

大位移量桥梁伸缩缝多向变位施工关键技术研究

李晨阳

江苏平山交通设施有限公司 江苏 南京 211500

【摘要】：随着现代交通基础设施建设的高速发展，大跨径桥梁工程越来越多，桥梁伸缩缝作为重要的构造部位，施工质量影响桥梁的整体性能。大位移量桥梁伸缩缝要承受纵向、横向和竖向多维度的变形，传统施工技术已经不能满足工程的要求。本文对大位移量桥梁伸缩缝多向变位施工的工程意义做了系统的分析，对多向位移计算复杂、施工精度控制难、材料工艺匹配性差等主要问题进行了详细的论述，提出了精准化多向位移监测预控、模块化安装精度控制、新型材料应用与工艺优化等关键技术策略。研究表明，通过建立三维变形监测体系、优化模块化装配流程、使用高性能复合材料，可以提高大位移量伸缩缝施工质量，给类似工程提供技术参考和实践指导。

【关键词】：大位移量；桥梁伸缩缝；多向变位；施工技术；精度控制

DOI:10.12417/2811-0536.26.04.059

引言

桥梁伸缩缝是用来适应结构变形的重要设施，它主要作用是吸收桥梁因为温度变化、混凝土的收缩徐变、车辆荷载等因素而产生的位移变形。大跨径桥梁工程中，伸缩缝所承受的位移量变大，变形方向也变得多维，既有纵向伸缩、横向偏移又有竖向沉降等复合变位。

传统伸缩缝施工技术大多是单向变形的的设计，对于大位移量多向变位的工况，存在着计算模型简化过度、施工定位误差累积、材料性能衰减加快等问题。本文以工程实践需求为基础，从大位移量桥梁伸缩缝多向变位施工关键技术创新问题入手，目的是通过技术创新提高施工质量，保证桥梁结构安全和使用性能。

1 大位移量桥梁伸缩缝多向变位施工的意义

1.1 保障桥梁结构安全与使用寿命

大位移量桥梁伸缩缝的多向变位施工技术，直接影响桥梁主体结构长期的安全性能。当伸缩缝不能很好地适应桥梁的多维变形时，会造成梁体约束应力集中，从而引起混凝土开裂、钢筋锈蚀等结构损伤。通过采用精准的多向变位施工，可以保证伸缩缝全寿命周期内保持较好的变形协调能力，有效分散温度应力、荷载应力和地基沉降所产生附加内力。合理设计多向变位可避免伸缩缝装置受力不均造成局部破坏，减少渗水、异物侵入等情况，从根本上提高桥梁使用寿命，减少全生命周期养护费用，给桥梁结构安全提供可靠的保证^[1]。

1.2 适应复杂环境下桥梁变形需求

现代桥梁工程经常要面对高寒、高温、强风、地震等复杂的环境条件，这些因素造成桥梁变形具有很强的多向性以及不确定性。大位移量多向变位施工技术可以考虑温度日较差、季节性温差引起的纵向伸缩，风荷载、地震作用引起的横向摆动，地基不均匀沉降造成的竖向位移。软土地基、山区峡谷等特殊地质条件下，桥梁基础沉降是长期的、差异的，传统的单向伸缩设计不能满足实际需要。采用多向变位施工技术，可使伸缩缝对三维空间变形有全方位的适应能力，在极端的环境以及特殊的工况下，桥梁仍能保持良好的运营状态，从而提高桥梁抵抗自然灾害的能力^[2]。

1.3 提升桥梁工程施工质量与技术水平

大位移量多向变位施工技术的应用是桥梁建设领域技术发展的方向，对提高整个行业的施工水平有重要的促进作用。该项技术牵涉精密测量、数值模拟、精细安装等诸多学科的交叉，施工队伍要具备先进的监测手段及控制办法。在施工时，依靠完善质量管理体系和技术标准，可以削减人为误差，改进安装准确度和施工速度。多向变位施工技术研究与应用促进了新材料、新工艺的开发，推进了施工装备智能化升级，为桥梁工程技术创新提供实践平台，对培养高素质技术人才、积累工程经验有重大意义^[3]。

2 大位移量桥梁伸缩缝多向变位施工面临的问题

2.1 多向位移计算与预测难度大

大位移量桥梁伸缩缝多向变位计算要进行温度

作者简介：姓名：李晨阳；出生年份：1991年；性别：男；民族：汉族；籍贯：安徽省安庆市；学历：本科；职业：工程师；研究方向：主要从事交通工程管理与施工技术的研究工作。

场、应力场、位移场的多物理场耦合分析，理论模型建立复杂，计算精度要求高。桥梁纵向位移受温度变化、混凝土徐变、预应力损失等因素的影响，横向位移与风荷载、车辆偏载、地震响应有关，竖向位移与基础沉降、梁体挠度变化有关。变形因素在时间和空间上是互相耦合的，并具有非线性特点。现有的计算方法大多都使用了简化假设，不能够全面的反映实际工况，造成预测结果和实际变形之间存在偏差。在温度梯度、不均匀沉降等复杂条件下，传统的经验公式就不适用了。

同时长期变形预测还要考虑材料的老化、环境的侵蚀等影响，增加了计算的不确定性。缺少精准的多向位移预测模型，导致伸缩缝设计参数选取没有可靠依据，施工方案的科学性、合理性受到影响，给后期的运营维护埋下了隐患^[4]。

2.2 施工精度控制与安装定位困难

大位移伸缩缝的多向变位特性给施工精度带来很高的要求，安装定位难度增大。伸缩缝装置在三维空间内要实现准确就位，纵向安装间隙、横向中心线偏差、竖向高程误差都应控制在毫米级以内。在实际施工过程中，梁端预埋件位置偏差、混凝土浇筑质量波动、温度变化造成的即时变形等互相叠加，造成安装基准面不稳定。大型模块化伸缩缝构件重量大、尺寸长，吊装时受风荷载、设备精度、操作熟练度等影响，不能实现一次性精准就位。

横向安装时，两侧梁缝平行、对称都要同时保证，有一点偏差都会造成受力不均、应力集中。竖向标高控制要考虑桥面铺装层厚度、排水坡度等，多专业协调配合难度大。施工时没有实时检测与反馈制度，不能及时发现并纠正偏差，一旦出现偏差之后调整成本就非常高、风险也很大^[5]。

2.3 材料性能与施工工艺匹配性不足

大位移量多向变位工况对伸缩缝材料的综合性能提出了很高的要求，但是现有的材料体系和施工工艺的匹配性不足。伸缩缝橡胶密封材料要具有良好的弹性恢复能力、耐疲劳性能和耐老化性能，才能适应反复的多向变形循环。但是常规橡胶材料在低温环境下硬化脆裂，在高温下软化蠕变，不能满足全气候条件下使用的要求。金属承重构件要承受车辆的冲击、环境的腐蚀和疲劳荷载，因此要求材料强度大、韧性好、耐久性强，传统钢材在盐雾、酸雨等腐蚀环境下很容易产生锈蚀，影响结构安全。橡胶和金属的粘接固结，其固化程度受温度、湿度的影响很大，施工现场的条

件很难精准地控制，从而造成粘接强度不稳定。预应力张拉、锚固等工序与材料力学性能的匹配缺少系统研究，施工参数设定大多依靠经验，科学性不高。新型高性能材料的应用还没有形成完善的施工工艺规范，推广受到限制，影响到大位移量伸缩缝施工质量整体提高。

3 大位移量桥梁伸缩缝多向变位施工关键技术策略

为系统展示大位移量桥梁伸缩缝多向变位施工的技术路线和实施步骤,本文构建了完整的施工技术流程体系,如图一所示。该流程涵盖了精准化监测预控、模块化安装工艺和新型材料应用三大关键技术模块,各模块协同配合,最终实现高质量施工目标。

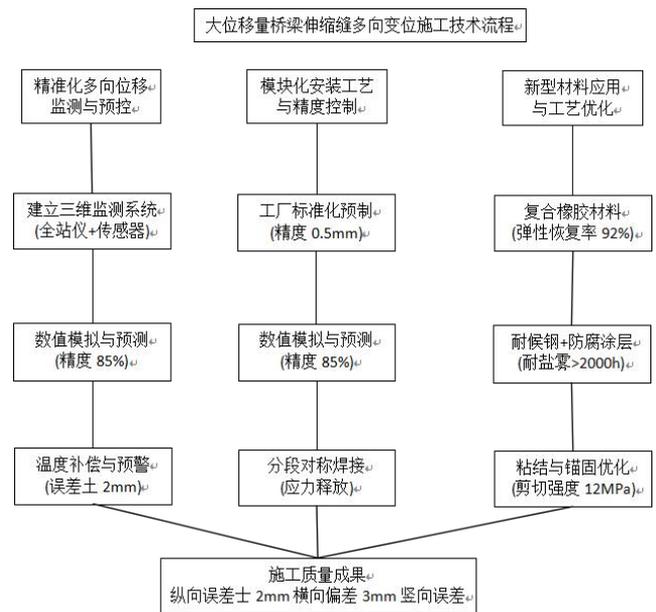


图1 大位移量桥梁伸缩缝多向变位施工技术流程图

3.1 精准化多向位移监测与预控技术

创建精确化的多向位移监测预控体系，是达成大位移量伸缩缝高质量施工的前提。

首先需要建立以三维坐标测量为依托的实时监测系统，在桥梁的关键截面处布置高精度全站仪、激光位移传感器和倾角仪，形成纵向、横向、竖向的立体监测网。监测频率应随温度变化规律和施工进度而变化而变化，在温度剧烈变化的时候每小时进行一次监测，保证能获得到位移峰值的数据。监测数据通过无线传输系统传送到中央处理平台，用大数据分析的方法形成位移时程曲线，辨别变形规律以及异常变动。数值预测方面要利用有限元分析软件来创建整体桥梁的模型，并把实测的温度场、荷载谱等边界条件输入进去，然后模拟不同的工况下多向位移。计算模型中混凝土徐变系数的取值范围为1.8~2.4，温度线膨胀

系数为 $1.0 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ ，基础沉降差控制在 15 毫米以内等。用实测值和计算值对比不断修正模型参数，使预测精度提高到 85% 以上。预控技术还要包括温度补偿措施，在高温季节施工时预留 3 到 5 毫米的收缩余量，低温环境下应增大伸长预留量。建立位移阈值预警机制，当实测位移大于设计值的 90% 就发出黄色预警，大于 95% 时就发出红色预警并停止施工，在预警发生的时候采取相应的措施。这样一套监测预控体系可以保证伸缩缝安装间隙误差控制在 ± 2 毫米以内，横向偏差不大于 3 毫米，竖向高程误差小于 2 毫米，大大提高了施工精度和可靠性。

3.2 模块化安装工艺与精度控制方法

模块化安装工艺是提高大位移量伸缩缝施工效率和精度的有效方法。伸缩缝装置在工厂内实行标准化预制，使用数控加工设备保证构件尺寸精度达到 ± 0.5 毫米，模块间接口用高精度定位销、螺栓连接，保证现场拼装互换性、一致性。模块划分要考虑到运输的限制以及吊装的能力，单个模块长度控制在 8 到 12 米，重量不超过 15 吨，利于标准吊装设备的操作。现场安装前要进行详细的测量放样，用三维激光扫描技术获得梁端实际几何形状，生成点云数据和设计模型对比，偏差大于 5 毫米的部位局部修整。用高强钢丝配合张力计张拉安装基准线，保证基准线直线度误差不大于 2mm 每 10m 作为横向定位可靠依据。吊装作业在气温 $15^\circ\text{C} \sim 25^\circ\text{C}$ 、风速小于 3 级的时候进行，使用双机抬吊加液压同步顶升系统，保证模块平稳就位。纵向定位时先用临时支撑架固定一端，用液压千斤顶在另一端微调，调整精度可以达到 0.1 毫米，保证安装间隙一致。横向定位用激光对中仪和钢尺复核，两侧边缘与中心线偏差控制在 ± 1.5 毫米内。竖向标高控制用精密水准仪逐点测量，通过调整垫板厚度达到找平目的，相邻模块高差不大于 1mm。焊接固定时采用分段对称施焊工艺，焊接顺序由中间到两端推进，每段焊缝长度 200mm，焊接后自然冷却，进行应力释放，防止焊接变形影响整体精度。

全部模块安装完毕后进行整体测量验收，合格率要达到 98% 以上，对超差部位进行返工处理，保证伸缩缝装置的整体性、协调性。该模块化安装工艺可以缩短现场施工周期 40%，高空作业的风险降低 30% 以上。相较于传统施工技术，多向变位施工技术在位移计算、施工精度、材料工艺等方面实现了全面突破，如图 2 所示。通过技术创新，整体合格率从 85% 提升至 98% 以上，施工周期缩短 40%，使用寿命延长至 25 年以上。

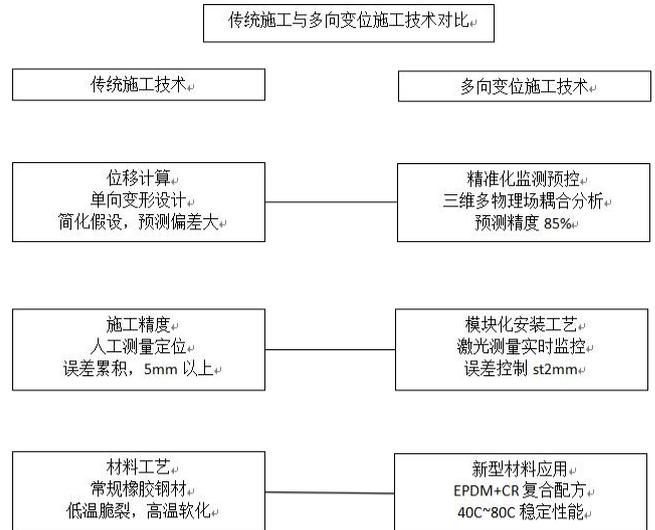


图 2 传统施工与多向变位施工技术对比

3.3 新型材料应用与施工工艺优化技术

新型高性能材料的使用，可以提高大位移量伸缩缝耐久性、适应性。橡胶密封材料应采用三元乙丙橡胶（EPDM）和氯丁橡胶（CR）复合配方，通过调节硫化体系和增塑剂比例，使材料在 $-40^\circ\text{C} \sim 80^\circ\text{C}$ 的温度范围内保持稳定的弹性模量，弹性恢复率大于 92%。添加纳米碳黑和抗氧化剂提高材料耐老化性能，紫外线照射 5000h 拉伸强度保持率不低于 80%。金属承载构件用耐候钢或不锈钢复合板材，表面热喷涂锌铝合金涂层，厚度控制在 150 微米至 200 微米，耐盐雾试验大于 2000 小时，有良好的抗环境腐蚀性。高应力区用超高强度螺栓连接，抗拉强度等级达到 10.9 级，预紧力矩按设计值的 1.1 倍施加，保证连接可靠。施工工艺优化，橡胶与金属粘结采用改性环氧树脂胶粘剂，施工环境温度控制在 18°C 至 28°C ，相对湿度小于 70%，粘结面喷砂处理达到 Sa2.5 级清洁度，粘结剂涂布厚度 1.5 毫米，加压固化时间不少于 24 小时，剪切强度测试结果达到 12 兆帕以上。预应力张拉工艺采用分级加载的方式，初张拉到设计应力的 50%，持荷 10 分钟后张拉到 100%，张拉应力误差控制在 $\pm 3\%$ 以内，有效减小应力松弛的影响。锚固端用机械锁定和化学灌浆双重保障，锚固长度不小于 50 倍钢筋直径，灌浆材料抗压强度达到 60 兆帕，保证锚固可靠。

施工过程中建立材料性能追溯体系，对每批次材料做力学性能、耐久性能检测，不合格材料不得使用。采用新型材料和改进工艺相结合的方法，伸缩缝疲劳寿命提高到 200 万次以上，维修周期延长 50% 左右，总的使用寿命大于 25 年，大大地改善了工程效益和社会效益。

表1 大位移量桥梁伸缩缝多向变位施工关键技术参数汇总表

技术类别	技术措施	关键参数	控制指标	技术效果
精准化监测预控	三维坐标实时监测	监测频率	温度剧变时 1 次/小时	预测精度 ≥85%
		纵向间隙误差	±2 毫米	
		横向偏差	≤3 毫米	
		竖向高程误差	<2 毫米	
	数值模拟分析	混凝土徐变系数	1.8~2.4	
		温度线膨胀系数	$1.0 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$	
		基础沉降差	≤15 毫米	
	温度补偿	高温收缩预留量	3~5 毫米	

措施			
	预警阈值(黄色)	设计值的 90%	
	预警阈值(红色)	设计值的 95%	

4 结语

大位移量桥梁伸缩缝多向变位施工技术属于桥梁工程领域的研究方向，对于保证桥梁结构的安全、适应复杂环境变形、提高施工质量具有重要意义。本文对目前施工中存在的多向位移计算预测困难、精度控制定位复杂、材料工艺匹配不足等问题做了系统的分析，提出了精准化监测预控、模块化安装精度控制、新型材料应用与工艺优化等技术策略。建立三维实时监测体系、数值预测模型可以实现位移的精准预控，采用模块化预制、精细化安装工艺可以大大提高施工精度、效率，使用高性能复合材料、优化施工工艺参数可以有效提高伸缩缝的耐久性、适应性。

参考文献:

[1] 胡兵.公路桥梁伸缩缝施工技术研究[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2024,(4).
 [2] 张萍.季节性温差大地区公路桥梁伸缩缝早损机理与防治[J].传奇天下,2024,(5):52-54.
 [3] 李瑞栓.高速公路桥梁过渡段伸缩缝施工技术研究[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2024,(8).
 [4] 刘林石水,陈约翰,资道明,等.装配式快速安装多向变位桥梁伸缩装置的承载性能[J].福州大学学报(自然科学版),2025,53(3):335-341.
 [5] 尹少雷.桥梁伸缩缝施工关键技术及损伤修复[J].交通世界,2025,(31):177-179.