DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.250617

水泥-固废基固化改良膨胀土力学特性研究

李石勇
(中交第三公路工程局有限公司,北京市 101304)

摘　要: 利用水泥、工业固废(粉煤灰、钢渣)协同固化改良膨胀土,系统分析固化剂配比、掺量、压实度和龄期对固化土力学性能的影响,探究其在路基工程中应用的可能性。结果表明:固化剂原材料中粉煤灰与钢渣的活性组分可协同水泥水化反应,固化土试样 A_4 的配比(粉煤灰用量与钢渣用量之比为 30∶45)固化效果最优,此时固化土的 28 d 无侧限抗压强度可达 3.74 MPa;增加固化剂掺量、提升压实度可显著提高固化土干密度,降低其最优含水率;随着龄期的增加,固化剂的水化反应能提供更充足的水化物质来填充固化土空隙,提高其强度。研究证实水泥-固废基固化剂可有效增强膨胀土力学性能,为路基绿色加固和工业固废资源化利用提供理论支撑。

关键词: 膨胀土;固化剂;无侧限抗压强度;压实度;水化反应
中图分类号: TU443　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1009-7716(2026)01-0112-05

Study on Mechanical Properties of Cement-solid Waste-based Solidification Improved Expansive Soil

LI Shiyong
(China Communications Third Highway Engineering Bureau Co., Ltd., Beijing 101304, China)

Abstract: The cement and industrial solid wastes (fly ash and steel slag) are utilized to collaboratively solidify and improve the expansive soil. The effects of curing agent proportion, dosage, compaction degree and age on the mechanical properties of the solidified soil are systematically analyzed, and its potential application in subgrade engineering is explored. The results indicate that the active components of fly ash and steel slag in the curing agent raw materials can synergize the cement hydration reaction. The A_4 mix proportion (fly ash to steel slag ratio of 30∶45) of the solidified soil specimen is the best curing effect. At this point, the 28-day unconfined compressive strength of the solidified soil can reach 3.74 MPa. Increasing the curing agent dosage and upgrading the compaction degree can significantly improve the dry density of the solidified soil and reduce its optimal moisture content. With the increase of curing age, the hydration reaction of the curing agent can provide more hydration products to fill the voids of solidified soil and to improve its strength. The study confirms that cement-solid waste-based curing agent can effectively enhance the mechanical properties of expansive soil, providing the theoretical support for green reinforcement of subgrade and the resource utilization of industrial solid waste.

Keywords: expansive soil; curing agent; unconfined compressive strength; compactness; hydration reaction

0　引　言

膨胀土具有显著的吸水膨胀和失水收缩特性,因而在全球范围内引发了路基变形、边坡失稳等工程灾害[1],尤其在干湿交替频繁区域,其反复胀缩行为加剧了土体结构劣化,导致工程维护成本激增。对膨胀土的传统处治多依赖水泥、石灰等化学固化剂,但这类材料的生产碳排放高,且易破坏土壤生态结构,难以满足绿色低碳发展需求[2]。与此同时,我国每年产生粉煤灰、钢渣等工业固废超 10 亿 t,堆存占地和环境污染问题突出。如何通过固废资源化来实现膨胀土的高效改良,已成为破解工程安全和环境保护双重难题的关键[3]。然而,膨胀土矿物成分复杂、孔隙结构多样,与固废材料的协同作用机制尚不明确,制约了膨胀土的大规模工程化应用。

近年来,有关膨胀土改良研究主要围绕三大方向展开:一是矿物调控,通过离子交换来抑制蒙脱石层间吸水膨胀,如采用碱性激发剂改性黏土矿物[4];二是力学增强,引入纤维加筋或纳米材料来提升土

收稿日期:2025-06-16
作者简介:李石勇(1982—),男,学士,工程师,项目总经济师,从事项目合约管理工作。

体抗裂性[5]；三是环境模拟，通过干湿循环试验来量化土体长期性能衰减规律[6]。然而，现有研究多聚焦于单一改良手段，对复合固废体系的胶结-膨胀协同机制缺乏深入解析。例如，粉煤灰中的活性 SiO_2 与 Al_2O_3 虽能与土中 Ca^{2+} 生成胶凝物质，但其掺量阈值与最优灰土比仍存在争议[7]；钢渣中游离氧化钙（f-CaO）的延迟膨胀效应可能抵消改良效果，需通过陈化预处理来平衡其力学性能与体积稳定性[8]。

在固废资源化领域，学者已证实粉煤灰-矿渣基胶凝材料可部分替代水泥[9]，其水化产物（C-S-H 凝胶、钙矾石）能有效填充土体孔隙[10]。研究表明，固废掺量为 20%~30% 时，改良土渗透系数降低 1 至 2 个数量级，CBR 值提升 40%~60%[11]。但现有成果多针对普通黏性土，针对高液限膨胀土的适用性研究不足：一方面，膨胀土中黏粒含量高（超过 20%），易包裹固废颗粒，阻碍水化反应[12]；另一方面，干湿循环下固废-土界面过渡区的微裂隙扩展规律尚未明晰，导致耐久性预测模型缺失[13]。此外，固废材料地域差异性显著，如北方粉煤灰钙含量高（C 类），而南方以低钙灰（F 类）为主，需建立区域适配的配比设计体系。

综上，尽管固废改良膨胀土在实验室尺度已展现潜力，但其工程应用仍面临三大瓶颈：一是固化配方的系统性优化不足，未能平衡强度增长与膨胀抑制[14]；二是水化进程与微观结构演变的关联机制不明确[15]；三是缺乏全生命周期性能评价体系[16]。因此，本文以典型的山东枣庄膨胀土为对象，系统研究固废掺量、灰土比、含水率等参数对其压实特性和力学性能的影响规律，表征材料水化产物和界面结构[17]，旨在建立“材料设计-性能调控-环境响应”的全链条技术路径，为膨胀土路基绿色建造提供理论支撑和实践依据。

1　试验材料与方法

1.1　试验材料

水泥为海螺牌 42.5 普通硅酸盐水泥（OPC）；粗粉煤灰（CFA）和钢渣（SS）来自山东宽信工贸有限公司；激发剂为脱硫石膏（FGD）。膨胀土（ES）来自山东枣庄。拌合用水为自来水。

1.1.1　化学成分

通过 X 荧光射线显微镜（XRF）来分析各材料化学成分[18]，结果见表 1。

由表 1 可知，OPC 和 CFA 的化学成分基本相似，均含有 SiO_2、Al_2O_3、CaO 和 Fe_2O_3，但是其中的含量各不相同。OPC 中化学成分含量较多的为 SiO_2、CaO，分别高达 19.78%、67.58%；CFA 中化学成分含量较多的为 SiO_2、Al_2O_3，分别高达 54.67%、36.27%。SS 中主要化学成分为 SiO_2、Al_2O_3、CaO。ES 主要化学成分为 SiO_2、Al_2O_3。

表 1　原材料化学成分　　单位：%

材料	SiO_2	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	K_2O	MgO	Na_2O	SO_3
OPC	19.78	6.14	67.580	3.67	1.43	1.83	0.58	2.40
CFA	54.67	36.27	4.460	5.43	0.29	0.62	0.49	2.12
SS	12.61	23.92	42.980	0.45		13.78		0.20
ES	51.38	29.33	0.089	5.52	4.42	0.34	0.35	0.04

1.1.2　激光粒度分析

通过激光粒度分析仪测得各原材料的粒径特性[19]，结果见表 2。

表 2　原材料粒度参数、比表面积与密度

样品	粒度参数/μm			比表面积/（$m^2 \cdot kg^{-1}$）	表观密度/（$g \cdot cm^{-3}$）
	D_{10}	D_{50}	D_{90}		
OPC	1.520	11.360	41.170	557	2.85
CFA	8.230	31.840	102.590	135	2.74
SS	1.983	13.337	42.482	388	2.83

由表 2 可知：OPC 的比表面积为 557 m^2/kg、CFA 的比表面积为 135 m^2/kg、SS 的比表面积为 388 m^2/kg；表观密度分别为 2.85、2.74、2.83 g/cm^3。3 种原材料的平均粒径为：CFA>SS>OPC。

综上所述，粉煤灰的大粒径特性（D_{50}=31.84 μm）可有效填充膨胀土孔隙，改善土体骨架密实性；钢渣的高 CaO 含量（42.98%）和较细粒径（D_{50}=13.337 μm）可协同促进水化反应，生成胶凝产物；水泥的高比表面积（557 m^2/kg）则增强其水化活性，为固废材料提供碱性激发环境。

1.2　试验方法

1.2.1　击实试验

采用重型击实法（锤重 4.5 kg，落距 305 mm），按分层击实（3~5 层，每层 56 击）制备试样，测定其在不同含水率（12%~24%）下的最大干密度和最佳含水率。

1.2.2　无侧限抗压强度试验

将标准养护（恒温恒湿）至 7、14、28 d 的圆柱形试样（直径 38~50 mm，高径比 2.0~2.5）置于压力试验机中，以 1~3 mm/min 加载速率轴向加压至破坏，记录峰值应力作为试样的无侧限抗压强度。

2　固化剂配合比设计

经过预实验，确定固化土试样的压实度为 97%，

灰土比为0.15∶1；固化剂中脱硫石膏掺量固定为5%、水泥掺量固定为20%，改变粉煤灰用量与钢渣用量的比值，以研究这一比值对固化土强度的影响[20]。

试验方案和试验结果见表3。

表3　试验方案和试验结果

试样编号	材料用量/%				无侧限抗压强度/MPa	
	脱硫石膏	粉煤灰	钢渣	水泥	7 d	28 d
A_1	5	60	15	20	1.78	2.44
A_2	5	50	25	20	1.93	2.86
A_3	5	40	35	20	2.03	3.29
A_4	5	30	45	20	2.31	3.74
A_5	5	20	55	20	2.14	3.36
A_6	0	0	0	100	1.94	2.97

由表3可知，7、28 d龄期时，试样A_4的无侧限抗压强度最高，试样A_3、A_5次之，试样A_1最低。在7 d龄期时，试样A_4的无侧限抗压强度达到2.31 MPa，是试样A_1、A_2、A_3、A_5、A_6的1.30、1.20、1.14、1.08、1.19倍；在28 d龄期时，试样A_3、A_4、A_5的无侧限抗压强度都大于3.0 MPa，分别为3.29、3.74、3.36 MPa，而最低为试样A_1的2.44 MPa。

试样A_1~A_6的7、28 d无侧限抗压强度增长规律整体一致，均为先增大后减小。随着养护龄期的延长，试样A_4的强度提升幅度显著高于其他试样，而试样A_1的强度增长最为缓慢。这一现象表明，试样A_1因钢渣掺入量不足，导致生成的$Ca(OH)_2$较少，无法形成足够的碱性环境以充分激活矿渣活性，进而造成其后期强度增幅处于最低水平。当水泥与钢渣用量比例适宜时，水泥水化反应产生的OH^-与磷石膏中的SO_4^{2-}会共同激发钢渣活性，促使大量水化产物生成并填充、黏结于土颗粒之间，有效减少结构空隙，最终实现强度提升。

综上所述，为探究固化土无侧限抗压强度的变化规律，选取试样A_4、A_5进行后续试验。

3　固化土无侧限抗压强度研究

3.1　击实试验

将固化土试样A_4、A_5中的固化剂（分别命名为F4S4、F2S5）掺量分别设置为5%、8%、11%、14%、17%，击实后，测试这2组试样在不同含水率（12%~24%）下的最大干密度和最佳含水率，结果见表4、表5和图1。

由图1可知，A_4、A_5组固化土试样的物理性能随着固化剂掺量的提升呈现规律性变化。当试样中固化剂掺量增大时，其干密度峰值持续上升，而对应的最佳含水率呈下降趋势。这种变化特征主要源于2个协同作用机制：首先，微米级固化剂颗粒因其粒径优势可有效填充粉土骨架间的孔隙空间，通过物理密实作用改善土体结构；其次，固化材料的水化反应过程不仅消耗体系内部水分，其生成的胶凝产物更会占据孔隙通道，形成双重降孔效应。上述物理化学反应的协同作用，最终导致材料致密化程度提升与孔隙含水量降低的耦合效应。

表4　不同固化剂掺量下2种固化土试样的最大干密度　单位：g/cm³

试样编号	固化剂名称	固化剂掺量/%				
		5	8	11	14	17
A_4	F4S4	1.681	1.705	1.731	1.742	1.752
A_5	F2S5	1.705	1.721	1.756	1.769	1.773

表5　不同固化剂掺量下2种固化土试样的最佳含水率　单位：%

试样编号	固化剂名称	固化剂掺量/%				
		5	8	11	14	17
A_4	F4S4	17.73	17.83	17.54	17.30	17.64
A_5	F2S5	17.88	17.78	17.64	17.17	17.69

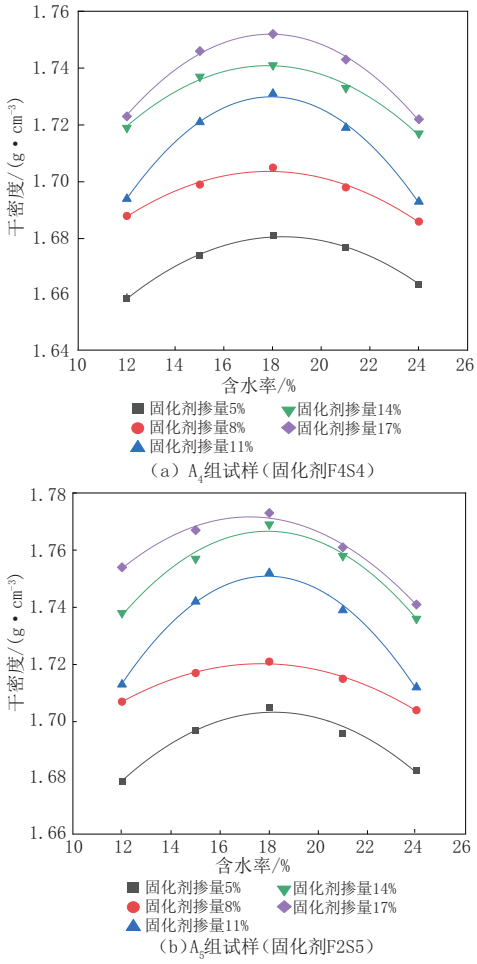


图1　2种固化土试样的干密度-含水率曲线

3.2　各因素对固化土无侧限抗压强度的影响

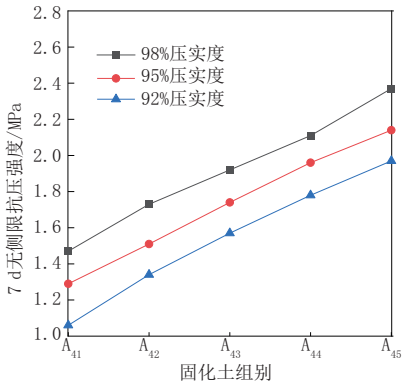
为测定各因素对固化土无侧限抗压强度的影响，将固化剂掺量分别为5%、8%、11%、14%、17%，压实度分别为98%、95%、92%的A_4、A_5组固化土试样标准养生7 d，测定其无侧限抗压强度，结果见表6。

表6　不同压实度和固化剂掺量的固化土试样7 d无侧限抗压强度　　单位：MPa

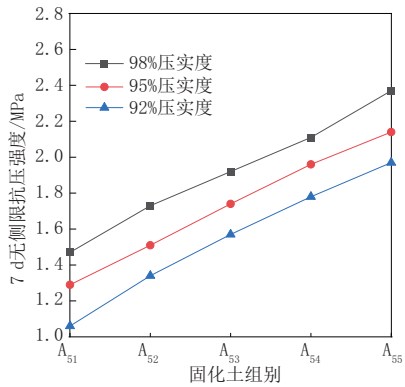
固化剂名称	试样组别	固化剂掺量/%	压实度/%		
			98	95	92
F4S4	A_{41}	5	1.54	1.33	1.19
	A_{42}	8	1.85	1.62	1.47
	A_{43}	11	2.01	1.78	1.62
	A_{44}	14	2.34	2.02	1.79
	A_{45}	17	2.57	2.26	2.05
F2S5	A_{51}	5	1.47	1.29	1.06
	A_{52}	8	1.73	1.51	1.34
	A_{53}	11	1.92	1.74	1.57
	A_{54}	14	2.11	1.96	1.78
	A_{55}	17	2.37	2.14	1.97

3.2.1　固化剂掺量和压实度对固化土无侧限抗压强度的影响

2组固化土试样7 d无侧限抗压强度与固化剂掺量、压实度的关系见图2。



(a) A_4组试样(固化剂F4S4)



(b) A_5组试样(固化剂F2S5)

图2　固化土试样7 d无侧限抗压强度与压实度、固化剂掺量的关系

由图2可见，各组固化土试样的7 d无侧限抗压强度随着固化剂掺量的增加而增加。当固化剂掺量增加时，固化土试样的7 d无侧限抗压强度显著提升。以A_4组试样(固化剂F4S4)为例，在98%压实度下，当固化剂掺量从5%增至17%时，试样的7 d强度从1.54 MPa增至2.57 MPa，增幅达66.9%。从原理分析，固化剂掺量的提升能促进粉煤灰和钢渣在碱性环境下生成更多胶凝物质，填充孔隙并增强颗粒黏结。

由图2还可见，各组固化土试样的7 d无侧限抗压强度随着压实度的增加而增加，且压实度的影响要比固化剂掺量的影响更大。以A_4组试样(固化剂F4S4)为例，在压实度为92%、95%和98%时，固化剂掺量为17%时的7 d无侧限抗压强度是5%掺量的1.67、1.70、1.72倍。由此可见，压实度对固化土无侧限抗压强度的发展影响极为重要。从原理分析，压实度较低时，土体结构空隙较大且致密性不足，在水饱和过程中，土颗粒间疏松的孔隙会使更多水分渗入粉土内部，水流会携带部分细小松散颗粒流失，最终导致孔隙逐渐增多，土体结构愈发松散，强度发展受限；而压实度较高时，土体结构更为致密，有利于固化剂水化产物在土颗粒间黏结和填充，对强度提升具有积极作用。因此，碾压施工中需尽可能对固化土进行充分压实，确保其处于良好压实状态，从而使固化剂性能得以充分发挥。

3.2.2　养护龄期对固化土无侧限抗压强度的影响

不同基层材料的强度增长规律会有差异，7 d无侧限抗压强度只能够在试验初期判断基层材料能否满足使用要求，无法得出后期强度的增长规律。为进一步了解固化土强度增长规律与空间，测试A_4、A_5组固化土试样的7、14、28 d无侧限抗压强度。根据98%压实度制件并标准养生，试验结果见图3。

由图3可见，在各龄期、各掺量下，A_4组固化土试样的无侧限抗压强度都高于A_5组固化土试样，但两者强度随龄期的增长规律大致相同。当固化剂掺量为5%时，A_4组固化土试样的14、28 d无侧限抗压强度分别为1.92、2.50 MPa，后者比前者增长76.8%；A_5组固化土试样的14、28 d无侧限抗压强度分别为1.83、2.41 MPa，后者比前者增长75.1%。这是因为A_4组固化土试样配合比中的粉煤灰含量要高于A_5组固化土试样，钢渣含量则较少，水泥水化反应能提供更充足的碱性环境来激发钢渣活性，生成较多的水化物质来填充空隙。

3.3　推荐施工配合比

根据上文对水泥-固废基固化改良膨胀土路用性能分析及《公路路基施工技术规范》(JTG/T 3610—

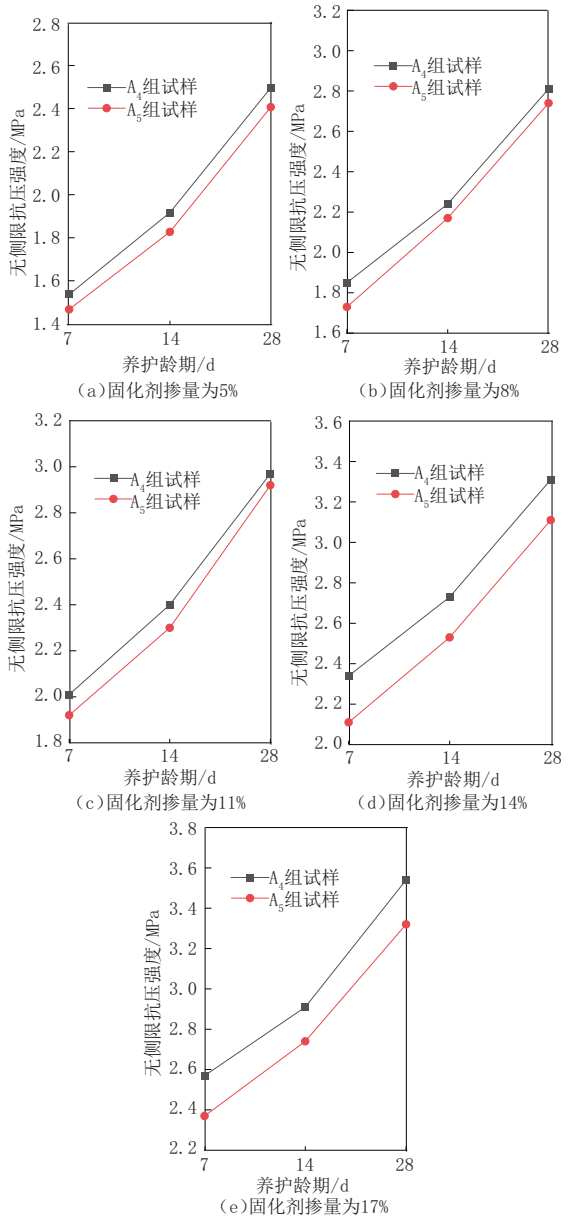


图3　固化土无侧限抗压强度与龄期的关系

2019)要求，同时综合考虑经济性，得出固化改良膨胀土推荐施工配合比，具体见表7。

表7　水泥-固废基固化改良膨胀土推荐施工配合比

压实度/%	固化剂掺量/%	材料用量/%			
		脱硫石膏	粉煤灰	钢渣	水泥
98	15~17	5	20~30	45~55	19~21
95	13~15	5	15~25	40~50	18~20

4　结　语

(1)水泥、粉煤灰、钢渣的化学成分以SiO_2、Al_2O_3、CaO为主，且颗粒粒径差异显著(CFA>SS>OPC)。其中，固化土试样A_4因最优配比而实现其28 d强度达3.74 MPa，与固化土试样A_1相比提升了53.3%，而固化土试样A_5可用于验证钢渣过量对延迟膨胀的负面影响。因此选择固化土试样A_4和A_5进行固化土无侧限抗压强度的探究。

(2)随着固化剂掺量的增加，固化土最大干密度显著提高。如在固化剂掺量为17%时，固化剂为F4S4的A_4组试样最大干密度最高可达1.752 g/cm^3，最佳含水率则低至17%左右。

(3)固化剂配比、掺量、压实度和龄期均显著影响着固化土的无侧限抗压强度。当其他用量相同，粉煤灰用量与钢渣用量之比为30∶45(A_4组)时，固化土强度最优；压实度主导作用更突出，在相同因素下，98%压实度下试样强度最高，92%压实度下试样强度最低；龄期延长可使试样强度持续增长，28 d强度较7 d强度提升34%~76%，而粉煤灰含量高的体系后期强度优势显著。因此，最佳固化剂组合为：粉煤灰用量与钢渣用量之比为30∶45、掺量为17%；再结合98%压实度制件并标准养生28 d，即可得到强度最优的固化土。综合考虑固化改良膨胀土材料路用性能与成本，得出其推荐施工配合比。

(4)本研究未系统评估干湿循环下固化土的长期耐久性和体积稳定性，且未纳入矿渣、赤泥等其他固废的协同效应；固化剂中游离氧化钙(f-CaO)的延迟膨胀风险需进一步量化。

参考文献：

[1] 程展林，李青云，郭熙灵，等. 膨胀土边坡稳定性研究[J]. 长江科学院院报，2011，28(10)：102-111.
[2] 胡力群. 半刚性基层材料结构类型与组成设计研究[D]. 西安：长安大学，2004.
[3] 陈正汉，郭楠. 非饱和土与特殊土力学及工程应用研究的新进展[J]. 岩土力学，2019，40(1)：1-54.
[4] 袁明月，张福海，王远航. 钢渣改良膨胀土试验效果与机理分析[J]. 河北工程大学学报(自然科学版)，2018，35(2)：67-70
[5] 陈晓雪，独莎莎，张丹，等. 纤维加筋膨胀土的三轴蠕变特性试验研究[J]. 工程地质学报，2017，25(1)：80-87.
[6] 尚云东，耿丙彦. HTAB改良膨胀土性能试验研究[J]. 土木工程学报，2010，43(9)：138-143.
[7] 童国庆，张吾渝，高义婷，等. 碱激发粉煤灰地聚物的力学性能及微观机制研究[J]. 材料导报，2022，36(4)：129-134.
[8] 何智海，张晓翔，詹培敏，等. 钢渣粉及其对水泥基材料性能的影响研究进展[J]. 混凝土，2020(2)：83-93.
[9] 杨南如. 碱胶凝材料形成的物理化学基础(Ⅰ)[J]. 硅酸盐学报，1996(2)：209-215.
[10] 徐日庆，文嘉毅，董梅. 工业废料固化浅层淤泥质土研究[J]. 长江科学院院报，2020，37(5)：85-91.
[11] 陈云敏，施建勇，朱伟，等. 环境岩土工程研究综述[J]. 土木工程学报，2012，45(4)：165-182.
[12] 李昊东，张世民，李路帆，等. 碱激发固废力学性能与水化产物研究进展[J]. 河南城建学院学报，2024，33(6)：74-84.
[13] 孔令伟，陈正汉. 特殊土与边坡技术发展综述[J]. 土木工程学报，2012，45(5)：141-161.

(下转第124页)