

文章编号: 1001-1455(2010)02-0220-05

# 制导炸弹连续打击下混凝土重力坝的破坏效应<sup>\*</sup>

李本平

(第二炮兵指挥学院, 湖北 武汉 430012)

摘要: 选取某制导炸弹作为研究对象, 利用任意 Lagrange-Euler 计算方法, 通过对大口径、高弹重武器的侵彻爆炸的全过程三维数值仿真, 针对连续打击作用下大坝破坏效应进行了研究。研究表明, 侵彻引起的振动很小, 引起质点振动的主要是弹药的爆炸。由于相继打击间隔时间已远超过大坝动态响应时间, 相继打击引起的坝体振动基本上不存在叠加效应。但前枚制导炸弹侵彻爆炸的破坏效应为后继制导炸弹提供了“临空面”, 使得后继制导炸弹无论是侵彻深度还是爆炸破坏范围等破坏效应都有所增大。连续打击下, 爆炸后形成的破坏范围基本上互相连通, 对大坝的正常运行及安全构成威胁。

关键词: 爆炸力学; 破坏效应; 任意 Lagrange-Euler 方法; 混凝土重力坝; 连续打击; 制导炸弹

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

## 1 引言

未来战争中, 对重要军事、民用设施等战略目标实施多波次重复打击已成为必然, 多弹头分导技术使得重复打击具有很强的实战性<sup>[1]</sup>。在战术上, 重复打击分为 2 个方面: (1) 以分布式多弹同时爆炸方式攻击重要的点目标或面目标; (2) 重复连续打击。连续打击的实质就是弹药爆炸相继作用。关于多弹爆炸相继作用破坏效应研究, 主要集中在空中多点聚集爆炸、浅水中多点爆炸、爆炸应力波相互作用的动态光弹性以及钻地弹聚集爆炸效应<sup>[2-3]</sup>等方面。研究制导炸弹连续打击下混凝土重力坝的破坏效应, 可以为大坝的安全评估以及综合防护提供理论依据和支撑, 具有十分重要的军事价值和现实意义<sup>[4]</sup>。

本文中选取某制导炸弹作为研究对象, 通过对大口径、高弹重武器的侵彻爆炸的全过程进行 3 维数值仿真, 探讨 2 枚制导炸弹跟进打击作用下混凝土重力坝的破坏效应。

## 2 计算模型

选取的研究对象为混凝土重力坝, 由泄洪坝段、两岸厂房坝段、升船机坝段、两岸非溢流坝段 4 部分组成。根据坝段的地理位置及重要性, 选取泄洪坝段作为计算分析对象。

泄洪坝段高 185 m, 长 483 m, 分 23 个坝段, 每个坝段长 21 m, 坝顶宽 40 m。在 2 个坝段之间布置净宽 8 m 的泄洪表孔, 表孔底部距坝顶 25 m。由于每个坝段彼此独立, 之间为施工缝, 计算时, 选取 1 个坝段进行计算。由于泄洪坝段体积庞大, 考虑到目前制导炸弹的侵彻深度和弹药量, 制导炸弹侵彻爆炸仅对泄洪坝段产生局部破坏效应, 对坝体整体稳定不会构成任何威胁。因此, 不考虑坝基的稳定以及坝体与地基间的相互作用。另外, 坝后库水水位一般比坝前水位低得多, 而且对坝体的稳定是有利的, 按最不利原则, 建立计算模型时不考虑坝后库水。鉴于此, 选取大坝计算模型如图 1 所示。大坝底部采用约束边界和无反射边界。计算水域为坝前 10 m, 深度为 10 m。由于大坝高度比厚度大得多, 从目前精确制导炸弹的侵彻深度看, 尽管从坝顶垂直入射的概率高, 但水平入射跟进打击相比垂直入射跟进打击的危害相应要严重得多。因此, 本文中考虑尺寸和装药量完全相同的 2 枚制导炸弹均从大坝下游水平入射, 撞击点位于大坝下游垂直段的中心, 撞击速度  $v=240$  m/s。一般来说, 制导炸弹跟进袭击相隔一定时间, 相隔时间与数值模拟的计算时间相比近似无限大, 因此, 计算时假设相隔时间很短, 在首枚制

\* 收稿日期: 2008-12-10; 修回日期: 2009-05-19

作者简介: 李本平(1967—), 男, 博士。

导炸弹爆炸大坝响应结束后第2枚制导炸弹跟进侵彻, 这样, 相隔时间的长短对计算结果没有影响。除和坝体接触面以及自由水面外, 库水模型其他4个面均采用无反射边界。由于侵彻计算对单元网格精度要求加高, 因此, 制导炸弹侵彻作用一定范围单元网格加密, 即模型中坝体垂直段中部厚度为1 m的范围进行单元网格加密处理。大坝和弹体划分 Lagrange 网格, 坝前库水和弹药采用 ALE 网格, 模型节点共 154 480 个, 3 维实体单元共 142 220 个, 如图 2 所示。

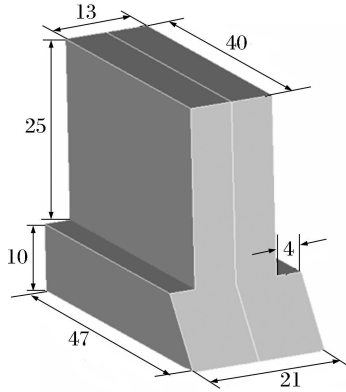


图1 大坝计算模型

Fig. 1 A calculation model for the dam

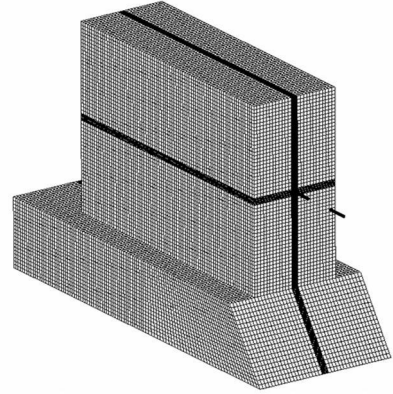


图2 模型网格

Fig. 2 Mesh of the model

### 3 材料模型及计算参数

#### 3.1 大坝材料本构模型

大坝材料为碾压混凝土, 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<sup>[5]</sup>

$$\sigma_y = k(\alpha_0 + \beta E_p \epsilon_p^p) \quad (1)$$

式中:  $\sigma_y$  为硬化屈服应力;  $\alpha_0$  为初始屈服应力;  $\beta$  为硬化参数,  $0 \leq \beta \leq 1$ ;  $E_p$  为塑性硬化模量;  $\epsilon_p^p$  为有效塑性应变;  $k$  为屈服应力缩比系数,  $k = 1 + (\epsilon/C)^{1/P}$ ,  $C, P$  为应变率参数。大坝材料的计算参数: 密度,  $2.4 \text{ t/m}^3$ ; 动态弹性模量,  $30.0 \text{ GPa}$ ; 泊松比,  $0.2$ ; 屈服强度,  $24 \text{ MPa}$ ; 硬化参数  $\beta$ ,  $1$ ; 切线模量,  $7.0 \text{ GPa}$ ; 应变率参数  $C$ ,  $25$ ; 应变率参数  $P$ ,  $1.5$ ; 失效应变  $\epsilon_p$ ,  $0.002$ ; 动态抗拉强度,  $6.0 \text{ MPa}$ 。

#### 3.2 爆轰产物状态方程

制导炸弹装药  $Q = 306 \text{ kg}$ <sup>[6]</sup>。高能炸药起爆后炸药单元体内的压力由状态方程求得, Jones-Wilkins-Lee 状态方程表示为

$$p = A \left[ 1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right] e^{-R_1 V} + B \left[ 1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right] e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (2)$$

式中:  $A, B, R_1, R_2, \omega$  是材料常数,  $p$  是压力,  $V$  是相对体积,  $E_0$  是初始比内能。

炸药的计算参数: 密度,  $1670 \text{ kg/m}^3$ ; 爆速,  $7 \text{ km/s}$ ;  $A$ ,  $371 \text{ GPa}$ ;  $B$ ,  $3.223 \text{ GPa}$ ;  $R_1$ ,  $4.2$ ;  $R_2$ ,  $0.95$ ;  $\omega$ ,  $0.3$ ;  $E_0$ ,  $7.0 \text{ GPa}$ 。

#### 3.3 水的状态方程

水作为1种流体, 采用 Grüneisen 状态方程<sup>[7]</sup>, 计算参数: 密度,  $998.21 \text{ kg/m}^3$ ;  $C$ ,  $1647$ ;  $S_1$ ,  $1.921$ ;  $S_2$ ,  $-0.096$ ;  $S_3$ ,  $0.0$ ;  $\gamma_0$ ,  $0.35$ ;  $A$ ,  $3.0$ ;  $E_0$ ,  $2.895$ ;  $\omega$ ,  $1.0$ 。

#### 3.4 弹体模型及计算参数

某制导炸弹质量  $m = 2130 \text{ kg}$ , 弹长  $L = 5.84 \text{ m}$ , 炸弹直径  $d = 370 \text{ mm}$ , 装药  $Q = 306 \text{ kg}$ , 弹壳厚度  $\delta = 1 \text{ cm}$ , 弹壳为钨合金材料, 弹头按刚体处理。弹壳材料计算参数<sup>[8]</sup>: 密度,  $7896 \text{ kg/m}^3$ ; 动态弹性模量,  $350 \text{ GPa}$ ; 泊松比,  $0.3$ ; 屈服强度,  $815 \text{ MPa}$ ; 硬化参数  $\beta$ ,  $1$ ; 切线模量,  $21.0 \text{ GPa}$ ; 应变率参数  $C$ ,  $40$ ; 应变率参数  $P$ ,  $5$ ; 失效应变  $\epsilon_p$ ,  $0.08$ ; 动态抗拉强度,  $1350 \text{ MPa}$ 。

## 4 计算结果与分析

### 4.1 振速

选取坝顶中心节点,整理得出水平方向和竖直方向振动速度时程曲线如图3所示。由图可见:侵彻引起的振动很小,引起质点振动的主要是弹药的爆炸。曲线上有2个明显的波峰,第2枚制导炸弹爆炸时,首枚制导炸弹爆炸引起的大坝响应已很小,说明计算所取的2枚制导炸弹袭击时间间隔是可行的。第2枚制导炸弹弹药中心基本上在该节点正下方,因此引起该节点处垂直向振速峰值比首枚制导炸弹爆炸的大,达15.51 cm/s。

### 4.2 应力云图

图4是坝体应力变化云图,由图可以看出:制导炸弹在侵彻过程中,仅在撞击点附近区域的坝体中产生应力集中现象(图4(a)、图4(c)),说明制导炸弹的侵彻仅引起坝体局部冲击破坏。制导炸弹弹药爆炸对坝体的破坏作用范围则相应要大得多,从应力等值线的范围看,爆炸的破坏作用在垂直侵彻方向比平行侵彻方向的大(图4(b))。 $t=85\text{ ms}$ 时,第2枚制导炸弹开始侵彻坝体,从应力云图(图4(c))看,除撞击点附近区域产生应力集中外,坝体其他部位应力近似为零,说明第2枚制导炸弹开始侵彻坝体时,首枚制导炸弹爆炸使坝体产生的应力基本上已消散,本文中对2枚制导炸弹打击的时间间隔的设置是合理的。

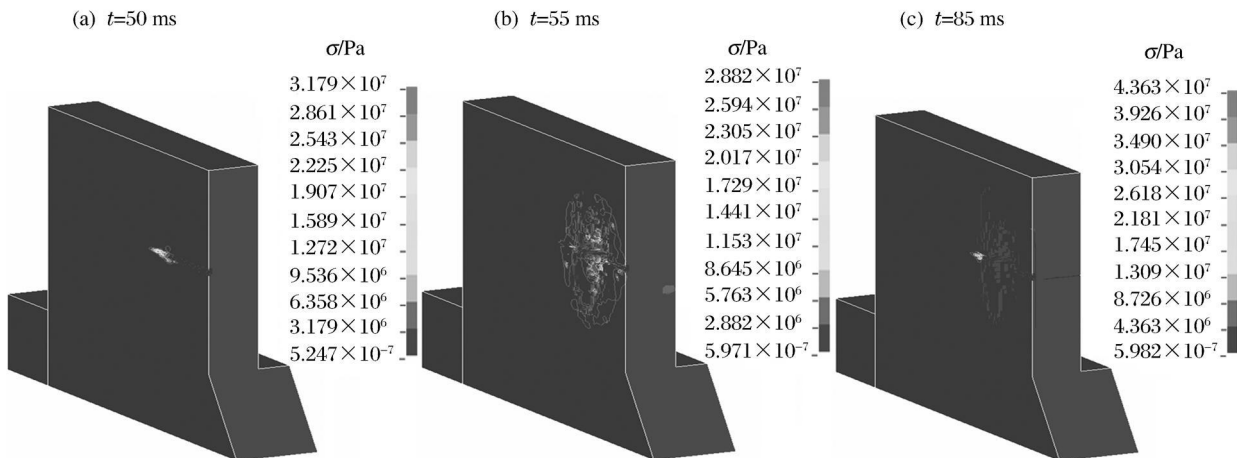


图4 大坝第1主应力变化云图

Fig. 4 Cloud atlas of the maximum principal stress for the dam

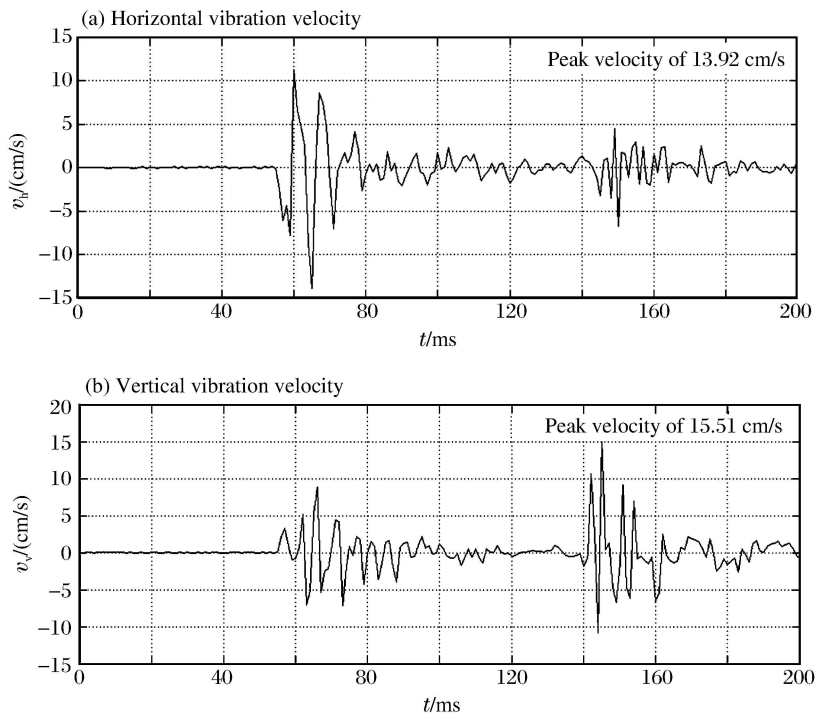


图3 振动速度时程曲线

Fig. 3 Vibration velocity against time

### 4.3 破坏范围

图5是大坝破坏范围变化图,图6是大坝模型对称面(即大坝轴线方向中心处剖面)破坏范围图。由图可以看出:首枚制导炸弹爆炸坝体破坏范围在平行弹轴方向约为9 m,垂直弹轴方向约为16 m;由于首枚制导炸弹爆炸形成的“临空面”的影响,第2枚制导炸弹爆炸坝体破坏范围在平行弹轴方向约为12 m,垂直弹轴方向约为16 m。2枚制导炸弹爆炸后形成的破坏范围基本上互相连通。

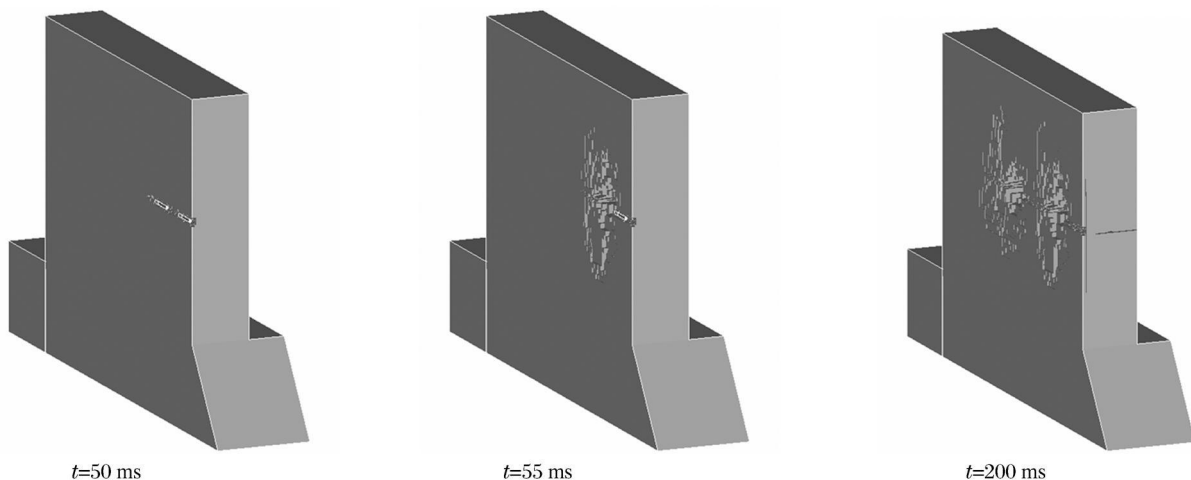


图5 不同时刻大坝的破坏范围

Fig. 5 Damaged range of the dam at different times

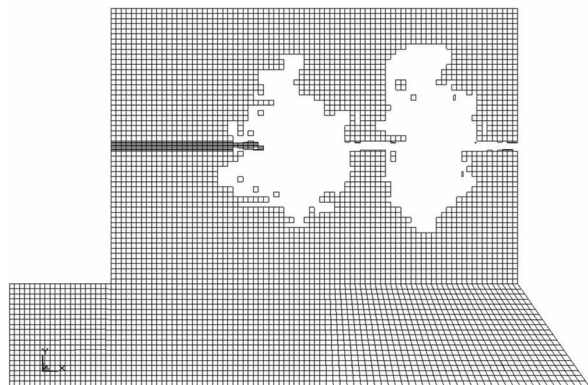


图6 破坏范围剖面图

Fig. 6 Damaged range profile at  $t=200$  ms

## 5 结论

通过以上数值模拟和计算成果分析,可以得到以下一些基本结论:

(1) 对大口径、高弹重武器的侵彻爆炸全过程3维数值仿真,可以避免因忽略侵彻过程而直接将炸药埋在预定位置的传统分析方法带来的误差,能更加真实地反映制导炸弹的侵彻爆炸破坏作用。通过对相继打击武器设置合理间距的简化处理,可以解决由于相继打击间隔时间相对于计算时间过长而带来计算无法实现的难题。

(2) 侵彻引起的振动很小,引起质点振动的主要是弹药的爆炸。由于相继打击间隔时间已远超过大

坝动态响应时间,相继打击引起的坝体振动基本上不存在叠加效应。

(3) 前枚制导炸弹侵彻爆炸的破坏效应为后继制导炸弹提供了“临空面”,使得后继制导炸弹爆炸破坏效应有所增大。连续打击下,爆炸后形成的破坏范围基本上互相连通,对大坝的安全构成威胁。

### 参考文献:

- [1] 李本平. 精确制导武器打击下混凝土重力坝毁伤效应研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2006: 1-2.
- [2] 孙百连, 顾文彬, 蒋建平, 等. 浅层水中沉底的两个装药爆炸的数值模拟研究[J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(5): 460-465. SUN Bai-lian, GU Wen-bin, JIANG Jian-ping, et al. Numerical simulation of explosion shock wave interaction in shallow layer water[J]. Explosion and Shock Waves, 2003, 23(5): 460-465.
- [3] 邓国强, 周早生, 郑全平. 钻地弹爆炸聚集效应研究现状及展望[J]. 解放军理工大学学报: 自然科学版, 2002, 3(3): 45-49.

- DENG Guo-qiang, ZHOU Zao-sheng, ZHENG Quan-ping. Study status quo and development of aggregated effect of multiple earth penetration bursts detonated simultaneously[J]. Journal of PLA University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2002, 3(3): 45-49.
- [4] 李本平, 黄志鹏. 制导炸弹水中爆炸对大坝破坏效应研究[J]. 防护工程, 2008, 30(1): 13-14.  
LI Ben-ping, HUANG Zhi-peng. Study on the damage effect for explosion of precision guided bomb under reservoir water[J]. Protective Engineering, 2008, 30(1): 13-14.
- [5] 赵海鸥. LS-DYNA 动力分析指南[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2003: 25-26.
- [6] 张殿臣, 王振宇. 打击地下工事的国外高技术武器弹药参考手册[M]. 洛阳: 总参工程兵科研三所, 1998: 1-10.
- [7] 张振华, 朱锡, 白雪飞. 水下爆炸冲击波的数值模拟[J]. 爆炸与冲击, 2004, 24(2): 182-188.  
ZHANG Zhen-hua, ZHU Xi, BAI Xue-fei. The study on numerical simulation of underwater blast wave[J]. Explosion and Shock Waves, 2004, 24(2): 182-188.
- [8] Cheng X W, Wang L, Wang F C, et al. Simulation on tungsten alloy PE projectile penetration into targets[C] //International Symposium of Young Scholars on Mechanics and Material Engineering for Science and Experiments. New York: Science Press New York Ltd, 2001: 367-370.

## Damage effect of a concrete gravity dam under continuous attacks of guided bombs<sup>\*</sup>

LI Ben-ping

(*The Second Artillery Command College, Wuhan 430012, Hubei, China*)

**Abstract:** Guided bombs were taken as the research objects to numerically simulate the penetration and explosion process of large-aperture-heavy weapons by using a three-dimensional arbitrary Lagrange-Eulerian (ALE) code and to explore damage effects of a roller compacted concrete gravity dam under continuous attacks of two precision-guided bombs. Results show that the vibration caused by penetration is weak, while the particle vibration is mainly caused by ammunition explosion. The intermission time of sequential attacks is far longer than the dynamic response stretch of the dam, and the dam vibration caused by sequential attacks scarcely takes on the superposition effect. But the damage effect of penetration and explosion for the former missile provides the freedom surface for the subsequent missile, and the penetration depth and explosion-damaged range of the subsequent missile increase. The explosion-damaged ranges basically connect with each other, which threat to the normal running and security of the dam.

**Key words:** mechanics of explosion; damage effect; arbitrary Lagrange-Eulerian (ALE) code; concrete gravity dam; guided bomb; continuous attack

<sup>\*</sup> Received 10 December 2008; Revised 19 May 2009

Corresponding author: LI Ben-ping, Benpin2000@yahoo.com.cn

(责任编辑 张凌云)