

# 波浪冲击作用下核电站防浪堤动力响应的数值模拟

楼云锋<sup>1,2</sup>, 杨 勋<sup>1,2</sup>, 王洪良<sup>3</sup>, 葛鸿辉<sup>3</sup>, 金先龙<sup>1,2</sup>

(1. 上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240; 2. 上海交通大学 机械系统与振动国家重点实验室, 上海 200240;  
3. 上海核工程设计研究院, 上海 200233)

**摘 要:** 基于多物质 ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian) 方法, 利用带阻尼罚函数实现波浪与防浪堤结构间耦合作用, 模拟波浪冲击作用下防浪堤结构及流体三维动态响应过程, 所得结果与物理模型试验结果一致性较好。讨论挡浪墙表面波压力分布及挡浪墙所承受最大水平推力及结构动态响应对波浪冲击系数影响。结果表明, 前挡浪墙静水面位置与后挡浪墙底部波压力较大; 后墙承受波浪水平推力较大; 结构动态响应会增强波浪的冲击作用。仿真结果可作为防浪堤强度设计重要依据及控制越浪量设计参考。

**关键词:** 核电站防浪堤; 多物质 ALE; 物理模型试验; 冲击响应; 压力分布

**中图分类号:** O353.4; U656.2 **文献标识码:** A

## Numerical simulation of the dynamic response of breakwater under wave impact

LOU Yun-feng<sup>1,2</sup>, YANG Xun<sup>1,2</sup>, WANG Hong-liang<sup>3</sup>, GE Hong-hui<sup>3</sup>, JIN Xian-long<sup>1,2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao tong University, Shanghai 200240, China;

2. State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, Shanghai Jiao tong University, Shanghai 200240, China;

3. Shanghai Nuclear Engineering Research and Design Institute, Shanghai 200233, China)

**Abstract:** To understand and improve the anti-wave-impact performance of coastal breakwater, the dynamic behaviors of breakwater under wave impact were numerically simulated. The wave movement was modeled by using the multi-material arbitrary lagrangian-eulerian (ALE) method. The interaction between breakwater structure and fluid was studied by applying the penalty method. The model and approaches were validated by comparing numerical results with experimental data. Based on the above investigation, a numerical simulation was performed to explore the wave pressure distribution of seawall surface and the maximum horizontal thrust. The effect of structure response of breakwater on wave pressure was also dealt with. The results show that: the wave pressures are in good agreement with the experimental results, the wave impact is enhanced by structural dynamic response, and the rear wall withstands the larger horizontal wave thrust. The results can provide references to the anti-wave-impact design and overtopping design of coastal nuclear power plant breakwaters.

**Key words:** breakwater of nuclear power plant; multi-material ALE; physical model test; impulse response; pressure distribution

防浪堤结构广泛用于沿海港口、沿海核电站等重要设施, 日本 3.11 地震海啸中釜石港防波堤有效阻挡了海啸冲击速度, 减轻了大风浪对沿海设施造成的破坏。对防浪堤抗震、抗波浪冲击及越浪问题已有研究, 其中防浪堤抗大风浪冲击研究由于冲击过程含较复杂的流-固耦合瞬态冲击问题, 采用何种有效方法分析

该问题成研究重点。

Isaacson 等<sup>[1]</sup>理论研究波浪对水平圆柱的冲击作用, 获得最大冲击系数  $C_s = 3.04 \sim 7.79$ , 考虑结构动力响应等因素修正后为 4.29。Cuomo 等<sup>[2]</sup>为研究波浪对竖直墙冲击作用力, 通过物理模型试验总结出竖墙表面波压力计算经验公式。随计算方法的改进与计算机性能的提高, 数值模拟可能会发挥更大作用。Hajivalie 等<sup>[3]</sup>采用 RANS 模型模拟二维直立式防浪堤受孤波冲击及越浪过程。Hur 等<sup>[4]</sup>通过 VOF 模型与多孔体模型相结合数值模拟研究三维潜堤的波浪力, 结果与经验公式吻合。Losada 等<sup>[5-6]</sup>采用 COBRAS 模型对斜坡堤

基金项目: 国家自然科学基金项目(11072150); 国家自然科学基金(61073088);

国家 863 重大项目课题(2012AA01AA307)

收稿日期: 2012-12-20 修改稿收到日期: 2013-08-21

第一作者 楼云锋 男, 博士生, 1987 年生

通讯作者 金先龙 男, 教授, 博士生导师, 1961 年生

冲击越浪过程进行模拟,所得数据与实验一致。而 Zhang 等<sup>[7]</sup>运用 ALE 方法分析船舶碰撞时流固耦合作用,认为 ALE 方法较好反映液体与固体间作用。Marco 等<sup>[8]</sup>研究箱内液面大幅晃动问题,将 ALE 方法与其它数值模拟方法进行比较,且与实验结果吻合较好。通过简单结构物模试验研究总结出诸多规律及理论模型。但对复杂三维模型,理论方法显然不适用。物模试验往往既存在试验繁杂又面临数据检测困难等问题。因此,选择合适的流-固耦合计算方法,采用数值模拟结合物模试验验证参数为主要研究方向。

本文针对波浪冲击的防浪堤动态响应进行数值模拟。通过动态接触法<sup>[9]</sup>建立防浪堤整体结构模型,流体部分基于 ALE 方法建模<sup>[10]</sup>,并利用罚函数法<sup>[11]</sup>实现流固耦合。通过试验验证方法的可靠性,进一步用数值模拟方法分析波压力分布、挡浪墙在冲击过程中承受的最大水平推力及结构动态响应对波浪冲击系数影响。

## 1 方法与原理

利用多物质 ALE 方法与罚函数方法相结合对防浪堤受波浪冲击现象进行数值模拟。罚函数方法通过计算穿透速度与时间计算穿透量,再由穿透量计算耦合力,以保证耦合过程中能量守恒。ALE 方法综合 Lagrange 方法与 Euler 方法优点,在材料域、空间域外引入参考域,并在参考网格上通过算子分裂法求解,可克服 Lagrange 方法中网格大变形问题及 Euler 方法移动边界问题。多物质 ALE 法采用 VOF 方法由计算网格单元中体积比函数 F 确定物质面,追踪流体变化。

基于 ALE 方法的流体连续性方程、动量方程及网格更新过程为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} \Big|_x + c_i \frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \rho \frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial \rho}{\partial t} \Big|_x + \rho c_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + b_i \quad (2)$$

$$\frac{\partial x_i}{\partial \chi_j} \omega_j = c_i \quad (3)$$

式中: $\chi$  为参考坐标; $v_i$  为流体流动速度; $x_i, x_j$  为空间坐标; $c_i, c_j$  为对流速度; $\rho$  为流体密度; $b_i$  为流体力; $\sigma_{ij}$  为应力张量。

防浪堤结构采用弹性体连续方程:

$$\rho_s \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \Big|_x = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + f_i \quad (4)$$

式中: $X$  为 Lagrange 坐标; $\rho_s$  为容器密度; $f_i$  为体力; $u$  为固体结构位移。

为适应显式格式求解,采用弱可压缩流体,引入线性牛顿流体本构方程:

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + 2\mu s_{ij} \quad (5)$$

式中: $p$  为流体静水压力; $\mu = \mu(s_{ij})$  为动力粘性系数,牛顿模型中为常数; $s_{ij}$  为应变率张量; $\delta_{ij}$  为克罗内克常数。弱可压缩流体求解需材料模型与状态方程配合使用。

流固耦合需在液体、结构界面满足几何相容条件及力的平衡条件,即:

$$v_i = v_s = \frac{\partial u}{\partial t} \Big|_x, \quad F_f + F_s = 0 \quad (6)$$

式中: $v_i, v_s$  为流固耦合界面水流动速度、固体材料速度; $F_f, F_s$  为流、固体结构作用在流固耦合界面的力,可由罚函数方法计算获得:

$$F_s = \frac{d^2 Z}{dt^2} + \xi \frac{dZ}{dt} + \omega^2 Z \quad (7)$$

式中: $Z$  为穿透量; $\xi$  为阻尼系数, $\xi \leq 2\omega$  时,振荡趋于收敛。因此可用于消除计算中的振荡;定义  $\omega = \sqrt{k \frac{m_s + m_f}{m_s - m_f}}$ ,  $m_s, m_f$  为固体、流体质量; $k = \frac{\alpha K_i A_i^2}{V_i}$ ,  $K_i$  为单元容积模量, $A_i$  为单元面积, $V_i$  为单元体积, $\alpha$  为缩放系数。据以上算式可得阻尼系数  $\xi$ ,取  $\xi = 0.3$ 。据单元尺寸适当调整结构体耦合积分点数量防止泄漏。

## 2 模型

### 2.1 几何设计图与物理试验模型

防浪堤抗波浪冲击试验断面设计图见图 1。防浪堤主要由素混凝土挡浪墙、堆石、护面结构堆砌而成。物理试验模型见图 2,物模模型与实物间 Froude 数、Strouhal 数相同。考虑堤身高度、波浪要素、水深及水槽尺寸等因素,采用模型比尺  $M = 25$ 。

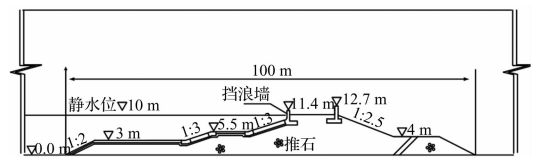


图 1 防浪堤设计图

Fig. 1 Structural design of the breakwater



图 2 物模模型

Fig. 2 The overall layout of the test section

### 2.2 有限元模型

基于核电站防浪堤设计图纸,1:1 于物模模型建立

波浪 - 防浪堤耦合系统数值模型。为准确描述防浪堤受波浪冲击后的动力响应,防浪堤模型对实际试验模型基本不简化,各组件间通过动态接触现实连接关系;结构 Lagrange 网格既满足动态接触所需尺寸匹配,又满足与流体 ALE 网格耦合所需尺寸匹配。图 3 为防浪堤结构模型,前后挡墙波压力记录点高程分别为  $A_1:0.44\text{ m}$ ,  $A_2:0.4\text{ m}$ ,  $A_3:0.36\text{ m}$ ,  $A_4:0.32\text{ m}$ ,  $B_1:0.498\text{ m}$ ,  $B_2:0.472\text{ m}$ ,  $B_3:0.448\text{ m}$ ,  $B_4:0.418\text{ m}$ 。

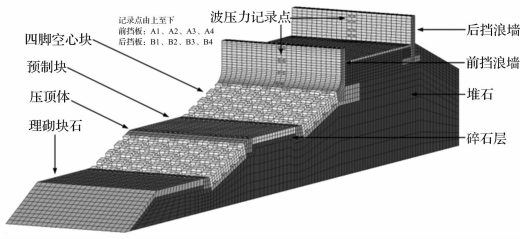


图 3 防浪堤结构有限元模型

Fig. 3 3-D finite element model of breakwater structure

波浪冲击耦合系统有限元模型及冲击区域局部放大有限元模型分别见图 4、图 5。据对波浪传播至防浪堤前距离估计建立  $10\text{ m} \times 1.2\text{ m} \times 1.7\text{ m}$  数值水槽模型,一端用速度入口,另一端模拟玻璃围墙用法向约束,流场其余侧面设无滑移边界,防浪堤结构底部全约束,侧面与后端面设置滑移边界。考虑波浪传播性质及计算精度,空气与水体交界处网格划分密集,流固耦合区单元划分密集,其它区域稀疏,既能保证计算精度,亦能缩短计算时间。整个波浪冲击系统有限元节点数 1 187 140,单元数 1 090 272。

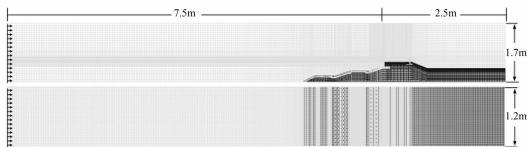


图 4 整体数值模型

Fig. 4 Global finite element model of system

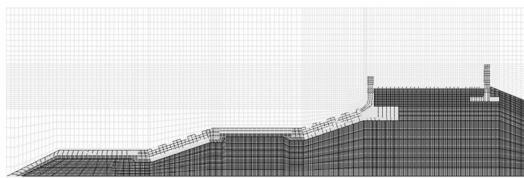


图 5 冲击耦合区数值模型

Fig. 5 The impact coupling region numerical model

### 2.3 材料模型

#### 2.3.1 水体

本文水体用空材料模型描述应力偏量与应变偏量关系,描述弱体积变形与压力关系状态方程用 Gruneisen 方程:

$$p = \frac{\rho_0 C^2 \mu \left[ 1 + \left( 1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{\alpha}{2} \mu^2 \right]}{1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2}} + (\gamma_0 + \alpha \mu) E$$

其中: $E_0$  为单位体积内能; $C$  为  $u_s - u_p$  曲线截距( $u_s$  为冲击波波速, $u_p$  为质点速度); $S_1, S_2, S_3$  为  $u_s - u_p$  曲线斜率系数; $\gamma_0$  为 Gruneisen 系数; $\alpha$  为对  $\gamma_0$  一阶体积修正。

#### 2.3.2 空气

空气采用空材料模型,状态方程用压力随单位体积内能线性变化,为体积变化多项式的 Linear\_Polynomial 方程:

$$p = C_0 + C_1 \mu + C_2 \mu^2 + C_3 \mu^3 + (C_4 + C_5 \mu + C_6 \mu^2) E_0$$

其中: $p$  为压力; $E_0$  为初始比内能; $C_0, C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$  为自定义常数, $\mu$  为体积变化率,本文令  $C_0 = C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = C_5 = C_6 = 0, C_4 = C_5 = \gamma - 1$ ;  $\gamma$  为热释放率;此时状态方程可缩减为  $p = (\gamma - 1) \rho E / \rho_0$ 。流体材料本构方程为  $\sigma_{ij} = \gamma \varepsilon'_{ij} + p \delta_{ij}$ 。

#### 2.3.3 防浪堤结构

素混凝土采用线弹性模型 (Elastic)。各组件材料见表 1。

表 1 防浪堤各组块主要材料参数

Tab. 1 Material parameters of sea-wall

材料	密度 $\times 10^3 / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量 $\times 10^{10} / (\text{N} \cdot \text{m}^{-2})$	泊松比
挡浪墙	2.40	2.00	0.15
砌砌块石	2.30	7.00	0.23
预制块体	2.40	2.55	0.20
碎石层	1.60	6.00	0.30
压顶体	2.30	7.00	0.23
四脚空心块	2.30	2.55	0.25
堆石	2.00	5.00	0.30

## 3 试验验证及结果讨论

本文用表 2 工况进行物理模型试验及数值模拟:①通过物理模型试验验证本文所用建模方法与耦合方法的有效性;②通过数值模拟对波浪冲击规律进行讨论。用上海超级计算中心“蜂鸟”计算平台及显式动力学软件 LS-DYNA 完成波浪对防浪堤冲击动态响应计算。

### 3.1 数值模拟与试验对比

建模时数值、物理模型在尺寸、结构布置及边界条件已达一致。数值模拟与物理试验均用规则波冲击防浪堤结构,为保证数值模拟与物模试验初始条件一致;波要素均用设计工况;通过波浪在堤上波浪形态与记录各自预先设置在前、后挡浪墙 8 个波压力记录点的波浪冲击压力对数值模拟与物模试验进行比较。对波

浪上堤后传播进化规律进行比较,包括平台波浪变形、冲击前侧挡浪墙、波浪直接越过挡浪墙及后挡浪墙二次越浪仿真数据与实验室图像对比,可定性认为数值模拟与物模试验一致,见图6。

表2 试验工况  
Tab.2 Test condition

试验工况	基本参数/m	波周期 $T_m/s$	波高 $H_m/m$
设计工况	前墙高 $H_f = 0.048$	1.704	0.264
	后墙高 $H_b = 0.1$		
讨论工况	前墙高 $H_f = 0.048$	1.4, 1.704	0.264, 0.252
	后墙高 $H_b = 0.1$		
	水深 $H_w = 0.4$	2, 2.3, 2.6	0.236, 0.232

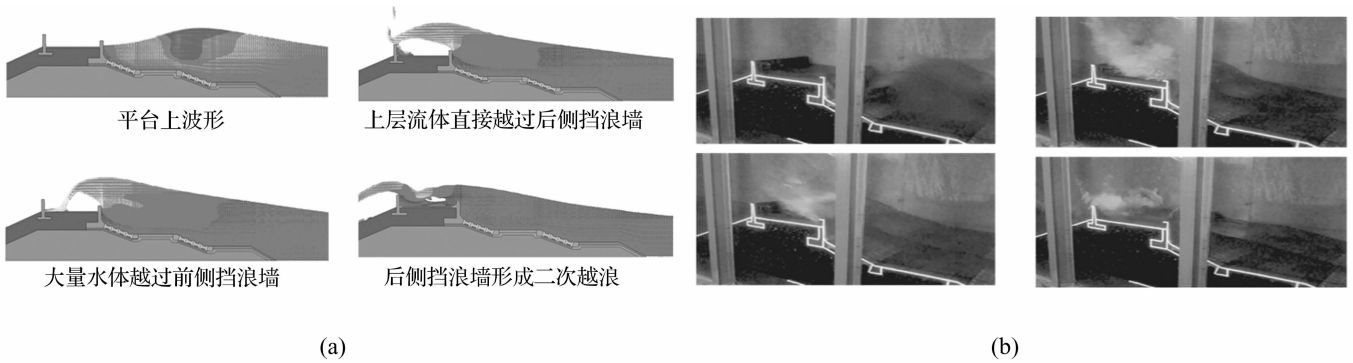


图6 仿真数据、实验室图像间波浪演化定性比较

Fig.6 Qualitative comparisons of wave evolution between simulation data and laboratory images

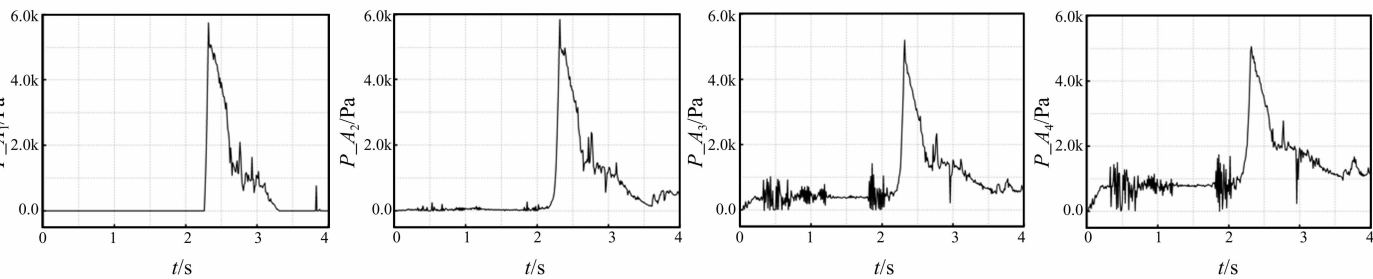


图7 波压力曲线

Fig.7 The curve of wave pressure

表3 波压力峰值

Tab.3 Maximum value of wave pressure

记录点	静水/Pa	波压力/Pa	试验记录/Pa
$A_1$	0	5.74E3	5.83E3
$A_2$	0	5.85E3	5.92E3
$A_3$	400	4.60E3	4.68E3
$A_4$	800	4.26E3	4.28E3
$B_1$	0	2.91E3	2.97E3
$B_2$	0	3.74E3	3.81E3
$B_3$	0	4.56E3	4.63E3
$B_4$	0	5.05E3	5.25E3

对前后挡浪墙表面波压力进行比较。在物模前、后挡浪墙波压力记录点相同位置,数值仿真所得在规则波冲击作用下前侧挡浪墙表面波浪压力曲线,减去静水压力后为波浪冲击压力,见图7。

试验数据见表3,数值仿真所得到  $A_3, A_4$  两点静水压力为 380 Pa, 785 Pa, 与理论水压公式所得静水压一致;数值仿真所得前后挡浪墙 8 个波压力记录点最大波浪冲击压力较物模试验略小,原因为数值计算中流体压力由耦合单元计算获得,而波压力记录单元尺寸与试验中布置的波压力传感器大小有出入,导致计算数值误差。本文通过控制耦合位置单元尺寸将误差缩小在较小范围,保证数值计算结果定量与试验结果一致。

### 3.2 数值模拟结果分析及讨论

由波浪波高  $H_m$ 、波周期  $T_m$  及防浪堤挡浪墙结构刚度要素对防浪堤抗冲击动态响应进行数值模拟,获得前、后挡浪墙表面波压力分布规律、挡浪墙结构在波浪冲击过程所受最大水平推力及波浪冲击系数随结构刚度变化情况。

#### 3.2.1 挡浪墙表面波压力分布

引入无量纲物理量  $z/d, P_{max}/\rho g H_m$ , 其中  $z$  为前挡浪墙记录点相对前挡浪墙曲面底端高程,  $d$  为静水面至前挡浪墙曲面底端水深,  $H_m$  为后挡浪墙记录点至堤顶高程,  $P_{max}$  为最大波压力。

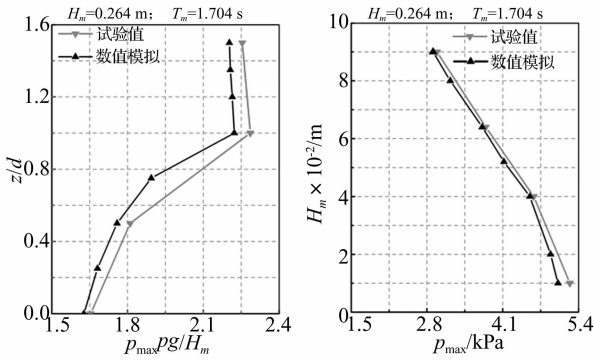


图 8 前后挡浪墙表面最大波压力分布

Fig. 8 Pressure impulse distribution up the front and rear walls

设计工况前、后挡浪墙表面最大波压力分布曲线见图 8。结合试验数据知,前挡浪墙波压力在静水位处最大,静水位以上呈线性减小,静水位以下呈抛物线减小;由数值模拟、物理模型试验的波浪在堤顶演化过程知,波浪在后挡浪墙形成二次越浪后大量水体冲击后挡浪墙造成后墙底部波压力最大,并沿高程方向减小。前、后挡浪墙表面波压力随波高、波周期变化见图 9。由图 9 看出,前挡浪墙最大波压力出现在静水处,后挡浪墙最大波压力位置在后墙底部,随波浪强度的减小,波浪越过前挡浪墙后未直接冲击后挡浪墙而在堤顶流动后冲击后挡浪墙底部,后墙最大波压力逐渐减小且波压力分布集中于底部。

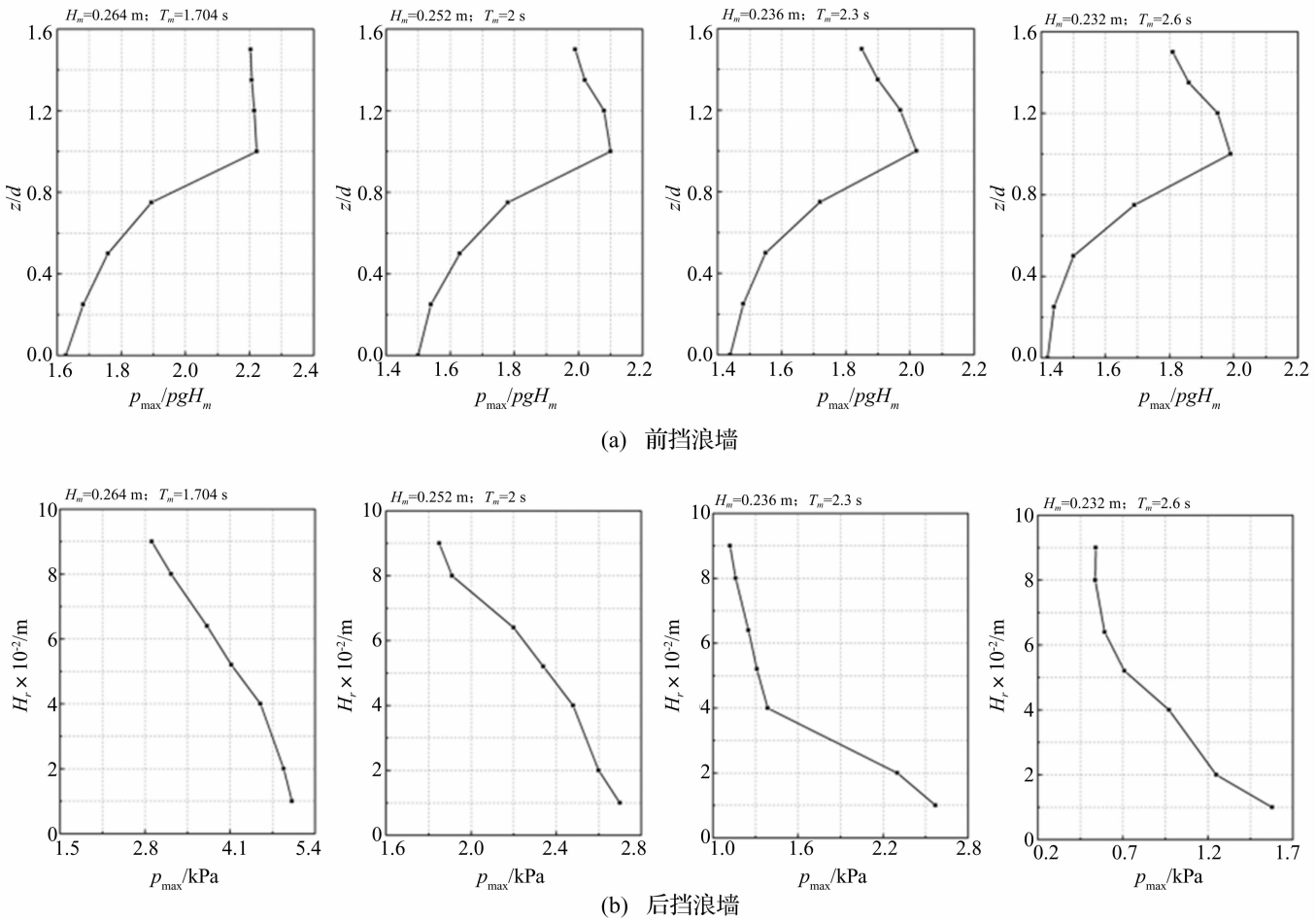


图 9 前、后挡浪墙表面最大波压力随波浪要素变化

Fig. 9 The pressure change with the wave height and wave period

### 3.2.2 挡浪墙承载能力

设计工况前后挡浪墙承受最大一阶主应力变化见图 10。由图 10 看出,前、后挡浪墙先后达到最大值,且后挡浪墙出现两次峰值,与物模试验冲击先后顺序及后挡浪墙二次越浪现象一致。其中后挡浪墙应力最大值几乎为前挡浪墙的两倍。

冲击中单位宽度挡浪墙水平推力计算式为:

$$F = \sum_{k=1}^n P_k \Delta Z \quad (8)$$

式中: $P_k$  为挡浪墙迎浪面波压力记录点值; $\Delta Z = 0.04$  m 为挡浪墙迎浪面波压力记录点间距离; $n$  为波压力记录点数,计算前挡浪墙水平推力时,含  $A_1$ 、 $A_2$  两点,计算后挡浪墙推力时,含  $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$ 、 $B_4$  四点。

通过模型比尺等效后获得现实工况的前后挡浪墙最大水平推力随波浪周期、波浪高度变化见图 11。前、

后挡浪墙水平推力均随波浪强度下降大幅下降,且因后挡浪墙迎波面积大于前挡浪墙,故所受水平推力高于前挡浪墙。

### 3.2.3 波浪冲击系数

据 Cuomo<sup>[2]</sup>对波浪冲击与准静载的研究,引入无量纲物理量  $F_h/\rho g H_m d, Z/d$  为冲击与准静载,见图 12。

$$Z/d = \frac{M_z}{F_h} / d = \frac{\sum_k P_k \Delta Z Z_k}{\sum_k P_n \Delta Z} / d$$

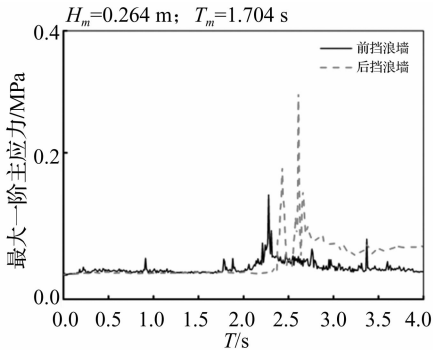


图 10 前、后挡浪墙动态响应

Fig. 10 The stress response of structural

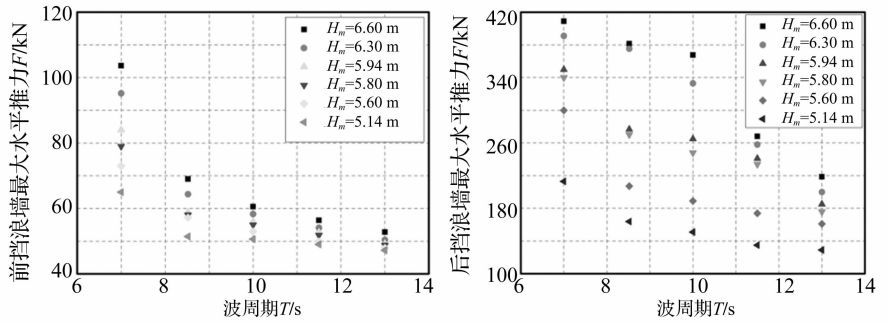


图 11 前、后挡浪墙表面水平推力

Fig. 11 The maximum horizontal thrust change with the wave height and wave period

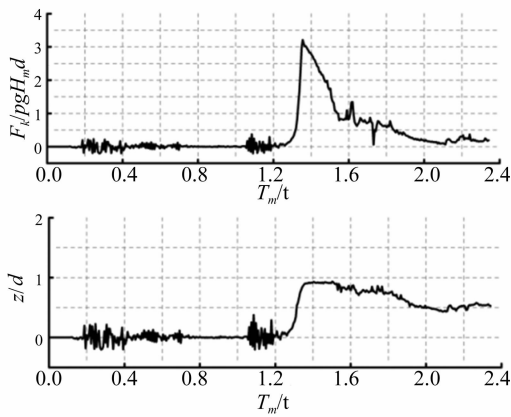


图 12 冲击与准静载

Fig. 12 Impulsive and quasi-static loads

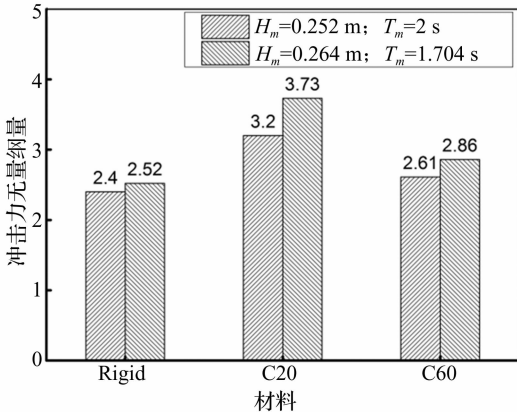


图 13 不同结构刚度下冲击系数比较

Fig. 13 The variation of impact coefficient changes with the structural rigidity and hydrological conditions

式中:  $d$  为静水面至前挡浪墙曲面底端水深。

为研究防浪堤结构响应对波浪冲击影响,本文设三种材料:刚体、C20 混凝土 ( $E = 2.0E10$ )、C60 混凝土 ( $E = 3.6E10$ )。波浪冲击系数随挡浪墙材料刚度及波浪条件变化见图 13。由图 13 看出,波浪冲击系数随结构刚度的减小而增大,随波浪强度的增大而增大;且小刚度结构,冲击系数随水文条件变化更明显。

## 4 结论

在对某沿海核电站防浪堤进行物理模型试验基础上,采用基于多物质 ALE 流固耦合方法与三维有限元模型对防浪堤冲击响应进行研究。结合试验数据,结论如下:

(1) 前挡浪墙波浪冲击压力最大处始终为静水面位置,向上呈线性减小,向下呈抛物线减小;后挡浪墙波压力最大位置在后墙底部,随波浪强度的减小,后墙最大波压力减小且较大波压力集中于后墙底部;

(2) 通过数值计算获得不同水文条件前、后挡浪墙承受的在最大波浪冲击水平力及不同结构刚度的挡浪墙波浪冲击系数。设计工况的后墙结构应力最大值约为前墙的两倍;后挡浪墙始终较前挡浪墙承受的水平力大;结构动态响应对波浪冲击系数有放大效应,且小刚度结构,冲击系数随水文条件变化更明显。所得数据可为防浪堤结构安全设计及控制越浪设计提供依据。

### 参考文献

[ 1 ] Isaacson M, Prasad S. Wave slamming on a horizontal circular cylinder [C]. Proc. Civil Engineering in the Oceans V, 1992.  
 [ 2 ] Cuomo G, Allsop W, Bruce T. Breaking wave loads at vertical seawalls and breakwaters [J]. Coastal Engineering, 2010, 57(4) : 424 - 439.

- 扩展寿命分析[J]. 机械工程学报, 2010, 46(22): 58-64.
- DING Zhi-ping, CHEN Ji-ping, SONG Chuan-jiang, et al. Analysis of fatigue crack growth life for rubber vibration damper [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(22): 58-64.
- [3] 彭立群, 林达文, 王进, 等. 铁道车辆用橡胶球铰扭转、偏转性能测试分析及探讨[J]. 铁道车辆, 2011, 49(9): 9-11.
- PENG Li-qun, LIN Da-wen, WANG Jin, et al. Deflection performances of rubber bushing for rolling stock [J]. Journal of Rolling Stock, 2011, 49(9): 9-11.
- [4] Mars W V, Fatemi A. A literature survey on fatigue analysis approaches for rubber [J]. International Journal of Fatigue, 2002, 24(9): 949-961.
- [5] Mars W V, Fatemi A. Multiaxial stress effects on fatigue behavior of filled natural rubber [J]. International Journal of Fatigue, 2006, 28(5-6): 521-529.
- [6] Saintier N, Cailletaud G, Piques R. Multiaxial fatigue life prediction for a natural rubber [J]. International Journal of Fatigue, 2006, 28(5-6): 530-539.
- [7] Kim W D, Lee H J, Kim J Y, et al. Fatigue life estimation of an engine rubber mount [J]. International Journal of Fatigue, 2004, 26(5): 553-560.
- [8] Li Q, Zhao J C, Zhao B. Fatigue life prediction of a rubber mount based on test of material properties and finite element analysis [J]. Engineering Failure Analysis, 2009, 16(7): 2304-2310.
- [9] 王文涛, 上官文斌, 段小成, 等. 基于线性疲劳损伤橡胶悬置疲劳寿命预测研究[J]. 机械工程学报, 2012, 48(10): 56-65.
- WANG Wen-tao, SHANGGUAN Wen-bin, DUAN Xiao-cheng, et al. Study on prediction of fatigue life of rubber mount based on linear cumulative fatigue damage theory [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(10): 56-65.
- [10] 殷闻, 靳晓雄, 全光. 两种常用橡胶本构模型的有限元分析及仿真[J]. 上海电机学报, 2010, 13(4): 215-218.
- YIN Wen, JIN Xiao-xiong, TONG Guang. Finite element analysis of rubber constitutive models and simulation [J]. Journal of Shanghai Dianji University, 2010, 13(4): 215-218.
- [11] 张少实, 庄苗. 复合材料与粘弹性力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 175-176.
- [12] Andre N, Cailletaud G, Piques R. Haigh diagram for fatigue crack initiation prediction of natural rubber components [J]. Kautschuk Und Gummi Kunststoffe, 1999, 52: 120-123.
- [13] 刘建勋, 黄友剑, 张亚新, 等. 关于高速列车轴箱拉杆拉杆式橡胶关节承载特性的探讨[J]. 铁道车辆, 2011, 49(5): 23-26.
- LIU Jian-xun, HUANG You-jian, ZHANG Ya-xin, et al. Discussion on mechanical properties of turbo rubber bushing used in axle-box pull rod [J]. Journal of Rolling Stock, 2011, 49(5): 23-26.
- [14] Abraham F, Alshuth T, Jerrams S. The effect of minimum stress and stress amplitude on the fatigue life of non-strain crystallizing elastomers [J]. Mater Des, 2005, 26(2): 39-45.
- [15] 黄友剑. 橡胶材料基础实验及疲劳特性研究报告[R]. 株洲时代新材料科技股份有限公司, 2007.
- [16] Luo R K, Cook P W, Wu W X, et al. Fatigue design of rubber springs used in rail vehicle suspensions [J]. Proc. Instn Mech. Engrs. Part F: J. Rail and Rapid Transit, 2003, 217(3): 237-240.
- [17] Luo R K, Cook P W, Wu W X, et al. An approach to evaluate the service life of rubber springs used in rail vehicle suspensions [J]. Proc. Instn Mech. Engrs. Part F: J. Rail and Rapid Transit, 2004, 218(2): 173-177.
- [18] Luo R K, Wu W X. Fatigue failure analysis of anti-vibration rubber spring [J]. Engineering Failure Analysis, 2006, 13(1): 110-116.

.....

(上接第98页)

- [3] Hajivalie F, Yeganeh-Bakhtiary A. Numerical simulation of the interaction of a broken wave and a vertical breakwater [J]. International Journal of Civil Engineering, 2011, 9(1): 71-79.
- [4] Hur D S, Mizutani N. Numerical estimation of the wave forces acting on a three dimensional body on submerged breakwater [J]. Coastal Engineering, 2003, 47(3): 329-345.
- [5] Losada I J, Lara J L, Guanche R. Numerical analysis of wave overtopping of rubble mound breakwaters [J]. Coastal Engineering, 2008, 55(1): 47-62.
- [6] Hsiao S C, Lin T C. Tsunami-like solitary waves impinging and overtopping an impermeable seawall: experiment and RANS modeling [J]. Coastal Engineering, 2010, 57(1): 1-18.
- [7] Zhang A, Suzuki k. A comparative study of numerical simulations for fluid-structure interaction of liquid-filled tank during ship collision [J]. Ocean Engineering, 2007, 34(5-6): 645-652.
- [8] Marco A, Castelletti L M L. Fluid-structure interaction of water filled tanks during the impact with the ground [J]. International Journal of Impact Engineering, 2005, 31(3): 235-254.
- [9] 郭毅之, 金先龙, 丁峻宏. 沉管隧道地震响应分析中的三维接触模型与算法研究[J]. 应用力学学报, 2006, 23(1): 48-52.
- GUO Yi-zhi, JIN Xian-long, DING Jun-hong. Three dimensional contact model and algorithm for earthquake response of immersed tunnel [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2006, 23(1): 48-52.
- [10] 张雄, 陆明万, 王建军. 任意拉格朗日-欧拉描述法研究进展[J]. 计算力学学报, 1997, 14(1): 91-102.
- ZHANG Xiong, LU Ming-wan, WANG Jian-jun. Research progress in arbitrary Lagrangian-Eulerian method [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 1997, 14(1): 91-102.
- [11] 张晓敏, 金先龙, 陈向东. 风荷载作用下大型柔性储液结构动态响应仿真方法研究[J]. 振动与冲击, 2009, 28(5): 115-118.
- ZHANG Xiao-min, JIN Xian-long, CHEN Xiang-dong. Numerical simulation of dynamic characteristics of flexible container under wind load [J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(5): 115-118.