# 三峡工程永久船闸中隔墩岩体稳定性研究

黄志全1.2,姜 彤2,廖德华3,张镜剑2

(1. 石油大学地球科学系,北京 102200;2. 华北水利水电学院岩土工程系,郑州 450045; 3 广西水电科学研究所,南宁 530021)

[摘 要]运用离散单元法(DEM)与有限单元法(FEM)等数值模拟方法,全面地对长江三峡工程永久船闸二闸室至三闸首部分的中隔墩岩体分别在施工期和运行期的应力分布、变形规律进行了模拟研究。综合分析结果表明:垂直于闸室轴线的水平位移在开挖完成后基本处于稳定状态,而在运行期有所减少;平行于闸室轴线的水平位移总体向下游发展;而垂直方向的位移先表现为回弹,后发生沉降。在中隔墩中上部位出现拉应力区,拉应力值一般小于0.6 MPa。

[关键词]三峡工程 中隔墩 数值模拟

「中图分类号]TU413.8 「文献标识码]A 「文章编号]0495-5331(2004)02-0092-05

# 0 前言

长江三峡永久船闸是三峡枢纽工程的重要建筑物,为长江航运的控制性工程。三峡工程永久船闸为双线连续五级船闸,位于左岸坛子岭以北约200m的山体中。闸室段轴线方向111°,总长1607m,单级闸室有效尺寸为280m(长)×34m(宽)×5m(槛上最小水深)。在双线闸室之间保留高达50~70余米、宽60m的中隔墩。工程区岩性主要为闪云斜长花岗岩,多为中粗粒结构,局部细粒结构。中隔墩岩体主要为微风化至新鲜岩石,岩质致密坚硬,一般多呈块状结构,部分为整体或次块状结构[1-4]。

永久船闸二闸室至三闸首中隔墩顶面找平砼于1997年9月~1998年5月浇筑完成。为了监测该段岩体的变形情况,自1997年8月开始,设置了变形监测系统,在该段中隔墩顶面南、北两侧埋设了表层岩体位移监测点8个(图1),主要分布于13-13、15-15、17-17三个重点剖面上。永久船闸的稳定性关系到三峡工程的成败,为此,众多单位相继进行了大量的各类研究,取得了丰富的成果<sup>[3-10]</sup>,具有重要的理论意义和实践价值。为确保三峡工程2003年通航发电,全面综合地研究永久船闸中隔墩

岩体变形规律及其发展趋势是十分必要的。因此本文在中国长江三峡工程开发总公司的资助下,以图1中二闸室至三闸首段的三个剖面(13-13、15-15、17-17)为研究对象,运用离散单元法(DEM)与有限单元法(FEM)等数值模拟方法分析了该段中隔墩岩体分别在施工期和运行期的应力分布、变形规律。所采用的地质资料与有关计算参数见文献[1.2]。

## 1 中隔墩岩体稳定性离散单元法分析

离散单元法 DEM(Distinct Element Method)已在数值模拟理论与工程应用方面取得了长足的进展,其突出的功能是它在反映岩块之间接触面的滑移、分离与倾翻等大位移的同时,又能计算岩块内部的变形与应力分布[11-13]。

# 1.1 中隔墩稳定性 DEM 分析

# 1.1.1 计算范围及计算工况

三峡永久船闸二闸室至三闸首段中隔墩长 307 m,南北宽约 57 m,根据该段地质条件及研究需要,选取图 1 中的 13-13、15-15、17-17 剖面为 DEM 计算剖面。计算范围分别为:13-13 和 5-15 剖面南北向(横向)分别向闸室边坡各取 30 m,达

[收稿日期]2002-03-05;[修订日期]2003-06-22;[责任编辑]李石梦。

<sup>[</sup>基金项目]中国长江三峡工程开发总公司项目资助。

<sup>[</sup>第一作者简介] 黄志全(1970年-),男,1999年毕业于中国科学院地质与地球物理研究所,现在石油大学资源与信息学院做博士后研究,主要从事岩土工程方面的研究,教学与设计等工作。

191 m,纵向取闸室底板以下大于中隔墩高度一倍为计算范围,共计100 m;17-17 剖面横向达192 m,

纵向为140 m。其中,节理、裂隙及裂缝的分布按地质资料而定。

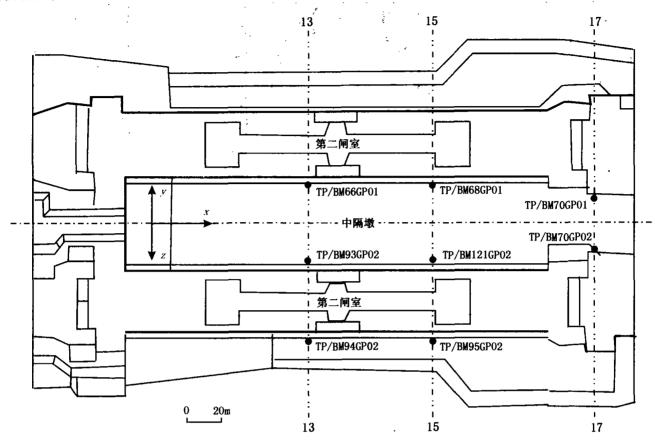


图 1 第二闸室至第三闸首中隔墩变形监测点平面布置图

"TP"为中隔墩水平位移监测点,"BM"为垂直位移监测点,"GP01"代表北侧,"GP02"代表南侧,位移量符号规定为;x 方向"+"表示下游位移;y 方向"+"表示北侧闸室位移,南侧向南闸室位移;垂直方向 z"+"表示下沉。

为了研究中隔墩的变形规律及其在船闸运行时的变形发展趋势,对以下工况进行了分析计算:(1)闸室开挖完成后中隔墩在自重作用下的变形特点、(2)双闸室充水条件及(3)单侧闸室充水情况下位移变化规律。在计算时,为了监测中隔墩顶面变形,特在各个剖面与监测点对应的位置布置了监测点

1、2(图2、图3)。

#### 1.1.2 计算参数选取

中隔墩地区岩性单一,为新鲜完整的闪云斜长花岗岩。根据已经公开的资料<sup>[1,2]</sup>,研究区的岩体及结构面物理力学参数分别列于表1及表2:

岩石名称	风化程度 - k	容重	湿抗压强		弹模 E. GPa	变模 E <sub>d</sub> GPa	泊松比μ 一	抗剪断强度	
		<u>容重</u> kN/m³	度/MPa					f'	c '/MPa
闪云斜长花岗岩	 微新	27.0	100	1.5	40	35	0.22	1.8	1.8
	弱风化	26.8	50	1.0	15	10	0.24	1.3	1.0

表 1 三峡工程船闸区岩体物理力学参数

表 2 三峡工程船闸区结构面物理力学参数

结构面类型	风化程度 -		抗剪	切向刚度	法向刚度		
		f'	c'/MPa	f	c/MPa	Ks/MPa/cm	Kn/MPa/cm
硬性结构面		0.70	0.20	0.60	0.10	30	75
	微新、弱风化	0.60	. 0.18	0.50	0.08	10	25
软弱结构面	强风化	0.40	0.12	0.35	0.05	10	25

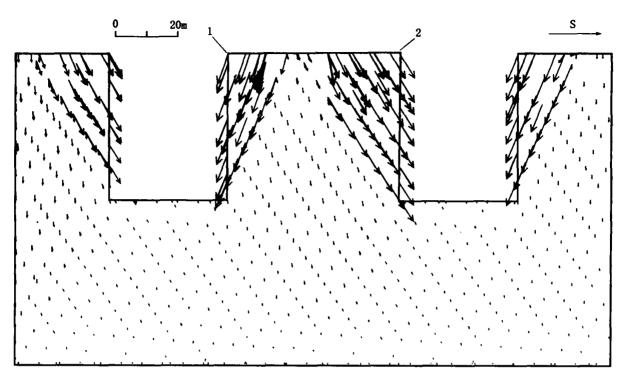


图 2 13-13 剖面位移矢量图(闸室不充水时)

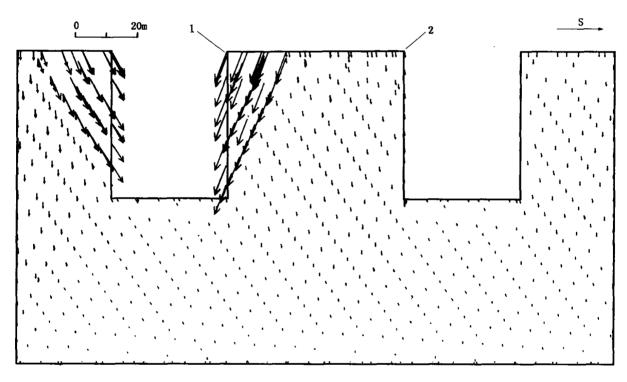


图 3 15-15 剖面位移矢量图(南闸室充水时)

#### 1.2 DEM 分析结果

根据对 13-13、15-15 及 17-17 剖面各种工况进行二维离散元分析,模拟结果如下:

#### 1.2.1 工程施工期:

闸室不充水,此时开挖完成,由于卸荷等原因,变形较大:对于监测点 1,y 方向累计位移为 17.3 ~ 27.0 mm;z 方向位移先表现为开挖回弹,累计达到

10.1 mm,之后岩体下沉,最大累计位移量达到 12 mm;对于 2 测点,y 方向位移表现为向闸室向变形,累计位移达到 38.2 mm;z 方向回弹值达到 9.2 mm,下沉累计位移量达到 10.5 mm。图 2 为 13 – 13 剖面的位移矢量图。在此工况下,模拟计算所得的结果与实际监测数据对比如表 3,从表中可以看出:模拟结果与监测数据比较吻合。

	TP/BM66GP01		TP/BM93GP02		TP/BM68GP01		TP/BM121GP02	
	у у	z	у	z	y	z	y	z
监测位移	31.00	-10.60	7.10	-1.45	30. 27	-7.54	34.45	- 17. 17
计算位移	27.00	- 10. 10	9.83	-2.36	25.10	-9.20	38.20	- 19.60

表 3 典型监测点模拟位移与监测值对比(mm)

注:由于监测数据所限,z方向只比较了回弹值。

## 1.2.2 工程运行期:

1)南北闸室充水时,由于水压力作用,1 测点 y 方向累计位移稍有减少(与施工期相比),最大达到 25.8 mm(13-13 剖面);2 测点 y 方向位移表现为向北变形,与不充水相比,累计位移量仅为 9.47 - 2.59 mm,特别是 15-15、17-17 剖面的位移已经不再向闸室方向发展,转而向北变形。

2) 南闸室充水情况下,1 测点 y 向位移有所增加(与施工期相比),累计达到 24.7 - 27.6 mm,y 方向回弹值累计达到 7.9 mm,下沉累计位移量达到 12.4 mm;2 测点 y 方向位移表现为向北变形,与不充水及双闸室充水相比,累计位移量达到 17.1 - 21.3 mm,17 - 17 剖面的位移向北发展,累计位移达到 -21.3 mm;z 方向位移变化不大(图3)。

#### 1.2.3 中隔墩应力分布规律

通过模拟分析表明:在中隔墩中上部位出现拉应力区, $\sigma$ , 值达到 0.2 MPa, 而  $\sigma$ <sub>z</sub> 为压应力,其值高达 4.75~5.5 MPa。

#### 2 永久船闸中隔墩岩体三维有限元分析

#### 2.1 计算范围及工况

计算模型为:沿闸室轴向取二闸室至三闸首段共307 m,垂直轴向取133 m,将需计算的中隔墩全部包括在内,计算区域共剖分3364个节点,2354个8节点空间单元。由于计算范围内的岩体是新鲜花岗岩,估作为弹性材料考虑,应用弹性有限元进行模拟。

计算荷载考虑自重应力场及开挖释放荷载,开 挖释放荷载的大小确定根据中隔墩地区的地应力资料。计算工况分别为:(1):自然状态未充水情况; (2):北闸室充水(3):南闸室充水;(4)南北两闸室 充水4种。计算参数按表1、2选取。

# 2.2 计算成果分析

中隔墩三维有限元计算结果表明:

1)中隔墩岩体裂缝双侧岩体开挖后,上部卸荷相对充分,下部卸荷不彻底,表现为上大下小的不均匀变形,岩体变形主要通过张拉开裂去适应,很小部分为岩块的膨胀与拉伸。岩体开裂优先在薄弱部位产生,即沿结构面或松动区内张开并扩展,并在裂缝

延伸方向将岩体局部拉裂,使短小裂缝相连通或延伸。由于岩体自身具有一定的抗拉强度,且下部约束,卸荷不彻底,开裂主要集中在中隔墩顶浅表层的爆破松动带和卸荷影响区内。

2)通过对中隔墩裂缝模拟计算表明:卸荷过程中,中隔墩顶部水平位移量较大,其单侧水平位移量值达 25 mm,说明中隔墩岩体变形后的拉裂主要受水平向卸荷作用的影响。由于中隔墩变形总体向坡外,因而墩顶裂缝走向的总趋势多近平行船闸的方向,部分受结构面控制而偏转成与船闸轴线斜交。

3)在超载情况下(即工况 2、3、4),即船闸在运行期,中隔墩整体变形很小,最大变形增量在 3×10<sup>-5</sup>~6×10<sup>-5</sup>m 之间,对工程的运行不构成威胁,中隔墩整体来说是稳定的。图 4、5 分别为工况(1)、(2)情况下的位移等值线图。其中,图 5 是在工况 1 的基础上的、在南北两闸室充水的超载情况下的位移增量等值线图。

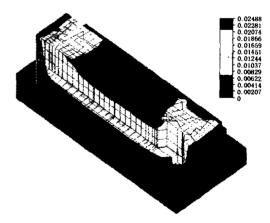


图 4 工况(1)下中隔墩岩体位移等值线图(m)

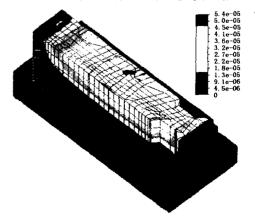


图 5 工况(2)下中隔墩岩体位移等值线图(m)

4)闸室开挖后,中隔墩岩体三面临空,具备了一定的卸荷条件。边坡下切开挖至闸室槽底过程中,中隔墩上部约3/4范围由原双向压应力状态逐渐变至水平向为零或拉应力状态,拉应力值一般小于0.6 MPa。

# 3 研究结论

通过对三峡永久船闸第二闸室至第三闸首段中隔墩岩体进行的离散单元法、三维有限元等数值分析,初步得到如下研究结论:

- 1)中隔墩 y 方向变形规律:
- y方向的位移是本研究的重点,其变化规律及发展关系到船闸的安全运行。根据多种方法的研究结果可以得出:在开挖完成后,该方向位移较大,据离散单元法分析结果,累计位移值最大达到 38.2 mm;在运行期当双闸室充水时,中隔墩北侧位移稍有减少,最大累计位移达到 25.8 mm(13 13 剖面),南侧位移表现为向北变形,特别是 15 15、17 17 剖面的位移已经不再向闸室方向发展, 17 17 剖面的累计位移达到 9.47 mm。
  - 2)中隔墩 x 方向变形规律:

中隔墩上的监测点 x 方向的水平位移主要表现 为向下游位移,累计位移量都较小。

3)中隔墩 z 方向变形规律:

受开挖卸荷的影响,测点的垂直位移主要表现 为回弹,位移不断增加。随闸室开挖结束后,回弹过 程也很快完成,位移曲线呈平缓趋势。

4)在中隔墩中上部位出现拉应力区,闸室开挖后,中隔墩上部约3/4范围由原双向压应力状态逐

渐变至水平向为零或拉应力状态,拉应力值一般小于 0.6 MPa。

5)通过对中隔墩裂缝进行三维有限元模拟表明:卸荷过程中,中隔墩顶部水平位移量较大。在超载情况下,中隔墩整体变形很小,对工程的运行不构成威胁,中隔墩岩体处于基本稳定状态。

#### [参考文献]

- [1] 长江三峽水利枢纽永久船闸中隔墩裂缝分析及处理专题报告 [R].长江水利委员会,1999,3.
- [2] 永久船闸二闸室中隔墩地质条件及其对岩体变形和裂缝形成的影响分析[R].长江水利委员会综合勘测局,1999,3.
- [3] Chen, D. The ecological study of the Three Gorges Project in China. Proc. 5th Int[R]. Congress. IAEG, 1986.
- [4] Chen, D. Engineering geological problems in the Three Gorges Project on Yangtze, China[J]. Engng Geol. 1999,51:183 ~ 193
- [5] Chen Changyan, Wu Xingchun, Wang Sijing, et al.. Rock mass quality evaluation of shiplock slope in Three.
- [6] Wu Xingchun, Wang Sijing. Unloading characteristics of rock mass in shiplock slope of Three Gorges Project[A]. Development in solid Earth Sciences[C]. Beijing: Sciences Press, 1996.
- [7] 张有天. 岩石高边坡的变形与稳定[M]. 北京:中国水利水电出版社,1999.
- [8] 周维垣,肖洪天,剡公瑞. 三峡船闸高边坡岩体渗流及稳定分析[J]. 岩石力学与工程学报.1998,17(增):818~822.
- [9] 寇晓东,周维垣,杨若琼. FLAC-3D进行三峡船闸高边坡稳定分析[J]. 岩石力学与工程学报. 2001,20(1):6~10.
- [10] 杨启贵,王冬珍. 三峡永久船闸中隔墩裂缝原因分析[J]. 水电能源科学,1999,17(4):36~38.
- [11] Cundall, P A. A computer model for simulating progressive, large scale movements in blocky rock systems Proc Int Symp Rock Fracture [A]. ISRM Nancy 1 [C]. 1971, Paper II ~8.
- [12] 李 忠、陈 伟. 公伯峽水电站导流隧道压扭性断裂带特征研究与隧道塌方防治[J]. 地质与勘探,2002,38(4);87~89.

# STUDY ON THE DEFORMATION SIMULATION OF MIDDLE - ISOLATED PIER OF PERMANENT SHIPLOCK IN THE THREE GORGES PROJECT

HUANG Zhi - quan<sup>1,2</sup>, JIANG Tong<sup>2</sup>, LIAO De - hua<sup>3</sup>, ZHANG Jing - jian<sup>2</sup>
(1 Department of Earth Sciences, University of petroleum, Beijing 102200;
(2 North china Institute of Water Conservancy and Hydroelectric power, Zhengzhou 450045;
(3 Guangxi Hydroelectric Research Institute, Nanning 530021)

Abstract: The middle – isolated pier (MIP) is one of the key structures of permanent shiplock of Three Gorges Project on Yangtze River, China. This paper deals with the study on rock mass deformation of middle – isolated pier of the second shiplock under various operation conditions. The numerical simulations using 2 – D distinct element method and 3 – D finite element method are applied to analyze the stresses distribution and deformation law of rock mass. The comprehensive results can be summarized as follows: (1) the horizontal displacement vertical to axial line of shiplock varies with process of excavation, and is in steady state after excavation; during operation of shiplock, the displacement is slightly decreased; (2) the horizontal displacement parallel to axial line of shiplock is of tendency of developing to downstream; (3) the vertical displacement has the property of which resilient deformation occurs during excavation, and then subsidence with slightly various values takes place in different part of the middle – isolated pier on different operation conditions; and (4) the tensile stresses less than 0.6 Mpa are taken place on the upper part of MIP.

Key words: Three Gorges Project (TGP), middle - isolated pier (MIP), numerical simulation