

# 在役沥青路面基层地聚物注浆补强技术研究

林有贵<sup>1,2</sup>, 栗晖<sup>3</sup>, 易强<sup>1,2</sup>, 农彬芝<sup>1,2</sup>

(1. 广西交投科技有限公司, 广西 南宁 530001; 2. 广西高速公路养护工程技术研究中心; 3. 百色高速公路运营有限公司)

**摘要:** 该文采用地聚合物注浆技术对在役沥青路面水泥稳定碎石基层进行试验研究, 并采用钻芯和 FWD 弯沉检测等方法对注浆前后的路面进行了对比评价, 验证了注浆后的加固效果。研究结果显示: 对基层松散脱空等缺陷进行地聚合物注浆补强后, 路表弯沉值下降幅度达到 45%, 钻芯发现在有松散夹层和脱空的上下水稳层之间、下水稳层与级配碎石底基层之间形成了浆液结石, 上下水稳层之间通过浆液结石黏结成为一个整体, 下水稳层脱空得到填充, 路面结构强度显著提高。

**关键词:** 地聚物; 注浆补强; FWD 弯沉仪; 结构强度

随着运营道路的服役期不断延长, 常年经受重载的道路极易出现路面结构沉陷或基层松散甚至脱空等病害, 针对此类病害, 传统的方法是对路面进行铣刨重铺, 其缺点是养护周期长、资金投入大。为保证施工的快速高效, 经济适用, 非开挖式的道路注浆技术是一种切实可行的有效方案。道路路面加固技术可在不破坏原有路面、不改变原路线纵断面的前提下, 通过对路面钻孔、注浆的方式完成对路面基层的补强加固, 因此, 注浆技术目前在道路基层病害治理中广泛应用。

在国外, 注浆技术用于地基处理已有几十年历史, 荷兰率先采用了化学注浆技术, 直到 20 世纪 40 年代, 逐渐发展为主要以水玻璃为注浆材料的注浆技术, 并在欧美各国中得到广泛应用; 2001 年, 美国得克萨斯州交通局采用注浆技术对其境内 11 英里 (17.70 km) 长的沥青路面基层的松散、脱空等病害进行了治理, 不但取得了良好的补强效果, 也节省了数百万美元。在中国, 一些大学和公路养护单位对地聚合物路面注浆技术进行了研究, 确定了地聚合物注浆技术的施工工艺及注浆施工设计参数; 河南、上海等地的高速公路和市政道路均应用了地聚物路面注浆技术进行基层加固, 既具有较低的养护成本, 同时有效解决了路面基层松散和脱空等病害, 防止基层病害进一步的扩展, 并形成了路面基层注浆地方标准。

广西属高温多雨区, 高液限黏土分布广泛, 早期高速公路建设时为降低工程造价常采用高液限黏土填筑, 通车后填方路基持续沉降, 导致沥青路面半刚性基层脱空; 广西大部分地区属山岭区, 高填方路基较多,

因此填方和半填半挖路基路段常下沉, 导致半刚性基层脱空; 另外, 早期建设的高速公路, 部分基层施工质量不良, 上下水稳基层间存在松散夹层等缺陷。这些早期建设的高速公路通车 10 多年, 已进入疲劳寿命后期, 急需采取预防措施以延长路面寿命。广西高速公路路面结构的这些缺陷可能不同于其他省市, 注浆处治工艺也可能不同; 另外现有研究对注浆补强效率研究较少。基于上述原因, 该文针对广西高速公路水泥稳定碎石基层的典型缺陷开展注浆工艺研究, 以检验自主研发的两种注浆材料效果, 同时通过研究分析注浆前后各结构层模量变化, 评价注浆效率。

## 1 试验路概况

试验段位于广西百色至罗村口高速公路下行线, 属国家高速公路网广州至昆明 G80 线, 是广西通往云南的主要通道, 半幅路面总宽 9.8 m, 包括 0.5 m 路缘带 + 2 × 3.75 m 行车道 + 1.8 m 应急车道, 此高速公路于 2005 年 12 月建成通车, 为水泥稳定碎石基层沥青路面。试验段的路面结构从上至下为: 40 mm SBS 改性沥青 AK-13+50 mm 沥青混凝土 AC-16+60 mm 沥青混凝土 AC-25+200 mm 水泥 (5%) 稳定碎石上基层 + 200 mm 水泥 (5%) 稳定碎石下基层 + 级配碎石底基层 (低剂量 2% 水泥) + 路基。其中, 水稳基层分两层施工, 每层 200 mm。

试验段全长 1 km, 进行注浆补强的是第二车道 (外侧车道), 注浆施工于 2018 年 12 月 2 日开始, 2019

年1月6日结束。试验路段曾于2016年铣刨4 cm表面层后加铺AC-13。目前该试验路段的半幅交通量为3 000 pcu/d左右,根据2015年6月和2019年8月的车辆荷载调查结果显示,此路段的交通量不大,但重车占比较高。

2 注浆施工前路面检测

注浆施工前于2018年5月对试验段第二车道进行路况调查、钻孔检测,2018年11月27日进行FWD检测。至2016年试验路已通车10年,历年路况检测结果表明:该试验段的主要病害为纵横缝,并有少量坑洞,其路面病害逐年增加,PCI逐年下降。该试验段路面曾在2016年12月铣刨40 mm厚的表面层,然后加铺40 mm厚的AC-13层,加铺前路面主要病害为横缝和纵缝,数量见表1,裂缝影响宽度以0.2 m计,采用JTG 5210-2018《公路技术状况评价标准》评定PCI为86,等级为良。截止至2018年11月再次检测时部分横缝和纵缝已反射至表面。

表1 病害数量及PCI

病害类型	数量/条	总长/m	PCI
横缝	18	92.7	86
纵缝	3	76.0	

试验段曾于2015年5月和2018年5月在注浆车道共钻芯19个,钻孔穿透下水稳层,结果为:①4个芯样的上水稳层完好、但与下水稳层分离;15个芯样上水稳层底部松散,松散夹层厚10~20 mm;部分上下水稳层层间脱空;②下水稳层底部普遍存在松散和脱空的现象,脱空量为10 mm左右。

注浆前于2018年11月27日采用丹耐特落锤式弯沉仪检测弯沉,测点位于右轮迹带,间距为5 m;同时还检测了应急车道的弯沉,测点间距为10 m。

3 注浆施工

针对试验段路面结构强度较低,基层存在松散夹层、脱空等病害的状况,采取基层注浆的措施对试验段路面进行补强加固。在行车道的左、右轮迹带和两轮迹带中央钻孔,注浆孔的纵向间距为120 cm,横向间距为100 cm;注浆补强施工于2018年12月2日开始,至2019年1月6日完成,剔除节假日后实际施工

期为19 d,平均每天完成注浆单车道52 m。该次注浆工效较低,主要原因是人工投入不足。

3.1 注浆材料

试验路注浆施工采用4种注浆材料,其中两种为市场购买的地聚合物注浆材料,两种为自主研发材料。各材料的施工长度和力学性能指标见表2。在进行室内配合比试验时,为模拟现场注浆材料的环境情况,试件在成型24 h拆模后进行室内养生时采用塑料袋包装密封,室温为23~28℃,试件为尺寸70 mm×70 mm×70 mm的立方体。室内配合比试验时4种注浆材料在设计水灰比下的流动度均小于17 s。

表2 注浆材料施工长度及力学性能

注浆材料	施工长度/m	流动度/s	抗压强度/MPa			备注
			1 d	3 d	28 d	
1	300	15.0	21.1	30.9	40.5	自研
2	200	11.7	25.9	35.2	43.2	市售普通型
3	200	16.2	7.5	15.3	32.5	市售早强型
4	300	13.6	20.3	31.8	42.9	自研

在施工现场取样成型立方体试件,成型24 h后拆模,用塑料袋密封后部分置于现场养生(室外),部分置于水泥混凝土标准养护室养生,分别检测试件的1、3和28 d抗压强度,与表2中设计水灰比下的抗压强度进行对比。施工期内现场气温为8~25℃,气温较低。对同种注浆材料的试件在现场养生和标养条件下的抗压强度进行比较后发现:现场养生的4种注浆材料的1 d抗压强度均低于室内标准养生强度,3 d强度接近室内标养强度,而28 d强度与室内标养强度基本相同。施工期间在搅拌机处取样测流动度。

3.2 注浆设备及工艺

该次注浆机械为路基注浆常用拌和机和注浆机,搅拌速率140 r/min左右,设计注浆压力0.8~1.5 MPa。注浆孔直径35 mm,钻孔方式采用螺旋水钻。试验路共试验两种注浆施工工艺,即一层注浆和两层注浆工艺。其中一层注浆工艺为钻出深为65 cm的孔,对上下水稳层同时进行注浆;两层注浆工艺为两次钻孔两次注浆,分别对上水稳层和下水稳层进行注浆,第1次钻孔穿透上水稳层进入下水稳层约5 cm,孔深40 cm,然后注浆补强上水稳层;第2 d再次在原孔位钻孔注浆,注浆孔穿透下水稳层进入底基层10 cm左右,孔深65 cm,然后进行注浆补强下水稳层。注浆工艺流程如图1所示。因注浆时常观察到有浆液从周围

孔中流出,故完成注浆后立即用木塞堵塞好注浆孔,并用水冲掉表面污染物。该次注浆设备无自动控制压力

功能,注浆压力需人工控制,有时实际最大压力大于设计压力 1.5 MPa。

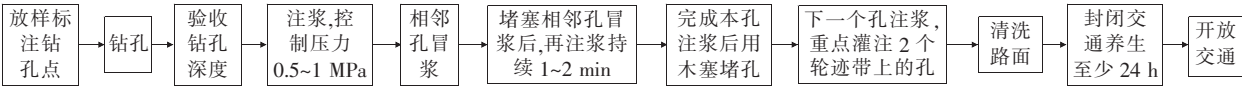


图 1 注浆工艺流程图

4 注浆后检测

注浆施工后开放交通前,对路面钻芯,检查注浆效果;通车后,多次现场跟踪观测试验路外观情况,并于 2019 年 1 月 15 日和 8 月 16 日进行了两次 FWD 检测。

4.1 钻芯检测

注浆后对路面钻取芯样 5 个,以验证注浆补强效果。现场典型芯样照片如图 2、3 所示。



图 2 注浆后钻芯在上下层层间发现 6~10 mm 厚注浆结石 (K800+420 慢车道,两层注浆工艺,钻孔深 35 cm)

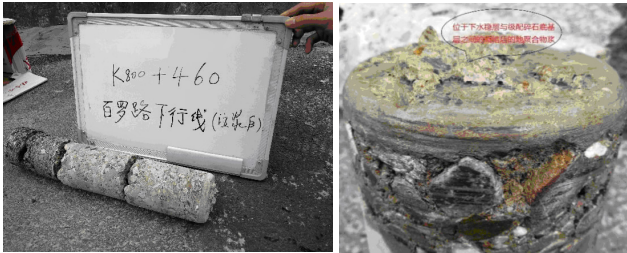


图 3 注浆后钻芯,上下水稳层层间未发现注浆结石,在水稳层底部有约 12 mm 厚注浆结石 (K800+460 慢车道,两层注浆工艺)

由图 2 可见:芯样的上下水稳层层间填满厚 6~10 mm 的浆液结石,松散碎石被固结,上下水稳层黏结牢固,钻芯时需撬动才能取出芯样;由图 3 可见:下水稳层底部黏有 12 mm 左右的浆液结石,上下水稳层层间未见结石,其原因是该芯样上水稳层底部密实,层间分离但层间空隙小。可见该次注浆有效固结了松散夹层,填充了脱空,极大提高了路面整体强度。

4.2 FWD 弯沉检测

在开放交通后分别于 2019 年 1 月 15 日、2019 年

8 月 16 日检测了 FWD 弯沉,测点位于注浆车道右轮迹带,并尽可能与注浆前 FWD 检测测点重合,测点间距为 5 m。

对于在非标准温度下进行的 FWD 检测,至今规范仍没有统一的温度修正方法,目前一般通过对沥青层反算模量的方法进行温度修正。现行 JTG E60—2008《公路路基路面现场测试规程》中规定了计算沥青层平均温度的方法和贝克曼梁弯沉的温度修正方法。试验路段距百色市区 15 km,利用从百色气象站得到的检测时段的气象资料,根据 JTG E60—2008《公路路基路面现场测试规程》计算得到 2018 年 11 月 27 日、2019 年 1 月 15 日、2019 年 8 月 16 日的沥青层平均温度分别为 18.7、16、38.7℃,据此计算得贝克曼梁弯沉温度修正系数结果如表 3 所示。

表 3 不同方法的弯沉温度修正系数

沥青层平均温度/℃	规程法 (文献[9])	宋小金法 (文献[7])	陈森法 (文献[8])	该文取值
16.0	1.070	1.030	1.120	1.070
18.7	1.020	1.004	1.080	1.020
38.7	0.620	0.604	0.603	0.604

由表 3 可见:当沥青层平均温度小于 20℃时,宋小金法的 FWD 弯沉修正系数与规程法计算的贝克曼梁弯沉修正系数相近;当沥青层平均温度大于 20℃时,宋小金法的计算结果与陈森法相近。综合考虑后,该文温度修正值取值如表 3 的最后一列所示。2019 年 8 月 16 日还检测了与试验路前后连接的未注浆段 2、1 的 FWD 弯沉作为对比,结果如表 4 所示。由表 4 可见:注浆后路面的平均弯沉和代表弯沉均得到了显著的降低,注浆 8 d 后的平均弯沉为注浆前的 0.52 倍;注浆完工通车 7 个月后弯沉稍有增大,增大了 5.6%;两个未注浆路段平均弯沉远大于注浆路段弯沉。

原路面设计弯沉为 198 μm,路面结构强度系数按式(1)计算:

$$SSI=\frac{l_d}{l} \tag{1}$$



表 4 注浆前后 1 km 路面结构整体强度(已进行温度修正)

路面状况	测点数/ 个	荷载中心点弯沉/ $\mu\text{m}$			检测日期
		平均值	标准差	代表值	
未注浆段 1	118	109.9	60.2	208.9	2019 年 8 月 16 日
注浆前	190	88.4	52.9	175.5	2018 年 11 月 27 日
注浆后	200	46.3	18.9	77.4	2019 年 1 月 15 日,开放交通 8 d
注浆后 7 个月	201	48.9	25.2	90.4	2019 年 8 月 16 日,开放交通 7 个月
未注浆段 2	24	96.3	41.6	164.7	2019 年 8 月 16 日
应急车道	101	51.8	14.2	75.3	2018 年 11 月 27 日

注:代表值=平均值+1.645 倍标准差,保证率为 95%,而非采用 JTG E60—2008《公路路基现场测试规程》的方法计算。

式中: $l_d$ 、 $l$  分别为设计弯沉、检测弯沉代表值( $\mu\text{m}$ )。浆前结构强度系数为 1.13,注浆后 8 d 和 7 个月的结  
计算得到结构强度系数如表 5 所示。由表 5 可见:注 构强度系数分别为 2.56、2.19,等级达到优等。

表 5 注浆前后路面结构强度系数

路面状况	设计弯沉/ $\mu\text{m}$	中心点弯沉 代表值/ $\mu\text{m}$	结构强度 系数 SSI	检测日期
未注浆段 1		208.9	0.95	2019 年 8 月 16 日
注浆前		175.5	1.13	2018 年 11 月 27 日
注浆后	198	77.4	2.56	2019 年 1 月 15 日,开放交通 8 d
注浆后 7 个月		90.4	2.19	2019 年 8 月 16 日,开放交通 7 个月
未注浆段 2		164.7	1.20	2019 年 8 月 16 日

4.3 外观检查

2019 年 1 月 6 日完成注浆,至 2019 年 8 月,对试  
验段路面进行了多次现场跟踪观测,发现路面完好平  
整,除原路表反射裂缝外,无新病害出现。

5 补强效率分析

如前所述,该试验路段内部结构缺陷主要有上水  
稳层底部松散、层间脱空,下水稳层底部松散、脱空。  
下面分析注浆后各结构层强度(模量)的提高效果,评  
价注浆补强效率、注浆工艺对补强效率的影响。

5.1 注浆工艺对补强效率的影响

注浆后至 2019 年 8 月已通车 7 个月,因此 2019  
年 8 月 16 日实测的弯沉代表了注浆后弯沉的降低情  
况。该次注浆试验了两种工艺,各注浆路段及工艺对  
应的荷载中心 FWD 弯沉见表 6,表 6 还给出了注浆前  
后各段代表弯沉的降低比值。表 6 中,2018 年 11 月  
27 日和 2019 年 8 月 16 日的弯沉温度修正系数分别  
为 1.02 和 0.604,代表弯沉的计算方法如之前所述。  
可见注浆后各段代表弯沉均得到显著降低。

从表 6 可看出:注浆材料 3 二层注浆后的代表弯  
沉降低值小于一层注浆的降低值,而注浆材料 4 却相

表 6 注浆前(2018 年 11 月 27 日)、后(2019 年 8 月 16 日)荷载中心弯沉变化

注浆材料	注浆工艺	长度/ m	测点数/ 个	注浆后/ $\mu\text{m}$			注浆前/ $\mu\text{m}$			注浆前后 弯沉比值
				平均值	标准差	代表值	平均值	标准差	代表值	
注浆材料 1	一层注浆	300	61	52.3	27.1	96.9	83.2	35.8	142.1	0.68
注浆材料 2	一层注浆	200	40	45.2	24.0	84.7	80.3	38.5	143.6	0.59
注浆材料 3	一层注浆	100	20	38.9	17.2	67.2	82.9	35.8	141.8	0.47
	两层注浆	100	19	47.5	14.4	71.2	126.0	51.0	209.9	0.34
注浆材料 4	一层注浆	130	27	50.0	27.5	95.2	133.9	88.3	279.2	0.34
	两层注浆	170	34	46.8	23.1	84.8	53.3	23.4	91.8	0.92

反。由于实测弯沉数据离散大,前面的论断未必正确,宜采用数理方法分析。注浆前后 FWD 的测点间距为 5 m,检测时采用路侧的百米桩号标定和调整记录桩号,可认为注浆前后两次测点基本重合。同一测点注浆前后的弯沉比值表征了补强效率,按式(2)计算:

$$c_i = \frac{d_{i后}}{d_{i前}} \tag{2}$$

表 7 注浆工艺对补强效率的影响分析(95%置信度)

材料	注浆工艺	测点数/个	注浆前后测点荷载中心弯沉比值 $c_i$ 统计		5%置信度判定
			比值平均值	比值标准差	
注浆材料 3	一层	17	0.431	0.199	差异显著
	两层	19	0.429	0.183	
注浆材料 4	一层	23	0.448	0.303	无差异
	两层	21	0.659	0.209	

由表 7 可见:对于注浆材料 3,两层注浆工艺的补强效果优于一层注浆工艺;而注浆材料 4 无此结论。从理论上讲,两层注浆效果应优于一层注浆,因为上水稳层底部多含松散夹层,而下水稳层脱空量大,一层注浆时压力作用下浆液先沿阻力小的脱空渗透,然后渗入阻力大的松散夹层,由此可能存在脱空完全被填充但松散夹层未全部注满的情况。

5.2 结构层模量变化分析

通过钻芯发现的结石证实了浆液填满上下水稳层层间脱空以及下水稳层脱空、固结松散碎石的效果。下面分析水稳层和级配碎石层模量的变化,以评价哪种结构层的补强效率更高。采用单个测点弯沉盆数据应用 SIDMOD 反算各层模量,结果表明各层反算模量离散极大,部分反算结果明显不合理。已有大量研究表明,沥青层、水稳层和路基的模量主要取决于弯沉盆的某些特征值,而采用其他传感器测值会导致反算值不合理,因此下面采用现有正算方法确定这些结构层模量,作为已知量代入 SIDMOD 反算级配碎石层模量。

5.2.1 路基模量

美国 AASHTO《路面结构设计指南》,采用 FWD 的远离承载板的弯沉反算地基模量  $E_0$ ,计算式为:

$$E_0 = \frac{0.24P}{rd_r} \tag{3}$$

式中: $E_0$  为路基模量(MPa); $P$  为施加的荷载(N); $d_r$  为在径向距离  $r$  处测得的弯沉(mm); $r$  为测量弯沉点的径向距离(mm)。

目前对非标准温度下检测的弯沉盆的温度修正研

究极少,陈森曾提出距荷载中心 180 cm 处弯沉的温度修正计算式,该文注浆后于 2019 年 8 月 16 日进行 FWD 检测,按文献[5]计算的沥青层平均温度为 38.7℃,实测  $D_{180}$  为 13.2  $\mu\text{m}$ (表 8),按陈森法计算的温度修正系数为 0.65, $D_{180}$  进行温度修正后为 8.6  $\mu\text{m}$ ,远小于 2018 年 11 月 27 日、2019 年 1 月 15 日的实测弯沉(表 8),显然不合理,因为表 8 的各点弯沉均未进行温度修正。表 8 的特征点弯沉为各测点弯沉的平均值。按式(3)计算的路基模量列于表 8。由表 8 可见:根据 3 次实测弯沉计算的路基模量相近,注浆孔进入级配碎石底基层 10 cm,未对路基注浆补强,计算的路基模量值合理。另外,美国 ASSHTO 路基设计模量采用反算模量的 0.33 倍,以上计算值乘以 0.33 倍后得 155 MPa 左右,与中国规范推荐值接近。

式中: $c_i$  为测点  $i$  的弯沉降低比值; $d_{i前}$ 、 $d_{i后}$  分别为测点  $i$  注浆前、后弯沉( $\mu\text{m}$ )。

FWD 检测时检测人员尽量使前后两次测点重合,但仍有少数测点注浆后弯沉大于注浆前弯沉,不合理,剔除这部分反常点后的统计值列于表 7。根据数理统计  $t$  分布,分析注浆材料 3、注浆材料 4 这两种注浆工艺的弯沉比值  $c_i$  的平均值是否有显著差异(表 7)。

究极少,陈森曾提出距荷载中心 180 cm 处弯沉的温度修正计算式,该文注浆后于 2019 年 8 月 16 日进行 FWD 检测,按文献[5]计算的沥青层平均温度为 38.7℃,实测  $D_{180}$  为 13.2  $\mu\text{m}$ (表 8),按陈森法计算的温度修正系数为 0.65, $D_{180}$  进行温度修正后为 8.6  $\mu\text{m}$ ,远小于 2018 年 11 月 27 日、2019 年 1 月 15 日的实测弯沉(表 8),显然不合理,因为表 8 的各点弯沉均未进行温度修正。表 8 的特征点弯沉为各测点弯沉的平均值。按式(3)计算的路基模量列于表 8。由表 8 可见:根据 3 次实测弯沉计算的路基模量相近,注浆孔进入级配碎石底基层 10 cm,未对路基注浆补强,计算的路基模量值合理。另外,美国 ASSHTO 路基设计模量采用反算模量的 0.33 倍,以上计算值乘以 0.33 倍后得 155 MPa 左右,与中国规范推荐值接近。

5.2.2 沥青层和水稳层模量

周岚等采用 BISAR 分析了沥青路面各层模量对路表弯沉盆的影响后指出,沥青层模量与 $(D_0 - D_{20})$ 、水稳基层模量与 $(D_{20} - D_{60})$ 均显著相关,提出了式(4)、(5)的计算公式,并在沪苏浙高速公路检测中应用,与反算模量关系显著,而底基层的相关系数很小,不满足要求。图 4 所示的路面结构层厚度采用设计值。

$$\lg(d_0 - d_{20}) = -0.89\lg E_1 + 4.55 \tag{4}$$

$$\lg(d_{20} - d_{60}) = -0.79\lg E_2 + 4.07 \tag{5}$$

式中: $d_0$ 、 $d_{20}$ 、 $d_{60}$  分别为距荷载中心 0、20、60 cm 的弯沉( $\mu\text{m}$ ); $E_1$ 、 $E_2$  分别为沥青层、水稳层模量(MPa)。

沥青混合料属温感性材料,采用非标准温度的弯

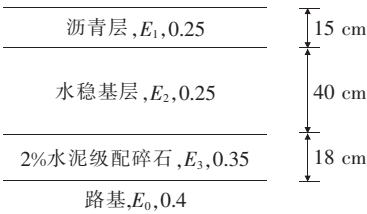


图4 路面结构模量反算

沉盆反算沥青层模量时应予以修正,而水泥稳定基层的反算模量勿需进行温度修正。关于沥青层反算模量温度修正的方法有很多研究,宋小金和樊亮提出反算模量的温度修正系数计算式如下:

$$K_E=0.274+\frac{51.1}{1+e^{-0.095T+6.14}}$$

(6)

式中: $K_E$ 为反算模量的温度修正系数; $T$ 为沥青层平均温度( $^{\circ}\text{C}$ )。

经分析该方法较合理,采用式(4)、(5)计算的沥青层模量 $E_1$ 、水稳层模量 $E_2$ 列于表8,其中2019年8月16日实测弯沉盆反算的沥青层模量按式(6)进行了

温度修正,系数为4.28;按文献[9]计算的2018年11月27日的沥青层平均温度为 $18.7^{\circ}\text{C}$ ,按式(6)计算的修正系数为0.917。应该指出,表8的各点弯沉未进行温度修正,根据上面分析沥青层反算模量 $E_1$ 进行了温度修正,其余各层反算模量 $E_2$ 、 $E_3$ 和 $E_0$ 勿需修正。

从表8可见:计算的沥青层模量基本相同,计算的路基模量值也相近,可见计算值合理;而注浆后的水稳层模量为注浆前模量的7.92倍,表明注浆补强效果明显。

5.2.3 级配碎石模量

表9为注浆前后实测弯沉盆平均值(未进行温度修正)。反算图4所示模型的级配碎石层(掺2%水泥)模量时,所用的沥青层厚度、水稳层厚度均为设计厚度,将表8所示的沥青层模量 $E_1$ 、水稳层 $E_2$ 和路基 $E_0$ 作为已知值代入SIDMOD,反算的结果见表8的 $E_3$ 。可见注浆后级配碎石底基层的模量为注浆前的2.09倍,补强效果明显。

表8 特殊点弯沉(弯沉未作温度修正)及计算模量

注浆情况	压力/ MPa	测点弯沉/ $\mu\text{m}$				反算模量/MPa				检测日期
		$D_0$	$D_{20}$	$D_{60}$	$D_{180}$	$E_1$	$E_2$	$E_3$	$E_0$	
注浆前	0.7	86.5	76	48.3	14.3	8 454	2 118	185	466	2018.11.27
注浆后		79.1	34.8	29.4	13.2	7 835	16 781	387	505	2019.08.16

表9 注浆前后弯沉盆(未作温度修正)

$\mu\text{m}$

检测日期	$d_0$	$d_{20}$	$d_{30}$	$d_{60}$	$d_{90}$	$d_{120}$	$d_{150}$	$d_{180}$
2018.11.27	86.473	75.993	67.6	48.3	34.4	27.7	19.7	14.26
2019.08.16	79.113	34.842	33.6	29.4	24.4	19.8	16.3	13.16

6 疲劳损伤分析

估算在役半刚性基层沥青路面的剩余疲劳寿命一直是路面养护技术的难点,至今仍没有规范的方法。现有的沥青路面性能预测模型是基于历年路面性能指标(如 $PCI$ 、 $RQI$ 等)来预测其未来使用性能的衰变规律,但无法预测路面剩余疲劳寿命。随着服役期的延长,路面结构强度逐渐降低,路面整体弯沉不断增大,李大鹏提出式(7)采用弯沉估算路面整体损伤度的经验公式:

$$\frac{N_{et}}{N_R}=\frac{l_t-l_0}{l_R-l_0}$$

(7)

式中: $N_{et}$ 为通车 $t$ 年时一个车道的累计标准轴次(次); $N_R$ 为达到临界破损状态时的当量标准轴次(次); $l_t$ 为通车 $t$ 年的实测弯沉代表值( $0.01\text{ mm}$ ); $l_0$ 为新建路面竣工时的实测弯沉代表值( $0.01\text{ mm}$ ); $l_R$ 为临界破损状态时的弯沉代表值( $0.01\text{ mm}$ )。

式(7)中 $N_{et}/N_R$ 显然为通车 $t$ 年的路面整体的损伤度,则注浆前后损伤度比值由式(8)确定:

$$\frac{d_{\text{后}}}{d_{\text{前}}}=\frac{l_{\text{后}}-l_D}{l_{\text{前}}-l_D}$$

(8)

注浆前,课题组曾于2018年11月27日实测试验路应急车道的FWD弯沉(表4),荷载中心平均弯沉为 $75.3\text{ }\mu\text{m}$ ,可当作通车前注浆车道的弯沉。将2019年8月16日的弯沉(考虑温度修正系数0.604)代入式

(8) 计算得到的注浆后的损伤度为注浆前的 0.18 倍, 可见注浆补强后显著提高了路面强度, 预计可极大地延长路面寿命。

## 7 讨论

采用地质雷达(天线 800 MHz)、瞬态面波法和弹性波法检测了注浆前后路面结构参数, 结果表明: 注浆前后的地质雷达图像变化明显, 瞬态面波法的剪切速度和弹性波法的频率变化显著, 故这 3 种检测方法均可用于定性评价注浆效果。2D 地质雷达难以检测路面结构层内部脱空、松散等缺陷。该文在 5.1 节中分析注浆效果时指出, 有一个路段两层注浆工艺的补强效果明显优于一层注浆工艺, 有一个路段则无显著影响。但通过进行理论分析后, 笔者推荐采用两层注浆工艺, 因为单独灌注上水稳层时通过慢速低压的注浆工艺, 可充分渗透填充上水稳层底部的松散夹层。对注浆前后的路面进行检测后可知: 此次注浆取得了良好的补强效果, 但试验路施工还有以下不足, 有待今后改善: ① 此次注浆设备为常用的路基注浆机, 注浆材料和水的添加和注浆压力均为人工控制, 施工控制精度不够高, 今后应采用智能注浆设备; ② 施工前钻取了 19 个芯样, 结果表明: 部分上水稳层底部完整, 无松散夹层, 但 2D 地质雷达无法准确判定定位基层松散和脱空等缺陷, 导致施工时不加区分地钻孔注浆, 从而影响工效; ③ 部分上水稳层底部松散夹层较密实(松散原因是施工时水泥剂量不足), 浆液无法渗入这种致密的松散缺陷, 今后宜采用渗透性更高的浆液; ④ 此次施工于冬季进行, 气温较低, 导致现场养生的试件早期强度低于室内配合比试验时同龄期的强度, 影响了开放交通的时间。

## 8 结论

(1) 此次基层注浆补强效果明显, 注浆后钻芯发现, 在上下水稳层层间、下水稳层与级配碎石层之间均形成了 10 mm 左右的浆液结石, 原脱空得到填充、松散夹层得到固结, 上下水稳层牢固黏结。注浆前的含松散夹层和脱空等缺陷的路面, 注浆后转变成为层间连续的路面结构。

(2) 注浆补强后路表弯沉显著降低, 路面强度显

著提高。注浆开放交通 7 个月后荷载中心平均弯沉为注浆前的 0.55 倍, 平均降低了 45%; 注浆补强后路面结构的整体损伤度为注浆前的 0.18 倍。

(3) 基层注浆后, 水稳层模量和级配碎石层模量分别是注浆前的 7.92、2.09 倍, 水稳基层和级配碎石底基层均得到有效补强, 而水稳基层的补强效率更高。

(4) 两层注浆工艺对上水稳层的注浆效果更明显, 一层注浆工艺的补强效果不如两层注浆工艺。

### 参考文献:

- [1] 张博, 董永辉, 田民, 等. 非开挖式结构补强技术在市政道路养护中的应用研究[J]. 城市道桥与防洪, 2017(9).
- [2] 曹强凤. 注浆技术在公路路面基层加固中的研究与应用[D]. 浙江大学硕士学位论文, 2013.
- [3] DB 41/T 1165—2015 道路非开挖式地聚合物注浆加固处治技术规范[S].
- [4] DG/TJ 08—2240—2017 道路注浆加固技术规程[S].
- [5] 马强. 基于弯沉的沥青路面注浆效果评价[J]. 山西建筑, 2016(27).
- [6] JTG 5210—2018 公路技术状况评定标准[S].
- [7] 宋小金, 曾梦澜, 王林, 等. 沥青路面动态弯沉值的温度修正方法研究[J]. 公路交通科技, 2016(1).
- [8] 陈森. 沥青路面 FWD 标准检测规程与弯沉温度修正研究[D]. 重庆交通大学硕士学位论文, 2011.
- [9] JTG E60—2008 公路路基路面现场测试规程[S].
- [10] JTG H20—2007 公路技术状况评定标准[S].
- [11] Richard N. Stubstad. LTPP Data Analysis: Feasibility of Using FWD Deflection Data to Characterize Pavement Construction Quality, 2002.
- [12] 《国外公路工程标准规范研究及编译》课题组. AASH-TO 路面结构设计指南[Z], 2005.
- [13] 宋小金, 樊亮. 基于 FWD 的沥青路面动态弯沉温度修正系数[J]. 土木工程学报, 2018(3).
- [14] 孙立军. 沥青路面结构行为理论[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [15] 吴栋, 田小革, 董凡荣. 基于灰色理论的沥青路面使用性能预测模型[J]. 中外公路, 2017(5).
- [16] 彭祖祥. 基于累加数列的沥青路面性能衰变模型研究[J]. 中外公路, 2018(5).
- [17] 周岚, 倪富健, 王浩仰, 等. 基于弯沉盆的高速公路沥青混凝土路面结构状况评价研究[J]. 公路, 2015(9).
- [18] 林有贵, 栗晖, 易强, 等. 在役沥青路面水泥稳定碎石基层缺陷注浆补技术研究(第一期)试验路施工报告[R], 2019.