

半刚性钢渣基层材料性能试验研究

李灿华^{1,2}, 向晓东¹, 刘 思², 华洲连², 焦立新²

(1. 武汉科技大学冶金矿产资源高效利用与造块湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430080;

2. 武汉钢铁集团金属资源有限责任公司, 湖北 武汉 430082)

摘要:提出了用钢渣配制两种半刚性基层材料,并确定了最佳含水量,7 d 无侧限抗压强度满足规范要求。在龄期较长时,使用纯钢渣集料组成的级配具有较高的抗压强度、劈裂强度和抗压回弹模量。钢渣半刚性基层材料的稳定性试验表明,钢渣用作半刚性基层材料具有合格的稳定性、较好的抗冲刷性能和抗裂性能。

关键词:钢渣;半刚性基层;路用性能;

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2015.03.018

中图分类号:TD989 文献标志码:A 文章编号:1000-6532(2015)03-0073-05

半刚性基层材料是指用水泥、石灰、粉煤灰等水硬性结合料配制的材料,主要用于道路基层,其与柔性基层材料相比,具有强度大、刚度大,水稳定性较好和板体性好,更适用于高等级道路。我国于20世纪80年代才对半刚性材料进行研究并逐步推广使用。钢渣具有良好的力学性能和路用性能,可作为一种优良的路用材料。钢渣作为集料用于半刚性基层材料,可以根据结合料的不同将其分为二灰钢渣和水稳钢渣^[1-3]。本研究基于钢渣的物化特性,开展半刚性水泥稳定钢渣基层的材料组成设计及性能研究,这将促进钢渣在道路铺筑中的应用。

1 材料及性质

原材料技术指标检测按照《《公路工程集料试验规程》^[4]方法执行。各原材料性能指标满足规范要求。

1.1 钢渣

钢渣来自武汉某大型钢企,采用颚式破碎机+圆锥破碎机的组合破碎方式破碎,并对粗集料进行滚筒水洗的洁净工艺处理,其中粗集料的性能检测结果见表1。

表1 钢渣粗集料性能检测

Table 1 Property testing results of steel slag coarse aggregate

试验项目	试验结果	技术要求
10 ~ 16 mm	表观相对密度	3.261 >2.6
	吸水率/%	1.958 <3
5 ~ 10 mm	表观相对密度	3.254 >2.6
	吸水率/%	2.704 <3
	压碎值/%	13.6 ≤26
洛杉矶磨耗值/%	13.2	≤28
针片状含量/%	4.75 ~ 9.5 mm	5.1 ≤18
	>9.5 mm	4.3 ≤12

1.2 玄武岩

玄武岩的性能检测结果见表2。

表2 玄武岩集料性能检测

Table 2 Property testing results of basalt aggregate

试验项目	试验结果	技术要求
2.36 ~ 4.75 mm	表观相对密度	2.735 >2.6
	吸水率/%	0.8 <2
0 ~ 2.36 mm	表观相对密度	2.745 >2.6
	砂当量/%	79.2 ≥60
压碎值/%	16.5	≤26
洛杉矶磨耗值/%	17.3	≤28

收稿日期:2014-09-18;改回日期:2014-11-09

基金项目:武汉市高新技术成果转化及产业化项目(2013010803010378)

作者简介:李灿华(1979-),男,博士研究生,高级工程师,主要从事环境安全与灾害防治研究。

试验项目	试验结果	技术要求
针片状含量/%	4.75 ~ 9.5 mm	12.3 ≤18
	>9.5 mm	9.8 ≤12

1.3 水泥

采用武汉市华新水泥公司生产的 P. S. A 32.5 水泥,所检各指标符合该水泥强度等级要求。

2 半刚性钢渣基层材料组成设计

水泥稳定级配碎石基层的配合比设计包括:级配曲线的确定、用水量的确定、水泥类型及剂量的确定。

2.1 级配设计

本研究依据《公路路面基层施工技术规范》^[5]中水泥稳定碎石级配的相关要求进行级配设计。级配 1 采用的集料全部为钢渣,各档料的尺寸规格及配合比如下:1#钢渣(26.5 ~ 16 mm):2#钢渣(16 ~ 9.5 mm):3#钢渣(9.5 ~ 4.75 mm):4#钢渣(4.75 ~ 2.36 mm):5#钢渣(2.36 ~ 0 mm) = 25% : 20% : 15% : 10% : 30%。同时考虑到钢渣细集料具有较大的吸水率和水泥与钢渣粉料的相互作用,在级配 2 中将 0 ~ 2.36 mm 及 2.36 ~ 4.75 mm 两档含钢渣粉料较多的细集料用玄武岩取代作对比研究。据此配合比,配制得级配曲线见表 3。可以看出总体级配区别不大。

表 3 半刚性钢渣基层合成级配

Table 3 Gradation of semi-rigid base

筛孔尺寸 /mm	31.5	50.26	60.10	90.00	9.50	4.75	2.36	0.60	0.075
合成级配 1	100.00	98.10	82.10	55.60	38.70	25.50	12.70	2.90	
合成级配 2	100.00	98.10	82.10	55.60	41.10	26.60	9.90	1.50	
级配上限	100.00	100.00	89.00	67.00	49.00	35.00	22.00	7.00	
级配中值	100.00	95.00	80.00	57.00	39.00	25.00	15.00	3.50	
级配下限	100.00	90.00	72.00	47.00	29.00	17.00	8.00	0.00	

2.2 较佳含水量试验

按照《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》^[4]确定其各个级配的较佳含水量和最大干密度。本次实验选择的水泥标号为 P. S. A 32.5。试验时将碎石混合料按合成比例配料,并人工进行拌和均匀,水泥剂量为 5%。钢渣半刚性基层混合料的击实曲线见图 1,两种级配的较佳含水率及最大干密度结果见表 4。

从图 1 中可以看到,两种级配的击实实验曲线在图形上没有太大的区别,均为一具有最大值的曲线,但是级配 1 的最佳含水率及最大干密度均大于级配 2,造成这种现象的主要原因是钢渣细集料较

玄武岩具有较大的吸水率和密度。另外,在试验过程中发现通过计算得出的实际含水量与试验一开始设定的含水量存在一定的差别,当含水量较低时,实际含水量与设定含水量比较接近,当含水量较高时,实际含水量与设定含水量区别较大,这是因为当加水量大时,较多的水量附着在集料的表面,在击实的过程中挥发和析出。

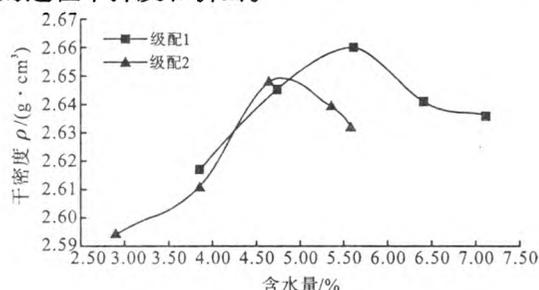


图 1 级配击实曲线

Fig. 1 Compaction curves of gradations

表 4 水泥稳定钢渣基层击实试验结果

Table 4 Compaction test results

	级配 1	级配 2
较大干密度/(g · cm ⁻³)	2.660	2.649
较佳含水率/%	5.6	4.7

2.3 级配性能验证

通过以上试验基本确定水泥稳定钢渣碎石的各项设计参数。对级配 1 和级配 2 采用静压法分别成型 1 组试样,进行 7 天不侧限抗压强度试验,试验结果分别为 4.5 MPa 和 4.6 MPa,级配 1 和级配 2 均能满足高等级路面基层的强度要求。

级配 1 和级配 2 配合比均为 1# : 2# : 3# : 4# : 5# = 25% : 20% : 15% : 10% : 30%,其中级配 1 全部集料均为钢渣,级配 2 中 4#、5#集料为玄武岩,水泥标号为 P. S. A 32.5,用量为 5%。通过干密度试验、击实试验和 7 d 无侧限抗压强度试验来确定符合规范规定的水泥稳定钢渣碎石级配,确定了级配 1 较佳含水量为 5.6%,级配 2 较佳含水量为 4.7%,7 d 无侧限抗压强度满足规范要求。

3 半刚性钢渣基层性能和稳定性研究

3.1 力学性能研究

水泥稳定钢渣基层的力学性能主要包括强度和刚度两个方面。强度主要有无侧限抗压强度、劈裂强度和抗弯拉强度等;刚度主要是指抗压回弹模量。

3.1.1 抗压强度

抗压强度是半刚性基层材料配合比设计中最基本的指标之一,它既取决于骨料的嵌挤和锁结作用,

即骨料直接的结构类型,又取决于结合料的粘结力的大小,即与水泥剂量的多少和水泥的型号有关。本实验按照《公路无机结合料稳定材料试验规程》^[6]进行抗压强度试验,按压实度 98% 成型试件,养生至 7 d、28 d 和 60 d 龄期的试件(养生期最后一天浸水 24 h)在万能试验仪上进行无侧限抗压强度试验,加载速度为 1 mm/min,然后计算试件的无侧限抗压强度,试验结果见表 5。

表 5 不同龄期无侧限抗压强度结果

Table 5 The unconfined compression strength at different ages

	龄期/d	无侧限抗压强度/MPa
级配 1	7	4.4
	28	5.9
	60	6.6
级配 2	7	4.5
	28	5.8
	60	6.2

根据表中的抗压试验结果,可以得到级配 1 和级配 2 的抗压强度均随着龄期的增长而增长,而且增长趋势相近。当龄期小于 28 d 时,级配 1 和级配 2 的强度增长幅度均大于 28 d 之后的强度增长幅度。对比级配 1 和级配 2,发现级配 1 的 7 d 抗压强度小于级配 2,但是 28 d 和 60 d 均大于级配 2,这说明钢渣细集料在反应初期对水泥水化有一定的抑制作用,延缓了水化反应,一段时间后,钢渣自身的反应活性得到显现,导致纯钢渣组成的级配 1 的抗压强度要强于级配 2。

3.1.2 劈裂强度

半刚性基层材料在性能上存在的一个不足就是抗拉强度低,其明显低于抗压强度。水泥稳定钢渣基层在收到长期荷载作用时或在环境温度变化时,很容易开裂。基层开裂后,不仅破坏了基层的整体性,而且还会造成路面面层开裂。对水泥稳定钢渣的抗拉强度,常采用劈裂试验来评定^[7]。试验按照《公路无机结合料稳定材料试验规程》^[6]进行试验,结果见表 6。

根据劈裂试验结果可以得到:劈裂强度与抗压强度相同随龄期的增长数值上不断增加提高;级配 1 的长期劈裂强度要高于级配 2,主要是因为级配 1 中的水化产物较多,从而结合料和细骨料的粘结作用得到增强,使得混合料有足够的粘结力来抵抗外

部拉应力的作用。

表 6 水泥稳定钢渣材料劈裂试验结果

Table 6 Results of splitting test

	龄期/d	劈裂强度/MPa
级配 1	7	0.576
	28	0.741
	60	0.914
级配 2	7	0.598
	28	0.768
	60	0.877

3.1.3 抗压回弹模量

抗压回弹模量是用来评价半刚性水稳材料的刚度的指标,基层的回弹模量应适中,与面层的模量相适应。若路面基层的模量过小,面层会在过大的拉应力或拉应变的作用下过早开裂破坏;若路面基层的模量过大则会因干缩和温缩变形导致基层开裂,影响结构的开裂性能,造成路面结构的服务性能和寿命降低,因而基层的各种模量应尽量与路面材料的模量相适应。

本研究采用《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》^[6]进行试验,结果见表 7。从表中得到水泥稳定钢渣基层的抗压回弹模量和抗压强度有类似的结果,级配 1 比级配 2 的抗压回弹模量高,可以说钢渣的抗压强度越大,其抗压回弹模量也越大。

表 7 半刚性钢渣基层材料的抗压回弹模量

Table 7 Compressive resilient modulus of semi-rigid bases

	龄期/d	抗压回弹模量/MPa
级配 1	28	2395
	60	2585
级配 2	28	2275
	60	2460

3.2 稳定性能研究

3.2.1 钢渣膨胀性

依据《公路工程集料试验规程》^[4]对钢渣半刚性基层混合料的膨胀性能进行检验,结果见表 8。钢渣半刚性基层混合料的膨胀率是满足技术要求的,说明钢渣作为半刚性基层材料稳定性是合格的。

表 8 钢渣碎石基层沥青混合料膨胀率

Table 8 The expansion rate of steel slag based ATB

	级配 1	级配 2	技术要求
膨胀率/%	1.62	1.44	<2

3.2.2 抗冲刷性能

早潮湿多雨的情况下,无论沥青路面还是水泥

路面其表面的水都能以多种途径进入道路的结构层,许多情况下这些水分难以及时排除,长期停留在结构层中,不但使基层材料吸水饱和,而且可能在行车荷载的作用下,使得面层和基层的混合料的细料部分不断受到冲刷,日积月累,容易在面层和基层之间形成各种细料浆,在公路表面则表现为唧泥现象,通过在行车荷载的泵吸作用将细骨料从结构层带走,最终可能导致路面结构的破坏^[8]。本试验选用沥青混合料车辙试验仪来模拟公路现场基层收到的冲刷情况,试验结果见图 2。

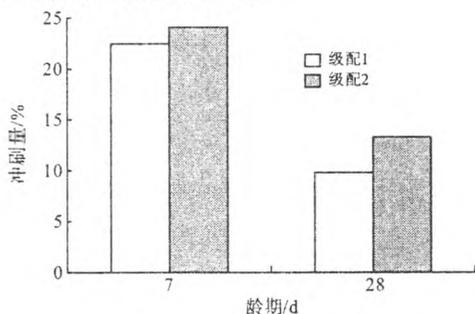


图 2 不同龄期的冲刷量

Fig. 2 Erosion quantity of different age

从图 2 中,水泥稳定钢渣基层的冲刷量都随龄期的增加而减少,级配 1 的 7 d 和 28 d 冲刷量均略小于级配 2,这说明级配 1 的抗冲刷性能更好。这一方面是因为细钢渣水化使容易冲刷掉的细集料凝聚力更强,另一方面,钢渣粗集料表面的微细孔使细集料与粗集料之间粘结的更紧密。

3.2.3 抗裂性能

水泥稳定材料经拌合压实成型后,由于水分挥发和混合料内部的水泥水化作用,混合料中的自由水不断减少产生毛细管作用、吸附作用、分子间力作用、材料矿物晶体或凝胶体间层间水的作用和碳化作用等会引起水泥稳定材料的体积收缩^[9]。材料干缩特性的指标有干缩应变、干缩系数、干缩量、失水量、失水率和平均干缩系数。本试验成型中梁试件(10 cm×10 cm×40 cm),根据《无机结合料稳定材料干缩试验方法》^[10]测试其失水率、干缩应变和干缩系数,试验结果见图 3、4。

从图 3、4 中可以得出,两个级配的抗收缩性能比较接近,级配 1 略好于级配 2。这主要是两方面作用的结果:一方面钢渣集料中活性成分的水化,加剧了水泥稳定半刚性基层的收缩,另一方面钢渣中含有的少量 f-CaO 和 f-MgO 发生化学反应产生体积膨胀,中和了一部分收缩。

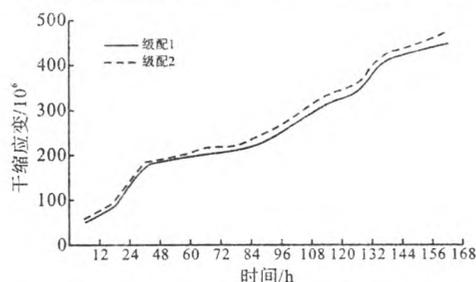


图 3 水泥稳定钢渣混合料干缩应变变化趋势

Fig. 3 Trend of dry shrinkage strain

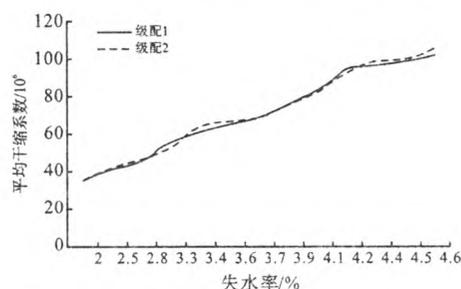


图 4 水泥稳定钢渣混合料平均干缩系数与失水率趋势

Fig. 4 Trend of dry shrinkage coefficient and diriage

4 结 论

(1) 由于钢渣细集料较大的吸水率,用作水稳基层材料时,其较佳含水率较天然集料要高。

(2) 钢渣细集料会对水泥水化造成影响,其具有一定的反应活性,在龄期较长时,使用纯钢渣集料组成的级配 1 具有较高的抗压强度、劈裂强度和抗压回弹模量。

(3) 钢渣路面基层材料具有优异的性能,减少废渣堆存用地及公路建设工程中开采天然集料用地,保护耕地和植被,应用前景十分广阔。

参考文献:

[1] 曾梦澜,阮文,蒙艺,等. 二灰钢渣碎石路面基层材的设计与使用性能[J]. 湖南大学学报:自然科学版,2012,39(10):1-6.

[2] 袁玉卿,吴传海,周鑫,等. 二灰钢渣混合料力学性能试验研究[J]. 武汉理工大学学报,2006,28(12):38-40.

[3] 曾梦澜,吴盛华,胡冰,等. 水泥稳定钢渣-碎石路面基层材料试验研究[J]. 湘潭大学自然科学学报,2011,33(1):29-33.

[4] 中华人民共和国交通部. JTG E42-2005,公路工程集料试验规程[S]. 2005.

[5] 中华人民共和国交通部. JTJ034-2000,公路路面基层施工技术规范[S]. 2000.

- [6] 中华人民共和国交通部. JTG E51-2009, 公路工程无机结合料稳定材料试验规程[S]. 2009.
- [7] 李淑明, 许志鸿. 水泥稳定碎石基层的最低劈裂强度和抗压强度[J]. 建筑材料学报, 2007, 10(2): 177-182.
- [8] 朱唐亮, 谈至明, 周玉民. 水泥稳定类基层材料抗冲刷性能的试验研究[J]. 建筑材料学报, 2012, 15(4): 565-568.
- [9] 孙兆辉. 水泥稳定碎石基层的抗裂稳定性研究[J]. 建筑材料学报, 2007, 10(1): 59-65.
- [10] 中华人民共和国交通部. T0854-2009, 无机结合料稳定材料干缩试验方法[S]. 2009.

Experimental Research on the Basic Performance of the Semi-rigid Base Material with Steel-slag

Li Canhua^{1,2}, Xiang Xiaodong¹, Liu Si², Hua Zhoulian², Jiao Lixin²

(1. Hubei Key Laboratory for Efficient Utilization and Agglomeration of Metallurgic Mineral Resources
Wuhan University of Science and Technology, Wuhan, Hubei, China

2. Metal Resources Co., Ltd., of Wuhan Iron and Steel (group) Corp., Wuhan, Hubei, China)

Abstract: A new way to make semi-rigid base material with steel slag was put forward. The optimal moisture contents were determined when the 7 d unconfined compressive strengths met the Chinese regulatory requirements. The semi-rigid base material using steel-slag as the only aggregate has obtained higher compressive strength, splitting strength and compressive modulus after a longer time hydration. By Stability test, it was found that the stability, erosion resistance, and crack resistance of the semi-rigid base materials with steel-slag were all superior to China's traffic regulations.

Keywords: Steel slag; Semi-rigid base; Road performance

(上接 80 页)

参考文献:

- [1] 刘新荣, 祝云华, 李晓红, 等. 隧道钢纤维喷射混凝土单层衬砌试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(8): 2320.
- [2] 刘竹风. 钢纤维—新型喷射混凝土加强材料[J]. 国外公路, 1996, 16(4): 50.
- [3] 高丹盈, 刘建秀. 钢纤维混凝土基本理论[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1994.
- [4] CECS13:89, 钢纤维混凝土试验方法[S]. 哈尔滨: 哈尔滨建筑工程学院, 1989.
- [5] 吴中伟. 纤维增强—水泥基材料的未来[J]. 混凝土与水泥制品, 1999(1): 5-6.
- [6] 杜国平, 刘新荣. 隧道钢纤维喷射混凝土性能试验及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(7): 7.
- [7] 赵春孝. 喷射钢纤维混凝土性能试验研究[J]. 煤炭工程, 2011(6): 92.
- [8] 刘红燕. 应用能量守恒原理设计钢纤维喷射混凝土衬砌厚度的方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2006(2): 424.

Experiments on Failure Mechanism and Mechanical Properties of Steel Fiber Reinforced Concrete

Zhe Yalei, Hou Kepeng, Yang Zhiquan, Qu Maoxuan

(Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan, China)

Abstract: Through the analysis and comparison of the failure mechanism between concrete and steel fiber reinforced concrete, the effect of the addition of steel fiber on the whole failure process of concrete and the mechanism of reinforcing the matrix, and the constraint effect of steel fiber across cracks on the development of cracks were discussed. The results indicated that steel fiber reinforced concrete is of obvious function in crack retardation, but there is no obvious function in the avoidance of cracking. Experiments on the mechanical properties of specimens cut from sprayed plates with the quantity of steel fiber of 30 kg/m³ were conducted to study the cube compressive strength, axial compressive strength and splitting tensile strength, and standard deviation coefficient was introduced into the experimental analysis to evaluate the credibility of the test data.

Keywords: Steel fiber reinforced concrete; Failure mechanism; Compressive strength; Splitting tensile strength