



# 高水头省水船闸室顶拉预应力钢索效果分析<sup>\*</sup>

林超<sup>1</sup>, 何良德<sup>1</sup>, 耿卓<sup>2</sup>, 吴新云<sup>3</sup>, 李俊龙<sup>1</sup>

(1. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098;

2. 山东省交通规划设计院有限公司, 山东 济南 250031; 3. 中国电建集团华东勘测设计研究院, 浙江 杭州 311122)

**摘要:** 穿黄工程隧洞方案的高水头省水船闸, 可在深基坑两侧边坡上交错布置分散式省水池, 闸室墙后回填土低、临空高度大。针对高水期闸室底板负弯矩过大的问题, 提出一种带顶拉高强钢索的整体式结构。利用ABAQUS软件建立平面有限元模型, 分析钢索在完建期、高水位期、低水位期和检修期4种工况下的作用, 研究钢索直径影响和预应力的效果, 基于单位索力效用指标提出一种预拉力估算方法。结果表明, 钢索主要在高水位期发挥作用, 直径越大效果越明显; 通过施加预应力可进一步提升钢索效果; 提出的预拉力估算公式是合理可行的。

**关键词:** 穿黄工程; 高水头; 省水船闸; 预应力钢索; 单位索力效用

中图分类号: U 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)04-0102-06

## Analysis on effects of installing pre-stressing wire rope on top of high water head water-saving ship lock chamber

LIN Chao<sup>1</sup>, HE Liang-de<sup>1</sup>, GENG Zhuo<sup>2</sup>, WU Xin-yun<sup>3</sup>, LI Jun-long<sup>1</sup>

(1. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Shandong Provincial Communications Planning and Design Institute Co., Ltd., Jinan 250031, China;

3. POWERCHINA Huadong Engineering Co., Ltd., Hangzhou 311122, China)

**Abstract:** The high head water-saving ship lock for tunnel scheme of the Yellow River-crossing engineering can arrange the scattered water-saving pools alternately on both sides of the deep foundation pit, and the backfill behind the lock chamber wall is low and the free height is large. For the problem of the baseplate's excessive negative moment of the high water head water-saving ship lock chamber in the high-flow period, we propose an integral structure with top-pull high-strength wire rope, use the ABAQUS finite element software modeling analysis to conduct focused research on the function of wire rope in four working conditions of completion period, high water level period, low water level period and maintenance period, analyze the effect of wire rope diameter and pre-stress, and propose a pre-stress estimation method based on unit cable force effect. The results show that the wire rope mainly plays a role during the high-flow period, and the larger the diameter is, the more obvious the effect is. The function of the wire rope can be further enhanced by exerting the pre-stress. The pre-stress estimation formula proposed in this paper is reasonable and feasible.

**Keywords:** the Yellow River-crossing engineering; high water head; water-saving ship lock; pre-stress wire rope; unit cable force effect

收稿日期: 2020-07-14

\*基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0402007); 山东省交通运输科技项目(2017B79); 通航建筑物建设技术交通行业重点实验室开放基金资助项目(YT918001)

作者简介: 林超(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为通航建筑物结构。

坞式闸室是将两侧闸墙和底板浇筑在一起的U形整体式结构,地基反力分布比较均匀,两侧闸墙相对位移较小,适用于水头较大、闸墙较高、抗震烈度要求较高、地基条件较差的船闸<sup>[1]</sup>。但坞式结构的底板内力较大,且易受不均匀沉陷、边荷载、温度应力的影响,如处理不当,底板将出现不同程度的裂缝,严重时甚至影响结构的正常使用<sup>[2]</sup>。闸墙后土体通常回填较高,否则由于墙后被动土压力不足,在高水头作用下,底板产生的弯矩较大,所需要的厚度也将增加<sup>[3]</sup>。

广西昭平船闸由于一侧紧靠泄水建筑物,无法高回填,首次采用了闸顶带连杆的框架整体式闸室结构<sup>[4]</sup>,利用连杆的轴力,可有效减小底板弯矩。拟建的德国吕内堡省水船闸<sup>[5]</sup>受临近已建升船机的地形限制,墙后填土较低,研究了框架闸室结构的受力特性。

京杭运河穿黄工程隧洞方案的省水船闸<sup>[6]</sup>,由于分散式省水池布置的限制,闸室两侧的回填土较低,闸墙外侧临空高度大,可采用框架整体式结构。进一步分析表明,在低水位期及检修期底板弯矩较小,连杆拉力也较小甚至出现压力;而在高水位期闸墙有明显向外的位移,连杆拉力减小底板弯矩的效果显著。因此,本文受斜拉桥高强钢丝拉索<sup>[7]</sup>的启发,提出一种带顶拉钢索的整体式闸室结构,设想通过闸顶高强度钢索的拉力代替连杆的拉力作用。利用ABAQUS有限元软

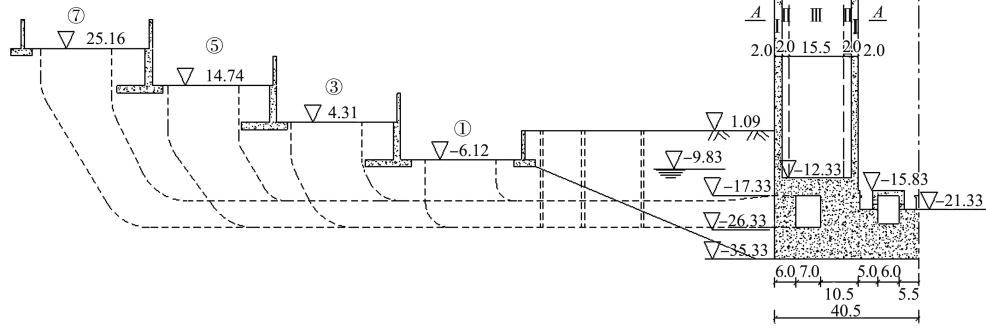
件建模,分析有、无钢索时底板弯矩特征及钢索优化结构受力的效果,研究钢索预应力对结构受力的影响并提出一种预应力值估算方法。

## 1 有限元模型的建立

### 1.1 顶拉钢索式闸室结构

规划的京杭运河穿越黄河工程位于山东省境内,分为平交、渡槽和隧洞3种方案<sup>[8]</sup>,其中隧洞方案是在黄河下开挖通航隧洞,两端利用通航建筑物沟通京杭运河<sup>[9]</sup>。以南端船闸方案为例,设计水头 $H=53.13\text{ m}$ ,京杭运河最高通航水位 $42.30\text{ m}$ ,最低通航水位 $39.30\text{ m}$ ,隧洞水位 $-10.83\text{ m}$ 。

由于穿黄隧洞与京杭运河水位差大,船闸运行时会向隧洞排出大量水体,若抽水不及时会造成隧洞内水位逐渐升高,因此设计建造8级分散式省水池以减少船闸用水量。闸室基本尺度 $34\text{ m}\times280\text{ m}\times5\text{ m}$ (有效宽度 $\times$ 有效长度 $\times$ 门槛水深),结构段长 $20\text{ m}$ ,断面见图1(仅显示结构左半部分)。闸墙采用直立式断面,宽度 $23.5\text{ m}$ ,总高度 $73.13\text{ m}$ ,内部设有3个空箱,高程为 $-12.33\sim49.3\text{ m}$ ,高度 $61.63\text{ m}$ 。底板顶高程 $-15.83\text{ m}$ ,基底高程 $-35.33\text{ m}$ 。场地地面高程约 $40.0\text{ m}$ ,需要开挖 $75.33\text{ m}$ 深基坑后施工闸室结构,基坑两侧边坡上交错布置8级分散式省水池。闸室两侧的回填土高程 $1.09\text{ m}$ ,闸墙外侧临空高度 $50.71\text{ m}$ 。



a) 顶拉钢索闸室断面(仅显示左半部分)

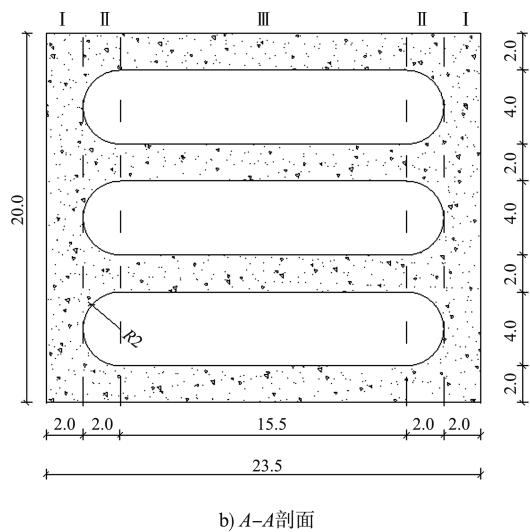


图 1 阀室断面及空箱剖面 (单位: m)

根据船舶通航净空 7.0 m 的要求, 钢索布置高程为 50.55 m, 综合考虑闸室通光需求与钢索锚具最小间距等因素, 钢索的水平间距  $a=2$  m。钢索采用热挤聚乙烯高强钢丝拉索, 选择钢索型号为 PES7-211、PES7-265、PES7-313、PES7-367、PES7-421, 公称截面面积  $A_s$  依次为 81.20、101.98、120.46、141.21、162.02 cm<sup>2</sup>, 等效直径依次为  $d_1=102$  mm、 $d_2=114$  mm、 $d_3=124$  mm、 $d_4=134$  mm、 $d_5=144$  mm。为简洁表达, 本文用  $d_0$  表示无钢索方案。

## 1.2 计算工况及水位组合

选取完建期、高水位期、低水位期和检修期 4 种工况进行计算分析, 水位组合见表 1。

表 1 水位组合

计算工况	水位组合/m		省水池水深/m
	墙前	墙后	
完建期	无水	闸底以下	0
高水位期	42.30	-9.83	1.00
低水位期	-10.83	-9.83	6.22
检修期	无水	-9.83	0

## 1.3 有限元模型

闸墙带空箱、闸顶带钢索的闸室是一种三维空间结构。根据闸墙竖向压缩、侧向弯剪为主以及钢索轴向拉伸为主的受力变形特点, 通过材料参数换算, 将闸墙、钢索沿纵向连续均匀化, 使每个结构段的闸墙抗压刚度、抗弯刚度、抗剪刚度、闸墙质量、钢索抗拉刚度及截面积保持等效,

则可简化为平面应变问题重点分析底板内力。

将含有空箱的闸墙水平截面分为 I、II、III 区域 (图 1b)), 分别进行抗压刚度等效的弹性模量换算:

$$E'_i = E_i A_i / A'_i \quad (1)$$

式中:  $E_i$ 、 $E'_i$ , 为换算前、后的弹性模量;  $A_i$ 、 $A'_i$  为换算前、后的截面积。

经计算可得  $E'_I = 30.000$  GPa、 $E'_{II} = 15.863$  GPa、 $E'_{III} = 12.000$  GPa。为保证质量不变, 需要进行密度换算:

$$\rho'_i = \frac{\rho_i A_i}{A'_i} \quad (2)$$

式中:  $\rho_i$ 、 $\rho'_i$  分别为换算前、后的密度。

钢索的弹性模量不需要换算, 截面积换算为:

$$A' = A/a \quad (3)$$

式中:  $A$ 、 $A'$  分别为换算前、后的截面积;  $a$  为钢索水平间距。

利用 ABAQUS 有限元软件建立平面有限元模型, 见图 2(仅显示闸室右半部分及右侧省水池的局部区域)。整个模型包括闸室、回填土、省水池和地基 4 个部分, 坐标原点为闸室底板下表面上中点, 横向为  $x$  轴, 竖向为  $y$  轴。考虑边界效应的影响, 地基土体自基坑开挖坡顶向外延伸 150 m, 地基总长度为 889 m, 地基总深度为 150 m。

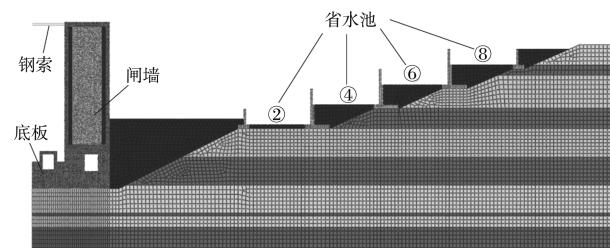


图 2 整体有限元模型(显示局部)

地基左右边界约束水平位移, 底部为全约束。闸室、省水池、回填土和地基都为均质实体单元, 通过设置接触的方式来模拟结构与土的相互作用, 接触面的切向行为采用 Coulomb 摩擦模型, 摩擦系数取 0.3; 法向行为采用硬接触, 即接触脱开时不传递法向压力。

钢索采用桁架单元进行模拟, 由于在本闸室中桁架单元总是受拉, 故可近似模拟钢索不受压力和弯矩、只受拉力的特性。

## 1.4 材料模型

闸室、省水池的混凝土结构、钢索采用线弹性材料模型。混凝土强度等级为C30, 密度 $2.5\text{ t/m}^3$ , 弹性模量 $E=30\text{ GPa}$ , 泊松比 $\nu=0.167$ 。

按上述方法做等效换算后闸墙空箱区域材料属性见表2。

表2 闸墙空箱区域结构材料参数

部位	密度/(\text{t}\cdot\text{m}^{-3})	弹性模量/GPa	泊松比
I区	2.500	30.000	0.167
II区	1.322	15.863	0.167
III区	1.000	12.000	0.167

表3 各层地基土力学指标

土层	层厚/m	层底高程/m	密度/(\text{t}\cdot\text{m}^{-3})	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa	压缩模量/MPa
⑦粉质黏土	14.7	-48.2	1.95	16	24	10.2
⑧强风化灰岩	1.5	-49.7	2.25	37	180	500.0
⑨弱风化灰岩	5.9	-55.6	2.35	60	440	3 000.0
⑩微风化灰岩	-	-	2.45	72	700	8 600.0

## 2 顶拉钢索直径的影响

### 2.1 闸墙位移对比

水平位移 $\delta$ 主要受闸室内侧向静水压力及墙后回填土压力影响, 对比不同工况发现高水位期 $\delta$ 远大于其他工况, 不同钢索直径下高水位期 $\delta$ 值沿高程 $y$ 的分布见图3。

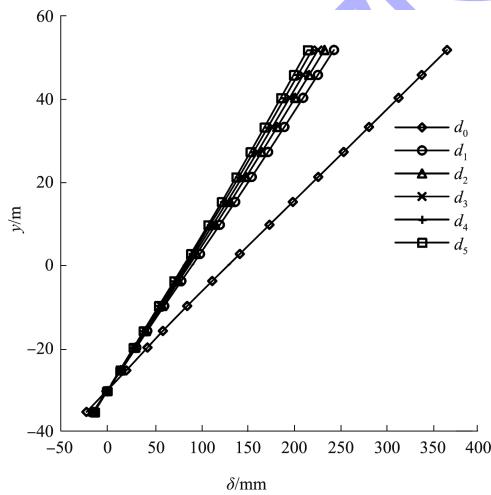


图3 高水位期闸墙水平位移 $\delta$ 沿高程 $y$ 的分布

沿高程 $y$ 自下至上,  $\delta$ 呈线性增加, 闸墙弯曲变形很小。由于闸室内水位较高, 同时墙后回填土高程较低, 被动土压力抵消水压力的作用不足, 无钢索时闸墙向外倾斜明显, 墙顶处 $\delta$ 达到365 mm。有钢索后, 在钢索拉力作用下闸墙位移

钢索密度 $\rho=7.8\text{ t/m}^3$ , 弹性模量 $E=19\text{ GPa}$ , 泊松比 $\nu=0.3$ , 抗拉强度 $\sigma_b=1.67\text{ GPa}$ 。

地基土和回填土的本构模型均采用D-P模型, 地下水位以下采用浮密度, 地下水位以上采用天然密度。回填土密度 $\rho_s=1.97\text{ t/m}^3$ , 内摩擦角 $\varphi=28^\circ$ , 黏聚力 $c=17.3\text{ kPa}$ , 压缩模量 $E_s=30\text{ MPa}$ , 泊松比 $\nu=0.3$ 。

工程地层可划分为10层, 闸室底板以下为7~10层, 土力学指标见表3。

受到限制, 钢索直径 $d_1$ 时 $\delta$ 降为 $d_0$ 时的66.7%, 当直径增加至 $d_5$ 时 $\delta$ 下降为 $d_0$ 时的58.9%。可见钢索可有效减小闸墙水平位移。

### 2.2 底板弯矩对比

以安装 $d_1$ 直径钢索的闸室为例, 有、无钢索时底板弯矩 $M$ 的分布情况见图4, 由于低水位期和检修期闸室内外水压力作用较小, 因此底板弯矩与完建期差异较小, 为便于观察, 图中未反映这两种工况下 $M$ 分布。

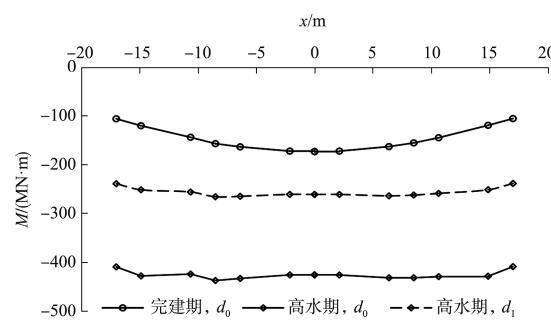


图4 底板弯矩分布

可以看出, 图4中 $M$ 均表现为负弯矩; 完建期从两端向中部 $M$ 的绝对值逐渐增加, 高水位期 $M$ 的绝对值沿水平方向变化不大, 两端较中部略有减小。闸墙传递给底板的负弯矩远大于底板顶面水重力产生的正弯矩, 表现为高水位期 $M$ 向负弯矩方向急剧增长。有钢索后高水位期 $M$ 的绝对

值下降明显, 约降低为  $d_0$  时的 56.9%。

钢索直径从  $d_1 \sim d_5$  时高水位期  $M$  分布见图 5。可以看出, 随着  $d$  增加, 底板各处负弯矩的绝对值减小相同, 钢索直径越大弯矩的绝对值越小。底板最大弯矩随钢索截面积  $A_s$  的变化趋势见图 6。可以看出, 随着  $A_s$  增加, 曲线逐渐放缓, 增加直径对减小底板弯矩的效果越来越小, 钢索直径过大是不经济的。

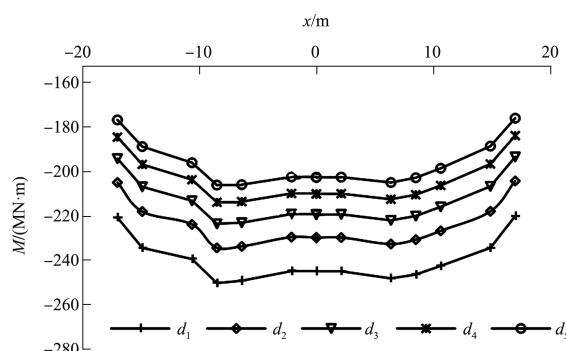


图 5 不同钢索直径时高水位期底板弯矩

$h_{\xi_1}$  为正值且在各工况下大致相同, 由于  $h_{\xi_1}$  沿水平方向变化较小, 可认为单位索力效用  $h_{\xi_1}$  大致与  $x$  无关。计算表明, 钢索直径的变化对  $h_{\xi_1}$  几乎无影响, 单位索力效用  $h_{\xi_1}$  平均值为 57.3 m。

### 3 钢索预拉力的影响

#### 3.1 预拉力模拟

由于高水位期底板负弯矩仍然较大, 继续增大钢索截面积的效果不大且不经济, 因此设想通过施加预应力的方式增加钢索拉力, 进一步减小高水位期  $M$ 。

ABAQUS 中可通过降温法对钢索施加预应力, 即在钢索单元上施加初始温度, 在后续分析步中降低温度使钢索收缩产生预拉力, 其实质是施加温度荷载间接使钢索单元产生初始应变, 从而起到钢索受拉的效果。施加预应力的大小与温度降低值  $\Delta T$  的关系为:

$$\Delta T = \frac{\sigma}{E\alpha\xi} \quad (4)$$

式中:  $\sigma$  为预应力;  $E$  为弹性模量;  $\alpha$  为钢索材料的线膨胀系数, 取  $1.2 \times 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ;  $\xi$  为墙顶位移引起的应力松弛系数, 与墙顶抗推刚度、钢索抗拉刚度、钢索长度等因素有关, 本船闸从  $d_1 \sim d_5$ ,  $\xi$  依次为 0.38、0.33、0.30、0.26、0.24。

#### 3.2 预拉力效果

对直径  $d_1$  的钢索分别施加  $N_0 = 0$  kN、 $N_1 = 2000$  kN、 $N_2 = 4000$  kN 预拉力后高水位期和完建期  $M$  分布见图 8。

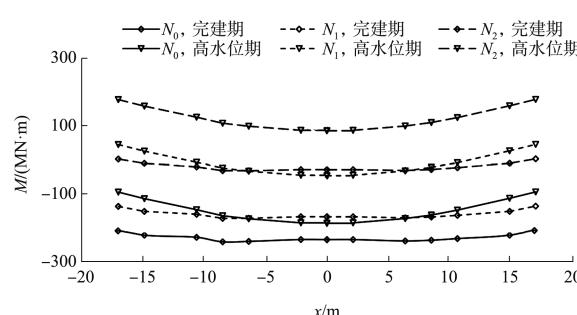


图 8 不同预拉力时底板弯矩分布

#### 2.3 单位索力效用

将有、无钢索时底板弯矩  $M$  相减, 再除以该时刻钢索总拉力可得单位钢索拉力减小的底板弯矩值, 称为单位索力效用  $h_{\xi_1}$ 。钢索直径为  $d_1$  时, 高水位期、低水位期和检修期  $h_{\xi_1}$  分布见图 7。

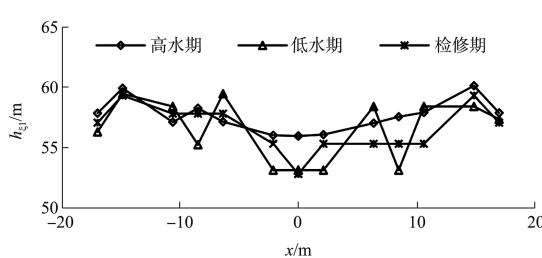


图 7 单位索力效用  $h_{\xi_1}$  分布

增加拉力  $N$  后, 完建期和高水位期  $M$  曲线同步上移, 说明  $N$  在不同工况下作用相同; 每增加

2 000 kN,  $M$  的绝对值降低值大致相同, 说明  $M$  的绝对值以线性方式降低, 每增加 1 kN 预拉力  $M$  约减小 57.8 kN·m。钢索直径  $d$  对单位预拉力效用  $h_{\xi 2}$  几乎无影响,  $h_{\xi 2}$  平均为 57.5 m。

整体坞式闸室是一种地基上 U 形开口结构, 可用地基梁方法<sup>[10]</sup>求解地基反力、底板内力。顶拉钢索式闸室结构计算时, 可将钢索在闸室轴线处切开, 并用未知钢索拉力  $X$  代替, 建立基于地基上 U 形开口结构的基本体系, 采用结构力学的方法求解底板内力。其中, 单位钢索力  $X=1$  kN 在开口基本体系中产生的底板弯矩, 即为  $h_{\xi 1}$ 、 $h_{\xi 2}$ 。显然, 闸墙越高, 单位力  $X$  产生的底板弯矩越大,  $h_{\xi 1}$ 、 $h_{\xi 2}$  值也越大。

本闸室地基为非线性 D-P 模型, 接触状态、计算工况等也含有非线性因素, 因此工况、钢索直径、预应力不同时, 地基应力状态不同,  $h_{\xi 1}$  或  $h_{\xi 2}$  数值有些差别, 但影响不大, 可近似认为  $h_{\xi} = h_{\xi 1} = h_{\xi 2}$ , 反映了闸室顶部单位水平力减小底板负弯矩的效用。若无非线性影响,  $h_{\xi 1}$  与  $h_{\xi 2}$  应完全一致, 为  $h_{\xi}$  在不同时刻的表现形式。

### 3.3 预拉力估算

当钢索直径增加至  $d_5$  后闸室底板负弯矩  $M$  仍然很大, 继续增大  $d$  的效果不好, 因此通过施加预应力的方法改善底板受力是非常必要的。设  $M_1$ 、 $M_2$  分别为闸室在计算工况下最大及最小负弯矩,  $M'_1$ 、 $M'_2$  分别为调整后闸室最大正、负弯矩, 由于当底板所受最大负弯矩与最大正弯矩差距最小时受力状况最好, 所以优化思路是通过调整钢索预拉力  $N$ , 使得  $M'_1 = M'_2$ , 并且钢索最大总应力  $\sigma_{\max} \leq \sigma_b$  ( $= 1670$  MPa)。 $N$  的公式为:

$$N = \frac{-(M_1 + M_2)}{2 h_{\xi}} \quad (5)$$

对应 5 种直径钢索的优化方案见表 4。可以看出, 这 5 种直径的钢索均可通过施加预应力达到使完建后底板最大正负弯矩相同的目的, 理论上均可作为设计方案。直径  $d_1 \sim d_5$  钢索的应力和调整后的底板正负弯矩值逐渐降低, 底板厚度及所需用钢量减小, 但钢索成本逐渐增加。因此实际工程中应综合考虑钢索应力、底板弯矩及经济性后选择优化方案。

表 4 优化方案

钢索直径	$M_1$ /(MN·m)	$M_2$ /(MN·m)	$N/MN$	预应力 $\sigma_y$ /MPa	最大总应力 $\sigma_{\max}$ /MPa	$M'_1$ /(MN·m)	$M'_2$ /(MN·m)
$d_1$	-220	-68	2.504	617	1 440	-76	76
$d_2$	-204	-68	2.365	464	1 174	-68	68
$d_3$	-192	-68	2.261	375	1 003	-62	62
$d_4$	-183	-68	2.183	309	879	-58	58
$d_5$	-174	-68	2.104	260	769	-53	53

## 4 结论

1) 对于穿黄工程隧洞方案的高水头省水船闸, 顶拉钢索可有效减小闸墙侧向位移及底板负弯矩, 钢索直径越大效果越好, 但随着钢索直径增加, 效果提升效率逐渐降低。

2)  $h_{\xi}$  反映了闸室顶部单位水平力减小底板负弯矩的效用, 闸墙越高  $h_{\xi}$  值越大。由于非线性因素影响, 单位预拉力效用  $h_{\xi 2}$  与单位索力效用  $h_{\xi 1}$  略有差别, 但两者本质相同, 为  $h_{\xi}$  在不同时刻的表现形式。

3) 对于钢索所需施加的预应力值, 本文提出一种估算方法, 使调整后底板正、负弯矩最大值

相同或接近以优化底板受力。实际工程中应在满足钢索抗拉强度要求的基础上, 综合考虑底板弯矩、经济性后选择合适的方案。

## 参考文献:

- [1] 王阳.软基上坞式船闸闸室结构应力变形特性研究[D].重庆:重庆交通大学, 2018.
- [2] 刘世龙, 刘晓平, 曹周红, 等.复杂地基对坞式船闸结构的影响研究[J].水力发电学报, 2015, 34(5): 124-130.
- [3] 雷明月, 陶桂兰, 姜丞.岩基上键槽式闸室结构与整体式闸室结构受力特性比较[J].水运工程, 2016(8): 119-124, 130.