

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2023.08.070

水泥-钢渣混合基层在冻融循环作用下性能分析

韩晓亮

(兰州市公路服务中心, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 在工业发展突飞猛进的背景下, 钢铁作为各行各业中都需要用到的材料, 在加工过程中也会产生许多难以有效利用的废渣。将钢渣与水泥按照一定的级配混合后作为公路路基填料, 能够解决部分钢渣处理问题。主要分析了在冻融循环作用下水泥-钢渣混合料的承载力问题, 通过室内试验得到以下结论, 一是在满足公路等级要求的级配下, 随着冻融循环的次数增加, 试件的裂隙增多, 呈现骨料外露, 承载力显著下降; 二是试件在冻融作用下质量随着循环次数先增大后减小, 强度则随着循环次数增加不断减小, 三是通过试验与数据处理得到试件抗压强度与循环次数的关系式, 可以为后续实地试验以及现场施工提供预测指导。

关键词: 水泥; 钢渣; 冻融循环; 抗压强度

中图分类号: TU455

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2023)08-0280-04

0 引 言

随着我国经济发展, 建筑材料发展迅速, 钢铁逐渐成为建筑发展中首屈一指的金属材料^[1-3], 然而随着钢铁冶炼行业不断发展, 其废弃物产量也随之增加, 一度高达 9.28 亿 t^[4]。如何能够合理有效地使用钢渣, 变废为宝, 成为了我国学者追求的目标。将炼钢工艺中产生的废弃钢渣应用到路基基层中, 具有较大的前景^[5]。水泥混合能够提高混合料的力学性能, 可作为地基处理的回填料使用。将钢渣与水泥混合作为路基填土使用, 较基本路基基层填土具有更好的承载效果^[6], 将不同粒径钢渣细料掺入生石灰与偏硅酸钠用于稳定土中, 合理级配能够提高混合土体的强度与耐久性, 同时能够减弱钢渣的膨胀性^[7-8]。钢渣在性能上与水泥具有相似之处, 自身强度足够大。本文主要研究水泥-钢渣混合料在冻融循环作用下的力学性能变化, 为季冻区水泥-钢渣混合路基研究提供参考, 减少存在季节性冻土区的路基破坏, 为工程施工做指导。

1 材料选取与试件制作

本研究主要选取材料为 P.O42.5 硅酸盐水泥与钢厂废弃转炉钢渣, 按照一定级配混合后制成试件, 并在养护后进行试验。

收稿日期: 2022-10-12

作者简介: 韩晓亮(1968—), 男, 本科, 教授级高级工程师, 从事路基路面研究。

1.1 水泥

根据《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》(JTG E30—2005)^[9]、《水泥化学分析方法》(JTG 176—2017)^[10]、《通用硅酸盐水泥》(GB 175—2007)^[11], 对研究采用的硅酸盐水泥进行测定, 结果如表 1 所示。

表 1 水泥质量测定结果

水泥质量指标		P.O42.5	
		标准	检验值
比表面积 / (m ² ·kg ⁻¹)		不小于 300	309
细度 / %		不大于 10.0	2.81
标准稠度用水量 / g			25.23
凝结时间 / min	初凝	不小于 45	189
	终凝	不大于 600	251
氧化镁 / %		不大于 6.0	1.82
三氧化硫 / %		不大于 3.5	2.51
氯离子 / %		不大于 0.06	0.03
烧失量 / %		不大于 5.0	2.88
碱含量 / %		—	0.72
3 d 强度 / MPa	抗折	不小于 3.5	5.9
	抗压	不小于 17.0	28.8
28 d 强度 / MPa	抗折	不小于 6.5	8.7
	抗压	不小于 42.5	50.4

由表 1 可知, 试验采用水泥满足各规范要求。

1.2 钢渣

本研究选用钢渣为某钢厂的经无害化处理的转炉钢渣, 属于无害固体废弃物。其粒径大小与物理性能分别见表 2、表 3 所示。

表 2 钢渣粒径组成

粒径	通过率 /%	粒径	通过率 /%
19	100	1.38	17.02
16	99.46	0.6	12.49
13.3	96.34	0.3	7.68
9.3	86.61	0.15	4.52
4.35	48.73	0.075	3.64
2.46	24.94		

表 3 钢渣物理性能

试验项目	试验结果	技术要求
4.75~16 mm 表观相对密度 /($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	3.22	不小于 2.6
4.75~16 mm 吸水率 /%	1.52	不大于 2
2.36~4.75 mm 表观相对密度 /($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	3.21	不小于 2.6
2.36~4.75 mm 吸水率 /%	1.64	不大于 2
压碎值 /%	12.3	不大于 22
洛杉矶磨耗值 /%	17.5	不大于 26
粗集料针片状含量 /%	3.1	不大于 18
水洗法 0.075 mm 以下含量 /%	2.7	不小于 1.0

由表 3 可知,钢渣能够满足各项技术要求。

1.3 级配预实验

混合料的级配是影响力学性能的重要因素,合理的级配能够充分发挥混合料的性能。本研究对象为二级公路路基基层,需根据《公路路面基层施工技术细则》(JTG F20—2015)^[12]结合具体施工的可行性与可操作性,制定合理的配合比。

结合规范制定先行试验可确定混合料中水泥掺比以及钢渣的粒径,并通过击实试验与无侧限抗压强度试验确定水泥掺量 4%、钢渣各档配比为 0.075 ~ 4.75 mm : 4.75~13.2 mm : 13.2~31.5 ≈ 25 : 14 : 18 时为最优级配方案。并以此作为试验方案进行试件的制作。

2 冻融循环试验

2.1 制作试件与分组

试验按照最优级配配置好混合料,制成尺寸为高 150 mm 直径 150 mm 的圆柱体,共制 32 个试件,分为 4 组进行试验。将试件标号并用保鲜膜包裹,淋水后养护至 28 d 进行试验。各试件配合比数值表 4。

2.2 冻融循环试验

试验依据《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E51—2009)^[13]操作,在养护最后一天,将试件从养护室取出后擦干表面水分并称重记录,再浸泡在没过上表面 2.5 cm 的水中,待到达养护时间后

表 4 试件各掺料质量

序号	各档集料质量 /g			钢渣 质量 /g	水泥 质量 /g
	0.075~ 4.75 mm	4.75~ 13.2 mm	13.2~ 31.5 mm		
1	2 514	1 394	1 824	5 732	250
2	2 521	1 387	1 864	5 772	250
3	2 527	1 394	1 847	5 768	250
4	2 521	1 384	1 853	5 758	250
5	2 528	1 379	1 842	5 749	250
6	2 519	1 384	1 854	5 757	250
7	2 526	1 386	1 847	5 759	250
8	2 521	1 382	1 864	5 767	250
9	2 534	1 391	1 853	5 778	250
10	2 521	1 387	1 854	5 762	250
11	2 535	1 392	1 824	5 751	250
12	2 526	1 384	1 836	5 746	250
13	2 536	1 394	1 828	5 758	250
14	2 509	1 393	1 839	5 741	250
15	2 538	1 386	1 853	5 777	250
16	2 514	1 394	1 824	5 732	250
17	2 541	1 397	1 824	5 762	250
18	2 526	1 400	1 824	5 750	250
19	2 528	1 385	1 814	5 727	250
20	2 531	1 384	1 819	5 734	250
21	2 518	1 396	1 845	5 759	250
22	2 527	1 394	1 847	5 768	250
23	2 526	1 399	1 861	5 786	250
24	2 545	1 387	1 842	5 774	250
25	2 534	1 379	1 843	5 756	250
26	2 524	1 391	1 834	5 749	250
27	2 519	1 379	1 843	5 741	250
28	2 516	1 383	1 864	5 763	250
29	2 524	1 384	1 854	5 762	250
30	2 521	1 387	1 864	5 772	250
31	2 519	1 394	1 897	5 810	250
32	2 547	1 384	1 837	5 768	
平均值	2 526.125	1 388.563	1 844.313	5 759	250

取出,擦干称重,放到 -18℃温控箱中冻结 16 h,取出称重后再放入 20℃的恒温水槽中融化 8 h,此为一次循环。将养护完成的试件依次进行 0 次、5 次、10 次、20 次冻融循环后进行下一步试验。试件如图 1 所示。

2.3 抗压强度试验

试验采用压力机作为抗压试验仪器,其精度为 ± 1%,加载速率为 1 mm/min。加压前将试件表面水分擦干,称重后开始加载,记录试件破坏时对应的最大压力值 $P(\text{kN})$ 。

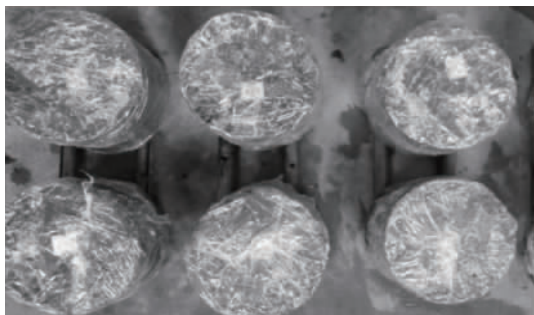


图 1 试件养护示意图

3 试验数据分析与结论

3.1 冻融前后质量变化

冻融前后质量变化可由质量损失率表示，公式如式 1 所示：

$$W_n = \frac{m_0 - m_n}{m_0} \tag{1}$$

表 5 冻融循环混合料质量损失率

组别	1 组		2 组		3 组		4 组	
	试件质量 /g	质量损失率 /%	试件质量 /g	质量损失率 /%	试件质量 /g	质量损失率 /%	试件质量 /g	质量损失率 /%
	6 681	0	6 679	-0.030	6 681	-0.073	6 648	0.251
	6 562	0	6 583	-0.030	6 592	-0.049	6 571	0.079
	6 590	0	6 578	0.015	6 584	-0.300	6 582	0.068
	6 572	0	6 582	-0.015	6 592	-0.048	6 562	0.168
	6 620	0	6 622	-0.030	6 631	-0.046	6 620	0.142
	6 609	0	6 610	-0.015	6 610	-1.549	6 578	0.134
	6 543	0	6 562	-0.030	6 658	-0.049	6 558	0.241
	6 574	0	6 573	-0.045	6 573	-0.089	6 568	0.158
平均值	6 593.875	0	6 598.625	-0.023	6 615.125	-0.275	6 585.875	0.155

表 6 强度测试记录结果

组别	循环 0 次			循环 5 次			循环 10 次			循环 20 次		
	抗压强度 /MPa	损失率 /%	最大压力 /kN	抗压强度 /MPa	损失率 /%	最大压力 /kN	抗压强度 /MPa	损失率 /%	最大压力 /kN	抗压强度 /MPa	损失率 /%	最大压力 /kN
	6.6	0	118.290	6.5	4.482	112.993	6.0	11.938	104.166	4.9	29.761	82.979
	8.5	0	148.304	8.1	4.759	141.242	7.4	10.724	132.414	6.2	28.649	105.931
	7.2	0	125.352	6.6	5.645	118.290	6.4	11.258	111.228	5.3	29.647	88.276
	7.4	0	132.414	7.2	5.341	125.352	6.6	10.684	118.290	5.0	29.621	93.573
	8.6	0	153.600	6.5	2.651	112.993	6.1	32.153	104.166	4.8	49.684	82.979
	7.2	0	123.586	6.6	4.291	118.290	6.3	11.538	109.462	5.1	28.921	88.276
	8.5	0	148.304	8.2	3.586	143.007	7.4	9.594	134.180	5.6	29.364	104.166
	6.9	0	120.055	6.6	2.957	116.524	6.2	10.348	107.697	4.9	29.527	84.745
平均值	7.6125	0	133.738	7.037 5	4.214	123.586	6.55	13.529 63	115.200	5.225	31.896 75	91.366

由表 6 可知，随着循环次数增加，试件的抗压强度不断减小。

为更加直观表示，将不同冻融循环次数下的抗压强度与未经过冻融循环试件的抗压强度比值进行

式中： W_n 为第 n 次冻融循环后试件的质量损失率，%； m_0 为冻融循环前试件质量，g； m_n 为冻融循环后试件质量，g。

由表 5 可知，随着冻融循环次数的增加，试件质量平均损失率变化依次为：-0.023%、-0.275%、0.155%。分析发生此种现象的原因，可知当冻融循环次数较少时，试件内部孔隙在冷热交替下逐渐扩大为裂隙，并且不断变大，导致试件吸水能力增强，质量增加。随着循环次数不断增大，裂隙扩大至试件表面，导致试件表面集料脱落，粗骨料露出，试件质量损失率增高。

3.2 冻融前后强度变化

按照上述试验流程对不同循环次数下的试件进行强度测试，记录结果如表 6 所示。

总结分析，结果如表 7、图 2 所示。
由图可拟合曲线得到冻融前后比值关系式(2)：

$$\frac{R_{DC}}{R_c} = -0.01\ 473\ 714\ 286 \times P + 1.019\ 2 \tag{2}$$

表 7 经冻融试件与未冻融试件比值

循环次数	0	5	10	20
经冻融试件 R_{DC} 与未冻融试件 R_c 比值	1	0.959	0.890	0.712

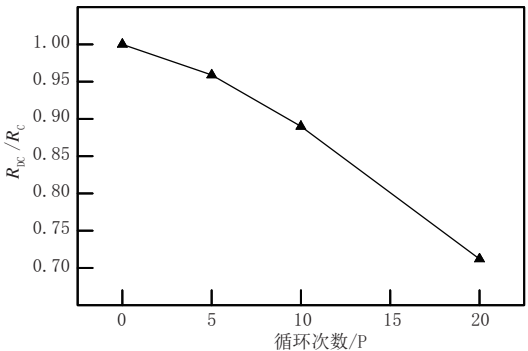


图 2 冻融前后比值关系图

由图表分析可知,随着循环次数增加,试件抗压强度不断下降,下降速率不断增大,对试件的破坏更加明显。基于强度测试值与冻融循环前后比值关系,在本试验条件下,当冻融循环达到 20 次时,试件抗压强度下降明显,反映于路基即为承载力降低。因此,在季冻区的公路路基附近需要增加一定的保温措施。

3.3 结论

本文主要研究在冻融循环作用下,水泥与钢渣混合后作为路基基层的抗压强度变化,通过室内制取试件,养护后在不同循环次数下的最大抗压值作为判断依据,由此得到以下结论:

(1)在满足公路等级要求的级配下,随着冻融循环的次数增加,试件的裂隙增多,呈现骨料外露,承

载力显著下降等特征。

(2)试件在冻融作用下质量随着循环次数先增大后减小,强度则随着循环次数增加不断减小。

(3)通过试验与数据处理得到试件抗压强度与循环次数的关系式,可以为后续实地试验以及现场施工提供预测指导。

参考文献:

[1] 高蕊蕊,王安建. 基于“S”规律的中国钢需求预测[J].地球报,2010, 31(5): 645-652.

[2] 陆雷,温金保,姚强.钢渣的机械力化学效应研究[J].钢铁钒钛, 2005(2): 9-43.

[3] 张彦峰.转炉钢渣做集料在 SMA-13 中的应用研究[J].山西交通科技,2018(2): 14-16.

[4] 赵亮.道路桥梁施工技术的现状及发展趋势[J].住宅与房地产,2020 (4): 230-231.

[5] Wang C C, Lee D H. Recycling of engineering characteristics of basic oxygen furnace slag and used as base layer material[J]. Journal of the Chinese Institute of Civil and Hydraulic Engineering, 2007, 19 (2): 313-322.

[6] H. Motz, J. Geiseler. Products of steel slags an opportunity to save natural resources[J]. Waste Management, 2000, 1.

[7] H. Y. Poh, Gurmel S. Ghataora, Nizar Ghazireh. Soil Stabilization Using Basic Oxygen Steel Slag Fines [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2006, 18(2).

[8] Churchward A, Sokal Y J. Prediction of Temperatures in Concrete Bridges[J]. ASCE J Struct Div, 1981(11): 2163-217

[9] JTG E30—2005,公路工程水泥及水泥混凝土试验规程[S].

[10] JTG 176—2017,水泥化学分析方法[S].

[11] GB175—2007,通用硅酸盐水泥[S].

[12] JTG F20—2015,公路路面基层施工技术细则[S].

[13] JTG E51—2009,公路无机结合料稳定材料试验规程[S].

~~~~~  
(上接第 279 页)

形控制的部分斜拉体系加固建立的计算方法准确度较好,计算方法可行、可靠,能够用于桥梁的加固设计计算中。

参考文献:

[1] FRANGOPOL D M. Life-cycle performance, management, and optimization of structural systems under uncertainty: accomplishments and challenges [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2011, 7 (6): 389.

[2] 程修龙.预应力混凝土连续刚构桥加固方法及加固效果分析[D].武汉:武汉理工大学,2009.

[3] 刘岚.外加预应力量的 PC 桥的规划与设计[J].国外桥梁,1993(4): 263-284.

[4] 龚志刚.采用斜拉索体系加固普特桑德预应力混凝土悬臂梁桥[J].世界桥梁,2003(3): 57-59.

[5] FJELDHEIM S, TEIGEN J. Raising expectations[J]. Bridge Design & Engineering, 2003, 30: 31-32.

[6] TEIGEN J G. Prestressed box girder bridge strengthened by an internal tubular arch [J]. Journal of Bridge Engineering, 2018, 23 (4): 04018005.

[7] 王志斌,马健中,许志刚. 风陵渡黄河大桥的加固研究和设计[J]. 公路,2007(8): 45-49.

[8] 陈从春.矮塔斜拉桥设计理论核心问题研究[D].上海:同济大学, 2006.

[9] 李忠三. 基于静动力特性的多塔长跨斜拉桥结构体系刚度研究[D].北京:北京交通大学,2014.