

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2022.03.041

基于正交设计的钢渣黏土承载比试验研究

郭鸥¹, 张红日², 蓝天助^{2*}, 李晓明²

(1.防城港交通运输局, 广西 防城港 538000; 2.广西交通科学研究院有限公司, 广西 南宁 530000)

摘要:为了研究钢渣黏土的承载比特性,以防城港某钢铁厂的陈化转炉钢渣和某一级公路施工现场的黏土为原材料,综合钢渣和黏土的工程特性,考虑钢渣相对掺入量、陈化时间、钢渣粒径作为因子,进行 CBR 正交试验。研究表明:影响掺陈化转炉钢渣黏土的 CBR 值最大的因素是钢渣相对掺入量,其次为钢渣粒径,再次为钢渣陈化时间,研究分析了不同因子下浸水对掺陈化转炉钢渣黏土 CBR 值的影响,钢渣相对掺入比例对钢渣黏土浸水前后 CBR 值的比值影响较大,而钢渣陈化龄期和钢渣最大粒径对其影响较小。

关键词:工程材料; CBR 值; 正交试验; 钢渣黏土; 影响因素

中图分类号: U414 **文献标志码:** A

钢铁产业在中国经济发展中起着重要的作用。近几年,由于经济发展的需要,中国钢产量逐年增加,而在冶炼钢铁过程中,会产生一定的钢渣,其数量为钢铁产量的 12%~20%^[1],对钢渣的处理,目前大部分采用露天堆放,造成了资源浪费和环境污染^[2],所以,寻找合理的钢渣固体废弃物利用方法成为当今的热点议题之一。

近年来,中国道路工程飞速发展,对道路材料的需求越来越大,如果将钢渣应用于道路工程建设,不仅可以提高钢铁废渣的利用率,同时还能节省道路建设的材料费,对此,国内外在这方面已做了不少研究工作,但目前的研究多数是关于纯钢渣回填及钢渣替代碎石制作钢渣混凝土等方面的利用^[3],对钢渣掺土方面的研究较少,若将钢渣黏土应用于道路建设中,也将产生

较大的经济效益。

CBR 值是评估公路路基填料的潜在强度的重要指标^[4-5],该文以钢渣的掺入比例、钢渣陈化时间及钢渣粒径范围为影响因子,研究钢渣黏土各影响因子在不同水平下的击实特性及 CBR 值变化规律,探讨浸水对钢渣黏土 CBR 值的影响,为钢渣黏土在道路工程中的应用提供参考。

1 试验方案设计

1.1 试验原材料

1.1.1 钢渣

试验钢渣采用存放了 3、9 和 15 个月的转炉钢渣,其化学成分如表 1 所示。

表 1 陈化 3、9、15 个月钢渣主要化学成分

陈化时 间/月	化学成分/%							
	CaO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	Mn	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	其他
3	44.46	20.280	17.950	6.460	3.655	3.565	1.58	2.05
9	42.62	21.425	18.585	6.345	3.470	3.445	1.86	2.25
15	40.50	22.270	19.500	6.240	3.350	3.320	2.10	2.72

该钢渣 f-CaO 含量分别为 2.86%、1.79%、1.25%,CJJ 35—1990《钢渣石灰类道路基层施工及验收规范》^[6]要求回填料用钢渣的 f-CaO 含量不应大于 3%,试验所用钢渣的 f-CaO 含量满足规范要求。

收稿日期:2021-08-23(修改稿)

基金项目:广西科学研究与技术开发计划项目(编号:桂科攻 1598009-4);2019 年崇左市科技计划项目(编号:崇科 FA2019008);2020 年度第三批广西交通运输行业重点科技项目清单——科技成果推广项目(编号:桂科 AD19245014)

作者简介:郭鸥,男,硕士. E-mail:569854557@qq.com

* 通信作者:蓝天助,男,硕士,工程师. E-mail:1453622732@qq.com

不同陈化时间的转炉钢渣,其物理力学特性略有差异,表 2 为 0~9.5 mm 粒径不同陈化时间钢渣的基本物理力学指标,钢渣具有坚固性良好,密度较大、易吸水等特点。

表 2 钢渣的物理指标

陈化时 间/月	压碎指 标/%	坚固性/ %	表观密度/ (g·cm ⁻³)	吸水率/ %
3	17.7	6.2	3 560	3.91
9	18.4	4.9	3 491	3.45
15	19.4	2.0	3 389	1.90

为了考察不同级配对钢渣黏土击实及 CBR 特性的影响,试验选用钢渣的粒径范围为 0~2.36、0~4.5、0~9.5 mm,其级配曲线如图 1 所示。从钢渣材料的颗粒组成来看,该钢渣属于粗类土。

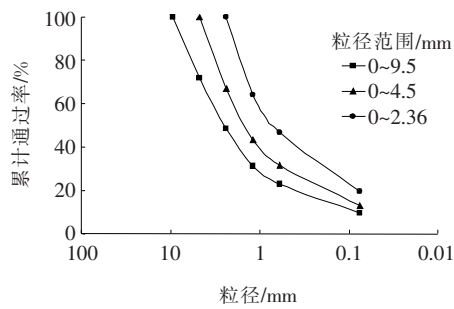


图 1 试验用钢渣颗粒级配曲线

1.1.2 黏土

土样取自防城港某一级公路的施工现场,取样深度为 0.2~0.6 m,其基本物理指标为:土粒相对密度为 2.67,液限 37.9%,塑限 18.3%,塑性指数 17.7。根据土工试验标准 JTG E40—2007^[7],该土体可以归为低液限黏土,土体以细粒为主,其级配组成见表 3。

表 3 土的颗粒级配

粒径/ mm	小于某粒径土粒 质量百分比/%	粒径/ mm	小于某粒径土粒 质量百分比/%
2.36	100	0.3	67.1
1.18	91.2	0.15	52.1
0.6	78.5	0.075	32.8

1.2 试验方法

1.2.1 试验方案设计

为了研究钢渣黏土的承载比特性影响因素,结合钢渣和黏土的特点,选取钢渣掺入比例、陈化时间、钢渣最大粒径作为因子,各影响因素对应的水平数为 3,

钢渣掺入比例(因素 A)水平数为 30%、50%、70%,钢渣陈化时间(因素 B)水平数为 3、9、15 个月,钢渣粒径(因素 C)水平数为 0~2.36、0~4.75、0~9.5 mm,常规试验需要进行 3³=27 组试验,为了减少试验数量,可采取正交试验^[8]。根据各因素及水平数的特点,选用 4 因素 3 水平的正交表 L₉(3⁴),试验因素与水平如表 4 所示。

表 4 钢渣黏土正交试验因素水平

水平	钢渣掺量 (A)/%	陈化时间 (B)/月	钢渣粒径 (C)/mm
1	30	3	0~2.36
2	50	9	0~4.75
3	70	15	0~9.5

1.2.2 具体试验过程

(1) 击实试验

取足量的黏土和钢渣集料,在 105 ℃ 下烘干,烘干后,根据钢渣掺量及粒径要求过筛,黏土过 2 mm 筛。在击实试验开始前,先预估各配比试样最佳含水量,根据钢渣及黏土的特性,估算得钢渣黏土的最佳含水量为 7%~17%。钢渣黏土试样的含水量设置为 7%、9%、11%、13%、15%、17%,依照相应含水量掺水搅拌。按规范要求进行闷料后,选用重型击实进行击实试验,获得 9 种配合比的掺钢渣稳定土的最大干密度与最优含水率。

(2) CBR 试验

取足量的钢渣和黏土,按各自最佳含水率进行配料,拌和均匀以后进行闷料 12 h,采用重型击实仪,按 3 层击实法,每层 96 次进行击实,击实完成后,不浸水条件下的 CBR 试验则将试样置于强度仪升降台面,进行贯入度试验,开始时施加 45 N 预加载后,读取测力计和测量贯入深度的百分表的初始读数。然后以 1~1.25 mm/min 的速率贯入试样,同时记录测力计读数和相应的贯入深度读数,当贯入量达到 5 mm 试验结束。浸水条件下的 CBR 试验则需要将击实后的试件置于加 4 块荷载板的多孔板上,再将其放置在水槽中浸泡 96 h 后按上述步骤进行贯入度试验。

2 试验结果与分析

2.1 击实试验结果

钢渣黏土击实试验结果见表 5。由表 5 可得:①忽略其他影响因素,单从钢渣掺入比例来看,转炉钢渣

掺入量从 30%增大到 70%时,其最大干密度增加了 0.203 g/cm³,随着钢渣掺入量比例的增加,掺陈化转炉钢渣黏土的最大干密度增大;② 考虑钢渣粒径范围对钢渣黏土最大干密度影响时,钢渣最大粒径由 2.36 cm 增加到 9.5 cm,其击实后的最大干密度增加了 0.132 g/cm³,干密度随钢渣粒径的增大而增大;③ 钢渣陈化龄期对钢渣黏土的最大干密度影响较小,不同

陈化时间的钢渣掺入黏土进行击实试验,其最大干密度波动值为 0.012 g/cm³,相对钢渣掺入比例和钢渣粒径范围对钢渣黏土击实后的最大干密度影响较小。所以对于掺入了陈化转炉渣的钢渣黏土的最大干密度,其影响程度为:钢渣相对掺入量>钢渣粒径>钢渣陈化龄期。

表 5 钢渣黏土击实试验结果

编号	钢渣掺量/%	陈化龄期/月	粒径/mm	试验误差	最佳含水量/%	最大干密度/(g·cm ⁻³)
1	1(30)	1(3)	1(0~2.36)	1	15.358	1.837 0
2	1(30)	2(6)	2(0~4.75)	2	15.168	1.900 0
3	1(30)	3(9)	3(0~9.5)	3	15.140	1.989 5
4	2(50)	1(3)	2(0~4.75)	3	16.210	2.021 2
5	2(50)	2(6)	3(0~9.5)	1	15.562	2.064 1
6	2(50)	3(9)	1(0~2.36)	2	17.608	1.960 0
7	3(70)	1(3)	3(0~9.5)	2	16.296	2.187 5
8	3(70)	2(6)	1(0~2.36)	3	18.966	2.049 0
9	3(70)	3(9)	2(0~4.75)	1	17.966	2.099 6
最大干密度	K ₁	5.727	6.046	5.846	6.001	
	K ₂	6.045	6.013	6.021	6.048	
	K ₃	6.336	6.049	6.241	6.060	
	k ₁	1.909	2.015	1.949	2.000	
	k ₂	2.015	2.004	2.007	2.016	
	k ₃	2.112	2.016	2.080	2.020	
	极差	0.203	0.012	0.132	0.020	

由表 5 可知:影响掺陈化转炉钢渣黏土击实特性的参数主要为钢渣掺量和钢渣粒径范围,钢渣陈化龄期对击实结果影响较小。

2.2 CBR 正交试验结果分析

2.2.1 极差分析

9 种配比的钢渣黏土浸水与不浸水条件下的 CBR 值见表 6,不浸水条件下 CBR 值为 37.2%~107%,浸水条件下 CBR 值为 18%~93%,不同配比条件下的 CBR 值波动较大。当试验所用钢渣粒径范围为 0~9.5 cm,陈化时间为 3 个月,钢渣相对掺入量为 70%时,其未浸水和浸水条件下的 CBR 值达到最大值,分别为 107%、93%。当试验所用的钢渣粒径范围为 0~2.36 mm,陈化时间为 3 个月,钢渣相对掺入量为 30%时,其未浸水和浸水条件下的 CBR 值达到最小值,分别为 37.2%、18%。

通过极差分析,可以获得影响钢渣黏土 CBR 值的主次关系,极差值越大,该因素对钢渣黏土 CBR 值的影响就大,反之亦然。3 个因素中对掺陈化转炉钢渣黏土浸水与未浸水条件下的 CBR 值的影响排序为:钢渣相对掺入量>钢渣粒径>钢渣陈化时间。

2.2.2 方差分析

正交试验中引起钢渣黏土 CBR 值波动的因素有钢渣相对掺入量的不同水平、钢渣陈化时间的不同水平、钢渣粒径的不同水平及随机误差。为了定量分析各因子对钢渣黏土 CBR 值的影响,用 F 统计量检验各因子的显著性。方差计算结果如表 7 所示。设显著性水平 $\alpha=0.1,0.05,0.01$,查表得^[9]: $F_{0.01}(2,2)=98.5,F_{0.05}(2,2)=19.0,F_{0.1}(2,2)=9.0$,由表 7 计算结果可知:陈化转炉钢渣相对掺入量对钢渣黏土浸水与不浸水的 CBR 值的影响在显著性水平 0.01 上是

表 6 钢渣黏土 CBR 值正交试验结果

编号	钢渣掺量/%	陈化龄期/月	粒径/mm	试验误差	CBR/%	
					不浸水	浸水
1	1(30)	1(3)	1(0~2.36)	1	37.2	18.0
2	1(30)	2(6)	2(0~4.75)	2	43.2	24.0
3	1(30)	3(9)	3(0~9.5)	3	48.2	30.0
4	2(50)	1(3)	2(0~4.75)	3	70.0	49.0
5	2(50)	2(6)	3(0~9.5)	1	63.5	49.5
6	2(50)	3(9)	1(0~2.36)	2	54.0	40.0
7	3(70)	1(3)	3(0~9.5)	2	107.0	93.0
8	3(70)	2(6)	1(0~2.36)	3	89.0	75.0
9	3(70)	3(9)	2(0~4.75)	1	96.6	83.0
CBR (不浸水)	K_1	128.60	214.20	180.20	197.30	
	K_2	187.50	195.70	209.80	204.20	
	K_3	292.60	198.80	218.70	207.20	
	k_1	42.87	71.40	60.07	65.77	
	k_2	62.50	65.23	69.93	68.07	
	k_3	97.53	66.27	72.90	69.07	
	极差	54.67	6.17	12.83	3.30	
CBR (浸水)	K_1	72.00	160.00	133.00	150.50	
	K_2	138.50	148.50	156.00	157.00	
	K_3	251.00	153.00	172.50	154.00	
	k_1	24.00	53.33	44.33	50.17	
	k_2	46.17	49.50	52.00	52.33	
	k_3	83.67	51.00	57.50	51.33	
	极差	59.67	3.83	13.17	2.17	

表 7 钢渣黏土 CBR 值方差分析结果

项目		偏差平方和	自由度	均方和	F	显著性
CBR (未浸水)	钢渣掺量	4 601.25	2	2 300.62	267.83	*
	陈化龄期	65.40	2	32.71	3.81	
	粒径	270.85	2	135.42	15.77	*
	试验误差 e	17.20	2	8.59		
CBR (浸水)	钢渣掺量	5 457.72	2	2 728.86	773.54	*
	陈化龄期	22.39	2	11.19	3.17	
	粒径	262.39	2	131.19	37.19	*
	试验误差 e	7.06	2	3.53		

注：* 表示该因子对目标值影响显著。

显著的,陈化转炉钢渣的粒径对钢渣黏土浸水与不浸水的 CBR 值的影响在显著性水平 0.1 上是显著的,转炉钢渣的陈化时间对钢渣黏土的 CBR 值的影响不显著。

2.3 浸水对钢渣黏土 CBR 值影响分析

为了预测钢渣黏土路基填料在最恶劣情况下的 CBR 值及水稳定性,根据 JTG E40—2007《公路土工试验规程》的规定,室内 CBR 试验在其试件成型后的

浸水时间为 96 h,使试件接近饱和,再进行贯入度试验。CBR 试验的试件在浸水 96 h 后,其饱和度可达 75%~95%^[10]。为了表征钢渣黏土浸水前后 CBR 值的变化,现定义无量纲的量 K 如下:

$$K = \text{浸水后 CBR 值} / \text{未浸水 CBR 值} \quad (1)$$

2.3.1 极差分析

通过极差分析,可以获得影响掺陈化转炉钢渣黏土 K 值的主次关系如表 8 所示。3 个因子中对掺陈化转炉钢渣黏土 K 值的影响排序为:钢渣相对掺入量>钢渣粒径>钢渣陈化时间。

表 8 K 值正交极差分析结果

编号	钢渣掺量/%	陈化龄期/月	粒径/mm	试验误差	K 值
1	1(30)	1(3)	1(0~2.36)	1	0.48
2	1(30)	2(6)	2(0~4.75)	2	0.56
3	1(30)	3(9)	3(0~9.5)	3	0.62
4	2(50)	1(3)	2(0~4.75)	3	0.70
5	2(50)	2(6)	3(0~9.5)	1	0.78
6	2(50)	3(9)	1(0~2.36)	2	0.74
7	3(70)	1(3)	3(0~9.5)	2	0.87
8	3(70)	2(6)	1(0~2.36)	3	0.84
9	3(70)	3(9)	2(0~4.75)	1	0.86
K_1	1.66	2.05	2.07	2.12	
K_2	2.22	2.18	2.11	2.17	
K_3	2.57	2.22	2.27	2.17	
k_1	0.55	0.68	0.69	0.71	
k_2	0.74	0.73	0.70	0.72	
k_3	0.86	0.74	0.76	0.72	
极差	0.30	0.06	0.07	0.01	

2.3.2 各因素对 K 值的影响分析

由表 8 可知:

(1) 随着钢渣掺入比例的增加, K 值逐渐增大,且钢渣掺入比例为 30%~50%的 K 变化幅度比掺入比例为 50%~70%区间大,说明随着陈化转炉钢渣掺入比例的增加,浸水条件对钢渣黏土的 CBR 值影响减小,钢渣黏土的水稳定性越好。

(2) 钢渣陈化龄期和钢渣最大粒径对掺陈化转炉钢渣黏土的 K 值影响较小。

3 结论

综合钢渣、黏土的特性,以钢渣相对掺入量、钢渣

陈化时间、钢渣粒径范围为影响因子,以 $L_9(3^4)$ 为正交表设计 9 组钢渣黏土配合比,对钢渣黏土进行 CBR 试验,得到以下结论:

- (1) 击实试验研究显示,转炉钢渣相对掺入量、钢渣陈化时间、钢渣粒径范围都会影响钢渣黏土的最大干密度,各因子对击实特性的影响排序为:钢渣相对掺入量>钢渣粒径>钢渣陈化时间。
- (2) 极差分析显示:转炉钢渣相对掺入量、钢渣陈化时间、钢渣粒径范围对钢渣黏土浸水与未浸水条件下的 CBR 值的影响排序为:钢渣相对掺入量>钢渣粒径>钢渣陈化时间。方差分析显示,转炉钢渣相对掺入量和钢渣粒径对钢渣黏土浸水与不浸水的 CBR 值的影响具有显著性,转炉钢渣的陈化时间对钢渣黏土的 CBR 值的影响不显著。
- (3) 通过对浸水因素对钢渣黏土 CBR 值影响分析,陈化转炉钢渣相对掺入比例对钢渣黏土浸水前后 CBR 值的比值影响较大,而钢渣陈化龄期和钢渣最大粒径对其影响较小,且研究显示,随着陈化转炉钢渣掺入比例的增加,浸水条件对钢渣黏土的 CBR 值影响越小,钢渣黏土的水稳定性越好。

参考文献:

[1] 俞海明,王强. 钢渣处理与综合利用[M]. 北京:冶金工业出版社,2015.

[2] 赵计辉,阎培渝. 钢渣的体积安定性问题及稳定化处理的国内研究进展[J]. 硅酸盐通报,2017,36(2):477—484.

[3] 胡谋鹏. 钢渣工程特性及钢渣路堤模型膨胀变形研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2006.

[4] 杨广庆,高民欢,张新宇. 高速公路路基填料承载比影响因素研究[J]. 岩土工程学报,2006,28(1):97—100.

[5] 陈柏年,朱凤艳,韩勤. CBR 试验内在机理研究及影响因素的分析[J]. 交通标准化,2001(1):28—30.

[6] 武汉市市政工程设计研究院. 钢渣石灰类道路基层施工及验收规范:CJJ 35—1990[S]. 北京:中国建筑标准出版社,1990.

[7] 交通部公路科学研究院. 公路土工试验规程:JTG E40—2007[S]. 北京:人民交通出版社,2007.

[8] 蔡鑫,张小旺,李新明. 掺钢渣稳定土的击实性能试验研究[J]. 路基工程,2017(2):71—74.

[9] 茆诗松,周纪芄,陈颖. 试验设计[M]. 2 版. 北京:中国统计出版社,2012.

[10] 杨广庆. 承载比(CBR)试验技术分析[J]. 铁道建筑,2004,44(6):51—52.