沥青路面纵向裂缝注浆加固调平技术研究

孙培芃
（中交第一航务工程局有限公司）

摘　要：为解决高速公路沥青路面纵向裂缝伴生错台、沉陷的病害问题，以某双向四车道高速 52 m 长病害路段为研究对象，创新采用钻孔注浆化学加固及沉陷调平技术。通过优化水泥-改性水玻璃浆液配比，采用梅花形布孔、“自下而上、分区推进、先重后轻”的注浆工艺，结合“观察法+测量法”双重质量控制，实现路基加固与沉陷抬升同步完成。该工艺突破传统表层修补局限，从根源治理路基病害，经检测路基承载力提升 124%，裂缝闭合率 92.5%，错台消除率 90.6%，路面平整度显著改善，2 a 观测效果稳定，使用寿命超 8 a，为同类病害治理提供了高效耐久的技术方案。

关键词：高速公路；沥青路面；纵向裂缝；钻孔注浆；化学加固；沉陷调平

0　引言

高速公路作为交通运输体系核心，通行质量关乎区域经济发展与公众出行安全，沥青路面因诸多优势被广泛应用于高速公路面层。但在长期行车荷载、自然环境侵蚀及施工缺陷等多重因素影响下，沥青路面易出现各类病害，纵向裂缝尤为突出[1]。纵向裂缝多分布于填挖交界处、陡坡路段等区域，初期缝宽较小，随雨水入渗与荷载反复作用会逐渐扩展，引发错台、沉陷等次生灾害，破坏路面结构完整性，大幅降低行车安全性与舒适度，甚至引发交通事故[2]。据统计，我国高速公路沥青路面纵向裂缝病害发生率超 30%，填挖交界路段高达 60%，未及时处理的路段使用寿命会缩短 30%~50%，年均养护成本增加 2~3 倍[3]。

近年来，国外聚焦环保型浆液材料开发与智能化施工技术升级，国内初期以开槽灌缝、贴缝带修补等传统技术为主[4]，但现有技术存在成本高、工艺复杂、耐久性不足或无法根治路基病害等问题[5]。本文针对某高速公路填挖交界路段的纵向裂缝及沉陷病害，开展钻孔注浆化学加固及沉陷调平技术研究，深入分析病害成因机理、优化浆液配比与施工工艺、验证工程效果并进行经济性分析，旨在提供高效耐久的修补技术，为同类病害治理提供科学依据与工程借鉴。

1　工程概况

某高速公路位于我国南方多雨地区，为双向四车道高速公路，设计时速 120 km/h，路面结构采用沥青混凝土面层，上面层为 4 cm 厚 AC-13 改性沥青混凝土，中面层为 6 cm 厚 AC-20 普通沥青混凝土，下面层为 8 cm 厚 AC-25 普通沥青混凝土，基层为 36 cm 厚水泥稳定碎石，底基层为 20 cm 厚级配碎石，总厚度 74 cm。

研究路段位于 K125+320—K125+372 区间，全长 52 m，处于纵向陡坡填挖交界结合处，填方高度 5~8 m，挖方深度 3~6 m。该路段通车运营 5 a 后，路面出现明显纵向裂缝，横跨超车道及行车道，伴随严重错台与整体沉陷，影响行车安全与舒适度，亟需进行专项治理。

2　纵向裂缝处理技术

2.1　技术原理

钻孔注浆化学加固及沉陷调平技术的核心原理是通过钻孔将特制化学浆液注入路基软弱土体中，通过浆液的流动性填充土体空隙与裂隙，同时浆液与土体发生一系列物理化学反应，形成具有高强度、高稳定性的固结体，从而提高路基土体的密实度、抗剪强度与承载能力。在注浆过程中，通过控制注浆压力与注浆量，逐步抬升沉陷路面，恢复至设计标高，消除错台与跳车病害[6]。

该技术的作用机制主要包括以下 3 个方面：1）填充作用：浆液在压力作用下渗透扩散，填充路基土体中的空隙、裂隙及颗粒间孔隙，减少土体孔隙率，提高密实度；2）胶结作用：水泥与水玻璃发生化学反应，生成水化硅酸钙、水化铝酸钙等胶凝物质，将松散的土体颗粒胶结在一起，

形成连续的固结体，提高土体的黏聚力与内摩擦角；3）抬升作用：注浆压力产生的向上推力与浆液凝固膨胀力共同作用，缓慢抬升沉陷的路面结构，使路面恢复至设计标高，同时闭合纵向裂缝。

2.2　浆液材料选择与优化

2.2.1　浆液材料选择

考虑到工程成本、施工可行性与加固效果，本次选用水泥–改性水玻璃双液浆液，主要原材料包括：1）水泥：选用符合 GB 175—2023《通用硅酸盐水泥》要求的普通硅酸盐水泥，其具有强度发展快、水化热适中、成本较低等优势；2）水玻璃：选用模数为 2.8~3.2、浓度为 1 027~1 028 kg/m^3 的工业水玻璃，作为速凝剂与早强剂，可有效缩短浆液凝结时间，提高早期强度；3）水：采用清洁饮用水，符合 JGJ 63—2006《混凝土用水标准》要求；4）外加剂：适量添加减水剂（聚羧酸系高效减水剂），改善浆液流动性，提高固结体强度。

2.2.2　浆液配比优化试验

为确定最佳浆液配比，开展室内正交试验，以水灰比、水玻璃掺量（占水泥重量百分比）为试验因素，每个因素设置 3 个水平，考察浆液凝结时间、28 d 抗压强度、扩散半径等性能指标，试验方案与结果如表 1 所示。

表 1　浆液配比正交试验方案与结果

试验编号	水灰比	水玻璃掺量/%	凝结时间/s	28 d 抗压强度/MPa	扩散半径/m
1	0.40	10.0	120	18.5	2.1
2	0.40	17.5	95	22.3	2.5
3	0.40	25.0	70	20.1	2.3
4	0.45	10.0	105	16.8	2.3
5	0.45	17.5	85	23.5	2.8
6	0.45	25.0	65	21.2	2.6
7	0.50	10.0	130	14.2	2.5
8	0.50	17.5	100	18.9	3.0
9	0.50	25.0	75	16.5	2.8

通过极差分析与方差分析，得出以下结论：1）水灰比与水玻璃掺量对浆液凝结时间均有显著影响，水灰比越小、水玻璃掺量越高，凝结时间越短；2）28 d 抗压强度随水玻璃掺量增加先升高后降低，在掺量 17.5%时达到峰值；水灰比越小，抗压强度越高；3）扩散半径随水灰比增大而增大，随水玻璃掺量增加先增大后减小。

结合工程实际要求（凝结时间控制在 90 s 左右，扩散半径 2~3 m，28 d 抗压强度≥20 MPa），确定最佳浆液配比为水:水泥=0.45:1（质量比），水玻璃掺量为水泥重量的 10%~25%（可根据现场路基情况调整），减水剂掺量为水泥重量的 0.5%。该配比下，浆液凝结时间为 85~90 s，28 d 抗压强度为 23.5 MPa，扩散半径 2.8 m，满足工程需求。

2.2.3　浆液性能指标

优化后的水泥–改性水玻璃浆液主要性能指标如表 2 所示，均符合 DBJ/T13–196—2014《水泥净浆材料配合比设计及试验规程》与 GB 8076—2016《混凝土外加剂规范》要求。

表 2　浆液主要性能指标

性能指标	测试值	规范要求
凝结时间/s	85~90	≤120
28 d 抗压强度/MPa	23.5	≥15
扩散半径/m	2.8	2~3
流动性/s	18~20	15~25
固结体渗透系数/（cm·s^{-1}）	1.2×10^{-6}	≤1×10^{-5}

3　钻孔注浆施工工艺

3.1　布孔

在路面布置灌浆孔，纵向孔距 3 m，横向孔距 2~3 m，呈梅花形分布；孔深 3~6 m，穿透全厚度软弱层土体（根据地质雷达探测结果调整，确保钻孔深度达到软弱层底部以下 0.5 m），遇特殊情况另行研究处理；钻孔直径 100 mm，灌浆管外径 20 mm，确保浆液顺利注入。该路段全长 52 m，共布置注浆孔 42 个，其中沉陷严重区域（20 m 长）布置 20 个孔，其余区域布置 22 个孔，孔位布置如图 1 所示。

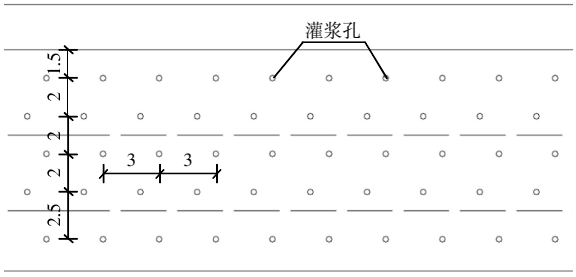


图 1　孔位布置示意图

3.2　钻孔与清孔

本文采用全站仪精确放样孔位，确保钻孔位置偏差≤5 cm。选用 QZ–100 型潜孔钻机，该钻机重量轻、机动性强，适用于沥青路面钻孔，钻孔效率高、孔壁规整。钻机安装时，需调整钻机水平，固定牢固，确保钻机底座与路面紧密贴合，防止钻孔过程中钻机移位。钻孔速度控制在 5~

8 cm/min，避免孔壁坍塌；钻孔过程中实时记录地层情况，若遇硬岩或障碍物，及时调整钻孔角度或孔位。钻孔至设计深度后，采用 0.5 MPa 压缩空气吹扫孔内岩粉、杂物，吹扫时间不少于 3 min，清孔后及时封堵孔口，防止杂物二次进入。

3.3　灌浆

采用“自下而上、分区推进、先重后轻”的注浆顺序。每个注浆孔采用自下而上分段注浆，每次提升灌浆管高度 50~80 cm，直至距离孔口 1 m 位置停止提升，确保全灌浆段路基软弱土体得到充分加固；将施工路段划分为多个施工区域(每个区域 10~15 m)，从沉陷严重区域向轻微区域推进，从裂缝两侧向中间注浆，避免浆液被裂缝引流，确保加固均匀；优先处理沉陷量大、裂缝宽的区域，再处理轻微病害区域，提高施工效率与治理效果。

注浆过程中采用“观察法+测量法”双重质量控制。安排专人实时观察路面情况，包括裂缝变化(是否闭合、是否产生新裂缝)、路面是否隆起、浆液是否从裂缝或孔壁溢出等，要求工后路面整洁，无新增隆起变形病害。同时，采用拉线法与平整度仪相结合的方式检测路面平整度，注浆范围内 15 m 拉线，线与路面的间隙≤10 mm；每 5 m 设置一个平整度检测点，实时监测路面平整度变化，确保达到设计要求。

4　效果验证

4.1　检测项目与方法

施工完成后，采用现场检测与长期观测相结合的方式验证工程效果，检测项目包括路基承载力、路面平整度、裂缝闭合程度、错台高度及长期使用状况，检测方法如下。

1）路基承载力：采用平板载荷试验(依据 JTG E60—2008《公路路基路面现场测试规程》)，在注浆区域随机选取 10 个检测点，测试路基顶面承载力。

2）路面平整度：采用连续式平整度仪，检测速度 5 km/h，每 10 m 记录一个数据，计算 *IRI*(平整度指数)值。

3）裂缝闭合程度：采用裂缝宽度尺，测量裂缝各段落缝宽，计算裂缝闭合率。

4）错台高度：采用水准仪测量裂缝两侧路面标高差，评估错台消除情况。

5）长期观测：施工完成后 6 个月、1 a、2 a 进行跟踪观测，记录路面病害复发情况、平整度变化及路基沉降量。

4.2　检测结果与分析

4.2.1　路基承载力

注浆前后路基承载力检测结果如表 3 所示。注浆前路基承载力平均值为 145 kPa，远低于设计要求的 300 kPa；注浆后路基承载力平均值达到 325 kPa，最小值为 305 kPa，均满足设计要求，承载力提升 124%，表明注浆加固有效提高了路基土体的承载能力。

表 3　注浆前后路基承载力检测结果

项目	注浆前/kPa	注浆后/kPa	提升幅度/%
1	138	312	126
2	142	305	115
3	150	330	120
4	148	328	122
5	155	340	119
6	140	315	125
7	146	322	121
8	152	335	120
9	139	308	122
10	149	325	118
平均值	145	325	124

4.2.2　路面平整度

注浆前后路面平整度检测结果如表 4 所示。注浆前该路段 *IRI* 平均值为 3.8 m/km，不符合规范要求(≤2.0 m/km)；注浆后 *IRI* 平均值降至 1.7 m/km，最大值为 1.9 m/km，均满足规范要求，路面平整度显著改善，行车舒适性大幅提升。

表 4　注浆前后路面平整度检测结果

项目	注浆前 *IRI* 值/(m·km^{-1})	注浆后 *IRI* 值/(m·km^{-1})	改善幅度/%
K125+320—K125+330	3.5	1.6	54.3
K125+330—K125+340	4.2	1.8	57.1
K125+340—K125+350	4.0	1.9	52.5
K125+350—K125+360	3.7	1.7	54.1
K125+360—K125+372	3.6	1.6	55.6
平均值	3.8	1.7	55.3

4.2.3　裂缝闭合程度与错台高度

注浆前该路段纵向裂缝宽度为 0.5~4.0 cm，平均缝宽 2.2 cm，同时存在 2~5 cm 的错台，平均错台高度 3.2 cm，跳车病害突出；注浆后裂缝宽度缩小至 0.1~0.2 cm，平均缝宽仅 0.16 cm，裂缝

闭合率达 92.5%，错台高度降至 0.2~0.5 cm，平均（错台高度）为 0.3 cm，错台消除率为 90.6%，跳车病害被彻底消除，路面结构完整性得以恢复。

4.2.4　长期观测结果

长期观测数据显示，施工完成后 6 个月、1 a、2 a，路面未出现新的裂缝、沉陷或错台病害，观测结果如表 5 所示。

表 5　长期观测结果统计表

观测时间	*IRI* 平均值/（m·km^{-1}）	裂缝宽度变化	路基沉降量/cm
施工完成后 6 个月	1.75	无变化	≤0.3
施工完成后 1 a	1.80	无变化	≤0.5
施工完成后 2 a	1.85	无变化	≤0.6

长期观测结果表明，该技术治理效果稳定，耐久性良好，能够有效抵抗行车荷载与自然环境的长期作用，延长路面使用寿命。

5　效果验证

选取该路段相邻的另一纵向裂缝病害路段（病害程度相近，长 50 m）作为对比组，采用传统“开槽灌缝+薄层罩面”技术处理，对比钻孔注浆化学加固及沉陷调平技术与传统技术的工程造价，如表 6 所示。

表 6　技术成本对比表

项目	钻孔注浆化学加固及沉陷调平技术/（元·m^{-1}）	传统技术/（元·m^{-1}）	成本差异/%
原材料	210	120	+75.0
设备租赁	60	40	+50.0
人工	30	25	+20.0
其他（交通疏导、安全防护等）	20	35	–42.9
总成本	320	220	+45.5
注：成本差异中正值表示钻孔注浆化学加固及沉陷调平技术成本高于传统技术，负值表示成本低于传统技术。			

从单次施工成本角度分析，钻孔注浆化学加固及沉陷调平技术成本（320 元/m）相较于传统技术成本（220 元/m）高出 45.5%。但传统技术仅能处理路面表层病害，无法根治路基问题，病害易复发，需定期养护。钻孔注浆化学加固及沉陷调平技术一次治理可维持 8 a 以上使用寿命；传统技术使用寿命仅为 2~3 a，需多次维修。

采用寿命周期成本分析方法，对比 2 种技术在 8 a 使用周期内的总成本（包括初始施工成本与后续养护成本），如表 7 所示。

表 7　寿命周期成本对比表

技术类型	初始施工成本/（元·m^{-1}）	后续养护次数/次	每次养护成本/（元·m^{-1}）	养护总成本/（元·m^{-1}）	寿命周期总成本/（元·m^{-1}）	年均成本/（元·m^{-1}）
钻孔注浆化学加固及沉陷调平技术	320	0	0	0	320	40
传统技术	220	3	180	540	760	95

由表 7 可知，在 8 a 使用周期内，钻孔注浆化学加固及沉陷调平技术寿命周期总成本（320 元/m）远低于传统技术成本（760 元/m），年均成本仅为传统技术成本的 42.1%。因此，从长期经济效益角度分析，钻孔注浆化学加固及沉陷调平技术更具优势。

6　结语

本文通过技术研究与工程应用，证实优化后的水泥–改性水玻璃浆液适配钻孔注浆技术需求，能有效解决高速公路纵向裂缝及沉陷病害，显著提升路基承载与路面平整性，且寿命周期成本远低于传统技术，施工便捷、对交通影响小，适用于填挖交界等路段病害治理。未来可进一步研发环保高性能浆液材料，融合无人机勘察、物联网监测等技术实现施工智能化升级，并拓展技术在横向裂缝、坑槽等其他病害及市政道路、机场跑道等工程领域的应用场景。

参考文献：

[1] TJG 5142—2019 公路沥青路面养护技术规范[S].
[2] 郑健龙. 基于结构层寿命递增的耐久性沥青路面设计新思想[J]. 中国公路学报，2014，27（1）：1–7.
[3] 康敬东. 中国高速公路沥青路面养护[J]. 建筑机械，2006（17）：9–11.
[4] 张作海. 公路路基路面工程质量控制方法研究[D]. 西安：长安大学，2009.
[5] 江姗. 公路路面裂缝形成机理及修补技术研究[D]. 西安：长安大学，2011.
[6] DBJ/T 13–196—2014 水泥净浆材料配合比设计及试验规程[S].