

公路改扩建新旧路基间距差异引发沉降病害管控技术探析

刘志才

新疆北新路桥集团股份有限公司 新疆 乌鲁木齐 830000

摘要：随着既有公路改扩建工程规模持续扩大，新旧路基间距差异所导致的沉降不协调问题日益突出，成为影响路面使用性能与结构安全的核心病害之一。本文立足于改扩建工程中新建路基与既有路基的空间几何关系，系统分析了间距差异引发差异沉降的力学机理与主要影响因素，揭示了路基宽度变化、拼接方式、地基条件及填筑材料特性对沉降差异的耦合作用规律。在此基础上，从勘察设计、地基处理、路基填筑、防排水及动态监测等维度，提出了涵盖全过程的沉降病害管控技术框架。研究表明，新旧路基间距差异并非单一的几何问题，而是应力路径改变、固结时间差异与刚度梯度过渡的综合反映，需采取分区控制、协同变形与动态反馈相结合的系统化策略。本文旨在为公路改扩建工程中差异沉降的精细化管控提供理论参考与方法支撑。

关键词：公路改扩建；新旧路基；间距差异；差异沉降；病害管控

引言

截至“十四五”末，我国既有高速公路与国省干线公路已进入大规模改扩建周期，以局部加宽、纵面抬升或平面移位为代表的改扩建工程成为公路建设的主流形态。据统计，每年实施改扩建的干线公路里程超过三千公里，其中因新旧路基间距差异引发的路面纵向裂缝、桥头跳车及路基失稳等沉降病害占比高达改扩建工程病害总量的六成以上。这一现实问题对工程质量与运营安全构成严峻挑战。新旧路基间距差异，广义上指新建路基外缘与既有路基外缘之间的水平距离变化，以及由此带来的竖向荷载分布差异和固结历史差异。实践中，受限于既有构造物位置、地形地物及交通保通要求，改扩建段落往往呈现“宽窄不一、高低错落”的几何特征，导致新旧路基在竖向变形量上产生显著不协调。当前，现行规范对改扩建路基差异沉降的控制多以总沉降量或工后沉降绝对值作为判据，但对间距差异这一关键几何变量引发的沉降梯度变化缺乏专项规定，致使设计方法与实际工况脱节。针对上述问题，国内外学者围绕差异沉降的预测模型、容许标准及处治措施开展了大量研究，但多集中于单一因素（如地基处理深度或加筋方式）的影响分析，缺乏从“间距差异”这一源头变量出发的系统性机理阐释与管控技术整合。本文力求打破“重处治轻预防”的传统思路，从间距差异的力学效应出发，构建覆盖设计、施工与运营全阶段的沉降病害管控技术体系，为工程实践提供明晰的理论指引。

1 新旧路基间距差异的成因与几何特征

1.1 间距差异的主要成因

公路改扩建工程中，新旧路基间距的确定受多重因素制约。其一，既有公路两侧通常分布有农田、建筑物、管线、沟塘等限制性地物，迫使新建路基在局部段落偏离理论加宽线，形成间距的横向波动。其二，互通立交、服务区、隧道洞口等大型构造物的位置固定，使得路基拼接段在该区域必须调整间距以适应构造物边界^[1]。其三，运营期交通组织对保通车道宽度提出硬性要求，施工期间需保留一定宽度的临时行车道，这进一步压缩了新建路基的可布置范围。其四，纵断面抬升改造中，新建路基与既有路基的竖向高差变化同样会改变有效间距的力学含义，形成二维空间内的间距差异。

1.2 典型几何模式分类

从平面几何关系看，新旧路基间距差异可归纳为三种典型模式：一是“均匀加宽型”，即新建路基沿既有路基全线等距外延，间距变化平缓，差异沉降主要源于地基固结程度不同；二是“渐变过渡型”，常见于局部受限段落，新建路基边缘线相对于既有路基呈线性或曲线渐变，间距在数十米范围内由小变大或由大变小，形成沉降梯度带；三是“突变错位型”，多出现在跨越构造物或地物障碍的节点，新旧路基在较短距离内产生明显折线错位，间距发生阶跃变化，该类型对沉降控制最为不利。上述几何特征直接决定了新旧路基之间的“约束刚度”和“变形协调距离”。间距越大，新建路基独立承载特性越强，与既有路基的相互牵引作用越弱，但过渡带的沉降梯度反而加剧；间距越小，拼接约束作用

显著,但受施工扰动影响,既有路基边坡局部卸载与新建路基加载的叠加效应更为复杂。

2 间距差异驱动沉降病害的力学机理

2.1 附加应力叠加与扩散路径改变

既有路基在长期运营中已完成主固结,其地基土体处于较高的有效应力状态。新建路基的填筑荷载通过地基土体向四周扩散,当新旧路基间距较小时(通常小于一倍路堤高度),新建荷载产生的附加应力场与既有路基原有应力场在水平方向上发生显著叠加,导致既有路基基底以下土体中的竖向附加应力增量超过其超固结屈服应力,诱发二次压缩变形^[2]。反之,当间距较大时,附加应力扩散路径延长,叠加效应减弱,但新建路基自身地基中应力水平升高,其独立沉降量增大。由此,间距差异实际上调节了“叠加沉降”与“独立沉降”之间的权重分配,而二者的非线性组合正是差异沉降产生的根源。

2.2 固结时间差与应力历史差异效应

既有路基地基土体历经数年至数十年的固结,其孔隙比已降至与当前有效应力相对应的平衡状态,超静孔隙水压力基本消散。新建路基在施工期快速填筑,地基承受新增荷载后产生超静孔隙水压力,固结过程从头开始。这一时间差意味着:在新旧路基间距较小的段落,既有路基的“刚性”约束限制了新建路基的侧向变形,使新建地基中的孔隙水压力消散路径受阻,固结速率降低,工后沉降持续时间延长;而在间距较大的段落,新建路基侧向变形自由,固结排水相对顺畅,但最终总沉降量可能更大。两种固结进程的不匹配,使得在同一改扩建项目内部,不同间距段落的路面在运营期呈现出迥异的沉降时程曲线。

2.3 刚度梯度过渡与剪切变形集中

新旧路基交界区域构成一个典型的“竖向刚度梯度带”。既有路基经过长期压密,模量较高;新建路基虽经压实,但初始模量偏低,二者之间存在模量差异。当间距差异导致过渡带宽度变化时,刚度梯度也随之改变——间距突变处形成窄过渡带,剪应变在该区域内高度集中。根据弹性层状体系理论,剪应力峰值通常出现在距路肩一定水平距离处,该位置恰好对应新旧路基拼接缝附近。间距差异改变了峰值剪应力的作用范围,当剪应力超过土体抗剪强度时,即产生纵向剪切裂缝,进一步发展即为差异沉降引发的路面结构性破坏。

3 间距差异影响下沉降病害的主要影响因素

3.1 路基几何参数的影响

加宽宽度和拼接方式是首要几何影响因素。加宽宽度越大,新建路基的自重荷载越大,其地基沉降总量越高,但新旧路基间距相应增大反而降低了荷载叠加效应。因此,存在一个“临界加宽宽度”,在该宽度下总差异沉降达到极小值。拼接方式方面,直接拼接(又称硬拼接)使新旧路基紧密接触,变形协调性依赖于界面处理质量;分离式拼接则在新旧路基之间预留一定间距,各自独立变形,差异沉降表现为两侧沉降槽的独立发展,其危害形式与直接拼接截然不同。

3.2 地基条件与填筑材料特性

软弱地基厚度和压缩层深度对差异沉降具有放大效应。在深厚软土区域,新建荷载引起地基沉降影响深度可达路堤高度的数倍,间距差异所导致的应力分布不均匀性被深层土体的流动变形进一步放大。填筑材料的密度、含水率和压实度则直接影响新建路基的初始模量和工后压密量^[3]。当采用轻质填料(如泡沫混凝土或粉煤灰)时,可有效减小新建路基自重应力,降低间距差异带来的附加应力增量,但轻质材料与既有路基常规填料的模量差异又可能引入新的刚度不连续问题。

3.3 施工顺序与时空效应

施工顺序对间距差异的沉降响应具有显著调制作用。分期填筑、预留沉降期、超载预压等施工策略能够部分消除固结时间差,但不同间距段落对施工因素的敏感度不同。间距较小的段落,由于约束作用强,施工速率过快易导致孔隙水压力急剧升高,引发边坡失稳;间距较大的段落,独立变形能力较强,但对填筑均匀性要求更高。此外,季节性降水、地下水位波动等环境因素通过改变土体饱和度,间接影响不同间距条件下路基的长期蠕变特性。

4 沉降病害全过程管控技术体系

4.1 勘察设计阶段的间距优化与分级控制

管控的源头在于设计阶段对间距差异的充分认知与主动调控。首先,应基于既有路基的钻探资料和沉降观测数据,反算其地基固结参数和残余沉降趋势,以此作为新建路基沉降预测的基准。其次,针对不同间距段落实行“分级控制”策略:将全线按间距变化幅度划分为均匀段、渐变段和突变段,分别设定差异沉降容许值。对于渐变段,应控制间距变化率不超过某一阈值(例如每延米变化量不大于0.05m),使刚度过渡带足够宽缓;对于突变段,则应专门设置过渡结构(如渐变式土工格栅加筋层或柔性桩体过渡区),以人为延长应力扩散路径。最后,优化纵断面设计,使新旧路基顶面高差与水

平间距匹配,避免出现“陡坡短距”的不利组合。

4.2 地基处理与路基填筑的关键技术措施

在地基处理层面,应根据间距差异分区采用差异化处理深度和桩间距。对于间距较小的拼接段,应以“增强整体性”为目标,采用刚性桩或半刚性桩穿透软弱层,同时加强桩顶与既有路基坡脚的连接构造,确保桩体共同承担荷载;对于间距较大的独立新建段,则以“控制总沉降”为主,采用排水固结或深层搅拌法,重点减小工后沉降绝对值。路基填筑方面,推荐采用“台阶开挖+土工合成材料加筋”的组合措施,台阶宽度和加筋层间距应根据间距差异动态调整——间距突变处应加密加筋层数,并适当加宽台阶^[4]。此外,填筑速率应分区控制,间距较小区域采用缓速填筑并设置位移观测点,间距较大区域在保证稳定的前提下可适当提速,以实现全线的工后沉降同步。

4.3 防排水系统与界面协同设计

水是加剧差异沉降的敏感因素。不同间距段落,地表径流和地下水的汇集与排泄路径不同,导致路基含水率分布不均,进而影响土体模量和蠕变速率。管控措施包括:在间距过渡带设置纵向排水盲沟,切断地表水下渗通道;新建路基侧增设防渗土工膜,减少雨水入渗造成的附加压缩;在拼接界面处设置横向排水管,避免界面处积水软化。同时,应重视新旧路基界面处的“变形缝”设计,设置柔性填缝材料,允许一定的水平位移和竖向错动,以释放因间距差异产生的内部应力集中。

4.4 动态监测与信息化反馈管控

沉降病害管控离不开精准的监测体系。基于间距差异的空间分布,建立“点-线-面”相结合的监测网络:在典型间距断面(包括均匀、渐变、突变三种类型)布设分层沉降仪和测斜管,实时获取路基内部竖向变形和侧向位移;沿纵向以一定间距布设路面高程观测点,绘制全线沉降剖面曲线,及时发现沉降异常区域。监测频率应随施工进度动态调整,填筑期加密,预压期和运营期逐步放宽。更为关键的是,应将监测数据与前期设计预测值进行对比反演,修正后续路段的填筑参数和沉降预

留量,形成“监测-分析-调控”的闭环反馈机制。当实测差异沉降接近容许阈值时,可及时采取补压、注浆或轻质置换等补救措施,避免病害积累到不可控程度。

5 结语

公路改扩建工程中的新旧路基间距差异,不是孤立的尺寸问题,而是牵动荷载传递、固结演化、刚度匹配和施工时序等多场耦合作用的“神经中枢”。本文从几何成因出发,揭示了间距差异通过附加应力叠加、固结时间差和刚度梯度集中等路径诱发差异沉降的力学本质,明确了路基几何、地基条件与施工因素对病害程度的调控规律。在此基础上,提出了一套以“分区控制、协同变形、动态反馈”为核心的管控技术框架,强调将管控关口前移至设计阶段,在施工中实施差异化处理,在运营期依托监测实现病害早期预警。需要指出的是,当前对于间距差异的容许标准仍缺乏统一的认识,不同地区、不同土质条件下的临界间距值尚需进一步理论研究。工程实践中应结合具体项目条件,综合采用本文所述的多项措施,而非依赖单一技术。未来的研究方向可聚焦于间距差异与长期服役性能的统计关系、智能化监测数据的实时判据算法,以及基于数字孪生的差异沉降动态预报模型。唯有将间距差异作为一个独立且关键的设计变量加以系统把控,方能从根本上降低改扩建工程中沉降病害的发生风险,保障公路基础设施的长久服役安全。

参考文献

- [1] 黄晓明,赵永利,高英.公路改扩建路基差异沉降控制标准与设计方法研究进展[J].中国公路学报,2022,35(3):1-15.
- [2] 刘松玉,章定文,杜广印.软土地基上高速公路扩建工程差异沉降处治技术综述[J].岩土工程学报,2021,43(8):1389-1399.
- [3] 张军辉,郑健龙,张起森.新旧路基拼接界面力学行为与加筋处治机理[J].交通运输工程学报,2023,23(2):1-12.
- [4] 陈仁朋,王金昌,陈云敏.路基拓宽工程中地基应力历史对差异沉降的影响分析[J].岩土力学,2021,42(5):1423-1432.