

文章编号: 1673-9469 (2018) 04-0035-05

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2018.04.008

石灰和水玻璃改良粉土的水稳定性试验研究

段丽军^{1, 2}, 张福海^{1, 2}, 胡明涛^{1, 2}, 朱文旺³, 周天宝^{1, 2}, 王远航^{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. 安徽省交通规划设计研究总院股份有限公司, 安徽 合肥 230088)

摘要: 通过对泰州某地区粉土添加不同比例的石灰和水玻璃来研究其水稳定性, 试验结果表明: 在石灰掺量为 1% 时, 改良土的水稳定性极差, 浸水 24 h 后完全崩解, 提高石灰掺量或水玻璃掺量均能提升粉土的水稳定性, 增加石灰掺量对粉土水稳定性的提高更加显著; 石灰掺量相同时, 水玻璃掺量越高, 石灰和水玻璃改良土的毛细吸水速率越快, 水玻璃掺量一定时, 石灰掺量越高, 石灰和水玻璃改良土的毛细吸水速率先减小后增大; 石灰掺量为 1% 时, 改良土的抗冲蚀性能较差, 试样冲蚀 4 h 后破坏较为严重, 提高石灰掺量能有效提升土体的抗冲蚀性能。

关键词: 粉土改良; 石灰和水玻璃; 水稳定性

中图分类号: TU443

文献标识码: A

Experimental study on water stability of lime and water glass modified silt

DUAN Lijun^{1, 2}, ZHANG Fuhai^{1, 2}, HU Mingtao^{1, 2}, ZHU Wenwang³, ZHOU Tianbao^{1, 2},
WANG Yuanhang^{1, 2}

(1. Key laboratory of Ministry of Education of Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 2. Jiangsu Research Center for Geomechanical Engineering Technology, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 3. ANHUI TRANSPORT CONSULTING & DESIGN INSTITUTE CO, LTD Hefei Anhui 230088)

Abstract: In this paper, the water stability is studied by adding different proportions of lime and water glass to the silty soil in Taizhou. The results show that the water stability of the improved soil is very poor when the content of lime is low (1%), and that the water stability of silt can be improved by increasing the content of lime or the amount of water glass after soaking 24h. The increase of lime content is more significant for the improvement of the water stability of silty soil. The amount of lime content is the same, the higher the amount of water glass, the higher the capillary water absorption rate of lime and water glass modified soil, the higher the amount of lime content, the better the capillary water absorption speed of lime and water glass improved soil. When the amount of lime content is low (1%), the erosion resistance of the modified soil is poor. The damage of the specimen after 4h erosion is serious, so the increase of lime content can effectively improve the erosion resistance of the soil.

Key words: improvement of silty soil; lime and water glass compression; Water stability

粉土在我国分布广泛, 其具有一系列不良的工程特性^[1-2], 不宜直接用来填筑路基。目前粉土作为路基填料的常用处理措施主要有弃方换填、物理加固技术、化学改良技术以及综合改良技术。陈燕等

^[3] 对京沪高速铁路新长段粉土路基进行了室内水泥改良试验, 结果表明改良剂掺入量大于 3% 水泥时土体方可满足压实度标准要求。近些年, 相关学者利用水玻璃或改性水玻璃联合水泥、粉煤灰等传统

收稿日期: 2018-08-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51778211); 江苏省自然科学基金资助项目 (BK20171434)

作者简介: 段丽军 (1994-), 男, 山西吕梁人, 硕士研究生, 主要从事软土地基处理方面的研究。

改良剂对不良工程性质土体进行改良试验研究，取得了十分重要的进展^[4-8]。姜冲^[9]采用水玻璃改良泰州地区粉土，并通过一系列强度特性试验探究了水玻璃改良粉土用作路基填料的可行性。肖尊群等^[10-11]采用碳酸钙和酸性水玻璃作为灌浆材料并进行试验研究，结果表明：随着碳酸钙加入量逐渐减少，溶胶凝胶时间随之非均匀增加。

本文通过石灰和水玻璃作为添加剂对泰州某地区粉土进行了改良，并通过室内试验对改良土的水稳定性进行研究。

1 试验方案及方法

1.1 实验材料

本试验所用粉土取自泰州市低液限粉土，其物理性质如表 1 所示，本试验所用石灰均为消石灰，所采用的水玻璃为钠水玻璃，化学式为 $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ 。

1.2 试验方案

在本文试验中将最优含水率下的粉土土样以 96% 的压实度制成直径 50 mm，高 50 mm 的圆柱形试样。

本试验中改良粉土所使用的石灰和水玻璃的掺量设计为：1% 石灰 +1% 水玻璃，1% 石灰 +2% 水玻璃，1% 石灰 +3% 水玻璃，3% 石灰 +1% 水玻璃，3% 石灰 +3% 水玻璃，3% 石灰，5% 石灰，7% 石灰和 3% 水玻璃。改良剂的掺量为改良剂与干土的质量比。

本文在研究改良粉土的水稳定性试验中共做了四组试验，分别为浸水崩解试验、不同养护条件下的无侧限抗压强度试验、毛细吸水试验以及模拟抗冲蚀试验，表 2 为改良粉土水稳定性试验方案。

2 试验结果分析

2.1 改良土的浸水崩解试验

图 1 为不同掺量改良土在浸水 24 h 后的状态。从图 1 可以看出，1% 石灰 +1% 水玻璃、1% 石灰

+3% 水玻璃和 3% 水玻璃改良土在浸水 24 h 后完全崩解；3% 石灰 +1% 水玻璃和 3% 石灰 +3% 水玻璃改良土试样浸水 24 h 后基本保持完整；5% 石灰改良土试样浸水 24 h 后有少许土颗粒剥落。

分析上述现象可以得出，当石灰掺量较低时，改良土的水稳定性极差；提高石灰掺量或水玻璃掺量均能提升粉土的水稳定性，而且提高石灰掺量对粉土水稳性的提升更加显著。

2.2 不同养护条件下改良土的无侧限抗压强度

表 3 为不同养护条件下改良土无侧限抗压强度试验结果。其强度水稳定系数为浸水养护试样的无侧限抗压强度与标准养护试样的无侧限抗压强度之比。

从表 3 可以看出，5% 石灰改良土的强度水稳定系数最低，3% 石灰 +3% 水玻璃改良土的强度水稳定系数最高；5% 石灰改良土的强度水稳定系数小于 1，3% 石灰 +1% 水玻璃和 3% 石灰 +3% 水玻璃改良土的强度水稳定系数大于 1。

由上可以说明相比于标准养护条件，浸水养护对石灰改良土的强度增长有抑制作用，而对于石灰和水玻璃改良土，充足的水能使改良剂更加充分地提高其改良效果，对土体的强度增长有促进作用。究其原因，石灰和水玻璃改良粉土在浸水养护过程

表 2 改良土水稳定性试验研究方案
Tab.2 Experimental study on improved soil water stability test

试验内容	养护条件
浸水崩解试验	标准养护 27 d+ 浸水养护 1 d
不同养护条件下改良土的无侧限抗压强度试验	标准养护，养护龄期 7 d 为标养 6 d，浸水 1 d；
	标准养护，养护龄期 28 d 为标养 27 d，浸水 1 d
	浸水养护，养护龄期 7 d 为标养 3 d，浸水 4 d；
	浸水养护，养护龄期 28 d 为标养 7 d，浸水 21 d
毛细吸水试验	标准养护 27 d+ 自然风干 1 d
模拟抗冲蚀试验	标准养护 27 d+ 自然风干 1 d

表 1 土样的基本物理性质指标
Tab.1 Basic physical properties of soil samples

天然含水率 /%	黏粒含量 /%	粉粒含量 /%	砂粒含量 /%	比重 G_s	液限 ω_L /%	塑限 ω_p /%	塑性指数 I_p
21.0	7.6	76.2	16.2	2.67	32.2	24.8	7

表 3 不同养护条件下改良土无侧限抗压强度试验结果
Tab.3 Test results of unconfined compressive strength of improved soil under different curing conditions

龄期 /d	掺量	无侧限抗压强度 /kPa		水稳定系数
		标准养护	浸水养护	
7	5% 石灰	631.8	601.6	0.95
	3% 石灰 +1% 水玻璃	788.8	820.6	1.04
	3% 石灰 +3% 水玻璃	1 053.4	1 348.8	1.28
28	5% 石灰	983.5	858.7	0.87
	3% 石灰 +1% 水玻璃	998.2	1 020.4	1.02
	3% 石灰 +3% 水玻璃	1 122.3	1 460.2	1.30

中，更有利于土体中 Ca^{2+} 与 SiO_3^{2-} 结合生成水化硅酸钙，使土体强度提高，而对于纯石灰改良粉土，浸水养护则抑制了 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与 CO_2 的反应，从而使土体强度有所降低。

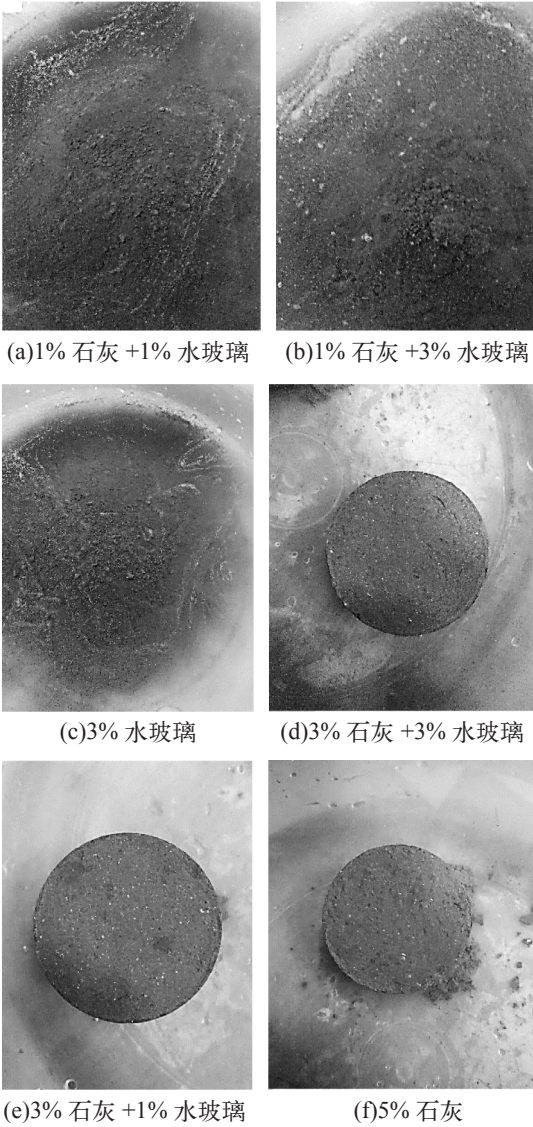


图 1 不同掺量改良土浸水 24 h 后状态图
Fig.1 State diagram of modified soil with different dosages for 24 h

2.3 改良土的毛细吸水试验

图 2 为掺量改良土毛细吸水质量与吸水时间的关系曲线图。土体通过毛细吸水的快慢反应了其毛细作用的剧烈程度，从图中可以看出：3% 石灰 +1% 水玻璃改良土的毛细作用最弱，其毛细吸水速率最小，总吸水量也较小；在石灰掺量相同时，水玻璃掺量越高，石灰和水玻璃改良土的毛细吸水速率越快。

对上述现象进行分析可知，利用石灰和水玻璃共同改良粉土时，水玻璃掺量越高，一方面粉土中生成的水化硅酸钙的含量越高，土体的结构更加致密，水稳性提高，毛细作用降低，另一方面，水玻璃通过物理脱水生成的脱水硅酸凝胶含量也越高，而脱水硅酸凝胶的吸水能力较强，使土体的毛细作用加剧，从试验结果可以看出，后者的作用强于前者，因此在进行石灰和水玻璃联合改良粉土时，水玻璃掺量不宜过高，否则会加剧粉土的毛细作用；3% 石灰 +1% 水玻璃改良土毛细吸水速率略低于 5% 石灰改良土；吸水 4 h 后，所有掺量改良土的吸水质量不再随吸水时间的增长而增加。总结上述分析可以得知，掺 3% 石灰 +1% 水玻璃改良粉土效果最佳。

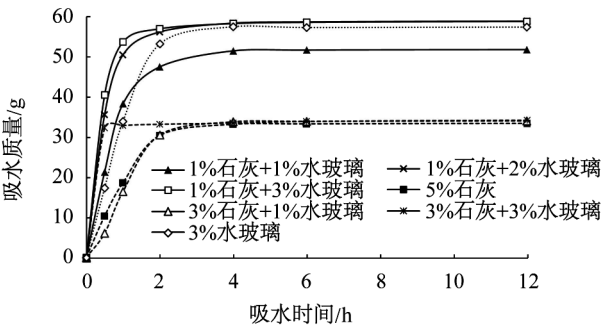


图 2 改良土毛细吸水质量和吸水时间关系曲线图
Fig.2 Curve of the relationship between the water absorption quality and the water absorption time of the improved soil

为了探究试样通过毛细作用吸水能否达到饱和,表 4 列出了不同掺量改良土通过毛细作用吸水以及浸水 12 h 后的吸水质量。

由于 1% 石灰+1% 水玻璃、1% 石灰+2% 水玻璃、1% 石灰+3% 水玻璃及 3% 水玻璃改良土试样浸水 12 h 后崩解,无法测量其吸水质量;比较 5% 石灰、3% 石灰+1% 水玻璃和 3% 石灰+3% 水玻璃改良土试样通过毛细作用吸水以及浸水 12 h 后的吸水质量发现两者相差较小,且在两种吸水条件下的改良土试样未发生明显变形,可以认为这三种改良土试样通过毛细作用吸水 12 h 后已经达到饱和状态。

假设养护以及毛细吸水过程中,试样的孔隙率不发生变化,使用该孔隙率可以计算得出试样的饱和含水率,将计算所得的饱和含水率与试样实测饱和含水率比较可以得出试样在养护以及毛细吸水过程中孔隙率的变化。

表 5 所列不同掺量改良土试样饱和含水率与实测含水率。从表中可以看出 5% 石灰、3% 石灰+1% 水玻璃和 3% 石灰+3% 水玻璃改良土试样的实测含水率小于其计算饱和含水率,这是因为这三种掺量改良土试样在养护过程中会发生一系列化学反应,新生成的固体物质会填充土颗粒间的孔隙,使土体的孔隙率减小。

1% 石灰+1% 水玻璃、1% 石灰+2% 水玻璃、1% 石灰+3% 水玻璃和 3% 水玻璃改良土试样的实测含水率较其计算饱和含水率大很多,原因是这 4 种掺量改良土试样毛细吸水 12 h 后体积膨胀,土体

过量吸水。

2.4 改良土的模拟抗冲蚀试验

图 3 为不同掺量改良土试样的土粒质量损失比与冲蚀时间的关系曲线,从图中可以看出,5% 石灰、3% 石灰+1% 水玻璃和 3% 石灰+3% 水玻璃改良土试样的抗冲蚀性能较好,冲蚀 4 h 的土粒质量损失比均在 1% 左右;1% 石灰+1% 水玻璃、1% 石灰+2% 水玻璃和 1% 石灰+3% 水玻璃改良土试样在冲蚀 30 min 时间内的土粒损失量较大,之后随冲蚀时间增长,土粒损失逐渐减少,冲蚀 4 h 时试样的土粒质量损失比分别为 19.1%、9.5% 和 7.8%。

分析以上现象可知,提高石灰掺量能够有效提升土体的抗冲蚀性能,通过石灰的“物理填充”作用、新生成物质的“化学填充”作用和胶结作用使土粒间的连接更为紧密,从而增强土体的抗冲蚀性能。当石灰掺量较低时,增加水玻璃掺量也能够

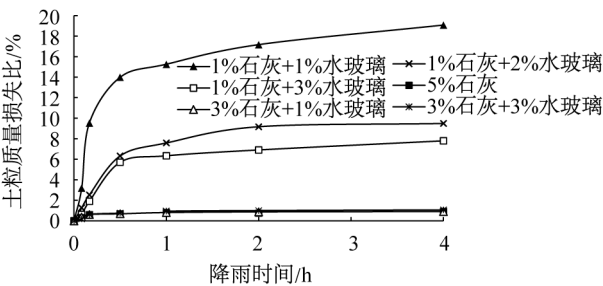


图 3 土粒质量损失比与冲蚀时间的关系
Fig. 3 Relationship between soil mass loss ratio and erosion time

表 4 不同掺量改良土通过毛细作用吸水以及浸水 12 h 后的吸水质量

Tab.4 Water absorption quality of different modified soils after water absorption by capillary action and water immersion for 12 h

掺量	1% 石灰+1% 水玻璃	1% 石灰+2% 水玻璃	1% 石灰+3% 水玻璃	5% 石灰	3% 石灰+1% 水玻璃	3% 石灰+3% 水玻璃	3% 水玻璃
毛细作用吸水 质量 /g	51.9	58.9	58.8	33.4	34.0	34.3	57.5
浸泡吸水 质量 /g	-	-	-	33.0	32.9	35.8	-

表 5 改良土计算饱和含水率与实测含水率

Tab.5 Calculated saturated water content and measured moisture content of improved soil

掺量	1% 石灰+1% 水玻璃	1% 石灰+2% 水玻璃	1% 石灰+3% 水玻璃	5% 石灰	3% 石灰+1% 水玻璃	3% 石灰+3% 水玻璃	3% 水玻璃
计算饱和 含水率 /%	24.9	26.1	26.5	25.7	26.5	26.8	25.3
实测 含水率 /%	33.7	38.0	37.9	20.8	21.7	21.8	37.3

一定程度上提升石灰和水玻璃改良土的抗冲蚀性能,主要原因是,水玻璃通过自身物理脱水生成的脱水硅酸凝胶能够起到填充孔隙,胶结粉土颗粒的作用,但是脱水硅酸凝胶容易吸水膨胀甚至溶解,因此增加水玻璃掺量仅能在较小程度上提升石灰和水玻璃改良土的抗冲蚀性能。

3 结论

1) 在 1% 的石灰掺量时,改良土的水稳定性极差,浸水 24 h 后完全崩解,提高石灰掺量或水玻璃掺量均能提升粉土的水稳定性,增加石灰掺量对粉土水稳定性的提高更加显著。浸水养护对石灰改良土的强度增长有抑制作用,而对于石灰和水玻璃改良土的强度增长有促进作用。

2) 石灰掺量相同时,水玻璃掺量越高,石灰和水玻璃改良土的毛细吸水速率越快,水玻璃掺量一定时,石灰掺量越高,石灰和水玻璃改良土的毛细吸水速率先减小后增大;3% 石灰 +1% 水玻璃改良土的毛细作用略弱于 5% 石灰改良土。

3) 在 1% 的石灰掺量时,改良土的抗冲蚀性能较差,试样冲蚀 4 h 后破坏较为严重,提高石灰掺量能有效提升土体的抗冲蚀性能;3% 石灰 +1% 水玻璃和 3% 石灰 +3% 水玻璃改良土的抗冲蚀性能略优于 5% 石灰改良土。

参考文献:

[1] 朱志铎. 粉土路基稳定理论与工程应用技术研究 [D].

南京: 东南大学, 2006.

[2] 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.

[3] 陈燕, 魏宏超, 徐鹏. 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.

[4] JOHN L, CHU Z Y, PETER D, et al. Correlating mechanical and thermal properties of sodium silicate-fly ash geopolymers[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2009: 57-63.

[5] ALI K, ASGHAR G V, FARSHAD R. Quantitative assessment of parameters that affect strength development in alkali activated fly ash binders[J]. Construction and Building Materials, 2015(5): 869-876.

[6] JOHANNA M, MEJIA E R, RUBY M D G, et al. Preparation and characterization of a hybrid alkaline binder based on a fly ash with no commercial value[J]. Journal of Cleaner Production, 2015(5): 346-352.

[7] 虞跃, 陈廷方, 张俊. 水玻璃改良昔格达土物理力学性质的试验研究 [J]. 路基工程, 2010, 7(2): 84-85.

[8] 姜冲. 水玻璃改良低液限粉土强度特性的试验研究 [D]. 南京: 河海大学, 2017.

[9] 张明. 水泥加固土工程性质的试验研究与分析 [D]. 太原: 太原理工大学, 2001.

[10] 肖尊群, 刘宝琛, 乔世范, 等. 碳酸钙-酸性水玻璃注浆材料对比试验 [J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2010, 41(6): 2305-2312.

[11] 肖尊群, 刘宝琛, 乔世范, 等. 型酸性水玻璃-碳酸钙注浆材料试验研究 [J]. 岩土力学, 2010, 31(9): 2829-2834.

(责任编辑 王利君)

(上接第 34 页)

transducer for simultaneous pressure and temperature measurement by using a single FBG[J]. Optical Fiber Technology, 2018, 45: 8-13.

[12] 于海鹰, 李琪, 索琳, 等. 分布式光纤测温技术综述 [J]. 光学仪器, 2013, 35(5): 90-94.

[13] 杜阳. 基于 OFDR 的分布式光纤多参量传感方法研究 [D]. 天津: 天津大学, 2016.

[14] 卢荣华. 基于 OFDR 的分布式光纤振动传感器的数据采集与分析 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2014.

[15] LI Jiong, GAN Jiulin, ZHANG Zhishen, et al. High spatial resolution distributed fiber strain sensor based on phase-OFDR[J]. Optics express, 2017, 25(22): 27913-27922.

[16] FAUSTOV A V, GUSAROV A V, MEGRET P, et al. Application of phosphate doped fibers for OFDR dosimetry[J]. Results in Physics, 2016(6): 86-87.

[17] 傅翼. 海底管道分布式光纤传感系统布设方案研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2006.

(责任编辑 王利君)