

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2017.06.006

不同横缝状态影响下混凝土重力坝抗爆性能研究

张社荣¹,于 茂^{1,2},王 超¹,王高辉³

- (1. 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室,天津 300072;
2. 中水北方勘测设计研究有限责任公司,天津 300222;
3. 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)

摘要:考虑混凝土重力坝横缝张开状态对大坝内冲击波传播的影响,基于FSI流固耦合数值分析方法模拟水下浅水爆炸冲击波的形成、传播及其与自由面、大坝结构之间的耦合相互作用过程,从混凝土重力坝的动态响应、渐进毁伤破坏过程及大坝损伤耗散能累积特性等方面,对比分析横缝状态对大坝综合抗爆性能的影响机制。结果表明,重力坝横缝张开范围对大坝抗爆性能有重要影响,且表现为加剧大坝动态响应、促进大坝混凝土毁伤破坏区域形成、增大坝体损伤耗能累积量的整体规律,明显削弱了大坝的抗爆性能。

关键词:混凝土重力坝;横缝;浅水爆炸;动态响应;毁伤特性;损伤耗散能

中图分类号:TV642.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2017)06-0509-06

Effect of contraction joint state on the anti-knock performance of concrete gravity dam

ZHANG Sherong¹, YU Mao^{1,2}, WANG Chao¹, WANG Gaohui³

- (1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. China Water Resources Beifang Investigation, Design and Research Co. Ltd., Tianjin 300222, China;
3. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: To identify the effect of contraction joint state on the anti-knock performance of concrete gravity dam, numerical simulations based on fluid-solid interaction (FSI) method are conducted, which simulates the formation and propagation of shock wave due to shallow underwater explosion, and its interaction with free surface and dam structure. Considering that the shock wave propagation is influenced by the opening states of the contraction joints in the dam, the impact of the latter on the anti-knock performance of the dam is hence investigated in three aspects, including dynamic response, gradual damage failure process and the accumulation of damage dissipation energy. The numerical results show that the anti-knock performance of the dam is significantly influenced by the opening area of the contraction joint, a larger opening area appears to yield enhanced dynamic response, wider damage area and larger accumulation of damage dissipation energy in the dam, thereby weakening the anti-knock performance of the dam.

Key words: concrete gravity dam; contraction joints; shallow underwater explosion; dynamic responses; damage characteristics; damage dissipation energy

收稿日期: 2016-10-28

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体科学基金(51321065); 国家自然科学基金(51379141, 51509182)

作者简介: 张社荣(1960—),男,山东日照人,教授,博士,主要从事水工结构静动力安全评价研究。E-mail: tjuzsr@126.com

通信作者: 于茂,工程师。E-mail: yumao@tju.edu.cn

对于大体积混凝土坝结构,为了满足施工、沉降及温控等方面的要求,往往进行分块浇筑,并在坝块间设置浇筑缝或者诱导缝,造成大坝在运行期内往往是带缝工作的^[1]。在运行期环境因素的激励作用下,坝间横缝大片区域会呈现张开状态,即坝段与坝段之间存在一定的空气间隙。在横缝张开状态下,坝体内部的冲击波在横缝处不能发生完全透射,导致坝体内部冲击波的传播规律复杂化,也必将坝体的动态抗爆力学性能产生一定的影响。

国内外学者在大坝横缝的动态变化过程及其对大坝力学行为特征影响等方面已经积累了较多的研究成果。在大坝抗震方面,Alembagheri 等^[2]考虑拱坝横缝接触非线性力学特性及不同横缝分布类型,对 12 条地震波激励条件下的大坝动态响应过程及损伤破坏规律进行了对比分析;张楚汉等^[3]在高坝抗震安全关键问题的进展研究中也指出,大坝横缝非线性特性对强震作用下的大坝混凝土损伤发展、横缝张开度及整体安全性等有重要影响;冯帆等^[4]研究了上游止水区域横缝未灌浆条件下的特高拱坝的力学性能;何婷等^[5]结合监测资料,综合探讨了横缝对高拱坝力学特性的影响规律;樊启祥等^[6]依托溪洛渡高拱坝工程,研究了高拱坝施工过程中的横缝开度的变化规律及控制方法;张社荣等^[7]研究了自重及水压作用下横缝状态对孔口结构变形、开裂状态、应力分布及钢筋受力状态的力学行为的影响规律。从以上的研究成果可以看出,在实际结构性能分析中横缝是不可忽略的重要因素。由于边界面两边介质的物理属性不同,冲击波由一种介质传到另一介质中时将在边界面处反射形成稀疏波或压缩波,导致近边界爆炸下的荷载分布与冲击过程较自由场下发生较大变化。明付仁等^[8]采用三维 SPH (smoothed particle hydrodynamics) 方法对水下爆炸冲击波传播过程及其与自由面的相互作用过程进行了分析。崔杰等^[9]等研究表明,自由面截断效应对冲击波的传播过程影响明显。刘翠丹等^[10]对界面处冲击波传播过程中压力及冲量特征进行了研究,论述了水底边界对冲击波传播过程也具有明显影响。杨莉等^[11]分析了水底影响下冲击波传播规律及马赫反射现象。而在大坝抗爆性能分析中,尚未有学者对坝间横缝张开造成的坝体不连续特性影响下的大坝整体抗爆性能展开相关研究工作。

本文主要考虑坝间横缝张开状态对坝体内部冲击波传播规律的影响,基于 FSI 流固耦合数值分析方法模拟了水下浅水爆炸冲击波的形成、传播及其与自由面、大坝结构之间的耦合相互作用过程,从混凝土重力坝的动态响应、渐进损伤过程及大坝损伤耗散能分布特性等方面,深入探讨及分析横缝状态对大坝综合抗爆性能的影响规律。

1 计算模型

以国内某 200 m 级高混凝土重力坝为研究对象,建立了其挡水坝段在浅水爆炸冲击荷载作用下的全耦合仿真分析模型,如图 1 所示。模型主要由重力坝坝体、基岩、库水、空气及 TNT 炸药等材料组成。大坝坝高为 200.1 m,坝段宽 30 m,库前水深 193.6 m,取大坝中心截面为对称面。库水、空气及 TNT 炸药采用欧拉网格模拟,坝体、挡水闸门、泡沫铝夹芯板及基岩均采用拉格朗日网格模拟,两种网格之间采取流固耦合算法进行物理参数的传递及更新,从而实现爆炸冲击全过程的数值仿真。水下炸药装药量为 1 000 kg,炸药爆心距(炸药中心到坝体上游直立面的距离)为 10 m,炸药起爆深度(炸药中心到库水自由表面的距离)为 10 m。图 2 为建立的坝体、基岩及库水的网格离散模型,为保证水体、孔口等重要区域的网格较为精细,网格最大尺寸不超过 0.5 m^[12],坝顶区域网格大小为 0.3 m,计算模型单元总数为 2 906 640 个。基岩底部截断处施加全约束,模型对称面施加对称边界,并在基岩、库水、空气截断面处施加无反射边界条件。如图 3 所示,采用 FSI 流固耦合数值分析方法计算时,往往先通过实际空间相对位置识别欧拉网格有效区域,再根据重叠情况对欧拉网格及拉格朗日网格的边界分别进行处理与加载,两类网格

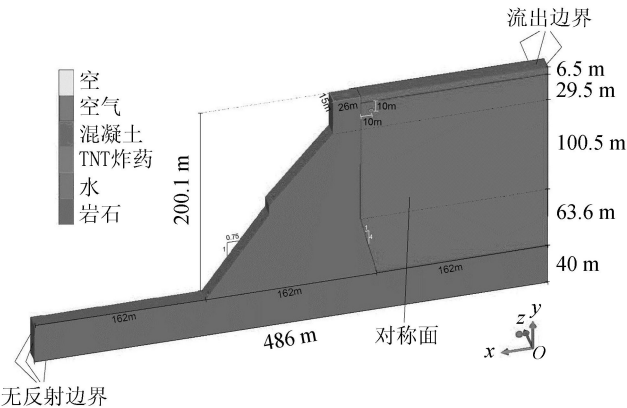


图 1 浅水爆炸冲击高坝结构的计算模型

Fig. 1 Calculation model of the high dam with openings subjected to deep underwater explosion

之间的边界条件相互传递,从而形成一个耦合体系。

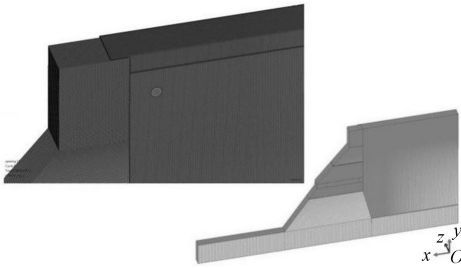


图 2 浅水爆炸冲击高坝结构的离散模型
Fig. 2 Discrete model of the high dam with openings

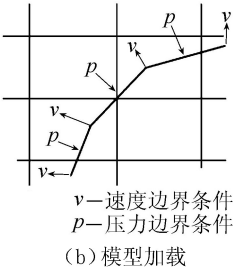
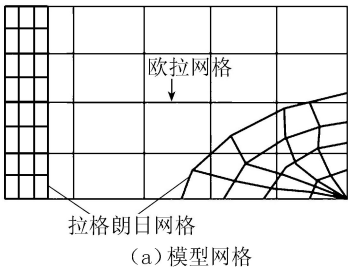


图 3 FSI 耦合方法
Fig. 3 Fluid structure interaction method subjected to deep underwater explosion

2 材料及参数

2.1 大坝混凝土材料

选用 RHT 本构模型^[13]描述高应变率加载下大坝混凝土的动态力学特性,采用 $P-\alpha$ 状态方程描述混凝土材料的体积压缩过程,同时考虑了混凝土材料的 3 个强度极限面:弹性极限面、破坏极限面以及残余强度面。具体材料参数见文献[14]。

2.2 基岩材料

坝基基岩的动态材料特性采用 JH-2 模型^[15]来描述,并采用 Principal-Stress 受拉失效准则,主要参数取值为:密度 $\rho=2630\text{ kg/m}^3$,弹性模量为 50 GPa,泊松比为 0.16,屈服应力为 40 MPa,切线模量为 12.50 MPa,抗拉强度为 24 MPa,抗压强度为 70 MPa。

2.3 高能炸药材料

高能炸药材料采用 JWL 状态方程描述了爆轰压力 P 和每单位体积内能 e 及相对体积 V 的关系:

$$P = a_2 \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) \exp(-R_1 V) + b_2 \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) \exp(-R_2 V) + \frac{\omega e}{V} \tag{1}$$

式中: P ——爆轰产物的压力,Pa; V ——相对体积,即爆轰产物体积和炸药初始体积之比, m^3 ; e ——单位体积内能, $e=5.999 \times 10^9\text{ J/m}^3$; $a_2, b_2, R_1, R_2, \omega$ ——特征参数,各参数取值如下: $a_2=3.738 \times 10^{11}\text{ Pa}$, $b_2=3.747 \times 10^{11}\text{ Pa}$, $R_1=4.15$, $R_2=0.9$, $\omega=0.35$ 。

2.4 空气及水等环境介质材料

空气采用理想气体状态方程:

$$P = (\gamma - 1) \frac{\rho}{\rho_0} E_2 \tag{2}$$

式中: E_2 ——比内能, J/kg ; γ ——绝热指数,取 $\gamma=1.4$; ρ_0 ——初始密度,取 $\rho_0=1.225\text{ kg/m}^3$; ρ ——密度, kg/m^3 。

当水为膨胀状态($\mu>0$)时,其状态方程为

$$P = A_1 \mu + A_2 \mu^2 + A_3 \mu^3 + (B_0 + B_1 \mu) \rho_0 e_2 \tag{3}$$

当水为压缩状态($\mu<0$)时,其状态方程为

$$P = T_1 \mu + T_2 \mu^2 + B_0 \rho_0 e_2 \tag{4}$$

其中

$$\mu = \frac{\rho}{\rho_0 - 1}$$
$$e_2 = \frac{\rho g h + p_0}{\rho B_0}$$

式中: ρ_0 ——初始密度,取 $\rho_0=999\text{ kg/m}^3$; e_2 ——材料内能, J ; h ——水的深度, m ; g ——重力加速度, m/s^2 ; p_0 ——大气压强,Pa; $A_1, A_2, A_3, B_0, B_1, T_1, T_2$ 为材料常数,各参数取值如下: $A_1=2.2 \times 10^9\text{ Pa}$, $A_2=9.54 \times 10^9\text{ Pa}$, $A_3=1.457 \times 10^{10}\text{ Pa}$, $B_0=0.28$, $B_1=0.28$, $T_1=2.2 \times 10^9\text{ Pa}$, $T_2=0$ 。

3 考虑横缝开合状态的坝体毁伤特性分析

如图4所示,为了对大坝横缝的开合状态影响下的高坝抗击水下爆炸冲击荷载作用的能力进行评估,拟定4种工况进行研究。

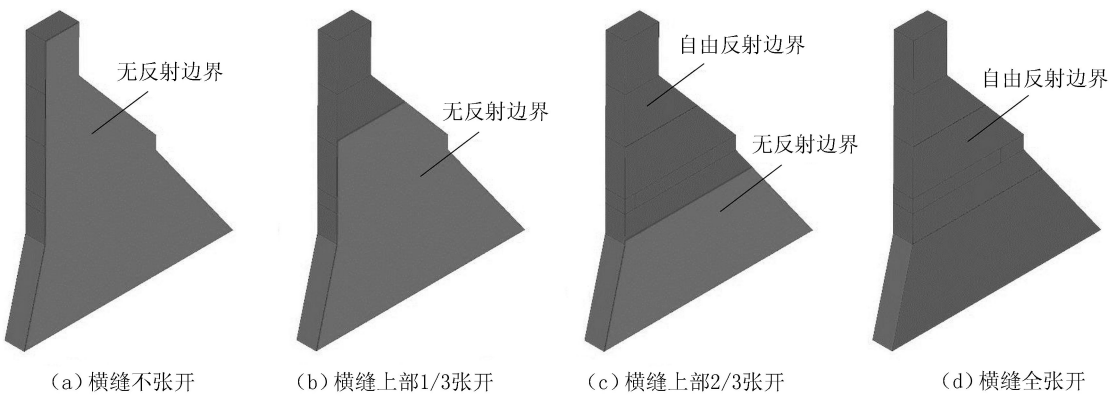


图4 不同横缝状态影响下大坝横缝处边界设置

Fig.4 Boundary conditions of the dam contraction joints with different opening states

3.1 动态响应规律

图5展示了水下浅水爆炸冲击荷载作用下、横缝不同张开范围影响下大坝顺河向的速度响应过程对比情况。与横缝全部闭合情况相比,20 ms 之前的测点速度变化基本相同,20 ms 之后测点的速度变化出现较为明显的差别;坝顶顺河向速度的差值最大为0.5 m/s,主要出现在28 ms 及38 ms;下游坝坡高程测点的顺河向速度差值最大为0.5 m/s,出现在23 ms。而坝踵区域的顺河向速度响应差异小于0.05 m/s,与横缝不张开计算条件相比:横缝上部张开1/3时,速度差异达到0.09 m/s,出现在126 ms;横缝上部张开2/3时,速度差异达到0.11 m/s,出现在126 ms;横缝全部张开时,速度差异达到0.10 m/s,出现在136 ms。由此可知,对于浅水爆炸冲击荷载作用下的高坝结构而言,大坝的速度响应较大区域主要集中在大坝上部的坝头区域,而横缝

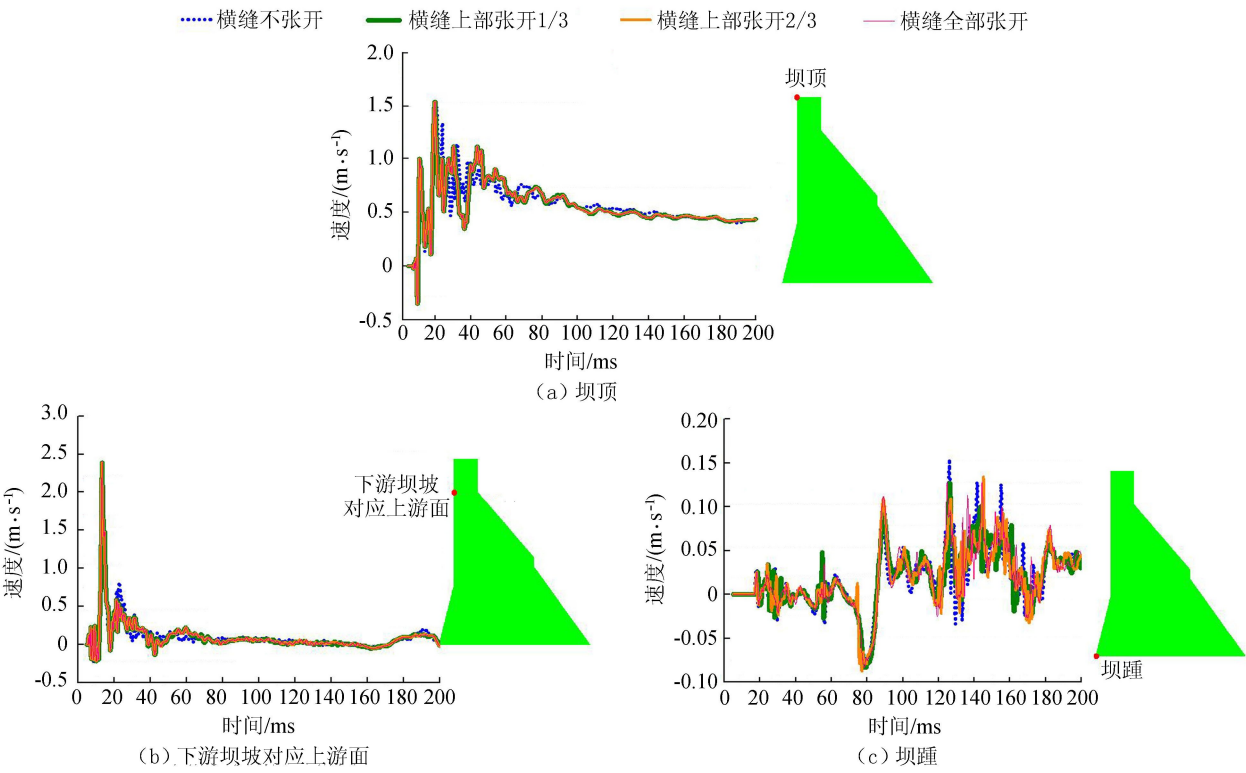


图5 横缝不同张开范围下大坝顺河向速度响应过程对比

Fig.5 Comparison of velocity responses of the dam with different opening areas in the contraction joints

张开范围在坝头区域变化时,对坝体尤其是坝头的动态响应影响较大。

3.2 毁伤破坏特征

一般认为混凝土损伤达到 0.75 以上后出现宏观破坏,图 6 及图 7 分别展示了不同横缝状态下的大坝上部严重毁伤区域(损伤大于 0.75)的渐进发展过程。受浅水爆炸冲击下,由于横缝上部张开 1/3、横缝上部张开 2/3 及横缝全部张开 3 种条件下坝头区域的毁伤区域及毁伤程度均相同,因此仅给出其中一种计算情况下的坝头毁伤状态。

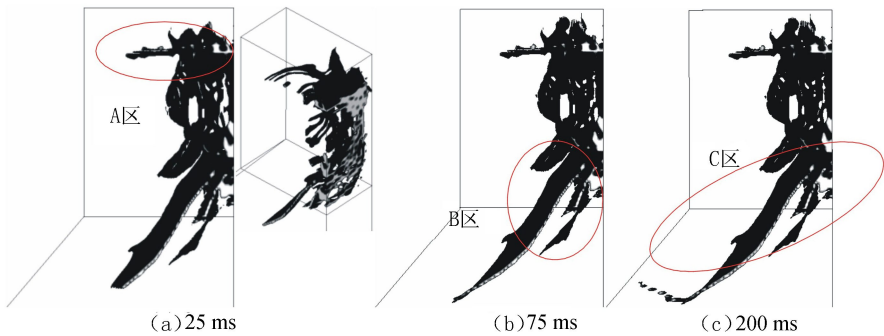


图 6 横缝不张开条件下的大坝毁伤破坏过程

Fig. 6 Damage failure process of the dam with contraction joints in closing state

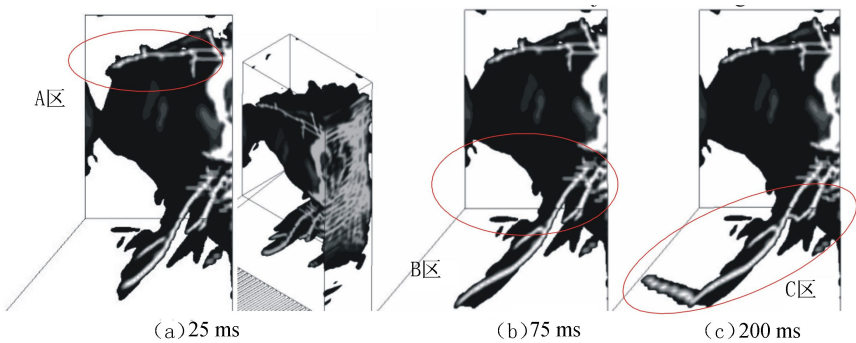


图 7 横缝上部 1/3 张开条件下大坝毁伤破坏过程

Fig. 7 Damage failure process of the dam with 1/3 upper contraction joints in opening state

由图 6 和图 7 可以看出,在坝头区附近的坝间横缝张开条件下,浅水爆炸冲击作用对大坝坝头区域造成了严重的毁伤破坏。相比于坝间横缝不张开的状态,爆炸冲击波在坝体内部传播的初期(25 ms 时),冲击波在横缝界面、坝头下游面均出现自由面反射而形成反射拉伸波,自由水面高程上的稀疏波拉伸破坏区(A 区)也有明显加深加厚;坝头多个界面处形成的反射拉伸波在坝体内部叠加后形成较大的拉伸应力,导致坝头内部区域(B 区)大面积出现受拉破坏,毁伤区域贯穿了整个坝头;25 ~ 200 ms 时间段内,坝头下游折坡高程以下的冲切破坏区域(C 区)逐步加深,并在 200 ms 时贯穿整个坝体,贯穿深度及损伤带的厚度均有明显的增大。

3.3 能量分布特征

考虑大坝横缝不同张开范围影响下,图 8 展示了挡水坝段受浅水爆炸冲击下的整体损伤耗散能的积累过程。因横缝张开后,自由面的反射卸载波致使附近混凝土大面积出现塑性损伤,并伴随损伤耗散能的积累,致使大坝整体的损伤耗散能有明显的升高。同时由图 5 和图 6 可以发现,浅水爆炸主要对坝头区域的造成了严重的毁伤破坏,而 3 种横缝张开范围条件下,冲击波对坝体中部及下部的冲击作用较弱,而坝头部位的横缝均处于张开状态,因此造成大坝整体塑性损伤耗散能的积累基本一样。

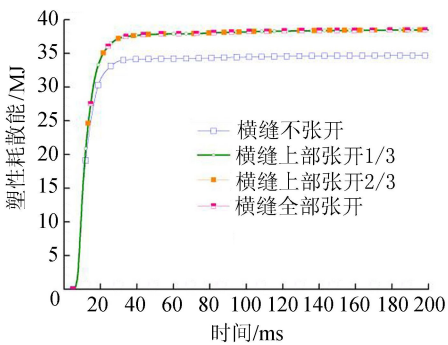


图 8 不同横缝张开状态下大坝整体塑性耗散能积累过程

Fig. 8 Accumulation process of the overall damage dissipation energy in the dam in different contraction joint opening states

4 结 论

- a. 考虑不同横缝张开范围的影响,探究了不同横缝张开状态下水下爆炸冲击大坝的动态作用全过程,研究结果表明,受横缝张开影响,浅水爆炸冲击荷载作用下,自由水面高程、坝头内部区域大面积出现贯穿性毁伤破坏,坝头冲切破坏区域贯穿深度及毁伤区厚度明显增大,大坝的整体抗爆安全性明显降低。
- b. 横缝上部张开 1/3、横缝上部张开 2/3 及横缝全部张开 3 种条件下坝头区域的横缝卸载条件基本相似,导致坝头区域的毁伤状态相同。因此,在大坝的抗爆设计及安全评价中,如果坝体遭受浅水爆炸冲击,则应主要关注坝体上部区域的横缝开合状态。

参考文献:

[1] 胡昱,左正,李庆斌,等. 高拱坝施工期横缝增开现象及其相关成因研究[J]. 水力发电学报,2013,32(5):218-225. (HU Yu,ZUO Zheng,LI Qingbin,et al. Study on abrupt gape of transverse joints and its cause during construction of high arch dams [J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2013,32(5):218-225. (in Chinese))

[2] ALEMBAGHERI M, GHAEMIAN M. Seismic performance evaluation of a jointed arch dam[J]. Structure & Infrastructure Engineering;Maintenance,Management,Life-Cycl,2016,12(2):256-274.

[3] 张楚汉,金峰,王进廷,等. 高混凝土坝抗震安全评价的关键问题与研究进展[J]. 水利学报,2016,47(3):253-264. (ZHANG Chuhan,JIN Feng,WANG Jinting,et al. Key issues and developments on safety evaluation of high concrete dams[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2016,47(3):253-264. (in Chinese))

[4] 冯帆,张国新,管俊峰,等. 特高拱坝上游止水区域横缝不灌浆的影响[J]. 应用基础与工程科学学报,2016(1):59-70. (FENG Fan,ZHANG Guoxin,GUAN Junfeng,et al. Influence study of non-grouted transverse Joints in upstream water stop area of super-high arch dam[J]. Journal of Basic Science and Engineering,2016(1):59-70. (in Chinese))

[5] 何婷,汪卫明,张雄,等. 复合接触单元及其在带缝高拱坝仿真中的应用[J]. 水力发电学报,2012,31(5):216-222. (HE Ting,WANG Weiming,ZHANG Xiong,et al. Composite contact element and its application to simulation of cracked high arch dam[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2012,31(5):216-222. (in Chinese))

[6] 樊启祥,张国新,刘有志,等. 特高拱坝横缝开度问题研究[J]. 水力发电学报,2012,31(6):179-185. (FAN Qixiang,ZHANG Guoxing,LIU Youzhi,et al. Study on transverse joint aperture in super-high arch dam[J]. Journal of hydroelectric engineering, 2012,31(6):179-185. (in Chinese))

[7] 张社荣,于茂,肖峰,等. 横缝开合状态对高坝深孔结构力学行为影响[J]. 水利学报,2013,44(10):1249-1256. (ZHANG Sherong,YU Mao,XIAO Feng,et al. Effect of contraction joint state on the mechanical behavior of deep openings in high dams [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2013,44(10):1249-1256. (in Chinese))

[8] 明付仁,张阿漫,杨文山. 近自由面水下爆炸冲击载荷特性三维数值模拟[J]. 爆炸与冲击,2012,32(5):508-514. (MING Furen,ZHANG Aman,YANG Wenshan. Three dimensional simulations on explosive load characteristics of underwater explosion near free surface[J]. Explosion and Shock Waves,2012,32(5):508-514. (in Chinese))

[9] 崔杰,杨文山,李世铭,等. 近自由面水下爆炸冲击波切断效应研究[J]. 船舶力学,2012,16(5):465-471. (CUI Jie,YANG Wenshan,LI Shiming,et al. Research on the cutoff effect of shock wave induced by underwater explosion near free surface[J]. Journal of Ship Mechanics,2012,16(5):465-471. (in Chinese))

[10] 刘翠丹,明付仁,丛刚,等. 基于 SPH 方法的浅水爆炸研究[J]. 舰船科学技术,2012,34(12):7-14. (LIU Cuidan,MING Furen,CONG Gang,et al. Research on shallow water explosion based on SPH method[J]. Ship Science and Technology,2012,34(12):7-14. (in Chinese))

[11] 杨莉,汪玉,杜志鹏,等. 沉底装药水下爆炸冲击波传播规律[J]. 兵工学报,2013,34(1):100-104. (YANG Li,WANG Yu, DU Zhipeng,et al. Research on shock wave propagation of underwater explosion of bottom charge[J]. Acta Armamentarii,2013, 34(1):100-104. (in Chinese))

[12] 张社荣,李宏璧,王高辉,等. 水下爆炸冲击波数值模拟的网格尺寸确定方法[J]. 振动与冲击,2015,34(8):93-100. (ZHANG Sherong,LI Hongbi,WANG Gaohui,et al. A method to determine mesh size in numerical simulation of shock wave of underwater explosion[J]. Journal of Vibration and Shock,2015,34(8):93-100. (in Chinese))

[13] RIEDEL W. Beton unter dynamischen Lasten: Meso-und makromechanische Modelle und ihre Parameter [D]. Munich: Universität der Bundeswehr München,2000.

[14] TU Z, LU Y. Evaluation of typical concrete material models used in hydrocodes for high dynamic response simulations[J]. International Journal of Impact Engineering,2009,36(1):132-146.

[15] JOHNSON G R, HOLMQUIST T J. An improved computational constitutive model for brittle materials [J]. AIP Conference Proceedings,1994,309(1):981-984.