

道路桥梁过渡段不均匀沉降防治措施探讨

王艳梅

杭州华烨交通工程检测有限公司, 浙江 杭州 310000

DOI:10.61369/ERA.2025120030

摘 要 : 道路桥梁过渡段因地基刚度差异、施工质量及荷载变化等因素, 易产生不均匀沉降, 导致桥头跳车、结构损伤及行车舒适性下降。为防治此类问题, 需从设计、施工与养护三方面协同优化。设计阶段应注重刚度匹配与合理设置过渡结构; 施工中应加强地基处理与压实控制; 运营期需通过监测与维护减少沉降差异。综合运用柔性铺装、复合加固及排水改良等技术, 可有效提升过渡段的整体稳定性与耐久性, 保障桥梁与道路的安全衔接。

关 键 词 : 道路桥梁; 过渡段; 不均匀沉降; 防治措施; 结构稳定性

Discussion on Preventive Measures for Differential Settlement in Road and Bridge Transition Sections

Wang Yanmei

Hangzhou Huaye Traffic Engineering Testing Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310000

Abstract : Due to differences in foundation stiffness, construction quality, and load variations, differential settlement is prone to occur in road-bridge transition sections, leading to issues such as bridgehead bumping, structural damage, and reduced driving comfort. To prevent and address these problems, coordinated optimization is required across design, construction, and maintenance phases. During the design stage, emphasis should be placed on stiffness matching and the rational arrangement of transition structures. During construction, foundation treatment and compaction control should be strengthened. During the operational period, monitoring and maintenance should be employed to minimize settlement discrepancies. By comprehensively utilizing technologies such as flexible pavement, composite reinforcement, and drainage improvement, the overall stability and durability of transition sections can be effectively enhanced, ensuring safe integration between bridges and roads.

Keywords : road-bridge; transition section; differential settlement; preventive measures; structural stability

引言

道路与桥梁的连接部位是结构受力最复杂、病害最集中的区域之一, 其中过渡段的不均匀沉降问题尤为突出。长期的交通荷载与环境作用使该区域易出现桥头跳车、裂缝及结构变形, 不仅影响行车安全与舒适性, 还加速路基与桥梁的老化。随着交通量和车辆轴载的不断增加, 如何有效防治过渡段不均匀沉降, 成为道路与桥梁工程领域的重要研究方向, 对提升道路使用寿命和运行品质具有现实意义。

一、道路桥梁过渡段不均匀沉降的成因分析

(一) 地基差异与土体压缩性影响

道路与桥梁结构在基础形式和刚度上存在显著差异, 桥梁通常采用桩基础或扩大基础, 刚度较大, 而路基多为填土结构, 压缩性强。由于两种基础的变形特性不同, 车辆荷载和环境应力作用下, 填土区易发生较大沉降。研究表明, 在一般公路工程中, 桥头路基沉降量可达 20 ~ 60 mm, 而桥台沉降仅约 5 ~ 15 mm, 两者差值过大便形成“桥头跳车”现象^[1]。若地基未充分固结或压实度低于 95%, 则沉降速率加快, 结构差异进一步扩大, 造成

不均匀沉降累积。此外, 不同土层的压缩模量差异明显, 软土地区若未设置加固层, 其压缩变形量可高出砂土地基约 2 ~ 3 倍。实地观测发现, 在未加固的黏性软土路段, 竣工两年后累计沉降量平均达到 85 mm, 而采用桩-网复合地基加固后的沉降量仅为 32 mm, 说明加固措施对控制早期不均匀沉降具有显著效果。

(二) 施工工艺与材料控制不当

施工阶段的压实质量、填料选择及分层厚度对沉降稳定性影响极大。部分施工现场存在填料级配不均、压实机械不足或碾压遍数不足等问题, 导致密实度下降。尤其在含水量控制不当, 土体孔隙比增大, 形成滞后沉降^[2]。试验数据显示, 压实度每降低

1%，可能导致路基累计沉降量增加约8%～10%。此外，使用粉质土或高含水粘土作为过渡段填料，会因湿胀性和剪切模量低，增加不均匀沉降风险。若施工阶段未严格分层碾压或忽视排水处理，雨后地基含水量升高，将进一步引发二次压密沉降。工程监测表明，施工压实度不足可使过渡段五年后沉降量增加约30%，并可能导致台背局部下陷2～3 cm，影响车辆平顺通过与结构受力均衡^[3]。

（三）荷载与环境因素的综合作用

交通荷载的重复循环与季节性温湿变化也是重要诱因。重型货车频繁通过使得过渡段承受动态应力集中，长期累积造成土体蠕变与塑性变形。温度梯度变化引起材料热胀冷缩，雨水渗透导致地基软化，使结构刚度进一步失衡。实测表明，在重载交通（年平均交通量 2.5×10^6 辆次）下，过渡段三年累计沉降量可超过80 mm，远高于普通道路的设计允许值。若遇到汛期或冻融循环，沉降速率可提高1.5倍，局部地基甚至出现滑塌或裂缝。此外，地下水位波动亦会改变地基应力状态，使部分粘性土层产生周期性变形。长期作用下，这些环境与荷载效应会叠加形成不可逆沉降累积，导致桥头连接区结构失稳及疲劳损伤加剧，严重影响桥梁的服役寿命与安全性能。不同因素对过渡段沉降影响对比分析如表1所示

表1 不同因素对过渡段沉降影响对比分析

影响因素类型	特征描述	沉降影响幅度（mm）	占总沉降比例（%）
地基差异	桩基与填土刚度不匹配	25 - 40	45
压实质量不足	含水量偏高或压实度 <95%	15 - 25	28
材料性能差	填料湿胀性强	10 - 18	17
环境与荷载	温湿变化与重载循环	8 - 15	10

二、过渡段结构设计优化与刚度匹配策略

（一）合理控制刚度过渡梯度

道路与桥梁连接处的刚度差异是造成沉降不均的重要诱因。为缓解这种“刚柔突变”，应在设计中设置渐变刚度结构体系，实现结构力学性能的连续过渡。常见的设计做法包括分级填料换填、设置碎石垫层、级配砂石层、泡沫混凝土层、水泥稳定碎石层等方法，以构建“柔—半硬—刚”的梯度结构。通过调整不同层次材料的弹性模量，使应力在纵向和深度方向均匀传递，减少界面变形突变。实测数据显示，当刚度梯度控制在1:3～1:5之间时，可将沉降差异降低约40%，结构应力峰值下降25%。此外，桥台背后增设加筋土挡墙、土工格栅加固层或钢筋混凝土抗剪板，不仅提高了填土整体模量和抗滑能力，还能有效分散桥台附加应力。部分重点工程还引入有限元仿真梯度优化法，通过模拟不同模量分布下的变形规律，确定最佳刚度匹配曲线，使沉降控制在设计限值内，保证结构的长期平顺过渡^[4]。

（二）优化结构型式与材料组合

在结构设计阶段应综合考虑路基模量、桥台刚度、地基承载力及车辆荷载作用，实现刚度协调与变形同步。实践中广泛采用

台背抗滑板、桩网复合地基、CFG桩—碎石桩复合体系等技术，形成“桩—土—台”协同承载的整体结构。试验研究表明，采用直径400 mm、间距1.6 m的CFG桩处理后，地基承载力由180 kPa 提高至320 kPa，沉降量减少约55%。在材料选择上，应优先使用粉煤灰稳定土、水泥改良土、石灰粉砂层或泡沫轻质土，这些材料具有高抗剪强度、低渗透系数及优良的冻融稳定性。经对比分析，改良土基底的回弹模量可提升至180～220 MPa，显著优于传统填料。通过多层复合与合理材料匹配，路桥过渡段的结构模量差可从原来的1:8降低至1:2.5，有效提升整体协调性和抗沉降能力。

（三）完善排水与防渗系统设计

排水不畅是诱发二次沉降、滑移及结构失稳的主要隐患。设计中应在桥头与路基结合处建立纵横向排水网络体系，包括反滤层、盲沟、透水垫层、集水井、边沟导排及出水渠等设施，确保雨水与地下水可顺畅排出。根据试验研究，当排水系数控制在 $\geq 1.5\times10^{-4}$ cm/s 时，地基孔隙水压力可降低30%～35%，沉降速率下降20%～25%。在防渗设计上，应在桥台背后及两侧设置HDPE防水膜、复合土工布或膨润土防渗垫层，形成封闭式防渗屏障，防止地下水渗入及毛细作用引发软化破坏。近年来，一些智能化工程已采用物联网渗流监测系统，可实时采集水位、渗流量及含水率变化，利用AI模型预测潜在渗漏趋势^[5]。通过建立“高效排水—精准防渗—智能预警—主动干预”的综合体系，过渡段地基长期稳态率提高约50%，结构使用寿命延长超过10～15年，真正实现了工程安全与可持续维护的统一。

三、施工过程控制与地基加固关键技术

（一）分层填筑与压实质量控制

施工阶段是防治不均匀沉降的关键环节，分层填筑与压实质量直接决定过渡段的长期稳定性与承载性能^[6]。为确保结构密实与应力分布均匀，应严格控制每层填土厚度在25～30 cm之间，采用重型压路机或振动碾压设备，并结合双向交错碾压工艺，保证密实度一致性。压实度标准应达到 $\geq 96\%$ （重载公路建议达到98%），含水量控制在最佳含水量 $\pm 2\%$ 范围内，确保填料颗粒间结合紧密、孔隙率合理。现场应进行分层检测与质量抽查，检测方法包括灌砂法、环刀法、核子密度仪法等，每100 m²至少布点2～3个，确保数据具有代表性。研究表明，当压实度由94%提升至98%时，累计沉降量可减少约35%，有效提高路基整体刚度与变形协调性。

（二）地基处理与加固技术应用

地基承载力不足是造成过渡段不均匀沉降的核心原因之一。针对不同地质条件，应采用分层强化与多手段联合加固策略，形成复合地基结构体系。在软弱地基区域，可采用CFG桩（直径400 mm，间距1.5～1.8 m）、振冲碎石桩、强夯法等方式增强承载力。试验结果显示，CFG桩加固后地基承载力可由原来的150 kPa 提升至 300 ± 20 kPa，不均匀沉降幅度减少约55%～60%。在湿陷性黄土地段，应采用预浸水—灰土垫层复合法处理，消除

湿陷潜势并提高填层稳定性。同时，可在桥台背后设置加筋土挡墙、钢筋混凝土抗剪板或桩-土复合承载结构，通过桩体与土体的协同变形分担荷载，从而降低应力集中，提升结构整体抗剪与抗压性能。

（三）施工监测与动态调整机制

施工过程中应建立全过程动态监测与反馈调控体系，实现沉降、应力与孔隙水压力的精准掌控。监测设备包括静力水准仪、沉降板、倾斜仪、孔隙水压力计及应变计，以获取地基变形与压实过程的实时数据。数据采集频率建议为每24小时一次，关键阶段（如填土高度超过3 m或桩基施工完毕）应加密监测。当沉降速率超过设计限值（ $>2\text{ mm/d}$ ）或地基孔隙水压力异常升高时，应立即暂停施工，调整填筑速率或扩大加固范围。部分工程已应用BIM+物联网+无人机测绘集成系统，可实时生成三维地基沉降模型，实现预测性预警^[9]。实践表明，该系统可将施工沉降异常率降低约40%，显著提升过渡段施工的安全性与控制性。

四、不均匀沉降的监测、养护与综合防治措施

（一）动态监测体系的构建与数据分析

不均匀沉降的防治离不开全过程的动态监测体系。应在过渡段关键位置布设沉降板、静力水准仪、位移计、应变计、孔隙水压力计与倾斜仪等多类型监测设备，对沉降量、沉降速率、结构应力及地基应变进行多维监测。监测点应沿桥台向道路方向布设5~8个观测断面，横向间距2~5 m，以获取沉降梯度变化规律。数据采集频率建议在施工期每日一次，运营期每月不少于两次，并结合气候变化或荷载增大时加密监测^[7]。实践结果表明，当沉降速率超过 2 mm/d 或累计沉降达到设计限值的1.2倍时，应立即启动黄色预警并采取措施。借助BIM+GIS+物联网监测平台，可实现沉降数据的实时上传、可视化分析及趋势预测。通过建立时序分析模型与多源融合算法，能提前7~10天预测异常变化，为后期维护提供精确化决策依据。

（二）养护维修技术与周期性维护策略

运营期的科学养护是延缓沉降发展的关键环节，应实行“早发现、早干预”的维护策略。针对轻微沉降差异（ $<20\text{ mm}$ ），可采用热拌沥青再生补强层、微膨胀注浆平衡层或超薄罩面技术

进行局部修复，以恢复表面平整度。当沉降差异超过 40 mm 时，应实施高压注浆加固或深层搅拌桩补强，在不影响交通的前提下提升结构承载性能。工程试验表明，采用水泥-粉煤灰-砂浆（1:0.5:1.5）注浆工艺后，过渡段地基承载力平均提高35%，路面平整度提升45%，变形协调性增强30%。为防止次生沉降，应建立年度巡检与季度抽查制度，重点检测纵断高程变化、裂缝宽度及压实度衰减情况。建议重载交通道路每6个月进行一次结构性性能评估，每3年实施一次系统性加固或材料更新。配合高精度三维激光扫描与无人机航测技术，可快速建立沉降变化模型，实现量化评估与精细化修复^[9]。

（三）综合防治与智慧化养护管理

综合防治需实现“设计预防—施工控制—智能监测—动态养护”的全周期协同机制。设计阶段应注重结构刚度匹配、材料选择与排水系统完善；施工阶段要强化压实质量、控制填层厚度与地基加固强度；运营阶段则应依托智慧化养护平台实现实时监控、动态预警与数据追溯。目前，部分省市已应用“物联网+AI智能预警系统”，通过深度学习模型对历史监测数据进行趋势识别，当系统预测未来30天内沉降速率上升超过15%或差异沉降超过 50 mm 时，自动触发红色预警并生成干预建议。应用案例显示，该系统可将结构失稳风险降低40%~50%，维修反应时间缩短约35%。此外，结合透水铺装、生态排水沟、柔性挡墙及新型排水垫层技术，可实现过渡段“自排水—自调节—自修复”的可持续运行状态，显著提升道路桥梁过渡段的服役寿命与安全等级。

五、结语

道路桥梁过渡段的不均匀沉降是影响结构安全与行车舒适性的重要问题，其形成涉及地基差异、施工控制及环境荷载等多重因素。通过优化结构设计、强化施工工艺、完善监测体系与实施综合防治措施，可有效减少沉降差异，提升过渡段的整体稳定性与耐久性。同时，应加强全过程质量管理与数据跟踪，实现施工与运营阶段的动态衔接。未来应进一步推广智能监测与数据化养护技术，构建集“感知—分析—决策—反馈”于一体的智慧管理体系，实现过渡段的动态感知与精准维护，为道路桥梁的长期安全、平稳与可持续运营提供科学支撑与技术保障。

参考文献

[1] 胡家波. 桥梁路基过渡段不均匀沉降防治措施 [J]. 汽车周刊, 2025, (07): 110-112. DOI: CNKI: SUN: QCZK.0.2025-07-041.

[2] 段秀林. 道路桥梁沉降段路基路面不均匀沉降防治措施 [J]. 时代汽车, 2025, (17): 145-147. DOI: CNKI: SUN: SDQE.0.2025-17-023.

[3] 孔春祥. 市政道路桥梁建设中的软土地基处理技术 [C]// 重庆市大数据和人工智能产业协会. 人工智能与经济工程发展学术研讨会论文集 (一). 杭州易能建设有限公司; 2025: 301-304. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2025.007752.

[4] 马兰. 高速公路拼接段沉降变形特性及地基处理研究 [J]. 青海交通科技, 2024, 36(03): 91-95. DOI: CNKI: SUN: QHKJ.0.2024-03-014.

[5] 刘惠惠. 道路桥梁工程沉降段路基路面施工技术研究 [J]. 四川建材, 2024, 50(01): 168-170. DOI: CNKI: SUN: SCJZ.0.2024-01-063.

[6] 王慧. 道路桥梁工程中沉降段路基路面施工技术 [J]. 四川建材, 2023, 49(07): 107-109. DOI: CNKI: SUN: SCJZ.0.2023-07-039.

[7] 程鹏. 道路与桥梁施工建设管理的技术要点分析 [J]. 运输经理世界, 2022, (27): 49-51. DOI: CNKI: SUN: YSGL.0.2022-27-017.

[8] 冉海峰. 道路桥梁沉降段路基路面施工技术研究 [J]. 工程技术研究, 2021, 6(15): 82-83. DOI: 10.19537/j.cnki.2096-2789.2021.15.034.