

工业废渣复合再生胶凝材料微观特征及 稳定土路用性能分析

李小重¹, 李万波², 王笑风³, 杨博³

(1. 河南淮信高速公路有限公司, 河南 信阳 464094; 2. 河南省公路工程局集团有限公司;

3. 河南省交通规划设计研究院股份有限公司)

摘要:复合再生胶凝材料是以工业废渣原料经一定工艺制备的新型道路材料,在道路工程中应用具有节省资源、绿色环保等优点。该文对比分析工业废渣复合再生胶凝材料和普通硅酸盐水泥成分,提出工业废渣复合再生胶凝材料的微观特征;同时通过路用性能试验、试验段铺筑及工程质量监测,实体验证复合再生胶凝材料稳定膨胀土和风化砂的工程应用效果。结果表明:工业废渣复合再生胶凝材料的主要矿物组成为硅酸二钙(C_2S)和硅酸三钙(C_3S),与普通硅酸盐水泥相似;稳定膨胀土和稳定风化砂用于高等级公路路堤、路床的最低掺量分别为4.5%和4.0%,且路用性能优于同等剂量下的水泥稳定材料;稳定膨胀土和风化砂的工程应用效果良好,能够用于高等级公路路基施工。

关键词:工业废渣;复合再生胶凝材料;微观特征;稳定土;路用性能

1 前言

钢渣、赤泥、粉煤灰、煤矸石、尾矿等工业废渣急剧增加,产生了一系列土地、资源、环境、安全等问题,工业固体废渣资源化再生利用成为人们关注的重点。同时,受到环境保护等政策的影响,水泥、石灰加工厂关停,造成水泥、石灰供应不足、价格上涨。因此,钢渣、尾矿等工业固体废渣再生利用成为目前亟待解决的问题,而将其作为水硬性胶凝材料,替代水泥、石灰应用于道路工程具有重要的研究价值。

20世纪30年代末,美国学者Purdon在研究波特兰水泥的硬化机理时发现,NaOH在水泥硬化过程中会起到一定催化作用,并由此提出了“碱激发”理论。碱激发材料是以硅、铝、氧为主要元素的硅铝质材料,通过碱金属离子激发作用下的缩聚反应实现化学键合的一类新型无机非金属材料,天然材料(如黏土或长石)以及工业废弃物(如矿渣,粉煤灰或矿山尾矿)都可以用来制备碱激发材料。白杨发现土凝岩材料与传统的水泥和石灰材料相比具有力学强度高、膨胀性低、耐久性高和终凝时间长等优点;Liu等研究表明:干法造

粒矿渣水泥砂浆早期强度较低,不到水泥熟料强度的50%,28d后,干法造粒矿渣水泥砂浆的抗压强度高于水泥熟料;Zhang等分别制备了利用氢氧化钠和硅酸钠活化的粉煤灰、矿渣基地聚合物复合物,并对其动态能量特性进行了比较研究。此外,在道路工程以及建筑行业,目前还有许多工业固体废弃物已经被成功应用于胶凝材料的制备中,包括钢渣、尾矿以及纸浆和造纸工业的废弃物,以上几种废弃物制成的胶凝材料在强度、抗冻性以及稳定性方面均表现出优于普通硅酸盐水泥的性能。

多年来,经室内试验与工程检验,土凝岩材料在力学性能以及耐久性能方面表现优良。王一峰等结合正交试验方法,进行了无侧限抗压强度试验,研究了土凝岩掺量、养护龄期、压实度对土凝岩改良铁尾矿无侧限抗压强度的影响;汲平等研究表明:土凝岩稳定材料相关指标均不低于相应水泥稳定材料,具有良好耐久性能;荣云杰研究表明:土凝岩掺入细粒土后,其抗剪强度和抗渗性均有所提高,效果随养护龄期延长而提升;付延凯等的试验结果表明:土凝岩掺量15%的稳定土,前期渗透系数下降较快,后期渗透系数可达到 2.10×10^{-8} cm/s,符合水利工程施工规范要求;

收稿日期:2020-04-19(修改稿)

基金项目:河南省交通厅科技项目(编号:2018J6)

作者简介:李小重,男,教授级高工, E-mail:LL00917@126.com

Yilmaz 等利用不同比例的标准和不合格粉煤灰用于稳定土壤,并对样品进行了一系列无侧限压缩测试,以分析粉煤灰对土壤稳定性的适用性。

该文所用的工业废渣复合再生胶凝材料(简称复合再生胶凝材料)的原材料为钢渣、赤泥、粉煤灰、煤矸石以及工业尾矿等固体废渣。从广义上讲,复合再生胶凝材料属于一种新型的土质固化剂,目前,国内外关于传统土质固化剂已经进行了大量研究,但对复合再生胶凝材料的研究较少。因此,该在对复合再生胶凝材料的微观成分进行分析的基础上,探讨了复合再生胶凝材料作用机理;同时对其改善膨胀土和风化砂进行了室内试验,结合河南省息邢高速公路路堤、路床的应用,总结其应用效果,从而为其在公路工程中的应用提供参考。

2 复合再生胶凝材料微观特征分析

2.1 化学组分分析

复合再生胶凝材料是由钢渣、赤泥、粉煤灰、煤矸石以及工业尾矿等工业废料经一定工艺制备的新型材料,其组成成分目前尚缺乏系统研究。该文采用扫描电镜(SEM)的 X 射线能谱分析(EDS)对复合再生胶凝材料和普通硅酸盐水泥(P. O. 42. 5)两种材料进行了组分分析,得到两种材料的 EDS 图谱如图 1、2 所示。经分析计算,得到两种材料所含的元素比例如图 3、4 所示。

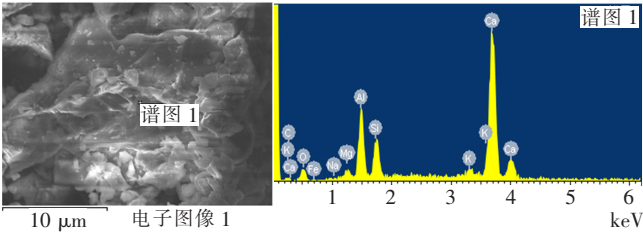


图 1 复合再生胶凝材料的 EDS 图谱

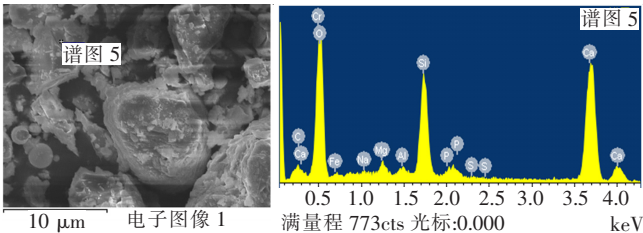


图 2 P. O. 42. 5 级水泥的 EDS 图谱

从图 3、4 可以看出:复合再生胶凝材料中重量分数超过 0.5% 的有 7 种,主要以 Ca 为主,含量达到总

量的 70% 以上,还含有少量的 Al、O、Si 和微量的 K、C、Mg、Fe 元素;P. O. 42. 5 级水泥中元素重量分数超过 0.5% 的有 9 种,O 含量最高,其次是 Ca 和 Si,还有少量 Cr 及微量的 Fe、S、K 等元素。由此可知,复合再生胶凝材料和 P. O. 42. 5 级水泥的组分含量差异悬殊,是两种不同的材料,复合再生胶凝材料的组分相对纯净,但元素含量存在不均一情况,而水泥所含元素的含量变化幅度较小,成分分布较为均匀。

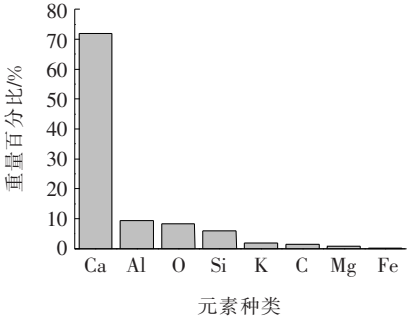
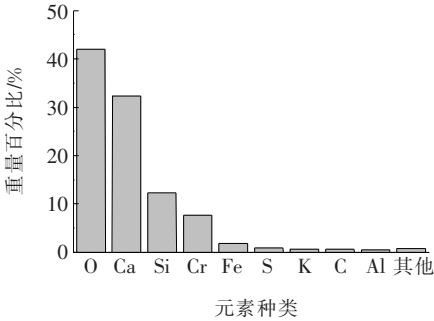


图 3 复合再生胶凝材料所含元素比例



注:“其他”包含的元素为:Na,0.34%;Cu,0.3%;Mg,0.22%

图 4 P. O. 42. 5 级水泥所含元素比例

2.2 物相分析

采用 X 射线衍射仪(XRD)分别对复合再生胶凝材料和 P. O. 42. 5 级水泥的晶体物相组成进行了分析,得到两种材料的 XRD 图谱,如图 5、6 所示。

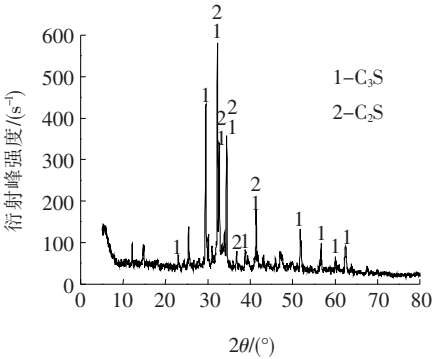


图 5 复合再生胶凝材料的 XRD 图

从图 5 可以看出:其主要晶体物质为硅酸二钙(C_2S)和硅酸三钙(C_3S)。将复合再生胶凝材料的 X 衍射曲线与其对应的 PDF 卡片对照发现, C_2S 的几个较大强度的衍射峰分别位于 $2\theta=32.24^\circ$ 、 32.65° 、 34.41° 、 36.77° 和 41.33° 左右,其中 $2\theta=32.24^\circ$ 左右的峰为 C_2S 的主峰; C_3S 的几个衍射强度较大的衍射峰分别位于 $2\theta=22.99^\circ$ 、 29.48° 、 32.24° 、 32.65° 、 34.41° 、 38.83° 、 41.33° 、 51.79° 、 56.64° 、 60.04° 和 62.41° 左右,其中 $2\theta=32.24^\circ$ 左右的峰为 C_3S 的主峰。

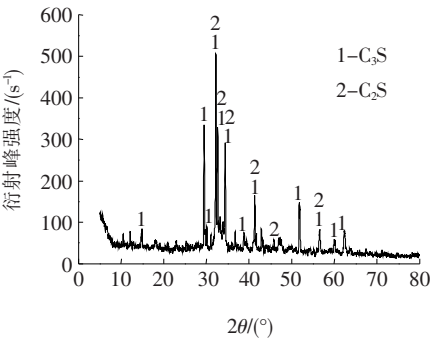


图 6 P.O. 42.5 级水泥的 XRD 图

从图 6 可以看出:水泥的主要晶体物质同样为硅酸二钙(C_2S)和硅酸三钙(C_3S)。将水泥的 X 衍射曲线与

其对应的 PDF 卡片对照发现, C_2S 的几个较大强度的衍射峰分别位于 $2\theta=32.24^\circ$ 、 32.67° 、 34.39° 、 41.33° 、 45.85° 和 56.60° 左右,其中 $2\theta=32.24^\circ$ 左右的峰为 C_2S 的主峰; C_3S 的几个衍射强度较大的衍射峰分别位于 $2\theta=14.95^\circ$ 、 29.48° 、 32.24° 、 32.67° 、 34.39° 、 38.83° 、 41.33° 、 51.77° 、 56.60° 、 60.01° 和 62.33° 左右,其中 $2\theta=32.24^\circ$ 左右的峰为 C_3S 的主峰。

上述分析表明:复合再生胶凝材料与普通硅酸盐水泥的成分基本相似,主要晶体物质均为硅酸三钙(C_3S)和硅酸二钙(C_2S),这为利用复合再生胶凝材料代替水泥用于道路工程提供了理论依据。

3 复合再生胶凝材料稳定土的路用性能

3.1 原材料

(1) 复合再生胶凝材料

复合再生胶凝材料的配方可以根据不同类型土壤的物理力学特性进行调整,使其技术指标能够满足不同的工程需求。该项目用于稳定膨胀土和风化砂的复合再生胶凝材料分别用 1 号和 2 号胶凝材料表示,其技术指标有所不同,具体见表 1。

表 1 复合再生胶凝材料主要技术指标

胶凝材料	凝结时间/min		安定性 (雷氏夹法)	胶砂强度(3 d)/MPa	
	初凝	终凝		抗折强度	抗压强度
1 号(稳定膨胀土用)	156	323	合格	0.8	5.4
2 号(稳定风化砂用)	161	364	合格	2.0	15.5
试验方法	GB/T 1346—2001			GB/T 17671—1999	

上述两种类型的复合再生胶凝材料的凝结时间相差不大,可是胶砂的抗压强度和抗折强度却有显著差异,2 号胶砂强度约是 1 号胶砂强度的 3 倍,其原因在于风化砂的结构松散、透水性好,压实后强度较低,需要采用品质较高的复合再生胶凝材料来改善强度。

(2) 膨胀土和风化砂

试验所用膨胀土和风化砂来自于淮滨至信阳高速

公路息县至邢集段沿线取土场,相关技术指标见表 2、3。

表 2 膨胀土技术指标

最大干密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	最佳含 水率/%	液限/ %	塑性 指数	膨胀 量/% ($K=96\%$)/%	CBR 值
1.88	14.61	43	19	1.96	2.36

表 3 风化砂技术指标

颗粒成分/%			级配指标		最大干密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	最佳含 水率/%	CBR 值 ($K=96\%$)/%
砾粒组 >2 mm	砂粒组 2~0.075 mm	细粒组 <0.075 mm	不均匀系数	曲率系数			
61.3	36.2	2.5	9.8	2.94	2.08	9.1	19

由表 2、3 可以看出:该膨胀土液限为 43%,塑性指数为 19,属于低液限黏土;膨胀量为 1.96%,属于弱膨胀土;96%压实度下的 CBR 值仅为 2.36%,远小于上、下路床填料的 CBR 值要求,甚至达不到 93%压实度的下路堤 CBR 值要求($\geq 3\%$)。风化砂不均匀系数为 9.8,曲率系数为 2.94,初步判定该风化砂为级配不良砂;93%压实度下的 CBR 值即达到 15.5%,满足

上路床填料的 CBR 值($\geq 8\%$)要求。

3.2 路用性能

根据路基设计规范要求,对不同掺量复合再生胶凝材料稳定膨胀土进行了击实试验、膨胀率试验及 CBR 试验,对不同掺量复合再生胶凝材料稳定风化砂进行了击实试验和 CBR 试验,不同试验按照规范进行了多次平行试验,结果取平均值,具体见表 4、5。

表 4 复合再生胶凝材料稳定膨胀土路用性能测试结果

胶凝材料 掺量/%	最大干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	最佳含 水率/%	总膨胀 率/%	CBR 值/%		
				K=93%	K=94%	K=96%
3.5	1.855	15.4	0.96	23.5	25.0	29.0
4.0	1.855	15.0	0.74	23.8	25.5	30.1
4.5	1.821	16.1	0.65	24.4	26.3	30.9
5.0	1.848	14.3	0.61	25.5	26.9	31.8
路基设计规范要求	—	—	≤ 0.7	≥ 3	≥ 4	下路床 ≥ 5 ,上路床 ≥ 8

表 5 复合再生胶凝材料稳定风化砂路用性能试验结果

胶凝材料 掺量/%	最大干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	最佳含 水率/%	CBR 值/%			7 d 无侧限抗 压强度/MPa
			K=93%	K=94%	K=96%	
1	2.089	9.1	18.9	20.0	22.4	0.73
2	2.122	8.6	27.4	29.7	34.1	0.84
3	2.125	8.6	32.6	40.9	49.2	0.91
4	2.132	8.3	51.7	58.3	67.1	1.13
路基设计规范要求	—	—	≥ 3	≥ 4	下路床 ≥ 5 ,上路床 ≥ 8	—

由表 4、5 可知:复合再生胶凝材料稳定膨胀土和稳定风化砂的 CBR 值均随着胶凝材料掺量的增加而不断提高。对于稳定膨胀土,当掺量为 4.5%时,总膨胀率 $\leq 0.7\%$, $\text{CBR} \geq 24\%$ (远大于上路床的 8%),则复合再生胶凝材料稳定膨胀土填筑路堤、路床时最低掺量为 4.5%。

对于稳定风化砂,掺不掺加胶凝材料,其 CBR 值均满足路基填筑要求,但是根据河南省高速公路建设

的经验,无机结合料改善路床材料 7 d 无侧限抗压强度达到 1.0 MPa 时,路床弯沉可满足验收要求,当胶凝材料掺量为 4.0%时,稳定风化砂的 7 d 无侧限抗压强度为 1.13 MPa,因此复合再生胶凝材料稳定风化砂用于路床填筑时胶凝材料掺量宜为 4.0%。

同时采用相同剂量的普通水泥(P. O. 42.5 级)分别对膨胀土和风化砂进行稳定处理,并分析其相关技术指标,结果见表 6。

表 6 水泥稳定膨胀土和风化砂性能测试结果

材料类型	最大干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	最佳含 水率/%	总膨胀 率/%	CBR 值/%			7 d 无侧限抗 压强度/MPa
				K=93%	K=94%	K=96%	
4.5%水泥稳定膨胀土	1.834	17.2	0.62	21.2	24.8	28.6	—
4.0%水泥稳定风化砂	2.038	10.2	—	46.2	51.7	63.2	1.11

对比表 4、5、6 可以发现:复合再生胶凝材料稳定膨胀土和风化砂与同等剂量的水泥稳定膨胀土和风化砂相比,两者的各项技术指标接近,而且前者稍优于后

者,说明复合再生胶凝材料稳定膨胀土和稳定风化砂具有良好的路用性能,能够满足高速公路路基施工技术要求。

4 工程应用实例

为验证复合再生水硬性胶凝材料的工程应用效果,在息邢高速公路 K86+109~K86+319 段铺筑了复合再生水硬性胶凝材料稳定膨胀土(胶凝材料掺量为土体质量的 4.5%)上路堤试验段(图 7);同时在息邢高速公路 K77+550~K77+600 段路床 96 区第一层铺筑了复合再生胶凝材料稳定风化砂(胶凝材料掺量为风化砂质量的 4.0%)试验段。



(a) 洒布胶凝材料



(b) 拌和



(c) 碾压

图 7 复合再生胶凝材料稳定膨胀土施工

试验段铺筑完成后,对施工质量进行了现场检测,复合再生水硬性胶凝材料稳定膨胀土上路堤试验段 CBR 值为 5.5%(上路堤要求 $\geq 4\%$),压实度为 94.2%(上路堤要求 $\geq 94\%$);复合再生胶凝材料稳定风化砂试验段 CBR 值为 12.7%(下路床要求 $\geq 5\%$),现场压实度 96.2%(路床要求 $\geq 96\%$),满足设计及验收要求,工程应用效果良好。

5 结论

(1) 采用扫描电镜(SEM)的 X 射线能谱分析

(EDS)和 X 射线衍射仪(XRD)对复合再生胶凝材料与 P. O. 42.5 级水泥进行了成分分析,结果表明两者化学元素含量差异较大,为两种不同材料,且复合再生胶凝材料的组分相对单一,但元素含量存在不均匀情况;复合再生胶凝材料与普通硅酸盐水泥的化合物成分基本相似,主要晶体物质均为硅酸二钙(C_2S)和硅酸三钙(C_3S)。

(2) 通过室内试验,确定了复合再生胶凝材料稳定膨胀土用于路床、路堤施工时最低掺量为 4.5%,稳定风化砂用于路床填筑时胶凝材料掺量宜为 4.0%;同等胶凝材料掺量下,复合再生胶凝材料稳定膨胀土和风化砂的路用性能优于水泥稳定膨胀土和风化砂。

(3) 通过复合再生胶凝材料稳定膨胀土和稳定风化砂的实体工程验证,试验段的 CBR 值和压实度均满足设计要求,应用效果良好。

参考文献:

- [1] 聂铁苗,刘颖. 粉煤灰在矿物聚合材料中的应用[M]. 北京:化学工业出版社,2015.
- [2] 孙晓刚,赵英良,邢军,等. 碱激发高炉矿渣—粉煤灰制备充填胶凝材料[J]. 金属矿山,2016(11).
- [3] John L. Provis, Angel Palomo, Caijun Shi. Advances in Understanding Alkali—Activated Materials[J]. Cement and Concrete Research, 2015, 78(Part A): 110—125.
- [4] Z. H. Zhang, H. J. Zhu, C. H. Zhou, et al. Geopolymer from Kaolin in China: An Overview[J]. Applied Clay Science, 2016, 119(Part A): 31—41.
- [5] 白杨. 土壤固化剂稳定细粒土基层试验研究[J]. 北方交通, 2011(5).
- [6] Junxiang Liu, Qingbo Yu, Zongliang Zuo, et al. Reactivity and Performance of Dry Granulation Blast Furnace Slag Cement[J]. Cement and Concrete Composites, 2019, 95: 19—24.
- [7] Hengbo Zhang, Xin Luo, Han Wang, et al. Influence of Activators on the Dynamic Energy Properties of Fly Ash—Based and Slag—Based Geopolymer Composites[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2019, 31(2).
- [8] 杨敏,杨和平,肖杰,等. 再生建筑废料铺筑沥青路面结构层力学性能现场试验[J]. 中外公路, 2017(3).
- [9] 魏连雨,李雪,巨利荣. 铸造废砂材料分析及道路应用研究[J]. 中外公路, 2017(6).
- [10] 马在宏,李豪,卢勇,等. 水泥就地冷再生基层铣刨料性状特征和级配影响因素研究[J]. 中外公路, 2018(2).
- [11] Diniz Dayse Horta, De Carvalho, José Maria Franco, et al. Blast Oxygen Furnace Slag as Chemical Soil Stabilizer

聚丙烯纤维透水水泥混凝土受力性能研究

单景松¹, 刘建¹, 王敏², 李峰³(1. 山东省土木工程防灾减灾重点实验室(山东科技大学), 山东 济南 250031; 2. 日照市城市建设投资集团有限公司;
3. 山东汇通建设集团有限公司)

摘要: 选用 6、12 和 18 mm 3 种纤维长度, 每种长度的掺量分别取 1.0、1.5 和 2.0 kg/m³, 进行了抗压、抗折和抗冻融性能试验。结果表明: 纤维长度 18 mm、掺量为 1.5 kg/m³ 时透水水泥混凝土 7、28 d 的抗压强度达到最大峰值, 较不加纤维试件增加了 41.7% 和 52.3%; 纤维长度 12 mm、掺量为 1.0 kg/m³ 时透水水泥混凝土抗折强度达到最大峰值, 由不加纤维时的 4.4 MPa 增加至 5.3 MPa; 掺加 18 mm 长纤维对增强透水混凝土的抗冻融能力最明显, 经 225 次饱水冻融循环后, 残余抗压强度比与不加纤维试件相比由 31.1% 增加到 78%。说明聚丙烯纤维对提升透水水泥混凝土的抗压、抗折强度及长期耐冻融能力都有明显的作用。纤维的掺量及长度变化对透水混凝土各性能的影响不同, 可根据实际受力状态和功能要求综合确定纤维参数, 建议纤维长度范围取 12~18 mm、掺量取 1.0~1.5 kg/m³。

关键词: 聚丙烯纤维; 透水水泥混凝土; 抗压强度; 抗折强度; 残余强度比

为改善混凝土的物理力学性能, 纤维类材料被广泛添加于混凝土中, 如钢纤维、矿物纤维、有机纤维等。张艳聪(2018 年)将废轮胎中的钢纤维掺入混凝土中, 混凝土强度得到明显增强; 张丽(2016 年)在水泥基透水混凝土砖中加入涤棉混纺废弃织物, 结果表明水泥基透水混凝土物理力学性能随织物体积掺量的增大得到提高。

聚丙烯纤维是有机纤维的一种, 有文献对其掺量、长度对混凝土的影响进行了研究。Wang(2012 年)在混凝土中加入纤维, 结果表明混凝土抗压强度和劈裂抗拉强度随纤维掺量的增加而增加; 詹冬(2014 年)的试验结果表明: 添加纤维对于混凝土的收缩有明显的影响作用, 混凝土在 28 d 后收缩率降低至 9.3%~18.9%; 陈建国(2018 年)的试验结果表明: 当聚丙烯

for Use in Roads[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2017, 29(9).

[12] Ana Luiza Borges Marinho, Carina Miranda Mol Santos, José Maria Franco de Carvalho, et al. Ladle Furnace Slag as Binder for Cement-Based Composites[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2017, 29(11).

[13] Joaquim Nery Sant'ana Filho, Sidney Nicodemos Da Silva, Gabriela Cordeiro Silva, et al. Technical and Environmental Feasibility of Interlocking Concrete Pavers with Iron Ore Tailings from Tailings Dams[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2017, 29(9).

[14] Santos Rodrigo Felipe, De Cássia Silva Sant'Ana Alvarenga Rita, Cardoso Mendes Beatryz, et al. Evaluation of Incorporation of Dregs in Mortar Production in Replacement of Hydrated Lime[J]. Materials Science Fo-

rum, 2017, 881: 351-356.

[15] 王一峰, 刘晶磊, 王奥运, 等. DHT 土凝岩改良铁尾矿路用性能正交试验研究[J]. 河北建筑工程学院学报, 2017(4).

[16] 汲平, 迟朝明. DHT 土凝岩稳定材料耐久性试验研究[J]. 工程建设与设计, 2017(23).

[17] 荣云杰. DHT 土凝岩土壤固化剂稳定细粒土的固化特性研究[D]. 山东农业大学硕士学位论文, 2016.

[18] 付延凯, 刘经强, 荣云杰, 等. 土凝岩的掺量和龄期对稳定土渗透系数的影响[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2016(2).

[19] Yuksel Yilmaz, Haluk Sinan Coban, Bora Cetin A. M. ASCE, et al. Use of Standard and Off-Spec Fly Ashes for Soil Stabilization[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2019, 31(2).

收稿日期: 2020-03-11

基金资助: 山东省高等学校科技计划项目(编号: J17KA213)

作者简介: 单景松, 男, 博士, 副教授. E-mail: cyhsjs@163.com