

文章编号: 1005-0523(2024)02-0048-08



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:【目的】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。【方法】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规范计算所得值进行对比分析。【结果】预应力损失主要发生在前期即瞬时损失,约占总损失的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,数据显示实测数据与《铁路桥涵设计规范》(TB 10002—2017)计算结果最为吻合。【结论】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; U488.33

文献标志码: A

本文引用格式: 许开成, 黄凌娟, 李鹏清, 等. 基于缩尺模型的高铁桥梁预应力损失试验研究[J]. 华东交通大学学报, 2024, 41(2): 48-55.

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

Abstract: 【Objective】To better evaluate the prestress loss of in-service prestressed concrete bridge structures, 【Method】this article takes the 32 m 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. 【Result】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

收稿日期: 2023-07-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(52368031, 51968021); 中国博士后科学基金项目(2022M713497); 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项目(HJGZ2022201); 江西省研究生创新专项资金项目(YC2022-s506)

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 measured data is most consistent with the calculation results of the "Code for Design of Railway Bridges and Culverts" (TB 10002—2017). **【Conclusion】**The research results can provide reference for the calculation of prestress loss of prestressed beams in practical engineering.

Key words: prestressed concrete beam; prestress loss; reduced scale model; standardized comparison; strain monitoring

Citation format: XU K C, HUANG L J, LI P Q, et al. Experimental study on prestress loss of high-speed railway bridges based on scaled model[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2024, 41(2): 48-55.

【研究意义】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、施工简单等优点,在我国高速铁路建设中得到大面积使用^[1-7]。然而随着此类桥梁服役年限的增加,预应力松弛、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、过度下挠等一系列问题,甚至可能引发事故^[8-10]。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。

【研究进展】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^[11]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^[12]在大量试验数据的基础上,从理论分析着手提出了3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^[13]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。Sheng等^[14]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^[15]利用有限元模拟了具有无黏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黏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。

【创新特色】在深入调研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,这26根梁都进行了瞬时监测,其中12根

用于长期监测试验。**【关键问题】**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

选取我国时速350 km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试验梁26根,受拉和受压钢筋均采用直径14 mm的HRB400螺纹钢筋,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100 mm,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号梁开展了监测钢绞线瞬时预应力损失,其中15~26号梁开展了监测钢绞线长期预应力损失。

1.2 试验梁制作

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。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

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。

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^[6], 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_{n1} 与锚固损失 σ_{n2} 。

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_{n1} , 故钢绞线监测点 P_i 点处的摩擦损失 σ_{n1}^i 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。

$$\sigma_{n1}^i = (\sigma_{con} - E\varepsilon_a^i), \quad i = 1 \sim 5 \quad (1)$$

b 阶段的预应力损失主要是 σ_{n2} , 故钢绞线监测点 P_i 处的反向摩擦损失 σ_{n2}^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。

$$\sigma_{n2}^i = E(\varepsilon_b^i - \varepsilon_a^i), \quad i = 1 \sim 5 \quad (2)$$

c 阶段, 在无外力作用的情况下预应力筋松弛 σ_{r5}^i 和混凝土收缩徐变 σ_{c6}^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。

$$\sigma_{r5}^i + \sigma_{c6}^i = E(\varepsilon_c^i - \varepsilon_b^i), \quad i = 1 \sim 5 \quad (3)$$

在预应力筋的张拉施工过程中, 除规范要求的预应力控制外, 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 1, 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 1, 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

表 1 钢绞线伸长量及瞬时损失

Test piece number	$\Delta L / \text{mm}$	$\bar{\varepsilon}_{con} (\times 10^{-6})$	$\bar{\varepsilon}_0 (\times 10^{-6})$	σ_{n1} / MPa	σ_{n2} / MPa	$\sigma_{n1+n2} / \text{MPa}$
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	4 718	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	6 155	4 541	102	315	417
14	14.4	6 106	4 586	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	6 294	4 699	75	311	386
20	14.3	6 140	4 613	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	4 677	99	291	390
26	21.5	6 257	4 778	82	288	370
Mean value	15.13	6 136	4 695	105	281	386

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。

利用 SPSS 软件先对 $\bar{\varepsilon}_{con}$ 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, 4 695, 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 1 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 号梁外, 其余试验梁的锚固损失占瞬时损失总和的比例均超过 70%, 最高的 19 号试验梁达到 80.57%。分析 5, 6, 8, 18 号试验梁 σ_{n1} 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 $\sigma_{n1} = \sigma_{con}(1 - e^{-(\mu\theta + kx)})$ ^[17])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_{f1} 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_{15} 和混凝土收缩徐变引起的损失 σ_{16} ,这类损失主要是考虑了材料的时间效应。在30 d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3和表2所示,其中表2当中的 $\Delta\bar{\epsilon}_1$ 为第一天和最后一天的应变差值。

由图3和表2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10 d预应力损失变化较快,后期的损失变化幅度较小,

表2 钢绞线应变变化及各类损失汇总
Tab.2 Strand strain change and summary of various losses

Test piece number	$\Delta\bar{\epsilon}_1$ ($\times 10^{-6}$)	σ_{15+16} /MPa	σ_{11+12} /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	1 032	201.24	379	580.24
6	1 131	220.55	364	584.55
7	740	144.30	381	525.30
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

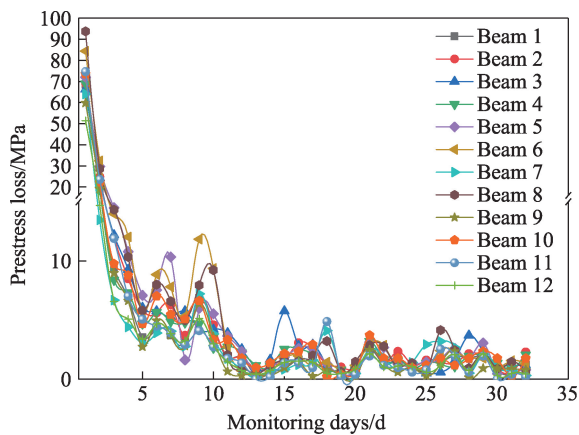


图3 预应力损失30 d内变化曲线

Fig. 3 Change curve of prestress loss within 30 d

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30 d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, 66.30, 69.03, 72.02, 84.37, 64.04, 93.70, 59.80, 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。

2.3 实测值与规范计算值对比分析

对采用中国《公路桥涵设计规范》(JTJ 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)、欧洲《混凝土结构设计规范》(EN199213)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。

5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3所示,其中 ψ 代表张拉系数,一次张拉系数: $\psi=1.0$;超张拉: $\psi=0.9$; ζ 为松弛系数,一级松弛, $\zeta=1.0$;二级松弛, $\zeta=0.3$ 。

通过对上述5种规范的对比可知:①5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,5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5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4所示。

由表4可知:①5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[18],为了结构更加安全稳定地运营,在设计阶段采用规范

表3 预应力计算公式
Tab.3 Prestress calculation formula

Prestress loss		JTG 3362—2018	GB 50010—2010	TB 10002—2017
Instantaneous loss	Friction loss	$\sigma_{l1} = \sigma_{con} [1 - e^{-(\mu\theta + kx)}]$	$\sigma_{l2} = \sigma_{con} [1 - e^{-(\mu\theta + kx)}]$	$\sigma_{l1} = \sigma_{con} [1 - e^{-(\mu\theta + kx)}]$
	Anchorage loss	$\sigma_{l2} = \frac{\sum \Delta L}{l} E_p$	$\sigma_{l1} = \frac{a}{l} E_s$	$\sigma_{l2} = \frac{\sum \Delta L}{l} E_p$
Long-term loss	Relaxation loss of prestressed reinforcement	$\sigma_{l5} = \psi \zeta \left(0.52 \frac{\sigma_{pc}}{f_{pk}} - 0.26 \right) \sigma_{pc}$	$\sigma_{l4} = 0.125 \left(\frac{\sigma_{con}}{f_{pk}} - 0.5 \right) \sigma_{con}$	$\sigma_{l5} = \zeta \sigma_{con}$
	Concrete shrinkage and creep loss	$\sigma_{l6} = \frac{0.9 [E_p \varepsilon_{cs}(t, t_0) + \alpha_{EP} \sigma_{pc} \varphi(t, t_0)]}{1 + 15 \rho \rho_s}$	$\sigma_{l5} = \frac{55 + 300 \frac{\sigma_{pc}}{f_{cu}}}{1 + 15 \rho}$	$\sigma_{l6} = \frac{0.8 n_p \Delta \sigma_c \varphi_{\infty} + E_p \varepsilon_{\infty}}{1 + \left(1 + \frac{\rho_s}{2} \right) \mu_n \rho_A}$
Prestress loss		AASHTO13	ENI99213	
Instantaneous loss	Friction loss	$\Delta f_{pf} = f_{pi} \left[1 - e^{-(\mu\alpha + kx)} \right]$	$\Delta \sigma_{\mu}(x) = \sigma_{max} \left[1 - e^{-\mu(\theta + kx)} \right]$	
	Anchorage loss	$\Delta f_{pA} = \frac{\sum \Delta L}{l} E_p$	$\sigma_{p,sl} = \frac{\partial L}{L} E_p$	
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	$\Delta f_{PCR} = 12 f_{cgp} - 7 \Delta f_{cdp}$	$\Delta \sigma_{p,c+s+r} = \frac{E_p \varepsilon_{cs} + 0.8 \Delta \sigma_{pr} + \frac{E_p}{E_{cm}} \sigma_{c,QP} \varphi(t, t_0)}{1 + \frac{A_p}{A_c} \left(1 + \frac{A_c}{I_c} z_{cp}^2 \right) (1 + 0.8 \varphi(t, t_0))}$	

表4 5种规范计算值与实测值对比

Tab.4 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/%
JTG 3362—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
ENI99213	65.6	37.5	234.4	16.6	300.0	22.2	119.2	29.2	420.4	24.0
Actual measured mean	105.0	0	281.0	0	386.0	0	168.3	0	553.3	0

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》(JTG 3362—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 JTG 3362—2018, GB 50010—2010, TB 10002—2017, AASHTO13, ENI99213 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。

3 结论

以目前高铁应用最为广泛的 32 m 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地运营。

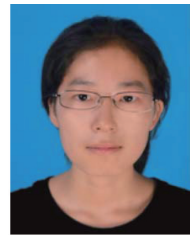
参考文献:

- [1] 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): 803-838.
- [2] 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(9): 62-67.
LU J F, SUN Z Q, QIU Y, et al. Experimental research on mechanics of long-span and heavy-load prestressed concrete double-tees[J]. *Industrial Construction*, 2020, 50(9): 62-67.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 张开银, 曹莹, 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(6): 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(6): 617-623.
- [6] 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(4): 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(4): 30-32.
- [7] 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(2): 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(2): 1-97.
- [8] PAEZ P M, SENSALÉ-COZZANO B. Time-dependent analysis of simply supported and continuous unbonded prestressed concrete beams[J]. *Engineering Structures*, 2021, 240(5): 112376.
- [9] 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(6): 74-78.
HOU Y F. Research on the performance of the precast integrated bridge deck system protecting wall in high-speed railway PC bridges[J]. *Railway Standard Design*, 2020, 64(6): 74-78.
- [10] 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 bridge subjected to explosion above the deck[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2022, 35(12): 106-114.
- [11] 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 instant loss of post-tensioned prestressed beams[J]. *Industrial Construction*, 2010, 40(10): 71-75.
- [12] 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, LYU Z T. Calculation of long-term prestress losses[J]. *Journal of Southeast University*, 1997(S1): 78-82.
- [13] 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(5): 78-84.
FANG Z, WANG J. Vertical prestressing loss in the box girder of long-span PC continuous bridges[J]. China Civil Engineering Journal, 2006(5): 78-84.
- [14] 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): 4106 .
- [15] 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: 573-581.
- [16] 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(1): 31-35.
HUANG Y, GAO J. Analysis and comparison of the computing methods of the losses for prestressed concrete structure in national main codes[J]. Journal of Sichuan University of Science & Engineering(Natural Science Edition), 2015, 28(1): 31-35.
- [17] 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(6): 31-36.
ZHANG W X, XIE Q Y, LI X B, et al. Analysis on test error sensitivity of prestressed duct friction loss coefficient of high speed railway bridge[J]. China Railway Science, 2015, 36(6): 31-36.
- [18] 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 prestress loss calculation methods in current highway and railway bridge codes[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2022.



第一作者: 许开成(1973—), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 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, 副教授, 博士, 硕士生导师, 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。E-mail: zllq@ecjtu.edu.cn。

(责任编辑: 刘棉玲)