

公路桥梁过渡段路基沉降的防治措施分析

高亮¹ 罗冬²

1.浙江省建投交通基础建设集团有限公司 浙江 杭州 310012

2.宁波奉化交投基础建设工程有限公司 浙江 宁波 315504

【摘要】：本文针对公路桥梁过渡段因桥台与路堤刚度差异、软弱地基分布不均等因素引发的差异沉降问题，系统分析了其成因机制及对行车安全与结构耐久性的危害。结合现有排水固结、土工格栅加筋及桥头搭板等措施的局限性，提出基于刚度阶梯过渡的填料优化、深层搅拌桩与管桩复合加固、动态排水与预压协同施工等关键技术。通过强化施工阶段分层压实与沉降监测、搭板脱空预警及服役期超限沉降补强流程，构建全过程质量保障体系。研究结果表明，多措并举可有效控制差异沉降，提升过渡段结构协调性与长期服役性能。

【关键词】：公路桥梁过渡段；路基沉降；差异沉降防治；复合地基加固；动态监测与预警

DOI:10.12417/2811-0722.26.07.076

引言

公路桥梁过渡段作为道路与结构物衔接的关键部位，其路基沉降问题长期困扰工程实践。由于桥台与路堤在材料属性、刚度特性及受力机制上的显著差异，加之复杂地质条件和施工控制难度，极易在交界区域形成不均匀沉降，进而诱发跳车、开裂乃至结构损伤。随着交通荷载日益繁重与行车舒适性要求不断提高，传统防治手段已难以满足高性能道路的服役需求。需要从沉降成因出发，系统分析现有技术的适用边界，并融合新材料、新工艺与智能监测手段，构建覆盖设计、施工至养护全阶段的综合防控体系，以实现过渡段长期变形可控与结构安全可靠。

1 公路桥梁过渡段路基沉降的成因与危害分析

1.1 桥台与路堤刚度差异引发沉降机理

在公路桥梁过渡段中，桥台结构通常采用刚性较大的混凝土或钢筋混凝土材料建造，其自身压缩变形极小；而与之相连的路堤则多由压实土体构成，整体刚度显著低于桥台^[1]。当车辆荷载或自重作用于该区域时，路堤部分因土体固结、侧向挤出及压实不足等因素产生较大竖向变形，而桥台几乎不发生沉降，从而在两者交界处形成明显的差异沉降。这种刚度突变不仅导致纵向坡度突变，还可能引发路面开裂、跳车现象，严重时影响行车安全与舒适性。此外，反复荷载作用下，差异沉降会进一步加剧路基土体的塑性变形，形成恶性循环，使沉降问题持续发展，对桥梁结构与道路使用寿命构成潜在威胁。

1.2 地基软弱土层分布不均导致沉降特征

地基软弱土层分布失衡是公路桥梁过渡段路基沉降的关键地质诱因，实际工程里软弱土层常表现为区域状、局部性或夹层状展布，压缩性能突出、承载能力薄弱，上部荷载作用下易出现大幅非均匀压缩变形。桥台与路堤衔接区域，桥梁基础多坐落于较深持力层，相邻路基却直接依托浅层软土，二者刚度相差较大，相同荷载作用下变形反应存在偏差，软弱土层厚

度突变或透镜体结构存在时，会进一步强化沉降的空间不均衡性，形成明显沉降差值，这类差值沉降会破坏路面平整性，诱发结构开裂、排水受阻及行车安全风险，极端情况下还会波及桥梁结构整体稳固性，软弱土层的空间变异性及其工程属性对过渡段沉降表现起着决定性作用。

1.3 过渡段沉降对行车安全与结构耐久性的影响

过渡段路基沉降引发的纵向不顺会显著改变车辆行驶轨迹，尤其在高速状态下加剧车身颠簸，降低驾驶员操控稳定性，增加交通事故发生概率。由于桥梁结构刚度远大于路基，二者交界处因沉降差异形成台阶状变形，致使车轮冲击荷载成倍放大，不仅加速路面表层破损，还诱发基层松散和底基层开裂。这种反复冲击作用进一步扩大结构内部微裂缝，促进水分和有害离子侵入，加快钢筋混凝土构件的腐蚀进程。同时，沉降导致伸缩缝错位、支座偏载及桥台后填土压实度下降，削弱整体结构协同受力性能。长期服役中，局部应力集中区域易产生结构性裂缝，影响桥梁与路基连接部位的整体性和稳定性，最终降低整个道路系统的使用年限与安全储备。

2 现有沉降控制手段的适用性与局限性

2.1 排水固结法在软基处理中的效果制约

排水固结技术搭配竖向排水构件（塑料排水板、砂井），结合堆载或真空预压措施加快软土孔隙水逸出，促使土体有效应力提升，实现沉降提前达成，实际应用中却受多种因素限制。软土层较厚或渗透系数过低时，排水路径偏长会放缓固结进程，即便布设密集排水构件，有限工期内也难以达成预期沉降控制标准，堆载预压会对周边环境产生附加荷载，诱发邻近构筑物变形，真空预压无额外荷载负担，密封系统却易因施工扰动受损，进而影响负压稳定状态。含有机质或高灵敏度的软黏土，固结阶段结构扰动会造成强度降低，间接弱化地基承载效能，地下水位变动、土层非均质性及夹层分布失衡，还会破坏排水路径连贯性，导致固结效果不均，局部区域仍遗留较大工

后沉降，进而降低该技术在复杂地质条件下的适用价值。

2.2 土工格栅加筋技术对差异沉降的调控不足

土工格栅加筋技术虽在提升路基整体稳定性与承载能力方面具有一定成效，但在应对公路桥梁过渡段因刚度突变引发的差异沉降问题时，其调控能力存在明显局限。该技术主要通过增强土体抗剪强度和限制侧向变形发挥作用，然而对于桥台与路堤之间由于压缩模量显著不同所导致的不均匀沉降，难以实现有效协调。尤其在软土地基或高填方路段，土工格栅无法从根本上改变地基土层的压缩特性，仅能延缓而不能阻止沉降发展^[2]。格栅与填料之间的界面摩擦效应受施工质量、填料类型及含水率等因素影响较大，易造成加筋效果不稳定。在长期动荷载作用下，格栅材料可能发生蠕变或疲劳损伤，进一步削弱其对差异沉降的控制能力。因此，在复杂地质条件或对沉降控制要求较高的过渡段工程中，单独依赖土工格栅加筋往往难以满足设计预期，需与其他地基处理措施协同使用以提升整体调控效能。

2.3 桥头搭板设置后的脱空与断裂问题

在公路桥梁过渡段路基沉降防治中，桥头搭板虽被广泛采用以缓解差异沉降带来的行车冲击，但其长期服役过程中常出现板底脱空与结构断裂问题。脱空现象主要源于搭板下方填土压实不足、地基不均匀沉降或排水系统失效导致的土体流失，使得搭板失去有效支撑，在车辆反复荷载作用下产生悬臂效应，进而引发应力集中。一旦脱空区域扩大，搭板中部或端部易出现横向或纵向裂缝，严重时发生结构性断裂，不仅削弱其过渡功能，还可能诱发跳车甚至安全事故。此外，搭板与台背连接部位若未设置合理伸缩缝或锚固措施不足，亦会加剧接缝处的错台和破损。现有工程实践中，部分项目虽通过注浆填充脱空区域进行修复，但该方法难以从根本上解决持续沉降引起的再脱空问题，且施工扰动可能影响周边路基稳定性，因此桥头搭板在设计阶段需综合考虑地基处理、排水优化及结构冗余度，以提升其耐久性与适应性。

3 针对沉降关键诱因的防治措施设计

3.1 基于刚度阶梯过渡的填料优化配比

为缓解桥梁路基衔接位置刚度骤变引发的不均匀沉降问题，填料配比需依照桥台往路基延伸方向呈现刚度逐层弱化的布设思路开展设计（见图1）。桥台周边0至2米区间选用高模量低压缩特质的级配碎石材料，颗粒最大粒径限定53毫米，天然形成稳固嵌挤构架且透水排水条件优越，2至5米区间搭配碎石砂砾复合原料构筑中间过渡结构，弱化局部应力聚集现象，5米开外地段选用砂性土、改良黏土等常规路基填筑材料，维系整体结构形变协调统一。现场填筑分层厚度维持20至30厘米区间，依托重型压实机械逐层夯压夯实，满足工程规范划定的密实标准。填筑物料弹性模量形成阶梯式排布格局，纵向

刚度过渡趋于平缓，弱化突变界面衍生的附加沉降隐患，保障过渡段构造整体稳固程度，长久服役工况下的安全耐久表现也能得到可靠保障。

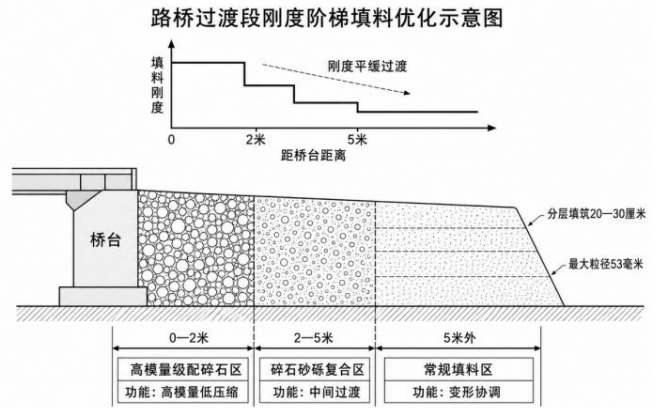


图1 路桥过渡段刚度阶梯填料优化示意图

3.2 深层水泥搅拌桩与管桩复合加固方案

深层水泥搅拌桩与管桩复合加固方案通过刚柔结合的桩体结构体系，有效提升公路桥梁过渡段地基的整体承载能力与变形协调性。该方案在软弱土层较厚区域布设深层水泥搅拌桩，利用专用搅拌机械将水泥浆液与原土体充分混合，形成具有较高强度和低压缩性的柱状加固体，增强地基抗沉降性能；同时，在荷载集中或差异沉降敏感部位嵌入预应力混凝土管桩，其高刚度特性可直接将上部结构荷载传递至深层稳定持力层。两种桩型在平面布置上采用交错或分区组合方式，确保过渡段范围内刚度梯度平缓变化，避免突变引起的附加应力集中。施工过程中，先完成水泥搅拌桩成桩并养护至设计强度后，再进行管桩静压或锤击施工，以减少相互干扰。桩顶设置碎石褥垫层或钢筋混凝土筏板，实现荷载在复合桩体间的合理分配，并协调各桩体之间的变形差异。整个加固体系兼顾整体稳定性与局部承载需求，显著抑制因土层压缩不均导致的纵向坡差和横向错台现象。

3.3 动态排水系统与预压荷载协同施工工艺

动态排水系统与预压荷载的协同施工工艺聚焦于通过水力控制与力学加载的耦合作用，抑制公路桥梁过渡段路基的不均匀沉降。该工艺在路基内部布设由纵向主排水管、横向支管及高渗透性碎石盲沟组成的三维排水网络，并结合可调节排水阀和水位感应装置，实现对地下水位及孔隙水压力的实时响应与调控。同时，在排水系统形成有效导排路径后，采用分阶段堆载方式进行预压施工，堆载体通常为土石方或混凝土预制块，荷载大小依据地基承载力及固结速率动态调整。加载过程中持续监测沉降速率与排水效率，确保土体在排水条件下完成大部分压缩变形^[3]。排水与加载同步推进，不仅加快了软土层的固结进程，也避免因排水滞后造成超静孔隙水压力积聚而诱发剪切破坏。整个施工过程强调工序衔接的严密性和参数反馈

的及时性,使路基在通车前达到稳定状态,有效降低工后差异沉降风险。

4 施工与养护阶段的质量保障技术要点

4.1 过渡段分层压实度与沉降监测频次控制

在公路桥梁过渡段施工过程中,路基填筑需严格实施分层填筑与压实工艺,每层填土厚度应控制在规范允许范围内,确保压实设备能够有效作用于整个填筑断面,避免因局部松散或压实不足引发不均匀沉降^[4]。压实作业应依据填料类型、含水率及气候条件合理选择压实机械与碾压遍数,保证各层压实质量均匀稳定。同时,沉降监测应贯穿整个施工及早期运营阶段,初期填筑阶段宜每日进行观测,进入稳定期后可逐步延长至每周或每两周一次,遇降雨、冻融等特殊工况应加密监测频次。监测点布设需覆盖过渡段关键位置,包括桥台背墙后方、路堤中部及远离结构物的参照区域,通过高精度水准仪或自动化沉降观测系统获取连续、可靠的沉降数据,为后续压实调整和养护决策提供依据。

4.2 搭板底部注浆填充与脱空预警装置布置

为有效控制桥梁搭板与路基衔接区域因沉降差异导致的脱空问题,需在搭板安装完成后或出现初期沉降迹象时及时实施底部注浆填充作业。注浆材料应具备良好的流动性、微膨胀性和早期强度,确保能充分填充板底空隙并形成稳定支撑层。注浆孔按梅花形布设,间距和深度依据搭板尺寸及地质条件确定,注浆压力需严格控制,防止抬升结构或造成二次扰动^[5]。在搭板关键受力部位及易发生脱空区域预埋脱空预警装置,如位移传感器或光纤光栅监测元件,实时采集板底间隙变化数

据。监测系统应具备自动报警功能,当脱空量达到设定阈值时立即触发预警信号,便于养护单位迅速响应。装置布设需兼顾施工便利性与长期耐久性,避免因环境侵蚀或交通荷载影响监测精度,确保整个服役期内对搭板底部状态实现动态、精准掌控。

4.3 服役期内沉降速率超限的补强处置流程

当公路桥梁过渡段在服役期间出现沉降速率超出设计容许范围的情况,需立即启动沉降异常响应机制。通过高精度监测设备对沉降区域进行连续动态观测,明确沉降范围、深度及发展趋势。依据监测数据与地质复勘结果,制定针对性补强方案,常见措施包括注浆加固、微型桩托换或复合地基处理等方式。注浆材料应具备良好的流动性与早期强度,确保有效填充空隙并提升地基整体刚度;微型桩布设需结合既有结构受力状态,避免扰动原路基稳定性。施工过程中同步实施沉降再监测,实时调整工艺参数。补强完成后设置不少于六个月的跟踪观测期,确认沉降趋于稳定方可结束处置流程,保障过渡段长期结构安全与行车平顺性。

5 结语

公路桥梁过渡段路基沉降问题涉及地质条件、结构刚度差异及施工养护等多个环节,需从成因识别、技术适配到全过程质量控制进行系统应对。通过优化填料刚度梯度、采用复合地基加固、构建动态排水与预压协同机制,并强化施工压实与服役期监测预警,可有效抑制差异沉降发展。针对已出现的超限沉降,应依托精准监测数据实施科学补强,确保结构安全与行车舒适性。未来防治工作应更加注重多技术融合与全寿命周期管理,提升过渡段长期性能稳定性。

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.
- [2] 岳莉.公路桥梁过渡段路基路面沉降成因及质量控制[J].交通世界,2021,(Z2):69-70.
- [3] 王继生.桥头过渡段路基沉降控制分析[J].交通科技与管理,2023,4(13):84-86.
- [4] 戴存.公路桥梁施工过程中过渡段施工技术探究[J].四川水泥,2021,(05):305-306.
- [5] 李健.对公路桥梁过渡段软基路基施工技术分析[J].建材与装饰,2020,(17):24-25.