

水泥稳定钢渣碎石基层材料的路用性能研究

王清洲¹, 梁瑛硕¹, 赵云飞^{1,2}, 张志银¹, 马士宾¹

(1. 河北工业大学 土木与交通学院, 天津 300401; 2. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710061)

摘要: 为保证公路半刚性基层性能的前提下最大限度地使用钢渣, 尝试将级配不良的自然级配水泥稳定钢渣混合料用于低等级道路的基层, 探究级配水泥稳定钢渣混合料力学性能、收缩性能和耐久性的影响, 分析自然级配水泥稳定钢渣混合料用于低等级公路半刚性基层的可行性和适用性。结果表明: 4类级配的水泥稳定钢渣碎石混合料的力学性能均随着龄期和水泥掺量的增加而增长, 中级配各项性能最优, 自然级配的性能最差。级配显著影响混合料的力学性能、收缩性能和疲劳性能。尽管掺加自然级配的水泥稳定钢渣混合料因级配不良将降低其路用性能, 但各项路用性能指标均能够满足规范中对低等级公路的技术要求, 同时因能够最大限度地利用钢渣修筑道路基层, 将具有较好的社会和经济效益, 推荐掺自然级配钢渣的水泥稳定钢渣混合料应用于低等级公路基层。

关键词: 水泥稳定碎石; 钢渣; 级配不良; 自然级配; 路用性能

中图分类号: TU521; U416.214

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2023)01-0143-09

Road performance of subgrade consisted of cement stabilized steel slag and crushed stone

WANG Qingzhou¹, LIANG Yingshuo¹, ZHAO Yunfei^{1,2}, ZHANG Zhiyin¹, MA Shibin¹

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;

2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

Abstract: In order to ensure the performance of semi-rigid subgrade under the premise of maximum use of steel slag, naturally graded cement stabilized steel slag mix with poor gradation was applied to low-grade road subgrade to explore the influence of gradation on the mechanical properties, shrinkage properties and durability of cement stabilized steel slag mix. Moreover, the feasibility and applicability of this mix in the construction of semi-rigid subgrade of low-grade roads were investigated. The results showed that the mechanical properties of the four types of graded cement stabilized steel slag mixes increased with the increase of age and cement dosage, with the best performance of the mix with medium gradation and the worst performance of that with natural gradation. The gradation significantly affects the mechanical properties, shrinkage properties and durability properties of the mix. Although the road performance of naturally graded cement stabilized steel slag mix is inferior due to poor gradation, its road performance indicators are still able to meet the requirements of the specification for low-grade roads, as well as maximizes the use of steel slag in the construction of road subgrade, which will bring better social and economic benefits. Therefore, it is recommended that the cement stabilized steel slag mix with natural graded steel slag should be adopted for the low-grade road subgrade.

Key words: cement stabilized crushed stone; steel slag; poor gradation; natural gradation; road performance

1 研究背景

钢渣是炼钢过程中产生的工业固体废物, 其超

过了钢产量的10%, 长期以来, 中国的钢渣存积量已超过了 $19 \times 10^8 \text{ t}^{[1]}$, 但钢渣的实际利用不足其存积量的20%。钢渣的持续存积, 不但浪费土地资

收稿日期: 2022-07-31; 修回日期: 2022-10-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(51978237)

作者简介: 王清洲(1979-), 男, 河北沧州人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事道路材料方面的研究。

通讯作者: 马士宾(1973-), 男, 河北保定人, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事路基路面方面的研究。

源,而且还容易带来严重的环境污染及安全问题^[2-3],合理高效地利用废弃钢渣成为当前研究的热点问题之一。水泥稳定碎石基层材料是我国沥青路面基层或底基层最常用的材料^[4],多年来,优质石料的需求旺盛与石料资源匮乏问题已成为基层建设过程中面临的主要难题。由于钢渣中含有一定的硅酸二钙、硅酸三钙等活性成分,激发活性后通过与水泥的水化作用可以生成对材料力学强度有益的水化硅酸钙^[5],因而已作为集料应用于道路水泥稳定基层中,但通常钢渣仅能替代部分碎石,所形成的水泥稳定碎石钢渣混合料多用于铺筑底基层。若采用钢渣替代部分或全部碎石集料应用于水泥稳定基层材料中,将有益于解决天然集料匮乏的工程难题。

关于钢渣用于半刚性基层材料的力学性能问题已有大量的研究成果。研究^[6-10]发现,钢渣的表面粗糙,可以增加其与水泥之间的摩擦力,其潜在胶凝活性成分水化后的产物可以填补钢渣和水泥浆体的过渡区域,从而提升水泥混凝土的抗压强度。Barisic 等^[11]通过研究发现龄期、水泥用量和钢渣掺量的增加均可以提高混合料的弹性模量以及力学强度。钢渣中的活性成分可以促进水泥早期水化反应的发生,有效减少水泥基材料的收缩。辛德军等^[12]采用体积设计法将不同水泥剂量和不同比例的钢渣和碎石掺配,通过对比发现水泥剂量为 5%、钢渣掺量为 65% 时,水泥稳定钢渣碎石混合料具有良好的强度和抵抗收缩能力,可减少基层收缩开裂;Liu 等^[13]研究了钢渣水泥混凝土的力学和疲劳耐久性,发现钢渣的掺入能够提高混凝土的强度和收缩性;顾晓薇等^[14]研究发现,适量的钢渣与高炉渣复掺能够促进水泥早期水化反应的发生。相关学者研究了掺加钢渣对提高水泥稳定碎石基层耐久性的贡献。黄浩^[15]研究了 4 种钢渣掺量下混合料的抗冻性能,证明掺入 75% 钢渣的混合料的抗冻系数相较于普通水泥稳定碎石混合料提高了 5.9%;黄优等^[16]研究表明钢渣掺量为 50% 的水泥稳定碎石具有良好的力学性能、体积稳定性以及环境友好性;肖杰等^[17]通过扫描电镜(scanning electron microscope, SEM)、X 射线衍射(X-ray diffraction, XRD)微观试验方法确定钢渣能够显著减少水泥稳定碎石混合料

的孔隙和裂缝;喻平^[18]通过试验表明,水泥稳定钢渣碎石试件疲劳寿命随着钢渣和水泥掺量的增加而增大,其疲劳性能的主要影响因素是集料与凝结材料之间的粘结效果。上述研究成果证明了水泥基材料中加入钢渣可有效提高混合料的力学性能,并能有效改善混合料的收缩特性、抗冻性和耐久性,同时,钢渣用于道路工程材料具备较好的经济效益和环境效益,符合交通运输行业减碳的政策方向。

集料的级配特性对于水泥基材料性能的影响不容忽视。张旭等^[19]、李宗利等^[20]、孔丽娟等^[21]研究发现,粗骨料体积分数越大,对水泥混凝土强度的影响越明显。研究^[22-25]表明,集料粒径和级配影响着水泥稳定碎石的密实度,进而影响材料的抗压强度、回弹模量、抗裂等性能指标,其原因是集料粒径较大或级配不良会导致材料内部孔隙率增大,材料强度降低;而细集料较多时,则混合料的抗裂性和耐冻性较差,回弹模量值较小。目前我国多数钢厂产生的钢渣级配偏细,最大粒径通常在 20 mm 以内,有少量的 30 mm 及以上粒径的超大块体。考虑到钢渣级配的不均匀性,使用过程中钢渣只能替代部分碎石用来拌制水泥稳定钢渣碎石混合料,这样钢渣的利用量将受到限制;若不掺加大粒径碎石而全部使用钢渣拌制水泥稳定钢渣基层混合料,则水泥稳定钢渣材料将因级配不良而降低其路用性能。

从现有的文献资料来看,学者们对于水泥稳定钢渣碎石混合料的研究主要包括钢渣和水泥的合理掺量、外加剂对含钢渣水泥稳定碎石混合料的影响以及如何减轻钢渣中重金属对环境的影响等方面,但由于我国钢渣存积量巨大,如何大批量、高消耗率地利用钢渣成为当前面临的首要难题。因此,本文研究了 4 种级配的水泥稳定钢渣碎石混合料的力学性能、收缩特性和疲劳性能,以期将级配稍差的水泥稳定钢渣碎石混合料应用于低等级道路基层,推动大掺量水泥稳定钢渣在道路基层中的推广应用。

2 材料与方法

2.1 原材料

(1)水泥。试验选用河北省邯郸市某水泥厂生产的云台山牌 P. O32.5 水泥,其技术指标见表 1。

表 1 试验用水泥的技术指标

细度/ ($\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$)	标准稠度用水量/ %	初凝(终凝)时间/ min	安定性/ min	烧失量/ %	三氧化硫 含量/%	碱含量/ %
371	27.6	205(284)	0.2	3.18	2.42	0.36

(2)粗骨料。试验选用天津市武清区某石料厂生产的碎石集料,根据《公路工程集料试验规程》(JTG E42—2005)的要求,检测碎石的各项基本性能指标,检测结果见表 2。

表 2 试验用碎石粗骨料的基本性能指标

表观密度/ (g·cm ⁻³)	抗压强度/ MPa	弹性模量/ 10 ⁵ MPa	吸水 率/%	压碎 值/%	硫化物 含量/%	碱活 性/%
2.851	85.3	1.51	0.81	13.6	0.2	0.03

(3)细集料。试验用砂产于天津市武清区某采石场,其技术指标见表 3。

表 3 试验用细集料技术指标

细度 模数	氯离子 含量/%	硫化物 含量/%	碱活 性/%	吸水 率/%	云母含 量/%
2.85	0.005	0.2	0.025	0.66	0.4

(4)钢渣。选用河北省邯郸市某钢厂生产的钢渣,经过多级破碎、滚筒及水洗等多重工艺处理,其外观形态与微观形貌如图 1 所示。钢渣集料整体结构密实,含有较多微观空隙,有利于水化反应后界面强度的形成。

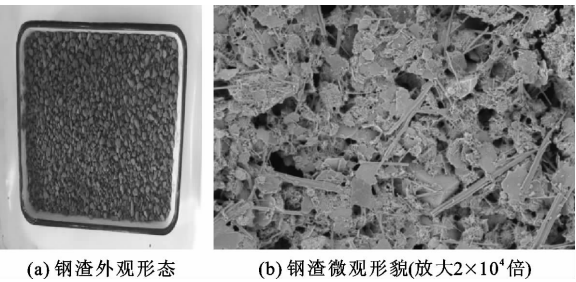


图 1 试验用钢渣的外观形态与微观形貌

通过四分法选取 4 组钢渣试样,采用德国布鲁克 D8FOCUS X 射线衍射仪分析钢渣中的化学成分及含量,如表 4 所示。由表 4 可见,试验钢渣中含量较多的化学成分为 CaO、Fe₂O₃、SiO₂、MgO、Al₂O₃、MnO、P₂O₅,其中 CaO、Fe₂O₃ 和 SiO₂ 三者含量最多,占总量的 80% 以上,这些成分有益于钢渣与水泥发生水化反应从而形成强度。

选用钢渣的技术性质指标如表 5 所示,满足《公路路面基层施工技术细则》(JTG/T F20—2015)对钢渣性质的相关规定。

依据《公路工程集料试验规程》(JTG E42—2005)的要求筛分试验用钢渣,自然级配的钢渣筛分结果如表 6 所示。

表 4 各组钢渣试样的主要化学成分及含量

化学 成分	各化学成分含量/%			
	试样 1	试样 2	试样 3	试样 4
CaO	40.22	41.94	40.39	37.98
Fe ₂ O ₃	30.07	32.41	36.16	37.54
SiO ₂	13.32	11.76	10.68	11.06
MgO	6.95	5.50	4.78	5.24
Al ₂ O ₃	5.58	4.48	4.20	4.15
MnO	1.38	1.49	1.41	1.56
P ₂ O ₅	0.94	1.10	1.07	1.15
其他	1.54	1.32	1.31	1.32

表 5 试验用钢渣的技术性质指标

表观密度/ (g·cm ⁻³)	吸水 率/%	压碎 值/%	针片状颗粒 含量/%	膨胀 率/%
3.1	1.5	16.0	2.6	1.2

表 6 试验用钢渣筛分试验结果

筛孔尺寸/ mm	分级筛余 百分率/%	累计筛余 百分率/%	通过百 分率/%
31.5	0	0	100
26.5	0	0	100
19.0	10.09	10.09	89.91
9.5	37.14	47.23	52.77
4.75	20.96	68.19	31.81
2.36	16.48	84.67	15.33
0.6	12.72	97.39	2.61
0.075	0.86	98.25	1.75
筛底	1.75	100	0

由表 6 可知,自然级配钢渣的粒径范围介于 0 ~ 20 mm 之间,19 mm 筛孔以上含量为 0,整体级配偏细,若要形成规范中要求的合理级配曲线,需掺入一定数量 10 ~ 30 mm 粒径的粗集料用以调整水泥稳定钢渣材料的级配,以便形成骨架结构。另外,自然级配钢渣中大于 9.5 mm 的粒径含量较少,小于 9.5 mm 的粒径含量又较多,分布不够均匀,但基本能够形成一定级配的曲线,如果将级配不良的自然级配钢渣拌制水泥稳定钢渣混合料使用,应考核其路用性能的各项指标能否满足相关规范要求。

2.2 试验混合料级配

为研究钢渣和天然石料混合后形成的合成级配对水泥稳定钢渣混合料性能的影响规律,采用试算

法确定自然级配、粗级配、中级配和细级配 4 种掺钢渣水泥稳定类基层材料,4 种级配试验混合料中各集料所占比例如表 7 所示,4 种级配混合料的级配曲线见图 2。

表 7 4 种级配试验混合料中各集料所占比例 %

级配类型	钢渣含量	20~30 mm 碎石含量	5~10 mm 碎石含量	0~5 mm 碎石含量
自然级配	100	0	0	0
粗级配	44	23	12	21
中级配	42	18	16	24
细级配	40	14	13	33

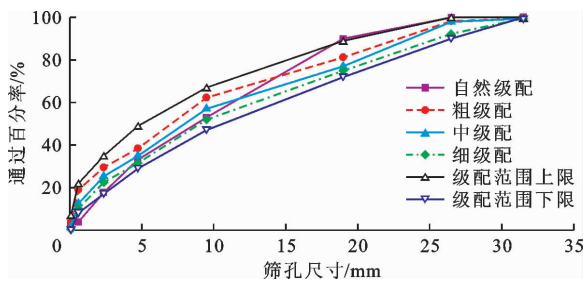


图 2 4 种级配试验混合料的级配曲线

2.3 试验方法

(1)力学性能试验。为测试 4 种不同级配的水泥稳定钢渣碎石混合料的力学性能,使用上海三思纵横机械制造有限公司生产的微机控制电液伺服万能试验机(WAW-1000 系统),按照《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E51—2009)分别进行抗压强度、抗压回弹模量和劈裂强度试验。采用振动成型方式制备试样,再分别养护 7、28、60、90 d。无侧限抗压强度、抗压回弹模量和劈裂试验的试验加载速率为 1 mm/min,抗弯拉强度试验采用的加载速率为 50 mm/min。

(2)收缩性能试验。混合料的收缩试验依照《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E51—2009)要求的方法进行。由于水泥掺量越多,试件的收缩越严重,故试验中仅采用 5% 水泥掺量的混合料开展收缩特性研究。采用振动成型方式,制备尺寸 100 mm×100 mm×400 mm 的试样,前 7 d 每天记录试件的变化情况,7~28 d 每间隔 1 d 记录 1 次数据,60 和 90 d 各记录 1 次试验数据。

(3)疲劳性能试验。疲劳试验依照《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E51—2009)中 T0856 的方法进行。采用三点弯曲疲劳试验,以振动成型法预制 100 mm×100 mm×400 mm 的试样,在标准条件下养护 90 d 并用水浸泡,取试样长度三等分点,放置在试验夹具中进行试验,试样中水泥掺量为 5%。

3 试验结果与分析

3.1 力学特性

3.1.1 无侧限抗压强度 3 种水泥掺量、4 种级配的混合料不同龄期的无侧限抗压强度试验结果如图 3 所示。由图 3 可知,随着水泥掺量的增多和养护龄期的延长,4 种级配混合料的抗压强度均呈增长趋势。混合料级配对无侧限抗压强度有明显影响。4 种级配混合料的抗压强度大小依次为中级配、粗级配、细级配、自然级配,5% 水泥掺量下,7 d 的无侧限抗压强度值相应为 9.3、8.7、8.1、7.4 MPa。自然级配钢渣混合料中的钢渣含量最大,抗压强度最低,可能的原因是钢渣中的 $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 和 $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 成分在后期仍然发生水化反应,使得强度增长缓慢;另外,自然级配钢渣较大粒径集料的缺失使其未形成骨架结构,导致混合料的无侧限抗压强度偏低。

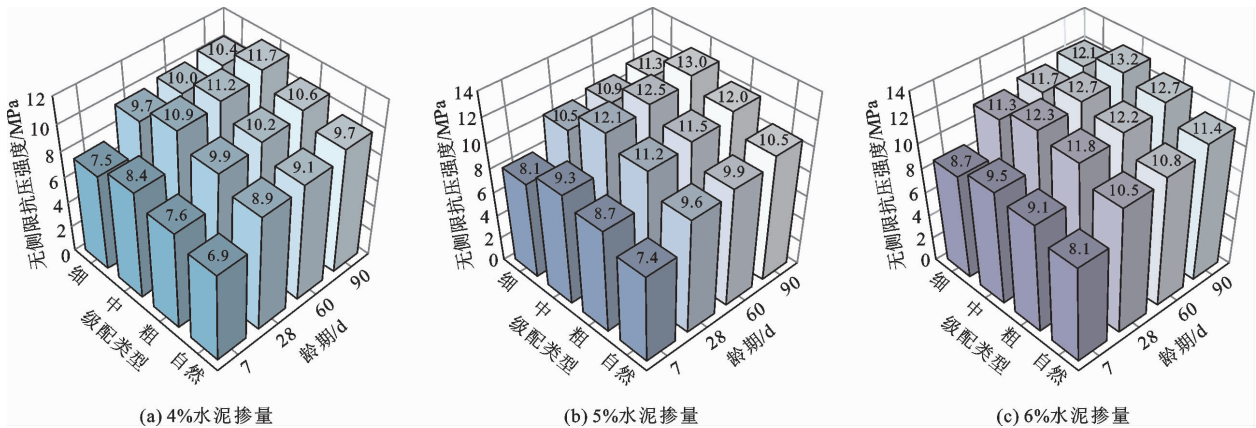


图 3 不同水泥掺量的 4 种级配混合料在不同龄期的无侧限抗压强度

7 d龄期自然级配4%~6%水泥掺量的混合料的抗压强度值为6.9~8.1 MPa。依照《公路路面基层施工技术细则》(JTG-F20—2015),高等级公路水泥稳定基层材料7 d的抗压强度为4.0~6.0 MPa,二级和二级以下公路为3.0~5.0 MPa,因此,自然级配混合料的无侧限抗压强度仍能够满足各等级公路的抗压强度要求。

3.1.2 抗压回弹模量 3种水泥掺量、4种级配的混合料不同龄期的抗压回弹模量试验结果如图4所示。由图4可以看出,随水泥和龄期的增加,4种级配混合料的抗压回弹模量均有所增加,且级配明显影响混合料的抗压回弹模量。4种级配的抗压回弹模量的大小关系为中级配>粗级配>细级配>自然级配,4%水泥掺量下混合料90 d的抗压回弹模量值相应为2 261、2 123、2 093和1 968 MPa,3种含碎石级配的抗压回弹模量较自然级配相应提高了14.9%、7.9%、6.4%。钢渣能够提高混合料的抗压回弹模量,但自然级配中钢渣含量高,钢渣膨胀消耗水分影响了水泥水化反应的进行;同时,早期在水泥与钢渣的水化反应没有完全完成时,混合料抗压回弹模量的贡献主要来自于级配,而自然级配内部因缺失粗集料而未形成骨架结构,因此,自然级配混合料的抗压回弹模量比其他3种含粗集料的级配低,但自然级配混合料仍然能满足公路工程相关规范中关于水泥稳定基层抗压回弹模量的要求。

3.1.3 劈裂强度 3种水泥掺量、4种级配的混合料不同龄期的劈裂试验结果如图5所示。由图5可

以看出,中级配混合料的劈裂强度最大,粗级配和细级配次之,自然级配最小。水泥掺量一定时,0~28 d龄期的劈裂强度值上升较快,后期增长较平缓;养护龄期一定时,水泥的掺量越多则混合料的劈裂强度值越大,且自然级配钢渣混合料的劈裂强度随水泥掺量变化的规律更加明显。主要原因是良好的级配能够形成骨架密实型结构,级配对于混合料的影响大于水泥掺量的影响,然而级配不良的自然级配水泥稳定钢渣混合料的劈裂强度主要取决于水化产物的含量,增加水泥掺量可以提高其劈裂强度值,但提高程度要明显小于级配产生的影响。

4%~6%水泥掺量的自然级配混合料7 d龄期的劈裂强度值为0.72~0.85 MPa,根据规范规定的7 d劈裂强度最小值不小于0.5 MPa的标准,可知自然级配钢渣混合料的劈裂强度能够满足中、轻交通等级公路材料内部抗弯拉破坏的要求。

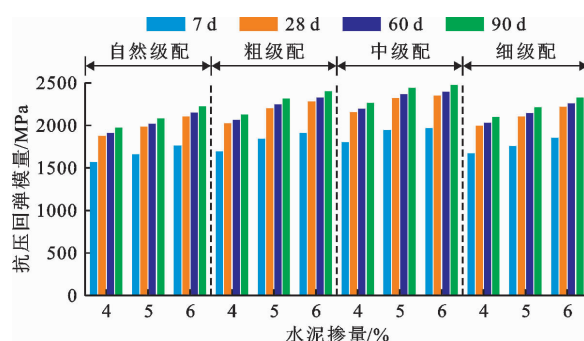


图4 不同水泥掺量的4种级配混合料在不同龄期的抗压回弹模量

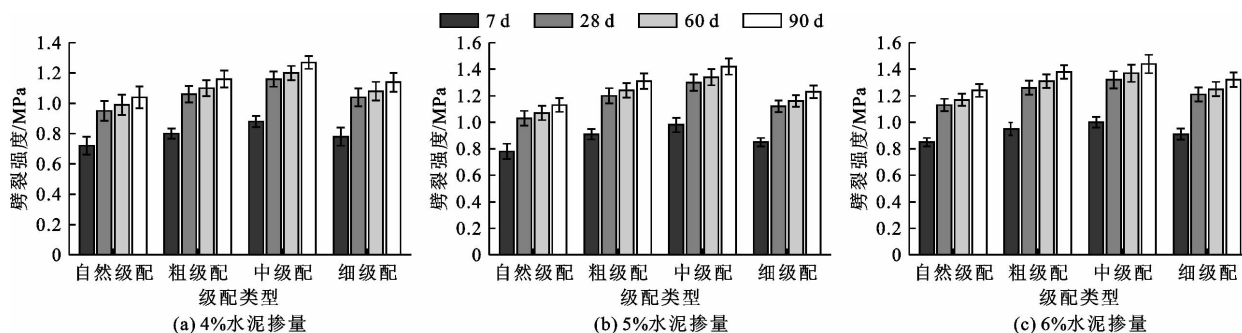


图5 不同水泥掺量的4种级配混合料在不同龄期的劈裂强度

3.2 收缩试验

3.2.1 干燥收缩试验 5%水泥掺量时4种级配混合料不同龄期的干缩试验结果如图6所示。图6中试验结果表明,4种级配的钢渣混合料失水率均小于1.5%,稳定干缩系数在80~160之间,整体而言失水率和干缩系数不大,满足规范要求。失水率随龄期的增长逐渐减少(图6(a)),其中混合料在前4 d的失水率迅速减

少,前期水分的减少主要是钢渣中的水化反应造成的,7 d之后失水率逐渐趋于平缓。干缩系数试验结果(图6(b))表明,钢渣的掺入能够明显降低不同级配混合料的干缩系数,其中,中级配干缩系数最大,自然级配最小;混合料的干缩系数随着龄期的增长而逐渐增大,且0~7 d干缩系数变化速率最大,后期水化反应基本完成,混合料的干缩系数趋于平缓。钢渣的水化反应过

程能够产生微膨胀,补偿了混合料的收缩,能够在一定程度上改善混合料的干缩性能,因而自然级配钢渣混合料的干缩性能表现最优,在 90 d 龄期时,自然级配的混合料收缩系数相较于粗级配、中级配和细级配分别减小了 28.3%、46.4%、42.4%。

3.2.2 温度收缩试验 5% 水泥掺量时 4 种级配混合料的温缩应变与温缩系数试验结果如表 8 所示。表 8 中试验结果表明,掺入钢渣的混合料的温缩应

变和温缩系数表现良好。温缩应变随温度的升高而增大,40 ℃ 中级配的温缩应变值最大,为 712×10^{-6} , -10 ℃ 自然级配温缩应变最小,为 94×10^{-6} 。4 种级配混合料中,自然级配混合料的温缩系数较中级配和细级配分别减少了 9.3% 和 2.2%,并且随着温度的升高,4 种级配混合料的温缩系数先减小后增大,其原因是水泥和钢渣水化产物对温度变化较为敏感,会使温度收缩系数增大。

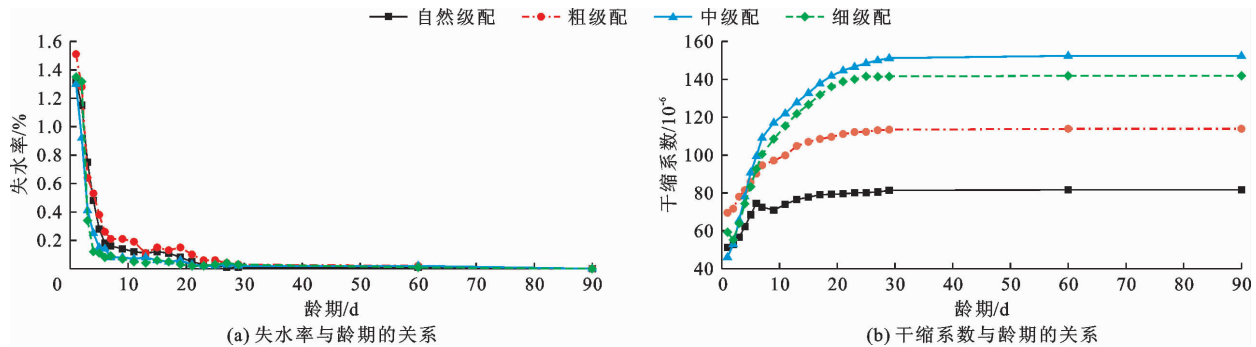


图 6 5% 水泥掺量的 4 种级配混合料在不同龄期的干缩试验结果

表 8 5% 水泥掺量的 4 种级配混合料温度收缩试验结果

级配类型	温缩指标	温度/℃							均值
		-20	-10	0	10	20	30	40	
自然级配	温缩应变/ (10^{-6})	0	94	183	268	356	438	526	8.8
	温缩系数/ $(10^{-6}/^{\circ}\text{C})$	0	9.4	8.9	8.5	8.8	8.2	8.8	
粗级配	温缩应变/ (10^{-6})	0	121	203	282	356	438	517	8.1
	温缩系数/ $(10^{-6}/^{\circ}\text{C})$	0	8.2	7.9	8.4	8.2	7.9	7.7	
中级配	温缩应变/ (10^{-6})	0	193	290	418	524	619	712	9.7
	温缩系数/ $(10^{-6}/^{\circ}\text{C})$	0	9.7	9.1	9.7	10.6	9.5	9.3	
细级配	温缩应变/ (10^{-6})	0	143	237	318	402	486	562	9.0
	温缩系数/ $(10^{-6}/^{\circ}\text{C})$	0	9.4	9.1	9.4	8.8	9.2	8.6	

3.3 疲劳试验

疲劳试验采用室内三点弯曲方法,选取水泥掺量为 5% 的 4 种级配混合料进行 0.60、0.65、0.70 共 3 种应力比下的疲劳试验,采用威布尔 (Weibull) 分布对疲劳试验数据进行评价。威布尔分布的函数方程为:

$$-\ln \ln(1/p) = -2.303 \lg N_p + 2.303 \lg N_a \quad (1)$$

式中: b 为形状参数; N_p 和 N_a 分别为混合料的疲劳寿命参数和特征寿命参数,均表示次数。

若试验数据的分析表明 $-\ln \ln(1/p)$ 与 $\lg N$ 存在良好的线性关系,则试验数据服从威布尔分布。自然级配、粗级配、中级配和细级配的疲劳试验结果分列于如表 9、10。

以应力比为 0.60 为例,4 种级配混合料的疲劳试验威布尔分布检验结果如图 7 所示,不同应力比下 4 种级配混合料疲劳试验威布尔一元线性拟合方程见表 11。

根据表 11 中一元线性拟合结果,在应力比为 0.60、0.65 和 0.70 时,4 种级配威布尔检验一元线性拟合方程的 $R^2 > 0.9$,所以 $\lg N$ 与 $-\ln \ln(1/p)$ 满足线性关系。采用如图 8 所示的 $S-N$ 关系曲线表征水泥稳定钢渣碎石混合料的疲劳性能,其函数关系式为:

$$S = a - b \lg N \quad (2)$$

式中: S 为应力比; N 为在 S 应力水平下材料的寿命,以次数为单位; a 、 b 为系数。

表 9 自然级配和粗级配混合料的疲劳试验结果

应力比	自然级配疲劳 寿命 N_1 (次数)	$\lg N_1$	粗级配疲劳寿命 N_2 (次数)	$\lg N_2$	p	$-\ln \ln(1/p)$
0.60	109007	5.03745	134576	5.12896	0.2	-0.47588
	78189	4.89314	96523	4.98463	0.4	0.087422
	60420	4.78117	74586	4.87265	0.6	0.671727
	20539	4.31258	25345	4.40389	0.8	1.49994
0.65	72541	4.86059	89546	4.95204	0.2	-0.47588
	58679	4.76849	72456	4.86007	0.4	0.087422
	44353	4.64692	54753	4.73840	0.6	0.671727
	18346	4.26354	22651	4.35508	0.8	1.49994
0.70	52242	4.71800	64521	4.80970	0.2	-0.47588
	35318	4.54799	43625	4.63973	0.4	0.087422
	29162	4.46482	36025	4.55660	0.6	0.671727
	23253	4.36648	28652	4.45715	0.8	1.49994

表 10 中级配和细级配混合料的疲劳试验结果

应力比	中级配疲劳 寿命 N_3 (次数)	$\lg N_3$	细级配疲劳寿命 N_4 (次数)	$\lg N_4$	p	$-\ln \ln(1/p)$
0.60	228406	5.35870	125156	5.09745	0.2	-0.475880
	145132	5.16176	89766	4.95311	0.4	0.087422
	114420	5.05850	69365	4.84114	0.6	0.671727
	45483	4.65784	33571	4.52596	0.8	1.499940
0.65	165364	5.21844	90591	4.95708	0.2	-0.475880
	131438	5.11872	78210	4.89326	0.4	0.087422
	96654	4.98522	57278	4.75798	0.6	0.671727
	45711	4.66002	30386	4.48267	0.8	1.499940
0.70	90436	4.95634	58359	4.76610	0.2	-0.475880
	61132	4.78627	38135	4.58132	0.4	0.087422
	50286	4.70145	32143	4.50708	0.6	0.671727
	40277	4.60506	22360	4.34946	0.8	1.499940

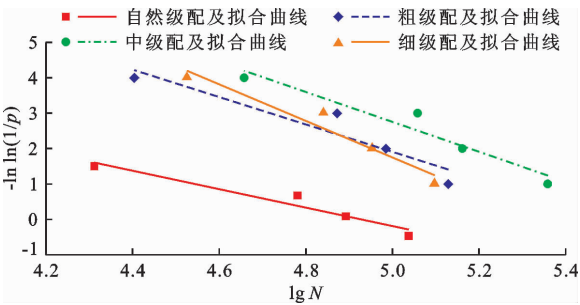


图 7 4 种级配混合料疲劳试验威布尔分布检验 (应力比为 0.60)

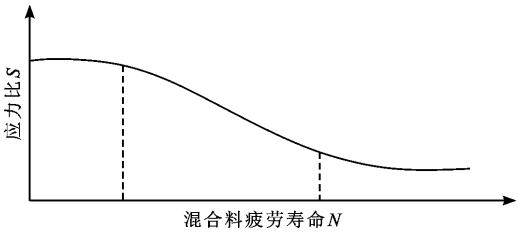


图 8 S - N 关系曲线

通过等效疲劳寿命拟合出 95% 概率水平下的 4 种级配水泥稳定钢渣混合料疲劳方程,结果见表 12。

表 11 4 种级配混合料疲劳试验威布尔一元线性拟合方程

应力比	级配	拟合方程	拟合度 R^2
0.60	自然级配	$-\ln \ln(1/p) = 12.85325 - 2.60875 \lg N$	0.9084
	粗级配	$-\ln \ln(1/p) = 13.08781 - 2.60792 \lg N$	0.9083
	中级配	$-\ln \ln(1/p) = 14.69648 - 2.81678 \lg N$	0.9531
	细级配	$-\ln \ln(1/p) = 17.15026 - 3.44109 \lg N$	0.9678
0.65	自然级配	$-\ln \ln(1/p) = 14.89164 - 3.11676 \lg N$	0.9082
	粗级配	$-\ln \ln(1/p) = 15.11756 - 3.11692 \lg N$	0.9081
	中级配	$-\ln \ln(1/p) = 17.48665 - 3.41115 \lg N$	0.9479
	细级配	$-\ln \ln(1/p) = 19.20421 - 3.93031 \lg N$	0.9385
0.70	自然级配	$-\ln \ln(1/p) = 25.39139 - 5.51365 \lg N$	0.9176
	粗级配	$-\ln \ln(1/p) = 25.85103 - 5.50397 \lg N$	0.9192
	中级配	$-\ln \ln(1/p) = 26.66214 - 5.50520 \lg N$	0.9176
	细级配	$-\ln \ln(1/p) = 22.32942 - 4.80850 \lg N$	0.9542

表 12 4 种级配混合料 95% 保证率的疲劳试验结果

级配种类	应力比	95% 保证率的等效 $\lg N$	95% 保证率疲劳拟合方程	拟合度 R^2
自然级配	0.60	6.0655	$S = -0.10585 \lg N + 1.24769$	0.97559
	0.65	5.7309		
	0.70	5.1438		
粗级配	0.60	6.1574	$S = -0.10670 \lg N + 1.26164$	0.98269
	0.65	5.8031		
	0.70	5.2365		
中级配	0.60	6.2717	$S = -0.10728 \lg N + 1.28120$	0.95358
	0.65	5.9971		
	0.70	5.3828		
细级配	0.60	5.8470	$S = -0.14893 \lg N + 1.47868$	0.95807
	0.65	5.6419		
	0.70	5.2037		

由表 12 可知,随着应力比的增加,4 种级配的水泥稳定钢渣碎石混合料的疲劳寿命逐渐减小,在 0.60、0.65、0.70 应力比下,4 种级配的疲劳寿命 95% 保证率等效 $\lg N$ 的大小依次为中级配、粗级配、自然级配、细级配,表明级配水泥稳定钢渣碎石基层材料的疲劳性能影响较大。另外,掺入钢渣可以增加水泥稳定钢渣碎石基层材料的疲劳寿命,可能是钢渣中含有较多的活性成分,以及钢渣骨料多微观空隙和表面粗糙的特性,使得水化反应后的生成物与钢渣骨料的粘附性增强,从而提高了混合料的耐久性。

根据疲劳拟合方程,应力比与水泥稳定钢渣混合料疲劳寿命的对数之间呈现良好的线性关系,4

种级配混合料拟合方程的斜率由小到大为自然级配、粗级配、中级配、细级配,故自然级配的疲劳性能最差。随着应力比的增加,自然级配混合料的疲劳寿命减少速率最快,对基层的耐久性有较大影响,但是自然级配水泥稳定钢渣混合料的疲劳性能能够满足交通量较低等级公路的要求。

4 结 论

通过试验研究 4 种不同级配的水泥稳定钢渣混合料在不同水泥掺量和龄期条件下的力学特性、收缩特性和疲劳性能,得到如下结论:

(1)在一定范围内,4 种级配水泥稳定钢渣混合料的力学性能均随着龄期和水泥掺量的增加而提

高,钢渣和水泥的水化反应在一定程度上促进了混合料强度的提升,对于100%钢渣的自然级配,其力学性能较经碎石优化的粗级配、中级配和细级配的力学性能稍差,但能够满足规范中关于交通量较低等级公路的相关要求。

(2)根据干缩、温缩试验,一定掺量的钢渣能够有效减少混合料的干燥收缩量和温度收缩量,由于水泥和钢渣的水化产物对温度较为敏感,会对混合料的温度收缩产生不利影响,但自然级配钢渣混合料仍然具有较好的收缩特性。

(3)疲劳试验表明,级配对水泥稳定钢渣碎石混合料的疲劳性能影响较大,钢渣的掺入能增加基层材料的疲劳寿命。虽然自然级配水泥稳定钢渣混合料的级配不够良好,但是能够满足交通量较低公路疲劳性能的要求。同时,由于自然级配水泥稳定钢渣混合料可最大限度地利用钢渣骨料,产生的经济和社会效益显著。

(4)综合力学性能、收缩性能和疲劳性能,自然级配水泥稳定钢渣混合料的各项性能可满足规范对低等级公路的要求,能够在保证施工质量的前提下最大量地使用钢渣,推荐将自然级配钢渣应用于低等级公路。

(5)本文主要对不同级配的水泥稳定钢渣碎石混合料的力学强度、收缩性能以及耐久性进行研究,下一步将开展细观、微观等多角度研究解释钢渣水化反应程度及其对路用性能的影响机理,为推广应用水泥稳定钢渣基层提供技术支撑。

参考文献:

- [1] 温建. 钢渣的活性激发及资源化利用[D]. 长沙:中南大学,2013.
- [2] CAO Liu, SHEN Weiguo, HUANG Jiaqi, et al. Process to utilize crushed steel slag in cement industry directly: Multi-phased clinker sintering technology[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 217: 520–529.
- [3] NIDHEESH P V, KUMAR M S. An overview of environmental sustainability in cement and steel production[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 231: 856–871.
- [4] 冀欣,盛燕萍,路再红,等. 掺加钢渣的半刚性基层材料性能[J]. 长安大学学报(自然科学版),2021,41(4):21–31.
- [5] 郑琪,张玉婷,赵风清. 蒸压建材生产过程中钢渣安定性处理与活性化利用[J]. 化工进展,2022,41(7):3983–3989.
- [6] 尚建丽,邢琳琳. 钢渣粗骨料混凝土界面过渡区的研究[J]. 建筑材料学报,2013,16(2):217–220.
- [7] MAHOUTIAN M, SHAO Yixin, MUCCI A, et al. Carbonation and hydration behavior of EAF and BOF steel slag binders[J]. Materials and Structures, 2015, 48: 3075–3085.
- [8] 严孝彩,邹长勇,田尔布,等. 热焖钢渣对混凝土性能影响研究[J]. 公路,2019,64(11):220–223.
- [9] 樊俊江,於林锋,王林. 钢渣骨料水生态框混凝土制备方法及性能研究[J]. 金属矿山,2022(1):28–34.
- [10] 刘云鹏,申培亮,何永佳,等. 特种骨料混凝土的研究进展[J]. 硅酸盐通报,2021,40(9):2831–2855.
- [11] BARISIC I, DIMTER S, RUKAVINA T. Elastic properties of cement-stabilised mixes with steel slag[J]. International Journal of Pavement Engineering,2016,17(9):753–762.
- [12] 辛德军,刘志强,冀欣,等. 干旱寒冷地区水泥稳定钢渣碎石基层特性研究[J]. 西安科技大学学报,2022,42(1):116–124.
- [13] LIU Jinzhou, YU Bin, WANG Qian. Application of steel slag in cement treated aggregate base course[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 269: 121733.
- [14] 顾晓薇,张延年,张伟峰,等. 大宗工业固废高值建材化利用研究现状与展望[J]. 金属矿山,2022(1):2–13.
- [15] 黄浩. 未陈化钢渣在水泥稳定碎石基层中的应用研究[D]. 西安:长安大学,2018.
- [16] 黄优,刘朝晖,柳力,等. 钢渣-水泥稳定碎石性能及环境影响试验[J]. 长安大学学报(自然科学版),2021,41(5):43–53.
- [17] 肖杰,龙晨杰,何建刚,等. 大掺量激活钢渣微粉-水泥稳定碎石性能及微观特性[J]. 中国公路学报,2021,34(10):204–215.
- [18] 喻平. 水泥稳定钢渣碎石基层抗疲劳性能研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2017.
- [19] 张旭,王武祥,杨鼎宜,等. 骨料级配对干硬性火山渣混凝土性能的影响研究[J]. 混凝土与水泥制品,2019(2):72–75.
- [20] 李宗利,邓朝莉,张国辉. 考虑骨料级配的混凝土有效弹性模量预测模型[J]. 水利学报,2016,47(4):575–581.
- [21] 孔丽娟,陈延军. 骨料级配对混合骨料混凝土性能的影响[J]. 混凝土,2013(6):43–46+51.
- [22] 张强,胡力群,刘兴成. 多掺量钢渣开级配沥青混合料性能研究[J]. 硅酸盐通报,2020,39(2):493–500.
- [23] 李欢. 冀北地区掺膨胀剂水泥稳定碎石材料抗裂性能研究[D]. 张家口:河北建筑工程学院,2021.
- [24] 梁春雨,郭有蒙,张利东,等. 季冻区多指标水泥稳定碎石性能评价及级配优选[J]. 吉林大学学报(工学版),2020,50(3):998–1005.
- [25] 谷艳妮. 适用于农牧区低等级公路的特殊混凝土力学性能研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2020.