



粉煤灰基地聚合物替代水泥加固软土的试验研究

杨望星, 陈柯宇, 俞烨炜, 巩津瑞, 徐灿玮, 吴大志

(浙江理工大学建筑工程学院, 杭州 310018)

摘要: 本文采用粉煤灰、水玻璃、氢氧化钠和水制备粉煤灰基地聚合物, 将其部分替代水泥用于软土加固, 研究不同替代比例对加固土性能及固化剂成本的影响。结果表明: 加固软土的抗压强度随地聚合物替代水泥比例的增加有所降低, 随固化剂比例的增加而增加; 固化剂成本随着替代比例的增加而减少。当固化剂比例为 20%, 替代比例为 0% 时, 所得到的纯水泥固化土的 28 d 无侧限抗压强度为 8.3 MPa; 当固化剂比例为 20%, 替代比例为 20% 和 40% 时, 28 d 无侧限抗压强度分别为 7.9 MPa 和 7.5 MPa, 固化剂成本分别为纯水泥固化剂的 93% 和 87%, 具有与纯水泥固化土相当的强度, 且成本有所降低, 该比例满足强度要求并符合经济环保效益。经 SEM 分析发现, 当地聚合物替代比例增加, 将出现未反应的球状粉煤灰及大量的孔隙和裂缝, 使得固化土强度降低。经 XRD 分析发现, 地聚合物成分的差异不会对固化土矿物相组成产生影响, 然而地聚合物掺入比例的增加会使体系中的无定形相成分增加。本文研究结果可为需进行软土加固的实际工程提供依据。

关键词: 地聚合物; 水泥; 部分替代; 抗压强度; 经济性评价

中图分类号: TU433

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851 (2022) 05-0433-08

Experimental study on replacing cement reinforced soft soil with fly ash-based geopolymer

YANG Wangxing, CHEN Keyu, YU Yewei, GONG Jinrui, XU Canwei, WU Dazhi

(School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In this paper, fly ash, water glass, NaOH and water were used to prepare fly ash-based geopolymer and partially replace cement for the soft soil reinforcement, for the purpose of investigating the effect of different substitution ratios on the performance of reinforced soils and the cost of curing agents. The results show that the compressive strength of the reinforced soil decreases with the increase of the proportion of cement replaced by the geopolymer and increases with the increase of the proportion of curing agent, while the cost of curing agent decreases with the increase of the substitution proportion. Also, the 28 d unconfined compressive strength of the pure cement reinforced soft is 8.3 MPa when the proportion of curing agent is 20% and the substitution proportion is 0%, and the 28 d unconfined compressive strength is 7.9 MPa and 7.5 MPa, respectively when the proportion of curing agent is 20% and the substitution proportion is 20% and 40%, respectively, and the cost of curing agent is 93% and 87% of that of pure cement curing agent, respectively, with equivalent strength to that of pure cement reinforced soil, and the cost is reduced, and the proportion can meet the strength requirement and conform to economic and environmental benefits. It is found through SEM analysis that the increase in the substitution proportion of local geopolymer will result in unreacted spherical fly ash and a large number of

收稿日期: 2021-07-26 网络出版日期: 2021-12-17

基金项目: 国家级大学生创新创业训练计划项目 (202010338035); 国家自然科学基金项目 (51678533)

作者简介: 杨望星 (2000—), 男, 江西赣州人, 本科生, 主要从事岩土工程方面的研究。

通信作者: 吴大志, E-mail: wudz@zstu.edu.cn

pores and cracks, and reduce the strength of the reinforced soil. It is found through XRD analysis that the difference in the composition of the geopolymer will not affect the mineral phase composition of the reinforced soil. However, an increase in the percentage of geopolymer incorporation will result in the increase of the amorphous phase composition in the system. The results of this study can provide a basis for the practical engineering of soft soil reinforcement.

Key words: geopolymer; cement; partial substitution; compressive strength; economic evaluation

0 引 言

在我国沿江、沿海等地区分布着大量软土,这些地区需要修建大量道路、桥梁和隧道等基础设施以及工业厂房、商业建筑和民用住宅等^[1-2]。而软土普遍存在高压缩性、低透水性、扰动性大、强度低、厚度分布不均匀等一系列工程弊端。软土地基如果处理不好,常常会导致较大的不均匀沉降、地基失稳等工程问题,致使建构筑物破坏,影响其正常使用,带来很大的经济损失和负面社会影响^[3-4]。

目前软土地基常用的主要处理方法可以分为软土改良和软土改性两类^[5],在实际工程中较为常用的方法是采用水泥对软土进行加固,且所得水泥土强度较高。高国瑞等^[6]采用宏观和微观的对比分析技术,对现场和室内的水泥土样品进行了对比分析,发现水泥固化土的工作机理是:当土中水足量时,钙离子进入水中并吸附在软土中的黏土矿物上,随后进行阳离子交换,使分散的黏土凝聚,以达到加固作用;当水中的钙酸盐离子在与黏土表面的离子交换后,仍然可以继续维持水中钙酸盐离子的饱和浓度,黏土矿物便会与溶解在水中的氧化硅等反应生成水化物,包覆在凝聚成团的黏土团粒表面或碎屑颗粒的表面,起到较好的加固作用。

虽然采用水泥加固软土的成效较好,但是这种加固方法对水泥的需求量较大,在水泥“两磨一烧”的生产中带来的环保问题也越来越突出。据国外媒体报道,波兰特水泥厂每年约排放 135 亿 t 温室气体,大约相当于全球平均每年的温室气体排放量的 7%^[7]。地聚合物(Geopolymer)作为一种新型绿色胶凝材料,最早由法国科学家 Davidovits^[8]提出。该材料主要由两部分组成:一部分是液体激发剂,另一部分是富含活性硅铝质的固体粉料。地聚合物的形成过程是各种铝—硅氧化物与硅在高碱环境下发生的一种化学反应,生成聚合的 Si—O—Al—O 键^[9-11]。它能大量减少由于生产水泥等传统胶凝材料所带来的温室气体

排放,且由地聚合物制成的产品具有早期强度形成快、抗压强度高、耐高温、耐化学腐蚀、抗渗性好等优点^[12-14]。也有研究认为,地聚合物混凝土可大幅度改善全球变暖问题^[15]。

目前,地聚合物的应用主要集中在地聚合物注浆加固浅层路基,有着较好的应用。孙家瑛等^[18]以纬九路路基为研究对象,采用地聚合物灌浆材料,开展了路基加固的现场试验,试验发现:注浆处理后路基的承载力增加了 1 倍以上,取得了明显的效果。而地聚合物在软土加固领域应用较少。叶华洋等^[16]以水玻璃为激发剂,水泥与偏高岭土基地聚合物为固化剂,对珠江三角洲滨海平原一变电站软基进行固化试验,试验结果表明:加固土的强度随着水玻璃含量的增加先增后减,其强度增长速率随着偏高岭土地聚合物含量的增加而增加,最后趋于平缓。张跃明等^[17]开展了地聚合物加固沼泽土、江畔土和田间土的室内试验研究,研究表明:地聚合物掺量和软土的含水率是影响地聚合物土强度的两个最主要的因素。Yaghoubi 等^[19]利用 6 种钠、钾基液体碱性激发剂激发下的粉煤灰和矿渣等工业废料,对库德罗岛的软质海相淤泥进行加固,试验表明:制备地质聚合物时,采用 30% NaOH 与 70% Na₂SiO₃ 的结合所得到的碱激发剂可以达到最好加固效果。已有研究大多集中在研究碱激发剂及地聚合物掺量对加固效果的影响,少有研究将地聚合物加固土与水泥土进行比较。

采用纯水泥通过注浆的方式对软土进行加固水泥消耗量较大,环保性能较差,无法满足可持续发展要求,而采用纯地聚合物加固软土强度也很难达要求。刘旭等^[20]采用赤泥—粉煤灰基地聚合物作为固化剂对软土进行加固,试验表明:采用该固化剂进行软土加固有一定加固效果,但加固效果较差,28 d 强度不超过 2 MPa。由于采用粉煤灰基地聚合物作为固化剂得到的加固软土样强度较低,而采用水泥作为固化剂对软土进行加固对环境存在危害。故本文考虑将地聚合物部分替代水泥加固软土,通过正

交试验方法,对不同掺比、不同替代比例时的软土进行加固试验研究。同时,本文通过加固土样的无侧限抗压强度评定其加固效果,通过微观分析得出其强度变化机理,以探索满足经济、环保和使用要求的软土地基加固方法。

表 1 P·O42.5 普通硅酸盐水泥氧化物相对含量

氧化物	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	TiO ₂	MgO	Na ₂ O	其他	烧矢量
相对含量/%	19.08	5.26	64.12	2.86	3.82	0.29	1.04	0.17	0.37	2.99

软土:软土试样为杭州市西湖区湖相软土,淤泥质黏土,取自杭州市西湖区某基坑。采集后将软土样品装入 20 L 塑料桶,转运到试验室,并用胶带密封固定,以防水分流失。其基本物理性质指标见表 2。

表 2 土样基本物理性质指标

液限/ %	塑限/ %	天然含 水率/%	土粒比 重 G _s	黏粒含 量/%	孔隙 比 e	重度/ (kN·m ⁻³)
36.20	23.45	45.86	2.73	34.5	1.42	17.10

粉煤灰:粉煤灰是由燃料燃烧过程中所排出的粒径在 1~100 μm 之间的微小灰粒。本试验用于制备地聚合物的粉煤灰为一级粉煤灰,其主要氧化物组成为 SiO₂、Al₂O₃、FeO、Fe₂O₃、CaO、TiO₂ 等,其主要参数见表 3。

表 3 粉煤灰主要参数

细度/μm	密度/(g·cm ⁻³)	含水量/%
43	2.40	0.50

碱激发剂:本文采用地聚合物碱激发剂为“水玻璃+固态氢氧化钠”,并制成模数为 1.2 的碱激发剂,本试验使用无锡亚泰联合化工公司生产的固体氢氧化钠,纯度高于 99%,水玻璃为市售液体水玻璃,来自山东优索化工科技有限公司,具体参数见表 4。

表 4 水玻璃参数

表观	密度/ (g·cm ⁻³)	波美度	模数	SiO ₂ 含量/%	Na ₂ O 含量/%
无色透明	1.53	40	3.30	26.80	8.30

1.2 配合比

本文先按一定配合比将粉煤灰、碱激发剂、水配置成一定量的地聚合物净浆,随后将一定量的配置好的地聚合物净浆与水泥、水、软土按设置好的配合比混合进行软土加固。本试验选取“地聚合物+水泥”混合比例为 10%、15%、20%,地聚合物替代水泥比例取 0%、20%、40%、60%、80%、100%。混合比例的选择依据我国《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—2012)中规定:“水泥土搅拌桩的实际施工

1 试验方案

1.1 原材料

水泥:试验用水泥标号为 P·O42.5 的普通硅酸盐水泥,其氧化物相对含量见表 1。

中块状加固时水泥掺量须大于 7%”,本文所选固化剂比例符合此规范中要求。

本试验使用粉煤灰、氢氧化钠、水玻璃和水制备粉煤灰基地聚合物,每千克粉煤灰基地聚合物配合比见表 5,水胶比为 0.4。采用正交试验,试验共 3×6=18 组,各组配合比见表 6。其中每组加固土样中软土质量为干重 2500 g,水的质量与“软土+水泥”质量之比为 0.35。

表 5 每千克粉煤灰基地聚合物配合比

粉煤灰 质量/g	碱激发剂(模数 1.2)			外加水 质量/g
	NaOH 质量/g	Na ₂ SiO ₃ 质量/g	碱激发剂 总质量/g	
629.15	39.75	212.25	252.00	118.85

1.3 试样制备

制备加固土样时,先将试验所用淤泥质软土烘干 24 h 后用粉碎机碾碎成粉末状,过 2 mm 筛,去除其中较大土颗粒,再将粉碎后的干燥土按含水量 35%加水配制成试样所需软土样;随后将粉煤灰和碱激发剂按给定比例配置成足量的地聚合物净浆,并将其与软土、水泥、水按各组不同配合比,通过搅拌机搅拌均匀,得到膏状的地聚合物水泥土;再将其放入 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm 模具中,振动捣实;最后放入标准养护箱,养护至试验要求龄期。各组别的加固土样制备 3 个平行试样,试验加固土试块制备具体流程见图 1。

1.4 试验参数

1.4.1 无侧限抗压强度试验

无侧限抗压试验装置采用液压万能试验机,实时记录抗压强度曲线变化,当抗压强度曲线不再增大时,取所能承受的最大压应力作为该试样的无侧限抗压强度,各组别测定 3 个平行试样无侧限抗压强度,在允许误差范围内(以 3 块试块强度居中的试块为准,强度值误差不超过 15%)取平均值作为该组别无侧限抗压强度,当各组别有效试样少于 3 个时该组无效,补做该组配合比的加固土样。

表6 各组配合比

组号	水泥+地聚合物 混合比例/%	地聚合物 替代比例/%	软土质量/g	水泥+地聚 合物总质量/g	水泥质量/g	粉煤灰基地聚 合物质量/g	水质量/g
LA1	10	0	2500.00	250.00	250.00	0.00	962.50
LA2	10	20	2500.00	250.00	200.00	50.00	945.00
LA3	10	40	2500.00	250.00	150.00	100.00	927.50
LA4	10	60	2500.00	250.00	100.00	150.00	910.00
LA5	10	80	2500.00	250.00	50.00	200.00	892.50
LA6	10	100	2500.00	250.00	0.00	250.00	875.00
LB1	15	0	2500.00	375.00	375.00	0.00	1006.25
LB2	15	20	2500.00	375.00	300.00	75.00	980.00
LB3	15	40	2500.00	375.00	225.00	150.00	953.75
LB4	15	60	2500.00	375.00	150.00	225.00	927.50
LB5	15	80	2500.00	375.00	75.00	300.00	901.25
LB6	15	100	2500.00	375.00	0.00	375.00	875.00
LC1	20	0	2500.00	500.00	500.00	0.00	1050.00
LC2	20	20	2500.00	500.00	400.00	100.00	1015.00
LC3	20	40	2500.00	500.00	300.00	200.00	980.00
LC4	20	60	2500.00	500.00	200.00	300.00	945.00
LC5	20	80	2500.00	500.00	100.00	400.00	910.00
LC6	20	100	2500.00	500.00	0.00	500.00	875.00

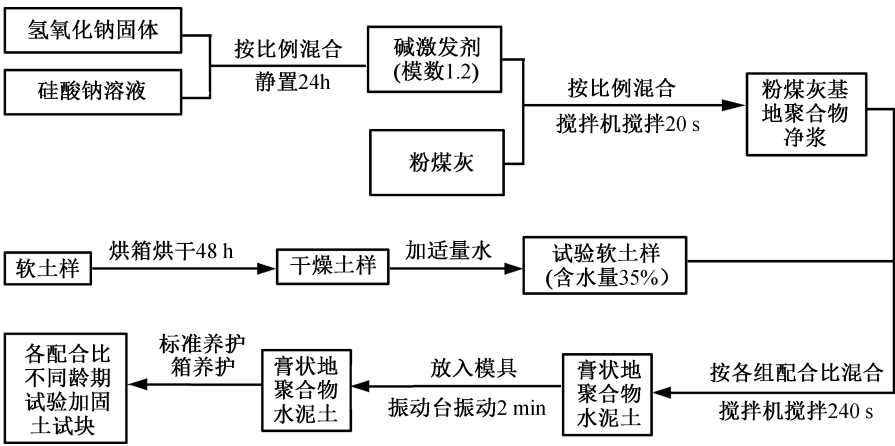


图1 试验加固土试块制备流程

1.4.2 微观结构及矿物相组成成分分析

微观结构分析采用扫描电子显微镜(Scanning electron microscope, SEM)技术,选择地聚合物替代比例为20%、40%、60%,养护龄期为28 d的地聚合物替代水泥加固土样进行SEM电镜扫描试验。

矿物相组成分析采用X射线衍射(X-Ray diffraction, XRD)技术,测量范围 2θ 为 $10^{\circ}\sim 80^{\circ}$,步长为0.5 s,测试电压为40 kV。

2 结果分析

2.1 无侧限抗压强度

混合比例(分别为10%、15%、20%)一定时,地聚合物替代水泥比例为0%、20%、40%、60%、80%、100%,试验加固土试块7、14、28 d的抗压强度试验结果见图2。图2(a)—(c)分别为“地聚合物

+水泥”混合比例为10%、15%、20%时,不同地聚合物替代水泥比例的试验加固土试块的抗压强度。

由图2(a)—(c)可知,各组加固土样抗压强度随着龄期及“地聚合物+水泥”混合比例增长均有较明显的增长,同时各组加固土样抗压强度随着地聚合物替代水泥比例增加有所降低。当混合比例为10%时,随着替代比例的增加,试验加固土试块28 d强度从4.3 MPa降低到2.5 MPa,当混合比例为15%时,随着替代比例的增加,试验加固土试块28 d强度从5.2 MPa降低到2.9 MPa,当“地聚合物+水泥”混合比例为20%时,随着替代比例的增加,试验加固土试块28 d强度从7.8 MPa降低到4.7 MPa。试验结果表明:当混合比例不变时,加固土抗压强度随地聚合物替代水泥比例的增加而降低;当地聚合物替代水泥比例不变时,加固土抗压强

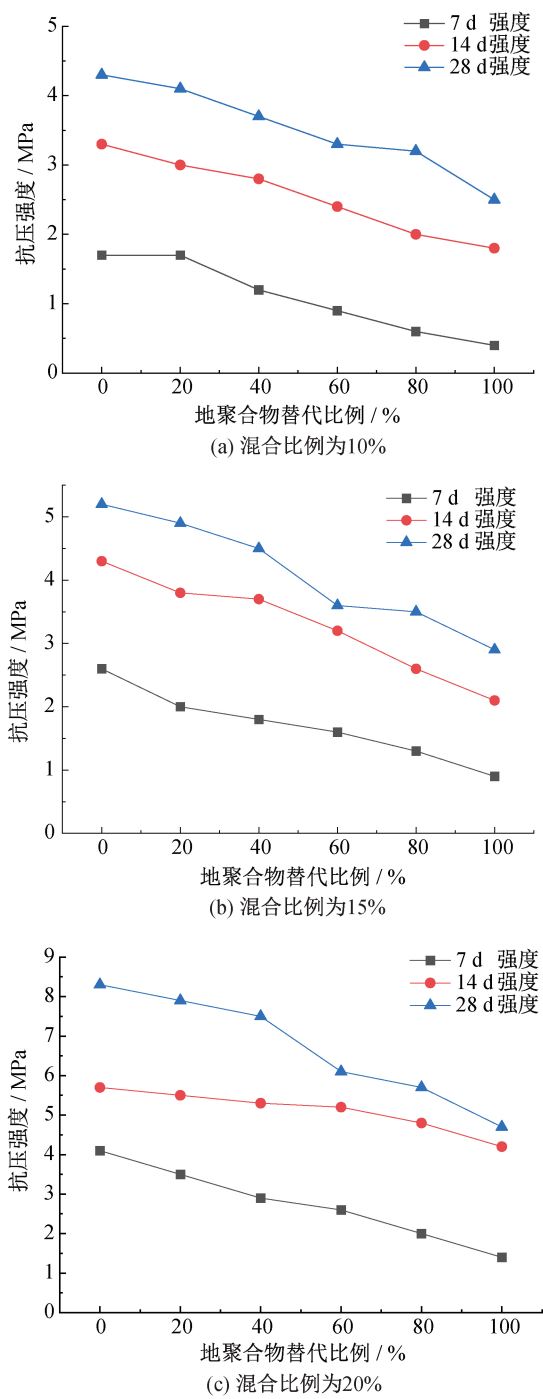


图 2 不同固化剂比例下加固土样抗压强度

度随“地聚合物+水泥”混合比例的增加而增加。这是由于随着水泥所占比例增加,加固土体中钙含量增加,在固化反应过程中生成了更多强度更高的 C-S-H 凝胶。因此就加固效果而言,最佳配合比组别为混合比例 20%、地聚合物替代水泥比例 0%。

表 7 粉煤灰基地聚合物制备成本明细

粉煤灰		NaOH		水玻璃溶液		水		总成本/元
用量/t	成本/元	用量/t	成本/元	用量/t	成本/元	用量/t	成本/元	
1.0	120	0.0631	189.3	0.3369	235.83	0.18944	0.66	545.79

2.2 微观结构及矿物相组成成分分析

2.2.1 SEM 电镜扫描试验结果

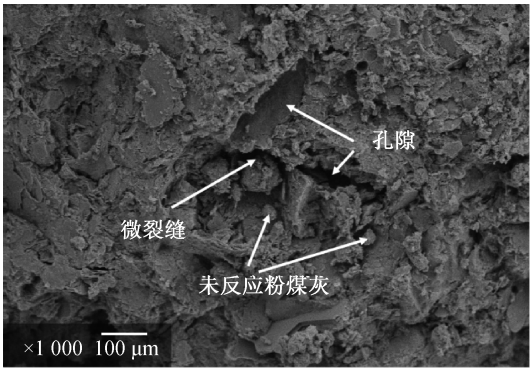
混合比例为 20% 时各地聚合物替代比例的 SEM 电镜扫描图见图 3。由 SEM 电镜扫描结果可以看出,地聚合物替代比例为 60% 的土样中存在被地聚合物凝胶包裹的未反应的球状粉煤灰,同时存在大量的孔隙和裂缝,表明该种多孔微观结构具有较高的渗透性。由于基质骨料界面之间存在的裂缝是引起的混凝土破坏的主要原因,大量裂缝和孔隙的存在使其强度降低。这是由于在 OPC 含量较低时,钙含量较低,水泥水化反应受到限制,聚合反应虽然生成了大量 N-A-S-H 凝胶,但仅生成了少量与 N-A-S-H 相比强度较高的 C-S-H 凝胶^[21]。随着地聚合物替代比例的降低,裂缝和孔隙减少、聚合程度更高,使得显微密度更大、更连续、更紧凑,通过阻断裂缝的路径增加了其外部承载能力。当替代比例为 20% 时,可以观察到几乎没有未反应的球状粉煤灰, OPC 粒子留在结构中,并对其起到黏结作用,所有的粒子反应成地缘聚合和水化,从而生成了更紧凑的基体,增加了土体的密实度。此外,由于系统中 OPC 水平的增加,钙含量增加,在固化反应过程中生成了更多强度更高的 C-S-H 凝胶,并分布在整个结构中,通过增加材料强度的路径提高了固化土的强度。

2.2.2 XRD 分析结果

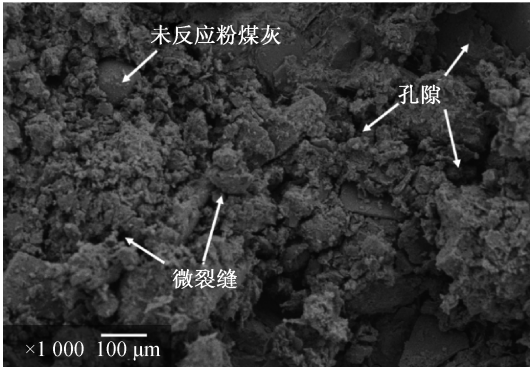
地聚合物以不同比例替代水泥用于加固土体 28 d 后产生的晶体相如图 4 所示,3 种样品主要含有石英相 (SiO₂)、钠长石 (NaAlSi₃O₈)、方解石 (CaCO₃)、斜绿泥石 (MgFe_{4.75}Al_{1.25}Si_{2.75}O₁₀·OH₈)、白云母 (K₂Al₆Si₆(OH)₈O₁₈) 及水泥主要矿物相硅酸二钙。这表明地聚合物成分的差异不会对固化土矿物相组成产生影响。然而地聚合物掺入比例的增加会使体系中的无定形相成分增加。

2.3 经济性分析

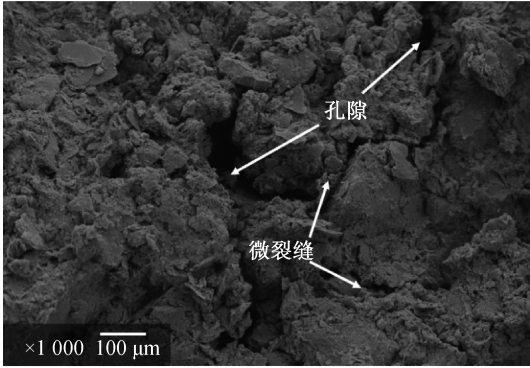
在上述试验基础上,选取“地聚合物+水泥”混合比例为 20% 的各组别进行固化效果比对以及经济性评价。其中:水泥单价约为 500 元/t,一级粉煤灰单价约为 120 元/t,NaOH 价格约为 3000 元/t,水玻璃价格为 700 元/t。则按 1 t 粉煤灰制备粉煤灰基地聚合物,不计水的成本,则其成本明细如表 7。



(a) 替代比例为20%



(b) 替代比例为40%



(c) 替代比例为60%

图3 不同替代比例固化剂加固后土样的 SEM 电镜扫描图

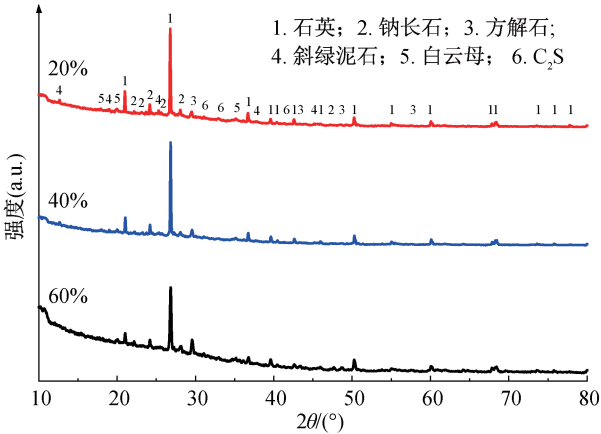


图4 不同地聚合物掺量下的固化土矿物相 X 射线衍射图

由表 7 可知,以 1 t 粉煤灰用量可制备粉煤灰基地聚合物 1.59 t,其总成本为 545.79 元,即制备 1 t 粉煤灰基地聚合物的成本约为 342.00 元。基于此,以地聚合物替代比例为 0 的试验作为对照,将各组强度与对照组强度比值作为固化效果参考,当“地聚合物+水泥”混合比例为 20%、龄期为 28 d 时,各组固化效果与经济成本见表 8,强度比值及成本比值曲线如图 5 所示。

表 8 混合比例为 20% 的各组固化效果与经济成本

替代比例/%	28 d 抗压强度/MPa	强度比值	经济成本/元	成本比值
0	8.3	1.00	0.25	1.00
20	7.7	0.93	0.23	0.93
40	7.5	0.90	0.22	0.87
60	6.1	0.73	0.20	0.81
80	5.7	0.69	0.19	0.74
100	4.7	0.56	0.17	0.68

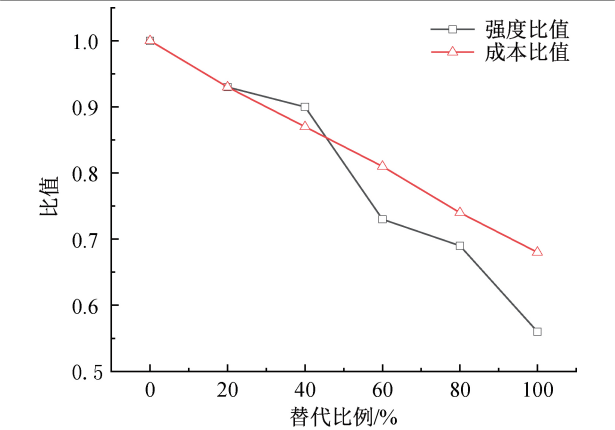


图5 各替代比例强度比值与成本比值

由表 8 和图 5 可知,随着地聚合物替代水泥比例的增加,固化剂经济成本逐渐降低。结合无侧限抗压强度试验结果可知:当地聚合物替代水泥比例为 20% 时,其 28 d 抗压强度相当于纯水泥加固 28 d 抗压强度的 93%,固化效果相当,且其成本为纯水泥加固的 0.93,成本降低的幅度与固化效果降低的幅度相当;当地聚合物替代水泥比例为 40% 时,其 28 d 抗压强度相当于纯水泥加固 28 d 抗压强度的 90%,固化效果相当,且其成本为纯水泥加固的 0.87,成本降低的幅度大于固化效果降低的幅度;当地聚合物替代水泥比例为 60% 时,其 28 d 抗压强度相当于纯水泥加固 28 d 抗压强度的 73%,固化效果降低幅度较大,其成本为纯水泥加固的 0.81,成本降低的幅度小于固化效果降低的幅度;当地聚合物替代水泥比例为 80% 时,其 28 d 抗压强度相当于纯水泥加固 28 d 抗压强度的 0.69%,固化效果降低幅

度较大,其成本为纯水泥加固的0.74,成本降低的幅度小于固化效果降低的幅度;当采用纯地聚合物加固时,其28 d抗压强度相当于纯水泥加固28 d抗压强度的56%,固化效果降低幅度过大,且其成本为纯水泥加固的0.68,成本降低的幅度大于固化效果降低的幅度。

基于上述分析可知,当地聚合物替代水泥比例为20%及40%时,所得加固土样28 d抗压强度分别为7.7 MPa和7.5 MPa,加固效果与纯水泥加固效果相当,且成本相对于纯水泥均有降低。故采用这两种替代比例的固化剂对软土进行加固有一定的强度保证,并且减少了水泥的用量,对环境保护有较大帮助,同时在经济效益方面也有一定的优越性。而当替代比例为60%及以上时,虽然固化剂经济成本有较大幅度的降低,但所得固化土与纯水泥固化土相比,强度降低幅度过大,故不作为固化剂优选比例。

3 结 论

本文通过“地聚合物+水泥”混合比例为10%、15%、20%,地聚合物替代水泥比例为0%、20%、40%、60%、80%、100%的粉煤灰基地聚合物部分(或全部)替代水泥加固软土的宏观试验和SEM、XRD微观试验,采用正交试验方法,研究了各种替代比例下的加固效果试验研究和经济效益评析,以期验证采用“粉煤灰基地聚合物+水泥”作为固化剂加固软土的可行性,并得到固化剂最优配比,得出以下结论:

a)当地聚合物替代水泥比例一定时,加固土样固化强度随“地聚合物+水泥”混合比例的增加而有所提升,当“地聚合物+水泥”混合比例一定时,加固土样固化强度随地聚合物替代水泥比例的增加有所降低,其中替代比例为20%和40%强度降低幅度较小,这表明在替代比例较小时,采用地聚合物部分替代水泥加固软土所得土样在强度方面有所保证。

b)当“地聚合物+水泥”混合比例一定时,固化剂经济成本随粉煤灰地聚合物替代水泥比例的增加而减少。当替代比例为20%、40%时,在保证具有与纯水泥固化土具有相当的强度之外,其成本有所降低,因此替代比例为20%、40%为满足强度要求及经济环保效益的最优替代比例。

c)SEM电镜试验表明当地聚合物替代水泥比例为20%和40%时,加固土样中钙含量较高,生成了高强度的C-S-H凝胶,并分布在整个结构中,同

时改善了其空间结构,使结构较为紧凑。而当地聚合物替代比例为60%时,土样中存在被地聚合物凝胶包裹的未反应的球状粉煤灰和大量的孔隙和裂缝,导致该替代比例下固化土强度较低。

综上所述,当替代比例为20%及40%时,采用地聚合物部分替代水泥加固软土在固化效果和经济效益上是可行的,同时采用地聚合物部分替代水泥能有效减少水泥用量,有利于环保。该结果可为实际工程中软土加固提供依据。

参考文献:

- [1] 雷华阳,李宸元,刘景锦,等.交替式真空预压法加固吹填超软土试验及数值模拟研究[J].岩石力学与工程学报,2019,38(10):2112-2125.
- [2] 焦丹,龚晓南,李瑛.电渗法加固软土地基试验研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(S1):3208-3216.
- [3] Araújo G L S, Palmeira E M, Macêdo Í L. Comparisons between predicted and observed behaviour of a geosynthetic reinforced abutment on soft soil[J]. Engineering Geology, 2012, 147/148: 101.
- [4] 杨爱武,肖敏,周玉明.石灰粉煤灰固化天津滨海软土试验研究[J].地下空间与工程学报,2019,15(1):60-67.
- [5] 张永利.关于建筑工程中软土地基处理及施工技术[J].工程建设与设计,2019(9):41-43.
- [6] 高国瑞,李俊才.水泥加固(改良)软土地基的研究[J].工程地质学报,1996,4(1):45-52.
- [7] Andrew R M. Global CO₂ emissions from cement production[J]. Earth System Science Data, 2018, 10(1): 195-217.
- [8] Davidovits J. Geopolymers and geopolymeric materials[J]. Journal of Thermal Analysis, 1989, 35(2): 429-441.
- [9] 曹向阳,杨建森.地聚合物及其混凝土的胶凝性质概述[J].硅酸盐通报,2019,38(7):2095-2103.
- [10] Lolli F, Manzano H, Provis J L, et al. Atomistic simulations of geopolymer models: The impact of disorder on structure and mechanics[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2018, 10(26): 22809-22820.
- [11] 王栋民,候云芬,左彦峰,等.粉煤灰基无机矿物聚合材料[J].新型建筑材料,2006,33(2):14-16.
- [12] Singh B, Ishwarya G, Gupta M, et al. Geopolymer concrete: A review of some recent developments[J]. Construction and Building Materials, 2015, 85: 78-90.
- [13] Aliabdo A A, Abd Elmoaty A E M, Salem H A. Effect of water addition, plasticizer and alkaline solution constitution on fly ash based geopolymer

concrete performance [J]. Construction and Building Materials, 2016, 121(9): 694-703.

[14] Ranjbar N, Mehrali M, Alengaram U J, et al. Compressive strength and microstructural analysis of fly ash/palm oil fuel ash based geopolymer mortar under elevated temperatures [J]. Construction and Building Materials, 2014, 65(8): 114-121.

[15] Abbas R, Khereby M A, Ghorab H Y, et al. Preparation of geopolymer concrete using Egyptian Kaolin clay and the study of its environmental effects and economic cost [J]. Clean Technologies and Environmental Policy, 2020, 22(3): 669-687.

[16] 叶华洋, 张伟锋, 韦未, 等. 激发剂—地聚合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.

[17] 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, 61(11): 198-204.

[18] 孙家瑛, 王志新, 戴亚英, 等. 地聚合物灌浆材料在公路软土地基处理中的应用[J]. 铁道科学与工程学报, 2005, 2(2): 62-65.

[19] Yaghoubi M, Arulrajah A, Disfani M M, et al. Effects of industrial by-product based geopolymers on the strength development of a soft soil [J]. Soils and Foundations, 2018, 58(3): 716-728.

[20] 刘旭, 张默, 邵龙潭. 地质聚合物加固含硫软土的试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2018, 16(4): 136-142.

[21] Chen K Y, Wu D Z, Yi M, et al. Mechanical and durability properties of metakaolin blended with slag geopolymer mortars used for pavement repair [J]. Construction and Building Materials, 2021, 281(2): 122566.

(责任编辑:康 锋)