

水泥稳定灰渣碎石道路基层材料设计及应用

李正伟

(浙江翰达工程检测有限公司, 浙江 杭州 311199)

摘 要 在“双碳”目标背景下, 工业固废资源化利用已成为产业绿色转型的重要方向, 水泥稳定灰渣碎石作为绿色环保型半刚性道路基层材料, 兼具强度高、耐久性好、成本低廉、固废利用率高等优势, 可有效替代传统水泥稳定碎石与石灰稳定土。本文阐述了水泥稳定灰渣碎石的原材料组成与核心性能特点, 从目标强度确定、配合比设计、生产配合比优化三个方面构建完整的材料设计方法, 结合材料特性提出拌和、运输、摊铺、碾压及养护全流程精细化施工工艺, 旨在实现工业废渣资源化利用, 为提升道路基层结构耐久性与工程综合效益提供借鉴。

关键词 工业固废; 固废利用; 水泥稳定灰渣碎石; 道路基层; 材料设计

中图分类号: U416.214

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.20.023

0 引言

近年来, 我国公路建设事业快速发展, 积极响应“双碳”目标和绿色可持续发展战略, 推广使用以工业废渣为主要掺合料的水泥稳定灰渣碎石, 替换水泥稳定碎石、石灰稳定土作为道路基层材料, 对保护生态环境、减轻工业生产负担有着重要现实意义。与此同时, 随着路基材料的更换, 明显改变了工程建设形势, 施工中需精准适配水泥稳定灰渣碎石材料特性, 优化配合比设计方法与施工工艺, 推动新型绿色基层材料规范化、规模化应用, 为高性能、长寿命、低碳型道路基层建设提供技术支撑。

1 水泥稳定灰渣碎石概述

1.1 主要成分

水泥稳定灰渣碎石材料和传统水泥稳定碎石二者成分相似, 使用灰渣作为掺合料, 搭配水泥、碎石和水拌和制成, 并按照工程建设需求掺加少量外加剂, 最终形成半刚性道路基层材料。其中, 灰渣作为掺合料, 普遍使用工业废渣, 如冶金矿渣, 以二氧化硅和氧化钙为主要成分, 具备一定的活性, 和水化产物相互接触进行二次反应, 负责保障道路基层材料具备足够强度和耐久性。水泥作为胶结材料, 按照道路等级来选择水泥强度, 水化反应进行期间, 持续形成胶凝体作为反应产物, 把松散骨料胶结形成稳定整体结构。碎石作为骨料, 选用级配良好和质地坚硬碎石, 碎石粒径取值范围为 4.75 mm ~ 31.5 mm, 保持骨料相互咬合状态, 从而形成稳定骨架结构。拌和水则作为拌和介质,

必须达到饮用水标准, 不含有泥质等无关成分, 按照配比方案和现场环境条件, 灵活调整拌和水用量^[1]。

1.2 性能特点

与传统道路基层材料相比, 水泥稳定灰渣碎石材料兼具水泥胶结性、碎石骨架作用和灰渣活性, 具备突出性能优势, 主要体现在力学性能、耐久性能、施工性能三方面, 有助于强化路基结构使用性能和保障通行车安全。其一, 力学性能。水泥稳定灰渣碎石具备较高强度水平, 以抗压强度为例, 标准条件下养护龄期达到 7 d 后的抗压强度达到 3 MPa ~ 5 MPa 水准, 满足高等级公路基层强度要求, 有效抵抗动态交通荷载, 基本不会出现剪切破坏等问题。其二, 耐久性能。水泥稳定灰渣碎石展现出优异抗渗性能和抗冻性能, 可以充分适应低温严寒环境, 冻融循环试验后的强度损失比例小于 20%, 并凭借内部致密结构来阻挡外部水分渗透。其三, 施工性能。水泥稳定灰渣碎石具备均匀性好的性能优点, 便于开展摊铺碾压作业, 无需配备重型压路机等特殊施工机械。

2 水泥稳定灰渣碎石道路基层材料设计方法

2.1 确定目标强度

目标强度是水泥稳定灰渣碎石材料最为重要的性能参数, 需综合分析道路等级、交通流量、基层类型、外部环境条件等多项因素, 合理确定路基材料目标强度, 再根据强度等级来制定配合比方案, 同步明确原材料选型标准。具体来讲, 以道路等级、使用环境作为目标强度设计依据。对于道路等级, 道路等级和路基材料

作者简介: 李正伟 (1995-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 道路桥梁。

强度等级呈现正比例关系,面向高速公路,路基结构承受较大竖向压力和剪切应力,要求7 d龄期时的基层抗压强度超过4 MPa,底基层抗压强度超过3 MPa;面向一级公路,要求7 d龄期时的基层抗压强度超过3.5 MPa,底基层抗压强度超过2.5 MPa。对于使用环境,大致分为普通环境和复杂环境,复杂环境包括软基路段、寒冷地区和潮湿多雨地区,目标强度适当提高5%~10%,环境条件越差,提高比例越大^[2]。

2.2 配合比设计

配合比设计即为确定各类原材料的用量比例,用量情况直接关乎材料强度、耐久性以及施工性能,需提前确认目标强度,初步制定配合比方案,拌制少量水泥稳定灰渣碎石,全面检测各项性能,基于性能偏差方向与大小,针对性调整配合比方案,最终确定最佳配合比方案。具体来讲,要求设计人员直接锁定水泥剂量、灰渣掺量、含水量、碎石级配四项核心参数,按照道路等级、基层类型和目标强度值,确认核心参数取值范围,制定3~4套配合比方案,细微调整核心参数。通常情况下,水泥剂量标准值为3%~6%,灰渣掺量标准值为10%~20%,含水量标准值为5%~8%,碎石最大粒径设定为31.5 mm,按照9.5 mm~31.5 mm、4.75~9.5 mm、0 mm~4.75 mm三档进行备料。后续以混合料试验检测报告作为配合比方案优化依据,重点检测7 d龄期和28 d龄期时的抗压强度。例如:在某公路工程中,公路等级为高速公路,路基材料目标强度为4 MPa,最终以“4.5%水泥+15%灰渣+68%碎石+7.5%拌和水”作为配合比方案,碎石粒径为4.75 mm~31.5 mm,7 d实测抗压强度达到4.2 MPa,28 d抗压强度达到5.8 MPa,完美满足目标强度要求。

2.3 生产配合比设计

生产配合比是设计成果转化施工成果的关键环节,暂定配合比方案主要面向实验室环境,实验室环境和现场施工环境有着明显差别,如果忽略施工场地条件,全面执行配合比方案,会导致水泥稳定灰渣碎石性能发生波动。因此,要求设计人员综合分析原材料实际特性、拌和设备参数等多项因素,把配合比参数转换为指导拌和作业进行的实操参数。确定生产配合比方案后,必须试拌3锅及以上的水泥稳定灰渣碎石,单锅拌和量超过80%拌和楼额定产量,开展重型击实试验和无侧限抗压强度试验,目视观察混合料拌和均匀性,要求实测强度不低于设计强度,最大干密度误差小于 $\pm 0.03 \text{ g/cm}^3$,不存在水泥团和集料离析问题。如果实测强度低于设计值,酌情增加水泥剂量,增加比例控制在0.3%~0.5%。

3 水泥稳定灰渣碎石道路基层材料的工程应用方法

3.1 混合料拌和

与传统路基材料相比,水泥稳定灰渣碎石具备灰渣质地细腻和碎石级配多的材料特性,一旦拌和质量达不到要求,就可能会出现灰渣团聚、水泥分布不均、骨料离析等问题,导致道路基层结构强度下降,甚至出现裂缝等质量病害。因此,在混合料拌和环节,必须采取集中厂拌方式,配备强制式拌和机作为拌和楼,利用自带计量系统精准称取原材料用量,要求水泥剂量误差小于 $\pm 0.5\%$,含水量、灰渣、碎石用量误差小于 $\pm 1\%$ 。准备工作完成后,按顺序依次投加碎石、灰渣、水泥与拌和水,率先投入碎石与灰渣,干拌时间控制在60 s~120 s,直至碎石、灰渣混合均匀后,继续投加水泥并干拌60 s,骨料表面完整覆盖水泥,最终加入拌和水,湿拌时间控制在3 min~5 min,总体拌和时间控制在5 min~8 min,以混合料颜色均匀、手握成团、无离析干料问题作为合格标准^[3]。此外,各批次混合料制备结束后,不得立即投入使用,随机抽样检测配合比、均匀性和含水量是否合格,重新拌和不合格混合料。

3.2 混合料运输

水泥稳定灰渣碎石混合料对使用时限提出严格要求,自身持续进行水化反应,呈现流动性逐渐下滑和强度逐渐增长趋势,如果混合料制备结束后未能按时投入使用,将提前出现混合料结硬现象,无法正常铺筑形成道路基层结构。因此,在混合料运输环节,精准适配材料时效性要求,拌合阶段同步准备运输车辆,优先使用密闭式自卸车辆,清理车厢内部杂质,内壁均匀涂刷隔离剂,车厢顶部全覆盖篷布。混合料拌和结束并通过质量检验后,立即装车运往施工现场,常温环境下的运输时长不得超过2 h,低温环境下的运输时长进一步缩短至1.5 h以内。运输车辆抵达施工场地后,配合开展卸料、摊铺作业,以摊铺机前端1 m~2 m位置作为卸料点位,卸料后立即把混合料虚铺成型。

3.3 混合料摊铺

水泥稳定灰渣碎石材料具备易离析的施工特点,施工精度达不到要求,可能会出现基层表面起砂、平整度误差超标、局部骨料集中等问题。因此,在混合料摊铺环节,必须推行精细化施工模式,重点掌握基准控制、设备调试、连续摊铺、接缝处理四个方面的技术要点。第一,基准控制。道路沿线连续挂设基准线,即为导向控制线,具体挂设高强度钢丝绳,每隔5 m等距设置若干基准桩,按照基层厚度和虚铺系数来确认基准线高程,如果灰渣掺量达到18%~20%区间,把虚铺系数从1.05~1.10调整为1.10~1.15。同步

检查下基层质量,使用相同级配混合料填补修复坑槽、松散等缺陷部位,以压实度高于 95%、平整度误差小于 3 mm/2 m 作为合格标准。第二,设备调试。优先配备多功能稳定土摊铺机,有效摊铺宽度不小于路面设计宽度,采取整幅摊铺方式。摊铺机部署就位后,全面开展调试检查作业,找平系统灵敏度控制在 ± 1 mm、熨平板预热至 $60^{\circ}\text{C} \sim 80^{\circ}\text{C}$,熨平板仰角调节在 $0.5^{\circ} \sim 1^{\circ}$,振捣器频率设定为 250 次/min $\sim$ 300 次/min^[4]。第三,连续摊铺。要求连贯完成道路基层摊铺作业,保持 2 m/min $\sim$ 2.5 m/min 恒定速度,中途不得随意停止作业、调整摊铺速度和变更摊铺方向。同步开展人工修整作业,摊铺机两侧安排施工人员辅助作业,使用铁锹等工具清理布料器内部灰渣结块和大颗粒碎石,均匀耙散局部离析混合料。第四,接缝处理。如果必须采取分幅摊铺方式时,接缝数量大幅增多,施工方案内补充接缝处理内容。尽量把相邻两幅摊铺间隔时间控制在 2 h 以内,搭接宽度保持在 100 mm $\sim$ 150 mm,补料找平搭接部位,后续重点开展碾压作业,消除路基结构薄弱环节。

3.4 混合料碾压

考虑到水泥稳定灰渣碎石混合料具备灰渣颗粒细腻的材料特性,如果碾压时间延误或碾压方式错误,灰渣和水泥水化产物形成胶结层,致使基层压实度不达标。为实现均匀压实目标,在混合料碾压环节,重点掌握碾压组合、分阶段碾压、基层养生三个方面的技术要点。第一,碾压组合。单一类型压路机无法满足水泥稳定灰渣碎石基层的压实需求,需要组合使用多种类型压路机,同时支持高频低幅和低频高幅两种碾压模式。从实操角度来看,推荐采取“振动压路机+光轮压路机”组合方案,配备 18 t $\sim$ 21 t 单钢轮振动压路机和 22 t $\sim$ 25 t 光轮压路机,全面调试检查压路机振动系统和制动系统,以碾压轮无变形磨损、振动频率/振幅灵活可调作为合格标准。同步测定混合料含水量,要求含水量误差小于 $\pm 1\%$,误差超标时以自然蒸发晾干、喷雾洒水作为调整措施^[5]。第二,分阶段碾压。以“先轻后重、先边后中”作为施工准则,分诸多阶段连贯开展碾压作业,明确各阶段的碾压重心,单独设置碾压参数。在正常工况下,道路基层碾压过程分为轻压稳定、中压振压、重压振压、静压收光四个阶段。以轻压稳定阶段为例,操控光轮压路机保持 1.5 km/h $\sim$ 2 km/h 速度开展作业,关闭振动功能,碾压遍数控制在 2 遍,以道路两侧作为起始点,向中间部位重叠碾压,初步压实混合料和平整基层表面,碾压结束后的基层压实度达到 85% $\sim$ 90%。第三,基层养护。路基碾压结束后,衔接开展养生作业,

以基层表面初凝、用手按压无明显痕迹作为养生条件,路基表面全覆盖土工布,定期洒水,保持表面湿润无积水状态。按照现场环境温度来确定养护时间,常温环境下养生时间超过 7 d, $5^{\circ}\text{C} \sim 15^{\circ}\text{C}$ 低温环境下把养护时间延长到 10 d $\sim$ 14 d,酌情减少洒水频率。

3.5 质量检测

为保证水泥稳定灰渣碎石基层的施工质量达标和长期稳定,必须建立起进场检验、过程监测和成型复检的三级质量管理体系。在原材料进场时,对灰渣活性指数、水泥安定性、碎石压碎值和含水量进行检查,以防止不合格的原材料进入生产;在拌和过程中,对现场含水量、水泥用量和灰配比例进行实时检测,严格控制计量误差和搅拌均匀性,避免灰块、骨料离析等常见病害。在施工结束后,利用无侧限抗压强度测试、压实度检测、平整度检测和钻芯取样等手段,检验基层的密实度和整体性,保证 7 d、28 d 强度都满足设计要求。并对检测记录、图像和样品进行保存,实现施工全过程的可追溯性,对细微的质量问题进行及时修正,从源头上控制基层的成型质量,从而提高路面的耐久性和使用寿命。

4 结束语

水泥稳定灰渣碎石作为新型路基优质材料,展现出成分环保、成本低廉的突出优势,高度适配现代公路工程建设需求。施工单位要认识到水泥稳定灰渣碎石材料的重要价值,围绕材料特性,全方位重新构建路基材料设计体系,针对性改良施工工艺,为道路建设高质量发展提供有力支撑。未来,可进一步结合数字化、智能化技术开展材料性能仿真模拟与施工过程动态监测,优化灰渣种类、掺量与外加剂适配性,提升材料在极端气候与复杂地质条件下的适用性,推动水泥稳定灰渣碎石基层材料的规模化、标准化应用,为绿色交通基础设施建设注入持续动力。

参考文献:

- [1] 尤晓颖.垃圾焚烧炉渣用于水泥稳定碎石混合料的研究[D].扬州:扬州大学,2020.
- [2] 霍畅维.道路基层水泥稳定碎石材料配比设计对强度的影响[J].城市建设,2025(14):38-40.
- [3] 高凤铃.生活垃圾焚烧灰渣掺入水泥稳定碎石的性能研究[D].长沙:湖南大学,2019.
- [4] 胡向宇,吴鹏,康雷,等.垃圾焚烧灰渣在水泥稳定基层中的工程应用研究[J].湖北文理学院学报,2024,45(11):11-15.
- [5] 于晓沛.水泥稳定灰渣碎石道路基层材料设计及应用[J].交通节能与环保,2025,21(06):101-106.