

软基上水闸截面积和地基对 预应力效果的影响规律

陈 坚¹, 于 宙², 王 丽¹, 周 丹³, 强 晟²

(1. 淮安市水利勘测设计研究院有限公司, 江苏 淮安 223005; 2. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098;
3. 南京瑞迪建设科技有限公司, 江苏 南京 210029)

摘要:水闸闸墩是一种薄壁混凝土结构,容易在施工期温度应力的作用下产生裂缝,预应力技术是一种降低闸墩内部拉应力的有效方法。为研究软基上水闸截面积对预应力作用效果的影响规律,运用有限单元法得到了预应力张拉荷载作用在不同截面积的水闸结构上时,在闸墩内部产生的拉应力降幅,并拟合出两者间的定量关系。通过基本力学原理,推导出了两者间的解析公式。在仿真计算值与解析值的对比分析中,发现地基对预应力效果有一定的消弱效果,因此针对具体消弱效果进行了研究。结果显示,地基会使预应力的作用效果降低10%,而水闸的截面积和常见软基的弹模对此消弱效果的影响不大。

关键词:预应力; 混凝土防裂; 有限元计算; 软基; 水闸

中图分类号:TV66 文献标识码:B 文章编号:1007-7839(2021)01-0025-07

Influence law of cross – sectional area of sluice and foundation on prestressed effect on soft foundation

CHEN Jian¹, YU Zhou², WANG Li¹, ZHOU Dan³, QIANG Sheng²

(1. *Huaian Water Conservancy Survey and Design Research Institute Co., Ltd.*, Huaian 223005, China;
2. *College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University*, Nanjing 210098, China;
3. *Nanjing Ruidi Construction Science and Technology Co., Ltd.*, Nanjing 210029, China)

Abstract: Sluice pier is a kind of thin – wall concrete structure, which is easy to crack under the action of temperature stress during construction period. Prestressed technology is an effective method to reduce tensile stress in pier. In order to study the influence law of the cross – sectional area of sluice on prestressed effect on soft foundation, finite element method was used to obtain the decrease of tensile stress in the pier when the prestressed tension load acted on sluice structures with different cross – sectional areas, and the quantitative relationship was fitted. Through the basic mechanics principle, the analytic formula between the two was derived. In the comparison between simulated value and analytical value, it's founded that the foundation had a certain attenuation effect on the prestressed effect, so the specific attenuation effect was studied. The results showed that the foundation reduced the prestressed effect by 10%, but the cross – sectional area of sluice and the elastic modulus of common soft foundation had little influence on the attenuation effect.

Key words: prestressed force; anti – cracking of concrete; finite element calculation; soft foundation; sluice

收稿日期:2020-08-06

基金项目:江苏省水利科技项目(2019008);国家自然科学基金面上项目(51679074)

作者简介:陈坚(1963—),男,高级工程师,本科,主要从事水工结构设计工作。E-mail:hsy.chenjian@163.com

水闸闸墩结构型式单薄,底板约束作用明显,是一种薄壁混凝土结构^[1-5]。据统计,在水利工程中,墩墙结构开裂次数最多^[6]。其中,施工期的温度应力是各类裂缝出现的重要原因。温度控制是常见的减小温度应力的方法,但会增加施工成本,不便于振捣施工。预应力也是大体积薄壁结构常用的减小拉应力的重要方法,我国对预应力闸墩结构的应用始于葛洲坝工程,随后龙羊峡、鲁布革、岩滩、安康、水口等工程的大尺寸弧门闸墩也都采用了预应力技术^[7]。目前未见针对预应力在不同水闸结构上作用时,闸墩内部最大拉应力降幅的定量分析成果。因此本文以长江中下游地区气候条件下常见的软基水闸工程为对象,通过有限元仿真计算^[8],研究了水闸截面积对预应力作用效果的影响规律,并得出了两者之间的定量关系。研究过程中还发现,地基的存在对预应力效果有一定的削弱作用,于是对具体削弱效果也进行了研究。

1 基本资料

1.1 主要计算参数

本文根据江苏省常见的气温资料,拟合出多年月平均气温的余弦曲线:

$$T_a(\tau) = 13.3 + 14.2 \times \cos\left[\frac{\pi}{6}(\tau - 6.5)\right] \quad (1)$$

式中: τ 为时间,月; T_a 为月平均气温, $^{\circ}\text{C}$ 。

参考类似工程的材料参数,初拟热学与力学参数如表 1 所示。

表 1 材料参数

材料	导热系数 $\lambda /$ ($\text{kJ} \cdot (\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1}$)	绝热温升 终值 $\theta_0 /$ $^{\circ}\text{C}$	导温系数 $a /$ ($\text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$)	线胀系数 $\alpha /$ ($10^{-6} \cdot ^{\circ}\text{C}$)	泊松比 μ	密度 $\rho /$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	自生体积收 缩变形终值	最终弹性 模量 $E_0 /$ GPa
地基	2.41	0	0.00122	8×10^{-6}	0.300	1800	0	20
垫层	8.80	46	0.00335	9×10^{-6}	0.167	2300	-80×10^{-6}	20
C30 混凝土	8.95	55	0.00337	10×10^{-6}	0.167	2400	-130×10^{-6}	35

1.2 计算模型

闸墩高 8 m,长 32.8 m,设置了 6 种不同宽度,分别为 0.3 m、0.5 m、1.0 m、1.5 m、2.0 m 和 3.0 m;底板长 32.8 m,宽 52 m,厚 2 m;垫层厚 0.2 m;软土地基厚 30 m;岩基厚 20 m;底板后浇带宽 1 m,距离底板左右边 18.5 m。底板与垫层下软土地基内有 C30 混凝土桩,地基沿上下游和左右岸方向各延伸一定长度。坐标原点沿顺水流方向距

离上游左岸处底板顶点 8.6 m, Z 轴竖直向上, X 轴为横河向从左岸指向右岸, Y 轴为顺水流方向。特征点位于闸墩中心剖面底部,坐标为 $(25, 10 + w/2, 3)$, w 为闸墩宽度。有限元模型和特征点位置如图 1~6 所示。

温度场仿真计算中,地基的四周和底面为绝热边界,上表面为散热边界。其他表面均为散热边界;应力场仿真计算中,地基的四周和底面施加法向约束,上表面为自由边界,其他表面为自由边界。

本文计算了水闸结构在夏季浇筑并采用不同预应力张拉荷载加载方案时的工况,各结构的浇筑时间与浇筑温度如表 2 所示。

表 2 浇筑进度安排

浇筑结构	浇筑时间	浇筑温度/ $^{\circ}\text{C}$
垫层	7 月 1 日	40
底板	7 月 10 日	40
闸墩	8 月 1 日	40
底板后浇带	12 月 1 日	10

2 水闸截面积对预应力作用效果的影响规律

2.1 计算工况

为研究水闸截面积对预应力作用效果的影响规律,在 50 d(即闸墩龄期 20 d)时一次性将张拉荷

载作用在 6 个计算模型的每个闸墩端面的 21 个结点上,加载位置如图 7~8 所示,时间的 0 时刻为 7 月 1 日的 0 时刻,计算工况如表 3 所示。

水闸结构的截面积包括闸墩、底板与垫层 3 个部分。由于施加张拉荷载时后浇带尚未浇筑,因此底板和垫层的截面积为后浇带一侧 18.5 m 宽的部分,则水闸截面积 S 为

$$S = S_{\text{垫层}} + S_{\text{底板}} + S_{\text{闸墩}} = W_{\text{垫层}} H_{\text{垫层}} + W_{\text{底板}} H_{\text{底板}} +$$

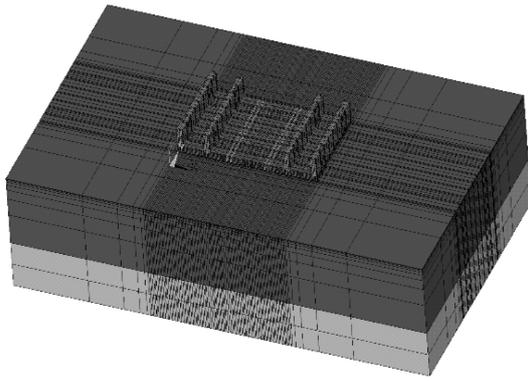


图 1 总体有限元模型图

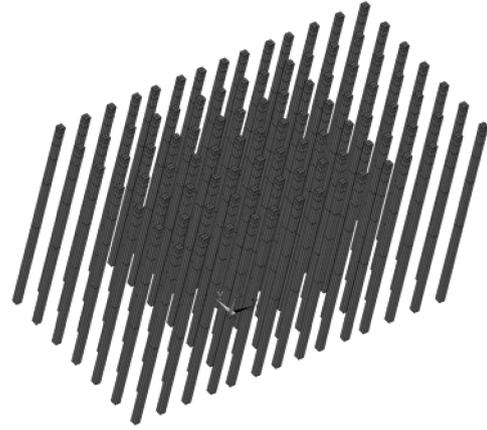


图 2 桩有限元模型图

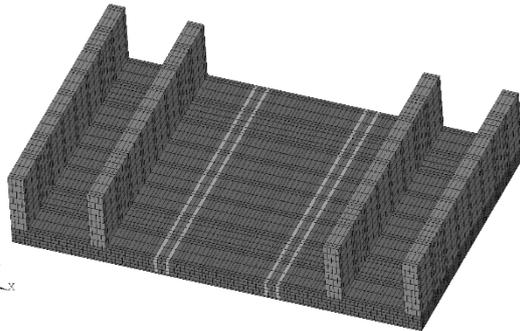


图 3 底板和闸墩有限元模型

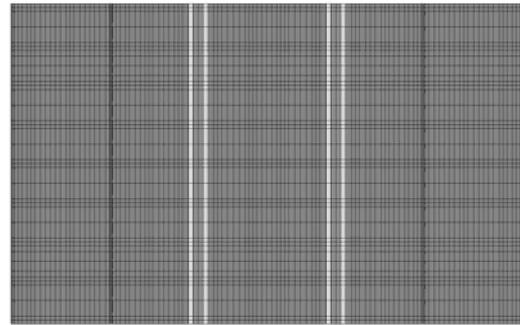
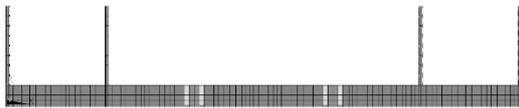
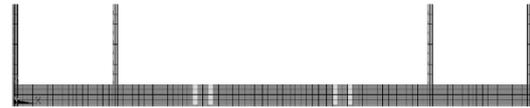


图 4 0.3 m 宽闸墩模型俯视图



(a) 0.3 m



(b) 0.5 m



(c) 1.0 m



(d) 1.5 m

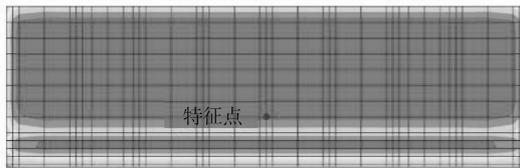


(e) 2.0 m



(f) 3.0 m

图 5 不同宽度闸墩模型立面图



(a) X=11



(b) Y=25

图 6 特征点位置示意图

$$2 \times W_{\text{闸墩}} H_{\text{闸墩}} = 18.5 \times 0.2 + 18.5 \times 2 + 2 \times 8W = 40.7 + 16W \quad (2)$$

式中: S 为水闸截面积, m^2 ; W 为闸墩宽度, m 。

2.2 计算结果

各工况下特征点的应力历时曲线图如图 9 所示。

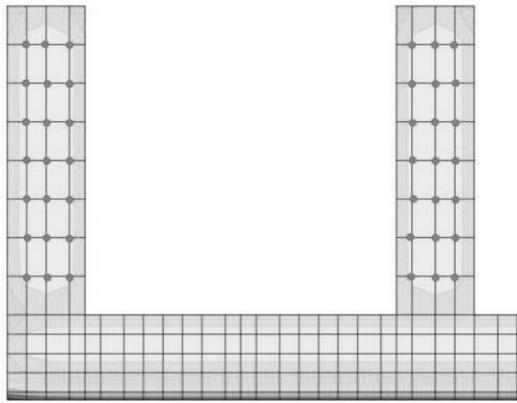


图 7 张拉荷载加载结点位置示意图

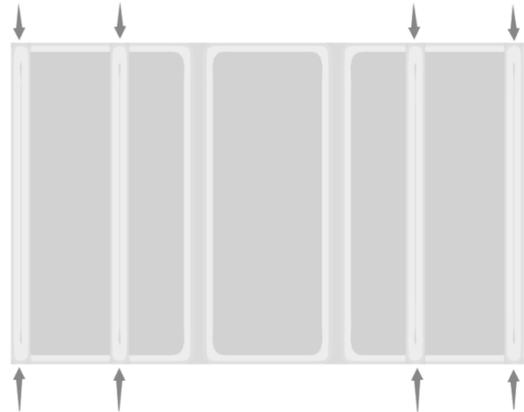


图 8 张拉荷载加载位置示意图

表 3 闸墩截面积与预应力作用效果研究计算工况

工况系列	工况序号	闸墩宽度/m	水闸截面积/m ²	单闸墩张拉荷载大小/MN
系列 1	工况 1-1	0.3	45.5	0
	工况 1-2			21
	工况 1-3			42
系列 2	工况 2-1	0.5	48.7	0
	工况 2-2			21
	工况 2-3			42
系列 3	工况 3-1	1.0	56.7	0
	工况 3-2			21
	工况 3-3			42
系列 4	工况 4-1	1.5	64.7	0
	工况 4-2			21
	工况 4-3			42
系列 5	工况 5-1	2.0	72.7	0
	工况 5-2			21
	工况 5-3			42
系列 6	工况 6-1	3.0	88.7	0
	工况 6-2			21
	工况 6-3			42

2.3 计算结果分析

由计算结果可知,当闸墩较薄时,相同大小的张拉荷载可大幅降低闸墩内部的拉应力,因此在施

加一次预应力之后,最大拉应力会出现在施加预应力之前,如图 9 所示。由此可知,用拉应力最大值的降幅来衡量预应力的作用效果是不准确的,会导

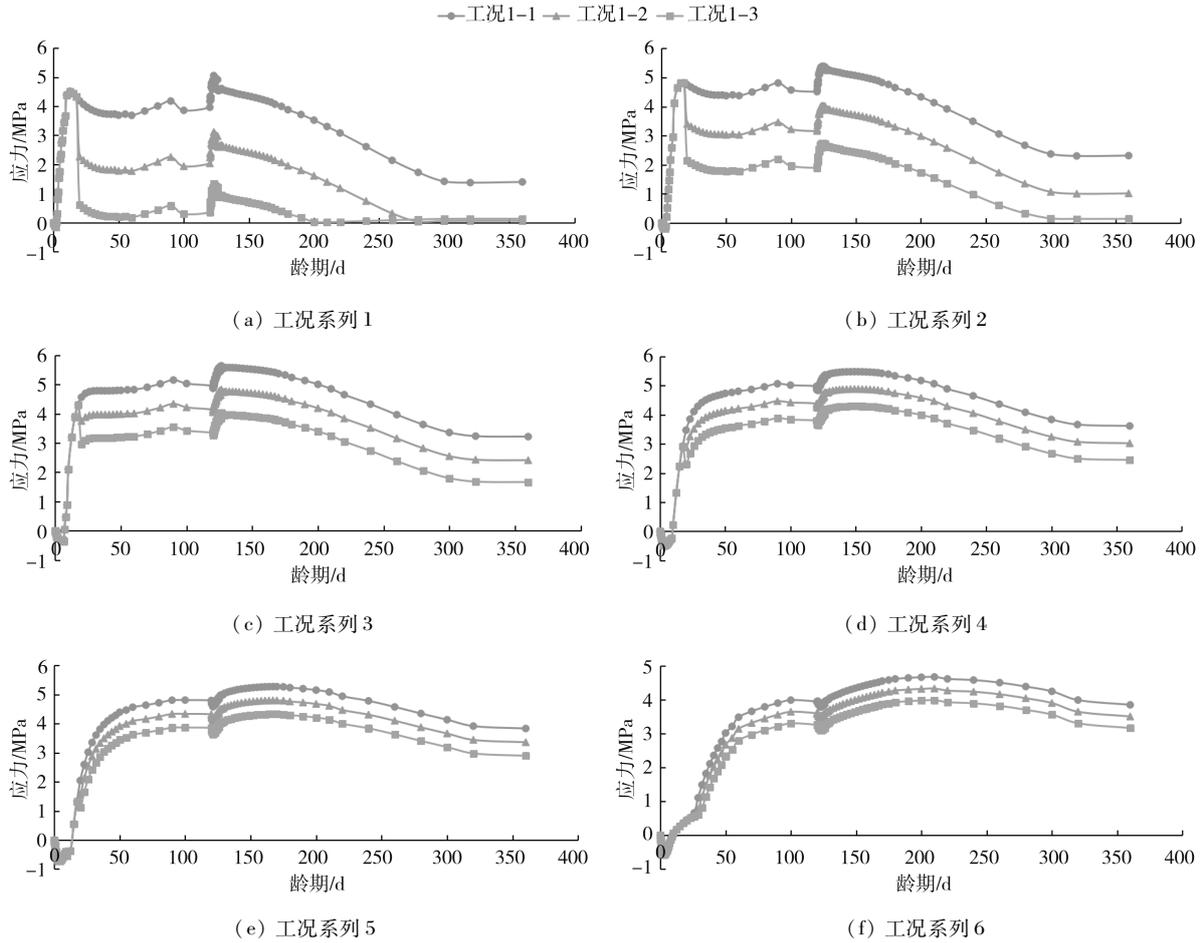


图 9 不同工况系列的应力历时曲线图

致结果偏低。如果采用 20 d 时应力的降幅来衡量预应力的作用效果, 会出现内部应力较小, 施加预应力后效果不明显的问题, 如图 9 所示。综上, 本文采用 50 d 龄期时的应力降幅衡量预应力的作用效果。根据计算结果, 可以得到不同宽度的闸墩在承受 21 MN 张拉荷载时闸墩内部拉应力降幅的仿真计算值。

根据闸墩、底板与垫层共同分摊预应力, 可得到在每个闸墩上每施加 21 MN 张拉荷载时, 闸墩内部最大拉应力降幅的解析解:

$$\Delta\sigma = \frac{P}{S} = \frac{42}{S} \quad (3)$$

式中: $\Delta\sigma$ 为在每个闸墩上施加 21 MN 张拉荷载时, 闸墩内部最大拉应力降幅, MPa; P 为施加在水闸结构一侧的两个闸墩上的产生预应力的张拉荷载, 取 42 MN; S 为水闸结构的截面积, 计算方法见公式 (2), m^2 。

根据公式 (3) 可得到应力降幅的解析值。每施加 21 MN 张拉荷载时特征点在 50 d 的应力降幅的仿真计算值与解析值如表 4 所示。

表 4 水闸截面积与每施加 21 MN 张拉荷载时特征点 3 的应力降幅

水闸截面积/ m^2	仿真计算值/MPa	解析值/MPa
45.5	1.767	0.923
48.7	1.302	0.862
56.7	0.678	0.741
64.7	0.590	0.649
72.7	0.470	0.578
88.7	0.343	0.474

由表 4 可知, 仿真计算值与解析值无法完全吻合。这是因为解析值中应力降幅的物理意义是每平方米的闸墩、底板和垫层截面分担的张拉荷载大小, 而仿真计算值还包含了地基分担等因素的影响, 故以仿真计算值为准。因此, 对解析公式 (3) 进行修正, 得到解析公式修正式 (4), 并作出解析修正值与水闸截面积的关系曲线, 如图 10 所示。

$$\Delta\sigma = \frac{42}{2.71S - 99.457} \quad (4)$$

由图 10 可见,解析修正式与仿真计算的结果吻合较好。因此,每当在闸墩上作用 1 MN 的张拉荷载时,能在闸墩内部产生的最大拉应力降幅为

$$\Delta\sigma = \frac{2}{2.71S - 99.457} \quad (5)$$

公式(5)适用于 C30 水闸横截面积大于 37 m² 的情况。

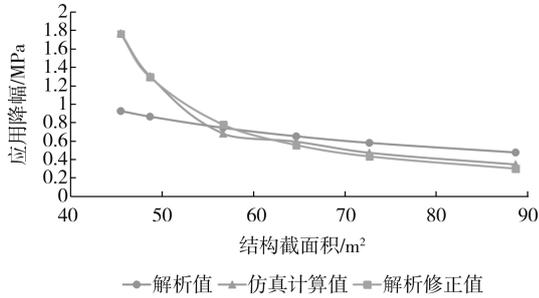


图 10 水闸截面积与应力降幅解析修正值关系曲线

3 地基对预应力作用效果的影响规律

前文指出仿真计算值与解析值不能完全吻合,是因为仿真计算中包含了地基等因素的影响,工程中常见的地基弹模如表 5 示。为了探究地基对预应力作用效果的影响,本节水闸结构在不同弹模的地基情况下施加相同张拉荷载时闸墩内部拉应力的降幅。计算工况如表 6 所示,计算结果如表 7 所示。

表 5 常见软基的弹性模量

土类	弹性模量/ MPa	土类	弹性模量/ MPa
很软的黏土	0.30 ~ 0.35	粉质黏土	7 ~ 20
软黏土	2 ~ 5	松砂	10 ~ 25
中硬黏土	4 ~ 8	紧砂	50 ~ 80
硬黏土	7 ~ 18	紧密砂、卵石	100 ~ 200
砂质黏土	30 ~ 40		

根据计算结果可算得不同地基对预应力作用效果的削弱情况,如表 8 所示。其中,应力削弱比的计算公式为

$$\eta = (\Delta\sigma_{\text{空气地基}} - \Delta\sigma_{\text{常见软基}}) / \Delta\sigma_{\text{空气地基}} \quad (6)$$

式中, $\Delta\sigma_{\text{空气地基}}$ 和 $\Delta\sigma_{\text{常见软基}}$ 分别是在空气地基(即地基弹模为 0.001 MPa,水闸自重依靠桩支撑)和常见软土地基条件下,对水闸施加预应力后,闸墩内部拉应力的降幅。

表 6 地基弹模的影响分析计算工况

工况序号	地基弹模/ MPa	水闸截面积/ m ²	单闸墩张拉荷 载大小/MN
工况 1-1-1	0.001	45.5	0
工况 1-1-2	0.001	45.5	21
工况 1-2-1	0.001	48.7	0
工况 1-2-2	0.001	48.7	21
工况 1-3-1	0.001	56.7	0
工况 1-3-2	0.001	56.7	21
工况 1-4-1	0.001	64.7	0
工况 1-4-2	0.001	64.7	21
工况 1-5-1	0.001	72.7	0
工况 1-5-2	0.001	72.7	21
工况 1-6-1	0.001	88.7	0
工况 1-6-2	0.001	88.7	21
工况 2-1-1	5	88.7	0
工况 2-1-2	5	88.7	21
工况 3-1-1	200	88.7	0
工况 3-1-2	200	88.7	21

表 7 不同软基条件下闸墩内部预应力作用效果

工况序号	闸墩内部最大拉应力/MPa		最大拉应力 降幅/MPa
	无预应力	有预应力	
工况 1-1 系列	5.593	3.643	1.950
工况 1-2 系列	5.854	4.373	1.481
工况 1-3 系列	6.031	5.270	0.761
工况 1-4 系列	5.959	5.308	0.651
工况 1-5 系列	5.773	5.246	0.527
工况 1-6 系列	5.194	4.811	0.383
工况 2-1 系列	5.197	4.853	0.344
工况 3-1 系列	5.305	4.965	0.340

表 8 不同弹模的地基对预应力的削弱作用

常见软基弹模/MPa	水闸截面积/m ²	仿真计算值/MPa		应力削弱比/%
		常见软基	空气地基	
20	45.5	1.767	1.950	10
	48.7	1.302	1.481	12
	56.7	0.678	0.761	11
	64.7	0.590	0.651	9
	72.7	0.470	0.527	11
	88.7	0.343	0.383	10
5	88.7	0.344	0.383	10
200	88.7	0.340	0.383	11

由计算结果可知,在常见的软基弹模范围内(5~200 MPa),即使考虑不同的闸墩截面积,地基的存在基本上都会使预应力的作用效果被削弱 10% 左右。无论是闸墩的截面积还是常见软基的弹模,对预应力削弱效果的影响不大,因此,可以认为软基会削弱 10% 的预应力效果。公式(5)的计算结果已经包含了此削弱效果,故其结果不必再另外乘以 90%。

4 结 论

本文通过有限元仿真计算,得到了在不同横截面积的水闸结构上施加 21 MN 的张拉荷载时闸墩内部拉应力的降幅。分析发现有限元仿真计算结果与解析公式(3)无法完全吻合,这是因为仿真计算中包含了地基分担预应力。因此,本文根据有限元分析结果,拟合出在不同横截面积的闸墩上施加 1MN 张拉荷载时,闸墩内部最大拉应力降幅的计算公式(5),该公式适用于 C30 水闸横截面积大于 37 m² 的情况。

此外,本文还研究了地基对预应力效果的削弱程度,即地基会分担多少预应力。计算结果表明,地基会使预应力的作用效果降低 10%,而水闸的截

面积和常见软基的弹模对此削弱效果的影响不大。

参考文献:

- [1] 王海波,周君亮.大型水闸闸墩施工期温度应力仿真和裂缝控制研究[J].土木工程学报,2012,45(7):169-174.
- [2] 张子明,郭兴文,杜荣强.水化热引起的大体积混凝土墙应力与开裂分析[J].河海大学学报(自然科学版),2002(5):12-16.
- [3] 陈守开,张越培,郭利霞,等.闸坝冲沙闸闸墩施工期温度与应力仿真研究[J].混凝土,2012(6):10-12,16.
- [4] 朱岳明,黎军,刘勇军.石梁河新建泄洪水闸闸墩裂缝成因分析[J].红水河,2002(2):44-47,61.
- [5] 王碗琴,王桂生,强晟,等.大体积薄壁混凝土墩墙结构早龄期开裂过程的数值模拟[J].水电能源科学,2018,36(4):139-142.
- [6] 吴健,曹为民,闪黎.水工墩墙结构混凝土裂缝成因与防裂措施分析[J].中国水利,2005(2):48-50.
- [7] 刘俊柏,林可冀.预应力闸墩技术及其在我国水电工程中的应用[J].水力发电,1991(5):20-24.
- [8] 朱伯芳.大体积混凝土温度应力与温度控制[M].北京:中国电力出版社,1999.