

# 无机结合料稳定粉质黏土的 强度特性试验研究

刘 泽<sup>1</sup>, 李 洪<sup>1</sup>, 严文钦<sup>1</sup>, 周环龙<sup>2</sup>

<sup>1</sup>湖南科技大学土木工程学院, 湖南 湘潭

<sup>2</sup>浙江交工国际工程有限公司, 浙江 杭州

收稿日期: 2022年3月31日; 录用日期: 2022年4月20日; 发布日期: 2022年4月29日

## 摘 要

为了探究粉质黏土用于路面基层的可行性, 分别以水泥、石灰为结合料, 开展了不同掺量的水泥、石灰、水泥 + 石灰的稳定土试验, 测试了不同改良方案下稳定土的强度。研究表明, 改良粉质黏土的CBR值随石灰、水泥掺量的增加而增大, 但相同掺量下, 水泥稳定土的CBR值高于石灰稳定土; 水泥稳定粉质黏土的7天无侧限抗压强度随水泥掺量的增加而增大, 粉质黏土不宜以石灰为改良剂; 常用掺量下水泥稳定粉质黏土的无侧限抗压强度较低, 不能满足道路底基层的要求。

## 关键词

粉质黏土, 稳定土, 强度, 试验研究

# Test Study on Strength Characteristics of Inorganic Binder Stabilized Silty Clay

Ze Liu<sup>1</sup>, Hong Li<sup>1</sup>, Wenqin Yan<sup>1</sup>, Huanlong Zhou<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan

<sup>2</sup>Zhejiang Jiaogong International Engineering Co., Ltd., Hangzhou Zhejiang

Received: Mar. 31<sup>st</sup>, 2022; accepted: Apr. 20<sup>th</sup>, 2022; published: Apr. 29<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

In order to explore the feasibility of silty clay used in pavement base, tests of stabilized soil with

different dosages of cement, lime and cement + lime were carried out with cement and lime as binder respectively, and the strength of stabilized soil under different improvement schemes was tested. The results show that the CBR value of the improved silty clay increases with the increase of lime and cement content, but the CBR value of cement stabilized soil is higher than that of lime stabilized soil under the same amount. The unconfined compressive strength of cement stabilized silty clay increases with the increase of cement content in 7 days, and lime is not suitable for silty clay as modifier. The unconfined compressive strength of cement stabilized silty clay with common dosage is low, which cannot meet the requirements of road subbase.

## Keywords

Silty Clay, Stabilized Soil, Strength, Test Study

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着国民经济的不断发展,城市内的各种结构纷纷拔地而起,大量的工程渣土也源源不断地产生。而随着环境保护政策的不断推进,这些渣土正面临着无处安放的境地,而筑路所需要的优质碎石却被限制开采。将工程渣土改良后用作路基路面材料势必带来巨大的技术、经济和环保效益,对促进城市可持续发展具有重要的意义。

工程建设开挖出来的渣土多为细颗粒的粉土或黏土。近年来,在沿海或平原地区公路建设中,细颗粒土改良后用作路基路面材料深受重视,但在实际工程中以路基填筑[1] [2] [3] [4]为主,针对路面基层的研究比较少。尤红军[5]通过试验研究了二灰土用作路面基层的配合比,黄新[6]探讨了水泥稳定细砂用于路面基层的可行性;胡朝辉[7]在对水泥稳定粉砂土进行试验的基础上,研究了稳定土的强度构成;京福高速公路采用三灰土(石灰 + 粉煤灰 + 水泥)作为路面底基层,杜学玲[8]研究了三灰土的合理配合比。程兆民[9]分析了稳定土基层的施工要点。这些研究为细粒土的工程应用提供了基础。

绍兴位于杭州湾北岸,钱塘江畔,景色优美,是中国优秀的旅游城市。近年来城市建设产生的渣土大量增加,而受环境保护的影响,碎石等地质材料的开采被严格限制。将工程渣土合理利用对绍兴的发展具有举足轻重的影响。为此,本文以绍兴盖北镇的粉质黏土为研究对象,分别采用石灰、水泥以及石灰 + 水泥为结合料,开展了稳定土的强度特性试验,并分析了改良后用于路面基层或底基层的可行性,为实现工程渣土处理的路用资源化提供技术支撑。

## 2. 试验土样的基本特性

试验所用的土样取自绍兴盖北镇新东线公路工程。土样呈黄褐色粉砂状,取回后以《公路土工试验规程》(JTG 3430-2020) [10]为依据,先后开展了筛分、击实、液塑限、比重、加州承载比以及直剪试验,获得了土样的基本物理力学参数,试验结果见图1和表1。由此可得,该土样的不均匀系数为 $C_u = 8.3$ ,曲率系数 $C_c = 0.75$ ,部分粒组(0.01~0.04 mm)缺乏,粒径大于0.075 mm的土颗粒占总质量的68%,结合土样的塑性指数( $IP = 14.2$ )分析可知,该土样为级配不良的粉质黏土;土样具有一定的抗剪强度,但浸水条件下的CBR值较低。

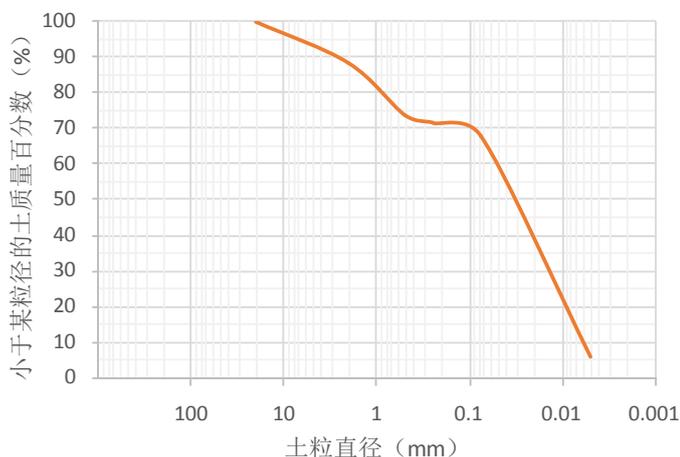


Figure 1. Grading curve of silty clay

图 1. 粉质黏土的级配曲线

Table 1. Basic physical and mechanical parameters of silty clay

表 1. 粉质黏土的基本物理力学参数

项目	指标
天然含水率/%	28.32
最佳含水率/%	15.71
最大干密度/(g/cm <sup>3</sup> )	1.61
液限/%	35.3
塑限/%	21.1
比重	2.603
内摩擦角/°	35.88
粘聚力/KPa	10.47
CBR	5.1

### 3. 稳定粉质黏土的强度试验

为了将该粉质黏土用于路面基层或底基层,拟以石灰、水泥以及石灰 + 水泥作为结合料对其进行改良。单掺石灰或水泥时,掺量为 0%、2%、4%、6%、8%、10%,石灰、水泥双掺时,考虑三种组合: 2% + 2%、3% + 3%、4% + 4%。石灰采用三级灰、水泥采用普通硅酸盐水泥(PO.32.5)。先完成三种方案下稳定土的击实试验,获取不同处治方案下的最优含水率,再据此制样,开展承载比试验、无侧限抗压试验和直剪试验,以获得稳定土的强度变化规律,为该土体的充分利用提供依据。

#### 3.1. 不同改良方案下的最佳含水率

试验采用重型击实法进行(图 2)。由每种掺量下的击实试验可以获得相应的最大干密度和最佳含水率,再将最佳含水率、最大干密度与结合料掺量的关系绘制成曲线图,如图 3 和图 4 所示。分析可知,当在粉质黏土中掺入 2% 的石灰或水泥后,土样的最佳含水率出现了近 2% 的增量,但随着石灰或水泥掺量的进一步增加,土样的最佳含水率反而出现下降,但下减幅度逐渐减小;当掺量大于 2% 后,相同掺量下水泥稳定土的最佳含水率大于石灰稳定土。石灰和水泥双掺时(图中的掺量是总掺量),其最佳含水率与

单掺石灰时相差不大。最大干密度基本上随结合料掺量的增加而增大，但石灰稳定土的最大干密度较水泥稳定土的最大干密度稍大，石灰水泥双掺时的最大干密度与单掺石灰时相当。



Figure 2. Compaction test  
图 2. 击实试验

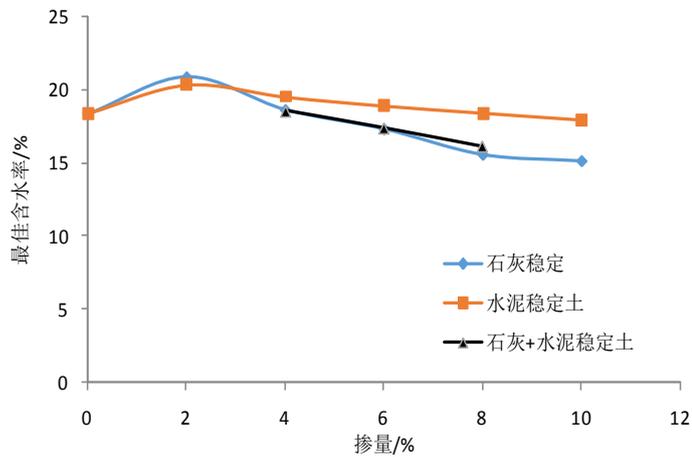


Figure 3. Relation curve of optimum water content and binder content  
图 3. 最佳含水与结合料掺量的关系曲线

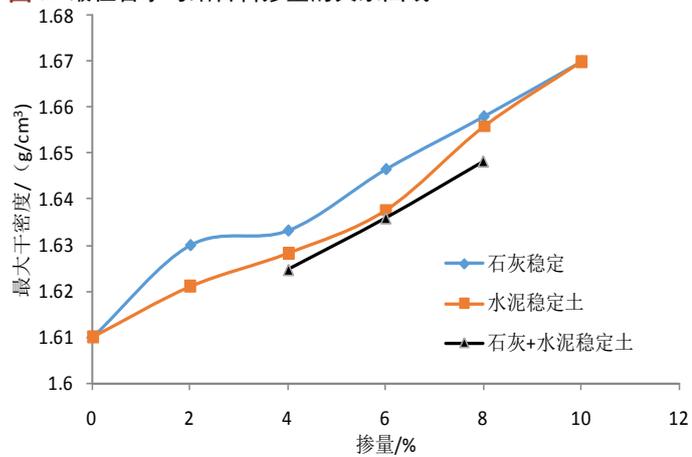


Figure 4. Relation curve between maximum dry density and binder content  
图 4. 最大干密度与结合料掺量的关系曲线

### 3.2. 加州承载比(CBR)

加州承载比是评价材料浸水后抵抗局部破坏的能力,也是路基路面材料需要重点考察的能力。不同方案下的稳定粉质黏土承载比试验(图 5)结果见图 6。可以看到,当粉质黏土采用水泥改良后,其抵抗局部破坏的能力(CBR 值)较素土有了大幅提升,且随着水泥掺量的增加 CBR 值也稳定提高;采用石灰改良时,当石灰的掺量较小时,CBR 值增加幅度较小,随着石灰掺量增大后,土样的 CBR 值的增幅加大,当掺量达到 10%时,石灰稳定土样的 CBR 值已经和水泥稳定土样的 CBR 值接近;但在相同掺量下,水泥稳定土的 CBR 值总大于石灰稳定土,说明对于粉质黏土,以水泥为改良剂优于以石灰为改良剂。石灰+水泥联合改良下土体的 CBR 值介于两者之间。

### 3.3. 无侧限抗压强度

无侧限抗压强度是评价路面材料另一个重要参数,特别是对于经石灰或水泥稳定后细粒土而言,路面规范提出了明确的要求。为此,按上述改良方案制备了直径为 50 mm、高为 100 mm 圆柱形试样,养护 7 天并在最后一天将试样浸在水中,然后进行无侧限抗压强度试验。试验过程见图 7。试验发现,当以石灰为结合料时,各掺量下的试样浸水 24 h 后其无侧限抗压强度基本为零,当进行石灰、水泥双掺后,其无限侧抗压强度也基本为零。这表明,对于粉质黏土不宜以石灰为结合料进行改良处理。



Figure 5. CBR test

图 5. CBR 试验

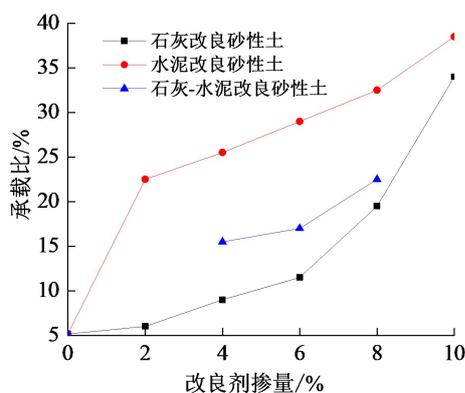


Figure 6. Relationship curve between CBR value of stabilized soil and dosage of modifier

图 6. 稳定土 CBR 值与改良剂掺量的关系曲线



Figure 7. Unconfined compressive strength test  
图 7. 无侧限抗压强度试验

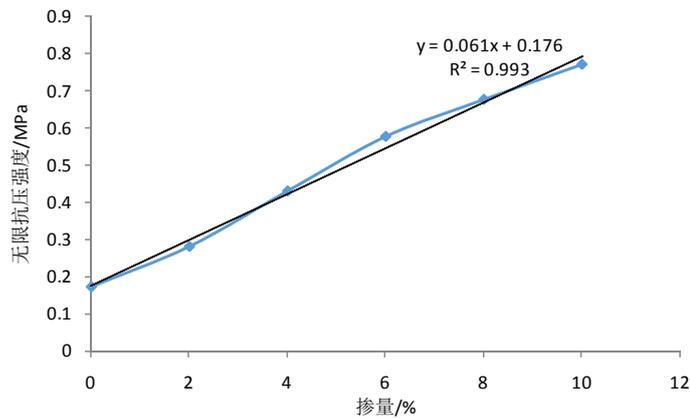


Figure 8. Relationship curve between unconfined compressive strength and binder content of cement stabilized soil  
图 8. 水泥稳定土无侧限抗压强度与结合料掺量的关系曲线

水泥稳定粉质黏土的无侧限抗压强度试验结果见图 8。可见，以水泥为改良剂时，试样的无侧限抗压强度随有了明显的增长，且基本上随掺量的增加线性增大，并满足式(1)所示的关系。

$$\sigma = 0.061\eta + 0.176 \quad (1)$$

式中， $\sigma$  为水泥稳定土的 7 天无侧限抗压强度(MPa)； $\eta$  为水泥掺量，%。

#### 4. 稳定粉质黏土用于路基路面基层的可行性分析

我国《公路路基设计规范》(JTG D30-2015) [11]规定：高速公路、一级公路的上路床(路基顶面以下 0~0.3 m)填料强度 CBR 不小于 8%，填料最大粒径应小于 100 mm，液限应小于 50%、塑性指数小于 26%。对比试验结果可知，该粉质黏土的 CBR 值过低，不宜直接用于路基填筑，但掺入 2% 的水泥或掺入 4% 的石灰后，其强度可以满足路基填筑要求。

半刚性基层是我国道路常用的结构层，这种结构层是以经水泥、石灰等无机结合料对处治后的碎石类和细粒土等填筑而成，具有成本低，整体性好的特点。我国《公路沥青路面设计规范》(JTG D50-2017) [12]对在各种等级的道路中均允许采用半刚性基层或底基层，但有一些明确的要求：1、当采用水泥稳定类材料时，水泥的掺量宜为 3%~6%。2、水泥稳定类材料可以用于各种等级的路面基层或底基层，但 7

天无侧限抗压强度随道路等级的提高而提高, 当于二级及二级以下轻交通公路的底基层时, 其强度要求最低, 但也应不小于 1.0 MPa。我国《城镇道路路面设计规范》(CJJ169-2012) [13]也允许以半刚性材料作为道路的基层, 要求半刚性基层的最小厚度不小于 150 mm, 水泥稳定类可用于各种交通等级的道路, 而石灰稳定类材料宜用于各类交通等级的下基层以及中、轻交通的基层; 规范对稳定土的强度提出了如表 2 所示的要求。将试验结果与上述要求对比分析可知, 作为一种粉砂性的细粒土, 粉质黏土不宜采用石灰进行改良, 而采用水泥进行改良的话, 在常用水泥掺量范围内, 水泥稳定粉质黏土的抗压强度还是比较低, 当水泥掺量达到 10% 也不能满足轻交通城镇道路下基层的要求。但水泥改良效果还是比较明显的, 如确需将其用于路面基层或底基, 可以进一步提高水泥掺量或多种结合料或改良剂共同使用。

**Table 2.** Strength requirements of semi rigid materials for urban roads (MPa)

**表 2.** 城镇道路半刚性材料的强度要求(MPa)

材料类型	层位	特重交通	重、中交通	轻交通
水泥稳定细粒土	上基层	—	—	2.5~3.5
	下基层	≥2.5	≥2.0	≥1.5
石灰稳定细粒土	上基层	—	—	≥0.8
	下基层	—	≥0.8	≥0.7

## 5. 结论

随着城镇建设的不断扩张和资源利用要求的不断提高, 工程建设中产生的渣土合理化利用正日益受到重视。本文在室内土工试验获得绍兴粉质黏土基本物理力学特性的基础上, 以石灰、水泥以及石灰 + 水泥作为结合料对粉质黏土进行了改良, 测试不同改良方案下稳定土的强度, 并探讨了改良后用于路面基层填筑的可行性。主要结论有:

- 1) 绍兴盖北镇粉质黏土是一种级配不良的细料土, 具有一定的抗剪强度, 但其 CBR 值较低。
- 2) 改良粉质黏土的 CBR 值随石灰、水泥掺量的增加而增大, 但相同掺量下, 水泥稳定土的 CBR 值高于石灰稳定土。掺入 2% 的水泥 4% 的石灰后, 其强度可以满足路基填筑要求。
- 3) 水泥稳定粉质黏土的 7 天无侧限抗压强度随水泥掺量的增加而增大, 各掺量下的石灰稳定粉质黏土的 7 天无侧限抗压强度均为零。粉质黏土不宜以石灰为改良剂。
- 4) 常用掺量(<10%)下水泥稳定粉质黏土的强度较低, 不能满足路基基层的要求。如确需将其用于路面基层或底基, 可以进一步提高水泥掺量或多种结合料或改良剂共同使用。

## 基金项目

浙江省建设科技项目(2020K153), 浙江交通科技项目(2020004)。

## 参考文献

- [1] 齐善忠, 付春梅, 曲肇伟. 建筑渣土作为道路填筑材料的改性试验研究[J]. 中外公路, 2015, 35(1): 262-267.
- [2] 王春阳. 石灰改良软土填料路用性能试件研究[J]. 粉煤灰综合利用, 2020, 34(4): 118-123.
- [3] 邬瑞光, 张德才. 二灰稳定材料强度分析[J]. 山西交通科技, 1997(5): 13-16.
- [4] 杨广庆. 二灰改良土在高速铁路路基中的应用研究[J]. 粉煤灰综合利用, 2001(6): 28-31.
- [5] 尤红军, 韩洋, 刘佳男. 二灰土路面底基层材料配比试验研究[J]. 中国资源综合利用, 2017, 135(11): 35-38.
- [6] 黄新, 宁建国, 郭晔, 等. 水泥含量对固化土结构形成的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(4): 436-441.

- [7] 胡朝辉. 水泥灰土稳定细砂做路面基层的应用研究[J]. 河南科技, 2005(1): 36-37
- [8] 杜学玲, 李向红, 杨俊彪. 三灰土路面底基层混合料配合比优化[J]. 路基工程, 2009(2): 38-39.
- [9] 程兆民. 复合固结土路面基层研究与探讨[J]. 中国新技术新产品, 2011(9): 42.
- [10] 交通运输部公路科学研究院. JTG 3430-2020, 公路土工试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [11] 中交第二公路勘察设计研究院. JTG D30-2015, 公路路基设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [12] 刘伯莹. JTG D50-2017, 公路沥青路面设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2000.
- [13] 徐健, 温学均, 郑晓光, 等. CJJ169-2012, 城镇道路路设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.