

公路大中修工程中路基下沉的处理与预防研究

何路青

杭州市富阳区交通建设服务保障中心, 浙江 杭州 311400

DOI:10.61369/ETQM.2025120021

摘 要： 路基作为公路结构的“承载基础”，其稳定性直接决定公路通行质量与使用寿命。在公路大中修工程中，路基下沉是高频多发问题，不仅导致路面开裂、沉降变形，还会增加养护成本、影响行车安全。本文结合公路大中修工程实际工况，分析路基下沉的核心成因（如填料不合格、压实度不足、水损害作用等），针对不同下沉类型（轻微沉降、不均匀沉降、结构性沉降）提出“换填处理、注浆加固、强夯补强”等差异化处理技术，并从“勘察设计、施工管控、后期监测”三个维度构建全流程预防体系。通过工程案例验证，该处理与预防方案可使路基工后沉降量控制在5mm/年以内，显著提升路基稳定性，为公路大中修工程质量保障提供实践参考。

关 键 词： 公路大中修；路基下沉；处理技术

Research on The Treatment and Prevention of Subgrade Subsidence in Major and Medium Repair Projects of Highways

He Luqing

Hangzhou Fuyang District Transportation Construction Service Guarantee Center, Hangzhou, Zhejiang 311400

Abstract： As the "load-bearing foundation" of highway structure, the stability of the subgrade directly determines the traffic quality and service life of the highway. In major and medium-sized highway repair projects, subgrade subsidence is a frequent and frequently-occurring problem. It not only leads to pavement cracking and settlement deformation, but also increases maintenance costs and affects driving safety. This paper, based on the actual working conditions of major and medium-sized highway repair projects, analyzes the core causes of subgrade settlement (such as substandard filling materials, insufficient compaction, water damage, etc.), and proposes differentiated treatment technologies such as "replacement and filling treatment, grouting reinforcement, and dynamic compaction reinforcement" for different settlement types (slight settlement, uneven settlement, structural settlement). And a full-process prevention system is constructed from three dimensions: "survey and design, construction control, and post-construction monitoring". Through engineering case verification, this treatment and prevention plan can control the post-construction settlement of the subgrade within 5mm per year, significantly improving the stability of the subgrade, and providing practical reference for the quality assurance of major and medium-sized highway repairs.

Keywords： major and medium repairs of highways; subgrade subsidence; processing technology

前言

当前公路大中修工程中，路基下沉处理存在两大痛点：一是“对症下药”，未深入分析下沉成因便盲目采用换填、注浆等措施，导致处理后短期内再次出现沉降；二是“重处理轻预防”，仅关注已发生的下沉病害，忽视前期勘察、施工环节的风险管控，无法从根源避免下沉问题。本文基于公路大中修工程实践，系统梳理路基下沉的成因，分类提出科学处理技术，并构建全流程预防体系，旨在为提升公路路基稳定性、延长公路使用寿命提供解决方案。

一、公路大中修工程中路基下沉的成因分析

（一）填料质量不达标：路基承载基础薄弱

填料选择或处理不当会直接导致路基承载力不足。一是填料类型不合格，部分工程用腐殖土、淤泥质土等，这类填料含水量

高、压缩性大，如某二级公路原路基用有机质超5%的黏土，运营3年下沉达8cm，远超3cm规范值；二是级配不合理，细颗粒过多易成“弹簧土”、遇水软化，粗颗粒过多则空隙大、易位移；三是含水量控制不当，过高致填料黏结机械、难达压实度，过低则颗粒摩擦力小、后期遇水易变形。

（二）施工压实质量缺陷：路基密实度不足

压实工艺、机械选型或管控不到位会导致密实度不足。一是机械选型不当，黏性土需 $\geq 300\text{kN}$ 重型振动压路机，砂性土宜用光轮压路机配合振动，用轻型压路机压黏性土会形成“表层实、深层松”；二是分层厚度超标，黏性土超 30cm 、砂性土超 50cm ，激振力传不到层底；三是检测不规范，抽检频率不足（如每 200m 未达4点）或虚假检测，致不合格路段流入下道工序。

（三）水损害长期作用：路基结构稳定性下降

雨水、地下水渗入会破坏路基结构。一是地下水浸泡，地下水位高且无盲沟等排水系统，填料软化、强度降，砂性土易颗粒流失成空洞；二是雨水渗透，路面裂缝致雨水下渗深层，形成积水冲刷颗粒；三是边坡排水不畅，无截水沟、急流槽或防护损坏，雨水冲刷边坡致坍塌，加速病害。

（四）运营荷载与自然因素叠加：路基长期累积变形

交通荷载与自然因素长期作用致累积变形。一是重载反复作用，轴载超 100kN 车辆多，压实不足路段填料颗粒位移、空隙率增大；二是温度变化，冬缩夏胀反复破坏路基完整性；三是自然灾害，地震致填料液化，洪水冲刷边坡与基底，引发塌陷沉降。

二、公路大中修工程中路基下沉的差异化处理技术

（一）轻微沉降处理：表层补强与压实

轻微沉降通常指路基沉降量 $\leq 3\text{cm}$ ，且沉降均匀、无明显裂缝，主要由表层填料压实不足或短期水损害导致，处理重点为“表层补强、提升密实度”，常用技术包括：

1. 表层换填法：清除路基表层 $50\text{--}80\text{cm}$ 范围内的松散或软化填料，更换为级配良好的碎石土或灰土（石灰含量 $8\%\text{--}12\%$ ），分层压实（压实度 $\geq 96\%$ ）。该方法适用于表层填料不合格或轻度水损害的路段——如某一级公路大中修工程中，对路基表层 3cm 轻微沉降路段采用灰土换填处理，换填后路基压实度达 97% ，运营2年后未出现再次沉降。

2. 冲击碾压补强法：使用冲击压路机（冲击能 $25\text{--}30\text{kJ}$ ）对路基表层进行冲击碾压（碾压次数 $15\text{--}20$ 遍），通过冲击能使表层填料进一步密实，提升路基承载力。该方法适用于表层压实度不足但深层填料合格的路段，具有施工速度快、成本低的优势，冲击碾压后路基表层压实度可提升 $2\%\text{--}3\%$ 。^[1]

3. 水泥粉煤灰稳定层补强法：在路基表层铺设 $15\text{--}20\text{cm}$ 厚的水泥粉煤灰稳定层（水泥含量 $3\%\text{--}5\%$ 、粉煤灰含量 $15\%\text{--}20\%$ ），分层压实后作为路基补强层。该稳定层具有强度高、水稳定性好的特点，可有效提升路基表层承载力，防止后期轻微沉降——某二级公路应用后，路基表层回弹模量从 300MPa 提升至 450MPa ，效果显著。

（二）不均匀沉降处理：注浆加固与调平

不均匀沉降指路基沉降量 $3\text{--}10\text{cm}$ ，且沉降差 $\geq 2\text{cm/m}$ ，常伴随路面裂缝、错台，主要由深层填料压实不均、局部水损害或空洞导致，处理重点为“加固深层、调整沉降差”，核心技术为注浆加固法：

1. 注浆材料选择：根据路基填料类型与水损害程度选择注浆材料——对砂性土路基，宜采用水泥-水玻璃双液浆（凝固时间

$10\text{--}30\text{s}$ ），可快速填充空隙、加固填料；对黏性土路基，采用水泥粉煤灰浆（水泥含量 $20\%\text{--}30\%$ 、粉煤灰含量 $40\%\text{--}50\%$ ），浆液渗透性强，可改善黏性土强度；对存在空洞的路基，采用水泥-膨胀剂浆（膨胀率 $3\%\text{--}5\%$ ），填充空洞的同时避免后期收缩。

2. 注浆工艺参数确定：

注浆孔布置：按“梅花形”布置注浆孔，孔距 $1.5\text{--}2.5\text{m}$ ，行距 $1.2\text{--}2.0\text{m}$ ，孔深根据沉降深度确定（通常为路基深度的 $1.2\text{--}1.5$ 倍）。

注浆压力：砂性土路基注浆压力 $0.3\text{--}0.5\text{MPa}$ ，黏性土路基 $0.5\text{--}0.8\text{MPa}$ ，避免压力过高导致路基隆起。

注浆量：按路基空隙率计算，通常每立方米填料注浆量 $0.1\text{--}0.2\text{m}^3$ ，确保浆液充分填充空隙。

3. 案例效果：某高速公路大中修工程中，对 $\text{K}120+300\text{--}\text{K}120+500$ 段（不均匀沉降量 $5\text{--}8\text{cm}$ ）采用水泥-水玻璃双液浆注浆处理，注浆后检测显示，路基深层压实度从 90% 提升至 96% ，沉降差缩小至 0.5cm/m ，运营1年后沉降量控制在 1mm 以内。^[2]

（三）结构性沉降处理：深层加固与重构

结构性沉降指路基沉降量 $> 10\text{cm}$ ，伴随路基开裂、塌陷，主要由基底承载力不足、深层填料严重不合格或水损害导致，需进行“深层加固、结构重构”，常用技术包括：

1. 强夯法：使用重型强夯机械（夯锤重量 $15\text{--}30\text{t}$ ，落距 $8\text{--}15\text{m}$ ）对路基进行强夯处理，通过巨大的冲击能使深层填料（ $3\text{--}6\text{m}$ ）密实，提升路基承载力。强夯前需在路基表层铺设 $20\text{--}30\text{cm}$ 厚的碎石垫层，避免夯锤破坏路基表层；强夯次数按“先点夯后满夯”执行，点夯 $6\text{--}8$ 遍，满夯 $2\text{--}3$ 遍。该方法适用于深层填料松散、基底承载力不足的路段，某二级公路应用后，路基深层（ 5m 处）压实度从 88% 提升至 95% ，沉降量控制在 3cm 以内。

2. 灰土挤密桩法：在路基中打入灰土挤密桩（桩径 $30\text{--}50\text{cm}$ ，桩距 $1.0\text{--}1.5\text{m}$ ），通过桩体挤压作用使周围填料密实，同时灰土桩与路基填料形成复合地基，提升整体承载力。该方法适用于黏性土路基或存在湿陷性黄土的路段，灰土桩长度根据沉降深度确定（通常 $5\text{--}8\text{m}$ ），桩体压实度 $\geq 97\%$ 。某公路大中修工程中，对湿陷性黄土路基采用灰土挤密桩处理，处理后路基湿陷性消除，运营3年后沉降量仅 2cm 。

3. 基底换填与加固法：若路基下沉由基底承载力不足导致（如基底为淤泥层），需开挖至基底，清除淤泥层，更换为碎石土或灰土（分层压实，压实度 $\geq 96\%$ ），并在基底铺设土工格栅（抗拉强度 $\geq 50\text{kN/m}$ ），增强基底整体性。某沿海公路大中修工程中，对基底淤泥层（厚度 1.5m ）采用碎石土换填+土工格栅加固处理，换填后基底承载力从 80kPa 提升至 150kPa ，彻底解决路基下沉问题。^[3]

三、公路大中修工程中路基下沉的全流程预防体系

（一）勘察设计阶段：精准把控路基设计参数

勘察设计是预防路基下沉的基础，需通过详细勘察掌握地质、水文条件，优化设计方案，确保路基设计符合实际工况：

1.详细地质水文勘察：勘察范围需覆盖路基全宽及两侧10–20m区域，勘察深度不小于路基深度的1.5倍，重点查明：

地层分布：明确路基范围内填料类型（黏性土、砂性土、碎石土等）、厚度及分布范围，避免使用不合格填料。

地下水位：确定地下水位埋深，若地下水位高于路基底面，需设计排水系统（如盲沟、渗沟）降低地下水位。

不良地质：查明是否存在淤泥层、湿陷性黄土、岩溶等不良地质，针对性制定处理方案（如换填、注浆）。

2.优化路基设计参数：

填料选择：优先选用级配良好的碎石土、砂性土作为路基填料，严禁使用腐殖土、淤泥质土；对黏性土填料，需掺入石灰（8%–12%）改善其工程性质。

压实度标准：根据公路等级确定压实度要求——高速公路、一级公路路基压实度 $\geq 96\%$ ，二级公路 $\geq 95\%$ ，三级及以下公路 $\geq 94\%$ 。

排水系统设计：完善路基排水体系，包括路基顶面封层（如沥青封层）、边坡截水沟、急流槽、地下盲沟等，确保雨水、地下水能及时排出，避免浸泡路基。^[5]

（二）施工管控阶段：严格落实质量标准

施工是确保路基质量的关键，需从“填料管控、压实工艺、排水施工”三个维度强化管控，杜绝质量隐患：

1.填料质量管控：建立“填料进场检验–现场试验–分层验收”制度——填料进场时需检测颗粒级配、含水量、有机质含量，不合格填料严禁进场；现场需进行击实试验，确定最佳含水量与最大干密度，指导压实施工；每层填料填筑后，需检测压实度，合格后方可进行下一层施工。

2.压实工艺管控：

机械选型：根据填料类型选择匹配的压实机械，黏性土选用重型振动压路机，砂性土选用光轮压路机配合振动压实。

分层厚度控制：严格按设计分层厚度施工（黏性土 $\leq 30\text{cm}$ ，砂性土 $\leq 50\text{cm}$ ），每层施工前用石灰线标注分层厚度，避免超厚填筑。

压实度检测：采用灌砂法或环刀法检测压实度，抽检频率按规范执行（每200m至少4点），检测不合格的路段需重新压实，直至达标。

3.排水施工管控：确保排水系统施工质量——盲沟、渗沟的

滤料需级配良好，避免堵塞；截水沟、急流槽的混凝土强度需符合设计要求，接缝处做好防水处理；路基顶面封层需平整、无裂缝，防止雨水渗入。

（三）后期监测阶段：动态跟踪路基稳定性

公路大中修工程完工后，需通过长期监测及时发现路基沉降趋势，提前采取干预措施，避免沉降扩大：

1.监测点布置：在路基两侧路肩、桥头、涵洞等关键部位设置沉降观测点，观测点间距50–100m，桥头路段加密至20–30m；观测点采用钢筋混凝土预制，顶部设置水准测钉，确保观测精度。^[4]

2.监测频率与标准：

监测频率：完工后1–3个月，每月监测1次；3–12个月，每3个月监测1次；1年后每6个月监测1次，连续监测2年。

预警标准：当单次沉降量 $> 2\text{cm}$ 或月沉降量 $> 5\text{mm}$ 时，启动预警，组织技术人员分析原因，采取补强措施（如注浆加固）。

3.监测数据应用：建立监测数据台账，通过数据分析掌握路基沉降规律——若发现某路段沉降速率加快，需排查是否存在水损害或重载交通过度集中的问题，及时采取针对性措施，防止沉降进一步发展。

四、结语

路基下沉治理需突破“事后补救”局限，转向“精准处理+全流程预防”的系统思路。处理上，需依下沉类型差异化施策：轻微沉降用表层补强（如冲击碾压）快速提密实度；不均匀沉降靠注浆加固填充空隙、平衡沉降差；结构性沉降需强夯或灰土挤密桩重构路基，避免二次病害。

预防上，需筑牢“勘察–施工–监测”闭环：勘察精准掌握地质水文，杜绝设计脱离实际；施工严控填料与压实，以压实度等为硬标准；监测长期跟踪数据，提前识别风险。实践证明，该体系可使路基工后沉降稳定在5mm/年以内，延长公路大中修周期3–5年，降低养护成本。

未来结合地质雷达、数字化监测等新技术，可推动治理向“数据驱动”升级，持续提升路基稳定性，为公路安全高效运营、交通基础设施高质量发展提供保障。

参考文献

- [1] 崔九平. 公路工程沉降段路基路面的施工处置方法 [J]. 四川建材, 2021, 47(07): 161–162.
- [2] 高斌. 公路工程项目沉降段路基路面的施工技术研究 [J]. 住宅与房地产, 2021(09): 223–224.
- [3] 王磊, 赵敏. 公路大中修工程路基下沉成因与注浆加固技术应用 [J]. 公路交通技术, 2023, 39(04): 38–42.
- [4] 刘杰, 陈晓. 路基水损害致沉降的机理分析及防治措施研究 [J]. 中外公路, 2022, 42(03): 56–60.
- [5] 张国栋, 李娜. 基于全流程管控的公路路基沉降预防体系构建 [J]. 交通世界, 2024(15): 135–137.