

基于缩尺模型的高铁桥梁预应力损失试验研究

许开成^{1,2}, 黄凌娟², 李鹏清², 张立卿^{1,2}, 邱日旭², 陈梦成^{1,2}

(1. 华东交通大学轨道交通基础设施性能监测与保障国家重点实验室, 江西 南昌 330013;

2. 华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 为更好的评估在役预应力混凝土桥梁结构预应力损失状况, 本文选用国内高铁中应用最广的 32 m 预应力混凝土箱梁作为研究对象, 按照 1:16 的缩尺比例将箱梁转化为 T 形截面制作了 26 根 C50 混凝土试验模型梁。通过对试验梁预应力钢绞线应变、伸长量的瞬时和长期监测得到预应力损失的实际值, 并将此实际值与目前国内外常用预应力损失计算规范计算所得值进行对比分析。结果表明: 预应力损失主要发生在前期即瞬时损失, 约占总损失 70%; 84.6% 的试验梁锚固损失占瞬时损失总和的 70% 以上, 最高达 80.57%; 试验梁的长期损失在锚固后的前 10 d 内变化较快, 后期逐渐趋于稳定; 将 5 种规范的计算结果与试验实测值进行对比, 对于长期损失, 数据显示(TB 10002-2017)的计算结果与本次试验实测数据最为吻合。研究结果可为实际工程中预应力梁的预应力损失计算提供参考。

关键词: 预应力混凝土梁; 预应力损失; 缩尺模型; 规范对比; 应变监测

中图分类号: TU375

文献标志码: A

Experimental study on prestress loss of high-speed railway bridges based on scaled model

Xu Kaicheng^{1,2}, Huang Lingjuan², Li Pengqing², Zhang Liqing^{1,2}, Qiu Rixu², Chen Mengcheng^{1,2}

(1. The State Key Laboratory of Performance Monitoring and Protecting of Rail Transit Infrastructure, Nanchang 330013, China;

2. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: To better evaluate the prestress loss of in-service prestressed concrete bridge structures, this article takes the 32m prestressed concrete box girder, which is widely used in domestic high-speed railways, as the research object. 26 test model beams using C50 concrete were produced by converting the box girder into a T-shaped section at a scale of 1:16. The strain and elongation of the prestressed steel strand in the experimental beam were continuously and continuously monitored to determine the actual value of prestress loss, which was then compared and analyzed with the values calculated by commonly used prestress loss calculation specifications at home and abroad. The findings demonstrate that prestress loss mainly occurs in the early stage, which is instantaneous loss, accounting for about 70% of the total loss. 84.6% of the anchoring losses of the experimental beam account for over 70% of the total instantaneous losses, with a maximum of 80.57%. The long-term loss of the experimental beam fluctuates dramatically in the first 10 days after anchoring and gradually stabilizes in the later stage. Comparing the calculation results of the five specifications with the measured values in the experiment, the data shows that the calculation results of (TB 10002-2017) are the most consistent with the measured data in this experiment for long-term losses. The research results can provide reference for the calculation of prestress loss of prestressed beams in practical engineering.

Keywords: prestressed concrete beam; prestress loss; scale model; code comparison; strain monitoring

收稿日期: 2023-07-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(51968021); 江西省自然科学基金项目(20224BAB204067); 轨道交通基础设施性能监测与保障国家重点实验室资助(HJGZ2022201); 江西省研究生创新专项资金项目(YC2022-s506)

高速铁路安全、平稳的运营很大程度上取决于线路的平顺,为此“以桥代路”的设计在高铁的基建中应用广泛^[1-5]。预应力混凝土桥梁因其具有刚度大、抗震性能优良、抗裂度高、施工简单等一系列优点,在我国高速铁路建设中得到大面积使用^[6-12]。然而随着此类桥梁的服役年限的增加,预应力筋应力松弛、混凝土收缩、徐变等因素将导致结构中的预应力减小,使得结构出现混凝土开裂、承载力下降、过度下挠等一系列影响桥梁正常使用的病害,甚至会引发事故^[13-15]。因此,有效、合理、精确的获取预应力结构的预应力损失十分关键。

近年来,国内外众多学者开展了许多有关预应力混凝土结构预应力损失计算方面的研究,同时也取得了许多研究成果。张海义等^[16]以我国公路桥规为计算依据,对比分析了预应力梁分别采用塑料波纹管 and 金属波纹管时的瞬时损失。周燕勤等^[17]在大量试验数据的基础上,从理论分析着手提出了三种符合实际工程要求和精度的预应力损失计算方法。方志等^[18]以某实际大跨径预应力混凝土连续箱梁桥为研究对象,对桥梁腹板预应力进行了长期监测,结果表明:按现行公路桥规中结构预应力损失计算方法计算所得损失值与实测值基本吻合。Shen 等^[19]利用长规格光纤布拉格光栅(LFBG)传感器实时监测,逐项确定张拉过程中每个阶段的预应力损失。Guo 等^[20]利用有限元模拟了具有无粘结预应力钢筋的混凝土梁随时间变化的行为,并提出了一种用于计算具有无粘结内筋的静定预应力混凝土构件中预应力损失的改进简化方程。综上,可以看出国内外专家采用了多种不同的计算方法来计算预应力损失值,这些

方法多以规范为计算依据。

目前,采用已有规范计算预应力损失已能得到和实际值较吻合的计算值,但考虑到结构材料、服役环境、工法等多方面的影响,要准确计算各项预应力损失仍需对规范不断进行修正。因此,本文在深入认识各国预应力损失计算方法及理论的基础上,设计制作了 26 根 T 形截面试验模型梁,其中 12 根用做长期监测试验,通过对试验梁预应力钢绞线应变、伸长量的监测得到预应力损失的实际值并以此实际值与采用国内外规范计算所得计算值进行对比分析,得出各计算方法间的区别,最后在此基础上给出了计算预应力损失的一些建议,为实际工程中预应力梁的预应力损失计算提供参考。

1 试验概况

1.1 试验梁设计

本文选取我国时速 350 公里客运专线铁路无砟轨道后张法预应力混凝土简支箱梁 32 m 通桥为原型桥梁,通过相似比原则进行缩尺设计,最终缩尺比例确定为 1:16。试验共设计了相同截面尺寸和配筋的 2.08 m 试验梁 26 根,梁长均为 2 080 mm,受拉和受压钢筋均采用直径 14 mm 的 HRB400 螺纹钢,箍筋采用直径为 6 mm 的 HPB300 光圆钢筋,梁内非加密区箍筋间距 100mm,梁内加密区箍筋间距 80 mm。钢绞线采用直径为 15.2 mm 的 1×7 捻制而成的 1860 级低松弛钢绞线,详细尺寸及配筋如图 1 所示。1~26 号梁用于监测钢绞线瞬时预应力损失,其中 15~26 号梁用于监测钢绞线长期预应力损。

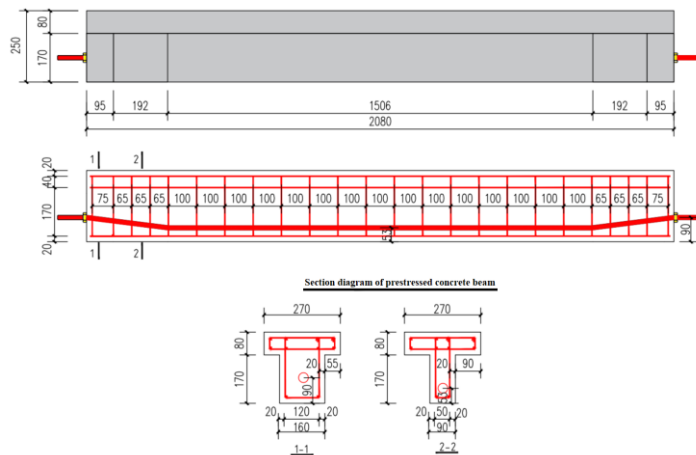


图 1 试验梁截面尺寸图(单位: mm)

Fig.1 Cross section dimension diagram of test beam (unit: mm)

1.2 试验梁制作

工人将带应变片的钢筋绑成钢筋笼，模板拼装后，把钢筋笼固定在木模内，并用 20 mm 混凝土垫块控制保护层。预应力筋用曲线布筋，为了方便成孔和灌浆，预埋金属波纹管作为预应力钢绞线的张拉孔道，用定位钢筋控制波纹管位置，满足曲线布筋要求。试验梁两端预埋锚垫板固定在模板上，套上波纹管并密封锚垫板喇叭口，防止混凝土进入。两端加螺旋箍筋防止支座加载时局部破坏。模板两侧留两个腐蚀孔，插 PVC 管与波纹管连接，让酸雨溶液能接触钢绞线，达到腐蚀效果。预应力筋孔道用金属波纹管预留，锚具用广西柳州桥厦工程管材有限公司的两孔圆锚四件套，如图 2 所示。张拉预应力钢绞线用单端张拉另一端锚固的方式。两端锚具下都预埋锚垫板和 5 匝直径 6 mm 的螺旋筋承受压力，防止混凝土压碎。为防止酸雨溶液渗入梁体腐蚀锚固端，选择张拉后 24 小时内封闭两端灌浆，等酸雨腐蚀后再从腐蚀孔灌浆保证安全。灌浆料水胶比 0.34，配合比水泥：膨胀剂：水：减水剂=1 368：72：490：0.5。两端灌浆料凝固后，对两侧锚固端防腐

处理。先喷金属漆，干后用环氧树脂和纱布包裹，再喷一层金属漆。试验梁放一周后进入腐蚀池通电腐蚀。



图 2 锚具四件套
Fig.2. Four sets of anchorage

1.3 试验梁材料性能参数

试验梁选用 P.O.42.5R 普通硅酸盐水泥，混凝土配合比见表 1，标准养护条件下养护 28d 后测得混凝土立方体抗压强度和轴心抗压强度： $f_{cu}=54.9$ MPa， $f_c=44.9$ MPa，满足设计要求。钢筋、钢绞线尺寸、类型及性能见表 2；钢绞线预留管道选用直径 40 mm 的金属波纹管。

1 混凝土设计配合比

Tab.1 Concrete design mix ratio

Water-cement ratio w/c	Content of each component / (kg m ⁻³)					
	Cement	Mineral powder	Fine aggregate	Coarse aggregate	Water	Water reducing agent
0.3	380	100	710	1111	144	1.44

表 2 钢筋材料性能

Tab.2 Properties of reinforcement materials

Specifications	Cross-sectional area /mm ²	Yield strength /MPa	Ultimate Strength /MPa	Elongation /%	Elastic modulus /MPa
Φ6	28.3	370	565	30	2.1×10 ⁵
Φ14	153.9	470	570	20	2.0×10 ⁵
Φ [*] 15.2	140	1840	1945	4	1.95×10 ⁵

1.4 量测内容及测点布置

预应力用张拉千斤顶一端张拉方式施加，张拉控制应力 σ_{con} 取 $0.7f_{ptk}=1 302$ N/mm²，计算得到张拉力为 182.3 kN。参考我国《公路桥涵设计规范》拟定张拉伸长值 14.5 mm。张拉前先对钢绞线进行预张拉，先张拉到 10% σ_{con} 然后卸载并以此为始张拉点进行正式张拉，为减少预应力损失最后

超张拉 3%到 186.4kN。张拉钢绞线使用的仪器及现场情况如图 3 所示。具体操作步骤为：0→20 kN→40 kN→60 kN→80 kN→100 kN→120 kN→140 kN→160 kN→180 kN→186.4 kN，回油锚固，张拉过程中每施加一级荷载持荷 3 min，记录一次数据。钢绞线张拉过程中使用应变仪采集钢绞线应变。钢绞线作为多根绞扭钢丝综合受力

体, 为了准确测定预应力钢绞线的应变, 应变片粘贴方向需顺丝而贴, 跨中、弯折和加载点位置分别布置了 5 个来自浙江黄岩双立工程传感器厂生产的型号 120-2AA 的胶基箔式电阻应变片(P1、P2、P3、P4、P5), 如图 4 所示。瞬时预应力监测是在梁张拉前, 将钢绞线 5 个量测点上的应变片通过电线连接好应变采集仪, 直到锚固记录完数

据后, 便可断开应变采集仪。张拉结束后保持应变仪与 15~26 号梁钢绞线的连接状态用于监测钢绞线 30 d 内的应变变化, 为后续分析预应力长期损失提供计算依据。除了测量钢绞线应变值外, 同时还测量钢绞线伸长量用来校核预应力张拉是否满足要求。



(a) 预应力张拉施工



(b) 长期监测

图 3 钢绞线张拉仪器及现场施工

Fig.3 Steel strand tension equipment and site construction

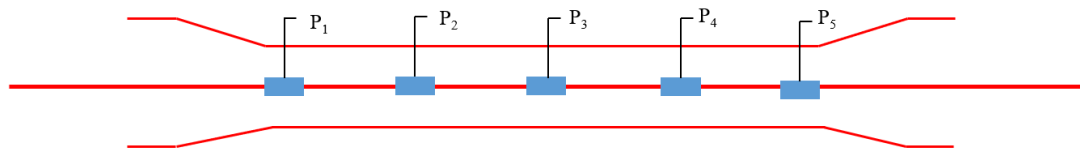


图 4 钢绞线应变片布置

Fig.4 Stranded wire strain gauge layout

2 试验结果及分析

2.1 瞬时损失

预应力损失依据其发生损失的时间可分为瞬时损失和长期损失两部分^[21], 其中瞬时损失主要包括: 摩擦损失、锚固损失、温差变化引起的损失, 混凝土弹性压缩损失。本文采用的为后张法且一次张拉完成, 故试验张拉过程中的预应力损失只考虑摩擦损失 σ_{l1} 与锚固损失 σ_{l2} 。

后张法张拉预应力筋的整个张拉过程一般被分为 3 个阶段(分别简称为 a、b、c 阶段), 其中 a 阶段代表张拉阶段, b 阶段代表锚固阶段, c 阶段则代表结构灌浆后的凝结固化阶段。

由上可知 a 阶段的预应力损失主要是 σ_{l1} , 故钢绞线监测点 P_i 点处的摩擦损失 σ_{l1} 如式(1)所示, 其中 E 代表钢绞线的弹性模量, ε_a^i 代表钢绞线达到张拉控制应力时在 P_i 点处的应变变化。

$$\sigma_{l1}^i = (\sigma_{con} - E\varepsilon_a^i) \quad (i=1\sim5) \quad (1)$$

b 阶段的预应力损失主要是 σ_{l2} , 故钢绞线监

测点 P_i 点处的反向摩擦摩擦损失 σ_{l2}^i 可用式(2)表示, 其中 ε_b^i 代表钢绞线放张后在 P_i 点处的应变变化。

$$\sigma_{l2}^i = E(\varepsilon_b^i - \varepsilon_a^i) \quad (i=1\sim5) \quad (2)$$

c 阶段, 在无外力作用的情况下预应力筋松弛 (σ_{l5}^i) 和混凝土收缩徐变 (σ_{l6}^i) 的损失和可用式(3)表示, 其中 ε_c^i 代表钢绞线在凝结固化阶段在 P_i 点处的应变变化:

$$\sigma_{l5}^i + \sigma_{l6}^i = E(\varepsilon_c^i - \varepsilon_b^i) \quad (i=1\sim5) \quad (3)$$

在预应力筋的张拉施工过程中, 除规范要求的用应力控制外, 伸长量也是校核预应力张拉是否满足要求的重要依据。本试验预应力筋实际伸长量数据见表 3, 基本都在规范要求的 $\pm 6\%$ 以内, 除 1、17、26 号伸长值偏大, 2、4 号梁测量的伸长值偏小, 分析原因是由于梁体尺寸较小, 其总伸长值也较小, 且拉伸后钢绞线回缩存在一定差别, 最终导致测得的预应力筋伸长值存在相应的误差。

具体张拉的应变数据如表 3, 荷载从 0 加至张拉控制应力 σ_{con} , 表中应变均为钢绞线上 5 个监测点应变的平均值, 其中 $\bar{\varepsilon}_{con}$ 和 $\bar{\varepsilon}_0$ 分别为达到张拉

控制应力时和千斤顶退顶时钢绞线上 5 个应变片应变的平均值, ΔL 为钢绞线的伸长量。

表 3 钢绞线伸长量及瞬时损失

Tab. 3 Strand elongation and instantaneous loss

Test piece number	$\Delta L/mm$	$\bar{\varepsilon}_{con}/10^{-6}$	$\bar{\varepsilon}_0/10^{-6}$	σ_{l1}/MPa	σ_{l2}/MPa	σ_{l1+l2}/MPa
1	19.1	6 100	4 599	113	293	406
2	12.9	6 169	4 521	99	321	420
3	14.9	6 153	4 746	102	274	376
4	13.4	6 211	4 971	91	242	333
5	14.1	6 036	4 734	125	254	379
6	14.5	6 080	4 808	116	248	364
7	15.3	6 249	4 721	83	298	381
8	13.9	5 971	4718	138	244	382
9	14.9	6 223	4 840	89	270	359
10	14.5	6 112	4 725	110	270	380
11	14.4	6 178	4 698	97	289	386
12	14.3	6 090	4 606	114	289	403
13	14.6	6155	4 541	102	315	417
14	14.4	6 106	4586	111	296	407
15	14.8	6 213	4 735	90	288	378
16	14.6	6 159	4 780	101	269	370
17	21.2	6 250	4 688	83	305	388
18	13.7	5 540	4 292	222	243	465
19	15.2	6294	4 699	75	311	386
20	14.3	6 140	4613	105	298	403
21	15.0	6 217	4 816	90	273	363
22	14.4	6 121	4 535	108	309	417
23	14.8	6 246	5 041	84	235	319
24	14.1	6 104	4 605	112	292	404
25	14.7	6 168	4677	99	291	390
26	21.5	6 257	4 778	82	288	370
Mean value	14.92	6 136	4 695	105	281	386

利用 SPASS 先对 $\bar{\varepsilon}_{con}$ 和 $\bar{\varepsilon}_0$ 两组数据进行离散程度分析可得它们的平均值分别为 6 136.2、4 695.1, 标准差为 142.8、148.6, 变异系数为 0.02、0.03, 由此可知应变片所得数据离散程度较小, 数据具有一定代表性。此外由表 3 中数据可以看出, 预应力混凝土梁前期的瞬时损失大部分在锚固阶段发生且主要是由于锚具变形产生的。26 根试验梁中除 5、6、8、18 号梁的 σ_{l1} 和 σ_{l2} 值相当, 其余试验梁的锚固损失均占瞬时损失总和的 70% 以上, 最高的 19 号试验梁达到 80.57%。分析 5、6、8、18 号试验梁 σ_{l1} 值较大的原因可能是由于钢绞线初始弯曲程度比较大(结合摩擦损失计算公式 $\sigma_{l1} = \sigma_{con}(1 - e^{-(\mu\theta + kx)})$ [22])导致钢绞线在张拉过程中和孔道产生更大的摩擦继而使得摩擦损失 σ_{l1} 增大。

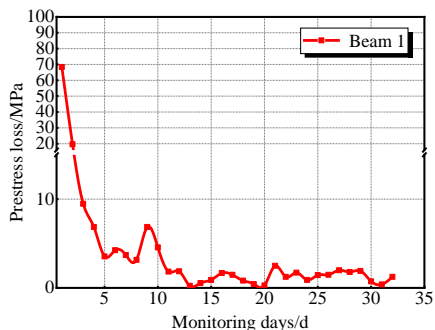
2.2 长期损失

长期损失主要是指由预应力筋松弛引起的损失 σ_{l5} 和混凝土收缩徐变引起的损失 σ_{l6} , 这类损失主要是考虑了材料的时间效应。在 30d 的时间段内通过对试验梁锚固后钢绞线应变的监测得到 12 根试验梁试验前后钢绞线应变变化及预应力长期损失变化情况如图 5 和表 4 所示, 其中表 4 当中的 $\Delta \bar{\varepsilon}_l$ 为第一天和最后一天的应变差值。

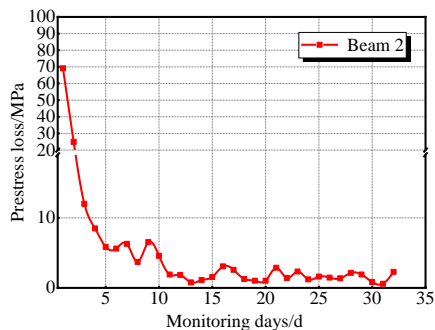
由图 5 和表 4 可知: 1) 在 30 d 内, 12 根试验梁预应力损失的变化趋势基本一致, 均表现出前 10d 预应力损失变化较快后期的损失变化幅度较小最终趋于平稳的特征, 这与理论的预应力长期损失变化规律相符; 2) 在 30d 内, 12 根试验梁第 1 d 发生的预应力损失均是最大, 分别为 68.41、69.12、66.3、69.03、72.02、84.37、64.04、93.70、59.8、73.52、74.69、51.43 MPa, 均占各自

长期损失总值的 35% 以上，最大的 8 号梁达到 51.78%；3) 考虑到预应力钢绞线的初始状态和张拉过程中钢绞线在孔道中的实际伸展情况不尽相

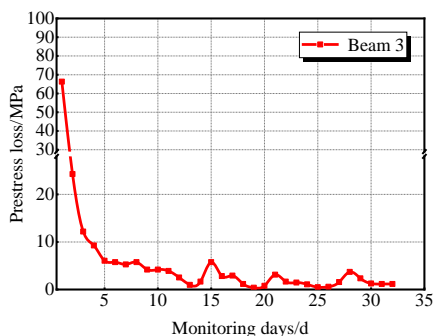
同，并且仪器本身存在一定精度误差，12 根试验梁实测的长期损失值存在一定差异但仍在合理区间内。



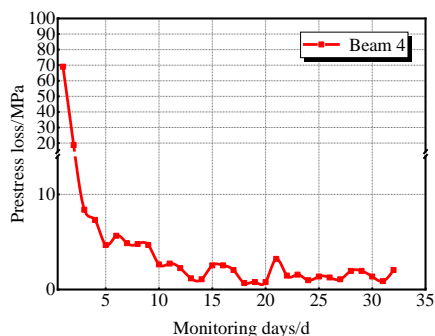
(a) 1 号梁



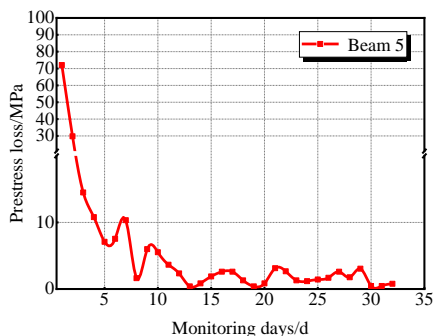
(b) 2 号梁



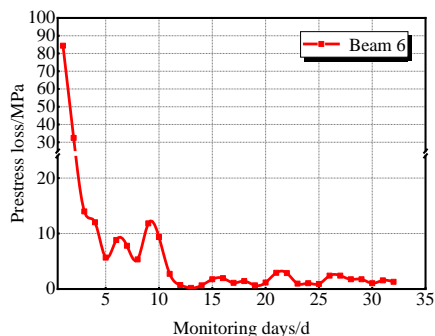
(c) 3 号梁



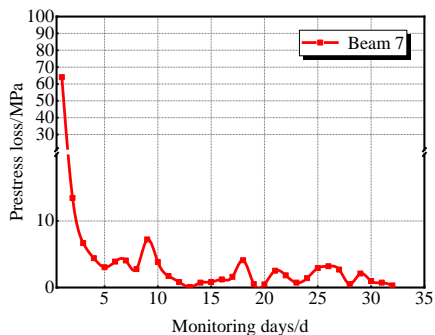
(d) 4 号梁



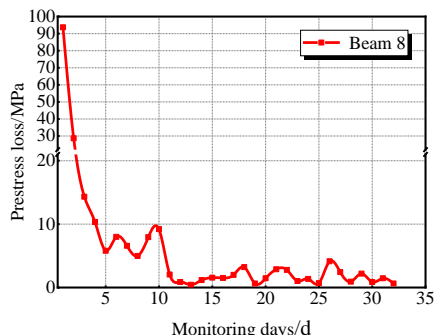
(e) 5 号梁



(f) 6 号梁



(g) 7 号梁



(h) 8 号梁

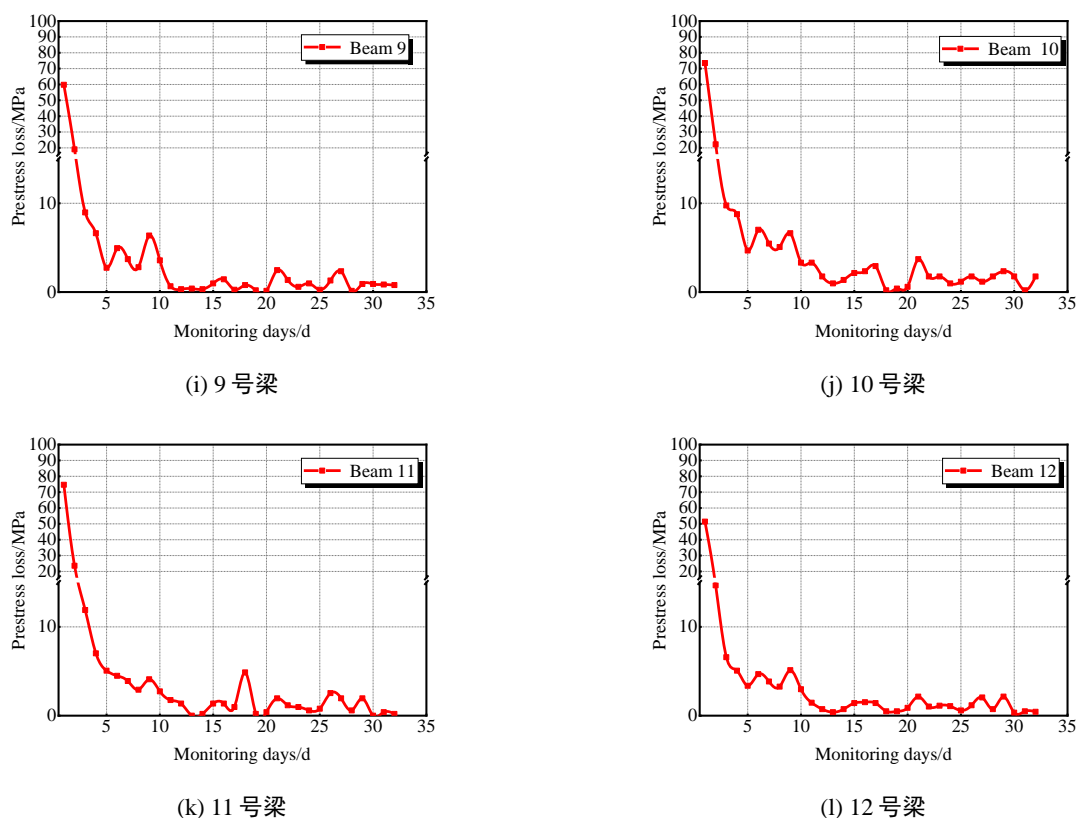


图 5 预应力损失 30 d 内变化曲线

Fig.5 Change curve of prestress loss within 30 d

表 4 钢绞线应变变化及各类损失汇总

Tab.4 Strand strain change and summary of various losses

Test piece number	$\Delta \bar{\varepsilon}_l / 10^{-6}$	$\sigma_{15+16} / \text{MPa}$	$\sigma_{11+12} / \text{MPa}$	Total loss /MPa
1	808	157.56	406	563.56
2	926	180.57	420	600.57
3	855	166.73	376	542.73
4	839	163.61	333	496.61
5	1032	201.24	379	580.24
6	1131	220.55	364	584.55
7	740	144.3	381	525.3
8	928	180.96	382	562.96
9	694	135.33	359	494.33
10	926	180.57	380	560.57
11	848	165.36	386	551.36
12	630	122.85	403	525.85
Mean value	863	168.30	380.75	549.05

2.3 实测值与规范计算值对比分析

本节将对采用中国《公路桥涵设计规范》(JTG 3362-2018)、《混凝土结构设计规范》(GB 50010-2010)、《铁路桥涵设计规范》(TB 10002-2017)、美国《公路桥涵设计规范》(AASHTO13)^[23]、欧洲《混凝土结构设计规范》(EN199213)^[24]中的后张法预应力损失计算方法计算

获得的损失值与试验实测的损失值进行对比, 分析各规范之间差异, 为我国预应力损失计算规范的修正、发展提供参考建议。

五种规范中后张法预应力混凝土梁各项预应力损失计算公式如表 5 所示, 公式符号解释如图表 6 所示:

表 5 预应力计算公式

Tab. 5 Prestress calculation formula

Prestress loss		JTG3362-2018	GB 50010-2010	TB 10002-2017
Instantaneous Loss	Friction loss	$\sigma_{11} = \sigma_{con} [1 - e^{-(\mu\theta + kx)}]$	$\sigma_{12} = \sigma_{con} [1 - e^{-(\mu\theta + kx)}]$	$\sigma_{11} = \sigma_{con} [1 - e^{-(\mu\theta + kx)}]$
	Anchorage loss	$\sigma_{12} = \frac{\sum \Delta L}{l} \cdot E_p$	$\sigma_{11} = \frac{a}{l} \cdot E_s$	$\sigma_{12} = \frac{\sum \Delta L}{l} \cdot E_p$
Long-term Loss	Relaxation loss of prestressed reinforcement	$\sigma_{15} = \psi \cdot \zeta \left(0.52 \frac{\sigma_{pe}}{f_{pk}} - 0.26 \right) \sigma_{pe}$	$\sigma_{14} = 0.125 \left(\frac{\sigma_{con}}{f_{ptk}} - 0.5 \right) \sigma_{con}$	$\sigma_{15} = \zeta \cdot \sigma_{con}$
	Concrete shrinkage and creep loss	$\sigma_{16} = \frac{0.9 [E_p \varepsilon_{cs}(t, t_0) + \alpha_{EP} \sigma_{pc} \varphi(t, t_0)]}{1 + 15 \rho \rho_s}$	$\sigma_{15} = \frac{55 + 300 \frac{\sigma_{pc}}{f_{cu}}}{1 + 15 \rho}$	$\sigma_{16} = \frac{0.8 n_p \Delta \sigma_c \varphi_\infty + E_p \varepsilon_\infty}{1 + \left(1 + \frac{\varphi_\infty}{2} \right) \mu_n \rho_A}$

(续表)

Prestress loss		AASHTO13 ^[23]	EN199213 ^[24]
Instantaneous Loss	Friction loss	$\Delta f_{pF} = f_{pj} \left[1 - e^{-(\mu\alpha + Kx)} \right]$	$\Delta \sigma_\mu(x) = \sigma_{max} \left[1 - e^{-(\mu(\theta + kx))} \right]$
	Anchorage loss	$\Delta f_{pA} = \frac{\sum \Delta L}{l} \cdot E_p$	$\sigma_{p,sl} = \frac{\partial L}{L} \cdot E_p$
Long-term Loss	Relaxation loss of prestressed reinforcement	$\Delta f_{PR2} = 138 - 0.3 \Delta f_{pF} - 0.4 \Delta f_{pES} - 0.2 (\Delta f_{PSR} + \Delta f_{PCR})$	$\Delta \sigma_{pr,j} = 0.66 \rho_{100} e^{9.1\mu} \left(\frac{t_0}{1000} \right)^{0.75(1-\mu)} \times 10^{-5}$
	Concrete shrinkage loss	$\Delta f_{PSR} = (93 - 0.85H)$	
	Creep loss of concrete	$\Delta f_{PCR} = 12 f_{csp} - 7.0 \Delta f_{cdp}$	$\Delta \sigma_{p,c+s+r} = \frac{E_p \varepsilon_{cs} + 0.8 \Delta \sigma_{pr} + \frac{E_p}{E_{cm}} \sigma_{c,qp} \varphi(t, t_0)}{1 + \frac{A_p}{A_c} \left(1 + \frac{A_c}{I_c} z_{cp}^2 \right) (1 + 0.8 \varphi(t, t_0))}$

表 6 预应力计算公式符号含义

Tab. 6 Explanation of symbols for prestressed calculation formula

Specification	Symbol	Interpretation of symbols	Unit
	σ_{con}	Tensioning control stress under prestressed steel anchor	
	f_{pk}	Standard value of tensile strength of prestressed steel bars	
	f_{ptk}		
	f'_{cu}	Cube compressive strength of concrete during tensioning of prestressed tendons	MPa
JTG3362-2018	E_p	Elastic modulus of prestressed reinforcement	
GB 50010-2010	θ	The sum of the included angles from the tensioning end to the tangent of the calculated section curve pipeline section	rad
TB 10002-2017	l	Effective length of prestressed reinforcement	
	$\sum \Delta L$	The sum of anchor deformation, reinforcement retraction, and joint compression values	mm
	x	The length of the pipeline from the tensioning end to the calculated section can be approximated as the projected length of the pipeline on the longitudinal axis of the component	m
	μ	Friction coefficient between prestressed steel bars and pipeline walls	
	k	Coefficient of influence of local deviation per meter of pipeline on friction	

	α_{EP}	The ratio of the elastic modulus of prestressed steel bars to the elastic modulus of concrete	
	σ_{pc}	The normal stress of concrete generated by pre-stressing (deducting the stress loss at the corresponding stage) at the center of gravity of all stressed steel bars on the calculated section during the relaxation of reinforcement for pre-tensioned prestressed components or anchoring of steel bars for post tensioned prestressed components in the tensile and compressive areas of the components. The influence of component gravity is considered based on the tensile stress situation.	
	ψ	Tensioning coefficient, during one tensioning, $\psi = 1.0$. When overtensioning, $\psi = 0.9$	
	ζ	Reinforcement relaxation coefficient, Grade I relaxation (ordinary relaxation), $\zeta = 1.0$. Level II relaxation (low relaxation), $\zeta = 0.3$	
	σ_{pe}	Reinforcement stress during force transfer anchoring	
	σ_{l6}	The prestress loss value caused by concrete shrinkage and creep at the center of gravity of all stressed reinforcement in the tensile and compressive areas of the component	
	μ_n	The reinforcement ratio of all longitudinal reinforcement in the tensile and compressive areas of the component	
	ρ		
	$\varepsilon_{cs}(t, t_0)$	The ratio of the elastic modulus of prestressed reinforcement to the elastic modulus of concrete	
	ε_{∞}		
	$\varphi(t, t_0)$	Final value of shrinkage strain starting from concrete age t_0	
	φ_{∞}		
	x	The length of prestressed reinforcement from the tensioning end to any point under consideration	mm
	K	Rolling friction coefficient	mm ⁻¹
	μ	Curvature coefficient	1/rad
	α	The sum of the absolute values of the angle changes of the prestressed reinforcement along the way from the tensioning end, or if both ends are equally tensioned, from the nearest tensioning end to the investigation point	rad
AASHTO13	f_{pj}	Stress in prestressed steel during tensioning	
	Δf_{pES}	Loss caused by elastic compression	
	Δf_{pSR}	Losses caused by concrete shrinkage	
	Δf_{pCR}	Loss caused by elastic creep	MPa
	f_{cgp}	Concrete stress at the center of gravity of prestressed reinforcement during force transmission	
	Δf_{cdp}	Change in concrete stress caused by permanent load at the center of gravity of prestressed reinforcement	
	H	Average annual environmental relative humidity	
	ρ_{100}	The loss value caused by the relaxation of prestressed reinforcement within 1000 hours of tensioning at an average temperature of 20 °C	%
	$\Delta\sigma_{c,qp}$	The stress generated at the center of gravity of the prestressed steel due to self weight, permanent load, and initial prestress	
	$\Delta\sigma_{pr}$	Relaxation stress of prestressed reinforcement	
EN199213	A_p	The cross-sectional area of prestressed reinforcement	mm ²
	A_c	Concrete cross-sectional area	
	Z_{cp}	The distance from the center of gravity of the reinforcement to the center of gravity of the beam	
	σ_{max}	The most controlled stress for the tensioning of prestressed reinforcement	MPa
	E_{cm}	Secant modulus at time t of concrete force transmission	
	∂L	Anchor slip	mm
	μ	The ratio of the standard value of prestressed and tensile strength of prestressed reinforcement after anchoring	

通过对上述五种规范的对比可知：1)五种规范中，对于摩擦损失及锚具变形引起的损失的计算方法基本一致，只是每种规范的一些系数选取存在细微的差别；2)对于长期损失的计算，五种规范中美国规范和我国的混凝土设计规范计算方法相对更加简单，考虑的影响因素少，未考虑环境温度、龄期、配筋率等对于损失的影响。采用上述五种规范计算得到的瞬时损失值与实测值的平均值的对比结果如表 7 所示。

由表 7 可知：1)五种规范中除了我国铁路桥涵设计规范(摩擦损失略小于实测值)各损失计算值大于实测值外，其余 4 种规范的计算值都在不同程度上小于实测值，其中欧洲规范偏小最多，故以本次试验为例，欧洲规范安全保证率也最低，我国铁路桥涵设计规范最安全；2)由上述表格数据可知，直接采用规范来计算预应力损失所得出的损失值普遍低于实际的预应力损失，偏于

不安全，这也印证了许多学者的观点即预应力损失估计值偏低是预应力梁开裂和下挠的主要原因。因此，根据相关文献^[25]，为了结构更加安全稳定的运营在设计阶段采用规范对预应力损失进行估算时建议乘上一个增大系数作为安全系数。安全系数可依据试验结果来确定，如根据本次试验若采用《公路桥涵设计规范》JTG3362-2018 进行估算时，建议安全系数取 1.2。3)通过对比规范计算值和试验实测值得出 JTG3362-2018、GB 50010-2010、TB 10002-2017、AASHTO13、EN199213 计算所得瞬时损失与实测值的误差分别为 8.9%、8.9%、4.9%、21.9%、22.2%；长期损失与实测值的误差分别为 11.1%、10.4%、10.3%、5.4%、29.2%；总损失与实测值的误差分别为 9.4%、9.2%、6.8%、16.8%、24.0%；综合安全因素及误差大小考虑，TB 10002-2017 的计算结果与本次试验实测数据最为吻合。

表 7 五种规范计算值与实测值对比

Tab. 7 Comparison of five standard calculated values and measured values

Design specification	Friction loss/MPa	Relative error/%	Anchorage loss/MPa	Relative error/%	Instantaneous Loss /MPa	Relative error/%	Long-term Loss /MPa	Relative error/%	Total loss /MPa	Relative error/%
JTG3362-2018	84.6	19.4	267.1	4.9	351.7	8.9	149.6	11.1	501.3	9.4
GB 50010-2010	84.6	19.4	267.1	4.9	351.7	8.9	150.8	10.4	502.5	9.2
TB 10002-2017	97.9	6.7	307.2	9.3	405.1	4.9	185.7	10.3	590.8	6.8
AASHTO13	66.8	36.3	234.4	16.6	301.2	21.9	159.2	5.4	460.4	16.8
EN 1992	65.6	37.5	234.4	16.6	300	22.2	119.2	29.2	420.4	24.0
实测均值	105	0	281	0	386	0	168.3	0	553.3	0

3 结论

本文以目前高铁应用最为广泛的 32m 预应力混凝土箱梁为研究对象，开展了 26 根模型梁的预应力损失监测试验，结论如下：

1) 预应力梁的预应力损失由两部分组成分别为瞬时损失和长期损失，其中瞬时损失占总损失的 69.35%。在瞬时损失中锚固损失又为主要部分，其值占前期损失的比例高达 72.8%。

2) 在 30 d 内，试验梁锚固后前 10 d 预应力损失变化较快，后期的损失变化幅度较小最终趋于平稳，其中试验梁第 1 d 发生的预应力损失均最大，都达到各自长期损失总值的 35% 以上，最大达到 51.78%。

3) 通过对比规范计算值和试验实测值得出《铁路桥涵设计规范》(TB 10002-2017)计算结果

与本次试验实测数据最为吻合，瞬时损失与实测值的误差值为 4.9%，总损失与实测值的误差值为 6.8%。

4) 采用规范计算得到的预应力损失普遍低于实测值，偏于不安全，建议根据相应的试验结果来增加一个安全系数进行预应力损失的估算，确保结构更加安全稳定的运营。

参考文献：

[1] 王强, 王丹竹. 高速铁路运营质量评价指标体系构建及实施 [J]. 铁道运输与经济, 2021, 43(06): 58-62.
WANG Q, WANG D Z. Construction and implementation of high-speed railway operation quality evaluation index system [J]. Railway Transport and

- Economy, 2021, 43(06): 58-62.
- [2] 吴大宏, 屠嘉杨, 苏伟, 等. 车桥耦合振动高速铁路典型桥梁动力系数研究 [J]. 华东交通大学学报, 2022, 39(02): 17-26.
WU D H, TU J Y, SU W, et al. Study on the dynamic coefficient law of typical bridges of high-speed railway based on vehicle-bridge coupling vibration [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2022, 39(02): 17-26.
- [3] 梁岩, 李庆贺, 罗小勇, 等. 高速铁路桥梁预制节段拼装桥墩抗震性能分析 [J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(06): 1492-1501.
LIANG Y, LI Q H, LUO X Y, et al. Seismic resistance capacity of applying PSBC in high-speed railway bridge [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(06): 1492-1501.
- [4] 孔文斌, 雷晓燕. 高速铁路长大桥梁无缝线路附加挠曲力计算分析 [J]. 华东交通大学学报, 2011, 28(01): 25-28.
KONG W B, LEI X Y. Calculation analysis of additional deflection force of CWR on high speed railway long span bridge [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2011, 28(01): 25-28.
- [5] 雷晓燕, 翁凌霄, 刘庆杰, 等. 高速铁路桥梁结构振动、噪声与环境振动现场试验 [J]. 铁道学报, 2022, 44(11): 121-128.
LEI X Y, WENG L X, LIU Q J, et al. Field test on structural vibration, noise and environmental vibration of high-speed railway bridges [J]. Journal of the Railway Society, 2022, 44(11): 121-128.
- [6] HUANG W, PEI M S, LIU X D, et al. Design and construction of super-long span bridges in China: Review and future perspectives [J]. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 2020, 14(4).
- [7] 芦静夫, 孙占琦, 邱勇, 等. 大跨重载预应力混凝土双T板受力性能试验研究 [J]. 工业建筑, 2020, 50(09): 62-67.
LU J F, SUN Z Q, QIU Y, et al. Experimental study on stress performance of double-T slab of long-span heavy-duty prestressed concrete [J]. Industrial Construction, 2020, 50(09): 62-67.
- [8] 薛志辉, 苗乾, 衷平. 大跨度桥梁既有预应力混凝土T梁循环利用潜力分析 [J]. 公路交通科技, 2020, 37(S2): 148-153.
XUE Z H, MIAO Q, ZHONG P. Analysis on recycling potentiality long-span existing prestressed concrete T-beam [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2020, 37(S2): 148-153.
- [9] 黄波, 沈洁, 王盼盼, 等. 预应力混凝土矮塔斜拉桥静载试验研究 [J]. 建筑结构, 2023, 53(S1): 1733-1736.
HUANG B, SHEN J, WANG P P, et al. Experimental study on static load of prestressed concrete low-tower cable-stayed bridge [J]. Building Structure, 2023, 53(S1): 1733-1736.
- [10] 张开银, 曹萱, 胡国海. 预应力混凝土桥梁弯曲孔道接触应力研究 [J]. 大连理工大学学报, 2019, 59(06): 617-623.
ZHANG K Y, CAO X, HU G H. Research on curved duct contact stress of prestressed concrete bridge [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2019, 59(06): 617-623.
- [11] 石挺丰, 胡狄, 陈政清. 预应力混凝土桥梁徐变模型试验相似关系研究 [J]. 华东交通大学学报, 2007(04): 30-32.
SHI T F, HU D, CHEN Z Q. Research on similarity relationship for model-based creep experiment of prestressed concrete bridges [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2007(04): 30-32.
- [12] 编辑部中国公路学报. 中国桥梁工程学术研究综述 2021 [J]. 中国公路学报, 2021, 34(02): 1-97.
Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's bridge engineering research: 2021[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(02): 1-97.
- [13] M. P áez Pablo, BERADI Sensale-Cozzano. Time-dependent analysis of simply supported and continuous unbonded prestressed concrete beams [J]. Engineering Structures, 2021, 240.
- [14] 侯宇飞. 高速铁路预应力混凝土桥梁预制装配整体式桥面系性能研究 [J]. 铁道标准设计, 2020, 64(06): 74-78.
HOU Y F. Study on performance of precast assembly monolithic bridge deck of high-speed railway prestressed concrete bridge [J]. Railway Standard Design, 2020, 64(06): 74-78.
- [15] 高超, 宗周红, 娄凡, 等. 预应力混凝土连续梁桥桥面爆炸荷载模型试验 [J]. 中国公路学报, 2022, 35(12): 106-114.
GAO C, ZONG Z H, LOU F, et al. Load model experiment of prestressed concrete continuous girder subjected to explosion above the deck [J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(12): 106-114.

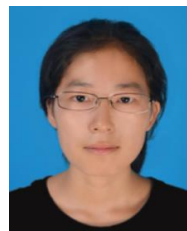
- [16] 张海义, 张杰, 邹道勤, 等. 后张法预应力梁瞬时损失设计与试验研究 [J]. 工业建筑, 2010,40(10):71-75. ZHANG H Y, ZHANG J, ZOU D Q, et al. Design and experimental study on instantaneous loss of post-tensioned prestressed beam [J]. Industrial Construction, 2010, 40(10): 71-75.
- [17] 周燕勤, 吕志涛. 预应力长期损失计算建议 [J]. 东南大学学报, 1997(S1):78-82. ZHOU Y Q, LV Z T. Suggestions for calculating long-term loss of prestress [J]. Journal of Southeast University, 1997(S1): 78-82.
- [18] 方志, 汪剑. 预应力混凝土箱梁桥竖向预应力损失的实测与分析 [J]. 土木工程学报, 2006(05): 78-84. FANG Z, WANG J. Measurement and Analysis of Vertical Prestress Loss of Prestressed Concrete Box Girder Bridge [J]. Journal of Civil Engineering, 2006(05): 78-84.
- [19] SHENG S, YAO W, MA S L, et al. Evaluation of Prestress Loss Distribution during Pre-Tensioning and Post-Tensioning Using Long-Gauge Fiber Bragg Grating Sensors [J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2018, 18(12).
- [20] GUO T, CHEN Z H, LU S, et al. Monitoring and analysis of long-term prestress losses in post-tensioned concrete beams [J]. Measurement, 2018, 122.
- [21] 黄颖, 高杰. 各国规范中对预应力混凝土结构损失的计算方法分析比较 [J]. 四川理工学院学报(自然科学版), 2015, 28(01): 31-35. HUANG Y, GAO J. Analysis and comparison of calculation methods for structural loss of prestressed concrete in national norms [J]. Journal of Sichuan Institute of Science and Technology (Natural Science Edition), 2015, 28(01): 31-35.
- [22] 张文学, 谢全懿, 李学斌, 等. 高速铁路桥梁预应力孔道摩阻损失系数测试误差敏感性分析[J]. 中国铁道科学. 2015, 36(06): 31-36. ZHANG L Q, Comparative analysis of the calculation methods for prestressing loss in current highway and railway bridge regulations[D], Lanzhou Jiaotong

University, 2022.

- [23] AASHTO LRFD-8 AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 8th Edition [S]. 2017.
- [24] DIN EN 1992-1-2/NA/A1-2015 National Annex - Nationally determined parameters - Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design; Amendment A1 [S]. 2015.
- [25] 张利强. 现行公路和铁路桥规中预应力损失计算方法的对比分析[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2022. ZHANG L Q, Comparative analysis of the calculation methods for prestressing loss in current highway and railway bridge regulations[D], Lanzhou Jiaotong University, 2022.



第一作者: 许开成 (1973—), 男, 研究方向为工程结构耐久性、废弃材料在混凝土中高效资源化利用。E-mail: xkcxj@ecjtu.edu.cn。



通信作者: 张立卿 (1987—), 女, 讲师, 博士, 研究生导师, 研究方向为结构健康监测与道路探测、多功能/智能混凝土与结构、绿色再生混凝土与结构。mail: zlq@ecjtu.edu.cn