

公路工程水泥稳定碎石层施工中试验检测技术的应用分析

马忻仪

新疆北新路桥集团股份有限公司，新疆乌鲁木齐，830000；

摘要：水泥稳定碎石基层因其承载力高、抗变形能力强、材料适应性广等优点，已成为我国高速公路建设的主要形式。要充分发挥其工程性能，必须依靠科学、系统的试验检测技术，精准控制施工质量。本文以水泥稳定碎石基层为研究对象，从材料特性、工艺参数到成型质量三个方面展开研究，探索检测技术保障水泥稳定碎石基层性能的具体途径。

关键词：公路工程；水泥稳定碎石层；施工技术；试验检测技术

DOI：10.69979/3029-2727.26.01.079

引言

近几年，我国高速公路建设规模不断扩大，已超过 17 万公里，其中 80% 以上为水泥稳定碎石基层。该结构将级配碎石与水泥胶结形成整体，有效分散路面荷载，抑制反射裂缝扩展，被称为“黄金基层”。水泥稳定碎石层是新型路面结构，但其性能受原材料配比、拌和均匀度、摊铺压实效果等多个关键环节的精确控制，其中任何环节出现偏差，都会导致路面强度不足和收缩开裂，直接影响路面使用寿命和行车安全^[1]。

1 公路水泥稳定碎石层概述

水泥稳定碎石基层是现代高速公路建设的重要承载结构层。该结构层采用级配碎石作为骨架集料，利用水泥胶结材料的粘结作用和砂浆充填孔隙，再经过摊铺、压实和养护等工艺，形成半刚性板体结构。其技术特点是强度高、抗渗性能好、抗冻融性能好，其核心是通过嵌挤机制实现颗粒之间的机械锁定。为了保证材料的均匀性，需要通过实验室试验来确定最佳参数和最大干密度指标。结构层的布置位置和典型结构如图 1 所示。

从工程实际效果来看，该技术体系具有明显的综合优势：一是结构力学性能优异，具有良好的抗冲韧性、耐磨损和变形协调能力，能够长时间保持服役状态，有效提高道路服役寿命和抵御外界载荷扰动。二是施工效率高，简化了机械工作流程，减少了设备和人力的投入，具有经济性和适应性。三是采用重型压实技术，提高路基的整体密实度和均一性，保证路基的承载能力达到设计要求；另外，水泥稳定碎石作为典型的半刚性材料，随着龄期的增长，其结构稳定性不断增强，能够有效地改善面层和基层之间的协同工作状态，显著提高路面板的抗疲劳性能，因此非常适合于高等级公路工程。同时，该技术也有其自身的局限性：一是材料的干缩和温度收缩效应容易引起基层和土体之间的脱空和收缩开裂；二是结构对超限荷载非常敏感，在重载交通条件下容易产生累积破坏；此外，由于整体强度高，局部损伤修复起来比较困难。这些技术特点要求在施工过程中严格实施配合比校验和质量检验，从源头上控制质量隐患，保证道路全生命周期性能。

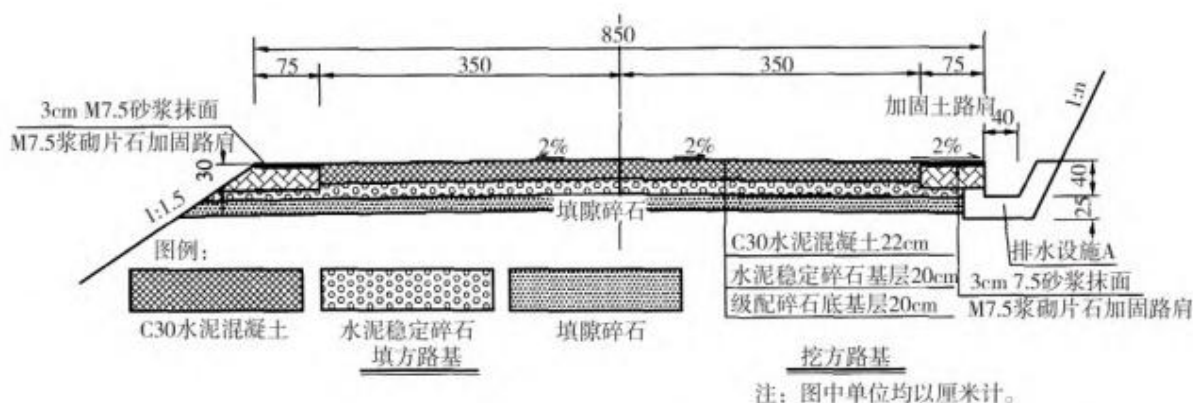


图 1 水泥稳定碎石层的位置与结构图

2 公路工程水泥稳定碎石层施工中试验检测技术的应用策略

2.1 工程概况

本项目是一条新建的双向 4 车道高速公路，主线为沥青砼路面，工程规模为 K2+150-K30+600，全长 27.45km。本项目位于本省中部丘陵区，沿线地形起伏明显，主要为粉质黏土和风化层，对路基的稳定性要求很高。路面结构中，碎石垫层设计用量为 18.5 万立方米，沥青砼面层设计用量为 16.8 万立方米，作为核心承重层的水泥稳定碎石基层，设计方量达 26.3 万立方米，施工质量控制重点集中于基层材料的强度、均匀性及抗裂性能^[2]。

2.2 材料进场阶段试验检测

如表 1 所示，确保工程质量的第一步是对材料质量的严格控制，这就需要建立一套系统的进场检查机制，使用科学的测试方法对材料的技术参数进行全面的评估，不合格的材料将被禁止进入和使用。本高速公路采用“二灰砂砾基层+二灰碎石基层+水稳碎石基层”的结构型式。

消石灰：三级及以上石灰需现场消解，其核心指标是钙镁总量和细度。钙、镁的总量必须 $\geq 55\%$ （用简易方法测定，精确度为 0.0001）。采样按缩分法进行；测定用碳酸钠的用量应严格控制在 1.5~2.0 克之间，与标准法测定时存在一定偏差。建议用标准方法每隔 15 天复查一次氧化钙/镁的含量。消化后的石灰要防潮贮存，

贮存期超过 30 天的不能使用。未消化的块料和过大的颗粒需要在使用前通过振动筛筛除。经过两次处理才能投入使用。

粉煤灰：粉煤灰是掺合料中的有效成分，其活性组分对早期强度的形成有直接影响。进场前需确认总 $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ 含量 $\geq 70\%$ ，0.075mm 筛余率 $\geq 70\%$ ，烧失量 $\leq 20\%$ 。这两个指标中的任一项不符合要求，都会导致活性不足，从而影响结构强度的发展。

水泥：侧重于强度和凝固性能。上部基层采用缓凝型水泥，其初凝时间 ≥ 3 小时，终凝时间 ≥ 6 小时。试验环境要求严格，室温为 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ，水中为 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 。在测定凝结时间之前，需要对标准浓度进行校准（推荐试杆法）。由于该方法容易受到人为干扰，所以需要指定专人进行测试，以确保数据的一致性。

粗砂：检验项目有土的含泥量、液塑限、压碎值和级配。本项目的河砂特性是：粒径大于 31.5mm 的颗粒含量在 10%~15%之间，大于 4.75mm 的粒径含量在 60%~75%之间，含泥量较低，0.075~2.36mm 的细颗粒含量较低（达不到设计级配）。采取二次破碎补料的方法，使实测塑性指标接近 0。满足设计要求。

碎石：主要指标是压碎值（基层 $\leq 28\%$ ，面层 $\leq 24\%$ ），必要时进行饱水强度测试。如果设计中没有明确的级配范围，则需要用合成级配来验证材料的性能。要求测试人员具有较强的专业素质，在进场之初就通过目测预判材料规格的适宜性^[3]。

石屑：主要检测粒径在 0.075mm 以内（含泥量 7%）的颗粒，其他指标同砂样试验要求。

表 1 水泥稳定碎石层材料进场阶段试验检测项目及技术要求

| 材料类型 | 检测项目 | 技术指标要求 | 检测方法/注意事项 |
|------|---|---|---|
| 消石灰 | 钙镁总量 | $\geq 55\%$ （简易法测定，精度 0.0001） | 缩分法取样；碳酸钠用量 1.5~2.0g；每 15 天用标准法复核 |
| | 细度 | 符合规范要求 | 筛除未消化块料及大颗粒 |
| | 贮存管理 | 防潮贮存，超 30 天禁用 | 使用前过振动筛 |
| 粉煤灰 | $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ 含量 | $\geq 70\%$ | 进场前必检 |
| | 0.075mm 筛余率 | $\geq 70\%$ | |
| | 烧失量 | $\leq 20\%$ | |
| 水泥 | 初凝时间 | ≥ 3 小时（缓凝型） | 室温 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、水中 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ ；专人试杆法测定 |
| | 终凝时间 | ≥ 6 小时（缓凝型） | |
| 粗砂 | 含泥量/液塑限/压碎值 | 粒径 $>31.5\text{mm}$ 占 10%~15%； $>4.75\text{mm}$ 占 60%~75% | 细颗粒（0.075~2.36mm）不足时需二次破碎补料 |
| 碎石 | 压碎值 | 基层 $\leq 28\%$ ，面层 $\leq 24\%$ | 必要时饱水强度测试；目测预判规格 |
| | 级配验证 | 无明确范围时需合成级配验证 | |
| 石屑 | $<0.075\text{mm}$ 颗粒含量 | 含泥量 $\leq 7\%$ | 其他指标同砂样试验 |

2.3 施工阶段试验检测

在施工过程中,对各种原材料和混合物进行系统的测试。其中,原材料检验和进场验收检验内容基本相同,只是检验频率不同。本阶段的核心工作是加强对混合料质量的测试与控制,主要测试项目包括级配、含水量、水泥用量和无侧限抗压强度等^[4]。

(1) 配合比确认:在设计单位提供的目标配合比基础上进行验证试验。采用随机抽样方法,对进场物料中有代表性的试样按照堆顶、中部和底部均匀布点取样,送实验室筛分分析,明确物料的级配特征。通过对不同样品筛分数据进行加权统计,得到综合筛选结果,并进行综合分析。根据设计的级配范围,绘制出相应的级配曲线,并对各个级配比例进行调整,使其接近设计级配中值线。考虑到稳定剂类型和混合料性质的不同,级配曲线需要表现出不同的方向:为了优化级配结构,应适当增加集料级配中的粗颗粒含量,即控制在大于 4.75mm 时,使粒径小于 4.75mm 的颗粒含量略高于设计值。对于水泥稳定剂,由于掺入量少,集料级配曲线必须与设计级配接近。在确定了目标配合比之后,还要根据原材料的实测含水量对生产配合比进行进一步的核定,从而为拌和料的拌制提供精确的依据^[4]。

(2) 混合料含水量控制:采用室内击实试验确定最佳含水量,根据实测值与目标含水量之间的偏差,结合气象条件、运输距离等因素对产品含水量进行动态调整。在正常运行条件下,实际含水率比设计要求高出 0.5%—2.0%。

(3) 水泥用量的测定:采用 EDTA 滴定法,按规范要求测定。在绘制标准曲线时,需要用 9.5 毫米方孔筛对混合物进行预筛,以去除粗颗粒大于 9.5 毫米的颗粒;此筛选过程在现场检测时同步进行,以确保数据的一致性。当检测到水泥用量不足时,应及时调整生产配方中的稳定剂用量,以避免因用量偏差而影响材料的综合性能^[5]。

2.4 验收阶段专项检测工作

基层工程竣工后,应按照规范要求对其进行专项检测,主要检查其平整度、压实度等关键技术指标是否满足设计和规范要求。测试数据形成后,应及时对测试数据进行整理、分析,并以书面形式上报项目管理部门和质量监督部门。如果在检查过程中,发现基层的实体质量没有达到标准,就必须根据现场的实际情况,尽快制定修复或返工方案,并立即组织整改。这样才能有效地避免由于局部缺陷而引起的后续工序的连锁质量问题,

从而有效地避免工程质量隐患和经济损失的风险。

3 公路水泥稳定碎石层试验检测控制要点

为了保证工程质量完全满足技术规范的要求,需要进行系统的试验测试工作,并对各个环节进行严格的控制,核心要点如下:

3.1 原材料性能验证与准入控制

需重点核查水泥、集料等关键原材料的物理力学特性,从源头保障水泥稳定碎石混合料的服役性能。

3.1.1 水泥材料管控

水泥是胶凝材料的核心成分,其质量的好坏直接影响到结构的强度和耐久性。在工程建设中,应选择强度等级在 32.5 或 42.5 以上的复合硅酸盐水泥、粉煤灰硅酸盐水泥和普通硅酸盐水泥,明确禁止使用快硬早强水泥和潮湿变质水泥;由于矿渣水泥具有较高的泌水率和较大的干缩变形,因此不能在基层上使用。水泥的凝结时间应满足初凝 3 小时、终凝 6~10 小时的技术要求。进场验收实行批量检验制度:每 200 吨袋装水泥为检验批,散装水泥每 500 吨为检验批。在实际施工过程中,要避免盲目使用低标号水泥,进场前要对出厂合格证和质量检验报告进行检查,以防止不合格品进入施工现场^[6]。

3.1.2 集料质量控制

集料宜优先选用硬岩破碎,软岩需经过专门论证。粗集料每 400 立方米或 600 吨为检测批,检测项目主要有筛分曲线、压碎值、针片状颗粒含量,粉尘颗粒粒径不超过 0.075mm,软石料含量符合设计和规范要求。针对重载、特重交通等级的高速公路和一级公路基层,需采用单一级配材料,以提高材料的均一性,降低非荷载作用下的开裂风险,提高结构整体性。反击破碎技术是碎石加工中推荐的方法,它具有针片状颗粒含量少、破碎面多、棱角大等特点,能有效地提高混合料内摩擦阻力和嵌挤效果。细粒级集料应满足清洁、干燥、无风化、无杂质等物理特性的要求,高速公路和一级公路中使用的细粒级配碎石还需进行颗粒级配、塑性指数、有机质和硫酸根含量的检测。在施工前,先将粗、细集料表面的浮尘清除干净,然后根据设计要求进行筛分、分级,并取样送去检测,以保证材料的级配连续性和清洁度。

3.2 试验检测关键要素分析

3.2.1 延迟时间的界定与验证

水泥终凝时间是影响水泥终凝时间的主要因素,包括水泥的凝结时间、环境温度和混合料的含水量等。它的测定应按照以下步骤进行:先根据设计强度要求确定

最低水泥用量,然后结合最大干密度和最优用水量配制水泥稳定碎石混合料;在此基础上,模拟实际施工过程中不同时间点闷压实过程,将延迟时间一小时一小时地延长,分别成型试件,进行7天无侧限抗压强度试验,绘制其强度一滞后时间变化趋势曲线。通过对曲线特性的分析,确定了满足设计强度规范要求的最大容许延长时间。在实验过程中,需要对环境温度和湿度的变化进行监测,并采取温度控制和保湿等措施,排除外界的干扰,保证数据的可靠性。

3.2.2 级配筛分的动态管控

级配的稳定性直接关系到压实度和压实效果,需要对其进行全过程的精细检测。具体来说,每批砂石进场前都要进行两次抽检;在施工期间,对每2000立方米的铺筑量进行2次复查,如果发现集料离析、级配不正常,应及时补测。试验时,取样后用四段法缩分试样,干燥后用标准套筛筛分作业,准确计算每一筛孔的筛余率、累积余率和通过率,以保证数据误差不超过容许范围,为后续配合比的优化提供依据。

4 结论

综上所述,水泥稳定碎石基层是重要的结构层,其性能检测涉及多个因素,如材料特性、施工技术和环境因素等。在实际应用中,需要根据实际情况建立自适应的质量控制系统,一方面要加强对胶凝材料核心指标的系统检查,标准化作业流程,提高数据准确性。另一方面,在施工过程中实行分级责任制,把检测技术嵌入到

施工过程的各个环节,以保证其符合公路施工技术规范。然而,在实际操作中仍然面临着材料波动、工况波动等不确定因素的挑战。只有在严格的实验数据支持下,建立完善的动态调整机制,才能真正保证高速公路的施工质量,为高速公路的长期服役奠定基础。

参考文献

- [1] 罗宇.公路水泥稳定碎石层试验检测技术要点[J].大众标准化,2025(18):181-183.
- [2] 吉军珠.公路水泥稳定碎石基层试验检测技术研究[J].汽车周刊,2025(10):78-79+88.
- [3] 刘晓会,邱晓宇.公路水泥稳定碎石层试验检测技术要点的分析[J].交通科技与管理,2025,6(14):167-169.
- [4] 王凯.公路工程水泥稳定碎石层施工中试验检测技术的应用分析[J].运输经理世界,2025(18):28-30.
- [5] 李剑.公路水泥稳定碎石层试验检测技术的应用[J].居舍,2021(27):29-30.
- [6] 张静.公路水泥稳定碎石层试验检测技术的应用[J].交通世界,2021(22):87-88.

作者简介:马忻仪,女,(1991.04-),毕业院校:西南财经大学天府学院;所学专业:工程造价,当前就职单位新疆北新路桥集团股份有限公司,职务:投标专员,职称级别:给排水中级工程师。