

粉煤灰基地聚物固化黄土性能研究

Study on Preparation and Properties of Fly Ash Based Polymer Solidified Soil

柏延平¹, 夏 懿¹, 马 雷¹, 雒亿平²

(1. 国网甘肃省电力公司临夏供电公司, 临夏 731100;

2. 西安理工大学 西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安 710048)

摘 要: 研究旨在开发粉煤灰基地聚物固化剂替代水泥用于黄土加固, 以粉煤灰为主要前驱体, 偏高岭土为铝质校正料, 硅酸钠与氢氧化钠复合配制碱激发剂, 通过正交试验考察碱激发剂模数、固体掺量及粉煤灰掺量对抗压强度的影响。结果表明: 最优配比为碱激发剂模数 1.1、固体掺量 7%、粉煤灰掺量 30%, 对应的固化土 7、14、28 d 抗压强度分别达到 5.11、6.16、10.71 MPa。进一步按粉煤灰与偏高岭土质量比 1:1 调整硅铝比, 7 d 强度较基准组提升 77.9%, 地聚物固化土在硫酸盐溶液中未出现膨胀开裂, 表现出良好的耐蚀性。该配比体系兼顾力学性能与环境适应性, 可为黄土地区低碳地基处理提供技术支持。

关键词: 粉煤灰; 地聚物; 铝质校正料; 耐久性

中图分类号: TU433

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2025) 05-0008-06

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.05.002

BAI Yanping¹, XIA Yi¹, MA Lei¹, LUO Yiping²

(1. State Grid Gansu Linxia Power Supply Company, Linxia 731100, China; 2. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The purpose of this study is to develop fly ash based polymer curing agent to replace cement for loess reinforcement. The alkali activator was prepared by using fly ash as the main precursor, metakaolin as the aluminum correction material, sodium silicate and sodium hydroxide. The effects of alkali activator modulus, solid content and fly ash content on compressive strength were investigated by orthogonal test. The results show that the optimal ratio of alkali activator modulus is 1.1, the solid content is 7%, and the fly ash content is 30%. The compressive strength of the corresponding solidified soil at 7 days, 14 days, and 28 days reaches 5.11 MPa, 6.16 MPa, and 10.71 MPa, respectively. The silica-alumina ratio was further adjusted according to the mass ratio of fly ash to metakaolin of 1:1, and the 7-day strength was 77.9% higher than that of the reference group. The geopolymer solidified soil did not expand and crack in the sulfate solution, showing good corrosion resistance. The ratio system takes into account both mechanical properties and environmental adaptability, and can provide technical support for low-carbon foundation treatment in loess areas.

Key words: fly ash; geopolymer; aluminum correction material; durability

基金项目: 西北旱区生态水利国家重点实验室开放课题 (XB15468)。

作者简介: 柏延平 (1994—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 基础沉降、地基变形预测分析。

通信作者: 雒亿平 (1984—), 男, 博士, 教授, 研究方向: 水工混凝土新材料地基变形预测分析。

收稿日期: 2025-03-10

0 引言

近年来，我国将粉煤灰作为地聚物的硅铝原料制备新型胶凝材料，既符合国家绿色发展的需要，也是新型环保建材的一种新选择^[1-2]。

相关学者针对水玻璃的模数和波美度对粉煤灰基固化黄土的相关性能展开了研究，其研究表明，随碱激发剂模数降低、波美度增大试件的抗压强度提升显著^[3]。目前市场常见的黄土固化材料水泥和石灰等在对富含硫酸盐的土体进行固化的过程中，会产生鼓胀，出现这种现象的原因是水泥和石灰等胶凝材料中的 Ca^{2+} 与 SO_4^{2-} 、 OH^- 等反应生成膨胀性的钙矾石^[4]。钙矾石浸水后可膨胀至 250%，由于晶体生长或水合反应继续膨胀^[5]，从而导致明显的膨胀起伏^[6]。因此，张傲宁^[7]使用无钙地聚物材料固化富含硫酸盐的贫黏土，研究表明无钙地聚物胶凝材料不会引起过度膨胀。由于地聚物^[8]具有干缩形变小、抗裂性能好、力学性能好等优点^[9]，朱增裕^[10]将地聚物改性材料用于某博物馆红砂岩围墙修缮工程中，经过改性后的地聚物修复材料能够很好地满足石质文物保护修复工程^[11]中对于透气性、抗压强度及黏接强度的要求，对于面层修补表面颜色方面^[12]的要求也基本能够满足。此外，近年来从碱激发剂种类、地聚物胶凝材料掺入比、液固比等方面对地聚物固化黄土的力学性能变化规律的研究也取得了一些进展^[13-14]。

现阶段，以粉煤灰作为被激发材料用于黄土固化的研究鲜有研究。以粉煤灰为原料，考虑碱激发剂模数、碱激发剂的固体掺量、粉煤灰掺量对胶凝材料性能的影响^[15]，设计三因素三水平 L9 (33) 的正交试验。对其进行同种养护条件，不同龄期的无侧限抗压强度测试，分析不同因素影响的主次顺序，确定最优配合比。其次，以粉煤灰基地聚物土壤固化剂的最优配合比为基础，通过单因素试验，用铝质校正料偏高岭土替换部分粉煤灰，使用不同比例的偏高岭土和粉煤灰制备地聚物固化黄土，探究不同硅铝比对地聚物固化黄土力学性能的影响。

1 试验材料

1.1 硅铝材料

粉煤灰的化学组成见表 1，XRD 衍射如图 1 所示。

表 1 粉煤灰的化学成分

Table 1 Chemical composition of fly ash							/%
SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	TiO ₂	其他
53.9	30.4	0.9	5.7	1.6	2.7	1.3	3.5

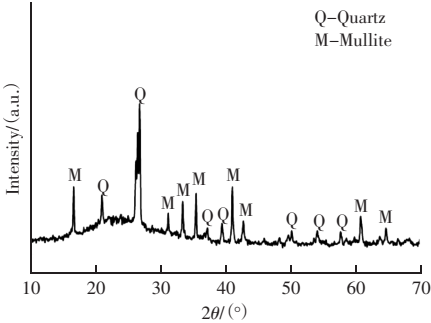


图 1 试验用粉煤灰 XRD 图
Fig. 1 XRD pattern of fly ash

XRD 衍射图结合表 1 粉煤灰的化学成分来看，该材料其主要成分主要为 SiO_2 和 Al_2O_3 ，比例分别为 53.9% 和 30.4%，这符合作为地聚物硅铝原料的要求。粉煤灰的 XRD 图中可以看出其物相组成主要是石英 (Quartz) 和莫来石 (Mullite)。从衍射角度 2θ 范围 $25^\circ\sim30^\circ$ 的峰值可以看出里面有大量的非晶相，说明该材料具有较高活性。

1.2 黄土

试验黄土取自某建筑工地，取土深度约为 11 米。原状土结构疏松不均匀，部分存在细小沙粒和软体动物残骸，表观呈黄褐色，遇水浸湿后有湿陷性。对黄土相关参数的测定依据国家标准 GB/T50123—2019《土工试验方法标准》，黄土的基本物理指标见表 2。借助筛分试验和激光粒度仪进行颗粒分析，粒径分布曲线如图 2 所示。

表 2 试验黄土的基本物理指标

Table 2 Basic physical indexes of test loess						
重度 γ /(kN/m ³)	天然含水 率 w /%	比重	液限 ω_L /%	塑限 ω_P /%	最佳含 水率/%	最大干密度 /(g/cm ³)
1.96	20.36	2.71	34.2	18.8	17.45	1.77

1.3 碱性激发剂

NaOH 质量分数不低于 98.5%，化学成分见表 3。硅酸钠化学式为 $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ ，式中 n 为二氧化硅与氧化钠的摩尔比，具体参数见表 4。

材料科学

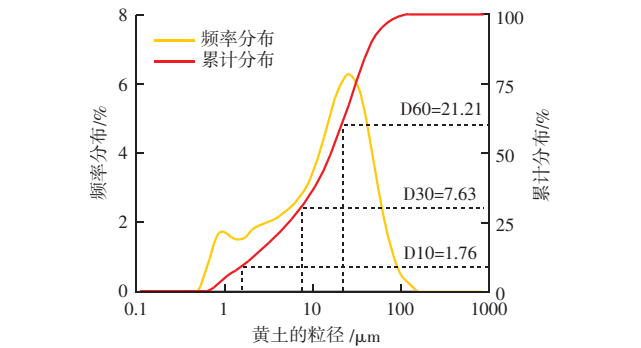


图2 黄土粒径分布曲线

Fig. 2 Particle size distribution curve of loess

表3 片碱的化学组分表

Table 3 Chemical components of alkali				/ %
NaOH	Na ₂ CO ₃	NaCl	其他	
98.5	0.3	0.01	1.19	

表4 硅酸钠的产品参数

Table 4 Product parameters of sodium silicate			
Na ₂ O/%	SiO ₂ /%	模数 M	堆积密度/(g/cm ³)
21.48	60.10	2.8	0.6

2 设计试验

2.1 粉煤灰基地聚物固化土配合比设计

正交试验见表5，根据前期的试配试验，设计水玻璃模数为1.1、1.3、1.5；碱激发剂固体掺量3%、5%、7%；粉煤灰掺量10%、20%、30%不同水平的9组正交试验。制备直径50 mm×50 mm的圆柱形土壤样品进行无侧限抗压强度试验，按照击实试验的最佳含水率控制加水量，用于制备试样的总水量是碱激发剂中的水量和后期制样所加入的自来水的水量之和。试件均在温度（20±2）℃，湿度≥95%的条件下养护。

表5 三因素三水平正交试验表

Table 5 Table of three-factor three-level orthogonal experiments				
试验编号	A: 水玻璃 模数	B: 碱激发剂 固体掺量/%	C: 粉煤灰 掺量/%	空白列
FA-1.1%~3%~10%	1.1	3	10	1
FA-1.1%~5%~20%	1.1	5	20	2
FA-1.1%~7%~30%	1.1	7	30	3
FA-1.3%~5%~30%	1.3	5	30	3
FA-1.3%~7%~10%	1.3	7	10	1
FA-1.3%~3%~20%	1.3	3	20	2
FA-1.5%~7%~20%	1.5	7	20	2
FA-1.5%~3%~30%	1.5	3	30	3
FA-1.5%~5%~10%	1.5	5	10	1

2.2 铝质矫正料掺入设计

以粉煤灰基地聚物胶凝材料土壤固化剂的最优配比为基准，添加偏高岭土作为铝质矫正料改变地聚物的硅铝比。通过保持掺入的硅铝原料总量不变，仅改变粉煤灰和偏高岭土的掺入比，设计单因素试验，对不同掺入比的试件展开7、14、28 d不同龄期的无侧限抗压强度试验，检测不同硅铝比的试件随龄期发展的力学性能变化。添加不同掺量的铝质矫正料试件的制样方式、养护方式和无侧限抗压强度试验过程与粉煤灰基地聚物固化黄土的一致。

设计的单因素试验见表6，编号“FA-AA-MK-CC”为各地聚物试验组的缩写，以“FA-0.9-MK-0.1”为例，“FA”为粉煤灰的缩写，后面的数字0.9代表粉煤灰占30%总硅铝原料中的90%；“MK”为偏高岭土的缩写，后面的数字0.1代表偏高岭土占30%总硅铝原料中的10%。

表6 单因素试验表

Table 6 Single-factor test table						/ %
试验编号	FA-0.9-MK-0.1	FA-0.8-MK-0.2	FA-0.7-MK-0.3	FA-0.6-MK-0.4	FA-0.5-MK-0.5	
偏高岭土占硅铝原料百分比	10	20	30	40	50	

3 试验结果与分析

3.1 不同配合比下无侧限抗压强度变化规律分析

对粉煤灰基地聚物固化土7、14、28 d试件的无侧限抗压强度测试结果进行总结，并对其进行极差和方差分析。通过正交试验，选出粉煤灰基地聚物固化土的最优配合比。通过粉煤灰基地聚物固化土力学强度随龄期的变化，结合其活性检测结果，分析粉煤灰基地聚物固化土的力学性能。

3.1.1 极差分析

极差分析采取先计算试验指标和 K_{ij} ，其代表第j列中相应水平号为i的各试验结果 y_i 总和；然后计算 K_{ij} 的平均值 $W_{ij} = K_{ij}/3$ ；最后可以算出极差 $R_j = \text{Max}(W_{ij}) - \text{Min}(W_{ij})$ 。7、14、28 d不同龄期的试验结果的极差分析见表7。

极差 R_j 越大表示该因素的水平变化对试验指标的影响越大，即该因素越重要。

表 7 极差分析表
Table 7 Range analysis table

龄期/d		碱激发剂模数	碱激发剂固体掺量	粉煤灰掺量
7	K_{1j}	10.56	4.54	5.60
	K_{2j}	6.21	9.19	7.31
	K_{3j}	6.21	9.24	10.06
	W_{1j}	3.52	1.51	1.87
	W_{2j}	2.07	3.06	2.44
	W_{3j}	2.07	3.08	3.35
	R_j	1.45	1.57	1.48
14	K_{1j}	12.83	6.01	7.37
	K_{2j}	9.41	11.74	10.31
	K_{3j}	8.09	12.49	12.64
	W_{1j}	4.28	2.03	2.46
	W_{2j}	3.14	3.91	3.44
	W_{3j}	2.70	4.16	4.21
	R_j	1.58	2.13	1.75
28	K_{1j}	19.27	7.40	9.45
	K_{2j}	12.80	17.12	14.27
	K_{3j}	12.16	19.71	20.51
	W_{1j}	6.42	2.47	3.15
	W_{2j}	4.27	5.71	4.76
	W_{3j}	4.05	6.57	6.84
	R_j	2.37	4.10	3.69

对 7、14、28 d 不同龄期的试验结果进行极差分析，得出（仅从配合比的角度）各原材料量影响因素敏感性由大到小为：碱激发剂固体的掺量 > 粉煤灰的掺量 > 碱激发剂的模数。

3.1.2 结果分析

通过试验结果综合分析，不同因素对粉煤灰基地聚物固化黄土的力学强度影响比重不同，其中，碱激发剂固体的掺量和粉煤灰的掺量对力学性能影响最大。

碱激发剂作为碱性氧化物，能够为硅铝氧化物提供碱性环境，促进无定形硅酸盐材料在碱性环境

中溶解激发 Si 和 Al 离子。碱激发剂固体的掺入量决定着其对无定型硅酸盐材料的活化性能。随着碱激发剂固体掺量的增加，溶液 pH 值上升，高碱性溶液为硅铝原料提供更好的活化环境，促进更多 Si 和 Al 离子溶解，相应水化速度加快，产物强度加强。

粉煤灰的掺量决定了参与地聚物反应过程中活性 Al_2O_3 和 SiO_2 的含量。粉煤灰中的活性硅铝离子在碱性环境下被激发溶出，进而水化生成地聚物。从组成成分上看，粉煤灰中 SiO_2 和 Al_2O_3 含量分别为 53.9%、30.4%，铝硅酸盐矿物中 Al_2O_3 比 SiO_2 含量较低。因而粉煤灰掺量是影响试件力学强度的重要因素。当粉煤灰掺量的百分比提高时，抗压强度结果也随之提高。粉煤灰含量的多少决定了在参与地质聚合反应时活性物质的多少，使更多活性离子参与反应，生成更多胶凝材料，对土体的固化效果更佳。

综合上述原因，碱激发剂固体掺量的改变能更大程度地影响到试件性能，在三个因素中对强度影响最大。

试件在不同龄期抗压强度变化如图 3 所示，随着龄期的增加，各因素的同一水平下的强度值均有所增长，但各因素不同水平的变化趋势并未随强度发展而变化。

图 4 展示了影响因素水平变化趋势，以 7 d 养护龄期为例分析，随着无侧限抗压强度峰值随着水玻璃的模数的增大而降低，碱激发剂模数为 1.1、1.3、1.5 的试件 7 d 抗压强度平均峰值分别为 3.52，2.07 和 2.06 MPa。根据正交试验结果可知，碱激发剂模数偏高会导致碱度的降低，不利于地聚物反应的有效进行。因此碱激发剂模数为 1.1 时，地聚物胶凝材料表现出良好的胶结能力，形成了较高的强度值。

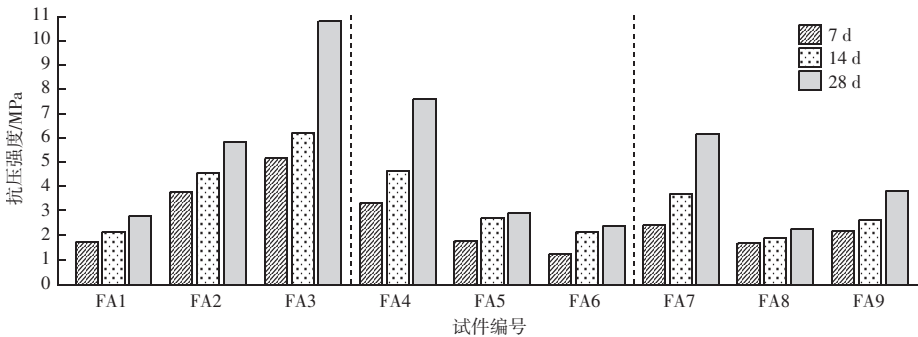
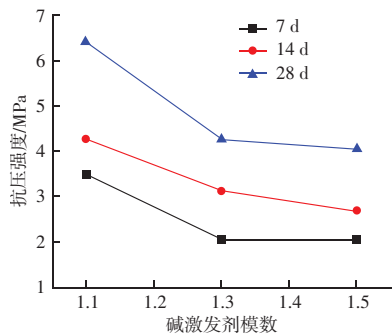


图 3 正交试验抗压强度峰值图
Fig. 3 Peak plot of orthogonal test

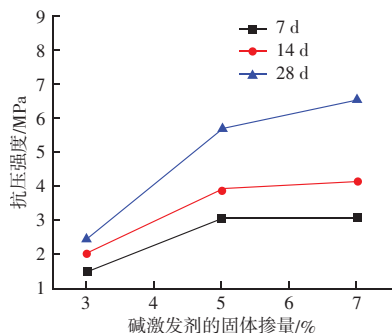
材料科学

此外，随着碱激发剂固体掺量的增加，无侧限抗压强度峰值呈现上升趋势。掺量从 3% 变化至 7% 时无侧限抗压强度峰值分别为 1.52、3.06 和 3.08 MPa，在碱激发剂固体掺量为 7% 时，无侧限抗压强度达到最高。掺量从 3% 增加至 5% 时，无侧限抗压强度有显著提升，这是因为在低碱性环境下无法与粉煤灰中的硅酸盐物质结合反应。图 4 (c) 显示了不同粉煤灰掺量下抗压强度的变化趋势，粉煤灰掺量越高，抗压强度越高。

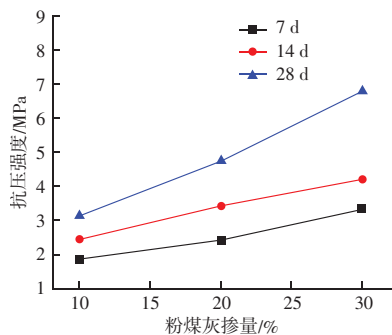
结合试验结果，总结分析碱激发剂模数、碱激发剂固体掺量、粉煤灰掺量对粉煤灰基地聚物固化土的强度影响。在试验条件下，得到粉煤灰基地聚



(a) 碱激发剂模数



(b) 碱激发剂固体掺量



(c) 粉煤灰掺入比

图 4 抗压强度随因素水平变化趋势图

Fig. 4 Trend diagram of compressive strength with factor level

物固化黄土最优配合比：碱激发剂模数为 1.1，碱激发剂固体掺量为 7%，粉煤灰掺量为 30%。正交试验所选出的最优配合比即为 FA-1.1%~7%~30%，其 7、14 和 28 d 无侧限抗压强度，分别为 5.11、6.16 和 10.71 MPa。因此选定碱激发剂模数为 1.1，碱激发剂固体掺量为 7%，粉煤灰掺量为 30% 为最佳配合比。

3.2 铝质矫正料对地聚物固化土性能影响研究

通过改变铝质矫正料和硅铝原料的掺入比的单因素试验制备不同硅铝比的地聚物试件，依次为粉煤灰基地聚物固化土 10%、20%、30%、40% 和 50% 铝质矫正料掺量的地聚物试件。

通过图 5 可知，不同铝质矫正料掺量的固化黄土在随着龄期发展的过程中，其抗压强度值均得到了不同程度的增加。

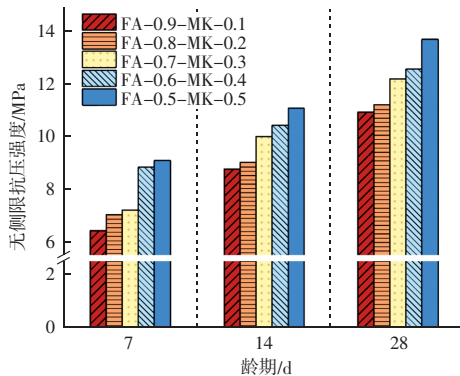


图 5 不同试验组固化土的抗压强度发展图

Fig. 5 Compressive strength development diagram of solidified soil in different test groups

由上一试验阶段的力学试验结果可知，正交最优配比 FA-1.1%~7%~30% 的 7 d 无侧限抗压强度值为 5.11 MPa，与改变硅铝比后的不同铝质矫正料掺量的地聚物固化土相比，无侧限抗压强度值均有所提高。其中，经过掺入偏高岭土调节地聚物硅铝比后，硅铝比最小的配合比 FA-0.5-MK-0.5 组的 7 d 无侧限抗压强度值最大提升为 9.09 MPa，相较最优配比 FA-1.1%~7%~30% 的 7 d 强度增幅为 77.9%。

FA-0.9-MK-0.1 组的抗压强度值提升虽然相比 FA-0.5-MK-0.5 组较小，但与最优配比 FA-1.1%~7%~30% 相比，也有 26% 的强度增幅。可以看出，降低硅铝比，对早期地聚物胶凝材料的生成有促进作用。根据不同硅铝比早期强度的对比，发

现其硅铝比越接近 1 时, 其对土体固化效果越好, 固化土的早期抗压强度值越高。FA-0.5-MK-0.5 组和 FA-0.6-MK-0.4 组相比, 虽然在 FA-0.5-MK-0.5 组地聚物硅铝比更小, 但在早期强度上, 两组的强度相差并不大, FA-0.5-MK-0.5 组相比 FA-0.6-MK-0.4 组的强度增幅仅 2.8%, 而同样的现象也出现在 FA-0.8-MK-0.2 和 FA-0.7-MK-0.3 两组中, 后者相比前者强度增幅为 2.6%; 而 FA-0.7-MK-0.3 和 FA-0.6-MK-0.4 两组的前期强度增幅达到 16.9%。FA-0.8-MK-0.2 和 FA-0.7-MK-0.3 两组偏高岭土掺量相差较小时, 而粉煤灰掺量占比更大。虽然偏高岭土活性硅铝离子溶出速度快, 但受到粉煤灰溶出活性离子速度的制约, 前期参与地质聚合反应的更多来自偏高岭土, 而地聚物胶凝材料的生成需要有相应的活性硅铝离子参与反应才能生成的 AlO_4 和 SiO_4 四面体结构单元, 因此在偏高岭土掺量相对较少时, 对地聚物固化土的力学强度提升有限。

4 结论

以粉煤灰和偏高岭土作为原料, 制备粉煤灰基地聚物, 在选定的最优配比基础上, 探究添加铝质校正料偏高岭土对地聚物固化黄土力学性能的影响, 得出以下结论:

(1) 借助配合比正交试验设计, 对粉煤灰基地聚物固化黄土进行最优选样。通过试验得出最优配合比碱激发剂模数为 1.1, 碱激发剂固体掺量为 7%, 粉煤灰掺量为 30%。通过极差分析得出因素影响主次顺序碱激发剂固体的掺量 > 粉煤灰的掺量 > 碱激发剂的模数。

(2) 无侧限抗压强度试验表明粉煤灰基地聚物固化土的抗压强度值随龄期的发展不断增大。通过对正交试验的无侧限抗压强度试验结果分析, 随着碱激发剂固体掺量和粉煤灰掺量的增加, 力学强度呈现上升趋势。在最优配比的地质聚合反应过程中, 后期的抗压强度值会相比前期强度值有显著提升, 这种现象可以满足实际工程需求。

(3) 在确定的硅铝原料总掺量的基础上, 通过

调节硅铝原料和铝质校正料的掺入比能够达到调节硅铝比的效果。基于配合比试验, 得到最优的铝质校正料掺入比为占总硅铝原料的 50%。

(4) 试验结果显示随着铝质校正料的掺入比的提高, 对原本的粉煤灰基地聚物固化土的早期强度和 28 d 龄期的强度均有显著提高。这表明当地聚物硅铝比越接近 1 时, 地质聚合反应生成的胶凝材料对土体的黏合效果就更好, 制备出的试件性能更优异。

参 考 文 献

- [1] 张延年, 杨吴斌, 韩东, 等. 多元固废地聚合物的制备与性能研究 [J]. 非金属矿, 2024, 47 (1): 99-102, 107.
- [2] 张亚鹏, 张凤娇, 曹佳伟, 等. 洗选煤矸石透水混凝土的制备及其性能研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38 (6): 1-5.
- [3] 胡庭婷. 粉煤灰回填双层结构地基建筑极限承载力计算 [J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38 (6): 54-58.
- [4] 贾亮, 连尚承. 石灰-粉煤灰-水泥稳定碎石的力学性能试验 [J]. 兰州理工大学学报, 2023, 49 (2): 125-129.
- [5] 桂彬, 陈鸿, 杨林, 等. 石灰-水泥-粉煤灰改性磷石膏对水泥物理性能的影响研究 [J]. 无机盐工业, 2022, 54 (12): 92-98.
- [6] 向俊燃. 水玻璃对碱激发地聚物固化黄土工程特性影响研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2020.
- [7] 张傲宁. 水泥固化硫酸盐渍土盐胀机理和性能调控研究 [D]. 南京: 东南大学, 2020.
- [8] 尧俊凯. 硫酸盐侵蚀水泥改良土膨胀研究 [D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2019.
- [9] 文庆军, 丁华柱, 刘兴平, 等. 延迟钙矾石形成、特征和膨胀机理概述 [J]. 四川建材, 2017, 43 (9): 3-4.
- [10] 朱增裕. 高分子改性地聚物文物保护材料的研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- [11] 石夏阳, 宋帅, 杨煜, 等. 不同粉煤灰基地聚物稳定土强度性能比较研究 [J]. 公路, 2025, 70 (3): 315-322.
- [12] 陈梓聪, 苏春晓, 孙璨, 等. 原厂粉煤灰-偏高岭土双掺地聚物混凝土制备及力学性能研究 [J]. 东莞理工学院学报, 2024, 31 (5): 83-90.
- [13] 杨晶, 牛玺荣, 杨煜, 等. 粉煤灰基地聚物稳定土抗压强度影响因素研究 [J]. 公路, 2024, 69 (8): 366-373.
- [14] 李振洋. 粉煤灰基地聚物的物理力学性能研究 [D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2024.
- [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, 2020.