

胡建林,赵雨萱,高通通,等.基于三轴试验地聚物固化土力学特性研究[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2025,44(6):696-703.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20250223

HU Jianlin,ZHAO Yuxuan,GAO Tongtong,et al.Study on the mechanical properties of geopolymer-stabilized soil based on triaxial tests[J].Journal of Liaoning Technical University(Natural Science),2025,44(6):696-703.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20250223

基于三轴试验地聚物固化土力学特性研究

胡建林^{1,2,3}, 赵雨萱¹, 高通通¹, 李雅儒¹, 高玉增¹, 周永祥², 王志萍⁴

(1. 河北建筑工程学院 土木工程学院,河北 张家口 075000;2. 北京工业大学 桥梁工程安全与韧性全国重点实验室, 北京 100124;3. 河北建筑工程学院 河北省寒冷地区交通基础设施工程技术创新中心,河北 张家口 075000;

4. 张家口第十建筑工程有限公司,河北 张家口 075000)

摘要:为减少固化土过程中的碳排放量,采用矿渣-粉煤灰基地聚物固化张家口某地区土体,通过三轴试验分析围压、固化剂掺入比、养护龄期对地聚物固化土力学性能的影响,结合电镜扫描技术揭示土体固化的微观机制。研究表明:随着养护龄期的延长及固化剂掺入比的增大,土体应力-应变曲线由硬化型向软化型转变,破坏应变稳定在1%~5%。土体峰值强度随养护龄期、围压及固化剂掺入比的增大而增大,破坏模式由鼓胀破坏转为脆性破坏。矿渣-粉煤灰基地聚物固化土体过程中产生的C-S-H、C-(A)-S-H及C-A-H凝胶,可胶结土颗粒并形成三维骨架结构,增大土体强度。

关键词:地聚物;三轴试验;强度;固化土;力学性能;微观机制;矿渣-粉煤灰基

中图分类号:TU473

文献标志码:A

文章编号:1008-0562(2025)06-0696-08

Study on the mechanical properties of geopolymer-stabilized soil based on triaxial tests

HU Jianlin^{1,2,3}, ZHAO Yuxuan¹, GAO Tongtong¹, LI Yaru¹, GAO Yuzeng¹,
ZHOU Yongxiang², WANG Zhiping⁴

(1. School of Civil Engineering, Hebei University of Architecture, Zhangjiakou 075000, China;
2. National Key Laboratory of Bridge Engineering Safety and Resilience, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;3. Hebei Innovation Center of Transportation Infrastructure in Cold Region, Hebei University of Architecture, Zhangjiakou 075000, China;4. Zhangjiakou Tenth Construction Engineering Company Limited, Zhangjiakou 075000, China)

Abstract: To reduce carbon emissions during soil solidification, slag-fly ash-based geopolymer was used to solidify soil from a specific area in Zhangjiakou. The effects of confining pressure, geopolymer dosage ratio, and curing age on the mechanical properties of the geopolymer-solidified soil were analyzed through triaxial tests. Scanning electron microscopy (SEM) was employed to investigate the underlying micro-mechanisms. The results indicate that: as the curing age increased and the geopolymer dosage ratio rose, the soil's stress-strain curve transitioned from hardening to softening behavior, with the failure strain stabilizing between 1% and 5%. The peak strength of the soil increased with higher curing age, confining pressure, and geopolymer dosage ratio. The failure mode transitioned from bulging failure to brittle failure. The C-S-H, C-(A)-S-H, and C-A-H gels generated during the slag-fly ash-based geopolymer solidification process can cement soil particles and form a three-dimensional skeletal structure, thereby enhancing the soil's strength.

Keywords: geopolymer; triaxial test; strength; solidified soil; mechanical properties; microstructure mechanism; blast furnace slag and fly ash based

收稿日期: 2025-05-21 修回日期: 2025-07-02 接受日期: 2025-07-12 责任编辑: 黄琦

基金项目: 国家自然科学基金项目(52378213); 河北省高等学校科学技术研究项目(QN2024070)

作者简介: 胡建林(1986-),男,河北张家口人,博士研究生,副教授,主要从事地基处理方面的研究。E-mail: hjl185@126.com

0 引言

在软土地基处理、基坑支护等实际工程中常需对土体进行加固,例如采用水泥土搅拌桩、夯实水泥土桩等工艺^[1-3]加固土体。生产水泥过程中需消耗大量不可再生资源,其碳排放量常年位居全球碳排放量前三名^[4],寻找可代替水泥的低碳环保固化剂具有重要意义。地聚物是通过碱性激发剂激发富含硅铝成分矿物形成的,由硅氧四面体和铝氧四面体构成的网络聚合胶凝体,常用原料有高炉矿渣^[5]、粉煤灰^[6-7]、偏高岭土^[8-9]、赤泥^[10]和稻壳灰^[11]等。根据加入原材料种类,可分为单组分、多组分地聚物。其生产过程中能耗较低,与生产水泥相比,碳排放量可减少80%以上,用它替代水泥作为固化剂逐渐成为新趋势^[12]。

目前,常将高炉矿渣和粉煤灰按一定比例混合,形成两组分地聚物结构,以保证地聚物的强度和工作性能^[13]。已有学者将高炉矿渣-粉煤灰地聚物用于加固砂土^[14]、黄土^[15]、软土^[16-17]及淤泥质黏土^[18]。HAMED等^[19]以高炉矿渣、粉煤灰替代水泥作为固化剂来固化土体。研究表明,固化剂含量、粉煤灰-矿渣比和碱性激发剂物质的量浓度对地聚物固化土的强度影响较大。张津津等^[14]研究表明,GGBS-FA地聚物可有效提高砂土力学性能,且复合激发剂的加固效果优于单组分激发剂。吴俊等^[18]研究发现,矿渣-粉煤灰基地聚物的主要产物为无定型水化硅酸钙和水化铝酸钙凝胶,当硅铝原材料中矿渣和粉煤灰的质量分数分别为90%和10%时,固化黏土无侧限抗压强度最高。高炉矿渣-粉煤灰地聚物替代水泥作为固化剂,可有效提高土体强度。目前,常通过无侧限抗压强度试验^[14,20-21]来研究高炉矿渣-粉煤灰地聚物固化土强度,然而实际工程中,搅拌桩均在侧限条件下承担部分载荷,因此有必要对存在围压条件下高炉矿渣-粉煤灰地聚物固化土的力学特性开展研究。

本文以高炉矿渣-粉煤灰为固化剂,对张家口某地区的土体进行固化并开展三轴试验,研究固化剂掺入比、围压、养护龄期对地聚物固化土力学特性的影响,分析地聚物固化土应力-应变关系、强度变化规律及破坏形态,通过扫描电镜试验进行微观分析,揭示其固化机制,以期地为地聚物在固化土中的应用提供参考。

1 试验材料及方案

1.1 试验材料

试验用土取自张家口某地区,土体基本物理性质如下:液限为23.8%(质量分数),塑限为

14.6%(质量分数),塑性指数为9.2,颗粒级配曲线见图1。粉煤灰为市售II级灰。高炉矿渣取自河北平山敬业钢厂,为S105级。碱激发剂采用水玻璃溶液,利用氢氧化钠调整水玻璃模数,其中,水玻璃产自郑州市全成实业有限公司,原液模数为3.2;氢氧化钠为西陇科学化工分析纯试剂(纯度≥96%)。

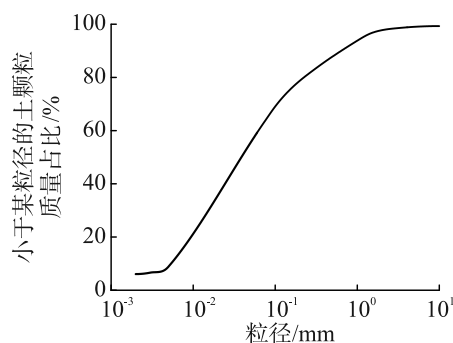


图1 颗粒级配曲线

Fig.1 particle grading curve

1.2 试样制备

为研究地聚物固化土在不同固化剂掺入比、围压及养护龄期下的强度特性,依据《水泥土配合比设计规程》(JGJ/T 233—2011),采用直径为50 mm、高为100 mm的圆柱形试样,高炉矿渣与粉煤灰质量比为1:1,固化剂掺入比(质量分数)取12%、16%、20%,水固比(质量比)取0.3,激发剂水玻璃模数为0.9,水玻璃掺量为固化剂总质量的15%。按照配比取相应质量的高炉矿渣、粉煤灰,加入水和水玻璃,利用水泥胶砂搅拌机初拌30 s,再加入过2 mm筛烘干后的土体进行充分搅拌。将拌合料等分成3份,分3层装入模具,利用振动台将每层振实,直至试样表面平整、无明显气泡,且无下沉现象。振动结束后将试样表面抹平并置于温度为(20±2)℃、相对湿度大于等于95%的标准养护室内进行养护,2 d后脱膜,用保鲜膜包裹后继续养护至指定龄期。

1.3 试验方案

(1) 三轴试验方案

采用三轴仪开展不固结不排水试验,轴向载荷为0~20 kN,位移传感器量程为0~50 mm。试验方案见表1。为保证数据稳定性,依据《水泥土配合比设计规程》(JGJ/T 233—2011),每组试验均设置3个平行试样,并选取具有代表性的数据进行分析。依据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019),以应力峰值点作为土体破坏点。当围压加载至设计值后,保持围压不变,以0.8 mm/min剪

切速率进行加载,直至试样破坏。试验终止加载的标准为:若剪切过程中轴向应力出现峰值,则继续加载,直至轴向应变达到峰值应变后的1%~2%;若剪切过程中轴向应力未出现明显峰值,则加载至轴向应变为15%时终止加载。

表1 三轴试验方案
Tab.1 triaxial test scheme

固化剂掺入比/%	围压/kPa	养护龄期/d
12、16、20	0、100、200、300、400	7、14、28

(2) 微观试验方案

取三轴试验后已破坏的地聚物固化土试样碎块,通过电镜扫描(SEM)试验观察其微观结构,分析固化机理。工作电压为10~15 kV,工作电流为 $3\times 10^{-10}\sim 10^{-9}$ A,使用铜靶,扫描速率为4°/min,扫描范围为15°~80°。

2 试验结果与分析

2.1 固化剂掺入比及养护龄期对土体强度的影响

固化剂掺入比及养护龄期对地聚物固化土无侧限抗压强度的影响见图2。

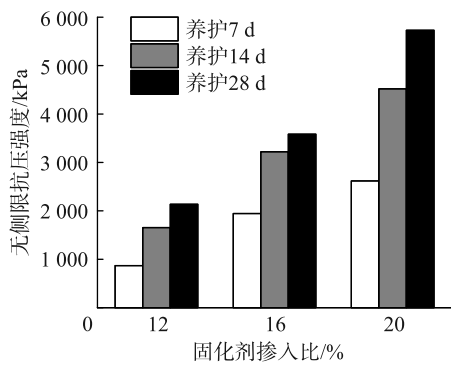
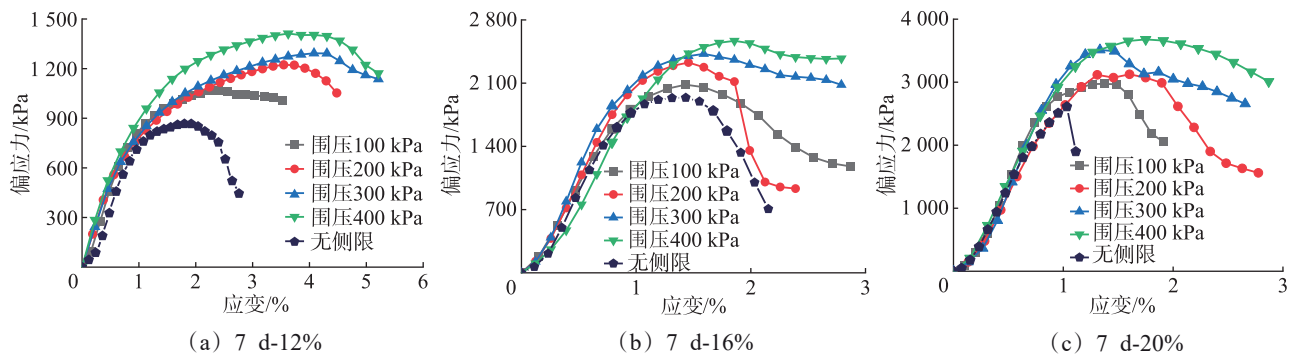


图2 固化剂掺入比及养护龄期对地聚物固化土无侧限抗压强度的影响

Fig.2 influence of binder dosage and curing time on ucs of geopolymer-stabilized soil

由图2可知,随着固化剂掺入比的增大,地聚



物固化土无侧限抗压强度显著提升。养护7 d条件下,固化剂掺入比由12%增至20%,地聚物固化土强度增大1 748.49 kPa。随着养护龄期的延长,地聚物固化土无侧限抗压强度不断增大。与养护7 d相比,养护28 d后,12%、16%和20%固化剂掺入比下地聚物固化土的无侧限抗压强度分别增大1 267.17 kPa、1 639.54 kPa和3 112.08 kPa。产生这种现象主要有三方面原因:一是在碱性激发剂的作用下,高炉矿渣和粉煤灰中的CaO、Al₂O₃和SiO₂被激发溶解,释放出的Ca²⁺、SiO₄⁴⁻和AlO₄⁵⁻发生聚合反应,生成絮状及晶体状的水化产物,例如水化硅酸钙(C-S-H)、水化铝硅酸钙(C-(A)-S-H)和水化铝酸钙(C-A-H)等,这些产物在土颗粒之间起到胶结和填充作用,使土颗粒紧密相连,搭建由土颗粒与胶凝产物共同构成的骨架结构,从而增大土体强度。二是粉煤灰的球形玻璃体结构具有良好的滚动和润滑作用,有助于固化剂在土体内均匀分散,增强土体的和易性。三是随着养护龄期的延长及固化剂掺入比的增大,地聚物水化反应更充分,水化产物增多,可进一步增强土颗粒之间的胶结作用,土体结构更加致密,强度不断增大。

2.2 围压对土体强度的影响

(1) 土体应力-应变曲线

不同围压下地聚物固化土应力-应变见图3,分图命名方式为“养护龄期-固化剂掺入比”。由图3可以看出,与无侧限状态(围压为0 kPa)相比,施加围压后,土体强度明显提升。地聚物固化土应力-应变曲线呈应变软化型,存在明显峰值。土体破坏前,应力-应变曲线相对更陡。随着围压的增大,土颗粒之间的摩擦力逐渐增大,导致土体切线模量、峰值强度逐渐增大。地聚物固化土的破坏应变为1%~5%,呈现出峰值强度越高、破坏应变越小、脆性破坏特征越明显的变化趋势。

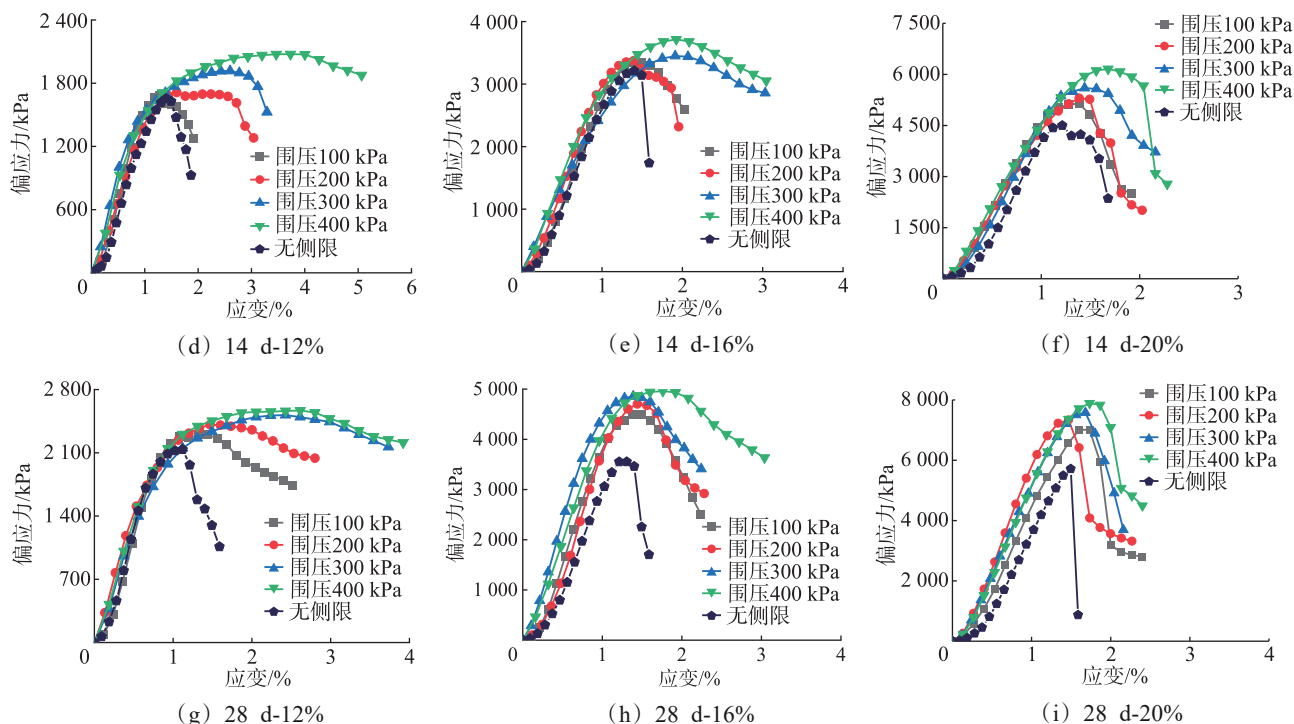


图3 不同围压下地聚物固化土应力-应变

Fig.3 stress-strain of geopolymer-stabilized soil under different confining pressures

由于地聚物固化土的应力-应变基本类似,故仅以7 d养护龄期、300 kPa围压,不同固化剂掺入比下地聚物固化土的应力-应变为例,阐释固化剂掺入比对土体强度特性的影响,见图4。可以看出,随着固化剂掺入比的增大,地聚物固化土峰值强度逐渐增大,破坏应变逐渐减小。这是由于随着固化剂掺量的增加,可产生更多的胶凝产物,胶凝产物与土颗粒胶结在一起,能形成更稳定的骨架结构,从而降低土体孔隙率,增大土体强度^[22]。

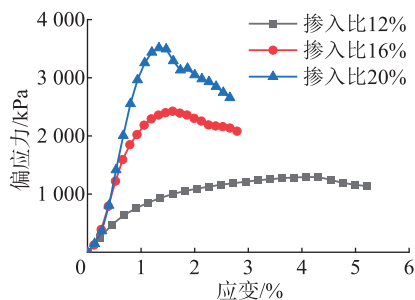


图4 不同固化剂掺入比下地聚物固化土应力-应变

Fig.4 stress-strain of geopolymer-stabilized soil with different binder dosages

固化剂掺入比为12%、围压为300 kPa,不同养护龄期下地聚物固化土应力-应变见图5。可以看出,随着养护龄期的延长,地聚物固化土峰值

强度逐渐增大,破坏应变逐渐减小。7 d、14 d和28 d养护龄期下地聚物固化土的峰值强度分别为1 295.05 kPa、1 926.05 kPa、2 525.04 kPa。养护龄期由7 d增至14 d,地聚物固化土峰值强度增速为90.1 kPa/d,养护龄期由14 d增至28 d,地聚物固化土峰值强度的增速为42.8 kPa/d,下降了52.5%。由此可见,养护前期地聚物固化土强度快速增大,养护后期地聚物固化土强度增长则较为缓慢。

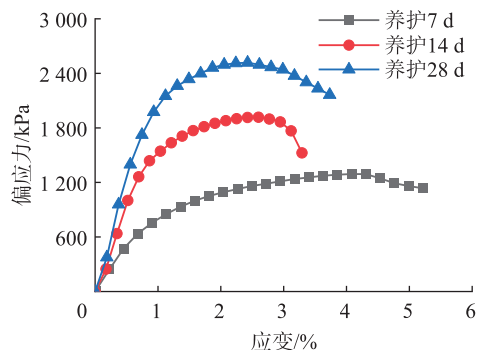


图5 不同养护龄期下地聚物固化土应力-应变

Fig.5 stress-strain of geopolymer-stabilized soil at different curing ages

(2) 土体割线模量变化规律

固化剂掺入比为12%、养护7 d,不同围压下地聚物固化土割线模量-应变见图6。可以看出,围压一定条件下,在加载初期,土体内部孔隙逐

渐被压缩,割线模量随应变的增大而增大。当应变继续增大,割线模量达到峰值后,由于刚度的增大,土体开始发生塑性变形,割线模量逐渐减小。应变一定的条件下,土体的刚度和割线模量均随着围压的增大而增大。

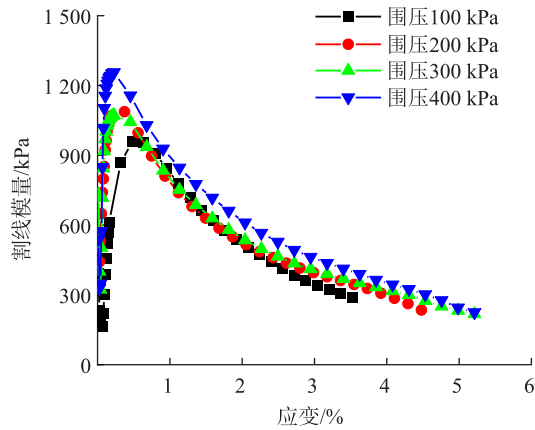


图6 地聚物固化土割线模量-应变

Fig.6 secant modulus-strain of geopolymer-stabilized soil



28 d-12%-0 kPa 28 d-16%-0 kPa 7 d-12%-300 kPa 7 d-16%-300 kPa 7 d-20%-300 kPa 14 d-12%-300 kPa 28 d-12%-300 kPa

图7 试样破坏形态

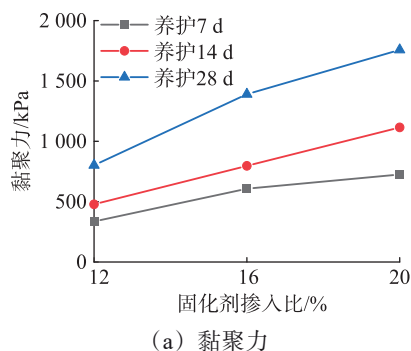
Fig.7 failure patterns of specimens

2.4 土体抗剪强度分析

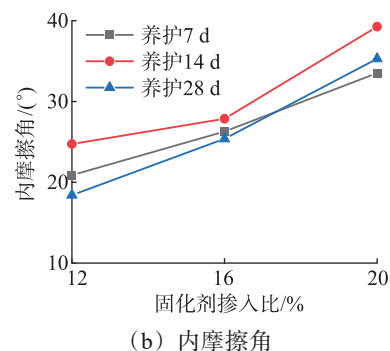
以应力-应变曲线峰值点处强度作为土体破坏强度,绘制各围压下的莫尔应力圆,采用库伦强度准则表征土体抗剪强度,得到地聚物固化土不固

2.3 试样破坏形态

试样破坏形态见图7,试样命名方式为“养护龄期-固化剂掺入比-围压”。通过对比可以看出,无侧限时地聚物固化土表现为脆性破坏。固化剂掺入比较小时,试样在破坏时产生多条细裂缝且裂缝均沿轴向发展,主裂缝不明显。随着固化剂掺入比的增大,试样破坏形态逐渐由鼓胀破坏转变为斜裂缝破坏再到竖向裂缝破坏,破坏时主裂缝明显。这是由于地聚物固化土通过碱性激发剂来激发高炉矿渣与粉煤灰,产生的胶凝物质可胶结土颗粒。掺入地聚物越多,土颗粒胶结越紧密,土体强度越大,更易发生脆性破坏。随着养护龄期的延长,试样由鼓胀破坏逐渐转变为脆性滑移破坏。这是由于随着养护龄期的延长,地聚物水化反应愈加充分,固化土强度逐渐增大。通过以上分析可知,随着固化剂掺入比的增大及养护龄期的延长,试样的破坏形态逐渐由鼓胀破坏转变为脆性破坏。



(a) 黏聚力



(b) 内摩擦角

图8 不同养护龄期下固化剂掺入比对地聚物固化土抗剪强度指标的影响

Fig.8 effect of binder dosage on shear strength parameters of geopolymer-stabilized soil at different curing ages

由图8可以看出,养护7 d时,与固化剂掺入比为12%的土体相比,固化剂掺入比为16%时,

结不排水三轴试验的抗剪强度参数。不同养护龄期下,固化剂掺入比对地聚物固化土抗剪强度指标的影响见图8。

土体黏聚力与内摩擦角分别增大272.33 kPa和5.4°;与固化剂掺入比为16%的土体相比,固化剂

掺入比为20%时,土体黏聚力与内摩擦角分别增大117.57 kPa与7.24°。养护龄期相同的条件下,随着固化剂掺入比的增大,土体黏聚力与内摩擦角均逐渐增大,其中土体黏聚力基本呈线性增长的变化趋势,土体抗剪强度显著增大。这是由于随着固化剂掺入比的增大,可生成更多的水化产物,更好地填充土颗粒之间的孔隙,土颗粒之间的摩擦力与胶结作用增强,土体内摩擦角与黏聚力逐渐增大。固化剂掺入比为12%~16%时,黏聚力增长较快,内摩擦角增长较慢。固化剂掺入比超过16%后,黏聚力增长逐渐变缓,内摩擦角增长较快,表明较高的固化剂掺入比对提高土颗粒之间摩擦性能的效果更加显著。

不同固化剂掺入比下,养护龄期对地聚物固

化土抗剪强度指标的影响见图9。由图9(a)可以看出,随着养护龄期的延长,不同固化剂掺入比下地聚物固化土的黏聚力均呈线性增大的变化趋势。由图9(b)可以看出,随着养护龄期的延长,不同固化剂掺入比下地聚物固化土的内摩擦角整体呈两段式变化,养护7 d至14 d,内摩擦角逐渐增大。养护14 d时,土体内摩擦角达到峰值。养护14 d至28 d,内摩擦角逐渐减小。通过以上分析可知,养护龄期小于14 d,随着养护龄期的延长,土体黏聚力和内摩擦角均逐渐增大,土体抗剪强度逐渐提高。养护龄期超过14 d,随着养护龄期的延长,土体黏聚力逐渐增大,内摩擦角逐渐减小,此时,与内摩擦角相比,黏聚力对土体抗剪强度提升的贡献更大。

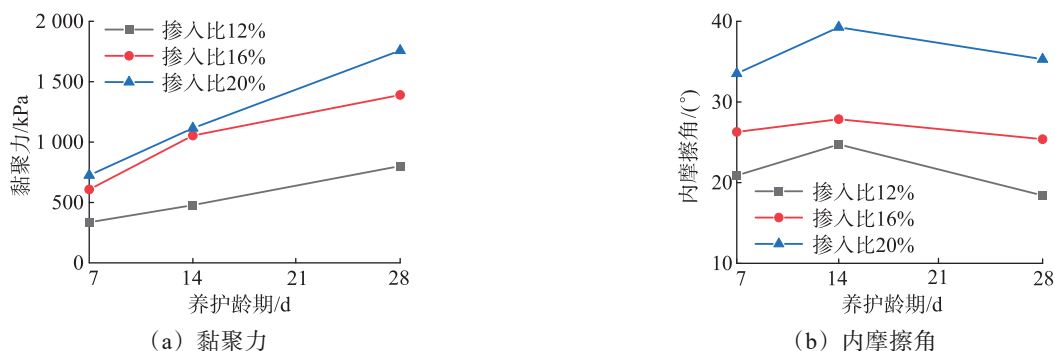


图9 不同固化剂掺入比下养护龄期对地聚物固化土抗剪强度指标的影响

Fig.9 effect of curing age on shear strength parameters of geopolymer-stabilized soil under different binder dosages

3 微观分析

养护28 d,不同固化剂掺入比下地聚物固化土1 000倍SEM图见图10。可以看出,地聚物水化反应产生蜂窝状、絮状和片状胶凝物质及晶体。其中,蜂窝状和絮状胶凝物质主要为水化硅酸钙

(C-S-H);片状胶凝物质为水化铝酸钙(C-A-H)^[18]。胶凝物质周围存在少量未反应的粉煤灰。随着固化剂掺入比的增大,水化产物逐渐增多,胶凝物质将土颗粒连接,形成骨架结构,从而增大土体强度。

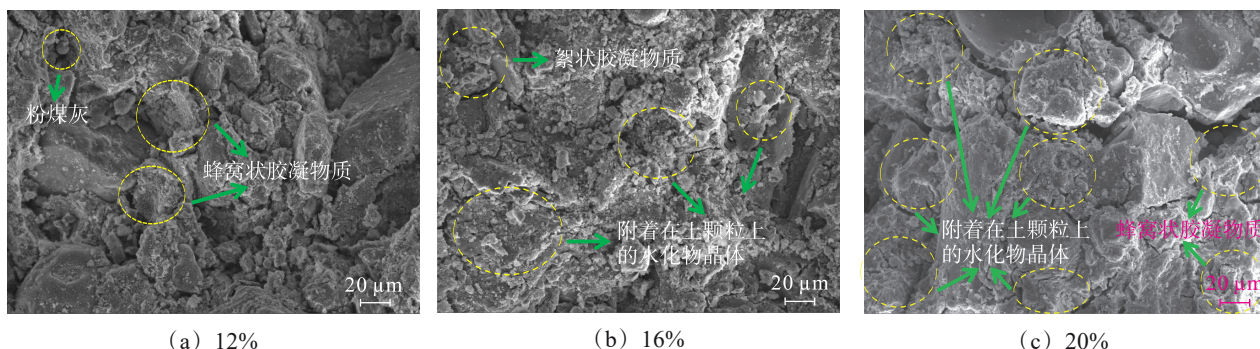


图10 不同固化剂掺入比下地聚物固化土1 000倍SEM图

Fig.10 SEM images (1 000×) of geopolymer-stabilized soil with different binder dosages

固化剂掺入比为20%,不同养护龄期下地聚物固化土1 000倍SEM图见图11,2 000倍SEM图见图12。由图11可以看出,养护龄期由7 d增至28 d,

土体微观结构形态差异较大。养护7 d,地聚物水化程度较低,土体内部存在大量孔隙与裂缝,固化土的骨架未完全形成。随着养护龄期的延长,

地聚物水化反应愈加充分,生成的大量胶凝物质逐渐包裹土颗粒,有效填充内部孔隙,土体结构更密实。由图12可以看出,养护7 d,土颗粒表面有少量晶体水化物附着,土颗粒之间存在大量絮状胶凝物质。

状胶凝物质。养护14 d,晶体水化物与絮状胶凝物质逐渐增多。养护28 d,晶体水化物逐渐变为片状,并与絮状胶凝物质逐渐将土颗粒包裹,土体结构更密实,强度更高。

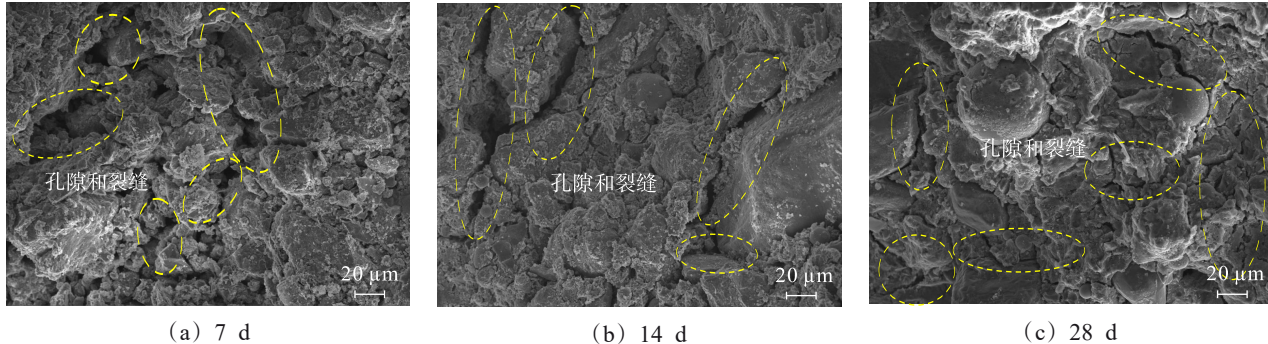


图11 不同养护龄期下地聚物固化土1 000倍SEM图

Fig.11 SEM images (1 000×) of geopolymer-stabilized soil at different curing ages

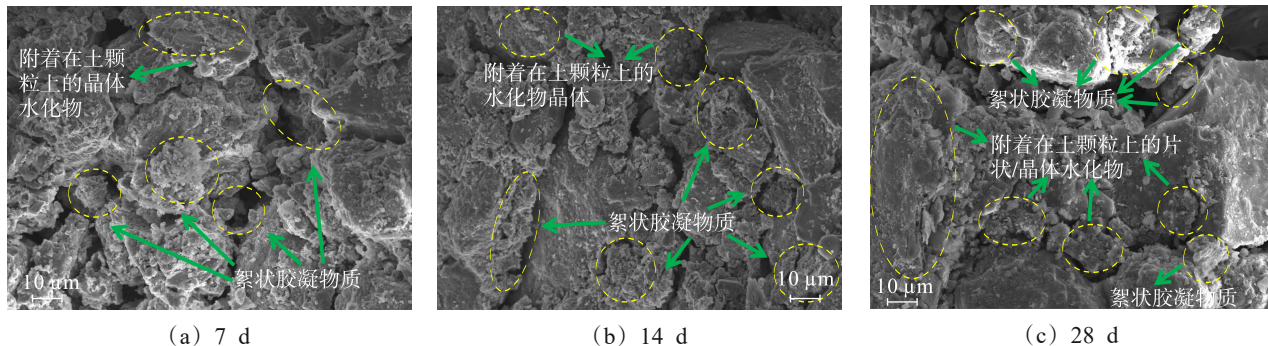


图12 不同养护龄期下地聚物固化土2 000倍SEM图

Fig.12 SEM images (2 000×) of geopolymer-stabilized soil at different curing ages

4 结论

本文通过三轴试验分析矿渣-粉煤灰地聚物固化土的力学性能,通过扫描电镜(SEM)观察其微观结构,得出如下结论。

(1) 固化土的峰值强度随固化剂掺入比的增大、养护龄期的延长和围压的增大而提高。随着抗压强度的增大,土体应力-应变曲线由应变硬化型转变为应变软化型,破坏模式由塑性鼓胀破坏转变为脆性剪切破坏,土体表现出较强的脆性特征。

(2) 随着应变的增大,固化土的割线模量呈先增后减的变化趋势,存在明显峰值。随着围压的增大,固化土割线模量逐渐增大。

(3) 固化土的黏聚力随着固化剂掺入比的增大、养护龄期的延长而增大。内摩擦角随着固化剂掺入比的增大而增大,随着养护龄期的延长呈先增后减的变化趋势。

(4) 随着固化剂掺入比的增大及养护龄期的

延长,固化反应更加充分,生成的凝胶产物逐渐增多,较好地填充土颗粒之间的孔隙,并将土颗粒连接,形成更加致密、稳定的骨架结构,从而有效增大土体强度。

参考文献(References):

- [1] 费大伟,黄耀英,方国宝,等.考虑养护温度的水泥土搅拌桩强度模型探讨[J].长江科学院院报,2021,38(12):125-129.
FEI Dawei, HUANG Yaoying, FANG Guobao, et al. Discussion on strength model of cement-soil mixing pile considering curing temperature[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021,38(12):125-129.
- [2] 苏文轩,宁宝宽,刘剑平,等.水泥与碱激发材料协同固化氯盐渍土的机理研究[J].建筑材料学报,2025,28(1):26-32,41.
SU Wenxuan, NING Baokuan, LIU Jianping, et al. Mechanism study of chlorine saline soil synergistically solidified by cement and alkali-activated materials[J]. Journal of Building Materials, 2025,28(1): 26-32,41.
- [3] 贾剑青,赵阳阳,贾超,等.湿陷性黄土地基水泥土搅拌桩加固效果研究[J].铁道工程学报,2022,39(7):18-24.

- JIA Jianqing, ZHAO Yangyang, JIA Chao, et al. Research on the reinforcement effect of cement-soil mixing pile on collapsible loess foundation[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2022, 39(7): 18-24.
- [4] 董烨民,钱雄,胡传林,等. 新型胶凝材料:石灰石煅烧黏土水泥研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2023, 51(9): 2446-2464.
- DONG Yemin, QIAN Xiong, HU Chuanlin, et al. New cementitious material: advances in limestone calcined clay cement[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2023, 51(9): 2446-2464.
- [5] MISHRA J, NANDA B, PATRO S K, et al. A comprehensive review on compressive strength and microstructure properties of GGBS-based geopolymer binder systems[J]. Construction and Building Materials, 2024, 417: 135242.
- [6] 张文豪,谢建斌,刘道炎,等. 水泥-高钙粉煤灰改良泥炭质土的宏观试验研究[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2020, 39(1): 41-50.
- ZHANG Wenhao, XIE Jianbin, LIU Daoyan, et al. Macroscopical and mesoscopic study on improving peaty soil with cement-high calcium fly ash[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2020, 39(1): 41-50.
- [7] YAZICI E, UNSEVER Y S. Investigation of cement and fly ash on the improvement of fine sand soil[J]. Applied Sciences, 2024, 14(7): 2908.
- [8] 谷上海,黄敦文,杨翼玮,等. 碱激发偏高岭土-矿渣对氯离子的固化能力及其影响因素[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2022, 54(2): 191-201.
- GU Shanghai, HUANG Dunwen, YANG Yiwei, et al. Chloride binding ability of alkali activated metakaolin/slag blends and its influencing factors[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2022, 54(2): 191-201.
- [9] ZHANG W Y, JIN Y Z, NA S, et al. Effect of different alkali equivalents on the drying shrinkage properties of metakaolin-based geopolymers[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2024, 36(12): 04024430.
- [10] 田凯歌,王恒岳,王琰帅,等. 碱激发赤泥-矿渣人造骨料及其砂浆性能研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2023, 55(4): 528-539.
- TIAN Kaige, WANG Hengyue, WANG Yanshuai, et al. Study on alkali-activated red mud-slag artificial aggregate and its mortar performance[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2023, 55(4): 528-539.
- [11] 徐宏,王旭,陈伟,等. 碱激发稻壳灰地聚物固化粉土试验[J]. 长江科学院院报, 2025, 42(5): 192-199.
- XU Hong, WANG Xu, CHEN Wei, et al. Experimental study on silt stabilization using alkali-activated rice husk ash geopolymer[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2025, 42(5): 192-199.
- [12] 刘凤云,罗怀瑞,万旭升,等. 低温养护下电石渣激发偏高岭土基地聚物固化土力学特性及固化机制研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(11): 3151-3164.
- LIU Fengyun, LUO Huairui, WAN Xusheng, et al. Study on mechanical properties and curing mechanism of metakaolin based geopolymer solidified soil activated by calcium carbide slag under low temperature curing[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(11): 3151-3164.
- [13] GOPALAKRISHNA B, DINAKAR P. Geopolymer mortars: a comparative study of fly ash, ground granulated blast-furnace slag, and silica fume-based binders for sustainable construction[J]. Journal of Structural Design and Construction Practice, 2025, 30: 04024073.
- [14] 张津津,李博,余闯,等. 矿渣-粉煤灰地聚物固化砂土力学特性研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(9): 2421-2430.
- ZHANG Jinjin, LI Bo, YU Chuang, et al. Mechanical properties of slag-fly ash based geopolymer stabilized sandy soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(9): 2421-2430.
- [15] LI S H, FANG X W, LI Y H, et al. Solidification of loess using a composite geopolymer based on slag powder and fly ash: influencing factors and mechanism analysis[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2024, 36(12): 04024428.
- [16] WAN Y, ZHU Z D, ZHANG D W, et al. Research on strength and deformation properties of high moisture soft soils stabilized by GGBS, cement, fly ash, and sodium silicate[J]. Construction and Building Materials, 2024, 448: 138244.
- [17] AL KHAFAJI A E, WAILY M J, JAWAD Z F. Strength performance of soft clayey soil solidified by slag-fly ash-metakaolin based geopolymer[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2024, 1374(1): 012020.
- [18] 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.
- [19] HAMED E, DEMIRÖZ A. Optimization of geotechnical characteristics of clayey soils using fly ash and granulated blast furnace slag-based geopolymer[J]. Construction and Building Materials, 2024, 441: 137488.
- [20] 郑溢雯,吴俊,杨爱武,等. 采用固体硅酸钠激发的一步法地质聚合物在软土固化中的适用性研究[J]. 岩土力学, 2024, 45(7): 2072-2084.
- ZHENG Yiwen, WU Jun, YANG Aiwu, et al. Feasibility study on the one-part geopolymer activated by solid sodium silicate for soft soil solidification[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(7): 2072-2084.
- [21] 陈瑞敏,简文彬,张小芳,等. CSFG-FR协同作用改良淤泥固化土性能试验研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(4): 1020-1030.
- CHEN Ruimin, JIAN Wenbin, ZHANG Xiaofang, et al. Experimental study on performance of sludge stabilized by CSFG-FR synergy[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(4): 1020-1030.
- [22] 刘拥华,朱杰,赵明喆,等. 冻结水泥改良粉质黏土的损伤力学特性研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2023, 48(3): 529-537.
- LIU Yonghua, ZHU Jie, ZHAO Mingzhe, et al. Study on damage mechanical properties of frozen cement-improved silty clay[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2023, 48(3): 529-537.