

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

黄颖, 高杰

(福建船政交通职业学院, 福州 350007)

摘要:对各国规范、规程中关于预应力损失的计算方法进行归纳总结,定性分析了各国规范中关于预应力短期损失和长期损失的不同计算方法,指出预应力损失计算方法—分项计算法的计算依据,详细的分析了各参数选择的差异;以两根模型梁为例,分别计算各国规范的预应力损失结果;最后对我国预应力损失的计算方法提出建议。

关键词:预应力混凝土;短期损失;长期损失

中图分类号:TU311.3

文献标志码:A

引言

在现阶段,确定预应力损失的方法可大致分为三类,包括“时一步”分析法、预应力长期损失综合值法和分项预应力损失法,这三种方法均可运用于先张和后张的预应力构件^[1-8]。其中,分项预应力损失法指的是在结构从施工到使用期满的各个阶段内,分别计算预应力损失的各个组成部分如弹性压缩损失和长期损失,而总的损失则等于各个组成部分的和,该方法因其原理清晰,计算简单,在各国规范中使用最广。本文定性分析了美国公路桥梁设计规范 AASHTO(1994)^[9]、欧洲混凝土协会 CEB 及国际预应力混凝土协会 FIP 混凝土结构设计规范(1990)^[10]和现行的中国公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵规范(JTGD62-2004)^[2]中关于预应力损失的计算方法,指出其计算依据及参数选择差异;并以两根模型梁为计算依据,根据各国规范分别计算了预应力损失的结果,通过对比分析为我国预应力损失的计算提出参考建议。

1 几种计算方法对比分析

目前,各国规范中对预应力损失的计算大致都分成

两大类,包括瞬时损失和长期损失^[2],其中,瞬时损失包括预应力钢筋与孔道壁之间摩擦、预应力钢筋回缩及拼接缝压密和锚具变形、预应力钢筋和张拉台座之间的温差、混凝土的弹性压缩,长期损失包括预应力松弛和混凝土的收缩与徐变。

1.1 中国公路桥涵规范(JTGD62-2004)

我国公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵规范中各项预应力损失计算公式见表 1。

预应力筋孔道的摩擦损失式中:

σ_{con} —预应力钢筋锚下的张拉控制应力(MPa)。

μ —预应力钢筋与管道壁的摩擦系数,按规范^[2]规定选用。

θ —从张拉端至计算截面曲线管道部分切线的夹角之和(rad)。

k —管道每米局部偏差对摩擦的影响系数,按规范^[2]规定选用。

x —从张拉端至计算截面的管道长度,可近似取该段管道在构件纵轴上的投影长度(m)。

锚具变形、预应力筋回缩及接缝压缩损失式中:

$\sum \Delta l$ —锚具变形、钢筋回缩和接缝压缩值之和(mm),

收稿日期:2014-06-30

基金项目:福建省交通厅交通科技项目(201336);福建省教育厅科技项目(JB12359)

作者简介:黄颖(1982-),女,福建宁德人,博士生,主要从事预应力结构动力性能与耐久性方面的研究,(E-mail)huangying6820@163.com

表1 中国公路桥涵规范(JTGD62-2004)各项预应力损失计算

张拉方式	先张法构件	后张法构件
预应力筋孔道的摩擦损失	—	$\sigma_{l1} = \sigma_{con} [1 - e^{-(\mu\theta+kx)}]$
瞬时损失	锚具变形、预应力筋回缩及接缝压缩	$\sigma_{l2} = \frac{\sum \Delta l}{l} \cdot E_p$
	温差引起的应力损失	$\sigma_{l3} = 2(t_2 - t_1)$
	混凝土弹性压缩	$\sigma_{l4} = \alpha_{EP} \sigma_{pc}$ $\sigma_{l4} = \alpha_{EP} \sum \Delta \sigma_{pc}$
长期损失	预应力钢筋松弛损失	$\sigma_{l5} = \psi \cdot \zeta \left(0.52 \frac{\sigma_{pe}}{f_{pk}} - 0.26 \right) \sigma_{pe}$
	混凝土收缩与徐变	$\sigma_{l6}(t) = \frac{0.9 [E_p \varepsilon_{cs}(t, t_0) + \alpha_{EP} \sigma_{pc} \varphi(t, t_0)]}{1 + 15\rho\rho_{ps}}$

按规范^[2]规定选用。

l —预应力筋的有效长度(mm)。

E_p —预应力筋的弹性模量(MPa)。

温差引起的应力损失式中:

t_1 —张拉钢筋时,制造场地的温度(°C)。

t_2 —混凝土加热养护时,已张拉钢筋的最高温度(°C)。

混凝土弹性压缩式中:

α_{EP} —预应力筋束与混凝土的弹性模量的比值。

$\sum \Delta \sigma_{h1}$ —在计算截面先张拉筋束处,由于后张拉各批筋束所产生的混凝土法向应力之和。

σ_{pc} —在计算截面钢筋重心处,由全部钢筋预加力产生的混凝土法向应力(MPa)。

预应力钢筋的松弛损失式中:

ψ —张拉系数,一次张拉时, $\psi = 1.0$;超张拉时, $\psi = 0.9$ 。

ζ —钢筋松弛系数,I级松弛(普通松弛), $\zeta = 1.0$;II级松弛(低松弛), $\zeta = 0.3$ 。

σ_{pe} —传力锚固时的钢筋应力,对后张法构件 $\sigma_{pe} = \sigma_{con} - \sigma_{l1} - \sigma_{l2} - \sigma_{l4}$;对先张法构件, $\sigma_{pe} = \sigma_{con} - \sigma_{l2}$ 。混凝土的收缩与徐变式中:

σ_{l6} —构件受拉区、受压区全部受力钢筋重心处由混凝土收缩、徐变引起的预应力损失值。

σ_{pc} —构件受拉区、受压区先张预应力构件放松钢筋时或后张预应力构件钢筋锚固时,在计算截面上全部受力钢筋重心处由预加应力(扣除相应阶段的应力损失)产生的混凝土法向应力,根据张拉受力情况考虑构件重力的影响。

α_{EP} —预应力钢筋弹性模量与混凝土弹性模量的比值。 ρ —构件受拉区、受压区全部纵向钢筋配筋率。

$\varepsilon_{cs}(t, t_0)$ —加载龄期为 t_0 时的混凝土徐变系数终值。

$\varphi(t, t_0)$ —自混凝土龄期 t_0 开始的收缩应变终值。

1.2 美国公路桥涵设计规范(AASHTO)

美国公路桥涵设计规范(AASHTO)中各项预应力损失计算公式见表2。

表2 美国公路桥涵设计规范(AASHTO)各项损失计算

张拉方式	先张法构件	后张法构件
摩擦损失	—	$\Delta f_{pF} = f_{pj} (1 - e^{-(Kx+\alpha x)})$
瞬时损失	锚固损失	$\Delta f_{pA} = \frac{\sum \Delta l}{l} \cdot E_p$
	混凝土弹性压缩	$\Delta f_{pES} = \frac{N-1}{2N} \frac{E_p}{E_{ci}} f_{cgp}$
长期损失	预应力钢筋的松弛损失	$\Delta f_{pR2} = 138 - 0.4\Delta f_{pES} - 0.2(\Delta f_{pSR} + \Delta f_{pCR})$ $\Delta f_{pR2} = 138 - 0.3\Delta f_{pF} - 0.4\Delta f_{pES} - 0.2(\Delta f_{pSR} + \Delta f_{pCR})$
	收缩	$\Delta f_{pSR} = (117 - 1.03H)$ $\Delta f_{pSR} = (93 - 0.85H)$
	混凝土徐变	$\Delta f_{pCR} = 12.0f_{cgp} - 7.0\Delta f_{cdp}$

预应力筋孔道的摩擦损失式中:

f_{pj} —张拉时预应力钢材中的应力(MPa)。

x —从张拉端到所考虑的任何点预应力筋的长度(mm)。

K —摇摆摩擦系数(mm^{-1})。

μ —曲率系数(1/rad)。

α —从张拉端,或如果在两端同等张拉时,从最近的张拉端到查究点,预应力筋沿途角度变化的绝对值的和(rad)。

e —自然对数底。

K 和 μ 是基于对规定的材料的试验数据,并应在合同文件中注明。在缺少这类数据时,可以使用规范^[9]中规定的 K 和 μ 范围内的值。

混凝土弹性压缩损失式中:

f_{cgp} —在最大弯矩截面处由传力时刻的预加力和构件自重产生的混凝土应力之和 (MPa)。

E_p —预应力钢材的弹性模量 (MPa)。

E_{ci} —传力时刻混凝土的弹性模量 (MPa)。

N —完全相同的力筋的束数。

预应力钢筋的松弛损失式中:

Δf_{pES} —由弹性压缩引起的损失 (MPa)。

Δf_{pSR} —由混凝土收缩引起的损失 (MPa)。

Δf_{pCR} —由弹徐变引起的损失 (MPa)。

混凝土的收缩引起的损失计算式中:

H —平均年环境相对湿度 (%)。

混凝土徐变引起的损失计算式中:

f_{cgp} —传力时预应力钢材重心处的混凝土应力 (MPa)。

Δf_{cdp} —在预应力钢材重心处由永久荷载产生的混凝土应力变化,在施加预应力时作用的荷载则除外。

Δf_{cdp} 值应在同一截面或计算 f_{cgp} 的截面处计算 (MPa)。

1.3 欧洲混凝土协会 CEB 及国际预应力混凝土委员会 FIP 规范 (CEB - FIP)

欧洲混凝土协会 CEB 及国际预应力混凝土协会 FIP 中各项预应力损失计算公式见表 3。

表 3 CEB - FIP 各项损失计算

张拉方式	先张法构件	后张法构件
摩擦损失	—	$\sigma_{po}(x) = \sigma_{po,max} e^{-u(\alpha+kx)}$
锚固损失	—	$\frac{\Delta A_{ps} E_s}{l^2} L$
温差引起的应力损失	$\Delta\sigma = 0.9 E_s \alpha_p (T_{max} - T_0)$	—
瞬时损失		
混凝土弹性压缩	$A_{ps} \frac{\frac{p_{jack}}{A} \left\{ 1 + \frac{Ae^2}{I} \right\} \frac{E_s}{E_{cm}(t)}}{\left[1 + \left\{ 1 + \frac{Ae^2}{I} \right\} \frac{E_s}{E_{cm}(t)} \frac{A_{ps}}{A} \right]}$	$\frac{(N-1)}{2N} \frac{E_s}{E_{cm}(t)} \Delta\sigma_c A_{ps}$
预应力钢筋的松弛损失	—	$\Delta\sigma_{pr} A_{ps}$
长期损失		
收缩	—	$\varepsilon_{cs} E_s A_{ps}$
混凝土徐变	—	$\left[\frac{p_{jack}}{A} \left\{ 1 + \frac{Ae^2}{I} \right\} - \sigma_{c,external} \right] \frac{E_s}{E_{cm}} \varphi A_{ps}$

预应力筋孔道的摩擦损失式中:

P_1 —张拉时预应力钢材中的应力 (MPa)。

x —从张拉端到所考虑的任何点预应力筋的长度 (mm)。

K —摇摆系数 (mm^{-1}) ($0.005 < K < 0.01$)。

μ —摩擦系数 (1/rad)。

θ —从张拉端,或如果在两端同等张拉时,从最近的张拉端到查究点,预应力筋沿途角度变化的绝对值的和 (rad)。

e ——自然对数底。

锚固损失式中:

ΔA_{ps} —预应力钢筋的截面面积。

E_s —预应力钢筋的弹性模量。

l —锚具回缩量 (mm)。

L —梁计算长度 (mm)。

混凝土弹性压缩损失式中:

p_{jack} —总张拉应力 (MPa)。

A_{ps} —预应力钢筋的截面面积 (mm^2)。

A —梁截面的截面面积 (mm^2)。

e —预应力钢筋布置偏心距 (mm)。

I —梁截面惯性矩 (mm^4)。

E_s —预应力钢筋的弹性模量 (MPa)。

$E_{cm}(t)$ —混凝土传力 t 时刻的割线模量 (MPa)。

$\Delta\sigma_c$ —混凝土受压应力 (MPa)。

N —完全相同的力筋的束数。

预应力钢筋的松弛损失式中:

$\Delta\sigma_{pr}$ —预应力钢筋松弛应力 (MPa)。

混凝土的收缩引起的损失计算式中:

ε_{cs} —混凝土收缩应变 (%)。

混凝土徐变引起的损失计算式中:

$\sigma_{c,external}$ —由准永久荷载产生的应力 (MPa)。

φ —徐变系数。

2 几种方法中计算参数的比较

2.1 瞬时损失

从三种规范中瞬时损失的计算公式可以看出:

摩擦损失:三种规范中对摩擦损失的计算都类似,只是根据各国材料不同情况,参数的取值略有不同。

锚固损失:中国规范和美国规范相似,中国规范中对锚具变形、钢筋回缩和接缝压缩值有详细规定,而美国规范中关于此项参数取值建议以厂家推荐为主,没有做具体规定。欧洲规范中引入了预应力钢筋截面面积作为参数,这点与我国规范和美国规范不同。

温差引起的应力损失:美国规范中没有此项,我国规范中此项损失计算相对简单,只与前后温差有关,而欧洲规范中此项的计算不仅与前后的温差有关,也与预应力钢筋弹性模量和钢筋的线膨胀系数有关。

混凝土弹性压缩:中国规范中对于此项损失的计算,后张法只是简单的将张拉各批筋束所产生的混凝土法向应力叠加,看不出后张和先张的区别;而美国 and 欧洲规范考虑了预应力张拉根数,并且从计算公式可以看出,后张法梁的弹性压缩损失最多只有先张梁的50%。

2.2 长期损失

中国规范中关于预应力长期损失的计算相对比美国规范和欧洲规范,比较复杂与繁琐,预应力钢筋的松弛损失计算公式中,中国规范引入了张拉系数和钢筋松

弛系数,就是将预应力长期损失与张拉方式及钢筋松弛等级相联系,欧洲规范中利用生产厂家提供的1000小时松弛损失值与总损失值的比值得到^[11],美国规范中考虑混凝土弹性压缩和混凝土收缩徐变的影响;在计算混凝土收缩徐变时,各国根据本国实际情况提出计算公式,中国规范与欧洲规范考虑因素基本一致,包括环境湿度、加载龄期和配筋率等,美国规范中计算相对简单,仅由传力时预应力钢材重心处混凝土的应力及在永久荷载作用下混凝土应力变化计算徐变。

3 几种方法计算结果比较

3.1 算例介绍

先张法为跨度为4m的预应力混凝土圆孔板,换算为I形截面,具体尺寸见表4,主梁采用C40混凝土,采用预应力消除应力钢丝,预应力钢丝一次张拉,锚具变形和钢丝内缩值为5mm,标准蒸汽养护,受张拉钢丝和台座之间的温差 $\Delta t = 20\text{ }^\circ\text{C}$ 。后张法为跨径为25m的预应力混凝土T梁,具体尺寸见表5,主梁采用C40混凝土,后张法采用抗拉强度为1860MPa的高强度钢绞线,曲线布筋,以 12° 弯起,非预应力钢筋采用二级钢筋,主梁所处的大气环境的相对湿度为55%,计算位置取跨中截面。

3.2 计算结果对比

根据三国规范中预应力损失的计算方法进行计算,计算结果见表4、表5。

表4 先张梁各预应力损失计算方法的计算结果

h_f/b_f /(mm/mm)	h'_f/b'_f /(mm/mm)	h/b /(mm/mm)	计算 跨度 /m	A_p /mm ²	I_0 /mm ⁴	预应力瞬时损失 计算值/(N/mm ²)			预应力长期损失 计算值/(N/mm ²)		
						中国 规范	美国 规范	欧洲 规范	中国 规范	美国 规范	欧洲 规范
26/630	26/600	130/190	24	150.8 (12 ϕ^4)	1.028×10^8	145.6	154.7	131.1	219.4	228.4	217.3

表5 后张梁各预应力损失计算方法的计算结果

b/h /(mm/mm)	h'_f/b'_f /(mm/mm)	计算 跨度 /(m)	恒载 标准值 /(Nm)	活载 标准值 /(Nm)	A_p /mm ²	A_s /mm ²	预应力瞬时损失 计算值/(N/mm ²)			预应力长期损失 计算值/(N/mm ²)		
							中国 规范	美国 规范	欧洲 规范	中国 规范	美国 规范	欧洲 规范
400/1750	125/1600	24	15710	4400	2764 (4 ϕ^2 12.70)	2450	169.1	172.0	156.6	279.3	290.8	217.3

3.3 计算结果分析

根据三国规范对先张法和后张法梁分别计算,得到预应力总损失值(表6)。由表6可知,欧洲规范无论先张梁还是后张梁其计算值最小,说明其安全保证率最低,美国规范计算值偏大,而我国规范相对较保守。

表6 预应力总损失计算方法的计算结果(N/mm²)

先张梁预应力总损失			后张梁预应力总损失		
中国规范	美国规范	欧洲规范	中国规范	美国规范	欧洲规范
365.0	383.1	348.4	448.4	462.8	373.9

4 对规范中预应力损失计算方法的改进建议

依据本文的分析,我国规范中预应力损失计算方法可在以下几个方面做进一步的探讨:

(1)从规范中对预应力损失的计算公式可以看出,计算繁杂,不便于工程实际应用,是否能给出各参数合理取值方法,或者可以建立参数查询表格,通过查表的形式获得各个参数值,以此为基础简化计算公式。

(2)以“时间依存法”为基础,编制实用的计算程

序,简化预应力长期损失的计算,为大型预应力混凝土结构工作状态的长期监测提供依据。

(3) 建立以材料特征、截面形式及跨度、荷载形式、约束条件和配筋条件为自变量的“主动选择型”计算式,替代现有的以混凝土应力为变量的“被动校核型”计算公式。

(4) 建议可以通过试验及大量工程实际数据,建立一个预应力损失计算综合公式,取代分项计算法,简化计算步骤,便于工程实际使用。

参考文献:

- [1] Maher K, Tadros A, Nabil A, et al. Prestress losses in Pretensioned high strength concrete bridge girders [R]. Washington D.C: NCHRP report, 2003.
- [2] JTGD62-2004, 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
- [3] 陈博, 刘德坤, 王科. 预应力混凝土 T 梁的预应力损失[J]. 公路工程, 2012, 37(3): 241-244.
- [4] 王文炜, 戴建国, 张磊. 后张预应力碳纤维布加固钢筋混凝土梁预应力损失试验及计算方法研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(11): 88-94.
- [5] Wang Wenwei, Dai Jianguo, Harries K A, et al. Prestress losses and flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with posttensioned CFRP sheets[J]. Journal of Composites for Construction, 2012, 16(2): 207-216.
- [6] Harry A. Cole. Direct solution for elastic prestress loss in pretensioned concrete girders[J]. Practice Periodical on Structural Design and Construction, 2000, 5(1): 27-31.
- [7] Kim Y J, Green M F, Wight R G. Bond and short-term prestress losses of prestressed composites for strengthening PC beams with integrated anchorage[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2010, 29(9): 1277-1294.
- [8] 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, 39(5): 78-84.
- [9] AASHTO, 美国公路桥梁设计规范[S].
- [10] Comite Euro-International du Beton. CEB-FIP Model Code 1990: Design code[M]. London: Thomas Telford, 1993.
- [11] 于德湖, 郑文忠, 杜晓鸣. 预应力混凝土结构长期损失若干计算方法的分析比较[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 2000, 33(2): 29-33.

Analysis and Comparison of the Computing Methods of the Losses for Prestressed Concrete Structure in National Main Codes

HUANG Ying, GAO Jie

(Fujian Chuanzheng Communications College, Fuzhou 350007, China)

Abstract: The computing methods of prestressed losses in several main codes and rules in the world are summarized and their different methods to calculate the short-term losses and long-term losses for prestress are analysed qualitatively. The basis of the calculation method of prestress-Sub-item calculation method is pointed out, and the differences of the parameters used in these methods are analysed in detail. Then, as example, two prestressed concrete beams are calculated to compare the results of different methods. At last, some recommendations for the calculation of prestressed stress losses in our country are given.

Key words: prestressed concrete; short-term losses; long-term losses