

# 大型水电站充水保压蜗壳结构联合承载分析

郭 涛, 张立翔, 姚 激

(昆明理工大学 建筑工程学院, 昆明 650224)

**摘要:**蜗壳结构是电站厂房的核心结构物, 因此准确获取其应力、应变状态是至关重要的。通过数值计算, 采用简化算法对某水电站保压蜗壳结构进行了应力状态和变形情况分析, 并与直埋方案做了对比研究, 结果表明: 从限裂方面考虑保压蜗壳结构有利于机组的安全稳定运行, 该水电站采取充水保压埋设方式是合理的; 蜗壳外围混凝土各截面最大拉应力值出现在蜗壳顶部, 该机组设计保压值偏低, 选取 1.9 MPa 保压值比较合理; 蜗壳外围混凝土的结构应力值主要是由内水压力所引起的, 上部荷载影响很小, 仅占 5%~24% 左右。

**关键词:**蜗壳; 简化算法; 结构; 充水保压

中图分类号: TV731 文献标志码: A 文章编号: 1674-4764(2011)04-0080-05

## Joint Bearing Analysis for the Preloading Water-filled Spiral Case of Lager Hydropower Station

GUO Tao, ZHANG Li-xiang, YAO Ji

(Department of Engineering Mechanics, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650051, P. R. China)

**Abstract:** Spiral case is the core structure of powerhouse, therefore, it is critical to obtain its accurate stress and strain. Simplified algorithm is adopted to analyze the mechanical characteristics of preloading water-filled spiral case of a large hydropower project. The numerical results show that the adoption of preloading water-filled spiral case structure is feasible. The maximum stress of surrounding concrete mainly lies in the top of spiral case structure at various sections. The suitable internal pressure is 1.9 MPa. The stress of surrounding concrete of spiral case is mainly caused by water pressure, and the effect of upper loading is limited, which is only about 5% to 24%.

**Key words:** spiral case; simplification algorithm; structure; preloading water-filled spiral case

随着能源需求的不断增加, 拟建或建成了大批高水头、大容量水电站, 发电机组单机容量越来越大, 蜗壳的 HD 值也急剧增长, 水电站结构的设计和安全运行面临新的挑战。蜗壳埋设方式的选择不仅影响电站厂房的设计和施工工期, 还决定了钢蜗壳和混凝土之间的承载比例, 因此选择合理的蜗壳埋

设方式, 是确保大型水电站机组安全稳定运行的关键问题之一。

目前较常见的埋设方式有: 直埋方式、垫层埋设方式、充水保压埋设方式。3 种埋设方式各有优缺点, 若从承担荷载的工作机理来讲都属于钢蜗壳和外围混凝土联合承载结构, 区别在于联合承载的方

收稿日期: 2010-12-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50839003、11002063); 云南省自然科学基金资助项目(2008GA027、2009ZC035M)

作者简介: 郭涛(1983-), 男, 博士生, 主要从事流固耦合数值模拟及水电站建筑物结构分析研究, (E-mail) guotaoj@126.com。

张立翔(通讯作者), 男, 教授, 博士生导师, (E-mail) zlxzcc@126.com。

式和程度各有不同。充水保压埋设方式作为一种部分联合承载结构,可以量化的控制蜗壳和外围混凝土承载的比例,在减少混凝土开裂的同时又满足了整体刚度的要求,减少了机组振动和变形,有利于机组稳定运行且便于施工。尤其对大型机组和抽水蓄能机组更重要,因此在国内外被广泛采用。在国外,对中高水头的大机组电站如美国的大古里电站、巴西的伊泰普电站、加拿大的麦卡、拉格朗德二级、丘吉尔瀑布、委内瑞拉古里及高水头、大容量抽水蓄能机组,无一例外,均采用充水保压蜗壳。中国以往大中型水电站多采用垫层方案,其中单机容量最大的是李家峡水电站,之后随着更多的大型机组和抽水蓄能电站的建设,中国开始较多的在水电事业的建设中采用充水保压蜗壳,如三峡左岸<sup>[1]</sup>、二滩<sup>[2]</sup>、小湾及天荒坪、十三陵、广州、西龙池<sup>[3]</sup>、回龙<sup>[4]</sup>、潘家口等抽水蓄能机组。

## 1 计算方法

充水保压埋设方式,最早是由美国田纳西流域管理局在20世纪30年代提出和推广的,国外在这方面的研究开展的比较早<sup>[5-9]</sup>。近年来随着中国水电事业的发展,充水保压蜗壳在中国有更广阔的应用前景,对其结构型式的研究也方兴未艾,在结构模型的建立与改进、联合承载结构的结构形式研究<sup>[1-3,10]</sup>、保压值优化<sup>[4,11]</sup>、分析方法<sup>[12-13]</sup>、模型试验<sup>[14]</sup>、温度影响<sup>[15]</sup>、蜗壳外围混凝土非线性分析<sup>[16-17]</sup>、及施工技术<sup>[18]</sup>等方面均取得了开创性成果。以糯扎渡水电站为算例,在收集和总结前人经验的基础上,以Ansys软件为平台,采用在模型上改进的简化算法分析了充水保压蜗壳结构外围混凝土的应力状态和变形情况,为该机组保压水头的选取提出工程建议,并与直埋方案做了比较,综合说明保压蜗壳的优势。

目前,对于保压蜗壳结构在数值计算中主要有2种算法,即简化算法和仿真方法<sup>[19]</sup>。在不着重考虑钢衬应力和变形的情况下,简化算法实用和简单,工程应用实践较多,它忽略了蜗壳与混凝土间的接触和初始缝隙对蜗壳结构的影响,当钢蜗壳与外围混凝土完全联合承载(两者紧贴)时,只计算超出保压水头那部分剩余水压力作用下,所得结构的应力

就是运行工况下外围混凝土上的真实应力。迄今中国大型机组保压蜗壳结构外围混凝土的应力计算,大多是采取简化算法,如三峡水电站<sup>[1]</sup>、二滩水电站<sup>[2]</sup>、十三陵抽水蓄能电站、广州抽水蓄能电站一期工程等。研究结果和实际工程观测资料显示,简化算法得到的蜗壳外围混凝土应力值小于实际应力值,文献<sup>[12]</sup>指出与仿真算法相比其相对误差在8%以下,其计算结果能满足工程需要,该文的计算亦采用了简化算法。

由于保压时蜗壳进口装设有闷头,闷头在保压水压力作用下所产生的轴向力对蜗壳膨胀亦有影响,因此在运行时,即使当蜗壳内水压力达到保压值时,钢蜗壳与外围混凝土两者也不会恰好紧贴,致使简化算法与实际存在差异。根据文献<sup>[1]</sup>采取在蜗壳进口的管壁端面人为的施加一个轴向力的方法来修正闷头带来的误差<sup>[1]</sup>。

## 2 算例

### 2.1 计算模型及工况

为便于与工程实际对比,选用云南境内某水电站蜗壳为例进行分析。该电站蜗壳采用保压浇筑混凝土的结构形式,总装机容量 $9 \times 650$  MW,蜗壳内正常运行水压力2.22 MPa,最大水压力(含水击压力)2.8 MPa,设计采用的保压值为1.8 MPa。计算模型截取一个机组段为研究对象,以机组段永久分缝为界,共34.0 m。上、下游向以厂房边墙为界,共29.0 m;竖向从高程578.5 m取至发电机层高程606.45 m,共计27.95 m。模型包括各层楼板、梁柱结构、风罩、蜗壳、座环、部分尾水管、蜗壳外围混凝土,以及各种廊道、吊物孔等孔洞结构。钢蜗壳、楼板采用壳单元划分,大体积混凝土采用八节点块体单元划分,钢筋采用管单元划分,梁柱采用梁单元划分,整体机组段共划分195 457个单元,117 451个结点,有限元模型如图1所示,其中蜗壳9 519个单元(不含座环),如图2所示,蜗壳外围环向钢筋8 927个单元(按配筋 $\varphi 32 @ 200$ 考虑,蜗壳上半部配双层),如图3所示。混凝土弹性模量为28 GPa,泊松比0.167,质量密度 $2 500 \text{ kg/m}^3$ ,钢材弹性模量为200 GPa,泊松比0.3,质量密度 $7 800 \text{ kg/m}^3$ 。

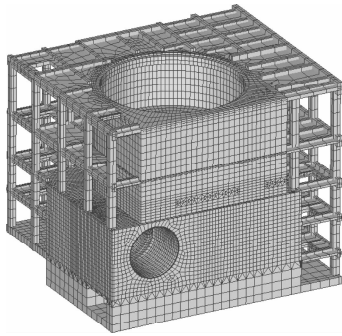


图 1 机组段整体有限元模型

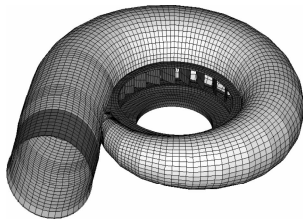


图 2 钢蜗壳网格

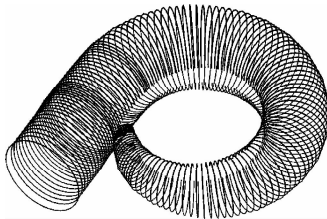


图 3 钢蜗壳外围环向钢筋网格

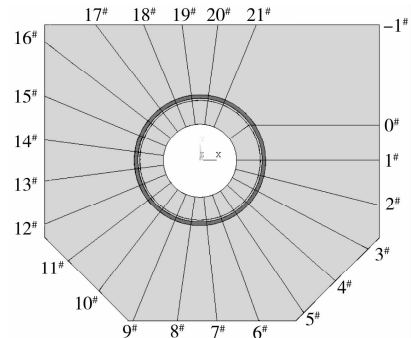
边界条件:模型底部围岩对混凝土的约束作用按刚性约束考虑,机组段分缝处无约束,上、下游边墙与围岩接触面按法向刚性约束。计算工况及荷载组合见表 1 所列。其中工况 3 为检修工况,工况 6 为直埋方案下的正常运行工况。楼板活荷载为:发电机层  $60 \text{ kN/m}^2$ ,中间层  $30 \text{ kN/m}^2$ ,水轮机层及以下  $40 \text{ kN/m}^2$ 。上机架、定子基础均有 14 个基础板,下机架 12 个基础板,机组正常运行时,上机架、下机架及定子基础每块基础板所受的竖向荷载分别为  $0.2372, 529 \text{ kN}$ ;径向荷载  $24, 0.342 \text{ kN}$ ;切向荷载为  $43, 0.461 \text{ kN}$ 。

表 1 计算工况及荷载组合

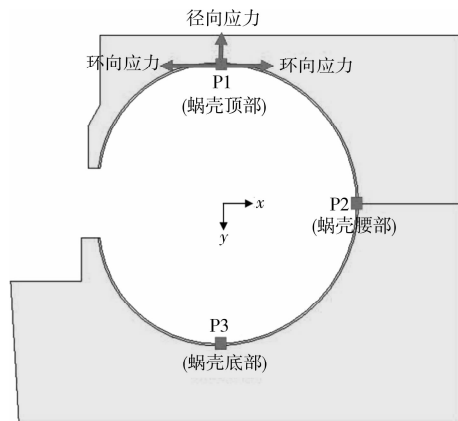
工况	保压值/ MPa	内水压力/ MPa	材料 自重	设备 自重	活荷载	机组运 行荷载
工况 1	1.8	2.80	✓	✓	✓	✓
工况 2		2.22	✓	✓	✓	✓
工况 3	—	0	✓	✓	✓	✓
工况 4	1.9	2.80	✓	✓	✓	✓
工况 5		2.22	✓	✓	✓	✓
工况 6		—	2.22	✓	✓	✓

## 2.2 结果分析

沿蜗壳水流方向的蜗壳分节情况,选取 23 个子午断面给出局部坐标下的计算结果。断面及关键点位置如图 4 所示。



(a)蜗壳外围混凝土断面位置示意图



(b)各子午断面关键点位置示意图

图 4 子午断面示意图

2.2.1 应力分析 蜗壳外围混凝土各关键点处的径向应力均为压应力且值很小,保压工况均在  $-0.6 \sim -0.8 \text{ MPa}$  之间,直埋工况最大值仅为  $-1.7 \text{ MPa}$ ,远小于混凝土抗压强度,不是主要控制指标,因此限于篇幅只列出各关键点的环向应力,如图 5—7 所示。

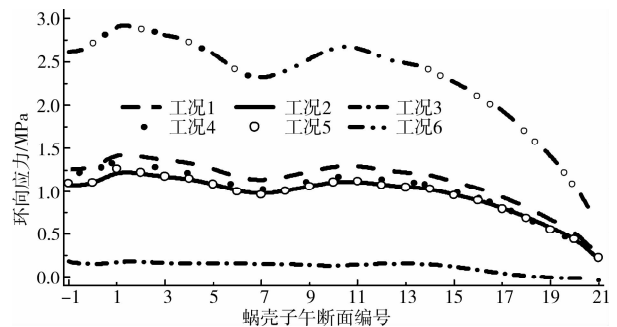


图 5 蜗壳外围混凝土顶部位置(P1点)环向应力分布曲线

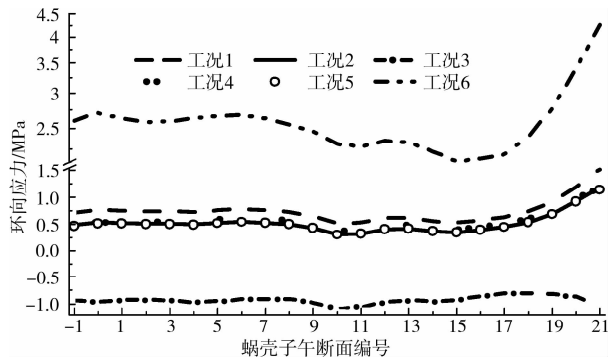


图6 蜗壳外围混凝土腰部位置(P2点)环向应力分布曲线

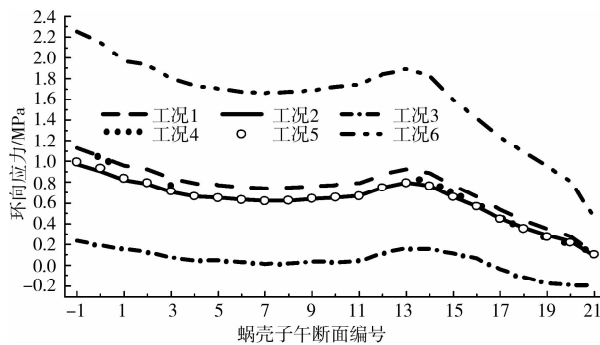


图7 蜗壳外围混凝土底部位置(P3点)环向应力分布曲线

由结果可知,直埋式蜗壳结构(工况6),在正常运行(2.22 MPa内水压力)情况下,与保压埋设蜗壳相比,蜗壳外围混凝土拉应力大幅增加,顶部和腰部大范围内超过了2.0 MPa且几乎贯穿了相应的混凝土结构,蜗壳混凝土全面出现贯穿性裂缝。

蜗壳外围混凝土环向应力均为拉应力。保压埋设蜗壳结构,各截面最大拉应力值出现在蜗壳顶部混凝土,蜗壳腰部和底部外围混凝土应力均小于混凝土设计抗拉强度。保压1.8 MPa,正常运行情况下(工况2)蜗壳外围混凝土环向拉应力均小于混凝土抗拉强度,最大值为1.24 MPa,出现在1号断面顶部位置。但是,当承受最大内压2.80 MPa时(工况1),在蜗壳1-4号子午断面顶部约20%区域的环向拉应力超过了混凝土抗拉强度1.3 MPa,最大值为1.45 MPa,出现在1号断面,拉应力超过1.3 MPa的区域分布深度约15 cm左右。当保压值取1.9 MPa时,在同等的内压作用下(工况4、5),蜗壳外围混凝土的最大拉应力均控制在1.3 MPa以下。因此,综合评定选择1.9 MPa的保压值较为合适。

检修工况(工况3)蜗壳外围混凝土各子午断面关键点应力均很小,最大值不超过0.2 MPa。由此可知,蜗壳外围混凝土结构应力值主要是由内水压力所引起的,结构自重和上部荷载的影响很小,仅占5%~24%左右。而应力的分布规律在蜗壳腰部和

底部,尤其是蜗壳底部主要是受结构自重和上部荷载的影响。

2.2.2 位移分析 蜗壳外围混凝土径向位移,在内水压力作用下,均表现为向外膨胀,保压浇筑蜗壳结构,最大位移0.25 mm发生在蜗壳进口端腰部位置(工况1),该位置混凝土厚度较薄。直埋式蜗壳结构,

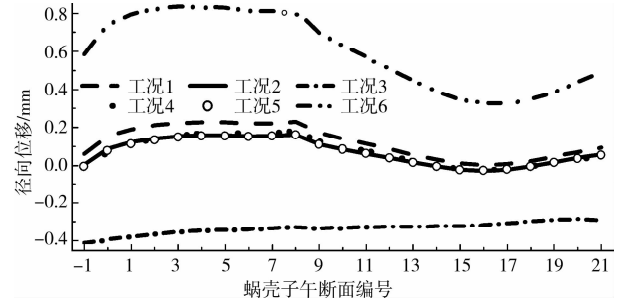


图8 蜗壳外围混凝土顶部位置(P1点)径向位移分布曲线

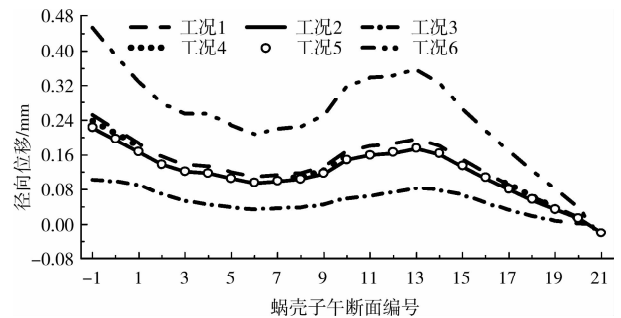


图9 蜗壳外围混凝土腰部位置(P2点)径向位移分布曲线

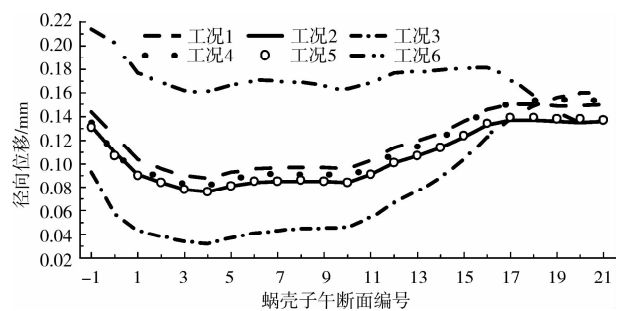


图10 蜗壳外围混凝土底部位置(P3点)径向位移分布曲线

位移值均较大,在蜗壳顶部超过0.8 mm。无内压力作用时(工况3),钢蜗壳对称面上部与混凝土处于分离状态,无内在支撑作用,因此在上部荷载的作用下,蜗壳顶部径向位移均为向内变形,最大位移-0.41 mm发生在蜗壳进口端顶部(该部位混凝土较薄)。说明内水压力对蜗壳外围混凝土的位移影响也很大,保压埋设蜗壳结构,有利于蜗壳外围混凝土位移的减小。

### 3 结论

在弹性计算基础上对充水保压蜗壳外围混凝土

应力状态及变形情况进行了分析,主要比较了不同方案及荷载的影响,经过分析可得出如下结论:

1)虽然保压蜗壳结构整体刚度没有直埋式蜗壳结构大,但是据上述应力、位移结果分析可知,从限裂角度考虑,“充水保压”埋设方式可以大幅度减小蜗壳外围混凝土拉应力,减少开裂和配筋率。因此该水电站钢蜗壳采用“充水保压”埋设方式是合适的。

2)文中以云南境内某水电站为算例,经过分析可知:蜗壳结构各截面最大拉应力值出现在蜗壳顶部混凝土,1.8 MPa的设计保压值略偏低,建议可适当提高为1.9 MPa,这样蜗壳外围混凝土拉应力基本能控制在混凝土的设计抗拉强度范围内,有利于机组的安全稳定运行。

3)蜗壳外围混凝土的应力主要是由内水压力引起的,结构自重和上部荷载的影响很小,仅占5%~25%。而应力分布规律在蜗壳腰部和底部,尤其是蜗壳底部主要是受结构自重和上部荷载影响。

#### 参考文献:

- [1] 秦继章,马善定,伍鹤皋,等.三峡水电站“充水保压”钢蜗壳外围混凝土结构三维有限元分析[J].水利学报,2001,6:28-32.  
QIN JI-ZHANG, MA SHAN-DING, WU HE-GAO, et al. 3-D FEM analysis for surrounding concrete of steel spiral case keeping constant internal pressure [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 6: 28-32.
- [2] 匡会健,伍鹤皋,马善定,等.二滩水电站钢蜗壳与外围钢筋混凝土联合承载研究:水电站压力管道·岔管·蜗壳[M].杭州:浙江大学出版社,1994.
- [3] 亢景付,孙少杰,张沁成.西龙池抽水蓄能电站蜗壳结构三维有限元计算分析[J].水力发电学报,2007,26(2):37-41.  
KANG JING-FU, SUN SHAO-JIE, ZHANG QIN-CHENG. 3D-FEM analysis on the spiral casing structure of Xilongchi pumped-storage hydropower station [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2007, 26(2): 37-41.
- [4] 熊卫,史仁杰,孙全胜.回龙抽水蓄能电站水轮机蜗壳充水加压值优化分析[J].红水河,2006,25(3):121-123.  
XIONG WEI, SHI REN-JIE, SUN QUAN-SHENG. Water filling pressurization analysis on turbine spiral case in Huilong pumped storage power station [J]. Hongshui River, 2006, 25(3): 121-123.
- [5] NIGAM PREM S, JAINO P, KANCHI MAHESH B. Stress in concrete around spiral case. American society of civil engineers [J]. Journal of the Power Division, 1976, 102(1): 95-111.
- [6] NIGAM PREM S, JAINO P, KANCHI MAHESH B. Comparative study of the prevalent design practices for the concrete surrounding spiral case of a ydrel power station [J]. Irrigation and Power, 1975, 32(1): 19-36.
- [7] KALKANI E C. Expected displacements and stress in the encasing concrete of a francis turbine scroll case [J]. Computers and Structures, 1995, 55(4): 13-21.
- [8] FAZALARE R W, LSRAELSEN R E. World-wide practices for embedding spiral case [J]. Hydro Review, 1989, 10: 55-58.
- [9] CASACCI DES S, MOULIN S C, BOSC J. Modern trends in very large hydraulic turbines [J]. Water power and Dam Construction, 1975, 27, 10: 63-68.
- [10] 伍鹤皋,田海平,李永祖.水电站混凝土蜗壳三维有限元分析[J].武汉大学学报:工学版,2007,40(5):53-57.  
WU HE-GAO, TIAN HAI-PING, LI YONG-ZU. Three dimensional finite element analysis of reinforced concrete spiral case of hydropower stations [J]. Engineering Journal of Wuhan University. 2007, 40(5): 53-37.
- [11] 聂金育,伍鹤皋,苏凯.抽水蓄能电站蜗壳保压值优化研究[J].水电能源科学,2009,27(1):151-154.  
NIE JIN-YU, WU HE-GAO, SU KAI. Study on optimizing precast water head of spiral case at pumped-storage power plant [J]. Water Resources and Power, 2009, 27(1): 151-154.
- [12] 李文富,李锦成,赵小娜.水电站充水保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 WEN-FU, LI JIN-CHENG, ZHAO XIAO-NA. The study on stress simulation of the preloading filling spiral case of hydropower station [J]. Water Power, 2004, 30(3): 52-54.
- [13] 王海军,黄津民,王日宣.充水保压钢蜗壳外围混凝土应力分析方法研究[J].中国农村水利水电,2007,6:131-136.  
WANG HAI-JUN, HUANG JIN-MIN, WANG RI-XUAN. Research on stress analysis method for periphery concrete of steel spiral case keeping internal water pressure [J]. China Rural Water and Hydropower, 2007, 6: 131-136.
- [14] 何勇,伍鹤皋,李杰,等.瀑布沟水电站充水保压蜗壳结构模型试验[J].天津大学学报,2009,42(5):400-406.  
HE YONG, WU HE-GAO, LI JIE, et al. Test of surrounding concrete of steel spiral case keeping constant internal water pressure in PuBuGou hydropower station [J]. Journal of TianJin University, 2009, 42(5): 400-406.

- European Physical Journal E, 2000(3):309-314.
- [11] 周健, 池永. 砂土力学性质的细观模拟[J]. 岩土力学, 2003, 24(6):901-906.  
ZHOU JIAN, CHI YONG. Mesomechanical simulation of sand mechanical properties[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(6):901-906.
- [12] KAMP T E, KONIEZKY L H, GUERIN F. Modeling of the Chagan underground nuclear test with the distinct element method [J]. International Journal of Blasting and Fragmentation, 1998(2):295-312.
- [13] 罗勇. 土工问题的颗粒流数值模拟及应用研究[D]. 杭州: 浙江大学土木工程系, 2007.
- [14] 周健, 史旦达, 贾敏才, 等. 砂土单调剪切力学性状的颗粒流模拟[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2007, 10(35):1299-1304.  
ZHOU JIAN, SHI DAN-DA, JIA MIN-CAI, et al. Numerical simulation of mechanical response on sand under monotonic loading by particle flow code[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2007, 10(35):1299-1304.
- [15] 曾远, 周健. 砂土的细观参数对宏观特性的影响研究[J]. 地下空间与工程学报, 2008, 4(3):499-503.  
ZENG YUAN, ZHOU JIAN. Influence of micro parameters of sandy soil on its macro properties[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2008, 4(3):499-503.
- [16] 贾敏才. 砂土地基振冲加固的试验研究及颗粒流模拟[D]. 上海: 同济大学, 2003.
- [17] 贾敏才, 王磊, 周健. 砂土振冲密实的细观颗粒流模拟[J]. 水利学报, 2009, 40(4):421-429.  
JIA MIN-CAI, WANG LEI, ZHOU JIAN. Meso-mechanics simulation on vibrocompaction of sand with two-dimensional particle flow code[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(4):421-429.

(编辑 王秀玲)

(上接第 84 页)

- [15] 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 SHAO-ZHONG, SU HAI-DONG. 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.
- [16] 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 HAI-JUN, LIAN JI-JIAN, YAN XIAO-RONG, 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.
- [17] 蒋逵超, 伍鹤皋, 申艳. 完全联合承载蜗壳三维非线性分析[J]. 水力发电学报, 2007, 26(1):71-76.  
JIANG KUI-CHAO, WU HE-GAO, SHEN YAN. Three-dimensional nonlinear analysis of complete bearing spiral case without cushion [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2007, 26(1):71-76.
- [18] 梁仁贵. 三峡水电站蜗壳保温保压施工介绍[J]. 西北水电, 2003, 3:20-23.  
LIANG REN-GUI. Construction of spiral case for Three Gorges project [J]. Northwest Water Power, 2003, 3:20-23.
- [19] 练继建, 王海军, 秦亮. 水电站厂房结构研究[M]. 中国水利水电出版社, 2007.

(编辑 胡玲)