

DOI :10.3880/j. issn. 1006-7647. 2009. 01. 016

西部三大水电工程地下厂房研究比较

武世婷¹ ,周广峰¹ ,张建海¹ ,李 杰² ,蒋 锋²

(1. 四川大学水利水电学院 ,四川 成都 610065 ; 2. 中国水电顾问集团成都勘测设计研究院 ,四川 成都 610072)

摘要 :系统地对比了锦屏一级、两河口、溪洛渡三大水电站地下厂房的主要地质特征、设计参数和围岩支护强度 ,采用三维有限元方法 ,计算分析其围岩变形特征以及破坏区分布特征 ,总结整理了 3 个工程的计算结果并与其他水电工程地下厂房进行了横向对比分析。为类似跨度 30 m 级洞室群稳定性评价和工程施工设计提供了参考依据。

关键词 :有限元法 ;地下洞室 ;围岩稳定 ;锦屏一级水电站 ;两河口水电站 ;溪洛渡水电站

中图分类号 :TV743 文献标识码 :B 文章编号 :1006-7647(2009)01-0061-05

Comparative study of three large underground powerhouses in West China //Wu Shi-ting¹ ,Zhou Guang-feng¹ ,Zhang Jian-hai¹ ,Li Jie² ,Jiang feng² (1. College of Water Resource & Hydropower , Sichuan University , Chengdu 610065 , China ; 2. Chengdu Hydroelectric Investigation Design and Research Institute of CHECC , Chengdu 610072 , China)

Abstract :The main geological characteristics , design parameters , and surrounding rock support strength of the Jinping I , Lianghekou and Xiluodu underground powerhouses are systematically compared. The deformation features and the distribution characteristics of the breaking area of the three large powerhouses are studied using the three-dimensional finite element method. The study results are summarized. A lateral comparison with other underground powerhouses is made. This study provides references for stability evaluation and construction design of cavern groups with similar spans (30 m).

Key words :FEM ; underground powerhouse ; surrounding rock stability ; Jinping I Hydropower Station ; Lianghekou Hydropower Station ; Xiluodu Hydropower Station

大型水电工程建设中 ,大跨度、高边墙的地下洞室是一种常用的发电厂房形式。地下厂房由于受到埋深变化大、高地应力、地质条件和地质构造复杂、厂房尺寸大、岩体强度和变形的不确定性、地下水等多种因素的影响 ,其设计和支护复杂而无规范可循 ,现在大部分工程仍然遵循的是“经验设计 ,经验施

工”的原则。
锦屏一级、两河口、溪洛渡三大水电工程同处西部 ,分别位于雅砻江大河湾干流河段、雅砻江干流与支流鲜水河的汇合口下游河段和金沙江下游河段 ,电站地下厂房的设计参数见表 1 ,厂房均采用大跨度、高边墙的地下洞室形式 ,且厂房跨度均接近

表 1 锦屏一级、两河口、溪洛渡水电站设计参数

工程名称	围岩类别	地应力	厂房轴线	开挖跨度
锦屏一级水电站	薄~中厚层大理岩夹绿片岩 ,以Ⅲ ₁ 类为主 ,部分为Ⅲ ₂ 和Ⅳ ₁ 类。	实测最大主应力为 35.7 MPa ,方 向 为 N48.7°W ,与岸坡走向近于垂直。	主 厂 房 轴 线 方 向 为 N65°W ,主 厂 房 吊 车 梁 以 上 29.2 m ,最大洞高为 68.7 m ,总 长 度 为 276.1 m。	主变室开挖跨度 18.8 m ,高度为 25.0 m ,总长度为 225.0 m ;尾水调压室中心线至主厂房中心线间距为 145 m ;主变室与主厂房净间距为 45 m ,与开挖跨度的比值 $L/B=1.54$,与洞高的比值 $L/H=0.66$ 。
两河口水电站	主厂房主要置于板岩、细砂岩中 ,副厂房为泥质粉砂岩 ,安装间主要为互层状砂板岩 ,以Ⅲ ₁ 类为主 ,部分为Ⅲ ₂ 类。	实测最大主应力为 23.6 MPa ,平均方向为 N46°E ,倾向坡外 ,略缓于岸坡。	厂 房 轴 线 方 向 为 N3°E ,主 厂 房 吊 车 梁 以 上 28.7 m ,最大洞高为 65.4 m ,总长度 285.12 m。	主变室开挖跨度为 18.8 m ,高度为 25.0 m ,总长度 196.08 m ;尾水调压室中心线至主厂房中心线间距为 133.65 m ;主变室与主厂房净间距为 45 m ,与开挖跨度的比值 $L/B=1.56$,与洞高的比值 $L/H=0.69$ 。
溪洛渡水电站	谷坡及河床基岩均为峨眉山玄武岩 ,厂房区以Ⅱ类岩为主。	实测最大主应力为 18.0 MPa ,方 向 为 NW65° ,与 河 流 方 向 SE50°小角相交。	厂 房 轴 线 方 向 为 N24°W ,主 厂 房 吊 车 梁 以 上 31.9 m ,最大洞高为 74.7 m ,总 长 度 为 397.0 m。	主变室开挖跨度为 20.0 m ,高度为 25.5 m ,总长度 352.89 m ;尾水调压室中心线至主厂房中心线间距为 146.5 m ;主变室与主厂房净间距为 49.4 m ,与开挖跨度的比值 $L/B=1.55$,与洞高的比值 $L/H=0.66$ 。

作者简介 武世婷(1984—) ,女 ,山西孝义人 ,硕士研究生 ,从事岩土工程数值分析研究。 E-mail :lina.wst@163.com

30 m ,洞室区地应力水平偏高 ,地质条件复杂。比较 3 个工程的异同点 ,对类似厂房跨度达到 30 m 级的大型地下厂房工程的设计施工具有重要的借鉴意义。表 2 为三大工程地下厂房的围岩力学参数。

表 2 锦屏一级、两河口、溪洛渡水电站围岩力学参数

岩体 代号	工程名称	变形模量/GPa		泊松 比 μ	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	抗剪强度参数	
		$E_{//}$	$E_{\perp}$			f'	c'/MPa
II	锦屏一级水电站	26.0	23.5	0.25	2700	1.35	2.00
	两河口水电站	23.0	12.0	0.22	2740	1.30	1.75
	溪洛渡水电站	21.5	14.0	0.20	2700	1.35	2.50
III ₁	锦屏一级水电站	12.0	10.5	0.25	2700	1.07	1.50
	两河口水电站	9.0	9.0	0.28	2720	1.00	1.25
	溪洛渡水电站	13.5	11.0	0.25	2600	1.22	2.20
III ₂	锦屏一级水电站	8.0	5.5	0.30	2700	1.02	0.90
	两河口水电站	6.0	6.0	0.28	2720	0.85	0.80
	溪洛渡水电站	6.0	5.0	0.25	2500	1.20	1.40

1 三大地下工程系统锚杆支护对比分析

本文用围岩黏聚力增量 Δc 来表示地下厂房系统锚杆的加固量：

$$\Delta c = \eta \frac{\tau_s S}{ab} \tag{1}$$

式中： τ_s 为锚杆的抗剪强度； S 为锚杆截面积； a, b 为锚杆纵横布置间距； η 为无量纲系数，与锚杆直径等因素有关， $\eta = 3 \sim 5$ ，此处取 $\eta = 3.5$ 。

式(1)在有限元数值模拟中常被用来反映锚杆的加固效应， Δc 越大，表明所采取的加固量越大^[1]。以式(1)评价系统锚杆锚固作用，得到国内部分地下厂房的加固量(表 3)。

综合考虑 $B, C_{\text{RMR}}, \sigma_1$ 与 Δc 的关系，绘制数据点，作多项式的一次拟合，可得

$$\Delta c = 0.00145B - 0.00134C_{\text{RMR}} + 0.00074\sigma_1 + \alpha \tag{2}$$

表 3 地下厂房系统锚杆黏聚力增量

工程名称	开挖跨度 B/m	岩体质量 分级值 C_{RMR}	最大主应力 σ_1/MPa	锚杆直径/ mm	锚杆纵间距 a/m	锚杆横间距 b/m	锚杆长度/ m	围岩黏聚力增量 $\Delta c/\text{MPa}$
江 口	19.2	80	7.38	25.0	1.5	1.5	8.0	0.1527
水布垭	21.5	60	5.62	28.5	1.5	1.5	8.0	0.2015
冶勒	22.2	40	8.80	25.0	1.5	1.5	7.0	0.2598
三板溪	22.7	40	14.50	28.0	1.2	2.4	9.0	0.1950
泰安	24.5	60	11.00	28.0	1.5	1.5	7.0	0.1915
小浪底	26.2	60	5.00	32.0	1.5	1.5	8.0	0.2502
大朝山	26.4	70	11.00	32.0	1.5	1.5	7.2	0.4065
瀑布沟	32.4	60	23.30	30.0	1.5	1.5	8.0	0.3909
龙滩	30.7	50	13.00	30.0	1.5	1.5	7.0	0.2209
向家坝	31.0	60	8.85	28.0	1.5	1.5	6.5	0.1915
三峡	32.5	80	11.73	28.0	3.0	3.0	3.0	0.0479
二滩	30.7	70	29.54	28.0	1.5	1.5	7.0	0.1916
佛子岭	25.3	70	1.30	28.5	1.5	1.5	4.5	0.2017
锦屏一级	29.2	50	35.70	32.0	1.5	1.5	7.0	0.2502
两河口	28.7	50	23.60	32.0	1.5	1.5	8.0	0.2502
溪洛渡	31.9	50	18.00	32.0	1.5	1.5	7.5	0.2502

式(2)在计算过程中不考虑单位，式中 α 为拟合值($\alpha = 0.15961 \sim 0.29758$)，取 $0.22736^{[2]}$ 。图 1 为厂房开挖跨度、最大主应力与围岩黏聚力增量之间的关系，由图 1 可以看出， $B > 0, \sigma_1 > 0$ ，说明地下厂房开挖跨度越大，最大主应力越大，所需要的支护也越多，这与工程实际相吻合。厂房开挖跨度、岩体质量分级值与围岩黏聚力增量之间的关系见图 2，由图 2 可以看出， $B > 0, C_{\text{RMR}} < 0$ ，说明厂房开挖跨度越大，所需支护越多，而岩体质量越高，所需支护越少，这也与工程实际相吻合。

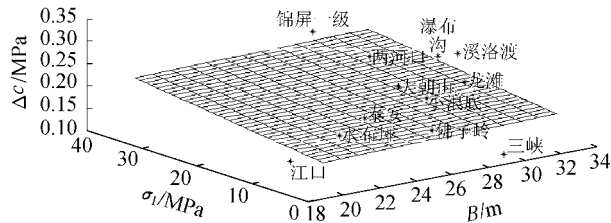


图 1 厂房开挖跨度、最大主应力与围岩黏聚力增量之间的关系

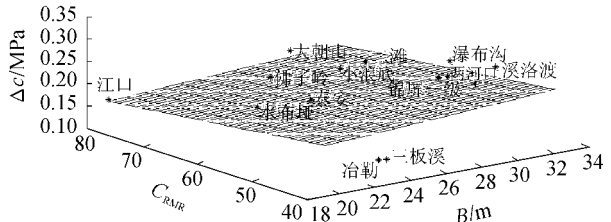


图 2 厂房开挖跨度、岩体质量分级值与围岩黏聚力增量之间的关系

由式(2)计算得到锦屏一级水电站、两河口水电站和溪洛渡水电站的 Δc 分别为 0.2291 MPa ， 0.2194 MPa 和 0.2199 MPa 。

在施工过程中由于考虑到断层、裂隙等不利的

地质条件,以及地应力释放等因素的影响,3个工程都适量地增大了支护强度,实际支护量均为0.2502 MPa(表3),比拟合计算值大,说明支护强度偏保守。

2 有限元计算模型

本文地下洞室开挖稳定性非线性有限元分析按低抗拉弹塑性模型分析岩体材料的开裂情况,岩体是否进入塑性状态,按Druker-Prager准则判别。对锚杆和锚索采用理想弹塑性本构关系。

有限元计算中对开挖区单元的变形模量取接近零的小值,并同时施加开挖释放荷载,即可模拟开挖施工。混凝土衬砌和混凝土喷层通过材料置换进行模拟,固结灌浆的效果通过提高灌浆区变形模量加以反映。参考其他工程资料,计算中将灌浆区的变形模量提高20%。大量工程实践证明喷锚支护对围岩的加固效果非常显著^[3]。目前,数值计算中一般将锚杆简化为锚杆单元加以模拟,锚杆的作用通过锚杆的刚度体现,由于系统锚杆的刚度相对于围岩的刚度非常小,许多计算成果表明,这种模拟方法不能完全反映锚杆的支护效应,实际上锚杆的作用主要体现在参与围岩的协调变形过程中,锚杆的弹性恢复变形存在一种反向锁固力,对围岩形成锚固效应,换言之,加锚岩体的变形与强度参数可以提高,这一观点已得到部分室内和现场试验的证实。该次有限元计算中参考中国科学院武汉岩土力学研究所^[1]的研究成果,加锚后围岩的 Δc 由式(1)算得^[4]。

分别对三大工程地下厂房所处的右岸山体截取有限元计算范围。在所截取的研究范围即左右边界面上采用法向链杆约束,在底面采用法向链杆约束,山坡面采用自由边界。锦屏一级水电站、两河口水电站采用三维建模,根据中国水电顾问集团成都勘测设计研究院提供的地质剖面资料,严格模拟岩层界面、地形、断层等地质特征。离散中充分反映了斜坡地形、地质条件对地下工程的影响,岩体均采用三维8节点6面体等参实体元及其退化单元模拟,锚杆和锚索均采用杆单元。溪洛渡水电站采用二维建模,为充分反映和模拟裂隙、错动带的作用,网格划分对层间层内错动带和裂隙进行了详细模拟,裂隙单元厚度均用2 cm厚的薄层单元模拟,参数取刚性结构面参数。

锦屏一级水电站地下厂房:原点取在河谷,大地坐标为N352 084.0 m,E328 202.23 m。上游指向下游截取长度共1 000.0 m,铅直向底部取至1 400.0 m高程,顶部延伸至山顶;左岸指向右岸截取长度共

541.2 m。共计切出37个横剖面,离散为33 384个节点和39 514个单元。开挖区三维网格见图3^[5]。

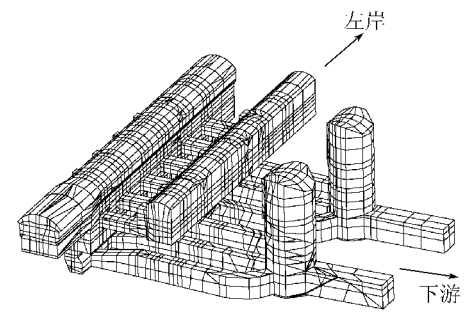


图3 锦屏一级水电站开挖区三维网格示意图

两河口水电站地下厂房:原点取在河谷,大地坐标为N3 743 324.979 m,E268 336.875 m。左岸指向右岸截取长度共340.4 m,铅直向底部取至2 500.0 m高程,顶部延伸至山顶;下游指向上游截取长度共327.02 m。共计切出32个横剖面,离散为192 535个节点和168 159个单元,其中杆单元33 682个。开挖区三维网格见图4^[6]。

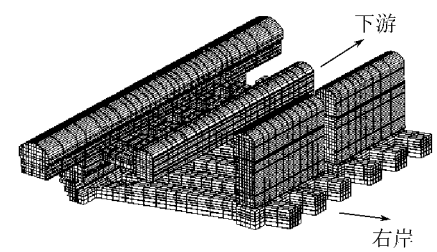


图4 两河口水电站开挖区三维网格示意图

溪洛渡水电站右岸地下厂房:右岸剖面上游指向下游总长度为373.69 m,铅直向底部取至250.0 m高程,顶部延伸至地表。右岸地下厂房剖面整个计算域共计离散为96 766个节点和113 934个单元。图5为预布大规模随机裂隙生成网格的效果图,左侧为上游方向^[7]。

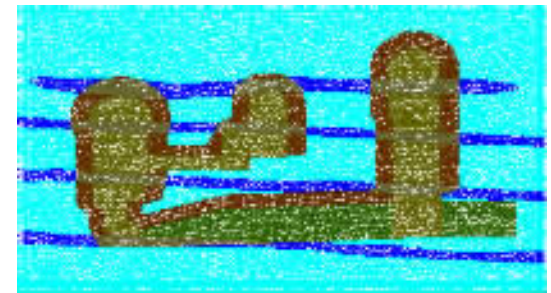


图5 溪洛渡水电站随机裂隙网格分布示意图

3 计算结果与分析

3.1 开挖围岩变形特征

a. 三维有限元计算表明,三大工程的洞周变形总体趋势基本相同,都呈现内收的变形特点,主厂房开挖结束时,底板均向上部变形,顶拱发生沉降变

形,开挖变形基本随埋深加大而增大。

b. 表 4 为各水电站地下厂房典型机组段开挖后主厂房边墙中部的变形量。由表 4 可知,锦屏一级水电站是 3 个工程中边墙变形量最大的,全部开挖后上游边墙变形达到 4.84 cm。这主要是因为锦屏一级水电站地应力是 3 个工程中最大的(表 1),且存在软弱围岩、 f_{13} 和 f_{14} 断层切割等多种不利地质条件。两河口水电站地下厂房变形量比锦屏一级水电站地下厂房变形量稍小(表 4),全部开挖后上游边墙变形量为 4.62 cm,但比溪洛渡水电站地下厂房变形量大。原因在于,虽然两河口水电站地下厂房地应力与溪洛渡水电站地下厂房地应力相近,但考虑到进出水的因素,其地下厂房轴线布置未能最优地规避地应力释放。而溪洛渡水电站地下厂房围岩以玄武岩为主,岩石坚硬,新鲜完整,稳定性较好,地应力是 3 个工程中最小的(表 1),且其厂房轴线布置利于释放地应力。因此,溪洛渡水电站地下厂房边墙变形量在 3 个工程中是最小的,全部开挖后上游边墙变形量为 1.34 cm。

表 4 三大工程地下厂房典型机组段
开挖结束后主厂房边墙中部变形量 cm

开挖级	锦屏 2 号机组		两河口 4 号机组		溪洛渡右岸中导洞	
	上游边墙	下游边墙	上游边墙	下游边墙	上游边墙	下游边墙
第 5 级	2.72	-2.07	2.86	-2.00	1.28	-0.83
第 7 级	4.81	-4.12	3.94	-3.27	1.27	-0.51
全部开挖	4.84	-3.93	4.62	-3.79	1.34	-0.97

3.2 开挖后破坏区分布

图 6~8 为三大工程地下厂房全部开挖后典型机组段的厂房塑性破坏区分布情况。

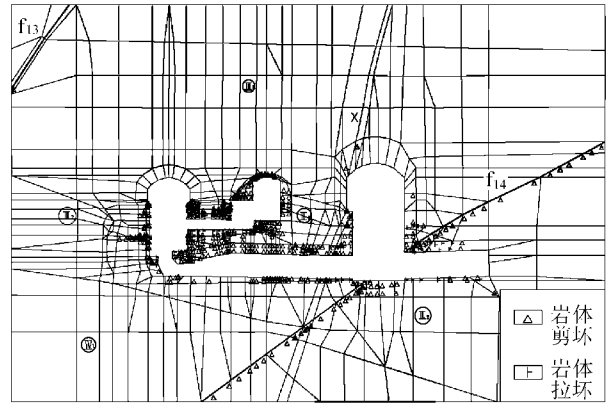


图 6 锦屏一级水电站第 2 机组段全部开挖围岩破坏模式

对比 3 幅图可知,地下厂房塑性破坏区主要分布在以下几个部位:①主厂房、主变室之间的隔墙出现较严重破坏,个别机组段岩柱破坏区贯穿;②主厂房上游边墙自岩壁吊车梁以下出现不同深度范围的拉剪破坏区;③机窝处上、下游侧出现显著剪切破坏;④尾调室破坏区主要出现在上、下游边墙中部与

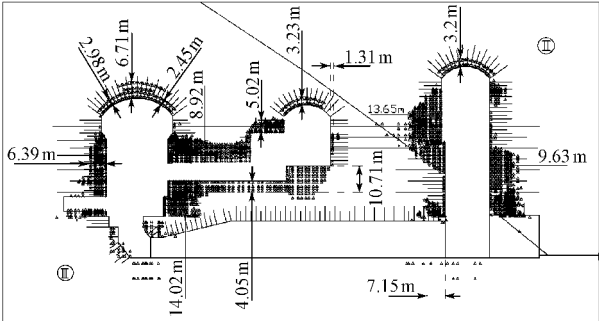


图 7 两河口水电站 4 号机组全部开挖围岩破坏模式

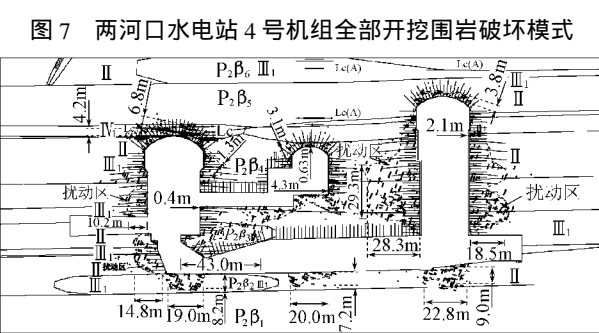


图 8 溪洛渡水电站右岸地下厂房全部开挖后洞周破坏模式

尾水管连接处。这些部位可能会产生塌落、滑动、剥落等破坏形式,应在这些部位施加必要的工程措施。

由图 6~8 可知,由于地质条件等因素的不同,3 个工程的破坏区分布特点、破坏深度、破坏范围都有所不同。

全部开挖后,由于锦屏一级水电站和两河口水电站主厂房与主变室之间的岩柱厚度(45 m)比溪洛渡水电站主厂房与主变室之间的岩柱厚度(49.4 m)小(表 1),而且岩柱处于强度较差的Ⅲ类岩中,因此主厂房、主变室之间的隔墙出现了较严重的破坏,个别机组段破坏区贯穿;而溪洛渡水电站主厂房与主变室均处于强度较好的Ⅱ类岩中,且岩柱厚度较大,因此破坏区未贯穿。

由于两河口水电站厂房轴线布置未能最优的释放地应力,因此其主厂房、主变室及尾调室顶拱均出现了深度较大的破坏扰动;与之相比,锦屏一级水电站主厂房顶拱的破坏扰动较小,仅在个别机组段出现少量破坏点,主变室顶拱仅在浅表 3.5 m 以内出现小部分拉剪破坏区;溪洛渡水电主厂房及主变室顶拱则有深度 4 m 左右的扰动区。

4 结 论

a. 综合考虑 B , C_{RMR} , σ_1 与 Δc 的关系,得到 16 个工程系统锚杆支护量的一次拟合公式。该公式表明开挖跨度越大,最大主应力越大,岩体质量越差,围岩黏聚力增量则越大,说明工程所需的支护量越大。这与 3 个工程的工程实际基本吻合。该拟合

公式为类似跨度 30 m 级洞室群稳定性评价和工程施工设计提供了参考依据。

b. 结合 3 个工程的地质条件及厂房轴线布置等因素,分析洞室开挖后围岩变形特征。全部开挖后,溪洛渡水电站主厂房上游边墙变形量为 1.34 cm,下游边墙变形量为 - 0.97 cm,变形量相对较小,锦屏一级水电站主厂房上游边墙变形量为 4.84 cm,下游边墙变形量为 - 3.93 cm;两河口水电站由于厂房轴线的布置没有极优地规避最大主应力的释放,因此变形量较大,上游边墙变形量为 4.62 cm,下游边墙变形量为 - 3.79 cm。可见,厂房轴线的布置能否最优规避地应力释放对厂房洞室开挖后的变形具有明显的影响。

c. 通过总结对比 3 个工程的破坏区分布特征,可知大跨度、高边墙洞室开挖后破坏区主要分布在以下部位:高地应力区的主厂房和主变室之间的岩柱较容易发生严重破坏,岩柱破坏区可能贯穿,特别是埋深大的机组,较易形成大的破坏区,建议施加对穿锚索等必要的工程措施;主厂房边墙自岩壁吊车梁以下常出现拉剪破坏区;母线洞和尾水管之间的岩板受三向释放荷载作用,受力条件不好,导致靠近机窝处较易发生严重破坏,建议施加必要的工程措施;调压室和尾水洞衔接岔口处容易发生较严重破

坏。对于变形和塑性区较大的机组段,比如地质分界线穿过的机组或是有断层等深部裂隙穿过的机组,建议施加专门的工程措施。

参考文献:

- [1] 朱维申,李术才,陈卫忠.节理岩体破坏机理和锚固效应及工程应用[M].北京:科学出版社,2002.
- [2] 唐旭海,张建海,蒋峰,等.关于锚固支护设计的统计方法研究[J].四川大学学报,2007,39(9):176-181.
- [3] 蒋峰,张建海.某大型地下厂房洞室群支护设计和围岩稳定[J].四川水力发电,2004,23(4):31-33.
- [4] 谢康和,周健.岩土工程有限元分析理论与应用[M].北京:科学出版社,2002.
- [5] 张雪晶,张建海,吴数伟,等.锦屏地下厂房洞室群整体稳定性三维有限元分析[C]//地质会议论文集.成都:四川水力发电工程学会地质及勘探专业委员会,四川省水利学会工程地质及岩土力学专业委员会,四川省地质学会水文地质工程地质专业委员会,2006:75-79.
- [6] 武世婷,周广峰,张建海,等.两河口地下厂房洞室群围岩稳定性三维有限元分析[J].四川水力发电,2008,27(3):123-126.
- [7] 唐旭海,张建海,张恩宝,等.溪洛渡电站左岸地下厂房洞室群围岩稳定性研究[J].云南水力发电,2007,23(1):33-37.

(收稿日期 2008-05-22 编辑:方宇彤)

· 简讯 ·

《水利水电科技进展》和《河海大学学报(自然科学版)》入编 《中文核心期刊要目总览》2008 年版核心期刊

据《中文核心期刊要目总览》2008 年版编委会通知,依据文献计量学的原理和方法,经研究人员对相关文献的检索、计算和分析,以及学科专家评审,《水利水电科技进展》已入编《中文核心期刊要目总览》2008 年版(即第五版)之水利工程类的核心期刊,《河海大学学报(自然科学版)》已入编《中文核心期刊要目总览》2008 年版(即第五版)之综合性科学技术类的核心期刊。据《中文核心期刊要目总览》2008 年版编委会介绍,这次核心期刊的评选工作,是由北京地区十几所高校图书馆、中国科学院国家科学图书馆、中国社会科学院文献信息中心、中国人民大学书报资料中心、中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、中国农业科学院农业信息研究所等相关单位的百余名专家和期刊工作者研究完成的。这次对中文核心期刊的评价仍采用定量评价和定性评审相结合的方法。定量评价指标体系采用了被引量、被摘量、被引量、他引量、被摘率、影响因子、获奖或被国内外重要检索工具收录、基金论文比、Web 下载量等 9 个评价指标。选作评价指标统计源的数据库及文摘刊物达 80 余种,统计到的文献数量共计 32400 余万篇次。最终从我国出版的 9800 多种正式期刊中评选出 1980 余种中文核心期刊。

目前,在我国自然科学领域较有影响的核心期刊评定主要有中国科学院文献信息中心的《中国科学引文数据库》(CSCD)、北京大学图书馆的《中文核心期刊要目总览》、中国科技信息研究所的《中国科技论文统计源期刊》(中国科技核心期刊)三大体系。社会科学领域较有影响的核心期刊评定主要有南京大学中国社会科学研究评价中心的《中文社会科学引文索引》(CSSCI)、北京大学图书馆的《中文核心期刊要目总览》、中国社会科学院文献信息中心的《中国人文社会科学核心期刊要览》三大体系。其中《中文核心期刊要目总览》分别于 1992 年、1996 年、2000 年、2004 年、2008 年共出版 5 次。

(本刊编辑部供稿)