

基于响应面法地质聚合物固化黏土力学性能试验研究

张青云, 张 鹏*

(青岛理工大学 土木工程学院, 青岛 266525)

摘要:地质聚合物是一种硬化快、强度高、耐久性好的绿色胶凝材料,通过添加地质聚合物胶凝材料矿渣、电石渣以及碱激发剂 CaO、NaHCO₃ 来进行固化黏土试验研究。影响因素为矿渣掺量、电石渣掺量、碱激发剂掺量,响应值为 7、28 d 固化土抗压强度,利用 Box-Behnken 试验,分析获得最优配合比。结果表明:养护龄期 7 d 时,矿渣掺量影响最大;养护龄期 28 d 时,碱激发剂掺量影响最大。固化土预测抗压强度和实际抗压强度较为接近,模型可靠性较高。矿渣掺量为 17.37%、电石渣掺量为 9.31%、碱激发剂掺量为 6.51%,7 d 龄期抗压强度目标值达到 612.97 kPa,28 d 龄期抗压强度目标值达到 875.69 kPa。经 SEM 分析,7 d 龄期主要水化产物为絮状 C-S-H 凝胶,随着养护龄期的增加,絮状 C-S-H 凝胶逐渐形成了三维网状 C-S-H 凝胶。随着钙矾石的生成,针状钙矾石和 C-S-H 凝胶共同填充固化土颗粒间孔隙,使固化土力学性能得到提升。

关键词:矿渣;电石渣;响应面法;地质聚合物

中图分类号: TU447

文献标志码: A

文章编号: 1673-4602(2024)06-0043-08

Experimental study on the mechanical properties of geopolymer solidified clay based on response surface method

ZHANG Qingyun, ZHANG Peng*

(School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China)

Abstract: Geopolymer is a kind of green cementing material with fast hardening, high strength and good durability. In this study, the experiment on clay solidification was carried out by adding such geopolymer cementing materials as slag, calcium carbide slag and alkali activators CaO and NaHCO₃. With the influencing factors of slag content, calcium carbide slag content and alkali initiator content, and with the response values of 7 and 28 days of solidified soil compressive strength, the optimal mix ratio was obtained through Box-Behnken test. The results showed that the slag dosage had the greatest effect at 7 days of maintenance age, and the alkali stimulant dosage had the greatest effect at 28 days of maintenance age. The predicted compressive strength of the solidified soil was close to the actual compressive strength, and the reliability of the model was high. When the slag content was 17.37%, the calcium carbide slag content was 9.31% and the alkali activator content was 6.51%, the target value of the compressive strength reached 612.97 kPa at the 7 days and 875.69 kPa at the

收稿日期: 2023-12-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42177167)

作者简介: 张青云(1999—), 男, 安徽淮南人。硕士, 研究方向为岩土工程。E-mail: 791019751@qq.com.

* 通信作者: 张 鹏(1985—), 男, 山东潍坊人。博士, 教授, 主要从事岩土工程、城市地下空间等方面的研究。
E-mail: zhangpchn@qut.edu.cn.

28 days. According to SEM analysis, the main hydration product for 7 days was flocculent C-S-H gel, and with the increase of curing age, the flocculent C-S-H gel gradually formed a three-dimensional network C-S-H gel. With the formation of ettringite, acicular ettringite and C-S-H gel filled the intergranular pores of solidified soil, which improved the mechanical properties of solidified soil.

Key words: slag; calcium carbide slag; response surface method; geopolymer

目前,水泥土和石灰土已经广泛应用于地基加固、深基坑、土石坝等工程中。随着社会生产需求的快速扩大,虽然水泥土几乎可以应用于各种土壤的改良,但其水泥掺量过大后便会导致显著的尺寸收缩和干裂^[1]。地质聚合物是一种具有三维网状结构的新型胶凝材料,主要由无机硅氧四面体和铝氧八面体组成^[2]。胶凝材料与碱激发剂经过合理设计后,地质聚合物具有早期强度高、抗渗性能好、抗腐蚀性强等优点。陈慧娥等^[3]采用玄武岩纤维和水泥共同固化软土,发现玄武岩纤维作为“桥梁”与水泥水化产物一起填充在土样孔隙中,提高了试样强度。张永杰等^[4]研究地质聚合物-水泥固化土抗压强度的影响,表明适当的水泥取代率可以提高水化反应速率,促进水化产物的生产。ARULRAJAH 等^[5]通过碱性活化剂活化粉煤灰和矿渣地质聚合物的组合,表明粉煤灰和矿渣的组合可以显著提高软黏土的强度和刚度。吴俊等^[6]发现矿渣-粉煤灰地质聚合物主要产物有无定型的 C-S-H、C-A-H 凝胶等,这些凝胶包裹着土颗粒,提高固化黏土强度。

目前国内外学者主要研究地质聚合物中前驱体掺量、碱激发剂掺量、碱激发剂类型等。周恒宇等^[7]研究表明,地质聚合物无侧限抗压强度在前驱体掺量为 10%~20%时增长缓慢,但当前驱体掺量超过 20%时,固化土抗压强度明显提升。朱月等^[8]发现掺入比、龄期和含水率对碱激发材料加固土强度均有显著影响,粉料比对强度的影响次之,而 NaOH 浓度对强度的影响不明显。张顶飞等^[9]进行粉煤灰-电石渣地质聚合物固化软土试验,当粉煤灰掺量为 17.3%、电石渣掺量为 7.3%、硫酸钠掺量为 5.0%时,固化土强度达到最高。KOMLJENOVIC 等^[10]对比研究不同碱激发剂激发效果,结果表明, $\text{KOH} < \text{NaOH} + \text{Na}_2\text{CO}_3 < \text{NaOH} < \text{NaOH} + \text{Na}_2\text{SiO}_3$ 。王东星等^[11]利用粉煤灰地质聚合物固化淤泥,提高无侧限抗压强度,但 Na_2CO_3 激发效果与 NaOH 和 Na_2SiO_3 相比,碱活化效果有限。LUO 等^[12]讨论了碱激发剂含量、模量和浓度对地质聚合物稳定土力学性能的影响,发现当碱性活化剂模量为 1.3、浓度为 40%,偏高岭土的混合质量是碱性活化剂的 1.2 倍时,固化土无侧限抗压强度最高。HU 等^[13]以粉煤灰为主要原料,以 NaOH 和 CaO 作为共同活化剂,结果表明,NaOH 溶液浓度和 CaO 含量对固化土强度起重要作用。然而,工程应用中,NaOH 溶液和 Na_2SiO_3 溶液运输和储存较为不便,并对生态环境有不利影响。故本文将 CaO 和 NaHCO_3 作为碱激发剂,方便日后大规模工程应用。

基于此,本研究以无侧限抗压强度为指标,采用 Box-Behnken 中心组合试验设计原理设计试验,通过响应面法建立影响因素与目标响应值之间的二阶回归方程。本次影响因素为矿渣掺量、电石渣掺量、碱激发剂掺量,响应值为固化土 7 及 28 d 无侧限抗压强度。其中矿渣、电石渣和碱激发剂掺量均为各自质量与干土质量的比值。通过绘制等高线与 3D 响应面直观反映影响因素与无侧限抗压强度的关系,分析获得最优配合比,并通过 SEM 试验得出微观强度发展机理。

1 试验材料与试验方案

1.1 试验材料

1.1.1 土样

试验黏土取自山东省某建筑工地,取样深度为 2 m。将风干土样磨粉后过 2 mm 筛,在温度为 105 °C 烘箱中烘干。根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—1999)^[14]测得土样天然含水率 29.4%、密度 1.73 g/cm³、液限 39.3%、塑限 26.7%。采用轻型击实的方法进行击实试验,得到黏土的最大干密度为 1.80 g/cm³,最优含水率为 16.23%。

1.1.2 矿渣和电石渣

研究中使用的原料为矿渣和电石渣,矿渣选用 S95 级磨细高炉矿渣。矿渣的中值粒径 $14.25 \mu\text{m}$,外观呈现白色粉末状。电石渣来自中国山东某建材公司。矿渣和电石渣具体化学成分如表 1 所示。矿渣、电石渣 XRD 图谱如图 1 所示。

表 1 矿渣和电石渣主要化学组成

材料	Al_2O_3	SiO_2	MgO	Fe_2O_3	CaO	Na_2O	其他
矿渣	20.70	36.40	5.82	1.33	31.06	0.05	4.64
电石渣	1.23	2.68	0.13	0.48	82.61	11.24	1.63

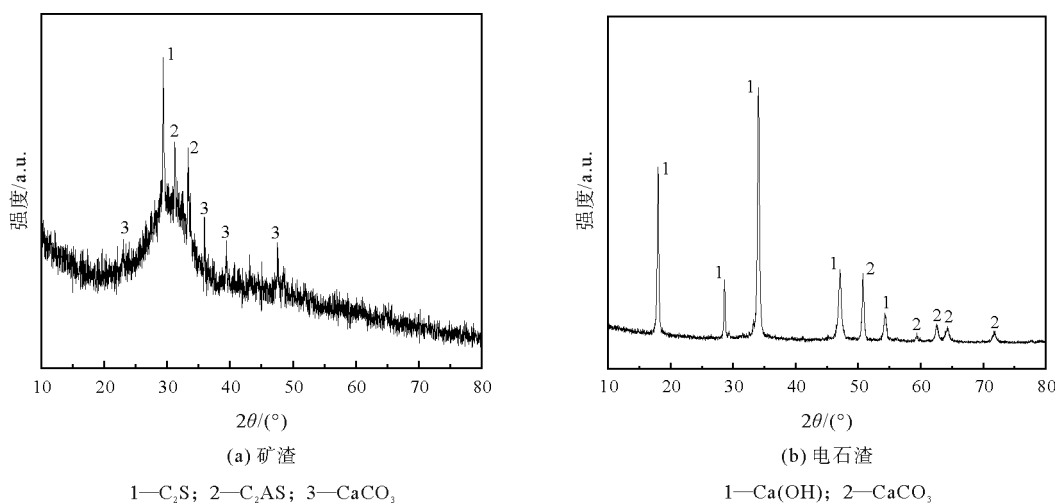


图 1 矿渣和电石渣 XRD 图谱

1.1.3 碱激发材料

本研究使用 CaO 粉末和 NaHCO_3 粉末二者混合物作碱激发剂材料。当水参与反应时, CaO 与水反应生成 Ca(OH)_2 ,随后 Ca(OH)_2 与 NaHCO_3 进行反应。若 NaHCO_3 足够多, OH^- 将被完全消耗。具体反应如下。



根据上述反应式, CaO 和 NaHCO_3 的理想摩尔比必须大于等于 1 : 1(质量比为 56 : 84)。为了方便起见,这里将 CaO 和 NaHCO_3 的摩尔比设置为 1 : 1。WANG 等^[15]证明了本研究中碱活化环境的构建方法是可行的。

1.2 试验设计

本试验采用三因素三水平 Box-Behnken 法进行试验设计,每个影响因素取 3 个水平,分别以 -1,0,+1 编码,带入到本试验。-1,0,+1 分别代表着最低、中间和最高掺量值。基于前期室内试验的总结,制定各影响因素掺量范围,如表 2 所示。试验次数计算为

$$C = 2b(b - 1) + a \quad (4)$$

式中: C 为所需要进行的试验次数; a 为试验中心点数量,取 $a = 5$; b 为影响因素个数, $b = 3$ 。

表 2 影响因素及编码水平

影响因素	代码	编码水平		
		-1	0	1
矿渣掺量	x_1	10	15	20
电石渣掺量	x_2	6	8	10
碱激发剂掺量	x_3	3	5	7

经计算,本次试验共有 17 组。

具体试验方案利用 Design-Expert 软件生成,试验结果如表 3 所示。

1.3 样品制备

将土样放置在 105 °C 烘箱中进行干燥,并使用磨粉机将其磨碎过 2 mm 筛。矿渣、电石渣、土体粉末按比例称量并混合搅拌均匀。随后在混合材料中加入定量 CaO 和 NaHCO₃ 粉末,最后称取一定量的水,充分搅拌均匀后得到固化土样品。本试验试样中土体含水率均为最优含水率。按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—1999)^[14]将固化土样分 3 次填充到模具中,每次装填过程中都用击实锤击实,每次击锤次数约 20 次,最后将试样上下表面刮平,制备直径 39.1 mm、高 80 mm 的圆柱形土样。每组试验至少制作 3 个平行试验,保证数据误差小、可靠性高。本试验固化土试样均在室内覆膜养护至 7、28 d 龄期后,进行无侧限抗压强度试验(表 3)。

2 结果与分析

2.1 模型建立及分析

利用 Design-Expert 软件处理试验数据,并结合 P -value 检验确定拟合方程的可靠程度,若 $P \leq 0.05$,则拟合效果显著。7、28 d 固化土方差分析结果如表 4 所示。

表 3 试验结果

序号	因素			7 d 强度/ kPa	28 d 强度/ kPa
	x_1	x_2	x_3		
1	10	6	5	405	692
2	10	8	3	461	584
3	10	8	7	492	716
4	10	10	5	538	737
5	15	6	3	421	687
6	15	6	7	490	713
7	15	8	5	587	845
8	15	8	5	581	829
9	15	8	5	602	817
10	15	8	5	561	804
11	15	8	5	576	822
12	15	10	3	463	684
13	15	10	7	608	879
14	20	6	5	587	741
15	20	8	3	507	651
16	20	8	7	621	814
17	20	10	5	542	801

表 4 方差分析结果

来源	7 d				28 d			
	P	F	系数	重要性排序	P	F	系数	重要性排序
模型	0.0002	25.23	-1119.07	—	<0.0001	33.08	-304.57	—
x_1	0.0002	52.81	57.44	1	0.0011	28.65	78.17	4
x_2	0.0016	24.92	234.80	5	0.0013	26.63	20.61	5
x_3	0.0002	52.22	57.88	2	<0.0001	98.71	103.81	1
x_1x_2	0.0015	25.68	-4.45	4	0.6952	0.17	0.38	9
x_1x_3	0.0501	5.58	2.08	7	0.4265	0.71	0.78	8
x_2x_3	0.0673	4.68	4.75	8	0.0025	21.18	10.56	6
x_1^2	0.0585	5.10	-0.77	9	0.0002	52.88	-2.60	3
x_2^2	0.0013	26.51	-11.02	3	0.1253	3.03	-3.89	7
x_3^2	0.0018	23.88	-10.46	6	0.0001	56.18	-16.77	2

注: P 为在原假设为真的前提下出现观察样本以及更极端情况的概率; F 为方差分析中使用的统计量,用于比较 2 个或多个组之间的差异性。

根据二阶方差系数线性拟合预测 7 d 无侧限抗压强度 Y_7 及 28 d 无侧限抗压强度 Y_{28} 强度公式,如下式所示:

$$Y_7 = -1119.07 + 57.44x_1 + 234.80x_2 + 57.88x_3 - 4.45x_1x_2 + 2.08x_1x_3 + 4.75x_2x_3 - 0.77x_1^2 - 11.02x_2^2 - 10.46x_3^2 \quad (5)$$

$$Y_{28} = -304.57 + 78.17x_1 + 20.61x_2 + 103.81x_3 + 0.38x_1x_2 + 0.78x_1x_3 + 10.56x_2x_3 - 2.60x_1^2 - 3.89x_2^2 - 16.77x_3^2 \quad (6)$$

由表 4 可知,3 种影响因素单因素状态下养护龄期 7 和 28 d 时 $P < 0.05$,结果表明,3 种影响因素对固化土强度增强过程均起到显著作用。养护龄期 7 d 时,敏感性顺序为:矿渣掺量 > 碱激发剂掺量 > 电石渣掺量;养护龄期 28 d 时,敏感性顺序为碱激发剂掺量 > 矿渣掺量 > 电石渣掺量。

2.2 矿渣和电石渣交互作用机理

由表 4 可知,养护龄期为 7 d 时, x_1x_2 $P < 0.05$,由此可知矿渣-电石渣交互作用对固化土抗压强度影响显著。将碱激发剂掺量控制在 5%,绘制矿渣-电石渣 7 d 抗压强度等值线及响应面,如图 2 所示。

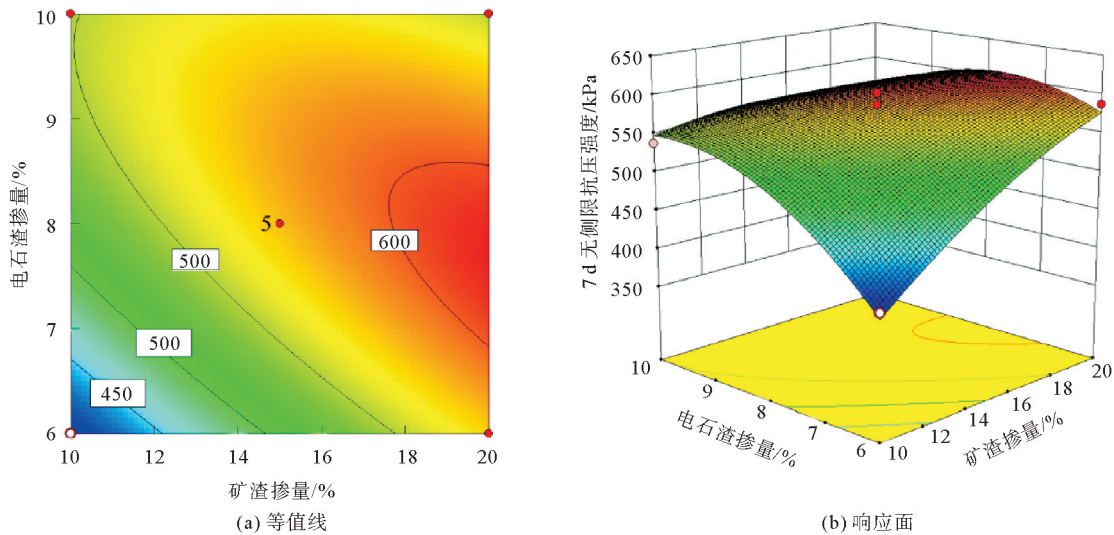


图 2 矿渣-电石渣 7 d 交互作用等值线和响应面

● 影响因素响应最强; ● 影响因素响应中等; ○ 影响因素响应最弱

如图 2 所示,电石渣溶于水后碱性较高,有利于矿渣中 SiO_2 和 Al_2O_3 的溶解,随着电石渣掺量增加,固化土强度先增后减。此外,电石渣提供的 Ca^{2+} 能加速聚合反应,生成更多 C-S-H 凝胶及 N-A-S-H 凝胶^[16]。然而,电石渣掺量过多会导致固化土 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体增多,使得早期水化产物沉积较多,影响水化反应的进行,导致固化土强度降低^[17]。由于矿渣掺量不断增加, OH^- 被大量消耗,使体系内碱性环境降低,水化反应速率减慢,固化土强度降低。

2.3 电石渣和碱激发剂交互作用机理

同样,养护龄期为 28 d 时, x_2x_3 $P < 0.05$,由此将矿渣掺量控制在 15%,绘制电石渣-碱激发剂等值线及响应面,如图 3 所示。

由图 3 可知,固化土的强度随电石渣掺量的提高呈现出先增加后减小的趋势。另一方面,随着碱激发剂掺量的增加,固化土强度也出现先增加后减小的趋势。电石渣掺量较少,碱激发剂掺量较低时,浆体结构致密,使得固化土早期强度较高,而后期 OH^- 含量不足,无法充分溶解 SiO_2 和 Al_2O_3 ,导致 28 d 强度降低。随着电石渣掺量增多,不断提高反应体系中碱性环境,但生成的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体增加了碱性激发剂溶液的黏度,减缓反应速率,使得固化土强度降低^[18]。适当提高碱激发剂掺量会使反应体系中 OH^- 含量增多,提高碱性环境,使固化土强度不断提高,但由于过多碱激发剂使反应速率增加,迅速生成的凝胶将尚未反应的前驱物包裹,影响聚合反应过程中缩聚反应,导致固化土强度下降^[7]。

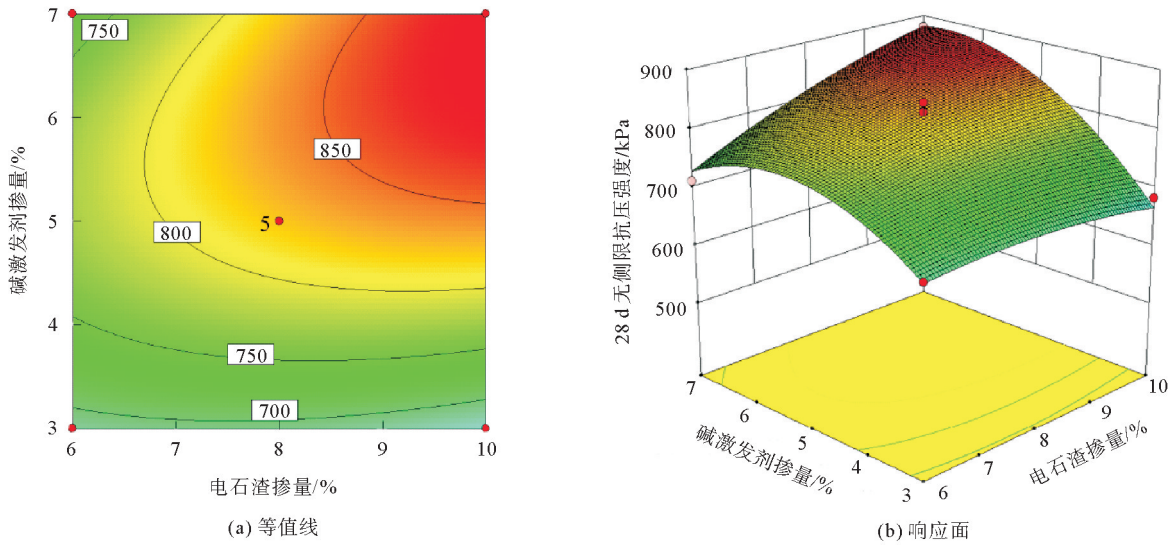


图3 电石渣-碱激发剂28 d 交互作用等值线和响应面

● 影响因素响应最强；● 影响因素响应中等；○ 影响因素响应最弱

2.4 配合比设计优化

为了验证模型的可靠性,将无侧限抗压强度试验值与预测值进行对比,如图4、5所示。固化土7和28 d 预测和实际抗压强度拟合较好,通过 Desin-Expert 软件寻找出矿渣掺量、电石渣掺量、碱激发剂掺量最优配合比。结果表明,当矿渣掺量为 17.37%、电石渣掺量为 9.31%、碱激发剂掺量为 6.51%时,7 d 龄期抗压强度目标值达到 612.97 kPa,28 d 龄期抗压强度目标值达到 875.69 kPa。

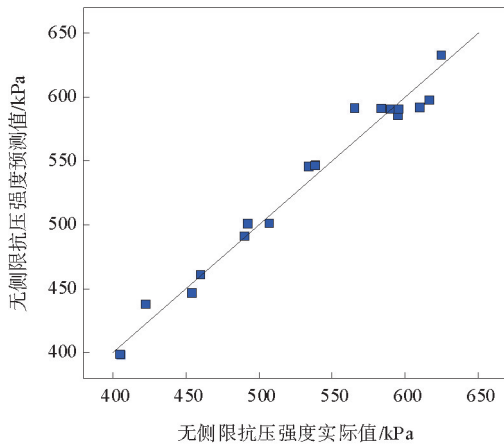


图4 7 d 抗压强度预测与实际值
— 强度预测曲线; ■ 实际强度值

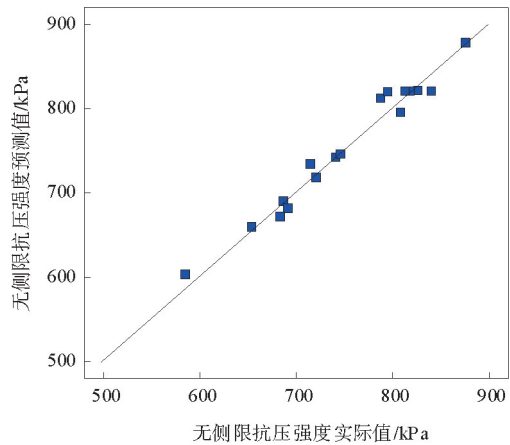


图5 28 d 抗压强度预测与实际值
— 强度预测曲线; ■ 实际强度值

2.5 微观结构

图6显示了最优配合比下固化土试样养护龄期7和28 d 的 SEM 图像,由图可知,固化土随着养护龄期的增加,颗粒间孔隙越来越小,结构密实度越来越高,从而提高了固化土样的抗压强度。养护龄期为7 d 时,水化反应不够充分,产生少量 C-S-H 凝胶,随着养护时间的增长,C-S-H 团聚体变得越来越多,逐渐形成了三维网状结构。伴随着钙矾石的生成,针状钙矾石和 C-S-H 凝胶共同填充固化土颗粒间孔隙,力学性能得到提高。

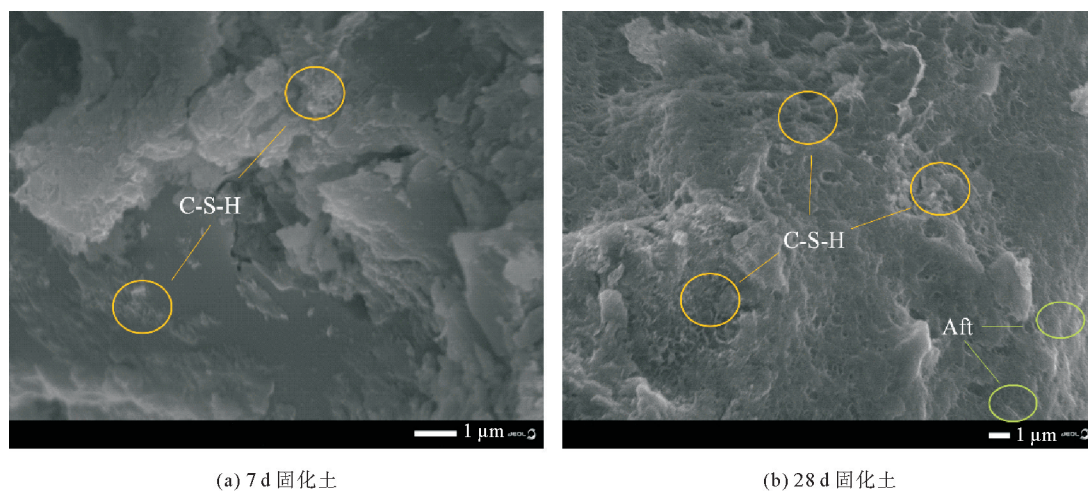


图 6 固化土 SEM 图

3 结论

1) 矿渣掺量、电石渣掺量、碱激发剂掺量 3 种影响因素均对抗压强度影响显著。矿渣掺量和电石渣掺量交互作用对 7 d 龄期抗压强度影响显著,电石渣掺量和碱激发剂掺量交互作用对 28 d 龄期抗压强度影响显著。

2) 养护龄期 7 d 时,敏感性顺序为:矿渣掺量>碱激发剂掺量>电石渣掺量;养护龄期 28 d 时,敏感性顺序为碱激发剂掺量>矿渣掺量>电石渣掺量。

3) 利用 Design-Expert 软件对预测抗压强度和实际抗压强度进行对比,发现预测强度和实际强度较为接近。当矿渣掺量为 17.37%、电石渣掺量为 9.31%、碱激发剂掺量为 6.51%时,7 d 龄期固化土抗压强度目标值达到 612.97 kPa,28 d 龄期抗压强度目标值达到 875.69 kPa。

4) 经 SEM 分析,矿渣-电石渣地质聚合物固化土 7 d 水化产物为絮状 C-S-H 凝胶,随着养护龄期的增加,絮状 C-S-H 凝胶逐渐形成了三维网状 C-S-H 凝胶,随着钙矾石的生成,固化土整体结构更加密实,提高了固化土强度。

参考文献(References):

- [1] KEVIN G,ZHANG Z J. Assessment of shrinkage crack mitigation technique performance in soil cement base courses[C]//Transportation Research Board Meeting. Washington DC;2009;19.
- [2] 邓永锋,吴子龙,刘松玉,等.地聚合物对水泥固化土强度的影响及其机理分析[J].岩土工程学报,2016,38(3):446-453.
DENG Yongfeng,WU Zilong,LIU Songyu,et al. Influence of geopolymers on strength of cement-stabilized soils and its mechanism[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering,2016,38(3):446-453.
- [3] 陈慧娥,王仕鑫,牛壮.玄武岩纤维对水泥固化软土性能的影响研究[J].工程地质学报,2023,31(2):432-440.
CHEN Hui'e,WANG Shixin,NIU Zhuang. Effect of basalt fiber on properties of cement solidified soft soil[J]. Journal of Engineering Geology,2023,31(2):432-440.
- [4] 张永杰,谭长江,邓沛宇,等.地质聚合物-水泥固化土石混合体试验与固化机理研究[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2023,20(5):49-58.
ZHANG Yongjie,TAN Changjiang,DENG Peiyu,et al. Study on test and curing mechanism of geopolymers-cement solidified soil-rock mixture[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology(Natural Science),2023,20(5):49-58.
- [5] ARULRAJAH A,YAGHOUBI M,DISFANI M M,et al. Evaluation of fly ash and slag-based geopolymers for the improvement of a soft marine clay by deep soil mixing[J]. Soils and Foundations,2018,58(6):1358-1370.

- [6] 吴俊,征西遥,杨爱武,等. 矿渣-粉煤灰地质聚合物固化淤泥质黏土的抗压强度试验研究[J]. 岩土力学,2021,42(3):647-655.
WU Jun,ZHENG Xiyao,YANG Aiwu,et al. Experimental study on the compressive strength of muddy clay solidified by the one-part slag-fly ash based geopolymer[J]. Rock and Soil Mechanics,2021,42(3):647-655.
- [7] 周恒宇,王修山,胡星星,等. 地聚合物固化淤泥强度增长影响因素及机制分析[J]. 岩土力学,2021,42(8):2089-2098.
ZHOU Hengyu,WANG Xiushan,HU Xingxing,et al. Influencing factors and mechanism analysis of strength development of geopolymer stabilized sludge[J]. Rock and Soil Mechanics,2021,42(8):2089-2098.
- [8] 朱月,陈锐. 碱激发材料加固软土强度的影响因素试验研究[J]. 公路,2020,65(3):23-28.
ZHU Yue,CHEN Rui. Experimental study on factors affecting strength of soft soil stabilized with alkali activated material[J]. Highway,2020,65(3):23-28.
- [9] 张顶飞,吕启航,张鹏,等. 基于响应面法的粉煤灰-电石渣地质聚合物固化软土试验研究[J]. 硅酸盐通报,2023,42(8):2821-2829.
ZHANG Dingfei,LV Qihang,ZHANG Peng,et al. Experimental study on soft soil solidified by fly ash and carbideslag geopolymer based on response surface method[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2023,42(8):2821-2829.
- [10] KOMLJENOVIC M,BASCAREVIC Z,BRADIC V. Mechanical and microstructural properties of alkali-activated fly ash geopolymers[J]. Journal of Hazardous Materials,2010,181:35-42.
- [11] 王东星,王宏伟,邹维列,等. 碱激发粉煤灰固化淤泥微观机制研究[J]. 岩石力学与工程学报,2019,38(S1):3197-3205.
WANG Dongxing,WANG Hongwei,ZOU Weilie,et al. Research on micro-mechanisms of dredged sludge solidified with alkali-activated fly ash[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2019,38(S1):3197-3205.
- [12] LUO Y,MENG J,WANG D,et al. Experimental study on mechanical properties and microstructure of metakaolin based geopolymer stabilized silty clay[J]. Construction and Building Materials,2022,316:125662.
- [13] HU M,ZHU X,LONG F. Alkali-activated fly ash-based geopolymers with zeolite or bentonite as additives[J]. Cement and Concrete Composites,2009,31(10):762-768.
- [14] GB/T 50123—1999,土工试验方法标准[S].
GB/T 50123—1999,Geotechnical test method standard[S].
- [15] WANG S,XUE Q,ZHU Y,et al. Experimental study on material ratio and strength performance of geopolymer-improved soil[J]. Construction and Building Materials,2021,267:120469.
- [16] 吴蓬,吕宪俊,胡术刚,等. 粒化高炉矿渣成分和细度对活性的影响[J]. 硅酸盐通报,2014,33(10):2572-2577.
WU Peng,LV Xianjun,HU Shugang,et al. Influence of composition and fineness of granulated blast furnace slags on activation index[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2014,33(10):2572-2577.
- [17] SHEKHOVTSOVA J,KEARSLEY E,KOVTUN M. Effect of activator dosage,water-to-binder-solids ratio,temperature and duration of elevated temperature curing on the compressive strength of alkali-activated fly ash cement pastes[J]. Journal of the South African Institution of Civil Engineering,2014,56(3):44-52.
- [18] LI W,YI Y. Use of carbide slag from acetylene industry for activation of ground granulated blast-furnace slag[J]. Construction and Building Materials,2020,238:117713.

(责任编辑 张晓靖;英文校审 程文华)