

消石灰、水泥改良粉土的强度及变形特性研究

宋博文^{1,2}, 吕光东^{1,3}, 朱文旺^{1,2}, 张瑜^{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. 江苏省岩土工程技术工程研究中心, 河海大学, 江苏 南京 210098; 3. 西藏农牧学院水利土木工程学院, 西藏 林芝 860000)

摘要: 以泰州市东风路南段的低液限粉土为研究对象, 通过添加消石灰、水泥及消石灰和水泥对粉土进行改良, 并对改良后的粉土进行室内研究。研究表明: 消石灰、水泥及消石灰和水泥改良粉土的无侧限抗压强度均有大幅度提高; 改良粉土的无侧限抗压强度均随养护龄期增长逐渐增大, 但在 14~28 d 之间的增长速率较大, 28 d 之后的增长速率较小; 改良粉土的无侧限抗压强度随压实度的增加明显提高; 消石灰和水泥联合改良粉土抵抗变形的能力显著提高; 3%消石灰+5%水泥联合改良粉土不仅能够满足路基填料的设计要求, 且比较经济, 是较佳改良方案。试验结果具有参考价值, 实际工程中可以依据强度要求确定不同的石灰+水泥掺量。

关键词: 消石灰; 水泥; 粉土; 强度特性; 变形特性

中图分类号: U416.03 文献标志码: A 文章编号: 2095-7874(2018)06-0042-05

doi: 10.7640/zggwjs201806010

Strength and deformation characteristics of silt modified with slaked lime or cement

SONG Bo-wen^{1,2}, LÜ Guang-dong^{1,3}, ZHU Wen-wang^{1,2}, ZHANG Yu^{1,2}

(1. Key Laboratory for Geotechnical Engineering of Ministry of Water Resource, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 2. Research Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 3. Department of Water Conservancy and Civil Engineering, Tibet Agricultural and Animal Husbandry College, Linzhi, Tibet 860000)

Abstract: Taking the low liquid limit silt located in Taizhou area as the research object, we improved the silt by adding slaked lime, cement and both, and carried a laboratory experiment on the modified silt. Results show that the unconfined compressive strength of the modified silt got dramatic improvement, which increased with the growth of the ages. Especially between the 14 to 28 days, the growth rate was larger. And after the 28th days, the growth rate was smaller. The unconfined compressive strength of the modified silt was dramatically improved with the increase of compactness. The ability of deformation resistance of silt treated by slaked lime and cement got great improvement. Silt modified with 3% slaked lime and 5% cement can meet the design requirements of roadbed packing, and it is also economical, which is a better improvement scheme. The test results have certain reference value, and the mixing amount of slaked lime and cement can be determined according to the strength requirement of practical engineering.

Key words: slaked lime; cement; silt; strength characteristics; deformation characteristics

0 引言

粉土是介于黏性土和砂土之间的一种土, 具有松散、不稳定、塑性指数低、黏性小和土粒径

集中等特点, 不能直接用来填筑路基。由于社会发展、土地资源紧缺、经济现状和工期等原因, 经常要用粉土来填筑路基。为了避免因使用粉土填筑材料而造成的工程危害, 必须对粉土进行改良, 使改良后的粉土能够满足路基填筑的设计要求。国内外学者对粉土的改良进行了大量的试验研究, 取得了一些重要成果。张瑜等^[1]用石灰和水

收稿日期: 2017-11-01 修回日期: 2018-01-17

基金项目: 中央高校基本科研业务项目 (KYLX15-0469)

作者简介: 宋博文(1992—), 男, 河北邯郸人, 硕士研究生, 从事土的静动力学特性、特殊土处治技术研究。

E-mail: 976142642@qq.com

泥改良泰州地区的粉土,发现水泥改良粉土的效果比水泥加石灰好,改良土的 CBR 值随着水泥掺合比的增加而增大。陈燕等^[2]采用水泥改良粉土,并给出了水泥的最优掺合比。张西海等^[3]依托陇海线郑州至徐州段铁路工程,利用石灰和粉煤灰改良粉土,得出石灰粉煤灰改良粉土的无侧限抗压强度随着粉煤灰掺合比的增加而提高的结论。王海俊等^[4]通过掺加石灰、水泥来改性粉土,得到较为经济的掺合比和加固机理。尚新鸿^[5]采用砂砾改

良粉土,效果较好。

粉土作为路基填料要经受反复的荷载作用,不仅要满足承载力要求,而且要能经受反复的荷载作用,故本文对石灰、水泥改良粉土的无侧限抗压强度和循环荷载作用下的变形特性进行了相关研究。

1 土样的基本物理性质

在泰州市东风路南段(永定路—宁通高速)采取的土样,土样的基本物理性质指标如表 1。

表 1 土样基本物理性质指标

Table 1 The basic physical properties of soil

含水率/%	最大干密度/ (g·cm ⁻³)	最优含水率/%	比重 G _s	液限含水率/%	塑限含水率/%	塑性指数 I _p	塑性指数 I _L	粉粒、砂粒含量/%	土样类别
21	1.67	13.5	2.67	28.6	20.3	8.4	0.2	92	低液限粉土

按 JTG E40—2007《公路土工试验规程》^[6]判定泰州市东风路南段的土样为低液限粉土,不能直接作为路基填筑材料。

2 试验方案

本文试验严格按照《公路土工试验规程》进行。采用水泥为普通硅酸盐水泥(P.O32.5),石灰为二级灰(CaO)。

1) 击实试验:采用重型击实试验,试样的制备采用干法制备。

2) 无侧限抗压强度试验:以重型击实试验测得的不同的掺加剂和掺合比改良粉土的最优含水率为基准,分别在试验室制配压实度为 93%、94%、96%的无侧限抗压强度试验试样,试样分别在标准养护条件下养护 14 d, 28 d, 58 d 和 90 d。

在进行无侧限抗压强度试验之前将试样浸水饱和 24 h。

3) 循环荷载试验:试样的直径和高度均为 50 mm,循环荷载下限利用公式 $\sigma_z = K \cdot \frac{P}{Z^2}$ 计算,其中 $K=0.4775$,假定轮载为集中荷载; P 参照规范取 100 kN;假定高等级道路面层厚度 80 cm,即 $Z=0.8$ m,代入公式得到下限荷载大小为 74.6 kPa。循环荷载上限取为无侧限抗压强度的 70%。

3 击实特性试验分析

在试验室进行不同的掺加剂和掺合比改良粉土重型击实试验,绘制干密度与含水率的关系曲线,最后得到不同的掺加剂和掺合比改良粉土的最优含水率和最大干密度,具体试验结果如表 2 所示。

表 2 击实试验结果

Table 2 Compaction test results

项目	土样									
	粉土	消石灰改良土				水泥改良土		消石灰+水泥联合改良土		
掺合比	0%	3%	5%	7%	3%	5%	7%	3%消石灰+3%水泥	3%消石灰+5%水泥	3%水泥+5%消石灰
最大干密度/(g·cm ⁻³)	1.67	1.66	1.68	1.67	1.69	1.70	1.68	1.68	1.69	1.69
最优含水率/%	13.5	15.4	15.0	14.8	15.2	14.6	15.6	13.7	13.3	13.4

分析表 2 中的数据可知,掺加不同的掺加剂和掺合比对粉土的最大干密度影响很小,但对粉土的最大干密度影响显著。消石灰改良法可以显著地提高改良粉土的最优含水率,但随着掺合比的增大改良粉土的最优含水率呈现逐渐减小的趋势。水泥改良法可以显著的提高改良粉土的最优含水率,但随掺合比的增大改良粉土的最优含水

率呈现逐渐增大的趋势。消石灰和水泥联合改良法对粉土的最优含水率没有较大的影响。

4 强度特性分析

4.1 消石灰改良粉土的强度特性分析

4.1.1 无侧限抗压强度试验结果

消石灰改良粉土的无侧限抗压强度试验结果如图 1 和图 2 所示。

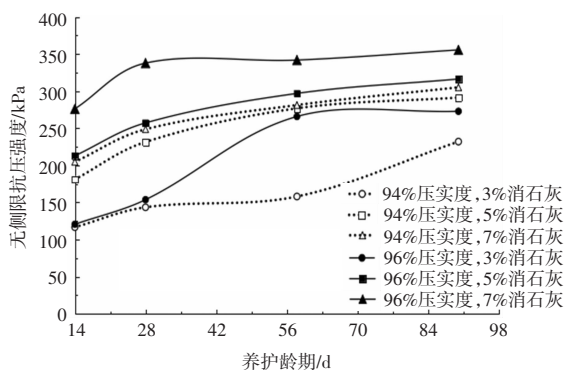


图1 消石灰改良粉土的养护龄期与无侧限抗压强度曲线
Fig. 1 Curve of maintenance age of silt modified with slaked lime and unconfined compression strength

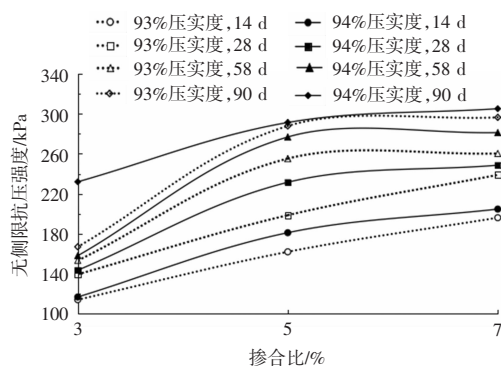


图2 消石灰改良粉土的掺合比与无侧限抗压强度曲线
Fig. 2 Curve of mixing ratio of silt modified with slaked lime and unconfined compression strength

4.1.2 强度特性分析

粉土在 93%、94%和 96%压实度下的无侧限抗压强度分别为 57.6 kPa、59.1 kPa 和 68.3 kPa。由图 1 和图 2 分析可知,消石灰可以有效地提高粉土的无侧限抗压强度。原因是将消石灰均匀添加到粉土中后,会发生离子交换作用、碳化作用、火山灰作用和结晶作用^[7-8]。离子交换作用: $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 水化生成的 Ca^{2+} 与黏土矿物表面吸附的 K^+ 、 Na^+ 进行离子交换的团粒化作用(由于粉土中黏粒含量较少,因此该反应很弱)。碳化作用: $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与空气中的 CO_2 发生反应生成难溶性的碳酸盐 CaCO_3 。火山灰作用: $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与粉土中的 SiO_2 和 Al_2O_3 发生了反应生成水化硅酸钙和水化铝酸钙(反应十分缓慢),这两种凝胶能够在水环境下以凝胶体出现,后期逐步转化为与土体胶结的纤维状晶体。结晶作用:消石灰在掺入粉土后,产生的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 除去以上几种作用之外,大部分以晶体形式析出,增加土体的强度。

由图 2 发现:消石灰改良粉土的无侧限抗压强度随着掺合比的增加而呈现逐渐增加的趋势,5%消石灰的改良效果较好;消石灰改良粉土的无侧限抗压强度随压实度的不断增加也在不断增加。

由图 1,消石灰改良粉土的无侧限抗压强度随养护龄期的增长而逐渐增长,但 14~28 d 之间无侧限抗压强度增长速率较大,在 28 d 之后增长速率变小。这是因为在 28 d 之前,改良粉土的无侧限抗压强度主要是由离子交换作用、碳化作用、胶结作用和结晶作用共同作用产生的,故强度增长速率较大。在 28 d 之后,离子交换作用、碳化作用和结晶作用已基本完成(三者反应较快),只进行反应缓慢的胶结作用,故强度的增长速率较小。

4.2 水泥改良粉土的强度特性分析

4.2.1 无侧限抗压强度试验结果

水泥改良粉土的无侧限抗压强度试验结果如图 3 和图 4 所示。

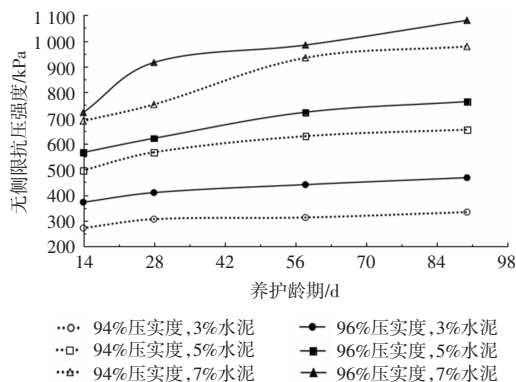


图3 水泥改良粉土的养护龄期与无侧限抗压强度曲线
Fig. 3 Curve of maintenance age of silt modified with cement and unconfined compression strength

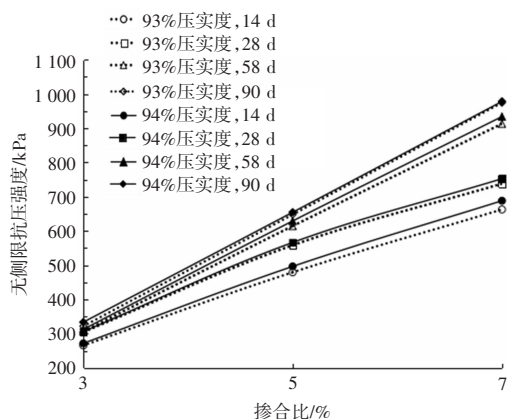


图4 水泥改良粉土的掺合比与无侧限抗压强度曲线
Fig. 4 Curve of mixing ratio of silt modified with cement and unconfined compression strength

4.2.2 强度特性分析

由图3和图4并对比图1和图2发现,水泥可以高效地提高粉土的无侧限抗压强度,且改良粉土的效果比消石灰好。将水泥均匀掺加到粉土中会发生复杂的化学反应,主要有水化作用和碳化作用^[9-10]。水泥水化后产生不溶于水的水硬性胶结产物,进而增加粉土的强度。水泥在粉土中水化后产生的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 与空气中的 CO_2 发生反应生成难溶性的碳酸盐,如 CaCO_3 和 MgCO_3 等。水泥改良粉土的效果比消石灰好,只因水泥产生的水化作用较消石灰产生的火山灰作用强,且反应速率快,增加粉土的强度较为显著。

由图4可知,水泥改良粉土的无侧限抗压强度随着掺合比的增加而呈线性增加。水泥改良粉土的无侧限抗压强度随着压实度的增加而增加。

图3分析可知,水泥改良粉土的无侧限抗压强度随着养护龄期的增长逐渐增大,但随着养护龄期的增长,增加幅度逐渐减小。14~28 d之间无侧限抗压强度增加速率较大,28 d之后的增长速率变小。因为水泥的早期强度增长较快,随着龄期的增长强度增长越来越缓慢,即前期离子交换作用、硬凝作用和碳化作用等反应速率较快,到后期反应速率逐渐减小,导致强度增长比较缓慢。

4.3 消石灰和水泥联合改良粉土

消石灰和水泥联合改良粉土的无侧限抗压强度试验结果如图5和图6所示。

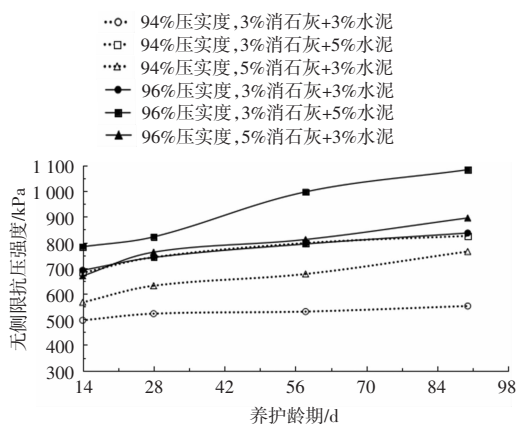
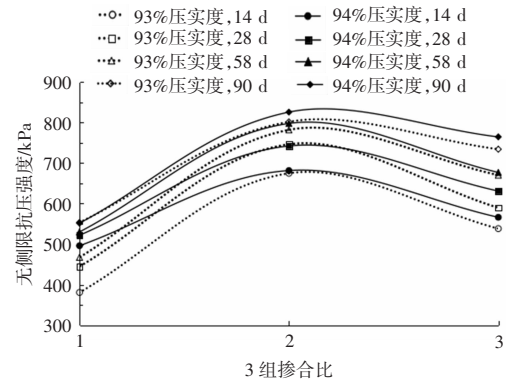


图5 养护龄期与无侧限抗压强度曲线

Fig. 5 Curve of maintenance age and unconfined compression strength

分析图5和图6发现,消石灰和水泥联合改良可以显著提高粉土的无侧限抗压强度。随着压实度的增加,消石灰和水泥联合改良粉土的无



注:横坐标数值1代表3%消石灰+3%水泥;2代表3%消石灰+5%水泥;3代表5%消石灰+3%水泥。

图6 掺合比与无侧限抗压强度曲线

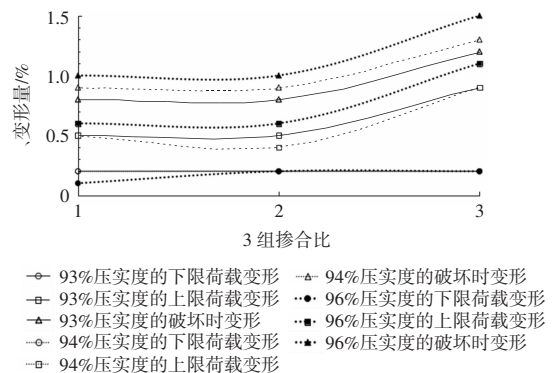
Fig. 6 Curve of mixing ratio and unconfined compression strength

限抗压强度也在不断增加。图5中消石灰和水泥联合改良粉土的无侧限抗压强度随着养护龄期的增长而逐渐增长,但无侧限抗压强度增长速率在14~28 d之间较大,28 d之后变小。

对比图6、图3发现,在90 d养护龄期以后,3%消石灰+5%水泥联合改良粉土与7%水泥改良粉土的无侧限抗压强度相差较小,但前者的改良成本相对较低。虽然3%的消石灰在前期改良效果一般,但在后期其改良效果显著提高。故在进行粉土改良时,可以采用3%消石灰和5%水泥联合改良粉土,从而达到经济高效的目的。

5 消石灰和水泥改良粉土的变形分析

由于消石灰和水泥联合改良粉土的效果较为经济高效,故对消石灰和水泥联合改良粉土进行了循环荷载作用下的变形试验,试验结果见图7。



注:横坐标数值1代表3%消石灰+3%水泥;2代表3%消石灰+5%水泥;3代表5%消石灰+3%水泥。

图7 消石灰和水泥联合改良粉土的变形量

Fig. 7 Deformation of silt modified with slaked lime and cement

分析图7可知,93%、94%和96%压实度下的荷载变形重合在一条水平的直线上,表明消石灰和水泥联合改良粉土在初次达到下限荷载时产生的应变与压实度和掺合比无关。消石灰和水泥联合改良粉土的无侧限抗压强度均大于381 kPa,而下限荷载为74.6 kPa(强度较小),因此只会引起的微弱变形,故呈现出不同压实度下的荷载变形重合在一条水平直线上的现象。

93%、94%和96%压实度的上荷载变形曲线都呈抛物线型,这表明消石灰和水泥联合改良粉土在初次达到上限荷载时产生的应变随着压实度的增加而不断增加,消石灰和水泥联合改良粉土在初次达到上限荷载时产生的应变随着掺合比的变化而呈现先减小后增大的抛物线型。因随着掺合比的变化改良粉土的无侧限抗压强度呈现先增大后减小的规律,故抵抗变形的能力也呈现先增大后减小的规律,而上限荷载强度也呈现先增大后减小的规律,会不断产生先增大后减小的荷载变形,但此时抵抗变形能力大于产生荷载变形的能力,故呈现先减小后增大的抛物线型。

93%、94%和96%压实度的破坏时变形曲线都呈抛物线型,表明消石灰和水泥联合改良粉土在达到破坏时产生的应变随着压实度的增加而不断增加,消石灰和水泥联合改良粉土在达到破坏时产生的应变随着掺合比的增加而呈现先减小后增大的抛物线型。因为随着掺合比的变化改良粉土的无侧限抗压强度呈现先增大后减小的规律,故抵抗疲劳变形的能力也呈现先增大后减小的规律,而上限荷载强度也呈现先增大后减小的规律,会不断产生先增大后减小的荷载变形,但此时抵抗疲劳变形能力大于产生荷载变形的能力,故呈现先减小后增大的抛物线型。

6 结语

1) 添加不同的掺加剂和掺合比对粉土的最大干密度影响很小,但对最优含水率的影响较大。消石灰改良法和水泥改良法都可以显著提高改良粉土的最优含水率。消石灰和水泥联合改良法对粉土的最优含水率影响较小。

2) 消石灰、水泥、消石灰和水泥联合均可以有效地提高粉土的无侧限抗压强度,消石灰改良的效果相对另外两种差。3%消石灰和5%水泥联合改良粉土可以达到经济高效的效果。消石灰改良法、水泥改良法及消石灰和水泥联合改良法改

良粉土的无侧限抗压强度均在14~28 d之间的增长速率较大,28 d之后的增长速率较小。

3) 消石灰和水泥联合改良法均可以有效地提高粉土抵抗变形的能力。

参考文献:

- [1] 张瑜,黄珂,朱文旺.水泥、石灰改良粉土试验研究[J].中国港湾建设,2017,37(3):33-36.
ZHANG Yu, HUANG Ke, ZHU Wen-wang. Experimental study on cement and lime to improve silt soil [J]. China Harbour Engineering, 2017, 37(3): 33-36.
- [2] 陈燕,魏宏超.高速铁路粉土路基改良试验研究[J].安全与环境工程,2011,18(3):126-128.
CHEN Yan, WEI Hong-chao. Improvement study of high-speed rail silty sand subgrade[J]. Safety and Environmental Engineering, 2011, 18(3): 126-128.
- [3] 张西海,夏琼,杨有海.石灰及其与粉煤灰混合料改良粉土的试验研究[J].路基工程,2007(3):43-45.
ZHANG Xi-hai, XIA Qiong, YANG You-hai. Test study of lime and its fly ash mixture for modified silt soil[J]. Subgrade Engineering, 2007(3): 43-45.
- [4] 王海俊,殷宗泽,余湘娟.粉土路堤填料的CBR试验研究[J].路基工程,2006(1):56-58.
WANG Hai-jun, YIN Zong-ze, YU Xiang-juan. Research on CBR test of silt as embankment filling[J]. Subgrade Engineering, 2006 (1): 56-58.
- [5] 尚新鸿.低液限粉性土作为路基填料的改良试验研究[D].长沙:长沙大学,2009.
SHANG Xin-hong. Experimental study on improvement of low limit silt as the material of subgrade[D]. Changsha: Changsha University, 2009.
- [6] JTG E40—2007,公路土工试验规程[S].
JTG E40—2007, Test methods of soils for highway engineering[S].
- [7] 周爱芳,章光,胡双双.从蒙脱石分析膨胀土的石灰改良机理[J].路基工程,2007,134(5):24-25.
ZHOU Ai-fang, ZHANG Guang, HU Shuang-shuang. Mechanism of expansive soil modification with lime from montmorillonite analysis[J]. Subgrade Engineering, 2007, 134(5): 24-25.
- [8] 惠会清,雷胜友.膨胀土膨胀机理及其改良(抑制)方法的研究综述[J].公路交通科技,2005,22(9):90-102.
HUI Hui-qing, LEI Sheng-you. Summarizing on the swelling mechanism of expansive soil and the method of restraining the swelling of expansive soil[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22(9): 90-102.
- [9] 高建伟,余宏明,钱玉智,等.水泥改良膨胀土强度特性试验研究[J].公路,2013(12):165-168.
GAO Jian-wei, YU Hong-ming, QIAN Yu-zhi, et al. Research on strength characteristics of cement modified expansive soil[J]. Highway, 2013(12): 165-168.
- [10] 吴新明,巫银勇,周明波.水泥改良膨胀土试验研究[J].路基工程,2007,131(2):94-95.
WU Xin-ming, WU Yin-yong, ZHOU Ming-bo. Study on the cement improvement of expansive soil[J]. Subgrade Engineering, 2007, 131(2): 94-95.