

水电站充水保压蜗壳结构仿真分析

刘波^{1,2}, 伍鹤皋¹, 孙海清¹

(1. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072; 2. 长江勘测规划设计研究院, 武汉 430010)

摘要: 应用面-面接触非线性理论, 考虑钢蜗壳与外围混凝土的接触滑移, 分别对断面直径大小不同的轴对称充水保压蜗壳模型进行了施工、逐级加压过程的仿真计算, 主要对钢蜗壳打压后的变形、蜗壳与混凝土的间隙及其应力变化过程三方面进行研究。计算结果表明, 若蜗壳断面直径较大, 水重对钢蜗壳打压后的变形以及逐级加压过程中钢蜗壳与外围混凝土的间隙变化过程影响较大, 但对应力变化影响较小; 若蜗壳断面直径较小, 水重对上述三方面的影响都很小; 无论蜗壳断面直径大小, 是否考虑蜗壳与支墩的接触滑移对上述三方面的影响都较大。

关键词: 水工结构; 仿真分析; 接触非线性; 充水保压蜗壳

中图分类号: TV31; TV731

文献标识码: A

Simulation and analysis of preloaded-filling spiral case in hydropower station

LIU Bo^{1,2}, WU Hegao¹, SUN Haiqing¹

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072;
2. Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Wuhan 430010)

Abstract: Surface-to-surface contact nonlinear theory was applied to the contact slippage between spiral case and surrounding concrete and two axisymmetric FEM models have been developed for preloaded-filling spiral case of different cross-sectional diameters. By simulating all courses of the construction and successive pressurizing, this study focuses on three factors, deformation of steel spiral case under preloaded filling pressure, gap value between spiral case and its surrounding concrete and their stress variations. The result shows that if the diameter is large, water weight has great impact on the case deformation and the variation of gap value, while little impact on the stress variations. If the diameter is small, water weight has little impact on the three factors. Whatever the diameter large or small, consideration of the contact slippage between spiral case and its surrounding concrete is crucial to the results of three factors.

Key words: hydraulic structure; simulation analysis; contact non-linearity; preloaded-filling spiral case

0 引言

充水保压蜗壳是钢蜗壳在充水加压的状态下浇筑外包混凝土, 属于部分联合承载结构, 钢蜗壳与外包混凝土之间的荷载分配比例可以根据需要选择。机组运行时, 钢蜗壳能贴紧外包混凝土, 使座环、蜗壳与大体积混凝土结合成整体, 增加了机组基础的刚度, 以承受运行时动水压力引起的交变荷载和变形, 同时也增加了其抗疲劳性能, 有利于机组的稳定运行。如果电站设计时提前考虑采用充水保压蜗壳结构并采取相应措施, 所占机组安装的直线工期也不长, 不会影响机组按期投产。因此, 充水保压蜗壳在三峡、二滩、广州抽水蓄能电站、十三陵抽水蓄能电站等大型工程中得到了应用, 并将有良好的发展前景。

充水保压蜗壳与垫层、直埋蜗壳相比, 施工工艺较为复杂; 施工、运行过程中, 钢蜗壳与外围混凝土之间的缝隙变化是众多科研工作者关注的重点。文献 [1, 2] 未考虑钢蜗壳与外围混凝土的间隙, 对三峡水电站充水保压蜗壳进行了平面非线性分析, 得到了钢蜗壳、钢筋的应力和外围混凝土的开裂、损伤情况; 文献 [3 ~ 5] 采用仿真

收稿日期: 2010-06-30

基金项目: 国家自然科学基金(51179141)

作者简介: 刘波(1983-), 男, 博士, wave0912@163.com; 伍鹤皋(1964-), 男, 教授, wbf1988@vip.sina.com

算法模拟实际施工的全过程,得到了钢蜗壳和混凝土之间的缝隙开度及钢蜗壳、混凝土的应力在施工、运行中的变化规律,并与传统的简化算法进行了对比,一致认为采用仿真算法更符合充水保压蜗壳的实际运行情况;文献[7,8]考虑温度荷载作用,对三峡水电站充水保压蜗壳进行三维仿真计算,分析了在不同季节、不同水位运行期钢蜗壳与外围混凝土之间的传力和可能存在的间隙。

如何建立合理的有限元模型,模拟充水保压蜗壳结构的实际施工和运行过程,是至今尚未很好解决的课题。钢蜗壳充水打压后的变形情况受蜗壳内的水重、蜗壳与支墩的初始接触状态、保压值等因素的影响,并将决定蜗壳与混凝土之间的缝隙开度以及钢蜗壳、混凝土的应力在施工、运行中的变化规律,这都是以往很多学者未曾深入研究的课题。本文采用大型通用有限元程序 ANSYS,结合两个水电站地下厂房充水保压蜗壳的施工实际,通过接触非线性计算,实现了蜗壳进口断面保压浇筑混凝土的施工仿真并进行对比分析,研究蜗壳打压后的变形情况,钢蜗壳与外围混凝土的间隙变化,并对钢蜗壳及外围混凝土的应力变化过程进行了细致深入的分析,可以为今后充水保压蜗壳的设计提供参考。

1 施工仿真过程

本文基于 ANSYS 软件提供的面-面接触摩擦模型,钢蜗壳与外围混凝土的摩擦系数根据经验取 0.25,采用的施工仿真分析过程为:①计算混凝土浇筑前钢蜗壳的打压变形情况,混凝土鞍形支墩按照实际情况进行模拟;②按照打压变形后的钢蜗壳形状,引入保压浇筑的混凝土单元,并将外包混凝土的内边界修改至蜗壳打压后的位置,钢蜗壳与保压浇筑的混凝土单元间设置面-面接触单元;③卸去蜗壳内水压力,这样蜗壳与外围混凝土之间便形成了预压缝隙;④逐级施加内水压力直至实际运行水头,模拟蜗壳运行情况。

2 计算模型与条件

2.1 计算模型及材料参数

计算选取 A、B 两水电站地下厂房,蜗壳进口断面直径相差较大,分别为 9.06m 和 3.95m,蜗壳设计内水压力分别为 1.70MPa 和 3.13MPa。计算时,取蜗壳进口断面附近包含一个完整固定导叶在内的扇形区域为研究对象(见图 1),高程从尾水管直锥段底部至定子基础,外侧至机组段分缝处,假定为轴对称问题进行计算。

计算模型底部施加固定约束,前后两端面施加法向约束;其他按自由面考虑。钢蜗壳、固定导叶采用四结点平面板壳单元模拟;围岩、外围混凝土和座环上下环板采用八结点六面体单元模拟;钢蜗壳与外围混凝土的相对滑移采用面-面接触单元(conta173 - targe170)模拟。A、B 两计算模型的材料参数见表 1。

2.2 荷载及计算方案

电站正常运行时与水轮机蜗壳有关的荷载包括:①定子基础板所受的轴向力;②下机架基础板所受的轴向合力;③水轮机层楼面活荷载;④结构各部分自重;⑤蜗壳内设计水压力,保压水压力皆为设计内水压力的 70%,便于对比分析。

A、B 两水电站蜗壳进口断面结构类似,但断面直径和运行水头相差较大,为探讨钢蜗壳内的水重及钢蜗壳与支墩的初始接触状态在蜗壳充水打压及运行过程中对蜗壳结构受力特性的影响,采取 5 种对比计算方案见表 2。

3 计算结果分析

3.1 钢蜗壳打压后的变形分析

钢蜗壳打压后各特征点径向位移及蜗壳整体变形见图 2,各特征点位置见图 1。

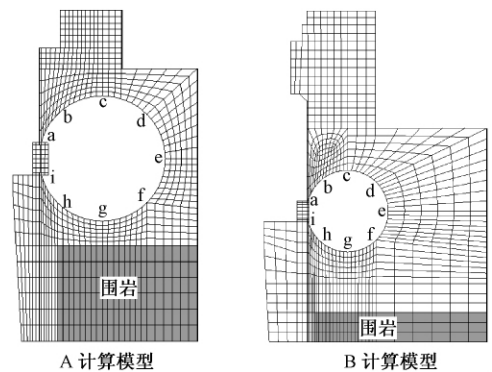


图 1 FEM 计算模型

Fig. 1 Model of FEM Computation

表 1 材料参数

Table 1 Parameters of materials

材料	钢蜗壳、座环	混凝土	围岩(A)	围岩(B)
容重 / $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	78.5	25	27	25.8
弹性模量 / GPa	206	28	15	18
泊松比 μ	0.3	0.167	0.2	0.22

表 2 计算方案

Table 2 Schemes of Computation

方案	计算模型	蜗壳内的水重	钢蜗壳与支墩的接触滑移
A1	A	考虑	考虑
A2	A	不考虑	考虑
A3	A	考虑	不考虑
B1	B	考虑	考虑
B2	B	不考虑	考虑

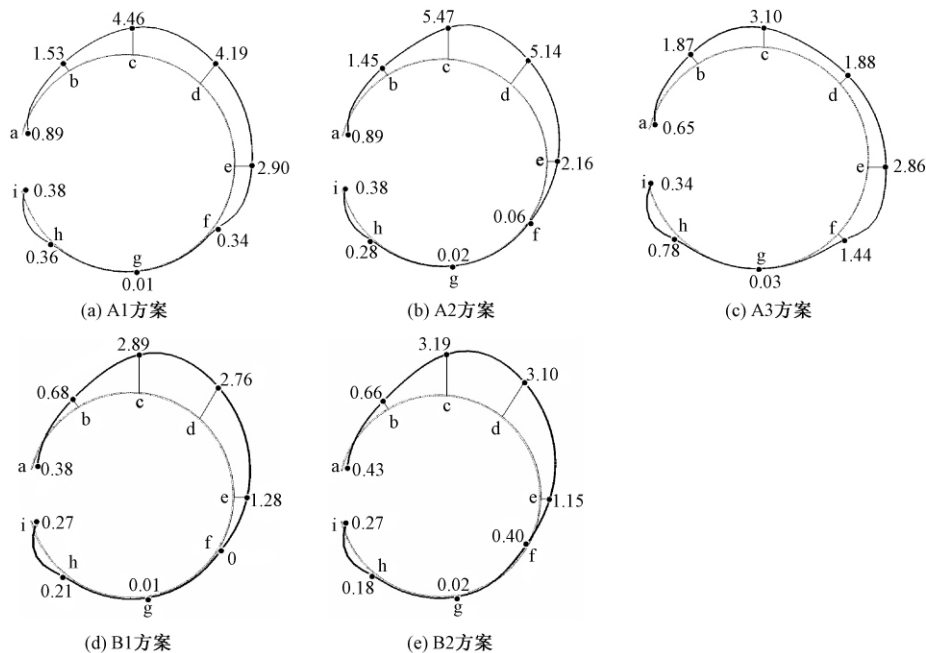


图2 蜗壳打压后的径向位移(单位: mm)

Fig. 2 Radial displacements under preloaded pressure(unit: mm)

从图2可以看出:(1)蜗壳充水打压后,上、下环板附近出现沿径向向内较小的位移,支墩部位的径向位移都很小,其他部位大都为沿径向向外较大的位移;(2)A1、A2方案相比,计算时是否考虑蜗壳内的水重对蜗壳打压后的位移影响较大,A1方案沿支墩外缘分别至座环底部和蜗壳腰部间的部位,径向位移呈突变增加的趋势,而A2方案则呈均匀过渡的趋势;A1、A2方案整个断面的最大径向位移都位于c点附近外侧,数值分别为4.63mm和6.58mm,两者相差达42.1%;(3)对比B1、B2方案可以看出,两者打压后的形态相似;B1、B2方案整个断面最大径向位移也都位于c点附近外侧,但数值分别为3.33mm和3.77mm,两者相差仅13.2%,说明蜗壳直径较小时计算是否考虑水重对蜗壳变形影响相对较小;(4)A3方案与A1方案相比,打压时未考虑蜗壳与支墩的接触滑动,致使支墩两端的径向位移显著增大,腰线上45°位置显著减小,整个断面最大径向位移则出现在支墩外侧至腰部的中间位置,数值为3.68mm。

3.2 钢蜗壳与混凝土的间隙分析

为详细分析钢蜗壳卸压后再次逐级施加内水压力(p)直至设计内水压力(p')过程中钢蜗壳与混凝土的间隙变化过程,图3整理了各方案部分特征点处的间隙值随各级荷载的变化。

从图3可看出,钢蜗壳卸压后再次加压前($p/p'=0.0$),保压浇筑的混凝土在重力作用下产生了一些变形,致使钢蜗壳不能完全恢复到打压前的状态,各特征点处钢蜗壳与混凝土的间隙值与蜗壳打压后的径向变形值(见图2)存在一定的差异,当蜗壳内的水压力达到设计内水压力时钢蜗壳与混凝土的间隙均为闭合状态。

蜗壳顶部c点、腰线上45°处d点,钢蜗壳与混凝土的间隙在A1方案0.1倍设计内水压力前变化不大,而后逐渐减小直至闭合,而在A2方案中从开始加压一直减小直到间隙闭合为止;A1方案腰部e点在开始加压时缝隙值的减小幅度比方案A2大;支墩外侧f点钢蜗壳与混凝土的间隙在A2方案中先减小后增大最后闭合,而在A1方案中从开始加压一直减小,说明蜗壳断面直径较大时是否考虑钢蜗壳内的水重对钢蜗壳与混凝土间隙的闭合过程有一定的影响。

再次逐级加压过程中,当内水压力达到0.7倍设计内水压力时,A1方案仅腰部e点有0.03mm的间隙,而A3方案b、d、e点分别还有0.24、0.01、0.26mm的间隙;A1方案在 $p/p'=0.8$ 时所有间隙已闭合,而A2方案在 $p/p'=0.9$ 时b点还有0.01mm的间隙,直至内水压力达到设计内水压力时所有间隙才闭合,说明是否考虑支墩处钢蜗壳与混凝土的接触滑动对钢蜗壳与混凝土间隙的闭合时机有一定影响。

对比B1、B2方案,两者钢蜗壳与混凝土的间隙变化规律一致,闭合时机相同,说明蜗壳断面直径较小时钢蜗壳内的水重对钢蜗壳与混凝土的间隙闭合过程影响不大。

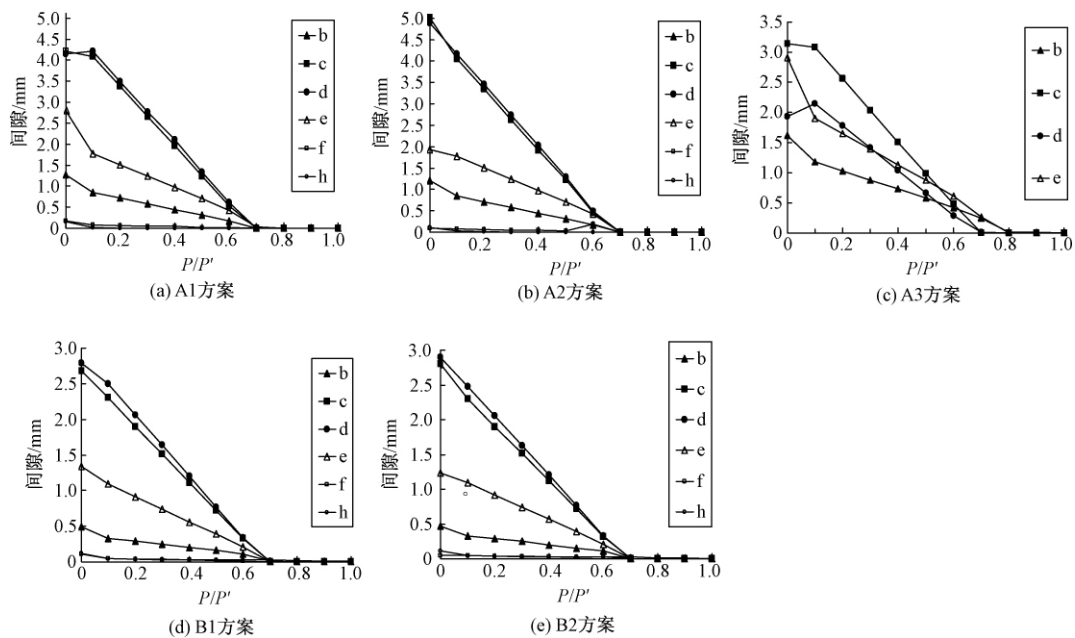


图3 钢蜗壳与混凝土的间隙随各级荷载的变化

Fig.3 Variations of gap between spiral case and its surrounding concrete

3.3 钢蜗壳及外围混凝土的应力分析

计算结果表明:对断面直径大、小两计算模型,钢蜗壳及外围混凝土的应力受蜗壳内水重的影响均较小,但支墩与钢蜗壳的接触关系对其影响较大,为此,以下主要分析 A1 和 A3 方案各特征点处钢蜗壳及外围混凝土的环向应力随各级内水压力的变化过程,分别见表 3 和表 4。

表 3 钢蜗壳环向应力随各级荷载的变化

		Table 3 Variations of tangential stress in the steel spiral case					MPa				
计算方案		A1 方案					A3 方案				
特征点		a	c	e	g	i	a	c	e	g	i
卸压后		-1.48	-0.32	-0.48	-0.93	-0.33	-0.82	-0.32	-0.48	1.37	-1.09
逐级加压 p/p'	10%	15.96	14.18	14.55	10.03	13.73	16.96	14.18	14.55	4.86	9.54
	30%	51.16	43.07	42.65	37.59	43.99	52.11	43.02	42.69	8.56	29.58
	50%	86.43	71.93	70.73	64.20	72.46	87.25	71.84	70.82	12.26	45.96
	70%	120.40	99.31	98.31	90.65	99.06	122.11	99.80	98.60	15.85	54.48
	90%	134.05	105.96	103.50	95.01	106.23	140.87	110.56	111.26	19.33	62.22
	100%	140.32	108.92	106.32	97.02	109.71	147.20	113.51	114.52	21.06	66.01

表 4 外围混凝土环向应力随各级荷载的变化

		Table 4 Variations of tangential stress in the surrounding concrete					MPa				
计算方案		A1 方案					A3 方案				
特征点		c	d	e	f	g	c	d	e	f	g
卸压后		0.31	-0.11	-0.65	-0.16	0.26	0.29	-0.11	-0.64	-0.15	0.17
逐级加压 p/p'	10%	0.46	-0.66	-1.13	-0.13	0.52	0.47	-0.61	-1.14	-0.17	0.54
	30%	0.42	-0.59	-1.05	-0.14	0.47	0.49	-0.39	-1.12	-0.26	0.94
	50%	0.39	-0.51	-0.98	-0.16	0.45	0.51	-0.16	-1.09	-0.35	1.33
	70%	0.35	-0.41	-0.87	-0.10	0.41	0.53	0.10	-1.02	-0.45	1.71
	90%	0.68	0.45	-0.24	0.37	0.74	0.76	0.81	-0.55	-0.34	2.07
	100%	0.86	0.88	0.07	0.62	0.91	0.94	1.24	-0.24	-0.19	2.25

从表 3 可以看出,钢蜗壳卸压后不能完全恢复到打压前的状态,在外围混凝土的约束下钢蜗壳内产生了一定的初始应力,A1 方案各特征点环向应力均为压应力,座环顶部 a 点环向压应力为 -1.48MPa; A3 方案 g、i 两点由于受到较强的支墩约束作用,钢蜗壳的环向应力分别为 1.37MPa 和 -1.09MPa; A3 方案蜗壳上半周 (a、c、e 三点) 受支墩约束的影响较小,应力变化过程与 A1 方案大致相同,在内水压力达到保压值前,钢蜗壳与混凝土间存

在一定的间隙,蜗壳应力增加较快,此后钢蜗壳与混凝土的间隙接近闭合,直至紧密结合,蜗壳应力增加较为缓慢; A3 方案蜗壳下半周(g、i 两点) 受到支墩较强的约束作用,与 A1 方案相比蜗壳应力有所减小且分布不均,应力增加也较为缓慢。

卸压后在自重作用下两方案外围混凝土的环向应力分布大致相同,蜗壳顶部和底部的混凝土环向处于受拉状态,腰部处于受压状态。逐级加压过程中,当蜗壳内水压力小于保压水压力时, A1 方案钢蜗壳与外围混凝土大部分处于脱开状态,外围混凝土环向应力较小,达到保压水压力时蜗壳底部 g 点的环向应力仅 0.41 MPa; A3 方案未考虑钢蜗壳与支墩的接触滑移,支墩处 g 点混凝土环向拉应力增加相对较快,达到保压水压力时为 1.71 MPa。当蜗壳内水压力大于保压水压力时,两方案钢蜗壳与混凝土的间隙大部分开始闭合,外围混凝土的环向拉应力增加较快,达到设计内水压力时缝隙都完全闭合,蜗壳底部 g 点外围混凝土的环向应力最大, A1、A3 方案分别为 0.91 MPa 和 2.25 MPa。考虑支墩与混凝土的接触滑移使得下半周外围混凝土的环向应力减小,整个断面的应力分布更加均匀,对混凝土的受力更加有利。

4 结语

本文根据蜗壳进口断面直径大、小不同的两水电站工程实际,基于接触非线性理论,建立充水保压蜗壳进口断面的局部轴对称模型,采用仿真算法对钢蜗壳打压后的变形、钢蜗壳与混凝土的间隙和应力变化过程进行了细致深入的研究,得出如下结论:

1) 水重对蜗壳打压变形的影响与蜗壳断面直径有一定的关系,断面直径较大时,水重对打压后蜗壳变形的影响较大;断面直径较小时,水重对打压变形的影响较小。此外,蜗壳与支墩的接触关系对打压变形的影响也较为显著,若不考虑钢蜗壳与混凝土支墩间的接触滑移,支墩两端的蜗壳径向位移明显增大,腰线上 45° 位置蜗壳径向位移显著减小。

2) 在卸压后再次逐级加压的过程中,若蜗壳断面直径较大,水重对各特征点处蜗壳与外围混凝土间隙的变化过程有一定影响;若蜗壳断面直径较小,则水重对上述的影响很小。支墩与混凝土的接触关系对蜗壳与混凝土间隙的闭合时机有一定的影响。

3) 水重对断面直径大、小两种情况的钢蜗壳及外围混凝土的应力变化过程影响都不大,但支墩与蜗壳的接触关系对其变化影响较大。考虑蜗壳与混凝土的接触滑移,支墩附近钢蜗壳及外围混凝土的应力分布较均匀。

参考文献:

- [1] 伍鹤皋,马善定,白建明. 三峡水电站充水保压蜗壳平面非线性分析 [J]. 水利学报, 2003, (5): 57-61.
WU Hegao, MA Shanding, BAI Jianming. 2-D nonlinear analysis for the spiral case of Three Gorges Power Station [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, (5): 57-61. (in Chinese)
- [2] 王海军,练继建,闫晓荣,等. 三峡水电站钢蜗壳外围混凝土损伤分析 [J]. 四川大学学报(工程科学版), 2006, 38(4): 24-28.
WANG Haijun, LIAN Jijian, YAN Xiaorong, et al. Concrete damage analysis of the spiral case structure of Three Gorges power station [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2006, 38(4): 24-28. (in Chinese)
- [3] 许新勇,李敏芝,马震岳,等. 基于非均匀间隙的充水保压蜗壳施工仿真分析 [J]. 水力发电学报, 2009, 28(4): 75-80.
XU Xinyong, LI Minzhi, MA Zhenyue, et al. Simulation and analysis of the constant internal pressure spiral case with non-uniform gap [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009, 28(4): 75-80. (in Chinese)
- [4] 李文富,李锦成,赵小娜. 水电站充水预压蜗壳结构的应力仿真算法研究 [J]. 水力发电, 2004, 30(3): 52-54.
LI Wenfu, LI Jicheng, ZHAO Xiaona. The study on stress simulation of the preloading filling spiral case of hydropower station [J]. Journal of Hydroelectric Power, 2004, 30(3): 52-54. (in Chinese)
- [5] 申艳,伍鹤皋,蒋逵超. 大型抽水蓄能电站充水保压蜗壳结构分析 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2008, 36(5): 97-99.
SHEN Yan, WU Hegao, JIANG Kuichao. Research on preloading filling spiral case structure in large pumped storage power station [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition), 2008, 36(5): 97-100. (in Chinese)
- [6] 林绍忠,苏海东. 水电站蜗壳保压浇筑混凝土结构的三维仿真分析 [J]. 水利学报, 2002, (1): 66-70.
LIN Shaozhong, SU Haidong. 3-D FEM analysis for surrounding concrete of steel spiral case keeping internal pressure during construction [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, (1): 66-70. (in Chinese)
- [7] 崔建华,苏海东,陈琴. 三峡左岸电站蜗壳保压浇筑外围混凝土仿真计算 [J]. 长江科学院院报, 2009, 26(7): 43-47.
CUI Jianhua, SU Haidong, CHEN Qin. 3-D FEM emulation computation on surrounding concrete of steel spiral case keeping internal pressure during construction for TGP [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2009, 26(7): 43-47. (in Chinese)