



引用格式:王晟华,王小敬,崔宏环,等.水泥加固类路面基层填料的浸水强度[J].科学技术与工程,2021,21(1):353-357.

Wang Shenghua, Wang Xiaojing, Cui Honghuan, et al. The flooding strength of cement reinforced pavement base filler[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(1): 353-357.

交通运输

水泥加固类路面基层填料的浸水强度

王晟华¹, 王小敬¹, 崔宏环^{2*}, 金成勇¹

(1. 北旺建设集团有限公司, 承德 067000; 2. 河北建筑工程学院土木工程学院, 张家口 075000)

摘要 在浸水条件下,对不同水泥占比和不同养生时间的加固土进行单轴抗压强度试验,试验结果表明:低液限黏土经固化剂加固后的最佳的含水率灵敏度比原土样有所减小,且随着水泥占比的增加而下降;养生时间一定的情况下,加固土的抗压强度随着水泥占比的增加而增大,水泥占比的增加对后期强度的影响较前期强度更显著;抗压强度随着养生时间增加而增大,随着时间的延长增长速率逐渐减小,28 d时水泥的水化反应基本完成;随着水泥占比的增加,各龄期下耐水系数均增大,表明加固土的水稳定性增强,但各种条件下耐水系数均小于0.75。

关键词 路面基层; 水泥加固土; 水中养生; 抗压强度

中图法分类号 U416.212; **文献标志码** A

The Flooding Strength of Cement Reinforced Pavement Base Filler

WANG Sheng-hua¹, WANG Xiao-jing¹, CUI Hong-huan^{2*}, JIN Cheng-yong¹

(1. Bei Wang Construction Group Co. Ltd., Chengde 067000, China;

2. College of Civil Engineering, Hebei University of Architecture, Zhangjiakou 075000, China)

[Abstract] Uniaxial compressive strength tests were carried out for reinforced soils with different cement ratios and different curing times under the condition of immersion. The test results show that the optimum moisture content sensitivity is lower than that of the original soil sample, and decreases with the increase of the proportion of cement. The compressive strength of reinforced soil increases with the increase of the proportion of cement. The increase of the proportion of cement has more significant influence on the strength in later stage. With the increase of curing time the compressive strength increases and the growth rate gradually slows down. The hydration reaction of cement basically completes at 28 d. The water resistance coefficient increases at each age with the increase of the proportion of cement, indicating that the water stability of the reinforced soil is enhanced, but the water resistance coefficient under various conditions is less than 0.75.

[Keywords] road base; cement reinforced soil; curing in water; compressive strength

路面基层是在原始地面线上按照公路的纵断面设计和横断面设计要求挖方或填方而成的岩土结构物^[1-3]。对于公路路面基层而言,强度和稳定性是其主要的评价指标。影响路面基层土强度和稳定性的因素有很多,水的作用是主要的因素之一。低液限黏土是华北中部地区常见土质之一,用作路面基层填料,易产生不均匀沉降、塌陷等工程病害。因此要对路面基层土进行加固,水泥加固土是化学加固土中的一种,主要通过在素土中加入水泥固化剂来提高素土的工程性能。在实际工程中降雨和地下水对路面基层的影响尤为显著,因此对

水泥加固土作为路面基层填料的水稳定性进行研究是非常重要的。

在重塑土或者结构土中加入一定量的固化剂,均匀混合后得到的混合料在击实与养生后,其强度满足公路路面基层设计规范要求的材料称为水泥加固材料^[4]。水泥加固土的物理力学特性主要有应力-应变特性、疲劳特性和干缩温缩特性等。刘占一^[5]进行了水泥加固土的抗剪试验研究,指出水泥加固可以很大程度上提高土样的抗剪强度;随着加水量和水泥占比的增加,抗剪强度不断增大;张凯等^[6]研究了重塑水泥加固黄土的力学特性,得到了

收稿日期: 2019-10-29; 修订日期: 2020-06-13

基金项目: 河南省教育厅自然科学重点项目(ZD2018101)

第一作者: 王晟华(1975—),男,满族,河北承德人,工程师。研究方向:道路与桥梁工程技术。E-mail:2458440530@qq.com。

*通信作者: 崔宏环(1974—),女,汉族,河北张家口人,教授。研究方向:岩土工程。E-mail:Cuihonghuan729@163.com。

水泥加固土的应力-应变关系曲线,发现加固土表现出明显的脆性破坏;董城等^[7]对水泥加固高液限黏土进行了研究,指出水泥加固土的有效应力与周围压力均对动三轴下的弹模有显著性影响,但有效应力的影响更为显著;刘雨等^[8]对水泥加固土的静力特性进行了研究,发现水泥加固土和未加固土均具有应变软化性和剪胀性,加固土的应变软化性和剪胀性均比未加固土的显著;阮庆等^[9]对水泥土力学性能展开了研究,指出水泥加固土的单轴抗压强度随着水泥占比的增加而增大,随着含水率的增大而减小。

目前,对水泥加固土研究多集中在标准养生条件下,对于地下水位较浅、降水量大的地区,地表水下渗到路面基层极端不利状况,路面基层水泥加固土填料在浸水的条件下强度的变化规律,以及在水中养生的加固土强度特性的研究并不多,相关记录文献也比较少,试验对水泥加固土在水中养生的力学特性进行重点研究,以期为路面基层加固土填料的全面研究提供理论参考。

1 试验概况

1.1 土样的物理性质

试验所用土样取自路面基层土。根据土的工程分类判定土样为低液限黏土,通过筛分试验得到了级配曲线,其中小于0.075 mm粒径的占26.81%,小于0.005 mm粒径的占13.17%,黏粒占比较高,其主要物理性质如表1所示。

表1 素土的物理性质

Table 1 Physical properties of plain soil

液限 (ω_L)	塑限 (ω_P)	塑性指数 (I_P)	最优含水 率/%	最大干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
29	17	12	11.2	2.07

1.2 试样制备

试验所用固化剂为水泥(PC32.5),初凝时间为4 h。试样制备过程需考虑水泥的初凝时间,所以需先配制一定含水率的土样,装入保鲜袋闷制24 h,保证水分充分扩散,根据水泥占比的不同加入水泥质量:干土质量为1:50、1:25、3:50、2:25的水泥。采用静压制作法以95%压实度制成直径×高(50 mm×50 mm)圆柱形试件,成件后脱模进行养生,一部分进行标准养生,另一部分先进行标准养生,再进行水中养生,如图1所示;水中养生是将试件浸没于恒温(20 ± 2)℃养生箱中养生,水面没过试样顶面20 mm,具体养生周期安排如表2所示。试验的制件工艺、试验过程,标准养生方法参考《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E51—2015)^[10]。



图1 试件水中养生

Fig. 1 Specimen curing in water

表2 水中养生周期

Table 2 Water curing cycle

养生周期	7 d		14 d		28 d		90 d	
	标养	浸水	标养	浸水	标养	浸水	标养	浸水
	3 d	4 d	7 d	7 d	7 d	21 d	7 d	83 d

2 试验结果分析

2.1 击实试验

击实试验是保证路面基层压实度可以达到规范要求必不可少的试验,对不同水泥占比(素土、1:50、1:25、3:50、2:25)的加固土进行重型击实试验,测定出每种占比下加固土的最佳含水率和对应的最大的干密度,如表3所示。

表3 不同水泥占比下的击实试验结果

Table 3 Compaction tests result under different cement contents

水泥掺量/%	0	2	4	6	8
最佳含水率/%	11.8	11.4	11	11.4	11
最大干密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	1.98	1.96	1.94	1.93	1.89

由表3可知,原土样经水泥加固后,加固土的最佳含水率灵敏度比原土样有减小的趋势,且随着水泥含量的增加而下降。从图2所示的击实曲线可以看出,原土样的击实曲线较为陡峭,经水泥加固后较为平缓,随着水泥含量的增加,击实曲线越发平缓。

由于水泥粒径较小,单位质量的水泥与水的接触面积大,即使携带着土颗粒反映仍然剧烈,在短时间内可使土颗粒凝聚成团,大体积的球体影响压实效果,从而导致最大干密度下降,图3是土样的最大干密度随水泥占比增加的趋势,随着水泥掺量的增加,土样的最大干密度减小,但最佳含水率变化没有明显规律。

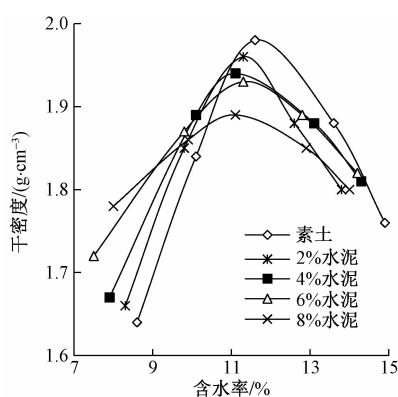


图2 不同水泥占比下的击实曲线

Fig. 2 Compaction curves under different cement contents

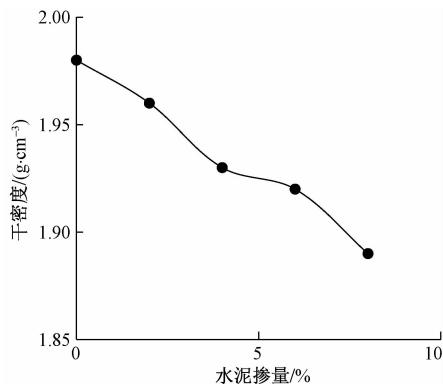


图3 最大干密度与水泥掺量的关系

Fig. 3 Relationship between maximum dry density and cement content

2.2 浸水单轴抗压强度

2.2.1 水泥占比

试验的含水率为击实试验得到的不同水泥掺量下的最佳含水率, 压实度为 95%, 水泥掺量为 1:50、1:25、3:50、2:25, 养生时间为 7、14、28、90 d。为保证试验结果精度, 每种情况采取平行试件不少于 6 个^[11]。水中养生条件下水泥加固土单轴抗压强度如表 4 所示, 拟合曲线如图 4 所示。

从图 4 可以看出, 在养生时间一定的情况下, 加固土的抗压强度随着水泥占比的增加而增加, 采用一次函数模型对水泥加固土的单轴抗压强度平均值和水泥占比进行线性拟合, 养生时间为 7、14、28、90 d 的水泥加固土试件的单轴抗压强度与水泥占比函数关系式分别为

$$y = 10.95x + 1.536, \quad R^2 = 0.9761 \quad (1)$$

$$y = 14.5x + 1.6, \quad R^2 = 0.9804 \quad (2)$$

$$y = 19.6x + 1.628, \quad R^2 = 0.9986 \quad (3)$$

$$y = 29.8x + 1.679, \quad R^2 = 0.9989 \quad (4)$$

由式(1)~式(4)可知, 线性拟合相关系数均较高, 表明采用一次函数模型能够较好地表征水泥加

表4 水中不同养生时间下水泥加固土的抗压强度

Table 4 Compressive strength of cement improved soil under different water curing time

水泥掺量/%	单轴抗压强度/MPa			
	7 d	14 d	28 d	90 d
4	1.94	2.22	2.46	2.59
6	2.21	2.46	2.69	3.10
8	2.40	2.83	3.18	3.59
10	2.87	3.45	4.10	4.64

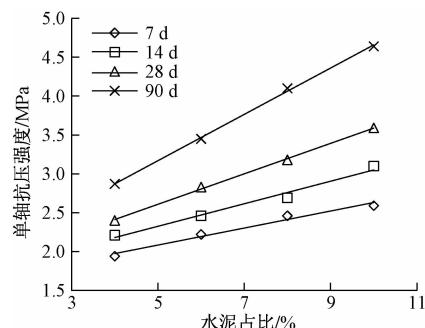


图4 浸水单轴抗压强度随水泥占比变化拟合曲线

Fig. 4 Fitting curve of unconfined compressive strength under immersion with the change of cement content

固土试件的单轴抗压强度与水泥占比的相关关系。随着养生时间的增加, 拟合函数的斜率也逐渐增大, 28 d 和 90 d 拟合函数的斜率较 7 d 和 14 d 的斜率增加 1 倍, 表明水泥占比的增加对水泥加固土后期强度的影响较前期强度更显著。

2.2.2 养生时间

图 5 所示为浸水单轴抗压强度随养生时间变化曲线图, 可以看出: 水泥加固土的抗压强度都随着养生时间增加而增加, 养生前 28 d, 水泥加固土抗压强度曲线走势较陡, 28 d 后, 水泥加固土的抗压强度出现转折点, 之后抗压强度增长趋于平缓。

单轴抗压强度 R_c 与养生时间 T 的关系可用复合对数方程表示, 即

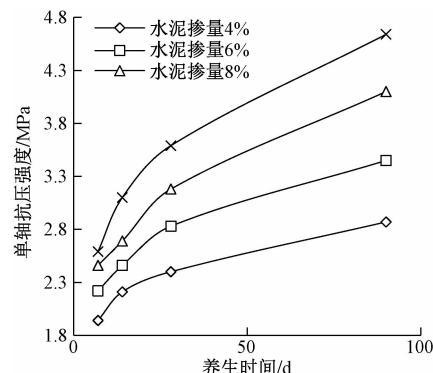


图5 浸水单轴抗压强度随养生时间变化曲线

Fig. 5 Change curve of unconfined compressive strength of immersed water with curing time

$$R_c = \ln(bT + c) \quad (5)$$

式(5)中: R_c 为水泥加固土单轴抗压强度, MPa; T 为养生时间, d; b 、 c 为与加固土物理性质相关的参数。

为了进一步研究水泥加固土的单轴抗压强度和养生时间的关系, 引入了单轴抗压强度增长速率的概念, 即

$$V = dR_c/dT = b/(bT + c) \quad (6)$$

式(6)中: V 为单轴抗压强度增长速率, MPa/d。

从水中养生条件下水泥加固土的单轴抗压强度增长速率的曲线中可以看出, 随着时间的增加, 抗压强度的增长速率逐渐减小, 水泥占比为 6% 的试件 7 d 的增长速率是 28 d 的 3 倍, 到 28 d 时水泥加固土的抗压强度平均增长速率减小到 0.101 MPa/d, 基本上趋于稳定, 同时其抗压强度达到 90 d 抗压强度的 92%, 水泥的水化反应基本完成。

由式(6)得到水泥加固土单轴抗压强度增长速率关系曲线如图 6 所示。

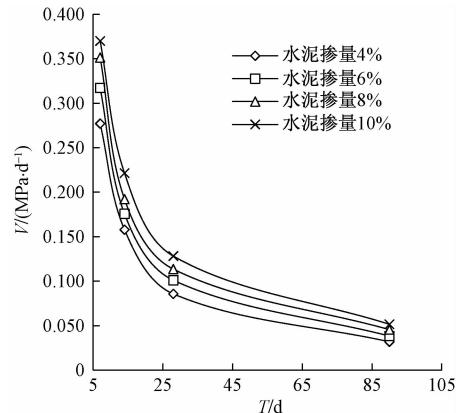


图 6 水中养生单轴抗压强度增长速率

Fig. 6 Growth rate of unconfined compressive strength in water curing

2.3 耐水性

标准养生条件为恒温恒湿, 温度恒为 (20 ± 2) °C, 相对湿度为 $\geq 95\%$ 。在养生时间的最后一天将试件浸水, 通过单轴试验测的抗压强度, 得到了标准养生条件下单轴抗压强度数据^[12], 如表 5 所示。

对比浸水条件下水泥加固土抗压强度, 标准养生条件下的加固土抗压强度要大很多, 水中养生条件下 7 d 抗压强度最大值为 1.59 MPa, 而标准养生条件下 6% 水泥占比养生 7 d 的抗压强度已经达到了 2.1 MPa, 为了更好地研究水中养生对水泥加固土的影响, 引进了材料的耐水系数^[13]。

耐水系数是表征材料耐水性的一个指标, 其值越大代表耐水性能越好, 表达式为

$$K = f/F \quad (7)$$

式(7)中: K 为材料的耐水系数; f 为试件在水中养生条件下的单轴抗压强度, MPa; F 为试件在标准养生条件下的单轴抗压强度, MPa。

根据式(7)得到不同水泥掺入与不同龄期下加固土的耐水系数, 如表 6 所示。随着水泥占比的增加, 各龄期下耐水系数均随水泥占比的增加而增大, 表明随着水泥占比的增加加固土的水稳定性在增强。这是因为随着水泥占比的增加, 水泥形成的胶凝物质越多, 加固土的强度越高, 但各种条件下耐水系数均小于 0.75。

表 5 标准养生条件下单轴抗压强度

Table 5 Unconfined compressive strength under standard curing conditions

水泥占比/%	单轴抗压强度/MPa			
	7 d	14 d	28 d	90 d
4	1.95	2.4	2.78	2.98
6	2.6	2.99	3.29	4.01
8	3.0	3.78	4.48	5.01
10	3.78	4.93	5.8	6.7

表 6 耐水系数与水泥占比关系

Table 6 Relation between softening coefficient and cement content

水泥占比/%	耐水系数			
	7 d	14 d	28 d	90 d
4	0.48	0.47	0.47	0.49
6	0.51	0.49	0.48	0.50
8	0.53	0.51	0.49	0.53
10	0.57	0.52	0.52	0.54

3 结论

对用于路面基层的低液限黏土进行水泥固化改良。通过击实试验、浸水条件下单轴抗压强度试验数据进行分析, 得到以下结论。

(1) 原土样经水泥加固后, 最佳含水率的灵敏度有减小的趋势, 且随着水泥占比的增加而下降; 最大干密度随着水泥占比的增加减小, 但最佳含水率变化没有明显规律。

(2) 水中养生时, 养生时间一定的情况下, 加固土的抗压强度随着水泥占比的增加而增大; 水泥占比的增加对水泥加固土后期强度的影响更为显著。

(3) 水中养生时, 水泥加固土的抗压强度随着养生时间增加而增大, 抗压强度的增长速率逐渐减小, 28 d 时水泥的水化反应基本完成。

(4) 随着水泥占比的增加, 各龄期下耐水系数均增大, 表明加固土的耐水性增强。但各种条件下耐水系数均小于 0.75。

参 考 文 献

- [1] 邓永煌, 刘 专. 加固粉土在不同浸泡环境下的强度试验研究 [J]. 科学技术与工程, 2013, 13(32): 9763-9766, 9781.
Deng Yonghuang, Liu Zuan. Strength test of improved silty soil under different soaking conditions [J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(32): 9763-9766, 9781.
- [2] 徐奋强, 郭先凯. 高液限土路面基层掺砂加固试验研究 [J]. 科学技术与工程, 2013, 13(33): 10054-10058, 10063.
Xu Fenqiang, Guo Xiankai. Experimental study on sand mixing improvement of high liquid limit subgrade [J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(33): 10054-10058, 10063.
- [3] 黄晓明. 路面基层路面工程 [M]. 5 版. 北京: 人民交通出版社, 2017: 14-25.
Huang Xiaoming. Roadbed and pavement engineering [M]. 5th edition. Beijing: People's Communications Press, 2017: 14-25.
- [4] 邓学钧. 路面基层路面工程 [M]. 3 版. 北京: 人民交通出版社, 2008: 7-20.
Deng Xuejun. Roadbed and pavement engineering [M]. 3rd edition. Beijing: People's Communications Press, 2008: 7-20.
- [5] 刘占一. 水泥加固土的剪切试验研究 [J]. 路面基层工程, 2016(5): 129-132.
Liu Zhanyi. Shear test research on cement improved soil [J]. Roadbed Engineering, 2016(5): 129-132.
- [6] 张 凯, 王起才, 李 盛, 等. 明洞顶回填水泥加固黄土力学特性研究 [J]. 公路工程, 2015, 40(5): 32-35, 39.
Zhang Kai, Wang Qicai, Li Sheng, et al. Study on mechanical properties of ming-dongding backfilled cement modified loess [J]. Highway Engineering, 2015, 40(5): 32-35, 39.
- [7] 董 城, 冷伍明, 李志勇, 等. 水泥加固高液限黏土动态回弹模量试验研究 [J]. 岩土力学, 2013, 34(1): 133-138.
Dong Cheng, Leng Wuming, Li Zhiyong, et al. Experimental study on dynamic resilience modulus of cement modified high liquid limit clay [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(1): 133-138.
- [8] 刘 雨, 陈俊桦, 朱自强. 水泥加固泥质板岩粗粒土的静力特性 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(1): 139-145.
Liu Yu, Chen Junhua, Zhu Ziqiang. Static characteristics of argillite coarse grained soil improved by cement [J]. Journal of Central South University (Natural Science), 2019, 50(1): 139-145.
- [9] 阮 庆, 阮 波, 曾 元, 等. 洞庭湖区淤泥质黏土水泥土力学性能试验研究 [J]. 铁道科学与工程学报, 2014, 11(5): 106-111.
Ruan Qing, Ruan Bo, Zeng Yuan, et al. Experimental study on mechanical properties of silty clay soil-cement in dongting lake district [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2014, 11(5): 106-111.
- [10] 中华人民共和国交通运输部公路科学研究院. 公路工程无机结合料稳定材料试验规程: JTGE51—2015 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
Research Institute of Highway Ministry of Transport of the People's Republic of China. Test procedures for inorganic binder stabilized materials in highway engineering: JTGE51—2015 [S]. Beijing: People's Communications Press, 2015.
- [11] 王 彦. 高速公路含砂低液限粘土路面基层结构研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
Wang Yan. Study on subgrade structure of expressway with sand and low liquid limit clay [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.
- [12] 崔宏环, 裴国陆. 含赤泥土壤固化剂加固粉质黏土的路用性能研究 [J]. 中外公路, 2018, 38(3): 301-306.
Cui Honghuan, Pei Guolu. Study on the road performance of soil hardening agent containing red mud improving silty clay [J]. Chinese and Foreign Highways, 2008, 38(3): 301-306.
- [13] 龚方泽. 福建省高液限土路面基层化学固化机理与耐久性研究 [D]. 福州: 福州大学, 2017.
Gong Fangze. Study on chemical curing mechanism and durability of high liquid limit subgrade in fujian province [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2017.