

高速公路水泥稳定碎石基层离析现象成因 与施工改进策略

郭一凡

广东省高速公路有限公司，广东广州 510000

DOI:10.61369/ME.2025120065

摘要：水泥稳定碎石基层作为高速公路路面结构中的关键承重层，其施工质量直接关系到路面结构的整体稳定性。受多种因素影响，基层施工过程中易产生离析现象，导致结构密实度不均、局部松散及早期裂缝等质量隐患。本文通过对离析现象的形成机理进行系统分析，并提出针对性施工改进策略，旨在为提升高速公路水泥稳定碎石基层施工质量提供实践参考。

关键词：高速公路；水泥稳定碎石基层；离析成因；施工改进

Causes and Construction Improvement Strategies of Segregation Phenomenon in Cement-stabilized Crushed Stone Base of Expressways

Guo Yifan

Guangdong Provincial Expressway Co., LTD, Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract : Cement-stabilized crushed stone base, as a key load-bearing layer in the pavement structure of expressways, its construction quality is directly related to the overall stability of the pavement structure. Due to the influence of multiple factors, segregation is prone to occur during the base construction process, leading to quality risks such as uneven structural density, local looseness and early cracks. This paper conducts a systematic analysis of the formation mechanism of segregation phenomenon and proposes targeted construction improvement strategies, aiming to provide practical references for enhancing the construction quality of cement-stabilized crushed stone base on expressways.

Keywords : expressway; cement-stabilized crushed stone base layer; causes of segregation; construction improvement

随着高速公路建设规模不断扩大，水泥稳定碎石基层因其整体性好、承载能力强、施工适应性高等优势被广泛应用于路面结构体系中。然而，在实际施工过程中，受材料来源差异、施工组织不合理及机械参数控制不足等因素影响，基层混合料易发生离析现象，进而削弱结构稳定性。因此，有必要对高速公路水稳基层离析现象的成因及其施工改进策略进行系统研究，以提高基层施工质量的可控性。

一、高速公路水泥稳定碎石基层离析现象成因

(一) 级配结构失衡

高速公路水泥稳定碎石基层本质上属于一种以多粒径骨料为骨架、水泥浆体为胶结介质的复合型结构材料，其整体稳定性高度依赖于级配结构的连续性^[1]。一旦级配设计或实际生产控制出现偏差，混合料内部各粒径骨料之间的嵌挤关系和填充关系就会被破坏，从而为离析现象的发生埋下隐患。在实际施工中，由于不同料场原岩性质差异明显，加工筛网孔径磨损、筛分精度不足，以及现场实际使用的骨料与实验室配合比存在偏差等因素，常常导致混合料中粗集料比例偏高、细集料含量不足，进而使基层材料由连续密实型结构向骨架疏松型结构转变。细集料和矿粉不仅承担着填充骨架空隙的重要功能，同时还为水泥浆体提供附着界面，当细料比例不足时，粗集料之间的接触点增多而填隙材料减少，在运输振动和

摊铺布料等外力作用下，粗颗粒更容易发生滚移与重新分布，逐步形成局部粗料富集区和细料聚集区，不仅导致基层压实度不均、孔隙率增大，还会在长期荷载作用下诱发裂缝扩展。

(二) 拌和系统运行缺陷

拌和阶段是水泥稳定碎石基层混合料内部结构形成的起始环节，拌和系统若存在下料不畅、传送带倾角过大、拌和时间不足或设备启停频繁等问题，都会在混合料尚未进入运输阶段之前便形成初始离析。尤其是在雨天或原材料含水量波动较大时，细集料容易结团堵塞下料口，使各级集料无法按既定比例稳定下料，从而破坏混合料的级配连续性；与此同时，若传送带倾角设置不合理或运行速度偏快，粗集料在重力与惯性力共同作用下会发生下滑或抛散，导致混合料在拌和系统内部就已经出现粗细料分布不均的状态。此外，拌和时间设置偏短或拌和能力与运输能力不匹配，常常引发设备频繁启停，使粗集料在二次启动过程中向拌和筒边缘滚落并逐渐累积，形成明显的离析带^[2]。在拌和环节形

成的初始离析具有很强的放大效应，一旦进入运输和摊铺阶段，原本已经不均匀的颗粒结构会在多次扰动作用下进一步恶化，最终表现为基层密实度不均、局部强度不足和整体稳定性下降，成为影响水稳基层性能的源头性风险因素。

(三) 运输装卸过程中的动态再分布加剧离析

混合料从拌和站到施工现场的运输过程，是离析现象最容易被放大、固化的重要阶段。由于混合料在车厢内通常呈锥体状堆积，粗集料在自重和惯性作用下更易向车厢四周滚落，而细集料则趋于集中在堆体中部或上部，形成明显的空间分层结构。在车辆启动、制动、转弯及路面颠簸等多重动态荷载作用下，颗粒之间的相对位置不断发生变化，粗细集料之间的分布差异被持续放大。与此同时，运输过程中水分蒸发会导致混合料表层逐渐变干，水泥浆体的黏结性能下降，使细集料对粗集料的包裹填充作用减弱，进一步削弱混合料整体的抗离析能力。当混合料进行卸料时，粗集料往往优先从车厢后部滑出，而细集料滞后流出，形成明显的纵向离析结构，使基层起铺端、接缝区和边缘区域出现粗料集中带。在运输阶段形成的离析具有显著的空间集中性，一旦出现在结构薄弱的接缝及边缘部位，将直接削弱基层整体连续性和承载协同性，是诱发早期裂缝、松散破碎和渗水病害的重要前兆。

(四) 摊铺机械布料特性放大离析效应

摊铺阶段是离析结构最终成型并被固化的重要节点，其施工机械布料方式与参数设置对混合料颗粒分布具有决定性影响^[3]。在实际施工中，摊铺机进料斗若处于空载状态或频繁进行收斗作业，粗集料容易向料斗底部集中，当翻板将混合料向中部汇集时会进一步加剧；若螺旋布料器转速设置偏高，粗集料容易被抛送至摊铺层表面，而细集料则通过叶片间隙提前铺散，形成明显的上下离析结构。与此同时，当供料不足或摊铺宽度过大时，布料距离加长，混合料在输送过程中受到的扰动次数增加，粗细颗粒发生二次分选的概率随之显著上升，导致表层细、两侧粗或中部细、边缘粗等离析形态频繁出现。在摊铺阶段被放大的离析一旦进入碾压环节，便会被压实固化，形成不可逆的结构缺陷，最终导致基层压实度不均、局部松散破碎和抗水损能力下降，严重削弱高速公路水稳基层的整体性能。

二、高速公路水泥稳定碎石基层施工改进策略

高速公路水泥稳定碎石基层的施工流程如图1所示：

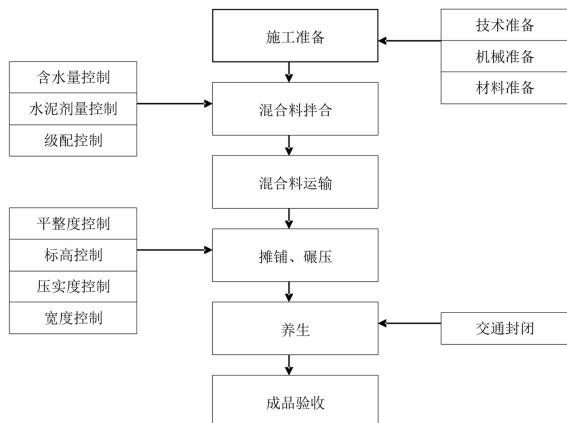


图1 高速公路水泥稳定碎石基层的施工流程

在高速公路水泥稳定碎石基层的施工流程中，为了减少离析现象，必须针对其中的关键环节进行施工改进，保障施工效果。

(一) 构建源头材料质量管控体系

在材料供应管理上，施工单位应优先选择单一稳定料源供料，减少因多料源交叉带来的级配离散问题；当工程条件限制必须采用多料场供料时，应对不同料源进行单独评估与备案管理，严格执行分区堆放、分批使用制度，严禁混堆混用，避免级配无序叠加导致的结构失稳。在料场堆放环节，应将堆料高度控制在3m以内，当受场地限制无法满足时，应通过设置隔墙分仓方式对堆体进行分区管理，抑制大粒径骨料沿堆体滚落形成底部富集带^[4]。装载机上料时应执行逐层取料、逐层推进原则，避免直接从料堆底部铲取粗集料富集区，使异常级配整体进入拌和系统。在进场检测环节，应建立以关键筛孔为核心的级配稳定控制机制，对4.75mm、9.5mm、19mm等关键筛孔通过率实施高频抽检，使其长期波动范围稳定控制在5%以内；同时应结合现场快速筛分与室内水洗筛分双通道检测方式，实时掌握级配变化趋势。当检测结果出现偏移征兆时，应立即对0~5mm、10~25mm等关键粒径比例进行微调纠偏，防止级配漂移累积放大。具体的筛孔尺寸及通过率如表1所示：

表1 水泥稳定碎石颗粒范围

筛孔尺寸 (mm)	31.5	19	9.5	4.75	2.36	0.6	0.075
通过率 (%)	100	68~86	38~58	22~32	16~28	8~15	0~3

(二) 优化拌和系统运行参数

施工中应首先保证拌和系统产能与运输能力的匹配，合理配置运输车辆数量，避免因车辆不足导致拌和机频繁启停，从而使粗集料在启动与停止瞬间受惯性作用向拌缸边部滚落形成初始离析带。拌和时间应严格控制不低于15s，确保水泥浆体能够充分裹覆各级骨料，使混合料形成稳定、连续的包裹结构，避免因搅拌不足造成粗细料分布不均。对集料仓应加高隔板并加设防雨棚，防止装载机上料过满引起窜料，同时避免雨天细集料结团堵仓导致下料比例失衡^[5]。传送带倾角与运行速度应进行联合控制，倾角不宜过大，防止粗集料下滑集中；必要时在成品仓内加设缓冲挡板，削弱抛料效应，避免粗细料在落料过程中发生二次分选。在拌和计量方面，应对电子计量设备进行定期校准、期间核查，保证各档集料与水泥剂量的准确性，避免因计量偏差导致混合料级配失稳。对原材料含水率应实施多点、勤测制度，使拌和用水量能够及时随原料含水波动进行调整，防止因含水率过大导致细集料黏附皮带、因含水率过小造成水泥浆体不足而诱发离析^[6]。

(三) 规范运输装卸流程

在装料环节，应统一采用“前一后一中”三点分次装车方式，避免一次性集中装料导致粗集料滚落至车厢边缘形成富集带；卸料高度应控制在2m以内，并确保卸料口完全开启，使混合料能够整体平稳地进入摊铺机料斗，减少因自由落体高度过大引发的再分选现象^[7]。运输过程中应统一使用篷布全覆盖，并在高温或大风天气下对篷布进行适量洒水，保持混合料表层湿润状

态，减缓水分蒸发造成的黏结力衰减。对运输路线应提前进行整修处理，尽量消除急弯、陡坡和明显起伏路段，要求车辆平稳行驶，严禁急刹车、急转弯与超速行驶，降低惯性冲击对颗粒结构的扰动。在卸料衔接控制方面，应合理安排车辆调度，确保摊铺机连续作业，避免出现停机等料现象；当上一车卸料尚未完全结束时，应提前启动下一车卸料，使新旧料在摊铺机料斗内形成过渡衔接，防止尾部富集粗料集中摊铺形成接缝离析。车厢底板应保持清洁光滑，必要时涂刷润滑剂，确保混合料能够整体滑落，避免因局部滞留导致粗细料分层卸出^[8]。

（四）重构摊铺布料控制模式

施工中应确保摊铺机料斗内始终保持一定料位，避免出现空载状态引发两侧翻板向中间收料而造成粗集料集中；料斗内原有混合料不宜清理过净，应在新料卸入后与其共同进入螺旋布料器进行二次搅拌，以削弱粗细料分层趋势。螺旋布料器应保持匀速运转，料位高度宜稳定在叶片高度的2/3左右，并可通过增设反向叶片方式增强混合料横向搅拌能力，使布料过程中混合料始终处于连续稳定的二次混合状态^[9]。对供料不足工况应通过车辆调度提前解决，严禁以提高螺旋转速代替供料补充，防止细集料提前卸出、粗集料被带向两侧形成典型离析带。摊铺速度应控制在约1.5m/min左右，使布料距离、扰动次数与混合料稳定性保持合理匹配，避免过快行走引发布料距离加长、颗粒分选加剧。对施工过程中已出现的局部离析区域，应及时清除原有混合料，并换用新拌合格料填补，严禁直接碾压固化；必要时可对局部区域人工补撒细料并重新整形，恢复级配连续性。

（五）强化碾压养生协同控制

在碾压组织方面，应在摊铺完成后立即检测混合料含水率，使其处于最佳含水率区间后再开展碾压作业，避免因水分不足导致水泥浆体迁移、细集料被挤出形成再离析现象。碾压工艺应分为初压、复压、终压三个阶段逐级推进，初压阶段宜采用轻型压路机形成初始稳定框架，复压阶段选用重型压路机满足压实度控制要求，终压阶段再以轻型压路机进行静压整形，使基层内部颗粒逐步趋于均匀致密^[10]。碾压路线应遵循由边向中、先慢后快的原则，避免横向推移与侧向剪切力集中造成细集料迁移。在养生控制方面，碾压完成并经检测合格后应立即进行洒水养护，养护时间不少于7d，并根据天气情况保持基层表面持续湿润状态，防止水泥浆体早期失水收缩引发结构松散。养生期间应实施交通管制，严禁任何车辆通行，避免尚未形成强度的基层结构受到扰动而放大潜在离析缺陷；同时可采用透水土工布覆盖配合薄膜保湿的方式，稳定基层表面湿度环境。

三、结语

高速公路水泥稳定碎石基层离析是由多因素叠加作用形成的结果。通过构建以级配稳定为核心、以全过程施工协同控制为主线的离析防控体系，能够有效提升基层结构的密实性，从而为高速公路水稳基层施工质量管理提供具有推广价值的技术参考。

参考文献

- [1] 孙芳. 高速公路中水泥稳定碎石基层施工技术 [J]. 四川水泥, 2025, (04): 255–257.
- [2] 王明明. 水泥稳定碎石基层离析原因及控制措施分析 [J]. 西部交通科技, 2023, (08): 24–25.
- [3] 陈永胜. 水泥稳定碎石基层离析成因及防治措施 [J]. 交通世界, 2021, (20): 96–97.
- [4] 王兴超. 高速公路水泥稳定碎石基层宽幅大厚度摊铺碾压施工技术 [J]. 交通世界, 2023, (08): 59–62.
- [5] 王开科. 高速公路水泥稳定碎石基层施工技术分析 [J]. 黑龙江交通科技, 2023, 46 (02): 73–75.
- [6] 刘建新. 高速公路水泥稳定碎石基层施工质量控制 [J]. 交通世界, 2022, (36): 87–89.
- [7] 王世超. 骨架嵌挤型水泥稳定碎石基层在高速公路施工中的应用研究 [J]. 工程建设与设计, 2024, (17): 220–222.
- [8] 宋耀红. 高速公路水泥稳定碎石基层施工技术 [J]. 价值工程, 2024, 43 (10): 94–96.
- [9] 黄金城, 张大斌, 赵承伟. 高速公路水泥稳定碎石基层双层连铺施工技术应用研究 [J]. 西部交通科技, 2023, (10): 18–21.
- [10] 刘伟伟. 论高速公路工程建设中水泥稳定碎石基层施工技术的应用 [J]. 交通科技与管理, 2023, 4 (16): 129–131.