

混凝土重力坝关键部件的毁伤判据分析

张克钊¹, 卢芳云², 彭 永², 李翔宇²

(1. 国防科技大学 试验训练基地, 陕西 西安 710103;

2. 国防科技大学 理学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 为了解决在爆炸载荷作用下混凝土重力坝关键部件功能毁伤分析和毁伤判据取值缺乏的问题, 基于结构树和毁伤标准, 分类梳理了混凝土重力坝的关键部件, 并从毁伤模式分析、毁伤规律归纳、毁伤判据研究和毁伤结果判定 4 个方面开展关键部件的毁伤分析, 将混凝土重力坝的物理毁伤和功能毁伤关联起来。结合毁伤标准, 建立了一套混凝土重力坝关键部件的毁伤等级判定方法, 给出了定量判定方法和准则。

关键词: 混凝土坝体; 毁伤评估; 易损性分析; 爆炸载荷; 量纲分析

中图分类号: O389

文献标志码: A

文章编号: 2097-2741(2024)04-001-014

Analysis of Damage Criteria for Key Components of Concrete Gravity Dams

ZHANG Kefan¹, LU Fangyun², PENG Yong², LI Xiangyu²

(1. Test Center, National University of Defense Technology, Xi'an 710103, Shaanxi;

2. College of Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, Hunan)

ABSTRACT: To analyze the function damage of key components of concrete gravity dams and explore the damage threshold of them under blast load, key components of the concrete gravity dam were classified based on the structure tree and the damage standard firstly. Subsequently, the damage analysis of key components was carried out from aspects of damage mode analysis, damage law induction, damage criterion research and damage result determination. Furthermore, the physical damage and functional damage of the concrete gravity dam were related. Thereby, a damage level criteria for key components of concrete gravity dams was proposed with the damage standard. Moreover, the judgment method and judging criteria were given.

KEYWORDS: concrete dam; damage assessment; vulnerability analysis; blast loading; dimensional analysis

混凝土重力坝是具有重要经济、政治效益的大型水工建筑物, 是关乎国家命脉的重要战略目标。一旦受到攻击, 不仅会严重破坏坝体自身稳定性, 而且会产生溃坝等灾难性后果, 带来难以估量的损失。现今, 混凝土重力坝相关的研究领

域主要包括筑坝技术^[1]、静力分析^[2]、稳定性分析^[3]、抗震安全分析^[4]、抗爆安全分析^[5]、安全评价指标体系^[6]等, 涉及水利学、材料学、力学、数学、地质学等多个交叉学科, 与常规武器打击下的重力坝易损性和毁伤评估相关的研究侧重于

收稿日期: 2023-11-11

基金项目: 国家自然科学基金 (11902355)

第一作者: 张克钊 (1994—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事毁伤评估与易损性分析研究。E-mail: kfzhang-v@163.com

引用格式: 张克钊, 卢芳云, 彭永, 等. 混凝土重力坝关键部件的毁伤判据分析[J]. 火箭军工程大学学报, 2024, 38 (4): 1-13, 23.

爆炸动态响应、安全性评估、稳定性分析等方面,目前,均已取得了较多具有代表性的研究成果。

很多研究采用损伤范围、损伤指数、地震动态指标、坝体加速度等参量对重力坝在爆炸载荷或者地震载荷下的损伤进行表征和度量^[7-9],进行了重力坝易损性的探索性研究,能够从动态响应层面描述坝体的受损情况。但这些参量本质上都仅停留于物理层面的毁伤,并不涉及功能毁伤,也没有向目标功能层面的毁伤进行拓展和延伸。因此,这些仅基于物理毁伤建立起来的“易损性”分析结果具有一定的局限性,不能全面支撑起完整

的重力坝易损性研究。

为了满足爆炸载荷作用下重力坝各类关键部件的功能毁伤分析与判定的需要,本文以重力坝关键部件为出发点,依照“关键部件→毁伤模式分析→毁伤规律归纳→毁伤判据研究→毁伤结果判定”的分析思路,基于仿真计算和试验验证结果,开展关键部件的毁伤准则和判据分析,将混凝土重力坝的物理毁伤和功能毁伤关联起来。同时,结合毁伤标准,建立一套混凝土重力坝关键部件的毁伤等级判定方法。

1 混凝土重力坝关键部件分类及分析思路

综合考虑国内外混凝土重力坝发展历史现状、结构特点、坝段组成等因素^{[10]39},建立典型混凝土重力坝模型,其结构树组成如图 1 所示。在关键部件的确定和分析过程中,需要依据不同功能与

坝段之间的相互联系建立起功能与部件之间的对应关系,进一步明确功能毁伤对应的具体部件。

结合文献[10](第 40 页)中的毁伤树和毁伤标准,混凝土重力坝的关键部件可按所属坝段进行分类,如表 1 所示。

表 1 依据坝段类型分类的混凝土重力坝关键部件

Tab. 1 Key components of concrete gravity dams classified by dam section types

坝段类型	关键部件
泄洪坝段	坝体、闸门(表孔、深孔)、启闭机
厂房坝段	坝体、进水口闸门、启闭机、背管、发电机组、主变压器、中央控制室
升船机坝段	上游挡水闸门及启闭机、顶部机房、船厢、驱动系统、下游挡水闸门及启闭机
导墙坝段	坝体
非溢流坝段	坝体

本文着重关注重力坝关键部件在较大当量爆炸载荷作用下的毁伤规律问题,后续的分析过程均基于此前提开展。因此,在充分考虑爆炸载荷的作用方式和特点、关键部件受爆炸载荷打击下的动态响应类型后,重新整理混凝土重力坝的关键部件及分类,如表 2 所示。

此外,本文侧重于阐明在已有仿真和试验数据基础上,开展关键部件功能毁伤分析方法和过程的研究,因此,未对仿真计算和试验验证的设计思路、实施方式、数据处理等内容多做介绍,该部分内容详见文献[10](第 82 页)。

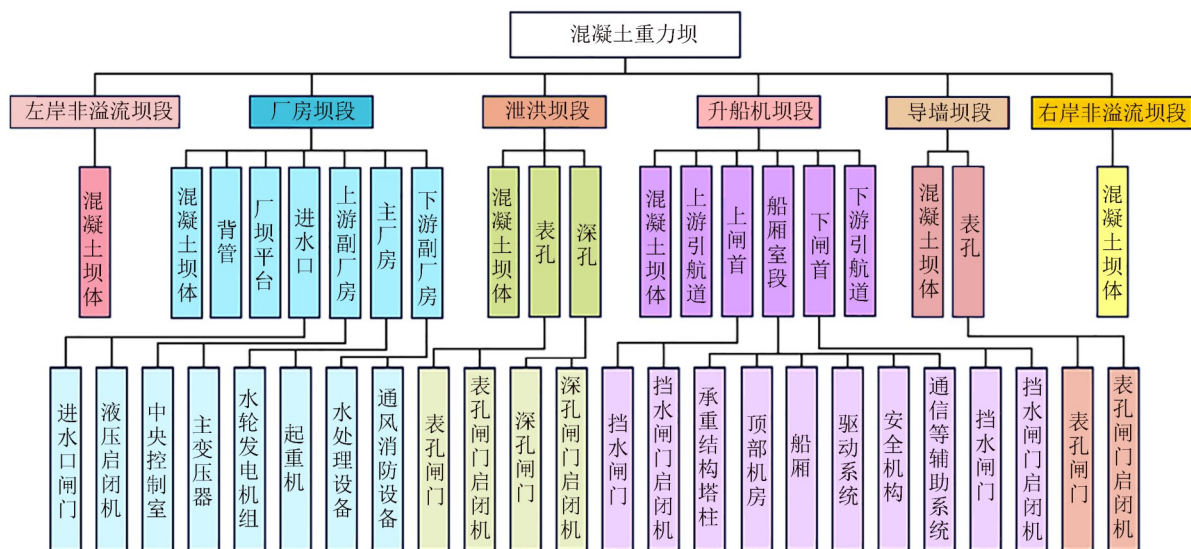


图 1 混凝土重力坝结构树

Fig. 1 Structure tree of concrete gravity dam

表 2 按爆炸载荷下的响应类型分类的混凝土重力坝关键部件

Tab. 2 Key components of concrete gravity dams classified by response types under blast loading	
类型	关键部件
混凝土坝体类	单个泄洪坝段坝体
机械类	闸门(表孔、深孔)
混凝土结构类	背管
机房类	启闭机、发电机组、主变压器、中央控制室、顶部机房、船厢、驱动系统

1.1 混凝土坝体类

在图 1 给出的混凝土重力坝结构树中，每类坝段基本上均将“混凝土坝体”作为单列的部件，这是由于各个坝段的坝体是重力坝的主要组成部分，且与重力坝结构完整性密切相关。作为关键部件，单个坝段受打击后的稳定性和动态响应决定了重力坝整体的毁伤结果。

因此，单个坝段的毁伤规律研究应侧重于坝体在爆炸载荷作用下的局部破坏和动力学响应。局部破坏指混凝土坝体在受到空爆或触爆打击后，产生的混凝土破碎、压碎、崩落、断裂等现象；动力学响应指坝段整体在爆炸载荷作用下的受力、振动、位移等力学响应。混凝土坝体与其他关键部件相比，能够承受的爆炸载荷强度更高，所以其毁伤规律对应的爆炸载荷当量范围也更广。

“重力坝坝段”或“不同坝段类型的坝体”实际上包括单个泄洪坝段、单个厂房坝段、单个导墙坝段和单个非溢流坝段 4 种，本文仅将单个泄洪坝段坝体作为关键部件（表 2），主要原因包括：（1）泄洪坝段位于整个混凝土重力坝的中间位置，坝段数量最多，宽度最大，最易受到爆炸载荷的打击，因此也最具有代表性；（2）不同类型单个坝段的截面形状、坝踵与坝趾之间距离均基本相近，混凝土强度、岩基类型、坝顶高度、坝段宽度均相同，单个泄洪坝段的局部破坏和动态响应规律可较好地应用于其他类型的单个坝段。

因此，本文选取单个泄洪坝段作为混凝土坝体类的关键部件，并直接应用于所有类型的坝段。为避免歧义和指代方便，后文将使用“单个坝段”指代混凝土坝体类的重力坝关键部件。

1.2 机械类

机械类关键部件主要指泄洪坝段表孔、深孔内部的止水闸门。闸门为金属材质，依靠启闭机的牵引和门板支架尾部轴承的旋转完成溢洪道的

开启与关闭，典型弧形闸门如图 2 所示。



图 2 典型弧形闸门

Fig. 2 Typical arc-shaped gate

在闸门的毁伤规律分析过程中，关注点应包括门板和支架尾部轴承两部分。闸门门板在爆炸载荷作用下会产生变形或破损，进而失去止水能力；支架尾部轴承若由于爆炸载荷产生剧烈振动，则会引起轴承变形并导致闸门整体无法正常旋转。

1.3 混凝土结构类

除了坝体自身，重力坝中的其他混凝土结构数量不多，厂房坝段背管结构是较为典型的混凝土材质的关键部件。背管结构在触爆载荷的作用下会产生局部混凝土压碎、崩落，甚至大面积的破孔。此时，破孔会导致进入发电机组的水流量减小，而且破孔附近的混凝土碎块会随着管内水流进入并损坏发电机组。因此，厂房坝段的背管结构的毁伤规律分析应从爆炸载荷与结构损伤程度的对应关系入手。

1.4 机房类

机房类关键部件包括各类溢洪道内的启闭机，厂房坝段的发电机组、主变压器、中央控制室，升船机坝段的顶部机房、船厢、驱动系统等。这些关键部件均由大量的金属构件、电子元件、传动结构组成，是重力坝各个功能的核心部件，但自身材质强度和抗冲击性能较弱，极易受到冲击波超压或震动的影响。出于简化分析考虑，受到爆炸载荷影响后的毁伤规律概括为“0/1 毁伤律”，即毁伤结果较为单一，仅存在失效和未失效两种状态。因此，可利用冲击波超压等经验公式归纳、总结机房类关键部件的毁伤规律。

2 单个坝段的功能毁伤分析

依据混凝土重力坝结构完整性的功能毁伤标

准^{[10]36}，首先需要对单个坝段的毁伤结果进行判定，再综合分析所有受损坝段的毁伤结果，以得到具体的功能毁伤等级。一般而言，单个坝段在爆炸载荷下的毁伤模式可分为混凝土坝体局部破坏和混凝土坝体整体失稳两种，与单坝毁伤标准^{[10]42}相对应。

2.1 混凝土重力坝毁伤模式

2.1.1 混凝土坝体局部破坏

单个坝段在爆炸载荷的作用下会产生局部破坏的毁伤模式，通常表现为爆炸成坑、坝体断裂、表面裂纹3种形式，可使用受损体积占比作为毁伤准则。单个坝段的局部破坏毁伤模式如图3所示。

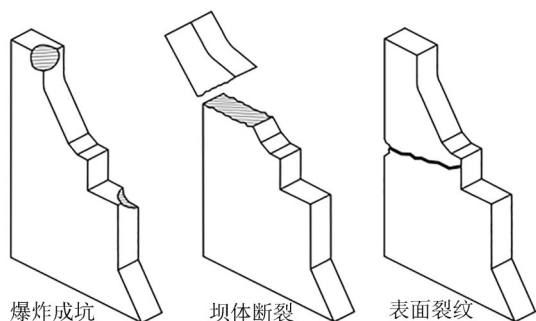


图3 单个坝段的3种局部破坏毁伤模式

Fig. 3 Three local damage modes of a single dam section

爆炸成坑为最普遍的毁伤模式，坝体在空爆、触爆或水中爆炸载荷的作用下发生局部压碎和崩落，所成爆坑的体积或崩落混凝土的体积即为单坝的受损体积。

坝体断裂一般发生在单个坝段的坝头位置，大当量爆炸载荷所形成的冲击波压力使一定范围内的坝头与坝身断裂并飞散，坝身损失的混凝土体积即为单坝的受损体积。此外，坝体断裂的破坏模式不仅会导致单坝结构完整性下降，也会造成一定的异常泄洪量，即泄洪功能下降。

表面裂纹是在坝体受损后，由于静水压和扬压力等其他外力的持续作用而形成的破坏模式，时间尺度较大。裂纹通常始于上游侧的爆坑或断口，沿坝长度方向向下游侧延伸，并在扩展到下游面时终止。表面裂纹附近的高应变区域和裂纹影响区域跨度（高度）可作为计算参量反映在坝体受损体积占比之中。

2.1.2 混凝土坝体整体失稳

当爆炸载荷强度超过一定范围时，单个坝段会发生失稳，主要表现为滑移、倾覆等具体毁伤模式，如图4所示。

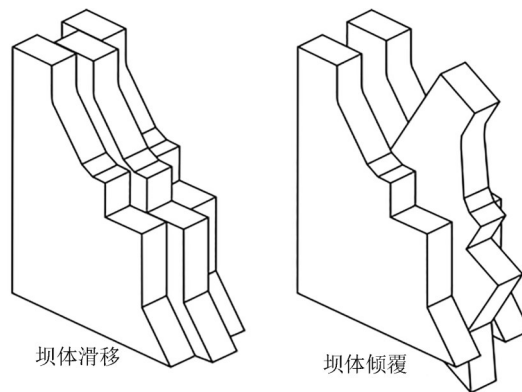


图4 单个坝段失稳的毁伤模式

Fig. 4 Damage modes of a single dam section instability

依照重力坝的抗滑稳定分析理论，坝体正常工作条件下，岩基面上所有法向合力带来的静摩擦力应大于使坝体具有翻转趋势的所有切向合力，此时坝体处于抗滑稳定状态。当高强度爆炸载荷以切向外力作用于坝体上时，会产生以下两种影响其稳定状态的因素。

1) 爆炸载荷所产生的压力作用于坝体一侧，导致所有切向合力大于坝体在岩基面上的静摩擦力，导致坝体失稳。此时，爆炸载荷下坝体整体受到的切向力是坝体失稳的主要原因，可利用坝体加速度作为毁伤准则。

2) 爆炸载荷作用于坝体后，使坝体发生了一定量的位移或震动，造成坝底部的防水帷幕断裂，进而引起坝体所受扬压力急剧增大，所有法向合力减小，最终导致坝体抗滑稳定系数下降，滑移或失稳可能性增加，过程如图5所示。此时，可利用坝底帷幕振动速度作为坝体功能毁伤的准则。

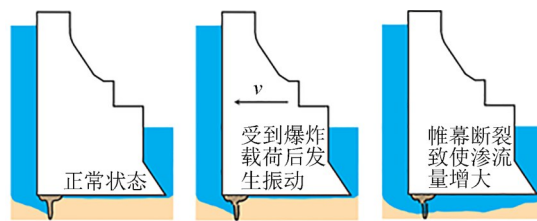


图5 帷幕断裂导致坝体失稳的原理

Fig. 5 Principle of dam instability caused by curtain fracture

2.2 毁伤结果计算与准则分析

文献[10]（第82页）开展了单个坝段在不同位置、不同当量爆炸载荷作用下的仿真计算，得到了坝体动力学参量的变化规律和毁伤结果。工况设置中的当量跨度较大，虽然在不同大爆炸当量下的坝体毁伤效应相近（坝体顶部断裂），但如

果关注的毁伤效应是混凝土坝体表面震塌效应（呈现出明显的当量相关性）时，则应适当调整当量大小和跨度。

2.2.1 计算模型与工况

爆点位置和具体工况如图 6 和表 3 所示。基于坝体毁伤模式的分析结果，拟采用坝体受损体积占比（ P_{DF} ）、坝底帷幕振动速度（ V_j ）、坝体加速度（ a_{dam} ）度量坝体的毁伤规律。

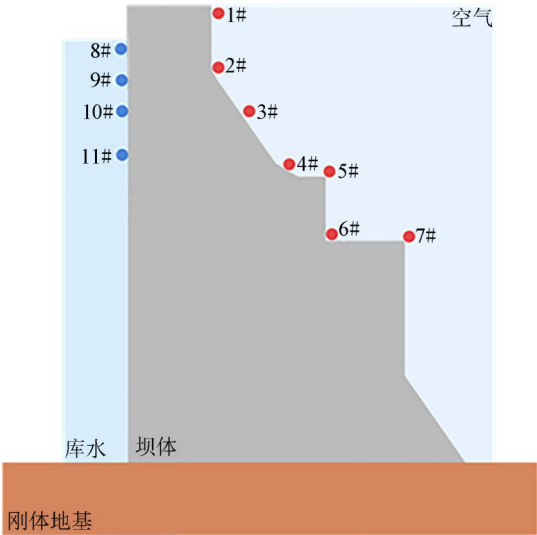


图 6 爆点位置

Fig. 6 Explosion point positions

表 3 爆点对应具体工况

Tab. 3 Working conditions of explosion points

序号	爆点区域	爆点高程/m	触爆介质	当量/t
1#	下游侧	237	空气	2.7、27、54、146、365、675、1 350
2#	下游侧	224	空气	2.7、27、54、146、365、675、1 350
3#	下游侧	210	空气	2.7、27、54、146、365、675、1 350
4#	下游侧	190	空气	2.7、27、54、146、365、675、1 350
5#	下游侧	188	空气	2.7、27、54、146、365、675、1 350
6#	下游侧	166	空气	2.7、27、54、146、365、675、1 350
7#	下游侧	166	空气	2.7、27、54、146、365、675、1 350
8#	上游侧	230	水	2.7、27、54、146、365
9#	上游侧	220	水	2.7、27、54、146、365
10#	上游侧	210	水	2.7、27、54、146、365
11#	上游侧	200	水	2.7、27、54、146、365

混凝土重力坝在触爆载荷下的动态响应是极其复杂的物理过程，仅简单地归纳爆炸当量和各类动态响应参量之间的对应关系具有一定的局限性，不能充分反映实际的物理背景，而且很难拓展分析结果的应用范围。因此，为更好地反映坝体动态响应与不同爆炸载荷之间函数关系的物理内涵，考虑引入无量纲数 B 度量不同工况的爆炸载荷参数，无量纲数 B 的计算表达式为

$$B = \frac{r_w}{l} \cdot \frac{h}{b} = \frac{r_w}{l} \tan \theta$$

式中： r_w 为触爆载荷的装药半径（假设触爆载荷为球形装药）； l 为单个坝段的长度； h 为爆点位置距坝底的高度； b 为爆点到坝体另一侧的水平距离（局部宽度）； $\tan \theta$ 为 h 与 b 的比值。图 7 为各参量的示意图。

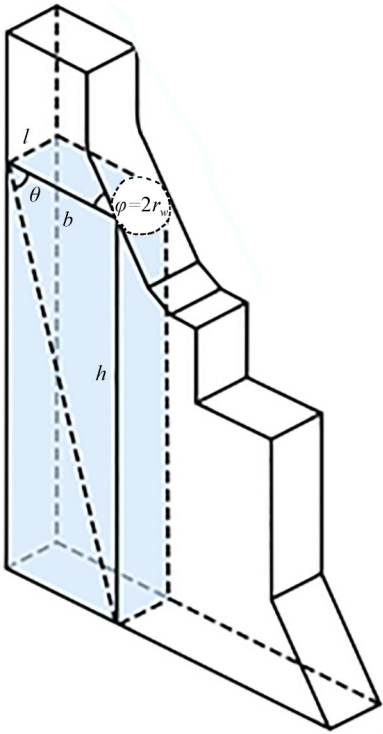


图 7 无量纲数 B 中的参量

Fig. 7 Parameters of dimensionless number B

无量纲数 B 由 r_w/l 和 h/b 两项组成。 r_w/l 的物理意义为坝体单位长度上所受到的爆炸载荷。由于仿真计算中所有坝段长度 l 均相同，因此，该项仅与爆炸载荷的实际当量大小相关。 h/b 的物理意义直观上为爆点具体位置的度量。随着爆点位置的不断下降， $\tan \theta = h/b$ 也在不断减小，而重力坝下游侧形状并不规则，所以， θ 或者 h/b 定量地体现了下游侧坝面由竖直逐渐变化为水平面的过程。

由图 6 可知, 1#爆点处, 爆炸载荷作用于坝顶的竖直面, 随着爆点位置的下降, 沿水平方向作用于坝面的爆炸载荷比例不断减小, 上游侧爆点同理。因此, h/b 的物理意义为爆炸载荷对坝体水平方向作用比例的大小, 对于特定坝段几何结构, 该项仅与爆点位置相关。

基于无量纲数 B , 可分别归纳出重力坝在触爆载荷作用下各动态响应参数 (具体化表述) 的无量纲变化规律。

$$\begin{aligned} P_{DF} &= f(B) \\ V_y/c_{\text{concrete}} &= G(B) \\ a_{\text{dam}}/g &= I(B) \end{aligned}$$

式中: c_{concrete} 为混凝土中的声速, 取 4800 m/s ; g 为重力加速度, 取 9.8 m/s^2 。

除爆炸载荷有关参量外, 重力坝在触爆载荷下的动态响应与混凝土材料参数 (抗压、抗拉强度等)、炸药材料参数 (密度、爆速等) 等诸多参量有关, 但由于本文仿真计算工况设置的限制及无量纲表达式的简化需求, 这些参量暂未考虑。

2.2.2 爆炸成坑和坝体断裂导致的坝体受损体积占比计算方法

重力坝的下游侧坝面形状并不规则, 因此, 坝体在下游侧触爆载荷作用下的动态响应不仅与爆炸当量相关, 也明显受到爆点位置变化的影响, 无量纲数 B 的引入较好地地将这两个影响因素结合起来了。然而, 在对下游侧爆点作用下坝体受损占比体积变化规律分析时发现, 将所有数据点统一考虑时规律性不明显, 但 1#~3#爆点的结果与 4#~7#爆点存在明显的不同趋势。因此, 拟建立分段函数, 并利用爆点位置数据区分两组数据, 以提高规律曲线和数据点的一致性。由于无量纲数 B 不仅包含爆点位置信息还包含爆炸当量信息, 不宜直接作为分段依据。参考无量纲数 B 的表达式, 可取 3#爆点和 4#爆点在坝面上的中点位置信息 (即 $h/b = 2.2$) 作为函数分段点。经过处理后的下游侧爆点作用下坝体受损体积占比变化规律如图 8 所示。

因此, 坝体在下游侧触爆载荷作用下的受损体积占比可表达为

$$P_{DF} = \begin{cases} 3.8B^{1.4}, & h/b > 2.2 \\ 15B^{1.4}, & h/b \leq 2.2 \end{cases} \quad (1)$$

图 8 和式 (1) 所表现出的规律与无量纲数 B 的物理意义相契合。相同当量情况下, 坝体下游

侧上部分爆点所造成的受损体积占比大于下部分爆点, 此时无量纲数 B 可以简化为 h/b , 即爆炸载荷对坝体的水平方向作用比例大小。 $h/b > 2.2$ 时, 爆炸载荷更多地作用于水平方向, 更易造成坝体顶部断裂; $h/b \leq 2.2$ 时, 爆炸载荷作用于竖直方向的比例更多, 坝体受损体积占比也相应下降。

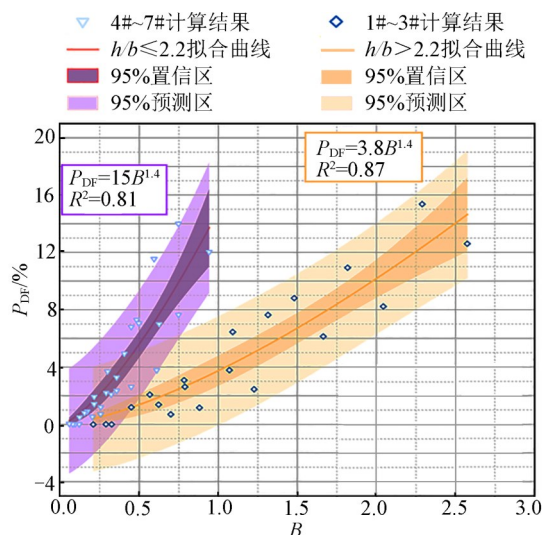


图 8 受损体积占比规律曲线 (下游侧爆点)

Fig. 8 Curves of damage fractions of downstream side explosion points

在对上游侧爆点所造成的坝体受损体积占比变化规律进行分析时, 发现单个爆点不同当量的数据点规律性较强, 而综合考虑所有爆点时的规律性较弱, 拟合曲线的 R^2 仅为 0.43, 如图 9 所示。

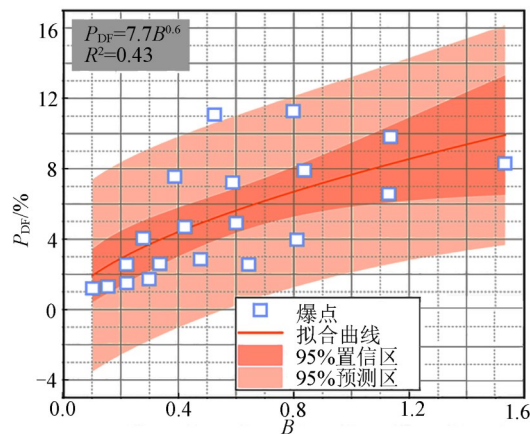


图 9 受损体积占比规律曲线 (上游侧爆点, 自变量为 B)

Fig. 9 Curves of damage fractions of upstream side explosion points (independent variable is B)

由图 9 可见, 明显存在 4 组单独的散点变化趋势, 对应于上游侧的 4 个爆点 (8#~11#) 的数据组。这表明, 无量纲数 B 作为自变量, 并没有很

好地反映出上游侧不同爆点位置 and 不同爆炸当量所造成的受损体积占比变化规律, 需引入新的无量纲数。

从仿真结果^{[10]82}来看, 上游侧爆点和下游侧爆点主要有两点不同。

1) 介质不同。下游侧爆点的介质为空气和混凝土, 而上游侧爆点的介质为水和混凝土。假设当量固定, 下游侧爆点的位置变化仅会造成基于坝体结构区别的动态响应差异。由于静水压 ($P = \gamma h_0$, 其中: γ 为水的容重; h_0 为水深) 的存在, 爆炸载荷对混凝土的破坏作用会随着水深减弱, 因此, 上游侧爆点的位置变化还会影响作用于坝体上的爆炸载荷的大小。所以, 适用于上游侧爆点的无量纲数应与 h 成反比。

2) 受坝体结构影响程度不同。虽然坝体上、下游侧各爆点处的 b 取值方法相同 (见图 7), 均为爆点到坝体另一侧的水平距离, 但下游侧坝面为不规则平面, 需要 b 和 h 共同描述爆点具体位置, 而上游面为规则竖直平面, 仅需要 h 即可描述爆点具体位置。

综合考虑上述因素, 基于简化计算式的原则, 本节引入无量纲数 C 作为上游侧爆点造成坝体受损体积占比变化规律的主定变量, 表达式为

$$C = \frac{r_w}{h} \quad (2)$$

重新用无量纲数 C 表示上游侧爆点造成的坝体受损体积占比变化数据点, 并绘制拟合曲线, 结果如图 10 所示。

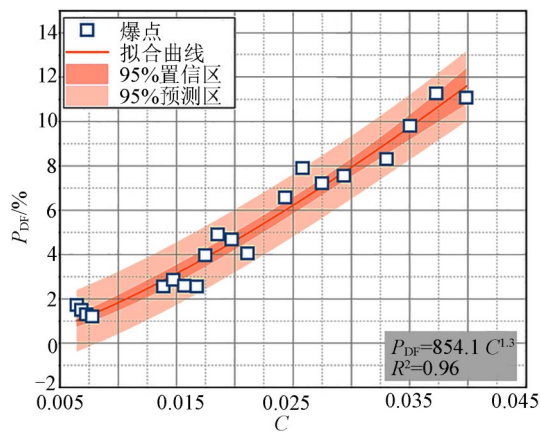


图 10 受损体积占比规律曲线 (上游侧爆点, 自变量为 C)

Fig. 10 Curves of damage fractions of upstream side explosion points (independent variable is C)

由图 10 可见, 所有上游侧爆点的数据点呈现出较好的一致性, 拟合曲线 R^2 达到 0.96。坝体在

上游侧触爆载荷作用下的受损体积占比计算式为

$$P_{DF} = 854.1 C^{1.3}$$

后文中上游侧爆点所致的坝底帷幕振动速度变化规律、坝体整体加速度变化规律均以无量纲数 C 为自变量。

2.2.3 表面裂纹影响范围的坝体受损体积占比计算方法

如果单个坝段受上游侧爆点影响产生的受损体积占比大于 10%, 此时需利用基于扩展有限元方法 (Extended Finite Element Method, XFEM) 的裂纹扩展路径快速获取算法^{[10]95}得到由爆点附近扩展出的裂纹具体路径, 进而将该表面裂纹的影响范围与坝高之比也考虑到最终的坝体受损体积占比之中。

表面裂纹的影响范围即为裂纹具体路径在坝体高度方向的跨度 $h_{\text{crack-range}}$ 。考虑了表面裂纹影响范围的最终坝体受损体积占比为

$$P_{DF}^* = P_{DF} + h_{\text{crack-range}}/H$$

式中: P_{DF} 为爆炸成坑和坝体断裂造成的坝体受损体积占比; H 为坝体实际高度, 取 180 m。

文献 [10] (第 95 页) 所给出的长短期记忆 (Long Short-term Memory, LSTM) 神经网络学习模型已能够基于仿真计算结果得到坝体上游侧各位置处的裂纹扩展路径, 由此得到的 $h_{\text{crack-range}}$ 变化规律如图 11 所示。

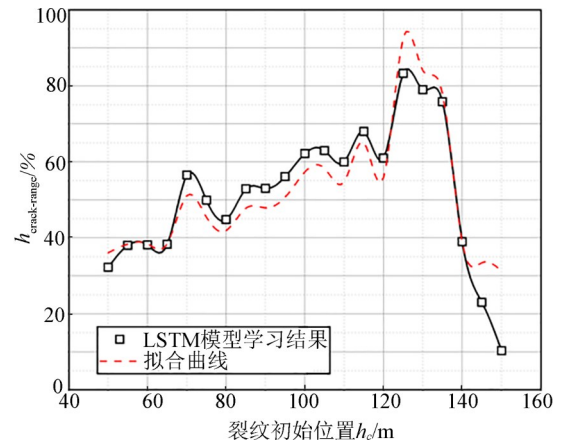


图 11 $h_{\text{crack-range}}$ 变化规律

Fig. 11 Variation laws of $h_{\text{crack-range}}$

图 11 中拟合曲线为

$$h_{\text{crack-range}} = 28.85 - 0.29 \times 4.0^{h_c/20.1} + 1.75 \times 4.2^{h_c/26.58} \quad (3)$$

由于拟合曲线的精度欠佳, 因此在实际分析过程中, 根据爆点或裂纹初始位置可采取散点插

值的方式或拟合曲线取值的方式计算 $h_{\text{crack-range}}$ 值。

综上所述,结合单坝毁伤标准^{[10][42]}中的毁伤判据(5%、10%、20%)和图 8、图 10 和图 11,以及式(3),即可计算任意爆点处坝体受损体积占比及对应单坝毁伤等级。

2.2.4 坝底帷幕振动速度计算方法

重力坝在下游侧爆点作用下的坝底帷幕振动速度随无量纲数 B 变化规律如图 12(a) 所示,因此,坝体在下游侧触爆载荷作用下的坝底帷幕振动速度可表达为

$$V_y/c_{\text{concrete}} = \begin{cases} 1.4e^{-4} B^{0.64}, & h/b \leq 2.2 \\ 5.1e^{-4} B^{0.64}, & h/b > 2.2 \end{cases}$$

重力坝在上游侧爆点作用下的坝底帷幕振动速度随无量纲数 C 变化规律如图 12(b) 所示。

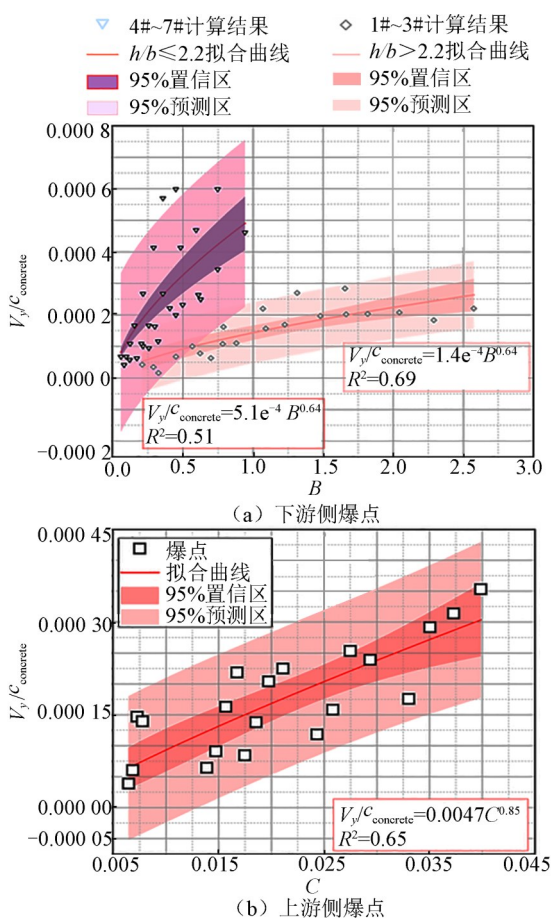


图 12 坝底帷幕振动速度规律曲线

Fig. 12 Curves of vibration velocities of dam bottom curtains

坝体在上游侧触爆载荷作用下的坝底帷幕振动速度计算式为

$$V_y/c_{\text{concrete}} = 0.0047 C^{0.85}$$

2.2.5 毁伤判据选取(坝底帷幕振动速度)

坝底帷幕振动速度的毁伤准则与单个坝段结构完整性毁伤标准中的“滑移、失稳”直接相关,坝体抗滑稳定系数为二者之间的纽带。

许红涛等^[11]提出了以 9.2 cm/s 作为帷幕振动速度的安全判据,在小于该振动速度时,帷幕的稳定性和结构性不会产生破坏。张俊^[12]认为许红涛未能考虑到结构面充分得到灌注的情况,因此,安全的帷幕振动速度取值过于保守。依据摩尔库伦定理中关于结构面的临界质点振动速度的描述,充分灌注后的帷幕安全振速可达到 27.1 cm/s。

本文对于致使帷幕断裂的临界振动速度的选取主要考虑两个因素。

1) 在工程建设或规范标准中,“安全判据”的设定通常较为保守,其实际含义是建筑结构稳定性几乎不受严重影响的动态响应临界值。也就是说,某动态响应参量超过了“安全判据”,并不意味着会产生明显的破坏或损伤。在实际工程应用中,能够产生严重毁伤的动态响应参量与“安全判据”之间通常是 1.5~2 倍的关系。

2) 根据图 12 中的仿真计算结果,不同爆炸载荷作用在单个坝段上产生的坝底帷幕振动速度分布于 0~300 cm/s,与已有研究给出的临界振动速度相差 1 个数量级。结合已有研究给出的临界振动速度,本文所考虑的大部分工况均能够造成较为明显的帷幕断裂。

综合考虑上述因素后,本文选取 54.2 cm/s 作为坝底帷幕振动速度的临界值,即毁伤判据。当帷幕振动速度大于该值时,帷幕发生断裂,坝底渗流量增大,最终将导致坝体扬压力增大。

结合单个坝段的尺寸、受力情况^{[10][33]}可知,帷幕断裂后,坝体的扬压力由 101 591.5 kN 增至 149 705.5 kN,根据下式计算得到抗滑稳定系数由 3.405 下降至 3.017。

$$K' = \frac{f' \sum W + c' A_R}{\sum P}$$

式中: K' 为按抗剪断强度计算的抗滑稳定安全系数; f' 为坝体混凝土与坝基接触面的抗剪断摩擦系数; c' 为坝体混凝土与坝基接触面的抗剪断凝聚力, kPa; A_R 为坝基接触面截面积, m^2 ; $\sum W$ 为作用于坝体上全部荷载(包括扬压力,下同)对滑动平面的法向分值, kN; $\sum P$ 为作用于坝体上全部荷载对滑动平面的切向分值, kN。

与前文的坝体受损体积占比不同, 利用坝体帷幕振动速度的毁伤准则判定的结果并不是一个具体数值, 而是坝体抗滑稳定系数是否下降。帷幕断裂通常并不足以导致单个坝段失稳或滑移, 还需要进一步依据坝段整体加速度计算抗滑稳定系数的最终数值。

2.2.6 坝体整体加速度计算方法

与坝底帷幕振动速度类似, 坝体整体加速度同样可通过抗滑稳定系数与单个坝段结构完整性毁伤标准中的“滑移、失稳”相关联, 从而作为单个坝段功能的准则。然而, 二者之间也存在明显区别: 坝底帷幕振动速度过高会导致坝底帷幕断裂, 使坝底扬压力增加, 最终导致坝体抗滑稳定系数下降至某一定值; 用于表征坝体受力情况的坝体加速度过高时, 虽然同样会导致抗滑稳定系数下降, 但不会降至一个定值, 抗滑稳定系数将随着坝体加速度的增大而不断降低。

重力坝在正常工作状态时上游侧的静水压力显著高于下游侧, 坝体所受的切向合力方向指向下游侧, 所以, 能够使单个坝段产生失稳的潜在爆点通常分布于上游侧。因此, 结合前文的分析结果, 本节仅对上游侧爆点的情况进行分析。

重力坝在上游侧爆点作用下的坝体整体加速度随无量纲数 C 变化规律如图 13 所示。

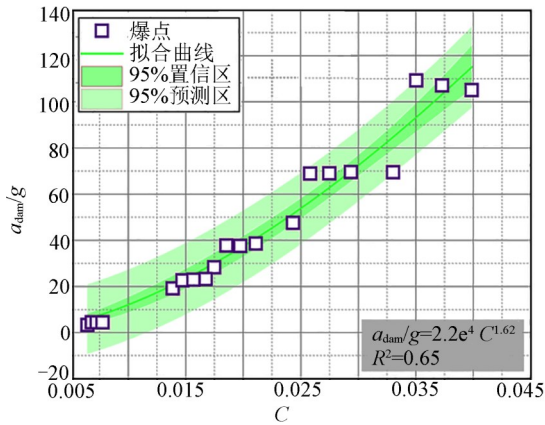


图 13 上游侧坝体加速度规律曲线

Fig. 13 Curves of acceleration of dams on upstream side

坝体在上游侧爆点作用下的坝体整体加速度计算式为

$$a_{\text{dam}}/g = 2.2e^4 C^{1.62} \quad (4)$$

2.2.7 毁伤判据选取 (坝体整体加速度)

得到坝体的整体加速度后, 并不足以评判坝体是否达到“失稳、滑移”的状态, 仍需依据坝

体抗滑理论计算抗滑稳定系数。坝体在上游侧爆炸载荷的作用下, 受力方向与上游静水压方向相同, 因此以合力 F_s 的形式加入切向合力。考虑了爆炸载荷后的抗滑稳定系数计算式可以表示为

$$K' = \frac{f' \sum W + c'A_R}{F_s + \sum P} \quad (5)$$

从计算式看, 抗滑稳定系数的数学意义是坝体受到的作用效应与抗滑力之比, 即切向合力与抗滑力之比。因此, 本文考虑坝体在爆炸载荷作用下“失稳、滑移”的临界状态为坝体所受切向合力和抗滑力相等时, 即抗滑稳定系数 $K' = 1$ 为坝体的毁伤判据。

依照重力坝中场工作状态下的各参量取值^{[10]34}, 可计算得出抗滑稳定系数 $K' = 1$ 时对应的坝体整体加速度毁伤判据为

$$a_{\text{dam}} = 7.06 \text{ m/s}^2$$

因此, 结合式 (4) 和式 (5) 即可计算并判定由坝体重力加速度变化导致的单坝结构完整性毁伤等级。

3 其他关键部件的功能毁伤分析

对于物理毁伤机理、毁伤律较为复杂的关键部件, 将基于通过仿真计算得到的物理毁伤结果^{[10]82}, 对其进行归纳总结, 逐个给出各部件功能毁伤的毁伤准则。对于物理毁伤机制较为单一、可应用“0/1”毁伤律的关键部件, 将参考标准规范并结合经验公式给出对应的功能毁伤准则。

3.1 闸门

3.1.1 闸门的物理毁伤模式

闸门是实现重力坝挡水功能的关键部件, 位于泄洪坝段的表孔和深孔内。依据闸门工作原理和仿真计算结果^{[10]82}, 可归纳出闸门的两种物理毁伤模式: 闸门门板破孔和闸门支架尾部轴承变形。任何一种毁伤模式都将导致闸门失效。

1) 闸门门板破孔。重力坝内部深孔、表孔处发挥止水功能的闸门门板在工作状态下承受着较大的静水压力, 当外部爆炸载荷作用于闸门门板时极易产生门板弯曲、破孔等物理毁伤现象。此时, 闸门门板破孔的最大长度可作为闸门结构的毁伤准则。

2) 闸门支架尾部轴承变形。由于闸门支架尾部与轴承相连处近似于固支, 因此, 闸门受到爆

炸载荷作用后所产生的震动极易导致支架尾部轴承变形,进而使得闸门无法正常抬起或落下。此时,闸门支架尾部振动速度可作为闸门结构的毁伤准则。

3.1.2 闸门毁伤判据选取

重力坝内部深孔、表孔处作为止水结构的闸门门板在工作状态下承受着较大静水压力,门板产生破损后会立即出现异常流量,并进一步加剧门板破损和撕裂。当门板破损长度较小时,静水压力不足以将破孔撕裂,异常流量较小,尚不致于造成闸门失效;当破损长度达到一定阈值时,异常流量与正常泄洪状态无异,可认定闸门失效。

然而,由于缺少相关的标准和研究背景,本节暂将闸门失效的毁伤判据设定为“闸门破损长度达到闸门横向宽度的50%”,即3.5 m。

依据现行国家标准《爆破安全规程》GB 6722—2003中相关规定^[13]:闸门支架属于重型钢结构,振动安全允许标准为8 cm/s。因此,本节将闸门门板支架尾部振动速度8 cm/s作为闸门失效的另一个毁伤判据。

3.1.3 闸门物理毁伤参数取值方法

与单个坝段不同,作用于闸门的爆炸载荷并不限于触爆。因此,不必过于强调爆点具体位置,可利用比例距离来表述任意爆点位置的爆炸载荷强度。

图14为基于文献[10](第105页)仿真计算结果,添加毁伤判据的闸门毁伤参数取值曲线。其中: L_{crack} 为破损长度; Z 为比例距离。在实际分析过程中,可直接在曲线上取点或者通过图中拟合公式计算的方式判断闸门是否失效。

虽然本节给出了闸门失效的两个毁伤判据,但很明显,以支架尾部振速为准则时,对应的临界比例距离更小。也就是说,以尾部振速为毁伤准则的判定范围一定程度上包含了以门板破损长度为准时的判定范围。尽管如此,本节仍保留了两种毁伤判据,主要原因在于闸门门板的破损长度作为毁伤准则更为直观,也更能具体地对应到泄洪功能毁伤标准中的异常流量。但本节并未给出足够有依据、有说服力的破损长度判据,该问题有待于在后续工作中完善。

3.2 背管

3.2.1 背管结构的毁伤模式和毁伤判据

背管结构是重力坝发电功能毁伤对应的关键部件,位于厂房坝段下游面,在受到爆炸载荷的

作用时会产生破孔。背管结构产生破孔后会造成混凝土碎块进入水轮机组等后效影响,最终导致该坝段发电机组失效。

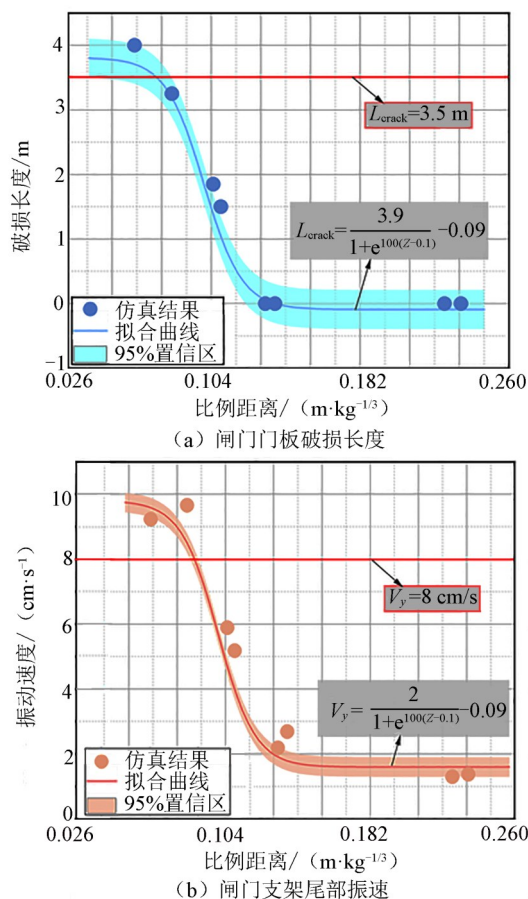


图 14 任意爆点处闸门毁伤参数的取值曲线

Fig. 14 Value curves of gate damage parameters at any explosion point

背管与发电水轮机之间未设置拦污栅等结构,因此,背管破损后的所有混凝土碎块将无障碍地进入水轮机之中。混凝土重力坝厂房坝段内的水轮机组转轮及叶片结构如图15所示,叶片之间的最小间距约为1.6 m,最大间距约为5.23 m。根据杨建超^[14]、张志华^[15]等的试验结果,混凝土结构在大当量爆炸载荷作用下产生的混凝土碎块通常较小,不会直接将转轮卡住或引发其他故障。但水轮机转轮在正常运行过程中,会出现淤泥、积沙等异物粘结在叶片附近的现象,当积累到一定程度时会极大增加轮机的载荷并引发异常振动,进而导致整个水轮机组失效。

一般来说,由于重力坝上游面通常设置了拦污栅,泥沙或者石块累积堵塞轮机的异常情况需要较长的时间周期。然而,当背管受到强烈的外

部爆炸载荷作用时, 破损后的混凝土碎块将直接进入轮机。如果按照图 15 中的尺寸计算, 泥沙完全堵住其中一个缝隙所需的混凝土碎块体积为 11.86 m^3 。假设背管破损后的混凝土块全部进入水轮机组, 那么, 依照背管的尺寸^{[10]108}可计算得到此时对应的背管破损长度为 2.44 m 。因此, 本节将 2.44 m 作为由背管破损而导致发电机组失效的毁伤判据。

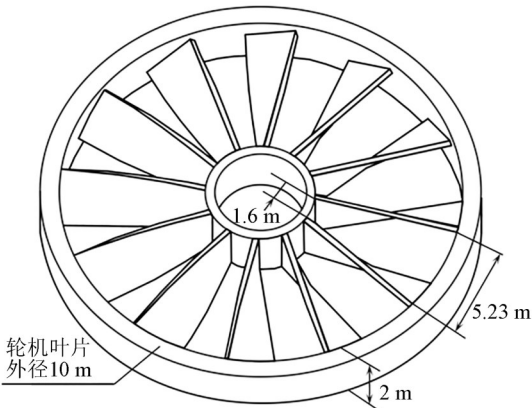


图 15 水轮机组转轮及叶片
Fig. 15 Runner and blade of the turbine unit

3.2.2 背管破孔长度的取值方法

厂房坝段的背管为半圆柱壳结构, 任意位置处的厚度均相等。因此, 同样不必强调爆点位置, 仅需归纳爆炸载荷当量和破孔长度的关系。

归纳文献[10] (第 122 页) 的仿真计算结果, 可得到如图 16 所示的背管破孔长度取值曲线。依图中拟合曲线公式计算, 或采用图中取点的方式即可得到任意爆点处某当量所能造成的背管结构破损长度, 再以红色直线为判据得到背管是否失效的结论。

3.3 机房类关键部件

3.3.1 机房类关键部件的子类

机房类关键部件具有对爆炸敏感、精密仪器多、位置较为明显等特点, 均拟用“0/1”毁伤律对其功能失效进行描述。共包括 7 种, 按所属坝段排序分别为启闭机、中央控制室、主变压器、发电机组、船厢、驱动系统、顶部机房。

按照工作原理的不同, 可进一步将机房类关键部件分为两个子类。

1) 机械类。机械类关键部件包括启闭机、发电机组、船厢和驱动系统。这一子类关键部件在正常运行时均需依靠液压机、钢索、起重机等完成重物的升降或牵拉, 属于重型机械工具, 材质

以金属为主、混凝土为辅。

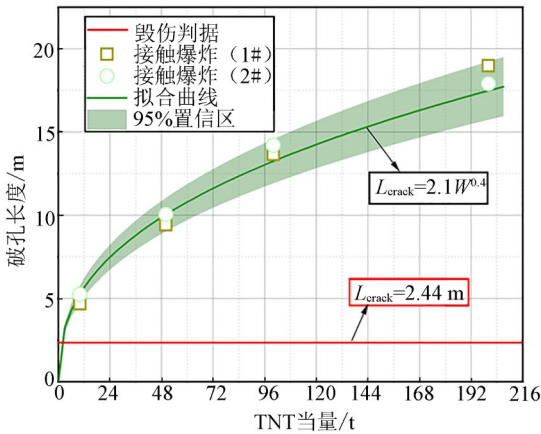


图 16 任意爆点处背管破孔长度的取值曲线
Fig. 16 Value curves of lengths of broken holes of back tubes at any explosion point

2) 设备类。设备类关键部件包括中央控制室、主变压器和顶部机房。这一子类关键部件通常包含较多的电子设备和仪器, 并置于混凝土结构的密闭空间内。

3.3.2 机械类关键部件的毁伤判据

机械类关键部件在正常运行时, 结构件若产生变形或移位, 将直接导致关键部件的功能毁伤。因此, 可将造成结构变形的超压作为机械类关键部件的毁伤准则。标准《化工企业定量风险评价导则》AQ/T 3046—2013^[16]对于超压的判定准则如表 4 所示。

表 4 超压对建筑物的影响 (部分)
Tab. 4 Influence of overpressure on buildings (partial contents)

压力/kPa	影响
20.7	工厂建筑物内的重型机械轻微损坏; 钢结构建筑变形, 并离开基座
(20.7, 27.6)	自成构架的钢面板建筑破坏, 储油管破裂
27.6	轻工业建筑物的覆层破裂
34.5	木制的支撑柱折断, 建筑物内高大液压机轻微破坏
(34.5, 48.2)	房屋几乎完全破坏
48.2	未装载货物的火车车厢倾翻
(48.2, 55.1)	未加固的 203.2~304.8 mm 厚的砖板因剪切或弯曲导致失效
62.0	装载货物的火车货车车厢完全破坏
68.9	建筑物可能全部遭到破坏; 重型机械工具移位并严重损坏, 非常重的机械工具幸免

依据表 4, 本节拟选用 68.9 kPa 的超压值作为机械类关键部件功能毁伤的毁伤判据。此外, 由于机房类关键部件均可采用“0/1”毁伤律描述, 即仅存在毁伤和未毁伤两种状态, 毁伤机制较为简单。因此, 本节采用经验公式计算的方法来获取实际情况下该类关键部件的毁伤参数。

拟采用 Kingery 和 Bulmash (K-B) 的试验数据及其简化模型^[17]计算作用于关键部件上的超压值。K-B 模型是基于大量爆炸波试验数据总结出

的, 公式简单, 计算速度快且适用性好, 广泛应用于爆炸波威力的参数计算。在该模型中, 所有威力参数都用变量 F 直接或间接表述, F 与装药当量 W_1 (kg) 及距离 R_1 (m) 的关系为

$$F = \exp(A + BT + CT^2 + DT^3 + ET^4 + FT^5 + GT^6)$$

式中: $A \sim G$ 为系数; T 为比例距离 Z 的自然对数, 即 $T = \ln Z$, $Z = R_1 / W_1^{1/3}$ 。

系数 $A \sim G$ 的取值根据威力参数类型的不同而取值不同, 计算入射超压时的系数按表 5 取值。

表 5 K-B 公式中入射冲击波超压峰值计算系数取值

Tab. 5 K-B formula calculation coefficients of peak overpressure of incident shock wave

比例距离范围/($\text{m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$)	A	B	C	D	E	F	G
(0.2, 2.9]	7.210 6	-2.106 9	-0.322 9	0.111 7	0.068 50	0	0
(2.9, 23.8]	7.593 8	-3.052 3	0.409 8	0.026 1	-0.012 67	0	0
(23.8, 198.5]	6.053 6	-1.406 6	0	0	0	0	0

冲击波入射超压 P_i (单位: kPa) 计算公式为

$$P_i = \begin{cases} \exp(7.2106 - 2.1069T - 0.3229T^2 + 0.1117T^3 + 0.0685T^4), & 0.2 < Z \leq 2.9 \\ \exp(7.5938 - 3.0523T - 0.4097T^2 + 0.02617T^3 - 0.01267T^4), & 2.9 < Z \leq 23.8 \\ \exp(6.0536 - 1.4066T), & 23.8 < Z \leq 198.5 \end{cases} \quad (6)$$

依据式 (6) 的计算结果和本节的毁伤判据即可判定任意爆点处机械类关键部件的毁伤结果。

3.3.3 设备类关键部件的毁伤判据

设备类关键部件在正常运行时需要保证相对平稳的外部环境, 此时若发生剧烈震动将直接导致该类关键部件失效。

国家标准《电子信息系统机房设计规范》GB 50174—2008^[18]第 5.2.4 条规定: 在电子信息设备停机条件下, 主机房地板表面垂直及水平向的振动加速度应不大于 500 mm/s^2 。因此, 拟采用设备类关键部件所在位置处混凝土结构振动加速度作为毁伤准则, 毁伤判据为 500 mm/s^2 。

依据高康华^[19]、李伟健等^[20]的试验结果数据, 混凝土结构在外部爆炸载荷下的振动加速度规律可拟合为图 17 中所示曲线。由于毁伤判据数值较小, 未在图中标明。

图 17 中曲线的计算式为

$$a_{\text{JF}} = 163.5 Z^{-1.81} \quad (7)$$

式中: a_{JF} 为设备类关键部件在爆炸载荷下的振动

加速度。

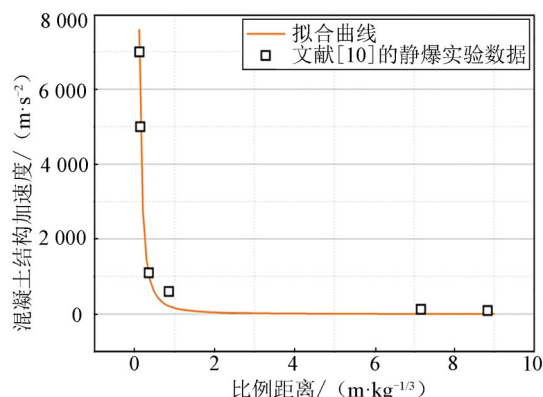


图 17 爆炸载荷下混凝土房屋震动加速度规律曲线

Fig. 17 Curve of vibration acceleration of concrete building under blast load

实际分析过程中, 可利用式 (7) 计算混凝土结构振动加速度的具体数值, 进而判定设备类关键部件功能毁伤的具体情况。

4 结论

本文将混凝土重力坝关键部件按照动态响应的不同形式划分为 4 类, 分析了各类关键部件毁伤模式, 根据已有研究成果和标准规范明确了 4 类关键部件的毁伤判据取值, 基于仿真和试验得到的毁伤效应数据建立了各类关键部件毁伤规律曲线。基于本文研究结果, 可定量判定给定弹目交会条

件下的重力坝关键部件毁伤结果,结合毁伤标准可进一步开展混凝土重力坝的毁伤评估工作。

参考文献:

- [1] 林继镛,张社荣. 水工建筑物[M]. 北京:中国水利水电出版社,2019:45.
- [2] 冯树荣,孙恭尧,殷有泉. 重力坝稳定性和承载能力分析[M]. 北京:中国电力出版社,2011:122.
- [3] 杨磊. 重力坝极限抗震能力分析及其工程应用[J]. 云南水力发电,2019,35(3):94-98.
YANG L. Analysis method and engineering application of gravity dams maximum anti-seismic capacity[J]. Yunnan Water Power, 2019, 35(3): 94-98.
- [4] 曹阳. 混凝土重力坝水下接触爆炸的毁伤特性及抗爆措施研究[D]. 大连:大连理工大学,2017:43.
CAO Y. Study on damage characteristic and anti-knock measures of concrete gravity dam subjected on underwater contact explosive[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017: 43.
- [5] 徐强,徐舒桐,陈健云,等. 混凝土重力坝的耐震时程损伤指标分析方法[J]. 振动工程学报,2019,32(3):452-461.
XU Q, XU S T, CHEN J Y, et al. Analysis method of endurance time damage factors for concrete gravity dam[J]. Journal of Vibration Engineering, 2019, 32(3): 452-461.
- [6] 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,2014:52.
WANG G H. Dynamic response and damage mechanism of concrete gravity dams under extreme loadings[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014: 52.
- [7] 石强,李艳玲,吴震宇,等. 考虑震损指标相关性的重力坝地震易损性分析[J]. 人民黄河,2017,39(12):109-112,116.
SHI Q, LI Y L, WU Z Y, et al. Seismic fragility analysis of gravity dam based on correlation between single peak area and damage index[J]. Yellow River, 2017, 39(12): 109-112, 116.
- [8] 郑晓东,郝建国,李丹丹. 基于增量动力分析的重力坝抗震性能评估[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2020,18(2):184-190.
ZHENG X D, HAO J G, LI D D. Evaluation of seismic performance of gravity dam based on incremental dynamic analysis[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(2): 184-190.
- [9] 马上,陈叶青,王振清,等. 水下爆炸离心机试验中爆炸荷载的缩比关系研究[J]. 土木工程学报,2021,54(10):10-29.
- MA S, CHEN Y Q, WANG Z Q, et al. Study on load scaling relationship in centrifuge test of underwater explosive[J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(10): 10-29.
- [10] 张克钊. 常规弹药打击下的混凝土重力坝目标易损性分析方法及应用研究[D]. 长沙:国防科技大学,2022.
ZHANG K F. Research on vulnerability analysis method and application of concrete gravity dam under conventional weapon attack[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2022.
- [11] 许红涛,卢文波,蔡联鸣. 邻近爆破对坝基灌浆帷幕的影响机理研究[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(8):1325-1329.
XU H T, LU W B, CAI L M. Mechanism study of blast-induced influence on vicinal curtain grouting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(8): 1325-1329.
- [12] 张俊. 爆破振动对水泥灌浆帷幕的影响机理研究[D]. 武汉:武汉大学,2017:64.
ZHANG J. Study on the influence mechanism of blasting vibration on cement grouting curtain[D]. Wuhan: Wuhan University, 2017: 64.
- [13] 中国工程爆破协会. 爆破安全规程:GB 6722—2003[S]. 北京:国家安全生产监督管理局,2003.
- [14] 杨建超,王幸,张强,等. 钢筋混凝土板震塌碎片特性试验[J]. 科学技术与工程,2021,21(5):1690-1695.
YANG J C, WANG X, ZHANG Q, et al. Test of fragments characteristics of reinforced concrete slab caused by spalling[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(5): 1690-1695.
- [15] 张志华,刘磊,王亚,等. 混凝土爆破试验及数值模拟[J]. 矿冶,2018,27(6):34-37.
ZHANG Z H, LIU L, WAN Y, et al. Blasting experiment and numerical simulation of concrete[J]. Mining Metallurgy, 2018, 27(6): 34-37.
- [16] 全国安全生产标准化技术委员会化学品安全分技术委员会. 化工企业定量风险评价导则:AQ/T 3046—2013[S]. 北京:国家安全生产监督管理总局,2013.
- [17] BULMASH G, KINGERY C N. Airblast parameters from TNT spherical air burst and hemispherical surface burst[R]. USA: Aberdeen: Ballistic Research Laboratory of Aberdeen Proving Ground, 1984.
- [18] 中国电子工程设计院. 电子信息系统机房设计规范:

- GB 50174—2008[S]. 北京: 中国工业和信息化部, 2008.
- [19] 高康华, 李斌, 孙宇都, 等. 外爆条件下冲击波与组合壳结构的相互作用[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(5): 13-23.
- GAO K H, LI B, SUN Y D, et al. Interaction of a shock wave with a composite shell structure under a external explosion[J]. Explosion and Shock Waves, 2019, 39(5): 13-23.
- [20] 李伟健, 郑晴. 爆炸冲击载荷作用下混凝土墙动态响应分析[J]. 计算机仿真, 2016, 33(2): 27-31.
- LI W J, ZHENG Q. Analysis of dynamic response for concrete wall under blast load[J]. Computer Simulation, 2016, 33(2): 27-31.