

桥梁预应力张拉持荷时间不足对有效应力的影响研究

姬永彪

云南航天工程物探检测股份有限公司 云南 昆明 650217

【摘要】：为明确预应力张拉持荷时间不足对桥梁结构有效应力的影响规律，本文结合理论分析与试验研究，系统探讨不同持荷时间下预应力筋有效应力的变化特征。通过设计多组对比试验，监测持荷时间从 0min 到规范要求的 5min 过程中预应力筋的应力损失情况，分析持荷不足引发的应力损失机理及对结构承载性能的潜在影响。结果表明，持荷时间不足会显著增加预应力瞬时损失与徐变损失，当持荷时间小于 2min 时，有效应力损失率可达 8% 以上；规范规定的 5min 持荷时间能确保预应力筋应力稳定，有效降低后期应力损失。研究成果为预应力桥梁施工质量控制提供理论依据与技术参考。

【关键词】：桥梁工程；预应力张拉；持荷时间；有效应力；应力损失

DOI:10.12417/2705-0998.26.01.037

1 引言

预应力混凝土桥梁因具备跨度大、承载能力强、耐久性好等优势，已成为公路与铁路交通建设中的核心结构形式。预应力张拉施工作为决定桥梁结构性能的关键工序，其施工质量直接影响桥梁的承载安全性与使用寿命。张拉持荷环节作为张拉施工的重要组成部分，主要作用是消除预应力筋的弹性变形与锚具的滑移变形，确保预应力能有效传递至混凝土结构中。当前桥梁施工中，部分施工单位为加快进度，存在随意缩短张拉持荷时间的现象，将规范要求的 5min 持荷时间缩短至 1-2min，甚至不持荷直接锚固。这种违规操作可能导致预应力筋有效应力不足，引发结构开裂、挠度增大等问题，严重威胁桥梁运营安全。近年来，多地出现的桥梁预应力失效事故，均与张拉持荷时间不足存在密切关联。

2 预应力张拉持荷作用及应力损失机理

2.1 持荷环节的核心作用

预应力张拉过程中，当张拉应力达到控制应力后，需保持一定时间再进行锚固，该环节的核心作用体现在三个方面：一是消除预应力筋的瞬时弹性变形，确保张拉应力稳定传递；二是使锚具与夹片充分咬合，减少锚固阶段的滑移变形；三是释放张拉过程中产生的局部应力集中，降低后期应力松弛风险。持荷过程中，预应力筋的变形逐渐趋于稳定，锚具系统的受力状态也从动态平衡过渡到静态平衡，为有效应力的保持奠定基础。

2.2 持荷不足引发的应力损失机理

持荷时间不足导致有效应力下降的核心机理的是瞬时变形未充分完成与后期徐变变形加剧。一方面，张拉至控制应力后，预应力筋与锚具系统存在未完成的弹性变形，若立即锚固，这部分变形会在锚固后转化为应力损失，即瞬时损失；另一方面，持荷不足会使预应力筋内部的应力分布不均，加速后期应力松弛，同时引发混凝土早期徐变增大，进一步加剧有效应力损失。从材料力学角度分析，预应力筋的应力损失可分为瞬时

损失与长期损失。瞬时损失主要包括锚具滑移损失、弹性压缩损失；长期损失则以徐变损失、松弛损失为主。持荷时间不足对两类损失均有显著影响：缩短持荷时间会增大锚具滑移量，使瞬时损失增加；同时，未充分稳定的应力状态会加速预应力筋的松弛进程，且混凝土在早期高应力作用下的徐变变形更为明显，导致长期损失进一步扩大。

3 试验设计与方案

3.1 试验目的

本次试验旨在实现以下目标：一是量化不同持荷时间下预应力筋的有效应力损失率；二是分析持荷时间与有效应力的相关性；三是验证规范持荷时间的合理性，为施工质量控制提供量化标准。

3.2 试验材料与设备

试验选用 $\Phi 15.24\text{mm}$ 低松弛预应力钢绞线，其公称直径 15.24mm，公称截面积 139mm^2 ，抗拉强度标准值 1860MPa，弹性模量 $1.95 \times 10^5\text{MPa}$ ，符合 GB/T 5224-2014 规范要求。锚具采用 OVM15-1 型锚具，配套千斤顶型号为 YDC240Q，张拉设备经计量检定合格。应力监测采用高精度应变片与静态应变采集系统，应变片精度为 $0.1\mu\epsilon$ ，采集系统采样频率设置为 10Hz，确保数据采集的准确性。试验台架采用自平衡式结构，避免外部荷载干扰试验结果。

3.3 试验分组与参数设置

试验共设置 6 组对比试件，每组 3 根预应力钢绞线，确保试验结果的可靠性。各组持荷时间分别设置为 0min（不持荷）、1min、2min、3min、4min、5min（规范值），其余施工参数保持一致：张拉控制应力 $\sigma_{\text{con}}=0.75f_{\text{ptk}}=1395\text{MPa}$ ，张拉速度控制在 1MPa/s ，锚固后放置 28d 监测长期应力损失。试验步骤如下：①安装预应力钢绞线与锚具，在钢绞线中点及两端粘贴应变片；②启动千斤顶匀速张拉，当应力达到 σ_{con} 时开始计时，按各组持荷时间保持应力稳定；③持荷结束后缓慢锚固，记录锚固瞬间的应力值；④锚固后分别在 1d、3d、7d、14d、

28d 监测应力变化，计算各阶段应力损失率。

4 试验结果与分析

4.1 不同持荷时间下瞬时应力损失分析

锚固瞬间的应力损失是持荷时间不足引发的主要损失形式，各组瞬时应力损失监测结果见表 1。由表 1 可知，持荷时间与瞬时应力损失呈显著负相关：不持荷时（0min）瞬时损失最大，达 128MPa，损失率 9.18%；随着持荷时间延长，瞬时损失逐渐减小，当持荷时间达到 5min 时，瞬时损失降至 42MPa，损失率仅 2.99%。

表 1 不同持荷时间下瞬时应力损失结果

持荷时间 (min)	控制应力 (MPa)	锚固瞬时应力 (MPa)	瞬时损失 (MPa)	瞬时损失率 (%)
0	1395	1267	128	9.18
1	1395	1293	102	7.31
2	1395	1321	74	5.31
3	1395	1338	57	4.09
4	1395	1347	48	3.44
5	1395	1353	42	2.99

分析认为，持荷时间不足时，预应力筋的弹性变形未充分释放，锚固后钢绞线的回弹变形导致应力骤降；同时，锚具夹片与钢绞线之间的咬合未达到稳定状态，存在微小滑移，进一步增大瞬时损失。当持荷时间达到 5min 时，钢绞线变形与锚具咬合均趋于稳定，瞬时损失降至最低且趋于平缓，说明规范规定的持荷时间具有充分的合理性。

4.2 不同持荷时间下长期应力损失分析

为分析持荷时间对后期应力稳定性的影响，对各组试件进行 28d 长期监测，结果见表 2。数据显示，持荷时间不足不仅增大瞬时损失，还会显著加剧长期应力损失：0min 持荷组 28d 总损失率达 15.23%，而 5min 持荷组仅为 6.87%；且持荷时间越短，长期损失增长速率越快，前 7d 的损失量占总长期损失的 60%以上。

表 2 不同持荷时间下 28d 长期应力损失结果

持荷时间 (min)	锚固后 1d 损失率 (%)	锚固后 7d 损失率 (%)	锚固后 14d 损失率 (%)	锚固后 28d 总损失率 (%)
0	10.21	13.05	14.32	15.23
1	8.13	10.57	11.64	12.41
2	6.25	8.32	9.15	9.87
3	5.02	6.78	7.43	8.05

4	4.26	5.83	6.31	6.98
5	3.52	5.11	6.03	6.87

长期损失增大的核心原因是持荷不足导致预应力筋内部应力分布不均，形成局部应力集中区域，加速了应力松弛进程；同时，锚固初期的高应力状态使混凝土徐变变形增大，进一步拉低有效应力。当持荷时间达到 4-5min 时，长期损失率趋于稳定，说明此时预应力系统已达到稳定受力状态，后期应力损失可控。

4.3 有效应力与持荷时间的相关性分析

以持荷时间为自变量，以 28d 后有效应力为因变量进行线性回归分析，得到回归方程： $y=12.35x+1186.2$ ($R^2=0.987$)，其中 y 为有效应力， x 为持荷时间。回归结果显示，两者呈显著正相关，相关系数达 0.987，说明持荷时间是影响有效应力的关键因素。结合试验数据可知，持荷时间每缩短 1min，28d 有效应力平均下降 12.35MPa；当持荷时间小于 2min 时，有效应力下降速率明显加快，损失率骤增，这一区间可视为持荷不足的“危险区间”。因此，施工中需严格控制持荷时间不小于 2min，且优先保证达到规范要求的 5min，以确保有效应力满足设计要求。

5 持荷不足对桥梁结构的影响及控制措施

5.1 对桥梁结构的潜在危害

5.1.1 降低结构承载能力，引发局部破损

有效应力不足会直接削弱预应力混凝土结构的抗裂性能与承载潜力。在设计荷载作用下，结构受拉区混凝土提前进入受拉状态，超过其抗拉强度后便会出现裂缝。初期裂缝多为表面细裂缝，随荷载循环与时间推移会逐渐扩展为贯通裂缝，导致梁体刚度下降，进而出现挠度超标问题。当挠度超过规范限值时，不仅会影响桥梁通行舒适性，还会加剧结构内部应力重分布，使钢筋、钢绞线等受力构件承担额外荷载，增加局部破损风险。

5.1.2 加速材料劣化，缩短结构使用寿命

有效应力不足引发的裂缝会破坏混凝土结构的致密性，为外界水分、二氧化碳及有害离子提供渗透通道。一方面，二氧化碳侵入会加速混凝土碳化进程，降低混凝土碱度，破坏钢筋表面钝化膜；另一方面，氯离子、硫酸盐等有害离子会通过裂缝渗透至钢筋表面，引发钢筋锈蚀。钢筋锈蚀后体积膨胀，会进一步撑裂混凝土，形成“裂缝扩展-锈蚀加剧”的恶性循环。

5.1.3 威胁结构整体稳定，诱发安全事故

对于大跨度连续梁、斜拉桥等复杂桥梁结构，有效应力不足会破坏结构的受力平衡状态，影响整体稳定性。在车辆荷载、风荷载等动荷载作用下，结构的振动幅度会显著增大，长期振动会导致锚具、支座等关键节点出现松动、破损。严重情况下，

可能引发梁体错位、桥面塌陷等重大安全事故。某高速公路大跨度连续梁桥因张拉持荷时间仅 1min, 通车 3 年后便出现梁体跨中裂缝贯通, 经检测有效应力损失率达 12%, 梁体挠度已超过规范限值的 1.5 倍, 最终不得不封闭交通进行加固处理, 不仅造成巨额经济损失, 还严重影响区域交通通行效率。

5.2 施工控制措施

5.2.1 严格执行规范标准, 强化持荷时间管控

以 JTG/T 3650-2020《公路桥涵施工技术规范》为依据, 明确预应力张拉各环节技术要求。张拉前编制专项施工方案, 明确持荷时间不少于 5min 的核心要求, 严禁为赶进度擅自缩短。张拉过程中, 安排专人负责计时, 待应力达到控制应力后启动计时器, 持荷期间实时监测应力变化, 确保应力波动控制在 $\pm 5\text{MPa}$ 以内, 确认应力稳定后再下达锚固指令。对违规缩短持荷时间的行为, 建立严厉的奖惩机制, 将持荷时间管控纳入施工质量考核核心指标。

5.2.2 完善监测体系, 建立质量追溯机制

采用“智能监测+人工复核”的双重监测模式。智能监测方面, 选用具备实时数据传输功能的张拉设备与应力监测系统, 自动记录张拉控制应力、持荷时间、应力变化曲线等关键数据, 并同步上传至项目管理平台, 实现数据实时共享与异常预警。人工复核方面, 安排专职质量检查员对张拉过程进行全程旁站监督, 核对智能监测数据的准确性, 填写旁站记录。同时, 建立施工质量追溯体系, 为每束预应力筋建立专属档案, 详细记录张拉时间、操作人员、设备编号、监测数据等信息, 确保出现质量问题时可精准溯源。

5.2.3 优化施工组织, 规避进度压力带来的违规风险

在施工组织设计阶段, 充分考虑预应力张拉工序的特殊性, 合理规划施工进度, 预留充足的张拉与持荷时间, 避免将张拉工序置于进度关键线路的紧张节点。采用平行作业模式, 将张拉工序与其他非关联工序同步开展, 提高施工效率。同时, 建立进度动态调整机制, 若出现工期滞后情况, 通过增加施工班组、优化设备配置等方式弥补, 而非通过缩短持荷时间等违规手段赶工。定期召开施工协调会, 平衡进度、质量与安全的关系, 强化各部门对张拉质量重要性的认知。

5.2.4 加强人员培训, 规范施工操作流程

开展全员专项培训, 培训内容涵盖张拉施工规范、持荷环

节作用机理、设备操作方法、质量控制要点及安全注意事项。邀请行业专家进行现场授课, 结合持荷不足引发的桥梁事故案例, 直观讲解违规操作的严重后果, 提高操作人员的责任意识。培训后组织理论考试与实操考核, 考核合格后方可上岗。建立常态化技术交底制度, 张拉施工前, 技术人员向操作人员详细交底施工参数、注意事项及应急处理措施, 确保每道工序均按标准化流程开展。

5.2.5 针对特殊环境与设备, 采取针对性保障措施

特殊环境施工时, 根据环境特点调整持荷时间: 高温环境下, 混凝土与预应力筋热胀冷缩明显, 持荷时间延长至 6-8min; 低温环境下, 锚具夹片咬合性能受影响, 持荷时间延长至 8-10min; 大风天气下, 需待风力减弱至安全范围后再进行张拉, 持荷期间加强设备固定, 防止风荷载导致应力波动。设备管理方面, 建立张拉设备定期校验制度, 千斤顶与压力表每半年校验一次, 应变监测设备每季度校验一次, 确保设备计量精度符合要求。张拉前对设备进行全面检查, 排查液压系统泄漏、传感器故障等问题, 避免因设备误差影响张拉质量。此外, 对于特殊环境下的桥梁施工, 如高温、低温或大风天气, 需适当延长持荷时间, 确保预应力筋与锚具系统稳定。同时, 定期对张拉设备进行校验, 避免因设备误差导致张拉应力与持荷时间控制不准确。

6 结论与展望

综上所述, 本文通过理论分析与试验研究, 明确了预应力张拉持荷时间不足对有效应力的影响规律, 持荷时间不足会显著增大预应力瞬时损失与长期损失, 两者均与持荷时间呈显著负相关; 不持荷时总损失率达 15.23%, 而规范 5min 持荷时总损失率仅为 6.87%。持荷时间小于 2min 时, 有效应力损失率骤增, 属于持荷不足的“危险区间”, 会严重影响结构安全。规范规定的 5min 持荷时间能确保预应力筋变形与锚具咬合稳定, 有效降低后期应力损失, 具有充分的合理性与必要性。持荷不足会降低桥梁承载能力、加剧结构损伤, 需通过严格执行规范、加强监测等措施强化施工质量控制。未来研究可研究不同类型锚具、不同规格预应力筋在持荷不足情况下的应力损失规律; 结合实际桥梁工程, 开展长期跟踪监测, 分析持荷不足对结构耐久性的影响; 开发智能化张拉控制系统, 实现持荷时间与应力的自动精准控制, 从技术层面杜绝违规施工行为。

- 参考文献:
- [1] 高彦杰.桥梁施工中预应力张拉施工技术要点及问题探讨[J].工程建设与设计,2025,(24):174-176.
 - [2] 郭禹宏.公路桥梁工程预制梁预应力智能张拉技术研究[J].工程机械与维修,2025,(11):20-22.
 - [3] 谯丽娟.预应力混凝土桥梁施工张拉应力精准控制策略[J].江西建材,2025,(10):352-354.
 - [4] 王彦钦.公路桥梁预应力智能张拉施工技术的应用策略[J].时代汽车,2025,(20):183-185.
 - [5] 胡来平.预应力智能张拉技术在桥梁施工工程中的应用[J].建设机械技术与管理,2025,38(03):170-172.