

快速固化土工程特性试验

温小平¹, 翁兴中¹, 张俊¹, 刘鹏程¹, 宁文溥², 谭翀²

(1.空军工程大学机场建筑工程系,西安,710038; 2.空军工程设计研究局北京设计室,北京,100023)

摘要 为探究长安大学研制的新型 4# 粉体固化剂的固化效果,以山西忻州定襄县粉质粘土为研究对象,进行了单掺长安大学新型 4# 粉体固化剂固化土制备。通过不同掺量与不同龄期固化土试件的浸水和不浸水无侧线抗压强度试验,分析了掺量和龄期对固化土力学特性的影响规律。结果表明:养护前期,固化剂固化土强度增幅随掺量增大而先快后慢,养护后期其强度增幅随掺量增大而先慢后快;低掺量固化剂固化土强度增幅随龄期延长而先快后慢,高掺量固化剂固化土强度增幅随龄期延长而先慢后快。然后在考虑固化剂掺量和龄期对强度影响的基础上,建立了符合该固化土力学特性的强度预测公式,为该固化剂在工程实际运用中开展强度保证理论和试验研究探索。

关键词 机场工程;固化土;无侧线抗压强度试验;掺量;养护龄期

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2016.01.020

中图分类号 TU448 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2016)01-0106-05

A Study of the Experiment on the Engineering Characteristics of Chang'an Curing Agent Solidified Soil

WEN Xiaoping¹, WENG Xingzhong¹, ZHANG Jun¹, LIU Pengcheng¹, NING Wenpu², TAN Chong²

(1.Department of Airfield and Building Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an, 710038, China; 2. Air Force Engineering Design Institute(Beijing Branch), Beijing 100023, China)

Abstract: In order to explore the solidification effect of the new type of 4 # powder solidified agent developed by Chang'an University, the article focuses on the silt clay at Dingxiang County, Xinzhou, Shanxi and the preparation of the soil samples mixed only the new type of 4 # powder solidified agent developed by Chang'an University. Then the article conducts the unconfined compression strength test of different proportion and different maintenance period with soaking or non-soaking respectively, and the influence regularity of different proportion and different age mechanical properties are analyzed. The experimental results show that the increase of the strength of solidified-soil increases with the proportion and then becomes slow in the early stage of the maintenance, and the growth trend is opposite in the late maintenance; The increase of the strength of low proportion solidified-soil increases with the maintenance period and then becomes slow, and the growth trend is opposite with high proportion. On the basis of considering the intensity effects of different proportion and different age, the strength prediction formula in accordance with the

收稿日期: 2015-04-21

基金项目: 国家自然科学基金(51509257)

作者简介: 温小平(1992-),男,山西大同人,硕士生,主要从事机场道面设计研究.E-mail: wxpdatong@163.com

引用格式: 温小平,翁兴中,张俊,等.快速固化土工程特性试验研究[J].空军工程大学学报:自然科学版,2016,17(1):106-110. WEN Xiaoping, WENG Xingzhong, ZHANG Jun, et al. A Study of the Experiment on the Engineering Characteristics of Chang'an Curing Agent Solidified Soil[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2016, 17(1): 106-110.

soil mechanics properties of solidified soil is established, and it is useful for the solidified agent in the engineering practice to carry out the exploration of the strength guarantee theory and experimental study.

Key words: airfield engineering; solidified-soil; unconfined compressive strength test; proportion; maintenance period

软土在我国有广泛的分布,在工程应用中往往需要进一步加强处理。针对现有软土面临的应用问题,国内工程实践中通常选用水泥及相似或其他类型的添加剂进行处理^[1-4],而国外的 Bell F G^[5]在水泥和石灰中分别加入一种名为 PFA 的添加剂,以此来进行加固试验。Shirazi H^[6]认为,石灰和粉煤灰的混合物可以消除由于水泥干缩而引起的开裂。Miller G A 等^[7]则认为 SH 固化剂可充分利用胶体间的电性吸引力和高分子长链的搭接、缠绕作用来增强土体强度,而且抗水性能好。Zalihe N 等^[8]合成了一种新型水溶性高分子土壤固化剂,但人们对其固化机理尚不明确。

目前,适用于各种应急路用状况的道面结构材料研究相对滞后,这也一直是制约我国应急路用材料实用性能提高的关键“瓶颈”。因此,开发更加经济实用的快速固化添加剂具有重要的实践意义。本文探讨了长安大学新型 4# 固化剂对土的强度的改良效果,构建考虑固化剂掺量和龄期的固化土强度预测公式,并实际检验了其在现场工程应用中的适用性与合理性。

1 试验条件

1.1 原材料

试验用土选用的是山西定襄土,土样取自山西忻州五台山军民合用机场改扩建工程现场,其液限为 31.5%,塑限为 21.3%,依规范命名为低液限粘土。试验用固化剂为水泥基质有机质粉体固化剂。

1.2 试样制备与养护

由于本试验用土均为细粒土,故应将碾散后的土样过 2 mm 筛,试验前将土样烘干以备用。依据现有研究数据信息调研结论,综合考虑强度、经济性、施工和储存运输方便性,制备压实度为 95%,固化剂掺量分别为 6%,8%,10%,含水率为各掺量水平下依据击实试验得出的最优含水率,龄期分别为 3 d,7 d,14 d 的固化土。

试件制备参照《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTJ E51-2009)中 T0843-2009 无机结合料稳定材料试件制作方法(圆柱形)和 T0805-1994 无机结合料稳定材料无侧限抗压强度试验方法,采用静压法,成型尺寸为直径 50 mm×高 50

mm,每个质量为(202.6±1) g。在标准养护箱养护至要求龄期,分别进行浸水和不浸水无侧限抗压强度试验。其中浸水试验中,试件需在试验前一天浸水饱和。每组制备 3 个试样做平行试验,最终采用值为每组有效数据的平均值,破坏压力记为 P 。

数据处理的计算公式为:

$$R_c = \frac{P}{A} \quad (1)$$

式中: R_c 为试件的无侧限抗压强度(MPa); P 为试件破坏时的最大压力(N); A 为试件的截面积(mm^2)。

1.3 试验仪器

试验用主要仪器为西安亚星土木仪器公司生产可自动存储试验过程中力和位移值的 YLQD-1B 型路面材料强度试验仪,可设置 3 个不同档位速率进行试验,本试验选取第 1 速率档位进行试验。

2 试验结果及分析

2.1 固化剂掺量及龄期对无侧限抗压强度的影响

图 1 为不同掺量固化剂固化时浸水和不浸水状态下的无侧限抗压强度值,分别对应于 3 个不同龄期。图 2 为固化土在不同养护龄期下浸水和不浸水状态的无侧限抗压强度值,分别对应于 3 个不同固化剂掺量。

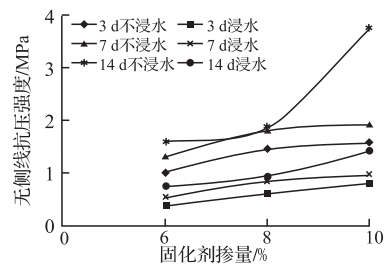


图 1 无侧限抗压强度与固化剂掺量关系

Fig.1 Relationship between unconfined compressive strength and proportion of solidified agent

分析图 1 可知,固化剂掺量较低时,固化作用化学反应效率高,在养护前期随固化剂掺量增加,强度增长较快。而固化剂掺量达到一定限度后,固化剂反应效率反而有所下降,表现为养护前期固化剂固化土强度增幅随掺量增大而先快后慢;随着养护时间的延长,土体内反应继续进行,固化土强度持续上

升,初时固化剂掺量较大的试件在此时所含掺量下降,固化化学反应效率增大,表现为养护后期固化土强度增幅随掺量增大而先慢后快。

分析图 2 可知,低掺量固化剂固化土在养护前期的固化作用反应效率较高,固化剂可以充分进行反应,养护后期时固化剂掺量由于前期的反应而减少,导致固化反应速率降低,表现为固化强度增幅随龄期延长而先快后慢的趋势;高掺量固化剂固化土在养护前期的固化作用反应效率较养护后期更高,养护后期时固化剂掺量由于前期的反应而相对减少,使得固化作用反应效率加快,表现为固化强度增幅随龄期延长而先慢后快。

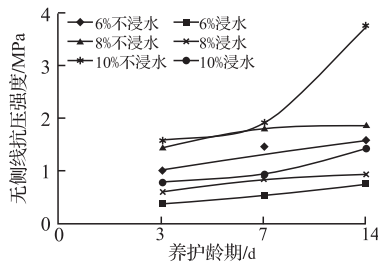


图 2 无侧限抗压强度与龄期关系

Fig.2 Relationship between unconfined compressive strength and maintenance period

综合分析可看出,对于粉质粘土,不论是否浸水试验,固化土强度会随着固化剂掺量的增大而增大,随着龄期的延长而增加。这满足设计要求和实际使用寿命设计要求。

2.2 固化剂掺量及龄期与无侧限抗压强度的关系

选择固化剂掺量为 8% 时随龄期的不浸水强度增长关系和龄期为 7 d 时随固化剂掺量的不浸水强度增长关系分别为考虑单一掺量因素和单一龄期因素的强度增长关系,实验结果见图 3~4。

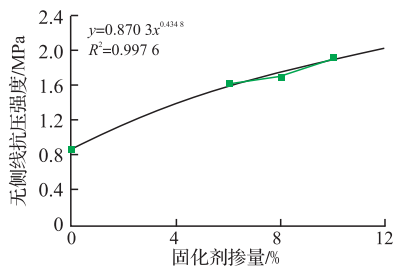


图 3 不浸水状态下无侧限抗压强度与固化剂掺量关系(7 d/龄期)

Fig.3 Relationship between unconfined compressive strength and proportion of solidified agent under the condition of not soaking(7 d)

图 3 反映的是固化剂掺量与固化土抗压强度的关系,固化剂掺量由 0% 增加到 10%,固化土强度呈现幂函数形式增长,相关系数高达 99% 多。其二者的关系可以表现为:

$$R_c = 0.8703 (\omega_c)^{0.4348} \quad (2)$$

式中: ω_c 为试件中固化剂掺量(%)。

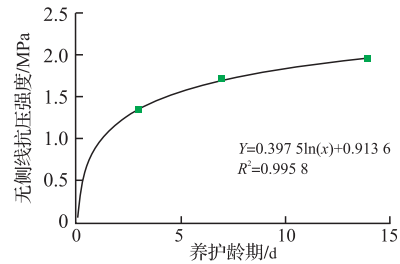


图 4 不浸水状态下无侧限抗压强度与养护龄期关系(掺量为 8%)

Fig.4 Relationship between unconfined compressive strength and maintenance period under the condition of not soaking(8%)

图 4 反映的是龄期与固化土抗压强度的关系。随着龄期的延长,抗压强度增加开始增快,后期逐渐减缓增速,通过回归分析可以得到抗压强度与龄期的关系见式(3)。可以看出抗压强度与龄期有着很好的对数相关性:

$$R_c = 0.3975 \ln(T) + 0.9136 \quad (3)$$

式中: T 为试件养护龄期(d)。

3 固化土抗压强度预测模型建立

在固化剂固化土实际工程应用时,往往需要进行土体强度的预测,最一般的方法就是应用现场预用掺量固化剂配置现场试验固化土,制备试件并进行理论龄期的养护,依据无侧限抗压试验数据进行强度的预测和配比方案的验证,而这种传统的方法通常需要 1 个月、半年甚至更久的时间来充分进行。针对某种固化剂固化土的强度预测模型的建立就可以很好地解决这类问题,既可以科学合理地进行强度预测检验,还可以大大缩短工程强度验算周期,为实际工程应用节约大量的资金。

在本研究的固化剂运用中,考虑土体含水率取值都为对应的最佳含水率范围内,此时各级含水率较为相近,设为统一值。以配制的最优固化剂掺量试验土的抗压强度为基础强度,对其余掺量的强度值与基础强度值比值进行分析。强度预测模型建立最主要考虑固化剂掺量和龄期 2 个重要试验因素,见图 5~6。

依据图 5 回归分析,考虑固化剂掺量和抗压强度有很好的幂函数关系,拟合得到的表达式为:

$$R_c/R_{c0} = 1.0919 (\omega_c/8)^{2.129} \quad (4)$$

式中: R_{c0} 为试验土基础强度值,经试验可得 R_{c0} 为 1.87 MPa。代入式(4),化解可得强度与固化剂掺量的关系为:

$$R_c = 0.024 4\omega_c^{2.129} \tag{5}$$

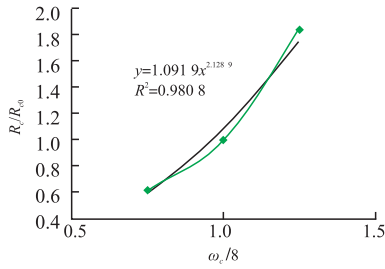


图 5 固化土抗压强度比与固化剂掺量比的关系

Fig.5 Relationship between compression strength ratio of solidified soil and proportion ratio of solidified agent

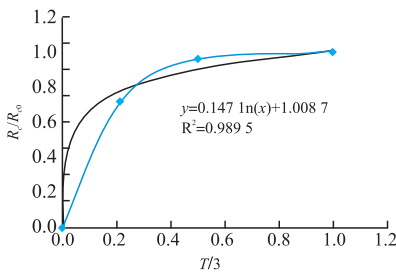


图 6 固化土抗压强度比与养护龄期比的关系

Fig.6 Relationship between compression strength ratio of solidified soil and maintenance period ratio

考虑养护龄期和抗压强度有很好的对数关系,进行回归拟合,得到的对数关系相关性非常好。在此将龄期 T 代入到式(5)中得到考虑固化剂掺量、龄期及当前固化剂掺量对应最优含水率对强度影响的强度预测模型为:

$$R_c = 0.024 4\omega_c^{2.129} [0.147\ln(T/3) + 1.008 7] \tag{6}$$

为验证其合理及该固化剂的通用性,在山西定襄机场进行试验段铺设的同时进行现场天然土与固化剂拌合土采集。

由于实际工程拌合土各组分比例精度难以精确于实验方案中的要求精度,铺设时精确量称所用拌合土中各分组的用量,实测实际用拌合土中固化剂掺量。在此基础上现场制作针对其实际用料比例的试件,借助现场质量监控实验室测试其无侧限抗压强度值。分析不同试验结构段所采集拌合料的抗压强度值和龄期、固化剂掺量的关系与式(6)计算结果的比较见图 7。

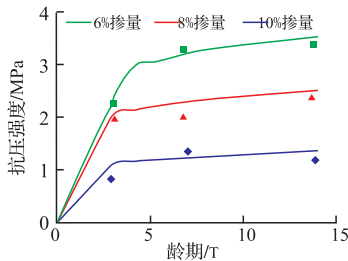


图 7 固化土强度实测数据与计算值比较

Fig.7 Comparison between calculated value and test data fou solidified-soil samples

依据计算结果和实测值的对比,式(6)较为准确的预测了该固化剂固化土的抗压强度,具有较强的通用性和适应性。需要指出的是该公式的适用龄期为 3 d 以上,因反应初期固化土强度离散性较大,在实际应用中建议使用 7 d 强度作为预测参数。

4 结语

鉴于对新型 4 # 固化剂固化土的探索需要,对其工程特性进行了研究,得出以下结论:

1) 试验分析可知,长安固化剂固化土的抗压强度随固化剂掺量的增加呈幂函数形式增长;养护前期固化土强度增幅先快后慢,养护后期固化土强度增幅先慢后快。可以预测,随着固化剂掺量的继续增加,长安固化剂固化土早期强度会逐渐减小,而固化土的后期强度会逐渐增大。

2) 分析抗压强度试验可以得到,长安固化剂固化土的抗压强度随龄期增加呈对数函数形式增长;低掺量固化剂固化土强度增幅先快后慢,高掺量固化剂固化土强度增幅先慢后快。

3) 通过对试验数据的整理处理,建立了可以考虑固化剂掺量、龄期及当前固化剂掺量对应最优含水率影响作用的固化土强度预测模型,在实际工程应用中有很好的借鉴和指导作用,也可以用于指导固化土配比试验,降低试验成本和缩短试验周期。

该模型仅仅是基于一些有限的试验数据得出的,局限性仍需要通过更多实际工程应用数据来改进调整。相同的研究思路依旧适用于改进后固化剂实际工程应用中的研究。类似固化剂的研究所带来的综合效益必将为改造传统应急工程及工程行业提供良好的空间。

参考文献(References):

[1] 汪稔, 陈善雄. 用石灰桩加固软弱地基[J]. 岩土力学, 1994(3): 19-25.
WANG Ren, CHEN Shanxiong. Stabilizing Soft Foundation with Quikclime Piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 1994(3): 19-25.(in Chinese)

[2] 黄殿瑛. 硅粉对水泥土性能影响的研究[D]. 长沙:中南工业大学, 1994.
HUANG Dianying. The Research on the Influence of Silicon Powder to the Property of Cement Soil[D]. Changsha: Central South University, 1994.(in Chinese)

[3] 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.
ZHANG Ming. Experimental Research and Analysis

- of Cement Stabilized Soil Engineering Properties[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2001. (in Chinese)
- [4] 王振军, 翁优灵, 杜少文. 矿渣粉加固粉土的理论分析及路用性能研究[J]. 工程地质学报, 2006, 14(5): 709-714.
WANG Zhenjun, WENG Youling, DU Shaowen. Theoretical Analysis and Field Performance of Silt Soil Reforced with Slag Powder[J]. Journal of Engineering Geology, 2006, 14(5):709-714.(in Chinese)
- [5] Bell F G. Assessment of Cement-PFA and Lime-PFA Used to Stabilize Clay Size Materials[J]. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, 1994, 49: 25-32.
- [6] Shirazi H. Field and Laboratory Evaluation of the Use of Lime Fly Ash to Replace Soil Cement as Abase Course[J]. Transportation Research Record, 1999, 1652: 270-275.
- [7] Miller G A, Zaman M. Field and Laboratory Evaluation of Cement Kilindustasa Soil Stabilizer[J]. Transportation Reaseareh Reecord, 2000, 1714: 25-32.
- [8] Zalihe N, Emin G. Improvement of Calcareous Expansive Soil Sin Semiarid Environments [J]. Journal of Arid Environments, 2001,47(4): 453-463.
- [9] 杨爱武, 周金, 孔令伟. 固化吹填软土力学特性试验[J]. 吉林大学学报:工学版, 2014, 44(3): 661-667.
YANG Aiwu, ZHOU Jin, KONG Lingwei. Experiment on Mechanical Properties of Stabilized Soft Dredger Fill[J]. Journal of Jilin University:Eng and Technol Ed, 2014, 44(3): 661-667.(in Chinese)
- [10] 陈达, 庄宁, 廖迎娣, 等. 水泥土力学特性随龄期发展规律试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2012(1): 26-29.
CHEN Da, ZHUANG Ning, LIAO Yingdi, et al. Experimental Study on Mechanical Properties of Cement-Soil with Age[J]. Hydro-Science and Engineering, 2012(1): 26-29.(in Chinese)
- [11] 张树彬. 水泥土无侧限抗压强度的损伤规律[J]. 吉林建筑工程学院学报, 2012, 29(2):16-19.
ZHANG Shubin. Unconfined Compression Strength of Cement soil Damage Regularity[J]. Journal of Jilin Institute of Architecture & Civil Engineering, 2012, 29(2):16-19.(in Chinese)
- [12] 邓晓轩, 黄新, 宁建国. 外掺剂对水泥固化土强度的影响[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(10): 1628-1633.
DENG Xiaoxuan, HUANG Xin, NING Jianguo. Influence of Admixture on Strength of Stabilized Soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(10): 1628-1633.(in Chinese)
- [13] 周丽萍, 申向东. 水泥土力学性能的试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2009, 28(2): 359-365.
ZHOU Liping, SHEN Xiangdong. Study on Mechanical Behaviors of Soil Cement[J]. Bulletin of the Chinese Ceram Society, 2009, 28(2): 359-365. (in Chinese)
- [14] 张树彬, 王清, 陈剑平. 土体腐殖酸组分对水泥土强度影响效果试验[J]. 工程地质学报, 2009, 17(6): 842-846.
ZHANG Shubin, WANG Qing, CHENG Jianpin, et al. Tests for Effect of Soil Humid Acid Components on Strength of Cemented Soft Soils[J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17(6): 842-846.(in Chinese)
- [15] 徐日庆, 郭印, 刘增永. 人工制备有机质固化土力学特性试验研究[J]. 浙江大学学报:工学版, 2007, 41(1): 109-113.
XU Riqing, GUO Yin, LIU Zengyong. Experimental Study on Mechanical Properties of Stabilized Artificial Organic Soil[J]. Journal of Zhejiang University:Engineering Science, 2007, 41(1):109-113.(in Chinese)
- [16] 邵玉芳, 徐日庆, 刘增永, 等. 一种新型水泥固化土的试验研究[J]. 浙江大学学报:工学版, 2006, 40(7): 1196-1200.
SHAO Yufang, XU Riqing, LIU Zengyong, et al. Experimental Study on New Variety of Cement-Stabilized Soil[J]. Journal of Zhejiang University:Engineering Science, 2006, 40(7): 1196-1200.(in Chinese)
- [17] 范昭平, 朱伟, 张春雷. 有机质含量对淤泥固化效果影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(8): 1327-1334.
FAN Zhaoping, ZHU Wei, ZHANG Chunlei. Experimental Study on Influence of Organic Matter Content on Solidified Dredging[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(8): 1327-1334.(in Chinese)
- [18] 童小东, 龚晓南, 蒋永生. 水泥土的弹塑性损伤试验研究[J]. 土木工程学报, 2002, 35(4): 82-85.
TONG Xiaodong, GONG Xiaonan, JIANG Yongsheng. Experimental Study on Elasto Plastic Damage of Cemented Soil[J]. China Civil Engineering Journal, 2002, 35(4):82-85.(in Chinese)
- [19] JTG E51-2009.公路工程无机结合料稳定材料试验规程[S].
JTG E51-2009. Test Methools of Materials Stabilized with Inorganic Bioders for Highway Engineering[S]. (in Chinese)

(编辑:徐敏)