

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20240303001

基于LSTM的混凝土重力坝水下爆炸毁伤风险评估

霍文龙^{1,2,3}, 关靖¹, 张石磊¹

(1. 黄河勘测规划设计研究院有限公司, 河南 郑州 450003; 2. 天津大学 水利工程智能建设与运维全国重点实验室, 天津 300350; 3. 天津大学建筑工程学院, 天津 300350)

摘要: 为了提高混凝土重力坝的抗爆性能确保其安全运行, 利用风险评估理论考虑爆炸载荷及坝体材料参数的不确定性, 提出了基于长短期记忆网络(Long-Short Term Memory, LSTM)的混凝土重力坝爆炸毁伤风险评估模型。选取裂缝贯穿度作为评价指标定量计算了不同爆炸场景下混凝土重力坝的风险失效概率, 基于大坝发生轻微损伤的风险概率确定了安全防护距离, 研究了浅水爆炸及深水爆炸对混凝土重力坝爆炸毁伤风险的影响, 并进行了敏感性分析识别了关键变量。研究表明: 混凝土重力坝的爆炸毁伤风险与爆炸荷载及坝体材料参数的不确定性密切相关; TNT炸药当量一定时, 随起爆距离的增加, 混凝土重力坝的爆炸毁伤风险降低; 随着起爆深度的增加, 坝顶发生严重破坏的概率降低, 坝基发生严重破坏的概率增大; TNT炸药当量是影响混凝土重力坝爆炸毁伤风险的关键变量。该研究为混凝土重力坝的水下爆炸风险评估及特殊时期抗爆措施的制定提供了依据。

关键词: 混凝土重力坝; 水下爆炸; 风险评估; 长短期记忆网络; 安全防护距离

中图分类号: TV312 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)05-1241-09

Risk Assessment of Underwater Explosion-induced Damage of Concrete Gravity Dams Based on LSTM

HUO Wenlong^{1,2,3}, GUAN Jing¹, ZHANG Shilei¹

(1. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China;

2. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Intelligent Construction and Operation, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 3. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: To enhance the blast resistance of concrete gravity dams and ensure their safe operation, a risk assessment model for explosion-induced damage of concrete gravity dams based on long-short term memory (LSTM) was proposed, considering the uncertainties of explosion loads and dam material parameters using risk assessment theory. The crack penetration depth was selected as the evaluation indicator to quantitatively calculate the risk failure probability of concrete gravity dams under different explosion scenarios. The safety protection distance was determined based on the risk probability of minor damage of the dam. The influence of shallow-water and deep-water explosions on the explosion-induced damage risk of concrete gravity dams was investigated, and a sensitivity analysis was conducted

* 收稿日期: 2024-03-03; 修回日期: 2024-07-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(52109163)、国家重点研发计划(2023YFC3011404)资助

作者简介: 霍文龙(1993—), 男, 博士研究生。主要从事混凝土坝抗爆研究。E-mail: hwl@tju.edu.cn

to identify key variables. The results showed that the explosion-induced damage risk of concrete gravity dams was closely related to the uncertainties of explosion loads and dam material parameters. When the TNT equivalent was constant, the explosion-induced damage risk of concrete gravity dams decreased with increasing detonation distance. As the detonation depth increased, the probability of severe damage at the dam crest decreased, while that at the dam foundation increased. The TNT equivalent was identified as a key variable affecting the probability of explosion-induced damage risk of concrete gravity dams. This study provides a basis for the risk assessment of underwater explosions of concrete gravity dams and the development of blast resistance measures during special periods.

Keywords: concrete gravity dam; underwater explosion; risk assessment; long short-term memory network; safety protection distance

0 引言

当前世界范围内的军事冲突、意外爆炸、恐怖袭击不断发生,混凝土重力坝等水工大坝作为保障社会发展的重要基础设施,一旦受袭溃坝后果不堪设想^[1-2]。因此,开展混凝土重力坝爆炸毁伤风险评估研究对提高其抗爆性能,保证大坝及下游人民生命财产安全意义重大^[3]。

目前学者们针对混凝土坝风险方面开展了一定的研究。李宗樾等^[4]利用洪水概率序列定量评估了混凝土坝洪水漫顶的生命风险大小。梁辉等^[5]通过建立地震风险模型评估了高拱坝结构的地震风险,为高拱坝的抗震风险决策提供参考。焦姣等^[6]采用综合烈度作为地震破坏指标,建立了混凝土大坝震害评估模型,评估了黄河上游混凝土坝的震害风险。A.G. Luis等^[7]利用蒙特卡洛法定量评估了混凝土重力坝的滑动失稳风险。姜彦作等^[8]基于优化的最小二乘支持向量机法评估了混凝土坝的服役风险,得到了其风险失效概率。李宗坤等^[9]识别了混凝土坝的主要风险源,利用动态贝叶斯网络评估了混凝土坝的失效风险,得到了其动态失事概率。L. Pei等^[10]基于蒙特卡洛和贝叶斯网络法研究了重力坝发生强度破坏和失稳破坏的风险大小。陈健云等^[11]利用概率密度演化方法研究了地震荷载作用下混凝土坝的动力可靠度随时间变化的规律。X. Lu等^[12]考虑重力坝漫顶、地基稳定性和结构失效等因素,提出了一种基于贝叶斯网络和蒙特卡洛模拟的坝基系统概率风险分析方法用于更准确地评估重力坝系统风险。上述混凝土坝风险研究主要针对洪水漫顶、地震、失稳破坏等风险,对于混凝土坝的抗爆风险研究鲜有关注。此外,爆炸荷

载作用下混凝土重力坝的失效数据缺乏,再加上爆炸荷载及大坝材料参数的不确定性,其失效模式复杂多变,风险评估难度大。传统的蒙特卡洛法、支持向量机法等用于混凝土重力坝抗爆风险评估存在计算难度大、计算参数较难确定等问题^[13-15]。

长短期记忆网络(LSTM)的提出可有效解决上述方法的局限性。LSTM作为一种深度学习算法,具备多维时空数据的建模学习能力,在处理大数据和非线性数据时可以在不同层进行自学习,准确模拟随机变量和混凝土坝结构响应之间复杂的非线性关系^[16]。此外,随着随机变量的增加,LSTM能够自行调参,提高风险评估的效率和精度,具有较强的鲁棒性和数据特征提取能力^[17-18]。目前,LSTM在计算机、医疗、金融等领域有所应用,但是在混凝土坝的风险评估领域应用较少。

本文以某混凝土重力坝为研究对象,考虑了爆炸荷载及大坝材料参数的不确定性,采用LS-DYNA软件建立了基于LSTM的混凝土重力坝水下爆炸风险评估模型,确定了其在不同爆炸场景下的风险失效概率和安全防护距离,研究了起爆深度对其爆炸毁伤风险的影响,并通过敏感性分析识别了影响混凝土重力坝水下爆炸毁伤风险概率的关键变量,为特殊时期混凝土重力坝的抗爆措施制定提供参考。

1 长短期记忆网络(LSTM)

LSTM是由S. Hochreiter等^[19]提出的一种具有长时间记忆功能的神经网络。作为一种改进的递归神经网络(Recurrent Neural Networks, RNN),LSTM利用特殊的记忆神经元保存关键数据特征信息的同时过滤掉非重要信息,可避免计算过程中

出现梯度爆炸、梯度消失等问题^[20-21]。LSTM在隐含层内部加入输入门、输出门、遗忘门,并增加了用于存储记忆的单元,其内部结构如图1所示。

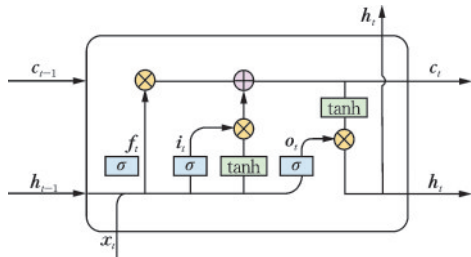


图1 LSTM内部结构示意图
Fig.1 Internal structure of LSTM

LSTM的记忆神经元利用控制门储存重要信息,LSTM基本步骤如下^[22]:

(1)输入信息 h_{t-1} 和 x_t ,通过遗忘门舍弃无用的信息:

$$f_t = \sigma(W_f \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_f) \quad (1)$$

(2)输入信息 h_{t-1} 和 x_t 利用输入门确定能通过的信息:

$$i_t = \sigma(W_i \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_i) \quad (2)$$

(3)利用遗忘门及输入门更新旧的细胞状态 C_{t-1} :

$$C_t = f_t * C_{t-1} + i_t * \tanh(W_c \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_c) \quad (3)$$

(4)利用输出门确定需要输出的信息,并利用 tanh层规范化,输出 h_t :

$$O_t = \sigma(W_o \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_o) \quad (4)$$

$$h_t = O_t * \tanh(C_t) \quad (5)$$

式中, f_t, i_t, O_t 分别表示为遗忘门、输入门、输出门; W, b 分别代表权重矩阵和偏置项; C_{t-1}, h_{t-1} 为上一时刻的细胞状态和输出; x_t 为输入向量; C_t, h_t 为当前时刻的细胞状态和输出; σ 表示 sigmoid 激活函数。

2 混凝土重力坝水下爆炸毁伤风险评估流程

基于LSTM的混凝土重力坝水下爆炸毁伤风险评估流程如图2所示,详细步骤如下:

(1)选取随机变量并获取随机样本组合。针对爆炸荷载的不确定性,主要选取TNT炸药当量为随机变量。针对重力坝材料参数的随机性,主要选取混凝土的弹性模量及抗压强度作为随机变量。

依据各随机变量的统计参数(均值、标准差、变异系数等)进行蒙特卡洛抽样生成随机样本。

(2)建立水下爆炸“坝基-大坝-库水-炸药-空气”全耦合数值模型。依据混凝土重力坝的坝顶高程、坝底高程、坝底宽度等几何尺寸,以及上游水位等参数,建立混凝土重力坝全耦合数值模型,并进行网格划分,边界条件施加,计算不同爆炸场景下混凝土重力坝坝顶及坝基的裂缝贯穿度。

(3)建立并优化LSTM风险评估模型。将随机变量TNT炸药当量、混凝土的弹性模量及抗压强度、混凝土重力坝坝顶及坝基的裂缝贯穿度作为LSTM模型的训练样本,不断训练学习,得到优化后的LSTM模型。

(4)评估混凝土重力坝的爆炸毁伤风险。利用优化后的LSTM模型,定量计算混凝土坝不同爆炸损伤等级的失效概率。依据相关文献^[23-24],本文选取坝顶及坝基的裂缝贯穿度作为评价指标,将混凝土

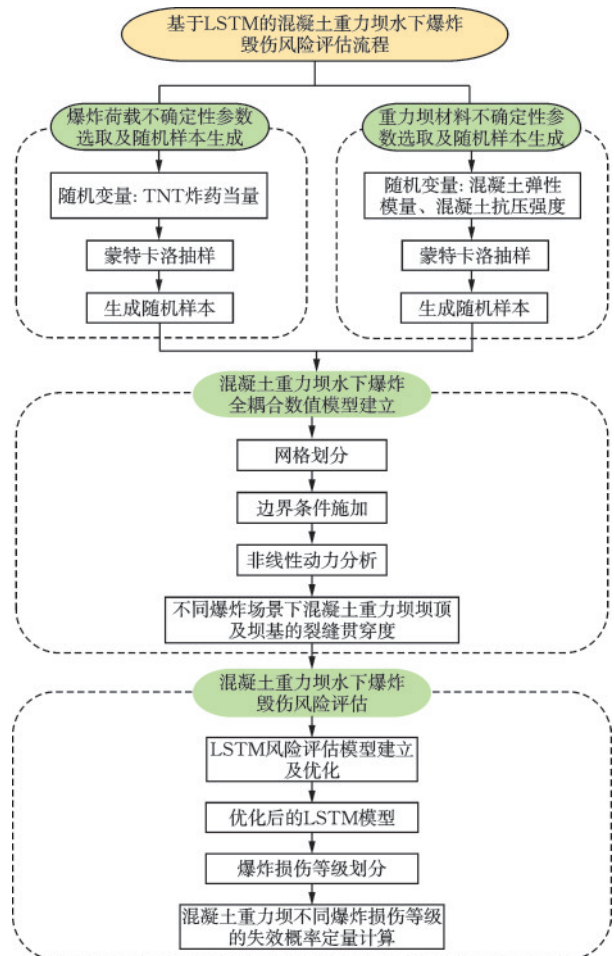


图2 基于LSTM的混凝土重力坝爆炸毁伤风险评估流程
Fig.2 Risk assessment process for explosion-induced damage of concrete gravity dams based on LSTM

土坝的爆炸损伤等级划分为3等,如表1所示。数值模拟中混凝土开裂行为的判定:当计算结果的单元损伤因子大于0.75时,认为该区域出现宏观损伤;当单元损伤因子大于0.99时,则认为该部位出现了贯穿性破坏,混凝土板出现大量宏观裂缝损伤区域^[25]。

表1 混凝土重力坝爆炸损伤分级标准

Table1 Classification criteria for explosion-induced damage of concrete gravity dams

损伤状态	描述
轻微破坏	坝顶或坝基裂缝贯穿度小于1/3,大坝不发生失效,仍可发挥正常挡水功能
中等破坏	坝顶或坝基裂缝贯穿度介于1/3~2/3,大坝挡水功能降低但仍处于可修复范围内
严重破坏	坝顶或坝基裂缝贯穿度大于2/3,大坝无法发挥挡水功能,需立即采取改造措施

3 工程实例

3.1 全耦合数值模型建立

以国内某混凝土重力坝单坝段为研究对象,开展混凝土重力坝水下爆炸毁伤风险评估。选取坝段的坝高为79.5 m,顶宽为11.1 m,底宽为57.6 m,坝段厚度为15 m,上游水深为73.5 m。为了提高计算效率,选取坝段对称平面的一侧为研究对象,沿坝轴线厚度取7.5 m,模型底部沿水平和垂直方向各延长20 m,模型包括大坝、基岩、TNT炸药、库水和空气,考虑坝体自重,建立全耦合有限元模型,如图3所示。对模型中的空气、水和TNT炸药采用Eulerian网格,坝基和大坝采用Lagrangian网格。TNT炸药形状为立方体,网格尺寸为100 mm^[26],远离TNT的网格逐渐增大;大坝上部单元尺寸为300 mm,沿坝底方向逐渐增大,全耦合模型共893 988个单元。在基岩底部截断处施加全约束边界,在对称平面施加对称边界,截断面设置为非反射边界条件。

混凝土采用CSC模型描述^[27-28],抗压强度为30 MPa;CSC模型可以通过有效塑性应变确定损伤位置及损伤级别,损伤级别的范围从0到1,表示材料从无损坏到完全损坏。基岩采用HJC模型描述^[29],抗压强度为150 MPa;TNT炸药采用炸药模型和JWL状态方程描述^[29],参数为: $\rho_0=$

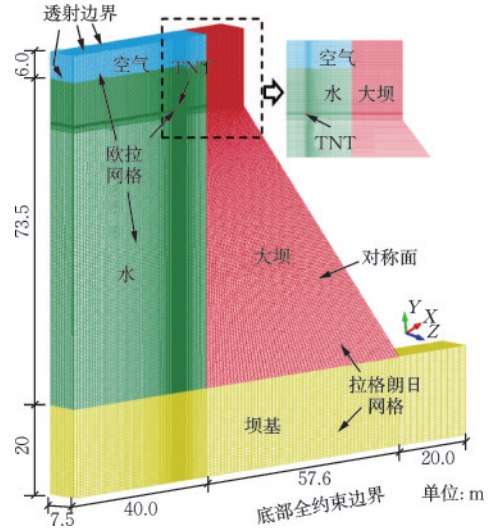


图3 混凝土重力坝全耦合有限元模型

Fig.3 Fully coupled finite element model of concrete gravity dam

$1\ 630\ \text{kg/m}^3$, $D=6\ 950\ \text{m/s}$, $P_{c-j}=21\ \text{GPa}$, $A=373\ \text{GPa}$, $B=3.74\ \text{GPa}$, $R_1=4.15$, $R_2=0.9$, $w=0.35$, $E_0=7\ \text{GJ/m}^3$, $V_0=1.00$;库水采用Mat_Null和Gruneisen状态方程描述^[29],参数为: $\rho_0=1\ 025\ \text{kg/m}^3$, $C=1\ 480\ \text{m/s}$, $a=0$, $S_1=2.56$, $S_2=1.986$, $S_3=1.226\ 8$, $\gamma_0=0.35$, $E=1.89\ \text{MJ/m}^3$;气采用Mat_Null和线性多项式方程描述^[29],参数为: $\rho_0=1.293\ \text{kg/m}^3$, $C_0=C_1=C_2=C_3=C_6=0$, $C_4=C_5=0.401$, $V_0=1.0$, $E=0.25\ \text{MJ/m}^3$ 。

3.2 随机变量选取

本文选取爆炸载荷和重力坝材料参数作为随机变量。爆炸荷载主要选取TNT炸药当量为随机变量,坝体材料主要选取混凝土的弹性模量及抗压强度作为随机变量^[30]。各随机变量的统计特征^[8,31]见表2。

表2 随机变量统计特征

Table 2 Statistical characteristics of random variables

参数	均值/MPa	变异系数	分布
TNT炸药当量 W	—	0.1	正态
混凝土弹性模量 E	2.8×10^4	0.1	正态
混凝土抗压强度 f_u	30.3	0.206	正态

3.3 水下爆炸毁伤风险评估

依据表2中各随机变量的统计特征进行蒙特卡洛抽样生成随机样本,并采用图3中的混凝土重力

坝全耦合有限元模型计算不同爆炸场景下坝顶及坝基的裂缝贯穿度,全耦合有限元模型的合理性已得到验证^[29]。不同的爆炸场景见表3,其中TNT炸药当量用 W 表示,爆炸位置到上游坝面的水平距离用起爆距离 R 表示,爆炸位置到水面的竖直距离用起爆深度 D 表示, $D=10\text{ m}$ 。

表3 爆炸场景

TNT炸药当量 W/kg	起爆距离 R/m			
250	10	15	20	25
500	10	20	25	30
750	10	25	30	35
1 000	10	30	35	40

为了验证LSTM方法用于混凝土坝爆炸毁伤风险评估的合理性,分别利用蒙特卡洛和LSTM方法计算 $W=250\text{ kg}$ 、 $R=15\text{ m}$ 时混凝土坝坝顶发生轻微破坏、中等破坏及严重破坏的失效概率,对比结果如表4所示。由表4可知,LSTM迭代90次左右计算结果即可收敛,与蒙特卡洛法迭代计算1 000次的结果相近,相对误差均小于8%。由此可知,LSTM所需样本数远小于蒙特卡洛法,极大简化了计算过程,提高了混凝土坝爆炸毁伤风险评估的效率,同时验证了LSTM方法的可靠性和合理性。

表4 不同方法的失效概率计算结果对比

Table 4 Comparison of failure probability calculation results using different methods

方法	坝顶失效概率			抽样次数
	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	
蒙特卡洛	0.36	0.50	0.14	1 000 ^[30]
LSTM	0.34	0.51	0.15	90

基于LSTM风险评估模型计算得到不同爆炸场景下混凝土坝坝顶发生轻微破坏、中等破坏及严重破坏的失效概率如图4所示。由图4可知,当 $W=250\text{ kg}$ 、 $R=10\text{ m}$ 时,混凝土坝坝顶发生严重破坏的风险较大,失效概率高达0.85; $R=15\text{ m}$ 时,坝顶主要发生中等破坏; $R=20\text{ m}$ 、 $R=25\text{ m}$ 时,坝顶发生轻微破坏的失效概率分别为0.89、0.98。当TNT炸药当量分别为 $W=500\text{ kg}$ 、 $W=750\text{ kg}$ 、 $W=1000\text{ kg}$ 、 $R=10\text{ m}$ 时,坝顶主要发生严重破坏,失效概率随着炸药当量增加逐渐变大,其他几种起爆距离下,坝体主要发生轻微破坏。

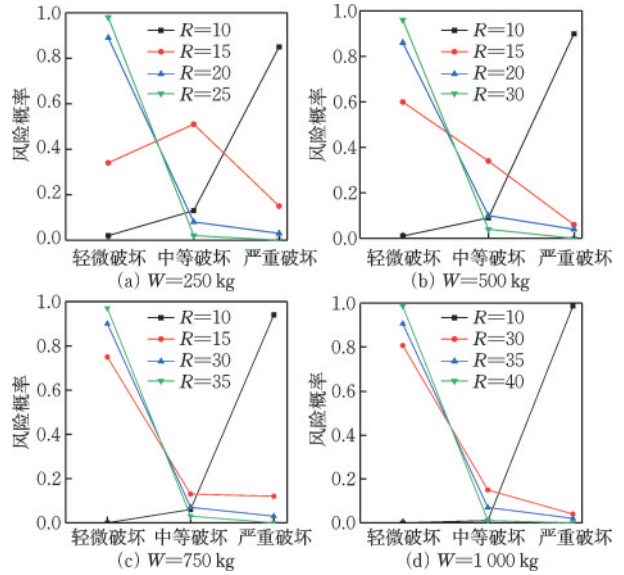


图4 不同爆炸场景下混凝土坝坝顶风险概率

Fig.4 Risk probabilities of concrete dam crest under different explosion scenarios

综上所述,当起爆深度 $D=10\text{ m}$ 发生浅水爆炸,TNT炸药当量一定时,随着起爆距离 R 的增加,混凝土坝坝顶发生轻微破坏的概率增大,发生严重破坏的概率降低,同时爆炸毁伤风险等级降低。结果表明混凝土坝的爆炸毁伤风险与爆炸荷载及坝体材料参数的不确定性密切相关。

不同爆炸场景下混凝土坝坝基发生轻微破坏、中等破坏及严重破坏的失效概率如图5所示。由图5可知,当 $W=250\text{ kg}$ 时,不同起爆距离下坝基主要发生轻微破坏。当 $W=500\text{ kg}$ 、 $R=10\text{ m}$ 时,坝基发生中等破坏的概率较大,其他起爆距离下爆炸

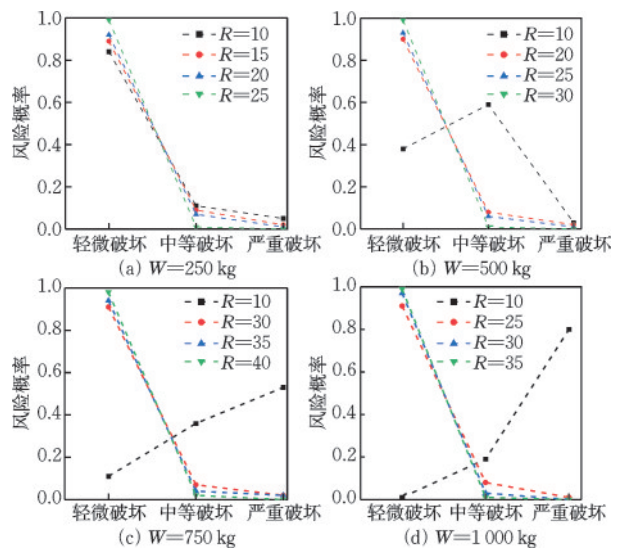


图5 不同爆炸场景下混凝土坝坝基风险概率

Fig.5 Risk probabilities of concrete dam foundation under different explosion scenarios

毁伤等级主要以轻微破坏为主。当 $W=750\text{ kg}$ 、 $W=1\ 000\text{ kg}$ 、 $R=10\text{ m}$ 时,坝基发生严重破坏的风险较大,其他几种起爆距离下坝基主要发生轻微破坏。综上所述,混凝土坝坝基风险变化规律与坝顶风险变化规律相似,炸药当量不变时,随起爆距离增大,坝基的爆炸毁伤风险等级降低,发生轻微破坏的概率增大,发生严重破坏的概率逐渐减小。

3.4 安全防护距离确定

依据图4和图5可知,对于恒定的TNT炸药当量,增加起爆距离对降低混凝土坝坝顶及坝基的失效概率有显著影响。因此,可通过增大起爆距离保护大坝免受恐怖爆炸的影响,从而降低大坝的失效风险确保其安全。本文将混凝土坝坝顶及坝基发生轻微损伤的概率为90%时对应的水平距离称为安全防护距离,该距离是爆炸位置与大坝上游面间的最小安全距离,此时大坝发生中等及严重破坏的概率小于10%。依据图4和图5绘制不同爆炸场景下坝顶和坝基发生轻微破坏对应的安全防护距离,如图6所示。由图6可知,对于不同TNT炸药当量,坝顶及坝基发生轻微破坏的风险概率随起爆距

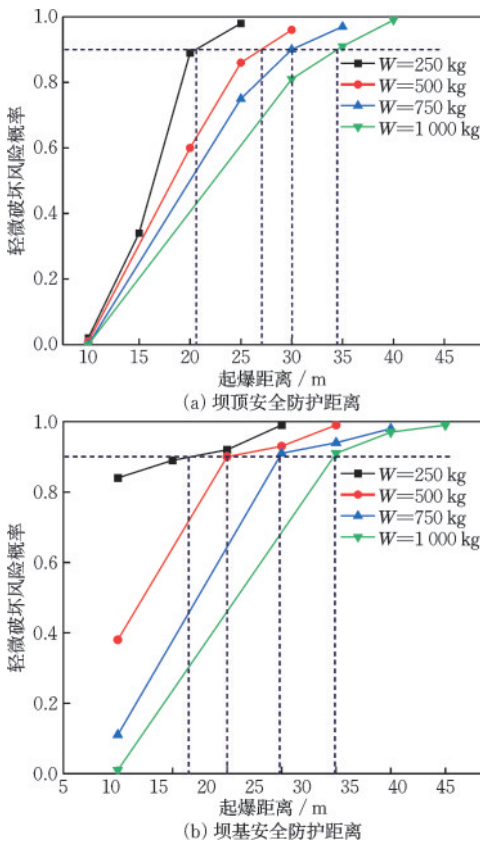


图6 混凝土坝坝顶及坝基的安全防护距离

Fig.6 Safety protection distances of concrete dam crest and foundation

离的增加逐渐增大;TNT炸药当量分别为250、500、750、1 000 kg时坝顶对应的安全防护距离分别为21、27、30、34 m,坝基对应的安全防护距离分别为17、20、25、30 m。

3.5 起爆深度对爆炸毁伤风险的影响

研究不同起爆深度 D 对混凝土坝坝顶及坝基爆炸毁伤失效概率的影响。当TNT炸药当量 $W=500\text{ kg}$,起爆距离 $R=10\text{ m}$,起爆深度分别为 $D=10、65\text{ m}$ 时,不同爆炸毁伤等级的风险概率对比如图7所示。

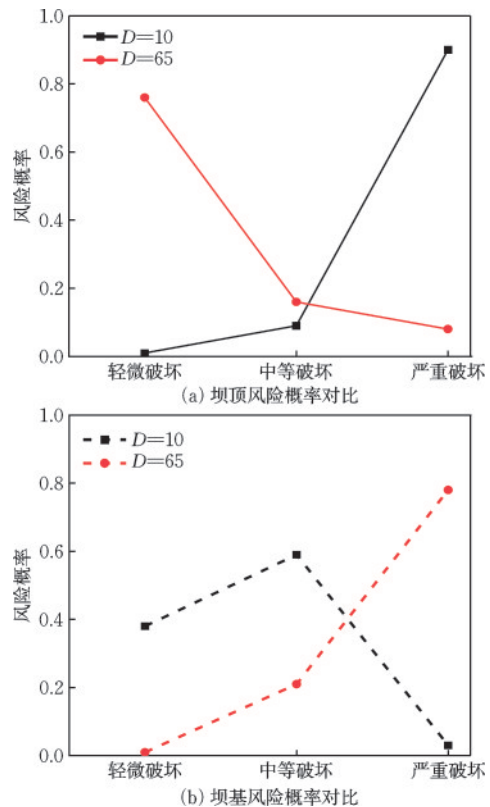


图7 不同起爆深度下混凝土坝的风险概率对比

Fig.7 Comparison of risk probabilities of concrete dam under different detonation depths

由图7可知,起爆深度对混凝土坝坝顶及坝基的爆炸毁伤风险概率有显著影响;随着起爆深度的增加,坝顶发生轻微破坏的概率增加,发生严重破坏的概率减小,这是由于 $D=10\text{ m}$ 时,在爆炸冲击波的作用下大坝上游面产生成坑破坏和冲切破坏,爆炸释放的能量集中在坝体上部,坝体内的透射波在坝头下游折坡处形成反射拉伸波产生拉伸破坏,坝顶破坏程度较为严重,与此同时,爆炸冲击波在上游水域产生推力导致大坝整体向下游弯曲,在上游坝面产生弯曲破坏及坝基面的拉伸破坏,坝基面

裂缝较小,如图 8(a)所示。随着起爆深度的增加,坝基发生严重破坏的概率增大,这是由于 $D=65\text{ m}$ 时,爆炸源接近坝踵,坝踵附近产生冲切破坏和沿坝基面的拉伸破坏,坝基面破坏程度较为严重,由于爆炸源远离坝顶,冲击能量在传播至坝顶的过程中发生大量衰减,坝顶下游折坡处拉伸破坏程度减小,如图 8(b)所示。

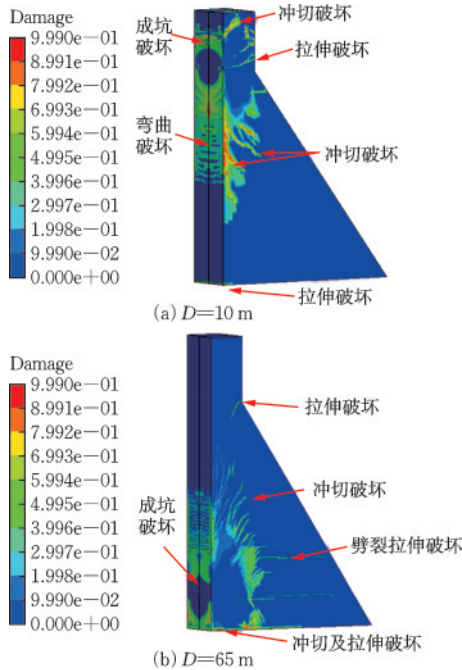


图 8 不同起爆深度下混凝土坝的破坏模式

Fig.8 Failure modes of concrete dam under different detonation depths

3.6 敏感性分析

进行敏感性分析,探究 TNT 炸药当量 W 、混凝土的弹性模量 E 及抗压强度 f_u 等随机变量的变化对混凝土坝爆炸毁伤风险概率的影响,确定关键变量,为提高混凝土坝的抗爆性能提供依据。采用控制变量法保持初始模型中所有随机变量的统计特征(均值、变异系数、分布)不变,将其中一个随机变量的平均值改变(新平均值=旧平均值+ $1.0\times$ 标准差),其余随机变量保持不变。以混凝土坝坝顶为例,得到 $W=500\text{ kg}$ 、 $R=10\text{ m}$ 、 $D=10\text{ m}$ 时其爆炸毁伤风险概率随各随机变量的变化曲线如图 9 所示,表 5 中给出了各随机变量对应的爆炸毁伤风险相对于原始曲线的概率变化。由图 9 和表 5 可知,混凝土坝坝顶的爆炸毁伤风险概率对 TNT 炸药当量的敏感性最高,对混凝土弹性模量的敏感性最低。因此,TNT 炸药当量是影响混凝土坝爆炸毁伤风险概率的关键变量。

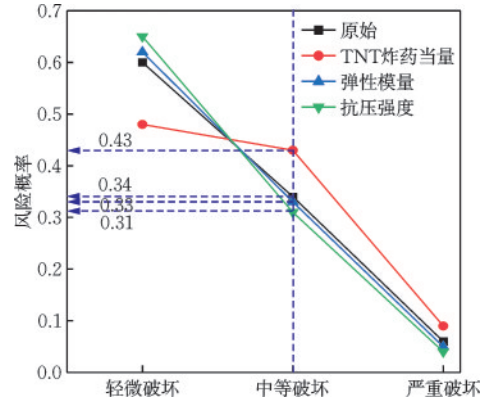


图 9 随机变量敏感性分析曲线

Fig.9 Sensitivity analysis curves of random variables

表 5 敏感性分析计算表

Table 5 Calculation results of sensitivity analysis

随机变量	风险概率	变化率/%
TNT 炸药当量 W	0.43	26.47
混凝土弹性模量 E	0.33	-2.94
混凝土抗压强度 f_u	0.31	-8.82

注:变化率= $[(\text{随机变量风险概率}-\text{原始风险概率})/\text{原始风险概率}]\times 100\%$

3.7 风险控制建议

合理的风险控制措施能够有效降低混凝土重力坝的爆炸毁伤风险。在关键时期,可结合大坝的安全防护距离及其毁伤模式,制定大坝的风险控制措施。在设计建造时期,针对坝顶及坝基等抗爆薄弱部位,可在局部预设高强钢筋以限制裂缝的发展,提高关键部位的弹性模量及抗压强度。对于既有混凝土重力坝,可在其上游增设泡沫铝板或多孔混凝土用于吸收爆炸产生的冲击能量,从而削弱作用在大坝上的爆炸冲击荷载,降低大坝的爆炸毁伤,提高大坝的抗爆性能。

4 结论

考虑爆炸荷载及坝体材料参数的不确定性,建立了基于 LSTM 的混凝土重力坝水下爆炸毁伤风险评估模型,并验证了其可靠性和合理性。通过工程实例应用,确定了不同爆炸场景下混凝土坝的风险失效概率,得到如下结论:

(1) 对于恒定的 TNT 炸药当量,增加起爆距离对降低混凝土坝坝顶及坝基的失效概率有显著影响;随起爆距离的增加,混凝土坝坝顶及坝基发生轻微破坏的概率增大,发生严重破坏的概率降低,

混凝土坝的爆炸毁伤风险降低。

(2) 基于混凝土重力坝发生轻微损伤的风险概率确定了安全防护距离;当 TNT 炸药当量分别为 250、500、750、1 000 kg 时坝顶对应的安全防护距离分别为 21、27、30、34 m, 坝基对应的安全防护距离分别为 17、20、25、30 m。

(3) 起爆深度对混凝土坝的爆炸毁伤风险概率影响较大;随着起爆深度的增加, 坝顶发生严重破坏的概率减小, 坝基发生严重破坏的概率增大;发生浅水爆炸时, 爆炸源接近坝顶, 大坝上部产生坑破坏和冲切破坏, 爆炸释放的能量集中在坝体上部, 坝顶破坏程度较为严重;发生深水爆炸时, 爆炸源接近坝踵, 坝踵附近产生冲切破坏和沿坝基面的拉伸破坏, 坝基面破坏程度较为严重。

(4) 混凝土坝的爆炸毁伤风险概率对 TNT 炸药当量的敏感性最高, TNT 炸药当量是影响混凝土坝水下爆炸毁伤风险的关键变量。并根据敏感性分析给出了爆炸毁伤风险控制建议。

参考文献:

- [1] 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, 30(1): 10-16.
Liu J, Liu H, Zhang Z. 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. (in Chinese)
- [2] 韩华焯, 王高辉, 卢文波, 等. 水下多弹爆炸打击下混凝土重力坝的累积毁伤效应研究[J]. 振动与冲击, 2022, 41(13): 172-179.
Han H Y, Wang G H, Lu W B, et al. Cumulative damage effect of concrete gravity dam under underwater multi-bomb explosion[J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(13): 172-179. (in Chinese)
- [3] 孔宪京, 陈健云, 邹德高. 高坝抗震安全理论发展趋势研究[J]. 水力发电学报, 2020, 39(7): 1-11.
Kong X J, Chen J Y, Zhou D G. Study on development trend of seismic safety theory for high dams[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2020, 39(7): 1-11. (in Chinese)
- [4] 李宗越, 余雷, 胡泽林, 等. 混凝土坝洪水漫顶生命风险评价[J]. 水利水运工程学报, 2022, (2): 85-91.
Li Z Y, Yu L, Hu Z L, et al. Assessment of life risk due to flood overtopping of concrete dam[J]. Hydro-Science and Engineering, 2022, (2): 85-91. (in Chinese)
- [5] 梁辉, 赵文光, 郭胜山, 等. 高拱坝-地基体系整体稳定概率地震风险分析[J]. 水利学报, 2021, 52(3): 310-322.
Liang H, Zhao W G, Guo S S, et al. Probabilistic seismic risk analysis of overall stability of high arch dam foundation systems[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(3): 310-322. (in Chinese)
- [6] 焦姣, 郭安宁, 王兰民, 等. 混凝土大坝震害评估模型的研究及对黄河上游大坝的分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2012, 32(3): 318-325.
Jiao J, Guo A N, Wang L M, et al. Study on the evaluation of earthquake damage to concrete dams in the upper reaches of the Yellow River[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2012, 32(3): 318-325. (in Chinese)
- [7] Altarejos-Garcia Luis, Escuder-Bueno I, Serrano-Lombillo A, et al. Methodology for estimating the probability of failure by sliding in concrete gravity dams in the context of risk analysis[J]. Structural Safety, 2012, 36-37: 1-13.
- [8] 姜彦作, 苗君, 董庆焯, 等. 混凝土坝风险失效概率的 SAGA-LSSVM 分析方法[J]. 水电与抽水蓄能, 2023, 9(3): 33-39.
Jiang Y Z, Miao J, Dong Q X, et al. SAGA-LSSVM analysis method for risk failure probability of concrete dam[J]. Hydropower and Pumped Storage, 2023, 9(3): 33-39. (in Chinese)
- [9] 李宗坤, 王特, 葛巍, 等. 基于动态贝叶斯网络的混凝土坝失事风险分析[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(5): 137-143.
Li Z K, Wang T, Ge W, et al. Risk analysis of concrete dam breach based on dynamic bayesian network [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2021, 38(5): 137-143. (in Chinese)
- [10] Pei L, Chen C, He K, et al. System reliability of a gravity dam-foundation system using Bayesian networks [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2022, 218: 108178.
- [11] 陈健云, 贾启彬, 徐强. 地震作用下混凝土坝时变动力可靠度的概率密度演化方法研究[J]. 水利学报, 2017, 48(11): 1348-1354.
Chen J Y, Jiang Q B, Xu Q. Study on probability density evolution method for time-dependent dynamic reliability of concrete dams subjected to earthquake[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(11): 1348-1354. (in Chinese)
- [12] Lu X, Chen C, Li Z, et al. Bayesian network safety risk analysis for the dam-foundation system using Monte Carlo simulation[J]. Applied Soft Computing, 2022, 126: 109229.
- [13] 陈思思. 基于系统可用度的土石坝洪水漫顶风险分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
Chen S S. Overtopping risk analysis of earth-rock dam

- based on system availability[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009. (in Chinese)
- [14] 李平, 黄跃飞, 于海莹, 等. 考虑滑坡堵江坝溃决影响的水库溃坝风险[J]. 水力发电学报, 2019, 38(9): 56-63.
Li P, Huang Y F, Yu H Y, et al. Dam break risk of reservoir under impact of landslide dam break floods[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2019, 38(9): 56-63. (in Chinese)
- [15] 陈聪聪. 尾矿库溃坝风险评估与预控方法研究及应用[D]. 北京: 北京科技大学, 2023.
Chen C C. Research and application of risk assessment and risk reduction for tailings dam failure[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2023. (in Chinese)
- [16] 满轲, 武立文, 刘晓丽, 等. 基于CNN-LSTM模型的TBM隧道掘进参数及岩爆等级预测[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(增2): 21-37.
Man K, Wu L W, Liu X L, et al. The prediction of TBM tunnel boring parameters and rock burst grade based on CNN-LSTM model[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(Sup2): 21-37. (in Chinese)
- [17] 丁紫玉, 方国华, 毛莺池, 等. 考虑发电、弃水风险的梯级水电站风险预控方法研究[J/OL]. 水资源保护, 1-11 [2025-09-12]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1356.TV.20230919.1215.002>.
Ding Z Y, Fang G H, Mao Y C, et al. Research on risk control methods for cascade hydropower station reservoirs considering power generation and water spillage risks[J/OL]. Water Resources Protection, 1-11[2025-09-12]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1356.TV.20230919.1215.002>. (in Chinese)
- [18] 崔震, 郭生练, 汪芸, 等. 三峡入库洪水概率预报的深度学习模型[J]. 水力发电学报, 2023, 42(4): 1-10.
Cui Z, Guo S L, Wang Y, et al. Deep learning model for probability forecasting of flood to Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2023, 42(4): 1-10. (in Chinese)
- [19] Hochreiter S, Schmidhuber J. Long Short-Term Memory[J]. Neural Computation, 1997, 9(8): 1735-1780.
- [20] 关涛, 陈普瑞, 于浩. 高拱坝施工仿真参数ARIMA-LSTM时序概率预测方法[J]. 水力发电学报, 2023, 42(11): 146-156.
Guan T, Chen P R, Yu H. ARIMA-LSTM time series probability prediction method for simulation parameters of high arch dam construction[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2023, 42(11): 146-156. (in Chinese)
- [21] 陈颖, 马刚, 周伟, 等. 深度学习提取时空特征的堆石坝变形预测模型[J]. 水力发电学报, 2023, 42(5): 120-132.
Chen Y, Ma G, Zhou W, et al. Rockfill dam deformation prediction model based on deep learning-extracted spatiotemporal features[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2023, 42(5): 120-132. (in Chinese)
- [22] Karasu S, Altan A. Crude oil time series prediction model based on LSTM network with chaotic henry gas solubility optimization[J]. Energy, 2022, 242: 122964.
- [23] 魏培勇. 全级配碾压混凝土动态本构模型及重力坝抗爆风险评估研究[D]. 天津: 天津大学, 2021.
Wei P Y. Study on dynamic constitutive model of fully-graded roller-compacted concrete and anti-knock risk assessment of gravity dams[D]. Tianjin: Tianjin University, 2021. (in Chinese)
- [24] 刘晓蓬. 爆炸荷载和地震作用下混凝土坝动力破坏及防护措施研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
Liu X P. Research on dynamic damage and protective measures of concrete dam under explosive load and earthquake[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [25] Chung Y S, Meyer C, Shinozuka M. Modeling of concrete damage[J]. Structural Journal, 1989, 86(3): 259-271.
- [26] Zhang S, Wang G, Wang C, et al. Numerical simulation of failure modes of concrete gravity dams subjected to underwater explosion[J]. Engineering Failure Analysis, 2014, 36: 49-64.
- [27] Corporation LST. LS-DYNA Keyword User's Manual [M]. CA, USA: Livermore Software Technology Corporation; Livermore, 2006.
- [28] Wang C, Wei P, Wang X, et al. Blast-resistance and damage evaluation of concrete gravity dam exposed to underwater explosion: Considering the initial stress field [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2021, 25(8): 2922-2935.
- [29] Huo W. Blast-Resistance and Damage Behavior of Underwater Explosion for Concrete Gravity Dam Considering Concrete Strength Partition[J]. Buildings, 2023, 13(9): 2237.
- [30] Hadianfard M A, Malekpour S, Momeni M. Reliability analysis of H-section steel columns under blast loading [J]. Structural Safety, 2018, 75: 45-56.
- [31] 张学杰. 爆炸荷载作用下FRP加固钢筋混凝土柱动态响应精细化分析及损伤评估方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2020.
Zhang X J. Research on Methods for Refined Dynamic Response Analysis and Damage Assessment of FRP Strengthened RC Columns Subjected to Blast Loading [D]. Tianjin: Tianjin University, 2020. (in Chinese)

(本文编辑: 苏泽云)