

# 武汉地区粉煤灰和膨润土双掺合剂水泥石 性能改良试验研究

陈 律<sup>1</sup>, 胡福洪<sup>2</sup>, 胡 刚<sup>3</sup>

(1.中机三勘岩土工程有限公司,湖北 武汉 430000; 2.武汉地质勘察基础工程有限公司,湖北 武汉 430072;  
3.中匠民大国际工程设计有限公司恩施分公司,湖北 恩施 445000)

**摘要:**近年来,水泥石被广泛应用于土体加固工程,其强度与加固效果密切相关。为研究膨润土和粉煤灰掺量对水泥石性能的影响,对 25 组不同膨润土和粉煤灰掺量的水泥石进行基本力学性能试验。通过抗压强度试验,发现当粉煤灰和膨润土掺量分别为 40% 和 11% 时,28 d 的水泥石抗压强度最大,为 7.30 MPa;当粉煤灰和膨润土掺量分别为 20% 和 7% 时,90 d 的水泥石抗压强度最大,为 7.19 MPa。通过室内直接剪切试验,发现当粉煤灰和膨润土掺量分别为 20% 和 11% 时,28 d 的水泥石抗剪强度参数粘聚力  $c$  最大,为 1144.8 kPa;当粉煤灰和膨润土掺量分别为 30% 和 5% 时,90 d 的水泥石抗剪强度参数粘聚力  $c$  最大,为 1753.71 kPa。研究成果可以为武汉地区的粉煤灰和膨润土双掺合剂改良水泥石的现场施工提供参考依据。

**关键词:**水泥石性能;膨润土;粉煤灰;掺量;抗压强度;抗剪强度;土体加固;武汉地区

**中图分类号:**P634;TU472 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2019)12-0062-06

## Experiment on performance improvement of cement-soil with the dual admixture of fly ash and bentonite in Wuhan area

CHEN Lü<sup>1</sup>, HU Fuhong<sup>2</sup>, HU Gang<sup>3</sup>

(1.China Machinery TIDI Geotechnical Engineering Co., Ltd., Wuhan Hubei 430000, China;

2.Wuhan Geological Prospecting Foundation Engineering Co., Ltd., Wuhan Hubei 430072, China;

3.Enshi Branch of China National Minda International Engineering Design Co., Ltd., Enshi Hubei 445000, China)

**Abstract:** In recent years, cement-soil has been widely used in soil reinforcement projects, and its strength is closely related to the reinforcement effect. In order to study the effect of the adding amount of bentonite and fly ash on the performance of cement-soil, the basic mechanical properties of 25 groups of cement-soil with different adding amount of bentonite and fly ash were tested. Through the compressive strength test, it was found that when the blending amount of fly ash and bentonite was 40% and 11% respectively, the 28d compressive strength of cement soil was the largest at 7.30MPa; when the blending amount of fly ash and bentonite was 20% and 7%, the 90d compressive strength of cement-soil was the highest at 7.19MPa. Through the indoor direct shear test, it was found that when the fly ash and bentonite content was 20% and 11% respectively, the 28d cement-soil shear strength parameter, e.g. cohesion  $c$ , was the largest at 1144.8kPa; when fly ash and bentonite was added with the amount of 30% and 5% respectively, the cohesive force  $c$  of the 90d cement soil shear strength parameter was the largest at 1753.71kPa. The research results can provide reference for the on-site preparation of cement-soil with fly ash and bentonite in Wuhan area.

**Key words:** cement-soil properties; bentonite; fly ash; adding amount; compressive strength; shear strength; soil reinforcement; Wuhan area

**收稿日期:**2019-05-15; **修回日期:**2019-11-27 **DOI:**10.12143/j.tkge.2019.12.012

**作者简介:**陈律,男,汉族,1987年生,硕士,湖北省武汉市江岸区春兰街89号。

**通信作者:**胡福洪,男,汉族,1989年生,工程师,硕士,岩土工程专业,主要从事地基基础施工设计及施工工作,湖北省武汉市武昌区八一路463号,964114961@qq.com。

**引用格式:**陈律,胡福洪,胡刚.武汉地区粉煤灰和膨润土双掺合剂水泥石性能改良试验研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(12):62-67.

CHEN Lü, HU Fuhong, HU Gang. Experiment on performance improvement of cement-soil with the dual admixture of fly ash and bentonite in Wuhan area[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(12):62-67.

## 0 引言

随着城市建筑的不断兴起,以及社会各界对环境友好型施工方式的倡导和追求,水泥土搅拌桩这种新型的施工技术在地基处理和基坑支护中越来越常见。这种施工方式具有能很好地利用原场地的条件、降低施工成本和减少排放等优势,且能适用于淤泥、淤泥质土、砂质土、粉土、泥炭土中<sup>[1]</sup>。水泥土搅拌桩在武汉和上海等地都已成功应用<sup>[2-4]</sup>。

水泥土广泛应用于土体加固工程,强度与加固效果密切相关。林云腾<sup>[5]</sup>、阮波等<sup>[6]</sup>通过总结前人的研究结果,得出影响水泥土强度的因素很多,其中影响水泥土无侧限抗压强度的因素重要性次序分别为水灰比、水泥掺量、搅拌时间;陈达等<sup>[7]</sup>通过大量试验,发现在实际工程应用中除非对强度有特别要求,一般情况下选用掺入比为 0.15~0.20 较为合适;陈燕平<sup>[8]</sup>通过试验发现水泥强度每提高一个强度等级,对应水泥掺入比可适当降低 2%~3%;艾志伟等<sup>[9]</sup>研究发现强度随土体含水量、有机质含量的减少而增强;水泥掺入比和养护龄期的增大而增强,且水泥土搅拌越充分,强度越高;游波等<sup>[10]</sup>研究发现水泥土应力-应变关系曲线都可分为压密阶段、弹性阶段、塑性强化阶段和应力衰减阶段 4 个阶段;水泥掺量和养护龄期的增加能够减小水泥土的弹塑性变形;干密度和含水率的增加能够增加水泥土的弹塑性变形。

现阶段武汉地区基坑大多采用坑内降水井进行降水和坑外利用水泥土搅拌桩形成止水帷幕隔水相结合的方式来达到基坑内止水和降水的效果,且在湖北省基坑技术规程中提到在水泥土中可以加入适量的膨润土,进而提高水泥土的稳定性和抗渗性,但就具体的掺量未做说明。膨润土是一种分布广且对工程建设有特殊危害的土,它的主要成分为含蒙脱石的粘土矿物,具有高胀缩性、强亲水性、易开裂、强度变化很大等特征<sup>[11]</sup>。侯少华等<sup>[12]</sup>通过在南水北调实际工程地基处理的实践表明,采用水泥改性土或水泥土处理膨胀土地基可明显改善地基的性质,施工效果较好,能够应用到实际工程中;朱伟等<sup>[13]</sup>从力学强度、体积安定性、渗透特性及干湿耐久性等方面对采用膨润土为辅助添加剂固化处理的污泥固化体进行了岩土工程性质的效果评价,试验结果表明,膨润土的掺入能保证低水泥掺入量下固化体的强度增大、渗透性降低、安定性和耐久性提高。除此

之外,任素琴<sup>[14]</sup>研究了粉煤灰掺量对水泥土强度的影响,结果表明:随着粉煤灰掺量增大,无侧限抗压强度增大;刘成才等<sup>[15]</sup>通过试验发现试样渗透系数和强度损失率随粉煤灰掺量增加先减小后增大,转折点粉煤灰掺量为 12%;谢德良<sup>[16]</sup>研究认为水泥土中掺加粉煤灰能够使水泥土的后期强度得到大幅度的增强,但在一定程度上减小了早期强度,并提出了最佳粉煤灰掺入比为 8%;李俊哲等<sup>[17]</sup>发现随着粉煤灰掺量的增加,早期抗压强度逐渐减小,后期抗压强度则明显提高,掺入硅粉不仅显著改善水泥土早期抗压强度,且明显提高其后期抗压强度。

本文在前人研究的基础上,研究膨润土和粉煤灰双掺合剂对水泥土的无侧限抗压强度和抗剪强度的影响以及探究双掺合剂的最佳掺入比。

## 1 研究内容

本试验依托武汉天地 B4B5 基坑支护工程、钰龙广场基坑支护工程、花桥村城中村改造等基坑支护工程,探究粉煤灰和膨润土的掺量对武汉地区粉砂质水泥土相关性能的影响,为武汉地区类似工程项目提供设计和施工指导,具体试验内容如下:

(1) 试验中所用水泥为华新 PO 42.5 普通硅酸盐水泥,粉煤灰和膨润土取自武汉某施工场地,并烘干过 2 mm 标准筛。确定以膨润土(钠基膨润土、钙基膨润土)、粉煤灰为主要添加物水泥土配合比设计方法,根据设计强度计算相应水泥土配合比。

(2) 采取正交试验设计方法,取钠基膨润土掺量、粉煤灰掺量 2 个因素,其中钠基膨润土取 0、5、7、9、11 kg/m<sup>3</sup> 五个水平试验,粉煤灰体积掺量取 0、10%、20%、30%、40% 五个水平试验,设计并计算出对应水泥土的配合比,分别制作 7、28、90 d 试验所需试件。

(3) 完成 7、28、90 d 水泥土试件的抗压强度和抗剪强度等试验,记录并分析数据,分析研究粉煤灰、钠基膨润土对不同龄期水泥土性能的影响。

(4) 根据试验结果确定以粉煤灰和钠基膨润土为主要掺加物的水泥土最优配合比。

## 2 试验方案

通过前期的试验调整,按照《水泥土配合比设计规程》(JGJ T 233-2011)确定抗压试块为 70.7 mm × 70.7 mm × 70.7 mm 立方体,抗剪试样为 Ø50

mm×100 mm 的圆柱体,共计 63 个,并对各材料按照配合比进行计算。最终确定水泥土的配比(见表 1)。

在本次实验中,同一配合比的水泥土放在同一

表 1 水泥土的配比设计  
Table 1 Mixing ratio of cement-soil

膨润土掺量 $m/$ %	组 别	粉煤灰掺量 $n/$ %	干土质量 $m_s/$ kg	水 $m_w/$ kg	膨润土质量 $m_p/$ kg	粉煤灰质量 $m_f/$ kg	水泥最终掺量 $m_c/$ kg	试件 个数
0	1	0	29.983	9.867	0.00	0.000	5.560	54
	2	10	29.983	9.867	0.00	0.556	5.004	54
	3	20	29.983	9.867	0.00	1.112	4.449	54
	4	30	29.983	9.867	0.00	1.668	3.893	54
	5	40	29.983	9.867	0.00	2.224	3.336	54
5	6	0	29.983	9.867	0.10	0.000	5.560	54
	7	10	29.983	9.867	0.10	0.556	5.004	54
	8	20	29.983	9.867	0.10	1.112	4.449	54
	9	30	29.983	9.867	0.10	1.668	3.893	54
	10	40	29.983	9.867	0.10	2.224	3.336	54
7	11	0	29.983	9.867	0.14	0.000	5.560	54
	12	10	29.983	9.867	0.14	0.556	5.004	54
	13	20	29.983	9.867	0.14	1.112	4.449	54
	14	30	29.983	9.867	0.14	1.668	3.893	54
	15	40	29.983	9.867	0.14	2.224	3.336	54
9	16	0	29.983	9.867	0.18	0.000	5.560	54
	17	10	29.983	9.867	0.18	0.556	5.004	54
	18	20	29.983	9.867	0.18	1.112	4.449	54
	19	30	29.983	9.867	0.18	1.668	3.893	54
	20	40	29.983	9.867	0.18	2.224	3.336	54
11	21	0	29.983	9.867	0.22	0.000	5.560	54
	22	10	29.983	9.867	0.22	0.556	5.004	54
	23	20	29.983	9.867	0.22	1.112	4.449	54
	24	30	29.983	9.867	0.22	1.668	3.893	54
	25	40	29.983	9.867	0.22	2.224	3.336	54

搅拌锅内搅拌。将代表性的土样按照配合比设计称重之后投入搅拌锅中搅拌,时间为 5 min 左右,确保搅拌均匀。根据水泥掺入比和水泥浆的水灰比,称取相应的水泥和水,掺和搅拌后配置成水泥浆。将配置好的水泥浆充分搅拌,直到搅拌均匀,制备好的试样如图 1 所示,最终放入养护池中进行标准养护。

根据《水泥土配合比设计规程》(JGJ T 233—2011),每组无侧限抗压强度的试验试件为 6 个,在试样养护 7、28、90 d 后进行脱模,并利用万能试验机测试水泥土试样的抗压强度,水泥土不同龄期的抗压强度如图 2 所示。由图 2 可知,水泥土养护 7 d 时,当膨润土掺量为 11%和粉煤灰掺量为 10%时抗压强度最大;水泥土养护 28 d 时,当膨润土掺量为 11%和粉煤灰掺量为 20%和 30%时抗压强度最大;水泥土养护 90 d 时,当膨润土掺量为 7%和粉煤灰掺量为 30%时抗压强度最大。

水泥土的强度随着龄期的增长而提高,一般在龄期超过 28 d 后仍有明显增长,本试验为积累地区经验,进行了 90 d 龄期的水泥土抗压强度试验,其 90 d 抗压强度如图 3 所示。由图 3(a)可知,随着粉煤灰的掺量的提高,水泥土的抗压强度呈现先增大后减小的趋势且在粉煤灰掺量为 20%和 30%时水泥土抗压强度达到最高;由图 3(b)可知,除了粉煤灰



(a) 抗压试块 (b) 抗剪试块

图 1 制备好的水泥土试样

Fig.1 Prepared cement-soil samples

### 3 试验结果与分析

#### 3.1 抗压强度试验

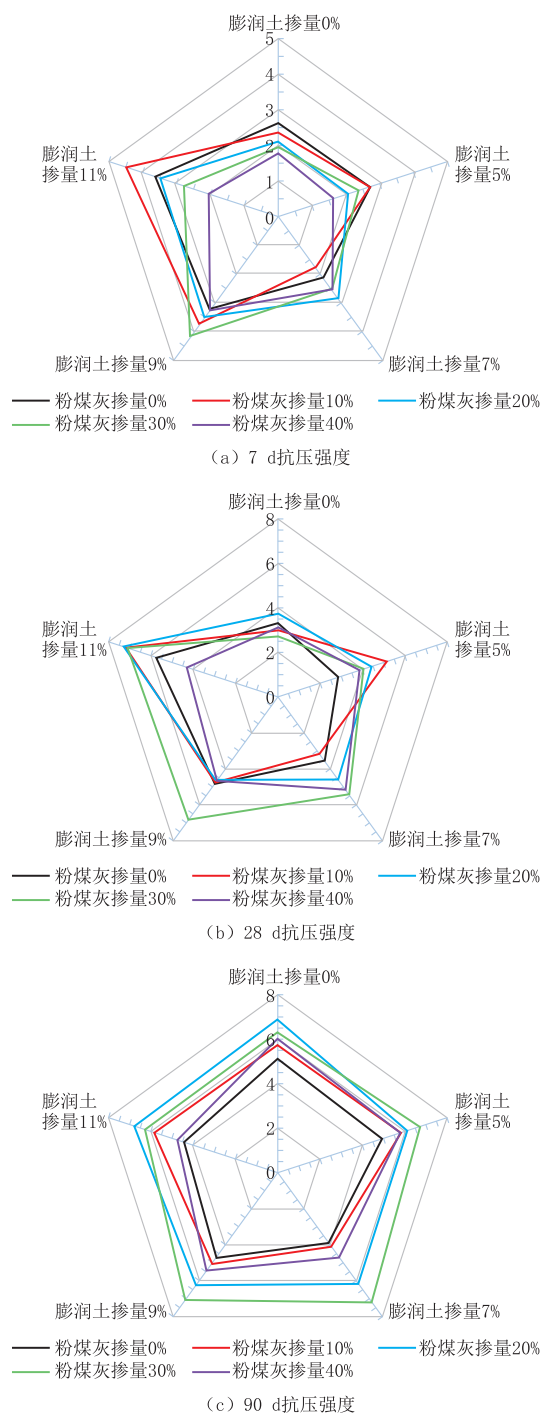


图 2 水泥土不同龄期的抗压强度

Fig.2 Compressive strength of the cement-soil over different waiting periods

掺量为 30%外,随着膨润土掺量的提高,水泥土抗压强度呈现先减小后缓慢增加,且均小于未掺加膨润土时的强度。

### 3.2 抗剪强度试验

水泥土抗剪强度试验试样采用  $\text{O}50 \text{ mm} \times 100$

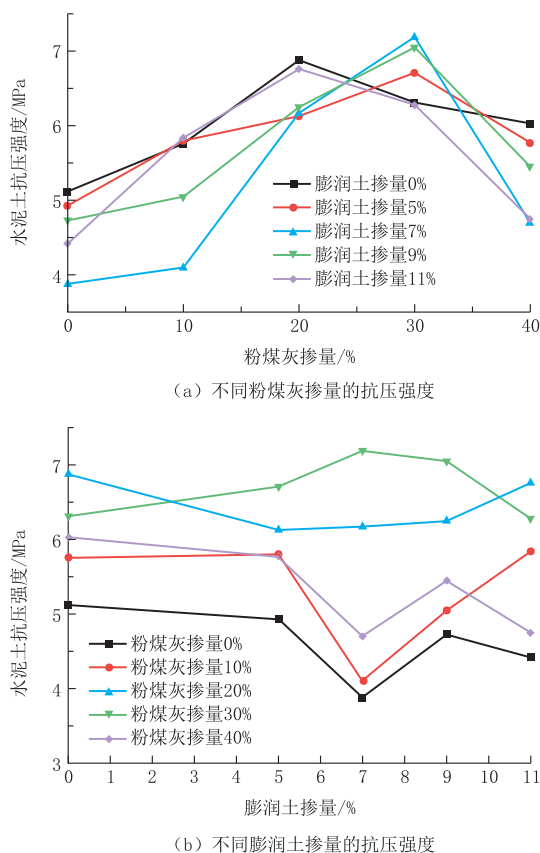


图 3 水泥土 90 d 抗压强度对比

Fig.3 Compressive strength comparison for the cement-soil of 90 days

mm,制备 3 组共 12 个试块,施加于试件的垂直压力分为 4 级,每级分别为 100、200、300、400 kPa。以 3 组试件的平均值作为每级垂直压力下的抗剪强度值。并对其每级垂直压力的抗剪强度平均值进行以垂直压力  $p$  为横坐标,抗剪强度平均值  $s$  为纵坐标进行拟合。所得到的拟合直线的倾角为内摩擦角  $\varphi$ ,直线的纵坐标上的截距为粘聚力  $c$ ,拟合方式如图 4 所示。最终得到的水泥土在不同的膨润土掺量的抗剪相关参数  $c$  和  $\varphi$  如图 5 所示。

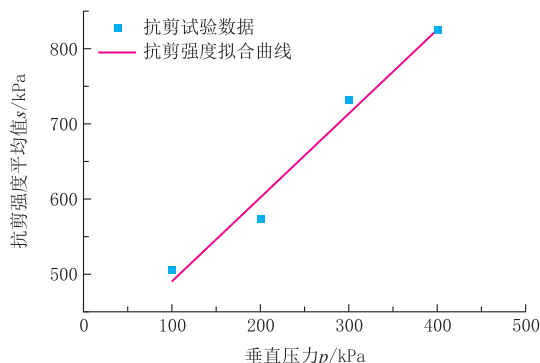


图 4 第一组数据拟合示例

Fig.4 Example of fitting of the first set of data



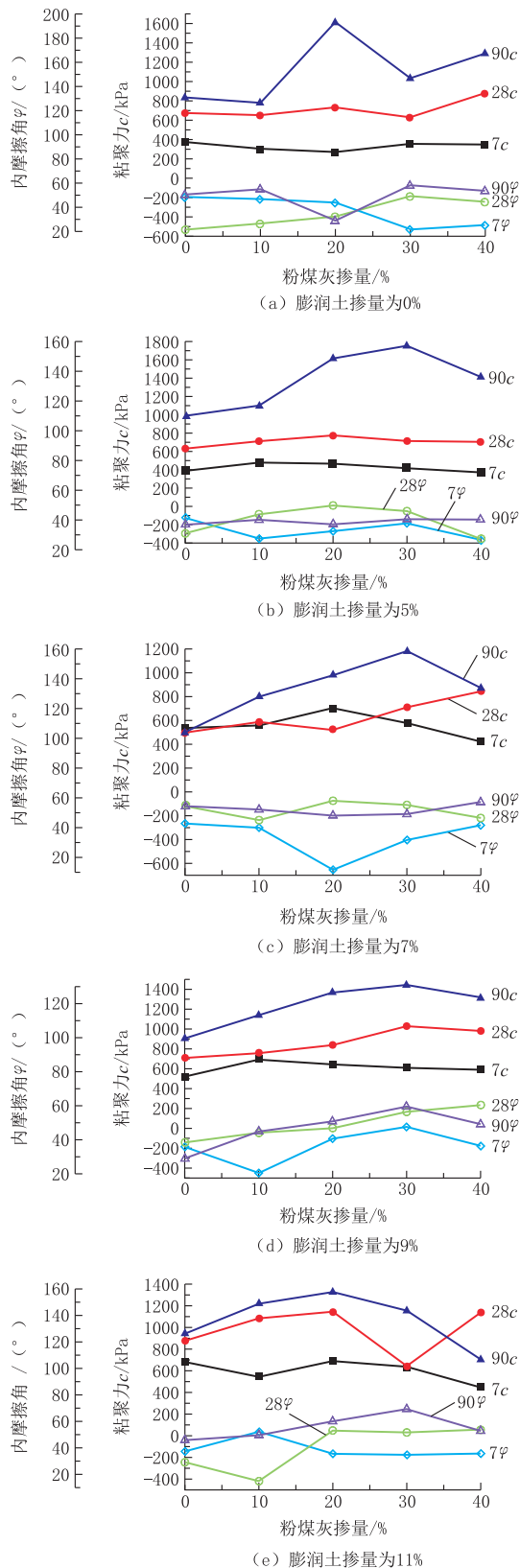


图5 水泥土在不同的膨润土掺量时的抗剪强度

Fig.5 Shear strength of the cement-soil with different bentonite amount

由图5可得,龄期为7和28 d的水泥土,随着膨润土和粉煤灰掺量的提高,水泥土的抗剪参数指标变化趋势不明显,但龄期为28 d的水泥土的粘聚力 $c$ 和内摩擦角 $\varphi$ 较7 d有所增大。龄期为90 d的水泥土,随着膨润土和粉煤灰掺量的提高,水泥土的粘聚力 $c$ 呈现先递增后缓慢减小;当膨润土掺量为0、粉煤灰掺量为20%时,水泥土的粘聚力 $c$ 达到最大值;当膨润土掺量为5%、7%、9%、粉煤灰掺量为30%时,水泥土的粘聚力 $c$ 达到最大值;当膨润土掺量为11%、粉煤灰掺量为20%时,水泥土的粘聚力 $c$ 达到最大值。

## 4 结论与展望

### 4.1 结论

本文通过对不同掺量的膨润土和粉煤灰双掺合剂水泥土抗压强度和抗剪强度参数指标的研究和对比分析,得到以下结论。

(1)粉煤灰和膨润土双掺合剂改良水泥土的抗压强度随着龄期的增加而变化,当粉煤灰和膨润土掺量分别为40%和11%时,28 d的水泥土抗压强度最大,为7.30 MPa;当粉煤灰和膨润土掺量分别为20%和7%时,90 d的水泥土抗压强度最大,为7.19 MPa。

(2)粉煤灰和膨润土双掺合剂改良水泥土的抗剪强度参数粘聚力随着龄期的增加而变化,当粉煤灰和膨润土掺量分别为20%和11%时,28 d的水泥土抗剪强度参数粘聚力 $c$ 最大,为1144.8 kPa;当粉煤灰和膨润土掺量分别为30%和5%时,90 d的水泥土抗剪强度参数粘聚力 $c$ 最大,为1753.71 kPa。

(3)通过对比粉煤灰和膨润土改良水泥土的抗压强度和抗剪强度,粉煤灰和膨润土改良的水泥土的抗压强度和抗剪强度均有明显的提高,并发现本次实验的粉煤灰的最佳掺量为20%~30%,膨润土的最佳掺量为5%~11%。

### 4.2 展望

近年来,水泥土在武汉地区的实际工程中应用越来越广泛,本文的研究成果可以为武汉地区的粉煤灰和膨润土改良水泥土的现场施工提供参考依据。测试结果受到试样制作方法、试样均匀性、养护条件(养护池养护7~90 d)等因素的制约和影响,势必会对测试结果造成影响,如何减少试样制作方面

的影响以及水泥土的抗渗性能,有待进一步的研究探索。

### 参考文献 (References):

- [1] 杨敏.浅谈水泥搅拌桩在路基软基处理中的应用[J].科技展望,2015(12):20-22.  
YANG Min. Application of cement mixing pile in soft foundation treatment of subgrade[J]. Technology Outlook, 2015(12):20-22.
- [2] 魏祥,梁志荣,李博,等. TRD 水泥土搅拌墙在武汉地区深基坑工程中的应用[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(S2): 222-226.  
WEI Xiang, LIANG Zhirong, LI Bo, et al. Application of TRD cement-soil wall in deep excavations in Wuhan area[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(S2): 222-226.
- [3] 张世轩,严学宁,王翠英. TRD 水泥土搅拌墙在基坑工程中的应用[J]. 湖北工业大学学报, 2019, 34(1): 38-43.  
ZHANG Shixuan, YAN Xuening, WANG Cuiying. Application of TRD to foundation pit engineering in Wuhan Forte of Hanzheng Street[J]. Journal of Hubei University of Technology, 2019, 34(1): 38-43.
- [4] 章兆熊,李星,谢兆良,等. 超深三轴水泥土搅拌桩技术及在深基坑工程中的应用[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(S2): 383-386.  
ZHANG Zhaoxiong, LI Xing, XIE Zhaoliang, et al. Ultra-deep triaxial mixed cement-soil pile technology and its application in deep foundation pits[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S2): 383-386.
- [5] 林云腾. 浅谈水泥土强度的影响因素[J]. 福建建设科技, 2011(6): 46-48.  
LIN Yunteng. Study on the factors affecting the strength of cement-soil [J]. Fujian Construction Science & Technology, 2011(6): 46-48.
- [6] 阮波,阮庆,田晓涛,等. 淤泥质粉质黏土水泥土无侧限抗压强度影响因素的正交试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2013, 10(6): 45-48.  
RUAN Bo, RUAN Qing, TIAN Xiaotao, et al. The study of the orthotropic test on cement-soil unconfined compressive strength of muddy silty clay[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2013, 10(6): 45-48.
- [7] 陈达,庄宁,廖迎娣,等. 水泥掺入比对水泥土力学特性影响的试验研究[C]//中国海洋学会. 第十五届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集. 北京:中国海洋出版社, 2011: 869-872.  
CHEN Da, ZHUANG Ning, LIAO Yingdi, et al. Experiment on the effect of the cement adding percentage on the mechanical properties of cement-soil[C]// Chinese Society of Oceanography. Proceedings of the fifteenth China ocean engineering symposium. Beijing: China Ocean Press, 2011: 869-872.
- [8] 陈燕平. 水泥土无侧限抗压强度室内试验影响因素探讨[J]. 福建建材, 2018(9): 8-10.  
CHEN Yanping. Discussion on influencing factors of unconfined compressive strength of cement soil in indoor test[J]. Fujian Building Materials, 2018(9): 8-10.
- [9] 艾志伟,邓通发. 水泥土强度的影响因素研究进展[J]. 公路, 2014, 59(1): 195-199.  
AI Zhiwei, DENG Tongfa. Research progress on influencing factors of cement-soil strength[J]. Highway, 2014, 59(1): 195-199.
- [10] 游波,王保田,李治朋,等. 水泥土无侧限抗压强度影响因素试验研究[J]. 现代交通技术, 2010, 7(5): 4-7.  
YOU Bo, WANG Baotian, LI Zhipeng, et al. Experimental research on influencing factors of unconfined compressive strength of cement soil[J]. Modern Transportation Technology, 2010, 7(5): 4-7.
- [11] 张晨辰,刘斯宏,张学峰. 膨胀土水泥改性掺灰量测定的龄期效应研究[J]. 南水北调与水利科技, 2012(5): 76-79.  
ZHANG Chenchen, LIU Sihong, ZHANG Xuefeng. Effect of ageing on determination of cement content in cement-modified expansive soil[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science and Technology, 2012(5): 76-79.
- [12] 侯少华,王国新,张红娟. 水泥改性土及水泥土处理膨胀土地基技术[J]. 人民黄河, 2012, 34(9): 133-134.  
HOU Shaohua, WANG Guoxin, ZHANG Hongjuan. Treatment technology of expansive soil foundation with cement modified soil and cement soil[J]. Yellow River, 2012, 34(9): 133-134.
- [13] 朱伟,林城,李磊,等. 以膨润土为辅助添加剂固化/稳定化污泥的试验研究[J]. 环境科学, 2007, 28(5): 1020-1025.  
ZHU Wei, LIN Cheng, LI Lei, et al. Solidification/stabilization (S/S) of sludge using calcium-bentonite as additive[J]. Environmental Science, 2007, 28(5): 1020-1025.
- [14] 任素琴. 不同掺量的粉煤灰对水泥土力学性能的影响[J]. 筑路机械与施工机械化, 2017, 34(1): 39-42.  
REN Suqin. Effect of fly ash content on mechanical properties of cemented soil[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2017, 34(1): 39-42.
- [15] 刘成才,郭艳坤,郭乐工. 粉煤灰掺量对水泥砾质土力学效应影响[J]. 公路工程, 2017, 42(6): 148-151, 198.  
LIU Chengcai, GUO Yankun, GUO Legong. Effect of fly ash content on mechanical effect of cement gravel soil[J]. Journal of Highway Engineering, 2017, 42(6): 148-151, 198.
- [16] 谢德良. 粉煤灰水泥土的强度特性试验研究[J]. 福建建材, 2016(6): 8-10.  
XIE Deliang. Experiment on strength behavior of fly ash cement-soil[J]. Fujian Building Materials, 2016(6): 8-10.
- [17] 李俊哲,方光秀. 双掺粉煤灰硅粉对水泥土抗压强度影响试验研究[J]. 山西建筑, 2016, 42(7): 113-115.  
LI Junzhe, FANG Guangxiu. Silicon powder-experimental study on the influence of the fly ash to the strength of cement-soil[J]. Shanxi Architecture, 2016, 42(7): 113-115.

(编辑 周红军)