



# 中俄规范混凝土结构 钢筋预应力损失计算的对比分析

魏志民<sup>1</sup>, 张露露<sup>2</sup>, 文 鹏<sup>1</sup>

(1. 湖北省交通规划设计院股份有限公司, 湖北 武汉 430051; 2. 华设设计集团股份有限公司, 江苏 南京 210014)

**摘要:** 从混凝土材料、预应力钢筋材料、张拉控制应力限值系数和预应力损失计算等方面对比分析中、俄规范。以后张法空心板作为算例, 得出如下结论: 1) 中俄规范在混凝土和钢筋材料的分类体系、预应力损失影响因素的考虑和部分预应力损失值计算上基本一致, 但两者在细分规则、材料范围、分级数量考虑不同。2) 在个别预应力损失计算中二者存在差别, 总体来说中国规范计算结果更大。

**关键词:** 水运混凝土结构; 预应力损失; 俄国规范; 结构分析

中图分类号: U 656

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)07-0045-04

## Comparative analysis on calculation of prestress loss of reinforced concrete structure in Chinese and Russian codes

WEI Zhi-min<sup>1</sup>, ZHANG Lu-lu<sup>2</sup>, WEN Peng<sup>1</sup>

(1. Hubei Provincial Communications Planning and Design Institute Co., Ltd., Wuhan 430051, China;

2. China Design Group Co., Ltd., Nanjing 210014, China)

**Abstract:** In this paper, the Chinese and Russian codes are compared and analyzed from aspects such as concrete materials, prestressed reinforcement materials, limit coefficients of control stress for prestressing, and prestress loss calculation. Taking a post-tensioned hollow slab as an example, we can draw the following conclusions: 1) The Chinese and Russian codes are consistent in the classification system of concrete and reinforcement materials, the consideration of influencing factors in the prestress loss, and the calculation of some prestress loss values, while the two differ in the subdivision rules, material range, and classification quantity consideration. 2) There are differences between the two in the calculation of individual prestress loss, and in general, the calculation results are greater under the Chinese code.

**Keywords:** concrete structures of port and waterway engineering; prestress loss; Russian code; structural analysis

俄罗斯港口有 96 个, 其中主要港口有 10 个, 考虑到俄罗斯的不断发

展, 中国参与俄罗斯港口建设拥有潜在机会, 对两国设计规范进行对比分析是十分必要的。

经过文献调查, 针对俄罗斯工业技术规范的中文研究文献较少, 其中针对混凝土结构方面系列文献[1-8]对俄罗斯早期混凝土规范进行翻译介绍, 另有文献[9-10]针对特定混凝土材料、钢筋

材料以及荷载等进行研究分析, 但均未涉及预应力损失计算部分, 故本文以此为对象进行分析研究, 为类似设计提供参考。

### 1 引用规范

笔者采用的中国规范为 JTS 151—2011《水运工程混凝土结构设计规范》<sup>[11]</sup>(简称《中规》); 采用的俄罗斯规范为《СП 63.13330.2018 Бетонные и

收稿日期: 2021-11-19

作者简介: 魏志民(1989—), 男, 工程师, 从事港口与航道工程设计。

железобетонные конструкции. Основные положения. СНиП 52-01-2003 (с Изменением N 1)》<sup>[12]</sup> (Concrete and reinforced concrete structures. General provisions. With Amendment No. 1, 简称《俄规》), 该规范为俄罗斯建设部发布的现行规范(2020 年 5 月 23 日修正生效)。两本规范的整体结构有许多相似之处, 其预应力损失计算的体系基本类似, 具有很高的可比性。

2 规范对比分析

2.1 材料对比分析

2.1.1 混凝土材料

《中规》《俄规》均采用立方体抗压强度标准值对混凝土强度进行分级,《中规》等级包括 C15~C80、《俄规》等级包括 B1.5~B100, 后者等级范围更广。在耐久性方面《中规》采用抗冻等级(F100~F350)、抗渗等级(P4~P12)进行分类,《俄规》采用抗拉强度等级(B<sub>1</sub>0.8~B<sub>4</sub>4.8)、抗冻性(F15~F100、F<sub>1</sub>25~F<sub>1</sub>1000、F<sub>2</sub>100~F<sub>2</sub>500)、防水等级(W2~W20)、平均密度(D500~D2000)、自应力等级(S<sub>p</sub>0.6~S<sub>p</sub>4)进行分类, 后者对耐久性方面的分类更多、分级更细、范围更广。

2.1.2 预应力钢筋材料

《中规》按照钢绞线(直径 5~18 mm, 强度标准值 1 470~1 960 MPa)、消除应力钢丝(光圆螺旋肋直径 4~12 mm, 强度标准值 1 470~1 860 MPa)、钢棒(直径 6~16 mm, 强度标准值 1 080~1 570 MPa)和螺纹钢(直径 18~50 mm, 强度标准值 980~

1 230 MPa)进行分类,《俄规》按照热轧和冷拉钢筋(A600、A800、A1 000, 直径 6~40 mm, 强度标准值 600~1 000 MPa)、冷轧钢筋(B<sub>p</sub>1 200~B<sub>p</sub>1 600, 直径 3~8 mm, 强度标准值 1 200~1 600 MPa)和钢绞线(K1 400~K1900, 直径 6.2~15.2 mm, 强度标准值 1 400~1 920 MPa)进行分类。《中规》分类更细, 且公称直径仅给出有限的种类进行选择, 每种公称直径还对应多种强度种类进行组合, 更有利于设计的标准化; 而《俄规》的热轧、冷拉钢筋等级范围更大, 每种等级中多是给出一个直径范围和强度定值进行选择, 分级思路更清晰简练、更便于设计中对钢筋的选型。

另外两个规范中对预应力钢筋强度标准值与设计值之间的比值关系取值也不相同。《中规》中对于钢绞线、消除应力钢丝和钢棒, 该值为 1.412,《俄规》中该值为 1.15 或 1.20, 对于抗拉强度标准值相当的预应力钢筋,《俄规》中的抗拉强度设计值都较大。

在预应力钢筋张拉限值规定方面,《中规》限值不大于《俄规》, 见表 1。

表 1 中俄规范张拉控制应力限值系数对比

钢筋	《中规》		《俄规》
	先张	后张	
消除应力钢丝、钢绞线	0.75	0.75	0.8
钢棒、螺纹钢	0.70	0.65	0.8
冷拉热轧钢筋	0.90	-	0.9

2.2 预应力损失计算对比分析

两本规范考虑的预应力损失值影响因素基本一致, 见表 2、3。

表 2 中俄规范先张法预应力损失值对比

公式	S1	S2	S3	S4
《中规》 计算公式	$\sigma_n = \frac{a}{l} E_s$	$\sigma_{l2}$ , 在转向装置处的摩擦损失值按实际情况确定	$\sigma_{l3} = 2\Delta t$	钢棒、螺纹钢: 一次张拉 $0.05 \sigma_{con}$ 超张拉 $0.035 \sigma_{con}$ 消除应力钢丝、钢绞线: 普通松弛 $\sigma_{l4} = 0.4 \Psi (\frac{\sigma_{con}}{f_{ptk}} - 0.5) \sigma_{con}$ 此处, 一次张拉 $\Psi = 1$ , 超张拉 $\Psi = 0$ 低松弛, 当 $\sigma_{con} \leq 0.7 f_{ptk}$ 时, $\sigma_{l4} = 0.125 (\frac{\sigma_{con}}{f_{ptk}} - 0.5) \sigma_{con}$ 当 $0.7 f_{ptk} < \sigma_{con} \leq 0.8 f_{ptk}$ 时, $\sigma_{l4} = 0.2 (\frac{\sigma_{con}}{f_{ptk}} - 0.575) \sigma_{con}$

续表2

公式	S1	S2	S3	S4
《俄规》 计算公式	$\Delta\sigma_{sp4}=\frac{\Delta l}{l}\cdot E_s$	-	$\Delta\sigma_{sp2}=1.25\Delta t$	对于 A600-A1000: 机械法: $\Delta\sigma_{sp1}=0.1\sigma_{sp}-20$ 电热法: $\Delta\sigma_{sp1}=0.03\sigma_{sp}$ 对于 B <sub>p</sub> 1200~B <sub>p</sub> 1600 以及机械张拉 K1400、K1500: $\Delta\sigma_{sp1}=(0.22\frac{\sigma_{sp}}{R_{s,n}}-0.1)\sigma_{sp}$ 对于稳定化处理的 K1400~K1900: $\Delta\sigma_{sp1}=0.15r\sigma_{sp}$ , $r$ 为松弛指数
公式	S5	S6	S7	
《中规》 计算公式	$\text{受拉区: } \sigma_{is}=\frac{A+220\alpha_c\frac{\sigma_{pc}}{f_{cu}'}}{1+15\rho}$ $\text{受压区: } \sigma'_{is}=\frac{A+220\alpha_c\frac{\sigma_{pc}'}{f_{cu}'}}{1+15\rho'}$	-	-	
《俄规》 计算公式	$\Delta\sigma_{sp5}=\varepsilon_{b,sh}E_s$ $\Delta\sigma_{sp6}=\frac{0.8\alpha\varphi_{b,cr}\sigma_{bpj}}{1+\alpha\mu_{spj}\left(1+\frac{y_{sj}^2\cdot A_{red}}{I_{red}}\right)\left(1+0.8\varphi_{b,cr}\right)}$	-	$\Delta\sigma_{sp3}=\frac{n-1}{2n}\cdot\frac{\Delta l}{l}\cdot E_s$ 在缺乏形式设计和制造技术数据的情况下, 允许取 $\Delta\sigma_{sp3}=30\text{ MPa}$	

表 3 中俄规范后张法预应力损失值对比

公式	S1	S2	S3	
《中规》计算公式	$\sigma_{i1}$ ，详见规范附录 D	$\sigma_{i2}=\sigma_{con}\left(1-\frac{1}{e^{\kappa\chi+\mu\theta}}\right)$ $\kappa\chi+\mu\theta\leqslant 0.2$ 时, $\sigma_{i2}=(\kappa\chi+\mu\theta)\sigma_{con}$	—	
《俄规》计算公式	$\Delta\sigma_{sp4}$ ，同先张法	$\Delta\sigma_{sp7}=\sigma_{sp}\left[1-\frac{1}{e^{\delta(\omega'x+\theta)}}\right]$	—	
公式	S4	S5	S6	S7
《中规》计算公式	$\sigma_{i4}$ ，同先张法	$\sigma_{i5}$ 、 $\sigma'_{i5}$ ，同先张法。	$\sigma_{i6}=30\text{ MPa}$	—
《俄规》计算公式	$\Delta\sigma_{sp1}$ ，同先张法	$\Delta\sigma_{sp5}=0.75\,\varepsilon_{b,sh}\cdot E_s$ $\Delta\sigma_{sp6}$ ，同先张法	—	—

注: 各编号对应的引起预应力损失因素为: S1 为张拉端锚具变形和钢筋内缩; S2 为预应力钢筋的摩擦; S3 为混凝土加热养护时, 受张拉的钢筋与承受拉力的设备之间的温差; S4 为预应力钢筋的应力松弛; S5 为混凝土收缩和徐变; S6 为用螺旋式预应力钢筋作配筋的环形构件, 当构件直径  $d\leqslant 3\text{ m}$  时, 由于混凝土的局部挤压; S7 为非同步张拉下钢模底座变形<sup>[13]</sup>。

表 2、3 中主要变量:  $a$ 、 $\Delta l$  为张拉锚具变形和钢筋内缩值;  $l$  为张拉端至锚固端之间的距离;  $E_s$  为钢筋弹性模量;  $\Delta t$  为混凝土加热养护时, 受张拉的钢筋与承受拉力的设备之间的温差;  $\sigma_{con}$  为预应力钢筋的张拉控制应力;  $f_{pk}$  为预应力钢筋强度标准值。其他变量名解释见规范。

根据表 2、3 可得到如下结论: 1) 对于 S1(先张法)、S2、S3 的计算, 两本规范的计算公式基本一致, 所取变量参数相同, 仅在相应系数取值上不同, 但《俄规》没有区分先张法和后张法的预

应力损失值计算; 2) 对于 S4 的计算, 两本规范采用的公式模型类似, 同时也都按照不同的钢筋材料进行第一级分类。但在第二级分类时, 《中规》按照普通松弛、低松弛的张拉工艺进行分类, 《俄规》则按照不同的预应力施加方法进行分类, 更注重原理; 3) 对于 S5 的计算, 两者都选取了配筋率和混凝土应力指标, 《中规》另外引入常量参数、修正参数和混凝土强度参数, 《俄规》另外引入钢筋弹性模量、混凝土弹性模量、混凝土收缩系数、徐变系数等参数, 同时《俄规》还将收缩预应力损

失和徐变预应力损失分开考虑。《中规》参数更少、操作性更强,《俄规》参数更多,但对影响因素的分析更细致,更有利于设计人员对预应力损失理解的全面性;4)S6 仅《中规》考虑, S7 仅《俄规》考虑。

3 工程实例分析

3.1 工程概况

长江中游某散货码头引桥(宽 9 m、排架间距

22.5 m)考虑 55 t 汽车行驶,设计采用后张法预应力空心板(单块板高 1.1 m、宽 1.5 m、弯矩计算长度 22.05 m)。空心板采用 C50 混凝土,第 1、2 层左右肋板内均各布置 9 根  $\phi 15.2$  mm 低松弛钢绞线,张拉控制应力为  $0.62f_{pk}=1\ 153\text{ MPa}$ 。

3.2 计算结果分析

经过计算,不同规范下的各项预应力损失最大值见表 4。

表 4 预应力损失对比

采用规范	钢束编号	预应力损失值计算/MPa							合计
		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	
《中规》	N1	170.9	65.3	—	17.3	55.1	—	—	308.6
	N2	134.2	28.4	—	17.3	56.2	—	—	236.1
《俄规》	N1	50.2	27.2	—	0	43.88+37.3	—	—	158.58
	N2	50.3	25.6	—	0	43.88+41.3	—	—	161.08

4 结论

1)中俄规范在混凝土和钢筋材料的分类体系、预应力损失影响因素的考虑和部分预应力损失值计算上基本具有一致性。

2)对于混凝土材料,《俄规》混凝土强度等级范围更广,在耐久性方面分类更多、分级更细、范围更广。

3)对于钢筋材料,《中规》分类更细,更有利于设计的标准化;而《俄规》的热轧、冷拉钢筋等级范围更大,分级思路更清晰简练、更便于设计中对钢筋的选型。对于抗拉强度标准值相当的预应力钢筋,《俄规》中的抗拉强度设计值都较大。

4)在预应力钢筋张拉限值规定方面,《中规》限值不大于《俄规》。

5)对于预应力损失值计算,中俄规范考虑的预应力损失值影响因素基本一致,仅在具体计算公式上存在异同。从实例分析结果可见,在后张法空心板计算预应力损失中,《中规》计算结果较大,其中 S1 的差距最大。根据相关文献研究<sup>[14]</sup>,《中规》S1 先张法计算公式及《俄规》S1 先张法、后张法计算公式是针对直线预应力筋计算的预应力等比例折减,而后张法曲线预应力筋还需考虑曲线孔道上的反摩擦力,即预应力筋由于孔道不

直、孔道尺寸偏差、孔壁粗糙、预应力筋不直、预应力筋表面粗糙等因素与孔壁的某些部位接触而产生额外的预应力损失,显然《俄规》没有考虑上述因素欠妥,而《中规》的考虑是合理的。

6)鉴于本文所选规范发布时间的不同,建议《中规》在下一步修订时针对钢材抗拉强度设计值、张拉控制应力限值系数进行进一步研究,同时在预应力损失计算中对 S5 进行深化研究,并探索增加 S7 的合理性。

参考文献:

[1] 朱海涛.俄罗斯建筑规范介绍(Ⅰ):水工建筑物.基本设计原则[J].港工技术与管理,1999(4):26-31.

[2] 朱海涛.俄罗斯建筑规范介绍(Ⅱ):水工建筑物.基本设计原则[J].港工技术与管理,1999(5):26-31.

[3] 朱海涛.俄罗斯建筑规范介绍(Ⅳ):混凝土与钢筋混凝土结构[J].港工技术与管理,2000(1):32-40.

[4] 朱海涛.俄罗斯建筑规范介绍(Ⅴ):混凝土与钢筋混凝土结构[J].港工技术与管理,2000(2):35-43.

[5] 朱海涛.俄罗斯建筑规范介绍(Ⅵ):混凝土与钢筋混凝土结构[J].港工技术与管理,2000(3):31-40.

[6] 朱海涛.俄罗斯建筑规范介绍(Ⅶ):混凝土与钢筋混凝土结构[J].港工技术与管理,2000(4):32-41.