文章编号:1005-0523(2023)04-0033-07

高强粉质黏土-水泥搅拌土固化剂配比研究

刘银芳[1],胡椿华[2],秦金龙[3],童立红[2],朱碧堂[2],郭易盟[2],李志平[2]

(1. 福建岩土工程勘察研究院有限公司,福建 福州 350001; 2. 华东交通大学江西省地下空间技术开发工程研究中心,江西 南昌 330013; 3. 核工业华东建设工程集团有限公司,江西 南昌 330013)

摘要:为提高粉质黏土-水泥搅拌土强度,使其与钢筋或型钢共同作用形成水泥土搅拌墙。以南昌地区粉质黏土为例,在现有水泥土改良剂性能研究基础上,通过选择合适的固化剂,采用正交试验,对16组粉质黏土改良方案形成的搅拌土开展室内无侧限抗压强度试验和渗透试验,研究水泥、水玻璃、生石膏和生石灰不同配比对粉质黏土改良后强度性能的影响,并对试验结果进行了极差和方差分析。结果表明:对搅拌土的抗压强度影响程度从大到小依次为水泥掺量、水玻璃掺量、生石膏和生石灰掺量,确定粉质黏土固化改良的最优配比为水泥掺入比24%、水玻璃6%、生石膏2%、生石灰0、萘系减水剂1.5%,并推荐在水灰比为1.5、粉质黏土含水率为12%时使用。经过筛选固化剂和优化配比后,粉质黏土在标准龄期28 d时强度可以达到8.6 MPa。最后通过扫描电镜试验,对高强粉质黏土-水泥搅拌土的微观结构进行了分析,阐述了高强水泥搅拌土的产生机理。

关键词:粉质黏土;正交试验;水泥土;固化剂;无侧限抗压强度;微观结构

中图分类号:TU472 **文献标志码**:A

本文引用格式:刘银芳,胡椿华,秦金龙,等. 高强粉质黏土-水泥搅拌土固化剂配比研究[J]. 华东交通大学学报,2023,40(4):33-39.

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2023.04.010

Study on Curing Agent Ratio of High Strength Silty Clay-Cement Mixed Soil

Liu Yinfang[1], Hu Chunhua[2], Qin Jinlong[3], Tong Lihong[2], Zhu Bitang[2], Guo Yimeng[2], Li Zhiping[2]

(1. Fujian Geotechnical Engineering Investigation and Research Institute Co., Ltd., Fuzhou 350001, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical Infrastructure Safety and Control of Jiangxi Province, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 3. Nuclear Industry Eastern China Construction Engineering Group Co., Ltd., Nanchang 330013, China)

Abstract: To improve the strength of silty clay-cement mixed soil, a cement-soil mixed wall is formed by making it work together with steel bars or sections. In this paper, taking the powdered clay soil in Nanchang area as an example, based on the existing research on the performance of cement soil improver, indoor unconfined compressive strength test and permeability test were conducted on the mixed soil formed by 16 groups of silty clay improvement schemes through selecting suitable curing agents and using orthogonal test to study the effects of different ratios of cement, water glass, gypsum and quicklime on the strength performance of the improved silty clay. The results were analyzed by the range analysis and variance analysis. The results showed that the compressive strength of the mixed soil was influenced by the amount of cement, water glass, gypsum and quicklime in descending order, and the optimal ratio of cement, water glass, gypsum, quicklime and naphthalene water reducing agent was determined to be 24%, 6%, 2%, 0 and 1.5%, and was recommended to be used when the wa-

收稿日期:2023-01-08

基金项目:中国冶金地质总局2021年科研项目(CMGBK202102);江西省科技合作专项项目(20212BDH81034)

ter-cement ratio was 1.5 and the moisture content of the silty clay was 12%. After screening the curing agent and optimizing the proportion, the strength of the silty clay could reach 8.6 MPa at the standard age of 28 d. Finally, the microstructure of the high-strength silty clay-cement mixed soil was analyzed by scanning electron microscope test, and the mechanism of the generation of high-strength cement mixed soil was elaborated.

Key words: silty clay; orthogonal test; soil mixing; curing agent; unconfined compressive strength; microstructure

Citation format: LIU Y F, HU C H, QIN J L, et al. Study on curing agent ratio of high strength silty clay-cement mixed soil[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2023, 40(4): 33-39.

在SMW工法中，水泥土搅拌墙常作为止水帷幕，未考虑其强度在基坑开挖支护中的贡献。随着绿色基坑支护技术的发展，有必要在满足低渗透率基础上，提高水泥土搅拌墙的强度，从而合理地考虑水泥土在支护结构中的贡献。粉质黏土作为水泥土搅拌墙常用原材料，其强度低、结构性差，往往需要通过合理的手段改良加固后才能应用于实际工程建设中[1-2]。改良粉质黏土强度的方法有很多，例如：夯实[3]、干湿循环[4]、冻融[5]以及外掺固化剂[6]等。经过已有研究可知，通过物理的方法改变粉质黏土的性质对其强度影响都不大[7-9]。

经研究发现，外掺固化剂对粉质黏土抗压强度影响较为显著，其中无机、有机类高分子合成材料或盐溶液等固化剂通过水化反应、离子吸附交换和凝聚作用等，增强土体内部颗粒之间的联结作用，从而使土体更加密实和稳定[10]。江守慈等[11]对不同水泥掺入比(20%、25%和30%)水泥土的强度特性进行了分析，试验结果表明随着水泥掺入比的提高，水泥土的无侧限抗压强度相应增大。Phetchuay等[12]在粉质黏土中加入粉煤灰和电石渣，研究发现两种材料能提高其工程性能。何财胜等[13]将不同掺量的水泥、石膏和水玻璃加入水泥土中进行室内强度试验，通过对试验结果比较分析发现三种材料对水泥土强度的影响程度大小，并且得到最优固化剂配合比，确定了掺合料的掺入量与水泥用量之间存在一个比例关系。Nalbantoglu等[14]在黏土中加入石灰和粉煤灰可以有效地改良黏土的物理性质，例如减小其膨胀性和可压缩性等。Bozbey等[15]使用不同掺量石灰对黏土进行改良，对试验结果分析发现，石灰能够有效地提高了黏土的塑性、压缩强度等力学性质。根据以上学者的研究表明，水泥、水玻璃、石灰和石膏等固化剂对粉质黏土无侧限抗压强度都有一定增强效果，且搅拌土无侧限抗压强度与加入的固化剂种类有关，不同固化剂对其抗压强度影响程度不同。

本文以南昌地区粉质黏土为例，通过正交试验探究水泥掺入比、水玻璃掺量、生石膏掺量和生石灰掺量对水泥搅拌土的抗压强度的影响，最终确定固化剂最优配比组合，并且通过扫描电镜试验，对高强粉质黏土-水泥搅拌土的微观结构进行了分析，阐述了高强水泥搅拌土的产生机理。

1 试验

1.1 试验材料

本试验采用南昌市地铁4号线七里站地段粉质黏土作为原料土，随机从中取出部分土样进行室内物理试验，得到其力学指标如表1所示。先将原料土放入烘箱中进行烘干处理，温度控制在105 ℃左右，时间超过8 h，之后用工具击碎烘干后的土样，过5 mm筛出去大粒径杂质，最后将制备好的土放置于密封塑料桶中以备试验使用。

表1 试验土样的物理参数

Tab.1 Physical parameters of the test soil samples

Soil sample	Water content/%	Wet density/(g/cm^3)	Porosity ratio	Liquidity index	Compression factor/MPa	Compression modulus/MPa	Cohesion/kPa	Angle of internal friction/(°)
Silty clay	12	1.801	0.801	0.309	0.284	6.373	34.680	20.529

本试验用主固化剂为普通硅酸盐水泥，标号等级为 42.5，江西赣江海螺水泥有限责任公司生产。试验用外掺剂有生石膏：主要成分为 $CaSO_4 \cdot 2H_2O$；生石灰：其主要成分为 CaO，灼烧后氧化钙含量不低于 98%；水玻璃，硅酸钠水溶液，呈无色半透明黏稠状；萘系减水剂：萘磺酸盐甲醛缩合物，呈褐色粉末状；砂：产自南昌市天然河砂，细度模数为 3.32。

1.2　正交试验方案

本试验采用正交试验设计安排，对照组配比为水泥掺量 20%、萘系减水剂掺量 1.5%，将该正交试验基准组命名为 S 组。在此基础上，本文确定 4 个考察因素，分别为：水泥掺量、水玻璃掺量、生石膏掺量和生石灰掺量，对应将 4 个因素命名为：因素 A、因素 B、因素 C 和因素 D，其中每个因素包含 4 个水平，采用正交表为 L16(44)，所选用的因素及对应水平列于表 2。

表 2　正交试验方案的因素水平表

Tab.2　Factor levels for the orthogonal test protocol

%

Dosage level	Cement blending	Water glass dosage	Raw gypsum dosing	Lime dosing
Level 1	20	0	0	0
Level 2	16	2	2	2
Level 3	24	4	3	3
Level 4	28	6	4	4

1.3　试样的制备

试验制作时，先称取一定质量的干土样置于立式砂浆搅拌机，按照设计含水率加水搅拌至均匀，再依次加入一定比例的水泥和各外掺剂组分充分搅拌，并按照水灰比的设定，加入一定量的水，充分搅拌至均匀后得到拌和物，待用于制样。根据《水泥土配合比设计规程》(JGJ/T 233—2011)的规定，每组配合比制作 12 个边长 70.7 mm 的立方体试块，该正交试验共 16组，共计制备 192 个有效试样。待试样制作完成后，随后进行拆模、养护，待养护龄期达到 7 d 和 28 d 后将其取出，进行强度试验。拆模前水泥土试块如图 1 所示。

1.4　扫描电镜试验

本次试验采用扫描电子显微镜(SEM)对水泥搅拌土的微观结构特性以及内部微观形貌进行观测和分析。

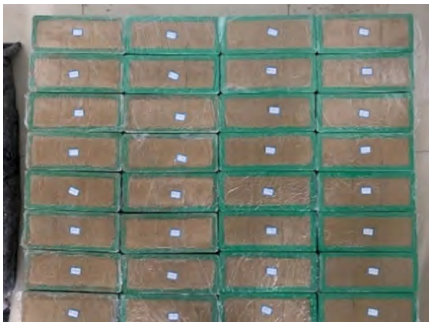


图 1　水泥土试样

Fig.1　Cement soil specimen

2　试验结果与分析

2.1　正交试验结果

水泥土试块养护到 7 d 和 28 d 后分别进行无侧限抗压强度试验，对应试验方案及计算结果如表 3。

根据正交试验设计，以水泥土 7 d 和 28 d 无侧限抗压强度为评价指标，由正交试验结果可以得到每个因素各个掺量水平下搅拌土的强度值，并绘制其影响趋势图，如图 2(a)和图 3(b)所示。

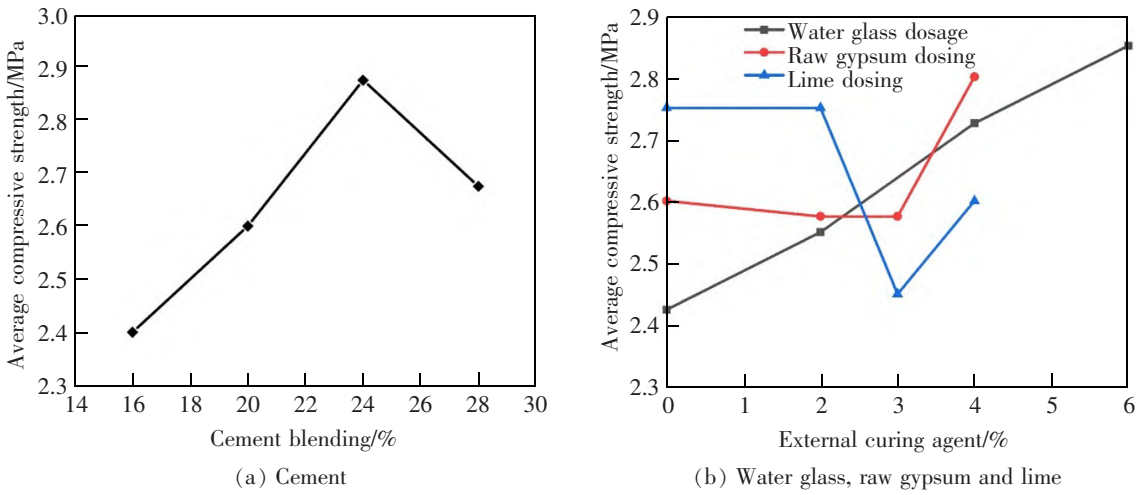
对比图 2(a)和图 3(b)可知，7 d 和 28 d 龄期时四个因素在各水平掺量下与搅拌土抗压强度的关系趋势比较相近。从图 2(a)和图 3(b)可以看出，当水泥掺入比从 16%提升至 24%过程中，搅拌土的无侧限抗压强度一直增长，但随着水泥掺入比增加到 28%，强度反而减小。同样，随着水玻璃和生石膏的掺入比变大，搅拌土的无侧限抗压强度总体呈现上升趋势。但在搅拌土 28 d 龄期时，水玻璃掺入比从 0%增长到 2%其无侧限抗压强度反而减小；在搅拌土 7 d 龄期时，石膏掺入比从 0%增长至 3%其无侧限抗压强度也在减小。对于生石灰，在其掺入比达到 2%的时候，搅拌土的无侧限抗压强度达到最大。搅拌土强度增加的原因是生成水化产物：钙矾石晶体和硅酸钙凝胶，它们相互结合填充孔隙，使搅拌土内部更加紧实。

另外，结合表 3 给出的正交试验中各种固化剂对搅拌土 7 d 龄期无侧限抗压强度影响的试验结果，养护龄期为 7 d 时，第 12 组试验的强度是最高的，其值为 3.2 MPa，相较于基准对照组 2.3 MPa，强度提升了 39%，其试验条件为：A3B4C2D1，此时试验配比为：水泥掺入比 24%、水玻璃 6%、生石膏 2%、生石灰 0%。由表 4 可知，养护龄期为 28 d 时，

表3 7 d和28 d龄期正交试验表

Tab.3 Orthogonal test at 7 d and 28 d

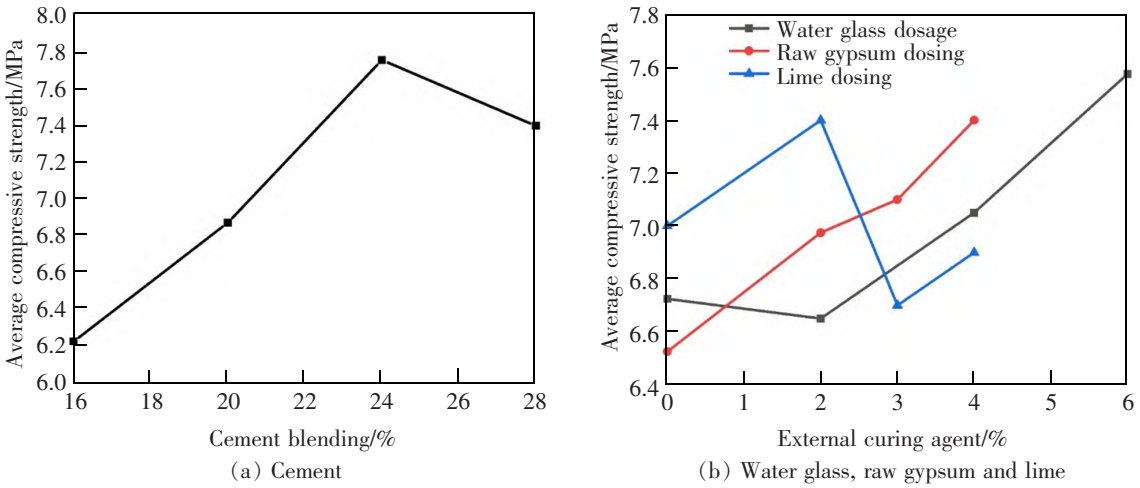
Test item	Influencing factors and column numbers					Compressive strength without lateral limit/MPa	
	Cement blending	Water glass dosage	Raw gypsum dosing	Lime dosing	Error estimation		
	1	2	3	4	5	7 d	28 d
S	1(20%)	1(0)	1(0)	1(0)	1	2.3	5.7
ZJ-2	1(20%)	2(2%)	2(2%)	2(2%)	2	2.3	5.8
ZJ-3	1(20%)	3(4%)	3(3%)	3(3%)	3	2.3	6.3
ZJ-4	1(20%)	4(6%)	4(4%)	4(4%)	4	2.7	6.7
ZJ-5	2(16%)	1(0)	2(2%)	3(3%)	4	2.1	5.9
ZJ-6	2(16%)	2(2%)	1(0)	4(4%)	3	2.5	6.2
ZJ-7	2(16%)	3(4%)	4(4%)	1(0)	2	2.9	6.9
ZJ-8	2(16%)	4(6%)	3(3%)	2(2%)	1	2.9	8.2
ZJ-9	3(24%)	1(0)	3(3%)	4(4%)	2	2.5	7.1
ZJ-10	3(24%)	2(2%)	4(4%)	3(3%)	1	2.8	7.8
ZJ-11	3(24%)	3(4%)	1(0)	2(2%)	4	3	7.4
ZJ-12	3(24%)	4(6%)	2(2%)	1(0)	3	3.2	8.6
ZJ-13	4(28%)	1(0)	4(4%)	2(2%)	3	2.8	8.2
ZJ-14	4(28%)	2(2%)	3(3%)	1(0)	4	2.6	6.8
ZJ-15	4(28%)	3(4%)	2(2%)	4(4%)	1	2.7	7.6
ZJ-16	4(28%)	4(6%)	1(0)	3(3%)	2	2.6	6.8



(a) Cement (b) Water glass, raw gypsum and lime

图2 7 d各因素的实际掺量与抗压强度的关系

Fig.2 Relationship between the actual dosing and compressive strength of each factor at 7 d



(a) Cement　　(b) Water glass, raw gypsum and lime

图 3　28 d 各因素的实际掺量与抗压强度的关系

Fig.3　The relationship between the actual dosing and compressive strength of each factor at 28 d

第 12 组试验的强度也是最高的，其值为 8.6 MPa，同比基准对照组 5.7 MPa，搅拌土强度提升了 51%，其试验条件为：A3B4C2D1。对试验结果分析发现，生石灰对搅拌土抗压强度的影响略大于生石膏。

综合上述试验结果与分析，在搅拌土的正交试验中，使用第 12 组配合比浇筑时搅拌土强度达到最大值，因此选定用于粉质黏土固化改良的最优配比为：水泥掺入比 24%、水玻璃 6%、生石膏 2%、生石灰 0、萘系减水剂 1.5%。为了方便表述，将此配比中的外掺剂命名为固化剂 DH。基于正交试验，推荐在水灰比为 1.5、粉质黏土含水率为 12%左右的条件下使用固化剂 DH。

2.2　极差分析

按照正交试验的分析方法，对表 3 结果进行处理，得到正交试验极差表，见表 4。

表 4　正交试验极差表

Tab.4　Range of orthogonal test

Mechanical properties	Age/d	Factor			
		A	B	C	D
Compressive Strength without lateral limit	7	0.475	0.425	0.225	0.3
	28	1.6	0.925	0.875	0.7

由表 4 中抗压强度的各因素极差值可以看出，搅拌土试块 7 d 龄期和 28 d 时水泥掺量对搅拌土抗压强度的影响最大，这也与一般规律吻合，其次是水玻璃掺量，但在搅拌土试块 7 d 龄期时生石灰掺量比生石膏掺量对搅拌土抗压强度影响大，而 28 d 龄期时正好相反。

2.3　方差分析

以 28 d 无侧限抗压强度试验结果为例，进行单变量方差分析，结果如表 5 所示。

$F_{0.01}(3,6)=9.78$，$F_{0.05}(3,6)=4.76$，$F_{0.1}(3,6)=3.29$。如果 $F>F_{0.01}(3,6)$，则说明该因素对指标有显著影响，即用符号“＊＊”表示；如果 $F_{0.05}(3,6)<F<F_{0.01}(3,6)$，则说明该因素对指标有一定程度影响，即用符号“＊”表示；如果 $F_{0.1}(3,6)<F<F_{0.05}(3,6)$，则说明该因素对指标有影响；如果 $F<F_{0.1}(3,6)$，则说明该因素对指标几乎没有影响。

表 5　28 d 无侧限抗压强度试验结果方差分析

Tab.5　Variance analysis of 28 d lateral limitless compressive strength test results

Factor	Deviation sum of squares	Degree of freedom	Mean Square	F	Signif-icance
A	3.602	3	1.201	14.267	＊＊
B	2.833	3	0.944	11.218	＊＊
C	2.003	3	0.668	7.931	＊
D	2.107	3	0.702	8.347	＊

由表 5 可知，水泥掺入比和水玻璃掺量对搅拌土 28 d 抗压强度均有显著影响，但水泥掺量是影响搅拌土的主要因素，其次是水玻璃掺量，生石膏掺量和生石灰掺量对搅拌土 28 d 抗压强度有一定程度影响。这与极差分析结果略有不同，但都证明了

添加这4种外掺剂是改良搅拌土的有效加固手段。

2.4 因素指标分析

由于极差分析法的局限性,不能很准确地证实各因素对指标的影响,同时不能把试验条件改变引起的数据波动和由误差的数据波动区分开[16],为减小误差,需对各因素贡献率的计算进行分析,各因素贡献率结果见表6。

表6 28 d抗压强度下各因素与误差的贡献率结果

Tab.6 Results of the contribution of each factor to the error at 28 d compressive strength

Factor	Partial variance	Degree of freedom	Pure sum of squares of deviations	Contribution rate
A	3.602	3	3.349	31.02
B	2.833	3	2.58	23.89
C	2.003	3	1.75	16.21
D	2.107	3	1.854	17.17
Error	0.253	3	1.265	11.71
Sum	10.798	15		

由表6中搅拌土28 d抗压强度下各因素与误差的贡献率结果可知,水泥掺量对28 d抗压强度的影响程度最大,这与极差分析结果一致,水玻璃掺量次之。同时从表中结果可知,生石灰掺量和生石膏掺量引起的数据波动均大于误差引起的数据波动,其中生石膏对应的数据波动在4个因素中最小。

2.5 高强水泥搅拌土机理分析

为了进一步分析粉质黏土改良后强度提升的机理,分别对粉质黏土原状土和经过最优配比固化剂改良过的水泥土开展了扫描电镜试验。图4和图5为粉质黏土改良前后在放大4 000倍下的SEM图像。由图4可知,土体内部的物质以片状和颗粒状为主,片状土质间存在裂缝,局部出现土颗粒堆积,整体来看孔隙较大,颗粒物间胶结程度差,这也导致土体结构疏松和强度低的原因。由图5可以清晰地看出,土颗粒之间的孔隙基本都由凝胶物质填充,其表面已被绝大多部分胶结物质所覆盖,材料中颗粒之间的孔隙明显减小,分散的颗粒逐渐形成团聚状结构,搅拌土的密实性大幅度提高,搅拌土抗压强度的得以提升,这也说明多种外掺剂在合理配比下对粉质黏土改良效果良好。

水泥土结构的密实性主要受硅酸盐水泥与水起水化反应的程度及相应产物多少的影响,而外掺剂的作用机理正是推动水泥土微观结构朝有利于

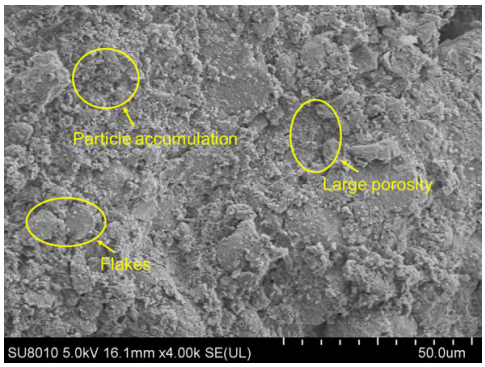


图4 粉质黏土原状土的SEM图像

Fig.4 SEM image of a silty clay in situ soil

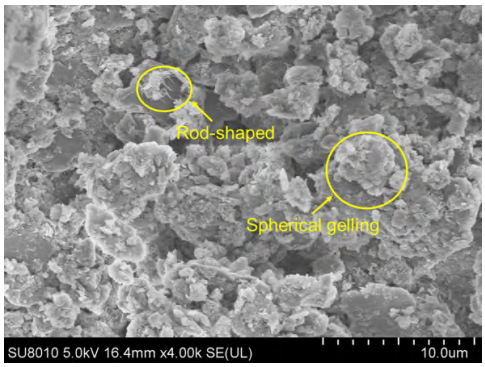


图5 正交试验最优配比组的SEM图像

Fig.5 SEM image of the optimal ratio group from the orthogonal test

提高强度和耐久性的方向发展。水玻璃加入水泥土中能够加速浆液的凝结,同时作为原材料参与水化反应。生石灰的掺入可以直接在固化土中间接补充足够的Ca^{2+}和OH^-离子浓度,促进搅拌土中水泥水化速率提升,使得早期水化硅酸钙形成,显著增强搅拌土的早期抗压强度。生石膏与水泥反应生成大量水化产物,并且水化产物不断膨胀,使水泥土的结构不断密实,强度增长,承载力提高。上述几种材料按照合理的比例加入搅拌土中,能够大幅度提升搅拌土的力学性能。

3 结论

1)通过极差分析法对正交试验结果进行分析,对搅拌土的抗压强度影响程度从大到小依次为水泥掺量,水玻璃掺量,生石膏和生石灰掺量。

2)对试验结果进行单因素方差分析,可知影响搅拌土无侧限抗压强度的主要因素为水泥掺入比和水玻璃掺量,而生石膏掺量和生石灰掺量是对搅拌土无侧限抗压强度有一定程度影响。

3)确定粉质黏土固化改良的最优配比为水泥掺

入比 24%、水玻璃 6%、生石膏 2%、生石灰 0%、萘系减水剂 1.5%，并推荐在水灰比为 1.5、粉质黏土含水率为 12%时使用。经过 DH 固化剂改良后，粉质黏土可以在标准龄期 28 d 时强度可以达到 8.6 MPa。

4）高强粉质黏土–水泥搅拌土的改性机理主要包括：搅拌土的力学特性离不开水泥的水化和凝结硬化、土颗粒中的离子交换与团粒化作用以及碳酸化作用等；按照一定合理配比下的固化剂可以帮助改善提高土壤 pH 值、增加溶液 Ca^{2+}浓度，激发活性矿物解离并不断参与水化反应生成凝胶性物质，有助于强化微观骨架，使得搅拌土的抗压强度等宏观力学性能大幅度提升。

参考文献：

[1] 熊勇，罗强，张良，等. 粉质黏土填料在 K_{30} 试验加载进程中的变形时间效应状态分析[J]. 岩土力学，2018，39(3)：863–871.
XIONG Y，LUO Q，ZHANG L，et al. State analysis of deformation time effect of powdered clay fill in K_{30} test loading process[J]. Geotechnics，2018，39(3)：863–871.

[2] 吕国仁，葛建东，肖海涛. 水泥土搅拌桩沿海软基处理[J]. 山东大学学报(工学版)，2020，50(3)：73–81.
LV G R，GE J D，XIAO H T. Cement soil mixing pile coastal soft foundation treatment[J]. Journal of Shandong University(Engineering Edition)，2020，50(3)：73–81.

[3] 王绍全，高斯，何钰龙，等. 基于微观分析的石灰改良粉质黏土击实特性[J]. 中外公路. 2015，35(6)：246–248.
WANG S Q，GAO S，HE Y L，et al. Compaction characteristics of lime modified pulverized clay based on microscopic analysis[J]. Sino–Foreign Highway，2015，35(6)：246–248.

[4] 崔宏环，朱超杰，杨尚礼，等. 干湿循环作用下改良粉质黏土的路用性能[J]. 华南理工大学学报(自然科学版)，2022，50(2)：42–49.
CUI H H，ZHU C J，YANG S L，et al. Road performance of improved pulverized clay under the action of dry and wet cycles[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)，2022，50(2)：42–49.

[5] 崔宏环，秦晓鹏，王文涛，等. 冻融循环对非饱和粉质黏土 SWCC 及强度的影响[J]. 地下空间与工程学报，2020，16(6)：1722–1728.
CUI H H，QIN X P，WANG W T，et al. Effect of freeze–thaw cycles on SWCC and strength of unsaturated pulverized clay[J]. Journal of Underground Space and Engineering，2020，16(6)：1722–1728.

[6] 阮锦楼，阮波，阳军生，等. 粉质黏土水泥土无侧限抗压强度试验研究[J]. 铁道科学与工程学报，2009，6(3)：56–60.
RUAN J L，RUAN B，YANG J S，et al. Experimental study on unconfined compressive strength of cement soil with powdered clay[J]. Journal of Railway Science and Engineering，2009，6(3)：56–60.

[7] 赵霞. 粉质黏土和黏土无侧限抗压强度相关关系研究[J]. 地下空间与工程学报，2013，9(S1)：1516–1519.
ZHAO X. Study on the correlation between unconfined compressive strength of powdered clay and clay[J]. Journal of Underground Space and Engineering，2013，9(S1)：1516–1519.

[8] 刘家顺，王来贵，张向东，等. 粉质黏土结构性参数试验研究[J]. 应用力学学报，2018，35(4)：911–917.
LIU J S，WANG L G，ZHANG X D，et al. Experimental study on structural parameters of powdered clay[J]. Journal of Applied Mechanics，2018，35(4)：911–917.

[9] 郭婷婷. 固结比对粉质黏土动力学特性影响的试验研究[J]. 地球物理学进展，2016，31(6)：2729–2734.
GUO T T. Experimental study on the effect of consolidation ratio on the kinetic properties of pulverized clay[J]. Advances in Geophysics. 2016，31(6)：2729–2734.

[10] 李笛. 严寒积雪融水区粉质黏土路基填料改良与断面形式研究[D]. 西安：长安大学，2020.
LI D. Research on the improvement and section form of powder clay roadbed fill in cold snow melt area[D]. Xi′an：Chang′an University，2020.

[11] 江守慈，郭易盟，苏德垠，等. 粉煤灰和硅灰对南昌典型土层水泥土强度影响[J]. 华东交通大学学报，2021，38(2)：37–43.
JIANG S C，GUO Y M，SU D Y，et al. Effect of fly ash and silica fume on the strength of cement soil in typical soil layers in Nanchang[J]. Journal of East China Jiaotong University，2021，38(2)：37–43.

[12] PHETCHUAY C，HORPIBULSUK S，SUKSIRIPATTANAPONG C，et al. Calcium carbide residue：Alkaline activator for clay–fly ash geopolymer[J]. Construction and Building Materials，2014，69：285–294.

[13] 何财胜，竺成明. 掺合料对淤泥质黏土水泥土抗压强度的影响[J]. 建筑结构. 2021，51(S1)：1373–1376.
HE C S，ZHU C M. Effect of admixtures on the compressive strength of silt–clay hydromulch[J]. Building Structures，2021，51(S1)：1373–1376.

[14] NALBANTOGLU Z，TUNCER E R. Compressibility and hydraulic conductivity of a chemically treated expansive clay[J]. Canadian Geotechnical Journal，2021，38(1)：154–160.

[15] BOZBEY I，GARAISAYEV S. Effects of soil pulverization quality on lime stabilization of an expansive clay[J]. Environmental Earth Sciences，2010，60(6)：1137–1151.

[16] 陈兴，卢玉斌，滕骁，等. 砂浆–花岗岩界面过渡区的劈裂拉伸试验研究[J]. 混凝土与水泥制品，2016(4)：10–16.
CHEN X，LU Y B，TENG X，et al. Splitting tensile test study of mortar–granite interface transition zone[J]. Concrete and Cement Products，2016(4)：10–16.

通信作者：刘银芳(1973—)，男，正高级工程师，研究方向为岩土工程治理设计，软基处理，地质灾害防治。E-mail：2510047 2@qq.com。

(责任编辑：姜红贵)