地聚合物在软土地基加固中的应用研究*

邱豪杰，姚佳良，陈鑫，郝桂禹
（长沙理工大学 交通运输工程学院，湖南 长沙 410114）

摘要： 为研究地聚合物代替水泥作为搅拌桩固化剂处理软土的可行性，以地聚合物掺量、软土含水率和搅拌时间三因素三水平进行正交试验，在实验室对地聚合物稳定土进行无侧限抗压强度和直剪试验，并通过 SEM 扫描和 CT 扫描分析地聚合物改善软土的机理和稳定土的微观结构特征。结果表明，地聚合物的最佳掺量为 14%；地聚合物稳定土强度相较于水泥稳定土有所提高；微观试验证实稳定土中形成了类沸石前驱体凝胶，使稳定后软土趋于均匀致密的微结构。试验路段检测结果表明地聚合物搅拌桩处理软土地基的效果良好。

关键词： 公路；地聚合物；软土地基；地基加固

中图分类号：U416.1 **文献标志码：**A **文章编号：**1671－2668(2021)02－0064－06

采用水泥作为固化剂的搅拌桩对于一些土质的处理效果并不明显，限制了搅拌桩处理软土地基的使用范围。地聚合物是一种通过土工合成物的化学反应获得的矿物质聚合物，是由四面体铝硅酸盐单元冷凝产生的框架结构，其中碱金属离子平衡了四面体铝的电荷。地聚合物的合成温度一般为 25～80 ℃，用地聚合物代替 OPC 可减少 CO_2 排放对环境的破坏。此外，地聚合物还具有类似于水泥基材料的抗压强度及优异的耐热性、有机溶剂性和耐酸性。Dai Y. S.等以高炉渣和粉煤灰为原料，采用无机聚合物作为砼结构修补材料，地聚合物黏结的砼基层抗压强度试验表明，修复率可达 120%；通过与硅酸盐水泥对比，证明了矿渣/粉煤灰基聚合物水泥浆具有良好的工程发展潜力。Kuo W. T.等以粉煤灰/磨细高炉渣地质聚合物(FGG)为主要水泥材料作为砼修补材料，随着液固比的增加，FGG 修补材料的抗剪强度和劈拉强度降低，粉煤灰取代率为 10%时可获得良好的修补效果。Phetchuay C.等研究电石渣(CCR)和粉煤灰(FA)基地聚合物稳定海洋黏土的强度发展和碳足迹，高强度下碳足迹的减少表明 FA 地聚合物可用作传统硅酸盐水泥的替代品和绿色土壤稳定剂。地聚合物能克服普通硅酸盐水泥碱集料反应、收缩性大、水化热高、耐腐蚀性差等不足，还具有较低的收缩潜力和团聚体的良好附着力，同时它是一种环保型材料，其原材料来源广泛、能耗低、对环境污染小、制备简易，可作为一种有效的土壤稳定剂。该文通过试验，研究地聚合物代替水泥作为搅拌桩固化剂处理软土的可行性。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 软土

从试验路段取得软土土样，将其破碎后放入烘箱烘干，然后用 5 mm 筛孔筛分。软土的的技术指标见表 1。

表 1 软土土样的技术指标

项目	指标值	项目	指标值
采样深度/m	16	孔隙比	1.468
含水量/%	49	塑性指数	28.5
湿密度/(g·cm^{-3})	1.63	压缩模量/MPa	1.41

1.1.2 地聚合物

以高钙粉煤灰、矿渣、偏高岭土、石灰为矿物原材料，以模数为 3.10 的硅酸钙加入一定量 NaOH 调制成模数为 1.50 的硅酸钠作为碱激发剂，再加适量添加剂制配成复合型地聚合物，其物理力学性能见表 2。

表 2 地聚合物的物理力学性能指标

项目	试验结果	项目	试验结果
泌水率/%	0.5	28 d 抗折强度/MPa	8.7
初凝时间/min	165	28 d 抗压强度/MPa	52.0
终凝时间/min	243		

地聚合物中硅铝质材料在碱溶液中溶解，会在

* **基金项目：** 湖南省交通运输厅科技进步与创新计划项目(201930)；长沙理工大学研究生实践创新项目(SJCX201914)

水溶液中游离出 $Al(OH)_4^-$ 和 $OSi(OH)_3^-$ 单体，溶解出的铝酸根离子和硅酸根离子经扩散、定位和缩聚形成（—Si—O—Al—O—Si—O—）结构的低硅铝酸盐低聚体。单体聚合物通过缩聚反应组合成高分子聚合物，且变成坚硬的凝胶体。

1.2　地聚合物的改性软土机理

地聚合物与土团粒充分接触后，通过内在的缩聚水化反应生成无机胶凝体，这些胶凝体一部分会硬化形成地聚合物骨架，一部分会包裹黏土颗粒形成裹覆体，一部分填充土团粒间的多余孔隙。地聚合物形成的骨架支撑着裹覆体，形成一个相互联结的结构系统，在宏观上表现为软土体系强度提高。

离子交换的团粒化作用：土颗粒表面带有 Na^+ 或 K^+，它们与地聚合物水化物中的 Al^+ 进行当量吸附交换，使较小的土颗粒不断吸附交换形成较大土团粒，使土体强度得到提高。

凝结硬化反应：软土中的 SiO_2、Al_2O_3 与地聚合物中少量存在的 $Ca(OH)_2$ 发生发应，生成凝胶物质，起到填充颗粒间孔隙和连接软土颗粒的作用。其反应式如下：

$$SiO_2+Ca(OH)_2+nH_2O\rightarrow CaO\cdot SiO_2\cdot(n+1)H_2O \quad (1)$$

$$Al_2O_3+Ca(OH)_2+nH_2O\rightarrow CaO\cdot Al_2O_3\cdot(n+1)H_2O \quad (2)$$

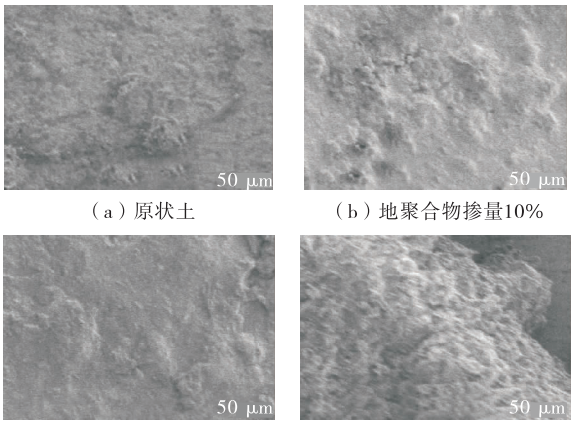
地聚合物对软土颗粒界面的深入作用：地聚合物具有碱性，能与土颗粒表面的自由水结合，同时能渗入强弱结合水中并生成胶凝结构物。与水泥或其他材料加固软土相比，地聚合物不仅能起到水泥所起的填充和包裹作用，还能与软土颗粒界面内的活性物质反应生成新的无机高分子胶凝体。

地聚合物中碱液与软土的反应：地聚合物中的碱激发剂会与土中可溶性及其交换性碱土金属阳离子发生置换反应，使土体成为钠饱和土，且在土体颗粒表面及周围生成碱土金属的氢氧化物沉淀。置换反应结束后剩下的激发剂溶液与土颗粒发生反应，在土颗粒外面形成一层外壳，主要成分为铝酸盐和钠硅酸盐的胶膜。化学反应式如下：

$$2NaOH+nSiO_2\rightarrow Na_2O\cdot SiO_2+H_2O \quad (3)$$

$$2NaOH+mAl_2O_3\rightarrow Na_2O\cdot mAl_2O_3+H_2O \quad (4)$$

对原状土和地聚合物稳定土进行扫描电镜观察，得到土壤的微观形态（见图 1）。从图 1 可看出：原状土中孔隙率较大，土颗粒之间没有结合在一起，因而软土的强度非常低。而地聚合物稳定土中有很多如蜘蛛网一样的白色结晶体，具有更致密的表面形貌、更好的连通性和填充性，将土颗粒胶结成一个更完整的整体，这是因为地聚合物水化产生的类沸石前驱体凝胶脱水会形成非晶相，从而降低软土的孔隙率和孔隙尺寸，土体强度提高。



（a）原状土　（b）地聚合物掺量10%　（c）地聚合物掺量12%　（d）地聚合物掺量14%

图 1　原状土和地聚合物稳定土 SEM 图

1.3　基于正交法的地聚合物土配合比优化设计

1.3.1　地聚合物土试件制备

地聚合物掺量（地聚合物与被加固软土质量之比）取 10%、12%、14%，地聚合物稳定土含水率按软土天然含水率±3%控制，水灰比取 0.5。

称取地聚合物粉末、软土土样、水，先把土样和地聚合物放入搅拌锅充分搅拌，再利用小型喷水壶均匀洒布水，继续搅拌直至均匀。将搅拌均匀的地聚合物稳定土装模，成型后将试模放入恒温养护箱，1 d 后试块形成一定强度后脱模。将脱模的试块放入温度为（20±2）℃、湿度为 75%的养护箱中养护至相应龄期（见图 2）。

图 2　地聚合物稳定土成型试件

1.3.2　基于正交法的地聚合物稳定土配合比设计

采用正交表 $L_9(3^3)$，以地聚合物掺量、软土含水率和搅拌时间为影响因素，影响因素的水平，地聚合物掺量为 10%、12%、14%，软土含水率为 46%、

49%、52%，搅拌时间为 240、480、720 s。通过无侧限抗压强度和抗剪强度试验，对比各因素水平对地聚合物稳定土力学性能的影响，优选出地聚合物处理软土最优水平组合。正交试验设计方案见表 3。

表 3 正交试验设计方案

试验编号	各试验因素的试验水平			试验编号	各试验因素的试验水平		
	地聚合物掺量/%	软土含水率/%	搅拌时间/s		地聚合物掺量/%	软土含水率/%	搅拌时间/s
1	10	46	240	6	12	52	720
2	10	49	480	7	14	46	240
3	10	52	720	8	14	49	480
4	12	46	240	9	14	52	720
5	12	49	480				

1.4 试验路地聚合物土搅拌桩性能测试

(1) 工程概况。试验路段位于浙江省 104 国道改扩建工程，将地聚合物作为固化剂，水灰比采用 0.5，地聚合物掺量为 14%，软土面积约为 25 m^2。设置搅拌桩 10 根，其中 5 根为地聚合物搅拌桩，5 根为水泥＋地聚合物搅拌桩(水泥和地聚合物掺量各占 50%)，按等边三角形布置。

(2) 地聚合物土搅拌桩的性能。根据 GB 50007－2011《建筑地基基础设计规范》及工程设计基本参数对试验路段深层搅拌桩进行计算，结果见表 4。由表 4 可知：地聚合物土搅拌桩的技术指标均满足规范要求。

表 4 地聚合物土搅拌桩的技术指标

项目	参数值	项目	参数值
布桩数量/根	10	复合地基承载力/MPa	258.56
有效长度/m	16	桩身强度/MPa	2.35
单桩承载力/kPa	235	面积置换率/%	15.38

2 试验段地聚合物搅拌桩试验结果与分析

2.1 地聚合物土配合比优选

地聚合物稳定土试件无侧限抗压强度和抗剪强度试验结果见表 5，试验结果的极差分析结果见表 6、表 7，各因素与抗压强度、抗剪强度的关系分别见图 3、图 4。

表 5 $L_9(3^3)$正交试验结果

试验编号	地聚合物掺量 α/%	软土含水率 β/%	搅拌时间 γ/s	无侧限抗压强度/MPa			抗剪强度/MPa		
				7 d	28 d	90 d	7 d	28 d	90 d
1	10	46	240	0.56	1.95	3.99	0.792	0.512	0.778
2	10	49	480	0.53	1.86	3.87	0.187	0.442	0.765
3	10	52	720	0.51	1.70	3.75	0.170	0.345	0.753
4	12	46	480	0.72	2.24	4.20	0.237	0.629	1.239
5	12	49	720	0.64	2.15	4.11	0.223	0.597	1.145
6	12	52	240	0.58	1.99	4.02	0.211	0.532	1.043
7	14	46	720	0.89	2.48	4.73	0.265	0.742	1.523
8	14	49	240	0.84	2.35	4.39	0.257	0.726	1.447
9	14	52	480	0.77	2.27	4.25	0.242	0.641	1.314

表 6 抗压强度的极差分析

极差	7 d 抗压强度			28 d 抗压强度			90 d 抗压强度		
	α	β	γ	α	β	γ	α	β	γ
K_{1j}	1.60	2.17	1.98	5.51	6.67	6.29	11.61	12.92	12.40
K_{2j}	1.94	2.01	2.02	6.38	6.36	6.37	12.33	12.37	12.32
K_{3j}	2.50	1.86	2.04	7.10	5.96	6.33	13.37	12.02	12.34
k_{1j}	0.533	0.723	0.660	1.837	2.223	2.097	3.870	4.307	4.133
k_{2j}	0.647	0.670	0.673	2.127	2.120	2.123	4.110	4.123	4.107
k_{3j}	0.833	0.620	0.680	2.367	1.987	2.110	4.457	4.007	4.197
R_j	0.300	0.103	0.020	0.530	0.236	0.026	0.587	0.300	0.090
主次顺序	$\alpha>\beta>\gamma$								
优水平	α_3	β_1	γ_3	α_3	β_1	γ_2	α_3	β_1	γ_3
优组合		$\alpha_3\beta_1\gamma_3$			$\alpha_3\beta_1\gamma_2$			$\alpha_3\beta_1\gamma_3$	

表 7　抗剪强度的极差分析

极差	7 d 抗剪强度			28 d 抗剪强度			90 d 抗剪强度		
	α	β	γ	α	β	γ	α	β	γ
K_{1j}	0.55	0.69	0.66	1.30	1.88	1.68	2.30	3.54	3.27
K_{2j}	0.67	0.67	0.67	1.76	1.76	1.71	3.43	3.36	3.32
K_{3j}	0.77	0.62	0.72	2.11	1.52	1.77	4.28	3.11	3.42
k_{1j}	0.183	0.231	0.220	0.433	0.628	0.590	0.765	1.180	1.089
k_{2j}	0.224	0.222	0.222	0.586	0.588	0.571	1.142	1.119	1.106
k_{3j}	0.225	0.208	0.219	0.703	0.506	0.561	1.428	1.037	1.140
R_j	0.072	0.023	0.003	0.270	0.122	0.029	0.663	0.143	0.051
主次顺序	$\alpha>\beta>\gamma$								
优水平	α_3	β_1	γ_3	α_3	β_1	γ_3	α_3	β_1	γ_3
优组合	$\alpha_3\beta_1\gamma_3$			$\alpha_3\beta_1\gamma_3$			$\alpha_3\beta_1\gamma_3$		

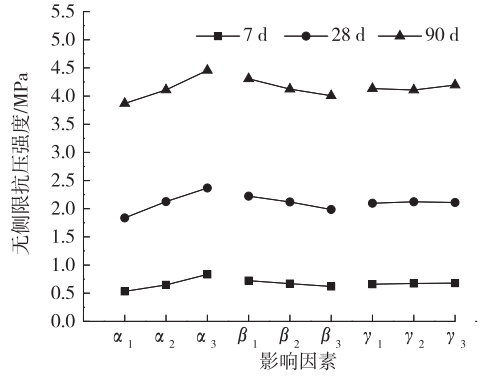


图 3　各因素与抗压强度的关系

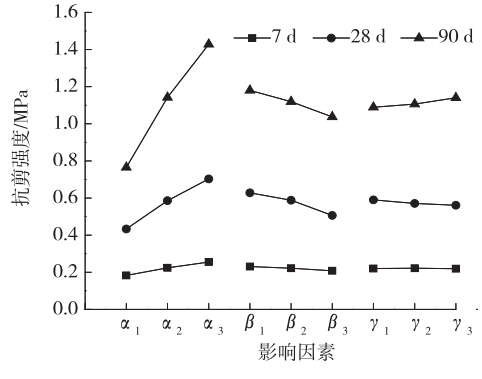


图 4　各因素与抗剪强度的关系

由表 6、表 7 可知：影响地聚合物稳定土抗压、抗剪强度的主次顺序依次为地聚合物掺量 α、软土含水率 β、搅拌时间 γ，地聚合物稳定土的最优水平为 $\alpha_3\beta_1\gamma_3$。

由图 3、图 4 可知：地聚合物稳定土各龄期抗压强度和抗剪强度随着各因素变化呈相似的变化趋势。地聚合物掺量由 10%增大到 14%，地聚合物稳定土的强度增长显著。地聚合物稳定土的强度在后期 28～90 d 的增长速率比 7～28 d 时更快，表明地聚合物稳定土在后期发展更完全。考虑到经济性，在保证地聚合物稳定土强度达到要求的基础上选择 14%作为地聚合物掺量用于实际工程。地聚合物稳定土的强度随着软土含水率的增加而减少，含水率大小同样会影响搅拌的均匀性，可借鉴水泥处理软土的经验取得最佳含水率。

2.2　原状土、水泥稳定土与地聚合物稳定土的强度性能对比

对原状软土、水泥稳定土、地聚合物稳定土的 90 d 无侧限抗压强度进行对比，结果见图 5。固化剂掺量取 10%、12%、14%。

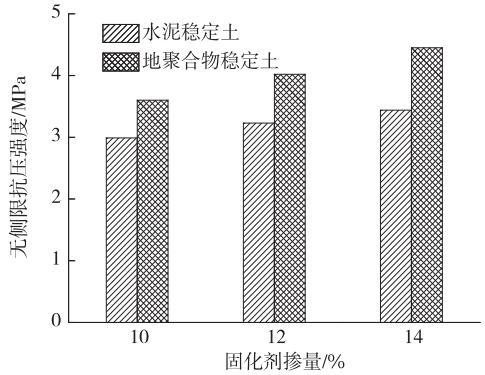


图 5　不同固化剂不同掺量下稳定土抗压强度对比

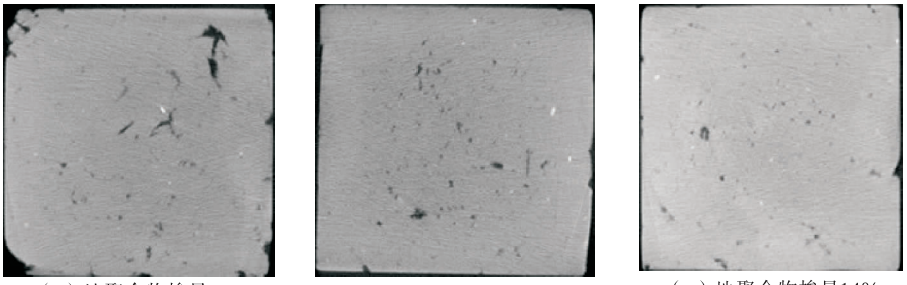
由图 5 可知：随着固化剂掺量的增加，稳定土的无侧限抗压强度增大。当固化剂掺量为 10%时，90 d 龄期地聚合物稳定土、水泥稳定土的抗压强度分别为 3.60、2.98 MPa，比原状软土的无侧限抗压强度 0.04 MPa 分别提高 90、75 倍，地聚合物稳定土的强度比水泥稳定土提高 121%。固化剂掺量为 14%时，地聚合物稳定土、水泥稳定土的抗压强度分别为 4.45、3.43 MPa，比原状软土的无侧限抗压强度分别提高 112、86 倍，地聚合物稳定土的强度比水泥稳定

土提高 130%。用水泥和地聚合物作为固化剂处理软土均能大幅度提高其强度。在相同条件下，地聚合物稳定土的强度比水泥稳定土的高，且随着掺量的增加，地聚合物稳定土的强度增幅比水泥稳定土更大，用地聚合物替代水泥作为固化剂处理软土地基可行。

2.3 CT 扫描结果分析

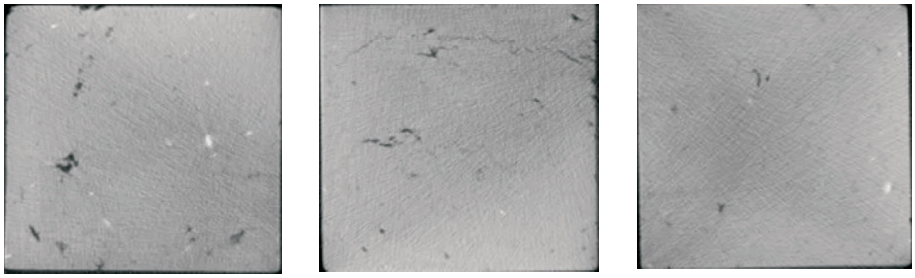
28 d 龄期地聚合物稳定土不同截面高度的 CT 扫描结果见图 6、图 7。

由图6、图7可知：随着地聚合物掺量的增加，



（a）地聚合物掺量10%　（b）地聚合物掺量12%　（c）地聚合物掺量14%

图 6　地聚合物稳定土截面高度 60 cm 时的 CT 扫描结果



（a）地聚合物掺量10%　（b）地聚合物掺量12%　（c）地聚合物掺量14%

图 7　地聚合物稳定土截面高度 70 cm 时的 CT 扫描结果

试件的孔隙率减少，大孔隙的比例也减少，表明地聚合物对软土发挥了填充作用。地聚合物掺量相同时，同一试件不同截面高度的孔隙分布不同，表明孔隙的发展并没有贯穿整个试件。当然试件的孔隙和试件的制备也有必然联系。CT 扫描结果与地聚合物稳定土 SEM 图及宏观试验结果一致，地聚合物水化产生类沸石前驱体凝胶，降低了土体的孔隙率和孔隙尺寸，使土体颗粒之间更紧密，因而土的强度提高。

2.4 试验路地聚合物土搅拌桩性能评价

（1）钻孔取芯法检测。施工完成 28 d 后，在抽取的 6 根搅拌桩桩体的三等分处各取一个芯样（见图 8），检测结果见表 8。设计桩长 16 m，设计桩径 700 mm，设计强度≥0.06 MPa。根据对芯样的观测和抗压强度结果，搅拌桩桩身完整性、长度及无侧限抗压强度均满足设计要求。

3 结论

（1）影响地聚合物稳定土强度的主要因素是地聚合物掺量和软土含水率，次要因素是搅拌时间；地聚合物加固软土的最佳掺量为 14%。地聚合物稳定土的强度随着养护龄期和地聚合物掺量的增加而增加，随着软土含水率的增加而减小。

（2）地聚合物水化产生类沸石前驱体凝胶，这些凝胶脱水会形成非晶相，使土体孔隙率减少，大孔隙比重降低。结合宏观力学试验分析，地聚合物浆

图 8　地聚合物（水泥）土搅拌桩芯样图

表 8　搅拌桩钻孔取芯检测结果

桩的类型	芯样描述	实际桩长/m	芯样强度/MPa
水泥和地聚合物桩	芯样连续、完整，多呈长、短柱状，地聚合物搅拌均匀，地聚合物搅拌桩比水泥＋地聚合物搅拌桩颜色深，无其他异常情况	16.1	2.10
水泥和地聚合物桩		16.2	2.00
水泥和地聚合物桩		15.8	2.50
地聚合物桩		15.7	1.15
地聚合物桩		15.8	1.17

体与软土团粒充分接触后，水化产物能填充土团粒间的多余孔隙，从而提高软土体系强度。

（3）结合试验路段对地聚合物搅拌桩复合地基进行稳定性验算，验算指标均满足要求。从现场抽取芯样的无侧限抗压强度和静载荷试验结果来看，桩身完整，无侧限抗压强度、单桩承载力极限值均满足设计要求。

参考文献：

[1] GHADIR P，RANJBAR N.Clayey soil stabilization using geopolymer and Portland cement[J].Construction and Building Materials，2018，188(10)：361－371.

[2] PHETCHUAY C，HORPIBULSUK S，ARULRAJAH A，et al.Strength development in soft marine clay stabilized by fly ash and calcium carbide residue based geopolymer[J].Applied Clay Science，2016，127－128：134－142.

[3] YAO J L，GUAN R，YUAN J B，et al.Characterizing vibration responses of cement pavement slabs atop different interlayers to moving vehicle load[J].Journal of Testing and Evaluation，2016，45(1)：120－130.

[4] 何华.地聚合物处理软土地基性能与应用研究[D].长沙：长沙理工大学，2017.

[5] BUSHLAIBI A H，ALSHAMSI A M.Efficiency of curing on partially exposed high-strength concrete in hot climate[J].Cement and Concrete Research，2002，32(6)：949－953.

[6] DAVIDOVITS J.Synthesis of new high temperature geo-polymers for reinforced plastics/composites[C].PACTEC'79 Society of Plastics Engineers，1979：151－154.

[7] NGUYEN Q H，LORENTE S，DUHART-BARONE A，et al.Porous arrangement and transport properties of geopolymers[J].Construction and Building Materials，2018，191(10)：853－865.

[8] FENG D，PROVIS J L，DEVENTER J S J V.Thermal activation of albite for the synthesis of one-part mix geopolymers[J].Journal of the American Ceramic Society，2012，95(2)：565－572.

[9] GUNASEKARA C，DIRGANTARA R，LAW D W，et al.Effect of curing conditions on microstructure and pore-structure of brown coal fly ash geopolymers[J].Applied Sciences-Basel，2019，9(15)：3138.

[10] 张跃明，李威，林天干，等.地聚合物软土强度影响因素试验研究[J].公路，2016(11)：198－204.

[11] DAI Y S，CHENG T W.Application of geopolymer paste for concrete repair[J].Structural Concrete：Journal of the FIB，2017，18：561－570.

[12] ASRANI N P，MURALI G，PARTHIBAn K，et al.A feasibility of enhancing the impact resistance of hybrid fibrous geopolymer composites：Experiments and modelling[J].Construction and Building Materials，2019，203(10)：56－68.

[13] KUO W T，LIU M Y，JUANG C U.Bonding behavior of repair material using fly-ash/ground granulated blast furnace slag-based geopolymer[J].Materials，2019，12(10)：1697.

[14] 施惠生，夏明，郭晓潞.粉煤灰基地聚合物反应机理及各组分作用的研究进展[J].硅酸盐学报，2013，41(7)：972－980.

[15] BILLONG N，KINUTHIA J，OTI J，et al.Performance of sodium silicate free geopolymers from metakaolin(MK) and Rice Husk Ash (RHA)：Effect on tensile strength and microstructure[J].Construction and Building Materials，2018，189(20)：307－313.

[16] XIANG J，LIU L，HE Y，et al.Early mechanical properties and microstructural evolution of slag/metakaolin-based geopolymers exposed to karst water[J].Cement and Concrete Composites，2019，99：140－150.

[17] 林天干，许东风，尹万辉，等.地聚合物土搅拌桩技术工程应用研究[J].公路与汽运，2018(1)：94－97.

[18] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑地基基础设计规范：GB 50007－2011[S].北京：中国建筑工业出版社，2012.

[19] 中国建筑科学研究院.建筑地基处理技术规范：JGJ 79－2012[S].北京：中国建筑工业出版社，2012.

收稿日期：2020－03－03