

# 二维水槽中岩石坠落激发表面波的生成机制<sup>\*</sup>

何海伦<sup>1) 2) 3) †</sup> 刘永军<sup>2) 3) 4)</sup> 莫 军<sup>5)</sup> 宋金宝<sup>2) 3)</sup>

1) 河海大学海岸灾害及防护教育部重点实验室, 南京 210098)

2) 中国科学院海洋研究所, 青岛 266071)

3) 中国科学院海洋环流与波动重点实验室, 青岛 266071)

4) 中国科学院研究生院, 北京 100049)

5) 海军潜艇学院, 青岛 266071)

(2008 年 12 月 6 日收到, 2009 年 1 月 15 日收到修改稿)

针对二维水槽中岩石坠落激发表面波的生成机制进行数值和实验室研究, 其中数值模型使用边界元方法求解完全非线性势流函数, 实验室研究测得不同时刻的波面位移并用于检验数值模型. 研究表明, 数值结果和实验结果比对良好, 这种基于势流函数理论的数值模型能够有效模拟水中岩石坠落激发表面波的生成过程. 进一步数值研究了生成波最大位移随岩石大小、密度、初始位置和下落角度的变化, 结果发现: 岩石大小和密度对生成波最大位移的影响非常重要, 而岩石初始位置和下落角度对生成波最大位移的影响较为显著. 当岩石大小变大, 密度变大, 岩石初始位置更靠近水面或下落角度更偏离垂直方向时, 生成波最大位移增大. 此外, 数值研究表明, 利用水中岩石坠落可以给出水槽中生成破碎波的新方法.

关键词: 水中岩石坠落, 波浪生成, 边界元方法, 波浪破碎

PACC: 0340G, 9210H

## 1. 引 言

利用一定的造波工具在水槽中造出特定的波动对于工程实验来说具有重要意义, 而且, 水体中突然扰动引起的表面波动问题也是水动力学中的基本问题之一. 在实验室常见的水槽中, 波浪一般可由多种类型的造波板在水槽的一端生成, 这包括活塞式造波板、摇板式造波板、柱塞式造波板等. 关于这类造波板造波机制, 人们进行了较为完善的理论分析<sup>[1]</sup>, 并开展了大量的实验测量和数值模拟<sup>[2-4]</sup>. 另外, 底地形变化引发的波浪生成机制由于和海啸激发机制具有很大的相似性, 近来引发了人们的日益关注. 这种底地形变化主要集中表现为底部震动和底部滑坡两种类型. Hammack<sup>[5]</sup>从理论和实验室出发, 研究了底部垂直变化激发的二维表面波生成机制, Liu 和 Liggett<sup>[6]</sup>以及 Nakayama<sup>[7]</sup>使用基于边界元方法的数值模型对该过程进行模拟, He 等<sup>[8]</sup>进一步考虑了背

景表面波对这种表面波生成机制的影响. Grilli 和 Watts<sup>[9]</sup>, Enet 和 Grilli<sup>[10]</sup>对海底滑坡激发表面波机制进行了一系列研究, 并将其应用至真实的海啸研究中<sup>[11, 12]</sup>.

对于一些特殊扰动导致的波浪生成机制, 例如水中岩石坠落激发的表面波生成机制, 人们也较为关心, 因为它同样也是水库和海岸的潜在威胁. Noda<sup>[13]</sup>理论研究了岩石沿岸边坠落导致的波动生成过程, 他把岩石的垂直高度假定为无穷大, 得到了相应生成波的线性解. 但是, 对于更具一般性的岩石坠落方式, 即岩石不是沿着岸边而是在水体中间坠落, 其激发的表面波生成研究还未见报道. 事实上, 水中物体或者底地形的水平运动对表面生成波的影响引发人们越来越多的关注<sup>[14, 15]</sup>, 而水中物体的水平运动能否会向垂直运动一样, 对生成波产生显著影响还需要进一步的定量化研究. 另一方面, 这种水中岩石坠落激发表面波问题涉及水中物体运动在自由表面的反映, 这对于水中运动物体的探测具有非

<sup>\*</sup> 国家杰出青年科学基金(批准号: 40425015), 国家自然科学基金(批准号: 40876012)和教育部新世纪优秀人才支持计划(批准号: NCET-07-0255)资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: alanhe@hhu.edu.cn

常重要的参考意义.此外,和通常的造波板造波以及地形运动造波相比,这种岩石坠落造波方式需要的设施非常简单,而且如果仅考虑自由落体的下落方式,其造波过程非常易于操作和控制.值得一提的是,在实验室水槽中,我们常常需要制造出波面翻转和破碎,来研究波浪破碎及其对海-气边界层的影响<sup>[2,16-18]</sup>.此时我们经常使用的造波板造价不菲,而水下水翼拖曳造波法又相对不易控制<sup>[19,20]</sup>,所以,寻求新的易操作的破碎波造波方式对于波浪破碎研究来说是非常必要的.因此,研究水中岩石坠落激发表面波的生成机制,对于水动力学<sup>[21]</sup>和物理海洋学<sup>[22-28]</sup>都具有重要意义.为此,本文分别利用实验室实验和数值模拟两种方法,对这种生成机制进行研究.

## 2. 实验室实验

本次实验地点为中国海洋大学物理海洋教育部重点实验室,其水槽如图 1 所示.该水槽长 65 m、宽 1.2 m、高 1.5 m.实验水深为 0.8 m,岩石密度为  $2.0 \text{ g/cm}^3$ .在初始时刻,岩石上端面和静止的自由表面存在一定的垂直距离,然后岩石被释放,并做自由落体运动至水槽底部,在这个过程中,摄像机以 25 帧/s 的速度记录数据,并在后期的数据处理中被用于提取不同时刻的波面.



图 1 水中岩石坠落激发表面波的实验水槽

## 3. 数值模型介绍

针对物理模型,我们设计的数值模型如图 2 所

示,其中水体区域记为  $\Omega$ ,  $\Gamma_f$  为自由表面边界,  $\Gamma_r$  为水槽左右两侧反射边界,  $\Gamma_b$  为水槽底边界,  $\Gamma_{FR}$  为水中岩石的边界.我们选取直角坐标系  $(x, z)$ ,其中  $x$  轴以水平向右为正,  $z$  轴垂直向上为正,取水中岩石初始时刻  $x$  轴方向的中心为  $x = 0$ ,初始时刻静止水面为  $z = 0$ .水中岩石在初始时刻静止,其上端面垂向位移为  $z = -z_0$ ,然后在水中做自由落体运动至水槽底部,其落体时的加速度为  $(\rho_r - \rho_w)g/\rho_r$ ,其中  $\rho_r$  和  $\rho_w$  分别为岩石和水的密度( $\rho_w = 1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ),  $g$  为重力加速度.此外,水槽水深记为  $h$ ,水中岩石的水平长度和垂直长度分别记为  $L_{rx}$  和  $L_{rz}$ ,下落角度记为  $\theta$ .假定水体无粘无旋,则可以定义速度势函数  $\phi(x, t)$ ,它在区域  $\Omega(t)$  内满足 Laplace 方程

$$\nabla^2 \phi = 0, \tag{1}$$

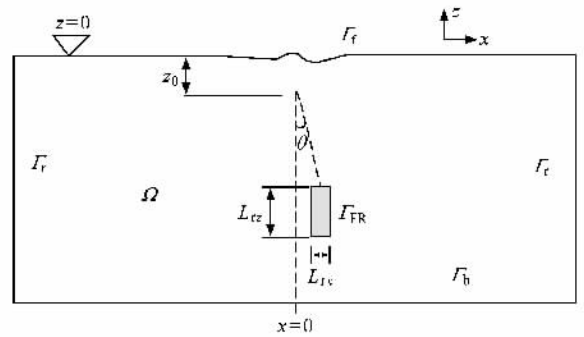


图 2 水中岩石坠落的数值波浪水槽示意图

在自由表面  $\Gamma_f$ ,  $\phi$  满足运动学和动力学边界条件

$$\frac{dX}{dt} = \nabla \phi, \tag{2}$$

$$\frac{d\phi}{dt} = -gz + \frac{1}{2} |\nabla \phi|^2 - \frac{p_a}{\rho_w}, \tag{3}$$

其中  $X = (x, z)$ ,  $t$  为时间,  $p_a$  为表面大气压强(被设为 0).

在固壁边界和底边界  $\Gamma_b$ ,  $\phi$  满足

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0, \tag{4}$$

其中  $n$  为边界的单位外法向.

在水中岩石的所有边界上,  $\phi$  满足

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = v_b, \tag{5}$$

其中  $v_b$  为岩石边界的法向速度,它根据岩石下落的加速度计算.

为了求解速度势和自由表面位置,我们使用一

个基于边界元方法的数值模型(MDAS1模型<sup>[29]</sup>)。它最初由 Drimer 和 Agnon<sup>[30]</sup>建立,后被 Segre(1998,个人交流)和何海伦等<sup>[31]</sup>改进。同时,已有研究表明该模型可以有效用于水槽中造波板和底部运动导致的波浪生成模拟<sup>[8 29-33]</sup>。

图 3(a)给出了水中岩石垂直下落时不同时刻的波面示意图,此时,  $h = 1 \text{ m}$ ,  $L_{rx} = L_{rz} = 0.2h$ ,  $z_0 = 0.05h$ ,  $\rho_r = 2.0\rho_w$ 。从图 3(a)中可以看出,在水中岩石下落初期,首先会诱导波面附近的粒子产生向下的垂直速度,此时波面出现凹陷,然后凹陷的波面在重力作用下逐渐恢复,并由于惯性形成凸起的波面,继而向左右散开传播。由于此时岩石垂直下落,所以生成的波面沿两个自由传播方向对称传播。图 3(b)进一步给出了相应的水中岩石沿  $45^\circ$ 角下落时不同时刻的波面示意图,此时,由于两个传播方向的生成波得到的水平动量输入不一致,所以生成波位移沿两个传播方向形成明显的不对称。

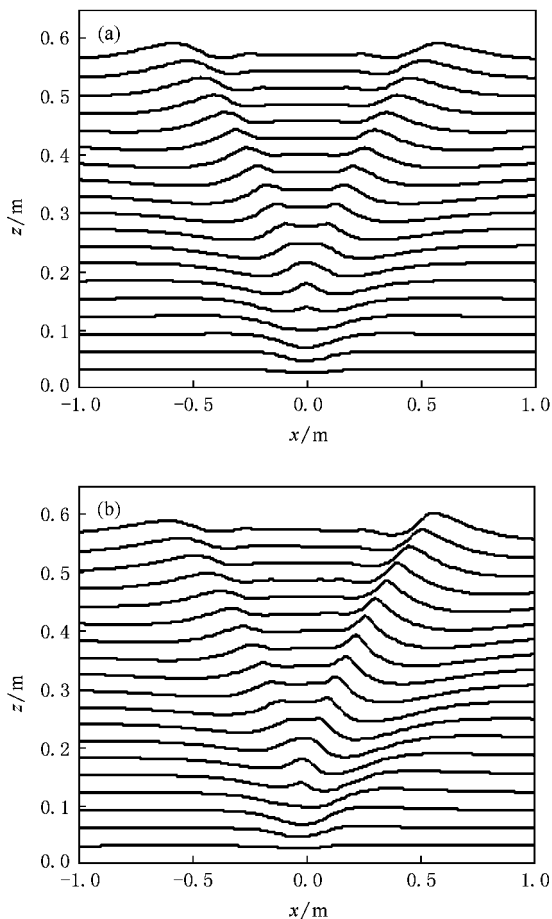


图 3 水中岩石坠落激发表面波的生成过程示意图 (a)岩石垂直下落 (b)岩石沿  $45^\circ$ 角下落

## 4. 实验室实验和数值模拟比对

实验室测得岩石下落角度为  $0^\circ$ 和  $10^\circ$ 的不同时刻波面位移,如图 4 和图 5 所示,并用于和数值结果比对,其实验参数为:  $z_0/h = 0$ ,  $L_{rx}/h = 0.1$ ,  $L_{rz}/h = 0.125$ 。在图 4 和图 5 中,数值结果和实验结果大致符合,数值结果基本再现了实验所得的波面生成过程。对于  $\theta = 0^\circ$ 和  $\theta = 10^\circ$ 的算例,数值生成波的平均波高(左右两侧取平均)和平均波长相对误差都小于 30%。值得一提的是,这些误差并不完全来自于数值模拟本身。因为在实验中发现,由于水槽中岩石沿着岩石左侧的滑轨向下坠落(如图 1),而在岩石右侧没有任何的约束,使得岩石在触及水槽底部后还会有水平向右方向的位移,这个位移在我们数值模拟中没有被考虑。对于  $\theta = 0^\circ$ 的算例,实验所得波面位移在左右两侧出现明显的偏差,其波高和波长相对误差都达到 15%。所以,可以推测这里的实验室结果大约存在 15%的误差。此外,在我们的数值模拟中,水体体积守恒误差和岩石停止运动后的能量守恒误差都小于 1%。为此,我们认为,这里基于完全非线性势流函数理论的数值模型大致能够给出表面波生成过程的模拟。

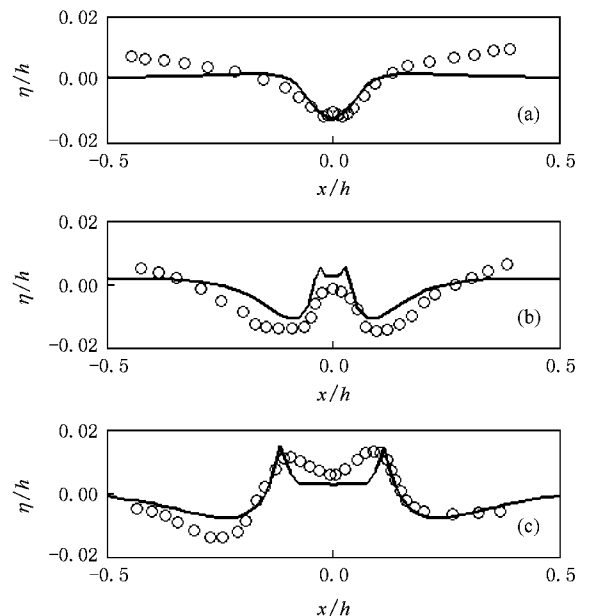


图 4 水中岩石坠落激发表面波的实验和数值结果比对 下落角度  $\theta = 0^\circ$ , — 为数值模拟,  $\circ$  为实验结果。(a)  $\theta/T_0 = 0.26$  (b)  $\theta/T_0 = 0.56$  (c)  $\theta/T_0 = 0.93$

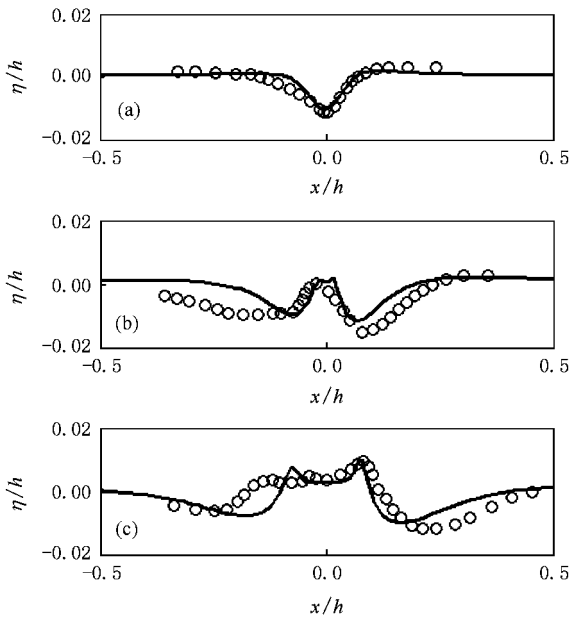


图 5 水中岩石坠落激发表面波的实验和数值结果对比 下落角度  $\theta = 10^\circ$ ，—为数值模拟，○为实验结果。(a)  $f/T_0 = 0.19$  (b)  $f/T_0 = 0.49$  (c)  $f/T_0 = 0.79$

### 5. 生成波的数值测试和分析

为了更全面地认识各种岩石特征参数和运动参数对于生成波的影响,我们进行了系列数值测试,并细致考察了岩石大小、密度、初始位置和下落角度对生成波位移的影响.为简单起见,仅考虑水中岩石为正方形,即  $L_{rx} = L_{rz}$ .同时,设置数值测试时的默认参数为  $h = 1\text{ m}$ ,  $L_{rx} = 0.2h$ ,  $\rho_r = 2.0\rho_w$ ,  $z_0 = 0.03h$ ,  $\beta = 0^\circ$ .定义生成波的空间最大位移  $\eta^{\max}$  和最大位移  $\eta_0^{\max}$  分别为

$$\eta^{\max}(t) = \max_{x>0} \{ \eta(x, t) \}, \quad (6)$$

$$\eta_0^{\max} = \max_t \{ \eta^{\max}(t) \}, \quad (7)$$

并记波面取得最大位移的时刻为  $t_{\max}$ .当下落角度大于  $0^\circ$  时,左右两侧的生成波位移不对称,为此,我们定义此时的左右最大位移不对称率  $\gamma$  为

$$\gamma = \eta_0^{\max} / \max_{x<0} \{ \eta^{\max}(x, t_{\max}) \}, \quad (8)$$

数值测试中,水体体积守恒误差和岩石停止运动后的能量守恒误差都小于  $1\%$ .

#### 5.1. 岩石特征参数对生成波的影响

图 6 和图 7 分别给出了岩石大小和岩石密度对于生成波位移的影响,由图 6(a)可知,随着时间的

增加,空间最大位移首先存在一定的波动,随之慢慢减小.这种波动随着岩石长度的变大而变得愈加明显.由图 6(b)可知,当岩石长度  $L_{rx}$  从  $0.1h$  增加到  $0.5h$  时,生成波的最大位移从  $0.013h$  增加至  $0.076h$ ,约增长 5 倍.显然,岩石长度对于生成波最大位移具有非常重要的影响.在图 7 中,生成波的空间最大位移随着岩石密度的增加而增加,不同岩石密度的空间最大位移存在明显的差异.当岩石密度从  $1.5\rho_w$  变化至  $2.5\rho_w$  时,生成波的最大位移从  $0.022h$  增加到  $0.032h$ ,增幅约  $43.2\%$ ,所以,岩石密度对于生成波最大位移的影响也是比较显著的.

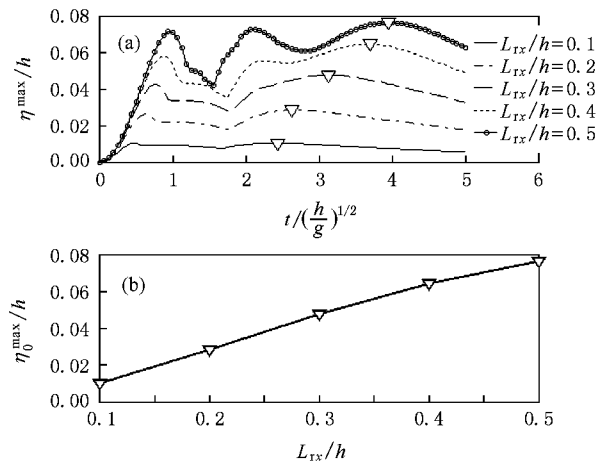


图 6 岩石大小对生成波的影响 (a) 空间最大位移随时间的演变 (b) 最大位移随岩石大小的变化

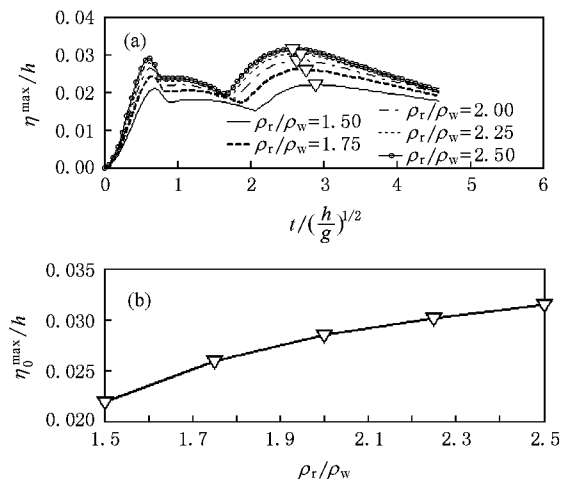


图 7 岩石密度对生成波的影响 (a) 空间最大位移随时间的演变 (b) 最大位移随岩石密度的变化

#### 5.2. 岩石运动参数对生成波的影响

图 8 为岩石初始位置对于生成波位移的影响.由图 8(a)可知,当岩石初始位置变小时(即水中岩

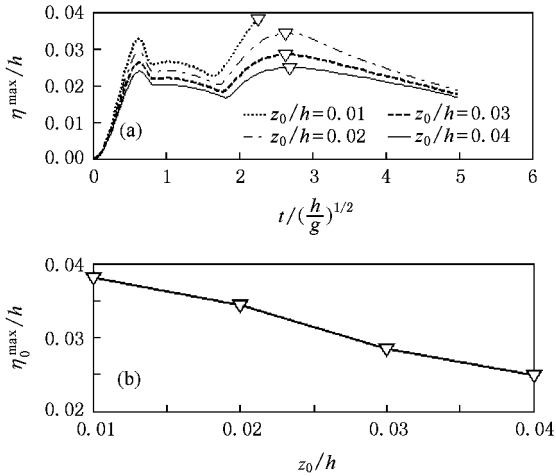


图8 岩石初始位置对生成波的影响 (a)空间最大位移随时间的演变 (b)最大位移随岩石初始位置的变化

石离水面越来越近时),生成波的空间位移会发生明

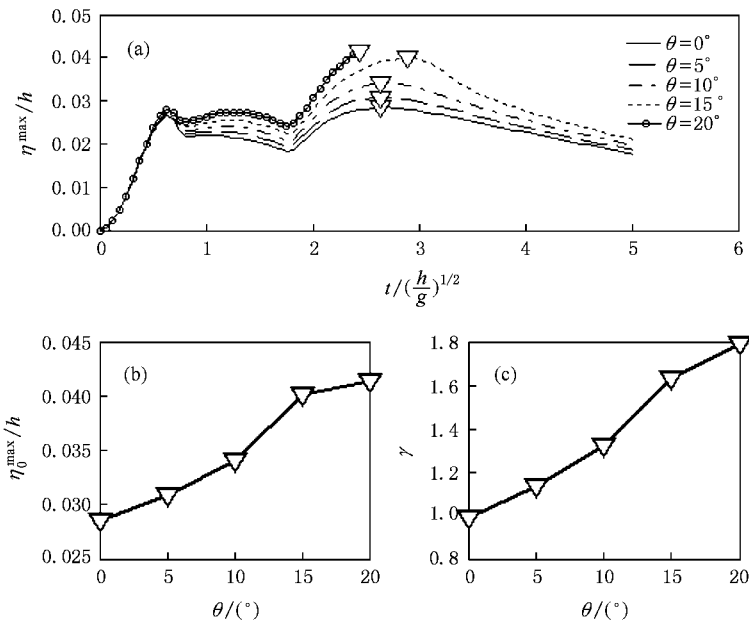


图9 岩石下落角度对生成波的影响 (a)空间最大位移随时间的演变 (b)空间最大位移随岩石下落角的变化 (c)最大位移的不对称率随岩石下落角的变化

### 5.3. 波面翻转和破碎

图10给出了图9中 $\theta = 20^\circ$ 算例生成波的波面翻转过程.可见,随着时间的逐渐递进,生成波的波峰位移逐渐增大,波峰的移动速度逐渐大于生成波的相速度,从而发生波峰处的翻转(图中给出最后时刻的时间).另外,我们通过一系列的数值测试发现,当岩石大小变大,密度增加,初始位置减小或下落角度变大时,都可能导致生成波由原先的不破碎状态

显的增加.当初始位置小于特定值时,生成波的波面甚至会发生翻转和破碎.无疑,这种波浪破碎会导致一定比例的波动能量的损失,并使得生成波的空间最大位移明显减小<sup>[2,32]</sup>.在图8(b)中,当岩石初始位置从 $0.01h$ 增大至 $0.04h$ 时,生成波的最大位移从 $0.038h$ 减小至 $0.025h$ ,变化幅度为34.2%.

图9给出了不同的岩石下落角度对生成波的影响.由图可见,当 $\theta = 20^\circ$ 时,生成波会发生破碎.当岩石下落角度从 $0^\circ$ 增加到 $20^\circ$ 时,生成波的最大位移从 $0.029h$ 增加到 $0.041h$ ,增幅约41.4%,这意味着对水体的水平方向动量输入能够激发和垂直方向动量输入同量级的表面波动.所以,岩石下落角度对于生成波最大位移具有显著影响.图9(c)给出的不对称率 $\gamma$ 随下落角度 $\theta$ 的变化更加直观地告诉我们,水平动量输入的不一致引发了生成波最大位移产生明显的不对称.

转变为破碎状态.值得一提的是,我们在实验室中利用造波板生成破碎波的基本原理是:先生成高频波,后生成低频波,因为低频波的相速度大于高频波,所以低频波会逐渐追赶高频波,当高频波和低频波的能量达到汇聚时,波浪破碎容易发生<sup>[2]</sup>.所以,这里生成波的最大位移很可能发生在生成波高频分量和低频分量发生汇聚时.事实上,在生成波能量汇聚以后,如果波浪并没有破碎,那么生成波的高频分量和低频分量会逐渐分离,使得空间最大位移逐渐减小,

这和我们得到的数值结果是符合的. 根据 Song 和 Banner<sup>[32]</sup>提出的破碎判据, 可以推测, 当波分量汇聚过程中的能量增长率小于某一阈值时, 波浪不会破碎, 而当能量增长率大于该阈值时, 波浪会发生破碎. 所以, 岩石大小变大, 密度增加, 初始位置减小和下落角度变大, 很可能会导致生成波的能量增长率增大, 从而引起生成波破碎. 波浪破碎不仅会带来波浪能量的显著损失, 而且会显著增强海洋和大气边界层中湍流, 加强海气之间动量通量、热通量和物质通量的传递, 所以波浪破碎的研究对于波浪研究和海-气相互作用研究具有重要意义. 鉴于本文的数值模式局限于计算破碎前状态, 不能够计算波浪破碎后的状态, 所以关于波浪破碎过程对于生成波的影响有待于进一步的研究. 但是, 这里利用岩石坠落生成波浪破碎的方法无疑可以给实验室研究该过程提供一种新的造波方法.

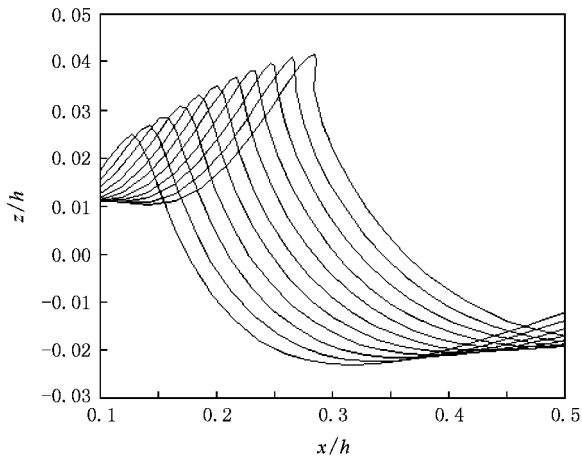


图 10 生成波的波面翻转过程  $t / \left( \frac{h}{g} \right)^{1/2} = 2.44$

## 6. 结 论

对于水槽中岩石坠落这种特殊扰动激发的表面波生成问题, 本文分别利用实验室实验和数值模拟两种方法研究了其生成机制. 其中, 实验室实验在一个二维水槽中进行, 而数值模拟则利用一个基于边界元方法的数值模型. 实验室实验得到不同时刻的生成波波面位移, 并被用于检验数值模型的有效性. 研究表明这种求解非线性势流函数的数值模型能够大致给出生成波的模拟, 其生成波的波高和波长误差小于 30%.

利用数值模型, 本文进行了大量的数值测试, 研究了岩石特征参数和岩石运动参数对生成波的影响. 结果表明, 生成波的空间最大位移(在位移的空间域上取最大值)随着岩石大小和岩石密度的增大而增大, 岩石大小和岩石密度对生成波最大位移(在位移的时间和空间域上都取最大值)的影响非常重要. 当岩石距离自由表面的初始位置变大时, 生成波最大位移变小. 同时, 当岩石沿着一定角度下落时, 对两侧水体水平动量输入的不均衡性使得两侧生成波的最大位移发生非常显著的不对称性. 生成波最大位移对于岩石初始位置和下落角度具有显著的依赖性. 此外, 岩石大小变大, 密度增加, 初始位置减小和下落角度变大都容易引发表面波的翻转和破碎. 本文的数值测试表明水中岩石坠落可以为实验室水槽中生成破碎波提供一种新方法.

- [ 1 ] Schaffer H A 1996 *Ocean Eng.* **23** 47
- [ 2 ] Rapp R J, Melville W K 1990 *Philos. Trans. Roy. Soc. London A* **331** 735
- [ 3 ] Fochesato C, Grilli S T, Dias F 2007 *Wave Motion* **44** 395
- [ 4 ] Li J X, Liu S X, Hong K Y 2008 *China Ocean Eng.* **22** 253
- [ 5 ] Hammack J L 1973 *J. Fluid Mech.* **60** 769
- [ 6 ] Liu P L F, Liggett J A 1982 *Developments in Boundary Element Methods-2* (London: Applied Science Publisher) p37
- [ 7 ] Nakayama T 1983 *Int. J. Numer. Methods Eng.* **19** 953
- [ 8 ] He H L, Song J B, Li S, Yang J P 2008 *China Ocean Eng.* **22** 693
- [ 9 ] Grilli S T, Watts P 2005 *J. Wtrwy. Port, Coast. Ocean Eng.* **131** 283
- [ 10 ] Enet F, Grilli S T 2007 *J. Wtrwy. Port, Coast. Ocean Eng.* **133** 442
- [ 11 ] Watts P, Grilli S T, Tappin D R, Fryer G J 2005 *J. Wtrwy. Port, Coast. Ocean Eng.* **131** 298
- [ 12 ] Tappin D R, Watts P, Grilli S T 2008 *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* **8** 243
- [ 13 ] Noda E 1970 *J. Wtrwy., Harbors Coast. Eng. Div.* **96** 835
- [ 14 ] Iwasaki S 1982 *Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo* **57** 239
- [ 15 ] Song Y T, Fu L L, Zlotnicki V, Ji C, Hjorleifsdottir V, Shum C K, Yi Y 2008 *Ocean Modelling* **20** 362
- [ 16 ] Li Z, Wei E B, Tian J W 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 3028 (in Chinese) 李志、魏恩泊、田纪伟 2007 物理学报 **56** 3028 ]
- [ 17 ] Wei E B, Ge Y 2005 *Chin. Phys.* **14** 1259

- [ 18 ] Zhang S W 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3287 ( in Chinese ) [ 张书文 2008 物理学报 **57** 3287 ]
- [ 19 ] Duncan J H 1981 *Proc. R. Soc. Lond. A* **377** 331
- [ 20 ] Duncan J H 1983 *J. Fluid Mech.* **126** 507
- [ 21 ] Jian Y J , Quan E X , Zhang J , Meng J M 2004 *Chin. Phys.* **13** 1623
- [ 22 ] Chen X G , Song J B 2006 *Chin. Phys.* **15** 756
- [ 23 ] Chen X G , Song J B , Sun Q 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 5699 ( in Chinese ) [ 陈小刚、宋金宝、孙 群 2005 物理学报 **54** 5699 ]
- [ 24 ] Chen C L , Zhang J E , Li Y S 2007 *Chin. Phys.* **16** 2167
- [ 25 ] Chen X G , Guo Z P , Song J B 2008 *Chin. Phys. B* **17** 3387
- [ 26 ] Yang H L , Song J B , Yang L G , Liu Y J 2007 *Chin. Phys.* **16** 3589
- [ 27 ] Pang J , Chen X G , Song J B 2007 *Acta Phys. Sin.* **57** 4733 ( in Chinese ) [ 庞 晶、陈小刚、宋金宝 2007 物理学报 **57** 4733 ]
- [ 28 ] Song J B 2006 *Chin. Phys.* **15** 2796
- [ 29 ] He H L , Song J B , Li S 2008 *Chin. J. Geophys.* **51** 727 ( in Chinese ) [ 何海伦、宋金宝、李 爽 2008 地球物理学报 **51** 727 ]
- [ 30 ] Drimer N , Agnon Y 2006 *Wave Motion* **43** 241
- [ 31 ] He H L , Chen L Q , Song J B 2007 *Marine Sciences* **31** 46 ( in Chinese ) [ 何海伦、陈利琴、宋金宝 2007 海洋科学 **31** 46 ]
- [ 32 ] Song J B , Banner M L 2002 *J. Phys. Oceanogr.* **32** 2541
- [ 33 ] Song J B , Banner M L 2004 *J. Phys. Oceanogr.* **34** 950

## Wave generation by the falling rock in the two-dimensional wave tank<sup>\*</sup>

He Hai-Lun<sup>1,2,3,†</sup> Liu Yong-Jun<sup>2,3,4</sup> Mo Jun<sup>5</sup> Song Jin-Bao<sup>2,3</sup>

1 *Key Laboratory of Coastal Disaster and Defense of Ministry of Education , Hohai University , Nanjing 210098 , China )*

2 *Institute of Oceanology , Chinese Academy of Sciences , Qingdao 266071 , China )*

3 *Key Laboratory of Ocean Circulation and Waves , Chinese Academy of Sciences , Qingdao 266071 , China )*

4 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences , Beijing 100049 , China )*

5 *Navy Submarine College , Qingdao 266071 , China )*

( Received 6 December 2008 ; revised manuscript received 15 January 2009 )

### Abstract

Wave generation by the falling rock in the two-dimensional wave tank is experimentally and numerically studied , where the numerical model utilizes the boundary element method to solve the fully nonlinear potential flow theory . The wave profiles at different times are measured in the laboratory , which are also used to test the numerical model . Comparisons show that the experimental and numerical results are in good agreement , and the numerical model can be used to simulate the wave generation due to the submarine rock falling . Further numerical tests on the influences of the rock size , density , initial position and the falling angle on the wave elevation of the generated waves are performed , respectively . The results show that the size and density of the rock have strong effects on the maximum elevation of the generated wave , while the effects of the initial position and the falling angle of the rock are also significant . When the size or the density of the rock increases , the maximum elevation of the generated wave increases . The same effect on the generated wave would be produced if the initial position of the rock becomes closer to the surface , or the falling angle between the falling route and the vertical direction turns larger . In addition , the present numerical tests reveal that the submarine rock falling provides a new generation method for the breaking wave in the wave tank .

**Keywords** : submarine rock falling , wave generation , boundary element method , wave breaking

**PACC** : 0340G , 9210H

<sup>\*</sup> Project supported by the National Science Fund for Distinguished Young Scholars of China ( Grant No. 40425015 ) , the National Natural Science Foundation of China ( Grant No. 40876012 ) , and the Program for New Century Excellent Talents in University of Ministry of Education of China ( Grant No. NCET-07-0255 ) .

<sup>†</sup> E-mail : alanhe@hhu.edu.cn