

爆炸载荷下三峡三期纵向围堰响应的离散元分析

鲁晓兵¹ 郭易圆² 李世海¹

(¹中国科学院力学研究所 北京 100080) (²北京航空航天大学理学院 北京 100080)

摘要 通过离散元方法的数值模拟, 首先对清江高坝洲二期碾压混凝土围堰在爆炸载荷下的响应进行了分析, 经与实验结果比较, 得到了较合适的材料参数; 然后根据这些材料参数并结合实验提供的部分数据, 分析了三峡三期纵向围堰在爆炸载荷条件下的振动速度随离爆源距离衰减的变化规律, 以及振动速度随时间的变化规律等。计算结果表明, 三峡三期围堰爆破拆除时振动安全问题集中在纵向围堰拆除, 研究爆破载荷作用下纵向围堰的振动响应是非常重要的。

关键词 爆炸载荷, 三峡, 振动

分类号 TU 746.5, O 382+.2

文献标识码 A

文章编号 1000-6915(2002)02-0158-05

1 引言

通过清江高坝洲碾压混凝土纵向、横向围堰拆除的工程实验, 已经得到了特定条件下碾压混凝土坝中爆破波的传播规律, 对爆破引起的结构振动特性有了较为全面的了解。然而, 碾压混凝土结构中波的传播总是与结构的形状、地质条件等有关。在目前的条件下, 获得与三峡三期围堰结构形状完全相同的实验条件是不可能的, 而通过数值模拟, 建立与三峡结构基本相同的模型并结合工程方案的具体情况, 可以帮助人们对爆破拆除引起的振动安全问题有较为深刻的认识。

本文先用离散元方法对清江高坝洲二期碾压混凝土围堰在爆炸载荷下的响应进行数值模拟, 将不同参数条件下的结果与现场的实验结果进行对比, 从而找到合适的材料参数, 然后结合实验提供的部分数据^[1], 用离散元方法对三峡三期纵向围堰在爆炸载荷下的响应进行数值模拟, 得到振动速度等随时间、空间变化的规律, 为三峡三期纵向围堰的爆炸拆除提供依据。

2 爆炸载荷下高坝洲水电站围堰结构响应

2.1 高坝洲水电站横向围堰结构

高坝洲水电站位于长江支流的清江下游, 二期碾压混凝土围堰位于清江左岸上游。顶面高程为+49 m, 底部为基岩, 高程约为+32 m。围堰全程为164 m,

上游为直立面, 下游为+32 m~+40 m的直立面, +46 m以上为直立面, +46 m~+49 m为素混凝土块构筑的台阶。每个台阶的高度为60 cm, 宽度为40 cm^[1], 围堰结构如图1所示。

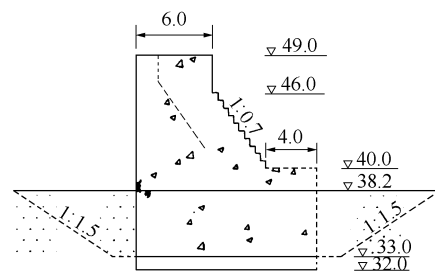


图1 围堰横截面示意图

Fig.1 Cross section of cofferdam

这样, 将分析如下的问题: 炸药4~8 kg, 其位置离围堰一端47 m, 空库条件即上下游面为自由面, 侧面及底面为法向固定, 将下游台阶段简化为斜平面。

2001年4月14日收到初稿, 2001年7月10日收到修改稿, 2001年7月25日收到改定稿。

作者 鲁晓兵 简介: 男, 1968年生, 博士, 1990年毕业于成都科技大学力学系力学专业, 现为助理研究员, 主要从事岩土力学方面的研究工作。

2.2 动态离散元的模型及定解条件^[2~5]

整个坝体被划分成 1 763 块 4 m×2 m×2 m 的六面体。沿轴向分为 41 层(计算时取轴向为 x 方向, 垂向为 z 方向), 每层截面分为 43 个面单元(六面体的一个面), 如图 2 所示。每个面划分为 4 个小四边形, 小四边形的中心点称为 LUMP 点, 每个块体质心的运动满足牛顿第二定律, 即

$$M\ddot{U}_i + C\dot{U}_i = \sum_{j=1}^{24} F_{ij} \quad (1)$$

$$F_{ij} = k_i \Delta U_{ij} \quad (2)$$

式中: M 为块体的质量或惯性矩, U 为块体质心的平动位移或转角, F_{ij} 为 i 块体 j LUMP 点的力或力矩, C 为阻尼系数, k_i 为节理刚度, ΔU_{ij} 为 i 块体 j LUMP 点与相邻块体对应的 LUMP 点的位移差。

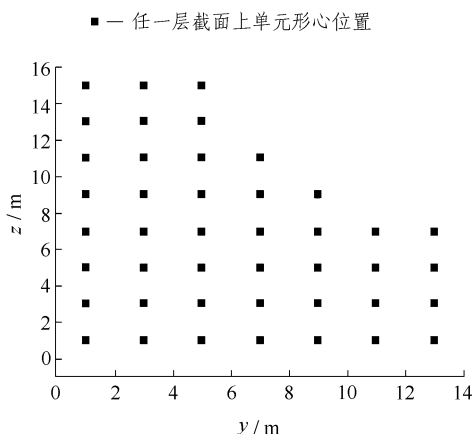


图 2 计算截面划分示意
Fig.2 Cross section for computation

初始条件: 坝体在重力作用下达到平衡, 然后在坝体某处药包起爆, 即, 当 $t = 0$ 时:

$$\left. \begin{aligned} U &= 0 \\ \sigma_x = \sigma_y &= \frac{\mu}{1-\mu} \rho g h \\ \sigma_z &= \rho g h \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

在 $x = xL$, $y = yL$, $z = zL$ 处, 药包爆炸, 产生一个高压气团, 压力 $p_0 = \frac{1}{8} k \rho D^2$, 其中 $k = 1$ 为系数, $\rho = 1\,000 \text{ kg/m}^3$ 为炸药密度, D 为炸药爆速。

边界条件: 上下游坝面及坝顶面为自由面, 其他面为法向约束, 即, 当 $y \leq 6$ 或 $y < 10.2$ 且 $y \leq 16.27 - 0.73z$ 或 $10.2 < y \leq 14.2$ 且 $z \leq 8$ (顶面及侧面) 时:

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = \tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{xz} = 0$$

当 $x = 0$ 或 $x = xL$ (轴向两端) 时: $U_x = 0$

当 $z = 0$ 时: $U_z = 0$

当 $z = zL$ 时:

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = \tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{xz} = 0 \quad (4)$$

围堰密度 $\rho_s = 2\,400 \text{ kg/m}^3$, 上述的 $h = 90 \text{ m}$, $xL = 104 \text{ m}$, $yL = 4 \text{ m}$, $zL = 10 \text{ m}$ 。对于某方向约束的边界, 直接限定块体质心该方向的合力为零; 对于某方向自由的边界, 取该方向不施加任何约束条件; 对于某方向为透射的边界条件, 对该方向上的力加上 $-\rho C v$, ρ 为块体密度, C 为波速, v 为块体振动速度。

2.3 数值模拟结果

根据前面所述的动态离散元模型及定解条件, 编制了相应的程序(由文[2, 4]编制的程序改进而来), 并进行了计算分析。下面给出了阻尼比对模拟结果的影响、垂向振动速度随距离的衰减规律、垂向振动速度随时间变化的数值模拟结果。计算中, 弹性系数、泊松比等是根据文[1]中的实验结果, 结合岩石参数的可能范围通过反演求得的^[6], 分别取为 $E = 59 \text{ GPa}$, $\nu = 0.2$; 药量是根据实验中采用的药量给出的, 取为 4~8 kg, 爆炸载荷的计算见文[2]; 阻尼比分别取为 0.01, 0.03, 0.05 三种情况。

2.3.1 阻尼比对模拟结果的影响

为考察阻尼比的影响, 模拟中分别取阻尼比为 0.01, 0.03, 0.05, 药量为 6 kg。结果表明(图 3),

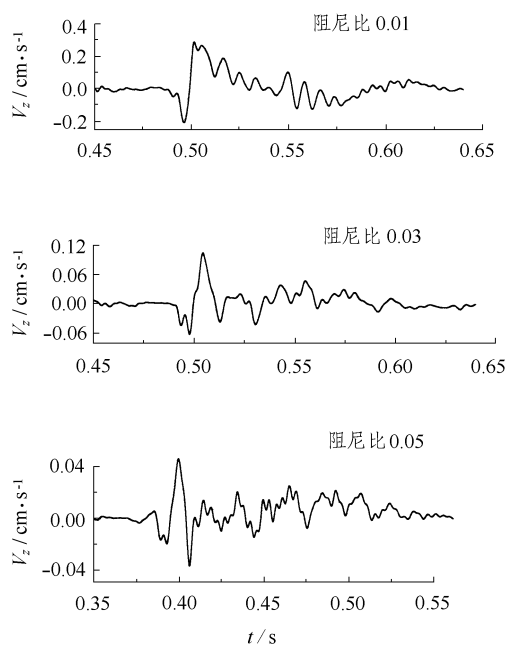


图 3 不同阻尼比时速度随时间的变化(离爆源 12 m)

Fig.3 Changes of the vibration velocity with different damping ratio(12 m far from detonation)

阻尼比越大，结构振动时间越短，振动幅值越小。这是由于阻尼比越大，即结构体的运动阻尼越大，振动幅值就越小；同时，振动过程中耗散越大，能量很快被消耗掉，这样，振动时间就越短。从计算结果可以看出，阻尼比取 0.03 时与实际情况比较接近。下面一节将作进一步比较和说明。

2.3.2 坝顶垂向振动速度随距离的衰减规律

下面根据数值模拟结果，给出了坝顶与药包同一轴向截面上的垂向振动速度随距离变化的曲线(图 4)，与实验结果^[7]进行对比，可以看到，两者在量级和变化趋势上还是基本符合的，其中阻尼比取为 0.03。

拟合公式为

$$V_z = 501 \left(\frac{Q^{1/3}}{R} \right)^{2.0} \quad (5)$$

式中： V_z 为垂向振动速度(cm/s)， Q 为药量(kg)， R 为测点距爆源之间的距离(m)。

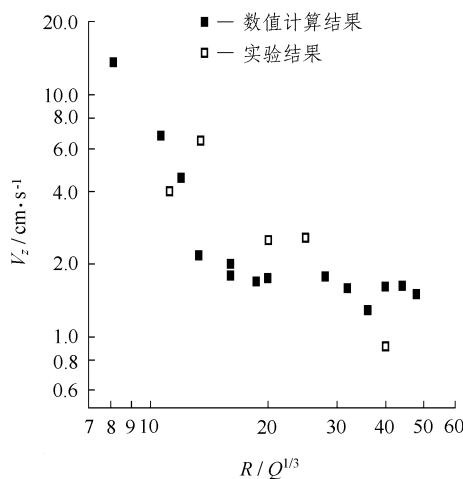


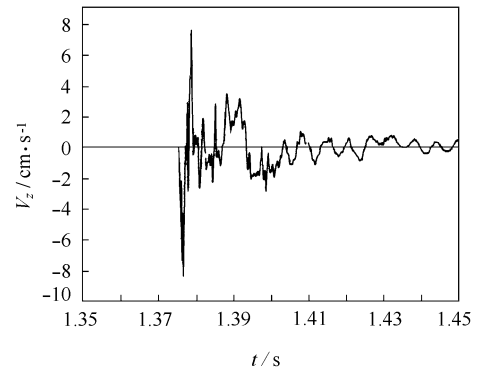
图 4 速度振动幅值衰减曲线

Fig.4 Decaying curve of the amplitude of vibration velocity

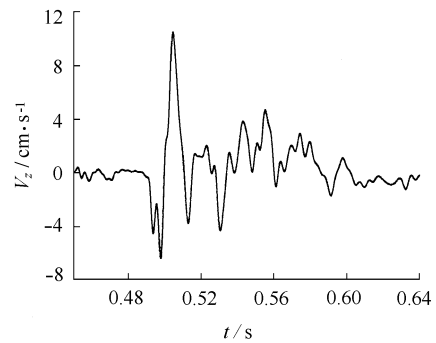
2.3.3 任意点垂向振动速度随时间的变化

为了进一步得到爆炸载荷作用下坝体中垂向振动速度的变化规律并与实验结果对比，下面给出了垂向振动速度随时间的变化曲线(图 5(a), (b))。可以看出，计算结果与实验结果的变化趋势基本一致。图中的起始时间为静力平衡计算结束，动态计算开始时间，同以下各图。

根据前面的数值模拟分析并与实验结果对照，确定了材料参数：阻尼比为 0.03，弹性模量为 50 GPa，泊松比为 0.2。



(a) 21.5 m 处实验结果



(b) 24 m 处计算结果

图 5 振动速度的实验和计算结果对比曲线

Fig.5 Comparing curves of the results from experiments and computing

3 三峡三期纵向围堰在爆炸载荷作用下的响应

3.1 三峡三期纵向围堰结构

三峡三期纵向围堰位于三峡大坝工程的右岸，围堰高 90 m，底部为基岩，顶面宽 8 m，坝头高 10 m。围堰全程长约为 120 m，上游为直立面，下游面为 1 : 0.75 的斜坡。围堰结构如图 6 所示。考察爆炸载荷下坝体中波的传播特性，包括振动速度等随时间、空间的变化等。

初始条件：坝体在重力作用下达到平衡，然后在坝体某处药包起爆，即当 $t = 0$ 时(初始条件同式(3)):

$$\left. \begin{aligned} U &= 0 \\ \sigma_x &= \sigma_y = \frac{\mu}{1-\mu} \rho g h \\ \sigma_z &= \rho g h \end{aligned} \right\}$$

在 $x = xL$ ， $y = yL$ ， $z = zL$ 处，药包爆炸。

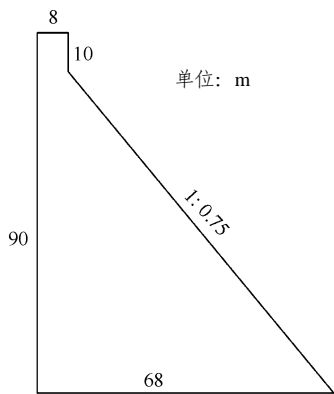


图 6 坝体横截面示意图

Fig.6 Cross section of the Three Gorges cofferdam

边界条件：上下游坝面及坝顶面为自由面，其他面为法向约束，即，当 $y \leq 8$ 或 $8 \leq y \leq 68$ 且 $z \leq 90.67 - 1.33 y$ (顶面及侧面)时：

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = \tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{xz} = 0$$

当 $x = 0$ 或 $x = xL$ (轴向两端)时： $U_x = 0$

当 $z = 0$ 时： $U_z = 0$

当 $z = zL$ (底面)时：

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = \tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{xz} = 0$$

当 $8 \leq x \leq 68$ 且 $z \leq 90.67 - 1.33 x$ 时(即与横向围堰接头处)：

$$U_y = 0 \tag{6}$$

上述 $\rho = 2400 \text{ kg/m}^3$, $h = 90 \text{ m}$, $xL = 104 \text{ m}$, $yL = 4 \text{ m}$, $zL = 10 \text{ m}$ 。

另外，根据前一节的分析，围堰的材料参数阻尼比取为 0.03，弹性模量为 50 GPa，泊松比为 0.2，整个围堰划分为 $2 \text{ m} \times 2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ 的块体集合。网格划分类似图 2 所示。

3.2 计算结果

3.2.1 坝顶垂向振动速度随距离的衰减规律

垂向振动速度随距离的衰减可以反映爆炸载荷作用下的介质的响应规律，也是工程界常作为参考的依据。因此，下面根据数值模拟结果，给出坝顶与药包同一轴向截面上的垂向振动速度随距离变化的曲线(图 7)。

经拟合，得到如下形式的关系式：

$$V_z = 14.3 \left(\frac{R}{Q^{1/3}} \right)^{-1.16} \tag{7}$$

式中： V_z 为垂向振动速度(cm/s)， Q 为药量(kg)， R 为测点距爆源的距离(m)。

3.2.2 垂向振动速度随时间和空间的变化

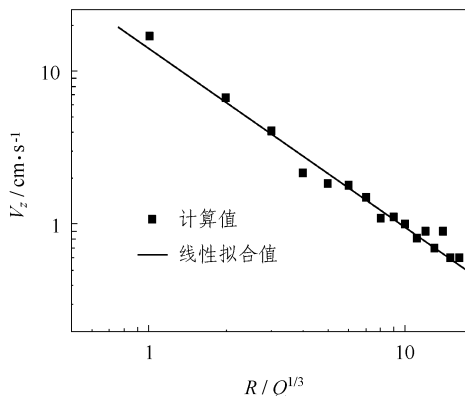


图 7 速度振动幅值衰减曲线

Fig.7 Decaying curve of the amplitude of vibration velocity

为了进一步得到爆炸载荷作用下坝体中垂向振动速度的变化规律，下面给出了垂向振动速度随时间的变化曲线(图 8)。可以看出，在施加爆炸载荷后(药量 6 kg)，在坝体中较远处(如图 8 所示 60 m 处)初始产生大的脉冲，然后迅速衰减为小的振动，在 100 ms 左右，衰减为零；在坝体中较近处(如图 8 所示 24 m 处)也是先出现大脉冲，然后迅速衰减，

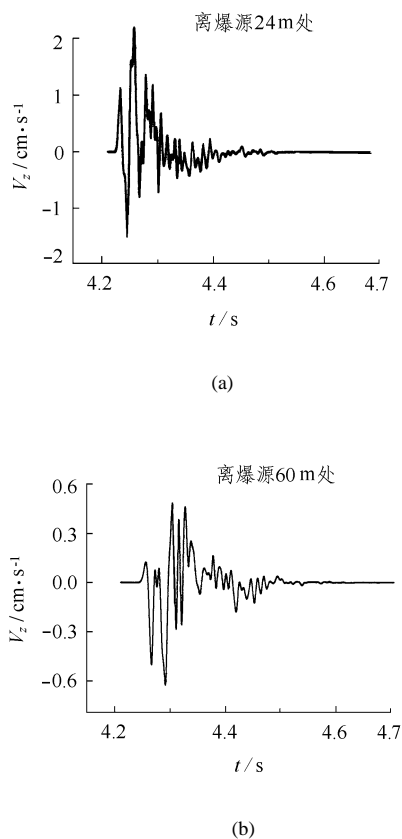


图 8 振动速度随时间变化的曲线

Fig.8 Changes of the vibration velocity with time

但是其振动速度幅值较远区的大。这是因为离爆源越近,坝体受到的冲击力越大,变形等响应也就越大。

4 结 论

本文通过数值模拟,首先由清江高坝洲二期碾压混凝土围堰在爆炸载荷下的响应分析得到材料参数;然后分析了三峡三期纵向围堰在爆炸载荷条件下的一些响应,包括振动速度等随时间及空间的变化特点,以及围堰两端的约束条件对振动响应的影响。主要结论为:(1)材料参数阻尼比取为 0.03,弹性模量为 50 GPa,泊松比为 0.2 时,结果与实际情况较符合;(2)垂向振动速度随距离衰减的拟合公式为 $V_z = 14.3(\frac{R}{Q^{1/3}})^{-1.16}$; (3) 振动速度随时间和空间而衰减,近距离衰减快,远距离衰减慢。本文的计算结果是单炮爆炸作用下的结果,三峡三期纵向围堰的爆炸拆除需要多炮作用,同时,由于模拟

上的困难,在模型中作了一些假设。这些分析对该围堰的爆炸拆除设计可以提供一些参考。

参 考 文 献

- 1 丁汉堃,方正,李世海等. 碾压混凝土可爆性实验研究[R]. 北京:中国科学院力学研究所, 2001
- 2 王泳嘉,邢纪波. 离散单元法及其在岩土力学的应用[M]. 沈阳:东北工学院出版社, 1991
- 3 郭易圆. 节理岩体中爆破远区传播规律的三微离散元数值分析[博士学位论文][D]. 北京:中国科学院力学研究所, 2001
- 4 高波. 三维离散元改进算法及其在三峡永久船闸高边坡工程中的应用[硕士学位论文][D]. 北京:中国科学院力学研究所, 1999
- 5 刘斯宏,徐永福. 粒状体直剪试验的数值模拟与微观考察[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(3): 288~292
- 6 郑哲敏,李世海,丁桦等. 三峡水利枢纽三期围堰爆破拆除方案设计与研究[R]. 北京:中国科学院力学研究所, 2000
- 7 李世海,陈力,方正. 碾压混凝土中爆炸波传播规律的实验研究[R]. 中国科学院力学研究所, 2001

DEM ANALYSIS ON THE THIRD PERIOD LONGITUDINAL COFFERDAM OF THE THREE GORGES UNDER BLAST LOADING

Lu Xiaobing¹, Guo Yiyuan², Li Shihai¹

¹*Institute of Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080 China*

²*School of Science, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100080 China*

Abstract The responses of the second period RCC of Qingjiang under blasting loading are analyzed by DEM first. The material parameters are obtained by comparing the numerical results and those of the experiments. And then, with these material parameters and some data obtained from experiments, the decaying rules of the vibration velocities with distance and time of the three period longitudinal cofferdam of the Three Gorges under blasting loading are analyzed. It is shown that the vibration safety of blast dismantlement for the third period longitudinal cofferdam of the Three Gorges is the most important problem. Therefore, it is practical and important to study the responses of vibration of the third period longitudinal cofferdam under blast loading.

Key words blasting loading, The Three Gorges, vibration