

水泥稳定碎石底基层纵向开裂分析与防治

李湘锋¹, 龚娄京^{2*}, 姚佳良³, 姚丁⁴

¹长沙市公路桥梁建设有限责任公司, 湖南 长沙

²长沙理工大学交通学院, 湖南 长沙

³云南交通运输职业学院公路学院, 云南 昆明

⁴湖南工业大学土木与环境工程学院, 湖南 株洲

收稿日期: 2025年11月11日; 录用日期: 2026年2月25日; 发布日期: 2026年3月6日

摘要

通过纵向开裂路段水泥稳定级配碎石底基层原材料试验、级配分析和现场取芯厚度、强度评定、裂纹观测、施工期间荷载有限元分析、开挖试坑进行路基稳定性分析等, 系统研究分析了炉慈高速公路某路面底基层施工期间出现的纵向开裂原因。研究表明: 开裂路段底基层强度、厚度满足设计要求, 引起本项目纵向裂缝与施工期间重型车辆荷载重复作用、路基浸水、失去地基支撑有直接的关系。依托炉慈高速公路, 提出了适当增大粗料用量, 减少0.075 mm以下矿料用量的级配优化建议, 针对本路段水泥稳定级配碎石底基层纵向开裂采取了在底基层表面加设直径: $\Phi 10$ mm双向布置100 mm \times 100 mm的钢筋网片, 基层采用水泥混凝土板的加固方案。本文相关分析和建议不仅服务于本项目后续施工, 同时也可供同类工程参考。

关键词

高速公路, 水泥稳定级配碎石, 纵向开裂, 路基稳定性, 加固

Analysis and Prevention of Longitudinal Cracking in Cement-Stabilized Crushed Stone Subbase

Xiangfeng Li¹, Loujing Gong^{2*}, Jialiang Yao³, Ding Yao⁴

¹Changsha Highway and Bridge Construction Co., Ltd., Changsha Hunan

²School of Transportation, Changsha University of Science & Technology, Changsha Hunan

³School of Highway Engineering, Yunnan Vocational College of Transportation, Kunming Yunnan

⁴School of Civil and Environmental Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan

Received: November 11, 2025; accepted: February 25, 2026; published: March 6, 2026

*通讯作者。

文章引用: 李湘锋, 龚娄京, 姚佳良, 姚丁. 水泥稳定碎石底基层纵向开裂分析与防治[J]. 交通技术, 2026, 15(2): 193-203. DOI: 10.12677/ojtt.2026.152018

Abstract

Through raw material tests, gradation analysis of the cement-stabilized graded crushed stone sub-base in the longitudinally cracked section, as well as on-site coring for thickness measurement, strength evaluation, crack observation, finite element analysis of loads during construction, and excavation of test pits for subgrade stability analysis, a systematic study was conducted to analyze the causes of longitudinal cracking in the subbase of a certain pavement section of the Lunci Expressway during construction. The study shows that the strength and thickness of the subbase in the cracked section meet the design requirements, and the longitudinal cracks in this project are directly related to the repeated action of heavy vehicle loads during construction, as well as subgrade immersion and loss of foundation support. Relying on the Lunci Expressway, optimization suggestions for gradation are proposed, including appropriately increasing the dosage of coarse aggregates and reducing the dosage of mineral aggregates smaller than 0.075 mm. For the longitudinal cracking of the cement-stabilized graded crushed stone subbase in this section, a reinforcement scheme is adopted: a 10mm-diameter steel mesh arranged in a 100 mm × 100 mm bidirectional pattern is added on the surface of the subbase, and cement concrete slabs are used for the base course. The relevant analysis and suggestions in this paper not only serve the subsequent construction of this project but also provide a reference for similar projects.

Keywords

Expressway, Cement-Stabilized Graded Crushed Stone, Longitudinal Cracking, Subgrade Stability, Reinforcement

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

水泥稳定碎石基层施工过程中经常会出现横向与纵向开裂, 尤以纵向开裂危害大, 处理难度大, 造成的损失大。控制水泥稳定级配碎石基层纵向开裂是路面基层施工中务必重视的一个问题, 因为基层纵向裂纹在路面运营期间车辆荷载作用下会进一步发展, 反射到沥青面层, 如果不及时处理, 雨水沿着裂纹下渗, 造成路基、路面损坏等病害, 不仅引起沥青面层纵向开裂扩展(增宽、增长), 还可能引起路基的脱空、甚至滑坡等破坏, 由此会严重影响道路的安全性、结构的耐久性, 造成更大的经济损失和社会影响[1]-[3]。

通常水泥稳定基层(底基层)纵向开裂原因有: 1) 基层原因, 如基层施工纵向接缝或者一次摊铺宽度大, 水泥稳定基层施工期间出现较大收缩引起纵向开裂[4]-[6]; 2) 路基原因: 如半填半挖路段原地面为横向坡面, 处理不当产生滑动, 或者路基排水不畅路基浸水, 产生较大变形等[7][8]; 3) 过早开放交通、超载或者偏载的影响也是引起纵向开裂的原因[9][10]: 施工期间由于交通流量较大, 重载车辆多, 可能导致新铺路面表面已经被磨损, 表面凸凹不平, 此时实质底基层板已经损伤, 甚至出现了纵向开裂。偏载是由于底基层设置了 2% 的横坡, 施工期间行驶在路面上的汽车, 轴荷载会产生偏心, 特别是超载重车高速行驶时的偏载, 纵向开裂往往出现在行车道右侧轮迹位置, 这种情况与偏载有一定关系[11][12]。

本文结合炉慈高速公路某路段底基层在施工期间产生的纵向开裂问题, 通过水泥稳定级配碎石底基层材料、配合比、施工期间弯沉有限元分析、现场取芯和性能试验、路基稳定性等调查, 从原材料、底基

层级配碎石形成结构、施工质量及施工荷载、路基稳定性等方面系统研究分析了炉慈高速公路某路段底基层纵向开裂原因：开裂路段底基层强度、厚度满足设计要求，引起本项目纵向裂缝与施工期间重型车辆荷载重复作用、路基浸水、失去地基支承有直接的关系。依托炉慈高速公路，提出了适当增大粗料用量，减少 0.075 mm 以下矿料用量的级配优化建议，针对本路段水泥稳定级配碎石底基层纵向开裂采取了在底基层表面加设直径： $\Phi 10$ mm 双向布置 100 mm \times 100 mm 的钢筋网片，基层采用水泥混凝土板的加固方案。本文相关分析和建议不仅服务于本项目后续施工，同时也可供同类工程参考。

炉慈高速公路位于湖南省，路线整体由北向南，起于湖南省常德市石门县与湖北省宜昌市五峰土家族自治县交界的炉红山(湘鄂界)，止于常张高速慈利西互通西的张家山。路面总厚度 95 cm，路面结构为：4 cm AC-13 + 6 cm AC-20C + 8 cm AC-25C + 1 cm SBS 改性沥青同步碎石封层 + 36 cm 5%水泥稳定碎石基层 + 20 cm 4%水泥稳定碎石底基层 + 20 cm 级配碎石垫层。设计要求底基层采用水泥稳定碎石，设计压实度不小于 97%，水泥剂量推荐为 4.0%，7 天浸水无侧限抗压强度的代表值不小于 3.5 MPa，采用“公路路面基层施工技术细则”(JTG/T F20-2015) C-A-1 级配，交通荷载等级属特重交通。

2. 纵向开裂底基层材料、级配、厚度、强度调查

本项目施工过程中出现了几处纵向开裂，有的路段(底基层施工桩号为 K26+300~K26+400)，施工不到一个月就产生了 69 m 长的纵向裂缝，且贯通到底基层底面，开裂位置取芯芯样见图 1。开裂路段底基层材料、级配、厚度、强度如下。



Figure 1. Core drilling at longitudinal crack location
图 1. 纵向裂纹处取芯

2.1. 底基层原材料选择与配合比设计

原材料

- 1) 水泥

水泥选用强度等级为 42.5 MPa 石门葛洲坝生产的普通硅酸盐水泥。主要技术指标见表 1。

2) 集料

集料均选用石灰岩，粗集料的堆积密度为 1510 kg/m³，压碎值为 15.6%，针片状含量 4.6%，0.075 mm 以下粉尘含量 0.6%；细集料小于 0.075 mm 颗粒含量 12.5%，堆积密度为 1562 kg/m³，细度模数为 2.7，粗、细集料筛分结果与合成级配见表 2。粗、细集料各项指标均符合相关技术指标要求，各矿料组成为：碎石 1:碎石 2:碎石 3:石屑 = 18:23:14:45，合成级配见图 2，级配符合要求(JTG/T F20-2015 推荐的级配范围：C-A-1)，但级配偏细(靠近级配上限)，因此从抗裂而言此级配应该进行优化，适当增大粗料用量，减少细料用量，尤其是减少 0.075 mm 以下矿料用量。

Table 1. Test results of main technical indexes of cement

表 1. 水泥主要技术指标试验结果

项目	细度(比表面积)	标准稠度(%)	凝结时间		安定性试验 (雷氏夹法, mm)	3 天抗折强度 (MPa)	3 天抗压强度 (MPa)
			初凝时间(min)	终凝时间(min)			
测试结果	310	25.8	256	361	1.0	4.5	20.8
规范要求	≥300	/	≥180	>360, <600	≤5	≥3.5	≥17.0

Table 2. Synthetic gradation of subbase course mineral materials

表 2. 底基层矿料合成级配

筛孔孔径(mm)	37.5	31.5	19	9.5	4.75	2.36	0.6	0.075
	通过率(%)							
碎石 1 (19~31.5)	100	90.0	15.0	0.9	0.5	0.5	0.5	0.5
碎石 2 (9.5~19)	100	100	92.6	10.4	2.1	1.3	0.8	0.6
碎石 3 (4.75~9.5)	100	100	100	96	8.7	1.9	1.3	1.0
石屑(0~4.75)	100	100	100	100	95.5	74.0	32.9	12.5
合成级配	100	98	83	61	45	34	15	6.0
级配范围	100	90~100	82~86	45~68	29~50	18~38	8~22	0~7

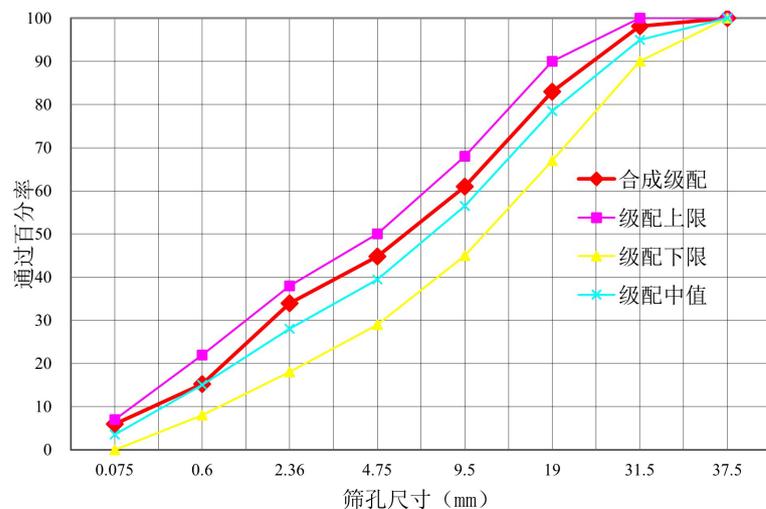


Figure 2. Gradation composition chart

图 2. 合成级配图

2.2. 开裂路段底基层施工质量调查

2.2.1. 底基层厚度调查

结合取芯调查时发现：本路段低基层设计厚度为 20 cm，取芯厚度见表 3，取芯芯样见图 3。

Table 3. Construction thickness of subbase layer in cracked sections

表 3. 开裂路段底基层施工厚度

序号	1	2	3	4	5	6	7	8
厚度(cm)	200	201	199	199	197	195	195	194
序号	9	10	11	12	13	14	15	16



Figure 3. Core sample thickness measurement

图 3. 厚度芯样检测

厚度代表值为平均值的下置信限 \overline{X}_L ；带入公式(1)可得 $\overline{X}_L = 19.14$ cm。

$$\overline{X}_L = \bar{X} - t_\alpha S / \sqrt{n} \quad (1)$$

式中： \bar{X} ——厚度平均值；

S ——厚度标准差；

N ——样本数量；

t_α —— t 分布表中随自由度和保证率(或置信度 α)而变的系数,对高速公路和一级公路应取保证率 99%,查分布表可得 $t_\alpha = 2.5835$ 。

按照式(1)计算,底基层厚度均值允许偏差为-10 mm,单点允许偏差为-25 mm, $\bar{X} = 195.06$, $S = 5.64$,带入公式(1)可得 $\overline{X}_L = 19.14$ cm,最小厚度为 18.4 cm,设计值 - 容许偏差 = 20 - 10 = 19 cm,设计值 - 单点容许偏差 = 20 - 2.5 = 17.5 cm,因此厚度代表值与单点极值均符合要求。

2.2.2. 底基层强度调查

本项目底基层 7 天抗压强度标准值为 3.5 MPa,击实试验与 7 d 无侧限抗压强度、取芯试验结果(见表 4),配合比按照设计图纸推荐 4.0%水泥剂量测得 7 d 无侧限抗压强度均满足设计要求。试验所取芯样的强度代表值 R_d^o 按照式(2)计算。

$$R_d^o = \bar{R} * (1 - Z_\alpha C_v) \quad (2)$$

式中： \bar{R} ——抗压平均强度(MPa)；

C_v ——试验结果的偏差系数(以小数计)；

Z_α ——标准正态分布表中随保证率而变的系数，高速公路取 1.645。

本项目纵向开裂路段抗压平均强度 7.1 MPa，按照式(2)计算得强度代表值为 5.83 MPa，强度代表值大于强度标准值，因此强度满足要求。

Table 4. Heavy compaction test and 7 d unconfined compressive strength

表 4. 重型击实试验与 7 d 无侧限抗压强度

最佳含水率(%)	最大干密度(g/cm ³)	无侧限抗压强度平均值(MPa)	变异系数(%)	R_d (MPa)
5.4	2.474	7.1	11.27	5.83

3. 底基层施工期间不同轴载下弯沉有限元分析结果

本文通过 Abaqus 有限元软件分析了超载 50%、100%、150%和 200%的情况下，20cm 水泥稳定碎石层的上部及下部弯沉值，结果如图 4 所示。

力学响应分析时，假设其各层为均匀连续且各向同性的线弹性体，层间为不发生滑移的完全连续状态，不考虑温度对模型的影响，仅考虑荷载作用，路基、4%水泥稳定碎石底基层和级配碎石改善层的三维模型尺寸为 4 m × 4 m × 3.38 m，采用八节点三维块体单元[13]-[16]，模型的网格划分为 C3D8R 网格积分单元。有限元分析时结构层材料参数参照本项目设计计算取值，见表 5。

Table 5. Structural layer material parameters during finite element analysis

表 5. 有限元分析时结构层材料参数

层位与材料	1-水泥稳定碎石	2-级配碎石	3-新建路基
厚度(mm)	200	200	-
弹性模量(MPa)	1800	500	50
泊松比	0.25	0.35	0.35

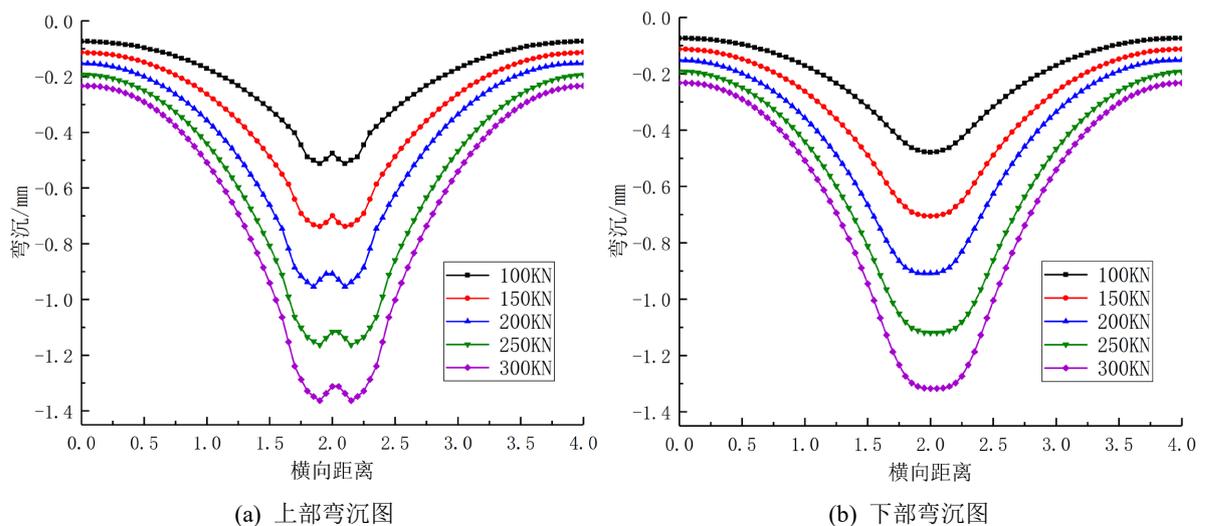


Figure 4. Calculation results of deflection values

图 4. 弯沉值计算结果

由图4可知, 对应于超载 50%、100%、150%和 200%, 上部、下部轮迹中心位置弯沉对应的增长率分别为 43.9%、85.9%、126.7%、165.7%和 47.2%、89.6%、133.6%和 174.9%。模拟结果表明超载情况下, 弯沉值都超过了标准轴载时底基层顶面交工验收弯沉值 $LS = 58.7 (0.01 \text{ mm})$, 因此, 施工期间超载将引起结构较大的变形, 会增大基层开裂风险, 过度超载可能是引起施工期间纵向开裂的一个因素。

4. 纵向开裂底基层路段路基稳定性调查

4.1. 纵向开裂路段路基排水调查

纵向开裂常常出现在软土地基或者挖填结合路段[17], 本项目开裂路段为山坡半填半挖路基, 按照设计要求横坡施工时设置了台阶, 但施工时正值雨季, 通过开挖试坑(图5), 发现路床含水量偏高, 开挖试坑后, 明显积水, 填筑部分的路基土处于过湿状态, 强度较低, 不能满足在重载交通作用下支撑作用。填筑部分的路基土处于过湿状态, 与半填半挖在挖方坡脚处路基纵向盲沟可能设置不好, 没有有效截断挖方边坡渗水有一定关系。



Figure 5. Test pit excavated at longitudinal crack location
图 5. 纵向开裂位置开挖的试坑



Figure 6. Initial crack
图 6. 初期裂纹



Figure 7. Widened crack
图 7. 增宽后的裂纹

4.2. 纵向开裂路段路基路基不均匀沉降

主要是半填半挖填方路段路基，产生不均匀沉降，甚至在行车荷载充分作用下引起滑动，使路面基层板沿纵向产生应力集中，引起纵向裂缝。这种情况可能与半填半挖路基位置出现横坡，横坡处开挖台阶没有做好或者填筑部分压实不够。观测表明产生不均匀沉降出现的纵向开裂随着施工车辆的累积作用有增大的趋势，开放施工车辆初期出现的纵向裂纹见图 6 (2~4 mm 左右)，随着施工车辆反复作用纵向裂纹增宽至 5~7 mm (见图 7)。

现场调查表明本项目纵向裂缝与施工期间重型车辆荷载重复作用、路基浸水、失去地基支承有直接的关系。

5. 纵向裂缝的防治技术措施

5.1. 预防底基层纵向裂缝的技术措施

- 1) 满足强度的前提下，尽量减少单位水泥用量，选用发热和收缩性小的普通硅酸盐水泥，严格限制游离氧化钙的含量，使之小于 1%。控制进罐水泥温度不超过 50℃。
- 2) 选用质地坚硬、级配良好、清洁含泥小的集料，分级堆放。
- 3) 选用干净的中粗砂，堆放在有避荫措施的场地。0.5~1.5 mm 的骨料也应有防雨措施。
- 4) 严格控制含水量，控制在最佳含水率范围内。
- 5) 水泥稳定基层拌和楼应有精确的计量系统和自动反馈补偿系统，确保混合料的均匀性。高温季节施工，注意防止失水过快。
- 6) 级配设计中要兼顾工作性和抗裂性，克服级配设计中重施工性能(易于压实、平整，表面性能好)，轻抗裂的设计思想。
- 7) 摊铺前的下承层应充分湿润，不得一边洒水一边卸料，要在保证摊铺机匀速的前提下，指挥好卸料车辆。

8) 若施工时气温超过 30℃, 风力达 3~4 级时, 压实成型后要及时养护, 加盖塑料薄膜养生。

5.2. 开裂路段纵向裂缝的处治方案比较与选择

5.2.1. 开裂路段纵向裂缝的处治方案比较

本文确定处治前, 考虑了两种处治方案: 方案一为“路基病害根治 + 底基层增强 + 沥青混凝土基层(含玻纤格栅)组合方案”, 该方案底基层采用加厚型(原厚度基础上增加 810 cm)水泥稳定级配碎石(水泥剂量提高 1.5%), 基层选用沥青稳定碎石(ATB25)并在底基层与基层间铺设玻纤格栅(克重 $\geq 80 \text{ g/m}^2$, 抗拉强度 $\geq 50 \text{ kN/m}$); 方案二为“底基层表面加设直径: $\Phi 10 \text{ mm}$ 双向布置 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的钢筋网片, 基层采用水泥混凝土板的加固方案”, 两方案在加固底基层与基层前都对开裂区域下路基进行注浆处治(消除路基不均匀沉降根源)。两种方案比较如下:

1) 技术可行性: 方案一底基层增加水泥剂量, 加固采用玻纤格栅铺设, 基层采用沥青稳定碎石摊铺, 方案二底基层加固采用钢筋网片, 基层采用水泥混凝土板均为道路工程成熟工艺, 适配路基变形类引起的开裂病害处治, 但, 方案一增加水泥剂量在本项目施工季节气温高, 有引发温度与收缩开裂风险。

2) 预期效果: 方案一采用柔性基层 + 玻纤格栅的组合, 能有效分散应力、延缓反射裂缝发展, 适应路基轻微变形。方案二采用刚性水泥混凝土基层承载能力强, 更适应重载交通引起的路基较大变形。

3) 施工难度: 两种方案由于本项目为沥青路面及项目部拥有水泥混凝土施工设备, 因此, 都不需要专用设备。但方案一整体施工周期更短, 养护期(沥青基层无需长时间养护)比水泥混凝土基层缩短 50% 以上。

4) 工程造价: 从材料与机械成本比较, 方案一由于沥青稳定碎石比水泥混凝土材料单价稍高, 底基层材料成本差别不大, 玻纤格栅比钢筋网片稍低, 综合来看, 两种方案工程造价基本持平。

5) 长期耐久性: 路基病害根治后, 减少了基层开裂的根本诱因, 但重载交通对开裂的影响需要进一步观测。

方案总结: 两种方案均以“根治路基病害 + 变形控制”为核心, 技术成熟、预期效果都可以处治本项目底基层纵向开裂, 但结合当时施工气温高和本项目重载交通特征, 项目处治时采用了方案二。

5.2.2. 本项目开裂路段纵向裂缝的处治

针对已经出现的纵向裂纹, 应从原材料、级配、配合比、施工及路基稳定性等多方面进行调查分析, 结合工程实际情况采取合理措施[18]-[20]。本项目实施中, 首先进行了级配优化, 增大了粗料的含量; 此外, 在路基方面, 于挖方一侧设置了坡脚纵向盲沟, 防止边坡内部水渗透, 同时, 加强和完善良好的路面表面排水系统。

由于本开裂路段是挖填结合部, 但填筑高度不大(4 米左右), 因此, 路基除了加强防排水, 没有进行特别处理。为了防止沉降不均匀进一步发展, 本项目方案二决定在底基层表面加设钢筋网片, 基层采用水泥混凝土板, 本路段基层按照项目短路基方案进行设计(桥、隧之间长度小于 80 米路段为短路基), 短路基路面总厚度 85 cm, 路面结构为: 4 cm AC-13 + 6 cm AC-20C + 1 cm SBS 改性沥青同步碎石封层 + 24 cm 水泥混凝土板($f_r = 5.0 \text{ MPa}$) + 30 cm C20 贫混凝土基层 + 20 cm 级配碎石改善层(位于路床范围), 在短路基路面结构基础上稍微改进了一点, 改为路面总厚度 95 cm, 路面结构为 4 cm AC-13 + 6 cm AC-20C + 1cmSBS 改性沥青同步碎石封层 + 24 cm 水泥混凝土板($f_r = 5.0 \text{ MPa}$) + 20 cm C20 贫混凝土基层 + 钢筋网片 + 20 cm 4%水泥稳定碎石底基层 + 20 cm 级配碎石改善层(位于路床范围), 原路面总厚度不变。原路面总厚度 95 cm, 路面结构为: 4 cm AC-13 + 6cm AC-20C + 8cm AC-25C + 1 cm SBS 改性沥青同步碎石封层 + 36 cm 5%水泥稳定碎石基层 + 20 cm 4%水泥稳定碎石底基层 + 20 cm 级配碎石垫层。浇筑基层混凝土板前先对底基层裂纹进行密封防水处理, 防止结构的层间水下渗, 避免土基长期处于潮湿状

态, 承载能力降低, 引发结构性病害。



Figure 8. Reinforcement steel mesh laid on base course surface
图 8. 基层表面铺设加强钢筋网

加固钢筋网(见图 8)规格要求:

钢筋类型: HRB400 (带肋钢筋), 直径: $\Phi 10$ mm。

网格尺寸, 网格间距: $100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ (双向布置)。

钢筋网布置尺寸要求:

1) 覆盖范围

钢筋网应覆盖裂缝区域并向两侧延伸至少 $300\sim 500\text{ mm}$ (超出裂缝端部), 以确保应力有效传递。若为连续开裂(如路面纵向裂缝), 需全长铺设。

2) 保护层厚度

顶面保护层: 钢筋网至加固层表面的距离宜为 $20\sim 30\text{ mm}$ (需满足耐久性和防锈要求)。

底面保护层: 若在原水泥稳定底基层表面铺设, 需通过垫块或锚筋固定, 确保钢筋网与原结构间有 $\geq 15\text{ mm}$ 空隙(便于灌浆粘结)。

3) 搭接长度

钢筋网片间的搭接长度应满足规范要求: 绑扎搭接: ≥ 30 倍钢筋直径。焊接搭接: 单面焊 $\geq 10d$, 双面焊 $\geq 5d$ (d 为钢筋直径)。

6. 建议及结论

路面底基层出现纵向断裂现象, 原因很复杂, 某些裂缝的机理还需进一步探讨。引起水泥稳定碎石基层纵向开裂的具体原因应结合工程项目实际情况, 从原材料、配合比、设计、施工、养护、施工超载作用等方面开展综合调查研究, 处理方案也会因工程差异而变化。经过分析本项目底基层纵向开裂主要原因如下:

1) 开裂路段底基层强度、厚度满足设计要求, 引起本项目纵向裂缝与施工期间重型车辆荷载重复作用、路基浸水、失去地基支承是导致开裂的关键影响因素。应适当增大矿料中粗料用量, 减少 0.075 mm 以下矿料用量, 优化矿料合成级配。

2) 有限元模拟结果表明超载情况下, 底基层弯沉值都超过了标准轴载时弯沉。施工期间超载将引起结构较大的变形, 会增大基层开裂风险, 过度超载也是引起施工期间纵向开裂的一个因素。

3) 路基排水不畅与不均匀沉降。

针对水泥稳定级配碎石底基层纵向开裂路段采取了在底基层表面加设直径： $\Phi 10$ mm 双向布置 100 mm \times 100 mm 的钢筋网片，基层采用水泥混凝土板的加固方案。

4) 建议项目运营中针对该处治路段进行长期变形与裂纹监测，必要时及时采取封水、灌浆等处治。

本文分析时未进行探坑中观察到的路基过湿状态含水率检测，由此引起的路基饱和状态下模量的变化对有限元模型的影响在后续研究中有待考虑。目前项目处于通车初期，效果尚可，纵向开裂路段采取单层或者双层钢筋网的加固方案其长期效果还有待进一步观测。有关纵向开裂所进行的分析和预防开裂措施、加固方案也只是一些初步探索，但相关方法和过程可供同类工程参考。

基金项目

湖南省科技厅重点研发项目《冷拌冷铺耐久性高性能沥青混凝土面层技术》，编号：2023SK2063；湖南省交通运输厅科技项目《绿色低碳冷拌冷铺沥青混合料面层技术研究》，编号：202249。

参考文献

- [1] 姚佳良, 易旺, 张谭龙, 姚丁. 改性废塑料纤维水泥稳定碎石性能与应用研究[J]. 交通科学与工程, 2023, 39(6): 57-65.
- [2] 徐永丽, 郭阳, 孙志棋. 不同基层类型对沥青面层低温收缩性能影响的研究[J]. 中外公路, 2023, 43(4): 75-79.
- [3] 张军, 刘伟. 路面裂缝养护不及时的社会成本评估模型[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(2): 183-192.
- [4] 朱俊清, 尹逸群, 马涛, 童峥, 黄斯琦. 半刚性基层沥青路面横向裂缝成因诊断综述[J]. 交通运输工程学报, 2025, 25(3): 12-32.
- [5] 郑大为, 刘畅, 李翱翔. 水泥稳定碎石收缩性能试验研究[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2017, 36(3): 292-296.
- [6] 刘国承, 邵玉山, 陈李峰, 孙雪伟. 半刚性基层裂缝发展机理分析与温缩性能研究[J]. 现代交通技术, 2014, 11(1): 7-10.
- [7] 张军, 王磊, 李强. 重载交通下沥青路面纵向裂缝形成机理及防治措施[J]. 中国公路学报, 2020, 33(5): 1-10.
- [8] 申爱琴, 蒋庆华. 沥青混合料低温抗裂性能评价及影响因素[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2004, 24(5): 1-6.
- [9] 陈立辉, 邱世鹏, 等. 新旧沥青路面搭接区力学响应及拼宽方式研究[J]. 路基工程, 2024(6): 120-125.
- [10] 胡霞光, 王秉刚. 青藏公路路基路面管理系统研究[J]. 重庆交通学院学报, 2002, 21(2): 33-37, 53.
- [11] 韦兰香, 梁玉娟. 高等级公路超高弯道潜在危险的力学分析[J]. 科学通报, 2016, 32(6): 201-204.
- [12] 马磊, 汪双杰. 高填方路基差异沉降对半刚性基层裂缝的影响[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(S2): 198-202.
- [13] AASHTO (2020) Guide for Design of Pavement Structures. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- [14] 周浩, 沙爱民, 胡力群. 半刚性基层材料疲劳试验[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2012, 32(3): 6-10.
- [15] 刘广军. 沥青路面面层剪应力的粘弹性有限元分析[J]. 公路交通科技, 2009, 26(6): 32-34.
- [16] 郝士华, 王艳璐. 基于 Abaqus 生死单元功能的地应力平衡在隧道开挖中的应用[J]. 公路, 2023, 68(1): 432-436.
- [17] 杨广庆, 刘田明. 软土地基处理不当引发路面纵向裂缝的案例分析[J]. 公路交通科技, 2018, 35(6): 30-36.
- [18] Li, P.F., Liu, J.H., Huang, H.P. and Du, H. (2014) Application of Pre-Cracking in Semi-Rigid Base to Mitigate Reflective Cracking. *Advanced Materials Research*, **1030**, 709-713. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.1030-1032.709>
- [19] 姚佳良, 袁剑波, 张起森, 吴羨, 晁德志. 蜡制养护剂隔离机理与效果研究[J]. 中国公路学报, 2009, 22(6): 47-52.
- [20] Yao, J. and Weng, Q. (2012) Causes of Longitudinal Cracks on Newly Rehabilitated Jointed Concrete Pavements. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, **26**, 84-94. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cf.1943-5509.0000212](https://doi.org/10.1061/(asce)cf.1943-5509.0000212)