

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2019.04.020

预应力钢筋回缩引起的预应力损失简化计算研究

龚良勇, 王俊召

(重庆交通大学 土木工程学院, 重庆市 400074)

摘要: 预应力钢筋回缩是导致预应力损失的主要因素之一, 预应力损失量预测方法众多, 该文针对预应力钢筋预应力损失预测问题展开文献调研, 总结了当前预应力损失研究的方法及存在的问题。在此基础上引入利用理论公式计算方法, 对预应力钢筋回缩引起的预应力损失量进行计算, 并利用有限元软件进行建模计算预应力损失。对这两种方法得出的结果进行了对比分析, 以此对理论公式计算结果进行了验证。结果表明: 理论公式计算预应力钢筋回缩引起的预应力损失具有较好的可靠性和使用便捷性。

关键词: 钢筋回缩; 预应力损失; 影响长度; 有限元

自20世纪50~60年代起中国混凝土桥梁建设逐渐起步, 各种大型简支梁、悬臂梁等预应力混凝土桥梁一一落成, 为中国大型后张法预应力混凝土桥梁的修建积累了丰富的经验。进入21世纪之后, 预应力混凝土桥梁在中国公路桥梁建设中得到了广泛的应用。预应力混凝土梁分为先张法预应力梁和后张法预应力梁, 目前世界上使用最为广泛的是后张法预应力混凝土梁。但是在预应力筋拉伸完毕锚固时由于锚具压缩, 锚具与梁体之间存在的接缝被压密等原因会造成预应力钢筋的回缩, 使得实际加载的有效预应力偏小。造成了预应力桥梁结构的承载能力打折扣, 也使得桥梁的耐久性受到不利影响。目前一些研究表明, 预应力混凝土桥梁建成投入使用后, 其预应力损失可达到30%左右, 局部位置预应力损失可达45%以上。因此有必要对预应力回缩引起的预应力损失情况进行研究。以便确定预应力损失量, 为实际加载的张拉量提

供依据。

1 国内外研究现状

目前, 预应力损失测量与计算方法有很多种, 大多数都是基于试验的基础结合理论分析与建模进行研究。有研究者将预制预应力钢筋混凝土梁的预应力损失分析与试验中观察到的预应力损失进行比较, 以模拟评估分析方法计算预制预应力钢筋混凝土梁的预应力损失。预应力损失的测量一般借由裂缝、挠度、动力性能等具体指标的检测来推断预应力梁中的预应力筋工作状态, 这些手段都能够间接地推测梁体的整体工作状态以及判断预应力损失量, 但是对预应力筋的实际状态(预应力损失、有效预应力等)做出有效的判断方法或是繁琐, 或是难以把控准确度。因此对预应力损失的测量计算方法有必要进行研究。

- *****
- [3] 江海燕, 伍雯晶, 蔡云楠. 开放空间的概念界定和分类[J]. 城市发展研究, 2016(4).
- [4] 周皓, 王晋华, 田朝阳. 滨河空间场所精神延续和更新探讨[J]. 华中建筑, 2012(4).
- [5] 张丽. 城市滨河带状空间景观规划与设计——以上海三林老街滨河城市公园为例[J]. 中外建筑, 2012(7).
- [6] 周琦, 汪坤, 祝遵凌. 地域性文化在城市滨河景观设计中的表达——以云南双江南勐河景观规划设计为例[J]. 中南林业科技大学学报: 社会科学版, 2013(4).
- [7] 刘琳. 探索城市景观桥梁的建筑造型[J]. 中外建筑, 2011(9).
- [8] 邓文中. 重庆两江大桥设计理念[J]. 桥梁, 2010(7).
- [9] 王文斌, 徐利平, 戴利民. 城市桥梁群概念刍议[J]. 上海公路, 2013(5).
- [10] 张澎涛, 范立础. 城市河道桥型系列规划方法研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2007(12).
- [11] 杨士金. 谈城市桥梁规划[J]. 城市道桥与防洪, 2016(2).

收稿日期: 2018-10-12

作者简介: 龚良勇, 男, 硕士研究生, 助理工程师, E-mail: xiaoxiao.gong@163.com

2 预应力钢束回缩引起预应力损失研究

该文将采用一种基于测量预应力筋回缩量的数值计算方法来检测预应力的损失。

预应力筋在张拉完成后由于种种原因会产生回缩,具体原因如下:

- (1) 锚具被预应力压缩产生的变形。
- (2) 锚板和垫板间原有空隙被压密产生的变形。
- (3) 锥形锚具被千斤顶挤压时使预应力筋回缩。
- (4) 夹片式锚具在锚固时由于夹片被挤进夹槽也会产生预应力筋回缩。

研究过程为:首先利用精密的仪器测量出预应力筋的回缩变形量,并根据公式计算出所对应的预应力损失值。然后将根据设计资料建立梁的有限元模型,并利用有限元模型计算对应的预应力损失,验证公式计算结果是否可靠。具体研究思路如图1所示。

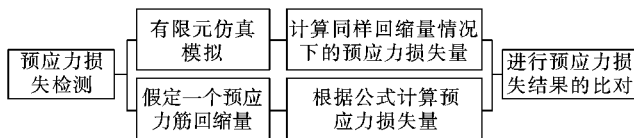


图1 研究思路框图

3 预应力钢束回缩应力损失理论公式计算法

对于后张法预应力混凝土结构,当预应力筋为曲线和折线布置时,钢筋与孔道壁的摩擦较大,此项预应力损失就集中发生在靠近张拉部位的预应力筋内,需要考虑反向摩擦的影响。用平均摩擦系数代替实际摩擦系数,忽略摩擦系数沿预应力筋长度方向的不同。同时假设预应力钢筋回缩时反摩擦作用机理与张拉时摩擦作用机理相同,就可以计算出预应力钢束回缩的影响长度和张拉端的预应力损失,进而求得距张拉端不同距离处考虑反摩擦后的预应力损失。

综上所述,在建立理论公式对预应力筋进行应力值计算时,作出如下假定:

- (1) 用平均摩擦系数代替实际摩擦系数,忽略摩擦系数沿预应力筋长度方向的不同。
- (2) 预应力钢束回缩时反摩擦阻力与张拉时正摩擦阻力大小相同,方向相反。

当不考虑波纹管孔道壁对预应力筋摩擦力的影响

时,据JTG/T F50—2011《公路桥涵施工技术规范》,由预应力筋回缩引起的预应力筋损失量 σ_1 的计算公式如下:

$$\sigma_1 = E_p \epsilon = \frac{\sum \Delta l}{l} E_p \quad (1)$$

式中: Δl 为张拉端锚具变形、钢筋回缩和接缝压缩值; l 为预应力钢筋的总长度; E_p 为预应力钢筋的杨氏弹性模量。

但是当预应力孔道是抛物线或者圆曲线时预应力钢筋和预应力孔道间就会产生反摩擦力。由于反摩擦力的作用,由预应力钢筋引起的预应力损失值会随着位置的不同逐渐变化。

研究表明,反摩擦力对预应力钢筋回缩引起的预应力损失的影响是有一定长度的,即影响长度 l_y 。在影响长度内,由于靠近张拉端的预应力钢筋回缩最大,因此预应力损失也最大,随着距离张拉端越来越远,预应力的损失也越来越小,当距离超过影响长度时预应力钢筋的回缩量变为零,预应力的损失量也变为零。

如图2所示,曲线ANC是预应力钢筋回缩前的预应力随着钢筋远离张拉端的变化曲线,A端是张拉端,当 $x=0$ 时此处的预应力值是张拉控制应力 σ_0 。从图2可以看出:当距离A点越来越远时预应力值是越来越小的,其原因是张拉预应力钢筋时会有摩擦力的作用,这个摩擦力被称为正摩擦力。曲线A'NC是预应力钢筋回缩后的预应力随着钢筋远离张拉端的变化曲线,N点到D点的距离是影响长度 l_y 。由于摩擦系数相同,可以近似认为正反摩擦力在大小上是相等的,所以在影响长度范围内,曲线AN与曲线A'N是关于DN对称的。曲线AN与曲线A'N之间的距离即是预应力钢筋回缩产生的预应力损失值。从图2可以看出:随着距离张拉端越来越远,预应力损失越来越小,到N点后预应力不再损失。

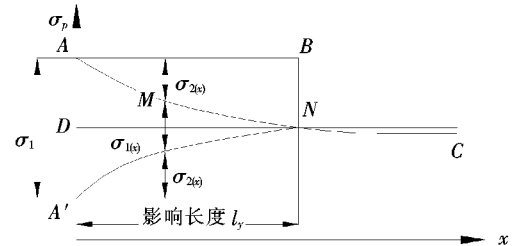


图2 预应力损失示意图

摩擦力对预应力大小的影响值 $\sigma_2(x)$ 如图2所示,可用式(2)计算得到。

$$\sigma_2(x) = \sigma_0 [1 - e^{-\langle \mu \theta + kx \rangle}] \quad (2)$$

由于 $-(\mu\theta+kx)$ 非常小, 而根据公式 $e^x \approx 1+x$ 可得:

$$\sigma_2(x) \approx \sigma_0 \{1 - [1 - (\mu\theta+kx)]\} = \sigma_0(\mu\theta+kx) \quad (3)$$

因此可以知道曲线 AN 可近似地视为一条直线, 如图 3 所示。

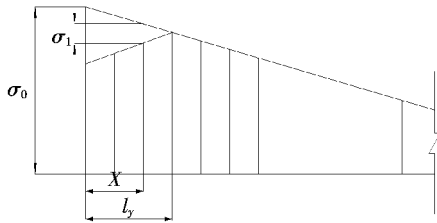


图 3 预应力近似值示意图

通过图 2 和式(3)可以推得:

$$\sigma_1 = 2\sigma_0(\mu\theta_y + kl_y) \left(1 - \frac{x}{l_y}\right) = 2\sigma_0 l_y \left(\frac{\mu}{r_d} + k\right) \left(1 - \frac{x}{l_y}\right) \quad (4)$$

在影响长度内的预应力钢筋的总回缩量 $\sum \Delta l$ 的计算公式为:

$$\sum \Delta l = \int_a^N \epsilon dx = \frac{1}{E_p} \int_a^N \sigma_1(x) dx \quad (5)$$

由式(5)可以推导出:

$$E_p \sum \Delta l = \int_a^N \sigma_1(x) dx \quad (6)$$

将式(4)代入式(6)可以推出:

$$l_y = \frac{\sqrt{E_p \sum \Delta l}}{\sqrt{\sigma_0 \left(\frac{\mu}{r_d} + k\right)}} \quad (7)$$

最后将式(7)回代入式(4)可以得到最终的预应力损失公式:

$$\sigma_1 = 2\sigma_0 \times \frac{\sqrt{E_p \sum \Delta l}}{\sqrt{\sigma_0 \left(\frac{\mu}{r_d} + k\right)}} \times \left(\frac{\mu}{r_d} + k\right) \times \left(1 - \frac{x}{\frac{\sqrt{E_p \sum \Delta l}}{\sqrt{\sigma_0 \left(\frac{\mu}{r_d} + k\right)}}}\right) \quad (8)$$

式中: σ_0 为预应力钢筋的张拉控制应力; l_y 为摩擦力对预应力损失的影响长度; μ 为预应力钢筋和孔道壁间的摩擦系数; θ 为张拉端到需计算处的孔道弯曲角度; k 为孔道壁偏差摩擦影响系数(1/m); x 为张拉端到需计算截面的孔道长度; θ_y 为影响长度内预应力钢筋的弯曲角度(rad); r_d 为张拉端到需计算处的孔道的等效曲率半径。

4 利用假定回缩量计算损失量

4.1 各参数取值与假定

预应力钢筋的回缩值应当采取实际测量得出的数据, 但是当无实测数据时, 可按表 1 取用。

表 1 预应力钢筋回缩的一般值

锚具、接缝类型	Δl 出现的形式	Δl /mm
钢制锥形锚具(用于钢丝)	锚具变形及锚塞顶压引起的预应力钢筋回缩	6
夹片式锚具(用于钢绞线)	锚具变形及夹片楔紧引起的预应力钢筋回缩	5~6(回缩自锚) 3~4(顶压锚固)
墩头锚具	锚具变形及缝隙压密引起的预应力钢筋回缩	1
螺杆、螺母式锚具		1
每块后加垫板或构件各种接缝	缝隙压密引起的预应力钢筋回缩或放松	1

表 1 中实测预应力钢筋有效长度为 $l=10.5$ m, 锚具变形及锚塞顶压引起的预应力钢筋回缩 $\sum \Delta l = 6$ mm, 在此基础上进行预应力损失的计算。

由于采用的是金属波纹管, 故 $k=0.0015$ (1/m), 预应力钢筋是光面钢绞线, 所以 $\mu=0.23$ 。另外根据梁体设计图纸, 得到 $r_d=5$ m, $E_p=2.1 \times 10^{11}$ Pa。

对于张拉控制应力 σ_0 的限值参照表 2。

表 2 张拉控制应力限值

钢筋类别	限值
钢丝、钢绞线	$0.75 f_{pk}$
热处理钢筋	$0.65 f_{pk}$
冷拉热轧钢筋	$0.90 f_{pk}$

表2中: f_{pk} 为预应力钢筋的抗拉强度标准值, $f_{pk} = 1.8 \times 10^9$ Pa,所以可取 $\sigma_0 = 0.75 f_{pk} = 1.35 \times 10^9$ Pa。
以上各参数值汇总如表3所示。

表3 参数取值汇总

参数名称	参数符号	单位	参数值
预应力钢筋的总长度	l	m	10.5
预应力筋的回缩总量	$\sum \Delta l$	mm	6
孔道壁偏差摩擦影响系数	k	1/m	0.001 5
摩擦系数	μ		0.23
等效曲率半径	r_d	m	5
预应力钢筋的杨氏弹性模量	E_p	Pa	2.1×10^{11}
张拉控制应力	σ_0	Pa	1.35×10^9

4.2 影响长度的计算

将表3中的参数值代入式(7),计算得:

$$l_y = \frac{E_p \sum \Delta l}{\sigma_0 \left(\frac{\mu}{r_d} + k \right)} = \frac{2.1 \times 10^{11} \times 0.006}{1.35 \times 10^9 \times \left(\frac{0.23}{5} + 0.001 5 \right)} = 4.433 \text{ m}$$

4.3 预应力损失的计算

将表3中的参数值代入式(8),得:

$$\sigma_1 = 2 \sigma_0 \times \frac{E_p \sum \Delta l}{\sigma_0 \left(\frac{\mu}{r_d} + k \right)} \times \left(\frac{\mu}{r_d} + k \right) \times \left[1 - \frac{x}{\frac{E_p \sum \Delta l}{\sigma_0 \left(\frac{\mu}{r_d} + k \right)}} \right] = (5.685 - 1.28x) \times 10^8 \text{ Pa}$$

$(0 \leq x \leq 4.433 \text{ m})$

根据公式计算到张拉端每隔0.2 m的位置上预应力筋中的预应力值,结果如表4所示。

5 有限元模拟

5.1 模型建立

为了验证公式计算的结果,利用Abaqus有限元软件对上文中假定的情况进行了建模。模型梁为高1 m、长5 m、宽0.2 m的C40混凝土梁,预应力用波纹管采用金属的,波纹管走向采用半径为5 m的圆弧形,波纹管半径为4 cm,预应力钢筋束采用 $\phi 30$ mm钢筋代替。

表4 理论公式计算预应力值随距离的变化情况

距张拉端 距离/m	预应力值/ ($\times 10^8$ Pa)		距张拉端 距离/m	预应力值/ ($\times 10^8$ Pa)	
	损失前	损失后		损失前	损失后
0.0	13.500	7.815	2.6	11.836	9.479
0.2	13.372	7.943	2.8	11.708	9.607
0.4	13.244	8.071	3.0	11.580	9.735
0.6	13.116	8.199	3.2	11.452	9.863
0.8	12.988	8.327	3.4	11.324	9.991
1.0	12.860	8.455	3.6	11.196	10.119
1.2	12.732	8.583	3.8	11.068	10.247
1.4	12.604	8.711	4.0	10.940	10.375
1.6	12.476	8.839	4.2	10.812	10.503
1.8	12.348	8.967	4.4	10.697	10.631
2.0	12.220	9.095	4.6	10.675	10.675
2.2	12.092	9.223	4.8	10.675	10.675
2.4	11.964	9.351	5.0	10.675	10.675

在模型中设置钢筋和混凝土为灌浆之前的上部界面全接触,钢筋弹性模量为 2.1×10^{11} Pa,泊松比为0.3,密度为 7.8×10^3 kg/m³;混凝土弹性模量为 3.25×10^{10} Pa,泊松比为0.2,密度为 2.4×10^3 kg/m³。

加载分两步,首先在一端加载 $\sigma_0 = 1.35 \times 10^9$ Pa的均布压强,待其稳定后,将其换成 $\sigma_0 - \sigma_{1\max} = 7.815 \times 10^8$ Pa的均布压强。如此,只要端部的回缩量以及预应力筋内部的应力值和理论公式法计算所得应力值接近,则可以认为两种方法所得结果较为一致。

5.2 结果输出

经过有限元仿真模拟,得到了在预应力变化前后预应力钢筋中的应力分布数据,该文从张拉端开始每隔0.2 m采集一个数据,如表5所示。

将表5数据绘制成图4,结合表4,比较理论公式法与有限元方法计算结果的差别。

5.3 结果对比分析

由理论公式计算结果(表4)可知,最大预应力损失在张拉端,损失值为 5.685×10^8 Pa,影响长度为4.43 m,超过影响长度之后预应力筋的预应力稳定值为 10.675×10^8 Pa。另外可以看出由于文中公式的假定条件,预应力损失随影响位置的变化成线性变化。

由有限元模拟结果(表5)可知:最大预应力损失在张拉端,损失值为 5.685×10^8 Pa,影响长度为4.37 m,超过4.37 m后的预应力值为 10.701×10^8 Pa。另外可以看出:有限元模拟预应力损失随影响位置的变化呈现一定弧度的曲线变化。

表 5 有限元模型计算预应力值随距离的变化情况

距张拉端			距张拉端		
距离/m	预应力值/($\times 10^8$ Pa)		距离/m	预应力值/($\times 10^8$ Pa)	
	损失前	损失后		损失前	损失后
0.0	13.500	7.815	2.6	11.137 641 97	10.249 072 47
0.2	13.245 592 21	8.077 130 882	2.8	11.040 724 72	10.348 931 86
0.4	13.003 299 08	8.326 779 34	3.0	10.955 922 12	10.436 308 82
0.6	12.773 120 61	8.563 945 376	3.2	10.883 234 18	10.511 203 35
0.8	12.555 056 79	8.788 628 989	3.4	10.822 660 90	10.573 615 47
1.0	12.349 107 63	9.000 830 178	3.6	10.774 202 27	10.623 545 16
1.2	12.155 273 12	9.200 548 945	3.8	10.737 858 30	10.660 992 43
1.4	11.973 553 27	9.387 785 289	4.0	10.713 628 99	10.685 957 27
1.6	11.803 948 08	9.562 539 21	4.2	10.701 514 33	10.701 302 51
1.8	11.646 457 54	9.724 810 708	4.4	10.701	10.701
2.0	11.501 081 67	9.874 599 784	4.6	10.701	10.701
2.2	11.367 820 44	10.011 906 44	4.8	10.701	10.701
2.4	11.246 673 88	10.136 730 67	5.0	10.701	10.701

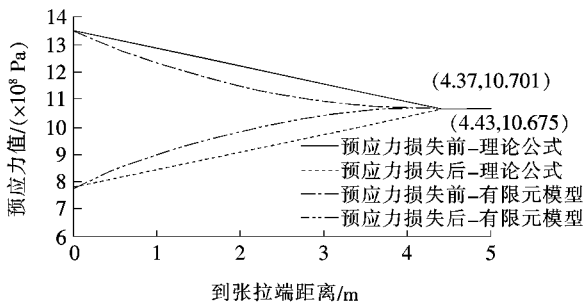


图 4 理论公式法与有限元模型法结果对比图

从图 4 可以看出,有限元模拟法中得到的张拉端预应力值与公式法得到的张拉端预应力值大小一致。有限元模拟得到的影响长度外的预应力值为 10.701×10^8 Pa,这与公式计算得到的结果(10.675×10^8 Pa)基本相同,表明用文中给出的公式法可以准确计算出影响长度以外的预应力实际值。从而可得出结论:有限元模拟法与公式计算法计算得到的数据吻合。

有限元模拟得到的影响长度为 4.37 m,这比公式计算得到的值 4.43 m 要小一些。考虑产生的原因,主要是因为模拟过程中没有进行假设所以更接近实际情况。公式计算中假设应力损失按线性递减,从图 4 可以看出有限元模型中的应力损失一开始的速率比较快,后来慢慢递减,故总体的递减趋势要高于公式计算结果,这是其影响长度稍小的主要原因。

为了更加直观地观察公式计算法和有限元模型法

计算得到的预应力损失的差别情况,绘制如图 5 所示的模型法和公式计算的预应力损失差值随张拉端距离的变化情况。

从图 5 可以看出:两种方法计算的预应力损失差值先增大后减小,其中差值最大的位置距离张拉端 2.2 m,此处的预应力差值为 1.513×10^8 Pa,也就是说,用公式法计算得到的预应力损失值在距张拉端 2.2 m 处最不准确,损失误差值与控制预拉应力的比值为 $1.513 \times 10^8 \text{ Pa} \div 1.35 \times 10^9 \text{ Pa} \approx 11.2\%$ 。

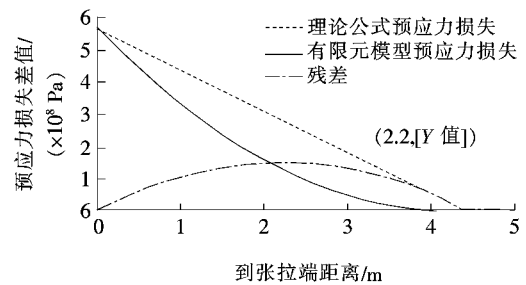


图 5 理论公式计算与有限元模型计算预应力损失差值随距离变化图

6 结论

利用理论公式的数值计算法和有限元模拟法两种方法,对同一预应力钢筋混凝土梁进行了预应力钢束回缩产生的预应力损失研究,通过公式计算法和有限

元仿真模拟的结果对比分析,得出以下结论:

(1) 有限元模拟方法与理论公式计算法得到的预应力损失最大值均出现在张拉端,且损失量大小一致,均为 5.685×10^8 Pa。

(2) 有限元模拟方法与理论公式计算方法得到的预应力损失影响长度大小基本一致,分别为 4.37 和 4.43 m。

(3) 有限元模拟方法和理论公式计算方法得出超过预应力损失影响长度后,预应力筋预应力值趋于稳定,稳定值分别为 10.701×10^8 Pa 和 10.675×10^8 Pa,两者相差较小,结果可信。

(4) 有限元模拟方法与理论公式计算方法得到的预应力损失值进行相减,差值变化规律为,由张拉端开始到稳定点逐渐增大后变为逐渐减小,最大差值大致出现在预应力损失影响长度一半处,最大预应力损失差值与控制预拉应力之比为 11.2%,即此处理论公式计算方法得到的预应力损失量较为不准确。

综上所述,该文提供的理论公式计算法可以作为一种较为简便的预应力损失量计算方法,有利于在工程实践中应用并再次检验,比有限元模拟计算方法具有简便快捷的优势,能满足实际工程中计算预应力张拉控制值的需求。

参考文献:

- [1] L. A. Caro, J. R. Martí-Vargas, P. Serna, Prestress Losses Evaluation in Prestressed Concrete Prismatic Specimens [J]. *Engineering Structures*, 2013, 48: 704-715.
- [2] Jared C. Bymaster, Canh N. Dang, Royce W. et al. Prestress Losses in Pretensioned Concrete Beams Cast with Lightweight Self-Consolidating Concrete [J]. *Structures*, 2015, 2: 50-57.
- [3] 张元海,刘世忠.后张法预应力混凝土梁钢束预应力损失研究[J].*中国公路学报*, 2002(2).
- [4] Lan Chunguang, Zhou Zhi, Ou Jinping. Full-Scale Prestress Loss Monitoring of Damaged RC Structures Using Distributed Optical Fiber Sensing Technology [J]. *Sensors*, 2012, 12(5): 5 380-5 394.
- [5] Chunguang LAN, Zhi ZHOU, Jinping OU. Life-Cycle Monitoring for RC Structural Prestress Loss Utilizing Optical Fiber Distributed Sensors [C]. 22nd International Conference on Optical Fiber Sensors. Part three of two parts, 2012.
- [6] Barr P J, Kukay B M, Halling M W. Comparison of Prestress Losses for a Prestress Concrete Bridge Made with High-Performance Concrete [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2008, 13(5): 468-475.
- [7] Wen-Wei Wang, Jian-Guo Dai, Kent A, et al. Prestress Losses and Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Posttensioned CFRP Sheets [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2016: 207-216.
- [8] 罗国宝.基于光纤光栅传感技术的简支梁桥预应力损失分析及超载预警[D].吉林大学硕士学位论文, 2016.
- [9] Huynh T C, Kim J T. FOS-Based Prestress Force Monitoring and Temperature Effect Estimation in Unbonded Tendons of PSC Girders [J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2016(2): 1-14.
- [10] Zhi Zhou, Hui Zhou, Ying Huang, et al. R & D of Smart FRP-OFBG Based Steel Strand and its Application in Monitoring of Prestressing Loss for RC [C]. *Smart Sensor Phenomena, Technology, Networks, and Systems*, 2008.
- [11] Ghorbanpoor A. Magnetic-Based NDE of Steel in Prestressed and Post-Tensioned Concrete Bridges [J]. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 1998: 343-347.
- [12] 田双珠,王小明,徐满意.超声波检测残余预应力的理论探讨[J].*水道港口*, 2007(3).
- [13] 李国平.预应力混凝土结构设计原理[M].北京:人民交通出版社, 2000.
- [14] 徐超.加载历史对混凝土动态特性的影响[D].三峡大学硕士学位论文, 2012.
- [15] 胡狄,陈政清.考虑反向摩阻的后张法 PC 构件锚固损失的计算[J].*中国公路学报*, 2004(1).
- [16] 贺志勇,陈智凯,易功超,等.桥梁预应力损失和刚度变化预测方法研究[J].*中外公路*, 2015(3).