

预应力钢绞线松弛试验研究

段钧文, 朱家镭*, 卢佳鑫

西南林业大学土木工程学院, 云南 昆明

收稿日期: 2026年6月16日; 录用日期: 2026年7月8日; 发布日期: 2026年7月17日

摘 要

本文针对预应力长期损失核心因素——钢绞线应力松弛, 依据国家标准开展试验研究。结果表明: 钢绞线松弛呈初期速降、后期趋稳特征, 0~50 d衰减最快; 1 h内数据离散性大, 以60 min后数据外推精度最高, 120 h实测推算的1000 h松弛率为2.51%, 满足规范要求, 且长度对松弛率无显著影响。对比发现, 规范低松弛模型虽趋势吻合, 但因未考虑锚具回缩等初期短期效应, 存在早期损失低估问题。实测长期损失较规范计算值低约35.7%, 建议将锚具回缩控制在8 mm以内并结合实测修正模型, 以提升预应力损失预测精度。

关键词

长期预应力损失, 松弛率时变规律, 规范外推方法, 低松弛模型偏差

Experimental Study on Relaxation of Prestressed Steel Strands

Junwen Duan, Jiarong Zhu*, Jiaxin Lu

College of Civil Engineering, Southwest Forestry University, Kunming Yunnan

Received: June 16, 2026; accepted: July 8, 2026; published: July 17, 2026

Abstract

This study focuses on stress relaxation of steel strands—the dominant factor governing long-term prestress loss—and conducts experimental investigations in accordance with relevant national standards. The results indicate that strand relaxation exhibits a distinct pattern: a rapid initial decline followed by gradual stabilization, with the most significant attenuation occurring within the first 0~50 days. Data collected within the first hour show high dispersion; consequently, extrapolation based on measurements taken after 60 minutes yields the highest accuracy. The 1000-hour relaxation rate, extrapolated from 120-hour test data, is 2.51%, satisfying code requirements. Furthermore, specimen

*通讯作者。

文章引用: 段钧文, 朱家镭, 卢佳鑫. 预应力钢绞线松弛试验研究[J]. 土木工程, 2026, 15(7): 59-65.
DOI: 10.12677/hjce.2026.157178

length was found to have no significant effect on the relaxation rate. Comparative analysis reveals that while the low-relaxation model specified in the code captures the general trend, it underestimates early-stage losses due to its omission of short-term effects, such as anchorage set. The measured long-term loss is approximately 35.7% lower than the code-predicted value. It is recommended that anchorage set be limited to within 8 mm and that the predictive model be calibrated using empirical data to enhance the accuracy of prestress loss forecasting.

Keywords

Long-Term Prestress Loss, Time-Dependent Relaxation Behavior, Code-Specified Extrapolation Method, Deviations in Low-Relaxation Models

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在张拉锚固后的长期服役阶段, 预应力有效保持是保障结构性能与耐久性的关键。预应力筋在高应力状态下会发生应力松弛, 导致内部应力随时间衰减, 这是长期预应力损失的核心组成部分, 与混凝土收缩、徐变耦合, 显著影响结构受力与变形。不同于锚具变形等瞬时损失, 松弛损失具有显著的时间依赖性, 受材质、应力水平及环境温湿度等多因素调控[1] [2]。

在后张法梁中, 锚固后筋材总变形受限, 但内部应力随时间的释放导致预应力下降。该过程呈非线性特征: 初期发展快, 后期趋稳。钢绞线松弛贡献显著, 且与收缩徐变存在叠加效应; 自然环境下温度波动更使其呈现阶段性与时变性[3]。

应力松弛直接决定有效预应力储备, 关乎结构抗裂性、刚度及耐久性。因此, 在厘清瞬时损失基础上, 深入揭示应力松弛机理与发展规律, 对完善预应力计算理论、提升长期性能预测精度具有重要价值。本章据此重点分析松弛损失的机理、影响因素及演变规律, 为全过程预应力损失评估奠定基础。

国内针对钢绞线松弛试验方法和数据外推也开展了较多讨论。付伟良以桥梁预应力混凝土用钢绞线为对象, 结合标准试验和实例数据分析松弛试验影响因素, 将松弛率与时间双对数坐标下的试验数据划分为 1 min~60 min 非线性区、1 h~2 h 过渡区和 2 h~120 h 线性区, 并提出可采用 2 h~120 h 有效数据区间进行 1000 h 松弛率推算[4]。该结论与工程试验中“早期读数离散、稳定阶段外推可靠性更高”的现象一致, 对本文确定外推起始时间具有直接参考意义。

2. 钢筋松弛试验方案设计

1) 方案设计

本次钢绞线松弛试验依据 GB/T 5224-2023 设计, 参照 GB/T 21839-2019 实施, 采用等温松弛原理: 恒定 $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 环境下对钢绞线施加初始应力(取极限抗拉强度 70%), 持荷期间保持试件总长不变, 自动记录应力时变规律。针对 1000 h 松弛率 $\leq 2.5\%$ 的规范要求, 采用 120 h 实测数据结合规范方法外推长期松弛率, 每种锚固力设 2 组平行试件保障结果可靠性。

按照《预应力混凝土用钢材试验方法》(GB/T 21839-2019)中的相关规定, 钢绞线应力松弛率计算公式为[5]:

$$R = \frac{(F_0 - F_t)}{F_0} \times 100\%$$

式中: R ——应力松弛率(%);

F_0 ——初始试验力(kN);

F_t —— t 时刻时剩余试验力(kN)。

2) 钢筋松弛试验

依托实验室专用松弛试验设备, 试验前基于同盘材性试验确定加载参数, 初始应力为钢绞线实际最大的 50%, 930 MPa, 选取 2.5 m 试样静置 4 h 与环境同温(控温 $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$)。设备预热 15 min 后, 将试样对中安装并固定, 预加载调整后于 3~5 min 内匀速加载至初始荷载、持荷 60 s, 随即转入 120 h 松弛监测, 全程自动采集应力数据, 最终经曲线拟合与外推得出 1000 h 应力松弛率[5]。

3) 试验数据推导方式

现场选取同批次钢绞线制作 4 组(每组 2 根) 2.5 m 标准试件, 外观完好、端部锚固避免应力集中。试验环境温度为 $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, 满足规范等温松弛要求, 初始张拉力取极限抗拉强度 50% (133 kN); 先测得钢绞线实际极限强度 1917 MPa, 再开展 2 根试件的 120 h 松弛监测, 按前 1 h 每 10 min、1~24 h 每小时、24 h 后每 12 h 的频率记录应力, 最终依规范外推 1000 h 松弛率。

3. 试验仪器设备

本次试验采用钢绞线松弛试验机(见 图 1)、高精度应变采集仪($0.1 \mu\epsilon$)、恒温恒湿实验箱及钢直尺, 可对试件施加稳定可控的张拉荷载并实时监测应力应变变化, 为钢绞线松弛性能研究提供可靠试验条件。



Figure 1. Relaxation testing apparatus for steel strands used in this experiment
图 1. 本次试验所使用的钢绞线松弛设备

试验截取规定长度试样并测量初始标距, 安装后对中并与加载轴线对齐, 连接应变采集仪调零; 在恒温恒湿标准环境下匀速加载至初始试验力, 持荷稳定后切换为应变控制模式锁定长度, 通过力传感器与应变采集仪实时监测试件力值与应变变化, 钢绞线松弛试验示意图如图 2 所示。

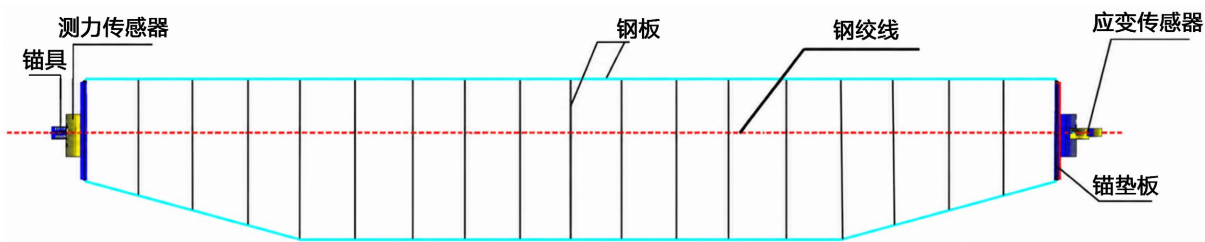


Figure 2. Schematic diagram of the steel strand relaxation testing apparatus
图 2. 钢绞线松弛设备示意图

4. 实测值与理论值对比

预应力筋松弛是恒定应变下钢绞线应力随时间衰减的现象，本质为钢材内部晶格位错滑移与微观结构重排的宏观体现，属长期预应力损失核心组成。受限于长期试验周期，工程常基于短期实测数据外推长期性能，其中 1000 h 松弛率为关键评价指标。

试验采用工程常用公称直径 15.2 mm、标准强度 1860 MPa 低松弛钢绞线，实验使用钢绞线长度均为 2.5 m，依据 GB/T 5224-2023 及 GB/T 21839-2019 开展，重点探究松弛率时变规律与规范外推方法适用性。松弛损失分两类：终极值为松弛稳定后的极限损失(最大值)，中间值为特定时刻 t 的阶段性损失，反映实时损失水平。《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362-2018)给出了不同时间点松弛损失中间值与终极值的比值，如表 1 所示。

Table 1. Ratio of intermediate to ultimate relaxation loss of steel strands
表 1. 钢筋松弛损失中间值与终极值的比值

时间(d)	2	10	20	30	40
比值	0.50	0.61	0.74	0.87	1.00

根据《预应力混凝土用钢绞线》(GB/T 5224-2014)及《预应力混凝土用钢材试验方法》(GB/T 21839-2019)的相关规定，1000 h 松弛值可由不少于 120 h 的试验数据外推获得，但需保证外推结果与实际值具有等效性，并在规范中给出了外推公式。基于上述规范依据，本文首先开展钢绞线极限抗拉强度试验，测得其最大力值为 266.5 kN；随后选取两根钢绞线开展松弛试验，初始张拉控制力分别取 133.5 kN 和 160 kN。通过对松弛试验过程中的应力数据进行连续监测，得到钢绞线应力随时间的变化规律，试验实测结果及长期松弛率推算结果分别见表 2。

Table 2. Results of relaxation test for extrapolated 1000 h relaxation rates based on different starting times of extrapolation
表 2. 松弛试验不同推算开始时间推算 1000 h 的松弛率结果

1000 小时松弛速率的起始时间推断	1000 小时松弛率/%	相关系数 R^2
1 min	3.28	0.862
2 min	3.15	0.871
4 min	2.92	0.893
8 min	2.76	0.921
15 min	2.68	0.945
30 min	2.61	0.968

续表

60 min	2.51	0.985
2 h	2.48	0.988
4 h	2.45	0.990
6 h	2.43	0.991
24 h	2.39	0.993
48 h	2.37	0.994
96 h	2.35	0.995
120 h	2.34	0.996

表 2 显示, 钢绞线松弛率与时间的双对数关系在 60 min 后进入稳定线性阶段, 平行试件数据离散性小、重复性好: 以 60 min 为起点外推, 1000 h 松弛率达 2.51% ($R^2=0.985$), 符合规范要求; 与 GB/T 5224-2014 限值($\leq 2.5\%$)偏差仅 0.4%, 满足 50%极限强度下的工程应用要求。

规范计算(张拉控制应力 1395 MPa、低松弛、一次张拉)的松弛损失为 54.4 MPa, 实测外推损失仅 35.0 MPa, 规范值偏保守, 可为精细化评估提供依据。

试验采用工程常用 $1 \times 7-15.20 \text{ mm}-1860 \text{ MPa}$ 低松弛钢绞线, 先通过极限抗拉试验测得实际强度参数, 再选取两根钢绞线开展松弛试验, 并依据 JTG 3362-2018 公式计算低松弛与普通松弛的理论损失值。试验实测松弛损失与规范计算结果的对比分别如图 3、图 4 所示(钢绞线松弛往张拉端相反方向进行松弛)。

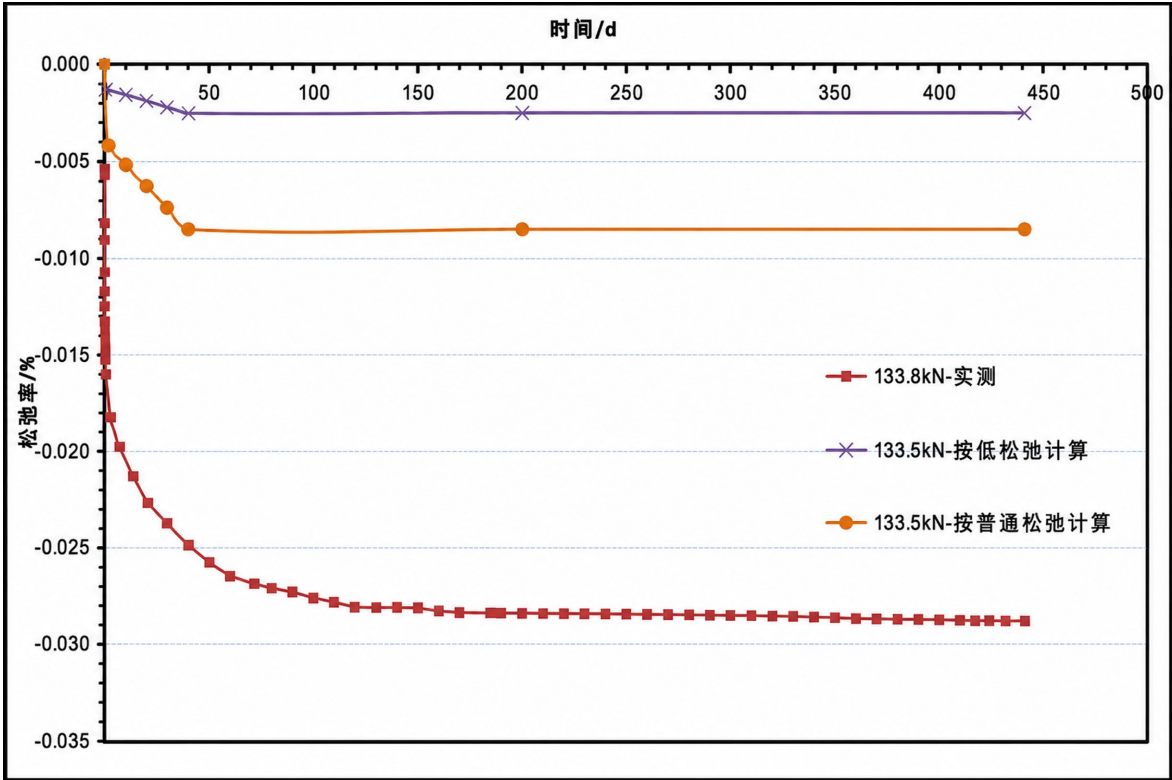


Figure 3. Measured vs. calculated stress relaxation of steel strands under an anchoring force of 133.8 kN
图 3. 133.8 kN 锚固力下钢绞线应力松弛实测与计算值

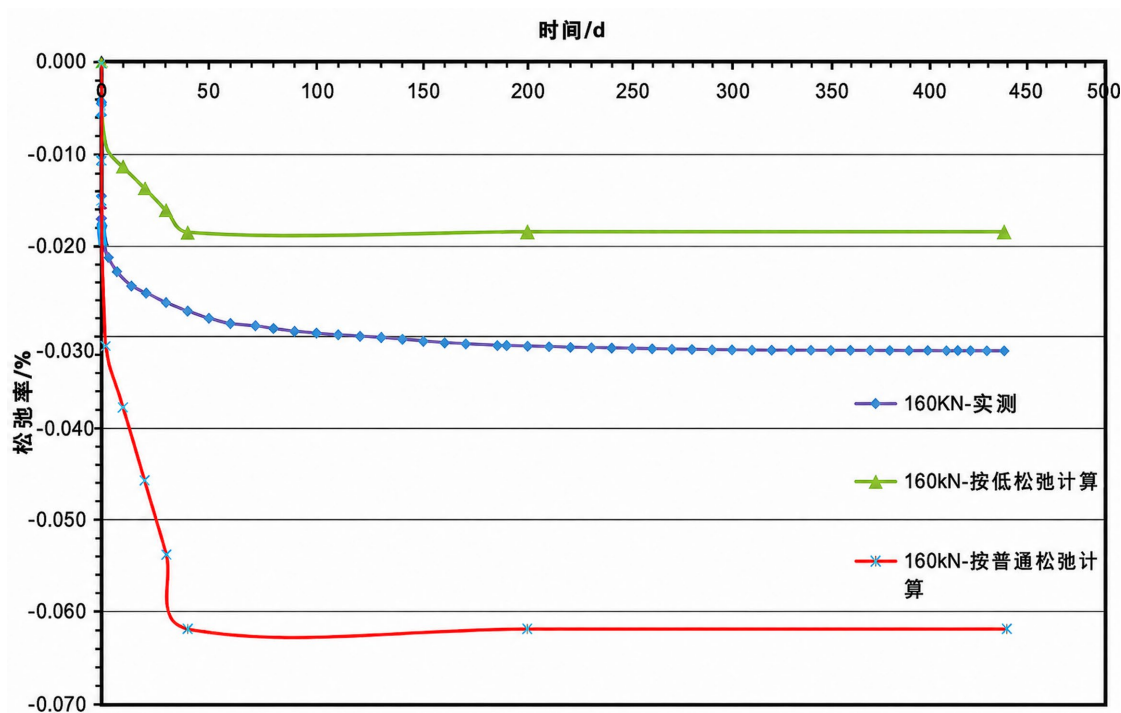


Figure 4. Measured vs. calculated stress relaxation of steel strands under an anchoring force of 160 kN
图 4. 160 kN 锚固力下钢绞线应力松弛实测与计算值

图 3 和图 4 试验结果表明, 钢绞线应力时变呈现明显阶段性: 0~50 d 为快速衰减期, 受锚具回缩、夹片滑移及材料初始松弛等叠加影响, 应力骤降; 100 d 后进入平缓期, 主要由长期松弛主导。

实测松弛率显著高于规范模型: 133.5 kN 工况下, 实测-3.0% (低松弛模型-0.26%、普通松弛-0.85%); 160 kN 工况下, 实测-3.1% (低松弛-1.9%、普通-6.1%)。普通松弛模型高估明显, 低松弛模型虽趋势接近但仍低估早期损失, 主因是规范默认初始应力稳定, 未纳入锚具回缩、混凝土弹性压缩等短期非稳定因素; 且高应力水平会加剧松弛, 证实应力水平为核心影响因素。

实测曲线初期快速衰减源于短期附加损失(锚具变形、混凝土局部压缩)与初期松弛、收缩徐变的叠加; 后期趋缓则为长期效应主导。本试验以锚固后即时读数为初始值, 将非稳定损失计入松弛, 致中间值偏大, 叠加单端张拉应力分布不均, 进一步放大差异。

综上, 外推结果可直接用于计算, 但需结合注浆状态、锚具回缩(建议 ≤ 8 mm, 对应损失 390 MPa)等工况修正规范模型, 以提升预测精度。当前规范在锚固初期损失评估中存在局限, 需针对性优化。

此外, 除钢绞线松弛外, 混凝土收缩徐变亦会导致预应力持续衰减, 为完善全过程损失机理, 下一章将重点研究收缩徐变损失规律及规范验证。

5. 结论

本文通过用 1860 MPa 级低松弛钢绞线为研究对象, 结合规范试验与梁体长期监测数据, 系统开展了预应力钢绞线松弛试验研究, 明确了松弛损失的时变规律、外推方法适用性及工程影响因素, 实际工程中建议将稳定锚固后锚具回缩位移控制为 8 mm, 并采用低松弛钢绞线, 可有效提升预应力损失预测精度。建议结合试验实测数据对规范计算模型进行修正, 或采用更贴合实际的松弛预测模型, 以提高预应力损失计算的准确性。

从工程应用角度看, 钢绞线松弛损失预测应同时关注材料性能与施工过程。锚具回缩、夹片滑移、加载稳定过程及局部压缩变形会改变试验或现场监测曲线的早期斜率, 进而影响长期损失判断。因此, 在预应力结构施工和质量控制中, 应加强张拉 - 锚固全过程的位移控制, 合理确定稳定持荷后的基准读数, 并结合钢绞线批次、锚具类型和张拉工艺开展必要的实测校核。对于重要桥梁或长期服役敏感结构, 可采用“短期松弛试验 - 规范公式计算 - 现场监测修正”相结合的方式, 提高有效预应力评估的可靠性。

本研究还表明, 现行规范模型在工程快速计算中具有实用价值, 但其参数取值和适用范围仍需结合实际工况进行辨析。低松弛钢绞线的长期损失并非单纯由材料松弛决定, 现场锚固状态、试验起始点选取和结构约束条件都会影响结果解释。由此可见, 后续预应力损失评估应从单项经验公式计算逐步走向多因素耦合分析, 使松弛、收缩徐变、孔道摩阻和锚固变形等因素能够在同一时变框架下进行协调计算。

参考文献

- [1] Bazant, Z.P and Baweja, S. (2000) Creep and Shrinkage Prediction Model for Analysis and Design of Concrete Structures. *Materials and Structures*, **33**, 357-365.
- [2] fib-Federation Internationale du Beton (2013) fib Model Code for Concrete Structures 2010. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9783433604090>
- [3] Gilbert, R.I. and Mickleborough, N.C. (2017) Design of Prestressed Concrete. CRC Press.
- [4] 付伟良. 桥梁预应力混凝土用钢绞线松弛试验影响因素的研究[J]. 工程与实验, 2022(2): 89-90.
- [5] 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 预应力混凝土用钢材试验方法: GB/T 21839-2019 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.