

文章编号:1673-9469(2016)04-0042-05

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2016.04.010

## 水玻璃改良低液限粉土的室内试验研究

姜冲<sup>1,2</sup>,黄珂<sup>1,2</sup>,杜伟<sup>1,2</sup>,赵子荣<sup>1,2</sup>

(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)

**摘要:**通过对泰州地区低液限粉土进行室内改良试验,研究2.6~2.9和3.1~3.4两种不同模数水玻璃作为改良剂对该地区粉土改良效果,试验结果表明:两种水玻璃改良土的最大干密度均小于素土的最大干密度,最优含水率均大于素土的最优含水率;两种不同模数水玻璃对该地区低液限粉土的CBR值均有明显提高作用,压实度对2种改良填料土的CBR值有着不同程度的影响,随着压实度增加,CBR值呈现不同比例的增长,而且28d龄期增长幅度远大于0d龄期的增长幅度,不养护时增加压实度对CBR值的提高影响不大;模数3.1~3.4水玻璃改良土的早期强度要高于模数2.6~2.9的水玻璃改良土;养护相同时间情况下模数2.6~2.9水玻璃改良土强度提高更大。

**关键词:**水玻璃;加州承载比;粉土;路基;改良试验

**中图分类号:**TU43

**文献标识码:**A

## Experimental study on improvement of low liquid limit silt with water glass

JIANG Chong<sup>1,2</sup>, HUANG Ke<sup>1,2</sup>, DU Wei<sup>1,2</sup>, ZHAO Zirong<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory for Geotechnical Engineering of Ministry of Water Resource, Jiangsu Nanjing 210098, China;

2. Research Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Jiangsu Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Through laboratory tests of low liquid limit silt in Taizhou area, 2.6~2.9 and 3.1~3.4 modulus of water glass were used as modifiers, and the effect of improved silt in the area was researched. The results show that the maximum dry density of two kinds of water glass modified soil are less than the plain soil, and the optimum moisture content is also greater than the plain soil. The CBR values of the low liquid limit silt with two kinds of water glass in the area are significantly increased, and the compaction degree has effects on the CBR value of the modified filler soil. With the increase of the compaction degree, the CBR value shows different proportion of growth. And the growth rate with 28 days is much greater than the growth rate of 0 day. The early strength of the 3.1~3.4 modulus water glass improved soil is higher than that of the 2.6~2.9 modulus water glass improved soil. Under the same maintenance conditions, the improved soil strength of the 2.6~2.9 modulus water glass improved soil is greatly improved.

**Key words:** water glass; California bearing ratio; Silt; subgrade; improved test

泰州位于长江三角洲平原区,砂质粉土(粉土、粉土夹粉砂、粉砂夹粉土)分布广泛,该类土液限低,塑性指数小,粉粒含量较高(一般大于50%),黏粒含量低(一般小于15%)。该类土含

水率稍大则进入流塑状态,易产生橡皮土现象;同时保水性差,含水率变化较快,在含水率较低时不成团,颗粒间摩擦力大,CBR值极低(小于5),难以压实。因此,砂质粉土不能直接作为路堤填料

收稿日期:2016-08-09

基金项目:浙江省交通运输厅科技计划项目(2015J06)

作者简介:姜冲(1990-),男,山东日照人,河海大学硕士研究生,主要研究方向为土的静动力学特性、特殊土处治技术。

在工程中直接应用,必须进行改良。工程中广泛采用的改良方法主要有物理改良和化学改良,其中采用稳定剂进行粉土改良加固方面,主要采用一种或几种无机结合料,如水泥、石灰、粉煤灰等进行加固,并取得了很好的改良效果<sup>[1-5]</sup>。但是石灰稳定土初期的塑性降低,而且石灰稳定土强度对冻融循环敏感且经过冻融强度降低。所以石灰改良粉土仍具有其局限性<sup>[6-7]</sup>。水泥土的干缩系数和温缩系数都比较大,因此,暴露的水泥土易因水泥水化反应、环境温度、湿度的变化造成体积的不均匀变化而产生裂缝。这种裂缝的出现,会导致固化体(水泥土)的抗压强度、抗渗、抗冻和抗冲刷性能降低。不仅如此,传统的改良剂在施工过程中会不可避免的出现扬尘,污染环境,虽然采用石灰土改良时,施工过程中采取边施工边洒水可以控制大面积扬尘,但是粉土在碾压过程中对含水率控制要求很高,采取这种施工方法不利于含水率的控制,影响压实效果。因此,在环境问题日益突出的今天,寻找一种既能满足工程要求又可以保护环境新型改良剂显得尤为重要。为解决水泥、石灰改良粉土施工过程中产生扬尘这一问题,拟采用水玻璃( $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ )代替石灰、水泥作为改良剂研究其对粉土加固作用效果,为以后的粉土改良加固研究及设计和施工提供依据。

## 1 试验方案及方法

### 1.1 试验方案的设计

本试验用土取自泰州地区低液限粉土,通过采用不同模数( $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ 中 $n$ 表示水玻璃模数,为研究模数对粉土改良效果的影响,试验选取应用广泛且价格相对较低的2.6~2.9,3.1~3.4两种模数水玻璃进行试验),不同掺量(掺量分别为3%、5%、7%、9%)水玻璃改良土的重型击实试验确定最大干密度和最优含水率,研究分析改良土的压实特性。最后以不同压实度(93%、94%、96%)、不同龄期(0 d、28 d)改良土路基填料的

CBR值作为填筑质量的控制指标进行研究,并加以分析,对该地区路基工程的设计和施工提供相应参考依据。

### 1.2 试验方法

(1)测素土风干含水率,根据预估最优含水率制备5种不同含水率试样,相邻组试验含水率相差2%~3%,每组试验取2.5 kg风干土加水拌匀焖料12 h左右,备用。考虑水玻璃溶液本身含水,根据水玻璃掺量适量减少素土试样含水率(本试验采用水玻璃浓度为39%左右,加水配土时须考虑所掺加的水玻璃中61%的含水量)。击实前根据配比掺入相应质量的改良剂,人工拌匀后立即进行试验。控制每层高度分五层击实,每层27击。击实后从中间取样测其含水率,并绘制击实曲线,得到最优含水率和最大干密度。

(2)通过重型击实试验得到素土和不同改良土的最大干密度与最优含水率,分别在最优含水率不同的压实度(93%、94%、96%)条件下对各改良填料按《公路土工试验规程》(JTG E40-2007)采用静压法制备CBR试样,分别养护0 d和28 d并浸水四昼夜后进行CBR试验。

## 2 试验结果

对取土坑的素土进行了液塑限、比重、颗粒分析及重型击实试验,其试验结果见表1。从颗粒分析结果以及结合液塑限情况依据规范《公路土工试验规程》(JTG E40-2007)可知该土属于低液限粉土。粉粒(粒径0.002~0.075 mm)的含量占总量91.9%,粘粒很少,从性质上更多显示出粉土的性质:颗粒较为均匀、级配差,难于压实同时粉粒毛细作用强烈,水稳定性差。

### 2.1 水玻璃改良的击实效果

模数为2.6~2.9,3.1~3.4水玻璃改良土的击实曲线如图1、图2。

表1 土样基本物理性质指标

Tab. 1 Basic physical properties of soil

含水率 /%	最大干密度 $\rho_{\max}$ /( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	比重 $G_s$	液限 $\omega_l$ /%	塑限 $I_p$ /%	塑性指数 $I_L$	粉粒含量 /%	土类名称
22	1.70	2.67	28.7	20.3	8.4	91.9	粉土

注:上述土的分类命名依据《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTJ024-85)

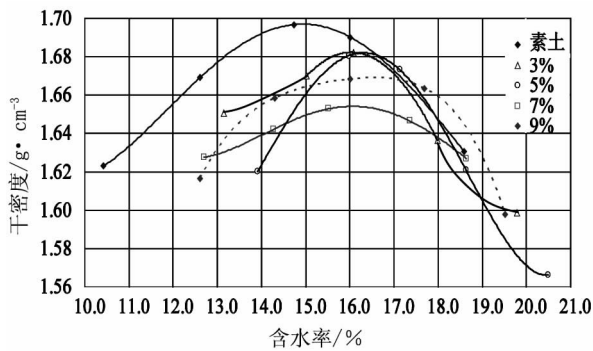


图1 模数为2.6~2.9的水玻璃改良土击实曲线

Fig.1 Modulus of 2.6~2.9 water glass modified soil compaction curve

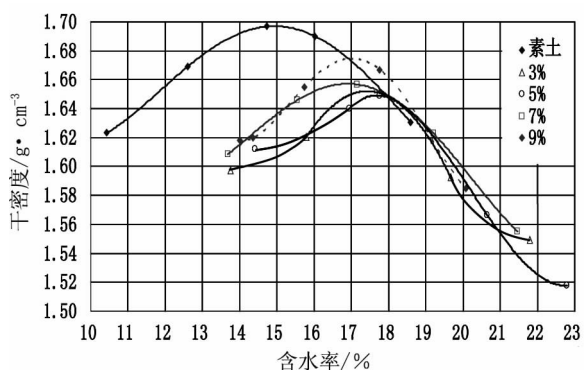


图2 模数为3.1~3.4的水玻璃改良土击实曲线

Fig.2 Modulus of 3.1~3.4 water glass modified soil compaction curve

分析图1可以发现,对于模数为2.6~2.9的水玻璃改良土而言,不同掺量下改良土的最优含水率先增大后减小,都略高于素土的最优含水率,最大干密度随着水玻璃掺量从0%增大到9%范围内表现出先减小后增大的变化规律。究其原因,是由于水玻璃与土颗粒间隙中空气以及土中的矿物成分发生一系列化学反应致使土的塑性减小、胶结物增多,这些原因造成了颗粒的团聚、粗化,这种颗粒的团聚少量产生后会造土体的局部空隙增大致使最大干密度有所减小,但随着水玻璃剂量的继续增加,相应的粗颗粒的数量增加到一定程度后又使得水玻璃改良土的最大干密度开始随水玻璃掺量增加而变大。同时可以看到,模数2.6~2.9的水玻璃改良土的击实曲线变化趋势与素土的基本相同。

由图2可知,对于模数为3.1~3.4水玻璃改良土,随着水玻璃掺量增加,改良土的最大干密度先减小后增大,最优含水率高于素土的最优含水率,改良土最大干密度明显小于素土的最大干密度,原因与2.6~2.9模数水玻璃改良土相同。同时可以看出模数3.1~3.4的水玻璃改良土的击

实曲线变化趋势与素土的基本相同。

## 2.2 CBR 试验结果与分析

### 2.2.1 不养护条件下水玻璃改良土 CBR 值与压实度的关系

在不同模数(2.6~2.9、3.1~3.4)、不同压实度(93%、94%、96%)条件下水玻璃改良土不养护直接浸水四昼夜后的 CBR 试验结果见图3、图4。

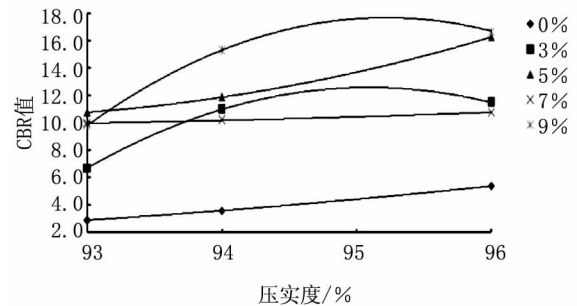


图3 模数2.6~2.9水玻璃改良土不养护条件下CBR值随压实度的变化

Fig.3 Change of CBR with degree of compaction under condition of modulus 2.6~2.9 water glass improved soil

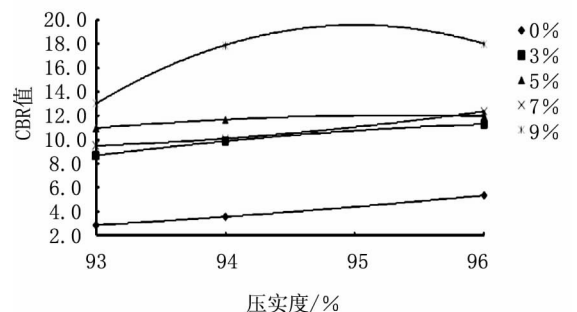


图4 模数3.1~3.4水玻璃改良土不养护条件下CBR值随压实度的变化

Fig.4 Change of CBR with degree of compaction under condition of modulus 3.1~3.4 water

图3、图4分别描述的是模数为2.6~2.9和3.1~3.4水玻璃改良土不养护条件下 CBR 值与压实度之间的关系。由图可知,压实度对于2种改良土均有着较明显的影响,随着压实度的增大 CBR 值都有所增加。分析图3中各掺量变化曲线我们可以看到,当掺量为7%时,随着压实度的增加 CBR 值变化不大,这是由于水玻璃是气硬性材料只能在空气中硬化而不能很好的在潮湿环境或者水中硬化,掺量7%模数2.6~2.9的水玻璃改良土的最大干密度小,同时最优含水率较大,限制了水玻璃与空气的反应。从图3、图4我们还可以看到,压实度不变的情况下随着掺量的增加 CBR 值大体呈增加趋势。

### 2.2.2 养护 28 d 条件下水玻璃改良土 CBR 值与压实度的关系

不同模数(2.6~2.9、3.1~3.4)、不同掺量(3%、5%、7%、9%)下水玻璃改良土养护 28 d 浸水四昼夜后的 CBR 值与压实度关系曲线如图 5、图 6。

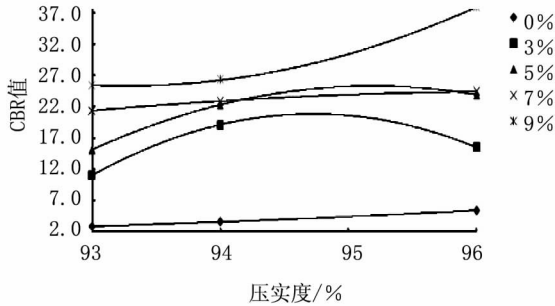


图5 模数2.6~2.9水玻璃改良土养护28 d条件下CBR 值随压实度的变化

Fig 5 Change of CBR value with the degree of compaction under condition of 28 days of 2.6~2.9 water glass improved soil conservation

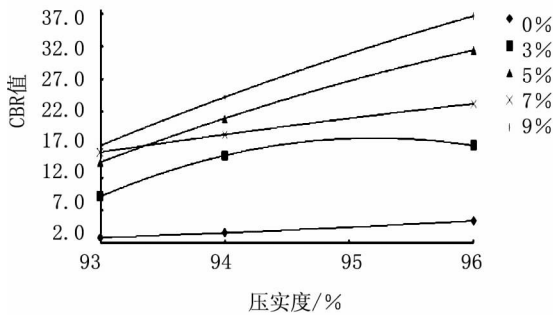


图6 模数3.1~3.4水玻璃改良土养护28 d条件下CBR 值随压实度的变化

Fig.6 Change of CBR value with degree of compaction under condition of 28 days of 3.1~3.4 water glass improved soil conservation

分析图 5、图 6 来看,养护 28 d 后两种模数水玻璃改良土的 CBR 值较素土均有很大提高,且随着压实度的增加都明显增大。同时,模数 2.6~2.9 的水玻璃改良土在同一压实度条件下,随着掺量的增加 CBR 值增大。

比较图 3 与图 5、图 4 与图 6 可以看出,两种模数水玻璃改良土 28 d 龄期较 0 d 龄期 CBR 值有明显提高。模数为 2.6~2.9 和 3.1~3.4 水玻璃改良土在 93% 压实度条件下,掺量为 3%、5%、7%、9% 养护 28d 的 CBR 分别为不养护的 1.8、1.5、2.3、2.7 倍和 1.0、1.3、1.5、1.3 倍;模数为 2.6~2.9 和 3.1~3.4 水玻璃改良土在 94% 压实度条件下,掺量为 3%、5%、7%、9% 养护 28 d 的 CBR 分别为不养护的 1.7、2.2、2.1、1.7 倍和 1.4、

1.8、1.6、1.4 倍;模数为 2.6~2.9 和 3.1~3.4 水玻璃改良土在 96% 压实度条件下,掺量为 3%、5%、7%、9% 养护 28 d 的 CBR 分别为不养护的 1.3、1.4、2.3、2.3 倍和的 1.7、2.6、2.5、2.0 倍。

### 2.2.3 不同龄期 93% 压实度水玻璃改良土的 CBR 值与掺量的关系

93% 压实度条件下,两种模数水玻璃改良土 0、28 d 龄期的 CBR 值与掺量的关系如图 7 所示。

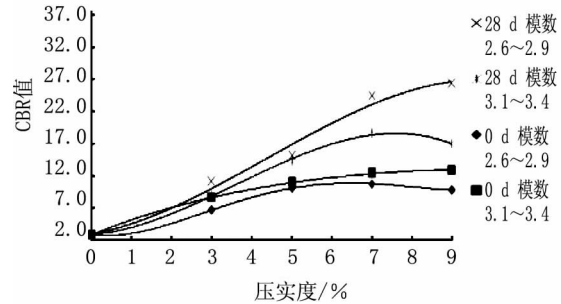


图7 93%压实度下不同龄期水玻璃改良土的CBR值与掺量的关系

Fig.7 Relationship between CBR and modulus of improved soil with different compaction degree at different age 93%

分析图 7 可知,压实度为 93% 其它条件不变的情况下,随着水玻璃掺量的增加,两种水玻璃改良土的 CBR 逐渐增大。不养护条件下,两种水玻璃掺量相同时,模数 3.1~3.4 水玻璃改良土 CBR 值均大于模数为 2.6~2.9 水玻璃改良土。由此可以看出模数 3.1~3.4 水玻璃改良土的早期强度要高于模数 2.6~2.9 的水玻璃改良土。养护 28 d 条件下,水玻璃掺量相同时模数 2.6~2.9 水玻璃改良土 CBR 值均大于模数为 3.1~3.4 水玻璃改良土。由此可以看出,养护相同时间情况下模数 2.6~2.9 水玻璃改良土强度提高较大。

## 3 结论

1)从两种水玻璃改良土的击实总体情况来看,改良土的最大干密度均小于素土最大干密度,最优含水率均大于素土的最优含水率。两种模数水玻璃改良土的最大干密度随着掺量增加先减小后增加。

2)从 CRB 值随压实度变化规律分析来看,压实度对 2 种水玻璃改良土的 CBR 值有着不同程度的影响,随着压实度增加,CBR 值呈现不同比例的增长。而且 28 d 龄期增长幅度远大于 0 d 龄期的增长幅度,不养护时增加压实度对 CBR 值的提高影响不大。

3) 分别比较分析 93% 压实度 0 d 龄期和 28 d 龄期条件下两种水玻璃 CBR 值变化曲线可以看出, 模数 3.1~3.4 水玻璃改良土的早期强度要高于模数 2.6~2.9 的水玻璃改良土; 养护相同时间情况下模数 2.6~2.9 水玻璃改良土强度提高较大。

(4) 两种水玻璃均能有效提高泰州地区低液限粉土的 CBR 值, 且随着掺量的增加改良土 CBR 值大体呈增加趋势。从室内试验结果看, 用水玻璃改良该地区低液限粉土是可行的。

### 参考文献:

- [1] 白祖国. 低路堤填筑的粉土改良及毛细水作用下路堤稳定性研究[D]. 天津: 天津大学, 2009.  
[2] 张西海, 夏琼, 杨有海. 水泥及水泥粉煤灰改良粉土填

料性能试验研究[J]. 路基工程, 2007(2): 75-76.

- [3] 杨迎晓. 钱塘江冲海积粉土工程特性试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.  
[4] 陈燕. 土强度影响因素研究及合理填筑条件探索[D]. 南京: 河海大学, 2005.  
[5] 马巍, 徐学祖, 张立新. 冻融循环对石灰粉土剪切强度特性的影响[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(2): 158-160.  
[6] 商庆森, 姚占勇, 刘树堂. 提高石灰稳定粉土的强度及抗冻性的研究[J]. 山东工业大学学报, 1997, 27(1): 8-15.  
[7] 姚占勇, 刘树堂, 商庆森. 生石灰粉稳定黄河冲(淤)积粉土的可行性探讨[J]. 山东工业大学学报, 1999, 29(1): 77-80.

(责任编辑 李军)

(上接第 41 页) 地层孔隙, 随着时间推移逐渐形成不透水泥膜。但喷洒泥浆成膜与普通成膜方式又有所不同, 泥浆被喷洒在地层表面, 一部分在压力差和喷洒冲力的作用下渗入地层孔隙, 但绝大部分会因为重力作用落到仪器内, 顺着排浆孔被排出。当仪器内压力增大时, 泥浆颗粒向地层渗透的速度加快, 成膜所花的时间变短, 消耗的泥浆量减少。

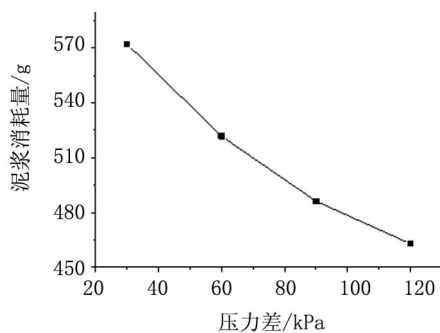


图7 ⑤号泥浆试验时, 泥浆消耗量与压力差的关系曲线  
Fig. 7 Curves of pressure gap and slurry No. ⑤

### 3 结论

1) 泥浆在压力的作用下, 向地层中进行渗透, 逐渐形成泥膜, 泥膜的形成, 使得泥浆所承受的压力能够转化为有效应力, 作用在开挖面上, 平衡掌子面后方的土水压力, 从而保证掌子面的稳定。

2) 泥浆能否成膜与泥浆性质、地层条件、泥浆压力有关, 在保证泥浆能够成膜的前提下, 通过增大压力差, 可有效减少泥浆用量。

3) 在今后采用泥水盾构施工中, 进行带压开仓作业时, 为减少泥膜形成时间, 可采取增大泥浆压力的办法, 来快速形成泥膜。

### 参考文献:

- [1] 张凤祥, 朱合华, 傅明德. 盾构隧道[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.  
[2] 闵凡路, 朱伟, 魏代伟, 等. 泥水盾构泥膜形成时开挖面地层孔压变化规律研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(4): 722-727.  
[3] 韩晓瑞, 朱伟, 刘泉维, 等. 泥浆性质对泥水盾构开挖面泥膜形成质量影响[J]. 岩土力学, 2008, 29(Z): 288-292.  
[4] 姜腾, 朱伟, 闵凡路, 等. 泥水盾构开仓时的泥膜闭气性能及改进方法[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(3): 504-509.  
[5] 白云, 戴志仁, 张莎莎, 等. 盾构隧道同步注浆浆液压力扩散模式研究[J]. 中国铁道科学, 2011, 32(4): 38-45.  
[6] 张云, 殷宗泽, 徐永福. 盾构法隧道引起的地表变形分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(3): 388-392.

(责任编辑 李军)