



脱硫石膏-地聚合物固化软土的抗压强度

张子龙,吴大志,陈柯宇,王均益

(浙江理工大学建筑工程学院,杭州 310018)

摘要:采用脱硫石膏-地聚合物作为固化剂固化软土,通过强度试验研究在不同硅铝原料配比时,碱激发剂模数、含量和脱硫石膏的掺量对固化软土抗压强度的影响,并通过扫描电镜试验和X射线衍射试验分析固化软土的微观结构变化。结果表明:脱硫石膏-地聚合物可有效提高软土的抗压强度;碱激发剂的最佳模数和含量分别为0.8和6%;脱硫石膏对地聚合物固化软土的抗压强度有促进作用,硅铝原材料中含有30%矿渣的固化软土抗压强度提升幅度大于100%粉煤灰。地聚合物固化软土生成C-(A)-S-H和N-A-S-H胶结物,加入脱硫石膏后生成了钙矾石,两者共同作用是脱硫石膏-地聚合物提高固化软土抗压强度的主要原因。该研究结果可为地聚合物应用于实际工程中软土地基处理提供参考。

关键词:地聚合物;脱硫石膏;固化软土;试验研究;机理分析

中图分类号: TU 433

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851 (2023) 01-0140-08

引文格式:张子龙,吴大志,陈柯宇,等. 脱硫石膏-地聚合物固化软土的抗压强度[J]. 浙江理工大学学报(自然科学),2023,49(1):140-147.

Reference Format: ZHANG Zilong, WU Dazhi, CHEN Keyu, et al. Compressive strength of desulphurized gypsum-geopolymer solidified soft soil[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University,2023,49(1):140-147.

Compressive strength of desulphurized gypsum-geopolymer solidified soft soil

ZHANG Zilong, WU Dazhi, CHEN Keyu, WANG Junyi

(School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Desulfurized gypsum-geopolymer was used as the curing agent to solidify the soft soil and the effects of the modulus and content of the alkali activator and the content of the desulfurized gypsum on the compressive strength of the solidified soft soil were studied under different ratios of silica-alumina raw materials. In addition, the microstructure of the solidified soft soil was analyzed by scanning electron microscope test and X-ray diffraction test. The results show that the compressive strength of the soft soil can be effectively improved based on the desulfurization gypsum-geopolymer and the optimum modulus and content of the alkali activator are 0.8 and 6%, respectively. Desulfurized gypsum improves the compressive strength of geopolymer-solidified soft soil, and the compressive strength of the solidified soft soil containing 30% slag in the silicon-alumina raw material is greatly improved compared with 100% fly ash. The C-(A)-S-H and N-A-S-H cements are formed by the geopolymer solidified soft soil and ettringite is formed after the addition of desulfurized gypsum, with the joint action of the cements and ettringite being the main reason for the improvement of the compressive strength of the soft soil cured by desulfurized gypsum-geopolymer. The research results provide a theoretical basis for the application of geopolymers in practical engineering to deal with soft soil foundation.

Key words: geopolymer; desulfurization gypsum; solidified soft soil; experimental investigations; mechanistic analysis

收稿日期:2022-06-05 网络出版日期:2022-10-08

基金项目:国家自然科学基金项目(51678533);浙江省公益基金项目(LGG21E080012)

作者简介:张子龙(1997—),男,河北石家庄人,硕士研究生,主要从事软土地基加固方面的研究。

通信作者:吴大志,E-mail:wudz@zstu.edu.cn

0 引 言

在我国东南沿海地区广泛分布着第四纪泻湖相、溺谷相与滨海相等海相沉积软土层,一般包括淤泥与淤泥质软土^[1]。工程建设中,这些软土地基由于其承载力低、易于变形的特点,往往达不到工程设计要求,需要进行地基加固处理。通常,深层搅拌法(也称为水泥土桩地基加固法)适用于软弱性黏性土,常采用水泥作为固化剂。据报道,每年水泥在生产过程中排放了 135 亿吨左右的温室气体,约占全球总排放量的 7%^[2-3];空气中 CO₂ 含量的增加会导致全球变暖和海洋酸化,给人类健康和环境安全带来一定的风险^[4]。

为了研制出能够替代水泥的低碳、绿色的固化材料,国内外学者将粉煤灰、矿渣、钢渣、脱硫石膏等工业废料用作固化剂,进行了相关研究。固废大概分为两类:一类是以工业副产石膏为主的膨胀组,另一类是富含硅铝的胶凝组。利用富含硅铝的工业废弃物(如粉煤灰、矿渣、钢渣等)经过碱激发制成的胶凝材料又称地聚合物,具有早期抗压强度高、耐高温、耐化学腐蚀、抗渗性优良、收缩率低等优点^[5-7]。研究表明,地聚合物替代水泥可将全球变暖潜力(以二氧化碳当量衡量)降低 61%^[8]。因此,研究脱硫石膏复合地聚合物替代水泥固化软土,不仅具有工程意义,还可以实现固废资源的利用,具有重要的经济效益和社会效益。邓永锋等^[9]研究了地质聚合物对水泥固化软土的影响,发现地聚合物掺入水泥土后,水泥土的无侧限抗压强度得到了大幅提高,然而抗压强度与地聚合物掺量之间并非单一线性增加关系。Abdullah 等^[10]研究了粉煤灰地质聚合物稳定低塑性和高塑性黏土的强度特性,发现地质聚合物的加入提高了黏土的强度和刚度。Cristelo 等^[11]发现,固化条件也会影响反应产物和固化土的强度,并且碱激发钙含量较高的粉煤灰,相比钙含量较低的粉煤灰,具有较高的短期抗压强度,且钙含量较低的粉煤灰需要经过更长时间的固化。吴俊等^[12]在矿渣-粉煤灰地质聚合物固化淤泥质黏土的抗压强度试验研究中发现,地聚合物土的强度受碱激发剂影响较大。周恒宇等^[13]研究地聚合物固化淤泥的力学特性,发现地聚合物固化软土的前期强度低于水泥土且强度增长缓慢。

上述研究表明,地聚合物固化软土对于软土强度的提升较为明显,但受硅铝原材料和碱激发剂的影响较大,低钙硅铝原材料活性低以及碱激发剂不

能够完全激发硅铝原材料等问题,导致固化软土前期的强度较低。然而有研究表明,在碱性的环境下,加入适量的脱硫石膏,会促进硅铝原材料的激发,同时会进一步提高钙离子的浓度,促进钙矾石的生成^[14],从而提高地聚合物固化软土的强度。Li 等^[15]关于碱激发钢渣固化黏土的研究表明,脱硫石膏对于固化强度影响并非单一线性关系,脱硫石膏存在最优掺量。夏琳玲等^[16]发现,矿渣替代粉煤灰为 30%时粉煤灰地聚合物强度提升幅度最为显著,大于 30%后强度增加缓慢。因此,本文采用脱硫石膏-地聚合物作为固化剂固化软土,通过单因素试验方法,开展在不同硅铝原料配比时,不同碱激发剂模数、含量和脱硫石膏掺量的固化剂加固软土试验;采用无侧限抗压强度试验方法对地聚合物固化软土的抗压强度进行分析研究,通过微观试验分析其化学成分和微观特征等,揭示固化机理,以探索更加绿色、低碳的固化剂为实际工程中软土地基处理提供参考。

1 试 验

1.1 试验土样及固化剂材料

试验的土样取自浙江省杭州西湖区某基坑,属于典型的杭州湖相软黏土。取样深度为 3~5 m,将土样装入塑料桶密封好运回实验室。将土样烘干磨碎备用,根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—1999)测得原状土的基本物理指标,结果见表 1。粉煤灰为 F 类Ⅱ级粉煤灰,粒径在 200~400 目,矿渣呈白色粉末状,比表面积为 428 m²/kg,脱硫石膏呈淡黄色,见图 1。根据 XRD 衍射试验确定了其主要的化学成分和含量,见表 2。水玻璃为市售液体水玻璃,初始模数为 3.30,固含量为 34.8%。NaOH 为无锡亚泰联合化工公司生产的纯度高于 99%的片状固体。

表 1 试验土样基本物理指标

液限/ %	塑限/ %	天然含 水率/%	土粒 比重	塑性 指数	黏粒 含量/%
45.29	25.37	41.86	2.62	19.92	43.5



(a)粉煤灰 (b)脱硫石膏 (c)矿渣

图 1 粉煤灰、矿粉和脱硫石膏的实物图

表 2 粉煤灰、矿粉和脱硫石膏的化学组成						
材料	不同化学组成的含量/%					
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
粉煤灰	23.67	56.96	4.63	1.50	1.50	—
矿渣	16.32	36.10	1.28	35.58	6.54	—
脱硫石膏	0.62	1.67	0.44	39.02	—	53.00

1.2 试验方案

本次试验土样统一制备,设计土样初始含水量

为 41%(即水分与干土质量之比),设定地聚合物基准掺量(地聚合物与湿土质量之比)为 21%,外加剂脱硫石膏、碱激发剂和硅铝原材料的掺量都是与湿土的质量比;研究在硅铝原材料矿渣与粉煤灰不同比下,确定合理的碱激发剂模数(模数表示的是溶液中 SiO₂ 与 Na₂O 的物质的量比)、碱激发剂含量,进而分析外加剂脱硫石膏对地聚合物固化软土抗压强度的影响,具体试验方案见表 3。

表 3 试样配比及养护龄期						
组号	试验编号	矿渣、粉煤灰配比	碱激发剂含量/%	碱激发剂模数	脱硫石膏掺量/%	养护龄期/d
A	I-1	0:100	4	1.0	0	7、28
	I-2		6	1.0	0	
	I-3		8	1.0	0	
	I-4		10	1.0	0	
	II-1		6	0.6	0	
	II-2		6	0.8	0	
	II-3		6	1.0	0	
	II-4		6	1.2	0	
	III-1		6	0.8	0	
	III-2		6	0.8	2	
	III-3		6	0.8	4	
	III-4		6	0.8	6	
	I-1		4	1.0	0	
	I-2		6	1.0	0	
	I-3		8	1.0	0	
	I-4		10	1.0	0	
B	II-1	30:70	6	0.6	0	7、28
	II-2		6	0.8	0	
	II-3		6	1.0	0	
	II-4		6	1.2	0	
	III-1		6	0.8	0	
	III-2		6	0.8	2	
	III-3		6	0.8	4	
	III-4		6	0.8	6	

根据上述试验方案与《水泥土配合比设计规程》(JGJ/T 233—2011)制备地聚合物固化软土试样,将所有干料搅拌均匀,加入水和静置 24 h 的碱激发剂溶液,再次搅拌至均匀状态,将混合料分 3 次填充在 70.7×70.7×70.7 mm³ 的立方体模具内,每层振动 2 min 捣实。然后将制备好的试样进行标准养护(温度为(20±2)℃,相对湿度为 95%),并在 24 h 后脱模,继续标准养护至 7 d 和 28 d 龄期后,进行无侧限抗压强度试验。选取破坏后试样放置在 50℃烘箱内低温烘干,然后研磨并过 0.075 mm 筛,进行 X 射线衍射试验(XRD),测试扫描角度:10°~80°,扫描速率:3(°)/min;取自然断面约 5 mm³ 的小试块,进行扫描电子显微镜试验(SEM)。

2 试验结果及分析

2.1 固化软土的无侧限抗压强度试验

2.1.1 碱激发剂对地聚合物固化软土的影响

图 2 为在不同硅铝原材料矿渣与粉煤灰配比下,地聚合物固化淤泥质软土无侧限抗压强度(UCS)随碱激发剂模数的演化规律。FA 代表粉煤灰(fly ash),S 代表矿渣(slag),FA_xSY_y 表示粉煤灰与矿渣之比为 $x:y$ 。由图 2(a)与图 2(b)可以看出,随着碱激发剂模数的增加固化土的抗压强度呈现出先增加后减少的趋势,固化土的抗压强度随着龄期的增加而增加;FA100S0 与 FA70S30 固化土 7 d 的抗压强度在 0.6、0.8、1.0 三个模数下,抗压强度并

未发生很大变化。然而 FA100S0 与 FA70S30 固化土 28 d 的抗压强度在不同的模数下呈现出较大差异;FA100S0 与 FA70S30 在最佳碱激发剂模数下,28 d 抗压强度分别达到 183.48 kPa 和 1109.34 kPa。这是因为 7 d 龄期的硅铝原材料未完全反应,由于前期碱激发剂提供的 OH^- 与活性 $[\text{SiO}_4^-]$ 含量相对充足随着龄期的增加抗压强度升高;碱激发剂模数增大,提供的活性 $[\text{SiO}_4^-]$ 越多,在满足反应所需的碱性环境下,能够生成更多

的胶凝产物;当模数过大时,碱性随之变弱,硅铝原材料难以被激发。在相同的模数下,FA100S0 与 FA70S30 的抗压强度相差很大,这是因为矿渣中存在较多的 CaO , $\text{Ca}-\text{O}$ 键比 $\text{Si}-\text{O}$ 键和 $\text{Al}-\text{O}$ 键更易断裂, CaO 的水化反应不仅增强了碱性,同时游离的 Ca^{2+} 促进了硅铝反应,随着龄期的增加,更多的胶凝物质填充在土颗粒之间,因此提高了固化软土的强度。

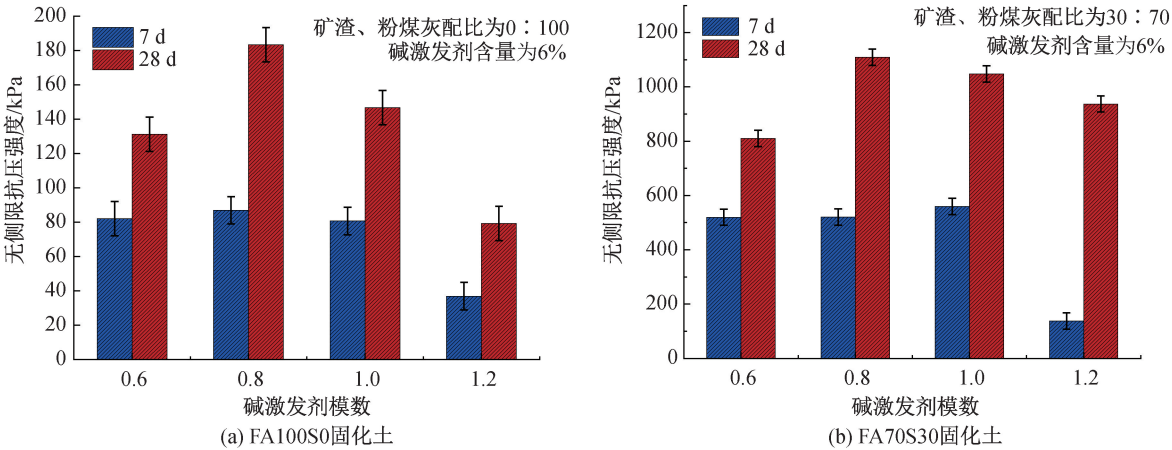


图 2 不同碱激发剂模数下 FA100S0 和 FA70S30 固化土无侧限抗压强度

图 3(a)与图 3(b)显示,随着碱激发剂含量的增加固化土的抗压强度先增加后减少,延长龄期可以明显提高固化土的抗压强度。从图 3 中可以看出,地聚合物固化软土,碱激发剂存在最佳含量,FA100S0 与 FA70S30 在最佳碱激发剂含量下,28 d 最高抗压强度分别达到 146.73、1047.32 kPa。随着碱激发剂含量的增加,固化土的抗压强度明显提高,这是因为碱激发剂含量不够,较多的硅铝原材料

未能被激发,因此提高碱激发剂含量固化土的抗压强度显著提高;当碱激发剂含量过多时,固化土的抗压强度下降,这是因为较多的碱激发剂含量会导致地聚合物硅铝原材料减少,即使碱激发剂能够使得硅铝原料充分被激发,但是硅铝原材料的减少导致生成的胶凝材料减少,不能够很好地填充在土颗粒之间。因此,过多或者过少的碱激发剂含量均不利于地聚合物固化土的力学性能。

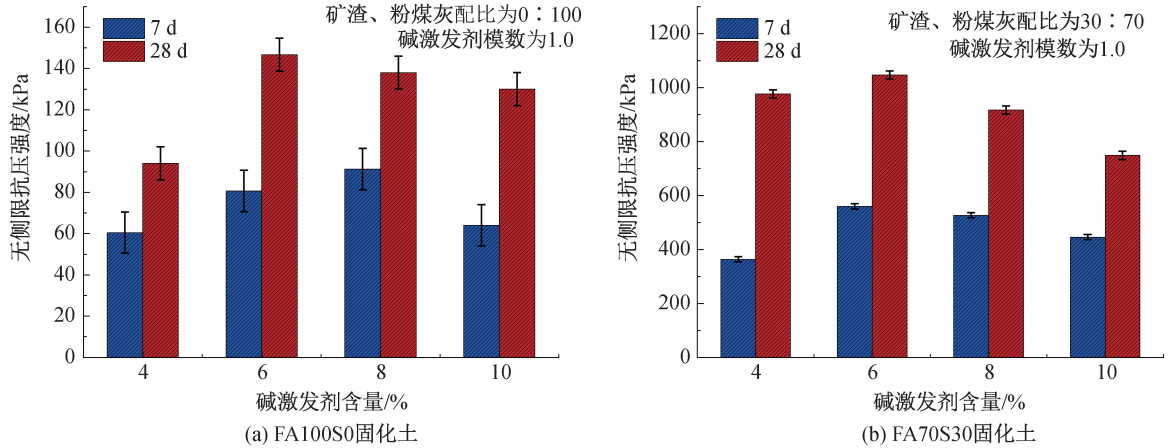
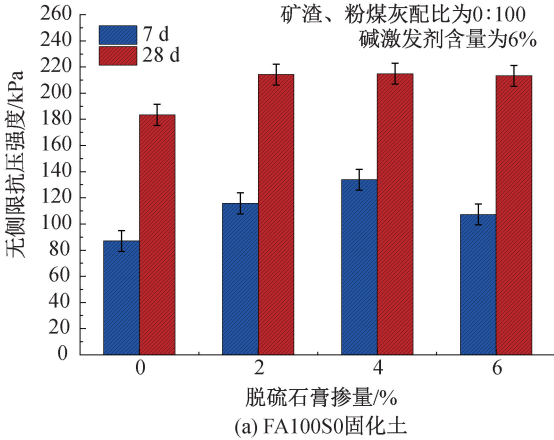


图 3 不同碱激发剂含量下 FA100S0 和 FA70S30 固化土无侧限抗压强度

根据以上分析,对于不同硅铝原材料,FA100S0 与 FA70S30 固化土的最佳模数为 0.8,FA70S30 与 FA100S0 固化土的最佳碱激发剂含量为 6%。

2.1.2 外加剂脱硫石膏对地聚合物固化软土的影响
图 4 是在 FA100S0 与 FA70S30 下,碱激发剂含量为 6%、模数为 0.8,地聚合物固化土的无侧

限抗压强度与脱硫石膏掺量间的关系。由图 4(a)与图 4(b)可以看出,7 d 和 28 d 的抗压强度随着脱硫石膏掺量的增加均呈现出先增加后减少的趋势。当脱硫石膏掺量为 2%~6%时,FA100S0 固化软土 28 d 的抗压强度几乎一致;当脱硫石膏掺量为 2%时,FA70S30 固化软土 28 d 的抗压强度达到峰值。当脱硫石膏掺量为 2%时,FA100S0 固化土 28 d 抗压强度的峰值为 214.21 kPa,相比没有添加外加剂的抗压强度提升了 16.75%,FA70S30 固化土 28 d 抗压强度的峰值为 1742.53 kPa,相比没有添加外加剂的抗压强度提升了 57.08%。脱硫石膏对 FA100S0 与 FA70S30 固化土抗压强度的提升相差较大,主要是因为硅铝原材料中矿渣与粉煤灰的活性差异较大导致其



反应程度不同,因此脱硫石膏对其反应的促进程度存在差异。适量的脱硫石膏使得抗压强度提升,这是因为脱硫石膏提供的 SO_4^{2-} 在与 Ca^{2+} ,在碱性环境下促进了钙矾石的生成与稳定^[17-18],使之分布在土颗粒之间,钙矾石的针状结构可以弥补土体孔隙,使得早期结构更密实。当脱硫石膏加到一定掺量时抗压强度出现降低,这是因为脱硫石膏加入过量,导致土料密实度降低,试样内部孔洞较多;并且过量的脱硫石膏与土颗粒接触的同时,地聚合物与土颗粒的接触程度也相对降低,这不利于胶凝材料黏结与填充土颗粒之间的缝隙;过多的脱硫石膏未完全参与早期的水化反应,而到了反应后期再释放出 SO_4^{2-} ,会促使膨胀性钙矾石的形成,使得土体内部结构松散。

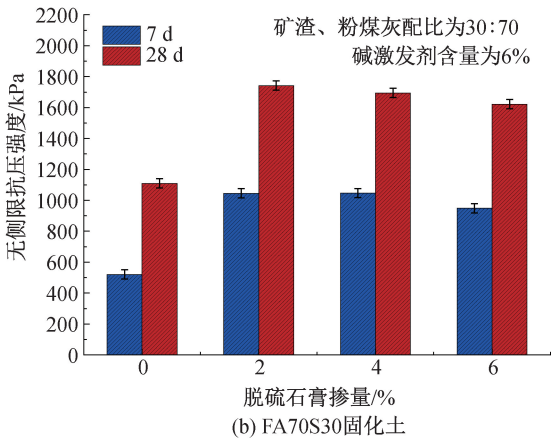


图 4 不同脱硫石膏掺量下 FA100S0 和 FA70S30 固化土无侧限抗压强度

2.2 微观试验

2.2.1 化学成分

原状土和地聚合物固化软土 28 d 养护龄期的 XRD 衍射图谱如图 5 所示,由图可知,软土的矿物组成主要有石英、钠长石、正长石、蒙脱石、斜绿泥石。FA70S30 与 FA100S0 固化土与原状土相比地聚合物固化土的衍射峰未有明显变化,表明该体系没有新的矿物生成,但固化土的 XRD 衍射图谱部分峰值降低,且在 $30^\circ\sim35^\circ$ 的范围内可观察到弥散峰生成,一是因为黏土中的一些矿物参与了反应^[19],二是因为水化产物 N-A-S-H 和 C-(A)-S-H 为胶凝无定形的物质,这些生成物分布在土颗粒之间甚至将土颗粒包裹住,因此降低了土颗粒入射线的反射^[20],没有明显的特征峰。FA70S30 在掺加脱硫石膏后的衍射峰在 $11^\circ\sim13^\circ$ 的位置有明显的新峰形成,因为脱硫石膏的加入,在碱性环境下生成了钙矾石;然而 FA100S0 掺加脱硫石膏后钙矾石的衍射峰相对不显著,表明钙矾石的生成过少或未生成。

FA70S30 掺加 4%脱硫石膏的钙矾石衍射峰比 2%脱硫石膏显著,表明生成了更多的钙矾石,然而钙矾石过多会导致了体系膨胀,结构松散^[15]。当 FA70S30 掺加 4%脱硫石膏时,在 $27^\circ\sim28^\circ$ 钠长石的峰值明显降低,这是因为钠长石在碱性环境下,特殊的离子交换反应发生了溶蚀,而较多脱硫石膏的加入提升了地聚合物体系的 Ca^{2+} 浓度,加速了上述反应^[21]。

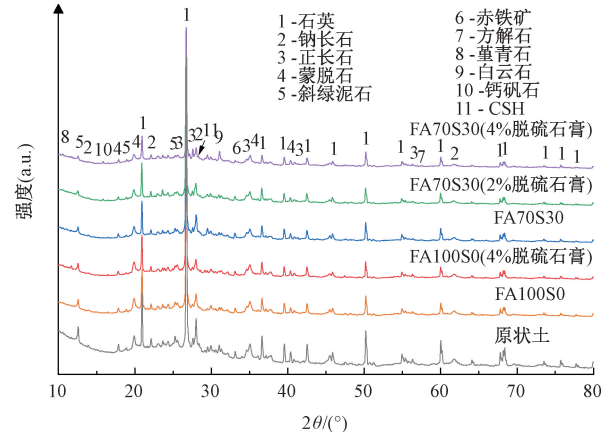


图 5 地聚合物固化软土的 XRD 图谱

2.2.2 微观结构

通过 SEM 可以定性显示固化土的微观结构的变化,从 SEM 图中可以观察出微孔、未反应的胶凝材料颗粒、致密和松散结构以及部分胶结产物的形态。FA100S0 与 FA70S30 的地聚合物固化软土 28 d 龄期的微观结构分别如图 6 和图 7 所示。图 6 (a)与图 6(b)为纯粉煤灰地聚合物固化土的 SEM 图片。从图 6(a)可以看到有较多未完全反应的球状颗粒,这些粉煤灰的表面并不光滑,已经部分参与反应,并且未完全反应粉煤灰附近有较大的孔洞,表明常温下粉煤灰活性未能有效激发,胶凝产物较少,导致土颗粒间松散。图 6(c)与图 6(d)为 FA100S0 掺加脱硫石膏的 SEM 图,与图 6(b)相比加了脱硫石膏的体系,从图中可以看出:粉煤灰和土颗粒之间

更加密实,生成的晶体也相对较多。图 7(a)与图 7 (b)分别为 FA70S30 固化软土与 FA70S30 掺加脱硫石膏固化软土的 SEM 图,从图中可以看出:土体更密实,不再有未反应的球形粉煤灰;掺加脱硫石膏的土颗粒之间的缝隙有大量的结晶相填充,黏结作用使得土体形成一个较为密实的整体,导致其抗压强度大幅度提高,根据已有研究^[22-23]可知,该结晶相为网络状的 C-(A)-S-H 凝胶和少量泛白色 N-A-S-H 凝胶。以上分析表明:含有矿渣的硅铝原料固化软土反应更加充分,脱硫石膏的加入对含有矿渣的硅铝原材料固化软土水化程度明显提升,黏结性产物增加,它不仅能够有效填充颗粒孔隙,还能通过黏结作用将颗粒彼此之间连接起来,这是固化软土抗压强度提升的主要原因。

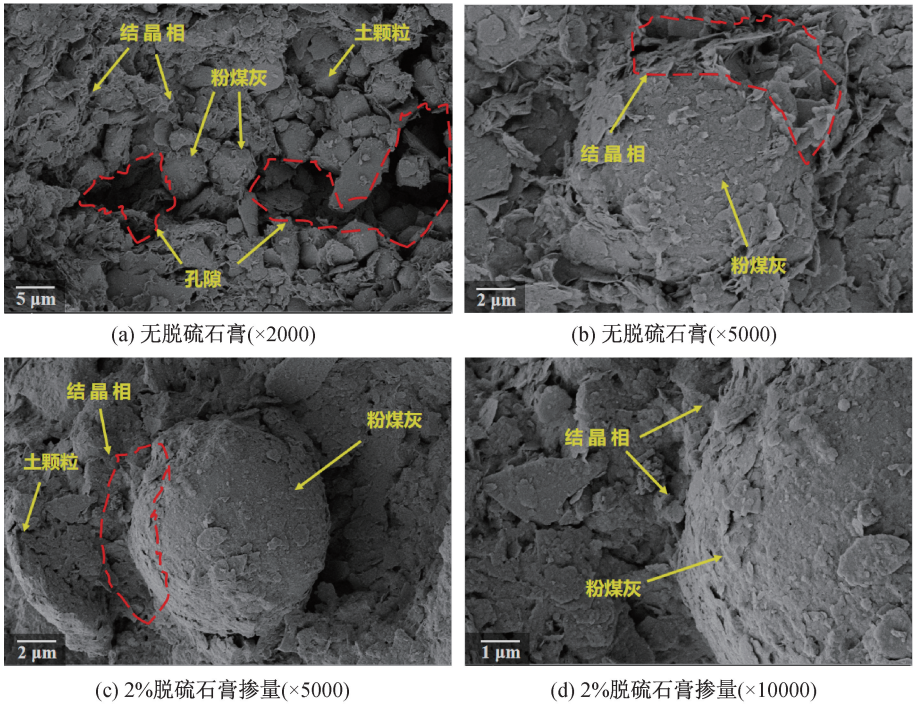


图 6 FA100S0 固化软土 SEM 图

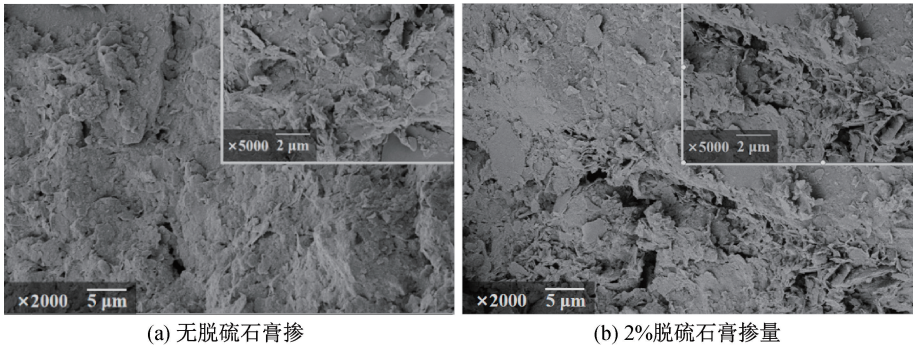


图 7 FA70S30 固化软土 SEM 图

3 结 论

本文主要研究了在不同硅铝原料配比时、不同碱激发剂模数、含量和脱硫石膏的掺量对地聚合物固化淤泥质软土抗压强度的影响规律,并通过 SEM 和 XRD 试验分析固化软土的微观结构变化,揭示固化剂固化软土机理,得出以下结论:

a)不同硅铝原材料地聚合物作为固化剂对软土固化强度有较大的差异;当地聚合物掺量固定时,随着碱激发剂含量以及模数的增大,固化软土抗压强度呈现出先增加后降低的趋势,随着养护龄期的增长,规律更加显著。碱激发剂模数和含量分别为 0.8 和 6% 时,较为有利于地聚合物固化土。

b)脱硫石膏可以明显提升地聚合物固化软土的前期抗压强度,固化土抗压强度随外加剂脱硫石膏掺量的增加,先增加后降低。FA100S0 与 FA70S30 的 28 d 抗压强度的峰值分别为 214.21 kPa 和 1742.53 kPa;相比没有添加外加剂的抗压强度分别提升了 16.75%、57.08%。脱硫石膏对活性较高的硅铝原材料固化土提升幅度大于低活性硅铝原材料。当脱硫石膏掺量为 2% 时,地聚合物固化软土具有最佳的力学性能。

c)微观结果表明,FA100S0 与 FA70S30 固化软土并没有新的矿物生成,但是有无定形胶凝材料 N-A-S-H 和 C-(A)-S-H 生成,胶凝产物通过黏结和填充作用使得土体结构密实。脱硫石膏的加入,促进了地聚合物反应,生成的钙矾石起到填充作用。

参考文献:

- [1] 梁国钱,张民强,俞炯奇,等. 浙江沿海地区软土工程特性[J]. 中国矿业大学学报, 2002, 31(5): 435-437.
- [2] Andrew R M. Global CO₂ emissions from cement production, 1928-2018[J]. Earth System Science Data, 2019, 11(4): 1675-1710.
- [3] Zhao J H, Tong L Y, Li B E, et al. Eco-friendly geopolymer materials: A review of performance improvement, potential application and sustainability assessment [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 307: 127085.
- [4] Davis S J, Caldeira K, Matthews H D. Future CO₂ emissions and climate change from existing energy infrastructure[J]. Science, 2010, 329 (5997): 1330-1333.
- [5] Singh B, Ishwarya G, Gupta M, et al. Geopolymer concrete: A review of some recent developments [J]. Construction and Building Materials, 2015, 85(02): 78-90.

- [6] Aliabdo A A, Abd Elmoaty A E M, Salem H A. Effect of water addition, plasticizer and alkaline solution constitution on fly ash based geopolymer concrete performance[J]. Construction and Building Materials, 2016, 121(9): 694-703.
- [7] Ranjbar N, Mehrali M, Alengaram U J, et al. Compressive strength and microstructural analysis of fly ash/palm oil fuel ash based geopolymer mortar under elevated temperatures [J]. Construction and Building Materials, 2014, 65(8): 114-121.
- [8] Abbas R, Khareby M A, Ghorab H Y, et al. Preparation of geopolymer concrete using Egyptian Kaolin clay and the study of its environmental effects and economic cost [J]. Clean Technologies and Environmental Policy, 2020, 22(3): 669-687.
- [9] 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.
- [10] Abdullah H H, Shahin M A, Sarker P. Use of fly-ash geopolymer incorporating ground granulated slag for stabilisation of kaolin clay cured at ambient temperature [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2019, 37(2): 721-740.
- [11] Cristelo N, Glendinning S, Teixeira Pinto A. Deep soft soil improvement by alkaline activation[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement, 2011, 164(2): 73-82.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 高英力,孟浩,冷政,等. 电石渣-脱硫石膏复合激发充填材料性能及微观结构[J/OL]. 土木与环境工程学报. (2021-08-09)[2022-06-05]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.TU.20210809.1047.004.html>.
- [15] Li M, Wang Q, Yang J D, et al. Strength and mechanism of carbonated solidified clay with steel slag curing agent[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2021, 25(3): 805-821.
- [16] 夏琳玲,吴大志,陈柯宇. 粉煤灰地质聚合物的性能研究及机理分析[J]. 水利规划与设计, 2021(4): 79-82.
- [17] 张文生,张金山,叶家元,等. 合成条件对钙矾石形貌的影响[J]. 硅酸盐学报, 2017, 45(5): 631-638.
- [18] Zhang J J, Li G X, Yang X F, et al. Study on a high strength ternary blend containing calcium sulfoaluminate cement/calcium aluminate cement/ordinary Portland cement

[J]. Construction and Building Materials, 2018, 191: 544-553.

[19] Phummiphan I, Horpibulsuk S, Rachan R, et al. High calcium fly ash geopolymer stabilized lateritic soil and granulated blast furnace slag blends as a pavement base material[J]. Journal of Hazardous Materials, 2018, 341: 257-267.

[20] Zhang M, Guo H, El-Korchi T, et al. Experimental feasibility study of geopolymer as the next-generation soil stabilizer[J]. Construction and Building Materials, 2013, 47: 1468-1478.

[21] Yuan G H, Cao Y C, Schulz H M, et al. A review of feldspar alteration and its geological significance in sedimentary basins: From shallow aquifers to deep hydrocarbon reservoirs [J]. Earth-Science Reviews, 2019, 191: 114-140.

[22] Chen K Y, Wu D Z, Zhang Z L, et al. Modeling and optimization of fly ash-slag-based geopolymer using response surface method and its application in soft soil stabilization[J]. Construction and Building Materials, 2022, 315: 125723.

[23] 俞家人,陈永辉,陈庚,等. 地聚物固化软黏土的力学特征及机理分析[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(2): 364-371.

(责任编辑:康 锋)