

稻壳灰-地聚物固化土力学特性及机理分析

易 富, 管茂成, 李 军, 杜常博

Mechanical properties and mechanism analyses of rice husk ash geopolymer solidified soil

YI Fu, GUAN Maocheng, LI Jun, and DU Changbo

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202107021>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

上海黏土压缩回弹变形的微观机理

Micro-mechanism of compression and rebound of clay in Shanghai

顾迪, 严学新, 张云, 白杨, 杨天亮 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 123-131

冻融循环作用下黄土无侧限抗压强度和微观规律的试验研究

Effect of freezing-thawing cycles on mechanical properties and microscopic mechanisms of loess

刘乐青, 张吾渝, 张丙印, 谷遇溪, 解邦龙 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 109-115

改性糯米灰浆固化黄土的微观机理试验研究

A test study of the microscopic mechanism of modified glutinous rice mortar solidified loess

贾栋钦, 裴向军, 张晓超, 周立宏 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 90-96

干湿循环作用下污泥固化土三维力学特性研究

Research on 3D mechanical properties of sludge solidified soil under the action of drying and wetting cycles

徐健, 赵绪, 马锐敏, 杨爱武, 杨少坤 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 110-118

侵蚀环境中碱渣-矿渣固化淤泥的力学性质

Mechanical properties of the soft soil stabilized with soda residue and ground granulated blast furnace slag under the erosion environment

何俊, 栗志翔, 石小康, 王小琦 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 83-89

固化轻质土在干湿循环及大变形条件下力学特性研究

A study of the mechanical properties of curing light soil under the condition of drying-wetting circles and large deformation

杨爱武, 姜帅, 封安坤, 陈立杰, 赵梦生 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 93-100



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202107021

易富, 管茂成, 李军, 等. 稻壳灰-地聚物固化土力学特性及机理分析[J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(2): 94-101.
YI Fu, GUAN Maocheng, LI Jun, *et al.* Mechanical properties and mechanism analyses of rice husk ash geopolymer solidified soil[J].
Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(2): 94-101.

稻壳灰-地聚物固化土力学特性及机理分析

易富¹, 管茂成², 李军², 杜常博²

- (1. 辽宁工程技术大学建筑与交通学院, 辽宁 阜新 123000;
2. 辽宁工程技术大学土木工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要: 为了研究绿色环保新型流态固化土在狭窄肥槽回填等工程问题中的应用, 提出稻壳灰联合地聚物固化工程渣土形成流态稻壳灰-地聚物固化土。采用无侧限抗压强度(UCS)试验、X射线衍射(XRD)、扫描电子显微镜(SEM)和X射线能谱分析(EDS)等测试方法, 研究稻壳灰的掺量与粒径对稻壳灰-地聚物固化土的无侧限抗压强度(UCS)的影响规律, 并探讨了稻壳灰掺量与粒径对其微观结构影响规律。结果表明: 稻壳灰-地聚物固化土的净浆流动度与稻壳灰的掺量、粒径呈负相关关系, 其凝结时间与稻壳灰掺量呈正相关关系, 但与稻壳灰的粒径呈负相关关系; 稻壳灰-地聚物固化土 UCS 值随着稻壳灰的掺量增加、粒径降低而显著提高, 当稻壳灰的掺量增加到 10% 后, 强度提升效能降低, 初步判定稻壳灰的最优掺量为 10%; 固化过程中产生水化硅铝酸钠(N-A-S-H)和水化硅酸钙(C-S-H)2 种凝胶, 起到填充内部孔隙和胶结土颗粒的作用, 使整体结构趋于完整, 是稻壳灰-地聚物固化土强度提升的根本原因。研究成果可为稻壳灰在流态固化土的工程应用提供理论依据。

关键词: 流态固化土; 地聚物; 稻壳灰; 无侧限抗压强度; 微观机理

中图分类号: TU411.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2022)02-0094-08

Mechanical properties and mechanism analyses of rice husk ash geopolymer solidified soil

YI Fu¹, GUAN Maocheng², LI Jun², DU Changbo²

- (1. College of Architecture and Transportation, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China;
2. College of Civil Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China)

Abstract: In order to study the application of the green environmental protection fluid solidified soil in engineering problems such as backfilling of a narrow fertilizer tank, the rice husk ash and geopolymer solidified engineering residue forming the fluid rice husk ash geopolymer solidified soil is proposed. The effects of the content and particle size of the rice husk ash on the unconfined compressive strength (UCS) of the rice husk ash geopolymer stabilized soil are examined by using the test methods of the unconfined compressive strength (UCS), X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscope (SEM) and X-ray energy spectrum analysis (EDS), and the effects of the content and particle size of the rice husk ash on the microstructure of the soil are discussed. The results show that the net pulp fluidity of the rice husk ash geopolymer solidified soil is negatively correlated with

收稿日期: 2021-07-08; 修订日期: 2021-09-26

投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(51774163); 辽宁工程技术大学首批“双一流”学科建设创新团队资助(LNTU20TD-26)

第一作者: 易富(1978-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事环境岩土研究。E-mail: yifu9716@163.com

通讯作者: 管茂成(1996-), 男, 硕士研究生, 从事固化土力学特性与微观结构研究。E-mail: gmc19960613@163.com

the content and particle size of the rice husk ash, and the setting time is positively correlated with the content of the rice husk ash, but is negatively correlated with the particle size of the rice husk ash. The UCS value of the rice husk ash geopolymer stabilized soil increases significantly with the increase of the content of the rice husk ash and with the decrease of the particle size. When the content of the rice husk ash increases to 10%, the strength improvement efficiency decreases, and the optimal content of the rice husk ash is 10%. During the curing process, two kinds of gels, namely hydrated sodium aluminosilicate (N-A-S-H) and hydrated calcium silicate (C-S-H), play the role of filling the internal pores and cemented soil particles, so that the whole structure tends to be complete, which is the fundamental reason for the strength improvement of the rice husk ash geopolymer stabilized soil. The research results can provide a theoretical basis for the engineering application of the rice husk ash in fluid solidified soils.

Keywords: fluid solidified soil; geopolymer; rice husk ash; unconfined compressive strength; micro-mechanism

城市建设中翻建工程产生大量渣土,其中大部分渣土没有得到有效的回收利用,容易对周边环境造成二次污染。翻建工程中地基开挖后,肥槽狭窄难以用常规方法进行回填,流态固化土可以解决回填问题,且能对地基开挖的泥土再次利用,将泥土与固化剂、水混合后回填到基坑当中,形成稳定的回填土。现在工程中多数采用以水泥为主要固化剂的流态固化土,然而水泥在生产过程中会消耗大量资源,并排放CO₂与粉尘造成环境污染,因此寻找替代水泥的绿色环保胶凝材料具有十分重要的研究意义^[1]。地聚物凝胶作为固化材料受多种因素影响,一些学者研究发现不同碱激发剂模数、掺量对矿渣与粉煤灰地聚物路面基础材料与地聚物固化土的强度有很大的影响,且碱激发剂模数为1.2时,地聚物固化效果更优^[2-3]。杨世玉等^[4]采用压汞试验(MIP)对粉煤灰基地聚物砂浆微观孔隙结构与宏观力学性能进行了研究,发现地聚物砂浆强度受水相含量影响最为显著,水相含量越高,孔隙率越大,强度越低。贾栋钦等^[5]探究了改性糯米灰浆固化黄土不同胶固比固化土水敏性变化,结果表明改性糯米灰浆改善了黄土的孔隙结构与物质成分,通过X射线衍射、扫描电镜试验发现胶固比为0.45时,其吸水率最低,方解石增长最为明显,孔隙率降低显著。周恒宇等^[6]以煤系偏高岭土(CMK)与矿渣对淤泥进行固化,结果表明固化土的强度随着碱固比、矿渣与NaOH的浓度提高而增强,通过微观试验发现无定形凝胶增多,凝胶通过粘合作用增强土颗粒之间的黏聚力。何俊等^[7]对矿渣-碱渣固化淤泥在侵蚀环境下的力学性能进行了研究,结果表明碱渣-矿渣固化淤泥稳定性能优异,经过溶液浸泡28~42 d时,

抗压强度基本保持不变,抗变形能力减弱,浸泡相同时间的情况下固化土抗NaCl侵蚀的能力强,抗MgSO₄侵蚀能力较弱。邓永锋等^[8]、叶华洋等^[9]均对偏高岭土(MK)的加入对水泥固化土力学影响规律进行了研究,研究表明,MK的加入对于固化土强度影响并非单一线性增加关系,而是由活性区域和惰性区域组成,经试验得到固化剂配比最优组合,通过现场试验与工程造价分析,地聚合物替代部分水泥固化其经济价值与力学性能均强于水泥石,具有较大的工程实用性。

稻壳灰是极具潜力的再生资源之一,其含有高纯度的非晶态SiO₂,具有较高火山灰活性,可以广泛应用于建筑行业,符合可持续发展绿色建筑的理念^[10]。Muntohar等^[11]研究了稻壳灰、石灰和废弃纤维对土体加固的影响,研究表明加入稻壳灰、石灰和纤维后,土体的拉伸、压缩剪切强度等工程性能均得到提升,增强了土体的耐久性与稳定性,同时得出最佳掺量范围为干土质量的0.4%~0.8%。Ghorbani等^[12]将稻壳灰作为水泥替代物进行土体固化,研究表明当稻壳灰的掺量与水泥掺量比例为1:1时,固化土无侧限抗压强度与抗折强度均得到很大提升。厚荣斌等^[13]将钢渣、生石灰、稻壳灰作为添加剂加入膨胀土中,以无侧限抗压强度为指标确定三者最佳配比,研究表明改良土的颗粒组成、物理性质与胀缩性能均得到明显改善。Nasiri等^[14]将石灰与稻壳灰采取单掺与组合掺入的方案进行土体加固研究,结果表明稻壳灰掺量增加,混合土最大干密度减少,最优含水率增大,承载力增加,但是单掺稻壳灰会使土体的可塑性降低。

基于上述学者的研究,粉煤灰、高炉矿渣等工业

废弃物替代水泥作为胶凝材料从经济价值与环境价值来说都是很好的选择,在掺量不变的情况下,稻壳灰的加入能进一步提高流态固化土的力学性能。地聚物凝胶在含水率较高的情况下反应缓慢,在干燥环境下反应良好,而水泥在含水量充足的环境下效率更高^[15],所以加入少量的水泥会加速流态固化土凝结。鉴于此,本文基于降低工程造价及环境保护的考虑,采用水泥、粉煤灰、高炉矿渣粉联合固化工程渣土,增添稻壳灰增强流态固化土力学性能。通过无侧限抗压强度作为力学性能判断依据,探究稻壳灰的掺量以及粒径对稻壳灰-地聚物固化土力学性能的影响,并采用 SEM、XRD、EDS 对固化土微观结构进行研究,探究内部结构与化学成分对其固化机理影响。

1 试验材料与试验方案

1.1 试验材料

1.1.1 试验土样

试验土样来自北京翻建工程渣土,取回土样筛掉其中大块的建筑固废,晾干粉碎。经试验测定,土样塑限 16.7%,液限 28.7%,天然密度 1.83 g/cm³,天然含水率 18.7%,属于粉质黏土。

1.1.2 固化材料

采用水泥、粉煤灰、矿渣粉、稻壳灰作为复合固化剂对土样进行固化。水泥采用 42.5 普通硅酸盐水泥。粉煤灰为韵达矿产品有限公司提供的二级粉煤灰,矿渣粉为同公司提供的粒化高炉矿渣粉(GGBS),密度为 2.9 g/cm³,比表面积 720 m²/kg,活性指数为 95%。稻壳灰为黑色粉末状,相对密度为 1.80 g/cm³。粉煤灰、GGBS、水泥、稻壳灰化学组成见表 1。

表 1 粉煤灰、GGBS、水泥、稻壳灰的化学组成
Table 1 Chemical compositions of the fly ash,
GGBS, cement and rice husk ash

材料	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	SO ₃	K ₂ O
粉煤灰	63.34	27.00	2.00	1.00	3.00	1.11	1.10	1.05
GGBS	35.41	20.24	0.18	8.16	31.64	1.36	1.79	0.29
水泥	23.22	4.51	2.33	1.16	60.47	0.87	4.22	1.23
稻壳灰	84.00	1.35	1.45		3.17		0.932	

1.1.3 碱激发剂

碱激发剂由水玻璃和氢氧化钠配制而成,氢氧化钠为纯度 96% 市售分析纯,水玻璃模数 3.3,波美度 38.5°Bé, SiO₂ 质量分数 27.3%, Na₂O 质量分数 8.54%。经验证,固化土碱激发剂的模数为 1.2 mol/L 时,其抗压强度达到最优,所以溶液模数选为 1.2 mol/L,将配

置好的溶液封住瓶口,放置 24 h 后再使用。

1.2 试样制备

将稻壳灰筛分成 4 种粒径: 0.075, 0.15, 0.3, 0.6 mm。将水泥、粉煤灰、GGBS 以 2 : 5 : 3 混合,其总质量为干土质量的 10%,取不同粒径稻壳灰掺入,稻壳灰的重量分别为胶凝材料的 5%、10%、15%。将碱激发溶液与胶凝材料、稻壳灰和纯净水混合,将混合的液体加入含水率 30% 的土样中,用 NJ-160A 净浆搅拌机搅拌,取一部分浆体做流动度测试,再将剩余浆体装入 100 mm×100 mm×100 mm 的立方体模具中,待其凝结后脱模,将试块装入密封袋中置于湿度 95%、温度 20±2℃ 的恒温恒湿养护箱内进行 3, 7, 14, 28 d 养护。与传统水泥固化方案相比,本方案用粉煤灰与 GGBS 代替 80% 的水泥用量,添加稻壳灰进一步提高流态固化土力学性能,降低工程造价,同时具有很高的环境价值。固化土配比设计见表 2。

表 2 固化土设计方案

Table 2 Design scheme of the solidified soil

试验编号	稻壳灰掺量/%	稻壳灰粒径/mm	碱激发剂掺量/%
GFP	0		10
GFPD1-1	5	0.6	10
GFPD1-2	5	0.3	10
GFPD1-3	5	0.15	10
GFPD1-4	5	0.075	10
GFPD2-1	10	0.6	10
GFPD2-2	10	0.3	10
GFPD2-3	10	0.15	10
GFPD2-4	10	0.075	10
GFPD3-1	15	0.6	10
GFPD3-2	15	0.3	10
GFPD3-3	15	0.15	10
GFPD3-4	15	0.075	10

1.3 试验方案

1.3.1 流动度试验

准备好玻璃板和 1 个上口直径 36 mm、下口径 60 mm、高 60 mm 的截头圆锥状模具,试样搅拌完成之后迅速装入模具中,用直尺测量试样的最大、最小直径,当直径差小于 50 mm 时,取二者平均值即为净浆流动度。

1.3.2 凝结时间试验

将搅拌好的试样装入上口直径 65 mm、下口径 75 mm、高 40 mm 的模具中,凝结时间测定从搅拌完成开始计时。固化土在成型后 3 h 开始测定,试针贯入的深度小于 40 mm 时即可视为初凝,初凝后改为直径为 10 mm 的试针,试针无法在试块上留下痕迹则视为终凝。

1.3.3 无侧限抗压强度

采用TAW-2000压力机对于养护龄期3, 7, 14, 28 d的试块进行压力试验, 每组测试3个试块, 去除偏差较大的压力强度数值, 然后取其平均值, 防止偶然性。

2 试验结果与分析

2.1 固化土流动度

不同配比的净浆流动度如图1所示。随着稻壳灰的加入, 浆体流动度与稻壳灰掺量呈负相关关系, 与稻壳灰的粒径呈正相关关系。由图1可知, GFP的流动值为280 mm, GFPD1-1、GFPD2-1、GFPD3-1与GFP相比分别下降了4%、12%、23%, 掺量越多对于浆体流动值的影响越为显著。GFPD3-1的净浆流动值为218 mm, GFPD3-2、GFPD3-3、GFPD3-4与GFPD3-1相比分别提高了4%、7%、10%, 粒径越大流动值越大。

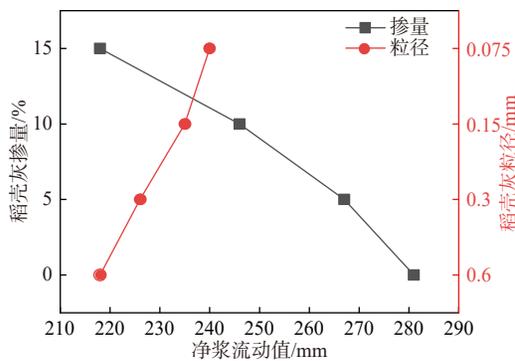


图1 净浆流动度示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the net pulp fluidity

2.2 凝结时间

如图2所示GFP的初凝时间为18 h, 终凝时间为25 h。GFPD1-4、GFPD 2-4、GFPD 3-4与GFP相比初凝时间降低了11%、16%、16%, 其终凝时间降低了8%、20%、24%, 随着稻壳灰掺量的增加, 凝结时间与

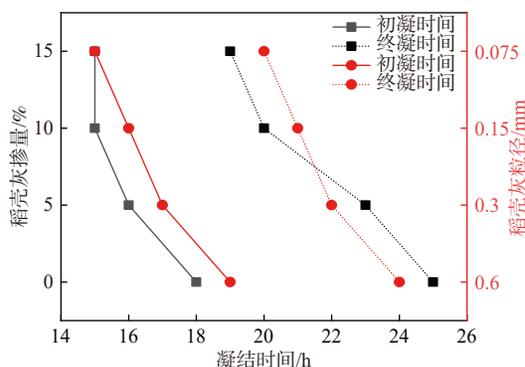


图2 试块凝结时间

Fig. 2 Setting time of the test block

稻壳灰掺量呈负相关关系。GFPD2-4的初凝时间为15 h, 终凝时间为20 h, GFPD2-3、GFPD 2-2、GFPD 2-1与GFPD2-4相比初凝时间分别增加了6%、13%、26%, 终凝时间分别增加了5%、10%、20%。随着稻壳灰粒径的增大, 凝结时间与稻壳灰粒径呈正相关关系。

2.3 无侧限抗压强度

2.3.1 稻壳灰掺量影响

如图3所示, 稻壳灰掺量从0%增加至15%, 固化土无侧限抗压强度随稻壳灰掺量并非单一线性增长, 而是分段区域增长。以养护龄期28 d粒径0.6 mm稻壳灰-地聚物固化土为例, 掺量0%时UCS值为1.45 MPa, 掺量5%时UCS值为2.42 MPa, 掺量10%时UCS值为2.90 MPa, 掺量15%时UCS值为3.01 MPa, 掺量由0%增加至5%时, 强度增长67%; 掺量由5%增加至10%时, 强度增长20%; 掺量由10%增加至15%时, 强度增长4%。稻壳灰掺量从0%增加至10%时, 固化土强度增长迅速, 掺量超过10%后, 强度增长缓慢。

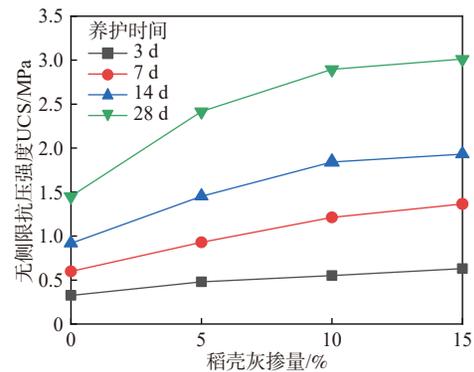


图3 不同稻壳灰掺量的固化土 UCS 值

Fig. 3 UCS values of the solidified soil with different rice husk ash content

2.3.2 稻壳灰粒径影响

如图4所示, 随着稻壳灰粒径的增加, 固化土无侧限抗压强度降低, 粒径的大小与UCS值呈负相关关系。以养护龄期28 d稻壳灰掺量10%的稻壳灰-地聚物固化土为例, 粒径0.075 mm时UCS值为3.94 MPa, 粒径0.15 mm时UCS值为3.46 MPa, 强度降低12%; 粒径0.3 mm时UCS值为3.11 MPa, 强度相比0.075 mm降低21%; 粒径0.6 mm时UCS值为2.89 MPa, 强度相比0.075 mm降低26%。随着稻壳灰的粒径减小, 更易发生地聚反应, 固化土的强度提高。

3 固化土微观结构与固化机理分析

3.1 SEM、XRD、EDS 试验

物相分析采用Bruker D8 Advance 仪器, 扫描范围

为 $10^{\circ} \sim 80^{\circ}$, 扫描速度为 $5^{\circ}/\text{min}$ 。微观形貌观察采用的是 Zeiss Gemini 300 仪器, 对于不同试样的微观形貌进行观察分析。同时用电镜配套的 X 射线能谱分析仪, 对于地聚物内部元素进行分析。

3.2 SEM 结果分析

不同稻壳灰掺量稻壳灰-地聚物固化土在养护龄期 28 d 的微观形貌见图 5。随着稻壳灰掺量的增加, 固化土结构逐渐致密, 可观察到团聚体数量增加, 裂隙数量减少, 胶结物更好地将土颗粒包裹和胶结。当稻壳灰掺量为 0% 时(图 5a), 固化土内部结构松散, 裂隙较多, 可观察到团聚体数量较少, 无法有效填

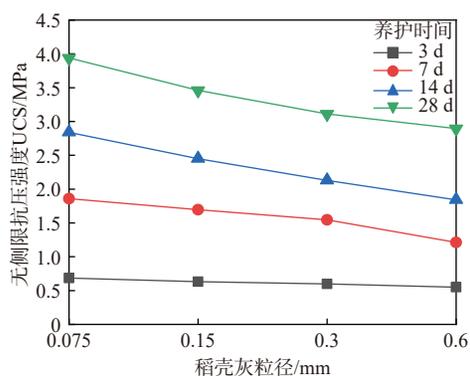


图 4 不同稻壳灰粒径的固化土 UCS 值

Fig. 4 UCS values of the solidified soil with different particle sizes of rice husk ash

补裂隙, 颗粒间胶结差; 当添加稻壳灰掺量为 5% 时(图 5b), 其内部可观察到裂隙数量减少, 团聚体之间的胶结逐渐明显, 团聚体数量增多, 颗粒间胶结加强; 当掺量增至 10% 时(图 5c), 其内部结构变得较为致密, 可观察到的裂隙数量很少, 产生了较大的团聚体, 填补裂隙; 当掺量增至 15% 时(图 5d), 内部结构致密, 裂隙难以观察到, 生成大量的团聚体, 将土颗粒包裹、胶结。随着地聚物凝胶的增加, 孔隙被填补, 土颗粒得到更好的胶结, 其内部结构逐渐致密, 固化土强度逐渐提升。

掺量相同且稻壳灰粒径不同的稻壳灰-地聚物固化土在养护龄期 28 d 的微观形貌见图 6。随着稻壳灰的粒径变小, 稻壳灰更容易参与反应, 反应产物明显增多, 可观察到针棒状、层片状与无定形絮状团聚物。大量的胶结体将孔隙填补, 结构趋近致密平整。

3.3 XRD 结果分析

不同稻壳灰掺量固化土 XRD 图谱如图 7 所示。由图谱可观察到, 在稻壳灰掺量为 0% 时, 有多处钙长石相存在, 当稻壳灰掺量增加后, 钙长石相的衍射峰减少, 只在 $2\theta=23^{\circ}$ 处始终存在。随着稻壳灰的加入, 生成更多的钠长石与莫来石相。

图 7 还显示, 4 种不同配比的固化土图谱基本相近, 均存在大量的石英的特征峰, 最明显的特征峰约

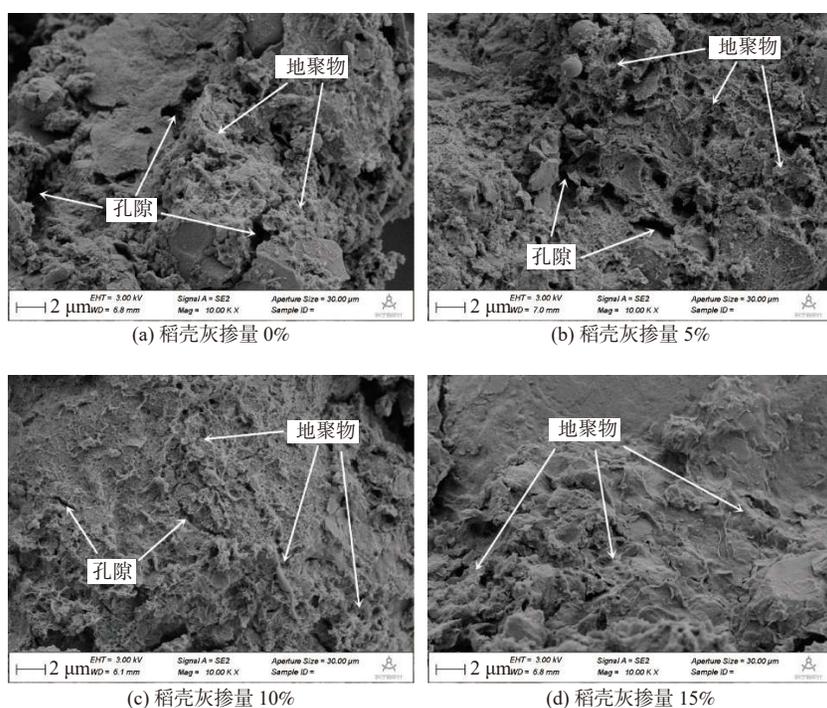


图 5 稻壳灰掺量为 0%、5%、10%、15% 时稻壳灰-地聚物固化土 28 d 的微观形貌

Fig. 5 Micro morphology of the rice husk ash geopolymer solidified soil at 0%, 5%, 10% and 15% rice husk ash content for 28 days

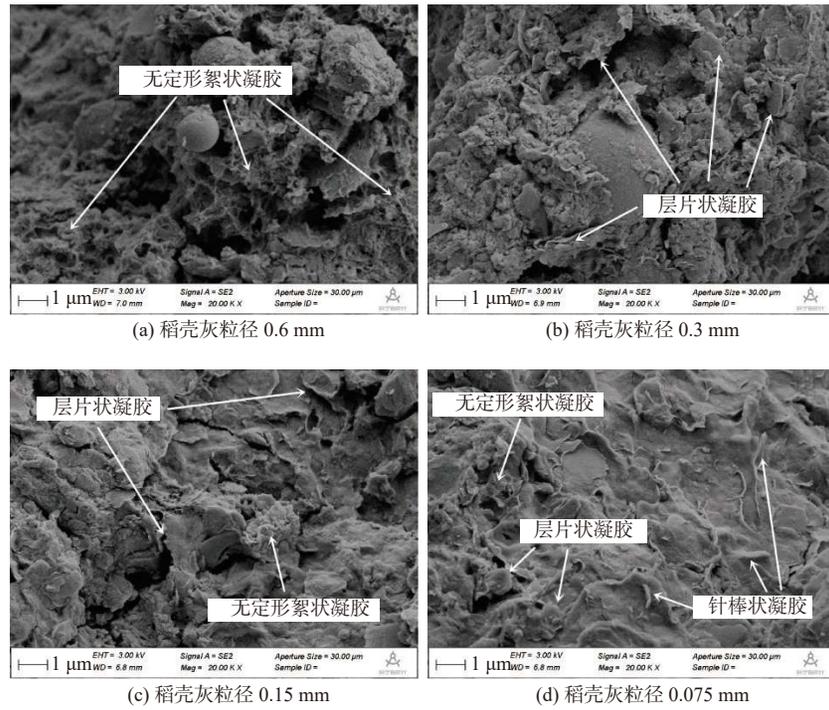


图 6 稻壳灰粒径 0.6, 0.3, 0.15, 0.075 mm 时稻壳灰-地聚物固化土微观形貌

Fig. 6 Micro morphology of the rice husk ash geopolymer solidified soil with particle sizes of 0.6, 0.3, 0.15 and 0.075 mm

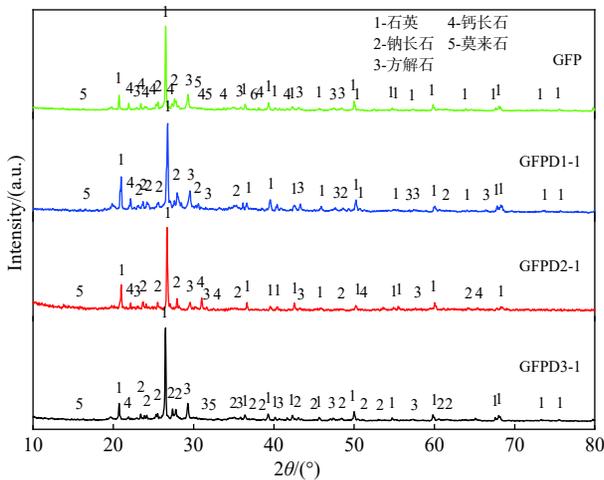


图 7 养护龄期 28 d 不同稻壳灰掺量稻壳灰-地聚物固化土的 XRD 图谱

Fig. 7 XRD patterns of the rice husk ash geopolymer solidified soil with different amount of rice husk ash during the curing period of 28 days

在 26° 处。不同之处在于, 随着稻壳灰掺量的增加, 石英衍射峰的峰值产生变化。GFP 的特征峰值为 233 a.u., GFPD1-1、GFPD2-1、GFPD3-1 的特征峰值分别比 GFP 提高了 391, 1 106, 1 110 a.u.。稻壳灰掺量的变化形成了不同的峰值, 没有添加稻壳灰时, 粉煤灰提供了地聚反应所需的 SiO₂, 导致图谱中石英相特征峰值较低。随着稻壳灰的加入, 提供了大量无定相 SiO₂, 代

替粉煤灰中部分 SiO₂ 参与反应, 留存较多石英相于粉煤灰中。随着稻壳灰掺量提高, XRD 图谱中石英相特征峰值随之变大。当掺量为 5% 时, 此时参与反应的为稻壳灰中的 SiO₂, 由于掺量较少无法满足反应所需, 粉煤灰提供一部分 SiO₂ 参与反应, 导致特征峰值高于 GFP。当掺量增至 10% 和 15% 时, 稻壳灰提供更多 SiO₂ 参与地聚反应, 使粉煤灰中参与反应的 SiO₂ 减少, 留存大量的石英相, 使得 GFPD2-1 与 GFPD3-1 特征峰值相差不大。

3.4 EDS 结果分析

将养护龄期 28 d 的稻壳灰-地聚物固化土 SEM 图放大 15 000 倍, 选取不同的 2 点进行能谱分析, 结果见图 8 和表 3, 图 8 中地聚物凝胶点 1 为无定形的絮状大团聚凝胶, 由表 3 可知, 地聚物凝胶点 1 的元素比例为 $m(\text{Na}) : m(\text{Ca}) : m(\text{Al}) : m(\text{Si}) = 4.78 : 4.98 : 20.75 : 42.48$, Na、Al、Si 元素含量较高, Ca 元素含量较少, Ca 元素含量几乎可以忽略。根据微观形貌与元素含量分析, 地聚物凝胶点 1 主要为 N-A-S-H 凝胶。N-A-S-H 是胶凝材料中粉煤灰与 GGBS 在碱激发剂催化作用下的主要反应产物, 其对于孔隙的填充与土颗粒之间的胶结作用是固化土抗压强度增加的重要影响因素。

地聚物凝胶点 2 为针棒状凝胶, 元素比例为 $m(\text{Na}) : m(\text{Ca}) : m(\text{Al}) : m(\text{Si}) = 2.19 : 24.55 : 4.27 :$

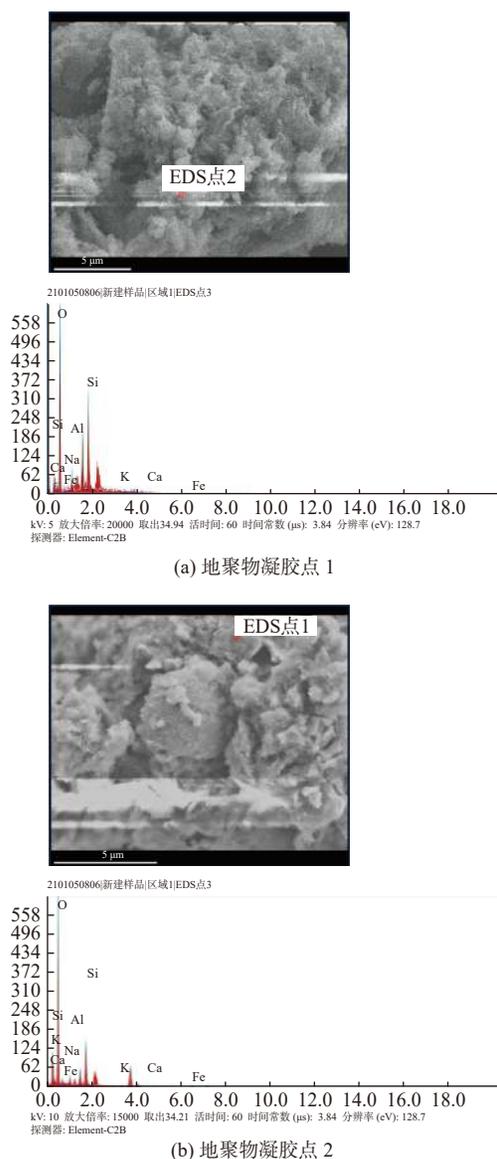


图 8 养护龄期 28d 稻壳灰-地聚物固化土的 SEM 照片与 EDS 图谱

Fig. 8 SEM photos and EDS spectra of 28 d Rice Husk Ash Geopolymer solidified soil

表 3 SEM 图点 1 与点 2 的元素占比

Table 3 Element proportion of point 1 and point 2 in SEM

点号		O	Si	Ca	Al	Na
1	重量百分比	25.63	42.48	4.98	20.75	4.78
	原子百分比	37.38	35.67	2.93	18.14	4.91
2	重量百分比	53.60	11.84	24.55	4.27	2.19
	原子百分比	71.20	8.96	13.02	3.37	2.03

11.84, 其中 Ca 与 Si 元素含量较高。根据水泥与混凝土的水化反应原理, C-S-H 凝胶的 $n(\text{Ca})/n(\text{Si})$ 大多在 0.8 ~ 1.3 之间, 由该点的元素比例分析可知地聚物凝胶点 2 主要为 C-S-H 凝胶。C-S-H 是水泥基胶凝材料的水化反应产物, 由于水泥基胶凝材料水化反应较为

迅速, 初期有更多的 C-S-H 凝胶形成, 使流态固化土凝结时间提升显著, 同时提高固化土初期抗压强度。

4 结论

(1) 稻壳灰-地聚物固化土的净浆流动值与稻壳灰掺量和粒径呈负相关关系, 掺量增加、粒径增大流动值均降低。固化土的凝结时间与稻壳灰掺量呈负相关关系, 掺量增加凝结时间降低, 凝结时间与粒径呈正相关关系, 粒径增大凝结时间增加。

(2) 当其他胶凝材料掺量一定时, 稻壳灰掺量增大, 稻壳灰-地聚物固化土的 UCS 值增大, 掺量从 0% 增加至 10% 时, UCS 值增长较快, 从 10% 增加至 15% 时, UCS 值增长缓慢, 初步判定稻壳灰-地聚物固化土的最优掺量为 10%。UCS 值与稻壳灰粒径呈负相关关系, 粒径增大 UCS 值降低。

(3) 微观试验结果表明, 稻壳灰-地聚物固化土的强度提升受到填充效应与增加胶结强度两方面因素影响。固化土内部主要产生 N-A-S-H 与 C-S-H 凝胶, 凝胶的胶结作用使内部结构整体性提高, 同时内部孔隙得到了填充, 结构完整致密。

参考文献 (References) :

[1] DU Y J, YU B W, LIU K, et al. Physical, hydraulic, and mechanical properties of clayey soil stabilized by lightweight alkali-activated slag geopolymer[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2017, 29(2): 04016217.

[2] PHUMMIPHAN I, HORPIBULSUK S, RACHAN R, et al. High calcium fly ash geopolymer stabilized lateritic soil and granulated blast furnace slag blends as a pavement base material[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, 341: 257 - 267.

[3] 俞家人, 陈永辉, 陈庚, 等. 地聚物固化软黏土的力学特征及机理分析[J]. *建筑材料学报*, 2020, 23(2): 364 - 371. [YU Jiaren, CHEN Yonghui, CHEN Geng, et al. Mechanical behaviour of geopolymer stabilized clay and its mechanism[J]. *Journal of Building Materials*, 2020, 23(2): 364 - 371. (in Chinese with English abstract)]

[4] 杨世玉, 赵人达, 靳贺松, 等. 粉煤灰地聚物砂浆早期强度的影响参数研究[J]. *工程科学与技术*, 2020, 52(6): 162 - 169. [YANG Shiyu, ZHAO Renda, JIN Hesong, et al. Research on influence parameters of early strength of fly ash-based geopolymer mortar[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2020, 52(6): 162 - 169. (in

- Chinese with English abstract]
- [5] 贾栋钦,裴向军,张晓超,等.改性糯米灰浆固化黄土的微观机理试验研究[J].水文地质工程地质,2019,46(6):90-96. [JIA Dongqin, PEI Xiangjun, ZHANG Xiaochao, et al. A test study of the microscopic mechanism of modified glutinous rice mortar solidified loess[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(6): 90-96. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 周恒宇,王修山,胡星星,等.地聚合物固化淤泥强度增长影响因素及机制分析[J].岩土力学,2021,42(8):2089-2098. [ZHOU Hengyu, WANG Xiushan, HU Xingxing, et al. Influencing factors and mechanism analysis of strength development of geopolymer stabilized sludge[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(8): 2089-2098. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 何俊,栗志翔,石小康,等.侵蚀环境中碱渣-矿渣固化淤泥的力学性质[J].水文地质工程地质,2019,46(6):83-89. [HE Jun, LI Zhixiang, SHI Xiaokang, et al. Mechanical properties of the soft soil stabilized with soda residue and ground granulated blast furnace slag under the erosion environment[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(6): 83-89. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 邓永锋,吴子龙,刘松玉,等.地聚合物对水泥固化土强度的影响及其机理分析[J].岩土工程学报,2016,38(3):446-453. [DENG Yongfeng, WU Zilong, LIU Songyu, et al. Influence of geopolymer on strength of cement-stabilized soils and its mechanism[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(3): 446-453. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 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. [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. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 汪知文,李碧雄.稻壳灰应用于水泥混凝土的研究进展[J].材料导报,2020,34(9):9003-9011. [WANG Zhiwen, LI Bixiong. Research progress on application of rice husk ash in cement and concrete[J]. Materials Reports, 2020, 34(9): 9003-9011. (in Chinese with English abstract)]
- [11] MUNTOHAR A S, WIDIANTI A, HARTONO E, et al. Engineering properties of silty soil stabilized with lime and rice husk ash and reinforced with waste plastic fiber[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2013, 25(9): 1260-1270.
- [12] GHORBANI A, SALIMZADEHSHOOIILI M. Dynamic characterization of sand stabilized with cement and RHA and reinforced with polypropylene fiber[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2019, 31(7): 04019095.
- [13] 厚荣斌.钢渣、稻壳灰和生石灰改良膨胀土的性能研究[J].公路交通科技(应用技术版),2017,13(7):208-210. [HOU Rongbin. Study on properties of expansive soil improved by steel slag, rice husk ash and quicklime[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development(Application Technology Edition), 2017, 13(7): 208-210. (in Chinese)]
- [14] NASIRI M, LOTFALIAN M, MODARRES A, et al. Optimum utilization of rice husk ash for stabilization of sub-base materials in construction and repair project of forest roads[J]. Croatian Journal of Forest Engineering, 2016, 37(2): 333-343.
- [15] GHADIR P, RANJBAR N. Clayey soil stabilization using geopolymer and Portland cement[J]. Construction and Building Materials, 2018, 188: 361-371.

编辑:张明霞