DOI:10.3880/j.issn.1006-7647.2019.05.013

折叠液压坝支撑结构工作特性有限元分析

俞昊捷[1,2],沈振中[1,2],徐力群[1,2],张宏伟[1,2],林　杰[1,2]

(1.河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏 南京　210098;
2.河海大学水利水电学院,江苏 南京　210098)

摘要:为了探究折叠液压坝支撑结构在坝体升降过程中的工作特性,结合某实际工程,采用三维有限元法,研究了加固后的折叠液压坝支撑结构在不同面板启闭角度下应力的变化规律,分析了坝前泥沙淤积高度对支撑结构工作特性的影响。结果表明:该工程在导致液压坝破坏的实际溢流水头作用下,支撑连杆主应力最大值随着面板启闭角度的增大先增大后减小,其最危险的开启角度为45°;支撑连杆座主应力最大值随面板启闭角度的增大先减小后增大,最后再减少,其最危险的开启角度为0°;地锚螺栓最危险截面平均拉应力在面板开启角度45°时出现峰值59.46 MPa,平均剪应力在面板开启角度0°时出现峰值75.56 MPa,平均应力值均大幅低于加固前值,且均能够满足安全要求,表明加固后的折叠液压坝支撑结构安全可行;坝前泥沙淤积对折叠液压坝支撑结构稳定性具有不利影响。

关键词:液压坝;折叠支撑结构;开启角度;工作特性;应力;变形;有限元法

中图分类号:TV314　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1006-7647(2019)05-0083-06

Operating characteristics of support structure for a folding hydraulic lifting dam by FEM//YU Haojie[1,2], SHEN Zhenzhong[1,2], XU Liqun[1,2], ZHANG Hongwei[1,2], LIN Jie[1,2] (1. *State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering*, *Hohai University*, *Nanjing* 210098, *China*; 2. *College of Water Conservancy and Hydropower Engineering*, *Hohai University*, *Nanjing* 210098, *China*)

Abstract: To explore the characteristics of the support structure for a folding hydraulic lifting dam during operation, combined with a practical project, the stress change laws after reinforcement under different opening angles were analyzed by FEM. Also, the effects of sediment deposition height in front of the dam on the support structure were analyzed. The results show that under the pressure of actual overflow head which led to the destruction of hydraulic lifting dam, the maximum value of the principal stress in the folding strut first increases and then decreases with the increase of opening angle. The most dangerous working angle is 45°. As the opening angle increases, the maximum value of the principal stress in the support seat first decreases, then increases, and decreases at last. Its most dangerous working angle is 0°. At the opening angle of 45°, the average tensile stress in the anchor bolt reaches the peak of 59.46 MPa. At the opening angle of 0°, the average shear stress in the anchor bolt reaches the peak of 75.56 MPa. The average stress is lower than that before reinforcement, indicating that the support structure is safe and feasible. The sediment deposition before the dam mainly has an adverse effect on the stability of the folding support structure.

Key words: hydraulic lifting dam; folding support structure; opening angle; operating characteristic; stress; deformation; finite element method

液压坝是一种依靠液压支撑系统升降挡水面板的低水头挡水水工建筑物,可调节坝体高度,具备挡水溢流、放水泄洪等功能。液压坝不但能够克服土石坝不易调节水量、容易发生滑坡,自动翻板坝抗洪水冲刷能力差、易受漂浮物卡阻,橡胶坝易受损、使用寿命短等缺点,而且能够实现全机械化操控,方便运行与管理,同时具有保护生态、美化城市河道景观的作用[1-6]。折叠液压坝是在普通直推式液压坝的基础上进行修改的新型液压坝,其与普通直推式液压坝的主要区别在于它取消了整根支撑杆的结构形式,以支撑销锁定结构代之。折叠液压坝的支撑系统为折叠式支撑结构,其主要支撑构件分为上、下连杆,两者中间通过支撑销连接,并配有锁定液压缸,下支撑杆底部铰接于固定铰支座。

普通直推式液压坝在立坝和降坝时的工作特性已有一些研究成果[7-12]。折叠液压坝的支撑连杆在

基金项目:国家自然科学基金雅砻江联合基金(U1765205);江苏高校优势学科建设工程资助项目(水利工程)(YS11001)
作者简介:俞昊捷(1994—),男,硕士研究生,主要从事水工结构设计分析理论及试验技术研究。E-mail:1561334575@qq.com

面板启闭时位置不断发生变化,致使折叠支撑系统在坝体升降过程中工作特性复杂,支撑结构的强度和稳定性有待深入分析。目前对新型折叠液压坝的研究,尤其是对其支撑结构的强度安全和稳定性分析几近空白,制约了新型折叠液压坝的推广和应用。本文依据安徽省某折叠液压坝工程的实际情况,建立三维有限元模型,采用有限元软件 ABAQUS,对新型折叠液压坝启闭过程进行三维仿真模拟,分析其支撑结构在坝体升降过程中应力变形的变化规律,确定危险的工作状态,以期为将来设计、改进和应用新型折叠液压坝提供参考。

1 折叠液压坝支撑结构

液压坝工程通常包括挡水面板、支撑杆、液压杆、液压缸、液压泵站和控制室。其中,多根支撑杆间隔分布在挡水面板下游侧,由液压杆带动支撑杆移动。普通直推式液压坝的支撑杆为独立整根直杆,每根支撑杆上端连接面板背面中上部,下端安装于底部滑槽内,通过支撑杆下端在滑槽内的移动实现支撑面板的启闭,并由滑槽内的限位卡确定支撑杆的支撑高度。

新型折叠液压坝启闭支撑结构采用折叠支撑形式,支撑结构组成构造与支撑连杆座细部结构分别见图 1、图 2。由图 1 和图 2 可见,一组折叠式支撑结构包括一根上支撑连杆、两根下支撑连杆、支撑销、液压杆、耳板、耳板底座、底部钢板、角焊缝和地锚螺栓。其中,上、下连杆铰接于支撑销,并在支撑销处发生折叠;液压缸带动液压杆上下移动,产生顶托支撑杆折叠和收拢的启闭力;支撑连杆座由耳板、耳板底座及底部钢板组成,角焊缝将耳板底座焊接于底部钢板上表面;底部钢板通过地锚螺栓布置于底部基础之上。当需要折叠液压坝卧坝行洪时,上、下支撑连杆能够折叠收拢,不但能够降低支撑液压油缸的推力行程,节约油缸成本[13],而且还能节省支撑连杆下放后的空间;当需要立坝拦水时,折叠液压坝的上、下连杆展开,支撑住面板进行挡水。折叠支撑系统可以自由固定液压坝升坝高度,不受限于限位卡的数量和位置。

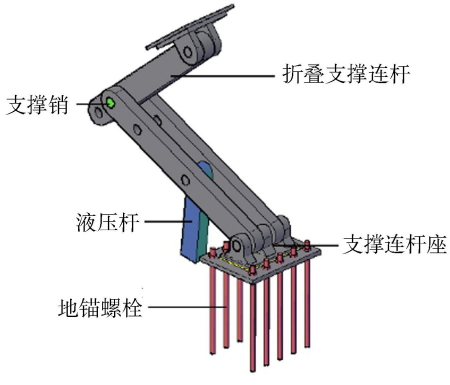

图 1 支撑结构组成构造

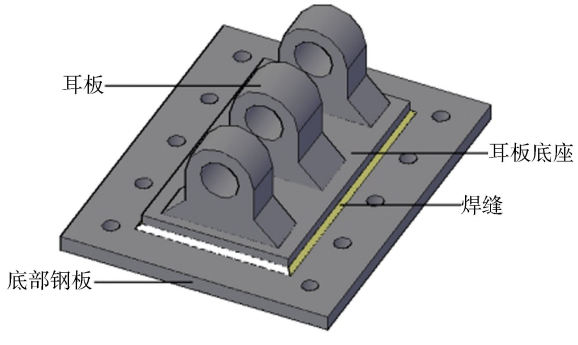

图 2 支撑连杆座细部结构

2 实例工程概况及计算参数

安徽省某新型折叠液压坝,坝长 108 m,坝体面板分 15 节,单节面板宽 7.2 m,每节面板配备两组折叠支撑结构,面板可启闭角度为 0° ~ 78°。折叠液压坝设计拦水高度 3.4 m,包括正常拦水高度 3.2 m 以及设计溢流水头 0.2 m。折叠液压坝可整体启闭,也可根据需要一节或数节坝体自行局部启闭。该工程建成不久,在一次洪水中被破坏,发生数节液压坝支撑杆座扳起、部分坝体倒塌的事故,为了修复液压坝,重新拟定了加固方案,更改了地锚螺栓的型号,并相应增加了地锚螺栓的数量。折叠液压坝主体材料采用 Q235 钢,支撑销材料采用 45 号钢,角焊缝宽度 10 mm,底部钢板厚度 30 mm,底部钢板通过地锚螺栓与基础锁紧固定,坝底基础为钢筋混凝土。原始方案中,采用 6 根 M16 的地锚螺栓固定每块底部钢板;后续加固方案中,更换为 10 根 M33×800(8.8 级)的地锚螺栓。本文针对加固方案,研究支撑系统的工作特性,论证加固方案的合理性。

根据折叠液压坝加固方案建立液压坝三维有限元模型,如图 3 所示,三维有限元模型包括单节折叠液压坝挡水面板、支撑结构、旋转底轴与埋件,以及钢筋混凝土基础。模型所采用坐标系为右手系,规

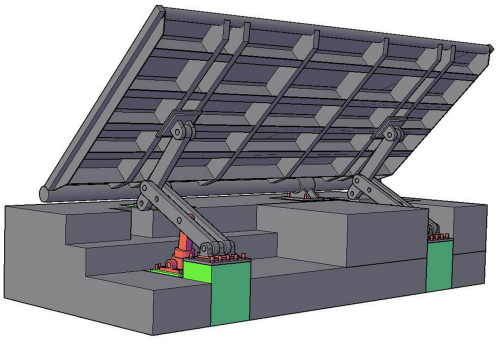

图 3 三维有限元模型

定为：x 轴方向为水平垂直水流方向，右岸指向左岸方向为正；y 轴方向为平行水流方向，逆水流方向为正；z 轴方向为垂直地基方向，竖直向上方向为正。

由于单节折叠液压坝具有对称性，因此以单节面板的中轴线所在平面为对称面，截取单节液压坝模型的一半进行有限元分析计算。在模型的截断处边界设置轴对称约束，在地基的侧边界设置法向约束，在地基的底边界设置三向约束。折叠支撑结构的有限元网格剖分见图 4。如图 4 所示，剖分网格时模型总体采用 8 节点等参单元，网格类型采用 C3D8R。由于需要考虑模型内部某些相邻零部件接触面上的摩擦行为和法向传力，具体包括以下部位：耳板底座与底部钢板之间的接触面，底部钢板与混凝土基础之间的接触面，地锚螺栓与底部钢板之间的接触面，故在模型内设置相应的接触，定义法向接触关系为“硬接触”，即法向接触压力值无限制；定义切向接触关系为“库伦摩擦”，即切向接触力未达到静摩擦临界值则不发生相对滑动。本文计算所用材料参数如表 1 所示。

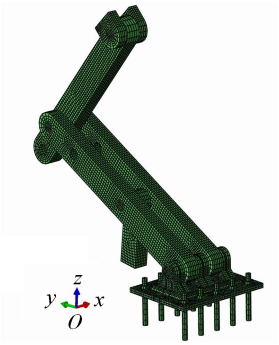

图 4　支撑结构三维有限元网格

表 1　材料参数

材料	密度/(kg·m^{-3})	弹性模量/GPa	泊松比
液压坝主体	7850	210	0.3
支撑销	7850	210	0.3
角焊缝	7850	225	0.3
混凝土	2400	28	0.2

3　折叠支撑结构工作特性分析

为分析新型折叠支撑结构在面板不同启闭角度下的工作特性，选取多个面板启闭角度（0°、13°、28°、38°、45°、58°、68°、78°）分别进行计算分析。折叠液压坝启闭过程中，其受力与坝体上下游水流流态（堰流和淹没出流）密切相关，而且还存在动水压力。根据本工程折叠液压坝实际运行情况，有限元计算进行了一些简化，所采用的水头边界为导致加固前液压坝破坏的溢流水头，规定如下：上游侧水头取为液压坝开启各角度下的面板挡水高度值，加上设计溢流水头 0.2 m，下游侧水头通过线性插值求取，具体方法为：当面板关闭至 0°时，下游侧水头取 0；当面板开启至 78°时，下游侧水头取设计拦水高度 3.4 m 时形成淹没出流的下游水头最大临界值；当面板开启角度为 0°～78°之间时，下游侧水头取 0 和 78°开启度时下游侧水头之间的线性插值。

3.1　启闭过程中支撑连杆应力的变化规律

上、下支撑连杆的主应力最大值随面板启闭角度的变化见图 5。如图 5 所示，折叠液压坝支撑连杆处主应力最大值随面板的开启先增大后减少。当面板关闭至 0°时，支撑连杆主应力最大值较小，故面板关闭时支撑连杆不承担主要支撑力；随着面板慢慢开启，支撑连杆开始承受越来越多的支撑力，支撑连杆处主应力最大值随之升高。支撑连杆最危险工作角度为 45°。当面板启闭至 45°时，支撑连杆的第一主应力最大值达到峰值 225.40 MPa，为谷值 36.13 MPa 的 6.24 倍；第三主应力最大值亦达到峰值−228.70 MPa，为谷值−69.18 MPa 的 3.31 倍。当面板开启角度超过 45°，支撑连杆的主应力最大值逐渐减少，其承担的支撑力逐渐减少。

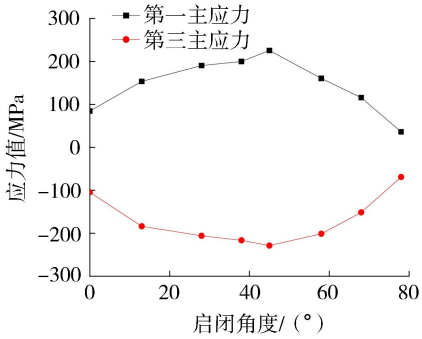

图 5　支撑连杆主应力最大值随面板启闭角度的变化

铰接上、下支撑连杆的支撑销在面板开启角度为 13°～58°时，其主拉应力最大值均大于 45 号钢的屈服强度值，此时支撑销局部超过屈服阶段。支撑销主拉应力最危险峰值出现在面板启闭 45°时，该启闭角度下的支撑销应力分布见图 6。图 6 中灰色区域超过屈服阶段，可见该区域位于上、下支撑连杆

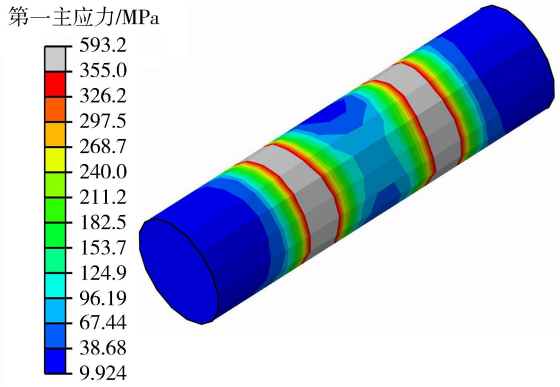

图 6　面板启闭 45°时的支撑销主拉应力云图

相切处,其中主拉应力最大值为 593.20 MPa,超过屈服强度值 0.67 倍。据此,建议将支撑销替换为强度更高的钢材,防止金属疲劳而造成结构破坏。

3.2 启闭过程中支撑连杆座应力的变化规律

支撑连杆座各部件主应力最大值随面板启闭角度的变化见图 7。从图 7 中可以看出:①耳板、耳板底座和底部钢板处主应力随面板启闭变化的规律相近似。②支撑连杆座处主应力最大值随面板开启的总体变化趋势为先减小后增大,最后再减少。③面板开启角度 0°时,支撑连杆座第一主应力最大值达到峰值 140.10 MPa,支撑连杆座第三主应力最大值达到峰值-108.00 MPa,峰值区域均位于耳板底座与底部钢板相焊接处。④支撑连杆座最危险工作角度为 0°。⑤当面板关闭至 0°,支撑连杆座承受主要支撑力;当面板开启至 45°,支撑力主要由支撑连杆座与支撑连杆共同承受;当面板开启角度超过 45°,支撑连杆座承受的支撑力逐渐减少。

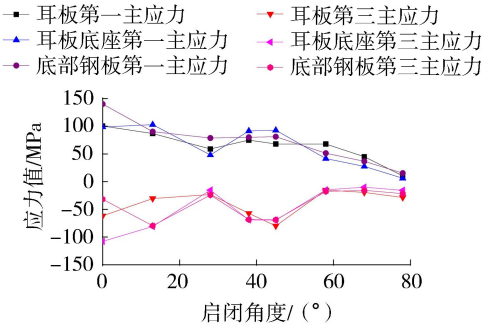

图 7 支撑连杆座主应力最大值随面板启闭角度的变化

面板启闭 0°~45°时,角焊缝的主拉应力最大值超过角焊缝强度设计值。面板启闭 45°时角焊缝的主拉应力分布见图 8,图中灰色区域处应力值超出抗拉强度设计值,该区域均位于角焊缝转角处,究其原因,主要是角焊缝在转角处发生形态突变,由此产生应力集中。从图 8 中可以看到,角焊缝主拉应力最大值为 594.40 MPa,超出抗拉强度设计值 2.72 倍。据此,建议加宽焊缝、增加焊缝与材料的咬合面积、提高焊条材料强度,并对焊缝的 4 个角进行加固,防止角焊缝处发生破坏。

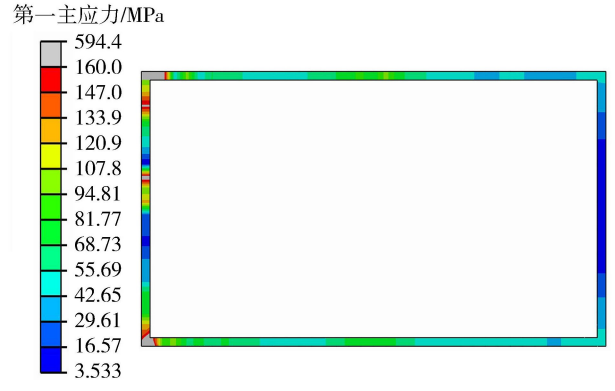

图 8 面板启闭 45°时的角焊缝主拉应力云图

3.3 启闭过程中地锚螺栓应力的变化规律

地锚螺栓最危险工作截面为底部钢板下表面与钢筋混凝土基础上表面的相切平面所在的截面,对地锚螺栓该截面进行数据分析,得到加固后的地锚螺栓最危险截面处平均拉应力、平均剪应力随门页启闭角度的变化曲线,如图 9 所示。由图 9 可见,其平均拉应力在面板开启 0°至 45°时稍有起伏变化,但变化较小,大致呈上升趋势,而后在面板开启 45°至 78°时出现直线下降;其平均剪应力在面板完全闭合时最大,在面板开启 0°至 13°时出现直线下降且下降速度较快,在面板开启 13°至 78°时依然保持递减趋势,但递减的速率减缓。

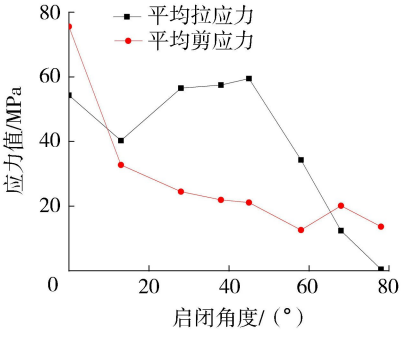

图 9 螺栓最危险截面平均应力随面板启闭角度的变化

加固后的地锚螺栓最危险截面平均拉应力在面板开启角度 45°时出现峰值 59.46 MPa,平均剪应力在面板开启角度 0°时出现峰值 75.56 MPa,平均应力值均能够满足安全要求[14];相比之下,在原始方案中,地锚螺栓最危险截面平均拉应力在面板开启角度 45°时出现峰值 421.53 MPa,平均剪应力在面板开启角度 0°时出现峰值 535.69 MPa,均超出地锚螺栓的强度设计值。由此可见,在安全加固方案中,地锚螺栓最危险截面的平均应力值较加固前大幅度降低,用加固方案中的地锚螺栓固定折叠液压坝支撑结构是安全可靠的。同时可以看出,当面板关闭至 0°时,地锚螺栓最危险截面主要承受剪力;当面板开启角度 13°~58°时,地锚螺栓最危险截面主要承受拉力;当面板开启角度 58°~78°时,地锚螺栓最危险截面主要承受剪力。

3.4 坝前泥沙淤积的影响

坝前有泥沙淤积的情况下,折叠液压坝的启闭力与附带泥沙的重量、泥沙对面板的压力等因素紧密相关[15-17]。本文计算了折叠液压坝在面板启闭角度分别为 45°和 58°,坝前泥沙淤积高度分别为 1.02 m 以及 0 时的折叠支撑结构各部位的应力及变形(或安全系数),计算结果见表 2 和表 3。

由表2和表3可以看出:①与泥沙淤积高度0

表 2　不同用泥沙淤泥高度下地锚螺栓应力及安全系数

启闭角度/(°)	淤积高度/m	平均拉应力/MPa	平均剪应力/MPa	抗拉安全系数	抗剪安全系数
45	1.02	59.46	21.09	6.73	15.17
	0	58.56	20.82	6.83	15.37
58	1.02	34.30	12.58	11.66	25.44
	0	33.92	12.34	11.79	25.92

表 3　不同泥沙淤积高度下支撑结构各部位应力及变形

部位	启闭角度/(°)	淤积高度/m	第一主应力/MPa	第三主应力/MPa	总变形/mm
支撑连杆	45	1.02	225.40	−228.70	11.69
		0	218.70	−224.50	11.47
	58	1.02	160.50	−201.20	6.54
		0	157.10	−197.10	6.43
铰支座	45	1.02	92.84	−69.67	0.14
		0	93.16	−69.95	0.13
	58	1.02	67.90	−17.83	0.86
		0	66.97	−17.59	0.84
底部钢板	45	1.02	81.10	−68.95	0.15
		0	81.36	−69.22	0.14
	58	1.02	51.39	−17.83	0.06
		0	50.67	−17.59	0.05
角焊缝	45	1.02	594.40	−396.20	0.18
		0	595.50	−397.60	0.17
	58	1.02	86.12	−5.16	0.07
		0	84.94	−5.07	0.06

时相比,泥沙淤积高度 1.02 m 时,地锚螺栓截面所承受的平均拉应力与平均剪应力更大,其抗拉安全系数与抗剪安全系数更低。②支撑连杆的主应力最大值随着泥沙淤积高度的增加而增大。③当液压坝启闭角度为 45°时,支撑连杆座处的主应力最大值随着泥沙淤积高度的增大而减少;当液压坝启闭角度为 58°时,支撑连杆座处的主应力最大值随着泥沙淤积高度的增大而增大。针对变化规律的不同,究其原因,主要是折叠液压坝在启闭过程中,面板的重心位置发生上下移动,外界荷载的合力也随启闭角度的变化而上下移动,面板重心和合力的相对位置不断发生变化,从而出现不同的变化规律。④支撑结构各部件的变形值随着泥沙淤积高度的增大而增大。综合以上各点,泥沙淤积对折叠支撑结构产生不利影响,建议定期清理坝前淤积泥沙。

4　结　论

a. 当面板关闭至 0°时,主要由支撑连杆座承担面板支撑力;当面板开启 0°~45°时,由支撑连杆与支撑连杆座共同承担面板支撑力;当面板开启超过 45°时,支撑连杆座与支撑连杆承受的面板支撑力均减小。

b. 当面板关闭至 0°时,地锚螺栓最危险截面主要承受剪力;当面板开启 13°~58°时,地锚螺栓最危险截面主要承受拉力;当面板开启 58°~78°时,地锚螺栓最危险截面主要承受剪力。加固方案中,地锚螺栓最危险截面处平均拉应力及平均剪应力较加固前均大幅度降低,加固方案安全可行。

c. 当面板开启 13°~58°时,支撑销主拉应力最大值超过材料屈服强度值,建议将支撑销替换为强度更高的钢材。当面板开启 0°~45°时,角焊缝转角处主拉应力最大值超过强度设计值,建议加固焊缝。

d. 随着坝前泥沙淤积高度的增大,支撑连杆及地锚螺栓截面处的应力值增大,支撑结构整体稳定性变差,总变形增大,建议定期清除坝前淤积泥沙。

参考文献:

[1] 杨利. 液压升降坝在亳清河景观工程中的应用[J]. 山西水土保持科技, 2017(3): 47-48. (YANG Li. Application of hydraulic lifting dam in landscape engineering of Haoqing River[J]. Soil and Water Conservation Science and Technology in Shanxi, 2017(3): 47-48. (in Chinese))

[2] KIRCHHERR J, CHARLES K J, WALTON M J. Multi-causal pathways of public opposition to dam projects in Asia: a fuzzy set qualitative comparative analysis (fsQCA)[J]. Global Environmental Change, 2016, 41(8): 33-45.

[3] LOKTEFF R L, ROPER B B, WHEATON J M. Do beaver dams impede the movement of trout?[J]. Transactions of the American Fisheries Society, 2013, 142(4): 1114-1125.

[4] CANTERO-CHINCHILLA F N, CASTRO-ORGAZ O, DEY S, et al. Nonhydrostatic dam break flows. II: one-dimensional depth-averaged modeling for movable bed flows[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 142(12): 04016069.

[5] ZATORSKI M, BUCZEK K, FRANCZAK P. The structural control of a landslide development and functioning of a lake geoecosystem in the catchment area of the Hucianka Stream (the Outer Carpathians, Beskid Niski)[J]. Limnological Review, 2015, 15(3): 129-142.

[6] 石桂萍. 城市河道治理设计中几种拦河建筑物型式的分析比较[J]. 水利规划与设计, 2013(6): 62-64. (SHI Guiping. Analysis and comparison of several types of block structures in urban river regulation design[J]. Water Resources Planning and Design, 2013(6): 62-64. (in Chinese))

[7] 陈业银, 任华春, 朱水生. 液压升降坝工作原理及结构性态分析[J]. 水电能源科学, 2012, 30(7): 69-72. (CHEN Yeyin, REN Chunhua, ZHU Shuisheng. Structural performance and operating principle analysis of hydraulic lifting dam[J]. Water Resources and Power, 2012, 30(7): 69-72. (in Chinese))

[8] 谢良平. 液压升降坝泄流特性试验研究[D]. 太原: 太

原理工大学, 2017.
[9] 李礼. 液压坝底板铰支座计算分析[J]. 山西水利科技, 2018(3):1-3. (LI Li. Calculation and analysis of hinged support in bottom plate of hydraulic movable dam [J]. Shanxi Hydrotechnics, 2018(3): 1-3. (in Chinese))
[10] 马贵友, 朱水生, 李强. 高寒地区大型液压升降坝设计问题探讨[J]. 人民长江, 2016, 47(10): 62-64. (MA Guiyou, ZHU Shuisheng, LI Qiang. Design discussion on hydraulic lifting dam in alpine region[J]. Yangze River, 2016, 47(10): 62-64. (in Chinese))
[11] 周建方, 李典庆, 李朝晖,等. 水工钢闸门结构正常使用极限状态可靠度分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2003, 31(3): 310-313. (ZHOU Jianfang, LI Dianqing, LI Zhaohui, et al. Reliability analysis of hydraylic steel gate structures in limit service state[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2003, 31(3): 310-313. (in Chinese))
[12] 李俊, 汪基伟, 冷飞. 扩展有限元法及其在钢筋混凝土结构中的应用综述[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(3): 106-113. (LI Jun, WANG Jiwei, LENG Fei. Review of extended finite element method and its application in reinforced concrete structures [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(3): 106-113. (in Chinese))
[13] 刘明军, 罗业成, 李学义. 新型液压拦河坝特点与优势[J]. 中国水利, 2016(15): 74-74. (LIU Mingjun, LUO Yecheng, LI Xueyi. Features and advantages of new hydraulic barrage dam[J]. China Water Resources, 2016(15): 74-74. (in Chinese))
[14] 刘小宁, 韩春鸣, 张红卫,等. 用许用可靠度确定螺栓的安全系数[J]. 石油化工设备, 2013(5): 24-28. (LIU Xiaoning, HAN Chunming, ZHANG Hongwei, et al. Determine bolt safety factor according to permissible reliability[J]. Petro-chemical Equipment, 2013(5): 24-28. (in Chinese))
[15] 吴培军. 多泥沙河流水力自控翻板闸门数值模拟及应用研究[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学, 2011.
[16] 侯莹. 淤沙对水力自控翻板闸门的影响研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2016.
[17] 徐国宾, 高仕赵, 訾娟. 淤泥对平面钢闸门启门力影响的计算方法[J]. 水利学报, 2012, 43(9): 1092-1096. (XU Guobin, GAO Shizhao, ZI Juan. Calculation method for effect of silt sediment to lifting force of plane gate[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(9):1092-1096. (in Chinese))

(收稿日期:2018-10-25 编辑:雷燕)

(上接第 72 页)

[17] SMITH P. Project cost management with 5D BIM[J]. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 2016,226: 193-200.
[18] 邱世超, 张社荣, 潘飞, 等. 基于 IFC 标准的大坝施工期 5D 进度成本信息模型研究及应用[J]. 水力发电, 2016, 42(2): 54-59. (QIU Shichao, ZHANG Sherong, PAN Fei, et al. Study and application of 5D schedule and cost information model of dam based on IFC standard during construction[J]. Water Power, 2016, 42(2): 54-59. (in Chinese))
[19] 刘健. H 公司项目进度和成本协同控制研究[D]. 成都:电子科技大学, 2015.
[20] 胡长明, 熊焕军, 龙辉元, 等. 基于 BIM 的建筑施工项目进度-成本联合控制研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2014, 46(4): 474-478. (HU Changming, XIONG Huanjun, LONG Huiyuan, et al. Study on cost and schedule combined control of 4D model based on building information modeling (BIM) [J]. Journal of Xian University of Architecture and Technology (Natural Science Edition), 2014,46(4): 474-478. (in Chinese))
[21] 陈立春, 赖华辉, 邓雪原, 等. IFC 标准领域层实体扩展方法研究[J]. 图学学报, 2015, 36(2): 282-288. (CHEN Lichun, LAI Huahui, DENG Xueyuan, et al. Study on the method of expanding entities of domain layer of IFC standard[J]. Journal of Graphice, 2015, 36(2): 282-288. (in Chinese))
[22] 张志伟, 何田丰, 冯奕, 等. 基于 IFC 标准的水电工程信息模型研究[J]. 水力发电学报, 2017, 38(2): 83-91. (ZHANG Zhiwei, HE Tianfeng, FENG Yi, et al. Industry foundation classes-based hydroelectric engineering information model [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017, 36(2): 83-91. (in Chinese))
[23] 赵春菊, 胡超, 周宜红. 基于 OGRE 的碾压混凝土坝施工过程可视化仿真系统[J]. 水利水电科技进展, 2013, 33(4): 41-45. (ZHAO Chunju, HU Chao, ZHOU Yihong. Visual simulation system of RCC dam construction process based on OGRE[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, 33(4): 41-45. (in Chinese))
[24] WANG K C, WANG W C, WANG H H, et al. Applying building information modeling to integrate schedule and cost for establishing construction progress curves [J]. Automation in Construction, 2016, 72: 397-410
[25] WILLIAMS D L. Oracle primavera P6 version 8: project and portfolio management [M]. Birmingham: Packt Publishing Ltd, 2012.
[26] HUANG J W, PAN H M, LI Y, et al. Cost/schedule monitoring and forecasting for project based on earned value management (EVM) [J]. Advanced Materials Research, 2014,919/920/921:1437-1440.

(收稿日期:2019-01-15 编辑:雷燕)