

## 赤泥基可控性低强度材料性能试验研究\*

冯琪<sup>1</sup>, 冉晋<sup>1</sup>, 张新波<sup>2</sup>, 王琳<sup>1</sup>, 王冬梅<sup>1</sup>

(1.山东省交通科学研究院, 山东 济南 250102; 2.山东高速交通建设集团股份有限公司, 山东 济南 250101)

**摘要:** 利用拜耳法赤泥制备具有自流平、自填充和自密实特性的可控性低强度材料替代级配型传统回填材料, 通过测试其流动性、泌水率和无侧限抗压强度, 研究其工作性能和强度变化规律。结果表明, 利用拜耳法赤泥制备的可控性低强度材料的流动度和泌水率随拌合用水量的增加而增大, 在满足目标流动度的条件下, 泌水率基本可控制在 3.0% 以内; 无侧限抗压强度不仅与养护龄期有关, 还与灰砂比和水固比有关; 较低的水泥掺量不仅有利于降低材料成本, 还有利于未来的二次开挖。

**关键词:** 公路; 拜耳法赤泥; 可控性低强度材料; 流动度; 泌水率; 无侧限抗压强度

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2022)02-0065-03

赤泥是以铝土矿为原料, 在生产氧化铝过程中产生的极细颗粒, 是一种低重度、高孔隙比、高稠度、高 pH 值的呈强碱性的固体工业废弃物。目前, 赤泥主要采取简易的露天堆放或填埋, 无害化程度低, 不仅占用土地, 耗费较多的堆场建设和维护管理费用, 还污染水体、大气和土壤, 影响作物生长, 危害人体健康。对赤泥的综合利用主要包括三方面: 一是提取赤泥中的有用组分, 回收有价金属和稀有元素; 二是将赤泥作为一般矿物原材料, 生产砖、瓦、水泥和砼等建筑材料; 三是利用赤泥多孔结构和较大比表面积所具有的较强吸附作用或赤泥中铁、重金属等元素所具有的催化作用对环境进行修复与治理。但上述研究因受制于各种条件, 难以得到大规模推广应用。中国近年来陆续开展了赤泥用作道路建筑材料的探索性研究, 主要进行了利用赤泥的路基填料、稳定土基层、水泥砼路面等室内试验研究和现场试验路铺筑, 实践表明赤泥用作筑路材料是大规模消耗赤泥堆存、解决筑路材料紧缺的有效途径之一。该文以拜耳法赤泥为掺合料, 制备具有低强度、自流平、自填充和自密实特性的高流动性水泥基回填材料(国外称之为可控性低强度材料)替代级配型传统回填材料, 并通过试验分析其流动度、泌水率和力学强度等变化规律, 研究其主要工程特性。

## 1 原材料与设计配合比

### 1.1 原材料

常规可控性低强度材料组成与一般砼或砂浆类

似, 主要由胶结料、集料、水及添加剂组成。胶结料为水泥, 采用钻牌 P.O42.5R 普通硅酸盐水泥; 集料为天然砂, 采用普通河砂, 细度模数 2.6, 属 II 区中砂; 掺合料采用拜耳法赤泥, 属高铁低硅的特种废渣, 矿物组成以针铁矿、赤铁矿为主, 其基本物理参数见表 1; 拌合用水采用自来水。

表 1 拜耳法赤泥的基本物理参数

试验项目	试验值	试验项目	试验值
密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	3.18~3.31	塑性指数	6.3
含水量/%	20~40	黏聚力/kPa	9.6~74.3
液限/%	34.4	内摩擦角/(°)	13.5~21
塑限/%	28.1	pH 值	>12.0

### 1.2 设计配合比

水泥砼的配合比设计参数通常采用水灰比、砂率和单位用水量, 目的是保证砼拌合物的和易性、凝结硬化后的强度和耐久性达到要求。可控性低强度材料主要应用于回填工程, 很多需要后期开挖, 易开挖是其区别于传统水泥砼或砂浆材料的显著特性, 其首要工作性能是流动性和保水性, 强度并不是可控性低强度材料在工程应用中需考虑的主要因素, 其强度满足回填工程的设计要求即可。

采用灰砂比(水泥与集料的质量比)和水固比(水与固体材料的质量比)作为赤泥基可控性低强度材料的配合比设计参数。集料为普通河砂; 固体材料则包括普通河砂、水泥、赤泥, 不包括外加剂。一

\* 基金项目: 山东省重点研发计划(公益类科技攻关)项目(2019GSF109057)

一般情况下,灰砂比与可控性低强度材料中水泥用量有关,对其强度影响较大,但对流动性影响较小;水固比与可控性低强度材料中用水量有关,对其工作性能(如流动度、泌水率等)的影响较大,对强度的影响也较大。

固定水泥掺量,选取 0.040、0.043、0.046 的灰砂比和 0.24、0.26、0.27、0.28 的水固比制备 12 组不同组成比例的赤泥基可控性低强度材料,分别测试其工作性能(流动度和泌水率)、力学性能(无侧限抗压强度)。设计配合比和试验测试结果见表 2。

表 2 设计配合比和试验结果

编号	水固比	灰砂比	流动度/mm	泌水率/%	无侧限抗压强度/MPa					
					1 d	3 d	7 d	14 d	21 d	28 d
Z1		0.040	171.5	2.80	0.50	0.82	1.07	1.26	1.24	1.40
Z2	0.24	0.043	128.5	2.40	0.37	0.69	1.01	1.30	1.21	1.31
Z3		0.046	129.5	0.60	0.35	0.59	0.91	0.96	0.99	1.27
Z4		0.040	198.5	3.10	0.29	0.54	0.79	0.82	0.95	1.11
Z5	0.26	0.043	157.5	2.40	0.57	0.88	1.03	1.26	1.26	1.34
Z6		0.046	145.5	1.40	0.46	0.73	1.07	1.15	1.23	1.26
Z7		0.040	229.5	3.10	0.44	0.69	0.97	1.09	1.06	1.24
Z8	0.27	0.043	182.0	2.70	0.35	0.58	0.82	0.81	1.01	1.17
Z9		0.046	172.0	1.60	0.63	0.91	1.23	1.31	1.29	1.42
Z10		0.040	255.5	3.80	0.54	0.87	1.00	1.16	1.12	1.33
Z11	0.28	0.043	197.5	3.50	0.50	0.72	0.94	1.13	0.99	1.29
Z12		0.046	193.5	1.60	0.37	0.69	0.83	0.89	0.95	1.10

## 2 试验方法

采用砂浆搅拌机制备赤泥基可控性低强度材料试样,先将搅拌锅壁润湿,再将称量好的普通河砂、普通硅酸盐水泥和拜耳法赤泥倒入搅拌锅中,干拌 30 s 左右后加入拌合用水,再次拌合 3 min 左右,制得赤泥基可控性低强度材料试样。

采用常用的截锥圆模等试验工具,参考 ASTM D6103《可控性低强度材料流动连续性的标准试验方法》和 GB/T 50448—2015《水泥基灌浆材料应用技术规范》中流动度检验方法进行赤泥基可控性低强度材料流动度试验,以试样底面最大扩散直径及与其垂直方向的直径的平均值作为流动度。采用容积为 1 L 的容量筒,参考 JTG 3420—2020《公路工

程水泥及水泥混凝土试验规程》中水泥砂浆拌合物泌水试验方法进行泌水率试验,以累计吸水总量与容量筒中拌合物总含水量的比值作为泌水率。成型  $\phi 100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$  无侧限抗压强度试件,参考 JGJ/T 70—2009《建筑砂浆基本性能试验方法标准》中抗压强度试验方法,分别测试试件在 1、3、7、14、21、28 d 的无侧限抗压强度。

## 3 试验结果分析

### 3.1 工作性能

赤泥基可控性低强度材料的工作性能主要是指其流动性和保水性,流动度在 160 mm 以上时可满足填充狭窄操作空间或存在死角等回填工程的要求,泌水率宜控制在 3.0% 以内。图 1 为赤泥基可控

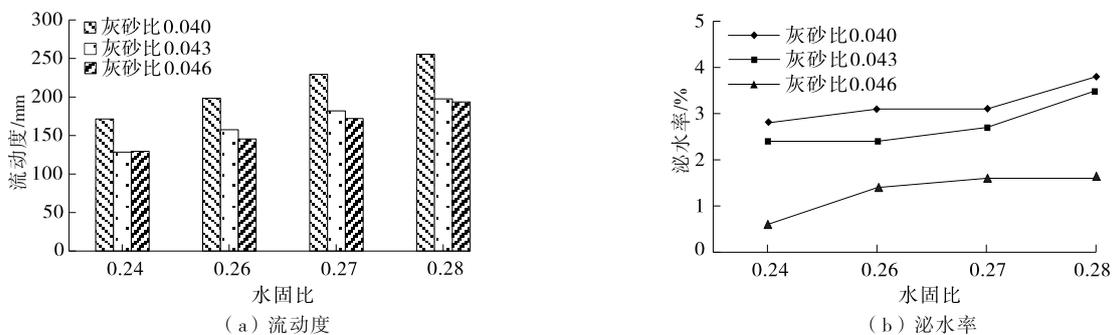


图 1 赤泥基可控性低强度材料的工作性能变化规律

性低强度材料的工作性能变化规律。

从图 1 可以看出:1) 灰砂比一定时,无论是流动度还是泌水率,赤泥基可控性低强度材料的工作性能均随着水固比的增加而增大,这与拌合用水量的增加有关。表明在水泥用量不变的情况下,拌合用水量对该材料的工作性能具有显著影响,用水量越大,流动性越大,保水性越差。2) 通常情况下,可控性低强度材料的自密实特性要求其具备较高的流动性,但泌水率太大会影响材料的正常凝结与硬化,对材料内部结构和硬化后性能也会造成危害。因此,如何在目标流动度范围内合理降低拌合物的泌

水率是保证赤泥基可控性低强度材料工作性能的关键。从图 1 来看,水固比一定时,流动度和泌水率均随着灰砂比的增加而减小。由于试验中水泥用量不变,灰砂比增加意味着砂的用量减少,赤泥用量增加,由于赤泥的多孔结构和较大的比表面积使其可吸附更多的水,从而使材料的流动性显著降低,泌水率大幅减小。说明当赤泥增加到一定用量时,对流动性的影响不大,泌水率可控制在 3.0% 以内甚至更低的水平。

### 3.2 无侧限抗压强度

图 2 为不同灰砂比下赤泥基可控性低强度材料

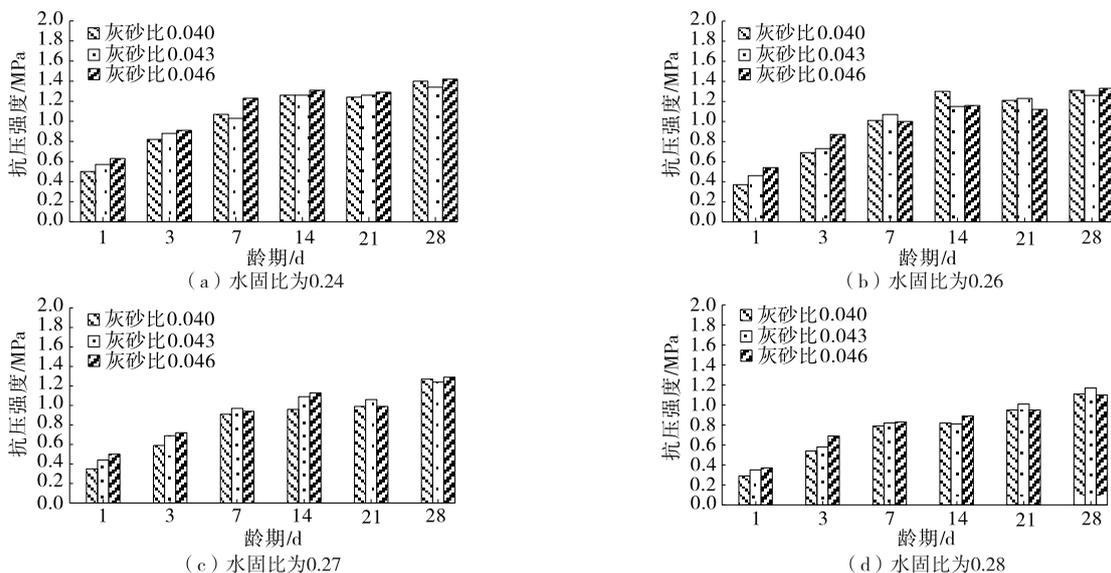


图 2 赤泥基可控性低强度材料的无侧限抗压强度变化规律

试件的无侧限抗压强度变化规律。

从图 2 可看出:1) 在同一水固比下,以不同灰砂比成型的赤泥基可控性低强度材料试件的无侧限抗压强度变化规律与水泥砂浆或砂浆材料类似,即在养护初期强度增长较快,随着养护时间的延长,强度增长速度放缓,强度与养护龄期呈显著的对数关系,相关系数在 0.9 以上。2) 在同一灰砂比和养护龄期下,水固比越大,赤泥基可控性低强度材料试件的无侧限抗压强度越低。这与混合料中水的用量增加有关,多余的自由水除从拌合物表面析出造成泌水外,还有部分存留在混合料内部形成孔隙,影响水泥石与骨料之间的骨架强度,从而削弱试件的整体强度。

从无侧限抗压强度来看,以不同水固比成型的赤泥基可控性低强度材料试件的强度基本小于 1.4 MPa,低强度对赤泥基可控性低强度材料未来的二次开挖非常有利。

## 4 结论

(1) 赤泥基可控性低强度材料的流动度和泌水率均随着拌合用水量的增加而增大,较高的流动度和较低的泌水率是该材料所期望的工作性能,在目标流动度范围内合理降低拌合物的泌水率是该材料的制备关键。

(2) 赤泥基可控性低强度材料的泌水率大都在 3.0% 以内,这与赤泥的多孔结构和较大的比表面积使其可吸附更多的水有关。

(3) 赤泥基可控性低强度材料的无侧限抗压强度不仅与养护龄期有关,还与灰砂比和水固比有关。灰砂比较小、水固比较大时,其抗压强度总体较小;灰砂比较大、水固比较小时,其抗压强度总体较大。

(4) 较低的水泥掺量有利于赤泥基可控性低强度材料在未来的二次开挖,从降低回填材料成本的

(下转第 70 页)

按式(7)求得各待选方案在理想方案上的投影值(见表2)。

表2 投影值计算结果及排序

方案编号	投影值	排序	方案编号	投影值	排序
方案1	2.085	2	方案3	1.746	4
方案2	2.140	1	方案4	1.874	3

由表2可知:方案2与理想方案之间的投影值最大,该方案为软基处理最优方案。采用自适应共振神经网络法得到的软基处理最优方案也为方案2,两者的结果完全吻合。但采用集对分析与投影寻踪相结合的方法解决高维非线性不确定性优选决策问题具有简单、快速的优势。

### 4 结语

软基处理方案优选受众多经济、技术指标的影响,是一个复杂的不确定性多指标决策问题。基于集对分析理论和投影寻踪理论建立软基处理方案集对投影寻踪模型,通过计算待选方案对理想方案的投影值来评价待选方案,可有效避免待选方案评价指标高维数据处理的复杂性,使结果更合理可靠。实例应用表明,该模型应用于软基处理方案优选有效、可行,是一种快速、准确的软基处理方案决策方法。

### 参考文献:

[1] 刘汉龙,赵明华.地基处理研究进展[J].土木工程学报,

(上接第67页)

角度,也应控制水泥用量,从而避免该材料的强度和成本过高。

### 参考文献:

[1] 孙兆云,程钰.山东省赤泥堆存与综合利用现状[J].山东交通科技,2017(2):99-100+107.

[2] 程钰.赤泥资源化公路工程应用[M].济南:山东大学出版社,2018.

[3] 杨家宽,侯建,齐波,等.铝业赤泥免烧砖中试生产及产业化[J].环境工程,2006,24(4):52-55.

[4] 任根宽.用改性赤泥为原料制备水泥[J].化工环保,2008,28(6):526-530.

[5] 秦旻,陆兆峰,宋永朝.赤泥在道路工程中的应用研究[J].公路与汽运,2008(6):81-84.

[6] 孙兆云,韦金城,程钰.改性拜耳法赤泥路基的模量特

2016,49(1):96-115.

[2] 张龙云,张强勇,杨尚阳.灰色变权模糊优选模型在软基加固中的应用[J].水电能源科学,2013,31(1):131-134.

[3] 杨逾,郑志明.基于范例推理的软基处理评价方案研究[J].长江科学院院报,2015,32(12):93-97.

[4] 吾斯曼·若孜,吐尔尼沙·尼亚孜,陈法安.基于TOPSIS的高速公路软基处理方案评价[J].交通标准化,2014,42(7):40-42.

[5] 陈向阳,夏元友,鄢恒珍.基于ART网络的高速公路软基处理决策模型[J].武汉理工大学学报,2007,29(2):104-106.

[6] 张留俊,黄晓明,尹利华.公路软基处理方案多层次模糊综合评判方法研究[J].公路交通科技,2007,24(3):35-38.

[7] 赵克勤.集对分析及其初步应用[M].杭州:浙江科学技术出版社,2000.

[8] 汪明武,金菊良,周玉良.集对分析耦合方法与应用[M].北京:科学出版社,2014.

[9] 田铮.投影寻踪方法与应用[M].西安:西北工业大学出版社,2008.

[10] 冯玉国,王渭明.基于集对分析同一度的基坑支护方案综合评价[J].岩土工程学报,2008,30(9):1389-1392.

[11] 刘展瑞,张潭,罗克文,等.基于沉降实测数据的软土地基土工参数优化计算[J].公路与汽运,2021(6):88-91+94.

[12] 严黎.南方湖区高速公路吹砂填筑路基关键技术研究[J].公路与汽运,2021(3):78-81+86.

收稿日期:2021-05-18

性研究[J].中外公路,2018,38(2):54-57.

[7] 张宏,凌建明,钱劲松.可控性低强度材料(CLSM)研究进展[J].华东公路,2011(6):49-54.

[8] 范猛.非压实回填土基本性能及应用研究[D].北京:北京工业大学,2009.

[9] 贾冬冬.低强度流动性建筑垃圾回填材料基本性能研究[D].北京:北京工业大学,2014.

[10] 冉晋,张金喜,王建刚,等.快硬性建筑垃圾流动化回填材料制备与性能[J].公路,2016(3):190-195.

[11] 刘万超,闫琨,和新忠,等.拜耳法赤泥制备地聚物类无机聚合材料的研究进展[J].硅酸盐通报,2016,35(2):453-457.

[12] 郑磊.赤泥基矿井喷浆材料的研制及性能优化[D].徐州:中国矿业大学,2021.

收稿日期:2021-04-21