

掺钢渣水泥稳定碎石配合比优化设计及  
路用性能研究\*

陈超<sup>1</sup>, 陈云耀<sup>2</sup>, 龚耀<sup>3</sup>

(1.江西萍乡经济开发区农技水利站, 江西 萍乡 33700;2.江西安源路桥集团有限公司, 江西 萍乡 33700;  
3.长沙理工大学 交通运输学院, 湖南 长沙 410114)

**摘要:**为分析萍钢钢渣代替碎石对水泥稳定碎石基层的影响,参照半刚性基层水泥稳定碎石配合比设计方法,对 3 种结构类型、9 种级配的萍钢钢渣混合料进行 5%水泥剂量的 7 d 抗压强度试验,确定最优级配;进行 5 种钢渣掺量水泥稳定碎石混合料抗压强度试验、弹性模量试验、干缩试验和温缩试验并与水泥稳定碎石进行对比。结果表明,水泥稳定钢渣的级配以骨架密实细型级配为最优;以 60 d 强度为优化目标比 7 d 强度更合理;掺钢渣水泥稳定碎石的强度、弹性模量及干缩性能优于水泥稳定碎石,但其温缩性能降低。

**关键词:**公路;半刚性基层;掺钢渣水泥稳定碎石;配合比;路用性能

**中图分类号:**U416.1

**文献标志码:**A

**文章编号:**1671-2668(2019)05-0075-04

大量工程实例表明,钢渣不但具有板体性、强度高、稳定性好等特性,且表现出良好的施工性能,合理的钢渣掺量在半刚性基层中能发挥其特有的活性,提高水泥稳定碎石的路用性能。尽管对钢渣应用于公路基层有一定研究成果,也有相关规范对钢渣用于路面基层作了相应规定,但钢渣的存放龄期、物理力学性能等的差异,影响掺钢渣水泥稳定碎石混合料的力学性能及路用性能,阻碍了钢渣在基层中的推广应用。该文以江西联达白源冶金有限公司的萍钢钢渣为原料,以 7 d 抗压强度为目标确定最佳级配,以 60 d 抗压强度确定掺钢渣水泥稳定碎石的钢渣最佳掺量,对比分析掺钢渣水泥稳定碎石与水泥稳定碎石的强度、弹性模量、干缩性能及温缩性能,分析掺钢渣水泥稳定碎石的路用性能。

1 原材料

1.1 水泥

采用中材萍乡水泥有限公司生产的 P.C32.5 水泥,其技术性质(见表 1)符合 JTG/T F20-2015《公路路面基层施工技术细则》对基层用水泥的要求。

1.2 碎石

碎石采用萍乡市上栗县杨岐鸿发采石场生产的石灰岩,压碎值为 21.4%,其余指标符合《公路路面基层施工技术细则》对基层用碎石的要求。

表 1 水泥的技术性质检测结果

检测项目		检测结果
细度/%		7.8
初凝时间/min		195
终凝时间/min		485
安定性		合格
抗折强度/MPa	3 d	3.2
	28 d	6.1
抗压强度/MPa	3 d	12.0
	28 d	34.2

1.3 钢渣

1.3.1 钢渣的物理力学性质

采用江西联达白源冶金有限公司炼钢的陈渣,其为在自然堆积下陈伏 2 年以上的钢渣。钢渣粗集料技术性质检测结果见表 2,满足规范要求。

表 2 钢渣粗集料的技术性质检测结果

检测项目	技术 要求	各粒径(mm)实测结果		
		20~25	10~20	5~10
压碎值/%	≤26	—	20.4	—
毛体积密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	实测	2.899	2.976	2.954
吸水率/%	—	2.3	2.3	3.2
针片状含量/%	≤22	8.9	9.5	5.3
0.075 mm 以下粉尘含量/%	≤2	0.6	0.5	1.5
软石含量/%	≤5	0.2	0.3	0.6

\* 基金项目:湖南省教育厅资助科研项目(18A117);湖南省自然科学基金资助项目(2019JJ40312)

0~5 mm 钢渣的塑性指数为 12.5,满足规范要求;钢渣的吸水率比碎石大得多,主要是由于钢渣为多孔结构,内部存在很多微小孔隙,掺入钢渣的混合料的最佳含水率有所提高;钢渣的压碎值为 20.4%,小于碎石的压碎值 21.4%;密度比一般碎石大。钢渣用于道路工程具有良好的力学性能。

### 1.3.2 钢渣的稳定性

(1) 钢渣的粉化率。根据 GB/T 24175—2009《钢渣稳定性试验方法》进行粉化率试验,结果显示,钢渣的粉化率为 3.9%,满足规范不大于 5%的要求,可用作公路基层骨料。

(2) 钢渣的浸水膨胀率。根据《钢渣稳定性试验方法》进行浸水膨胀率试验,结果显示:3 个试件的浸水膨胀率分别为 1.48%、1.43%、1.52%,均值为 1.48%,符合规范对筑路用钢渣浸水膨胀率不大

于 2%的要求;随着时间的推移,钢渣的浸水膨胀率增大,其中前 7 d 增长速率较大,7 d 后速率变小。

## 2 配合比优化设计

### 2.1 级配曲线设计

试验采用 3 种结构类型,分别为骨架密实结构、悬浮密实结构与骨架空隙间断级配结构,其中骨架密实结构、悬浮密实结构的级配范围分别为 JTGF20—2015《公路路面基层施工技术细则》中高速公路基层推荐的 C—B—3、C—B—2,间断级配采用该规范附录 A 中的幂函数、指数函数与对数函数分别构造一条曲线。每种类型设计偏细、适中、偏粗 3 种级配分别进行重型击实试验,以抗压强度最大为优化目标选取最佳级配作为后续 5 种掺钢渣水泥稳定碎石的级配。9 种级配的目标配合比见表 3。

表 3 9 种级配的目标配合比

粒径/mm	3 种骨架密实结构的目标配合比/%			3 种悬浮密实结构的目标配合比/%			3 种间断级配结构的目标配合比/%		
	细型	中型	粗型	细型	中型	粗型	细型	中型	粗型
31.500	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
26.500	—	—	—	100.0	100.0	100.0	95.0	95.0	95.0
19.000	82.9	77.9	72.0	100.0	100.0	100.0	83.2	77.9	66.7
16.000	—	—	—	93.2	91.9	89.8	77.1	70.3	57.8
13.200	—	—	—	83.4	80.7	76.6	70.3	62.6	50.7
9.500	52.4	50.2	46.3	67.4	64.4	62.1	58.6	51.5	42.6
4.750	30.4	28.6	25.9	41.5	38.9	35.5	34.0	34.0	34.0
2.360	22.7	21.3	19.2	31.2	29.2	26.4	28.7	21.9	9.0
1.180	—	—	—	19.4	18.2	16.5	23.4	14.2	4.6
0.600	9.8	9.3	8.4	13.5	12.7	11.6	18.3	9.2	3.4
0.300	—	—	—	8.0	7.6	7.0	13.0	6.0	2.8
0.150	—	—	—	5.3	5.0	4.6	7.8	3.9	2.6
0.075	1.9	1.8	1.7	2.5	2.4	2.3	2.5	2.5	2.5

### 2.2 击实试验

拟定 5%、6%、7%、8%、9% 5 个含水率梯度,水泥剂量取 5%,根据 JTGE51—2009《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》进行击实试验,得到 9 种级配的最大干密度与最佳含水率(见表 4)。

### 2.3 无侧限抗压强度试验

以最大干密度和最佳含水率静压成型试件,采用液压式压力机进行无侧限抗压强度试验,每种级配成型 13 个试件,以保证率系数为 95%且变异系数小于 15%计算强度代表值,试验结果见表 5。

由表 5 可知:以骨架密实结构细型、中型和粗型 3 种级配成型的试件的抗压强度分别为 5.94、5.47、

5.15 MPa,满足高速公路基层强度 5~7 MPa 的要求;以悬浮密实结构 3 种级配成型的试件的抗压强

表 4 各级配的最大干密度及最佳含水率

级配类型	最大干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	最佳含水率/%
骨架密实细型	2.526	7.1
骨架密实中型	2.590	7.2
骨架密实粗型	2.610	7.4
悬浮密实细型	2.532	8.2
悬浮密实中型	2.550	8.0
悬浮密实粗型	2.535	8.0
间断级配细型	2.420	7.6
间断级配中型	2.440	7.5
间断级配粗型	2.430	7.7

表 5 各级配的无侧限抗压强度试验结果

级配类型	7 d 无侧限抗压强度 代表值/MPa	变异系数/%
骨架密实细型	5.94	5.5
骨架密实中型	5.47	4.2
骨架密实粗型	5.15	3.4
悬浮密实细型	4.59	5.0
悬浮密实中型	5.08	9.0
悬浮密实粗型	3.73	5.5
间断级配细型	2.11	10.4
间断级配中型	2.76	9.6
间断级配粗型	2.26	10.4

度分别为 4.59、5.08、3.73 MPa,只有悬浮密实中型级配符合要求;以间断级配结构 3 种级配成型的试件的抗压强度分别为 2.11、2.76、2.26 MPa,均不符合要求。就 7 d 无侧限抗压强度而言,骨架密实结构的强度最高,悬浮密实结构次之,间断级配最差。因此,选定抗压强度最高的骨架密实细型级配为最优级配进行后续试验研究。

2.4 各掺量钢渣混合料成型参数

分别以钢渣掺量 0、25%、50%、75%、100% 进行水泥稳定碎石击实试验,采用丙法分 3 层击实。每种钢渣掺量进行 2 次试验,取平均值作为试验结果(见表 6)。

表 6 5 种钢渣掺量水泥稳定碎石的击实试验结果

钢渣 : 碎石	最大干密度/(g · cm <sup>-3</sup> )	最佳含水率/%
0.00 : 1.00	2.357	4.4
0.25 : 0.75	2.397	4.9
0.50 : 0.50	2.447	5.8
0.75 : 0.25	2.495	6.8
1.00 : 0.00	2.530	7.2

由表 6 可知:随着钢渣掺量的增大,水泥稳定碎石的最大干密度与最佳含水率增大,这是由于钢渣的毛体积密度与吸水率均比碎石大,随着钢渣掺量增加,混合料中碎石减少,最大干密度增大,所对应的含水率也增大;随着钢渣比重的增加,最佳含水率在前期缓慢上升,当钢渣达到一定数量时,最佳含水率先快速增大后逐渐变缓,而最大干密度随着钢渣的增加基本为匀速增大。

3 路用性能对比

3.1 强度试验

以 5 种钢渣掺量水泥稳定碎石的最大干密度和

最佳含水率成型无侧限抗压强度试件,分别养护 7、28、60 d,测定不同掺量混合料在不同龄期的强度,确定最佳钢渣掺量,试验结果见表 7。

表 7 掺钢渣水泥稳定碎石各龄期的抗压强度试验结果

钢渣 : 碎石	各龄期抗压强度/MPa		
	7 d	28 d	60 d
0.00 : 1.00	5.1	9.1	10.5
0.25 : 0.75	5.2	9.8	11.6
0.50 : 0.50	5.6	10.7	12.4
0.75 : 0.25	5.7	12.1	13.4
1.00 : 0.00	6.0	9.9	8.9

由表 7 可知:相对于集料全部用碎石,将钢渣掺入水泥稳定碎石中,混合料的强度增强。1) 7 d 抗压强度。钢渣掺量为 100% 时混合料的 7 d 抗压强度最大,达 6.0 MPa,比水泥稳定碎石增加 17.6%。其原因主要是钢渣的压碎值比一般石灰岩大,有助于混合料的强度形成,随着混合料中钢渣比重的增加,混合料强度增大;钢渣中具有类似于硅酸三钙、硅酸二钙、铁铝酸三钙、铁铝酸四钙等的活性成分,这些水硬性矿物与水发生反应产生具有胶结作用的水化产物,使混合料的强度增强;钢渣中具有少量的游离氧化钙成分,其遇水发生水化反应生成的氢氧化钙会与钢渣中的活性氧化物发生火山灰反应,为混合料强度的形成添砖加瓦;游离氧化钙遇水发生水化反应会使体积膨胀,填充混合料的孔隙,使混合料更加密实,强度得以增长。钢渣掺量为 25% 时的 7 d 抗压强度与不掺钢渣时相比仅大 0.1 MPa,这是因为钢渣掺量较少时,钢渣对混合料强度的作用甚微,短时间内不能为强度带来有效的作用。2) 28 d 抗压强度。钢渣掺量为 75% 时混合料的 28 d 抗压强度最大,为 12.1 MPa,而钢渣掺量为 100% 时的强度只有 9.9 MPa。这是因为掺量过大时钢渣中活性物质较多,虽然存在某些活性物质与水反应生成具有胶结作用的水化产物,但较多的活性物质发生化学反应后体积膨胀,混合料中原有的孔隙不足以吸收,使混合料的内应力增大,当内应力积累达到一定程度时,混合料内部会产生一些微小裂缝,导致混合料强度降低。说明钢渣掺量存在一个最佳值。3) 60 d 抗压强度。除钢渣掺量为 100% 时混合料因内部产生微小裂缝其 60 d 抗压强度减小外,其他掺量时强度均随时间缓慢增长,其中钢渣掺量为 75% 时强度最大,达 13.4 MPa,比水泥稳定碎石增大 27.6%。

在掺钢渣水泥稳定碎石设计中,不能笼统地将

7 d 强度最大时的配合比作为最佳配合比,这是因为钢渣膨胀缓慢,混合料后期强度不一定随龄期而增长,甚至会出现强度降低的情况,只有将钢渣以一个适当的掺量掺入水泥稳定碎石中,钢渣遇水膨胀后的体积恰好能被混合料的原有孔隙中和,吸收膨胀产生的内应力,将钢渣变废为宝,合理地应用于路面基层。根据 5 种混合料抗压强度与龄期的关系,确定钢渣最佳掺量为 75%。

### 3.2 弹性模量试验

按 JTG D50—2017《公路沥青路面设计规范》对水泥稳定碎石进行弹性模量试验,掺 75% 钢渣的水泥稳定碎石及不掺钢渣的水泥稳定碎石的弹性模量试验结果见表 8。

表 8 水泥稳定碎石弹性模量测试结果

混合料类型	弹性模量平均值/MPa	标准差/MPa	变异系数/%
水泥稳定碎石	17 152	2 093	12.2
掺钢渣水泥稳定碎石	22 086	3 024	13.7

由表 8 可知:掺钢渣水泥稳定碎石的弹性模量大于一般水泥稳定碎石,进一步说明掺 75% 钢渣的水泥稳定碎石的强度优于水泥稳定碎石。

### 3.3 干缩试验

无机结合料的收缩性能是反映半刚性基层抗裂性能的重要指标。参照无机结合料稳定材料干缩试验方法,对掺 75% 钢渣的水泥稳定碎石及不掺钢渣的水泥稳定碎石进行干缩性能试验,结果见图 1。

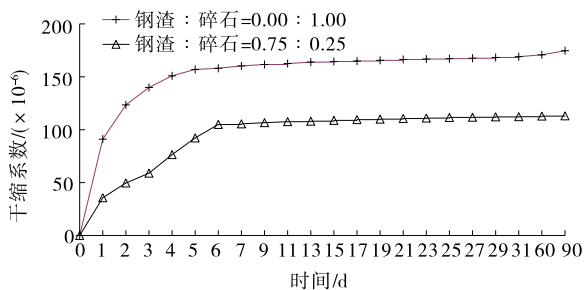


图 1 水泥稳定碎石干缩系数的变化

由图 1 可知:随着钢渣掺量的增加,混合料的干缩系数减小;相对于水泥稳定碎石,掺 75% 钢渣的水泥稳定碎石的干缩系数减少 35.2%,且其干缩系数变化在 7 d 左右后开始变缓。其原因为钢渣中含有较多活性物质,其与水发生化学反应消耗部分水分,从而抑制混合料的干缩;钢渣中的游离氧化钙遇水反应生成氢氧化钙导致体积膨胀,中和混合料的干燥收缩。

裂缝是半刚性基层最易发生的病害现象,而干

燥收缩是导致裂缝生成的重要原因。在水泥稳定碎石中掺入一定量钢渣,可大大减小混合料的干缩系数,延缓或抑制半刚性基层裂缝的产生。

### 3.4 温缩试验

参照无机结合料稳定材料温缩试验方法,对掺 75% 钢渣的水泥稳定碎石与不掺钢渣的水泥稳定碎石进行温缩性能检测。试验温度为 40~ -20℃,从高温到低温,每 10℃ 为 1 个温度级别,共 6 个温度级别。试验结果见图 2。

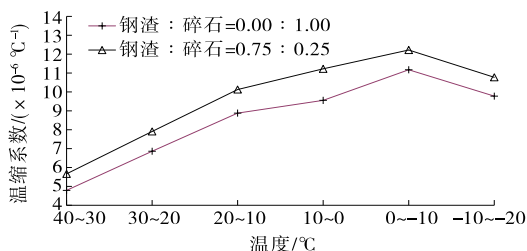


图 2 水泥稳定碎石温缩系数的变化

由图 2 可知:水泥稳定碎石 6 个温度级别的平均温缩系数为  $8.51 \times 10^{-6} \text{℃}^{-1}$ ,而 75% 钢渣掺量的水泥稳定碎石的平均温缩系数为  $9.65 \times 10^{-6} \text{℃}^{-1}$ ,掺入钢渣后水泥稳定碎石的温缩系数增大,且 6 个温度级别的温缩系数均有所增加,以钢渣代替部分集料的半刚性基层相对于碎石为集料的半刚性基层更易发生温缩裂缝。这主要是由于钢渣集料的吸水率大,成型的水泥稳定钢渣碎石的毛细水和弱结合水比水泥稳定碎石多。

## 4 结论

(1) 掺钢渣水泥稳定碎石的级配以骨架密实细型级配为最优,建议以 60 d 抗压强度为级配选择依据。钢渣掺量为 75% 时,水泥稳定碎石的抗压强度最大,其 60 d 抗压强度为水泥稳定碎石的 1.28 倍。

(2) 掺钢渣可提高水泥稳定碎石的弹性模量,掺量为 75% 时的弹性模量提高 28.8%,与抗压强度的提高趋势一致。

(3) 钢渣掺量为 75% 的水泥稳定碎石的干缩系数比水泥稳定碎石小,但温缩系数稍大,钢渣的掺入有助于缓解水泥稳定碎石的干缩开裂,但会导致温缩性能不佳。

### 参考文献:

- [1] 胡致远,李闯民.钢渣底基层在昌金高速公路应用的研究[J].公路交通科技:应用技术版,2006(6).

(下转第 82 页)

层格栅嵌入老路堤的深度进行分析,结果见图9。

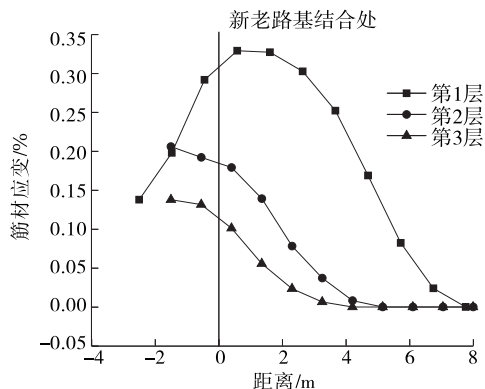


图9 中下部第1、2、3层土工格栅的应变

由图9可看出:距离结合部处2 m时,随着离结合部距离的增加,筋材的应变迅速下降,实际工程中应将土工格栅嵌入老路堤中以更好地发挥筋材的性能;嵌入老路堤的长度越大,筋材的性能越能得到发挥。该工程中路基台阶宽度并不大,选择全部嵌入老路堤中效果最好。但当台阶宽度较大时,选择全部嵌入则可能造成浪费,应进行具体分析。

#### 4 结论

(1) 土工格栅对路堤竖向沉降和侧向位移均能起到限制作用,随着格栅模量的增加,相较于未铺设格栅时,对竖直沉降的限制最多为11.6%,对侧向位移的限制作用则可达50.6%。

(2) 综合考虑施工成本与对位移的影响,建议在新路堤铺设2层土工格栅且铺于底部与中部;若铺设1层土工格栅,则铺于底部时效果最佳。

(3) 土工格栅对侧向位移的限制作用随着铺设宽度的增加而提升,最多可达17.3%。但并非线性变化,可根据实际需要与成本选择是否全铺。

(4) 土工格栅嵌入老路堤中更有利于发挥其性能,路基台阶宽度较小时,选择全部嵌入老路堤中效果最好。

#### 参考文献:

- [1] 刘汉龙,吴维军,高玉峰.土工织物加固堤防非线性有限元分析[J].岩土力学,2003,24(1).
- [2] 沈国印,李修忠.高速公路拓宽工程新老路基差异沉降的数值模拟[J].公路,2012(9).
- [3] 汪益敏,李庆臻,高水琴.差异沉降对土工格栅加筋路堤工作性能影响的试验研究[J].华南理工大学学报:自然科学版,2011,39(9).
- [4] 梁小勇,靳静.土工格栅二灰改良土在地基加宽中的应用分析[J].河北工业科技,2016(4).
- [5] 张军辉,黄晓明,彭娟.软土地基上高速公路双侧加宽工程的数值分析[J].公路交通科技,2007,24(3).
- [6] 王成祥.土工格栅在处治软土路基变形中的应用研究[J].交通科技,2015(6).
- [7] 郭忠印,刘奉侨,辛伟,等.土工材料在加宽路基中的应用研究[J].辽宁交通科技,2005(增刊).
- [8] 观祖保.新老道路拼接中土工格栅加筋土的协同作用研究[D].南京:南京林业大学,2016.
- [9] 汪迎红.高速公路软土路基沉降影响因素及变形规律研究[J].价值工程,2016(34).
- [10] 尉红彬.高速公路改扩建地基加宽锚固加筋技术研究[J].公路交通科技:应用技术版,2013(2).
- [11] 史芳,薛晓辉,秋全,等.土工格栅二灰土加宽路基的力学特性[J].公路交通科技,2014,31(9).
- [12] 汪浩.新老路结合部处治技术研究[D].南京:东南大学,2004.
- [13] 章定文.软土地基上高速公路扩建工程变形特性研究[D].南京:东南大学,2004.

收稿日期:2018-12-09

\*\*\*\*\*

(上接第78页)

- [2] 肖常青.水泥稳定钢渣基层施工技术及其应用研究[J].中外公路,2004,24(5).
- [3] 卢发亮,李晋,张起.水泥稳定钢渣转炉钢渣性能试验研究[J].中外公路,2013,33(5).
- [4] 刘大超,陈云,马世洪,等.水泥稳定钢渣在路面基层中的应用技术研究[J].重庆建筑,2009,65(3).
- [5] YB/T 4184-2009,钢渣混合料路面基层施工技术规范[S].
- [6] GB/T 24175-2009,钢渣稳定性试验方法[S].
- [7] JTG/T F20-2015,公路路面基层施工技术细则[S].

- [8] JTG E51-2009,公路工程无机结合料稳定材料试验规程[S].
- [9] 阮文,胡圣魁,陈泽宏,等.基于膨胀机理的钢渣基层材料体积安定性研究[J].公路,2013(4).
- [10] 张宗保,张和远,刘志强,等.水泥粉煤灰综合稳定钢渣碎石基层性能研究[J].公路,2008(10).
- [11] JTG D50-2017,公路沥青路面设计规范[S].
- [12] 李飞,陈勇鸿,高伏良,等.掺钢渣无机结合料稳定路面基层材料干缩温缩试验研究[J].公路,2012(12).

收稿日期:2019-04-10