

高温差地区水泥稳定基层裂缝防控研究

张伟, 葛洋洋, 肖玉杰

(中交一航局第五工程有限公司)

摘要:以新疆乌尉高速公路路面工程水泥稳定碎石基层为例,研究了高温差环境下水泥稳定基层裂缝的形成原因及防控方法。通过对新疆地区现有高速公路水稳基层开裂状况进行调研,论证了环境因素(温差、干燥、大风)是区别于其他地区的主要因素。采用定性分析法探讨了材料性能、水泥剂量、配合比设计、施工工艺及环境条件等因素在高温差地区的权重,提出“环境是最大诱因,施工控制是关键”的核心观点。研究结果表明,采用骨架密实型级配、严格控制含水量与碾压时机、实施针对性养生等措施,可有效降低裂缝出现频率,显著提升水泥稳定基层的抗裂能力。工程应用表明,该技术体系在保证施工质量的前提下可降低成本,具有良好的技术推广价值。

关键词:高温差地区;水泥稳定基层;裂缝防控;全过程控制;温缩裂缝

0 引言

半刚性基层作为国内当前应用最广泛的基层结构形式,兼具刚性基层与柔性基层的综合优势,其中水泥稳定碎石基层在当前基层施工中应用最为普遍。然而该水泥稳定碎石基层在施工过程中仍面临诸多技术难题,尤其是易产生开裂现象,在温差较大的地区,水稳基层结构的裂缝风险更为显著,不仅会削弱结构的整体性并缩短使用寿命,还可能对行车安全构成潜在威胁^[1]。本文依托乌尉高速公路工程,针对特定地域环境特征,筛选科学合理的工程处置方案,以保障乌尉高速路面工程建设质量。本研究聚焦于分析高温差地区水泥稳定基层裂缝的形成机理与防控技术路径,通过系统探讨其成因机制,提出针对性解决方案,以期最大限度降低裂缝发生率,从而有效延长道路结构的服务年限。

1 工程背景与开裂原因分析

1.1 工程背景

乌尉高速公路地处新疆维吾尔自治区境内,线路纵贯天山山脉南北区域。其中北疆路段的气候环境呈现显著的极端特征:夏季高温炎热,冬季严寒酷冷,且常年伴随强风天气,区域内降水总量稀少,昼夜温差可达 25°C 以上,1月份平均气温低至 -17°C ,极端低温环境下甚至可达 -31.7°C 。在这类恶劣自然条件的作用下,半刚性基层材料易因温度应力与水分蒸发产生温缩及干缩裂缝病害。

1.2 水稳基层裂缝状况

新疆地区干旱少雨、日蒸发强烈、昼夜温差大、季节性温差显著,这种特殊气候条件加剧了水泥稳定基层的收缩裂缝病害。杨三强等^[2]依托G3012阿克苏至喀什高速公路的研究表明,在新疆干旱荒漠区水泥剂量越大,干缩应变越大;随着失水率增加,干缩应变逐渐增大;温缩应变随水泥剂量和环境温度的降低而逐渐增大,呈线性关系。此外,星哈(星星峡—哈密)高速公路、赛果高速公路等工程实践也表明,横向裂缝(主要为温缩裂缝)是该地区水稳基层最常见的病害形式,严重影响了路面结构的耐久性^[3-4]。由此可见,裂缝问题在新疆类似气候区具有普遍性,开展针对性防控研究十分必要。

1.3 温缩与干缩开裂机理

水泥稳定碎石材料对环境温湿度变化表现出较高敏感性,其强度形成过程中常伴随温缩与干缩裂缝的产生。温缩裂缝的形成机制与水泥水化反应密切相关:水化过程中释放的大量热量使材料内部温度显著升高,而当外部环境温度快速降低时,材料表层发生冷却收缩,这种内外部温度差异形成的温度梯度会产生约束应力。当该应力超过基层材料的极限抗弯拉强度时,温缩裂缝便会随之产生^[5]。干缩裂缝的形成机制则与材料内部水分迁移密切相关:当水分通过蒸发或迁移逐渐散失时,材料会因体积收缩产生内应力,最终形成干缩裂缝^[6]。

在乌尉高速所处地区昼夜温差及季节温度变化大的情况下,水稳材料在温度应力作用下更容易产生变形和应力集中。裂缝的出现不仅降低结构承载能力,而且还会随着雨水下渗,不断冲刷裂缝两侧材料,尤其在北方严寒地区,易产生冻胀破坏,加速结构损伤^[7]。

1.4 高温差地区影响因素权重分析

导致水泥稳定类材料开裂的影响因素众多,可分为内因和外因两大类。通过对新疆地区已建成高速公路水稳基层开裂状况的调查,并结合相关文献分析,各影响因素在不同环境下的主导作用存在差异^[8-9]。在类似于乌尉高速的极端温差、干旱、多风环境下,各影响因素的权重可初步定性排序为:环境条件>施工工艺>配合比设计与水泥剂量>材料性能。

1) 环境条件(高权重):巨大的昼夜温差和季节性温差是温缩裂缝产生的直接驱动力;而极度干燥和频繁的大风天气则急剧加速水分蒸发,是干缩裂缝形成的关键外部诱因。这是区别于其他非干旱温差地区的根本特征。

2) 施工工艺(次高权重):在恶劣环境下,碾压时机、碾压段长度、养护措施的及时性与有效性等工艺控制,对抵抗环境的不利影响至关重要,稍有不慎即会开裂。

3) 配合比设计与水泥剂量(中等权重):合理的级配(尤其是细集料含量)和最优的水泥剂量,是提高混合料自身抗裂能力的“内因”。低剂量水泥虽能减少裂缝,但须以牺牲强度为代价,因此在高温差地区寻求平衡点尤为关键。

4) 材料性能(基础权重):优质、洁净的集料和稳定的水泥是基础,但在满足基本指标后,其对裂缝的直接影响相对环境因素和施工控制要低。

基于上述权重分析,后续防控措施应重点针对高权重的环境因素和施工工艺进行精细化控制,同时优化中等权重的配合比设计与水泥剂量,以实现最佳防控效果。

2 基于影响因素权重的施工关键技术控制

2.1 材料选择与配合比优化

结合项目当地地材特点,因地制宜,优先选择质量稳定、抗裂性能好的水泥和骨料。水泥采用强度等级为42.5的缓凝型普通硅酸盐水泥,初凝时间大于3h,终凝时间6~10h。由于新疆地区卵石资源丰富,采用卵石作为水稳用材料,粗细

集料分为4档:20~25mm、10~20mm、5~10mm、0~5mm。材料技术指标要求如表1所示。

表1 原材料技术指标要求

材料	技术指标	要求
粗集料	压碎值/%	≤26
	针片状颗粒含量/%	≤22
	0.075 mm 以下粉尘含量/%	≤2
	软石含量/%	≤5
细集料	颗粒级配	满足级配要求
	塑性指数	≤17
	有机质含量/%	<2
	硫酸盐含量/%	≤0.25

配合比设计采用骨架密实型级配(C-B-3级配类型),增加粗集料用量,减少细集料用量,控制集料粒径4.75mm通过率在22%~32%,0.075mm以下通过率在0~3%。级配设计通过率见表2。

表2 级配设计通过率

项目	31.5 mm	19 mm	9.5 mm	4.75 mm	2.36 mm	0.6 mm	0.075 mm
通过率/%	100	78~86	38~58	22~32	16~28	8~15	0~3

2.2 施工过程精准控制

1) 含水量动态调控:每天开始搅拌前,检查场内各处集料的含水量,计算当天的配合比,根据天气情况控制含水量在最佳含水量,潮湿天气宜高0.5%~1%,气温高、干燥天气时含水量可调高1%~2%(不超过最佳含水量的2%),根据实际情况严格控制混合料的含水量。搅拌后出料时取样检查符合生产配合比,正式生产后,每1~2h检查1次拌和情况,抽检其配合比、含水量变化。高温作业时,早晚与中午的含水量要有区别,按温度变化及时调整。

2) 混合料装料控制:运输车辆在开工前检查完好情况,装料前将车厢清洗干净。运输车辆数量满足拌和出料与摊铺需要,并略有富余。由漏斗出料直接装车运输,装车时车辆“前、后、中”移动,分3次装料,避免混合料离析。

3) 碾压段长度控制:根据天气情况及时调整碾压段长度。在高温时段缩短碾压段长度至20~30m,防止水分过快蒸发导致表面干燥开裂。碾压在水泥初凝前完成,避免过振碾压。碾压工艺遵循“先轻后重,由边向中,由低向高”的原则,流程为:双钢轮压路机静压1遍→单钢轮压路机

弱振1遍+强振3遍→胶轮压路机碾压1遍→双钢轮压路机静压收面1遍,共7遍。

4) 水泥剂量稳定控制:采用EDTA滴定法控制水泥剂量处于稳定范围,每1~2h检查1次拌和情况,抽检配合比、含水量变化。

5) 切缝位置合理设置:水泥稳定类材料采用切缝工艺,掌握合理的切缝时机可以有效防止和减少温缩性裂缝,有助于基层适应温度的变化,减少热胀冷缩现象,从而减少裂缝的产生。

2.3 针对性养生工艺

1) “一布一膜”复合湿养:针对西北地区昼夜温差大、多大风、降水稀少的特点,单独洒水养生水分蒸发快,无法保证质量。施工中采用“一布一膜”(土工布+塑料薄膜)覆盖养生,可使水分保持更长时间,均匀渗透到基层内部。这种方式既能节约养生用水量,又能在低温期避免霜雪对基层强度的影响。

2) 乳化沥青透层油养生:水泥稳定碎石基层碾压结束后,表面稍干但尚未硬化时喷洒透层油。透层油温度控制在60~80℃,洒布量约(1.20±0.20) kg/m³,保证喷洒均匀。与洒水养生7d后再洒布相比,这种方式渗透深度更深、效果更好。气温较高时,可先在基层表面均匀洒布少量水,使表面湿润,以利于乳化沥青渗透^[9]。

上述养生工艺有效改善了基层早期养护条件,减少了干缩裂缝的产生,是应对高温差、干旱、大风环境的创新措施。

3 现场应用效果与验证分析

基于上述影响因素权重分析,在施工中重点对高权重的施工工艺和环境控制因素进行了严格管理,并优化了中等权重的配合比和水泥剂量。通过在试验段对不同水泥剂量进行对比,验证了在满足设计要求的前提下,降低水泥剂量对裂缝控制的显著效果。

3.1 强度对比

采用同一级配,对不同水泥剂量进行水稳试验段铺筑,强度对比结果见表3。随着水泥剂量从4.5%降低至3.5%,无侧限抗压强度呈现下降趋势,但水泥剂量为4.0%时无侧限抗压强度代表值5.2 MPa仍满足设计要求(≥5 MPa),而水泥剂量为3.5%时无侧限抗压强度代表值已不能满足要求且变异系数较大,强度离散大。表明在保证强度的前提下,水泥剂量不宜低于4.0%。

表3 无侧限抗压强度统计

水泥剂量/%	无侧限抗压强度			强度设计值/ MPa
	平均值/MPa	变异系数/%	代表值/MPa	
4.5	6.5	7.8	5.7	≥5
4.0	6.0	8.4	5.2	
3.5	5.3	12.3	4.2	

3.2 裂缝控制

经过一个冬季的收缩,对裂缝进行调查,结果见表4。随着水泥剂量从4.5%降低至4.0%,横向裂缝数量从36条减少至17条(减少52.8%),平均裂缝间距从51.7 m增大至74.8 m;进一步将水泥剂量降低至3.5%,裂缝数量减少至11条,平均裂缝间距增大至85.8 m。说明降低水泥剂量对控制由环境因素驱动的温缩、干缩裂缝具有明显效果。

表4 水稳横向裂缝统计

水泥剂量/%	横向裂缝/条	平均裂缝间距/m
4.5	36	51.7
4.0	17	74.8
3.5	11	85.8

4 经济效益

本项目水稳施工120万t,通过加强各项工艺控制及配合比优化,细集料掺配比例降低8%,水泥掺量降低0.3%,共节约成本约154万元,在降低裂缝出现频率的情况下取得了显著的经济效益。同时,由于裂缝减少,后期养护成本也相应降低。

5 结语

本文系统分析了高温差地区水泥稳定基层裂缝的成因及防控技术,结合乌尉高速公路工程实践,得出以下结论:

1) 裂缝成因复杂多样,主要包括温缩与干缩作用。在新疆高温差、干旱、多风环境下,各影响因素的权重排序为:环境条件>施工工艺>配合比设计与水泥剂量>材料性能,其中环境是最大诱因,施工控制是关键。

2) 通过采用骨架密实型级配、控制细集料含量与水泥剂量,可显著降低基层的收缩变形。针对高温差环境,4.0%水泥剂量可在保证强度(代表值5.2 MPa)的同时有效控制裂缝(较4.5%水泥剂量减少52.8%)。

3) 高温差地区应重点针对高权重因素采取措施:针对环境干燥、大风天气,采用含水量动态

调控、碾压段长度调整;针对昼夜温差大、水分蒸发快的特点,通过采用“一布一膜”复合湿养和乳化沥青透层油养生工艺,从源头减少干缩与湿缩裂缝。

4) 工程应用表明,该技术体系在保证结构强度与耐久性的同时,兼顾经济性与施工可行性,对新疆及类似高温差地区的水稳基层裂缝防控具有较高的推广价值。

参考文献:

- [1] 任玉册,吴越. 水泥稳定碎石基层施工技术 in 道路施工中的应用[J]. 全面腐蚀控制, 2025, 39(10): 224-226.
- [2] 杨三强,刘涛,谭忆秋,等. 干旱荒漠区水泥稳定砂砾基层干缩、温缩特性分析[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2013, 38(4): 918-928.
- [3] 武越锋. 半刚性基层沥青路面温缩反射裂缝疲劳扩展[J]. 黑龙江交通科技, 2021, 44(10): 260-261.
- [4] 李勇. 水稳基层施工裂缝和拱胀控制技术研究[J]. 四川建材, 2023, 49(5): 144-146.
- [5] 程箭,许志鸿,孙兆辉. 基于环境和荷载的水泥稳定碎石抗裂评价系数试验研究[J]. 公路交通科技, 2008(9): 18-22.
- [6] 谭学政. 水泥稳定碎石多指标质量控制方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2013.
- [7] 郝小娟. EDTA 滴定法在测定基层水泥剂量实践中的应用[J]. 陕西水利, 2014(2): 117-119.
- [8] JTG/T F20—2015, 公路路面基层施工技术细则[S].
- [9] 程龙龙. 水泥稳定碎石基层透层油养生技术[J]. 交通世界, 2023(23): 61-63, 66.
- [10] 吴春洋. 沥青混合料摊铺动力学分析及对摊铺均匀性的影响研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2019.