

预应力混凝土桥梁施工过程中应力损失控制措施

王维军

新疆生产建设兵团交通建设有限公司 新疆 乌鲁木齐 832017

摘要: 预应力混凝土桥梁因其优异的跨越能力、良好的耐久性和经济性,在现代桥梁工程中占据主导地位。然而,在预应力施加及后续使用过程中,由于材料特性、施工工艺和环境因素等多重影响,不可避免地会发生预应力损失。若不加以有效控制,将显著削弱结构的有效预压应力,影响桥梁的承载能力、抗裂性能及长期服役性能。本文系统梳理了预应力混凝土桥梁施工过程中各类应力损失的成因与机理,重点分析了瞬时损失(如锚具变形、摩擦损失、混凝土弹性压缩)与长期损失(如混凝土收缩徐变、钢筋松弛)在施工阶段的表现特征,并提出了针对性的控制策略与优化措施。研究表明,通过精细化设计、先进施工技术、严格质量控制以及全过程监测反馈,可显著降低施工阶段的预应力损失,保障桥梁结构的安全性与耐久性。本文成果对提升预应力混凝土桥梁施工质量具有重要的理论价值与工程指导意义。

关键词: 预应力混凝土桥梁; 应力损失; 施工控制; 摩擦损失; 弹性压缩; 收缩徐变; 张拉工艺

引言

随着我国基础设施建设的持续推进,大跨径、高墩、复杂线形的预应力混凝土桥梁日益增多。预应力技术通过在混凝土中预先引入压应力,有效抵消外部荷载引起的拉应力,从而提高结构的抗裂性、刚度和承载力。然而,从预应力筋张拉完成到桥梁投入运营的整个过程中,预应力值会因多种物理和化学机制而逐渐减小,这一现象称为“预应力损失”。预应力损失可分为瞬时损失和长期损失两大类。瞬时损失发生在张拉后短时间内,主要包括锚具变形与钢筋回缩损失、孔道摩擦损失、混凝土弹性压缩损失等;长期损失则随时间缓慢发展,主要由混凝土收缩徐变和预应力筋松弛引起。尽管部分长期损失在施工阶段尚未完全显现,但其初始发展速率和最终量值受施工阶段诸多因素(如混凝土配合比、养护条件、张拉时机等)的显著影响。若预应力损失过大,将导致有效预应力不足,使结构在正常使用状态下出现裂缝,甚至影响承载安全。因此,如何在施工过程中科学预测、精准控制并有效补偿预应力损失,是确保预应力混凝土桥梁工程质量的核心技术难题之一。

1 预应力损失的分类与机理分析

1.1 瞬时损失

1.1.1 锚具变形与钢筋回缩损失 ($\Delta\sigma_1$)

在张拉完成后,当千斤顶卸载、锚具夹片锁紧预应力筋时,锚具本身会发生微小的塑性变形,同时预应力筋在锚固点处会产生局部回缩。这一过程导致预应力筋长度缩短,从而引起应力损失^[1]。该损失主要发生在锚固端附近,沿构件长度方向呈线性分布,距张拉端越远,

损失越小。损失值可近似按以下公式计算:

$$\Delta\sigma_1 = \frac{E_p \cdot \delta}{L}$$

其中, E_p 为预应力筋弹性模量, δ 为锚具变形与钢筋回缩总值(通常取4~6mm), L 为张拉端至计算截面的距离。

1.1.2 孔道摩擦损失 ($\Delta\sigma_2$)

对于后张法桥梁,预应力筋通常穿入预留孔道中进行张拉。在张拉过程中,预应力筋与孔道壁之间存在摩擦阻力,尤其在曲线段或存在偏差的直线段更为显著。摩擦损失由两部分组成:一是由孔道曲率引起的法向压力产生的摩擦(弯曲摩擦);二是由孔道局部偏差引起的附加摩擦(偏差摩擦)。根据《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG3362-2018),摩擦损失可按下式计算:

$$\Delta\sigma_2 = \sigma_{con} [1 - e^{-(\mu\theta + kx)}]$$

其中, E_p 为张拉控制应力, μ 为预应力筋与孔道壁的摩擦系数, θ 为从张拉端至计算截面的孔道切线夹角(rad), k 为孔道每米局部偏差的摩擦系数, x 为张拉端至计算截面的孔道长度(m)。摩擦损失随孔道长度和曲率增大而显著增加,是长跨径、多曲线桥梁中不可忽视的损失项。

1.1.3 混凝土弹性压缩损失 ($\Delta\sigma_3$)

当预应力筋分批张拉时,先张拉的预应力筋会使混凝土产生压缩应变,导致后张拉的预应力筋在锚固前即因混凝土缩短而产生应力损失。对于先张法构件,所有预应力筋同步放张,此损失较小;而后张法中若采用分批张拉,则该损失较为显著。对于后张法,若采用一次张拉全部钢束,则无此项损失;若分批张拉,第*i*批钢束

的弹性压缩损失可表示为:

$$\Delta\sigma_3 = \frac{n \cdot E_p}{E_c} \cdot \sigma_{cg}$$

其中, n 为预应力筋根数, E_p 为混凝土弹性模量, σ_{cg} 为扣除相应损失后混凝土在预应力筋重心处产生的压应力。

1.2 长期损失 (施工阶段相关部分)

虽然长期损失主要在使用阶段发展,但其初始条件由施工阶段决定。

1.2.1 预应力筋松弛损失 ($\Delta\sigma_4$)

预应力筋在高应力状态下长期持荷,会发生缓慢的塑性变形,即应力松弛。松弛损失与张拉控制应力、持荷时间、温度及钢筋种类密切相关。规范中通常按张拉控制应力的百分比估算^[2]。值得注意的是,若在混凝土强度未达设计要求时过早张拉,会导致有效应力偏低,反而可能加剧相对松弛率。

1.2.2 混凝土收缩与徐变损失 ($\Delta\sigma_5, \Delta\sigma_6$)

混凝土在硬化过程中因水分蒸发产生体积收缩;在持续压应力作用下,随时间发生徐变变形。两者均导致预应力筋长度缩短,引起应力损失。收缩徐变的发展受混凝土配合比(水胶比、水泥用量)、养护条件(湿度、温度)、加载龄期等因素强烈影响。

施工阶段的关键在于:张拉时混凝土的龄期越短、强度越低,徐变系数越大,长期损失越高。因此,合理确定张拉时机是控制长期损失的关键。

2 施工过程中应力损失的主要影响因素

预应力损失并非孤立现象,而是设计、材料与施工多环节交互作用的结果。在设计层面,孔道布置的合理性直接影响摩擦损失大小,过于复杂的曲线线形或密集的弯起角度会显著增加预应力传递阻力;张拉顺序若未统筹考虑弹性压缩效应,亦会放大分批张拉带来的应力不均。材料方面,混凝土的体积稳定性是控制长期损失的基础,高水胶比、高水泥用量的配合比往往伴随更大的收缩徐变;而预应力筋表面若存在锈蚀或油污,则会增大与孔道间的摩擦系数。施工工艺则是损失控制的最后一道关口:孔道定位偏差、接头漏浆、内壁粗糙等质量问题会加剧摩擦;张拉控制不精准(如超张或欠张)、持荷时间不足、未实现两端同步张拉等操作失误,均会直接导致有效预应力偏离设计预期;此外,养护条件不良不仅延缓强度发展,还可能诱发早期塑性收缩裂缝,进一步恶化结构性能。综上,应力损失的控制必须贯穿于全链条,任何环节的疏忽都可能造成系统性风险。

3 应力损失控制的关键措施

3.1 优化设计阶段控制

在设计源头采取前瞻性措施,是降低应力损失的根本途径。首先,应在满足结构受力需求的前提下,尽可能简化预应力筋的布束线形,优先采用直线或大半径曲线,减少不必要的弯起次数和角度,从而从几何上削弱摩擦损失的产生条件。对于连续梁或刚构桥,可考虑设置通长束以减少锚固点数量,降低锚具变形损失的累积效应^[3]。其次,应优先选用高强低松弛预应力钢绞线(如1860MPa或1960MPa级),其1000小时松弛率可控制在2.5%以内,显著优于普通松弛产品。此外,在设计计算中应充分考虑最不利损失组合,并适当预留预应力储备;对于摩擦损失严重的区段,可在规范允许范围内实施适度超张拉(一般不超过5%),以补偿远端应力衰减,确保全截面有效预压应力满足抗裂与承载要求。

3.2 提升材料与构件质量

材料性能是应力损失控制的物质基础。混凝土配合比设计应以低水胶比(建议 ≤ 0.35)、适量掺加优质矿物掺合料(如I级粉煤灰、S95矿粉)为核心原则,这不仅能降低水化热、改善工作性,更能显著抑制后期收缩徐变。同时,应严格控制水泥用量,避免因胶凝材料过多而加剧体积不稳定性。在孔道材料选择上,高密度聚乙烯(HDPE)塑料波纹管因其内壁光滑、摩擦系数低($\mu \approx 0.14 \sim 0.17$)、耐腐蚀且密封性好,已逐步取代传统金属波纹管,成为降低摩擦损失的有效手段。此外,必须严把原材料进场关,确保预应力筋无锈蚀、无油污、无机械损伤,锚具硬度与夹片齿形符合标准,所有关键材料均需进行力学性能复检,杜绝不合格品流入施工现场。

3.3 精细化施工控制

施工过程是应力损失控制的主战场,必须实施全过程精细化管理。孔道成型质量直接决定摩擦损失大小,应采用数控弯管设备精确加工曲线管道,并通过加密定位钢筋(间距不宜大于50cm)确保浇筑过程中孔道位置稳定;所有接头必须严密密封,防止漏浆形成“死孔”阻碍钢束穿束或张拉。张拉时机的确定需基于同条件养护试块的实测强度,确保混凝土强度不低于设计值的85%且龄期不少于7天(高性能混凝土可酌情调整),避免因过早张拉导致局部压溃或徐变过大。张拉作业应采用智能张拉系统,严格执行“双控”原则(即以张拉力为主、伸长量为辅),程序应为0→初应力($10\% \sigma_{con}$)→ $100\% \sigma_{con}$ (持荷5分钟)→锚固,且实测伸长量与理论值偏差应控制在 $\pm 6\%$ 以内。对于长跨或曲线束,必须实施两端同步张拉,以消除单端张拉造成的应力不对称^[4]。张拉完成后,应及时进行真空辅助压浆,确保孔道饱满密实,浆体水胶比应 ≤ 0.28 ,并掺加膨胀剂与阻锈剂,防止泌

水收缩形成空洞；最后，锚头应及时封锚，隔绝外界侵蚀介质，保障预应力系统的长期有效性。

3.4 全过程监测与反馈调整

理论计算与实际工况往往存在偏差，因此必须建立现场实测与反馈机制。可在关键截面（如跨中、支点、合龙段）埋设振弦式或光纤光栅应变计，直接监测混凝土中的有效预压应力发展过程；亦可采用反拉法或钢绞线自振频率法间接测定预应力筋的实际应力状态。通过对比实测值与设计理论值，可验证损失模型的准确性，并识别施工异常。若发现有效预应力显著低于设计预期（如低于90%），应在设计单位复核后，考虑利用预留孔道进行补充张拉。更重要的是，应将监测数据动态反馈至后续施工节段，用于修正张拉参数、优化施工方案，实现从“经验施工”向“数据驱动”的转变，真正构建闭环控制体系。

4 工程案例析

以某座主跨100米的三跨预应力混凝土连续箱梁桥（跨径组合为60+100+60米）为例，该桥采用单箱双室截面，纵向预应力体系由15-19φs15.2低松弛钢绞线组成，孔道采用HDPE塑料波纹管，设计为两端张拉。在首跨合龙段张拉完成后，通过频率法检测发现跨中底板有效预应力仅为设计值的82%，存在抗裂安全储备不足的风险。经深入排查，问题根源在于三个方面：一是现场孔道实际线形与设计图纸存在偏差，局部曲率半径小于30米，远低于规范建议值；二是张拉作业在混凝土浇筑后第5天进行，虽强度达标，但龄期偏短，徐变潜力较大；三是施工方为节省设备，采用单端张拉，导致摩擦损失高达18%。针对上述问题，项目团队立即采取整改措施：对后续节段孔道定位模板进行BIM三维放样校正；将张拉龄期统一调整为7天，并加强保温保湿养护；全面启用智能同步张拉设备，实时监控两端伸长量一致性。整改后，后

续节段的实测有效预应力稳定在设计值的93%至96%之间，完全满足规范与设计要求，有效保障了桥梁的长期服役性能。

5 结语

预应力混凝土桥梁施工过程中的应力损失是影响结构性能的关键因素。本文系统分析了各类损失的机理与影响因素，并提出从设计优化、材料提升、施工精细化到全过程监测的综合控制策略。研究表明，摩擦损失与弹性压缩损失是施工阶段最主要的瞬时损失源，可通过优化布束、采用低摩擦孔道、合理张拉顺序等措施有效抑制；张拉时机与混凝土质量直接决定长期损失的初始水平，必须严格控制混凝土强度、龄期与配合比；智能张拉、真空压浆等新技术的应用显著提升了施工精度与可靠性；而现场实测与反馈机制则是验证与修正理论模型、实现动态控制的核心手段。未来，随着数字孪生、BIM+GIS集成平台的发展，预应力损失控制将向“预测—执行—监测—优化”闭环管理方向演进。同时，新型材料（如碳纤维预应力筋、超高性能混凝土）的应用有望从根本上降低预应力损失，推动预应力混凝土桥梁向更长寿命、更高性能迈进。

参考文献

- [1]陈汛.桥梁预应力张拉应力损失与质量控制探究[J].中国公路,2021,(15):84-85.
- [2]王建成,袁树才,何宝根,等.预应力锚索张拉应力损失原因及监测数据分析[C]//中国水利学会,西安理工大学.2024中国水利学术大会论文集(第六分册).中水珠江规划勘测设计有限公司,2024:92-98.
- [3]卢发亮.预应力混凝土箱梁体外索应力损失监测研究[J].中外公路,2021,41(02):115-119.
- [4]王魏礼.穿心式预应力锚索应力损失分析及控制措施研究[J].工程与建设,2024,38(06):1336-1337.