

# 路桥过渡段沉降差异控制与路面结构协调性研究

薛生东

新疆生产建设兵团建设工程(集团)有限责任公司 新疆 乌鲁木齐 830000

**摘要:** 路桥过渡段作为道路工程中刚性结构物(桥梁)与柔性路基之间的衔接区域,其沉降差异问题长期困扰着高等级公路与高速铁路的建设与运营。不均匀沉降不仅导致“桥头跳车”现象,严重影响行车舒适性与安全性,还加速路面结构的早期损坏,增加后期养护成本。本文从沉降差异的成因机理出发,系统分析路桥过渡段沉降差异的形成机制及其对路面结构性能的影响;进而深入探讨沉降差异控制的核心理念与技术路径,并在此基础上提出实现路面结构协调性的设计原则与工程对策。研究表明,沉降差异控制应贯穿于勘察、设计、施工与运维全生命周期,而路面结构协调性则需通过材料性能梯度化、结构层功能优化及动态响应匹配等手段予以保障。唯有将沉降差异控制与路面结构协调性有机融合,方能从根本上提升路桥过渡段的整体服役性能与耐久性。

**关键词:** 路桥过渡段;沉降差异;不均匀沉降;路面结构;协调性;刚柔过渡;耐久性

## 引言

我国交通基建发展迅速,桥梁数量与规模持续增长,路桥过渡段存在沉降差异这一技术难题。桥梁基础多为深基础,工后沉降小,可视为刚性支承;而相邻路堤填土建立在天然地基上,压缩变形不可避免,软弱地基条件下更显著。这种沉降不一致使过渡段路面纵坡突变,形成“桥头跳车”,降低行车舒适性,威胁行车安全,还会加速路面结构性病害,缩短使用寿命。因此,控制路桥过渡段沉降差异、确保路面结构协调适应能力是道路工程领域核心课题。传统多侧重抑制路基沉降来减小与桥台差异,但“单向控制”忽视路面结构自身适应性。即便沉降差异在规范内,路面设计若未考虑受力与变形需求,仍会早期损坏,需从系统工程角度一体化考量沉降差异控制与路面结构协调性。

### 1 路桥过渡段沉降差异的形成机理

沉降差异的本质是不同介质在相同外部荷载(包括自重与交通荷载)作用下,因物理力学性质迥异而产生的不协调变形。在路桥过渡段,这种差异主要源于以下几个方面:

#### 1.1 结构刚度的根本性差异

桥梁结构,特别是其下部结构(桥台、桩基),具有极高的竖向刚度。桩基础通过将荷载传递至深层稳定持力层,使得其工后沉降通常可以忽略不计(一般小于5mm)。相比之下,路堤作为由松散颗粒组成的土体结构,其刚度远低于混凝土结构。路堤自身的压缩以及其下卧天然地基的固结沉降,共同构成了路基的总沉降量。这种“刚-柔”对接的先天属性,是沉降差异产生的根本原因。

#### 1.2 地基条件的非均质性

路桥过渡段的地基往往呈现出空间上的非均质性。桥台基础下方的地基通常经过严格勘察与处理,承载力高、压缩性低。而紧邻桥台的路基段,受限于施工空间、工期及成本等因素,其地基处理深度和范围可能不足,尤其是在软土、湿陷性黄土等不良地质区域,地基的压缩模量与强度指标显著低于桥台区域<sup>[1]</sup>。这种地基承载性能的横向突变,加剧了沉降差异的产生。

#### 1.3 施工工艺与时间效应的不匹配

桥梁与路基的施工通常是分阶段、分主体进行的。桥梁施工周期长,且在通车前已完成大部分沉降。而路基填筑则可能在桥梁主体完工后才开始,其沉降过程(尤其是主固结沉降)需要较长时间才能完成。这种时间上的错位,使得在道路投入运营初期,路基仍在持续沉降,而桥台已基本稳定,从而形成了动态变化的沉降差。此外,路基填筑的压实度、分层厚度等施工质量控制因素,也会直接影响其最终沉降量。

#### 1.4 动荷载的放大效应

车辆荷载作为一种移动的、周期性的动荷载,在通过沉降差异形成的纵坡突变点时,会产生附加冲击力。这种冲击力远大于静荷载,并会反作用于路基,加速其塑性变形与累积沉降,形成“沉降—冲击—再沉降”的恶性循环,进一步放大沉降差异。

综上所述,路桥过渡段的沉降差异是一个由结构性、地质条件、施工过程及荷载作用等多重因素耦合而成的复杂工程问题。对其控制,不能仅着眼于单一环节,而需采取系统性的综合措施。

## 2 沉降差异对路面结构性能的影响

沉降差异的存在，从根本上改变了路面结构在路桥过渡段的受力状态与变形模式，对其整体性能构成严峻挑战。

### 2.1 应力与应变场的畸变

在均匀路基上，路面结构各层在荷载作用下的应力与应变分布相对平顺。而在存在沉降差异的过渡段，路面结构被迫跨越一个“凹陷区”。这导致在沉降区边缘（即差异沉降最大处），路面结构内部产生显著的附加弯拉应力与剪切应力。对于半刚性基层沥青路面而言，基层极易在此处发生弯拉疲劳开裂；对于柔性基层路面，面层则承受更大的拉应变，加速疲劳裂缝的萌生与发展。

### 2.2 结构层间连续性的破坏

理想的路面结构要求各结构层之间保持良好的层间粘结与连续性，以实现荷载的有效传递与扩散。然而，不均匀沉降会在结构层内部及层间产生复杂的相对位移，破坏原有的连续状态。特别是在基层与底基层、底基层与路床之间，容易形成脱空或滑移界面<sup>[2]</sup>。这不仅削弱了结构的整体性，降低了承载能力，还为水的侵入提供了通道，诱发唧泥、冲刷等水损害，进一步恶化结构性能。

### 2.3 动力响应特性的劣化

沉降差异形成的纵坡突变，使车辆在通过时产生垂直方向的加速度变化，即“跳车”。这种剧烈的动力冲击，一方面直接损伤路面表层，造成松散、坑槽等病害；另一方面，其产生的高频、高幅值振动荷载会向深层传递，扰动路基土体，使其密实度下降，CBR（加州承载比）值降低，形成一个软弱的“薄弱带”。这个薄弱带又反过来加剧了不均匀沉降，形成负反馈循环。

### 2.4 使用性能与耐久性的双重折损

从使用性能角度看，“桥头跳车”直接导致行车舒适性指数（如国际平整度指数IRI）急剧恶化，影响驾乘体验，并构成安全隐患。从耐久性角度看，上述应力集中、层间破坏及动力冲击等因素的综合作用，使得过渡段路面的使用寿命远低于一般路段，维修频率高、成本大，全寿命周期经济效益低下。

由此可见，沉降差异不仅是几何形态上的缺陷，更是引发一系列结构性病害的根源。因此，对路面结构的设计必须超越传统的均匀受力假设，充分考虑其在非均匀变形场中的协调适应能力。

## 3 沉降差异控制的理念与技术路径

针对沉降差异的成因，其控制策略应遵循“源头削减、过程调控、末端适应”的系统性原则。

### 3.1 源头削减：强化地基与路基

这是最根本、最有效的控制途径。通过提高路基及其下卧地基的整体刚度与稳定性，从源头上缩小与桥台的沉降差距。具体而言，应根据详细的地质勘察资料，对过渡段地基进行针对性处理，例如采用深层搅拌桩、CFG桩或碎石桩等形成复合地基，以显著提升地基的承载力并减少其压缩变形。同时，在路堤填筑材料的选择上，可优先考虑EPS（聚苯乙烯泡沫塑料）、泡沫混凝土或优质粉煤灰等轻质填料，通过降低填料自重来减小作用于地基的附加应力，从而有效抑制沉降。此外，在工期允许的情况下，实施预压或超载预压是一种经济有效的手段，它能够加速地基的固结过程，使绝大部分沉降在道路正式通车前完成，从而最大限度地减少工后沉降量。

### 3.2 过程调控：优化结构与施工

在无法完全消除沉降差异的情况下，通过合理的结构设计与精细化的施工管理来调控沉降的发展过程显得尤为重要。设置钢筋混凝土搭板是一种历史悠久且行之有效的过渡措施，它通过一端支承于稳定的桥台上，另一端置于处理后的路基上，形成一个“架越”结构，有效缓和了纵坡的突变。然而，搭板的设计长度、厚度及其与路基的连接方式必须经过严谨计算，否则可能在板端形成新的沉降集中点。更为先进的理念是在桥台后一定长度内（通常为30至50米）设置专门的渐变过渡段，该区域内采用更高标准的压实控制、掺入土壤固化剂改良路基土体性能，或铺设土工格栅等加筋材料，使路基的沉降量沿纵向由小到大平缓过渡，避免任何形式的突变<sup>[3]</sup>。与此同时，施工组织也需精心策划，尽可能延长路基的自然沉降期，或采用分期施工、分期开放交通的策略，为路基提供充足的固结时间。

### 3.3 末端适应：引入柔性与容错机制

工程实践表明，追求绝对的零沉降差异既不经济也不现实。因此，一种更为务实的策略是承认并接受一定程度的残余沉降差异，并通过增强结构的柔性及容错能力来包容它。这可以通过在搭板与普通路面之间设置高性能的柔性伸缩缝来实现，该缝既能适应微小的相对位移，又能保证行车的平顺性。另一种思路是采用分段式或铰接式的过渡板设计，赋予结构一定的转动自由度。此外，在路面材料层面，应大力推广使用改性沥青、高模量沥青混合料或掺加纤维的复合材料，这些材料不仅具有优异的高温稳定性和低温抗裂性，更关键的是其高韧性能够有效吸收由不均匀沉降引起的能量，抑制裂缝的萌生与扩展，从而为整个路面结构提供一道内在的“缓冲”防线。

#### 4 路面结构协调性的内涵与实现路径

如果说沉降差异控制是“治本”，那么路面结构协调性就是“强身”。它强调的是路面结构系统自身对非理想边界条件（即不均匀沉降）的内在适应与协调能力。

##### 4.1 协调性的核心内涵

路面结构协调性是指在路桥过渡段这一特殊区域，路面各结构层（面层、基层、底基层、路床）在材料性能、结构能力及力学响应上能够相互匹配、协同工作，共同抵御由沉降差异引发的复杂应力状态，维持结构整体性与功能完整性的一种综合性能。其核心在于“梯度化”与“功能化”。这意味着设计者不能再将过渡段视为普通路段的简单延伸，而应将其看作一个具有独特力学行为的“功能区”，其内部的每一层材料、每一个构造细节都应服务于整体协调的目标。

##### 4.2 材料性能的梯度化设计

摒弃传统“一刀切”的材料设计模式，在过渡段内沿纵向（从桥台向路基方向）对材料性能进行梯度化调整是实现协调性的关键。从桥台附近开始，路面结构的整体模量应由高到低平缓过渡。例如，在紧邻桥台的10米范围内，可采用高模量沥青混合料或贫混凝土作为基层，以匹配桥台的高刚度；随着距离桥台越远，逐步过渡到常规的沥青稳定碎石或水泥稳定碎石基层。这种模量的梯度变化能够有效分散因沉降差异而产生的应力集中，避免在某一界面处出现刚度的突变，从而保护结构免受破坏<sup>[4]</sup>。同样，材料的强度与韧性也应呈现相应的梯度，靠近沉降差异最大区域的材料，需要在保证足够强度的同时，具备更高的断裂韧性和延展性，以吸收变形能量并阻止裂缝贯穿。

##### 4.3 结构层的功能优化

明确各结构层在过渡段的特定功能，并据此进行针对性设计，是提升协调性的另一重要途径。面层作为直接受到车辆轮胎作用的第一道防线，其首要任务是提供优异的抗车辙、抗裂及抗冲击性能，因此可优先选用SMA（沥青玛蹄脂碎石）或OGFC（开级配磨耗层）等骨架密实型或排水型高性能面层结构。基层和底基层作为承重的主层，其核心功能是提供足够的承载力和抗疲劳性能。在协调性设计理念的指导下，可以审慎考虑用柔性更强的粒料类基层（如ATB，沥青稳定碎石）部分替代传统的半刚性基层，因为柔性基层更能顺应下卧路基的

不均匀变形，有效避免因基层开裂而导致的反射裂缝问题。至于路床，作为整个路面结构的基础平台，其均匀性与稳定性至关重要，必须确保使用优质填料、达到高标准的压实度，并与经过处理的地基形成牢固的整体，为上部结构提供一个坚实、均质的支撑。

##### 4.4 动态响应的匹配

协调性还深刻体现在路面结构对车辆动荷载与自身变形的动态响应匹配上。理想的状态是，路面结构的动态变形能够平滑地跟随下卧路基的静态不均匀沉降，从而最小化对车辆的冲击。这要求结构体系具备一定的“追随性”或“顺应性”，而非一味追求高刚度。一个由柔性基层与高韧性面层构成的组合体系，正是为了实现这种动态匹配。当车辆驶过存在微小沉降差异的区域时，该体系能够通过自身的弹性与塑性变形吸收冲击能量，将剧烈的瞬时冲击转化为平缓的连续变形，从而保护结构本身并提升行车舒适性。这种动态协调能力，是衡量路桥过渡段设计是否成功的重要标志。

#### 5 结语

路桥过渡段沉降差异是道路工程顽疾，治理需系统集成与理念创新。本文剖析其成因机理，揭示了对路面结构性能的多维度负面影响，提出“沉降差异控制”与“路面结构协调性”并重的综合治理框架。沉降差异控制是基础，要从地基强化、结构优化、施工精细化等多维度削减差异量；路面结构协调性是保障，需转变设计思维，通过材料、结构层、动态响应的优化，赋予路面适应力与韧性，使其在非理想环境中保持优良服役状态。未来路桥过渡段设计应注重全寿命周期理念，将勘察、设计、施工、运维视为整体，深度融合沉降控制与结构协调思想，实现“平、顺、耐、久”目标，为现代化交通基础设施建设提供坚实支撑。

#### 参考文献

- [1]石川.路桥过渡段不均匀沉降原因及控制措施[J].四川水泥,2025,(10):268-270.
- [2]陈紫媛.路桥过渡段不均匀沉降控制[J].交通世界,2025,(28):156-158.
- [3]曹江鹏.公路路桥过渡段沉降特性与优化处理方案研究[J].福建建材,2025,(03):102-104.
- [4]张阳.某路桥过渡段差异沉降控制技术及其效果评价[J].四川水泥,2024,(11):208-210.