

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.080



开放科学(资源服务)标识码OSID:



钢渣-杂填土基层材料配合比优化试验研究

黄伟¹, 张耄耄¹, 张丽¹, 唐钢¹, 赵鲁卿², 王宗森²

(1. 安徽工业大学 建筑工程学院, 安徽 马鞍山 243032; 2. 安徽马钢嘉华新型建材有限公司, 安徽 马鞍山 243000)

摘要:以杂填土、钢渣、矿渣微粉为原料,采用土体固化技术混拌制备钢渣-杂填土基层材料。开展钢渣、混凝土破碎料、素土等主料对基层材料强度的耦合影响试验,构建回归模型,得到主料最优掺入比例,试验验证表明,回归模型预测值误差小于2%;以钢渣、混凝土破碎料、水泥、固化剂为因素开展正交试验,得到的最优结果与强度耦合影响试验基本一致,从而确定钢渣-杂填土最优配合比。最优配合比试件试验结果表明:钢渣-杂填土强度随龄期增长显著提升,30 d 高温水浴膨胀率仅为1.03%。X射线衍射分析(XRD)及扫描电子显微镜(SEM)测试表明:矿渣微粉中SiO₂与钢渣中f-CaO反应生成水化硅酸钙(C-S-H)凝胶,同时发现土壤固化剂对土体的改性可有效抑制钢渣膨胀;C-S-H凝胶填充于混凝土破碎料、钢渣、土颗粒间,增加了钢渣-杂填土基层材料密实度,使其强度得以提高。

关键词:道路工程;钢渣-杂填土;强度试验;微观结构

中图分类号:TU521.3;U414 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2022)06-0012-10

Experimental study on optimization of mix ratio for steel slag-miscellaneous fill base material

HUANG Wei¹, ZHANG Maodie¹, ZHANG Li¹, TANG Gang¹, ZHAO Luqing²,
WANG Zongsen²

(1. Institute of Civil Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243032, Anhui, P. R. China;

2. Anhui Maanshan Jiahua New Building Materials Co., Ltd., Maanshan 243000, Anhui, P. R. China)

Abstract: Miscellaneous fill, steel slag, and slag powder were mixed to prepare steel slag-miscellaneous fill base material by soil solidification. Firstly, coupling influence test of main materials including steel slag, concrete crushed material and plain soil on the strength of base materials were conducted, regression model was established to obtain optimal mixing ratio. Experimental verification shows that the prediction error was within 2%. Secondly, the orthogonal test was carried out with steel slag, concrete crushing material, cement as well as curing agent as the factors, and the optimal results obtained were basically consistent with the strength coupling influence test. Thus, the optimal mix ratio of steel slag and miscellaneous fill was determined. The test

收稿日期:2020-10-19

基金项目:安徽省高校自然科学研究重大项目(KJ2018ZD006);安徽省住房城乡建设科学技术计划(2018YF-007)

作者简介:黄伟(1963-),男,教授,主要从事道路材料研究,E-mail:hwpsagd@163.com。

Received:2020-10-19

Foundation items: Major Projects of Natural Science Research of Anhui Universities (No. KJ2018ZD006); Anhui Housing Urban and Rural Construction Science and Technology Program Project (No. 2018YF-007)

Author brief: HUANG Wei (1963-), professor, main research interest: road material, E-mail: hwpsagd@163.com.

results of the optimal sample showed that the strength increased significantly with age, which presented expansion rate of 1.03% after treatment 30 d high temperature water bath. X-ray diffraction analysis (XRD) and scanning electron microscope (SEM) test results show that SiO_2 in slag powder reacted with f-CaO in steel slag to form hydrated calcium silicate gel (C-S-H). It was also confirmed that the modification of the soil solidification agent to the soil can effectively prevent the expansion of steel slag; C-S-H gel is filled in the space of the broken concrete, steel slag as well as soil particles to increase the compactness of the steel slag-miscellaneous fill base material and thus enhance its strength.

Keywords: road engineering; steel slag-miscellaneous fill; strength test; microstructure

随着国民经济建设的快速发展和国家环境整治力度的逐步加大,诸如钢渣、建筑垃圾等固体废弃物排放所造成的土地占用、环境污染、治理成本攀升等^[1-2]已成为当前亟待解决的重要问题。充分发挥钢渣、建筑垃圾等固体废弃物材料特性,通过技术处理手段,使之应用于道路工程领域,是实现固废资源大宗回用的重要途径。建筑垃圾杂填土是由渣土、废旧混凝土、砖瓦石块等废弃物组成的一种结构复杂、成分多样的特殊土,具有亲水性强、成分复杂等工程特性。研究发现,建筑垃圾作为回填料时,在适当条件下,其抗压强度与水固比和灰砂比之间拥有较好的幂指数关系^[3];当作为再生混凝土骨料适量掺入时,混凝土力学性能满足道路面层要求,但当掺量超过50%时,再生混凝土抗折强度显著降低^[4]。钢渣具有潜在胶凝性,能够提高土体混合料的整体性及力学性能^[5],但其安定性较差,所含 f-CaO 等成分会引起体积膨胀,直接应用于道路工程中存在风险^[6-8]。近年来,随着土壤固化研究的发展^[9-13],结合土体固化技术复掺制备钢渣混合土基层材料取得了一定的进展,所制备的材料力学性能优异、体积安定性良好,满足规范关于高等级公路特重交通路面基层强度要求^[14-15]。

笔者将杂填土、钢渣、矿渣微粉等复掺混拌制备钢渣-杂填土基层材料并开展配合比优化试验研究。考虑到材料内部耦合影响较为复杂,相关研究文献也较少,首先参考混料设计方法^[16-17]开展钢渣、素土、混凝土碎料等主料对基层材料强度耦合影响试验,并在此基础上以固化剂、水泥、混凝土破碎料、钢渣等为因素开展正交试验,进一步探讨钢渣杂填土优化配合比。

1 原材料与试验内容

1.1 原材料

1.1.1 杂填土 为便于定量分析,杂填土采用废旧混凝土破碎料和素土拌制而成。素土选自安徽

省马鞍山市某建筑工地的回填土,液塑限测定结果:液限(W_L)为44.7%,塑限(W_P)为22.1%,塑性指数 I_P 为22.6;土体性质为低液限黏土。混凝土破碎料为某项目改造工地拆除的混凝土,取破碎后过4.75 mm标准筛的筛下料,主要成分及含量如表1所示。

表1 混凝土破碎料主要成分及含量

Table 1 Main components and content of broken concrete

%							
SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	CaO	MgO	Na_2O	P_2O_5
41.28	12.42	5.27	0.77	32.14	1.97	1.84	0.23

1.1.2 钢渣 试验采用马鞍山钢铁股份公司产生的热闷渣,堆放时间不足1月,取过4.75 mm标准筛的筛下料。采用XRF测试对钢渣化学成分进行分析,结果见表2。

表2 钢渣化学成分及含量

Table 2 Chemical composition and content of steel slag

%							
CaO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	MgO	SO_3	P_2O_5
58.13	16.31	1.89	14.36	1.03	3.58	0.35	1.54

1.1.3 矿渣微粉 矿渣微粉采用马钢嘉华新型建材公司生产的S95级高炉矿渣微粉,其表观密度为2 900 kg/m^3 ,比表面积为400 m^2/kg ,主要成分见表3。

表3 矿渣微粉成分及含量

Table 3 Composition and content of slag powder

%									
SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	CaO	MgO	SO_3	P_2O_5	Loss	
33.4	16.1	0.28	0.60	38.3	7.89	2.42	0.028	0.56	

1.1.4 水泥 水泥采用安徽海螺42.5普通硅酸盐水泥,比表面积为332 m^2/kg ,初凝时间为270 min,终凝时间为390 min,各项强度指标均满足规范

要求。

1.1.5 土壤固化剂 试验所用土壤固化剂为中国产易孚森离子型土壤固化剂,以1:200用水稀释后使用,凝结时间影响系数比为108.1%,抗压强度比为139.3%,水稳定性系数比为115.3%,各项指标满足土壤固化外加剂的要求。

1.2 材料制备与试验内容

材料制备步骤见图1。按内掺计量法将钢渣-杂填土主料钢渣、杂填土(混凝土破碎料与素土按不同比例配制)拌和得到初拌料;在初拌料中掺入矿渣微粉得到中间料;按照外掺计量法将土壤固化剂和水水泥分别掺入,得到钢渣-杂填土混合料。

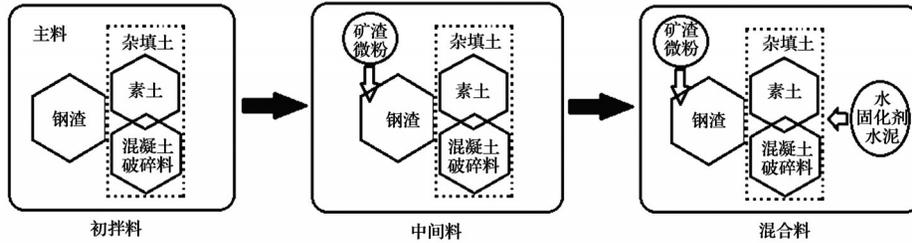


图1 钢渣-杂填土材料配制步骤

Fig. 1 Steel slag-miscellaneous fill material configuration steps

击实试验:依据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[18]中击实试验标准,利用CSK-VI型击实仪,选择重型II-2方法,确定各配合比下钢渣-杂填土最大干密度及最佳含水率。

强度试验:依据《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E51—2009)^[19]制备试件,试验所用圆柱体试件尺寸为50 mm×50 mm,用于测试7 d无侧限抗压强度、28 d间接抗拉强度。

安定性试验:依据《钢渣稳定性检测方法》(GB/T 24175—2009)^[20],开展试验组与对照组的安定性检测,以10 d高温水浴膨胀率进行评判,采用重型击实试验标准试件成型,圆柱体试件尺寸为152 mm×170 mm,进行3次平行试验,结果取平均值。

X射线衍射试验:采用德国SMARTAPEX II型Cu靶X射线衍射仪测试养护28 d的钢渣混合土最优配合比试件及其同配合比干粉混合料样品图谱,扫描范围 2θ 为 $5^\circ\sim 80^\circ$,扫描速率为 $0.01^\circ/\text{s}$ 。

扫描电镜(SEM)试验:采用日本JSM-6490LV型扫描电镜进行微观形貌测试,分析钢渣-杂填土膨胀抑制原理、内部结构变化及强度增长机制。

1.3 配合比设计

1.3.1 主料耦合影响试验设计 参考混料设计方法^[16-17],将钢渣(X)、混凝土破碎料(Y)、素土(Z)等作为主料,开展主料对钢渣-杂填土基层材料强度耦合影响试验,其中,矿渣微粉为钢渣掺入量的40%,土壤固化剂为0.020%、水泥为5%。钢渣掺量占比范围取30%~60%,杂填土掺量占比范围取40%~70%,其中,混凝土破碎料在杂填土中掺量占

比范围取30%~70%,具体配合比见表4,表中 $Y_{n_1}Z_{n_2}$ 下标 n_1 、 n_2 分别为混凝土破碎料与素土在杂填土中的占比, $n_1+n_2=1$ 。

表4 主料耦合影响试验配合比设计

Table 4 Design of mixing proportion in the experiment of the influence of admixture coupling

序号	杂填土/%	钢渣/%	序号	杂填土/%	钢渣/%
1	70($Y_{0.3}Z_{0.7}$)	30	11	50($Y_{0.5}Z_{0.5}$)	50
2	60($Y_{0.3}Z_{0.7}$)	40	12	40($Y_{0.5}Z_{0.5}$)	60
3	50($Y_{0.3}Z_{0.7}$)	50	13	70($Y_{0.6}Z_{0.4}$)	30
4	40($Y_{0.3}Z_{0.7}$)	60	14	60($Y_{0.6}Z_{0.4}$)	40
5	70($Y_{0.4}Z_{0.6}$)	30	15	50($Y_{0.6}Z_{0.4}$)	50
6	60($Y_{0.4}Z_{0.6}$)	40	16	40($Y_{0.6}Z_{0.4}$)	60
7	50($Y_{0.4}Z_{0.6}$)	50	17	70($Y_{0.7}Z_{0.3}$)	30
8	40($Y_{0.4}Z_{0.6}$)	60	18	60($Y_{0.7}Z_{0.3}$)	40
9	70($Y_{0.5}Z_{0.5}$)	30	19	50($Y_{0.7}Z_{0.3}$)	50
10	60($Y_{0.5}Z_{0.5}$)	40	20	40($Y_{0.7}Z_{0.3}$)	60

1.3.2 正交试验设计 基于主料耦合影响试验结果,以钢渣-杂填土7 d无侧限抗压强度及28 d间接抗拉强度为目标,将固化剂(A)、水泥(B)、混凝土破碎料(C)、钢渣(D)作为因素,每一因素取3个水平,开展4因素3水平正交试验,各组配合比中矿渣微粉掺量均取为定值,并按掺入钢渣质量的40%计,正交因素水平表见表5。

2 试验结果及分析

2.1 配合比试验

2.1.1 主料耦合影响试验 通过击实试验,测得

表 5 正交设计因素水平
Table 5 Orthogonal design factor levels

水平	因素			
	A/%	B/%	C/%	D/%
(1)	0.016	3	50	40
(2)	0.020	5	60	50
(3)	0.024	7	70	60

主料耦合影响各配合比最佳含水率和最大干密度,并据此开展 7 d 无侧限抗压、28 d 间接抗拉强度试验。主料耦合影响试验结果见表 6,对表中的数据

表 6 主料耦合影响试验结果

Table 6 Compaction test and strength test results

序号	X/%	Y/%	Z/%	最佳含水量/%	最大干密度/(g·cm ⁻³)	7 d 无侧限抗压强度/MPa	28 d 间接抗拉强度/MPa
1	30	21	49	15.2	2.031	5.07	1.33
2	40	18	42	14.3	2.075	5.96	1.52
3	50	15	35	13.9	2.124	7.21	1.80
4	60	12	28	13.3	2.159	6.87	1.57
5	30	28	42	12.9	2.089	6.36	1.48
6	40	24	36	12.2	2.124	7.98	1.59
7	50	20	30	12.0	2.152	10.25	1.86
8	60	16	24	11.6	2.177	8.19	1.72
9	30	35	35	14.1	1.958	7.06	1.51
10	40	30	30	12.1	1.969	9.02	1.77
11	50	25	25	11.8	2.068	11.20	1.92
12	60	20	20	11.2	2.114	9.09	1.72
13	30	42	28	13.1	2.076	6.92	1.57
14	40	36	24	12.2	2.114	9.60	1.79
15	50	30	20	11.7	2.148	11.93	2.05
16	60	24	16	11.0	2.203	9.38	1.81
17	30	49	21	14.3	2.024	5.73	1.49
18	40	42	18	13.8	2.080	7.68	1.67
19	50	35	15	12.4	2.123	10.12	2.01
20	60	28	12	10.6	2.210	9.02	1.84

7 d 无侧限抗压强度、28 d 间接抗拉强度的回归模型分析见表 7、表 8,从表中可以看出:模型 P 值均小于 0.000 1,表明两个模型均极其显著,模型决定系数 R^2 值与矫正决定系数 R^2_{Adj} 值也较为接近,均大于 0.95,表明三次项模型中预测值与试验真实值之间的相关性很高,模型可以用来预测试验结果;7 d 无侧限抗压强度和 28 d 间接抗拉强度模型变异系数(C. V. %)分别为 4.47%、2.40%,表明两个模型置信度均较高,能够较好地反映真实试验值。从表 7 中可以发现,7 d 无侧限抗压强度交互系数 P 值

进行多项式方程回归拟合,得到钢渣-杂填土 7 d 无侧限抗压强度和 28 d 间接抗拉强度回归拟合公式,分别见式(1)、式(2)。

$$R_c = -115.278 X + 20.515 Y + 111.82 Z + 1.786 6 XY - 0.037 1 XZ - 1.032 9 YZ - 0.016 4 XYZ + 0.035 7 XY(X - Y) + 0.046 0 XZ(X - Z) + 0.012 6 YZ(Y - Z) \quad (1)$$

$$R_t = -14.092 X + 1.182 8 Y + 8.5093 Z + 0.312 1 XY + 0.1791 XZ + 0.074 YZ - 0.008 8 XYZ + 0.004 3 XY(X - Y) + 0.004 5 XZ(X - Z) + 0.001 7 YZ(Y - Z) \quad (2)$$

的排序为 $XY > XZ > YZ$,即 XY 的交互作用对 7 d 无侧限抗压强度的影响最大;而表 8 中 XY 、 XZ 交互系数 P 值均小于 0.000 1, YZ 的交互系数 P 值为 0.005 8,高于 XY 和 XZ ,表明 YZ 的交互作用对 28 d 间接抗拉强度的影响最小。

由各配合比 7 d 无侧限抗压强度和 28 d 间接抗拉强度试验结果得到的等高线图和响应面图分别见图 2、图 3。从图中可以看出:抗压强度与间接抗拉强度的响应面图形特征大致相同,均呈曲面趋势,说明主料之间存在耦合交互作用,并有峰值出

表 7 7 d 无侧限抗压强度回归模型分析

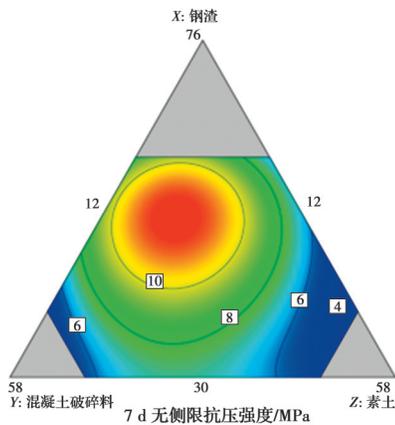
Table 7 7 days R_c regression model analysis

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	
模型	65.22	9	7.25	53.46	<0.000 1	非常重要
线性项	28.40	2	14.20	104.75	<0.000 1	
XY	8.29	1	8.29	61.18	<0.000 1	
XZ	4.07	1	4.07	30.02	0.000 3	
YZ	3.33	1	3.33	24.57	0.000 6	
残差	1.36	10	0.135 5			
总和	66.58	19				

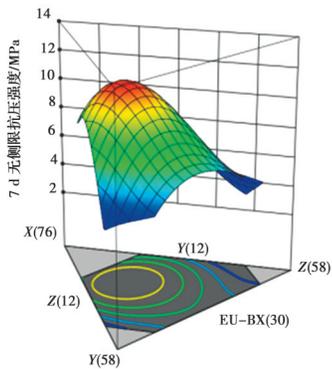
表 8 28 d 间接抗拉强度回归模型分析

Table 8 28 days R_t regression model analysis

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	
模型	0.676 1	9	0.075 1	45.04	<0.000 1	非常重要
线性项	0.368 1	2	0.184 0	110.35	<0.000 1	
XY	0.137 3	1	0.137 3	82.31	<0.000 1	
XZ	0.084 9	1	0.084 9	50.91	<0.000 1	
YZ	0.020 4	1	0.020 4	12.22	0.005 8	
残差	0.016 7	10	0.001 7	1.90		
总和	0.692 8	19				



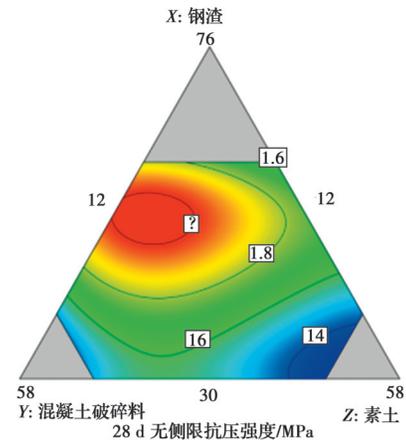
(a) 7 d 无侧限抗压强度等高线图



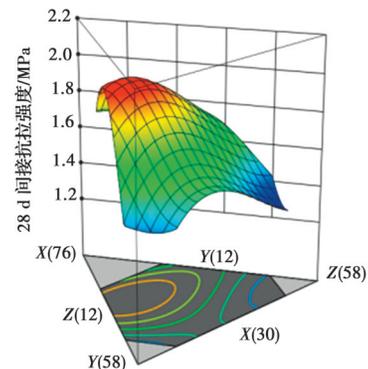
(b) 7 d 无侧限抗压强度响应面图

图 2 7 d 无侧限抗压强度等高线及响应面

Fig. 2 7 days unconfined compressive strength contour and response surface



(a) 28 d 间接抗拉强度等高线图



(b) 28 d 间接抗拉强度响应面图

图 3 28 d 间接抗拉强度等高线及响应面

Fig. 3 28 days indirect tensile strength contour and response surface

现。采用数据分析软件的优化功能,以 7 d 无侧限抗压强度和 28 d 间接抗拉强度的最大值为双控目标进行配合比推优,得出最优结果为钢渣掺量 51.98%,混凝土破碎料掺量 28.44%,素土掺量 19.57%,外掺钢渣质量 40% 的矿渣微粉、5% 的水泥和 0.020% 的离子型土壤固化剂,其 7 d 无侧限抗压强度为 11.55 MPa,28 d 间接抗拉强度为 2.026 MPa。对最优结果开展 3 次重复验证试验,得到实际 7 d 无侧限抗压强度、28 d 间接抗拉强度试验平均值分别为 11.75、2.012 MPa,与回归模型预测值误差小于 2%。

2.1.2 正交试验 通过击实试验,测得正交试验各配合比最佳含水率和最大干密度,并据此开展 7 d 无侧限抗压、28 d 间接抗拉强度试验,正交试验结果见表 9。抗压强度、间接抗拉强度极差分析结果见表 10。从表 10 及图 4 可以看出:土壤固化剂(A)掺量由 0.016% 增至 0.020% 时,钢渣杂填土 7 d 无侧限抗压强度、28 d 间接抗拉强度增幅明显;掺量大于 0.020% 后,增幅几乎持平,因此,固化剂最佳掺量

表9 正交试验结果

Table 9 Orthogonal test results

序号	A	B	C	D	最佳含水量/%	最大干密度/(g·cm ⁻³)	7 d无侧限抗压强度/MPa	28 d间接抗拉强度/MPa
1	(1)	(1)	(1)	(1)	12.1	1.969	4.35	1.09
2	(1)	(2)	(2)	(2)	11.7	2.148	9.55	1.54
3	(1)	(3)	(3)	(3)	10.6	2.210	8.75	1.52
4	(2)	(1)	(2)	(3)	11.0	2.203	5.95	1.21
5	(2)	(2)	(3)	(1)	11.2	2.114	8.90	1.55
6	(2)	(3)	(1)	(2)	11.8	2.068	11.20	1.91
7	(3)	(1)	(3)	(2)	11.0	2.203	6.22	1.33
8	(3)	(2)	(1)	(3)	11.2	2.119	9.01	1.55
9	(3)	(3)	(2)	(1)	12.2	2.114	10.66	1.84

表10 抗压强度与间接抗拉强度极差分析表

Table 10 Analysis table of extreme difference between compressive strength and indirect tensile strength

因素	A		B		C		D	
	7 d无侧限抗压强度 /MPa	28 d间接抗拉强度 /MPa						
I	7.550	1.383	5.507	1.210	8.187	1.517	7.970	1.493
II	8.683	1.557	9.153	1.547	8.720	1.530	8.990	1.593
III	8.630	1.573	10.203	1.757	7.957	1.467	7.903	1.427
R	1.133	0.190	4.697	0.547	0.763	0.063	1.087	0.167

确定为0.020%。水泥(B)掺量由3%增至5%时,钢渣-杂填土7 d无侧限抗压强度、28 d间接抗拉强度提升效果明显,超过5%后增势略有减缓,考虑到成本控制,将水泥掺量确定为5%。钢渣-杂填土7 d无侧限抗压强度、28 d间接抗拉强度随混凝土破碎料(C)在杂填土中占比的增加呈先增长后下降趋势,在占比为60%时出现峰值,表明C在混合料中具有骨料特性,掺量占比较少时可起到骨架支撑作用,有利于试件强度提升;但掺量占比较大时会影响试件密实度,导致试件强度有所降低。钢渣-杂填土7 d无侧限抗压强度、28 d间接抗拉强度随钢渣(D)掺量的增加亦呈先增长后下降态势,在掺量为50%时出现峰值,其原因为:1)与C影响相同,钢渣具有骨料特性;2)与钢渣具有潜在胶凝性有关,在水泥水化产生的碱环境作用下,钢渣中f-CaO、C₂S、C₃S与矿渣微粉中SiO₂反应生成水化硅酸钙凝胶(C-S-H),有利于试件强度提升。当钢渣掺量较小时,二者共同作用,对强度产生有利影响,使得试件强度上升;但随着钢渣掺量增加,前者对强度的不利影响逐渐增大并开始超越后者的有利影响,试件强度出现峰值并下降。故根据钢渣-杂填土7 d无侧限抗压强度、28 d间接抗拉强度正交试验极差分

析并综合考虑上述因素,确定正交试验最优结果为A₂B₂C₂D₂。

比较主料耦合强度影响试验与正交试验,可以发现,两者配合比最优结果非常接近,两种试验设计方式结果得到相互印证。考虑到便于试验及实际工程应用,可将50%杂填土(混凝土破碎料:素土=6:4)和50%钢渣,外掺钢渣质量40%的矿渣微粉、5%的水泥和0.020%的离子型土壤固化剂组成的配合比确定为钢渣-杂填土最优配合比。

2.2 安定性及龄期影响

2.2.1 安定性

对钢渣-杂填土最优配合比试件开展30 d 90℃高温水浴膨胀率试验,结果如图5所示。从图5可以看出,钢渣-杂填土膨胀率在前5 d增长较快,之后增长速率逐渐减小,12 d后几乎不再增长,30 d膨胀率试验结果为1.03%,指标满足《钢渣集料混合料路面基层施工技术规程》(YB/T 4184—2018)^[21]中对于钢渣混合料的安定性要求。

2.2.2 龄期影响

对钢渣-杂填土最优配合比试件在不同龄期下进行无侧限抗压强度试验,结果见表11。从表中可以看出,试件强度随龄期增长呈早期增速较快,龄期28 d强度达到19.33 MPa之后增速趋缓。

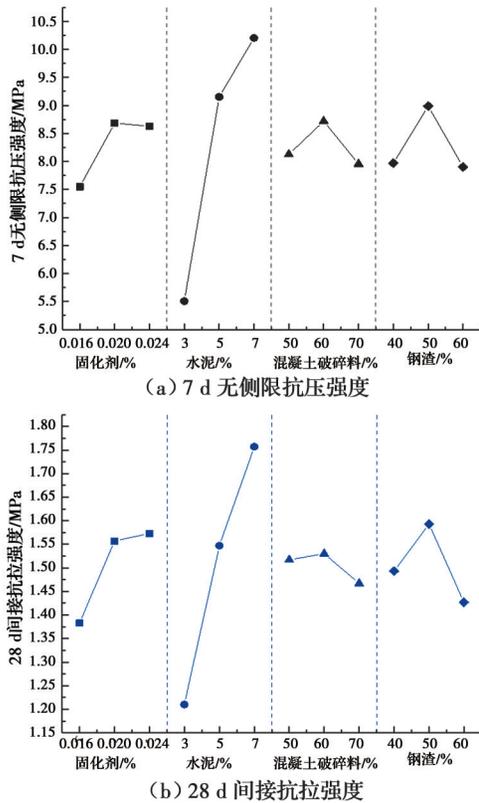


图 4 正交试验因素影响图

Fig. 4 The influence diagram of orthogonal experiment factors

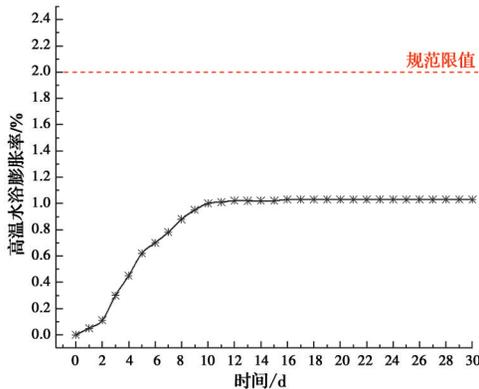


Fig. 5 Expansion rate test results

表 11 不同龄期下无侧限抗压强度

Table 11 Unconfined compressive strength at different ages

龄期/d	强度/MPa
7	11.93
14	16.75
28	19.33
60	23.29
90	27.04

2.3 XRD 分析

将最优配合比作为试验组(钢渣掺量 50%),基于最优配合比调整钢渣掺量分别为 30%、10%作为对照组,养护 90 d 后进行 X 射线衍射试验,结果见图 6(a)。由图中可以看出:试验组试样在衍射角度为 28.04°、39.48°、68.18°时的 C-S-H 衍射特征峰均高于对照组,说明试验组 C-S-H 晶体结构较完整;由衍射角度分别为 20.86°、26.68°、50.18°、60.02°的 SiO₂ 衍射特征峰可以看出,衍射峰值随钢渣掺量增大而降低,说明试验组有更多的 SiO₂ 参与反应;试验组在 18.22° 出现 Ca(OH)₂ 特征峰,由水泥及钢渣中的 f-CaO 水化生成,但峰值强度不高。

按照最优配合比备料,将加水发生固化反应分别养护 7、90 d 的试样作为试验组,未加水干粉混合料(养护 0 d)的试样作为对照组,进行 X 射线衍射试验,结果见图 6(b)。由图中可以看出:对照组试样在衍射角 27.54° 时有较为明显的钙长石(CaO·Al₂O₃·2SiO₂)特征峰,但试验组此特征峰消失,说明

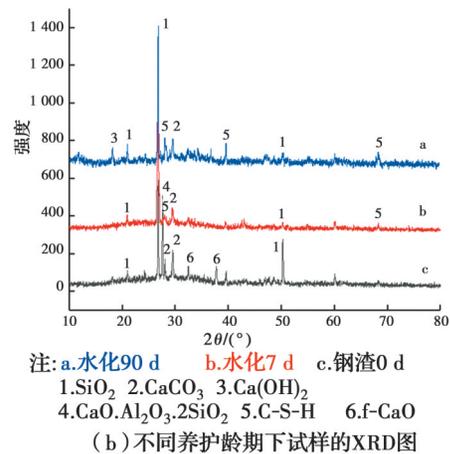
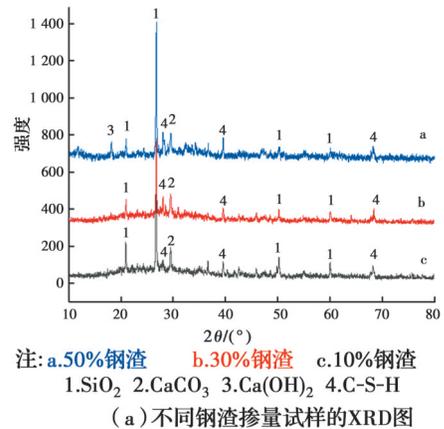


图 6 钢渣-杂填土的 XRD 图

Fig. 6 XRD pattern of steel slag-miscellaneous fill

该晶体结构在固化反应过程中逐渐被消解;对照组 f-CaO 特征峰(32.38° 、 37.68°)较为明显,经过固化反应后,试验组的 f-CaO 衍射强度明显降低。同时,相较于对照组,试验组的 SiO_2 特征峰在 50.9° 时显著降低,表明在水泥水化作用下干粉混合料矿渣微粉中 SiO_2 与钢渣中 f-CaO 反应,共同生成水化硅酸钙凝胶(C-S-H)特征峰(28.04° 、 39.48° 、 68.18°),试验组在养护 7、90 d 时均出现了 C-S-H 特征峰,且随着养护时间的增加,晶体完整度更高。

2.4 扫描电镜观察

基于最优配合比,分别对养护周期为 7、28、60、90 d 的钢渣-杂填土试样进行 SEM 微观形貌扫描试验,结果见图 7。由图 7 及表 11 可知:在养护 7 d 时,钢渣-杂填土离子型土壤固化剂使得土体表面由亲水性变为憎水性,土壤颗粒、混凝土破碎料、钢渣颗粒等形成团聚体在外力作用下易相互靠近、堆叠,但内部孔隙仍相对较多,材料强度主要由部分水泥水化及土壤固化剂对土壤颗粒改性后的团聚体压

密形成。当养护周期为 28~60 d 时,水泥基本完全水化,在碱性条件下,钢渣中的 f-CaO、 C_2S 、 C_3S 与矿渣微粉中活性二氧化硅(SiO_2)生成了网状的水化硅酸钙 $i\text{CaO}\cdot m\text{SiO}_2\cdot n\text{H}_2\text{O}$ (即 C-S-H 凝胶),钢渣潜在的胶凝性、混凝土破碎料的粉末活性逐渐被激发,出现针棒状的钙矾石,填充于团聚体颗粒之间,既可支撑团聚体结构,又使得团聚体更加密实,材料强度提升的同时亦可有效避免钢渣中 f-CaO 充分水化所产生的体积膨胀。养护至 60 d 时,形成了更多珊瑚状、片状结构,材料颗粒之间的过渡区界面孔隙基本被完全填充,强度进一步提升。养护至 90 d 时,钢渣-杂填土结构中的 C-S-H 较 60 d 时仍在增多,紧密填充于团聚体孔隙中并对团聚体进行再挤压,试样中已无明显孔隙,混凝土破碎料及钢渣颗粒被充分包裹。

此外,在试件养护过程中,混凝土破碎料中的内部玻璃体含有一定量的可溶性 SiO_2 、 Al_2O_3 ,其表面 Si-O、Al-O 易断裂水化生成 C-S-H、C-A-H,附着于混凝土破碎料颗粒表面,形成网状结构,使得混凝土破碎料与土体、钢渣间的团聚体孔隙更小;同时,矿渣微粉所产生的火山灰反应可改善钢渣-杂填土中各种材料过渡区的富集效应,减小 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体的尺寸,界面过渡区的孔隙被树枝状的钙矾石和网络状、片状的 C-S-H 填充与挤压,多晶化、多孔化的现象被消除,分割了极为脆弱的破坏区,使钢渣-杂填土保持强度增长趋势及水稳性能。

3 结论

以未经陈化处理的钢渣为对象,结合土体固化技术,将杂填土与钢渣进行混拌,开展钢渣-杂填土基层材料试验研究,得出以下结论:

1) 通过钢渣-杂填土主料耦合影响试验得到了钢渣-杂填土 7 d 无侧限抗压强度和 28 d 间接抗拉强度回归拟合方程及响应面图形,模型显著性较高;以 7 d 无侧限抗压强度和 28 d 间接抗拉强度最大值为双控目标,得出最优结果为钢渣掺量 51.98%,混凝土破碎料掺量 28.44%,素土掺量 19.57%,外掺钢渣质量 40% 的矿渣微粉、5% 的水泥和 0.020% 的离子型土壤固化剂;以最优配合比进行的 7 d 无侧限抗压强度、28 d 间接抗拉强度验证试验结果与回归模型预测值误差小于 2%。

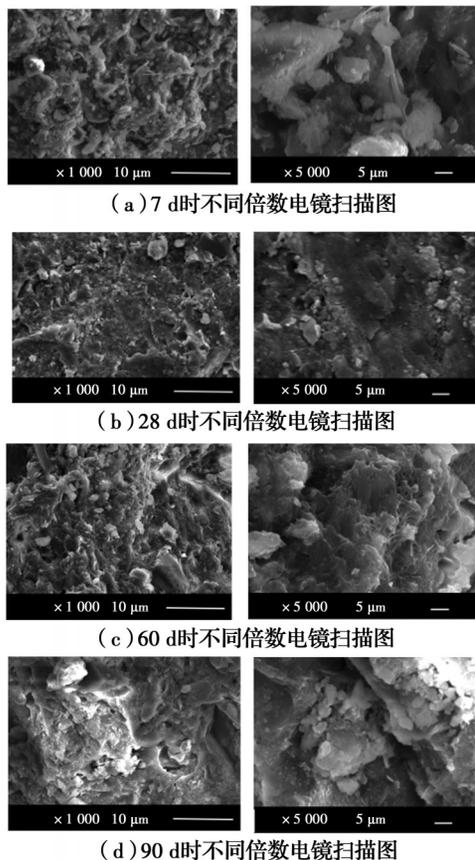


图 7 钢渣-杂填土不同龄期 SEM 扫描图

Fig. 7 SEM scan of steel slag-miscellaneous fill at different ages

2)通过正交试验和极差分析得出:钢渣-杂填土7 d无侧限抗压强度、28 d间接抗拉强度的影响顺序为:水泥>土壤固化剂>钢渣>混凝土破碎料;正交试验与主料耦合影响试验的最优结果基本一致,最终确定50%钢渣、50%杂填土($Y_{0.6}Z_{0.4}$),外掺钢渣质量40%的矿渣微粉、5%的水泥和0.020%的离子型土壤固化剂为钢渣-杂填土基层材料的最优配合比组,其7 d无侧限抗压强度为11.93 MPa,28 d间接抗拉强度为2.05 MPa。

3)对钢渣-杂填土最优配合比进行不同龄期无侧限抗压强度测试,试件强度随龄期增长早期增速较快,28 d后增速趋缓,指标满足《公路沥青路面设计规范》(JTGD50—2017)^[22]中对于一级高速公路在重载交通时的基层材料要求;30 d膨胀率监测结果表明:最优配合比试件30 d高温水浴膨胀率为1.03%,符合钢渣混合料安定性要求。

4)通过X射线衍射分析(XRD)及电子显微镜扫描试验(SEM)发现,矿渣微粉和土壤固化剂对钢渣混合料的抑制起关键作用,土壤固化剂通过离子交换原理提升了基层材料的憎水性,避免了f-CaO遇外界水的影响不断水化所致的体积增大;配合水泥的水化作用及其提供的碱性环境,矿渣微粉中的SiO₂成分与钢渣中产生消解反应生成C-S-H凝胶,不仅使基层材料的安定性符合标准,强度也得到明显提升。

参考文献

- [1] 陈敬收. 工程弃渣制备砂石骨料技术研究和应用[J]. 中国铁路, 2019(8): 36-41, 56.
CHEN J S. Study and application of sand and gravel aggregate production from engineering waste slag [J]. China Railway, 2019(8): 36-41, 56. (in Chinese)
- [2] 赵有仓, 薛斌, 古贵陆, 等. 城市建筑垃圾处理现状及资源化利用研究[J]. 科学技术创新, 2019(5): 138-139.
ZHAO Y C, XUE B, GU G L, et al. Research on the status quo of urban construction waste treatment and resource utilization [J]. Scientific and Technological Innovation, 2019(5): 138-139. (in Chinese)
- [3] 魏建军, 张金喜, 王建刚. 建筑垃圾细料生产流动化回填材料的性能[J]. 土木建筑与环境工程, 2016, 38(3): 96-103.
WEI J J, ZHANG J X, WANG J G. Properties of flowable backfill materials using recycled fine aggregates of brick and concrete waste [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2016, 38(3): 96-103. (in Chinese)
- [4] 雷斌, 徐原威, 熊进刚. 道路面层用建筑垃圾再生混凝土配合比设计分析[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(12): 3931-3935.
LEI B, XU Y W, XIONG J G. Analysis on mix proportion design of construction waste recycled concrete used in road surface [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2016, 35(12): 3931-3935. (in Chinese)
- [5] 孙朋, 郭占成. 钢渣的胶凝活性及其激发的研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2014, 33(9): 2230-2235.
SUN P, GUO Z C. Research progress on cementitious activity and its activation of steel slag [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2014, 33(9): 2230-2235. (in Chinese)
- [6] 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.
ZHAO J H, YAN P Y. Volume stability and stabilization treatment of steel slag in China [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2017, 36(2): 477-484. (in Chinese)
- [7] 侯贵华, 李伟峰, 郭伟, 等. 转炉钢渣的显微形貌及矿物相[J]. 硅酸盐学报, 2008, 36(4): 436-443.
HOU G H, LI W F, GUO W, et al. Microstructure and mineral phase of converter slag [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2008, 36(4): 436-443. (in Chinese)
- [8] HU Z H, ZHUO F, JING S H, et al. Combined application of arbuscular mycorrhizal fungi and steel slag improves plant growth and reduces Cd, Pb accumulation in Zea mays [J]. International Journal of Phytoremediation, 2019, 21(9): 857-865.
- [9] ZHANG X C, GAO J N, FAN H H, et al. Study on the mechanism of nano-SiO₂ for improving the properties of cement-based soil stabilizer [J]. Nanomaterials, 2020, 10(3): 405.
- [10] ZHANG Z L, ZHANG H, ZHANG J M, et al. Effectiveness of ionic polymer soil stabilizers on warm frozen soil [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2019, 23(7): 2867-2876.
- [11] HE S, YU X B, BANERJEE A, et al. Expansive soil treatment with liquid ionic soil stabilizer [J]. Transportation Research Record, 2018, 2672(52):

- 185-194.
- [12] NITESH S J. Soil stabilization study by using steel slag [J]. International Journal of Trend in Scientific Research and Development, 2019, 3(5): 34-35.
- [13] 游庆龙, 邱欣, 杨青, 等. 离子土壤固化剂固化红黏土强度特性[J]. 中国公路学报, 2019, 32(5): 64-71.
YOU Q L, QIU X, YANG Q, et al. Strength properties of ionic soil stabilizer treated red soil [J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(5): 64-71. (in Chinese)
- [14] 黄伟, 邱鹏, 赵鲁卿, 等. 钢渣-土混拌基层材料试验研究及微观机理分析[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(4): 44-52.
HUANG W, QIU P, ZHAO L Q, et al. Experimental study and micro-mechanism analysis of steel slag-soil mixed road base material [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020, 42(4): 44-52. (in Chinese)
- [15] 黄伟, 邱鹏, 唐刚, 等. 钢渣混合土基层材料制备及性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(10): 3237-3242, 3265.
HUANG W, QIU P, TANG G, et al. Study on preparation and performance of roadbase material of steel slag mixed soil [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38(10): 3237-3242, 3265. (in Chinese)
- [16] 刘嫒春, 崔恩彤, 汪恩良, 等. 基于混料设计的干硬性混凝土强度模型[J]. 混凝土与水泥制品, 2019(9): 10-14.
LIU Y C, CUI E T, WANG E L, et al. Strength model of dry concrete based on mixture design [J]. China Concrete and Cement Products, 2019(9): 10-14. (in Chinese)
- [17] KAMALI ROUSTA L, GHANDEHARI YAZDI A P, AMINI M. Optimization of athletic pasta formulation by D-optimal mixture design [J]. Food Science & Nutrition, 2020, 8(8): 4546-4554.
- [18] 土工试验方法标准:GB/T 50123—2019[S].北京:中国计划出版社,2019.
Standard for geotechnical testing method : GB/T 50123-2019 [S].Beijing: China Planning Press,2019.(in Chinese)
- [19] 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.
Test methods of materials stabilized with inorganic binders for highway engineering: JTG E51-2009[S]. Beijing:China Communications Press,2009.(in Chinese)
- [20] 钢渣稳定性试验方法:GB/T 24175—2009[S].北京:中国标准出版社,2009.
Test method for stability of steel slag: GB/T 24175-2009 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2009. (in Chinese)
- [21] 钢渣集料混合料路面基层施工技术规程:YB/T 4184—2018[S].北京:冶金工业出版社,2019.
Technical specification for construction of steel mixture used as base course: YB/T 4184-2018 [S]. Beijing: Metallurgical Industry Press,2019.(in Chinese)
- [22] 公路沥青路面设计规范:JTG D50—2017[S].北京:人民交通出版社,2017.
Specification for design of highway asphalt pavement: JTG D50-2017 [S]. Beijing: China Communications Press,2017.(in Chinese)

(编辑 王秀玲)