国省道沥青路面基层注浆补强技术探讨

杨 帆

（灌南畅安交通工程有限公司，江苏 连云港 222500）

摘 要 国省道沥青路面长期承受重载交通、温湿循环及雨水渗入，基层容易出现开裂、松散、脱空和唧浆，单纯处治面层往往难以消除结构性病害。本文从现场病害精准判别入手，明确基层注浆的适用边界与前提条件，重点阐述施工准备、浆液配制、孔位布设、钻孔成孔、分序注浆、参数动态控制和封孔养生全流程关键技术，结合公路实体工程案例验证补强效果，以期为国内干线公路非开挖养护提供实操参考。

关键词 国省道；沥青路面；基层病害；注浆补强；浆液配制

中图分类号：U416.2 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.29.014

0 引言

国省道连接城市、县域及产业节点，重型车辆占比通常高于一般城市道路，重型荷载反复作用会加快路面结构的疲劳损伤速度。面层裂缝形成后，雨水沿裂隙进入基层，车辆荷载反复挤压结构内部的水与细料，病害会由局部开裂逐步发展为松散、脱空和沉陷。基层注浆能够在较少铣刨的条件下恢复结构连续性，且占道时间较短，但施工效果受选段、材料、孔位和压力共同影响。因而，工程应用不能只追求灌入量，还需建立与病害状态相匹配的施工控制方法。

1 国省道沥青路面基层病害分析

1.1 基层病害表现

国省道常见路面结构由8 cm～12 cm沥青面层、30 cm～40 cm水泥稳定碎石基层组成[1]。基层开裂初期，路表多出现间距较大的横向反射裂缝，缝宽常由不足1 mm扩展至3 mm以上；雨后重车驶过时，缝口若喷出灰白色浆液，表明基层细料已经被动水带走。基层局部松散后，轮迹带会出现龟裂、沉陷或轻微跳车。层间脱空则会使裂缝两侧弯沉差增大，落锤式弯沉检测中病害点中心弯沉通常明显高于相邻完好区。外观调查只能反映病害结果，现场还需用400 MHz～900 MHz探地雷达识别强反射和同相轴中断区域，再通过钻芯确认松散深度、层间黏结及基层含水状态。

1.2 基层病害成因

基层病害的形成具有累积性，水泥稳定碎石在失水、降温阶段产生干缩和温缩应力，当拉应力超过材料抗拉强度时，裂缝首先在薄弱断面形成。车辆轴载长期作用后，裂缝尖端的弯拉应力反复集中，基层裂缝逐渐向面层扩展。面层灌缝不及时、路肩排水不畅或中央分隔带渗水时，水分进入裂缝并在轮载下产生泵吸作用，基层细颗粒不断迁移，原有裂缝随之扩大为松散带和脱空区[2]。施工阶段级配离析、压实度不足、养生时间不够也会削弱板体性。若病害源于路基不均匀沉降，路表往往呈连续沉陷，弯沉值大范围偏高，此时只处理基层难以稳定结构。

1.3 注浆补强适用条件

注浆补强适用于基层仍保有基本骨架，但局部存在裂缝、松散、脱空或层间黏结不足的路段。工程可结合弯沉、雷达和芯样进行综合判断：病害范围较分散，基层芯样虽有断裂但未完全粉化，注浆后具有形成连续加固体的空间，采用该技术较为合适；路面仅有表面老化且结构强度稳定时，没有必要钻孔注浆[3]。若路面结构强度指数低于60，或弯沉代表值达到150（0.01 mm）以上，应继续检查路基病害；基层大面积碎裂、路基持续沉降、边坡水害未得到控制时，宜先换填或处治深层软弱部位。浆液进入裂缝和孔隙后置换积水，硬化后重新建立荷载传递路径，使局部应力集中转为较连续的扩散。

2 国省道沥青路面基层注浆补强技术

2.1 施工准备

施工前应完成交通组织、病害复核、试验段施工和设备检查。作业区按50 m～100 m分段封闭，在上游设置渐变段、缓冲区及限速标志。技术人员应将雷达异常区、弯沉超限点和芯样结果叠合到同一桩号图上，划定实际处理范围，避免仅沿路表裂缝机械布孔[4]。

作者简介：杨帆（1999-），女，本科，助理工程师，研究方向：公路工程。

试验段选取病害程度具有代表性的 20 m～30 m 路段，通过 3 个～5 个孔组观察吸浆量、返浆位置和路面抬升，再校正孔距与压力。注浆泵最大压力宜达到 6 MPa～10 MPa；制浆机、储浆桶、钻机、高压清洗设备需先以清水试运转。

2.2 浆液配制

基层补强可采用 42.5 级普通硅酸盐水泥，也可根据开放交通时间选用普通型或快凝早强型地聚合物。水泥基浆液的水胶比通常控制在 0.35～0.50，粉煤灰宜采用Ⅱ级产品，烧失量不宜超过 5%。浆液过稠会增加堵管风险，过稀则容易泌水和收缩，因此材料配比必须以可灌性和硬化稳定性为主。普通型地聚合物可按干料与水质量比 1:0.30～0.40 试配，流动时间宜不超过 20 s，泌水率不超过 0.4%，1 d 抗压强度不低于 5 MPa，7 d 不低于 30 MPa；快凝早强材料 4 h 抗压强度宜达到 4 MPa 以上。现场配料应使用计量装置，先加水和液体外加剂，再投入胶凝材料，高速搅拌不少于 2 min。每盘浆液均需在可操作时间内用完，停放期间保持低速搅动，出现结团、明显离析或初凝后不得加水继续使用。

2.3 孔位布设

孔位应围绕病害体布置，整体承载补强多采用梅花形布孔，纵横间距可取 1.0 m～3.0 m；横向裂缝修复可在裂缝两侧布置等边三角形孔组，临近两孔中心间距宜为 0.5 m～1.5 m；沉陷、龟裂和雷达强反射区可适当加密。单孔理论注浆量可根据浆液覆盖范围进行初估：

$$Q=\pi R^2hn(1+\lambda) \quad (1)$$

式（1）中，Q 为单孔理论注浆量，m^3；R 为有效扩散半径，m；h 为目标层有效厚度，m；n 为可填充孔隙率；λ 为施工损耗系数，通常可取 0.05～0.15。计算结果只能作为材料计划依据，实际孔距仍需通过试验段的返浆范围和注浆量分布修正。放样后应在路面标注孔号、设计深度，孔位偏差控制在 100 mm 以内。

2.4 钻孔成孔

钻孔孔径通常取 40 mm～60 mm，常用 50 mm。孔深应穿过面层并到达松散基层或层间脱空位置，不能只钻至面层底部，也不宜无依据进入路基。钻进时钻杆保持垂直，可在钻杆上设置深度标记，成孔后用带刻度探杆逐孔复核[5]。采用干式钻孔时，应上下抽动钻杆并配合吸尘设备排出粉尘、碎石；采用水钻时，孔内泥浆会降低浆液黏结能力，必须抽排积水并延长后续排浆时间。孔壁坍塌或孔底堵塞会造成压力虚高，可使用压缩空气清孔，但不得长时间高压吹扫。清孔完成后立即安装注浆管，管口密封长度应满足压力要求，临时待注孔还需加盖，防止车辆带入砂粒。钻孔中若发现基层完全粉化或深层空洞，应暂停相邻孔施工，重新核定处治方案。

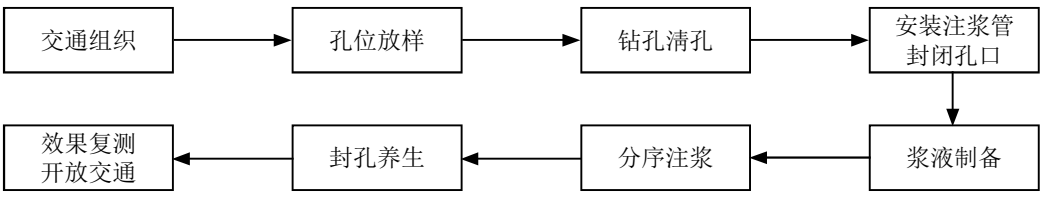
2.5 分序注浆

正式注浆宜按先外围后内部、先低处后高处、间隔跳孔的顺序实施。外围孔先形成约束，可减少浆液向路肩或边沟无效扩散；低处先注有利于排出积水和空气；跳孔施工能够避免相邻孔同时受压引起串浆。基层注浆补强施工流程如图 1 所示。

每孔开始时先采用低压慢注，确认管路通畅后再分级升压，每级稳定 20 s～30 s，观察压力、瞬时流量和相邻裂缝反应。临孔返浆说明扩散体已经连通，应先停泵封闭返浆孔，再回到原孔继续稳注；裂缝口冒浆时可用速凝材料临时封堵。单孔应建立记录卡，写明孔号、孔深、起止压力、持续时间、累计注浆量、返浆位置和路面抬升值。完成一个作业单元后及时清洗泵体和管路，避免残浆硬化造成后续压力读数失真。

2.6 注浆参数控制

注浆压力需要与病害类型相匹配，整体承载补强的控制压力一般为 2.0 MPa～4.0 MPa，基层局部裂缝修复可控制在 1.5 MPa～2.5 MPa，单孔持续时间不少于 2 min。压力达到设计上限且吸浆量持续下降，或累计注浆量达到计算值并保持稳定时，可结束该孔施工。路面抬升必须同步监测，控制值不应超过 20 mm；实际养护工程应把预警值设在 5 mm～10 mm，以便在结构出现明显隆起前调整压力。泵机活塞停止工作超过 15 s、压力突然升高、管路剧烈振动或裂缝快速扩展时，应立即卸压停注[6]。常用施工指标如表 1 所示，表中数据用于现场初始控制，最终参数仍应以材料试验和试验段结果为准。注浆量很大而压力长期不上升，多提



全过程同步记录孔深、压力、注浆量、返浆位置和路面抬升

图 1 基层注浆补强施工流程图

表1 基层注浆补强主要施工参数

项目	技术参数	控制说明
注浆材料	42.5级水泥或地聚合物	流动时间≤20 s，泌水率≤0.4%
布孔尺度	孔径40 mm～60 mm	整体孔距1.0 m～3.0 m，局部孔距0.5～1.5 m
注浆压力	整体2.0 MPa～4.0 MPa	局部裂缝1.5 MPa～2.5 MPa
过程控制	单孔持续时间≥2 min	路面抬升≤20 mm
封闭养生	普通型≥24 h	快凝早强型≥4 h

示贯通裂缝、边沟泄浆或较大脱空，应先查明通道，再采用稠浆封边和分次补注。

2.7 封孔养生

注浆结束后应缓慢卸压，拔出注浆管时用容器承接余浆，并立即使用塞体临时封孔。待孔内浆液稳定后，采用高强水泥砂浆或与面层性能相适应的修补材料封闭孔口，孔顶应与原路面齐平，既不能形成车辆冲击点，也不能留下积水凹槽。普通型地聚合物封闭养生时间不少于24 h，快凝早强型材料可在4 h后根据强度检测决定是否开放交通，普通水泥基浆液则需依据凝结和早期强度确定。养生期间不得让重车碾压注浆区，气温连续5 d平均低于5 ℃或持续降雨时应采取保温、防水措施。开放交通前需检查孔口、裂缝和路面高程，在原弯沉点进行复测。若雷达仍显示连续强反射，或弯沉改善不足，应定位补注，不得仅凭路表清洁和孔口完整判定施工合格。

3 国省道沥青路面基层注浆补强工程案例

345省道K41＋550～K42＋050上行段长500 m，双向四车道，路面结构为5 cm SMA-13、7 cm AC-20、34 cm水泥稳定碎石基层和20 cm石灰土底基层，通车11年后日均交通量约1.45万辆，重型车辆占8.07%。调查共发现横向裂缝43条、唧浆点9处，局部沉陷为12 mm～31 mm。400 MHz三维探地雷达检出14处强反射区，总面积612 m^2；8个芯样中6个基层松散，5个存在层间分离。注浆前FWD代表弯沉为46.8（0.01 mm），相邻完好路段为31.5（0.01 mm），因此项目采用基层局部注浆而未进行大面积换填。浆液由42.5级普通硅酸盐水泥和Ⅱ级粉煤灰组成，粉煤灰占胶凝材料质量的15%，水胶比0.42，稳定剂掺量0.3%，实测流动时间18.2 s，泌水率0.25%，1 d抗压强度7.3 MPa，7 d达到31.6 MPa。施工按梅花形布孔，正常区孔距1.5 m，唧浆和沉陷处加密至0.75 m，孔径50 mm，孔深0.52 m～0.58 m，共完成326孔。注浆采用低压起注、逐级升压方式，工作压力控制在1.8 MPa～2.4 MPa，单孔持续2 min～6 min，总注浆量18.6 m^3，平均单孔57.1 L，最大路面抬升4.6 mm，未出现结构性隆起。24 h养生后按原点位复测，代表弯沉降至33.9（0.01 mm）。弯沉降低率按下式计算：

$$\eta=\frac{L_0-L_1}{L_0}\times 100\% \quad (2)$$

式（2）中，η为弯沉降低率，L_0为注浆前弯沉值，L_1为注浆后弯沉值，本段计算结果为27.6%。雷达强反射面积由612 m^2降至118 m^2，缩减80.7%；复核的6个芯样中5个可见浆体连续填充，1个孔位因扩散不足实施二次补注。开放交通6个月后，处治区未再出现唧浆，仅在加固区边缘发现2条宽度不足1 mm的细裂缝。

案例表明，准确划定病害体、控制浆液流动性并采用分序稳压施工，可减少基层铣刨并恢复承载能力；对于加固区边缘和深层沉降段，仍需保留跟踪检测。

4 结束语

国省道沥青路面基层注浆补强的重点是让材料、孔位和压力与病害状态相匹配。施工前应通过弯沉、雷达和钻芯确定处理边界，施工中以试验段校准参数，严格控制清孔、分序注浆、路面抬升和养生时间，注后再用同点复测验证效果。需注意的是，该技术适合基层局部开裂、松散和脱空路段。面对大面积粉化或路基持续沉降，仍应采用换填或深层加固措施。

参考文献：

[1] 辽宁省市场监督管理局.公路养护工程基层注浆补强技术规范:DB21/T 20012-2024[S].2024.
[2] 吴小冬.黄太公路注浆施工技术与质量控制研究[J].工程建设,2025,08(08):94-96.
[3] 蔡迎春,谢申健.移动荷载下道路病害的弯沉盆特性[J].中外公路,2024,44(03):270-281.
[4] 刘宪明,夏晗,胡冬平,等.公路路面损坏与内部隐伏病害的关联性研究[J].中外公路,2024,44(05):75-82.
[5] 张永杰,李嘉兵,邓沛宇,等.矿渣-粉煤灰地聚物注浆材料配比优化方法研究[J].硅酸盐通报,2024,43(10):3726-3735.
[6] 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(04):22-25,31,208.