

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2017.09.003

工业废渣用于地下工程止水帷幕的试验

张明飞^{1,2}, 童立元^{1,3}, 郑灿政^{1,2}, 程亮^{1,2}

(1.东南大学岩土工程研究所,南京 210096;2.江苏省城市地下工程与环境安全重点实验室,南京 210096;
3.济南轨道交通集团,济南 250101)

摘要:等厚度水泥土搅拌连续墙作为止水帷幕,具有适应地层广、成墙品质好等独特的优点;但在推广过程中的最大障碍是造价过高;若粉煤灰和矿渣等工业废渣替代部分水泥,则其应用范围将大大提高。为测试工业废渣代替水泥的性能,笔者做了大量无侧限抗压强度和渗透性试验。试验结果表明:性能差别不大的情况下,粉煤灰和矿渣可以部分替代水泥;复合水泥土存在最优配合比,对于黏土,最佳掺入比为30%,最佳水固比为0.6;对于砂土,最佳掺入比则为40%,最佳水固比为0.6;总体而言,粉煤灰配合砂土的物理力学性质较优,矿渣则更适合黏土。添加粉煤灰或矿渣的黏土长期强度接近;而添加粉煤灰的砂土强度平均值比添加矿渣大2.4倍,同时更加稳定。添加粉煤灰的黏土和砂土平均渗透系数是添加矿渣的35%左右。

关键词:粉煤灰;矿渣;无侧限抗压强度;渗透系数;等厚度水泥土搅拌连续墙

中图分类号:TU46

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2017)09-019-11

Experimental application of the industrial waste to the waterproof curtain in underground engineering

ZHANG Mingfei^{1,2}, TONG Liyuan^{1,3}, ZHENG Canzheng^{1,2}, CHENG Liang^{1,2}

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, P.R.China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Urban Underground Engineering and Environmental Safety, Southeast University, Nanjing 210096, P.R.China; 3. Jinan Rail Transit Group Co., Ltd., Jinan 250101, P.R. China)

Abstract: As one of the waterproof curtains, trench cutting re-mixing deep wall (TRD) possesses unique advantages of fitting most layers and getting good qualities, however, the high cost hinders its popularization. Thus, if cement can be partly substituted by cheaper fly ash, slag and other industrial waste, the application scope of TRD will be greatly enlarged. In order to verify the performance of the cement replaced by industrial waste, the authors conduct a lot of strength and permeability tests. And results show that fly ash and slag can substitute partially for cement and there is an optimal mixture ratio for the composite cement soil. The best mixing ratio and water-solid ratio is 30% and 0.6 respectively for clay, and 40% and 0.6 for sand. Generally, the physical and mechanical properties will be superb when fly ash mixing with sand, while slag is more suitable for clay. The long-term strength of clay is close when

收稿日期:2017-02-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(4157020433);国家科技支撑计划资助项目(2012BAJ01B02)。

Supported by National Natural Science Foundation of China(4157020433), and National Key Technology Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China(2012BAJ01B02).

作者简介:张明飞(1989—),男,博士,主要从事地下工程、地下水方面的研究,(E-mail)362621158@qq.com。

adding fly ash or slag, while the average strength of sand after adding fly ash is more stable and 2.4 times larger than that of sand adding slag. In addition, the average permeability coefficient of clay and sand after adding fly ash is about 35% than that of clay and sand adding slag.

Keywords: fly ash; slag; unconfined compressive strength; permeability coefficient; TRD

等厚度水泥土搅拌连续墙(TRD, trench cutting re-mixing deep wall)作为止水帷幕,在国外得到广泛应用,但由于价格因素,始终未能大范围推广使用。尤其是 TRD 工法,是日本开发的较为新型的地下支护形式,凭借其墙体均匀、止水性好、厚度一致,表面平整,H 型钢设置灵活等优点,在深基坑工程中越来越得到重视和应用^[1]。国内的研究大多集中在工法介绍、工法特点、工效及材料消耗数量等方面^[2]。吴国明^[3]和王卫东等^[4]采用国产化的 TRD-E 型工法主机及配套设备做了非原位试成墙试验,为上海地区乃至全国超深 TRD 工法设计与施工提供了参考。汤怡新^[5]通过大量的试验论述了水泥固化土的基本特性,在此基础上总结出水泥土中水泥掺量和抗压强度之间的关系。郭红梅^[6]研究得出:水泥固化土早期抗压强度的增长速率与水泥固化的龄期几乎呈直线关系,而且增长速率较大。侯永峰^[7]认为,掺加适量的粉煤灰可以提高水泥土强度,但掺加过量的粉煤灰,会降低水泥土强度。Chao Y^[8]通过压汞实验表明粉煤灰主要改变了孔体积分布,其范围为 0.01~1 μm,由于二次水化反应产生胶结物。Katsumi T^[9]做了膨润土应用于 TRD 的试验,表明较高浓度的 C_a^{2+} 对渗透系数影响明显。Gularte F^[10]通过室内外试验证明,添加矿渣-海泡石的水泥土可使 TRD 渗透系数降低至 10^{-7} cm/s。

文中通过减少水泥的比重,用工业废渣,如粉煤灰和矿渣替代大部分的水泥配置固化剂,在不影响 TRD 工程效果的情况下降低工程造价,同时减少环境污染。

1 试验

1.1 实验材料

试验所用黏性土土样的物理性质指标见表 1,试验材料如表 2~表 5 所示。

表 1 黏土的物理性质指标

Table 1 The clay physical property indexes

土 样	含水量 $\omega/\%$	颗粒相对密度 G	液限 $\omega_L/\%$	塑限 $\omega_p/\%$	塑性指数 IP	渗透系数 $k/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$
黏 土	35	2.75	48.7	23.8	24.9	1.740×10^{-5}

表 2 试验材料来源

Table 2 Test material sources

土 样	材料来源
黏土	东南大学九龙湖校区土木交通大楼施工场地
砂土	厦门艾思欧公司标准砂有限公司生产
水泥	徐州矿务局水泥厂生产(425#)
粉煤灰	徐州电厂所生产的 F 类、I 级
矿渣	南京钢铁厂生产的高炉矿渣
石灰	南京化学试剂有限公司生产的生石灰
水玻璃	成都市科龙化工试剂厂生产

表3 粉煤灰物理性能表

Table 3 The physical properties of fly ash

物理性能	密度/(g·cm ⁻³)	细度/%	含水量/%
数值	2.05	11.6	0.21

表4 粉煤灰化学成分表

Table 4 The chemical composition of fly ash

成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O
含量/%	51.4	28.2	3.4	5.8	1.3	1.1	0.9	0.7

表5 矿渣化学成分表

Table 5 The chemical composition of slag

成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	MnO	SO ₃
含量/%	33.59	16.19	39.20	0.60	8.12	0.19	2.45

1.2 试验方案

实际 TRD 工程中,抗压强度不低于 0.8 MPa,要求 28 d 的渗透系数不低于 10^{-7} cm/s,将此设定为试验目标。实际中,水泥掺量为 25%,故所有试验配比中,固化剂的总掺量(下称总掺量)恒为 25%,目的是用工业废渣(粉煤灰、矿渣)替代大部分的水泥,作为固化剂使用。表 6~表 8 所示为水泥以及粉煤灰和矿渣代替水泥的试验设计。

表6 仅添加水泥试验设计

Table 6 Experimental design of add only cement

编号	水泥掺量/%	总掺量/%	水固比
1	100	25	0.6 : 1

表7 粉煤灰替代部分水泥试验设计

Table 7 Experimental design of fly ash replace part of cement

编号	掺入比/%			总掺量/%	水玻璃/%	水固比
	水泥	粉煤灰	石灰			
2	10	78	12	25	3	0.6 : 1
3	20	69	11			0.6 : 1
4	30	61	9			0.6 : 1
5	40	52	8			0.6 : 1
6	30	61	9			0.8 : 1
7	30	61	9			1.0 : 1

表 8 矿渣替代部分水泥试验设计

Table 8 Experimental design of Slag replace part of cement

编 号	掺入比/%			总掺量/%	水玻璃/%	水固比
	水泥	矿渣	石灰			
8	10	78	12			0.6 : 1
9	20	69	11			0.6 : 1
10	30	61	9	25	3	0.6 : 1
11	40	52	8			0.6 : 1
12	30	61	9			0.8 : 1
13	30	61	9			1.0 : 1

1.3 试样制作

使用黏土和砂土 2 种原料,按照上述试验方案添加各种固化剂和外掺剂,每种配比每个龄期制作 2 组平行试样,制作试样的数目和类型如表 9 所示。无侧限抗压强度试验及渗透试验均按《土工试验方法标准》(GBT 50123—1999) 进行。

表 9 试样的数目和类型

Table 9 Number and type of samples

试样名称	试样尺寸/cm	试样用途	试样个数
大试样	直径:约 5; 高:约 10	用作无侧限抗压强度测试	156
备用试样	直径:约 5; 高:约 10	以备试验试样损坏	26

1.4 试验结果

通过正交试验,对养护龄期、水固比、掺入比、拌合土料、固化剂进行优选,由于篇幅所限,部分结果如表 10 所示。(水固比 0.6 : 1 称为 0.6,下同)

表 10 部分试验结果

Table 10 Part of the test results

养护龄期/d	水固比/%	掺入比/%	拌合土料	固化剂	强度/kPa
7	0.6	30	砂土	矿渣	130.78
7	0.6	10	黏土	矿渣	260.31
7	0.6	10	黏土	粉煤灰	267.01
7	0.8	30	黏土	粉煤灰	477.08
7	0.6	40	黏土	粉煤灰	758.18
14	0.6	20	砂土	粉煤灰	261.20
14	1.0	30	黏土	粉煤灰	419.83
14	0.8	30	黏土	粉煤灰	501.66

续表10

养护龄期/d	水固比/%	掺入比/%	拌合土料	固化剂	强度/kPa
14	0.6	20	黏土	粉煤灰	615.9
14	0.6	40	砂土	粉煤灰	637.3
14	0.6	100	黏土	矿渣	2 388.33
28	0.6	30	砂土	矿渣	255.77
28	0.6	100	黏土	粉煤灰	2 795.11

2 渗透试验结果及分析

对 7 d,14 d,28 d 水泥石试样进行渗透系数试验,进行曲线拟合,结果如表 11~表 12 所示。

表 11 黏土试样渗透系数曲线拟合结果

Table 11 Clay sample permeability coefficient curve fitting results

Y(渗透系数)	X	拟合方程	相关系数
7 d+粉煤灰	掺入比	$Y=1.6E^{-5}-9.0E^{-7}X+1.5E^{-8}X^2-6.6X^3$	0.99
14 d+粉煤灰	掺入比	$Y=7.8E^{-8}+5.1E^{-4}\exp(-X/1.4)$	0.98
28 d+粉煤灰	掺入比	$Y=1.9E^{-8}+1.3E^{-3}\exp(-X/1.2)$	0.99
7 d+矿渣	掺入比	$Y=1.9E^{-6}-1.3E^{-7}X+2.4E^{-9}X^2$	0.99
14 d+矿渣	掺入比	$Y=2.0E^{-6}-1.4E^{-7}X+2.7E^{-9}X^2$	0.99
28 d+矿渣	掺入比	$Y=1.6E^{-6}-1.3E^{-7}X+2.9E^{-9}X^2$	0.98
7 d+粉煤灰	水固比	$Y=-9.2E^{-7}+1.6E^{-6}X$	0.99
14 d+粉煤灰	水固比	$Y=-5.5E^{-7}+8.9E^{-7}X$	0.92
28 d+粉煤灰	水固比	$Y=-1.5E^{-7}+2.3E^{-7}X$	0.96

表 12 砂土试样渗透系数曲线拟合结果

Table 12 Sand sample permeability coefficient curve fitting results

Y(渗透系数)	X	拟合方程	相关系数
7 d+粉煤灰	掺入比	$Y=-2.5E^{-7}+1.0E^{-5}\exp(-X/32.8)$	0.99
14 d+粉煤灰	掺入比	$Y=-4.7E^{-8}+1.5E^{-5}\exp(-X/11.0)$	0.99
28 d+粉煤灰	掺入比	$Y=2.2E^{-8}+4.9E^{-5}\exp(-X/9.5)$	0.99
7 d+矿渣	掺入比	$Y=-2.5E^{-6}+2.0E^{-4}\exp(-X/20.8)$	0.98
14 d+矿渣	掺入比	$Y=-2.7E^{-6}+1.9E^{-4}\exp(-X/18.6)$	0.94
28 d+矿渣	掺入比	$Y=-8.0E^{-8}+8.9E^{-5}\exp(-X/9.5)$	0.99
7 d+粉煤灰	水固比	$Y=-5.5E^{-4}+1.5E^{-3}X-8.8E^{-4}X^2$	0.99
14 d+粉煤灰	水固比	$Y=-3.8E^{-4}+9.9E^{-4}X-5.9E^{-4}X^2$	0.99
28 d+粉煤灰	水固比	$Y=-2.9E^{-4}+7.6E^{-4}X-4.6E^{-4}X^2$	0.99

黏土和砂土试样渗透系数与水泥掺入比的关系如图 1~图 2 所示(纵轴为对数坐标),添加粉煤灰的试样渗透系数与水固比的关系如图 3 所示(纵轴为对数坐标)。

由图 1~图 3 和表 11~表 12,可得:

- 1) 水泥掺入比 30% 时,大部分黏土试样的渗透系数达到极小值;而对于砂土,水泥掺入比大于 40% 后,渗透系数变化不大。
- 2) 28 d 龄期时,当水固比为 0.6 时,砂土试样的渗透系数满足要求;无论哪种水固比,黏土试样均满足要求。
- 3) 龄期为 7 d 添加剂为粉煤灰的黏土渗透系数与掺入比接近 3 次曲线,黏土添加矿渣的渗透系数与掺入比的关系以及砂土添加粉煤灰的渗透系数与水固比的关系接近二次曲线,黏土添加粉煤灰的渗透系数与水固比的关系接近一次曲线,其余接近指数函数。
- 4) 砂土的渗透系数随龄期的变化逐渐稳定,而黏土在 30% 处出现极小值。
- 5) 随着水固比的提高,黏土的渗透系数一直提高,砂土先提高后降低。
- 6) 粉煤灰对于砂土的止水效果均高于矿渣,而矿渣对于黏土的止水效果,仅当 7 d 时,高于粉煤灰,其余则低于粉煤灰。

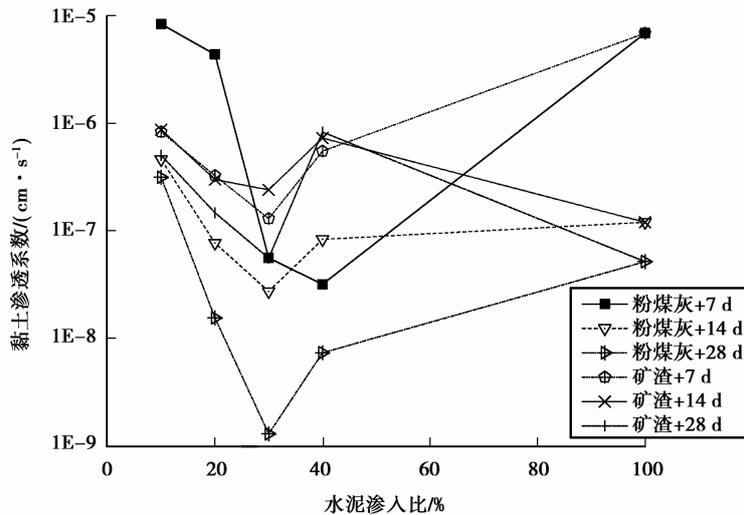


图 1 黏土试样渗透系数与水泥掺入比的关系

Fig. 1 Relationship between permeability coefficient and the cement mixing ratio in the clay samples

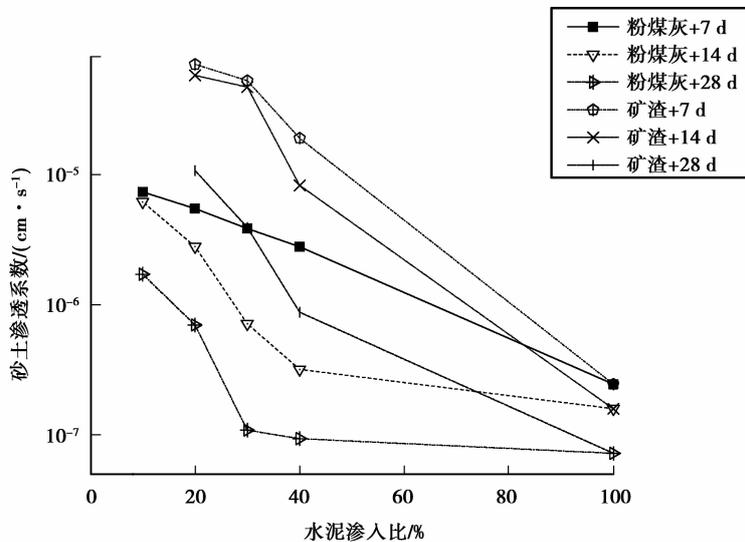


图 2 砂土试样渗透系数与水泥掺入比的关系

Fig. 2 Relationship between permeability coefficient and the cement mixing ratio in the sand samples

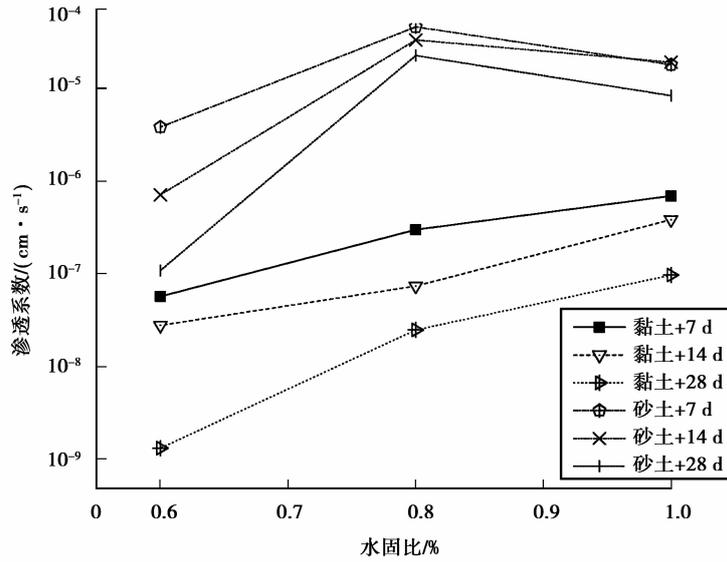


图 3 添加粉煤灰的黏土和砂土试样渗透系数与水固比的关系

Fig. 3 Relationship between permeability coefficient and the water-solid in the clay and sand samples adding fly ash

3 强度试验结果及分析

通过对 7 d, 14 d, 28 d 水泥土试样进行无侧限抗压强度试验(以下简称强度), 得到不同水泥土试件的无侧限抗压强度, 并进行曲线拟合, 7 d, 14 d, 28 d 的拟合结果如表 13~表 15 所示。黏土和砂土试样的无侧限抗压强度与水泥掺入比的关系如图 4~图 5 所示, 添加粉煤灰的试样渗透系数与水固比的关系如图 6 所示。

3.1 同一龄期试验结果

3.1.1 7 d 龄期

由图 4~图 6 以及表 13 所示, 可得如下结论:

- 1) 水泥掺量与试样强度呈正相关;
- 2) 水泥掺量相同时, 添加矿渣的黏土强度比添加粉煤灰强度高; 而粉煤灰对于砂土的固化效果更好;
- 3) 水泥土强度均随着水固比的增长而呈线性降低, 0.6 的水固比具有更好的固化效果;
- 4) 水泥掺入比的影响大于水固比。

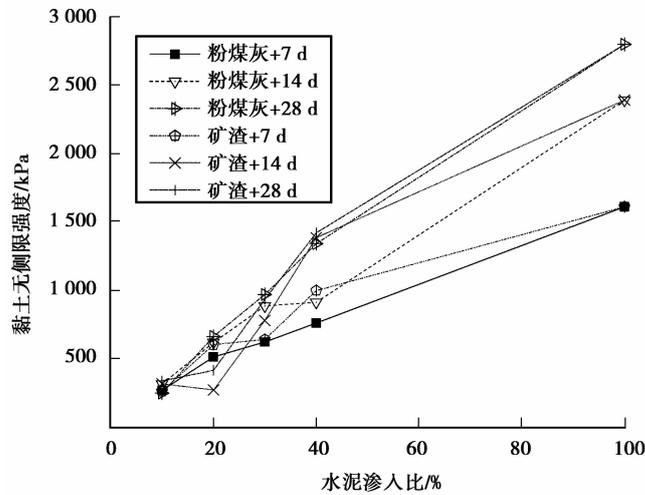


图 4 黏土试样无侧限抗压强度与水泥掺入比的关系

Fig. 4 Relationship between unconfined compressive strength and the cement mixing ratio in the clay samples

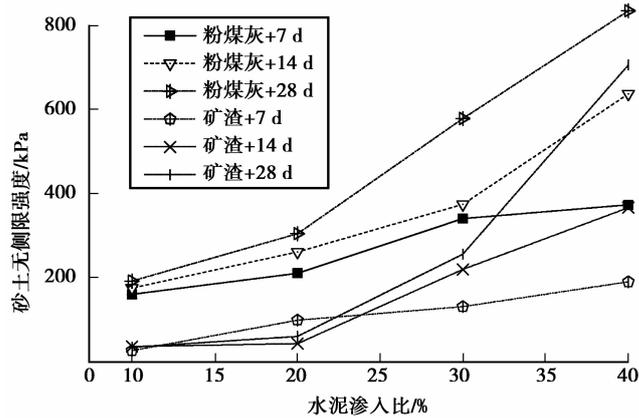


图 5 砂土试样无侧限抗压强度与水泥掺入比的关系

Fig. 5 Relationship between unconfined compressive strength and the cement mixing ratio in the sand samples

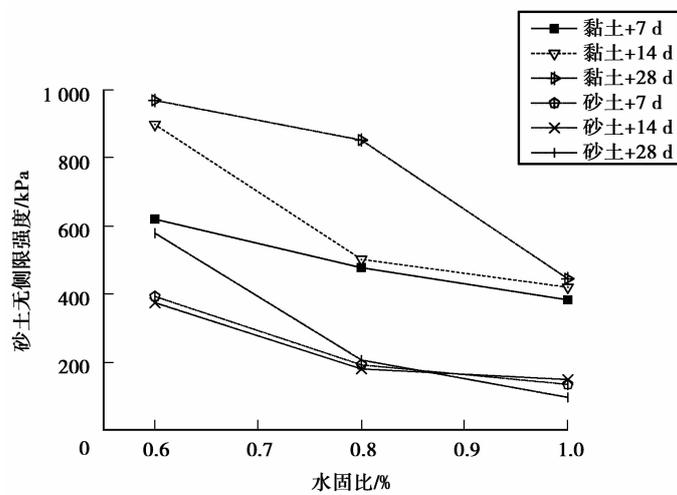


图 6 添加粉煤灰的黏土和砂土试样抗压强度与水固比的关系

Fig. 6 Relationship between unconfined compressive strength and the water-solid in the clay and sand samples adding fly ash

表 13 7 d 龄期试验曲线拟合结果

Table 13 Curve fitting results of the 7 d age test

Y(无侧限抗压强度)	X	拟合方程	相关系数
黏土+粉煤灰	掺入比	$Y=14.4(X+12.2)$	0.99
黏土+矿渣	掺入比	$Y=14.0(X+18.4)$	0.97
砂土+粉煤灰	掺入比	$Y=7.7(X+10.2)$	0.97
砂土+矿渣	掺入比	$Y=5.2(X-3.7)$	0.99
黏土	水固比	$Y=-591.7(X-1.6)$	0.99
砂土	水固比	$Y=644.9(X-1.2)$	0.95

3.1.2 14 d 龄期

由 14 d 试验结果以及曲线拟合,可得如下结论:

1)对于黏土,添加粉煤灰的强度大于添加矿渣,与 7 d 试验结果相比,粉煤灰试样的强度平均提高 30%;

2)对于砂土,添加粉煤灰的试样强度依旧大于添加矿渣的试样,粉煤灰对于砂土的固化效果更好;

3)水泥土强度均随着水固比的增长而呈线性降低,0.6 的水固比具有更好的固化效果,类比文献[3]中的方程 $q_u = k(C - C_0)$ (式中 k 为固化系数, C_0 为水泥土最低配方量),试样强度与水泥掺入比的最低配方量不稳定,但与水固比的最低配方量稳定均为 -1.4 左右。

表 14 14 d 龄期试验曲线拟合结果

Table 14 Curve fitting results of the 14 d age test

Y(无侧限抗压强度)	X	拟合方程	相关系数
黏土+粉煤灰	掺入比	$Y=22.6(X+9.5)$	0.98
黏土+矿渣	掺入比	$Y=23.1(X+2.4)$	0.99
砂土+粉煤灰	掺入比	$Y=15.0(X-0.86)$	0.96
砂土+矿渣	掺入比	$Y=11.7(X-10.8)$	0.95
黏土	水固比	$Y=-1192.6(X-1.3)$	0.93
砂土	水固比	$Y=-564.0(X-1.2)$	0.92

3.1.3 28 d 龄期

由 28 d 试验结果及曲线拟合,可得如下结论:

1)相同掺量的情况下,添加粉煤灰的黏土试样长期强度与添加矿渣的试样强度基本一致,说明粉煤灰和矿渣对黏土的长期固化效果接近;

2)粉煤灰对于砂土的固化效果更好;

3)0.6 的水固比具有更好的固化效果。

表 15 28 d 龄期试验曲线拟合结果

Table 15 Curve fitting results of the 28 d age test

Y(无侧限抗压强度)	X	拟合方程	相关系数
黏土+粉煤灰	掺入比	$Y=27.5(X+3.7)$	0.99
黏土+矿渣	掺入比	$Y=28.0(X+2.1)$	0.98
砂土+粉煤灰	掺入比	$Y=22.0(X-3.3)$	0.98
砂土+矿渣	掺入比	$Y=22.1(X-13.1)$	0.92
黏土	水固比	$Y=-1307.9(X-1.4)$	0.95
砂土	水固比	$Y=-1204.0(X-1.1)$	0.95

3.2 不同龄期试验结果对比分析

通过对不同龄期试验数据的整理,得到如图 4~图 6 所示的关系。分析可知:

1) 水泥土的强度与龄期呈正比;

2) 对于黏土试样,在 28 d 龄期,当水泥与其他固化剂之比大于 3 : 7 时,其强度可以满足工程需求(实际工程要求 28 d 强度不低于 0.8 MPa);

3) 对于砂土试样,在 28 d 龄期,当水泥与粉煤灰之比大于 4 : 6 时,其强度可以满足工程需求,添加矿渣的水泥土试样强度不能满足工程要求;

4) 无侧限抗压强度随水固比的提高而降低,水固比相同时,添加粉煤灰的黏土试样平均强度是砂土试样的 2.8 倍。

5) 随着水泥掺入比的提高,添加矿渣的试样强度波动比粉煤灰大,说明矿渣的稳定性比粉煤灰差;并且当水泥掺入比为 20% 时,矿渣的 7 d, 14 d, 28 d 的龄期强度依次降低,这与其他掺入比的结果相反。

4 结 论

1) 在用于 TRD 墙体的复合水泥土中,用工业废渣,如粉煤灰和矿渣,替代部分水泥的方法是可行的。复合水泥土最优配合比,对于黏土,最佳掺入比为 30%,最佳水固比为 0.6;对于砂土,最佳掺入比为 40%,最佳水固比为 0.6。

2) 不同工业废渣对于复合水泥土的影响不同,总体而言,粉煤灰配合砂土的物理力学性质较优,矿渣则更适合黏土。

3) 添加粉煤灰或矿渣的黏土长期固化强度接近,但后者的 7 d 早期强度平均值比前者大 10%;而添加粉煤灰比添加矿渣的砂土强度平均值大 2.4 倍,更加稳定。

4) 14 d 和 28 d 龄期,添加粉煤灰黏土平均渗透系数是添加矿渣的 38%,但 7 d 早期时,则是 5 倍;而无论何时,添加粉煤灰的砂土渗透系数平均值是添加矿渣的 30%。

参考文献:

[1] 王刚. TRD 围护结构深基坑施工变形规律研究[D]. 南昌:南昌航空大学, 2013.

WANG Gang. Study on the deformation of TRD enclosure structure deep foundation pit construction [D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2013. (in Chinese)

[2] 王凡. 雨润广场深基坑止水帷幕 TRD 工法应用及效果评价 [D]. 济南:山东大学, 2013.

WANG Fan. The application and effect evaluation of TRD construction in waterproof curtain of Yurun Plaza deep foundation pit project[D]. Jinan: Shangdong University, 2013. (in Chinese)

[3] 吴国明, 章兆熊, 谢兆良. TRD 工法在上海国际金融中心 56.73 m 非原位成墙试验中的应用[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(2): 814-818.

WU Guoming, ZHANG Zhaoxiong, XIE Zhaoliang. Application of TRD method in non-in-situ tests on 56.73 m-wall of Shanghai International Financial Center [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(2): 814-818. (in Chinese)

[4] 王卫东, 翁其平, 陈永才. 56 m 深 TRD 工法搅拌墙在深厚承压含水层中的成墙试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(11):

3247-3252.

WANG Weidong, WENG Qiping, CHEN Yongcai. Experimental investigation of construction of a 56 m deep constant thickness cement-soil wall using trench cutting re-mixing deep wall (TRD) method in deep aquifers [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(11): 3247-3252. (in Chinese)

[5] 汤怡新, 刘汉龙, 朱伟. 水泥固化土工程特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(5): 549-554.

TANG Yixin, LIU Hanlong, ZHOU Wei. Study on engineering properties of cement-stabilized soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(5): 549-554. (in Chinese)

[6] 郭红梅, 马培贤. 夯实水泥土强度特性的试验研究[J]. 勘察科学技术, 2001 (4): 27-31.

GUO Hongmei, MA Peixian. Experimental study of the strength characteristics of compacted cement soil [J]. Site Investigation Science and Technology, 2001 (4): 27-31. (in Chinese)

[7] 侯永峰, 张航, 周建, 等. 循环荷载作用下水泥复合土变形性状试验研究[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(3): 288-291.

HOU Yongfeng, ZHANG Hang, ZHU Jian, et al. Study on the Strain of composite cement soil under cycle loading [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(3): 288-291. (in Chinese)

[8] Chao Y, Songyu L, Yongfeng D. Experimental research for the application of mining waste in the trench cutting remixing deep wall method [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2015.

[9] Katsumi T, Kamon M, Inui T, et al. Hydraulic barrier performance of SBM cut-off wall constructed by the trench cutting and re-mixing deep wall method [C]// Geocongress, 2008:628-635.

[10] Gularte F, Barneich J, Burton J, et al. First use of TRD construction technique for soil mix cutoff wall construction in the united states [J]. GeoDenver, Denver, CO, February, 2007: 18-21.

(编辑 陈移峰)