

半刚性基层裂缝微创注浆耐久性评价

——以江苏省内宁杭等高速为例

凌 聪, 蔡文龙

(江苏中路工程技术研究院有限公司, 南京 211806)

摘要: 在高速公路沥青路面的养护工程中, 常规手段难以彻底解决路面结构内部的隐性病害问题。微创注浆技术因其技术优势, 逐渐被用于这类病害的修复。然而现在研究方向聚焦于注浆材料的研发和施工工艺, 对于注浆技术耐久性评价关注较少。鉴于耐久性直接影响技术的使用效果和寿命延长, 开展耐久性评价显得尤为重要。采用室内试验和实地路面跟踪观测两种方法评估半刚性基层裂缝注浆的效果。结果表明: 养生 28 d、90 d、1 a 的不同龄期无侧限抗压强度恢复率分别为 70.4%、70.0%、68.6%; 养生 7 d、28 d、90 d、1 a 的地推直剪试验剪切强度分别为 0.75、1.25、1.21、0.90 MPa; 养生 28 d 冻融循环 2 次劈裂强度值为 5.2 MPa。表明半刚性基层裂缝微创注浆并经长期使用后, 无侧限抗压强度值、剪切强度值仍保持较好的水平。根据实体工程持续跟踪观测, 芯样完整性高、浆液饱满、强度值未明显衰减。

关键词: 沥青路面; 半刚性基层; 微创注浆; 耐久性; 工后观测

中图分类号: U416.217 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2024)19-0304-05

半刚性基层因其出色的板体性, 良好的荷载扩散能力, 抗拉、抗疲劳及水稳定性, 且造价相对较低, 在全球范围内得到了广泛应用。然而, 半刚性基层材料存在的温缩和干缩特性导致基层容易产生裂缝, 特别是在车辆荷载的作用下, 裂缝的扩展和开裂进程会加速, 最终可能贯穿整个路面面层^[1-3]。传统的路面养护方法, 如灌封、挖补、连续铣刨等, 虽然能处理表面的裂缝, 但对于基层内部的隐性病害却难以有效处理。为了解决这一难题, 裂缝微创注浆技术应运而生。裂缝微创注浆技术采用高渗透、高强度、耐水型、早强型的化学扩张凝胶注浆材料, 结合专业化的施工装备和标准化的施工工艺, 通过压力注浆的方式对路面基层的松散、裂缝部位进行黏结修复。这种技术不仅能提升路面结构的板体性, 还能有效修复路面的隐性病害, 从而延长路面的使用寿命。相比传统养护方法, 裂缝微创注浆技术具有操作简便、效果显著、修复成本低等优点。它能够深入基层内部, 对裂缝进行彻底修复, 防止裂缝的进一步扩展和开裂。同时, 该技术所使用的注浆材料具有良好的耐久性和稳定性, 能够在不同的环境条件下保持长期的修复效果。

因此, 裂缝微创注浆技术在半刚性基层路面的养护中具有重要的应用价值, 能够有效解决基层裂缝等隐性病害问题, 提高路面的使用性能和安全性^[4-7]。

目前国内外学者针对微创注浆技术聚焦于注浆材料研发和施工工艺优化方向。例如, 孙海龙^[8]提出采用地聚物注浆材料在沥青路面基层裂缝进行处治; 周庆秀等^[9]认为双组分聚氨酯注浆材料能够有效修补半刚性基层裂缝; 曹春生^[10]研究了高聚物注浆施工工艺, 通过对比分析试验路段注浆前后弯沉值, 得到高聚物注浆施工可有效提高基层稳定性和路面结构强度的结论。潘贵和侯忠非^[11]认为对沥青路面内部隐性病害修复前进行探地雷达检测可提高修复精度。李强等^[12]从路基注浆试验和仿真角度评价了注浆效果。

对于半刚性基层裂缝微创注浆的耐久性试验及使用寿命评估方面的研究, 无论是国内还是国外, 所做的研究工作都非常少。随着注浆工程的飞速发展, 迫切需要工程技术人员开展这方面的研究工作。

1 耐久性评价准备

为评价修补完成后的水稳试件强度恢复情况,

收稿日期: 2024-05-13

作者简介: 凌聪(1995—), 男, 安徽芜湖人, 硕士, 初级工程师, 研究方向为道路工程; 通信作者蔡文龙(1988—), 男, 江苏南通人, 工程师, 研究方向为道路工程。

分别对完好试件和不同修补时间的试件进行无侧限抗压强度试验及地推直剪试验,以评价裂缝注浆耐久性。

1.1 成型试件

成型试件的流程包括 6 个部分:①成型裂缝试件。采用预制模具法预制裂缝,成型室内试验所需试件。②密封试件。利用 AB 胶(两液混合硬化胶)沿裂缝对试件的底面及两个侧面进行密封,然后使用防水胶布进一步对试件底面及侧面进行固定。③钻孔。利用手持式电钻在试件顶面中心位置进行钻孔。④清孔。利用空压机对注浆孔进行清理,将钻孔时产生的灰尘与石屑清空,保证浆液与试件断面的有效接触。⑤预埋注浆针头。清孔完毕后,将注浆针头插入注浆孔内,并用 AB 胶将注浆针头进行固定与密封。⑥注浆。待注浆针头固定后,连接注浆针头与手持式注浆枪,利用手持式注浆枪进行裂缝注浆。

1.2 试件养生

为评价复合水稳试件的耐久性,将试件置于室外露天放置 7 d、28 d、90 d、1 a 养生时间后备用。

2 评价途径

采用基层无侧限抗压强度试验和地推直剪试验评价半刚性基层裂缝微创注浆耐久性。无侧限抗压强度试验按《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E51—2009)中 T 0805 的要求进行。复合件直剪试验如图 1 所示。

3 试验结果

3.1 不同龄期无侧限抗压强度试验

3.1.1 28 d 无侧限抗压强度试验

完好水稳试件及修补后复合水稳试件的 28 d 无侧限抗压强度恢复情况如图 2 所示。

由图 2 可知,完好水稳试件 28 d 水稳试件强度约为 12.5 MPa,修补后复合水稳试件的 28 d 无侧限抗压强度约为 8.8 MPa,强度恢复率约为 70.4%。

3.1.2 90 d 无侧限抗压强度试验

完好水稳试件及修补后复合水稳试件的 90 d 无侧限抗压强度恢复情况如图 3 所示。

由图 3 可知,完好水稳试件 90 d 水稳试件强度约为 12.6 MPa,修补后复合水稳试件的 28 d 无侧限抗压强度约为 8.7 MPa,强度恢复率约为 70.0%。

3.1.3 1 年无侧限抗压强度试验

完好水稳试件及修补后复合水稳试件的 1 a 无侧限抗压强度恢复情况如图 4 所示。



(a) 试件制作



(b) 剪切过程



(c) 面层试件破坏



(d) 水稳试件破坏

图 1 复合件剪切试验

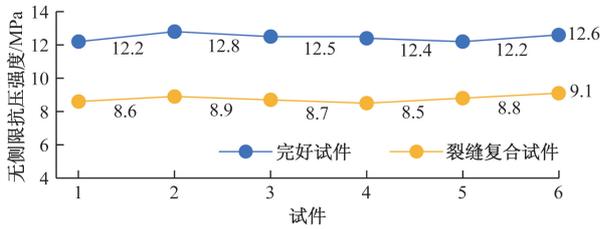


图 2 28 d 无侧限抗压强度恢复情况

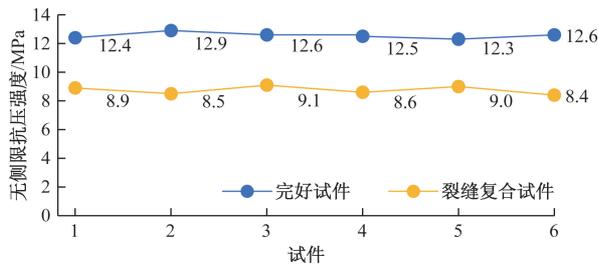


图 3 90 d 无侧限抗压强度恢复情况

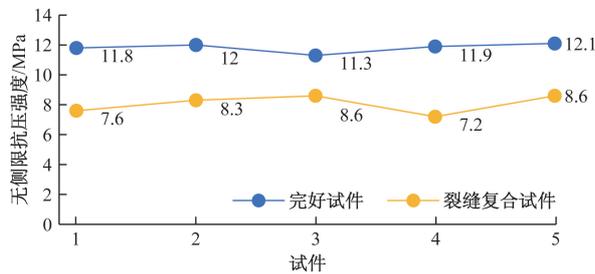


图 4 1 a 无侧限抗压强度恢复情况

由图 4 可知,完好水稳试件 1 a 水稳试件强度约为 11.8 MPa,修补后复合水稳试件的 1 a 无侧限抗压强度约为 8.1 MPa,强度恢复率约为 68.6%。

3.2 不同龄期地推直剪试验

分别对不同养生时间的复合水稳试件进行地推直剪试验,试验结果如表 1、图 5 所示。

养生时间为 7 d 时,由于水稳试件处于强度形成初期,自身强度较低,导致复合试件的整体强度较差,剪切强度仅为 0.75 MPa,试件破坏位置基本在非黏结面;养生时间为 28 d 时,试件强度较大,复合试件剪切强度基本保持在 1.25 MPa 左右,试验结果较为稳定,破坏位置均在黏结面;养生时间为 90 d 时,水稳试件自身强度趋于稳定,复合试件剪切强度基本为 1.21 MPa 左右;养生时间为 1 a 时,水稳试件自身强度发生稍微下降,复合试件剪切强度基本为 0.90 MPa 左右,试验结果稳定,破坏位置均在黏结面。

表 1 不同养生时间的复合水稳试件地推直剪试验结果

养生时间	试件	变形峰值/ (mm)	力值峰值/ N	破坏面	剪切强度/ MPa
7 d	水稳基层 1	4.58	19.1	黏结面	0.84
	水稳基层 2	9.31	15.3	非黏结面	0.70
	水稳基层 3	5.75	15.4	非黏结面	0.70
	水稳基层 4	5.33	16.8	非黏结面	0.74
	水稳基层 5	7.54	16.6	非黏结面	0.76
	水稳基层 6	6.21	18.0	黏结面	0.82
	水稳基层 7	5.89	15.1	非黏结面	0.69
	均值				
28 d	水稳基层 1	6.07	27.6	黏结面	1.21
	水稳基层 2	8.35	28.3	黏结面	1.29
	水稳基层 3	8.52	27.1	黏结面	1.24
	水稳基层 4	5.42	28.1	黏结面	1.27
	水稳基层 5	6.89	26.1	黏结面	1.23
	水稳基层 6	7.44	26.2	黏结面	1.22
	水稳基层 7	5.63	26.7	黏结面	1.28
	均值				
90 d	水稳基层 1	13.50	25.2	黏结面	1.24
	水稳基层 2	10.31	28.7	黏结面	1.21
	水稳基层 3	9.55	26.5	黏结面	1.17
	水稳基层 4	6.31	25.6	黏结面	1.23
	水稳基层 5	7.33	26.6	黏结面	1.19
	水稳基层 6	4.51	27.2	黏结面	1.20
	水稳基层 7	7.21	25.4	黏结面	1.22
	均值				
1 a	水稳基层 1	4.12	12.9	黏结面	0.57
	水稳基层 2	4.3	16.2	黏结面	0.72
	水稳基层 3	3.75	9.8	黏结面	0.43
	水稳基层 4	3.81	11.4	黏结面	0.52
	水稳基层 5	3.9	12.3	黏结面	0.61
	水稳基层 6	3.88	10.7	黏结面	0.58
	水稳基层 7	3.91	11.2	黏结面	0.59
	均值				

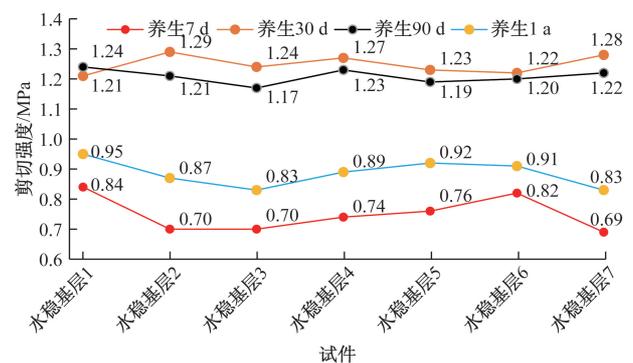


图 5 不同养生时间地推直剪试验结果

3.3 28 d 冻融循环试验

对 28 d 养生时间的常规水稳试件和注浆水稳试件进行两次冻融循环,再进行无侧限抗压强度试验,所测得无侧限抗压强度和破坏压力试验结果见表 2。

表 2 2 次冻融循环试验结果

编号	破坏压力/kPa	无侧限抗压强度值/MPa
常规试件 ①	114.7	6.5
常规试件 ②	120.3	6.8
常规试件均值	117.5	6.7
注浆试件 ①	101.2	5.7
注浆试件 ②	80.9	4.6
注浆试件均值	91.1	5.2
强度比值/%	78	78

经 2 次冻融循环试验后,常规试件无侧限抗压强度均值为 6.7 MPa,注浆试件无侧限抗压强度为 5.2 MPa,由此可看出,在冻融循环条件下,注浆试件与常规试件仅相差 1.5 MPa,试件注浆后具有良好的使用性能,常规试件与无侧限抗压强度试件强度比值为 78%,表明注浆后试件相较于常规试件具有较好的抵抗水损害效果。

4 注浆路段跟踪观测

依托江苏省内高速公路实体注浆路段工程,对现有注浆路段进行跟踪观测,评价注浆效果对路面病害的使用效果。跟踪观测从注浆路段裂缝复发率、注浆后取芯芯样完整性、注浆后取芯芯样无侧限抗压强度值 3 个角度考虑,对注浆路段进行使用效果后评估。

4.1 裂缝复发率

针对高速公路裂缝路段,对比常规铣刨重铺以及专项处置注浆修复裂缝复发率进行分析,详情见表 3、表 4。

对裂缝路段进行单车道铣刨重铺处治后,铣刨单层第 1 年裂缝复发率最高可达 15%,对于铣刨双层,裂缝复发率相较于单层更低,不超过 10%;而进行注浆修复处置后的裂缝复发率,第 1 年均均为 0%。

表 3 单车道铣刨重铺

处置方案	铣刨单层(单条裂缝挖补至中面层)		铣刨双层		
	2019 年	2020 年	2019 年	2020 年	
处治后复发率统计/%	第 1 年	11.42	15.05	9.85	5.78
	第 2 年	23.18	28.65	18.15	6.36
	第 3 年	29.87	—	28.00	—

表 4 专项处置注浆修复

高速名称	处置时间	处治裂缝数量/条	第 1 年复发率/%	第 2 年复发率/%	第 3 年复发率/%
沿江	2020 年	345	0	18	—
沿江	2021 年	564	0	0	0.81
沪苏浙	2020 年	21	0	19	—
宁杭	2020 年	146	0	10	—
润扬	2019 年	20	0	0	15

另外以沿江高速为例,使用原方案注浆后第 2 年,裂缝复发率从第 1 年 0% 增长至 18%;在使用优化后的注浆方案后,第 2 年裂缝复发率仍为 0%。

4.2 芯样完整性

为验证注浆后裂缝处结构内部裂缝浆液饱满情况,在 2022 年 9 月,沪宁高速进行工后观测,现场在裂缝位置共取 5 个芯样。经注浆 5 个月取芯观察,基层裂缝处浆液较为饱满,注浆效果较好。具体情况见表 5。

表 5 注浆后芯样状况

芯样	注浆时间	取芯验证时间	注浆裂缝取芯桩号	注浆后取芯注浆效果
1	2022 年 5 月	2022 年 8 月	K267+437	裂缝注浆饱满
2			K267+445	裂缝注浆饱满
3			K241+050	裂缝注浆饱满
4			K227+230	裂缝注浆饱满
5			K241+090	裂缝注浆饱满

4.3 芯样无侧限抗压强度

路面基层状况采用无侧限抗压强度指标进行评价。典型高速选择为宁杭高速和沪宁高速,根据取芯后的芯样进行无侧限抗压强度值检测,结果如表 6、表 7、图 6 所示。

根据上述所取芯样的无侧限抗压试验结果,注浆后裂缝处及裂缝旁所取芯样的无侧限抗压强度平均值为 15.03 MPa,相比于在路面完好处所取芯样的无侧限抗压强度试验结果 16.3 MPa,抗压强度

表 6 沪宁高速注浆后芯样无侧限抗压强度结果

检测时间	桩号位置	无侧限抗压强度/MPa
2022 年 4 月底	上海方向 K267+445 二车道裂缝	13.2
	上海方向 K227+230 二车道	16.0
	上海方向 K227+300 二车道	15.9
	上海方向 K267+445 完好	12.3

表 7 宁杭高速注浆后芯样无侧限抗压强度结果

注浆时间	检测时间	桩号位置	无侧限抗压强度/MPa
2020 年	2022 年	宁杭方向 K2148+424	13.92
		宁杭方向 K2148+460	12.04
		宁杭方向 K2152+132	12.50
		宁杭方向 K2152+225	14.52
		均值	13.25
		宁杭方向 K2147+900	13.41
		宁杭方向 K2147+910	15.94
		宁杭方向 K2147+920	14.82
		宁杭方向 K2147+930	13.15
		均值	14.33

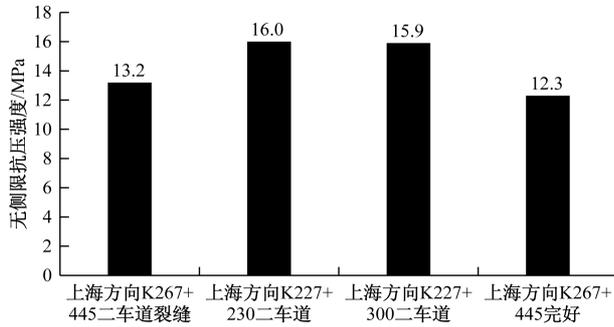


图6 非开挖注浆芯样无侧限抗压强度

恢复率为92.2%。非开挖注浆工艺在一定程度上提高了路面结构的强度。

根据上述所取芯样的无侧限抗压试验结果,注浆后裂缝处及裂缝旁所取芯样的无侧限抗压强度平均值为13.25 MPa,相比于在路面完好处所取芯样的无侧限抗压强度试验结果14.33 MPa,抗压强度恢复率为92.5%。非开挖注浆工艺在一定程度上提高了路面结构的强度。

5 结论

(1)基于室内标准成型方法开展不同龄期水稳裂缝注浆后强度变化情况分析,1 a后无侧限抗压强度恢复率仍在70%以上,剪切强度达到1.21 MPa且具有较好的稳定性;采用2次冻融循环后劈裂强度值为5.2 MPa,是相同条件下完好芯样劈裂强度的78%,具有较好的抗水损害性能。

(2)对注浆后路段跟踪观测,前3年裂缝复发率

均低于20%,取芯芯样浆液饱满,完整性高。根据芯样无侧限抗压强度可知,无侧限抗压强度值恢复率大于90%,提升了路面结构的强度。

参考文献

- [1] 吴子田. 公路半刚性基层沥青路面处理技术研究[J]. 运输经理世界, 2023(29): 43-45.
- [2] 童巨声. 沥青路面车辙与表面裂缝机理分析与预估研究[D]. 南京: 东南大学, 2022.
- [3] 单超, 郑传峰, 杨雪, 等. 半刚性基层沥青路面反射裂缝形成试验及扩展机理研究[J]. 路基工程, 2021(6): 69-74.
- [4] 孙奔, 应鹏, 朱瑶之. 半刚性基层沥青路面裂缝非开挖注浆修补技术应用研究[J]. 上海公路, 2023(4): 22-25.
- [5] 徐灿. 沥青路面病害治理中注浆材料制备及性能试验研究[J]. 交通世界, 2022(13): 23-26.
- [6] 韦联飞. 早强型地聚物注浆加固技术在公路病害治理中的应用探讨[J]. 西部交通科技, 2022(4): 73-75, 129.
- [7] 卢振文. 公路沥青路面注浆补强养护效果检测[J]. 运输经理世界, 2022(2): 136-138.
- [8] 孙海龙. 地聚物注浆材料试验及在路面基层裂缝处治中的应用[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2022.
- [9] 周庆秀, 赵鑫, 徐海峰, 等. 聚氨酯注浆材料性能影响因素研究[J]. 中国水运, 2023, 23(9): 142-144.
- [10] 曹春生. 沥青路面半刚性基层预防性补强关键技术[J]. 中国公路, 2021(14): 110-111.
- [11] 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.
- [12] 李强, 林占胜, 裴福才, 等. 路基注浆试验与仿真分析[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(21): 9339-9345.

Durability Evaluation of Minimally Invasive Grouting for Semi-rigid Base Cracks: Taking Nanjing-Hangzhou and other High-speed Railway in Jiangsu Province as an Example

LING Cong, CAI Wenlong

(Jiangsu Sinoroad Engineering Research Institute Co., Ltd., Nanjing 211806, China)

Abstract: In the maintenance engineering of asphalt pavement on highways, conventional methods are difficult to completely solve the problem of hidden diseases inside the pavement structure. Minimally invasive grouting technology is gradually being used for the repair of such diseases due to its technological advantages. However, current research focuses on the grouting materials and construction techniques, with less attention paid to the durability evaluation of grouting technology. Given that durability directly affects the effectiveness and lifespan of the technology, conducting durability evaluation is particularly important. Two methods including indoor testing and on-site road surface tracking observation were used to evaluate the effectiveness of crack grouting in semi-rigid base layers. The research results showed that the recovery rates of unconfined compressive strength at different ages of 28 days, 90 days, and 1 year of curing were 70.4%, 70.0%, and 68.6%, respectively. The shear strength of the ground push direct shear test for 7 days, 28 days, 90 days, and 1 year of health preservation were 0.75, 1.25, 1.21 and 0.90 MPa, respectively. The splitting strength value of two freeze-thaw cycles after 28 days of health preservation is 5.2 MPa. The results indicate that the unconfined compressive strength and shear strength values of the semi-rigid base crack still maintain good levels after minimally invasive grouting and long-term use. According to continuous tracking and observation of physical engineering, the integrity of the core sample is high, the slurry is full, and the strength value has not significantly decreased.

Keywords: asphalt pavement; semi rigid base layer; minimally invasive grouting; durability; post work observation