

文章编号: 1001-1455(2013)03-0255-08

# 水下爆炸冲击荷载下混凝土重力坝的抗爆性能\*

张社荣, 王高辉

(天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072)

**摘要:** 在水下爆炸冲击荷载作用下, 结构动力响应较之静态荷载和地震荷载作用下要复杂得多。通过大量的数值模拟, 探讨了混凝土重力坝在水下爆炸冲击荷载作用下, 大坝高度、库前水位对大坝抗爆性能的影响, 为大坝抗爆性能评估和防护设计提供基础。数值计算中, 构建了重力坝水下爆炸全耦合数值模型, 并考虑爆炸冲击作用下混凝土的高应变率效应。研究结果表明: 对于混凝土重力坝, 随着大坝高度的增加, 大坝的抗爆性能增强; 库前水位对大坝的抗爆性能影响较大, 通过降低库前水位可有效提高大坝的抗爆性能。

**关键词:** 爆炸力学; 抗爆性能; 水下爆炸; 混凝土重力坝; 破坏模式; 动力响应

**中图分类号:** O381; TV312

**国标学科代码:** 1303520

**文献标志码:** A

为了满足日益增长的对绿色能源的需求, 对水电的开发利用进入了快速发展时期, 一批 100~300 m 级的混凝土重力坝、拱坝正在建设中, 如雅砻江的官地水电站、锦屏一级水电站和两河口水电站。尤其在“9·11”恐怖袭击后, 高坝显著的政治经济效益无疑成为局部战争或恐怖袭击的重点攻击目标。因此开展大坝在爆炸冲击荷载作用下的动力响应和破坏模式分析, 具有重要意义。

水下爆炸冲击荷载作用下的结构破坏是一个十分复杂的过程, 造成结构破坏的作用荷载是多样的, 涉及水边界的影响以及目标运动等复杂的爆炸动力学问题。由于爆炸实验耗资巨大、数据采集困难而且数据误差大等难以克服, 使得实验研究具有很大的局限性。水下爆炸冲击荷载作用下结构抗爆性能的研究主要局限于: 经验法、理论解析法和数值模拟方法<sup>[1]</sup>。经验法是根据标准冲击曲线(如半正弦波、梯形波、三角波等)进行冲击实验, 得到经验公式及图表来估算结构的冲击加速度响应, 此法简单但精度差。理论解析方法主要以波动理论为基础, 按拟静力求解具有一定边界条件和简单规则几何形状的结构抗爆性能, 对于爆炸波的水中传播、水介质与坝体结构的相互耦合作用、坝体压缩应力波的传播等现象<sup>[2]</sup>, 理论解析法显得无能为力。随着计算机硬件及计算方法的逐步完善, 使得通过数值模拟方法研究结构对水下爆炸的响应成为可能。然而, 在大坝设计领域, 目前大多数研究主要根据经验公式简化得到爆炸荷载, 并简化为双直线的形式直接施加到结构上<sup>[3-4]</sup>, 与实际的爆炸荷载时程曲线相差较大, 并回避了气体或液体与结构间的流固耦合相互作用过程, 用来模拟近场爆炸会产生较大的误差。

由于水下爆炸问题的复杂性, 关于大坝抗爆性能的研究成果较少, 主要集中在水下爆炸的动力响应分析方面, 如徐俊祥等<sup>[2]</sup>建立了水下爆炸的全耦合模型, 得出了坝体在水下爆炸冲击作用下的加速度响应及位移时程变化特点; Yu Tian-tang<sup>[5]</sup>以非线性显式动力分析程序 LS-DYNA 为平台, 建立水下爆炸全耦合模型, 采用 ALE 算法对水下接触爆炸下的大坝动力响应进行了研究, 得到大坝的损伤破坏分布; 李本平等<sup>[6]</sup>以溢流坝段为研究对象, 采用任意的 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进行三维数值模拟, 研究了制导炸弹连续打击下的混凝土重力坝的破坏效应。

本文中通过建立混凝土重力坝水下爆炸全耦合模型, 考虑爆炸荷载作用下混凝土的高应变率效应, 采用三维非线性显示动力有限元法对水下爆炸冲击荷载作用下大坝动力响应进行了全性能数值仿真分

\* 收稿日期: 2012-03-30; 修回日期: 2012-08-16

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体科学基金项目(51021004);

水利工程仿真与安全国家重点实验室开放基金;

天津市应用基础与前沿技术研究计划(13JCYBJC19400)

作者简介: 张社荣(1960—), 男, 教授。

析,研究在水下爆炸冲击荷载作用下,大坝坝高、库前水位对大坝抗爆性能的影响,为混凝土重力坝的抗爆性能评估及抗爆防护设计提供理论依据。

## 1 混凝土和坝基岩体的非线性动力本构模型

### 1.1 混凝土非线性动力损伤本构模型<sup>[9]</sup>

混凝土材料具有明显的应变率相关特性,在爆炸荷载作用下,应变率高达  $10 \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$ <sup>[7-8]</sup>,此时混凝土的强度显著提高。HJC 本构模型<sup>[9-10]</sup>是针对混凝土材料在大应变、高应变率、高压下的一种应变率相关的动态损伤本构模型,该模型综合考虑了应变率效应、损伤度及损伤软化对材料本构关系的影响,能很好地描述爆炸冲击荷载作用下混凝土的大变形、高应变率及高压下产生的损伤、破碎和断裂等问题,主要包括屈服方程、损伤演化方程和状态方程。HJC 模型的屈服方程可表述为<sup>[10]</sup>

$$\sigma = [A(1 - D) + Bp^N] (1 + C \ln \dot{\epsilon}) \quad (1)$$

式中: $\sigma$  和  $p$  为实际等效应力和静水压力分别除以材料的静态抗压强度得到的量纲一标准化等效应力和标准化静水压力, $\dot{\epsilon}$  为真实应变率除以参考应变率得到的量纲一应变率, $D$  为损伤度。混凝土 HJC 本构模型材料参数为:混凝土密度  $\rho = 2400 \text{ kg/m}^3$ ,剪切模量  $G = 14.86 \text{ GPa}$ , $A = 0.79$ ,为标准化的凝聚力强度; $B = 1.60$ ,为标准化的压力硬化系数; $C = 0.007$ ,为应变率系数; $N = 0.61$ ,为材料的强度参数; $\sigma_{\max} = 7 \text{ MPa}$ ,为能达到的标准化最大强度。

材料的损伤累积可以用损伤度  $D(0 \leq D \leq 1.0)$  表示。损伤累积考虑了等效塑性应变、塑性体积应变和静水压力的影响,其损伤演化方程可以表示为<sup>[10]</sup>

$$D = \sum \frac{\Delta \epsilon_p + \Delta \mu_p}{\epsilon_p^f + \mu_p^f} \quad (2)$$

式中: $\Delta \epsilon_p$  和  $\Delta \mu_p$  分别为一个计算循环内的等效塑性应变和塑性体积应变; $\epsilon_p^f + \mu_p^f$  为塑性应变,其中  $\epsilon_p^f$  为等效塑性应变, $\mu_p^f$  为塑性体积应变。损伤常数是混凝土材料破碎的允许最小塑性应变。由于混凝土在压缩过程中内部孔隙不断崩塌,从而导致凝聚力强度的丧失,因此在大多数情况下,混凝土的损伤主要来自塑性体积应变。

HJC 模型采用状态方程描述静水压力与体积应变之间的关系。在体积应变已知的情况下,可通过状态方程计算相应的静水压力。混凝土的状态方程分 3 段表述<sup>[9]</sup>,第 1 阶段是线弹性阶段,静水压力和体积应变满足线性关系;第 2 阶段是过渡阶段,混凝土材料内的空洞逐渐被压缩而产生塑性变形。假设静水压力和体积应变曲线仍然具有线性关系,该阶段内任意点卸载的弹性体积模量可由两端模量插值计算得到;第 3 阶段为完全密实阶段,当压力达到某个值时,混凝土内部气孔被完全压碎,其关系常用三次多项式表示。

### 1.2 坝基岩体非线性动力本构模型

由于高能炸弹在库区近场爆炸时,坝基岩体应变较大,坝基岩体应变率效应明显。爆炸冲击荷载作用下的岩体损伤本构模型采用考虑应变率效应的塑性硬化模型<sup>[11]</sup>,该模型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,岩体屈服应力与应变率的关系为

$$\sigma_y = \left[ 1 + \left( \frac{\dot{\epsilon}}{\alpha} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \right] (\sigma_0 + \beta E_p \epsilon_p^{\text{eff}}) \quad (3)$$

$$E_p = \frac{E_{\tan} E_0}{E_0 - E_{\tan}} \quad (4)$$

式中: $\sigma_0 = 24.0 \text{ MPa}$  为岩体初始屈服应力, $\sigma_y$  为硬化屈服应力, $\beta$  表示各向同性硬化和随动硬化贡献的硬化参数, $0 \leq \beta \leq 1$ ;  $\dot{\epsilon}$  为加载应变率, $\alpha = 2.5$  和  $\gamma = 4.0$  为 Cowper-Symonds 应变率参数,是由材料应变率特性决定的常量, $\epsilon_p^{\text{eff}}$  为岩体有效塑性应变, $E_p$  为岩体塑性硬化模量,岩体切线模量  $E_{\tan} = 7.0 \text{ GPa}$ ,弹性模量  $E_0 = 23.0 \text{ GPa}$ ,岩体的泊松比  $\nu = 0.22$ 。

### 2 材料模型及状态方程

选取 GBU-28<sup>[12]</sup> 制导炸弹为研究对象,研究其在不同爆炸方式下对大坝抗爆特性的影响。GBU-28 制导炸弹质量  $W=2\ 130\ \text{kg}$ , 弹径  $d=370\ \text{mm}$ , 装药量  $Q=306\ \text{kg}$ , 撞击速度  $v=400\ \text{m/s}$ 。高能炸药采用高能炸药材料模型(MAT\_HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN),并用 JWL 状态方程<sup>[11]</sup>描述了爆轰压力  $p_1$  与体积内能  $E_1$  及相对体积  $V_1$  的关系

$$p_1 = A_1 \left( 1 - \frac{\omega}{R_1 V_1} \right) e^{-R_1 V_1} + B_1 \left( 1 - \frac{\omega}{R_2 V_1} \right) e^{-R_2 V_1} + \frac{E_1}{V_1} \tag{5}$$

式中: $p_1$  为爆轰压力, $E_1=9.50\ \text{GJ/m}^3$  为爆轰产物的体积内能, $V_1=1.00$  为爆轰产物的相对体积;特征参数  $A_1=934.7\ \text{GPa}$ 、 $B_1=12.7\ \text{GPa}$ 、 $R_1=4.60$ 、 $R_2=1.10$ 、 $\omega=0.37$ 。

高压下的水体一般采用 Grüneisen 状态方程进行描述<sup>[11]</sup>。该状态方程用于定义压缩材料压力和体积的关系,其一般形式为

$$p_2 = \frac{\rho_{20} C^2 \mu_2 \left[ 1 + \left( 1 - \frac{\lambda}{2} \right) \mu_2 - \frac{\delta}{2} \mu_2^2 \right]^2}{\left[ 1 - (S_1 - 1) \mu_2 - S_2 \frac{\mu_2^2}{\mu_2 + 1} - S_3 \frac{\mu_2^3}{(\mu_2 + 1)^2} \right]^2} + (\lambda + \delta \mu_2) E_2 \tag{6}$$

式中: $p_2$  为水压力;常数  $C=1\ 647\ \text{m/s}$ 、 $S_1=1.921$ 、 $S_2=-0.096$ 、 $S_3=0$ 、 $\mu_2=\rho_2/\rho_{20}-1$ ,初始密度  $\rho_{20}=998.21\ \text{kg/m}^3$ 、 $\rho_2$  为当前密度;Grüneisen 系数  $\lambda=0.35$ ; $\delta$  为对  $\lambda$  的一阶体积修正; $E_2$  为水的初始内能。

空气采用 Mat-Null 材料模型和线性多项式状态方程描述<sup>[11]</sup>

$$p_3 = (C_0 + C_1 \mu_3 + C_2 \mu_3^2 + C_3 \mu_3^3) + (C_4 + C_5 \mu_3 + C_6 \mu_3^2) E_3 \tag{7}$$

式中: $p_3$  为气压; $E_3$  为空气单位体积的初始内能; $C_0 \sim C_6$  为状态方程参数; $\mu_3=\rho_3/\rho_{30}-1$ 、 $\rho_3$  为当前密度; $\rho_{30}$  为初始密度; $C_0=C_1=C_2=C_3=C_6=0$ 、 $C_4=C_5=0.4$ 。

### 3 重力坝抗爆性能分析

某水电站共分为 26 个单坝段,水库正常蓄水位 1 330 m,挡水坝段最大坝高 142 m。有限元计算模型主要为大坝、坝基、高能炸药、库水、空气 5 种物质的耦合。其中高能炸药、库水、空气采用 Euler 网格建模,单元使用多物质 ALE 算法,大坝和坝基采用 Lagrange 网格建模,库水与大坝和坝基之间采用流固耦合算法。为了减少计算单元数量,提高计算效率,只建立对称面一侧的模型。为了研究水下爆炸冲击荷载作用下,大坝高度、库前水位对大坝抗爆性能的影响,高能炸药的水下起爆深度均取为 10 m,爆心距取为 10 m,挡水坝段计算示意图如图 1 所示,有限元模型如图 2 所示。

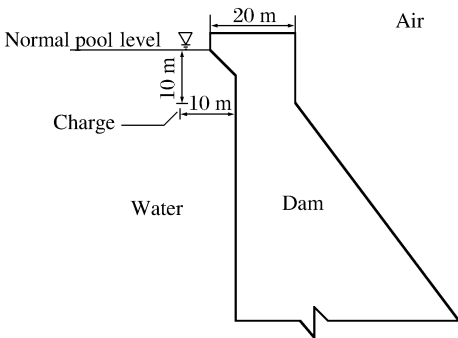


图 1 大坝计算模型示意图

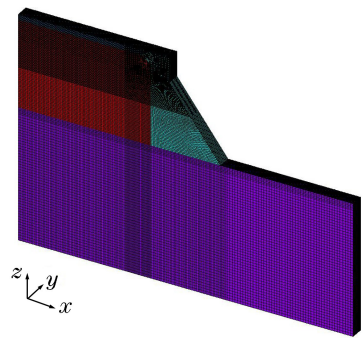


图 2 水下爆炸有限元计算模型

Fig. 1 Calculation region of non-flow dam

Fig. 2 Finite element model subjected to underwater explosion

对称面上施加对称约束,坝基底部施加全约束,四周截断边界处施加法向约束,并在边界上定义无反射边界,使得人工边界上无应力波反射,用这种方法来模拟半无限区域;除在库水、空气与坝体交接处外,库水和空气其他面均定义无反射边界条件,以此来模拟库水和空气的无限区域。

混凝土材料属于脆性材料,其抗拉强度远小于抗压强度,混凝土的断裂破坏主要是由于拉伸应力或拉伸应变达到极限条件引起的。混凝土材料是明显的率相关材料,屈服强度和瞬时应力随应变率的增加而增加,屈服应力所对应的轴向应变(临界应变)随应变率的增加变化不大。因此,为了研究大坝混凝土的断裂破坏,引入混凝土断裂条件,当其拉伸应变达到  $0.002^{[13]}$  时考虑混凝土断裂失效。

### 3.1 大坝高度对大坝抗爆性能的影响

混凝土重力坝由若干坝段组成,各坝段高度不尽相同,抗爆性能也存在很大的差异。以挡水坝段为研究对象,建立大坝高度  $H$  别为 30、50、70、100、142 m 等 5 种不同坝高的水下爆炸全耦合模型,研究大坝高度对大坝抗爆性能的影响,数值模拟计算得到的最终破坏模式在很大程度上体现了不同坝高下的大坝抗爆性能。高能炸药在水下爆炸时,不同高度下的大坝破坏模式如图 3 所示。

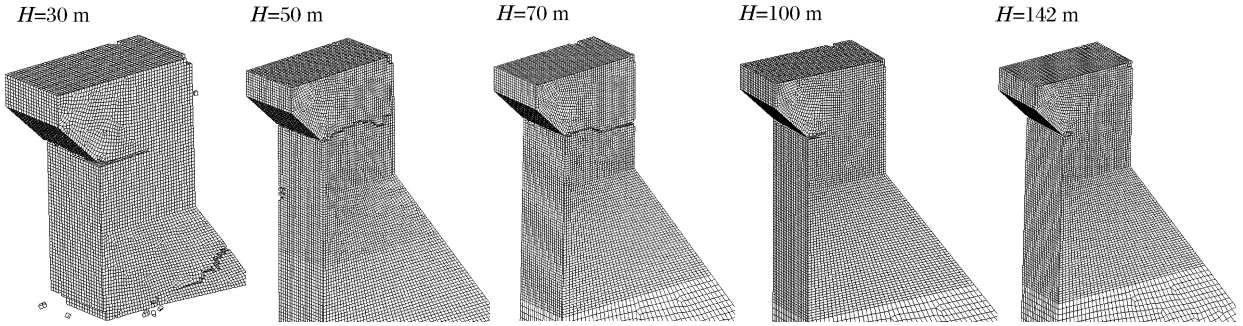


图 3 不同高度下的大坝破坏模式

Fig. 3 Dam failure mode at different heights

当高能炸药在库区近场浅水爆炸时,对水下建筑物都有不同程度的破坏作用。由图 3 可知,各坝高下,在坝头与上游直立面交接处均出现一定的开裂破坏;当大坝高度为 30 m 时,坝头与上游直立面交接处以及坝踵与基岩交接处距爆源均较近,在水下爆炸强冲击荷载作用下,截面变化处产生很大的剪应力和拉应力集中,开裂从此处开始扩展,在坝基面附近形成贯穿性裂缝,为脆性冲切破坏,同时在坝头与上游直立面交接处裂缝向坝体内部扩展约 7.4 m,大坝破坏较严重,大坝抗爆设计时需重点关注;当压缩应力波传播至坝顶时反射形成强拉伸波,使坝顶局部区域由于受拉破坏而发生震塌破坏。随着大坝高度的增加,坝顶在顺水流向的挠度不断增大,且作用在上游坝面的冲击波沿水深度逐渐减小,在坝踵与基岩交接处产生的剪应力不足以使该处产生开裂破坏,而坝头与上游直立面交接处距爆源较近,受冲击波的峰值压力较大,易发生脆性冲切破坏;当大坝高度为 50 和 70 m 时,除在坝颈处产生贯穿性裂缝外,在坝上游迎爆面及坝顶处,产生一定范围的震塌破坏;当大坝高度为 100 m 时,大坝未出现贯穿性裂缝破坏,在坝头与上游直立面交接处的裂缝向坝体内部扩展约 3.2 m,坝顶同样由于压缩应力波的反射形成的强拉伸波而发生局部震塌破坏;当大坝高度为 142 m 时,破坏深度进一步减小,在坝头与上游直立面交接处的裂缝向坝体扩展约 1.5 m。

图 4~5 分别给出了不同坝高时坝顶顺水流向位移响应时程曲线和基频与响应频率关系曲线。

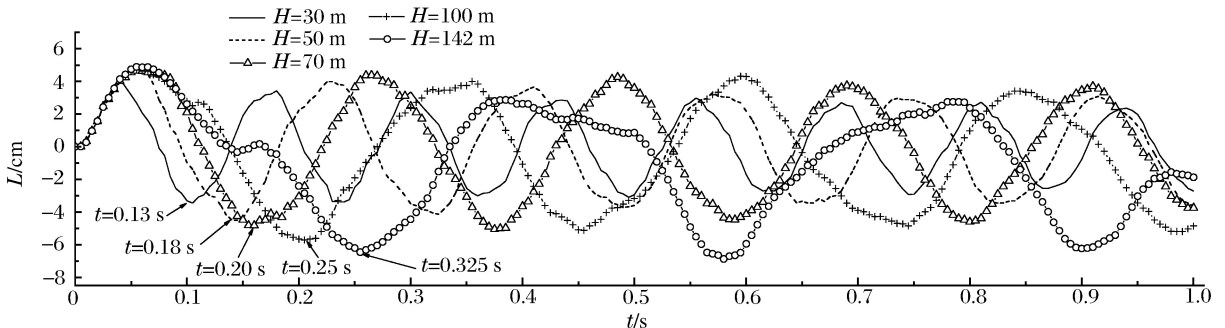


图 4 大坝动力时程响应曲线

Fig. 4 Dynamic time-history response curves

由图4~5可知,在水下爆炸冲击荷载作用下,大坝响应频率与结构基频相近,大坝坝顶位移随时间来回波动,主要由于化爆荷载作用时间相对较短,一般仅为数毫秒到几十毫秒,易引起结构产生反弹;大坝高度越低,基频越高,振荡越严重;随后由于爆轰冲击波作用的逐渐减弱及大坝中结构阻尼的存在,振动逐渐衰减。

图6给出了大坝高度为70 m时,坝顶前10 s的动位移响应时程曲线。化爆荷载由于作用时间短,在动荷载消失后大坝自由振动。在反应初期,大坝动响应趋势基本相同,而后大坝响应振动周期随大坝高度的增大而增大,与大坝自身动力特性相关;大坝越高,基频越低,在顺水流向挠度较大,大坝动力响应越大,最大顺水流向位移为6.45 cm,体现了振动能量由库水向大坝传递有了一定的恢复。大坝由于产生了严重的反弹现象,由于大坝材料阻尼效应,振动效应在10 s左右时才基本消散。

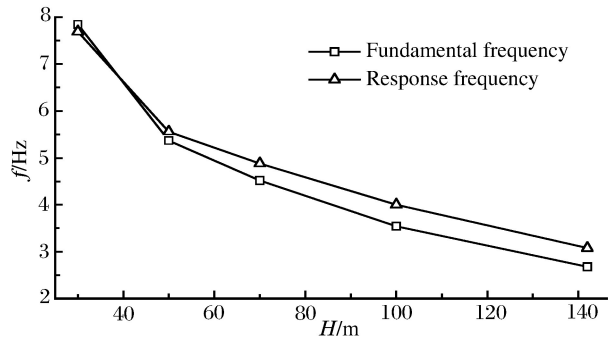


图5 大坝基频及响应频率

Fig. 5 The fundamental and response frequencies of dam

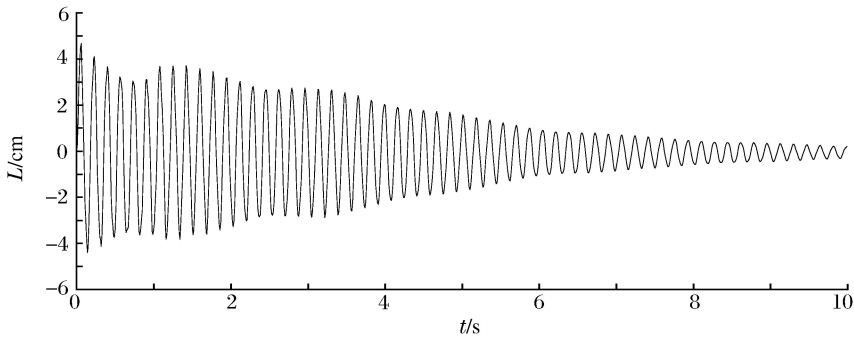


图6 大坝高度为70 m的坝顶动力时程响应曲线

Fig. 6 Dynamic time-history response curves at  $H=70$  m

由上述分析可知,大坝高度对大坝抗爆性能有较大的影响,随着大坝高度的增加,大坝抗爆性能不断增强。这主要与大坝动力特性有关,化爆荷载高频丰富,大坝高度越低,基频越高,振动越严重,大坝破坏越严重;大坝高度越高,基频越低,坝顶挠度越大,大坝自适应变形能力越强,从而使大坝具有更强抵抗冲击波荷载的能力。

### 3.2 库前水位对大坝抗爆性能的影响

现代战争有征兆可察,重大水利设施作为一般非战争的首批重点攻击对象,可采取预警放水的人防措施。如三峡工程枢纽建筑物设计中,已考虑战时与平时运用相结合,大坝有大泄量的底孔,降低水库水位所需时间较短,由正常蓄水位175 m降至135 m最多只需7 d,战时水库运用水位控制在145 m,必要时短时降到135 m甚至更低,可以有效减少溃坝损失。

取挡水坝段为研究对象,研究在战时预警放水后,坝前库水位对大坝抗爆性能的影响。建立库前水位分别降低5、10、15、20、25、30 m时的水下爆炸全耦合模型,为了进行对比研究,高能制导炸弹水下起爆深度保持10 m,爆心距取为10 m。

图7给出了降低库前水位后的大坝破坏模式,分析图7中降低库前水位不同幅值时大坝的破坏模式及程度可知,库前水位降低0~10 m时,大坝仍出现贯穿性裂缝破坏;库前水位降低10~20 m时,大坝破坏程度有很大的降低,且未出现贯穿性裂缝;库前水位降低20~30 m时,大坝仅在坝头与上游直立立面交接处产生局部开裂破坏,且裂缝扩展深度较小。表明随着库前水位的降低,大坝的破坏程度逐渐减小,大坝的抗爆性能得到提高。如当库前水位降低15 m时,水下爆炸产生的冲击波通过库水位上的空气传播作用于坝头,由于水面切断效应,冲击波的强度有较大的衰减,坝头与上游直立立面处仅出现局部开裂破坏,深度约5.2 m,当压缩应力波传播至下游折坡时,产生强烈的拉伸应力波,使该处产生开裂

破坏,并向上游扩展,扩展深度约 9 m;当坝前库水位降低 25 m 时,大坝仅在坝头与上游立面交接处产生局部开裂破坏,大坝整体性能可以得到保证。

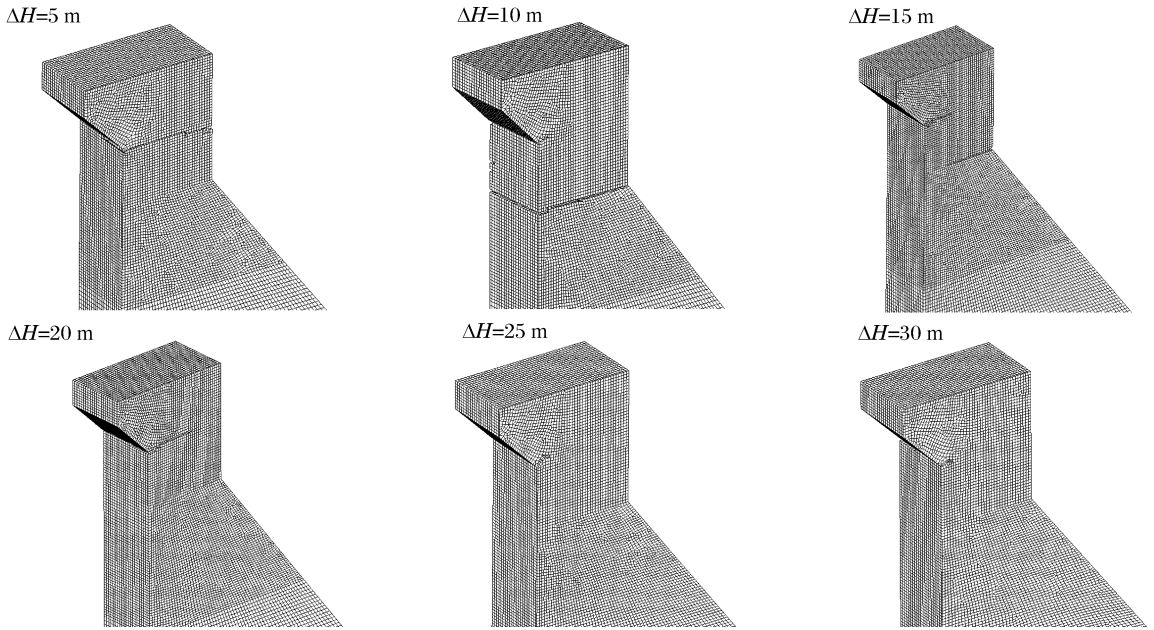


图 7 库前水位降低不同幅值下的大坝破坏模式

Fig. 7 Dam failure modes at different water levels before dam

图 8(a)~(b)分别给出了降低库前水位分别为 5、15、25 m 时坝顶上游侧及迎爆面中心处顺水流向位移响应。由图 8 可知,随着库前水位降低幅度的增大,爆炸冲击波峰值压力作用部位由坝颈部位逐渐向坝踵方向移动,而对于重力坝由于主要靠自重维持稳定,下部结构体积庞大,刚度较大,抗爆性能较好,因而大坝动位移响应不断减小,且随着库前水位的不断降低,坝顶的动位移出现延迟效应;当库前水位降低幅值较低时,由于高能炸药产生的水下冲击波峰值压力作用在坝头部位,使坝顶响应带动坝体下部结构振动,位移响应波形较规则,而当库前水位降低到坝颈下部时,受应力反射波的影响,结构位移响应规律较复杂,但大坝最大位移响应呈下降趋势。

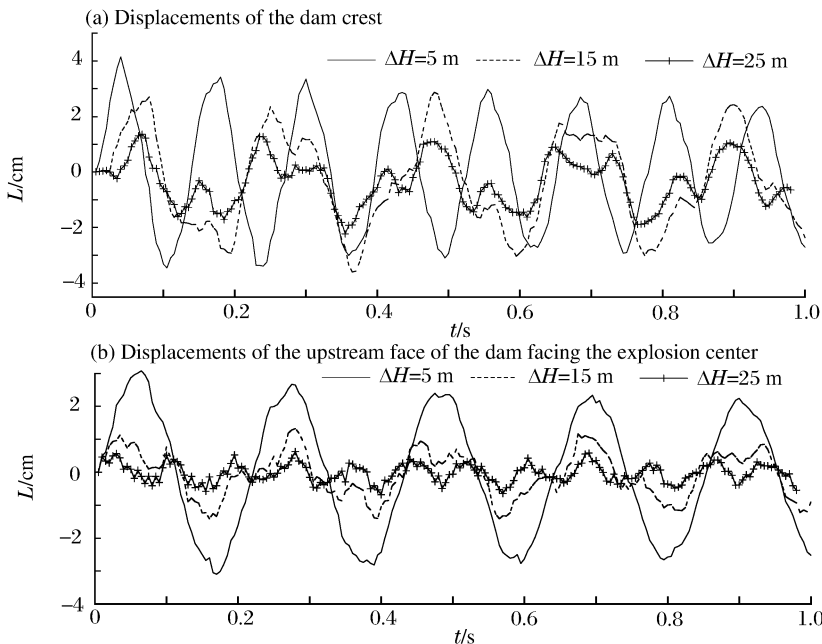


图 8 大坝动态位移时程响应曲线

Fig. 8 Dynamic displacement time-history response curves

随着坝前库水位的降低,大坝抗爆性能得到有效的提高,当库前水位降低 15 m,大坝未出现贯穿性裂缝破坏;当库前水位降低 25 m 时,大坝仅出现局部开裂破坏。现代战争有征兆可察,因此通过降低坝前库水位,可有效提高大坝的抗爆性能,同时也可以减少大坝战时的失事风险损失。

## 4 结 论

通过建立混凝土重力坝水下爆炸全耦合模型,对水下爆炸冲击荷载作用下的大坝动态响应及破坏模式进行分析,探讨了水下爆炸冲击荷载作用下,大坝的坝高、库前水位对大坝抗爆性能的影响,为混凝土重力坝的抗爆性能评估及抗爆防护设计提供理论依据。得出以下结论:

(1)水下爆炸冲击荷载由于作用时间短高频丰富,易引起大坝产生反弹。

(2)对于混凝土重力坝挡水坝段,大坝高度越低,基频越高,振荡越严重,抗爆性能越差,随着大坝高度的增大,大坝抗爆能力增强;随着库前水位的降低,大坝破坏程度不断降低,动位移响应减小,且坝顶的动位移响应出现一定的延迟效应。

(3)大坝抗爆薄弱部位主要位于坝头,实际工程中应加强对大坝上下游折坡处的抗爆支护。

(4)现代战争有征兆可察,通过降低坝前库水位,可以有效提高大坝的抗爆性能,同时也可以减少战时大坝的失事风险损失,是有效的人防措施。

## 参考文献:

- [1] 赵宝友,马震岳,梁冰,等.水电站地下厂房大型岩体洞室的抗爆性能[J].爆炸与冲击,2010,30(2):183-190.  
Zhao Bao-you, Ma Zhen-yue, Liang Bing, et al. Blast resistance of large underground rock caverns in hydraulic power stations[J]. Explosion and Shock Waves, 2010,30(2):183-190.
- [2] 徐俊祥,刘西拉.水中爆炸冲击下混凝土坝动力响应的全耦合分析[J].上海交通大学学报,2008,42(6):1001-1004.  
Xu Jun-xiang, Liu Xi-la. Full coupled simulation of concrete dams subjected to underwater explosion[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2008,42(6):1001-1004.
- [3] 李鸿波,张我华,陈云敏.爆炸冲击荷载作用下重力坝三维各向异性脆性动力损伤有限元分析[J].岩石力学与工程学报,2006,25(8):1598-1605.  
Li Hong-bo, Zhang Wo-hua, Chen Yun-min. 3D finite element analysis of anisotropic brittle dynamic damage in gravity dam under blast impact load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006,25(8):1598-1605.
- [4] 刘军,刘汉龙,张正.爆炸荷载下土石坝动力响应特征的数值模拟[J].防灾减灾工程学报,2010,28(1):10-16.  
Liu Jun, Liu Han-long, Zhang Zheng. Numerical simulation of dynamic response of an earth and rock-fill dam to a blast loading[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2010,30(1):10-16.
- [5] Yu Tian-tang. Dynamical response simulation of concrete dam subjected to underwater contact explosion load[C]//Computer Science and Information Engineering 2009 WRI World Congress: 769-774.
- [6] 李本平,王永,卢文波.制导炸弹在坝前水面爆炸破坏效应研究[J].爆破,2007,24(4):7-12.  
Li Ben-ping, Wang Yong, Lu Wen-bo. Study on the damage effect for water surface explosion of precision guided bomb[J]. Blasting, 2007,24(4):7-12.
- [7] Malvar L J, Ross C A. Review of strain rate effects for concrete in tension[J]. ACI Materials Journal, 1999,96(5):614-616.
- [8] Bischoff P H, Perry S H. Compressive behavior of concrete at high strain rate[J]. Materials and Structures, 1991, 24(144):425-450.
- [9] Holmquist T J, Johnson G R, Cook W H. A computational constitutive model for concrete subjected to large strains, high strain rates, and high pressures[C]//Jackson N, Dickert S. The 14th International Symposium on Ballistics. USA: American Defense Preparedness Association, 1993:591-600.
- [10] Johnson G R. Computed radial stresses in a concrete target penetrated by a steel projectile[C]//Proceedings of the 5th International Conference on Structures under Shock and Impact. Greece, 1998:793-806.

- [11] Livermore Software Technology Corporation, LS-DYNA keyword user' manul[M], California: Livermore Software Technology Corporation, 2006.
- [12] 王涛,余文力,王少龙,等. 国外钻地武器的现状与发展趋势[J]. 导弹与航天运载技术,2005(5):51-56.  
Wang Tao, Yu Wen-li, Wang Shao-long, et al. Present status and tendency of foreign earth-penetrating weapons [J]. Missiles and Space Vehicles, 2005(5):51-56.
- [13] Weathersbly J H. Investigation of bond slip between concrete and steel reinforcement under dynamic loading conditions[D]. Louisiana State University, USA, 2003.

## Antiknock performance of concrete gravity dam subjected to underwater explosion\*

Zhang She-rong, Wang Gao-hui

(*State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety,  
Tianjin University, Tianjin 300072, China*)

**Abstract:** The dynamic responses of structures under blast loading are much more complicated than those under other loadings such as static and earthquake loadings. In order to fully realize the blast resistances of concrete gravity dams, a great many numerical simulations were implemented by using three-dimensional nonlinear finite element models. The influences of dam height and water level before the dams on the blast resistance of the dams were analyzed, and a theoretical basis was provided for antiknock performance evaluation and protection design. Strain rate effects of concrete dams were taken into consideration in the establishment of the fully-coupled model for the gravity dams. For this kind of concrete gravity dams, numerical results indicate that the blast resistance of the low dams is weaker than that of the high dams, that the water level before the dams plays an important role on the antiknock performances of the dams, and that the antiknock performances of the dams can be effectively improved by reducing the water level.

**Key words:** mechanics of explosion; concrete gravity dam; antiknock performance; underwater explosion; failure mode; dynamic response

---

\* Received 30 March 2012; Revised 16 August 2012

Supported by the National Natural Science Foundation of China (51021004)

Corresponding author: Wang Gao-hui, tjdam@126.com

(责任编辑 王易难)