

不同 U 型锚索布置对预应力闸墩应力与变形的影响

王浩杰, 刘晓青

(河海大学 水利水电学院, 南京 210098)

摘要: 针对如何选用白鹤滩底孔预应力锚索布置方案,采用三维有限元子模型方法对不同 U 型预应力锚索布置方案下的白鹤滩 6[#]底孔闸墩进行应力和位移分析,初步拟定了两种预应力锚索布置方案。综合比较两种方案下典型剖面及典型剖面上的特征点应力变形情况,判断不同预应力锚索布置方案下闸墩结构的安全性。研究结果表明:对于两种不同的锚索布置方案来说,闸墩与大梁结构的应力与位移均未出现不连续和突变,符合工程经验与应力标准,且方案 1 的安全性能略优于方案 2。其研究成果可为布置锚索的大推力预应力闸墩设计提供参考。

关键词: 预应力闸墩; U 型锚索; 应力与变形; 白鹤滩拱坝

中图分类号:TV662.2; TV223.34

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2019)03-0208-05

Influence of different U – shaped anchor cable arrangements on stress and deformation of prestressed gate pier

WANG Haojie, LIU Xiaoqing

(College of Water Conservancy & Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In view of how to choose the prestressed anchor cable layout of Baihetan bottom holes, this paper analyzed stress and displacement of Baihetan 6[#] bottom hole with different U – shaped prestressed anchor cable layout schemes using three-dimensional finite element sub-model method, which preliminarily drafts two layouts. The stress and displacement of the typical sections and points was analyzed to determine the safety of the structure in the process of different prestressed anchor cable layout. The results showed that there is no non-uniform distribution and mutation of displacement in the pier and girder structure in the process of different prestressed anchor cable layouts, which is in line with the engineering experience and stress standards, and the security performance of scheme one is slightly better than that of scheme two. The results can provide a reference for the design of anchor cable of the large thrust prestressed gate pier.

Key words: prestressed sluice pier; U – type anchor cable; stress and deformation; Baihetan arch dam

1 研究背景

随着混凝土高拱坝的泄洪量不断增大,相应的孔口尺寸与弧门推力也随之增大。巨大的弧门推力作用到弧门支撑体上,在闸墩两侧和颈部产生大面积的拉应力区。而大吨位预应力锚索是解决闸墩承受大推力的有效措施,能够明显改善闸墩的应力状态,确保孔口安全运行^[1-5]。

对于泄水闸墩,由于预应力主锚索在闸墩大梁处产生沿大梁方向的次生拉应力,还需要沿大梁方向布置次

锚索,所以预应力闸墩的锚索布置十分复杂。然而目前预应力闸墩锚索设计理论相对落后,多在参考类似工程的经验基础上采用半经验法进行设计,对 U 型锚索的研究资料较少,缺乏理论计算和数据分析^[6]。因此研究不同锚索布置方案下预应力闸墩的应力变形对锚索的优化设计就显得尤为重要。本文根据两种预应力锚索布置方案,分析支撑大梁与预应力闸墩受力状态;针对相应的典型剖面与特征点,研究典型剖面上是否出现应力与位移的不连续和特征点应力与位移的突变等情况,并以此判断闸墩和支撑大梁的结构安全性。

收稿日期:2018-08-16; 修回日期:2018-12-10

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0401601)

作者简介:王浩杰(1994-),男,河南许昌人,硕士研究生,研究方向为水工结构。

通讯作者:刘晓青(1965-),女,江苏南京人,博士,教授,主要从事水工结构及固体与流体动力研究。

2 预应力锚索布置方案与模型建立

2.1 工程概况

白鹤滩水电站位于金沙江下游云南省巧家县和四川省宁南县境内,上接乌东德梯级,下邻溪洛渡梯级,是国家西电东送工程的骨干电源点之一^[7]。白鹤滩拱坝设计坝高 289.0 m,坝顶高程 834.0 m。坝身底部布置 6 个施工期临时导流底孔,上游水位 750 m,下游水位 606 m。1[#]~5[#]底孔孔口尺寸 6 m × 10 m,上游平板门挡水,下游自由出流;6[#]底孔孔口尺寸为 5 m × 7 m,出口高程 665 m,下游设工作弧门挡水。在施工期低水位工况下,弧门总推力为 57 610 kN,单支侧推力为 30 kN。

2.2 预应力锚索布置方案

由于 1[#]~5[#]底孔为平板门挡水,下游无弧门挡水,故只对 6[#]底孔预应力闸墩进行锚索布置。6[#]底孔

预应力闸墩承受着由弧形工作闸门产生的巨大推力,闸墩采用钢筋混凝土结构。为了避免由于闸墩产生过大的拉应力而引起裂缝的开展,进而对整体结构造成影响,沿推力方向在闸墩两侧对称布置共 16 束张拉吨位 3 500 kN 的 U 型主锚索(见图 1),图 1 中 N₁~N₈ 代表锚索的编号,每边 8 根,以辐射角 0.5° 辐射状布置;沿孔口下游闸门支座处的大梁方向布置 13 根张拉吨位 3 000 kN 的直线型次锚索(见图 2),图 2 中“Ⅰ~Ⅳ”表示次锚索的布置顺序,与主锚索相对应且同时布置。大梁第 1 排和第 2 排布置次锚索各 5 根,第 3 排布置 3 根。以消除大梁剪切和弯曲产生的拉应力,从而改善闸墩的整体受力状况。

图 3 为 6[#]底孔预应力闸墩 U 型主锚索两种布置方案,其中锚索根数与张拉吨位均相同。图 3 中“ZM”表示主锚索,编号与图 1 中相对应。罗马数字“Ⅰ~Ⅳ”表示布置顺序,锚索荷载逐步施加。

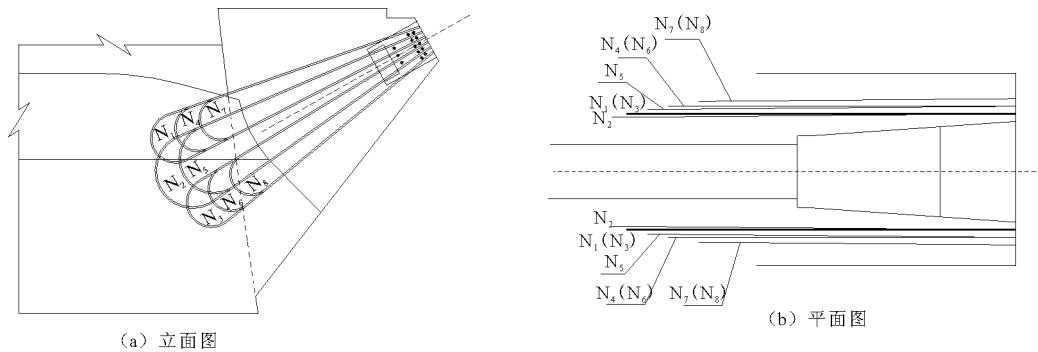


图 1 白鹤滩大坝 6[#]底孔预应力闸墩主锚索布置

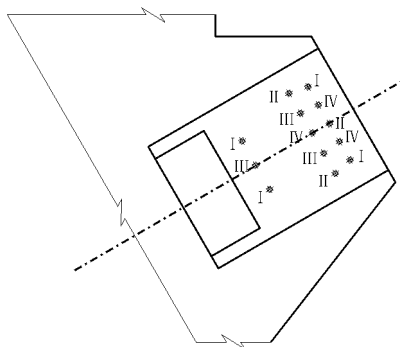


图 2 6[#]底孔预应力锚索闸墩大梁次锚索布置图

(a) 方案1		(b) 方案2	
ZM7 Ⅰ	ZM5 Ⅱ	ZM1 Ⅲ	ZM4 Ⅳ
ZM7 Ⅰ	ZM5 Ⅱ	ZM1 Ⅲ	ZM4 Ⅳ
ZM8 Ⅰ		ZM1 Ⅲ	ZM6 Ⅳ
ZM8 Ⅰ		ZM1 Ⅲ	ZM6 Ⅳ
ZM2 Ⅰ			
ZM2 Ⅰ			

图 3 6[#]底孔预应力闸墩主锚索布置方案

2.3 有限元子模型法计算过程

坝体自重、上下游水压力、弧门推力和主次锚索的预应力为施工期工况的全部荷载。其中以面力的方式简化弧门推力,荷载面在支撑大梁的上游;采用连接单元法简化主锚索预应力、等效荷载法简化次锚索预应力。地基为固定约束。水密度取 $1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,钢筋混凝土密度取 $2.4 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,混凝土弹性模量取 24 GPa,泊松比取 0.167。

采用有限元子模型法对白鹤滩大坝预应力闸墩进行三维有限元分析。建立大坝整体模型,按照图 1、2 的主锚索位置和图 3 的布置顺序依次在整体模型和子模型中建立锚索与锚块模型。按照布置方案,在每组锚索布置后均可以得到整体计算结果。而由整体计算结果可以得到子模型对应边界上的节点位移,子模型边界的节点位移作为计算的约束条件,在加密后的子模型上建立相对应的预应力锚索和锚块模型从而得出各典型剖面各特征点不同方案

下的位移和应力变化。

3 结果及分析

对于大推力预应力闸墩,颈部是设计的关键位置,也是拉应力较大的区域,容易产生应力集中。考虑锚索布置、闸墩设计对称性与受力状态,底孔出口闸墩左右两侧差别不大。但右侧承受的整体拱推力会挤压结构,使其产生沿大梁方向的内力,进而闸墩右侧的表面会受到拉应力。在闸墩自重作用下,其与坝体连接处也会产生较大的拉应力。

图4为6#底孔施工期工况第一主应力及典型剖面图,根据图4(a)的拉应力区,选择1-1、2-2和3-3剖面作为典型剖面(如图4(b)所示),图5为各典型剖面特征点示意图。选择闸墩颈部A点、主锚索张拉表面上B和C点3点作为应力位移特征点。考虑到大梁截面较小,布置顺序的变化对结

构的影响并不大,所以两种方案的次锚索布置顺序相同。

在大梁承受了较大的弧门推力情况下,其与闸墩的交界处以及与坝体的交界处常出现最大拉应力,主要对大梁跨中截面以及大梁纵截面进行对比,为此,在确定典型剖面与特征点时,应考虑拉应力较为集中的部位。这里选取典型剖面2-2(如图4、5所示)的大梁四周D、E、F、G点以及典型剖面3-3(图4、5)的闸墩与大梁交界部位的H、I、J、K点为特征点,所选择的特征点皆在受拉区域内且各特征点处拉应力较大。

本文重点分析支撑大梁横截面与大梁与闸墩连接处的应力和变形,根据特征点在两种方案下随着锚索布置顺序的应力和位移变化来初步选择较优的锚索布置方案。各典型剖面特征点在不同方案下的应力和位移变化结果见图6~11。应力以拉为正。

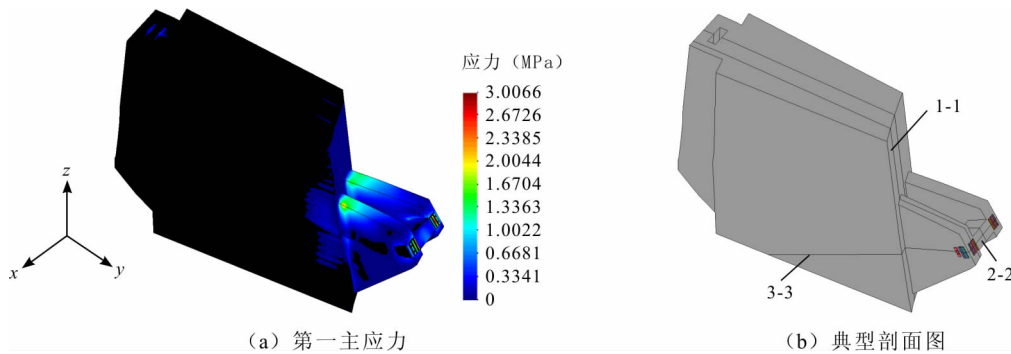


图4 6#底孔施工期工况第一主应力与典型剖面图

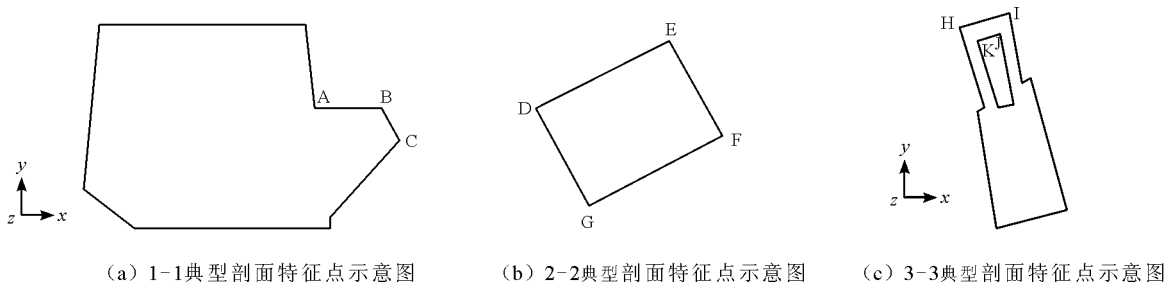


图5 各典型剖面特征点示意图

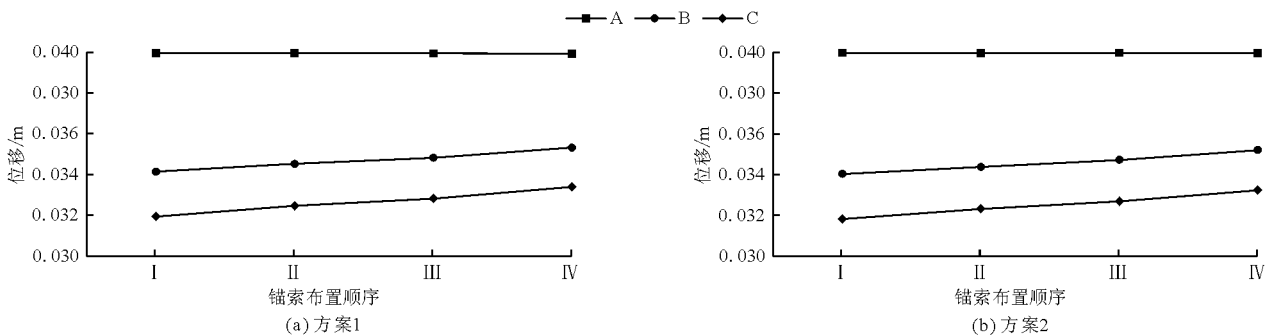


图6 1-1 典型剖面两种方案下特征点位移变化图

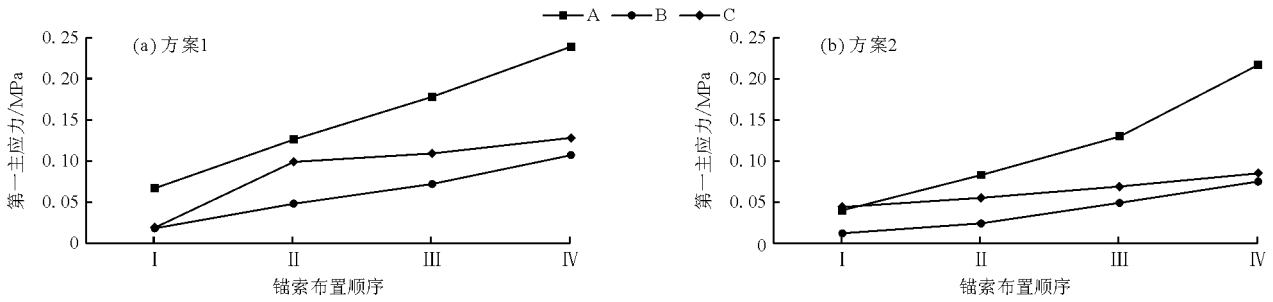


图 7 1-1 典型剖面两种方案下特征点第一主应力变化图

从图 6、7 可以看出,位移受锚索布置顺序的影响并不大,第一主应力的变化趋势受锚索顺序影响较大。可以看出差异主要在 I、II 两步,导致这种差异的原因是每步主锚索根数的不同,其次是主锚索位置。而两种方案下的最终位移和第一主应力数值相差不多。

在分析大梁横截面时,应考虑主锚索与次锚索共同的作用。从图 8、9 看到,两种方案下的位移差别不大,且变化趋势基本相同。但第一主应力的变化差别较大,尤其是 G 点的变化规律受每步主锚索根数和施加位置影响较大。整体来说,方案 1 的拉应力水平比方案 2 低。

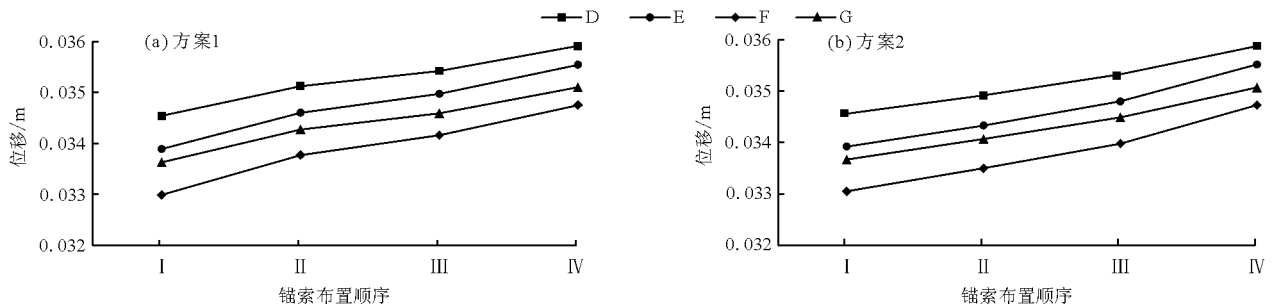


图 8 2-2 典型剖面两种方案下分析点位移变化图

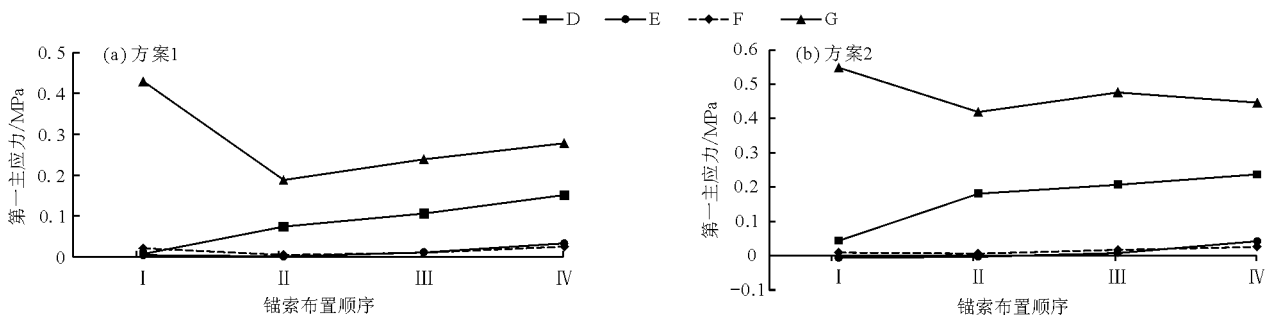


图 9 2-2 典型剖面两种方案下分析点第一主应力变化图

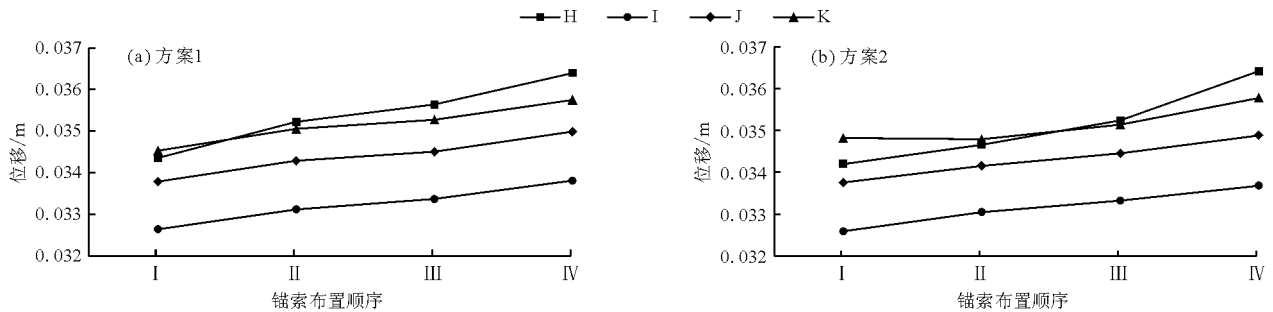


图 10 3-3 典型剖面两种方案下分析点位移变化图

从图 10、11 可知,3-3 剖面在两种方案下位移变化不大,主要差别在位于闸墩右侧的 H 和 K 两点。方案 2 的第 I 组锚索布置比方案 1 更靠近闸墩外侧,故 H

点位移比方案 1 略大。第 IV 组锚索的位移值也相差不多,且位移变化规律一致;对比两种方案下的第一主应力图可以发现;除 K 点外,其余 3 点的变化规律大致相

同,而方案2下K点应力变化规律有所不同的主要原因在于K点初始位移差异较大。

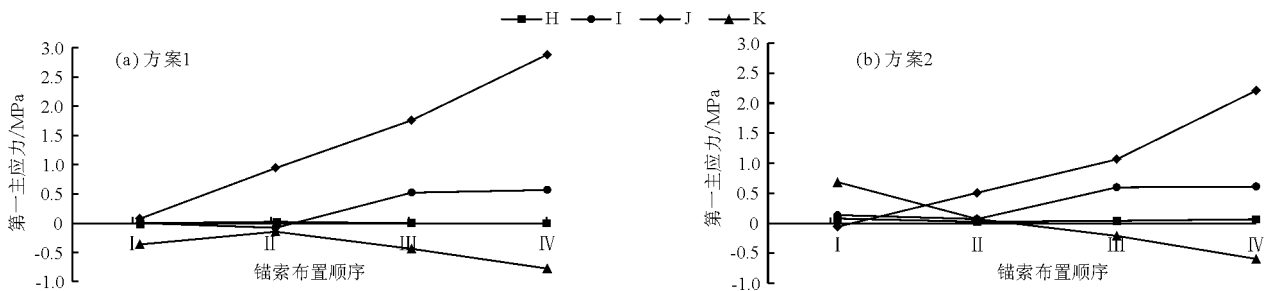


图 11 3-3 典型剖面两种方案下分析点第一主应力变化图

以上分析针对模拟锚索布置过程中的闸墩应力变形情况。在锚索全部施加后,对选取的典型剖面进行拉应力复核,采用混凝土抗拉强度标准值对闸墩最大拉应力进行安全评价。闸墩和孔口部位的混凝土为 $C_{90}40$,其抗拉强度标准值为 3.2 MPa;底孔周围区域的混凝土为 $C_{180}35$,其抗拉强度标准值为 2.8 MPa。复核结果如表 1 所示。

表 1 典型剖面最大拉应力复核 MPa

典型剖面	最大拉应力		抗拉强度标准值
	方案 1	方案 2	
1-1	0.608	0.616	3.2
2-2	2.882	2.209	3.2
3-3	0.278	0.446	3.2

从表 1 中看出,典型剖面的最大拉应力仍未超过混凝土的抗拉强度标准值,故闸墩应力水平符合要求。

4 结 论

(1) 通过对底孔预应力闸墩的应力和变形分析,在施工工况下,两种 U 型锚索布置方案下的预应力闸墩和大梁的应力水平均满足规范要求,位移并未出现不连续和突变的现象,因而闸墩和大梁在结构上是安全的。

(2) 通过对典型剖面上特征点的应力和位移的对比分析,方案 1 特征点的应力水平比方案 2 趋于平均,两种方案下特征点的位移相差不大。可见,锚索布置顺序对最终的结果影响不大,主要是在布置过程中研究闸墩的应力和变形。

(3) U 型锚索能够改善闸墩的应力状态,保证闸墩安全运行,本文的研究思路可为 U 型锚索布置设计和研究提供参考。同时需指出如何对预应力闸墩的安全进行评估仍未规范,而锚索的施工顺序对闸墩的受力状态需进一步地研究。

参考文献:

- [1] 蒋文双. U 形锚索在预应力闸墩上的锚固优化研究[D]. 南宁:广西大学,2012.
- [2] 郝晓飞,李守义,李萌,等. 锚索预应力衰减与失效对结构的稳定影响分析[J]. 水资源与水工程学报,2016,27(6):169-173.
- [3] 张博. 超大吨位预应力闸墩变形与强度分析[D]. 大连:大连理工大学,2017.
- [4] 张燕,周围,邵敬东,等. 大岗山水电站深孔闸墩 U 形预应力锚索优化设计[J]. 人民长江,2014,45(11):64-67.
- [5] 唐克东,孙留颖. 基于 ANSYS 的预应力闸墩结构布置研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),2014,35(4):23-26.
- [6] 王竞,何蕴龙,白新革. 角木塘水电站预应力闸墩三维有限元分析与配筋方案研究[J]. 中国农村水利水电,2017(8):170-176.
- [7] 陈晓年,王美斋,赵洪岭. 泄水闸预应力锚索的设计与研究[J]. 水利水电技术,2013,44(12):38-40+50.
- [8] 唐迎旭,杨君,吴银刚,等. 两种锚固型式下大推力预应力闸墩有限元分析[J]. 人民珠江,2017,38(1):87-90.
- [9] 潘家军,徐远杰,费胜. 水电站预应力闸墩三维有限元分析[J]. 中国农村水利水电,2007(9):92-95+99.
- [10] 王俊. 沙沱水电站闸墩预应力锚索设计优化[C]//贵州省岩石力学与工程学会 2014 年学术年会论文集,2014.
- [11] 王佳妍,张宏战,马震岳. 水电站预应力混凝土蜗壳锚索布置方案研究[J]. 水利与建筑工程学报,2018,16(3):228-234.
- [12] 尹华安,邓兴富. 溪洛渡拱坝高位导流底孔布置优化及结构设计[J]. 水电站设计,2014,30(3):1-5.
- [13] 李守义,郭晓晶,董华峰,等. 预应力锚固闸墩有限元分析研究[J]. 水资源与水工程学报,2007,18(6):35-38.
- [14] 陈强,黄欣,廖桂英. 预应力闸墩设计相关技术问题的调研与探讨[J]. 水电站设计,2014,30(3):16-20.
- [15] 武锐,刘晓青,李宏恩,等. 基于子模型法的高拱坝导流底孔预应力闸墩三维有限元分析[J]. 三峡大学学报,2017,39(1):25-29.
- [16] 焦永存. 高拱坝闸墩预应力 U 型锚索工法综合评判研究[D]. 重庆:重庆大学,2013.