

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2015.04.015

矿渣和粉煤灰固化南沙软土试验研究

周世宗, 梁仕华, 戴君

(广东工业大学 土木与交通工程学院, 广东 广州 510006)

摘要:以普通硅酸盐水泥为基础,分别以矿渣、粉煤灰换掺水泥对广州南沙软土进行固化处理,得出了固化土体的内摩擦角、黏聚力、无侧限抗压强度随各种固化剂掺入量及龄期的变化关系。通过电子显微镜观测(SEM)和X射线衍射技术(XRD)研究了不同固化土样的微观结构特征和土样的矿物组成。研究表明:在一定换掺量下,矿渣对水泥的换掺效果明显,其对于南沙软土的固化能力优于水泥,而且固化土后期强度增长速率较快;相反,粉煤灰对水泥的换掺效果却不佳,其固化软土的能力比矿渣弱得多。

关键词:固化土;矿渣;粉煤灰;无侧限抗压强度;水化产物

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2015)04-0076-04

Experimental Research of Nansha Soft Soil Reinforced by Slag and Fly Ash

ZHOU Shizong, LIANG Shihua, DAI Jun

(School of Civil and Transportation Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510006, China)

Abstract: Based on the addition of ordinary Portland cement, soft soil reinforced by slag or fly ash in Nansha (China) was studied. The effects of slag or fly ash ratio and curing period on the internal friction angle, cohesion and the unconfined compressive strength (UCS) of the reinforced soil were researched. Scanning electron microscope (SEM) observation and x-ray diffraction technique (XRD) were conducted to study different microstructure characteristics and the mineral composition of different reinforced soil samples. The results showed that the replacement effect of slag was very obvious and its ability of solidifying Nansha soft soil was better than that of cement, and that the strength of soil reinforced by slag increased faster in the late curing period. On the contrary, the replacement effect of fly ash was ineffective and its ability of solidifying soft soil was much weaker than that of slag.

Keywords: reinforced soil; slag; fly ash; unconfined compressive strength; hydration products

南沙位于广州的南部,地处珠江出海口和珠江三角洲的前缘地带,其分布着大范围的软土,该地区软土的含水率高、抗压强度低,它们能否得到有效的固化处理直接关系到该区的工程建设。水泥是目前国内外最常用的土壤固化剂,Mostafa A. Ismail等^[1]对水泥种类对水泥土强度影响进行了研究。但水泥加固土体时受土类别影响,特别在处理腐殖质含量高的土层时,其固化效果在一定程度上会降低,而增加水泥用量或加入外掺剂又必然会增大成本。

矿渣作为一种来源广泛的工业副产品,具有价格低廉,抗海水腐蚀^[2]能力强等优点。黄宏伟(1998)在对上海市西部某地区的灰色淤泥质黏土进

行固化时,采用的是水泥和高炉矿渣混合固化剂,其固化效果明显优于单掺水泥。曾卫东^[3]提出用矿渣硅酸盐水泥可以减小有机质的影响。黄汉盛等^[4]在固化深圳沿海地区软土时发现,用矿渣换掺一定量水泥可以增加水泥土的抗压强度,并且指出增大矿渣换掺量能有效提高水泥土的抗腐蚀性。

粉煤灰是燃煤电厂源源不断的排放物,有效利用粉煤灰可以降低环境的污染。周承刚等^[5]提出当粉煤灰掺量与水泥一样时,固化土的抗压强度比单掺水泥时增加约10%。Kolias^[6]等采用粉煤灰与水泥对软黏土进行固化时,发现随着粉煤灰掺量的增加,固化土的塑性降低,抗压强度提高。SeishiTomo-

收稿日期:2015-04-03

修稿日期:2015-05-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(511788112);珠江科技新星专项(2011J2200018);广东省高等教育高层次人才项目(2050205)

作者简介:周世宗(1989—),男,广东东莞人,硕士研究生,研究方向为岩土工程。E-mail:1435520237@qq.com

hisa 等^[7]使用粉煤灰加固土体取得了较好的效果,而且指出固化土强度的提高主要是因为水化铝酸钙和水化硅酸钙的生成。ShenbagaR. Kaniraj 等^[8]建立了水泥掺量和粉煤灰掺量、强度与龄期之间的函数关系。

利用电镜扫描和 X 射线衍射研究土或水泥土的微观结构近年来得到了重视。Chew 等^[9]利用这种方法分析了新加坡海相软土采用水泥加固后的工程特性和水化产物之间的关系。

本文利用矿渣或粉煤灰对目前最常用的水泥固

化剂进行替代,以不同换掺量配制混合固化剂对南沙软土进行固化处理,通过测试固化土体的内摩擦角、黏聚力和无侧限抗压强度来评价固化效果,并通过电镜扫描和 X 射线衍射对固化土进行微观分析,最后得出该地区软土固化的适用替代材料。

1 固化土室内试验研究

1.1 原状土物理力学特性

本次试验用土取自广州市南沙区蕉门水道附近,其基本物理参数如表 1 所示。

表 1 试验软土的物理指标

含水率 ω /%	湿密度 ρ /($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	干密度 ρ_d /($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	土粒比重 G_s	孔隙比 e	液限 ω_L /%	塑限 ω_P /%	液性指数 I_L	塑性指数 I_P
70	1.67	1.09	2.7	1.74	52.8	38.1	2.12	14.7

1.2 试验材料与试验制备

本试验水泥采用广州石井牌 42.5 级普通硅酸盐水泥,矿渣采用广东产高炉矿渣粉,粉煤灰采用韶关某燃煤电厂排出的主要固体废物,原料的化学成

分见表 2。试验前期将取回的土样烘干,温度控制在 $105^\circ\text{C} \sim 110^\circ\text{C}$ 范围内,烘干时间大约 8 h,过 2 mm 筛,用塑料袋密封备用。

表 2 原料的化学成分

原料	CaO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Loss
水泥	62.36	4.27	22.65	5.74	0.85	1.08	1.04
矿渣	44.12	1.26	35.55	13.26	1.1	1.32	0.92
粉煤灰	2.61	2.47	53.69	30.86	0.64	0.83	6.1

单位: %

直剪试验土样由内径 61.8 mm 高 20 mm 的环刀制备;无侧限抗压强度试验土样由内径 39 mm 高 80 mm 的三瓣模制备。制备方法:用矿渣和水泥制成混合固化剂,矿渣占固化剂的比例分别取 0%、20%、40%、60%、80%,而固化剂总掺入比均为 25% (总质量为干土、水和混合固化剂质量之和)。按一定配比称取适量干土、矿渣与水泥,置于配样桶中,充分混合,然后按照原含水率及 0.5 水灰比掺水,搅拌均匀。将洗净的三瓣模组装好(内壁涂一层薄凡士林),置于涂有凡士林的玻璃片上,将土体分 3 层~5 层加入模中捣实、整平、覆盖玻璃片,放入塑料袋密封,置于装满水的密封箱中至龄期试验。环刀制样与三瓣模类似,每组试验制作三个平行试样,如果三个试验值之间的差值都不超过 20%,则取其平均值;若某个试验值与其他两个相差均超过 20%,则按另外两个计算平均值;若三个试验值均差别较大,则试验重做。粉煤灰与水泥固化剂的配制方法同上。

试样制备完成后,将其置于自然条件下养护 1 d 后脱模,再将其放入温度为 $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$,相对湿度 $\geq 95\%$ 标准养护箱内养护,直至所需龄期。试验完成后,把少量残留土体烘干,再进行电镜扫描和 X 射线衍射试验。

1.3 试验结果及数据分析

1.3.1 固化土强度随掺入量的变化

以固化剂总掺入量 25% 为基准,分别以矿渣和粉煤灰换掺水泥固化软土,从表 3 可以看出,当矿渣掺入量占固化剂的比例不超过 60% 时,随着矿渣掺入量的增加,水泥固化土的内摩擦角和无侧限抗压强度都有一定程度的增大,但增大不明显,而黏聚力的提高比较明显,但当该比例超过 60% 后,固化土的三个指标都随即下降。而从表 4 可以看出,换掺粉煤灰的固化土,其内摩擦角、黏聚力和无侧限抗压强度的降幅接近 80%,这表明粉煤灰换掺效果不佳,粉煤灰换掺量的增加会使固化土强度大幅度降低。

表 3 矿渣 - 水泥固化南沙软土试验数据

矿渣占固化剂比例/%	内摩擦角/(°)			黏聚力/kPa			无侧限抗压强度/kPa		
	7 d	15 d	28 d	7 d	15 d	28 d	7 d	15 d	28 d
0	25.12	27.62	30.02	192.54	224.86	268.24	872	985	1080
20	26.25	27.41	30.21	199.57	229.96	305.09	902	975	1120
40	26.78	27.64	30.54	219.15	250.84	335.64	923	998	1173
60	27.21	28.21	30.68	234.22	256.77	357.23	972	1025	1200
80	24.42	25.21	27.58	160.62	185.78	250.54	840	890	1060

1.3.2 固化土强度随龄期的变化

从表 3 可以看出,随着龄期的增加,换掺矿渣的水泥土强度发生较大变化。从 7 d~15 d 和 15 d~28 d,矿渣与水泥固化土的内摩擦角、黏聚力和无侧限抗压强度都呈现前期强度增长速率小,后期强度增长速率大的特点。而且矿渣掺量越大,其后期强

度增长也明显,这说明矿渣主要在后期强度中起作用。而从表 4 可以看出,粉煤灰与水泥固化土的内摩擦角、黏聚力、无侧限抗压强度均随龄期的增加而增大,而且其前后期增长速率接近,这说明掺入粉煤灰的水泥土前后期增长速率基本相同。

表 4 粉煤灰 - 水泥固化南沙软土试验数据

粉煤灰占固化剂比例/%	内摩擦角/(°)			黏聚力/kPa			无侧限抗压强度/kPa		
	7 d	15 d	28 d	7 d	15 d	28 d	7 d	15 d	28 d
0	25.12	27.62	30.02	192.54	224.86	268.24	872	985	1080
20	17.48	24.76	30.38	142.87	169.82	213.85	637	859	1010
40	13.41	15.86	18.90	99.39	114.46	133.81	450	535	678
60	9.03	10.31	12.73	48.47	67.82	99.19	159	205	315
80	6.11	7.14	8.79	17.11	20.31	25.66	90	120	150

2 固化土微观结构特征分析

已有研究表明,土的内部结构在很大程度上决定了其物理力学性质,任何复杂的物理力学性质都能通过微观结构体现出来,通过对土体微观结构特征的深入研究,可以了解土体力学行为机制^[10-15]。为了进一步对掺入矿渣的水泥固化土进行研究,对不同掺量固化土进行扫描电子显微镜观测和 X 射线衍射,通过电子显微图片和 XRD 图谱,分析不同成分固化土的微观结构和矿物成分。

先把养护 28 d 之后不同矿渣和粉煤灰掺量的水泥固化土样进行烘干处理,再用日本电 JSM - 6490LV 型扫描电镜和日本理学 X - 射线衍射仪对土样进行扫描分析,得到矿渣与水泥固化土和粉煤灰与水泥固化土的主要成分和电镜扫描照片。

2.1 矿渣与水泥固化土微观结构特征

(1) 图 1 是 28 d 龄期矿渣占固化剂比例为 60% 时水泥土放大 3000 倍的 SEM 图。从图 1 中可以看出,矿渣与水泥固化土含有大量粗大的结晶物,结晶体多呈针状、棒状分布于土体中,而且结构单元体多

呈团聚状结构出现。可见矿渣与水泥混合固化剂在土中随着时间的增长不断地结晶,使土颗粒胶结在一起,土颗粒从接触连结变为胶结连结,从而增强土的结构强度。固化土中孔隙变的很少,土也变得十分的密实。

(2) 掺入矿渣的水泥固化土强度特征是其微观特征的宏观反映,两者密切相关。通过扫描电镜观察发现,硅酸盐水化物普遍地存在于固化土颗粒表面和颗粒之间。通过 X 射线衍射技术,可分析出这些物质是水化铝酸钙(C - A - H)和水化硅酸钙(C - S - H)。两者在土中形成“粒状·镶嵌·胶结”结构,这种结构使土的结构性增强,从而提高固化土的强度。在掺入矿渣的水泥固化土中,这种产物普遍存在,而且该产物随着矿渣掺量的增加而增加,当矿渣占固化剂的比例达到 60% 时,这种产物最多,如图 2 所示,这也是黏聚力和无侧限抗压强度在这时达到最大的原因。矿渣主要由 SiO₂、CaO、MgO、Al₂O₃ 等成分组成,其中具有潜在活性的成分是 SiO₂ 和 Al₂O₃。水泥水化反应产生的 Ca(OH)₂ 是一种碱性激发剂,与矿渣中的活性 Al₂O₃、SiO₂ 反应进一步生成 C

-S-H 和 C-A-H,从而提高固化土的抗压强度。

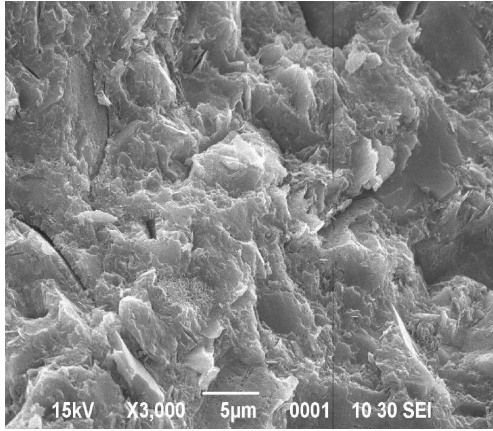


图 1 矿渣占固化剂比例为 60%时固化土放大 3000 倍 SEM

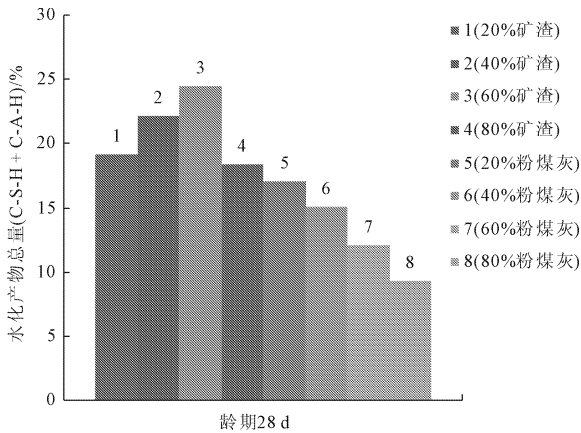


图 2 不同固化土中水化产物总量对比

2.2 粉煤灰与水泥固化土微观结构特征

(1) 从图 3 可以明显看出,当粉煤灰占固化剂的比例增大到 60%时,水泥固化土的结构性大大减弱,土主要以片状结构存在,土颗粒骨架很松散,孔隙大且多,土颗粒间的胶结性很弱。

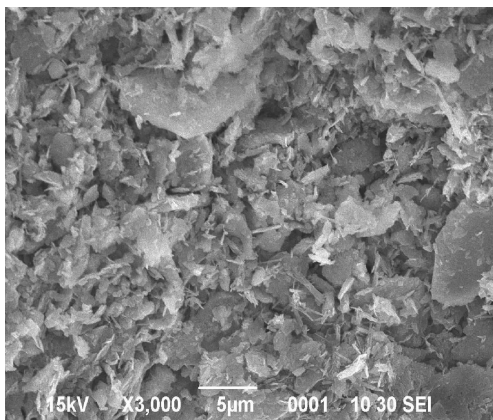


图 3 粉煤灰占固化剂比例为 60%时固化土放大 3000 倍 SEM

(2) 粉煤灰的化学成分种类与矿渣几乎一样,但粉煤灰中 CaO 的含量却很少,从图 2 可以看出,由于 CaO 的数量很少,必然会导致 C-A-H 和 C-S-H 生成量减少。水泥水化产物的大量减少使土体之间的胶接能力减弱,土的的抗剪强度和无侧限抗压强度都明显减少。

3 结 论

(1) 以 25% 混合固化剂为基准,矿渣占固化剂比例小于 60% 时,固化土体的内摩擦角、黏聚力和无侧限抗压强度都随矿渣掺量的增加而增大。相反,固化土体以上的三个指标都随粉煤灰掺量的增加而大幅度降低。这说明,对于固化南沙软土,矿渣比粉煤灰效果更明显。

(2) 矿渣与水泥固化土和粉煤灰与水泥固化土的强度均随龄期的增长有一定的提高,其中,矿渣与水泥固化土后期强度增长更快,而粉煤灰与水泥固化土强度随着时间的增长较平稳。

(3) 从微观结构上看,掺入矿渣的水泥土是因为生产大量的 C-S-H 和 C-A-H 等水化产物,该水化产物充填土颗粒间的孔隙并把土颗粒胶结在一起,使土的结构性加强,从而提高土的抗压强度。而掺入粉煤灰的水泥土,由于粉煤灰替代量的增加,使 CaO 大量减少,从而减少水化产物的生成,降低水泥土的强度。

参考文献:

- [1] Ismail M A, Joer H A, Sim W H, et al. Effect of cement type on shear behavior of cemented calcareous soil[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, 128(6): 520-529.
- [2] 周承刚,高俊良.水泥土强度的影响因素[J].煤田地质与勘探,2001,29(1):45-48.
- [3] 曾卫东,唐雪云,何泌洲.深层搅拌法在处理泥炭质土中的应用[J].地质灾害与环境保护,2002,13(2):67-69.
- [4] 黄汉盛,鄢泰宁,兰 凯.软土深层搅拌桩的水泥土抗腐蚀性室内研究[J].地质科技情报,2005,24(增刊):85-88.
- [5] 周承刚,高俊良,李曦滨.粉煤灰在搅拌地基处理时对水泥土强度的影响[J].河北建筑科技学院学报,2001,18(1):78-80.
- [6] Koliass S, Kasselouri - RigoPoulou V, Karahalios A. Stabilisation of clayey soils with high calcium fly ash and cement [J]. Cement & Concrete Composites, 2005, 27(2): 301-313.