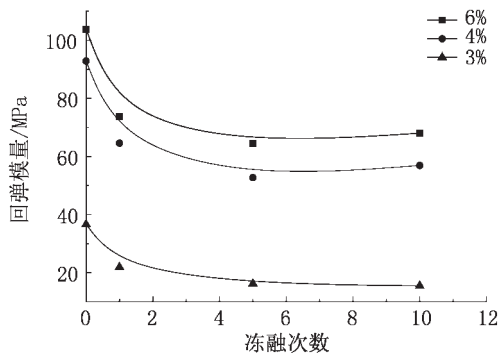


图 11 回弹模量随冻融次数的变化规律

Fig. 11 Variation law of resilient modulus with freezing and thawing times

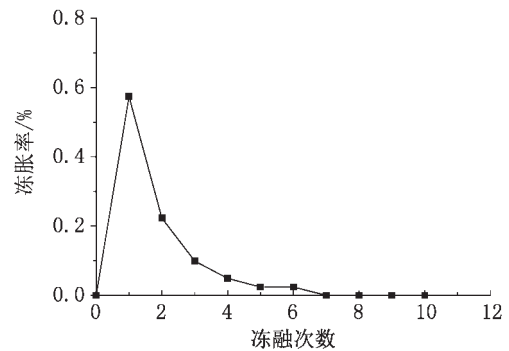


图 12 冻胀率随冻融次数变化规律

Fig. 12 Variation rule of frost heave rate with freezing and thawing times

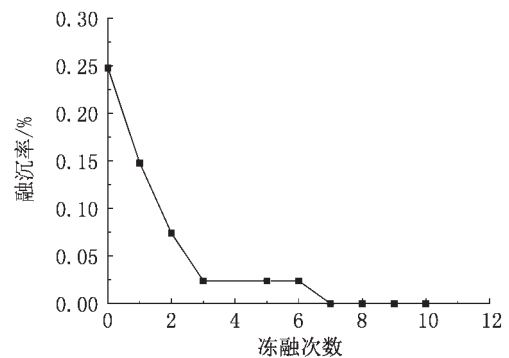


图 13 融沉率随冻融次数变化规律

Fig. 13 Variation law of thawing rate with freezing and thawing times

参考文献:

- [1] 尚新鸿. 低液限粉性土作为路基填料的改良试验研究 [D]. 西安: 长安大学, 2009: 15-25.
- [2] 崔金平. 强风化千糜岩粉土改良的 CBR 试验研究 [J]. 水利与建筑工程学报, 2011(4): 80-84.
- [3] 武庆祥, 彭丽云, 龙佩恒. 石灰、水泥对粉土的改良研究 [J]. 公路, 2015, 60(9): 14-19.
- [4] 张涛, 刘松玉, 蔡国军, 等. 木质素改良粉土热学与力学特性相关性试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2015, 37(10): 1876-1885.
- [5] 姜冲, 黄珂, 杜伟, 等. 水玻璃改良低液限粉土的室内试验研究 [J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2016, 33(4): 42-46.
- [6] 陈肖柏, 刘建坤, 刘鸿绪, 等. 土的冻结作用与地基 [M]. 北京: 科学出版社, 2011: 18-19.
- [7] JTG E51-2009, 公路工程无机结合稳定材料试验规程 [S].
- [8] 袁赛峰. 水泥改良林芝粉土路用性能试验研究 [D]. 南京: 河海大学, 2016: 55-80.

(责任编辑 王利君)