

# 高速公路路基沉降病害的注浆加固方法应用研究

米 丰

安徽建工公路桥梁建设集团有限公司 安徽 合肥 230031

**【摘要】**：高速公路作为交通网络的核心枢纽，其路基稳定性直接决定通行安全与运营寿命。路基沉降是公路工程中频发的典型病害，受地质条件、施工工艺、水文环境及长期荷载等多重因素影响，易引发路面开裂、平整度下降等问题，严重时会导致交通中断，威胁驾乘人员安全并造成巨额维修成本。注浆加固技术凭借施工便捷、成本可控、加固效果显著等优势，成为治理路基沉降的主流手段。本文立足高速公路路基沉降病害的成因与危害，探讨注浆加固技术的应用措施，以为同类工程的病害治理提供实践参考，助力提升高速公路路基工程质量与长期稳定性。

**【关键词】**：高速公路；路基；沉降病害；注浆加固；应用

DOI:10.12417/2811-0722.26.04.057

## 引言

对于高速公路的路基沉降处理来说，通常所用的方式是对沉降路段实施全翻处理，并确保路基软弱部分得到精准化处理。而今常用的处理技术主要涵盖水泥混凝土搅拌桩和换填以及强夯等，然而以上技术的实施并不能达到新建公路的标准。作为新时期的施工技术方式，注浆加固技术在高速公路的路基处理中的作用近些年来愈发突出，特别是在应对桥头跳车处理方面效果显著。关于此类技术的实施，其主要是借助于在基层结构中注入浆液的方式来具体进行，进而使得之前出现裂缝的材料和组织重新凝聚，以达到巩固结构稳定性和坚实性的目的，而这对于后续的防护处理也有着极其重要的作用。

## 1 高速公路路基沉降病害的成因与危害

### 1.1 地质条件——路基沉降的先天制约因素

地质条件是影响路基稳定性的基础因素，也是导致沉降的“先天隐患”。不同地质环境下，路基承受荷载的能力存在显著差异。在软土地基区域，土壤颗粒间隙大、含水量高，压缩性强，当路基上方承受车辆长期荷载与自身重量时，土壤颗粒易发生挤压变形，导致路基缓慢下沉。此外，特殊土质地基如膨胀土、盐渍土等，其物理化学性质不稳定，遇水易膨胀、失水易收缩，反复的体积变化会破坏路基结构完整性，进而引发沉降。同时，地下水水位变化也会间接影响地质稳定性，水位上升会降低土壤密实度，削弱地基承载能力。水位下降则可能导致土壤固结压缩，加剧路基沉降趋势，这些地质因素共同构成了路基沉降的先天制约。

### 1.2 施工质量——路基沉降的人为关键诱因

施工环节的质量控制不到位，是引发路基沉降的重要人为因素。在路基填筑过程中，若压实作业不达标，土壤密实度不足，路基内部存在大量空隙，后续在荷载作用下，空隙会逐渐被压缩，导致路基整体下沉。排水系统施工不完善同样会加剧沉降问题，若路基周边排水设施布局不合理或施工质量差，雨水、地下水易在路基内部积聚，降低土壤强度，破坏路基结构

稳定性，长期积累便会引发沉降。此外，施工顺序紊乱也会对路基稳定性产生负面影响，如未按照“分层填筑、分层压实”的规范流程施工，或在地基处理未达到设计要求时便进行后续作业，会导致路基受力不均，为后期沉降埋下隐患。

### 1.3 材料特性——路基沉降的内在影响要素

路基填筑材料的特性，直接决定了路基的承载能力与抗变形能力，是影响沉降的内在要素。若选用的填料颗粒级配不合理，如细颗粒含量过高，遇水后易发生软化，降低路基整体强度；粗颗粒含量过高且未充分压实，则会导致颗粒间空隙过大，易出现压缩变形。填料含水量控制不当也会引发问题，含水量过高时，土壤粘性增强，压实过程中易出现“橡皮土”现象，无法达到设计密实度；含水量过低则会导致土壤颗粒间粘结力不足，同样影响压实质量，这些材料问题都会使路基在后期使用中因抗变形能力不足而发生沉降。

### 1.4 环境作用——路基沉降的外部推动力量

长期的自然环境作用，会持续侵蚀路基结构，成为推动沉降的外部力量。降水是主要影响因素之一，大量雨水渗透至路基内部，会降低土壤密实度与承载能力，同时可能引发路基边坡失稳，间接加剧沉降。温度变化也会对路基产生影响，在寒冷地区，冬季路基土壤中的水分结冰膨胀，会破坏土壤结构；春季冰层融化，土壤含水量骤增，强度大幅下降，这种“冻融循环”会导致路基反复变形，最终引发沉降。此外，长期的车辆荷载反复作用，虽不属于自然环境范畴，但属于外部持续作用因素，会加速路基土壤的固结压缩，尤其在超载车辆频繁通行的路段，路基沉降速度会显著加快。

### 1.5 沉降危害——威胁公路安全与运营的连锁反应

路基沉降一旦发生，会引发一系列危害，严重威胁高速公路的安全运营与使用寿命。从行车安全角度来看，沉降会导致路面出现高低差、裂缝等病害，车辆行驶至该区域时易出现颠簸、打滑，甚至失控，大幅增加交通事故风险。从道路寿命角度分析，沉降破坏了路基的整体结构，会加速路面破损，如出

现坑槽、龟裂等，导致公路维修周期缩短，使用寿命大幅缩减。从运营成本角度而言，为修复沉降路段，需要投入大量的人力、物力与财力，不仅增加了养护成本，还可能因道路施工导致交通拥堵，影响通行效率，给社会经济发展带来间接损失。同时，严重的路基沉降若未及时处理，还可能引发路基坍塌等重大安全事故，对周边生态环境与居民生活造成不良影响。

## 2 注浆加固的原理

注浆加固治理高速公路路基沉降的核心原理，是借助专业注浆设备，将按特定配比调制的浆液（如水泥基浆液、化学浆液等），依据设计压力与流量注入路基病害区域。浆液在渗透过程中，会填充土壤颗粒间的空隙、裂缝，或与周边土体发生物理胶结、化学反应；待浆液固化后，能将松散土体胶结成整体，形成强度高、整体性好的复合结构，显著提升路基承载能力。同时，固化后的浆液可阻断水分渗透通道，减少水对路基土壤的侵蚀，增强路基抗变形能力，从而遏制沉降发展，使路基恢复稳定，为高速公路安全通行提供保障。

## 3 高速公路路基沉降病害的注浆加固方法应用策略

### 3.1 重视前期勘察与病害诊断，精准定位加固核心区域

前期勘察与病害诊断是注浆加固的基础前提，其核心目标是明确沉降范围、深度、土壤性质及病害成因，为后续加固方案制定提供数据支撑。在勘察过程中，相关部门需综合运用多种技术手段：采用地质雷达对路基内部结构进行无损探测，识别土壤空隙分布、松散区域及地下水位变化情况，确定沉降病害的具体位置与严重程度。通过钻孔取样获取不同深度的土壤样本，进行室内试验分析，测定土壤的颗粒级配、压缩系数、含水量等物理力学指标，判断路基土壤的承载能力与抗变形性能。同时，结合高速公路运营期间的沉降监测数据，分析沉降速率与发展趋势，明确病害是否处于活跃状态。基于勘察结果，对病害类型进行分类诊断，如区分因土壤松散导致的压缩性沉降、因地下水侵蚀导致的结构性沉降等，精准定位需要加固的核心区域，避免盲目施工造成资源浪费，确保注浆加固作业有的放矢。

### 3.2 开展浆液类型科学选型，匹配路基土壤特性与加固需求

浆液类型的选择直接决定注浆加固效果，需根据路基土壤特性、沉降病害类型及工程加固目标进行科学匹配。常见的注浆浆液主要分为无机浆液、有机浆液及复合浆液三大类，不同类型浆液具有不同的技术特性与适用场景。无机浆液以水泥浆、水泥-水玻璃双液浆为代表，具有材料来源广泛、成本较低、固化后强度高、环保性好等优势，适用于土壤颗粒较粗、空隙较大的路基区域，如砂类土、碎石土路基，可通过浆液填充与胶结作用，提升土壤密度与承载能力；有机浆液如丙烯酸胺类、聚氨酯类浆液，具有粘度低、流动性好、可在低渗透土壤中充分扩散的特点，适用于细颗粒土、粘性土路基，能有效填

充微小空隙，改善土壤抗渗性能，尤其适合因地下水渗透引发的路基沉降加固；复合浆液则结合无机浆液与有机浆液的优势，如水泥-聚氨酯复合浆液，既具备水泥浆液的高强度特性，又拥有聚氨酯浆液的高渗透性，适用于复杂地质条件下的路基加固，可兼顾强度提升与抗渗需求。在选型过程中，需通过室内配比试验，测试不同浆液的凝结时间、固化强度、渗透半径等指标，确保所选浆液与路基土壤特性高度匹配，满足工程加固的技术要求。

### 3.3 实施注浆参数合理设计，控制浆液扩散与加固效果

注浆参数设计是注浆加固的关键技术环节，主要包括注浆压力、注浆量、注浆孔布置、注浆顺序等参数的确定，其核心是通过合理设计控制浆液在路基土壤中的扩散范围与固结效果，避免出现浆液流失、加固不充分或过度加固等问题。注浆压力需根据路基土壤的渗透系数与埋藏深度确定，压力过低会导致浆液无法充分渗透至目标区域，加固范围不足。压力过高则可能破坏路基原有结构，引发新的裂缝或土壤扰动。通常采用分级加压方式，从低压力开始逐步提升，结合注浆量变化与现场监测数据，动态调整压力值，确保浆液在预设范围内均匀扩散。注浆量需根据加固区域的体积、土壤空隙率及浆液损耗系数进行计算，以填充全部目标空隙且不产生过量溢出为原则，可通过理论计算与现场试验相结合的方式确定，同时预留一定的损耗量，避免因浆液不足导致加固不彻底。注浆孔布置需根据勘察确定的加固区域形状与范围，采用梅花形、矩形或三角形布置方式，孔间距与孔深需结合浆液渗透半径设计，确保相邻注浆孔的浆液扩散范围能够有效衔接，形成连续的加固整体。注浆顺序则需遵循“由外及内、由浅入深”的原则，先对加固区域周边进行注浆，形成封闭帷幕，防止浆液向外部流失，再逐步向中心区域推进；同时按深度分层注浆，先加固浅层土壤，再处理深层病害，避免深层浆液对浅层已加固区域造成扰动，确保路基整体加固效果均匀稳定。

### 3.4 强化分区域分层注浆施工，适配路基结构与沉降差异

分区域分层注浆施工适用于沉降范围较大、路基土壤性质差异明显的高速公路路段，其核心是根据路基不同区域的沉降程度、土壤特性及结构要求，采用差异化的注浆方式，实现精准加固。在分区域施工方面，根据前期勘察确定的沉降严重程度，将加固区域划分为严重沉降区、中度沉降区与轻度沉降区，针对不同区域调整注浆参数：严重沉降区需增大注浆量、提高注浆压力，采用双液浆或复合浆液，加快固化速度，快速提升承载能力；中度沉降区采用常规注浆参数，以水泥浆为主，兼顾加固效果与成本控制；轻度沉降区则可减少注浆孔密度，降低注浆压力，通过少量浆液填充微小空隙，防止沉降进一步发展。在分层施工方面，根据路基深度将加固层分为表层（0-1.5m）、中层（1.5-3m）与深层（3m以上），不同层次采用不同的注浆工艺：表层路基直接承受车辆荷载，需采用高压

注浆方式,确保浆液充分固结,形成高强度加固层;中层路基处于过渡区域,采用中压注浆,平衡强度与渗透性需求;深层路基土壤压缩性较高,需采用低压慢注方式,使浆液缓慢渗透,充分填充深层空隙,避免因压力过高导致深层土壤扰动。通过分区域分层施工,可有效适配路基结构差异与沉降程度不同的需求,实现全断面、全方位的精准加固。

### 3.5 加强施工过程动态监测与质量控制,保障加固效果稳定可靠

施工过程中的动态监测与质量控制是确保注浆加固效果的重要保障,需建立完善的监测体系,实时跟踪注浆过程与路基状态变化,及时调整施工参数,防范质量风险。监测内容主要包括注浆过程监测与路基变形监测两方面:注浆过程监测需实时记录注浆压力、注浆量、浆液浓度及注浆时间等参数,通过分析参数变化趋势判断浆液扩散情况,如发现注浆压力突然下降,可能存在浆液流失通道,需及时调整浆液浓度或采用双液浆快速封堵。注浆压力骤升,则可能是浆液在局部积聚,需

降低注浆压力或暂停注浆,避免路基结构受损。路基变形监测需在注浆区域及周边布设沉降观测点,采用高精度水准仪或全站仪进行实时观测,记录注浆前后路基的沉降量与沉降速率,发现注浆过程中路基出现异常隆起或沉降加剧,则需立即停止施工,排查原因并调整方案。在质量控制方面,还需严格把控浆液制备、注浆作业及固化养护等关键环节:浆液制备需按照设计配比精确计量,采用机械搅拌确保浆液均匀,避免出现沉淀或结块;注浆作业需严格遵循设计的注浆顺序与参数,每完成一个注浆孔后,需对孔口进行封堵,防止浆液溢出;固化养护期间需控制车辆通行,避免外力扰动影响浆液固结,同时定期检测固化体强度,待强度达到设计要求后,方可恢复高速公路正常运营。

总而言之,注浆加固方法为高速公路路基沉降病害治理提供了有效路径,从勘察到养护的全流程策略,保障了路基稳定与通行安全。未来,还需持续优化技术,适配复杂工况,助力高速公路工程质量提升,为交通事业长效发展筑牢根基。

### 参考文献:

- [1] 倪晓明.公路路基沉降变形病害与注浆加固技术分析[J].运输经理世界,2024,(12):130-132.
- [2] 林森,杨钊,戴晓威.多雨山区高速公路路基沉降病害处置及无损检测方法研究[J].甘肃水利水电技术,2023,59(04):11-16+48.
- [3] 邓少梅.高速公路路基沉降注浆加固处理技术[J].交通世界,2020,(34):70-71.
- [4] 王永忠.注浆加固施工技术在高速公路路基沉降工程中的应用[J].交通世界,2020,(29):86-87.
- [5] 李有义,李珂.高速公路路基沉降中注浆加固技术分析[J].黑龙江交通科技,2020,43(02):66-67.