

繁重交通高速公路半刚性基层注浆补强处治效果

——以华南快速干线半刚性基层延寿项目为例

刘延河¹, 张敏¹, 张瑜玲²

(1. 广州隧华智慧交通科技有限公司, 广州 510000; 2. 广州肖宁道路工程技术研究事务所有限公司, 广州 510641)

摘要: 随着基础设施的不断完善,繁重交通高速公路半刚性基层路面结构内部病害问题日益突出,特别是半刚性基层的维护与补强,是当前亟须解决的难题之一。依托华南快速干线项目开展半刚性基层注浆补强处治效果研究,采用5种不同的注浆材料对路面结构内部进行注浆处治,结合三维探地雷达与落锤式弯沉仪评估注浆前后路面结构内部病害与承载能力的变化。同时,构建注浆处治路面结构内部评价体系,从裂缝降低系数CRC、承载能力提升系数CIC与修补均匀系数RUC指标,分析哪种注浆材料注浆补强效果最佳。经评估,5种注浆材料对路面结构内部处治补强效果为:高强度地聚物(含隔水剂)>高强度地聚物(无隔水剂)>低强度地聚物(含隔水剂)>高聚物>低强度地聚物(无隔水剂)。

关键词: 半刚性基层; 注浆处治; 无损检测; 评价体系

中图分类号: U416.224 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2025)04-0335-08

截至2023年底,全国公路里程已超过543.68万km,其中高速公路里程已达18.36万km。随着基础设施的不断完善,我国公路行业从以建设为重慢慢转向建管养并重,大规模的公路正面临维修与养护的压力。由于半刚性基层路面具有承载能力好、造价低等优点,是我国的主要路面结构之一,然而其随着服役时间的增加,在荷载、温度与湿度的重复作用下,半刚性基层易产生疲劳开裂与收缩开裂,从而导致路面出现松散、反射性裂缝甚至脱空等病害^[1-3]。目前国内外对半刚性基层沥青路面内部病害的检测评价技术缺乏、处治效果与延寿效果不明^[4]。

目前,国内外主要采用罩面处治、注浆加固与开挖修补等技术对半刚性基层沥青路面内部损害进行处治,其中注浆处治技术具有造价低、处治效果好、阻塞交通时间等优点,在处治半刚性基层脱空、反射性裂缝等病害方面得到大范围的应用^[5-6]。然而注浆处治效果受注浆设备、现场施工工艺与注浆材料等因素影响,其中,注浆材料是注浆处治技术的关键部分,并直接影响注浆处治的效

果^[7]。现阶段注浆材料主要可划分为化学注浆、水玻璃注浆以及聚合物注浆等类型,在国内则以聚合物类材料为主^[8-9]。然而注浆材料的选择缺乏科学的指导方法,只能参考现有经验或前人的研究成果,具有较大的盲目性,难以保证处治后的效果^[10]。

评估路面结构内部注浆处治效果时,现有研究中采用的检测手段与评价方法存在多样性^[11]。有些研究使用三维探地雷达和钻芯取样分析路面结构内部病害的变化情况,也有些采用落锤式弯沉试验与钻芯取样分析路面承载能力的变化,这些方法的差异使得不同研究中对注浆材料的处治效果未能直接对比^[12-13]。

因此,为了改善半刚性基层沥青路面服役寿命,针对半刚性基层路面内部病害与承载能力不足等问题,本文采用不同注浆材料对半刚性基层沥青路面内部病害进行注浆补强,结合三维探地雷达与落锤式弯沉仪对路面结构内部的病害与承载能力综合分析,并根据检测的结果,构建注浆处治路面结构内部评价体系,从而选出对半刚性基层注浆补强效果最佳的注浆材料。

收稿日期: 2024-08-12

基金项目: 国家自然科学基金(52178426);广州华南快速路三期繁重交通高速公路半刚性基层结构服役性能演变及延寿关键技术研究项目((2023)BH105)

作者简介: 刘延河(1982—),男,河南洛阳人,工程师,研究方向为路桥养护;张敏(1995—),女,江西赣州人,硕士,工程师,研究方向为道路养护;通信作者张瑜玲(1998—),女,广东化州人,硕士,工程师,研究方向为道路材料与养护。

1 工程概况

依托广州市内的“华南快速干线”项目,华南快速干线(简称华快)处于珠江三角洲大动脉通道,呈东西向贯穿白云区,是广州市东部公路干线的重要组成部分并于 2009 年正式通车。该干线重车比例高,交通量大,交通状况紧张,沿线途径经济发达地区,施工期间保通要求高,施工安全与交通组织压力大,要求减少路面维修养护频率,提高通车效率。

至 2024 年华南快速干线通车 15 年后,出现层间松散、滑移、脱空与裂缝等病害。而针对半刚性基层的破坏,传统的维修养护技术需对路面开挖,不仅对路面造成极大的破坏并产生大量的废弃材料、维修时间长、交通组织压力大等问题,该处置方法难以在华快项目实现投入产出高效化。注浆处治技术作为一种微创修复技术,具有非开挖、安全、快速与维护成本低等优点,其修复技术正满足华快项目的需求,尽可能减少对交通组织的干扰,并对路面进行快速有效地补强,这对提高半刚性基层沥青路面耐久性具有重要意义。

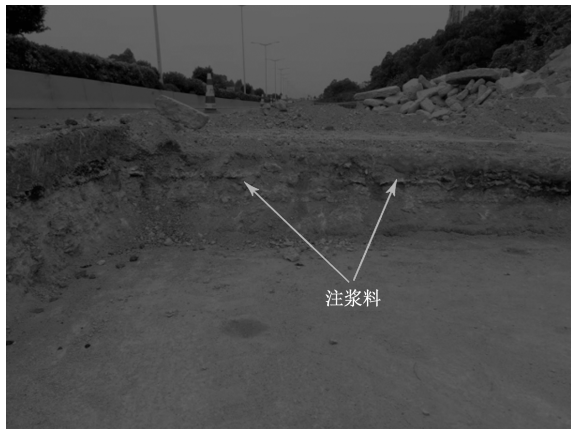


图 1 注浆处治施工后开挖效果示意图



图 2 注浆处治施工后回访路面情况

2 注浆材料与检测

2.1 注浆材料

2.1.1 高聚物

高聚物注浆处治技术主要通过向道路结构内部注入多组分高聚物材料,注浆材料注入后迅速发生化学反应,体积膨胀并形成泡沫状固体,填充路面结构内部的空隙,挤密周围松散的基层,从而增强路面结构的整体性,达到补强的效果。同时,由于高聚物材料的高弹性和粘附性、适应性强等特点,可以处治不规则形状与尺寸的病害区域。

2.1.2 地聚物

地聚物具有压密注浆流动度大、渗透性好等特点,可以渗透到被加固土体及道路基层或具有一定活性矿物材料(砂、石)界面内,与界面内的矿物活性进行物理化学反应,生成一种新的无机有机胶凝体,填充基层结构内部的空隙并与周围牢牢连成一体。采用地聚物作为注浆材料,可实现高效、全天候、无障碍与迅速开放交通的目的,并能有效地加固路面,快速施工。考虑到基层损坏的机理与发育形式,使用四种常用的地聚物注浆材料(低强度地聚物(无隔水剂)、低强度地聚物(含隔水剂)、高强度地聚物(无隔水剂)与高强度地聚物(含隔水剂)),对半刚性基层路面注浆处治效果进行评价分析。

2.2 检测

2.2.1 三维探地雷达

三维探地雷达设备是一种高级的无损检测设备,主要由集成化高性能主机、步频率多通道天线阵和高精度定位协同通讯平台^[11-14]。三维探地雷达现场检测与路面各层病害检测结果如图 3 所示,通过三维探地雷达对注浆前后路面进行检测,分析 5 种注浆材料在注浆前后路面结构内部裂缝、脱空等病害的变化情况(图 4),对比 5 种注浆材料对路面注浆补强的效果,以及在行车荷载重复作用与高温多雨环境下的服役情况。

2.2.2 落锤式弯沉仪

落锤式弯沉仪设备是以 50 kN 标准荷载作用于半径为 150 mm 的承载板,测量在该荷载作用下的沥青路面完成曲线,获取路面弯沉。采用三维探地雷达对五种注浆材料注浆处治前后的路面弯沉检测,评估路面承载能力在不同注浆材料下的变化,落锤式弯沉仪现场检测如图 5 所示^[15]。

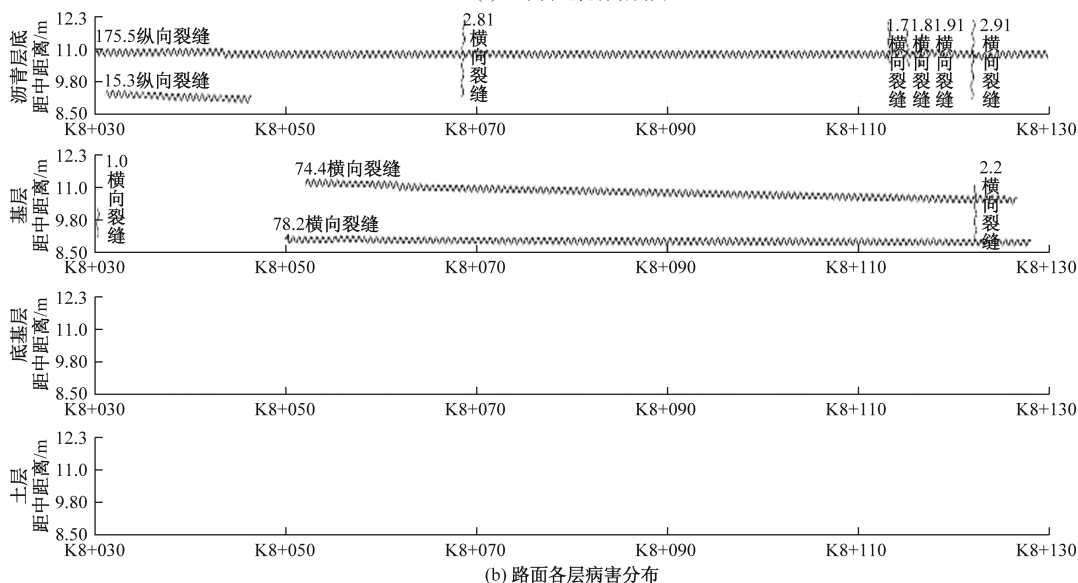
3 注浆前后路面检测数据分析

3.1 注浆前后路面内部状况分析

通过三维探地雷达对华快项目左幅第三车道 K8+30-K8+390 与右幅第四车道 K8+50-K8+



(a) 三维雷达现场勘测图



(b) 路面各层病害分布

图 3 三维探地雷达现场检测图片与路面各层病害分布

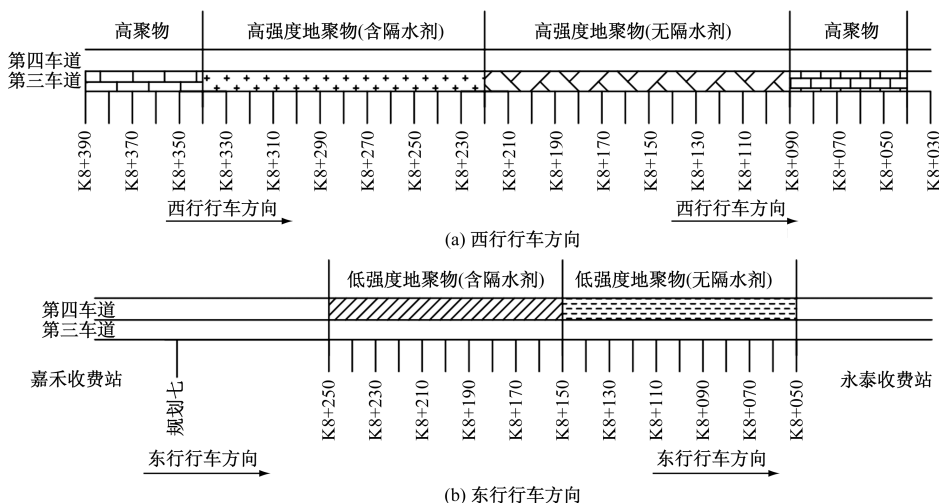


图 4 华快五种注浆材料注浆处治示意图

250 范围内的路面内部在注浆前后的各处置区段的面积与裂缝总长度进行测定,通过式(1)计算分别得到各区段的裂缝率与注浆处治前后的裂缝率变化情况,计算结果归纳如表 1 所示。

$$\gamma = \frac{l_c}{Area} \times 100\% \quad (1)$$

式中： γ 为裂缝率，%； l_c 为段落内面层、基层裂缝长度，m；Area 为段落面积， m^2 。



(a) 落锤弯沉仪检测侧面图

(b) 落锤弯沉仪检测低视图

图 5 落锤式弯沉仪现场检测

表 1 华快注浆处治前后结构内部裂缝率汇总

结构	区段	注浆技术	面积/ m ²	注浆前		注浆后		裂缝率 变化/%
				裂缝总 长度/m	裂缝率/ %	裂缝总 长度/m	裂缝率/ %	
沥青层底	左幅 K8+040—+K8+090 与 K8+340—K8+390	高聚物	380	111.23	29.27	59.02	15.53	-13.74
	左幅 K8+090—K8+220	高强度地聚物 (无隔水剂)	492	199.62	40.41	155.65	31.51	-8.89
	左幅 K8+220—K8+340	高强度地聚物 (含隔水剂)	456	83.41	18.29	69.34	15.21	-3.09
	右幅 K8+050—K8+150	低强度地聚物 (无隔水剂)	380	89.45	23.54	98.71	25.98	2.44
	右幅 K8+150—K8+250	低强度地聚物 (含隔水剂)	380	30.92	8.14	27.41	7.21	-0.92
水稳基层	左幅 K8+040—+K8+090 与 K8+340—K8+390	高聚物	380	206.69	54.39	181.12	47.66	-6.73
	左幅 K8+090—K8+220	高强度地聚物 (无隔水剂)	492	222.89	45.12	164.05	33.21	-11.91
	左幅 K8+220—K8+340	高强度地聚物 (含隔水剂)	456	247.98	54.38	134.15	29.42	-24.96
	右幅 K8+050—K8+150	低强度地聚物 (无隔水剂)	380	88.84	23.38	106.11	27.92	4.54
	右幅 K8+150—K8+250	低强度地聚物 (含隔水剂)	380	82.18	21.63	43.40	11.42	-10.21

各注浆材料处置前后沥青层底裂缝率的变化率如图 6 所示,可见 5 种注浆材料注浆处治后对结构内部沥青层底的裂缝率具有一定的影响,对沥青层底裂缝处治效果为高聚物>高强度地聚物(无隔水剂)>高强度地聚物(含隔水剂)>低强度地聚物(含隔水剂)>低强度地聚物(无隔水剂)。其中,高聚物注浆处治后沥青层底裂缝率变化最大,裂缝率从 29.27%降低到 15.53%,降低了 13.74%,对沥青层底裂缝的处治效果最明显;高强度地聚物(不添加隔水剂)注浆处治后裂缝率从 40.41%降低到 31.51%,降低了 8.89%,该注浆材料处治沥青层底裂缝效果次之;高强度地聚物(含隔水剂)与低强度

地聚物(含隔水剂)注浆出之后,裂缝率分别降低了 3.09%与 0.92%,这两种材料对裂缝率的处治效果一般,未能有效降低沥青层底内部裂缝病害;而低强度地聚物(无隔水剂)注浆出之后,裂缝率增加了 2.44%,该注浆材料未能对沥青层底裂缝率产生影响,并随着服役时间的增加,裂缝出现增长的趋势。

各注浆材料处治前后水稳基层裂缝率的变化率如图 7 所示,结果表明,5 种注浆材料注浆处治之后对水稳基层的裂缝率影响比较明显,对水稳基层的裂缝率处治效果排序为高强度地聚物(含隔水剂)>高强度地聚物(无隔水剂)>低强度地聚物(含隔水剂)>高聚物>低强度地聚物(无隔水剂)。

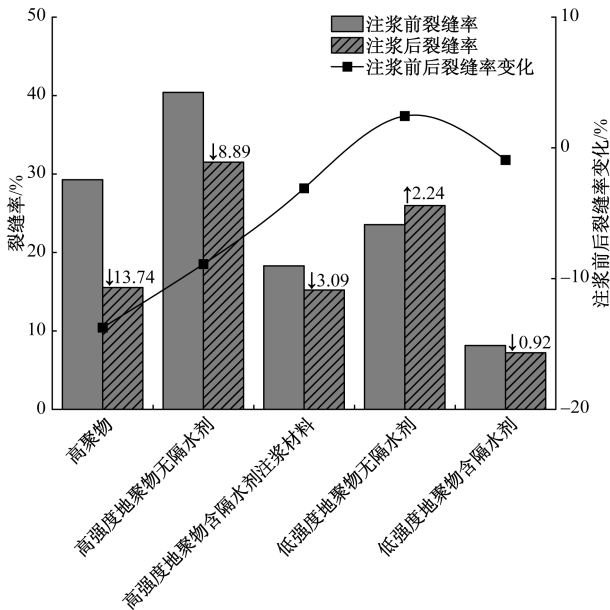


图6 5种注浆材料在注浆前后沥青层底裂缝率变化

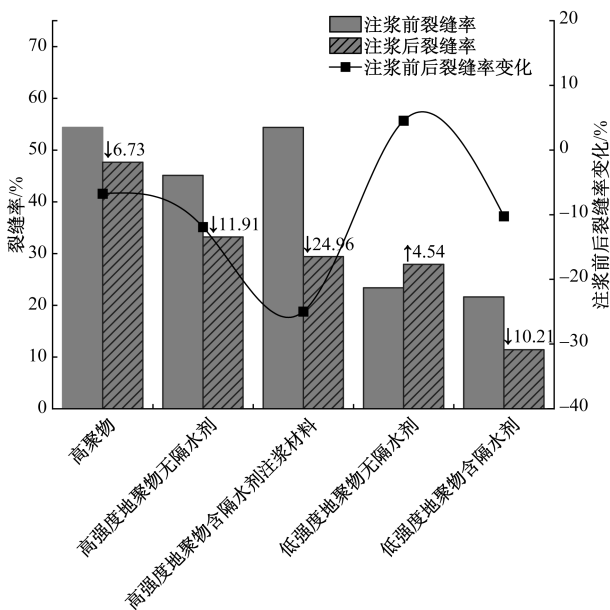


图7 5种注浆材料在注浆前后水稳基层裂缝率变化

其中,高强度地聚物(含隔水剂)注浆处治后,水稳基层裂缝率从54.38%降低到29.42%,裂缝率降低了24.96%,该注浆材料能明显填充裂缝产生的空隙,对水稳基层裂缝处治效果明显;高强度地聚物(无隔水剂)、低强度地聚物(含隔水剂)与高聚物注浆处治效果相近,水稳基层裂缝率分别降低了11.91%、10.21%与6.73%,两种注浆材料只能对部分水稳基层的裂缝进行填充,处治效果次之;低强度地聚物(无隔水剂)注浆处治后,水稳基层裂缝增加了4.54%,未能对裂缝进行有效的处治,并

随着服役时间的增加,裂缝呈增加的趋势。

综上所述,对华快路面进行注浆技术处治后,使用高强度地聚物(含隔水剂)注浆材料能够显著减少水稳基层裂缝率达到24.96%,而高聚物注浆材料对沥青层底减少了13.74%。注浆处治技术主要对路面水稳基层内部的裂缝起填充作用,能有效降低水稳基层的裂缝,从而对路面起到补强的效果。

3.2 注浆前后路面承载力状况分析

由于本项目华南快速干线地处珠三角交通大动脉通道,重车比例高,交通状况紧张,并处于高温多雨的广东地区,要求路面结构应具有足够的承载能力以满足路面行驶的要求。因此,采用落锤式弯沉仪评估5种不同注浆处治材料注浆前后半刚性基层沥青路面结构内部承载能力的变化,5种注浆材料注浆处治前后路面的弯沉试验结果如表2所示。

表2 沥青路面结构弯沉汇总统计

注浆类型	注浆前			注浆后		
	均值/ 0.01 mm	标准 差	变异系 数/%	均值/ 0.01 mm	标准 差	变异系 数/%
高聚物	17.85	2.93	16.45	15.34	2.75	17.97
高强度地聚物 (无隔水剂)	18.39	2.83	15.40	14.18	2.82	19.93
高强度地聚物 (含隔水剂)	18.81	3.21	17.07	14.44	3.56	24.65
低强度地聚物 (无隔水剂)	14.10	2.73	19.36	12.39	2.59	20.92
低强度地聚物 (含隔水剂)	13.31	2.02	15.19	12.51	2.29	18.37

5种材料注浆后路面的弯沉检测结果如图8所示,华快路面的注浆前后的弯沉值均小于25(0.1 mm),整体路面承载能力处于良好的水平。其中高聚物、高强度地聚物(无隔水剂)、高强度地聚物(含隔水剂)3种注浆材料注浆处治路面后,路面的弯沉均呈现降低的趋势,表明这些材料对减少路面结构内部病害,以及补强路面结构起到积极的作用。而注浆低强度地聚物注浆处治后路面弯沉变化不大,对路面结构补强效果不显著。

此外,注浆之后路面的弯沉值变异性增强,这一现象与所选择注浆材料的流动性密切相关。不同的注浆材料在填补路面结构内部半刚性基层空隙时,由于流动性的差异,可能导致注浆材料对路面结构内部未能有效填充病害空隙。例如,在路面注浆处理后,高强度地聚物材料的流动性不及高聚物,导致其在路面注浆处治的弯沉变异系数显著增

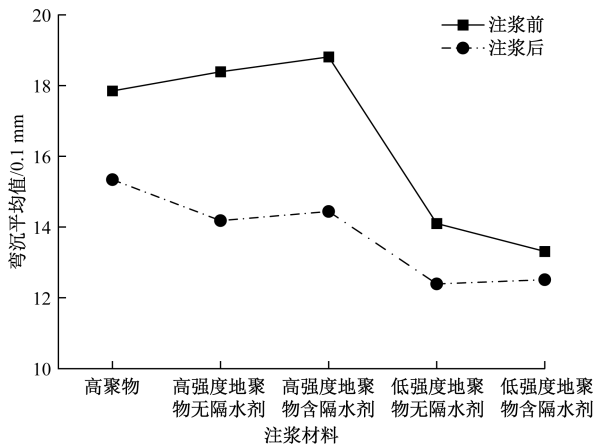


图 8 5 种材料注浆后路面的弯沉测试结果

加,这也进一步证实了材料流动性对注浆效果的重要影响。因此,优化注浆材料的选择与注浆孔位置的决策非常关键。

4 注浆处治评价体系的构建

目前,路面技术状况的评价体系主要针对路面表面及行车舒适方面进行评价,而对于路面结构内部的评价体系研究较少,未能对路面内部处治效果进行全面的评价。基于华南快线路面结构内部注浆处治技术,结合三维探地雷达与落锤式弯沉仪检测结果,构建注浆处治路面结构内部评价体系,使得注浆处治路面结构内部评价体系简单易懂针对性强。参考 JTC 5210—2018《公路技术状况评定标准》,构建的路面结构内部评价体系 (PIES) 如图 9 所示^[16]。

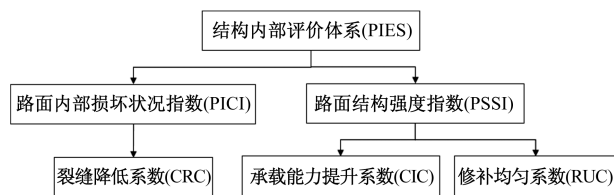


图 9 注浆处治路面结构内部评价体系

其中,裂缝降低系数、承载能力提升系数与修补均匀系数计算公式为

$$CRC = \frac{\Delta CR}{CR_0} \quad (2)$$

式中: CR_0 为注浆前半刚性基层裂缝率,%; ΔCR 为注浆前后半刚性基层裂缝率变化,%。

$$CIC = \frac{\Delta I}{I_0} \quad (3)$$

式中: I_0 为注浆前路面弯沉平均值(0.1 mm), ΔI 为注浆前后路面弯沉平均值变化(0.1 mm)。

$$RUC = \frac{\Delta IV}{IV_0} \quad (4)$$

式中: IV_0 为注浆前路面弯沉值变异系数,%; ΔIV 为注浆前后路面弯沉变异系数变化,%。

注浆处治路面结构内部评定指数 PIES 计算公式为

$$PIES = 0.55CRC + 0.3CIC + 0.15RUC \quad (5)$$

因此,采用注浆处治路面内部评价体系 PIES 对华快项目注浆前后路面内部病害与承载能力进行评估,评估主要依据裂缝降低系数(CRC)、承载能力提升系数(CIC)与修补均匀系数(RUC)指标,分析 5 种不同注浆材料在注浆补强后的效果,通过该评价体系,可以初步判断哪种注浆材料在路面养护中表现更为优越。

如表 3 所示,根据注浆处治结构内部评价体系对华南快速干线项目在注浆前后的处治效果进行分析,从裂缝降低系数、承载能力提升系数与修补均匀系数指标分析,采用高强度地聚物注浆材料相比于高聚物与低强度地聚物,在路面结构内部的处治效果更佳。特别是在含隔水剂的情况下,无论是高强度地聚物还是低强度地聚物,其对半刚性基层的处治表现出更好的效果。

因此,根据注浆处治路面结构内部评定指数 PIES 分析 5 种注浆材料注浆补强效果,初步得出 5 种注浆材料处治效果为:高强度地聚物(含隔水剂) > 高强度地聚物(无隔水剂) > 低强度地聚物(含隔水剂) > 高聚物 > 低强度地聚物(无隔水剂)。

5 结论

为了分析繁重交通路面高速公路半刚性基层注浆补强效果,采用 5 种注浆材料对华快项目半刚性基层路面注浆处治,分析注浆处治前后结构内部病害与承载能力变化情况,主要得出以下结论。

(1) 分析 5 种注浆材料注浆处治检测结果,高强度地聚物(含隔水剂)对水稳基层的裂缝填充效果最佳,注浆处治后水稳基层裂缝率减少了 24.96%,高聚物注浆材料注浆处治后沥青层底减少了 13.74%。注浆处治技术主要对水稳基层内部的裂缝起填充作用,能有效降低水稳基层的裂缝,从而对路面起到补强的效果。

(2) 分析落锤式弯沉仪检测结果,高聚物、高强度地聚物(无隔水剂)与高强度地聚物(含隔水剂)3 种注浆材料注浆处治路面后,路面的弯沉均呈现降低的趋势,表明这些材料对减少路面结构内部病害,以及补强路面结构起到积极的作用。

表3 华快项目注浆处治结构内部评价体系

注浆类型	裂缝率/%		裂缝率 变化/%	裂缝降 低系数	弯沉/0.01 mm		弯沉变化/ 0.01 mm	承载能力 提升系数	修补均 匀系数	PIES
	注浆前	注浆后			注浆前	注浆后				
高聚物	54.39	47.66	-6.73	0.12	17.85	15.34	-2.51	0.14	-0.92	-0.03
高强度地聚物 (无隔水剂)	45.12	33.21	-11.91	0.26	18.39	14.18	-4.21	0.23	-0.77	0.10
高强度地聚物 (含隔水剂)	54.38	29.42	-24.96	0.46	18.81	14.44	-4.37	0.23	-0.69	0.22
低强度地聚物 (无隔水剂)	23.38	27.92	4.54	-0.19	14.10	12.39	-1.71	0.12	-0.93	-0.21
低强度地聚物 (含隔水剂)	21.63	11.42	-10.21	0.47	13.31	12.51	-0.8	0.06	-0.83	0.15

(3)注浆之后路面的弯沉值变异性增强,这一现象与所选择注浆材料的流动性密切相关。不同的注浆材料在填补路面结构内部半刚性基层空隙时,由于流动性的差异,注浆材料对路面结构内部未能有效填充病害空隙。

(4)采用高强度地聚物注浆材料相比于高聚物与低强度地聚物,对路面结构内部半刚性基层的处治效果更佳。特别是在含隔水剂的情况下,无论是高强度地聚物还是低强度地聚物,其对半刚性基层的处治均表现出更好的效果。

(5)从裂缝降低系数 CRC、承载能力提升系数 CIC 与修补均匀系数 RUC 指标分析,5 种注浆材料处治效果为:高强度地聚物(含隔水剂)>高强度地聚物(无隔水剂)>低强度地聚物(含隔水剂)>高聚物>低强度地聚物(无隔水剂)。

参考文献

- [1] 丁蓬勃,陈搏. 骨架密实型水泥稳定碎石基层施工关键技术研究[J]. 科技和产业, 2021, 21(5): 311-317.
- [2] 宋健民,白鹏飞,管晓晴. 半刚性基层沥青路面反射裂缝建模分析[J]. 公路工程, 2017, 42(3): 40-44.
- [3] 房娜仁,胡士清,李琪琪,等. 基于半刚性基层强度控制的反射裂缝防治对策研究[J]. 公路, 2022, 67(9): 51-60.
- [4] 林翔,李强. 高速公路沥青路面半刚性基层结构剩余寿命评价方法研究[J]. 公路交通科技, 2021, 38(4): 1-8.
- [5] 张阳,李小龙. 新型复合水泥——水玻璃注浆材料在沥青路面水稳基层病害处治中的应用及工艺研究[J]. 交通世界, 2023(8): 19-21.
- [6] 杨振海,蔡文龙,许欢,等. 沥青路面半刚性基层裂缝非开挖注浆修补技术应用研究[J]. 湖南交通科技, 2020,

46(2): 29-31.

- [7] JUN H, LUO C, XIONG C, et al. Decision-making system and verification of pavement diseases treatment scheme for highway reconstruction and extension[J]. Applied Mathematics and Nonlinear Sciences, 2021, 6(1): 151-162.
- [8] 祝争艳,周文,刘海婷,等. 半刚性基层裂缝注浆材料性能及其机理研究[J]. 公路工程, 2020, 45(6): 185-189.
- [9] 武书华,张中华. 沥青混凝土路面高分子聚合物注浆技术研究[J]. 公路, 2015, 60(4): 80-84.
- [10] JIAO Z, SHEN A, LÜ Z, et al. Research on a treatment measure for base regeneration by preset cracking and grouting for severe reflective cracks[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2022, 47(4): 4695-4712.
- [11] 吴延凯,卢旭,魏育奇,等. 基于无损检测技术的白加黑路面病害探测与评价[J]. 科技和产业, 2022, 2(8): 329-335.
- [12] ZANG G, SUN L, CHEN Z, et al. A nondestructive evaluation method for semi-rigid base cracking condition of asphalt pavement[J]. Construction and Building Materials, 2018, 162: 892-897.
- [13] ZHU H, XU H, WEI G, et al. Evaluation of grouting effectiveness for semi-rigid pavement base layer cracks based on time-frequency domain signal characteristics of 3D GPR[J]. Measurement, 2024, 237: 115228.
- [14] 潘贵,侯忠非. 三维探地雷达技术在沉陷成因探测及处治效果评价中的应用[J]. 科技和产业, 2024, 24(3): 180-186.
- [15] 李丽慧,张浩亮,司兵洋. 水泥混凝土路面微裂加固技术在市政道路的应用[J]. 公路, 2019, 64(2): 244-247.
- [16] 交通运输部公路科学研究院. 公路技术状况评定标准: JTG 5210—2018[S]. 北京: 交通运输部公路科学研究院, 2018.

Treatment Effect of Semi-rigid Base Grouting Reinforcement in Heavy Traffic Highways: Taking the Semi-rigid Base Extension Project of the South China Expressway as an Example

LIU Yanhe¹, ZHANG Min¹, ZHANG Yuling²

(1. Guangzhou Tunhua Intelligent Transportation Technology Co. Ltd., Guangzhou 510000, China;

2. Xiaoning Institute of Roadway Engineering, Guangzhou, 510641, China)

Abstract: With the continuous improvement of infrastructure, the issue of internal damage in the semi-rigid base layer structure of heavy traffic highways is becoming increasingly prominent. Particularly, the maintenance and reinforcement of semi-rigid base layers represent one of the urgent challenges that need to be addressed. Based on the South China Expressway project, the effectiveness of semi-rigid base layer grouting reinforcement was investigated. Five different grouting materials were used to treat the internal structure of the road surface. Three-dimensional ground penetrating radar and a falling weight reflectometer were combined to assess changes in internal damage and load-bearing capacity before and after grouting. Simultaneously, a evaluation system was constructed to assess the internal structure of the road surface treated with grouting, and analyze which grouting material achieves the best reinforcement effect based on indicators such as crack reduction coefficient(CRC), carrying capacity improvement coefficient(CIC) and repair uniformity coefficient(RUC). After evaluation, the grouting reinforcement effectiveness on the internal structure of the road surface by the five grouting materials is as follows: high-strength polymer(with waterproofing agent)>high-strength polymer(without waterproofing agent)>low-strength polymer(with waterproofing agent)>geopolymer>low-strength polymer(without waterproofing agent).

Keywords: semi-rigid base layer; grouting treatment; non-destructive testing; evaluation system