

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2020.12.045

水泥稳定钢渣道路基层材料工程应用研究

汪 勇, 张晓帆

(重庆市设计院有限公司, 重庆市 400015)

摘 要: 采用纯钢渣和钢渣粗集料加玄武岩细集料制备两种水泥稳定半刚性基层材料, 通过击实试验确定了相应的最佳含水量和最大干密度, 7 d 无侧限抗压强度能够满足规范要求。使用纯钢渣混合料的半刚性基层材料, 随着龄期的延长钢渣的活性逐渐显现, 使得后期的抗压强度和回弹模量更高; 膨胀率试验结果表明水泥稳定钢渣半刚性基层材料具有合格的稳定性。

关键词: 半刚性基层; 钢渣; 抗压强度; 回弹模量

中图分类号: U414

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2020)12-0166-03

0 引 言

近年来, 我国国民经济的快速增长促进了道路交通行业的快速发展, 道路建设里程逐年增长, 对道路施工质量的要求也在不断提升。由于整体性好、强度高及抗变形能力强等诸多优点, 半刚性基层的结构形式在我国高等级道路基层施工中得到了广泛的应用, 如水泥稳定碎石、二灰稳定碎石、水泥稳定砂砾及二灰稳定砂砾等^[1-2]。上述道路基层的修筑对砂、石料的需求量巨大, 对砂石材料的开采必然会导致山体植被破坏、河床坍塌、水土流失, 甚至会引发山体滑坡、泥石流等自然灾害, 严重破坏自然生态环境^[3-4]。随着国家对自然环境日益重视, 保护力度的加强和治理水平的提高, 作为道路基层的主要材料, 天然砂、石的开采受到了愈加严格的控制, 导致其价格也在急剧攀升^[5-6]。

钢渣是炼钢工业中的必然产物, 生产 1 t 钢材大约产生 120 ~ 140 kg 的钢渣, 约占工业废渣的总量的 24%, 2018 年我国钢渣产量约 1.4 亿 t, 钢渣累计堆放量超过了 10 亿 t, 综合利用率仅约为 20%^[7-8]。数量庞大的钢渣被弃置, 不仅会占用大量的土地, 还会影响环境^[9]。相关资料研究表明, 钢渣具有强度高、硬度大、级配良好的物理力学性能, 同时富含活性成分, 可形成潜在的胶凝性物质, 与水泥材料拌和后可作为道路半刚性基层的主要原料, 可以大大节约砂石料的开采, 提高钢渣的综合利用率, 降低钢铁企业生产成本, 缓解钢渣堆弃带来的占用土地、污染环境等问题。由于钢渣在道路

建设中尚无系统应用研究, 本文将通过室内试验研究水泥稳定钢渣作为半刚性基层材料适用性。

1 试验原材料

1.1 钢渣

试验集料为钢渣, 取自重庆钢铁集团有限责任公司, 为存放 1 a 以上的陈钢渣, 洗渣后干燥状态下为黑灰色, 利用 X 射线技术和荧光分析法对钢渣的化学成分组成进行分析, 见表 1。可知, 钢渣的碱度(CaO/SiO_2)等于 3.59, 属于高碱度, 具有较高的活性。

表 1 钢渣的化学成分组成

成分	含量 /%	成分	含量 /%
CaO	57.63	SiO ₂	16.04
Fe ₂ O ₃	14.18	Al ₂ O ₃	1.82
MgO	3.62	TiO ₂	1.25
P ₂ O ₅	1.57	SO ₃	0.39

采用破碎机对钢渣破碎后并进行滚筒水洗工艺处理, 其性能检测见表 2。

表 2 钢渣粗集料性能检测

试验项目	试验结果	技术要求
10 ~ 16.5 mm	表观相对密度	3.259 > 2.6
	吸水率 /%	1.943 < 3
5 ~ 10 mm	表观相对密度	3.251 > 2.6
	吸水率 /%	2.674 < 3
压碎值 /%		13.7 ≤ 26
洛杉矶磨耗值 /%		14.2 ≤ 28
针片状含量 /%	4.75 ~ 9.5 mm	4.9 ≤ 18
	> 9.5 mm	4.0 ≤ 12

收稿日期: 2020-09-10

作者简介: 汪勇(1974—), 男, 本科, 教授级高级工程师, 从事市政工程设计工作。

1.2 水泥

水泥采用重庆永荣青鹏水泥有限公司生产的 P.C 32.5 普通硅酸盐水泥,根据《公路工程水泥基水泥混凝土试验规程》的要求(JTG E30—2005)的要求,对水泥进行检测,所得试验结果,见表 3。

表 3 水泥测试结果

指标	技术要求	测试结果
细度 /%	≤10.0	6.2
初凝时间 /h	≥3	4
终凝时间 /h	≥6 且 ≤10	8
安定性 /min	≤5.0	2.7
强度 /MPa	抗折	
	3 d ≥2.5	3.9
	28 d ≥5.5	7.6
	抗压	
	3 d ≥11.0	17.2
	28 d ≥32.5	36.8

2 材料组成设计

水泥稳定钢渣基层的配合比设计通常包括颗粒级配组成、加水量、水泥类型及其所用剂量的确定。根据《公路路面基层施工技术细则》(JTGF20—1015)中水泥稳定碎石的要求进行级配设计,采用两种级配形式,第一种是粗细集料全部采用钢渣;第二种是考虑钢渣细集料较大的吸水率,颗粒粒径小于 4.75 mm 的细集料用玄武岩代替,然后将两种半刚性基层材料的试验结果进行对比分析。两种颗粒级配组成的非常接近(见表 4)。

表 4 半刚性钢渣基层级配组成

筛孔孔径 /mm	颗粒级配组成	级配上限	级配下限
31.5	100.0	100.0	100.0
26.5	95.0	100.0	90.0
19.0	81.5	89.0	72.0
9.5	57.0	67.0	47.0
4.75	38.5	49.0	29.0
2.36	26.0	35.0	17.0
0.6	12.0	15.0	8.0
0.075	3.1	3.5	0

根据《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTGE51—2009),选择普通硅酸盐水泥的标号范围 P.C 32.5,水泥剂量均为 5.5%,确定两种级配钢渣半刚性基层材料的最佳含水量和最大干密度。两种半刚性钢渣材料的击实曲线,见图 1,相应的最佳含水量和最大干密度,见表 5。由图 1 和表 5 可以看出,纯钢渣的混合料,其最佳含水量和最大干密度均大于钢渣(粗集料)加玄武岩(细集料)

的混合料,主要原因在于细集料钢渣相比玄武岩的吸水率和密度均更大。另外,在击实试验过程中发现,实际含水量比设定含水量要小,且随着加水量的增加,两者之间的差别逐渐增大,原因在于加水量的增加会使较多的水分附着于集料表面,击实过程中容易析出和挥发。

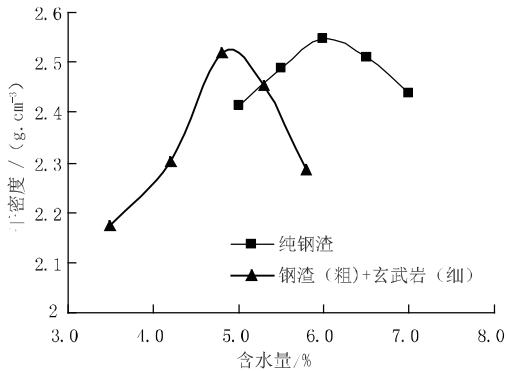


图 1 击实试验曲线

表 5 水泥稳定钢渣基层材料击实试验结果

级配类型	纯钢渣	钢渣(粗)+玄武岩(细)
最佳含水量 /%	6.0	4.8
最大干密度 /(g·m ⁻³)	2.546	2.518

通过以上击实试验确定的水泥稳定钢渣混合料的设计参数,分别采用静压法对纯钢渣和钢渣粗集料加玄武岩细集料的混合料成型试样,进行 7 d 无侧限抗压强度测试试验,所得试验结果分别为 4.8 MPa 和 4.9 MPa,均能满足高等级路基半刚性基层材料的强度要求。

3 水泥稳定钢渣基层材料的性能

以下主要从强度和刚度两个方面研究水泥稳定钢渣基层的力学性能,强度采用的是无侧限抗压强度试验测定,刚度主要是指回弹模量。

3.1 无侧限抗压强度

无侧限抗压强度作为半刚性基层材料设计的基本指标,取决于骨料之间形成的嵌挤结构类型性和结合料的粘结力(与水泥型号和使用剂量有关)。按照《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTGE51—2009),制备成型满足压实度要求的试件,分别养生 7 d、14 d、28 d 和 60 d,最后一天浸水 24 h,利用万能试验机测试试件的无侧限抗压强度,加载速度为 1 mm/min,所得试验结果见表 6。

由表 6 可以看出,两种水泥稳定钢渣混合料的无侧限抗压强度均随着龄期的增加而增大,且增幅随龄期逐渐减小;相比钢渣粗集料加玄武岩

表6 水泥稳定钢渣不同龄期无侧限抗压强度 MPa

龄期/d	7	14	28	60
纯钢渣	4.8	5.7	6.3	7.1
钢渣(粗)+玄武岩(细)	4.9	5.6	6.0	6.5

细集料的混合料,纯钢渣混合料在前期的强度略小,原因在于钢渣细集料在初期一定程度上抑制了水泥的水化,后期钢渣细集料的活性逐渐显现使得纯钢渣混合料的强度变大。

3.2 回弹模量

回弹模量是评价水泥稳定类基层材料刚度的指标,基层的回弹模量应于面层的模量相适应。基层材料回弹模量过小,沥青面层底部会产生较大的拉应变出现早期开裂破坏;基层材料回弹模量过大,容易出现干缩和温缩裂纹,会导致沥青面层过早出现反射裂纹,从而影响道路结构的舒适性和使用寿命。同样根据《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E51—2009),对不同龄期的水泥稳定钢渣混合料试件进行回弹模量测试,所得试验结果见表7。由表7可知,相比钢渣粗集料加玄武岩细集料的混合料,纯钢渣混合料的回弹模量更高,对应的抗压强度也就越大。

表7 水泥稳定钢渣不同龄期的回弹模量 MPa

龄期/d	7	14	28	60
纯钢渣	1 704	2 814	3 727	4 016
钢渣(粗)+玄武岩(细)	1 836	2 809	3 563	3 858

3.3 膨胀性能

根据《公路工程集料试验规程》(JTG E42—2005),开展水泥稳定钢渣基层材料的膨胀性检测试验,得到纯钢渣和钢渣粗集料加玄武岩细集料混合料的膨胀率分别为1.65%和1.42%,均满足规范的技术要求,说明采用钢渣作为水泥稳定类基层材料的稳定性是合适的。

4 工程实例及施工工艺

4.1 工程实例

某规划道路位于重庆市沙坪坝区土主镇,全长3 km,路面标准宽度44 m,双向八车道,属于园区主干道。设计路面基层采用垫层、底基层、基层三层结构,每层23 cm,采用水泥稳定钢渣作为路面基层材料,施工完成后不同路段基层顶面竣工验收弯沉值均小于10(0.01 mm),其中代表弯沉值为10.7(0.01 mm),而同一路段内水泥稳定碎石基层的代表性弯沉值为19.3(0.01 mm),说明采用水

泥稳定钢渣混合料作为道路基层材料相比水泥稳定碎石能够改善弯沉指标。95%保证率下,水泥稳定钢渣基层材料的钻芯取样的无侧限抗压强度介于4.2~4.8 MPa,满足相关规范技术要求。

经过比较,相比传统水泥稳定碎石,采用水泥稳定钢渣作为道路半刚性基层材料造价较低,摊铺后的各项技术指标包括压实度、回弹模量以及平整度等均能够满足设计和相关规范技术要求。使用一段时间后,试验路段没有车辙、裂缝等常见病害出现,满足使用要求。采用水泥稳定钢渣作为道路基层材料质量合格、安全可靠,同时节约成本、保证工期,绿色环保,取得了良好的经济效益和社会效益,受到道路建设单位的好评。

4.2 施工工艺

通过对相关工程的归纳,水泥稳定钢渣作为道路基层材料与水泥稳定碎石非常相似,其施工工艺沿用水泥稳定碎石的施工工艺,但需要注意以下几点:

(1)施工前必须检查各种材料的来源和质量。对经招标程序购进的水泥、钢渣等重要材料,必须提交最新检测的正式试验报告。对首次使用的钢渣,应检查生产条件、加工机械、覆盖层的清理情况。各种材料运至现场后必须取样进行质量检验,经评定合格后方可使用。

(2)必须对材料的存放场地、防雨和排水措施进行确认,不符合规定时材料不得进场。进场的各种材料的来源、品种、质量应与样品一致,不符合要求时严禁使用。

(3)施工前应对水泥稳定钢渣生产设备、摊铺机、压路机等各种施工机械和设备进行调试,对机械设备的配套情况、技术性能、传感器计量精度等进行认真检查和标定。

(4)水泥稳定钢渣混合料生产过程中,必须对各种原材料进行抽样试验,确保质量满足施工规范要求。

(5)严格按照施工配合比制作水泥稳定钢渣混合料,认真计量,检查并确保水泥稳定钢渣混合料质量满足施工要求。

5 结论

(1)相比水泥稳定碎石,由于钢渣细集料的吸水率较大,使得水泥稳定钢渣混合料具有较高的最佳含水量;

(2)初期钢渣细集料会对水泥水化有一定影响,随着龄期的延长钢渣细集料的活性逐渐显现,使得后期使用纯钢渣集料组成的水泥稳定材料具有

(下转第179页)

表 9 综合灰色关联系数的计算结果

序列号	$\gamma(x_1)$	$\gamma(x_2)$	$\gamma(x_3)$	$\gamma(x_4)$	$\gamma(x_5)$	$\gamma(x_6)$	$\gamma(x_7)$
1	0.64	0.61	0.61	0.61	0.62	0.05	0.77
2	0.46	0.30	0.40	0.47	0.47	0.00	0.44
3	0.39	0.19	0.32	0.44	0.43	0.00	0.28
4	0.36	0.15	0.33	0.51	0.48	0.02	0.52
5	0.19	0.07	0.18	1.13	1.26	0.20	0.25

表 10 灰色关联度计算结果

γ_1	γ_2	γ_3	γ_4	γ_5	γ_6	γ_7
0.41	0.26	0.37	0.63	0.65	0.05	0.45

0.65,动荷载的灰色关联度为 0.63,面层动弹性模量的灰色关联度为 0.05。进而得出结论:动荷载和面层板厚度对动荷载与板底脱空耦合作用下水泥路面疲劳寿命的影响程度较高,而脱空半径、脱空深度、行驶速度以及基层动弹性模量对动荷载与板底脱空耦合作用下水泥路面疲劳寿命的影响程度较小,面层动弹性模量对动荷载与板底脱空耦合作用下水泥路面疲劳寿命基本无影响。

4 结 语

(1)利用 Ansys 有限元软件建立了水泥路面板底脱空模型,提出了动荷载与板底脱空耦合作用下水泥路面疲劳寿命的计算式: $\lg N_f = 2.813 (\frac{(1-D)f_r}{\sigma})^{1.22}$ 。

(2)介绍了一种改进的灰色关联模型的建立步骤。

(3)动荷载和面层板厚度对动荷载与板底脱空耦合作用下水泥路面疲劳寿命的影响程度较高,

而脱空半径、脱空深度、行驶速度和基层动弹性模量对动荷载与板底脱空耦合作用下水泥路面疲劳寿命的影响程度较小,面层动弹性模量对动荷载与板底脱空耦合作用下水泥路面疲劳寿命基本无影响。

参考文献:

[1] 彭永恒,李想.基于板底脱空的水泥混凝土路面动力特性分析[J].黑龙江大学自然科学学报,2016,33(2):244-250.

[2] AMEEN M, RAGHU B K, GOPALAKRISHNAN A R. Modeling of concrete cracking—A hybrid technique of using displacement discontinuity element method and direct boundary element method [J].Engineering Fracture Mechanics, 2012, 35 (9): 1054-1059.

[3] 张国雄.板底动水压力作用下水泥路面脱空机理及疲劳损伤研究[D].长沙:长沙理工大学,2012.

[4] 杨斌,陈拴发,胡长顺.重载及脱空耦合状态下混凝土路面疲劳寿命分析[J].公路工程,2005,30(3):175-177.

[5] 谢远勇.基于有限元法的级配碎石基层沥青路面疲劳寿命预估 [D].重庆:重庆交通大学,2016.

[6] 邱阳阳.基于弹塑性有限元法的沥青路面局部应变与疲劳寿命预估[D].西安:长安大学,2013.

[7] 叶丛,王乾,丁亚碧.脱空耦合下水泥混凝土路面疲劳寿命影响因素分析[J].公路,2018 (7):100-105.

[8] 程培峰,范平.基于正交灰关联分析法的温拌橡胶沥青性能影响因素研究[J].中外公路,2014,34(4):318-323.

[9] FALLAH S, KHODAII A. Developing a fatigue fracture model for asphalt overlay reinforced with geogrid [J]. Materials and Structures, 2016,49(5):1705-1720.

[10] OMRANI H, TANAKIZADEH A, GHANIZADEH A R, et al. Investigating different approaches for evaluation of fatigue performance of warm mix asphalt mixtures [J]. Materials and Structures, 2017,50:1-16.

[11] 宁小磊,吴颖霞,陈战旗.一种改进的灰色关联模型验证方法研究[J].计算机仿真,2015,32(7):259-263.

[12] 赵大勇.基于灰色关联分析的沥青混合料紫外线老化影响因素分析[D].西安:西安建筑科技大学,2015.

(上接第 168 页)

较高的抗压强度和回弹模量;

(3)采用钢渣作为筑路材料,可以提高工业废渣的综合利用率,减少废渣堆弃占地,减少砂石料的开采,具有良好的经济和环保效益,应用前景广阔。

参考文献:

[1] 曾梦澜,阮文,蒙艺,等.二灰钢渣碎石路面基层的设计与使用性能[J].湖南大学学报(自然科学版),2012,39(10):1-5.

[2] 徐方,陈志超,朱婧,等.钢渣路面基层材料安定性试验[J].混凝土,2012(9):59-62.

[3] 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试验研究[J].公路,2012(12):186-191.

[4] 黄永强,李飞,欧碧峰,等.二灰稳定钢渣碎石基层材料沥青路面设计参数研究[J].公路工程,2013,38(1):208-212.

[5] 张智豪,李波,李鹏,等.改良铁尾矿用于道路基层材料的研究 [J].中外公路,2018,38(6):274-278.

[6] 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(5): 1-11.

[7] 申爱琴,刘波,郭寅川,等.隧道路面钢渣沥青混合料抗滑性能衰减试验研究[J].建筑材料学报,2019,22(2):284-290.

[8] 刘玉民,王兰,王玉.钢渣混合料用到道路基层材料工程应用[J].中外公路,2018,38(5):209-213.

[9] 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.