大跨度预应力混凝土桥梁施工过程中的应力监测与控制

沈应鹏

宁夏晨乾建设发展有限公司　宁夏　银川　750000

摘　要：大跨度预应力混凝土桥梁施工过程中，结构体系不断转换，预应力筋张拉、节段浇筑与合龙等工序均会引起显著的应力重分布。若应力状态偏离设计预期，轻则导致梁体开裂，重则危及结构安全。本文系统梳理了施工应力监测的理论基础与技术手段，分析了预应力损失、温度效应、混凝土收缩徐变等关键影响因素的作用机理，阐述了应力监测系统的布置原则与传感器选型方法，并探讨了基于监测反馈的施工控制策略。研究表明，构建“监测—识别—预测—调控”的闭环控制体系，实现应力状态的动态追踪与主动调节，是保障大跨度预应力混凝土桥梁施工安全与成桥线形、内力状态的关键路径。本文可为同类桥梁的施工监控提供理论参考与方法指导。

关键词：大跨度预应力混凝土桥梁；施工应力监测；应力控制；预应力损失

引言

预应力混凝土桥梁自 20 世纪中叶以来在跨越能力与结构效率方面持续突破，目前主跨超过 200 米的连续刚构桥、斜拉桥及拱桥已大量涌现。此类桥梁在施工阶段往往采用悬臂浇筑、悬臂拼装或顶推等方法，结构从墩顶向两侧逐段延伸，期间经历多次体系转换。每一次体系转换都伴随着内力重分布，而预应力张拉、混凝土龄期差异、环境温度波动等因素进一步增加了应力状态的复杂性。施工应力监测与控制的核心目标在于：实时掌握关键截面的应力水平，验证其是否处于设计允许范围；识别实际应力与理论预期之间的偏差，并及时采取调控措施；为合龙精度和成桥内力状态提供保障。近年来，随着光纤光栅传感技术、振弦式传感器及无线传输技术的发展，应力监测的精度与可靠性显著提升，但如何将海量监测数据转化为有效的控制决策，仍是工程实践中的难点。本文从应力监测的理论基础出发，分析施工应力的主要影响因素，探讨监测系统的设计原则与控制策略，旨在为大跨度预应力混凝土桥梁的施工安全控制提供系统性参考。

1 施工应力监测的理论基础

1.1 预应力混凝土桥梁的受力特征

预应力混凝土桥梁通过预加力使混凝土在受拉区预先受压，从而提高构件的抗裂能力和刚度。在施工阶段，结构的受力状态与成桥状态存在显著差异。以悬臂浇筑连续刚构桥为例，最大悬臂状态下墩顶截面的负弯矩往往超过成桥状态，而合龙后体系转换又会导致内力重新分配。因此，施工应力监测不能简单以成桥设计内力为参照，而应建立各施工阶段的分阶段目标应力状态。从力学本质上看，预应力混凝土桥梁的施工过程是一个预应力筋与混凝土协同工作、内力不断调整的过程。预应力筋的张拉使混凝土产生弹性压缩，而混凝土的收缩徐变又反过来影响预应力筋的应力水平，二者之间存在复杂的耦合关系。

1.2 应力监测的基本原理

混凝土应力监测通常采用间接测量方法。振弦式应变计通过测量钢弦振动频率的变化来推算应变，再结合混凝土弹性模量换算应力；光纤光栅传感器则利用布拉格波长对应变的敏感性实现测量。无论何种传感器，其测得的是总应变，需扣除温度应变、收缩应变和徐变应变后，才能得到荷载引起的弹性应变，进而计算有效应力。这一分离过程是应力监测精度的关键所在[1]。具体而言，总应变可表示为弹性应变、温度应变、收缩应变和徐变应变之和，其中弹性应变与应力之间满足胡克定律。由于温度应变和收缩徐变应变的量值往往与弹性应变相当，甚至更大，因此分离方法的准确性直接决定了应力监测的可靠性。

1.3 监测与控制的闭环关系

应力监测的价值在于反馈控制。监测数据经滤波、温度修正和误差识别后，与有限元模型计算值进行对比，通过参数识别修正模型中的材料参数、预应力损失系数等，再据此预测后续施工阶段的应力演化，最终形成调控指令。这一“监测—识别—预测—调控”的闭环

体系，是现代桥梁施工控制的核心逻辑。在该体系中，监测是基础，识别是桥梁，预测是核心，调控是目的。四个环节相互衔接、循环往复，贯穿于施工全过程。只有建立完整的闭环体系，才能实现从被动监测到主动控制的转变。

2 施工应力的主要影响因素

2.1 预应力损失

预应力损失是施工应力偏差的首要来源。瞬时损失包括锚具变形与钢筋回缩、管道摩擦和混凝土弹性压缩；长期损失则包括混凝土收缩徐变和钢筋应力松弛。在悬臂施工中，各节段预应力筋的张拉时间、顺序和批次不同，导致损失量存在显著差异。尤其在后张法体系中，管道摩擦系数受波纹管材质、施工质量及弯曲角度影响，实际值与规范取值之间常有偏差。此外，锚具变形与钢筋回缩引起的损失与张拉端至锚固端的距离相关，在长束预应力筋中尤为突出。混凝土弹性压缩损失则与张拉批次密切相关，后批张拉引起的弹性压缩会使先批已张拉的预应力筋产生附加损失。

2.2 温度效应

大跨度桥梁对温度作用高度敏感。日照温差使梁体上下缘产生温度梯度，引起附加应力；季节温差则影响整体结构的长效变形。在悬臂施工阶段，温度梯度会导致悬臂端产生竖向位移和截面应力波动，若在温度不利时段进行合龙或张拉，可能引入难以修正的偏差[2]。因此，应力监测必须同步记录温度数据，并在数据分析中予以分离。温度效应的复杂性还在于其具有明显的时变性和空间分布特征，沿梁高方向的温度梯度模式与日照强度、风速、梁体表面颜色等因素有关，难以用单一函数精确描述。

2.3 混凝土收缩与徐变

收缩徐变是混凝土的时变特性，其发展贯穿施工全过程乃至成桥后数十年。在施工阶段，各节段混凝土龄期不同，收缩徐变的发展程度各异，导致结构内部产生次内力。对于采用节段浇筑的桥梁，新老混凝土的龄期差可引起显著的应力重分布。准确预测收缩徐变效应，需要结合现场温湿度条件和混凝土配合比进行参数标定。目前常用的预测模型包括 CEB-FIP 模型、ACI 模型和 B3 模型等，各模型对收缩徐变的预测结果存在一定差异，实际工程中宜采用多种模型对比分析，并结合实测数据进行修正。

2.4 施工荷载与体系转换

施工过程中的临时荷载（如挂篮、施工机具、人员）以及体系转换（如合龙、支座安装、临时固结解除）均会引起应力的突变。挂篮在节段间的移动导致悬臂端荷载位置变化，合龙时的顶推或配重调整则直接影响合龙口两侧的应力状态。这些施工行为的力学效应需要在监测中予以重点关注。体系转换是施工应力控制中最为敏感的环节，因为体系转换前后结构的边界条件和传力路径发生根本变化，内力重分布可能在短时间内完成，若控制不当，极易造成应力超限或线形偏差。

3 应力监测系统的设计与实施

3.1 监测截面的选择原则

监测截面应覆盖结构受力最不利部位和体系转换关键部位。对于连续刚构桥，墩顶截面、跨中截面、L/4 截面及合龙口附近截面是重点监测对象。墩顶截面承受最大负弯矩，跨中截面在成桥后承受正弯矩，合龙口截面则在合龙前后经历应力突变。此外，预应力筋锚固区、截面突变处也应布置测点。监测截面的数量应综合考虑结构重要性、施工风险和监测成本，在关键截面宜适当增加测点密度，以捕捉应力分布的细节特征。

3.2 传感器选型与布置

振弦式应变计因其长期稳定性好、抗干扰能力强，在桥梁施工监测中应用广泛。光纤光栅传感器具有分布式测量、抗电磁干扰等优势，适用于长距离、多点位监测。传感器布置应遵循“关键截面多点位、重要截面多冗余”的原则，在截面上下缘及腹板中部均设置测点，以捕捉应力梯度[3]。同时，应在无应力区域设置温度补偿传感器，用于分离温度应变。传感器安装时应注意与混凝土的协同变形，避免因安装缺陷导致测量失真。对于长期监测，还应考虑传感器的耐久性和可更换性。

3.3 数据采集与传输

现代监测系统通常采用自动化采集与无线传输方案。数据采集频率应根据施工阶段动态调整：在预应力张拉、合龙等关键工序中提高至分钟级，在正常施工期间可降低至小时级。采集的数据通过无线网络传输至监控中心，经预处理后存入数据库，供实时分析与历史回溯使用。数据采集系统的可靠性至关重要，应具备断电保护、数据缓存和远程重启等功能，以应对施工现场的复杂环境。同时，数据传输应保证实时性和完整性，避免因网络中断导致数据丢失。

3.4 监测数据的预处理

原始监测数据不可避免包含噪声和异常值。预处理包括：剔除明显跳变点、平滑随机噪声、进行温度修正和收缩徐变修正。温度修正依赖于温度补偿传感器和

温度场模型；收缩徐变修正则需结合混凝土龄期和现场环境参数。预处理后的数据才能用于与理论值的对比分析。此外，还应对监测数据进行一致性检验，判断各测点之间的应力分布是否符合力学规律，以发现可能的传感器故障或安装问题。

4 施工应力控制策略

4.1 分阶段目标应力控制

施工控制应以各阶段的目标应力状态为基准。在施工前，通过有限元分析确定每个施工阶段关键截面的理论应力区间；施工中，将实测应力与目标区间对比，判断偏差是否在允许范围内。允许偏差的设定应综合考虑监测精度、材料参数不确定性和施工误差。目标应力区间的确定还应考虑预应力损失和收缩徐变的时间效应，宜采用考虑时变效应的有限元分析，以获得更符合实际的目标值。

4.2 参数识别与模型修正

当实测值与理论值出现系统性偏差时，需通过参数识别修正计算模型。常用方法包括最小二乘法和卡尔曼滤波法。需要识别的参数主要有：混凝土弹性模量、预应力损失系数、收缩徐变参数、温度梯度模式等。模型修正后，重新预测后续阶段的应力演化，为调控提供依据。参数识别应遵循“敏感性优先”的原则，优先识别对结构应力影响显著的参数，避免因参数过多导致识别结果不稳定。

4.3 预应力张拉的优化控制

预应力张拉是施工应力控制中最直接的调控手段。在悬臂施工中，应根据监测反馈调整后续节段的张拉控制应力或张拉顺序。例如，若实测墩顶截面压应力储备不足，可适当提高后续节段的张拉力；若悬臂端挠度偏大，可通过调整张拉顺序改善受力状态。张拉控制应遵循“双控”原则，即以张拉力为主、伸长量为辅进行校核[4]。对于长束预应力筋，宜采用两端张拉以减小摩擦损失；对于密集布置的预应力筋，应合理安排张拉顺序，避免混凝土局部应力过大。

4.4 合龙过程的应力调控

合龙是体系转换的关键工序，合龙口的应力状态直接影响成桥内力。合龙前应通过监测确认两侧悬臂的应力和位移状态，必要时采用顶推、配重或临时约束调整。合龙时机应选择在温度稳定时段，以减少温度应力的干扰。合龙后应及时监测体系转换引起的应力重分布，验证其是否与设计预期一致。合龙顺序对多跨桥梁的应力状态也有显著影响，通常从边跨向中跨依次合龙，以减小中跨合龙时的应力调整幅度。

4.5 预警机制与应急调控

建立分级预警机制是施工安全的重要保障。根据实测应力偏离目标值的程度，设置黄色、橙色和红色三级预警。黄色预警时加强监测频率并分析原因；橙色预警时启动参数识别和调控预案；红色预警时暂停施工并组织专家论证。应急调控措施包括临时支撑、调整张拉方案和局部加固等。预警阈值的设定应结合结构可靠度分析和工程经验，既不能过于保守导致频繁报警，也不能过于宽松而失去预警意义。

5 监测与控制的发展趋势

随着智能建造技术的推进，应力监测正朝着自动化、智能化和集成化方向发展。基于机器学习的应力预测模型可提高参数识别的效率；数字孪生技术可实现施工过程的虚拟映射与实时交互；分布式光纤传感技术则有望实现全桥应力的连续测量。未来，应力监测将与线形监测、温度监测深度融合，形成多维度的施工控制体系。此外，云平台和大数据技术的应用将使多座桥梁的监测数据实现共享与对比分析，为施工控制经验的积累和规范的完善提供数据支撑。

结束语

大跨度预应力混凝土桥梁施工过程中的应力监测与控制，是保障结构安全、实现设计意图的核心环节。本文从理论基础、影响因素、监测系统设计和控制策略四个层面进行了系统阐述。研究表明，施工应力的复杂性源于预应力损失、温度效应、收缩徐变和体系转换等多重因素的耦合作用，单一监测手段难以全面把握。构建“监测—识别—预测—调控”的闭环体系，将实时监测数据与有限元分析相结合，实现参数动态修正和应力主动调控，是提高施工控制精度的有效途径。随着传感技术和智能算法的发展，应力监测与控制将向更高精度、更高效率和更高集成度方向演进，为大跨度桥梁的建设提供更可靠的安全保障。

参考文献

[1] 王景全, 刘钊. 预应力混凝土桥梁施工控制中的应力监测方法研究 [J]. 桥梁建设,2021,51(3):45-52.

[2] 李国平, 陈艾荣. 大跨度连续刚构桥施工阶段应力监测与分析 [J]. 土木工程学报,2022,55(7):88-96.

[3] 张建仁, 彭建新. 混凝土桥梁收缩徐变效应预测与施工控制 [J]. 中国公路学报,2020,33(5):112-120.

[4] 刘永健, 周绪红. 基于光纤传感的桥梁施工应力监测技术进展 [J]. 建筑结构学报,2023,44(2):156-165.