

水下核爆作用下混凝土重力坝模型破坏试验

陆路, 李昕, 周晶*

(大连理工大学 水利工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 采用落锤冲击模拟水下核爆的一次冲击波对混凝土重力坝的作用. 试验遵循弹性-重力联合相似准则, 并以冲量相似条件确定冲击摆的质量与悬挂高度. 对两种坝体和坝基接触条件, 即一种在平滑基底上筑坝, 一种在锚固基底上筑坝, 开展模型坝的冲击试验, 得到模型坝体的动力特性. 试验结果表明, 坝体破坏模式包括贯穿性断裂、滑移、碎裂、层裂和抛掷等, 并初步研究了核爆输入能量和大坝耗散能量之间的平衡关系.

关键词: 混凝土重力坝; 水下核爆; 机械冲击试验; 破坏模式

中图分类号: TV322; O383.2 **文献标志码:** A

0 引言

目前各国学者就水下爆炸作用下水中结构的响应开展了大量的实验研究. 如 Rajendran 对 4 mm 厚的 300 mm×250 mm 的矩形板及直径 290 mm 的圆柱壳(长 1 m)作了系列水下爆炸荷载作用下的响应试验, 测得不同爆炸距离下高强度合金钢(HSLA)的应变分布情况^[1]; Ramajeyathilagam 对长×宽×厚为 0.55 m×0.45 m×0.004 m 的长方体高强度低合金钢进行了水下爆炸荷载作用下的响应试验, 得到了矩形板在不同炸药量及不同作用距离下的非线性瞬态动力响应, 试验结果同数值研究结果十分吻合^[2]; Houlston 等对不同强度的方形薄板进行了水下爆炸试验研究, 获得响应的位移分布值^[3,4]. 张效慈等对钢质圆柱壳(直径 0.5 m, 长 1 m, 壁厚 5 mm)进行了 1 kg TNT 不同作用距离下的水下爆炸动态响应试验研究, 获得了不同部位的应变分布值^[5]; 李国华等对浮动平台进行了水下爆炸冲击谱的测量与分析^[6]. 进行实船水下爆炸试验研究十分昂贵, 目前比较少见. 意大利在退役的“EXMARGOTTIN1”号驱逐舰上进行了全尺度的 6 次不同强度的水下爆炸试验, 获得了全船及加筋板在水下爆炸荷载作用下动态响应分布^[7]; 高秋新对 2 500 t 级驱

逐舰进行了实船水下爆炸试验, 获得舰船受振荡效应下的振型和频率^[8]; 中国船舶科学研究中心将某驱逐舰缩比成弹性船模, 进行了水下爆炸荷载作用下的动态响应试验^[9]; 张绮蓉等对某舰船进行了水下非接触爆炸试验, 获得了水下爆炸对舰船总纵强度与局部强度的影响^[10]. 综上所述可以看到, 水下爆炸对水中结构响应的试验研究主要集中于金属材料及舰船.

水利枢纽工程的关键建筑——大坝的安全, 直接关系到下游的工农业生产和人民的生命安全. 文献[11]数模了水库中小剂量药包爆炸时混凝土重力坝的弹性响应, 但人们更关心的是水库中核爆对大坝破坏程度的估计. 由于还不能建立混凝土在强冲击作用下破坏机制精确的计算模型, 目前还难以对这一过程进行数值仿真模拟. 本文试用机械冲击模拟大坝在强冲击波作用下的破坏过程, 开展大坝在核爆作用下的破坏试验.

1 模型试验方法

1.1 原型重力坝及试验方法

本文模型试验对象为一混凝土重力坝, 高 150 m, 上游坡直立, 下游坡度 1:0.75, 如图 1 所示. 假设有一个 $W=10^6$ t TNT 当量的核弹在坝体上游 $R=637$ m 处的水库中爆炸, 即采用 TNT

爆炸来模拟核爆炸,但实际上模拟原型坝体存在困难,如 TNT 的密度按 1.6 t/m^3 计,那么 10^6 t TNT 当量的核弹相当于一直径 $d\approx 106\text{ m}$ 的球形 TNT 药包,假设水库的深度 h 为 150 m ,则 $h/d\approx 1.50$,这不可能形成深水爆炸的效果.

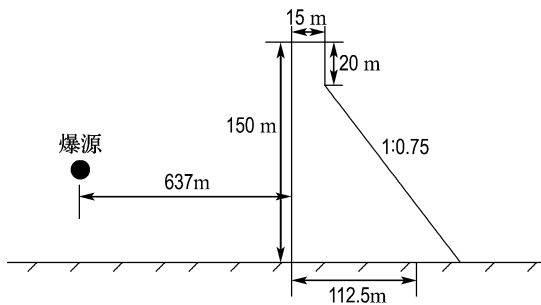


图 1 原型重力坝
Fig. 1 Prototype of gravity dam

假定水库中核爆对大坝的破坏作用主要源自一次冲击波,核爆时水面水底现象及二次波动对大坝的破坏作用可以忽略,那么可以采用简单的机械冲击来模拟一次冲击波.在 19 世纪 70 年代,霍布金斯曾经用落体方法使钢丝突然受拉伸来测量钢丝的强度.本文则用落体方法来形成作用在坝体上的冲击波,如规定的原型大坝,取一次冲击波的最大压强 $p_m=73.245\text{ MPa}$,历时曲线示于图 2.显然,对于极短历时的强冲击过程,对大坝的破坏作用取决于总冲量 I 的大小,而压强 p 的历时影响不大.

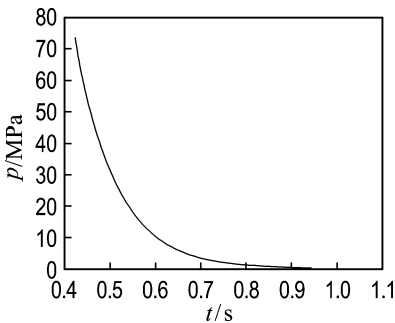


图 2 $W=10^6\text{ t}$, $R=637\text{ m}$ 时水中冲击波压强与时间关系

Fig. 2 Relation between underwater shock wave pressure and time for $W=10^6\text{ t}$, $R=637\text{ m}$

设作用在原型大坝上游面面积 A_p 上的总冲量为 I_p ,那么按相似关系可以确定作用在相应模型坝上游面面积 A_m 上的总冲量

$$I_m = I_p / \lambda_I \tag{1}$$

式中: λ_I 为冲量比尺.根据 I_m 选定冲击体的悬挂

高度和质量.

1.2 试验设计

1.2.1 相似关系 试验遵循弹性-重力相似律.

$$\lambda_t^2 = \lambda_l^2 \cdot \lambda_\rho \cdot \lambda_E^{-1}; \lambda_a = 1 \tag{2}$$

式中: λ_t 为时间比尺; λ_l 为几何比尺; λ_ρ 为密度比尺; λ_E 为弹性模量比尺; λ_a 为加速度比尺.

本试验的特点是以原型冲量 I_p 作为模型设计的控制量.因

$$I = F \cdot t \tag{3}$$

式中: F 为作用力; t 为时间,所以 I 的相应比尺

$$\lambda_I = \frac{I_p}{I_m} = \lambda_F \cdot \lambda_t \tag{4}$$

式中: λ_F 为外力比尺.因进行满库试验时,有 $\lambda_\rho = 1$,所以

$$\lambda_I = \lambda_\rho \cdot \lambda_l^3 \cdot \lambda_a \cdot \lambda_l^{1/2} = \lambda_l^{7/2} \tag{5}$$

因此模型中的 I_m 由下式确定:

$$I_m = I_p / \lambda_I^{2/7} \tag{6}$$

I_p 为已知值, λ_l 根据具体条件选定.

因为试验中用质量为 M_m 的悬锤形成冲量,所以若悬锤悬挂位置与冲击点位置的高差为 H_{om} ,那么悬锤到达坝面时的冲量

$$I_m = M_m \sqrt{2gH_{om}} \tag{7}$$

由式(7)可知对给定的 I_m 可以有 M_m 和 H_{om} 的不同组合,可根据条件选择.

1.2.2 模型材料 模型材料是指模拟重力坝的修建材料——混凝土的材料.本试验模型采用材料为由水泥、粉煤灰、矿石粉、重晶石粉和水按一定比例配制而成的仿真混凝土.在浇注模型坝的同时,浇注立方体试块,用 SANS 型 10 t 压力机进行材料的抗压试验.2 组冲击试验的模型材料主要力学指标列于表 1.

表 1 模型坝材料的主要力学指标
Tab. 1 Basic mechanical properties of model dam material

试验 编号	E/MPa	抗压强度 f_c/MPa	抗拉强度/ MPa	峰值 应变	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
1	4.947 2	0.272 5	0.017 2	0.064 7	2 900
2	3.873 5	0.184 8	0.015 4	0.057 8	2 900

本试验取几何比尺 $\lambda_l=200$,若原型混凝土的抗压强度和抗拉强度分别按 $40\times 10^6\text{ Pa}$ 和 $4\times 10^6\text{ Pa}$,密度 $2\,400\text{ kg/m}^3$,那么要求模型坝的抗压、抗拉强度和密度分别为 0.2×10^6 、 $0.02\times 10^6\text{ Pa}$ 和 $2\,400\text{ kg/m}^3$.表 1 中的这 3 个指标虽然和要求值有一定差异,但差别还不是很大.虽然模型

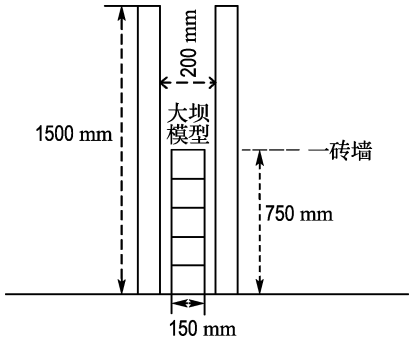
材料的弹性模量比要求值低很多,但对强冲击破坏试验起控制作用的应是强度,弹性模量的差异不至于引起显著的影响.

1.3 试验装置

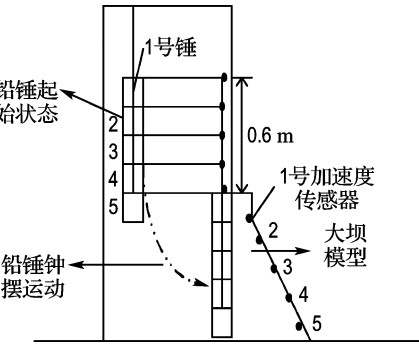
由于核爆产生的冲击波强度高,冲击波在水中传播速度快,在一定范围内球面波可以作为平面波来考虑,坝体上游面受到的核爆冲击荷载可以认为沿坝高和坝轴线方向均是均匀分布的,同时考虑到坝体横向分缝形成坝段,各个坝段独立工作,所以取一个坝段研究可以代表整个坝体.

试验装置的后视图和侧视图分别示于图 3(a)和 3(b). 模型坝高 0.75 m;模型坝宽度取值约为 0.15 m,相当于原型的坝段宽 30 m(几何比尺为 200). 其他尺寸均示于图 3. 采用 5 个悬锤,悬吊高度均为 0.6 m,悬锤是铅制成的立方体,其尺寸为 0.15 m×0.15 m×0.086 0 m. 5 个悬锤作用坝面时保证全坝高同一时刻均受到冲击荷载. 悬锤的质量 M_m 由下式确定:

$$M_m = \frac{I_m}{\sqrt{2gH_{om}}} = \frac{52.287\ 7}{\sqrt{2 \times 9.8 \times 0.60}}\ \text{kg} = 15.25\ \text{kg}$$



(a) 后视图



(b) 侧视图

图 3 试验装置示意图

Fig. 3 Sketch of test rig setup

浇注模型坝时分成两种情况:一是直接在光

滑底板上浇筑,二是在有锚钉的底板上浇筑. 在邻近坝下游面埋设了 AR-5F 型号加速度传感器,它的位置示于图 3(b). 冲击前的第一种模型示于图 4.

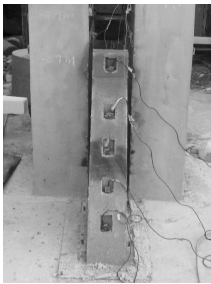


图 4 冲击前的第一种模型

Fig. 4 Type one model before impact

2 试验结果

2.1 第一种模型的试验结果

各坝块反应特征列于表 2. 冲击后的坝体破坏状态示于图 5,冲击后加速度传感器复零良好,5 个加速度传感器的历时曲线分别示于图 6(a)~(e).

表 2 坝体对冲击反应的主要动力特征

Tab. 2 Dynamic characteristics of dam response under impact

坝底条件	坝块号	振动频率/Hz	最大加速度/ g
第一种 条件 (坝底 无锚固)	1	41.13	13.56
	2	40.95	9.26
	3	41.70	9.59
	4	41.70	7.10
	5	41.82	5.33
第二种 条件 (坝底 有锚固)	1	37.50	11.37
	2	42.70	5.56
	3	39.60	3.55
	4	36.70	2.81
	5	37.70	2.88

注:表中坝块号与图 3 中加速度传感器号保持一致



图 5 第一种模型冲击后的坝体破坏模式

Fig. 5 Failure mode of type one model dam after impact

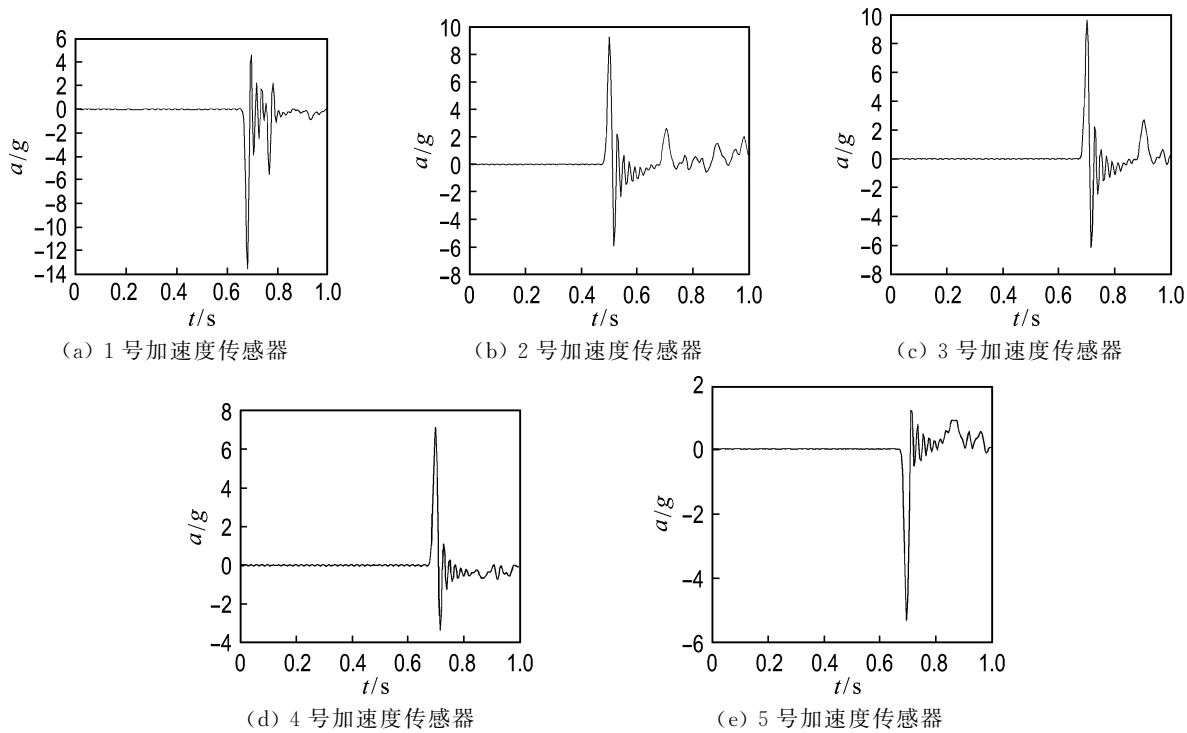


图 6 冲击后第一种模型加速度传感器响应的历时曲线

Fig. 6 Acceleration sensor response time history curves of type one model dam after impact

2.2 第二种模型的试验结果

在相同的冲击下,第二种模型的 1 号与 5 号加速度传感器的记录示于图 7(a)与 7(b),冲击后的破坏坝体示于图 8,各坝块反应特征也列于表 2.

3 试验结果分析

3.1 破坏模式

强冲击作用下坝体内的应力分布比较复杂,所以坝体的失效模式也有多种.有的是因裂缝扩展而形成的贯穿性断裂,如图 5 中的基底裂缝和上部的水平裂缝;有的是因冲击应力过大,冲击时间过短,裂纹来不及扩展而引起的局部碎裂,如图 5 中上游面和图 8 中的碎块.所以总体而言,强冲击下是断裂、碎裂、层裂^[12]、滑移和抛掷的组合破坏模式.

比较图 5 和 8 发现,两个模型坝的破坏特征有较明显的区别.图 5 中的坝底贯穿性剪断,坝的第 5 块(最下一块)在模型中滑动 0.13 m,如按变形相似比尺(等于几何比尺)换算,原型中滑动 26 m;第 3、4、5 号坝块内无贯穿性裂缝,保持良好的整体性;在 2 号坝块以下的下游面,仍基本保持光

滑状态,无痂片痕迹.图 8 中的模型,由于坝底锚

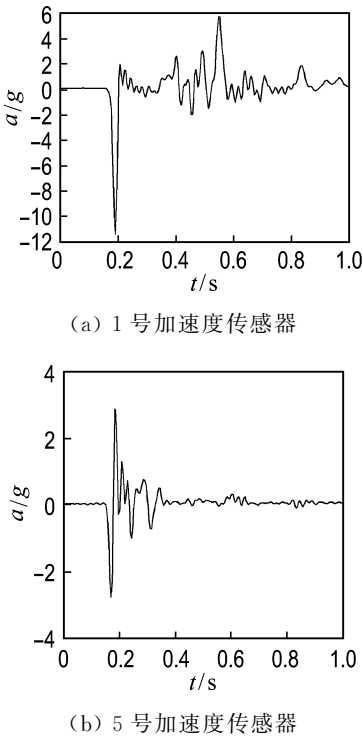


图 7 冲击后第二种模型加速度传感器响应的历时曲线

Fig. 7 Acceleration sensor response time history curves of type two model dam after impact



图 8 第二种模型冲击后的坝体破坏模式
Fig. 8 Failure mode of type two model dam after impact

固,坝底虽碎裂,但不能确切判断是贯穿性剪断.第 5 号坝块基本上无整体滑移;距坝底 0.28 m 以上的坝块都已破碎,被抛掷;坝的整个下游面都已成碎块散落.出现如上差异的原因有二:坝体的固结方式;坝体材料强度的差异.图 5 中的坝体受冲击后坝底很快被剪断,坝体滑移,因此冲击荷载部分释放,减小了坝体中的冲击应力,再加上坝体强度较图 8 中的坝体强度大,所以破碎程度较轻.但对原型而言,无论形成图 5 还是图 8 中的破坏,计及库水的作用都会形成毁灭性的灾害.

3.2 冲击弹性模量与冲击阻尼

受应变速率的影响,混凝土的动弹性模量大于静弹性模量,但常用的动弹性模量也都是在应力不大、应变速率不高的条件下测定的,布里奇门(1931 年)曾指出:“固体的体积压缩模量 K 在高压时升高.” K 与弹性模量 E 之间存在线性关系,所以可推断强冲击下混凝土的动弹性模量将高于通常所应用的动弹性模量.

图 6 是第一种模型上的 5 个传感器的加速度历时曲线,应力波到达时加速度急剧升高,应力波通过后则为坝的衰减自振.5 个加速度传感器曲线基本一致.相应的振动频率列于表 2,平均频率约为 41.5 Hz.用 ANSYS 有限元程序进行试算后,得与 $\rho=2\,900\text{ kg/m}^3$ 、 $f_0=41.5\text{ Hz}$ 相应的模型坝的冲击弹性模量 $(E_I)_m=2.38\times10^8\text{ Pa}$,远大于表 1 中用静力测定的弹性模量 $(E_0)_m=4.95\times10^6\text{ Pa}$. $(E_I)_m$ 还略大于要求值 $1\times10^8\text{ Pa}$,但原型的弹性模量 $2\times10^{10}\text{ Pa}$ 不是在冲击条件下确定的.

3.3 冲击应力

因为只在靠近坝的下游面埋设了加速度传感器,所以只能估计传感器处的冲击应力.令坝体

中的位移为 d ,模型中的冲击接近平面问题,则 d 沿 X 向(坝体横向)的传播过程近似为(沿坝高向为常数)

$$d = f(C_0 t - x) \tag{8}$$

式中: x 为离上游坝面的距离; C_0 为坝体的纵波波速; f 为任意函数.把式(8) 分别对 x 和 t 求导,则有

$$\frac{\partial d}{\partial x} = -f'(C_0 t - x) \tag{9}$$

$$\frac{\partial d}{\partial t} = C_0 f'(C_0 t - x) \tag{10}$$

式中: f' 表示对函数 f 求导.由式(9)、(10) 可得

$$\frac{\partial d}{\partial t} = -C_0 \frac{\partial d}{\partial x} \tag{11}$$

而

$$\frac{\partial d}{\partial x} = \epsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} \tag{12}$$

所以有

$$\sigma_x = -\frac{E}{C_0} \frac{\partial d}{\partial t} = -\rho C_0 \frac{\partial d}{\partial t} = -\rho C_0 v \tag{13}$$

式中: v 是坝体中质点运动的速度,其中 $C_0 = \sqrt{E/\rho}$.

根据图 6,可近似令加速度

$$a = a_0 e^{-\xi\omega_0 t} \sin \omega_0 t \tag{14}$$

由式(13) 可得

$$v = \frac{a_0 e^{-\xi\omega_0 t} (-\xi \sin \omega_0 t - \cos \omega_0 t)}{\omega_0 (1 + \xi^2)} \tag{15}$$

显然

$$v_{\min} = \frac{-a_0}{\omega_0 (1 + \xi^2)} \approx \frac{-a_0}{\omega_0} \tag{16}$$

因此

$$(\sigma_x)_{\max} = \rho C_0 \cdot \frac{a_0}{\omega_0} = \frac{a_0}{\omega_0} \sqrt{E\rho} \tag{17}$$

各个坝块的 C_0 、 ω_0 是相同的,但各坝块的 a_0 不一样.如 1 号坝块 $a_0 = 14g$,则 $(\sigma_x)_{\max} = 0.44 \times 10^6\text{ Pa}$;3 号坝块的 $a_0 = 10g$,则 $(\sigma_x)_{\max} = 0.31 \times 10^6\text{ Pa}$.由于 1 号坝块已碎裂,3 号坝块外观仍完整,由此可以近似判断图 5 模型坝的实际抗压强度为 $0.3 \times 10^6\text{ Pa} < f_c < 0.5 \times 10^6\text{ Pa}$,远大于表 1 中的抗压强度,这正如文洛克等(1933 年)早就指出的“随着变形速度的增大断裂应力也增大;如果变形速度足够大,那么材料不产生预先的屈服就开始破坏.”

3.4 能量平衡

以第一种模型为例,分析本试验系统能量的输入与输出.能量输入:进行过无坝时的摆下落试验,摆越过最低点后的回复高程基本和初始高程一致,所以可以忽略摆的摩擦损失,且假定摆与坝面撞击后速度立即为零,因此系统的输入能量为

$$E_i = 5M_m g H_{om} \tag{18}$$

当 $H_{om} = 0.6\text{ m}$, $E_i = 448.35\text{ J}$.

坝体的耗散能量包括坝体滑移能量、断裂能、头部抛掷所需能量、振动阻尼耗能、碎裂能及其他耗能,具体计算如下:

(1) 坝体滑移能量

$$E_{no1} = M g f s \tag{19}$$

式中: M 为坝体质量,本试验 $M = 99.62\text{ kg}$; f 为坝体底面与坝基的摩擦因数,取 0.8 ; s 为坝体移动距离,本试验 $s = 0.13\text{ m}$.则得到 $E_{no1} = 101.53\text{ J}$.

(2) 水平裂缝的断裂能

$$E_{no2} = A G_f \tag{20}$$

式中: A 为断裂面积; G_f 为单位裂缝面积所吸收的能量. G_f 较难确定,根据线弹性断裂力学理论, G_f 与 K_{Ic} 、 E 之间有如下关系:

$$G_f = K_{Ic}^2 / E \tag{21}$$

文献[13]建议

$$K_{Ic} \approx 0.23 f_c \tag{22}$$

式中: f_c 为 $10\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ 混凝土试件的立方体强度, K_{Ic} 为断裂韧度.

如用表 1 中的 f_c 和 E 及式(21)、(20),得出的 $G_{f1} \approx 800\text{ N/m}$,远大于文献[14]中常规混凝土的试验结果 $G_f = 110 \sim 150\text{ N/m}$ (相应的 $f_c = 23.8\text{ MPa}$).若采用本文冲击试验的估计值则 G_f 会减小, $G_{f2} \approx 43\text{ N/m}$,当取 $G_{f1} = 800\text{ N/m}$,那么 $E_{no2} = 0.122\text{ m}^2 \times 800\text{ N/m} = 97.6\text{ J}$;若取 $G_{f2} \approx 43\text{ N/m}$,则 $E_{no2} = 0.122\text{ m}^2 \times 43\text{ N/m} = 5.25\text{ J}$.

(3) 头部的抛掷能量

$$E_{no3} = \frac{1}{2} M_0 v_t^2 = \frac{M_0 g l^2}{4 y} \tag{23}$$

式中: M_0 为抛掷部分的质量; l 为抛掷距离; y 为抛掷体原始位置离地面的高度.取 $M = 5\text{ kg}$, $l = 1.40\text{ m}$, $y = 0.6\text{ m}$,则 $E_{no3} = \frac{5 \times 9.8 \times 1.4^2}{4 \times 0.6}\text{ J} = 40.0\text{ J}$.

(4) 坝体的振动阻尼损耗(按 1 周计)

$$E_{no4} \approx 2 \pi a_0 y_0 \varphi \approx 14\text{ J} \tag{24}$$

式中: a_0 为加速度峰值, φ 为阻尼比, y_0 为振幅.

(5) 坝体的破碎能

突加应力很大时应力会引起坝体碎裂.坝在刚受到冲击后,外观完整的混凝土 1 d 后会破碎成小碎块,此种形式消耗的能量即为破碎能.曾纳(1952)描述过一个例子:“穿甲弹垂直射入并穿透装甲板后不立即发生破坏,但是在穿过后几分钟至几天的时间内,穿甲弹的头部却发生碎裂”.破碎能可用下式估计^[15]:

$$E_{no5} = \xi (E_i - (E_{no1} + E_{no2} + E_{no3} + E_{no4})) \tag{25}$$

式中: ξ 为小于 1 的一个系数.图 8 的模型整体位移基本为零,即 $E_{no1} \approx 0$,所以 E_{no5} 比较大,碎裂程度高于图 5 中的模型.

(6) 其他耗能

把混凝土坝受到强冲击后产生的热能等耗能归结在一起用 E_{no6} 表示:

$$E_{no6} = E_i - (E_{no1} + E_{no2} + E_{no3} + E_{no4} + E_{no5}) \tag{26}$$

4 结 论

(1)采用机械冲击模拟水下核爆,基于弹性和重力联合相似准则,开展混凝土重力坝的破坏试验是可行的.

(2)坝体与坝基的接触程度决定了大坝在冲击荷载作用下的破坏模式.当坝体与坝基弱连接时,冲击荷载作用下坝体发生较大的整体位移,坝体上部破碎;当坝体与坝基锚固连接时,冲击荷载作用下坝体无明显的整体位移,但坝体上部破碎范围明显扩大.

(3)通过模型试验发现,在高强度冲击荷载作用下坝体的强度、弹性模量和阻尼比均远大于静力试验或地震等动力试验所得到的结果,需要进一步开展材料试验研究.

参考文献:

[1] RAJENDRAN R. Linear elastic shock response of plane plates subjected to underwater explosion [J]. International Journal of Impact Engineering, 2001,

25:493-506

- [2] RAMAJEYATHILAGAM K. Non-linear transient dynamic response of rectangular plates under shock loading [J]. **International Journal of Impact Engineering**, 2000, **24**:999-1015
- [3] HOULSTON R, SHATEN J E. Structural response of panels subjected to shock loading [C] // **55th Shock and Vibration**. Doyton: US Naval Research Lab, 1985
- [4] HOULSTON R. Damage assessment of naval steel panels subjected to tree-field and enhanced air-blast loading [C] // **Advances in Marine Structures-2**. Essex:Elsevier Science Publishers Ltd. , 1991
- [5] 张效慈,李玉节,赵本立. 深水爆炸水动压力场对潜体结构的动态影响[J]. 中国造船, 1997, **38**(4):61-68
- [6] 李国华,李玉节,张效慈. 浮动冲击平台水下爆炸冲击谱测量与分析[J]. 船舶力学, 2000, **4**(2):50-60
- [7] 彭兴宁. 船舶结构对水下非接触爆炸的响应[J]. 舰船力学情报, 1994(3):26-33
- [8] 高秋新. 爆炸引起的船体振荡[J]. 舰船力学情报, 1992(9):41-47
- [9] 李珙华. $\times\times\times$ 舰弹性船模的三维水弹性理论分析及试验结果比较[R] // 中国船舶科学研究中心科技报告. 武汉:中国船舶科学研究中心, 1994
- [10] 航空航天部六零三研究所. GJB 2329—95 舰船抗核加固总要求[S]. 北京:国防工业技术委员会, 1995
- [11] 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
- [12] 张 磊,胡时胜,陈德兴,等. 混凝土材料的层裂特性[J]. 爆炸与冲击, 2008, **28**(3):193-199
- [13] 于晓中,居 襄. 混凝土的强度和破坏[J]. 水利学报, 1983(2):22-35
- [14] 于晓中,张玉美,郭桂兰,等. 混凝土断裂能 G_F [J]. 水利学报, 1987(7):30-37
- [15] 朱 锡,侯海量,谷美邦,等. 抵御小口径火炮弹道侵彻装甲防护模拟实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2006, **26**(3), 263-268

Destructive tests of concrete gravity dam under underwater nuclear explosion

LU Lu, LI Xin, ZHOU Jing*

(School of Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Dropping hammers impact is adopted to simulate the impact wave loading of underwater nuclear explosion imposed on concrete gravity dam. Joint elastic similitude and gravity similitude are used to design model test of gravity dam under impact loading. Based on the impulse similitude, mass and position of each hammer are determined. Two kinds of contact conditions between dam and base, such as weak contact, and anchoring contact, are selected to carry out destructive tests of concrete gravity model dam under impact loading. The experimental results show that failure modes of concrete gravity dam under impact include cracking, sliding, fragmenting, spalling and throwing. Meanwhile, energy balance between input energy from nuclear explosion and dissipation energy is studied preliminarily.

Key words: concrete gravity dam; underwater nuclear explosion; mechanical impact tests; failure modes