

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2017.01.007

爆炸荷载作用下大坝破坏分析的数值模拟研究进展

顾鑫,章青

(河海大学力学与材料学院,江苏南京 211100)

摘要:对近年来爆炸冲击荷载作用下大坝动力响应和破坏分析所采用的数值模拟方法的研究进展和发展趋势进行综述。重点总结现有计算爆炸力学数值方法进行大坝爆炸动力响应特征和破坏过程分析的研究成果,指出大坝爆炸响应分析是一个涉及炸药爆炸、爆炸冲击波形成和传播、冲击波或爆炸产物与坝体相互作用以及坝体结构动态响应的完整连续过程,同时总结了水库大坝环境中的爆炸荷载分类、特点及其对大坝结构的破坏效应。指出各种爆炸条件下大坝的爆炸模拟需要关注的不同问题,今后需要在目前研究基础上及时吸收计算力学的最新研究成果,发展高精度的数值计算方法和高效率的数值求解体系,实现大坝爆炸动力响应的全过程仿真模拟。

关键词:爆炸荷载;大坝破坏分析;数值模拟;研究现状;综述

中图分类号:TV698;O347;O38 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2017)01-0045-11

Progress in numerical simulation of dam failure under blast loading

GU Xin,ZHANG Qing

(College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: Research progress and development trends in numerical simulation methods for analyzing the dynamic response and failure process of dams under blast and impact loads are reviewed. Research findings regarding the dynamic response and failure process of dams under blast loading obtained through the existing numerical simulation methods for the computation of explosion mechanics are focally summarized. It is pointed out that the dam dynamic response analysis under blast loading involves an explosion, the formation and propagation of a shockwave, the interaction between the shockwave and the dam body, and the dynamic response of the dam body. The classification and characteristics of the blast loads exerted on dams and their damage effects on dams are summarized, and issues that require more attention in dam explosion simulation under explosion conditions are pointed out. Based on current research, the latest research achievements of computational mechanics should be absorbed into future research to develop high-precision numerical methods and high-efficiency numerical solution systems, and to realize the entire process simulation of the dam dynamic response to explosions.

Key words: blast loading; dam failure analysis; numerical simulation; research status; review

大坝在服役期间内除受到自重、水压等常规荷载作用外,还可能面临爆炸冲击等极端外荷载作用。战争实例表明,重大水利工程尤其是高坝以其显著的政治经济效益是局部战争的重点攻击对象^[1-2]。大坝安全防护为世界各主要国家所重视,也是我国国家总体安全战略的重要组成部分,爆炸冲击荷载作用下大坝的毁损破坏过程和抗爆安全研究给学术界和工程界提出了迫切的要求和挑战。

结构爆炸毁损涉及炸药爆炸、爆炸冲击波的形成和传播、冲击波或爆炸产物与固体结构的相互作用以及

收稿日期: 2016-04-23
基金项目: 国家自然科学基金(11672101,11372099,11132003);“十二五”国家科技支撑计划(2015BAB07B10);江苏省自然科学基金(BK20151493)
作者简介: 顾鑫(1991—),男,江苏连云港人,博士研究生,主要从事计算力学与灾变破坏力学研究。E-mail:guxinx1010@gmail.com
通信作者: 章青,教授。E-mail:lxzhangqing@hhu.edu.cn

由此导致的结构动态响应4个过程^[3],涉及多相介质在高速、高温、高压等极端条件下的复杂力学行为,也必然会产生各种复杂的变形不连续特征,研究难度很大。试验研究对大坝爆炸动力响应和破坏过程研究至关重要,国内外在水中爆炸、空中爆炸和侵彻爆炸等的化爆模拟试验、核爆炸效应试验、大坝模型溃坝试验、机械冲击试验、离心机试验等方面均开展了相关的试验研究^[1-2,4-11],但试验成本高,且爆炸的瞬时特征也会导致观测困难,试验研究获得的有限数据还可能存在较大离散性。完全的理论分析方法只适用于一些简单、理想化问题,对精确描述爆炸冲击荷载作用下大坝的动力响应和破坏机制极为困难;半经验数据的理论分析技术虽然可以降低试验成本,建立某些经验关系,但其应用范围较窄。目前,计算爆炸力学的数值模拟与仿真技术已成为研究结构爆炸响应的主要手段,国内外研究者在炸药爆轰、爆炸冲击波传播、结构爆炸的动态响应、毁伤破坏过程和抗爆防护等方面的数值模拟开展了许多卓有成效的研究,但现有研究主要集中于各类建筑结构工程、舰船工程和军事设备领域,对大坝等水工结构工程的爆炸毁伤效应、破坏过程和破坏机理尚缺乏系统研究。

本文对爆炸荷载作用下大坝破坏分析的数值模拟方法和研究成果进行综述。重点总结现有计算爆炸力学数值方法对大坝爆炸动力响应特征和破坏过程分析的研究成果,探讨爆炸荷载分类、特点及其对大坝结构的破坏效应,指出各种爆炸条件下大坝爆炸模拟需要关注的问题,并对爆炸荷载作用下大坝毁损过程的全过程仿真模拟提出相关建议。

1 水库大坝环境中的爆炸荷载及其特点

根据炸药爆炸时战斗部所处介质的不同(空气、水体和坝体),大坝受袭主要有空中爆炸^[12]、水下爆炸^[13]和侵彻爆炸^[14]3类。根据爆距 R 与TNT当量药包半径(装药半径) r 的比值 $\bar{r}=R/r$,可分为近场、中场和远场爆炸,其中近场爆炸又可细分为接触爆炸和非接触爆炸^[15-17](图1)。不同介质环境中的爆炸荷载特性存在差异,其对结构的破坏作用、导致的大坝动态响应也存在较大差异,因而准确描述爆炸荷载是开展大坝爆炸动力响应和破坏过程数值模拟的基础。

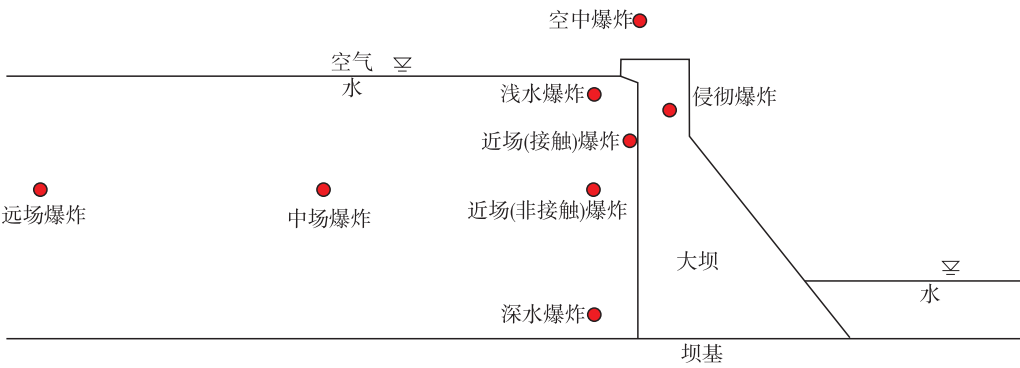


图1 水库大坝环境中的爆炸荷载

Fig. 1 Blast loading exerted on reservoir dam

1.1 侵彻爆炸的特点和破坏效应

战斗部装药对大坝的侵彻爆炸实质上是射弹的侵彻和炸药爆炸2个过程的耦合作用,但由于作用机理的复杂性、过程的瞬时性和材料的差异性,通常将侵彻过程和爆炸过程分开单独进行研究^[18]。分析弹体对大坝的侵彻过程,关键是准确描述弹体与坝体的冲击接触过程、弹体的运动规律以及坝体的渐进破坏过程,进而分析爆炸产物与坝体结构的相互作用以及固体结构的动力响应。

侵彻爆炸会产生侵彻弹坑、爆腔、爆炸漏斗和震动效应。弹体的侵彻深度和轨迹与弹体材质、尺寸和运动参数以及坝体材质和结构相关,爆炸破坏范围和爆腔尺寸等与炸药性能、坝体材质和结构,以及前期侵彻破坏作用相关。总体来看,侵彻爆炸主要使大坝在侵彻部位、坝踵和起坡点附近区域发生局部破坏,而不至于发生整体失效破坏。

1.2 空中爆炸的特点和破坏效应

炸药装药在空中爆炸具有以下特点:(a)空中爆炸冲击波超压峰值和超压冲量比水中爆炸低,压力波持续时间较短,冲击波超压初始衰减迅速,后期衰减平缓,传播一定距离后衰减到介质声速。(b)装药的空中爆炸对结构物主要产生 2 种破坏效应,即冲击波效应(包括超压和动压 2 部分作用力)和爆炸产物的破片效应;冲击波对结构的破坏起主要作用,当发生距离爆心小于 $(10 \sim 15)r$ (r 为装药半径)的近场接触爆炸时,目标受到爆炸产物和冲击波共同作用,超过上述爆距时,只受到空气冲击波作用^[19]。(c)爆炸产物在空气中重复膨胀-压缩的脉动过程,但只有首次脉动的爆炸破坏效应显著。(d)冲击波在地面或结构物表面发生反射、衍射和绕射,将一定程度地增强或减弱爆炸冲击波效应。

1.3 水下爆炸的特点和破坏效应

在近场、中场和远场爆炸分类的基础上,根据爆源水深 h 和 TNT 当量 Q 得到的比例爆炸深度值 $\bar{H} = h/Q^{1/3}$,水中爆炸又可分为深水爆炸($\bar{H} > 5.0$)和浅水爆炸($\bar{H} < 5.0$)^[2](图 1)。

炸药装药在水下爆炸具有以下特点:(a)水中爆炸冲击波超压峰值高、相比于空中爆炸随距离衰减慢、波及范围广,对临近水中建筑和舰船等结构产生较严重的破坏效应。(b)爆生高压气体的周期性胀缩运动形成多次脉动压力,即气泡脉动压力,其滞后于冲击波作用,作用频率低、持时长、动能大,易激发水中结构物共振,具有较强的破坏力。(c)水下岩土介质处于水饱和状态,深水爆炸时爆炸地震效应格外强烈,且衰减慢。(d)浅水爆炸气体冲出水面形成强烈的空气冲击波,伴生的水喷和水面波浪效应升高,动压大、拖曳力强,对岸边设施的冲刷破坏力强。此外,浅水爆炸的水中冲击波超压峰值明显低于深水爆炸值。(e)随着爆心距增加,水下爆炸冲击波很快衰减到介质声速,因而可采用线性声学近似描述远场爆炸冲击波的传播规律。(f)水下爆炸冲击在不同交界面(自由水面和结构面)发生反射,冲击波叠加易造成水面切断效应和气穴现象(或空化效应),气穴荷载对临近自由水面的建筑结构具有重要影响,故在分析坝体近场近水面爆炸时需要考虑气穴效应。

2 爆炸荷载的施加方式

大坝结构爆炸响应数值模拟的关键是确定爆炸荷载作用的方式和大小。过去常采用经验公式或爆炸荷载时程曲线,以简化爆炸过程的前 3 个阶段,直接将爆炸荷载施加到结构上。该方法在一定程度上简化了爆炸分析的复杂性,方便得到问题的解答,但不能真实反映爆炸的复杂过程,致使荷载施加不准确,会影响结果的真实性。也有学者不考虑炸药爆炸和冲击波的产生过程,将理想模型的或试验测得的炸药爆轰近区压力-时间函数曲线 $p_0(t)$ 作为爆炸波荷载函数,研究冲击波的传播与结构动力响应,该方法同样忽略炸药爆轰过程的模拟。随着爆轰理论的研究深入和计算模拟水平的提高,研究者愈发关注结构爆炸响应的全过程模拟,以科学地描述炸药爆炸、爆炸冲击波的传播规律、爆炸冲击波或爆炸产物与坝体结构的相互作用,准确分析大坝的爆炸响应。

水库大坝环境下的炸药爆炸与结构动力响应涉及炸药、水、空气、坝体等多种材料介质,以及它们在高应变率、高温、高压等极端条件下的复杂力学行为,准确描述各种材料的力学行为需要有恰当的状态方程与本构模型。由于装药爆轰反应区机理复杂,高精度模拟装药爆轰过程还存在困难,通常采用定常爆轰反应速率函数配合爆轰产物的动力学状态方程^[19-20]描述炸药爆炸过程:

$$p = \lambda p_{\text{eos}} \quad p_{\text{eos}} = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V}\right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V}\right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \tag{1}$$

$$\lambda = \max(\lambda_1, \lambda_2) \quad \lambda_1 = \begin{cases} \frac{(t - t_L) D}{1.5h} & t > t_L \\ 0 & t \leq t_L \end{cases} \quad \lambda_2 = \beta \left(1 - \frac{v}{v_0}\right) \quad \beta = \frac{\rho_0 D^2}{p_{\text{CJ}}} = \gamma + 1 \tag{2}$$

式中: p ——爆轰压力; λ ——爆轰反应速率函数,在 0 到 1 之间变化; p_{eos} ——由爆轰产物状态方程计算得到的爆轰压力; A, B, R_1, R_2, ω ——材料常数; V ——爆轰产物的相对体积(即现时爆轰产物体积 v 与炸药初始体积 v_0 之比), $V = v/v_0$; E_0 ——炸药单位初始体积比内能; λ_1 ——Wilkins 反应速率函数; t ——当前时间; t_L ——点火时间,不同单元或质点不同,它反映了爆轰波以爆速从起爆点传播到该质点的时间; D ——

爆速; h ——特征尺寸, 采用有限元计算时一般取单元最小尺寸; λ_2 ——CJ 比体积燃烧函数(或 β 燃烧函数); γ ——绝热指数, p_{CJ} ——CJ 点爆压。

空气采用理想气体或真实气体状态方程描述:

$$p = (\gamma - 1) \rho e = (\gamma - 1) \frac{\rho}{\rho_0} E_0 \quad (3)$$

式中: γ ——绝热指数; ρ, ρ_0 ——材料现时密度和初始密度; e ——单位质量比内能。

水体压缩可用等熵状态方程或多项式状态方程描述, 常用的一种多项式方程为

$$p = a_1 \mu + a_2 \mu^2 + a_3 \mu^3 + (b_0 + b_1 \mu + b_2 \mu^2 + b_3 \mu^3) \rho_0 e \quad \mu \geq 0 \quad (4)$$

其中

$$\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1$$

式中: $A, n, a_1, a_2, a_3, b_0, b_1, b_2, b_3$ ——水的材料常数。

土、岩石和混凝土等筑坝材料在高压下可采用可压缩流体模型描述, 如 Mie-Gruneisen 方程:

$$p = p_* + \frac{\Gamma}{v} (e - e_*) \quad p_* = \frac{g^2 (v_0 - v)}{[v_0 - h(v_0 - v)]^2} \quad e_* = \frac{p_* (v_0 - v)}{2} \quad \mu \geq 0 \quad (5)$$

式中: p_* ——冷压, e_* ——冷比内能, Γ ——格林乃森系数, g, h ——材料常数。

在较高动压下, 土、岩石和混凝土等也可采用流体弹塑性模型描述:

$$p = \begin{cases} \frac{\rho_0 c_0^2 \left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{a}{2} \mu^2 \right]}{[1 - (1 - \lambda) \mu]^2} + (\gamma_0 + a \mu) E & \mu \geq 0 \\ \rho_0 c_0^2 \mu + (\gamma_0 + a \mu) E & \mu < 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中: γ_0, a ——无量纲材料参数; E ——系统内能。

式(6)给出流体弹塑性模型中状态方程表示的球应力, 球应力由物态方程控制; 同时, 偏应力由胡克定律控制并受塑性准则修正。不能忽略材料强度效应时也可用含率效应的动态本构模型, 如 Holmquist-Johnson-Cook 模型。

3 爆炸荷载作用下大坝动力响应的数值模拟研究

数值模拟方法可以对爆炸的4个阶段及各自涉及的问题进行系统分析, 促进爆炸荷载作用下大坝的动力响应、毁伤机理、破坏过程与抗爆性能评估研究, 为大坝抗爆安全评估及综合防护提供理论依据和科学支撑。目前, 爆炸力学数值计算方法主要有4类: (a) 基于网格的有限差分法、有限体积法和有限元法(Lagrange方法、Euler方法、ALE和CLE等Lagrange与Euler混合方法、TVD和WENO等为代表的高分辨率算法、CE/SE方法为代表的新型高精度算法); (b) 以光滑粒子流体动力学方法(SPH)和物质点方法(MPM)为代表的无网格方法; (c) 以FEM-SPH耦合方法为代表的网格-无网格耦合分析方法; (d) 能反映不连续变形特征的离散元方法、块体元法和流形元方法等。宁建国等^[19, 21]在其出版的专著中, 系统介绍了爆炸力学的内容、数值计算方法和相关研究成果。宁建国等^[22]和王成等^[22]分别综述了爆炸力学数值计算方法和高精度数值模拟的研究进展。胡春红等^[13]分析和总结了水下爆炸现象数值模拟以及水下爆炸作用下结构响应的数值计算研究进展。辛春亮等^[23]比较了LS-DYNA、DYTRAN、ABAQUS和AUTODYN这4种商业软件在模拟水下爆炸问题的特点和适用范围。宗智等^[24]系统介绍了ABAQUS模拟中远场水下爆炸问题的半经验性方法与分析算例。现有文献采用的大坝爆炸响应和破坏分析的数值模拟方法皆可包含于上述4类。

3.1 离散元法

离散元法(DEM)在大坝的变形、抗滑稳定性、大坝地震开裂和溃坝破坏等方面得到了应用, 近年来在岩体爆破的动力响应和破坏分析中受到广泛关注, 但对坝体结构的爆炸响应研究较少。中国科学院力学研究所鲁晓兵等^[25-26]采用离散元法进行坝体表面埋置装药爆炸作用下混凝土坝的动力响应分析, 验证了DEM模拟混凝土坝爆炸破坏的可行性。他们通过与试验比对的方法确定离散元法模型的计算参数, 给出坝体表面质点速度时程曲线, 并指出数值计算结果的精度与划分块体尺寸及材料参数密切相关。河海大学王冰玲等^[27]基于四面体单元随机剖分网格, 采用离散元法模拟了上游坝面接触爆炸荷载作用下三维混凝土坝的溃

坝过程,但其采用经验公式直接将爆炸荷载施加到坝体上,影响爆炸模拟结果的准确性和真实性。

为充分发挥有限元法和离散元法各自的优势,研究者发展了多种 FEM/DEM 耦合分析方法。FEM/DEM 耦合分析方法通常采用过渡层衔接有限元区域和离散元区域,或者采用接触算法与位移约束条件描述有限单元与离散单元间的相互作用,或者在离散或破裂有限单元间引入离散元法的接触力模型(即可离散有限元法或连续-非连续单元方法),或者在一定条件下将有限单元转化为离散单元。上述各种 FEM/DEM 耦合方法已在建筑结构倒塌、重力坝地震破坏分析、边坡稳定、混凝土等准脆性材料冲击破坏、岩石劈裂破坏、颗粒-结构相互作用等多个领域得到初步应用,但 FEM/DEM 耦合方法在爆炸分析与大坝爆炸破坏分析中仍缺乏研究,仅严成增等^[28]采用 FEM/DEM 耦合方法开展了爆炸气体驱动下岩体破裂模拟。

3.2 Lagrange 有限元法

浙江大学李鸿波等^[29-31]采用连续损伤模型描述坝体行为,采用自主研发的三维各向异性脆性动力损伤有限元程序 ADDFEP3D,分析了混凝土重力坝和拱坝及其基岩系统在大坝下游面受炸弹爆炸冲击荷载作用下的动力响应、损伤演化与破坏问题。他们在研究中采用三角形荷载时程曲线施加爆炸荷载,忽略炸弹冲击侵彻对坝体的毁损效应,也忽略了库水满库工况时坝体与动水的耦合作用。

基于远场水下爆炸冲击波对重力坝的作用可近似为均匀冲击荷载作用的假定,南京水利科学研究院顾培英等^[32]采用 ABAQUS/Explicit 的 Lagrange 显式动力学程序分析了不同冲击荷载下大坝的动态响应和破坏形态。基于线性声学近似的声-固耦合计算方法可以较好地模拟远场水下爆炸问题的结论,长江科学院张启灵等^[33-35]采用 ABAQUS/Explicit 的显式有限元程序,通过声-固耦合方法模拟远场水下爆炸冲击作用下多种坝工结构的损伤发展规律和潜在破坏模式;需要指出,声-固耦合模拟方法仅适用于中远场爆炸,不能求解近场爆炸问题。

早期的分析爆炸冲击问题的流体动力学程序(Hydrocode)多采用欧拉算法,近年来,北京理工大学^[19,21]、北京应用物理与计算数学研究所^[36]、中国科学院力学研究所和北京大学^[37]等单位的学者也开发了一些基于 Euler 算法的爆炸计算程序,但采用单一欧拉法研究大坝爆炸动力响应和破坏问题的文献还很少见。

3.3 Lagrange 与 Euler 混合方法

网格类 Lagrange 方法方便确定物质界面移动,但在处理大变形问题时易发生网格扭曲缠绕,导致求解不精确甚至失效;Euler 方法适合模拟大变形问题,但存在难以精确追踪物质界面和多介质混合网格的力学量的问题。基于 Lagrange 和 Euler 的混合算法已成为计算爆炸力学当今的研究重点,任意拉格朗日-欧拉(Arbitrary Lagrangian-Eulerian, ALE)法和耦合欧拉-拉格朗日(Coupled Eulerian-Lagrangian, CLE)法是 2 种典型的耦合分析方法,在爆炸冲击模拟中取得良好效果。现有近场爆炸和侵彻爆炸荷载作用下大坝的动力响应和破坏分析多采用 Lagrange 与 Euler 混合方法。其中:高能炸药、库水和空气采用 Euler 网格建模,采用多物质 Euler 算法或多物质 ALE 算法求解;大坝等固体结构采用 Lagrange 网格建模,采用 Lagrange 算法求解;采用流固耦合算法描述库水/空气与大坝之间的相互作用,流固耦合方法包括合并流体和结构的界面节点方法、Noh 耦合方法、罚函数接触算法和 Ghost 耦合算法等。

武汉大学潘超^[38]以 LS-DYNA2D 软件的 Euler 有限元法分析了炸药浅水爆炸时冲击波传播规律和水体喷柱现象,采用 ALE 方法分析了上游水面近坝爆炸、上游库底近坝爆炸作用下混凝土重力坝的应力变化规律、坝体振动特性、坝体损伤演化和破坏规律。指出:水面近坝爆炸易造成坝踵和下游面起坡点附近拉应力应力集中,水面爆炸时坝头部分损坏严重,坝体中部及下部损坏并不严重,坝踵附近有小范围局部损伤;库底爆炸时坝踵区域严重破坏,坝基面损伤破坏区域大,对大坝安全影响更为严重。采用 ALE 方法分析了巡航导弹垂直打击坝顶与水平打击坝体上游不同部位时,侵彻爆炸作用下混凝土重力坝的应力和应变变化规律、爆腔大小及坝体最终破坏范围,指出侵彻爆炸易造成侵彻部位、坝踵和起坡点附近的局部破坏,提出了坝踵加厚、改善混凝土材料性能、在重点部位增加纤维材料的大坝抗爆安全防护措施。但其研究忽略了侵彻过程及其对大坝的损毁效应;炸药爆轰采用 Lagrange 算法,并通过接触滑动算法研究爆炸产物与坝体的相互作用,但接触滑动算法的描述还不完善。

第二炮兵学院李本平等^[39-41]利用 LS-DYNA 软件的 ALE 方法,在精确制导炸弹侵彻爆炸和重复打击等条件下,研究了混凝土重力坝的动态响应、破坏效应及坝体的抗滑稳定性问题,分析了制导炸弹在坝前水面

爆炸时水下和空中冲击波的传播规律以及大坝的动态响应。其研究表明:(a) 侵彻爆炸造成坝体局部毁伤破坏,且呈现以爆炸作用为主、侵彻作用为辅的破坏特征;(b) 重复打击下弹药爆炸具有明显的叠加效应,大坝毁伤更为严重,对大坝的正常运行及安全构成威胁。第二炮兵学院孟会林等^[42]采用同样的方法研究上游近坝面水下爆炸和上游深水库底坝踵处爆炸时,典型混凝土重力坝断面的动力响应特性和破坏范围。张甲文等^[3]采用相同方法研究钻地武器垂直侵彻坝顶后爆炸下,混凝土重力坝的动态响应,指出坝顶遭到侵彻爆炸时破坏区主要集中在坝头部分。

上海交通大学徐俊祥等^[3]建立了坝体、坝基、炸药、水及空气二维全耦合计算模型,全过程分析了水下爆炸时混凝土重力坝的弹性加速度和位移时程变化规律。河海大学 Yu^[44]利用 LS-DYNA 软件的 ALE 算法研究了发生上游坝面接触爆炸时,水面、水中和库底等 3 种不同位置炸药爆炸对混凝土坝体动力响应和毁伤破坏的影响,指出距库底一定距离的水中爆炸对坝体的毁伤最为严重。刘军等^[45]采用荷载时程曲线,在坝体顶部施加均布爆炸荷载,利用 LS-DYNA 软件研究了两河口土石坝在坝顶局部接触爆炸作用下的动力响应和毁伤破坏问题。张智超等^[46]利用 LS-DYNA 内的多物质 ALE 方法分析了均质土石坝的爆炸破坏问题,研究不同炸药埋深和不同孔压上升程度对堤坝弹坑及爆腔效应的影响。Zhu 等^[47]采用 LS-DYNA 研究了水下爆炸作用下三维混凝土拱坝的动力响应问题,指出水下爆炸冲击作用下拱坝的水平位移、速度和加速度动力响应比竖直方向更为显著。Linsbauer^[48]通过建立库水-坝体耦合模型,对库底爆炸冲击荷载作用下的混凝土重力坝(上游面含水平裂缝)的动力响应、稳定性及破坏机理进行了研究。

天津大学张社荣等^[49-53]、王高辉等^[54-55]基于 LS-DYNA、AUTODYN 和 ABAQUS 等软件,构建坝体、坝基、炸药、水及空气的三维全耦合模型,采用 CLE 法和 ALE 法系统研究混凝土重力坝在侵彻爆炸、水中爆炸和空中爆炸等不同爆炸方式下的动力响应、破坏模式及抗爆性能,为大坝抗爆性能评估和防护设计提供基础。对浅水爆炸的冲击波传播过程和水面切断效应进行分析,进而针对水下爆炸冲击波传播及荷载特点,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、库前水位和局部配置抗爆钢筋对大坝抗爆性能的影响。张社荣等^[56]还分析了浅水爆炸下混凝土高拱坝的动态响应、可能破坏模式及抗爆性能,并进而研究了网格尺寸对空中、水下爆炸模拟精度的影响,并给出网格尺寸的确定方法^[57-58]。王高辉等^[59-60]研究了近水面水下爆炸冲击波传播特性和气穴效应问题,并对比了水下爆炸和空中爆炸冲击波的传播特性^[61],以及 2 种爆炸条件下重力坝的不同动态响应特性^[62-63]。张社荣等^[64]和杨明^[65]采用 LS-DYNA 的 ALE 算法研究了水下爆炸冲击下重力拱坝的动力响应、破坏特性和增加泡沫铝结构的抗爆性能。朱祖国等^[66]采用同样方法模型分析了混凝土闸坝在进口段库前和内部发生水下爆炸时的失效模式。金亮等^[67]考虑坝身孔口对结构抗爆性能的影响,研究了水下爆炸冲击荷载作用下重力拱坝及坝后式厂房的动力响应和破坏模式,分析了爆心距对大坝结构破坏模式的影响。他们的研究表明:水中爆炸冲击荷载作用下大坝的破坏效应较大,水下贴坝面爆炸时大坝破坏最严重,侵彻爆炸和空中爆炸的毁伤效应主要体现为坝体的局部破坏效应;采用配筋抗爆措施能够显著限制坝体裂缝的扩展和贯穿,减少坝体开裂破坏范围,有效地改善坝体的抗爆性能。

3.4 SPH、MPM 和 PD 等无网格法

近年来,无网格粒子类方法^[68-71]成为国际计算力学领域的研究热点之一,光滑质点流体动力学方法(smoothed particle hydrodynamics, SPH)、物质点法(material point method, MPM),以及近场动力学方法(peridynamics, PD)是其典型代表。光滑质点流体动力学方法的无网格、Lagrangian 性质能够自然处理爆炸产生的大变形、多介质等问题;目前,SPH 程序已集成于 AUTODYN、LS-DYNA 等商业软件中,在爆炸问题分析中得到广泛应用,也应用于大坝的爆炸毁损分析,得到工程界的认可。物质点法是一种无网格粒子法,兼有 Lagrange 方法和 Euler 方法的优点,能够自然描述爆炸涉及的大变形、运动物质交界面和多介质耦合等问题;目前,研究者积极开展 MPM 在爆炸分析中的理论和应用研究,已初步形成了商业分析软件^[69],但尚未应用到大坝毁伤分析领域。近场动力学方法是一种新兴的非局部无网格粒子类方法^[70],具有类似 SPH 方法的优势,同时在分析固体破坏问题时优势显著,是爆炸问题分析的一种较有潜力的方法,目前仅 Demmie^[71]初步开展了炸药爆轰和弹头破碎的模拟研究,亟待进一步发展。

3.5 SPH/FEM 等耦合法

有限元法与光滑粒子流体动力学(SPH/FEM)耦合方法在大变形区域采用 SPH 点,在小变形区采用 FEM 网格,充分利用 FEM 的计算效率与准确施加本质边界条件优势,以及 SPH 方法能更准确模拟大变形问

题而没有网格畸变问题的优势。张社荣等^[72]和王帅^[73]使用 AUTODYN 软件的 FEM/SPH 耦合方法分别研究水下接触爆炸下重力坝的动态响应,以及近水面水下爆炸对大坝动力响应及破坏模式的影响规律。同时,物质点法或近场动力学方法与有限元法的耦合分析是一个潜在研究方向,有利于促进大坝结构的爆炸毁伤分析。

4 结论与展望

a. 计算爆炸力学的数值模拟与仿真技术已成为结构爆炸响应的主要研究手段,便于系统研究炸药爆炸、爆炸冲击波传播,以及结构爆炸的动态响应、毁伤破坏过程和抗爆防护等问题。

b. 现有的数值模拟研究多基于 LS-DYNA、AUTODYN 和 ABAQUS 等商用软件,这些软件都有各自的适用范围,相应的数值计算方法也存在一些不足。自主研发的计算程序在分析大坝的爆炸动力响应和破坏问题的成果还不多见,同时对计算模型做了许多简化处理,计算精度有待进一步提高。商用软件在及时吸收先进理论和算法、改进计算方法等方面难度较大,一些商用软件的关键部分存在对华禁用的现实问题。结构的抗爆安全性研究事关国家安全,必须独立自主研发相关分析程序。

c. 现有的大坝爆炸毁伤机理和破坏过程的研究还不够系统和深入,需要加大研究投入。大坝的侵彻爆炸研究还较少,常用的 ALE 方法考虑侵彻和爆炸 2 个过程联合作用,但基于网格分析方法在准确模拟裂纹扩展时遇到困难,且一些研究中忽略侵彻过程对坝体的毁伤作用而只分析爆炸作用;FEM/DEM 耦合方法尚未运用到大坝的爆炸模拟中;SPH/FEM 的耦合分析方法尚未运用到坝体开裂分析;物质点法等无网格粒子类方法在分析侵彻破坏问题中具有显著优势,有望进一步促进侵彻爆炸数值模拟的发展。水下爆炸和空中爆炸需要关注冲击波在不同爆炸介质中的传播特性,以及多种边界面或结构面对冲击波传播的影响,需要加强水下气泡脉动对结构的毁伤模拟研究。3 种爆炸条件均需考虑多相介质的流固耦合作用,需加强流固耦合方法研究,提高荷载的施加精度。

d. 基于传统连续介质力学的数值分析方法与不连续破坏问题本身存在根本矛盾,不能很好地描述结构的损伤累积、宏观裂纹萌生与扩展、局部断裂乃至整体失稳的渐进破坏过程。其中的 Lagrange 方法在处理大变形问题时易发生网格扭曲缠绕导致求解不精确甚至失效;Euler 方法虽然便于处理大变形问题,但运动物质界面的精确追踪和多介质混合网格问题处理难度大;ALE 和 CLE 等混合方法兼具 Lagrange 和 Euler 法的特点,但需要着重处理 2 种单元界面的耦合作用。网格类数值方法在分析大变形问题时,一般采用网格重构或侵蚀算法,网格重构技术处理复杂、侵蚀算法删除破坏单元不能真实反映爆炸产物与坝体间的作用过程。SPH 和 MPM 等无网格方法近年来受到广泛重视,但仍存在裂纹等不连续处的空间导数不存在的奇异性问题;无网格方法通常计算耗时多,需通过并行计算等高性能计算方式加以解决。SPH/FEM 等网格-粒子类无网格耦合方法通过点、面接触模拟两者间的相互作用,但还不成熟,需要研究高精度的耦合计算方法。DEM 方法能自然模拟结构损伤破坏,但其难以精确确定单元间接触模型的参数,且计算精度和效率低于有限元方法;FEM/DEM 耦合分析方法具有一定优势。及时吸收计算力学领域的最新研究成果有利于促进大坝等工程结构的爆炸分析。

e. 虽然大坝爆炸的动力响应和破坏分析已取得许多研究成果,但仍有许多待研究问题,如:侵彻爆炸的侵彻和爆炸过程的联合分析、水下爆炸冲击波和气泡脉动压力联合作用下大坝的动态响应特征和破坏效应、各种常规坝型和特种坝型的爆炸毁损分析、坝体局部构造对大坝整体爆炸毁伤效果的影响,以及大坝抗爆防护方案设计和优化等问题。

参考文献:

- [1] 陆遐龄. 三峡工程防护问题研究的回顾[J]. 中国三峡建设, 1995(2):23-24. (LU Xialing. Review of research on protection of the Three Gorges Project [J]. China Three Gorges Construction, 1995 (2):23-24. (in Chinese))
- [2] 霍永基. 大坝工程抗爆炸研究[C]//白以龙, 杨卫. 力学 2000. 北京:气象出版社,2000:698-702.
- [3] 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 Junxiang, LIU Xila. Full Coupled Simulation of Concrete Dams Subjected to Underwater Explosion [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2008, 42(6):1001-1004. (in Chinese))
- [4] 王山山, 任青文. 重力坝在冲击荷载作用下破坏模型试验[J]. 水力发电学报, 2010, 29(5):11-13. (WANG Shanshan,

- REN Qingwen. Experimental study of the gravity dam damage caused by impact load [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(5):11-13. (in Chinese))
- [5] 王山山, 杨振宇. 重力坝动力特性测试方法模型试验研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(10):1-3, 8. (WANG Shanshan, YANG Zhenyu. Experimental study of the gravity dam damage caused by impact load [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(10):1-3, 8. (in Chinese))
- [6] 雷冬, 任青文, 王山山, 等. 拱坝冲击破坏的数字图像相关研究[J]. 水电能源科学, 2012, 30(1):70-71. (LEI Dong, REN Qingwen, WANG Shanshan, et al. Study of digital image correlation for impact damage of arch dam [J]. Water Resources and Power, 2012, 30(1):70-71. (in Chinese))
- [7] 陆路. 混凝土重力坝在水下冲击波作用下的损伤及防护决策研究[D]. 大连:大连理工大学, 2012.
- [8] 顾培英, 肖仕燕, 邓昌, 等. 冲击荷载作用下混凝土重力坝破坏特性分析[J]. 长江科学院院报, 2016, 33(5):1-7. (GU Peiying, XIAO Shiyan, DENG Chang, et al. Study on damage characteristics of concrete gravity dam under impact load [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2016, 33(5):1-7. (in Chinese))
- [9] VANADIT-ELLIS W, DAVIS L K. Physical modeling of concrete gravity dam vulnerability to explosions[C]//Waterside Security Conference (WSS). New York:IEEE, 2010:1-11.
- [10] 王秋生, 陈祖煜, 梁向前. 应用离心模型试验研究爆炸荷载效应[C]//中国水利学会工程爆破专业委员会. 水利水电工程爆破技术新进展. 北京:中国水利水电出版社, 2009:1-11.
- [11] 张雪东, 侯瑜京, 梁向前, 等. 水下爆破对大坝影响的离心模拟试验研究[J]. 西北地震学报, 2011, 33(增刊1):234-236. (ZHANG Xuedong, HOU Yujing, LIANG Xiangqian, et al. Centrifuge modeling research on the influence of underwater blasting on a dam[J]. Northwestern Seismological Journal, 2011, 33(Sup1):234-236. (in Chinese))
- [12] 赵海涛, 王成. 空中爆炸问题的高精度数值模拟研究[J]. 兵工学报, 2013, 34(12):1536-1546. (ZHAO Haitao, WANG Cheng. High resolution numerical simulation of air explosion [J]. Acta Armamentarii, 2013, 34(12):1536-1546. (in Chinese))
- [13] 胡春红, 冯新, 李昕, 等. 水下爆炸作用下结构响应的数值计算研究综述[J]. 工程爆破, 2007, 13(1):28-34. (HU Chunhong, FENG Xin, LI Xin, et al. Review of numerical simulation of structural responses to underwater explosion[J]. Engineering Blasting, 2007, 13(1):28-34. (in Chinese))
- [14] 宋顺成, 才鸿年. 模拟战斗部对混凝土侵彻与爆炸耦合作用的计算[J]. 弹道学报, 2004, 16(4):23-28. (SONG Shuncheng, CAI Hongnian. Computations for coupled actions of simulated projectile penetrating and detonating to concrete [J]. Journal of Ballistics, 2004, 16(4):23-28. (in Chinese))
- [15] 牟金磊, 朱锡, 张振华, 等. 水下爆炸载荷作用下加筋板的毁伤模式[J]. 爆炸与冲击, 2009, 29(5):457-462. (MU Jinlei, ZHU Xi, ZHANG Zhenhua, et al. Failure modes of stiffened plates subjected to underwater explosion [J]. Explosion And Shock Waves, 2009, 29(5):457-462. (in Chinese))
- [16] 牟金磊, 朱锡, 张振华, 等. 水下爆炸载荷作用下加筋板的毁伤模式[J]. 爆炸与冲击, 2010, 30(3):225-231. (MOU Jinlei, ZHU Xi, ZHANG Zhenhua, et al. Failure modes of stiffened plates subjected to underwater explosion [J]. Explosion And Shock Waves, 2010, 30(3):225-231. (in Chinese))
- [17] 杨棣, 姚熊亮, 张玮, 等. 水下近场及接触爆炸作用下双层底结构损伤试验研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(2):161-165. (YANG Di, YAO Xiongliang, ZHANG Wei, et al. Experimental on double bottom's structural damage under underwater near-field and contact explosions [J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(2):161-165. (in Chinese))
- [18] FORRESTAL M J, TZOU D Y. A spherical cavity-expansion penetration model for concrete targets [J]. International Journal of Solids and Structures, 1997, 34(31):4127-4146.
- [19] 宁建国, 王成, 马天宝. 爆炸与冲击动力学[M]. 北京:国防工业出版社, 2010.
- [20] 马上. 冲击爆炸问题的物质点无网格法研究[D]. 北京:清华大学, 2009.
- [21] 宁建国, 王猛. 关于计算爆炸力学的进展与现状[J]. 力学与实践, 2012, 34(1):10-19, 69. (NING Jingguo, WANG Meng. Review on computational explosion mechanics [J]. Mechanics in Engineering, 2012, 34(1):10-19, 69. (in Chinese))
- [22] 王成, SHU Chiwang. 爆炸力学高精度数值模拟研究进展[J]. 科学通报, 2015, 60(10):882-898. (WANG Cheng, Shu Chiwang. Progress in high-resolution numerical simulation of explosion mechanics [J]. Chinese Journal, 2015, 60(10):882-898. (in Chinese))
- [23] 辛春亮, 秦健, 徐更光, 等. 数值模拟软件在水下爆炸模拟中的应用研究[C]//安徽省力学学会. 第四届全国爆炸力学实验技术学术会议论文集. 合肥:安徽省力学学会, 2006:232-235.
- [24] 宗智, 赵延杰, 邹丽. 水下爆炸结构毁伤的数值计算[M]. 北京:科学出版社, 2014.
- [25] 鲁晓兵, 郭易圆, 李世海. DEM在爆炸荷载下混凝土坝体响应的应用[C]//中国岩石力学与工程学会. 中国岩石力学与工程学会第七次学术大会论文集. 北京:中国科学技术出版社, 2002:319-321.
- [26] 鲁晓兵, 李世海, 郭易圆. 爆炸荷载下三峡三期纵向围堰响应的离散元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(2):

- 158-162. (LU Xiaobing, LI Shihai, GUO Yiyuan. DEM analysis on the third period longitudinal cofferdam of the Three Gorges under blast loading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering, 2002, 21(2):158-162. (in Chinese))
- [27] 王冰玲, 刘军. 爆炸荷载下混凝土坝溃坝过程的连续仿真[J]. 系统仿真学报, 2014, 26(1):159-162. (WANG Bingling, LIU Jun. Numerical simulation of process of concrete dam-break under explosive loading [J]. Journal of System Simulation, 2014, 26(1):159-162. (in Chinese))
- [28] 严成增, 孙冠华, 郑宏, 等. 爆炸气体驱动下岩体破裂的有限元-离散元模拟[J]. 岩土力学, 2015, 36(8):2419-2425. (YAN Chengzeng, SUN Guanhua, ZHENG Hong, et al. Simulation of explosive gas-driven rock fracture by FEM/DEM [J]. Rock & Soil Mechanics, 2015, 36(8):2419-2425. (in Chinese))
- [29] 李鸿波. 混凝土大坝各向异性脆性动力损伤问题的三维有限元程序与分析[D]. 杭州:浙江大学, 2006.
- [30] 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 Hongbo, ZHANG Wohua, CHEN Yunmin. 3D finite element analysis of anisotropic brittle dynamic damage in gravity dam under blast-impact load [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering, 2006, 25(8):1598-1605. (in Chinese))
- [31] 李鸿波, 张我华, 王亚军. 爆炸荷载下拱坝脆性动力损伤有限元分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2007, 41(1):29-33, 103. (LI Hongbo, ZHANG Wohua, WANG Yajun. Finite element analysis of brittle dynamic damage in arch dam under blast load[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2007, 41(1):29-33, 103. (in Chinese))
- [32] 顾培英, 肖仕燕, 邓昌, 等. 均匀冲击荷载作用下重力坝的损伤分析[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2015, 36(5):18-22. (GU Peiying, XIAO Shiyan, DENG Chang, et al. Damage analysis of gravity dam under uniform impact load [J]. Journal of North China University of Water Resources & Electric Power (Natural Science Edition), 2015, 36(5):18-22. (in Chinese))
- [33] 张启灵, 李端有, 李波. 水下爆炸冲击作用下重力坝的损伤发展及破坏模式[J]. 爆炸与冲击, 2012, 32(6):609-615. (ZHANG Qiling, LI Duanyou, LI Bo. Damage propagation and failure mode of gravity dam subjected to underwater explosion [J]. Explosion and Shock Waves, 2012, 32(6):609-615. (in Chinese))
- [34] 张启灵, 李端有, 李波. 常规面板堆石坝坝前水下防爆距离的确定和影响因素[J]. 振动与冲击, 2013, 32(6):78-83. (ZHANG Qiling, LI Duanyou, LI Bo. Underwater explosion protection range of conventional concrete face rockfill dam and its influencing factors [J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(6):78-83. (in Chinese))
- [35] 张启灵, 李波. 高水位运行下近水面水下爆炸对拱坝结构的影响[J]. 应用力学学报, 2013, 30(2):153-159. (ZHANG Qiling, LI Bo. Impact on arch dam with a high reservoir level experiencing a near-surface underwater explosion shock loading [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2013, 30(2):153-159. (in Chinese))
- [36] 何长江, 于志鲁, 冯其京. 高速碰撞的三维欧拉数值模拟方法[J]. 爆炸与冲击, 1999, 19(3):216-221. (HE Changjiang YU Zhilu FENG Qijing. 3D Eulerian numerical simulation method of high speed impact [J]. Explosion And Shock Waves, 1999, 19(3):216-221. (in Chinese))
- [37] 王景焘, 张德良, 刘凯欣. 基于CE/SE方法的二维Euler型多物质流体弹塑性问题计算[J]. 计算物理, 2007, 24(4):395-401. (WANG Jingtao, ZHANG Deliang, LIU Kaixin. A Eulerian approach based on CE/SE method for 2D multimaterial elastic-plastic flows[J]. Jisuan Wuli/chinese Journal of Computational Physics, 2007, 24(4):395-401. (in Chinese))
- [38] 潘超. 关于砼重力坝在爆炸冲击作用下的仿真分析[D]. 武汉:武汉大学, 2005.
- [39] 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):7-10. (LI Benping, Wang Yong, LU Wenbo. Study on the damage effect for water surface explosion of precision guided bomb [J]. Blasting, 2007, 24(4):7-10. (in Chinese))
- [40] 李本平, 卢文波. 制导炸弹水平侵彻爆炸作用下混凝土重力坝毁伤效应数值仿真[J]. 爆破, 2008, 24(1):1-5. (LI Benping, LU Wenbo. Numerical simulation for the damage of concrete gravity dam under horizontal penetration and explosion of GBU-28 [J]. Blasting, 2007, 24(1):1-5. (in Chinese))
- [41] 李本平. 制导炸弹连续打击下混凝土重力坝的破坏效应[J]. 爆炸与冲击, 2010, 30(2):220-224. (LI Benping. Damage effect of a concrete gravity dam under continuous attacks of guided bombs [J]. Explosion and Shock Waves, 2010, 30(2):220-224. (in Chinese))
- [42] 刘代志. 国家安全地球物理丛书(三):地球物理探测与应用[M]. 西安:西安地图出版社, 2007:212-221.
- [43] 张甲文, 孟会林, 卢江仁. 混凝土重力坝在侵彻及爆炸加载下的仿真分析[J]. 弹箭与制导学报, 2008, 28(3):126-130. (ZHANG Jiawen, MENG Huilin, LU Jiangren. Simulation analysis for concrete gravity dam under penetration and explosion [J]. Journal of Projectiles Rockets Missiles & Guidance, 2008, 28(3):126-130. (in Chinese))
- [44] YU Tiantang. Dynamical response simulation of concrete dam subjected to underwater contact explosion load [C]// Computer Science and Information Engineering. New York:IEEE, 2009:769-774.
- [45] 刘军, 刘汉龙, 张正珩. 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, 30(1):10-16.

- (LIU Jun, LIU Hanlong, ZHANG Zhengjun. Numerical simulation of dynamic response of an earth and rock-fill dam to a blast loading[J]. Journal of Disaster Prevention & Mitigation Engineering, 2010, 30(1):10-16. (in Chinese))
- [46] 张智超, 陈育民, 刘汉龙, 等. 孔隙水压力及炸药埋深对堤坝爆炸效应的影响分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(7):2214-2230. (ZHANG Zhichao, CHEN Yumin, LIU Hanlong, et al. Analysis of influences of pore water pressure and buried depth of explosive on blasting effect of embankments [J]. Rock & Soil Mechanics, 2012, 33(7):2214-2230. (in Chinese))
- [47] ZHU Feng, ZHU Weihua, ZHU Xiaoxi, et al. Numerical simulation of arch dam withstand underwater explosion [C]//Modeling, Identification & Control (ICMIC). New York:IEEE, 2012:1034-1039.
- [48] LINSBAUER H. Hazard potential of zones of weakness in gravity dams under impact loading conditions [J]. Frontiers of Architecture & Civil Engineering in China, 2011, 5(1):90-97.
- [49] 张社荣, 王高辉. 混凝土重力坝抗爆性能及抗爆措施研究[J]. 水利学报, 2012, 43(10):1202-1213. (ZHANG Sherong, WANG Gaohui. Study on the antiknock performance and measures of concrete gravity dam [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(10):1202-1213. (in Chinese))
- [50] 张社荣, 王高辉. 水下爆炸冲击荷载下混凝土重力坝的抗爆性能[J]. 爆炸与冲击, 2013, 33(3):255-262. (ZHANG Sherong, WANG Gaohui. Antiknock performance of concrete gravity dam subjected to underwater explosion [J]. Explosion and Shock Waves, 2013, 33(3):255-262. (in Chinese))
- [51] 张社荣, 王高辉, 王超, 等. 水下爆炸冲击荷载作用下混凝土重力坝的破坏模式[J]. 爆炸与冲击, 2012, 32(5):501-507. (ZHANG Sherong, WANG Gaohui, WANG Chao, et al. Failure mode analysis of concrete gravity dam subjected to underwater explosion [J]. Explosion and Shock Waves, 2012, 32(5):501-507. (in Chinese))
- [52] ZHANG Sherong, WANG Gaohui, WANG Chao, et al. Numerical simulation of failure modes of concrete gravity dams subjected to underwater explosion [J]. Engineering Failure Analysis, 2014, 36:49-64.
- [53] 王高辉. 极端荷载作用下混凝土重力坝的动态响应行为和损伤机理[D]. 天津:天津大学, 2014.
- [54] WANG Gaohui, ZHANG Sherong. Damage prediction of concrete gravity dams subjected to underwater explosion shock loading [J]. Engineering Failure Analysis, 2014, 39:72-91.
- [55] 王高辉, 张社荣, 卢文波, 等. 水下爆炸冲击荷载下混凝土重力坝的破坏效应[J]. 水利学报, 2015, 46(6):723-731. (WANG Gaohui, ZHANG Sherong, LU Wenbo, et al. Damage effects of concrete gravity dams subjected to underwater explosion [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(6):723-731. (in Chinese))
- [56] 张社荣, 王高辉. 浅水爆炸冲击荷载下高拱坝抗爆性能分析[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2013, 46(4):315-321. (ZHANG Sherong, WANG Gaohui. Antiknock Performance of High Arch Dam Subjected to Shallow Water Explosion [J]. Journal of Tianjin University(Science and Technology), 2013, 46(4):315-321. (in Chinese))
- [57] 张社荣, 李宏璧, 王高辉, 等. 空中和水中爆炸冲击波数值模拟的网格尺寸效应对比分析[J]. 水利学报, 2015, 46(3):298-306. (ZHANG Sherong, LI Hongbi, WANG Gaohui, et al. Comparative analysis of mesh size effects on numerical simulation of shock wave in air blast and underwater explosion [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(3):298-306. (in Chinese))
- [58] 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))
- [59] WANG Gaohui, ZHANG Sherong, YU Mao, et al. Investigation of the shock wave propagation characteristics and cavitation effects of underwater explosion near boundaries [J]. Applied Ocean Research, 2014, 46:40-53.
- [60] 王高辉, 张社荣, 卢文波. 近边界面的水下爆炸冲击波传播特性及气穴效应[J]. 水利学报, 2015, 46(8):999-1007. (WANG Gaohui, ZHANG Sherong, LU Wenbo. The influence of boundaries on the shock wave propagation characteristics and cavitation effects of underwater explosion [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(8):999-1007. (in Chinese))
- [61] 张社荣, 孔源, 王高辉. 水下和空中爆炸冲击波传播特性对比分析[J]. 振动与冲击, 2014, 33(13):148-153. (ZHANG Sherong, KONG Yuan, WANG Gaohui. Comparative analysis on propagation characteristics of shock wave induced by underwater and air explosions [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(13):148-153. (in Chinese))
- [62] 张社荣, 孔源, 王高辉. 水下和空中爆炸时混凝土重力坝动态响应对比分析[J]. 振动与冲击, 2014, 33(17):47-54. (ZHANG Sherong, KONG Yuan, WANG Gaohui. Dynamic responses of a concrete gravity dam subjected to underwater and air explosions [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(17):47-54. (in Chinese))
- [63] WANG Gaohui, ZHANG Sherong, KONG Yuan, et al. Comparative study of the dynamic response of concrete gravity dams subjected to underwater and air explosions [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2015, 29(4):1-16.
- [64] 张社荣, 杨明, 王高辉. 水下爆炸冲击下重力拱坝的破坏特性[J]. 水电能源科学, 2014, 32(7):69-73. (ZHANG Sherong, YANG Ming, WANG Gaohui. Failure characteristics of gravity arch dam subjected to underwater explosion [J]. Water Resources and Power, 2014, 32(7):69-73. (in Chinese))

[65] 杨明. 水下爆炸冲击下混凝土重力拱坝动态响应及抗爆措施研究[D]. 天津:天津大学, 2014.

[66] 朱祖国, 王高辉, 许昌, 等. 水下爆炸冲击作用下混凝土闸坝的失效模式分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2015, 13(5):36-40. (ZHU Zuguo, WANG Gaohui, XU Chang, et al. Failure mode analysis of concrete gate dams subjected to shock-loading of underwater explosion [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2015, 13(5):36-40. (in Chinese))

[67] 金亮, 王高辉, 卢文波, 等. 水下爆炸冲击荷载作用下重力拱坝及坝后式厂房的破坏效应[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(1):32-38. (JIN Liang, WANG Gaohui, LU Wenbo, et al. Damage effects of gravity arch dams and powerhouse at dam toe subjected to underwater explosion [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2016, 14(1):32-38. (in Chinese))

[68] 缪吉伦. SPH 数值模拟在水科学与工程中的应用[M]. 长春:吉林出版集团有限责任公司, 2013.

[69] 周旭, 张雄. 物质点法数值仿真<软件>系统及应用[M]. 北京:国防工业出版社, 2015.

[70] SILLING S A. Reformulation of elasticity theory for discontinuities and long-range forces [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2000, 48(1):175-209.

[71] DEMMIE P. An approach to modeling extreme loading of structures using peridynamics [J]. Journal of Mechanics of Materials and Structures, 2007, 2(10):1921-1945.

[72] 张社荣, 孔源, 王高辉, 等. 混凝土重力坝水下接触爆炸下的毁伤特性分析[J]. 水利学报, 2014, 45(9):1057-1065. (ZHANG Sherong, KONG Yuan, WANG Gaohui, et al. Damage characteristic analysis of concrete gravity dams subjected to underwater contact explosion [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(9):1057-1065. (in Chinese))

[73] 王帅. 基于 FEM/SPH 方法的水下爆炸冲击荷载作用下的混凝土重力坝破坏模式研究[D]. 天津:天津大学, 2012.



· 简 讯 ·

河海大学获国家科技进步一等奖

2017 年 1 月 9 日,2016 年度国家科学技术奖励大会在北京隆重举行。河海大学王沛芳教授主持的“生态节水型灌区建设关键技术及应用”获国家科技进步一等奖。

王沛芳教授领衔的“生态节水型灌区建设关键技术及应用”研究团队针对我国农业面源污染防治和水资源节约重大需求,创建生态节水型灌区建设理论方法体系,构建节水减污和面源防控四道防线系统,发明水肥精准施用设备、便携式水质净化器等核心技术和创新装置,开发灌区智能监控管理系统,攻克灌排系统与面源防控相耦合的关键技术瓶颈,在新技术的工艺、结构、材料和装备方面取得重大原创性突破。成果广泛应用于灌区规划设计和建设运行中,取得了重大社会经济与生态环境效益。

此外,河海大学主持的“软土地基沉降控制刚性桩复合地基新技术应用”和参与完成的“复杂水工混凝土结构服役性态诊断技术与实践”两项成果获国家技术发明二等奖。

(本刊编辑部供稿)