

MSWIBA 改良海相淤泥质工程渣土 性能与机理研究

刘世宇^{1,2}, 雷学文¹, 李江山², 刘夏临³, 张先伟^{1,2}, 李雪和^{1,2}, 王平²

(1. 武汉科技大学 城市建设学院, 湖北 武汉 430065;

2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071;

3. 中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 湖北 武汉 430056)

摘要: 利用 MSWIBA 与氢氧化钙-矿粉 (GGBS) 协同固化改良渣土, 通过强度及浸出试验探究 MSWIBA 改良渣土的性能, 采用 XRD 以及 SEM-EDS 对改良土进行微观表征。结果表明: 掺入 5%~10% 的 MSWIBA 能改良渣土水稳性, 有效降低渣土的液限; 5% MSWIBA 掺量的改良土具有较佳的应用效益, 其水稳系数提高了 16%、液限降低了 5%, 7 d 无侧限抗压强度为 1.95 MPa, 符合路基填筑强度要求; 改良土重金属浸出浓度均低于 0.05 mg/L, 符合Ⅲ类地下水以及Ⅱ类地表水的要求; MSWIBA 改良土的主要水化产物为 (N,C)-A-S-H 以及钙矾石, 强度和污染组分的稳定性均有提升, 材料低碳经济, 具有良好应用前景。

关键词: 海相淤泥质工程渣土; MSWIBA; 改良; 工程特性; 微观机理

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2023)02-0121-07

Performance and Mechanism of MSWIBA Improved Marine Silty Engineering Residue

LIU Shiyu^{1,2}, LEI Xuewen¹, LI Jiangshan², LIU Xialin³, ZHANG Xianwei^{1,2}, LI Xuehe^{1,2}, WANG Ping²

(1. School of Urban Construction, Wuhan University of Science and Technology University, Wuhan, Hubei 430065, China;

2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and

Soil Mechanics Chinese, Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China;

3. CCCC Second Highway Survey and Design Research Institute Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430056, China)

Abstract: MSWIBA was used to improve the spoil by synergistic curing with calcium hydroxide-granulated blast furnace slag powder (GGBS), and the performance of MSWIBA improved spoil was investigated by strength and leaching tests, and the improved soil was microscopically characterized by XRD and SEM-EDS. The results show that adding 5%~10% MSWIBA can improve the water stability of the spoil and reduce the liquid limit of the spoil effectively. The improved soil with 5% MSWIBA content has better application benefits, its water stability coefficient was increased by 16%, the liquid limit was reduced by 5%, the 7 d unconfined compressive strength was 1.95 MPa, which meets the requirements of subgrade filling strength. The leaching concentrations of heavy metals in the improved soil were all lower than 0.05 mg/L, which could meet the requirements of Class III groundwater and Class II surface water. The main hydration products of MSWIBA improved soil are (N,C)-A-S-H and ettringite. The stability of strength and pollution components have been improved. The material is low carbon economy and has good application prospects.

Keywords: marine silty engineering residue; municipal solid waste incineration bottom ash; improvement; engineering properties; micromechanics

海相淤泥质工程渣土(下简称“渣土”)产量大、综合利用率低^[1],存在含水率高、水稳性差、承载力弱等问题^[2],在路基填筑中难以压实,且成型后病害多,处理不当会造成翻浆、路面开裂、滑坡失稳、不均匀沉降和坍塌等工程问题^[3]。实际工程中对于渣土的处理,一般选用化学固化方式作为地基、路基等回填材料资源化就地利用^[4]。莫秋旭等^[5]针对液限 47.2%、塑限 20.6% 的红色高液限土采用水泥改良,掺入水泥比例为 7% 时,强度大幅提高。碱激发矿粉(GGBS)可以显著提高固化剂活性,董博闻等^[6]利用纳米 SiO₂、矿渣、生石灰对滨海地区淤泥质黏土进行加固改良,28 d 强度能达到 5.59 MPa。尽管传统固化剂的掺入可大幅提高渣土的力学性能,但对降低细粒含量多、级配不良的渣土液限和塑性指数作用有限,从而使得改良土难以压实,而且传统固化剂在固化渣土过程中还存在水稳性差的缺陷依然存在^[7]。程涛等^[8]采用水泥作为固化材料处置淤泥质土,并进一步掺砂调整颗粒级配和提供骨架作用,使改良土液限降幅可达 14%,从而降低施工难度。张桂荣等^[9]通过调整改良土的级配,弥补了改良土不同粒径的颗粒含量,有效提高了改良砂土的压实度。欧孝夺等^[10]通过掺入不同粒径及比例的砂来改良铝土尾矿泥浆高含水量、低渗透性、高压缩性、高液限等不良性质。掺入干砂等惰性材料可改善渣土压实性能并提供骨架作用,但随着国家对天然河砂的限制开采,此类改良材料变得不可行。亟需寻找一类固体废弃物替代天然砂应用于渣土的施工特性改良,有效解决其压实难、水稳性差、承载力弱等不利工程问题。

近年来,垃圾焚烧已经成为我国生活垃圾处置的主流方式,据统计在 2020 年全国城市生活垃圾无害化处理量中焚烧占比已高达 62.28%。但是每焚烧 1 t 生活垃圾却会产生约 200 kg~250 kg 的城市生活垃圾焚烧底渣(MSWIBA),其中含有重金属等污染物^[11],随意丢弃或堆存会引发较严重的环境问题。研究者针对 MSWIBA 提出了一系列资源化利用方案^[12],现有研究表明,MSWIBA 具有优良的集料特性^[13],若污染物能得到有效控制,其在建筑工程领域具有极大的应用潜力。目前在 MSWIBA 作为类砂材料改良海相淤泥质工程渣土这方面的研究较少,本文将通过试验研究进行初步探索。

本文协同利用 MSWIBA 改善碱激发 GGBS 固化处置海相淤泥质工程渣土的物理力学性质,通过调整渣土的粒径分布和矿物组分,探究 MSWIBA 掺

量对改良土的物理状态、强度特征和水稳性的影响规律,采用 XRD 以及 SEM-EDS 对固化效果进行微观表征,结合毒性浸出试验(SPLP)开展固化渣土的环境影响评价,同时评价其碳排放量及经济成本,以期对渣土的安全消纳,提高城市固废资源化协同利用水平提供支撑。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

试验用土取自温州高速公路基础开挖工程渣土,依据《公路土工试验规程》^[14](JTG 3430—2020)测定渣土物理性质指标,如表 1 所示。该渣土呈黑褐色,黏粒含量多,液限高,塑性指数大,水敏性强,根据《水电水利工程土工试验规程》^[15](DL/T 5355—2006)土的分类法,该渣土定名为低液限黏土。MSWIBA 取自武汉市生活垃圾焚烧厂,试验所用固化剂为武汉钢铁厂 S95 级商用 GGBS,碱激发剂为国药分析纯氢氧化钙(Ca(OH)₂≥AR95%)。

表 1 渣土的基本物理性质

含水率 /%	液限 /%	塑限 /%	塑性 指数	相对 密度	黏粒含 量/%	有机质 含量/%
29.40	41.54	21.01	20.53	2.71	91.10	3.71

取回的渣土经风干,碾碎,除杂,过 2 mm 筛,筛下物备用,粒径分布如图 1 所示。其中,不均系数 C_u 为 3.55,曲率系数 C_c 为 0.92,粒径分布窄,颗粒细,为级配不良土。MSWIBA 经 105℃ 烘干后,经前期预试验,颚式破碎后球磨 15 min,过 2 mm 筛预处理混入后可调整复合渣土粒径的均匀性和级配的连续性。如图 1 所示,经预处理的 MSWIBA,不均系数 C_u 为 5.66,曲率系数 C_c 为 1.32,级配良好,补充了渣土中缺失的大颗粒粒径分布范围(100 μm~2 000 μm)。

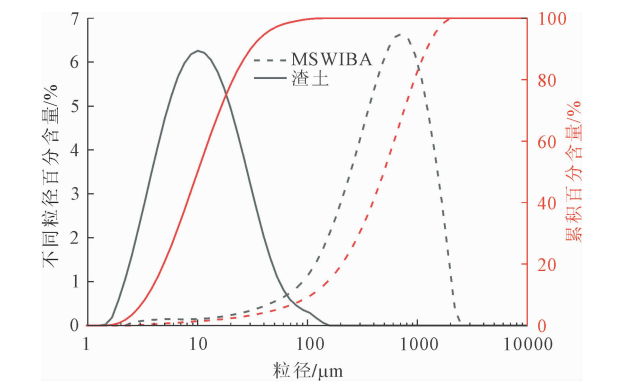


图 1 渣土和 MSWIBA 粒径分布曲线

渣土和 MSWIBA 的主要化学成分见表 2。组成渣土的主要元素是 Si、Al;MSWIBA 的主要元素组成是 Si、Ca,相对密度 2.41,含有部分易溶钠盐。矿物

相分析表明,二者主要矿物相均为石英,渣土中含有片状结构的次要矿物相白云母。

表 2 渣土和 MSWIBA 的化学成分 单位:%

名称	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	CaO	TiO ₂	SO ₃	Cl
渣土	65.35	15.50	7.13	4.07	2.34	1.61	1.61	0.96	0.48	0.45
MSWIBA	63.16	6.84	1.32	1.71	1.57	8.78	12.47	0.40	1.13	0.38

1.2 试验方案及基本指标

本文主要探讨 MSWIBA 掺量对碱激发固化渣土物理力学性质的影响规律。依据前期预试验结果,当 Ca(OH)₂ 和 GGBS 外掺量分别占干土 4% 时,具有较好的力学性能和经济效益。因此,基于此掺量,探究不同 MSWIBA 掺量对于改良土性能的影响规律,试验方案及基本指标如表 3 所示。

表 3 试验方案及基本指标

渣土 /%	MSWIBA /%	Ca(OH) ₂ /%	GGBS /%	编号	最优含 水率/%	最大干密度 /(g·cm ⁻³)
100	0	0	0	B0C0G0	18.7	1.73
100	0	4	4	B0C4G4	21.6	1.63
95	5	4	4	B5C4G4	21.4	1.64
90	10	4	4	B10C4G4	21.3	1.67
80	20	4	4	B20C4G4	20.1	1.68
60	40	4	4	B40C4G4	18.8	1.74

注:编号中 B 为 MSWIBA,C 为 Ca(OH)₂,G 为 GGBS,数字代表掺量。

1.3 试验步骤

按照试验方案称取所需质量的干渣土和 MSWIBA,均混后备用。称取所需质量的水均匀喷洒至渣土或渣土混合物中,焖料 24 h,直至水膜迁移均匀。固化剂为后掺,并保证土样与固化剂均混后 1 h 内完成试验。获取最优含水率和最大干密度后,通过静压一次成型,制备 Φ50 mm×50 mm 圆柱体试样,每个龄期样品脱模后在标准养护(温度 20℃,湿度 95%)条件下,分别养护 7 d、14 d、28 d、60 d、90 d,样品养护至测试龄期后开展无侧限抗压强度试验。强度试验结束后,收取破坏试样残渣,使用无水乙醇浸泡中止水化反应并真空干燥,保存代表性样品的干燥残渣以备后续微观试验。

1.4 试验方法

采用激光粒度分析仪干法分散颗粒测定渣土混合物粒径分布,采用液塑限联合测定仪开展液塑限试验^[14],通过应变控制加载速率(1.00 mm/min)开展无侧限抗压强度试验^[16],依据《土壤固化外加

剂》^[17](CJT 486—2015)开展水稳性试验。代表性样品干燥后研磨开展矿物成分分析,XRD 选择 Cu 靶,波长 0.154 060 nm,扫描速率为 2°/min(2θ),扫描范围 10°~80°(2θ)。真空干燥的代表性样品,喷金后,开展 SEM-EDS 试验分析其微观形貌。其中,XRD 与 SEM-EDS 试验均使用 28 d 龄期下代表性样品。

2 试验结果与分析

2.1 液塑限

土的液塑限反映了土体状态发生改变时,土颗粒吸附水的能力,加入固化剂后不同 MSWIBA 掺量的改良土的液塑限指标如图 2 所示。结果表明,单独掺入固化剂会增加土的液限、塑限和塑性指数,未掺入 MSWIBA 的复合固化渣土液限为 50.3%,塑限为 26.7%,存在液限偏高的潜在工程问题(图 2 中虚线为液限界限值 50%)。MSWIBA 的掺入可降低液塑限,B5C4G4、B10C4G4、B20C4G4、B40C4G4 的液限较 B0C4G4 分别下降约 5%、16%、20%、27%。液限降低幅度大,塑限降低较小,从而导致塑性指数下降较大。当 MSWIBA 掺量超过 20% 时,分散性的 MSWIBA 使得塑性指数低于 17(图 2 中点划线为塑性指数界限值 17),变为粉质黏土(17>I_p>10),土处在可塑状态的含水量变化范围小,不利于现场施工,故 MSWIBA 掺量范围在 5%~10% 之间具有较好的液塑限改良效果。

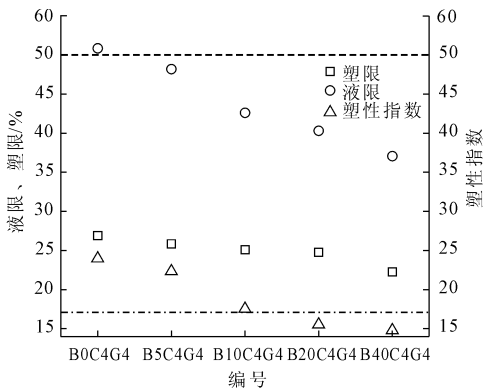


图 2 液塑限指标

产生液塑限变化的原因分析:仅为渣土时,颗粒细,粒径分布范围窄,比表面积大,因而吸附的结合水较多。外掺固化剂时,相对于土颗粒而言,其吸水性更强,干燥的固化剂颗粒被土体中的水分浸润,因此土体状态改变时需要更多水分;另外一旦固化剂与水接触,开始发生水化反应,消耗了一部分水,生成的水化产物起到胶凝团聚作用,从而需要更多水分来改变土体状态,进而导致了复合固化渣土的液塑限增加。掺入 MSWIBA 时,由于 MSWIBA 粒径较大且亲水性矿物较少,对应的吸附结合水的能力也较弱,生成的水化产物不易与固化对象胶结团聚,随着 MSWIBA 掺量增多,改良土中粗粒占比增加,粗颗粒填充土壤骨架降低了颗粒间的粘结力,表现为改良土的塑性指数下降明显。

2.2 无侧限抗压强度

不同龄期下改良土的无侧限抗压强度试验结果如图 3 所示,结果表明,碱激发 GGBS 固化剂有效提高了渣土的强度,B0C4G4 的抗压强度值从养护 7 d 的 2.10 MPa 增加至养护 90 d 的 5.72 MPa。同时,MSWIBA 的掺入在任何龄期下对复合固化渣土强度均产生不同程度的劣化作用,40% MSWIBA 掺量样品的抗压强度值 7 d 为 1.75 MPa、90 d 为 4.54 MPa,尽管 MSWIBA 的掺量越大,改良土的劣化作用越明显,但仍满足高速公路和一级公路底基层中规定的 7 d 无侧限抗压强度 0.8 MPa 的强度要求^[18]。

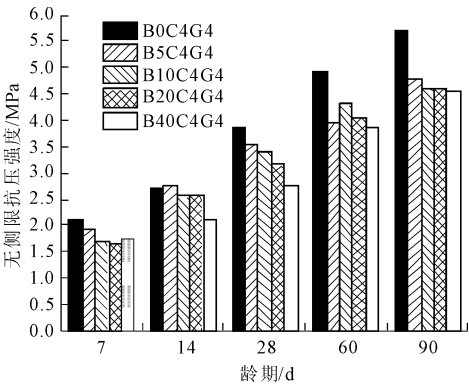


图 3 不同龄期下改良土的无侧限抗压强度试验结果

2.3 水稳特性

水稳性用于评价高液限土改良效果,可以通过水稳系数进行表征,该系数越大,则水稳性越好,其计算见公式(1)^[17]:

$$\gamma_w = \frac{R_w}{R_0} \quad (1)$$

式中: γ_w 为水稳系数,%; R_w 为标准养护 6 d 浸水 1 d

试样的无侧限抗压强度,MPa; R_0 为标准养护 7 d 试样的无侧限抗压强度,MPa。

水稳性试验结果如图 4 所示,图 4 中圆圈为水稳系数值,虚线为水稳系数界限值 80%。1 d 的浸水养护对强度均有一定程度的折减,尽管未掺 MSWIBA 样品 B0C4G4 强度最高,但受水力侵蚀的影响也越明显,由浸水前 2.10 MPa 下降至浸水后的 1.48 MPa,水稳系数仅 70%,已无法满足 7 d 水稳系数 $\gamma_w \geq 80\%$ 的要求^[17]。随着 MSWIBA 的掺入,大幅提升了复合固化渣土的水稳系数,B5C4G4、B10C4G4、B20C4G4 的水稳系数分别为 86.62%、85.92%、85.21%,但 40% MSWIBA 掺量的改良土水稳系数已降低至 80% 以下。因此,一定量的 MSWIBA 加入能够提高改良土的水稳性,但存在合适的添加范围,MSWIBA 适宜的掺量范围为 5%~20%。

未掺入 MSWIBA 改良土水稳系数低的原因在于较低的固化剂掺量形成的水化产物不能完整包裹渣土颗粒,并且均匀性土的孔隙结构更为发育,内部的土颗粒随着水的浸入产生破坏,因此被水力侵蚀时产生剥离。而随着 MSWIBA 的掺入,级配趋于良好,孔隙被填充,水力难以剥蚀小颗粒,进而水稳系数提高。这种改善高液限黏土的颗粒级配来增大颗粒间的摩擦力,从而改善水稳性的方法已有研究人员证明^[19]。

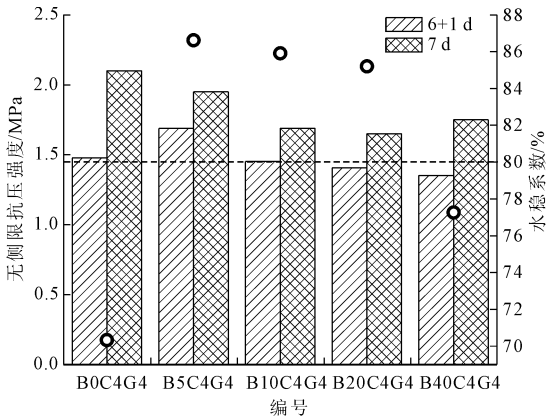


图 4 水稳性试验结果

2.4 浸出特性

MSWIBA 中含有锌、铅等重金属,具有浸出风险^[20]。对 MSWIBA 做模拟地表水和酸雨浸出试验,浸出液中重金属浓度如表 4 所示,对比《地下水质量标准》^[21] (GB/T 14848—2017) 和《地表水环境质量标准》^[22] (GB 3838—2002),模拟地表水浸出条件下,MSWIBA 中重金属浓度满足Ⅲ类地表水和Ⅴ

类地下水;模拟酸浸出条件下,MSWIBA 中重金属浓度满足Ⅴ类地下水,但铬离子浓度超过Ⅲ类地表水的要求(5.00×10^{-2} mg/L),有潜在的环境浸出风险。

表 4 MSWIBA 浸出结果

重金属种类	浸出浓度/(mg·L ⁻¹)	
	水	酸雨
Cr	2.59×10^{-2}	8.19×10^{-2}
Cu	3.20×10^{-3}	6.00×10^{-3}
Pb	3.35×10^{-2}	1.97×10^{-2}
Zn	2.02×10^{-2}	2.50×10^{-3}

对 28 d 养护龄期的改良土开展毒性浸出试验 (SPLP),模拟改良土暴露在酸雨条件下的浸出行为,浸出结果如表 5 所示,改良土模拟酸雨浸出结果均满足Ⅲ类地表水和Ⅴ类地下水的环境标准要求。Zhang Wanlu 等^[23]用 GGBS 处理沉积物,表明了 GGBS 具有一定的重金属的固定能力。短期浸出试验暂未考虑到时间效应,基于长久的环境安全考量,推荐改良土中合适的 MSWIBA 掺量为 5%。

表 5 改良土浸出结果

重金属种类	浸出浓度/(mg·L ⁻¹)		
	B0C4G4	B5C4G4	B40C4G4
Cr	3.17×10^{-3}	2.74×10^{-3}	4.49×10^{-3}
Cu	2.03×10^{-2}	2.44×10^{-2}	3.01×10^{-2}
Pb	3.30×10^{-4}	4.00×10^{-4}	2.40×10^{-4}
Zn	2.69×10^{-2}	1.55×10^{-2}	4.96×10^{-2}

2.5 微观表征

2.5.1 粒径矿物成分

渣土、MSWIBA 及不同 MSWIBA 掺量渣土的粒径参数如表 6 所示。

表 6 粒径参数

编号	$d_{10}/\mu\text{m}$	$d_{30}/\mu\text{m}$	$d_{60}/\mu\text{m}$	C_u	C_c
M100	3.51	6.33	12.47	3.55	0.91
B100	88.11	345.19	791.46	8.98	1.71
M95B5	3.60	6.97	14.65	4.07	0.92
M90B10	3.65	8.29	18.32	5.02	1.02
M80B20	3.75	10.17	24.56	6.55	1.12
M60B40	3.91	13.24	31.87	8.15	1.41

注:编号中 M 为渣土,B 为 MSWIBA,数字代表掺量。

结果表明,不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c 均随 MSWIBA 掺量的增加而增大,并当 MSWIBA 掺量超过 10% 时,满足 $C_u > 5, 1 < C_c < 3$ 要求,改良土由级

配不良土转变为级配良好土。这说明 MSWIBA 的这一连续性级配的散体材料加入时,逐步弥补了渣土缺失中间粒径不足的缺陷,细颗粒充填于粗颗粒所形成的孔隙中,易于压实,改良土粒径在 2 mm 范围内趋于连续,在相同的压密条件下,具有较好的工程性质。已有研究人员通过掺砂改良高液限土,证明了掺砂改良土的颗粒分布随着掺砂率增大,其混合料粒径级配趋好^[24]。

改良土 XRD 图谱如图 5 所示,主要的水化产物为磷酸铝(AlPO₄)、钠长石、钙长石、正长石以及钙矾石。Ca(OH)₂ 碱激发 GGBS 发生水化反应固化渣土的机理可以解释为:GGBS 中的氧化硅、氧化钙、氧化铝等组成的玻璃体结构,在 Ca(OH)₂ 的碱性环境下活性被激发,其中的-Si-O-Si-溶解,生成硅酸和-Si-O-,之后-Si-O-会再次聚合形成水化硅酸物,再次聚合形成最终水化产物。水化产物与土颗粒之间能够相互胶结,从而为渣土提供骨架,提高强度。

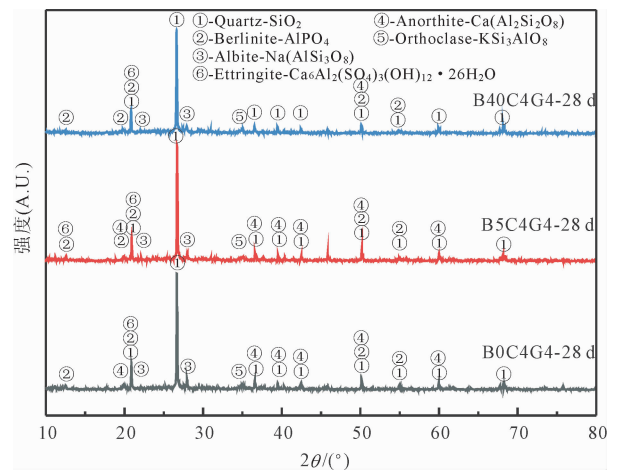


图 5 改良土 XRD 图谱

2.5.2 扫描电镜

基于 MSWIBA 调配渣土的级配与液限参数,并结合 Ca(OH)₂ 碱激发 GGBS 固化渣土的矿物组成与微观形貌,构建改良土概化模型。SEM-EDS 图谱及概化模型如图 6 所示,左侧为配料示意图,中间(a)(b)(c)为电镜图和 EDS 图,右侧为概化模型图。

图 6(1)中(a)为 B0C4G4 的 SEM-EDS 结果,其中(N,C)-A-S-H 胶凝体系附着在黏土矿物表面且明显可见,有较多相互链接的网络骨架,但未形成完整网络,同时具有较多明显孔洞。MSWIBA 的掺入使得水化产物的胶结模式发生差异,如图 6(2)中

(b) 为 B5C4G4 的 SEM-EDS 结果,粗颗粒加入后水化产物难以包裹 MSWIBA 大颗粒形成网络骨架,以致大颗粒接触面附近易产生薄弱面,MSWIBA 之间的水化产物仅存在弱胶结,但小颗粒填充在大颗粒的孔隙中,改良土更为密实。而随着 MSWIBA 掺量的加大,如图 6(3) 中 (c) 为 B40C4G4 的 SEM-EDS 结果,未能胶结的 MSWIBA 占比增大,分散性增强,端面更为平滑,水化产物弱胶结能力减弱,孔洞趋于贯通形成细小裂隙。

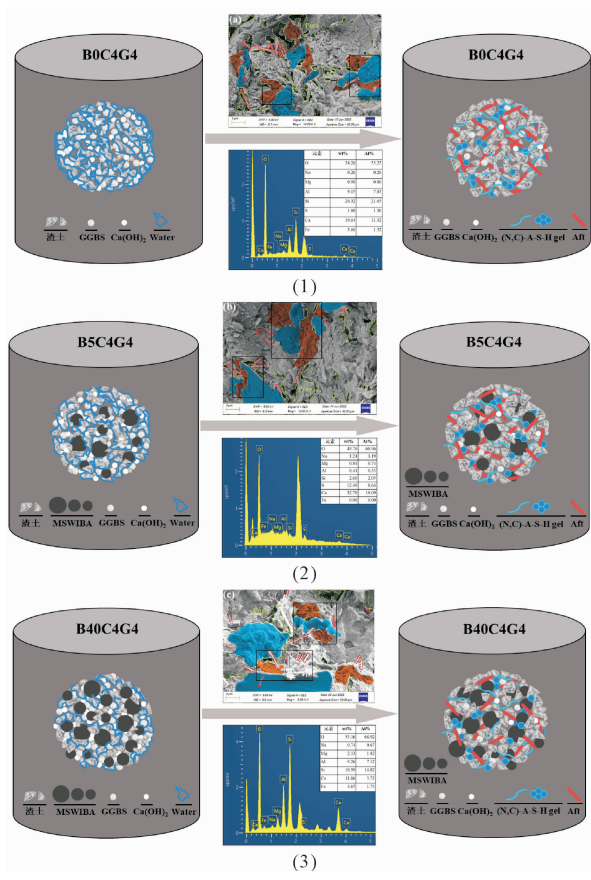


图 6 改良土 SEM-EDS 图谱及概化模型

对比图 6(1) — 图 6(3) 不同 MSWIBA 掺量的改良土概化模型,从中分析改良前后的微观机制:如图 6(1) 所示,当颗粒较细时,配料趋于团粒,存在较多孔隙,且吸附水较多较难压密;固化后水化产物包裹了较多的颗粒,形成了较多相互链接的网络骨架,因此,可提供较高的强度,但其中水化产物仅包裹在均匀性细粒土表面,孔洞结构明显未能形成完整的网络,易浸水侵蚀产生剥离,内部的土颗粒随着水的浸入,少量黏土矿物遇水膨胀,产生破坏。MSWIBA 掺入后,如图 6(2) 所示,当颗粒变粗时,配料较为分散,小颗粒填充在大颗粒的孔隙中,孔洞减少,吸附水减少易于压密;固化后在大颗粒点点接触和点面

接触处,水化产物较少,难以完全包裹 MSWIBA 大颗粒形成网络骨架,进而在大颗粒之间仅依靠弱胶结抵抗外力,因此,在受外力作用的传力过程中,固化体容易沿着大颗粒接触链上形成的薄弱面产生破坏,从而降低了强度。但是改良土级配趋于良好、整体结构更为密实,水力难以剥蚀小颗粒,进而水稳系数得到提高,并且 MSWIBA 之间的水化产物的弱胶结,可进一步克服水力破坏。当 MSWIBA 掺量过大,如图 6(3) 所示,配料过于分散,大小颗粒间孔隙的黏土颗粒减少,MSWIBA 吸水性弱于黏土颗粒,吸附水更加减少;固化后部分 MSWIBA 未能被胶结,弱胶结的水化产物使得颗粒端面平滑,孔洞贯通为细小裂隙,因此,抵抗水力破坏的能力变弱,保证了一定的力学强度。

3 环保及经济效益评价

根据《建筑碳排放计算标准》^[25] (GB/T 51366—2019) 及相关研究,不同材料的建筑材料碳排放因子指标见表 7,与普通硅酸盐水泥(市场平均,735 kg CO₂ e/t)相比,GGBS 耗能低、排放低。按表 3 中数据计算各组处理后得到 1 t 土的材料碳排放量,结果见表 8。随着 MSWIBA 掺量的增加,各组处理后得到 1 t 土的材料碳排放量逐渐减少,证明掺入 MSWIBA 后的样品能够减少碳排放量,对生态环境保护产生深远影响。

表 7 不同材料的建筑材料碳排放因子指标			
材料类别	Ca(OH) ₂	GGBS ^[26]	MSWIBA ^[27]
建筑材料碳排放因子/(kg CO ₂ e·t ⁻¹)	747.00	182.80	9.94

表 8 各组处理后得到 1 t 土的材料碳排放量				
编号	处理后得到 1 t 土的材料碳排放量/(kg CO ₂ eq)			
	MSWIBA	Ca(OH) ₂	GGBS	合计
B0C4G4	0.00	27.67	6.77	34.44
B5C4G4	0.44	26.44	6.47	33.35
B10C4G4	0.84	25.32	6.20	32.36
B20C4G4	1.55	23.34	5.71	30.61
B40C4G4	2.69	20.19	4.94	27.82

市场调查固化材料单价分别为:熟石灰 450 元/t、矿粉 260 元/t(42.5 级普通硅酸盐水泥 525 元/t)。根据各组材料占比计算处理后得到 1 t 土的材料成本,如表 9,比较各组合计评价其经济效益,发现随着 MSWIBA 掺量的增加,各组处理后得到 1 t 土的材料成本逐渐减小,说明添加 MSWIBA 更加经

济。与谭鹏等^[7]提及的换填土方案相比较:余土弃置 38.31 元/m³、外购土 76.09 元/m³,使用固废材料原地处理具有极大价格优势。

表 9 各组处理后得到 1t 土的材料成本			
编号	处理后得到 1 t 土的材料成本/元		
	Ca(OH) ₂	GGBS	合计
B0C4G4	16.67	9.63	26.30
B5C4G4	15.93	9.20	25.13
B10C4G4	15.25	8.81	24.07
B20C4G4	14.06	8.13	22.19
B40C4G4	12.16	7.03	19.19

4 结 论

(1) MSWIBA 的掺入可降低液塑限,提升改良土的水稳系数。当 MSWIBA 掺量范围在 5%~10% 之间时,具有较好的改良效果,利于工程应用。综合分析推荐合适的 MSWIBA 掺量为 5%,此掺量下的改良土液限降低了 5%,塑限降低了 4%,水稳系数提高了 16%。

(2) 协同固化后,5% MSWIBA 掺量的改良土 7 d 强度为 1.95 MPa,满足路基填筑强度要求,主要由 (N,C)-A-S-H 以及钙矾石等水化产物保证了改良土强度。

(3) MSWIBA 协同固化后,改良土的水化产物保证了污染组分的稳定性,改良土重金属浸出浓度均低于 0.05 mg/L,符合Ⅲ类地下水以及Ⅱ类地表水的要求。

参考文献:

[1] 詹良通,郭淇萌,吴林波,等. 城市工程渣土消纳处置及资源化利用途径探讨——以温州市为例[J]. 环境卫生工程,2021,29(2):1-9.

[2] Wan Yuxiao, Du Guangyin, Liu Songyu, et al. Field research on the treatment of coastal phase liquefaction foundation with clay interlayer using resonance probe compaction method [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2022,26(10):4242-4252.

[3] Geng Weijuan, Han Wenxia, Yin Jie, et al. Salinity effects on the strength and morphological indices of soft marine clay[J]. Scientific Reports, 2022,12(1):17563-17579.

[4] 徐日庆,朱坤垠,黄伟,等. 淤泥质土固化及路用性能试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2022,49(3):167-174.

[5] 莫秋旭,陈家闯,许会生,等. 湛江大道 2 种高液限土水泥改良试验研究[J]. 铁道科学与工程学报,2020,

17(7):1728-1733.

[6] 董博闻,王修山,沈森杰. 基于正交试验的复合土壤固化剂配合比设计研究[J]. 人民长江,2021,52(9):193-197.

[7] 谭鹏,谢振文,邓奇春,等. 复合固化高液限土的力学及水稳性研究[J]. 铁道科学与工程学报,2022,19(5):1298-1308.

[8] 程涛,洪宝宁,刘鑫,等. 高液限土最佳掺砂比的确定[J]. 西南交通大学学报,2012,47(4):580-585,596.

[9] 张桂荣,罗紫婧,邵勇,等. 水泥、粉煤灰改良细砂土的工程特性与改良机理[J]. 水利与建筑工程学报,2019,17(5):128-132.

[10] 欧孝夺,秦金喜,罗炳雄,等. 降雨蒸发作用下掺砂改良铝土尾矿泥浆试验研究[J]. 人民长江,2021,52(3):204-208,213.

[11] Le N H, Razakamanantsoa A, Nguyen M L, et al. Evaluation of physicochemical and hydromechanical properties of MSWI bottom ash for road construction [J]. Waste Management, 2018,80:168-174.

[12] 袁满昌,温冬. 焚烧炉渣的综合处理与资源化利用研究[J]. 环境卫生工程,2019,27(2):45-50.

[13] 陈萍,冯彬,詹良通. 以垃圾焚烧底灰为骨料的脱水污泥固化试验[J]. 中国环境科学,2014,34(10):2624-2630.

[14] 公路土工试验规程:JTG 3430—2020 [S]. 北京:人民交通出版社,2020.

[15] 水电水利工程土工试验规程:DL/T 5355—2006[S]. 北京:中国电力出版社,2006.

[16] 公路工程无机结合料稳定材料试验规程:JTG E51—2009 [S]. 北京:人民交通出版社,2009.

[17] 土壤固化外加剂:CJT 486—2015 [S]. 北京:中国标准出版社,2015.

[18] 公路路面基层施工技术细则:JTG/T F20—2015 [S]. 北京:人民交通出版社,2015.

[19] 杨俊,黎新春,童磊. 风化砂改良高液限红粘土强度特性试验研究[J]. 南京理工大学学报,2015,39(2):181-186.

[20] Tang Jinfeng, Steenari B M. Leaching optimization of municipal solid waste incineration ash for resource recovery: A case study of Cu, Zn, Pb and Cd [J]. Waste Management, 2016,48:315-322.

[21] 地下水质量标准:GB/T 14848—2017 [S]. 北京:中国质检出版社,2017.

[22] 地表水环境质量标准:GB 3838—2002 [S]. 北京:中国环境科学出版社,2002.

仿真分析可增加停工施工步骤,应确保后期无砟轨道标高的精确控制。

(2) 考虑施工步骤的收缩徐变因素时,系梁和拱肋收缩徐变变形增大,系梁应力在拱脚处保持不变,拱脚处钢管应力减小。钢管内核心混凝土应力无变化。

(3) 其他大跨度桥梁的施工线形控制,也应充分考虑施工步骤的收缩徐变因素对成桥线形的影响,将其作为施工线形控制的影响因素之一。

参考文献:

- [1] 陈宝春,韦建刚,周俊,等.我国钢管混凝土拱桥应用现状与展望[J].土木工程学报,2017,50(6):50-61.
- [2] 陈宝春,牟廷敏,陈宜言,等.我国钢-混凝土组合结构桥梁研究进展及工程应用[J].建筑结构学报,2013,34(S1):1-10.
- [3] 韩冰,杜金生,王元丰.徐变对钢管混凝土拱桥的影响分析[J].公路交通科技,2005(6):75-77,93.
- [4] 王玉银,耿悦,张素梅.钢管混凝土收缩徐变模型及计算方法对比分析[J].天津大学学报,2011,44(12):1075-1082.
- [5] 武文杰,王元丰,马伊硕.考虑几何非线性及施工的钢管混凝土拱桥徐变[J].西南交通大学学报,2013,48(4):645-650.
- [6] 周履.混凝土收缩徐变引起的钢-混凝土结合梁的内力重分配[J].桥梁建设,2001(2):14.
- [7] 张正阳,赵人达.基于贝叶斯理论的钢管混凝土劲性骨架拱桥收缩徐变效应分析[J].铁道标准设计,2017,61(5):86-90,95.
- [8] 郭安娜.大跨度铁路预应力混凝土斜拉桥收缩徐变影响及控制措施研究[J].铁道标准设计,2021,65(6):73-77.
- [9] 姜嫚.基于实测数据修正的徐变预测模型在铁路桥预拱度计算中的应用[J].铁道建筑,2014(5):5-8.
- [10] Naaman H A E, et al. Creep and shrinkage prediction model for analysis and design of concrete structures-model B3[J]. Materials & Structures, 1996, 29(2): 126-126.
- [11] Ma Yishuo, Wang Yuanfeng. Creep of high strength concrete filled steel tube columns [J]. Thin-Walled Structures, 2012, 53(5): 91-98.
- [12] 宋郁民,刘媛,周世军.预应力混凝土桥梁悬臂施工中徐变挠度的计算[J].兰州交通大学学报,2008(4):25-28.
- [13] 吕福钢,柴金义,夏宏光.钢管混凝土拱桥收缩徐变计算模式的探讨[J].公路交通科技(应用技术版),2012,8(6):318-322.
- [14] 王龙飞.桥梁混凝土收缩徐变效应时变过程综合仿真[J].公路交通科技,2021,38(2):54-61.
- [15] 张文光.钢管混凝土拱-梁组合桥拱脚区域局部受力分析[J].安徽建筑,2021,28(8):225-226.
- [16] 白艳.收缩徐变对钢管混凝土系杆拱桥静力性能的影响[J].铁道建筑技术,2016(5):45-48.
- [17] 铁路桥涵混凝土结构设计规范:TB 10092—2017[S].北京:中国铁道出版社,2017:100-103.
- [18] 袁伦一.1978年国际预应力协会(FIP)关于混凝土徐变系数及收缩应变的研究[J].国外公路,1981(6):10-13.

(上接第 127 页)

- [23] Zhang Wanlu, Zhao Lunyang, Bryan A. M, et al. Dredged marine sediments stabilized/solidified with cement and GGBS: Factors affecting mechanical behaviour and leachability [J]. Science of the Total Environment, 2020, 733: 138551-138567.
- [24] 徐奋强,郭先凯.高液限土路基掺砂改良试验研究[J].科学技术与工程,2013,13(33):10054-10058.
- [25] 建筑碳排放计算标准:GB/T 51366—2019[S].北京:中国建筑工业出版社,2019.
- [26] Crossin E. The greenhouse gas implications of using ground granulated blast furnace slag as a cement substitute [J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 95: 101-108.
- [27] Ahmad A, Fabjola B, Alessandra Z, et al. Zero-waste approach in municipal solid waste incineration: Reuse of bottom ash to stabilize fly ash [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 245: 118779-118791.