

DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20230330001

文章编号: 1672-9331(2023)05-0049-10

引用格式: 张永杰, 谭长江, 邓沛宇, 等. 地聚物-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.

Citation: ZHANG Yongjie, TAN Changjiang, DENG Peiyu, et al. Study on test and curing mechanism of geopolymers-cement solidified soil-rock mixture[J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2023, 20(5): 49-58.

地聚物-水泥固化土石混合体试验与固化机理研究

张永杰, 谭长江, 邓沛宇, 李嘉兵, 唐银港

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要:【目的】研究水泥取代率对地聚物-水泥固化土石混合体抗压强度和破坏形态的影响, 揭示地聚物-水泥对土石混合体的固化机理。【方法】通过无侧限抗压强度试验、含水率测定试验、扫描电镜试验和X射线衍射试验, 探究水泥取代率对偏高岭土-矿渣-水泥基地聚物固化土和粉煤灰-矿渣-水泥基地聚物固化土抗压强度、破坏形态、含水率、微观形貌和矿物成分的影响及它们随龄期的变化规律。【结果】水泥取代率为0%~20%时, 固化土抗压强度与水泥取代率成正比。偏高岭土-矿渣-水泥基地聚物和粉煤灰-矿渣-水泥基地聚物的最优水泥取代率为20%, 此时其相应固化土的14 d抗压强度分别为2 510.90、2 532.14 kPa; 随着水泥取代率的增加, 固化土破坏模式由鼓胀破坏逐渐转变为劈裂破坏; 养护时间为14 d时, 20%水泥取代率的固化土的含水率最低, 水化反应最充分; 反应生成的水化硅酸钠(N-A-S-H)和水化硅铝酸钙(C-S-H)凝胶在孔隙中起胶结和填充作用。【结论】适当的水泥取代率可以提高水化反应速率, 促进水化产物的生成, 有效提升地聚物-水泥对土石混合体的固化效果。

关键词: 道路工程; 土石混合体; 地聚物; 固化机理; 抗压强度

中图分类号: U414

文献标志码: A

0 引言

土石混合体是指由强度较高的块石、细颗粒土体及孔隙构成且具有一定含石量的松散岩土介质系统^[1]。由于其组成成分特殊, 物质结构杂乱, 具有强度低、透水性强、易变形等特点, 在地震、降雨和工程扰动等因素的影响下, 土石混合体容易发生冲蚀、坍塌等地质灾害^[2], 为保证邻近工程构筑物的安全稳定, 有必要对其加固处置。在实际工程中除采用抗滑桩、锚索框架梁等支护方式外, 还可采用注浆加固的方法, 然而普通硅酸盐水泥在生产过程中存在成本高、环境污染等问题。因此, 有必要在现有研究的基础上探讨更经济、更环保的注浆材料。

地聚物是指用工业废弃物(粉煤灰、矿渣)和

天然矿物(偏高岭土)等硅铝质原料在碱激发剂作用下所制备的一种高性能绿色胶凝材料^[3-7]。相比于传统硅酸盐水泥, 地聚物的制备过程能减少CO₂排放, 且地聚物具备高强度、高稳定性以及高耐久性等优点, 因此受到了国内外学者的广泛关注^[8-10]。ZHANG等^[11]采用偏高岭土基地聚物对软黏土进行固化。RIOS等^[12]通过试验发现粉煤灰基地聚物可有效提升粉沙土的无侧限抗压强度和结构致密性。王伟齐等^[13]、黄龙波等^[14]和王海荣等^[15]通过室内试验, 对被地聚物固化后的软土、淤泥质土和污染土等的力学特性和微观结构开展了一系列研究。叶华洋等^[16-17]发现用偏高岭土与水泥共同固化软弱土体, 不仅能获得比单独用水泥固化更好的力学性能和抗渗性能, 而且更加经济环保。张小芳等^[18]采用粉煤灰基地聚物与水泥对淤泥质土进行固化, 得到了最优水泥掺量, 揭示了

收稿日期: 2023-03-30; 修回日期: 2023-05-08; 接受日期: 2023-05-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52178416、51878071); 湖南省自然科学基金资助项目(2022JJ30615); 长沙理工大学研究生实践创新与创业能力提升计划项目(CLSJCX22036)

通信作者: 张永杰(1981—)(ORCID: 0009-0001-9751-1784), 男, 教授, 主要从事岩土与基础工程方面的研究。

E-mail: zhangyongjie@csust.edu.cn

粉煤灰-矿渣-水泥对淤泥质土的固化机理。

综上所述,地聚物胶凝材料已被广泛运用于土体加固领域。然而,前人的研究主要集中在利用地聚物来改善软土和淤泥质土的力学性能上,对其用于土石混合体固化方面的研究较少,尤其是对不同地聚物组合固化的土石混合体的力学性能、微观结构和固化机理的研究明显偏少,亟须加强。

因此,本研究分别采用偏高岭土-矿渣-水泥基地聚物(metakaolin-slag-cement base polymer, MSC)和粉煤灰-矿渣-水泥基地聚物(fly ash-slag-cement base polymer, FSC)这两种固化方案下的固化土石混合体,研究水泥取代率对土石混合体固化土抗压强度的影响,对比不同水泥取代率下固化土石混合体的破坏模式,利用含水率测定试验、扫描电镜试验(scanning electron microscope, SEM)和X射线衍射试验(X-ray diffraction test, XRD)探究不同水泥取代率固化土含水率的变化规律、微观形貌和矿物成分,揭示地聚物-水泥对土石混合体的固化机理。

1 试验材料和方案

1.1 试验材料

本试验用土取自长沙市某工地。将取回的土样烘干、碾碎,并根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)的试验方法对其进行试验,得到土样的天然含水率、天然密度、初始孔隙比和液限分别为23.5%、1.78 g/cm³、0.68和40.03%,通过筛分试验和XRD试验得到颗粒级配曲线和XRD图谱如图1~2所示。为保证试验的可重复性,采用重塑土进行试验,试验用土级配良好,其含石率为

40%,颗粒粒径为(0, 20] mm,不均匀系数 $C_u=19.27$,曲率系数 $C_c=1.48$,含水率为13%,最大干密度为2.02 g/cm³,上述参数与文献[1]中土石混合体的参数一致。

试验所采用的固化剂材料由粉煤灰、偏高岭土和矿渣等胶凝材料组成,其中,所用的S95矿渣购自河南鼎诺净化材料有限公司,I级粉煤灰购自河南鑫亿嘉化工产品有限公司,1250目煅烧偏高岭土粉购自河南铂润铸造材料有限公司,它们的XRD图谱和主要化学成分如图2和表1所示。偏高岭土和粉煤灰中主要含有的矿物成分为石英,矿渣中主要含有的矿物成分为方解石,软黏土中主要含有的矿物成分为石英和方解石。偏高岭土、粉煤灰和矿渣在15~40°内出现较明显的衍射峰,说明这3种固化剂材料具有较强的化学活性,且存在利于发生水化反应的无定型相玻璃体。P·O 42.5水泥购自诸城杨春水泥有限公司,液体水玻璃购自南昌市佳俊化工有限公司,其初始模数为2.61,片状氢氧化钠纯度为99%,河沙粒径为0~1 mm。

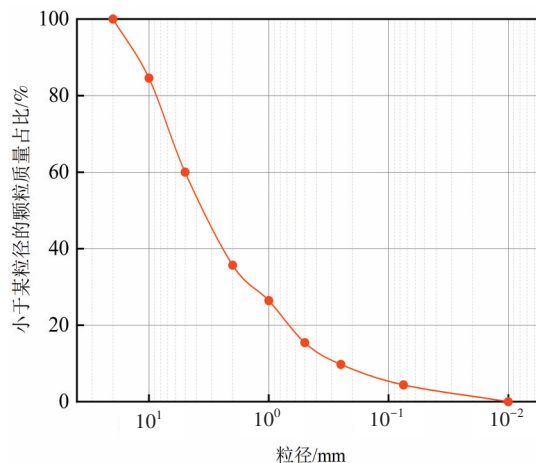
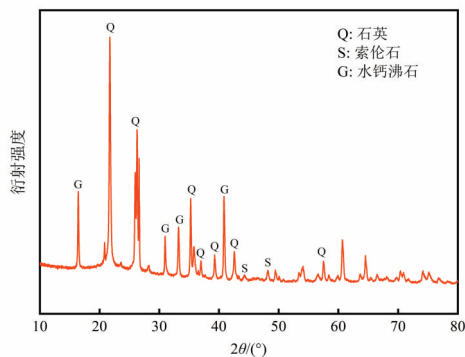
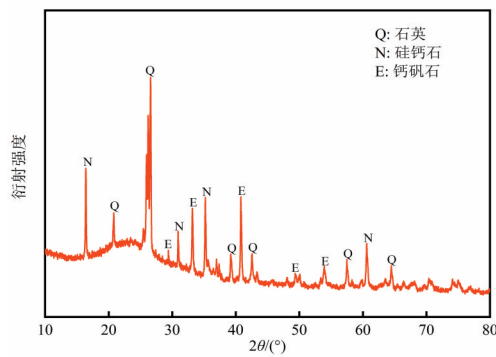


图1 土石混合体颗粒级配分布曲线

Fig. 1 Distribution curve of particle size of soil-rock mixture



(a) 偏高岭土



(b) 粉煤灰

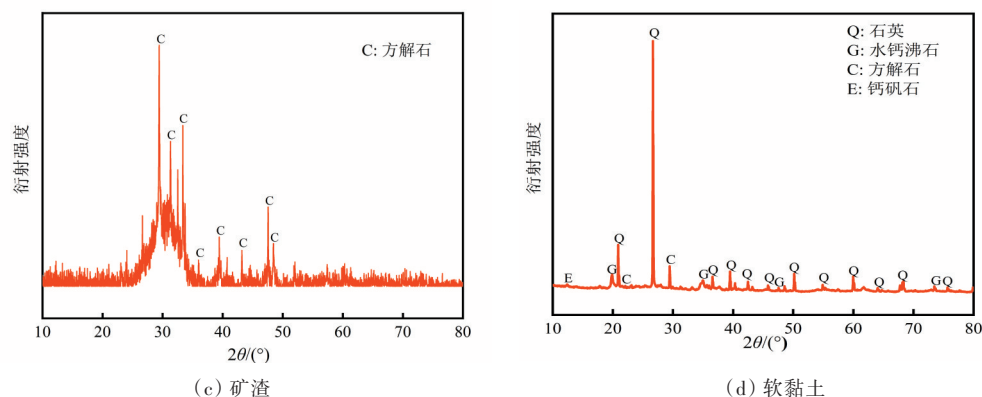


图2 试验材料的XRD图谱

Fig. 2 XRD patterns of test materials

表1 固化剂材料的主要化学成分及其质量分数

Table 1 The main chemical composition and mass fraction of curing agent %

材料	$w(\text{SiO}_2)$	$w(\text{Al}_2\text{O}_3)$	$w(\text{CaO})$	$w(\text{MgO})$	$w(\text{SO}_3)$	$w(\text{Fe}_2\text{O}_3)$	$w(\text{K}_2\text{O})$	$w(\text{TiO}_2)$
矿渣	34.78	14.75	35.80	8.55	1.81	0.62	0.48	
偏高岭土	53.00	41.50	0.10	0.06		0.80	0.37	1.00
粉煤灰	54.68	26.83	2.02	1.28	0.51	7.58	1.63	2.81

1.2 试验设计

根据以往的研究^[19],本研究将固化剂的基准掺量设定为20%,水胶比设定为0.4,砂胶比设定为0.3。根据前期的研究结果,固化方案MSC在碱激发剂模数为1.2、碱激发剂掺量为20%、矿渣取代率为60%时,固化方案FSC在碱激发剂模数为1.8、碱激发剂掺量为25%、矿渣取代率为60%时,对土石混合体的固化效果最好。本试验在前期的研究基础上,探讨水泥取代率对固化剂固化土石混合体效果的影响规律,水泥取代率取0%、10%、20%、30%和40% 5个水平,试验方案见表2。

表2 试验方案设计

Table 2 Test scheme design

试验组号	水泥取代率/%	固化土名称
L1	0	MS/FS
L2	10	MS1C/FS1C
L3	20	MS2C/FS2C
L4	30	MS3C/FS3C
L5	40	MS4C/FS4C

表2中MS、MS1C、MS2C、MS3C和MS4C分别

代表MSC固化方案下水泥取代率为0%、10%、20%、30%和40%的固化土;FS、FS1C、FS2C、FS3C、FS4C分别代表FSC固化方案下水泥取代率为0%、10%、20%、30%和40%的固化土。

1.3 试样制备

称取一定量的水玻璃和氢氧化钠并混合搅拌,将水玻璃模数调配至所需值,并作为碱激发剂备用^[20]。按预设质量比称取土石混合体材料和偏高岭土、粉煤灰、矿渣等胶凝材料及已制备好的碱激发剂倒入搅拌机,干搅2 min后加水搅拌15 min。拌和均匀后在150 mm×150 mm×150 mm的立方体模具内分三层压实,通过控制每层固化土的压实质量以保证其压实度为88%。制样完成后静置24 h后脱模,并用保鲜膜密封包裹以保证试样含水率不发生变化,然后放入标准养护箱(养护温度为20℃±2℃,相对湿度在95%以上)内养护至所需龄期。试样制备流程如图3所示。



图3 试样制备流程图

Fig. 3 Flow chart of sample preparation

1.4 测试方法

1.4.1 无侧限抗压强度试验

将标准养护至预设龄期(7、14 d)的固化土取出,进行无侧限抗压强度试验。试验设备为上海华龙测试仪器有限公司研发的WDW-100C型微型电子万能试验机,试验加载速率为1.5 mm/min。当轴向应变达到15%时,停止试验。试验结果取3个平行试样数据的平均值。

1.4.2 含水率测定试验

含水率依据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)中的烘干法测定。取试样中间剖面,按“十”字形在4个方向上距中心15、45、75 mm处取样(共12个取样点,见图4),称重后放入108℃电热烘箱烘8~10 h,然后再次称重。据水分损失情况,求得试样含水率,其为12个取样点试样含水率的平均值。每组试验取两个平行试样。

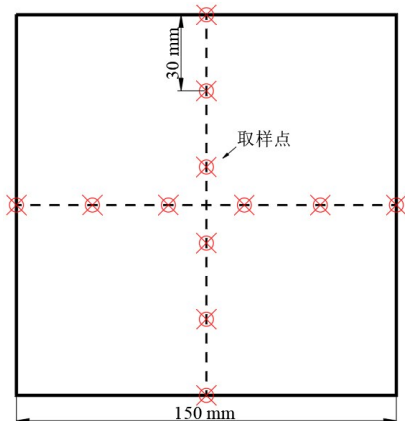


图4 含水率试验取样点

Fig. 4 Moisture content test point

1.4.3 微观形貌和物相分析试验

试验所用试样取自含水率测定试验后的固化土,主要通过SEM试验和XRD试验来对试样的微观形貌和矿物成分进行分析。SEM试验仪器采用德国蔡司(Zeiss)集团研发的EVO MA25,试验设置放大倍数为1 000倍;XRD试验设置衍射角扫描范围为10~80°,扫描速度为1°/min。

2 试验结果与分析

2.1 抗压强度试验

2.1.1 水泥取代率对固化土抗压强度的影响

在最优配合比下,两种固化土抗压强度随水泥取代率的变化规律如图5所示。由图5可知,当

水泥取代率较低(0%、10%)时,两种固化剂对土石混合体的固化效果均不理想。当水泥取代率为10%时,MSC和FSC固化土14 d的抗压强度分别为461.09、104.84 kPa;当水泥取代率增加到20%时,MSC和FSC固化土14 d的抗压强度分别提升至2 510.90、2 532.14 kPa,为水泥取代率10%时相应固化土抗压强度的5.45、24.15倍,为固化前土石混合体抗压强度的69.84、50.44倍,说明采用适量水泥取代一部分地聚物对土石混合体进行固化,可以有效提升土石混合体的抗压强度。但当水泥取代率进一步增加时,固化土的抗压强度变化不大,说明地聚物-水泥固化土石混合体存在边际效应。因此,对于土石混合体固化,MSC和FSC两种固化剂的最优水泥取代率为20%。

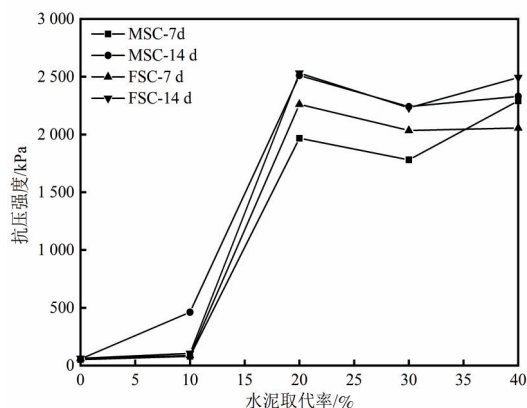


图5 固化土抗压强度随水泥取代率变化规律

Fig. 5 Variation of compressive strength of solidified soil with cement substitution rate

2.1.2 水泥取代率对固化土破坏形态的影响

试样的破坏形态可以在一定程度上反映试样在试验过程中的受力特性和固化效果。在无侧限抗压强度试验中,不同水泥取代率下试样的破坏形态及轴向应力-应变曲线如图6~7所示。

由图6(a)可知,在试验加载过程中,水泥取代率为0%的固化土发生鼓胀破坏,表现出一定的塑性;由图6(b)可知,当水泥取代率为10%时,固化土破坏模式由鼓胀破坏向劈裂破坏转变,试样中部首先出现裂缝,并随着轴向应变的增大而不断发育,直至贯穿;由图6(c)可知,当水泥取代率为20%时,固化土出现了类似混凝土的劈裂破坏,试样表面有多条裂缝产生。

由图7可知,当水泥取代率较低(0%、10%)时,固化土表现出一定的塑性,其轴向应力随着应变的增大变化较小;当水泥取代率增加到20%时,固化

土的轴向应力-应变曲线呈现出明显的3个阶段:快速增长阶段、缓慢增长阶段和破坏阶段。

当轴向应变从0%增长到3%时,试样内部孔隙被压实,固化土的应力主要源自固化剂的胶结能力和土颗粒之间的咬合力,在轴向应变为2%

时,固化土出现裂缝,其强度出现波动;当轴向应变从3%增长到5%时,固化土的应力源自其本身的承压能力;当轴向应变大于5%后,固化土的应力达到峰值,随着应变的不断增大,固化土试样完全被破坏,其强度彻底丧失。



图6 不同水泥取代率下固化土的破坏形态

Fig. 6 Failure modes of solidified soil under different cement replacement rates

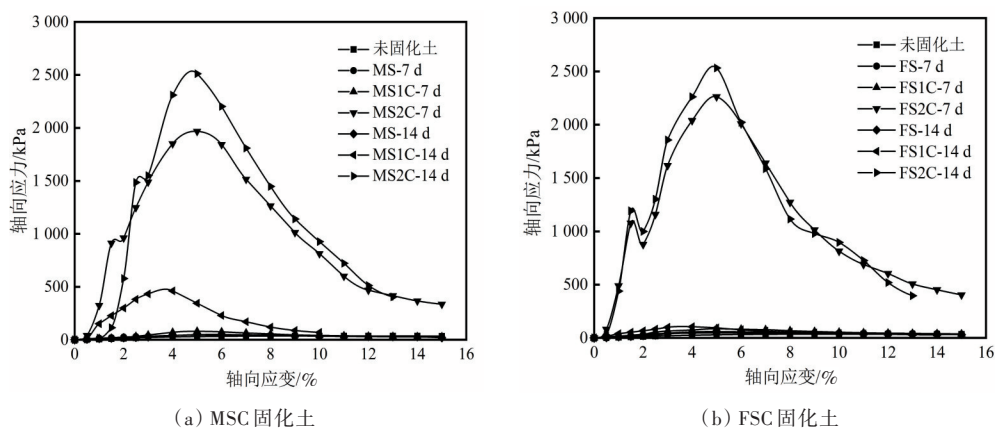


图7 固化土轴向应力-应变曲线

Fig. 7 Axial stress-strain curve of solidified soil

2.2 含水率测定试验

不同水泥取代率下固化土的含水率随龄期的变化规律如图8所示。由图8可知,固化土含水率随着养护时间的增加而逐渐降低,且固化土前期和中期含水率的下降速率明显比后期的大,这说

明随着龄期的增长,试样中固化剂的水化反应越来越充分,水化反应速率逐渐降低,宏观上表现为试样养护时间越长,其抗压强度越大,但固化土7 d的抗压强度和14 d的相差不大。

当养护龄期为14 d时,水泥取代率为0%、

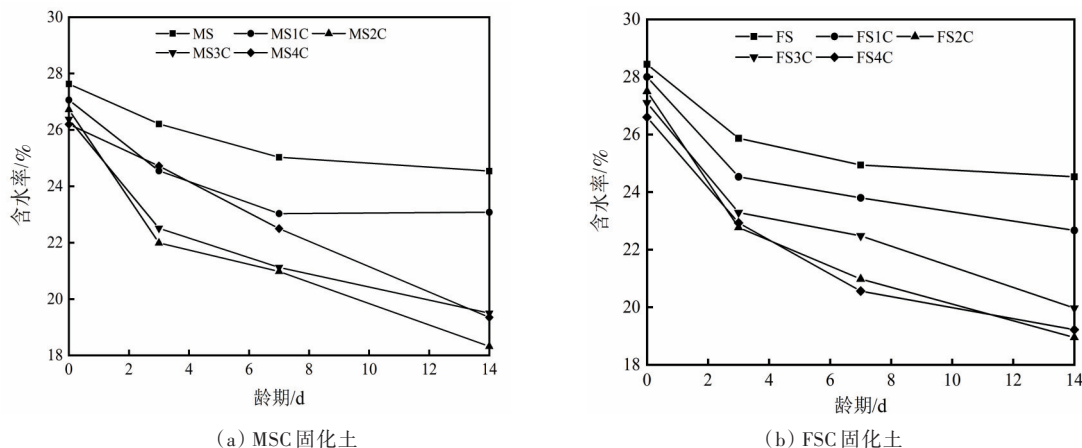


图8 不同水泥取代率下固化土含水率的变化规律

Fig. 8 Moisture content variation of solidified soil under different cement replacement rates

10%、20%、30%和40%的MSC固化土的含水率分别降低了11.2%、14.7%、31.4%、26.1%和26.2%；水泥取代率为0%、10%、20%、30%和40%的FSC固化土的含水率分别降低了13.8%、19.0%、31.1%、26.3%和27.7%。相同水泥取代率下FSC固化土含水率的下降幅度整体上比MSC固化土含水率的下降幅度要大,这说明FSC固化土石混合体的水化反应程度更高。

将不同水泥取代率下14 d养护龄期的固化土按照其含水率从大到小排列,依次为:0%、10%、30%、40%、20%水泥取代率的固化土,且20%、30%和40%水泥取代率下固化土的含水率比水泥取代率为0%和10%的固化土的低得多。这说明当水泥取代率为20%时,地聚物-水泥对土石混合体的固化效果最好,当水泥取代率为30%和40%时固化效果次之,当水泥取代率为0%和10%时固化效果最差,究其原因是地聚物中的金属离子与水泥水化产物氢氧化钙发生了二次反应,当水泥取代率较低(0%、10%)时,固化剂水化反应不充分,试样内部存在大量未反应完全的水;当水泥取代率较高(30%、40%)时,较多的水泥发生了水化反应,所生成的水化产物快速填充了试样中的孔隙,并阻碍了地聚物与水泥水化产物之间的接触反应^[18],进而导致固化土中存在未反应完全的水,这与抗压强度试验结果一致。

2.3 微观结构试验

2.3.1 SEM 试验

不同水泥取代率下养护时间为14 d的固化土的微观形貌如图9~10所示(图中SL、FA分别代表矿渣颗粒和球状粉煤灰颗粒)。由图9(a)和10(a)可以看出,当水泥取代率为0%时,未参与反应的棱角分明的矿渣颗粒和球状粉煤灰颗粒杂乱地堆积在固化土颗粒表面。

当水泥取代率为10%时,固化土中虽然有水化硅酸钙(C-S-H)和水化硅铝酸钠(N-A-S-H)生成,但生成量较小,土颗粒表面还存在大量的SL和FA等未反应完全的硅铝质原料,如图9(b)和10(b)所示。此时,试样内部存在大量孔隙,固化土结构较松散,整体性不强,强度较低。

当水泥取代率超过20%时,固化土颗粒表面出现大量如蜘蛛网般的白色晶体,如图9(c)和9(d)所示,它们牢牢附着在土体表面,将周边土颗粒黏结成一个整体。试样整体呈层状结构,如图9(e)所示,此时固化土内部的孔隙大大减少,其强度得到进一步提升。图10(c)、10(d)和10(e)中虽仍存在部分未反应完全的球状粉煤灰颗粒,但生成的C-S-H和N-A-S-H凝胶将其牢牢包裹,使其与土颗粒胶结成一个整体,改善了固化土的微观结构。对比不同水泥取代率下固化土的微观形貌可以发现,除0%和10%水泥取代率的固化土外,其他3组固化土试样的结构整体性较好,这也是无侧限抗压强度试验中0%和10%水泥取代率下固化土强度比其他3组水泥取代率下固化土强度低得多的原因。

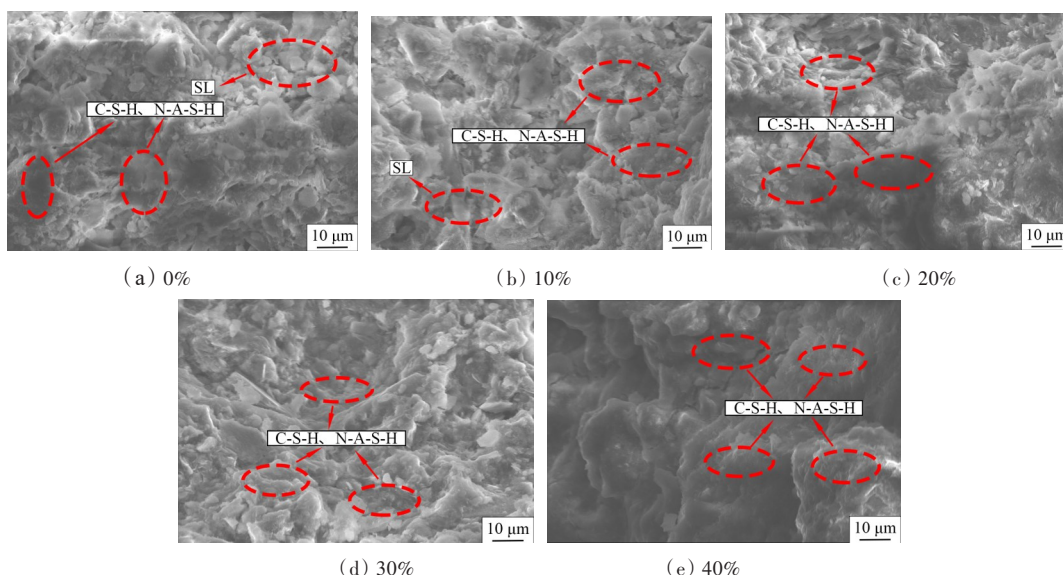


图9 不同水泥取代率下MSC固化土的SEM图

Fig. 9 SEM of MSC solidified soil under different cement replacement rates

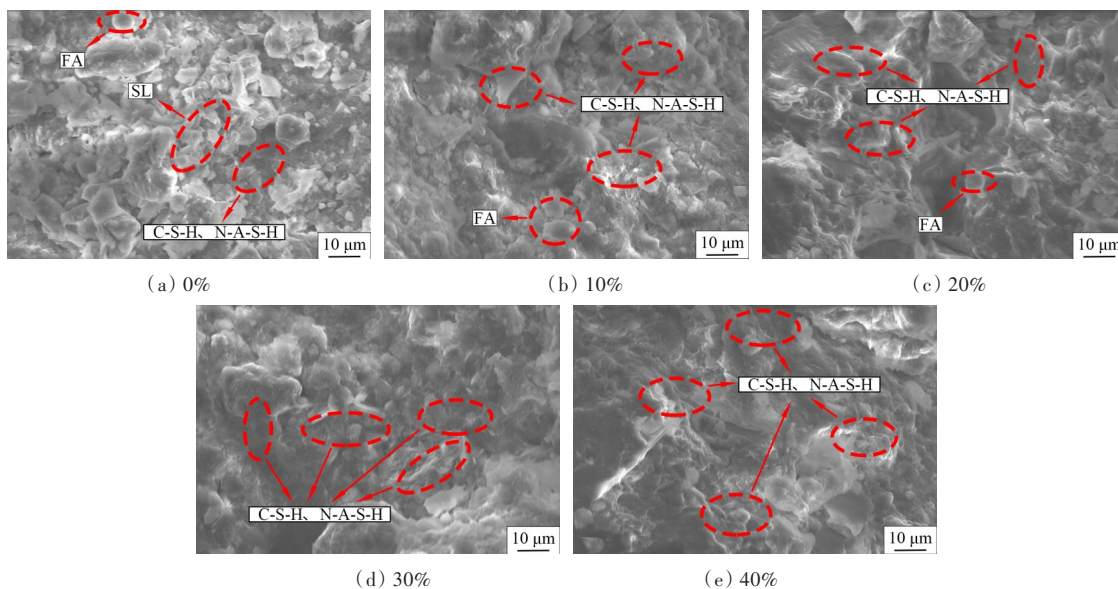


图10 不同水泥取代率下FSC固化土的SEM图

Fig. 10 SEM of FSC solidified soil under different cement substitution rates

2.3.2 XRD 试验

固化土试样的XRD图谱如图11所示。相较于原材料软黏土的XRD图谱(图2),固化土中的矿物峰有所降低,出现了更多的钙矾石峰,说明黏土矿物参与了反应,生成了钙矾石等水化产物。当水泥取代率由0%增加到20%后,固化土中的晶相明显增多,沸石衍射强度明显增大。以养护时间7 d的固化土(主要含有石英、沸石和方解石等黏土中常见的矿物)为例,当水泥取代率从0%增加到20%时,试样中石英的衍射强度有所降低,沸石的衍射强度有所提升,且有新的钙矾石波峰出现。另外,在固化土XRD图谱中还存在无定型的连续弥散峰,说明固化剂在固化土石混合物中发生了水化反应,不仅生成了沸石和钙矾石等矿物,

还生成了无定型相成分。本试验SEM结果和相关研究结果^[21]表明,该无定型相为C-S-H和N-A-S-H凝胶。

3 经济对比分析

根据本研究中两种固化方案下土石混合体的固化效果,对固化剂材料成本进行估算,并与水泥的成本进行对比分析,结果见表3。从表3可以看出,当水泥取代率为20%及以上时,偏高岭土-矿渣-水泥基地聚物材料的单价较高,是水泥单价的1.35~1.46倍,采用其对土石混合物进行固化,强度虽高但不经济;粉煤灰-矿渣-水泥基地聚物材料的单价是水泥的0.82~0.86倍,其固化土的抗

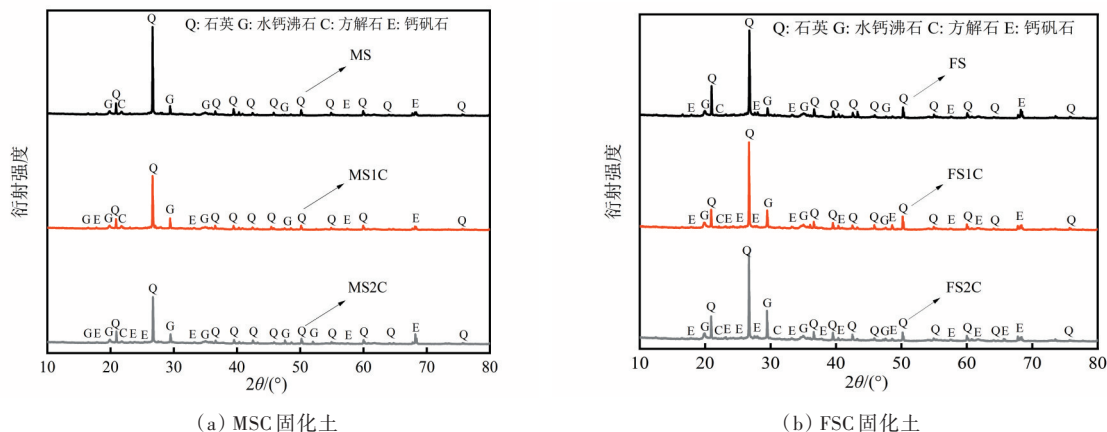


图11 试样固化后XRD图谱

Fig. 11 XRD patterns of samples after curing

压强度明显比水泥固化土的高,尤其是FS2C固化剂,其单价仅为水泥的82%,但其7、14 d固化土的抗压强度却分别达到了同龄期水泥固化土抗压强度的2.38、1.85倍,采用其对土石混合体进行固化将是最优选择。当水泥取代率较低(0%、10%)时,固化土的抗压强度较低,不能满足工程实际需求,故这里没有讨论。

综上所述,在地聚物中掺入一定量水泥可以有效提高固化土强度,大幅降低工程造价,在兼顾强度和经济的前提下,FS2C为最优固化剂组合。

表3 固化剂材料单价表

Table 3 Unit price list of curing agent materials

固化剂名称	固化土的抗压强度/kPa		材料单价/(元·t ⁻¹)
	7 d	14 d	
水泥	951.11	1 371.45	369.23
MS	50.67	56.31	580.44
MS1C	79.88	461.09	558.94
MS2C	1 967.64	2 510.90	537.54
MS3C	1 780.47	2 241.19	516.21
MS4C	2 291.79	2 330.50	497.56
FS	59.72	61.01	284.55
FS1C	86.28	104.84	292.72
FS2C	2 262.31	2 532.14	300.96
FS3C	2 034.68	2 230.62	309.27
FS4C	2 056.53	2 493.41	317.64

4 结论

1) 两种固化方案的最优水泥取代率为20%。在此水泥取代率下,当养护时间为14 d时,MS2C和FS2C固化土的抗压强度分别可达2 510.90、2 532.14 kPa,在兼顾强度和经济的前提下,FS2C为土石混合体的最优固化剂组合。

2) 在无侧限抗压强度试验的加载过程中,当水泥取代率较低(0%、10%)时,固化土发生鼓胀破坏;当水泥取代率大于等于20%时,固化土发生劈裂破坏,可以在试样中观察到明显的贯穿裂缝。

3) 在相同水泥取代率下,FS2C固化剂比MS2C固化剂的水化反应更充分;将不同水泥取代率下14 d养护龄期固化土的含水率按照从大到小的顺序排列,依次为:0%、10%、30%、40%、20%水泥取代率的固化土,这说明当水泥取代率为20%时,固

化剂的水化反应程度最高。

4) 当水泥取代率为20%时,试样内部生成了大量C-S-H和N-A-S-H凝胶,其填充在土颗粒孔隙之间,有效改善了土体结构,试样整体性大幅提升。

[参考文献]

- [1] 徐文杰, 胡瑞林. 土石混合体概念、分类及意义[J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(4): 50-56, 70. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3665.2009.04.012.
XU Wenjie, HU Ruilin. Conception, classification and significations of soil-rock mixture[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2009, 36(4): 50-56, 70. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3665.2009.04.012.
- [2] 邸小勇. G42沪蓉高速重庆段松散堆积层区域路基边坡稳定性分析及加固方法研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2012.
DI Xiaoyong. Research on reinforcement method and stability analysis on the subgrade slope build in loose accumulative region on G42 Shanghai-Chengdu highway Chongqing [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2012.
- [3] JUENGER M C G, WINNEFELD F, PROVIS J L, et al. Advances in alternative cementitious binders [J]. Cement and Concrete Research, 2011, 41(12): 1232-1243. DOI: 10.1016/j.cemconres.2010.11.012.
- [4] 刘荣, 马玉玮, 李源, 等. 外加剂对碱激发粉煤灰/矿渣胶凝材料早期性能的影响[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(16): 107-113.
LIU Rong, MA Yuwei, LI Yuan, et al. The effect of admixtures on early-age properties of alkali-activated fly ash/slag [J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(16): 107-113.
- [5] 马艳霞, 聂思凡, 郭佳庆. 硫酸盐渍土地区粉煤灰混凝土力学性能试验研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2022, 19(1): 64-72. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.01.008.
MA Yanxia, NIE Sifan, GUO Jiaqing. Experimental research on mechanical properties of fly ash concrete in sulfate saline soil area [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2022, 19(1): 64-72. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.01.008.
- [6] 张雄飞, 乐新波, 王淑玲, 等. 高岭土地质聚合物聚合动力学初探[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2016, 13(2): 102-107.
ZHANG Xiongfei, YUE Xinbo, WANG Shuling, et al. Reaction kinetics of kaolinite-based geopolymer with different active SiO₂/Al₂O₃ ratios [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2016, 13(2): 102-107.

- [7] 王海龙, 陈亚飞, 邹道勤, 等. 不同打印与加载方向下3D打印地质聚合物混凝土力学性能研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2022, 19(4): 55-63. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.04.006.
WANG Hailong, CHEN Yafei, ZOU Daoqin, et al. Mechanical properties of 3D printed geopolymer concrete under different printing and loading directions [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2022, 19(4): 55-63. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.04.006.
- [8] 崔潮, 彭晖, 刘扬, 等. 矿渣掺量及激发剂模数对偏高岭土基聚物常温固化的影响[J]. 建筑材料学报, 2017, 20(4): 535-542. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2017.04.008.
CUI Chao, PENG Hui, LIU Yang, et al. Influence of GGBFS content and activator modulus on curing of metakaolin based geopolymer at ambient temperature [J]. Journal of Building Materials, 2017, 20(4): 535-542. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2017.04.008.
- [9] KOMNITSAS K, ZAHARAKI D. Geopolymerisation: a review and prospects for the minerals industry [J]. Minerals Engineering, 2007, 20(14): 1261-1277. DOI: 10.1016/j.mineng.2007.07.011.
- [10] 吕松涛, 张超, 樊喜雁, 等. 水泥替代矿粉对橡胶沥青混合料性能的影响[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2019, 16(4): 57-63.
LYU Songtao, ZHANG Chao, FAN Xiyan, et al. The effect of cement substituting mineral powder on the performance of rubber asphalt mixture [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2019, 16(4): 57-63.
- [11] 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. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.06.017.
- [12] RIOS S, CRISTELO N, VIANA DA FONSECA A, et al. Structural performance of alkali-activated soil ash versus soil cement [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016, 28(2): 04015125. DOI: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001398.
- [13] 王伟齐, 孙红, 葛修润. 碱激发作用下海相软土固化研究[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(7): 2248-2255, 2269. DOI: 10.16552/j.cnki.issn1001-1625.20210511.001.
WANG Weiqi, SUN Hong, GE Xiurun. Solidification of marine soft soil under alkali excitation [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40(7): 2248-2255, 2269. DOI: 10.16552/j.cnki.issn1001-1625.20210511.001.
- [14] 黄龙波, 汪洪星, 谈云志, 等. 固化淤泥土长期强度发展规律与预测模型研究[J]. 武汉理工大学学报, 2016, 38(2): 70-75.
HUANG Longbo, WANG Hongxing, TAN Yunzhi, et al. Solidified silt long-term strength developing principle research considering the influence of initial water content and solidification agents [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2016, 38(2): 70-75.
- [15] 王海荣, 朱志铎, 浦少云, 等. 碱激发粉煤灰-矿渣固化镉污染土的影响因素分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2021, 51(6): 1025-1032.
WANG Hairong, ZHU Zhiduo, PU Shaoyun, et al. Analysis on influencing factors of cadmium contaminated soil solidified by alkali-activated fly ash-slag [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2021, 51(6): 1025-1032.
- [16] 叶华洋, 张伟锋, 韦未, 等. 激发剂-地聚物对软土固化试验研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2019, 27(4): 906-917. DOI: 10.16058/j.issn.1005-0930.2019.04.018.
YE Huayang, ZHANG Weifeng, WEI Wei, et al. Experimental study on the curing of soft soil with activator-geopolymer [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2019, 27(4): 906-917. DOI: 10.16058/j.issn.1005-0930.2019.04.018.
- [17] 叶华洋, 张伟锋, 韦未, 等. 地下水对地聚物改性水泥土的影响研究[J]. 广东土木与建筑, 2018, 25(5): 49-52. DOI: 10.19731/j.gdtdmyjz.2018.05.015.
YE Huayang, ZHANG Weifeng, WEI Wei, et al. Study on the effect of groundwater on geopolymer modified cement soil [J]. Guangdong Architecture Civil Engineering, 2018, 25(5): 49-52. DOI: 10.19731/j.gdtdmyjz.2018.05.015.
- [18] 张小芳, 陈瑞敏, 简文彬. 水泥-矿渣-粉煤灰固化淤泥的水分转化规律及其固化机理研究[J]. 工程地质学报, 2023, 31(1): 102-112. DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2020-378.
ZHANG Xiaofang, CHEN Ruimin, JIAN Wenbin. Study on water conversion law and solidification mechanism of cement-slag-fly ash solidified silt [J]. Journal of Engineering Geology, 2023, 31(1): 102-112. DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2020-378.
- [19] CHEW S H, KAMRUZZAMAN A H M, LEE F H. Physicochemical and engineering behavior of cement treated clays [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, 130(7): 696-706. DOI: 10.1061/(asce)1090-0241(2004)130:7(696).
- [20] 孙淑文. 水玻璃模数的调节与计算[J]. 建井技术, 1984, 5(2): 26-29. DOI: 10.19458/j.cnki.cn11-2456/tid.1984.02.008.
SUN Shuwen. Adjustment and calculation of water glass modulus [J]. Mine Construction Technology, 1984, 5

- (2): 26–29. DOI: 10.19458/j.cnki.cn11-2456/td.1984.02.008.
- [21] 何俊, 王小琦, 石小康, 等. 碱渣-矿渣固化淤泥的无侧限抗压强度与微观特征[J]. 应用基础与工程科学学报, 2021, 29(2): 376–386. DOI: 10.16058/j.issn.1005-0930.2021.02.011.
- HE Jun, WANG Xiaoqi, SHI Xiaokang, et al. Unconfined compressive strength and microscopic characteristics of soft soil solidified with soda residue and ground granulated blast furnace slag[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2021, 29(2): 376–386. DOI: 10.16058/j.issn.1005-0930.2021.02.011.

Study on test and curing mechanism of geopolymers-cement solidified soil-rock mixture

ZHANG Yongjie, TAN Changjiang, DENG Peiyu, LI Jiabing, TANG Yin'gang

(School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: [Purposes] The effect of cement substitution rate on the compressive strength and failure mode of geopolymers-cement solidified soil-rock mixture was studied, and the solidification mechanism of geopolymers-cement on soil-rock mixture was revealed. [Methods] The unconfined compressive strength test, moisture content determination test, scanning electron microscope test, and X-ray diffraction test were used to investigate the effect and the change law of cement substitution rate on the compressive strength, failure mode, moisture content, microstructure, and mineral composition of metakaolin-slag-cement based geopolymers solidified soil and fly ash-slag-cement based geopolymers solidified soil with age. [Findings] When the cement substitution rate is 0%–20%, the compressive strength of solidified soil is proportional to the cement substitution rate. Metakaolin-slag-cement based geopolymers and fly ash-slag-cement based geopolymers have the optimal cement substitution rate of 20%, and the 14 d compressive strength of the corresponding solidified soil can reach 2 510.90 kPa and 2 532.14 kPa, respectively. With the increase of cement replacement rate, the failure mode of solidified soil gradually changes from bulging failure to splitting failure. When the curing time is 14 d, the solidified soil with 20% cement replacement rate has the lowest water content and the most sufficient hydration reaction. The hydrated sodium silicate (N-A-S-H) and hydrated calcium aluminosilicate (C-S-H) gel produced by the reaction play a cementing and filling role in the pores. [Conclusions] An appropriate amount of cement substitution rate can increase the hydration reaction rate, promote the formation of hydration products, and effectively improve the curing effect of geopolymers-cement on soil-rock mixture.

Key words: road engineering; soil-rock mixture; geopolymers; curing mechanism; compressive strength

Manuscript received: 2023-03-30; **revised:** 2023-05-08; **accepted:** 2023-05-09

Foundation item: Projects (52178416, 51878071) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project (2022JJ30615) supported by the Natural Science Foundation of Hunan Province; Project (CLSJCX22036) supported by the Practical Innovation and Entrepreneurial Ability Improvement Plan of Postgraduate of Changsha University of Science & Technology

Corresponding author: ZHANG Yongjie (1981—) (ORCID: 0009-0001-9751-1784), male, professor, research interest: geotechnical and basic engineering. E-mail: zhangyongjie@csust.edu.cn

(责任编辑:石月珍;校对:刘平;英文编辑:栗淼)