文章编号： 1001-1455(2006)02-0183-05

廊道和库水对三峡围堰爆破拆除效果影响的数值模拟*

李本平[1,2]，卢文波[1]

（1. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室，湖北　武汉　430072；
2. 第二炮兵指挥学院，湖北　武汉　430012）

摘要： 用动力有限元程序 LS-DYNA 对长江三峡水利枢纽工程三期碾压混凝土横向围堰爆破拆除进行了数值模拟。计算分析了上游库水和廊道对爆破拆除效果的影响。计算结果表明，上游库水和廊道对爆破拆除缺口的形成和范围有较大影响，在进行爆破实施时应结合爆破试验予以充分考虑。

关键词： 爆炸力学；爆破拆除；数值模拟；碾压混凝土围堰

中图分类号： O383.2　　**国标学科代码：** 130・3520　　**文献标志码：** A

1　引　言

长江三峡水利枢纽工程三期碾压混凝土围堰由横向围堰和纵向围堰组成。横向围堰断面形状为：顶宽 8 m，围堰上游面▽ 140 m～▽ 70 m 为直立面，▽ 70 m 以下的坡度为 1∶0.3；围堰下游面▽ 140 m～▽ 130 m 为直立面，▽ 130 m 以下的坡度为 1∶0.75，廊道底板高程▽ 107.5 m，见图 1。

根据施工进度安排，在三期碾压混凝土围堰完成挡水使命后，为满足发电及纵向围堰坝身段排漂过流条件，将于 2006 年汛后枯水期完成围堰拆除工作。三期碾压混凝土围堰拆除的总长度为 670.0 m，其中横向围堰 572 m，根据建成时期分为二段，第二段长 380 m，拆除高程 110 m，拆除高度 30 m，拆除底宽 23 m，工程量约 1.49×10^5 m^3。为了节省爆破施工工期，采用预埋集中药室和预埋加密炮孔倾倒爆破方案[1]。爆破作业时，坝前设计水位为▽ 135.4 m，库水对爆破拆除有一定影响，另外，廊道对爆破拆除也存在一定影响。三峡三期碾压混凝土围堰拆除的难度及工程量均居世界同类工程前列，为了确保大坝、厂房及发电设施的绝对安全，爆破方案必须万无一失。对爆破方案进行数值模拟，计算分析这些影响因素，爆破实施时结合爆破试验[2~3]，综合考虑廊道和库水的影响，对确保爆破拆除安全有重大意义。

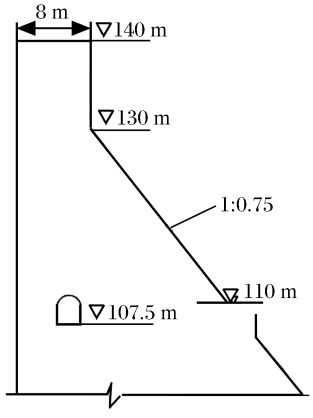

图 1　横向围堰横断面图

Fig. 1　Crosssectional view of transverse-cofferdam

2　材料模型及边界条件处理

2.1　碾压混凝土本构模型

采用塑性随动硬化材料来模拟碾压混凝土。这种材料属于各向同性应变率相关塑性材料中的塑性随动材料，并且含有失效应变

* **收稿日期：** 2005-01-12；**修回日期：** 2005-05-18
基金项目： 教育部科学技术研究基金项目(02133)；湖北省自然科学基金项目(2002AB006)
作者简介： 李本平(1967—　)，男，博士研究生，副教授。

$$\varepsilon_y = k\varepsilon^n = k(\varepsilon_{ye} + \bar{\varepsilon}_p) \tag{1}$$

式中：ε_{ye}、$\bar{\varepsilon}_p$分别为屈服弹性应变和有效塑性应变，k 为屈服应力缩比因数，$k = 1 + (\dot{\varepsilon}/C)^{1/P}$，其中 C、P 为应变率参数。

2.2 爆轰产物状态方程

高能炸药起爆后炸药单元体内的压力由状态方程求得，Jones-Wilkens-Lee 状态方程表示为

$$p = A\left(1 - \frac{\omega}{R_1 V}\right)\mathrm{e}^{-R_1 V} + B\left(1 - \frac{\omega}{R_2 V}\right)\mathrm{e}^{-R_2 V} + \frac{\omega e_0}{V} \tag{2}$$

式中：A、B、R_1、R_2、ω 是材料常数，p 是压力，V 是相对体积，e_0是初始比内能。

2.3 水的状态方程

水作为一种流体，采用 Grüneisen 状态方程，方程形式如下[4]

$$p = \frac{\rho_0 c^2 \mu\left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2}\right)\mu - \frac{a}{2}\mu^2\right]}{\left[1 - (S_1 - 1)\mu - S_2\frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3\frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2}\right]^2} + (\gamma_0 + a\mu)e_0 \tag{3}$$

式中：p 是压力，c 是剪切-压缩波速曲线截距，S_1、S_2、S_3是剪切-压缩波速曲线斜率因数，γ_0是 Grüneisen 常数，a 是初始体积修正因数，e_0是初始比内能，$\mu = \rho/\rho_0 - 1$，ρ 为材料密度，ρ_0是材料初始密度。

2.4 边界条件处理

炸药与药室孔壁之间的接触边界设为滑移边界。滑移边界主要应用于高能炸药爆轰气体作用于固体介质面时的边界条件。其基本原理是：将每个正在接触的从单元的一半质量分配到接触的主单元表面面积上，同时由每个从单元的内力确定作用在接受质量的主表面面积上的分布压力，在完成压力和质量分配后修正主表面的加速度，然后对从节点的加速度和速度施加约束，保证从节点沿主表面运动，这样，从节点不会穿透主表面，从而避免出现反弹现象。

计算中，围堰横断面底部和上游库水侧采用透射边界条件；围堰下游侧、顶面及上游库水位以上部分边界采用自由边界。

3 计算工况与参数选取

3.1 计算工况

横向围堰第二段长达 380 m，计算时作平面应变问题简化，装药量也按平面问题相应等效。为了分析库水和廊道对爆破的影响，仅针对最先起爆的上游侧 1 号预埋药室起爆，分别对有无廊道和有无库水以及廊道充水等五种情况进行了计算，计算过程中均考虑了重力。计算工况见表 1。

表 1 计算工况

Table 1 Calculation model

工况序号	库水	廊道
模型Ⅰ	无	无
模型Ⅱ	无	有，不充水
模型Ⅲ	有	无
模型Ⅳ	有	有，不充水
模型Ⅴ	有	有，充水

3.2 计算参数

碾压混凝土的计算参数[5]：密度为 2.4 t/m^3，弹性模量为 30 GPa，泊松比为 0.2，屈服应力为 15 MPa，抗压强度为 35 MPa，应变率参数 C 和 P 分别为 25 和 1.5。炸药药室底面直径 0.3 m，高度 0.5 m。炸药的计算参数：密度为 1.1 t/m^3，爆速为 4 km/s，A、B、R_1、R_2、ω、e_0分别为 214 GPa、0.812 GPa、4.2、0.9、0.15、4.5 GPa。水的计算参数：密度为 1.0 t/m^3，c、S_1、S_2、S_3、γ、a、e_0分别为 1 647 m/s、1.921、−0.096、0.0、0.35、0.0、0.0。

4 计算结果与分析

4.1 不考虑库水计算工况

图 2 是不考虑库水的情况下有无廊道两种模型在 1 号药室起爆后 t=0.04 s 时的计算爆破缺口图。由图 2 不难发现：爆破缺口的高度大致相等，但有廊道计算工况爆破缺口的宽度要比没有廊道计算工况大得多，这是由于廊道增多了爆破自由面所致。单从这一方面看，在坝前无水的情况下，廊道对爆破缺

口的形成有利。但实际爆破作业时，坝前水位▽ 135.40 m，因此，计算时必须考虑库水的存在。

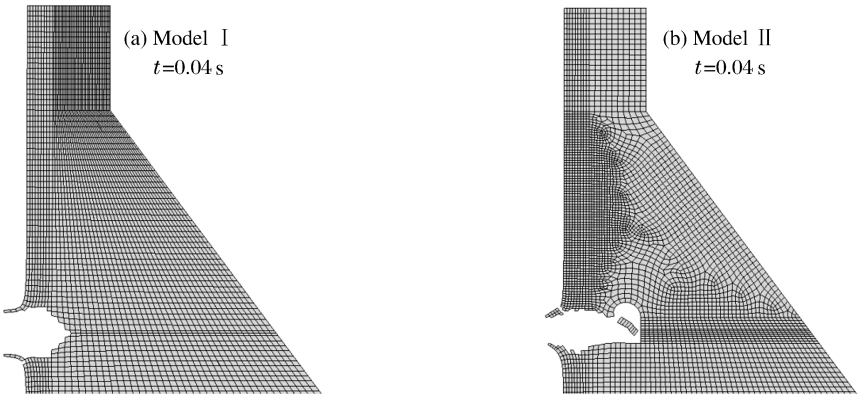

图 2　不考虑库水情况下的爆破缺口

Fig. 2　Blasting notch without taking account of reservoir water

4.2　考虑库水计算工况

图 3 是考虑库水的情况下有无廊道两种模型在 1 号药室起爆后 $t=0.04$ s 时的计算爆破缺口图。通过图 3 可以看出：无廊道时爆破缺口基本能形成，缺口前沿顶部和底部有少许残埂，由于水的阻力，爆渣抛掷不彻底。有廊道时，由于水的约束，爆渣向廊道内抛掷，临水面顶部和底部残留很多，爆破缺口不规则，廊道内爆渣对整体倾倒很不利，因此，在坝前有水的情况下，廊道对爆破缺口的形成和倾倒是不利的。图 4 是模型Ⅰ、模型Ⅱ爆破缺口放大图，分别比较图 3(a)和图 4(a)、图 3(b)和图 4(b)，不难发现：库前水对爆破缺口的形成有很大的影响，爆破实施时应综合考虑廊道和库水这两个影响因素。

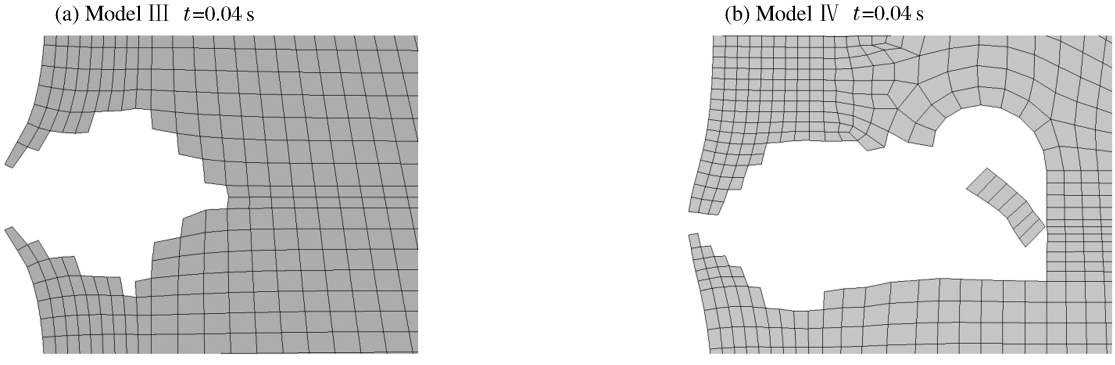

图 3　考虑库水情况下的爆破缺口

Fig. 3　Blasting notch with taking account of reservoir water

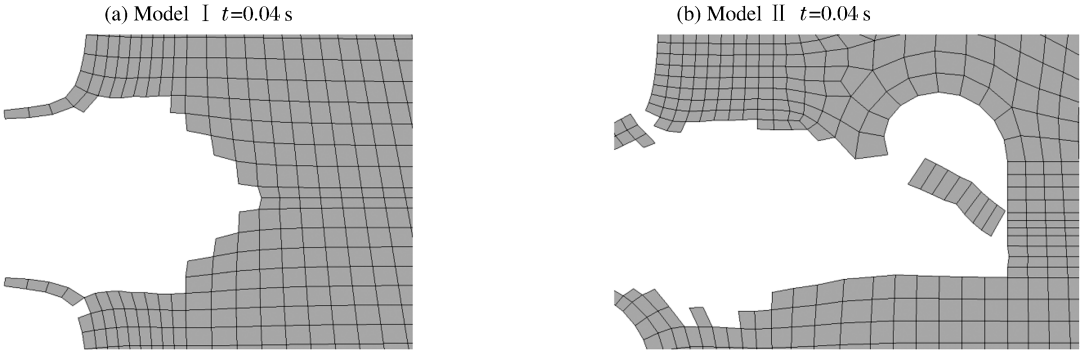

图 4　不考虑库水情况下的爆破缺口的放大图

Fig. 4　Enlarged blasting notchs without taking account of reservoir water

4.3 廊道充水计算工况

图 5 是考虑库水的情况下廊道充水时爆破缺口形成过程图。从图中可以看出，廊道充水时，由于廊道内水的约束作用，爆渣往廊道内抛掷较少。比较图 3(b)和图 5(d)可以发现：廊道充水时爆破缺口和没有充水时相比较易形成，但廊道和药室之间的拟爆体爆破不充分，易留下岩壁，尤其是实际廊道周边为厚度接近 0.5 m 的预制钢筋混凝土衬砌，在爆破参数设计尤其是药量设计时必须考虑这一因素。

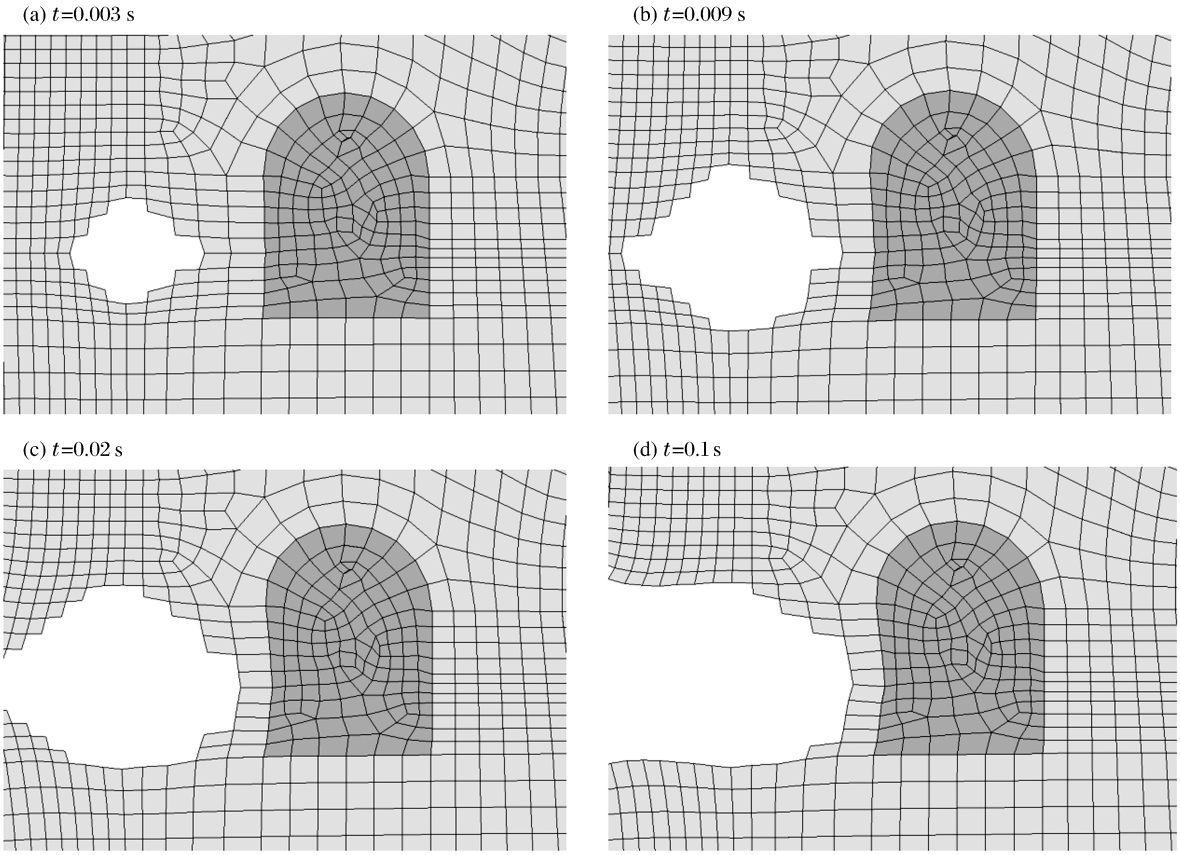

图 5 模型Ⅴ爆破缺口

Fig. 5 Blasting notch of model Ⅴ

4.4 计算结果分析

五种计算工况爆破缺口尺寸见表 2。通过计算结果的比较发现：在考虑库水的情况下爆破缺口的尺寸比不考虑库水时都相应要小，这是水的约束所致。考虑到上游库水对缺口范围爆渣抛掷的阻碍作用，以及廊道充水后廊道和药室之间的预制钢筋混凝土衬砌爆破不充分，在爆破实施时可以适当增大 1 号药室的装药量，确保缺口的形成。

表 2 爆破缺口尺寸

Table 2 Sizes of Blasting notchs

模型	缺口最大宽度/m	缺口最大高度/m	缺口面积/m^2
模型Ⅰ	4.57	4.83	13.1
模型Ⅱ	7.67	4.41	13.8
模型Ⅲ	4.55	3.87	9.9
模型Ⅳ	7.49	3.79	12.2
模型Ⅴ	4.07	3.07	9.5

5 结 束 语

通过用动力有限元程序 LS-DYNA 对长江三峡水利枢纽工程三期碾压混凝土横向围堰爆破拆除进行的数值模拟以及对计算结果的分析，可得出如下一些基本结论和建议：

(1)在不考虑库水的情况下，廊道对爆破缺口的形成是有利的；坝前有水、廊道不充水条件下，由于

水的约束和阻力，爆破缺口难以形成，爆渣向廊道内抛掷，对整体倾倒不利。

(2)爆破实施过程中，若廊道充水，虽然爆破缺口较易形成，但廊道和药室之间的被爆碾压混凝土体不易破碎。易留下岩壁、岩坎。

(3)在爆破实施过程中，可以适当增大 1 号药室的装药量，确保缺口的形成。

由于模拟工况与实际施工条件的差异，在爆破施工前，最好能够开展现场爆破试验，对廊道和库水进行综合考虑。

参考文献：

[1] 张正宇，赵根，吴新霞，等. 三峡三期碾压混凝土围堰拆除爆破研究[J]. 工程爆破，2003，9(1)：1－8.
ZHANG Zheng-yu, ZHAO Gen, WU Xin-xia, et al. Study on blasting demolition of third-stage roll compact concrete cofferdams in the third gorges[J]. Engineering Blasting, 2003，9(1)：1－8.

[2] 刘以钢，李世海. 碾压混凝土围堰拆除倾倒翻转方案现场试验研究[J]，爆破器材，2001，30(1)：21－26.
LIU Yi-gang, LI Shi-hai. The field test on the overturning program of demolishing the roller compacted concrete cofferdam[J]. Explosive Materials, 2001，30(1)：21－26.

[3] 李世海，刘以钢，郭易圆. 三峡三期围堰爆破拆除方案比较[J]. 爆破，2000，17(增刊 1)：40－42.
LI Shi-hai, LIU Yi-gang, GUO Yi-yuan. Optimization of explosive demolition programe of three gorges cofferdam at third stage[J]. Blasting, 2000，17(Suppl 1)：40－42.

[4] 赵海鸥. LS-DYNA 动力分析指南[M]. 北京：兵器工业出版社，2003：25－26.

[5] 杨华全，李家正，董维佳，等. 三峡工程三期围堰碾压混凝土试验研究[J]. 长江科学院院报，2004，21(2)：6－9.
YANG Hua-quan, LI Jia-zhen, DONG Wei-jia, et al. Study on properties of RCC of third-stage cofferdam of three gorges project[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2004，21(2)：6－9.

Numerical simulation for influence of corridor and reservoir water on blasting-demolition effect of the Three-Gorge cofferdam

LI Ben-ping[*1,2], LU Wen-bo[1]

(1. *State Key Laboratory of Water Resource and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan* 430072, *Hubei, China*;
2. *The Second Artillery Command College, Wuhan* 430012, *Hubei, China*)

Abstract: Numerical simulation has been carried out for blasting demolition of rolling compact concrete cofferdam in crosswise direction of which belongs to the third term of the Three-gorge project using dynamic finite element program LS-DYNA. The influence of corridor and reservoir water on blasting-demolition effect has been numerically analysed. The calculated resultes show that corridor and reservoir water influence forming and extent of blasting notch heavily, which must be considered sufficiently during blasting practice.

Key words: mechanics of explosion; blasting demolition; numerical simulation; rolling compact concrete cofferdam

* Corresponding author: LI Ben-ping
E-mail address: Benpin2000@yahoo.com.cn
Telephone: 027-82963937