



规则波条件下弹性支撑水平板 波浪冲击试验研究

孙见锋, 邢 飞, 唐 帅

(山东省水利勘测设计院有限公司, 山东 济南, 250013)

摘要: 随着水弹性力学的发展, 在海岸和近海工程中, 对于弹性支撑下波浪冲击作用过程的机理研究, 掌握建构筑物在波浪冲击作用下动力响应变化特征及动力响应对冲击荷载的影响规律变得十分迫切。试验研究以透空式海洋平台等为代表的建构筑物遭受波浪冲击为背景, 通过模型试验研究水平板在不同刚度弹性支撑下波浪冲击作用的过程。根据冲击压力变化特点, 把波浪冲击过程划分为冲击阶段、淹没阶段、脱水阶段、脱离阶段等 4 个不同阶段。讨论并归纳了一个波浪周期内水平板底部冲击压力变化特点, 定义冲击持续时间, 总结了较大压力沿板底的分布特征。为研究支撑刚度和水弹性对波浪冲击压力及结构动力响应的影响, 模型共设计 3 组不同刚度的弹性支撑水平板, 得到了支撑刚度变化对较大冲击压力幅值沿板底分布、冲击持续时间的影响规律; 在时域和频域内, 分别讨论了相对支撑刚度与相对加速度相互之间的变化规律以及弹性支撑刚度对振动加速度的频谱分布规律影响。

关键词: 波浪冲击; 模型试验; 支撑刚度; 时域分析; 频域分析

中图分类号: U641; P753

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)10-0010-10

Experimental investigation of regular wave impact on horizontal elastic supported plate

SUN Jianfeng, XING Fei, TANG Shuai

(Shandong Survey and Design Institute of Water Conservancy, Jinan 250013, China)

Abstract: with the development of hydro-elasticity, in coastal and offshore engineering, it has become very urgent to study the mechanism of wave impact process with elastic support, and to master the dynamic response change characteristics of buildings and structures under wave impact and the influence law of dynamic response on impact loads. The experimental research is based on the background of the open-type marine platform suffering from wave impact. The process of wave impact on horizontal plates under different stiffness elastic support is investigated through model tests. According to the characteristics of the impact pressure change, the impact process is divided into four different stages: impact stage, submergence stage, dehydration stage and detachment stage. In a wave period, the characteristics of the impact pressure changes at the bottom of the horizontal plate during a wave cycle are discussed and summarized. The impact duration time is defined and the distribution characteristics of the larger pressure amplitude along the bottom of the plate are summarized. To study the influence of the support stiffness and hydro-elasticity on the wave impact pressure amplitude and the dynamic response of the structure, three groups of horizontal plate with different stiffness elastic support are designed. The influence law of the support stiffness change on the distribution of the larger impact pressure amplitude along the plate bottom and the impact duration time is obtained. In the time-domain and frequency-domain, the change rule between the relative support stiffness and the relative acceleration, as well as the influence of elastic support stiffness on the frequency spectrum distribution of vibration acceleration, are discussed separately.

Keywords: wave impact; model test; support stiffness; time-domain analysis; frequency-domain analysis

收稿日期: 2025-01-09

作者简介: 孙见锋(1988—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为海洋工程结构、水工结构研究设计。

波浪冲击作用时常发生于水面与海洋平台上部结构和海上漂浮建筑物之间, 导致建构筑物发生破坏。波浪与结构物之间强烈的冲击碰撞现象即为波浪冲击, 冲击过程涉及三相介质(固、气、液)耦合。波浪冲击机理十分复杂, 至今仍是海洋工程领域的难题之一。

波浪冲击课题研究始于 20 世纪 60 年代。代表性的研究成果主要分为理论研究、物理模型试验和数值模拟三大类。理论研究中通常采用类 Morrison 方程, 结合冲击系数来计算小尺度结构冲击力, 冲击系数离散性很大^[1-4]; Wang^[5]提出计算大尺度结构基于动量定理的色散波冲击压力公式; Kaplan^[6]将小尺度水平圆柱的计算方法推广应用到平台结构的冲击问题。物模试验中研究者通过不同的物理模型试验分别提出不同的波浪冲击力的计算公式^[7]。数值模拟方面, 基于 VOF(流体体积法, volume of fluid)方法的有限差分法^[8-9]、SPH(平滑粒子流体动力学, smoothed particle hydrodynamics)方法^[10]用于模拟波浪对结构物的冲击作用。

上述研究成果均在刚体假定和忽略结构尺度对波浪的影响基础上得出, 存在一定的局限性。

大尺度结构物本身的尺度效应、动力响应和变形都会引起结构物底面的水体表面形状和冲击压力发生变化, 由此而造成的水弹性影响已经不能忽略。水弹性冲击的研究^[11-12]多以弹性船体的入水冲击为研究背景, 与海洋结构物的水弹性冲击问题明显不同。Sulisz 等^[13]进行了弹性支撑刚性板的物理模型试验研究。目前, 结构物的波浪冲击作用研究中考虑水弹性影响的研究成果还较少, 基础性的试验数据和试验研究相对匮乏。

本文通过模型试验开展了弹性支撑水平板的波浪冲击作用研究, 对较大冲击压力沿板底分布情况、弹性支撑刚度变化对冲击持续时间、冲击幅值和较大幅值压力沿板底分布的影响规律进行讨论和分析。在时域内得到了相对支撑刚度与相对加速度、相对位移之间的变化规律; 在频域内讨论了弹性支撑刚度对振动加速度的频谱分布的影响规律。

1 试验设计

试验在高校实验室的波浪水槽内进行。水槽长 22 m、宽 0.8 m、高 0.8 m。水槽一端为造波机, 一端为消能装置, 见图 1。

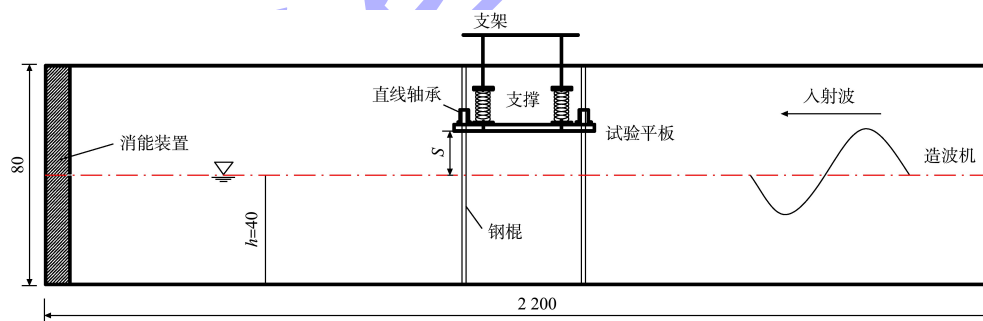


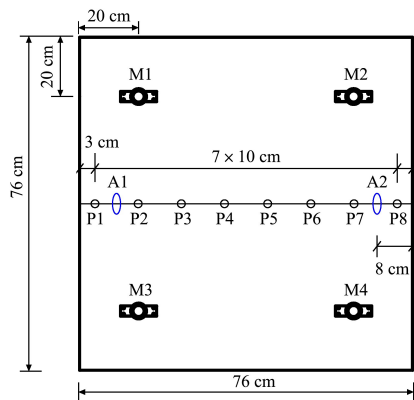
图 1 试验平面布置 (单位: cm)

Fig. 1 Layout plan of experiment (unit: cm)

水平板材质为有机玻璃, 尺寸为 $0.76 \text{ m} \times 0.76 \text{ m} \times 0.012 \text{ m}$ 。水平板通过 4 只弹簧连接到 4 根直径 12 mm 的钢丝杆上。钢丝杆一端连接弹簧, 一端连接升降装置, 见图 1。为保证水平板只能在竖直方向上下运动, 4 个直线轴承 (M1~M4) 固定在水平板上, 4 根钢棍穿过直线轴承后两端分别固定在水槽底部和上部, 见图 2。试验中布置 8 个竖向压力传感器 (编号 P1~P8) 和 2 个加速度传感器 (编号 A1~A2) 于水平板底部。波高 $H = 8、10$ 和 12 cm , 周期

$T = 1.0、1.3 \text{ s}$, 相对净空 $s/H = 0、0.1、0.2、0.3$ 和 0.4 , 其中 s 为水平板体与静水面之间的净空。

试验设计 3 种不同刚度弹性支撑的水平板模型。在 Model01 和 Model02 模型设计中, 水平板通过不同直径的弹簧连接到升降支架上。2 种模型的弹簧丝直径分别为 4、6 mm。在 Model03 模型设计中, 水平板直接由钢丝杆连接到升降架上。试验前, 采用初位移法得到 3 种模型的动力特性参数, 见表 1, 试验照片见图 3。



注：○代表压力传感器；○代表加速度传感器。

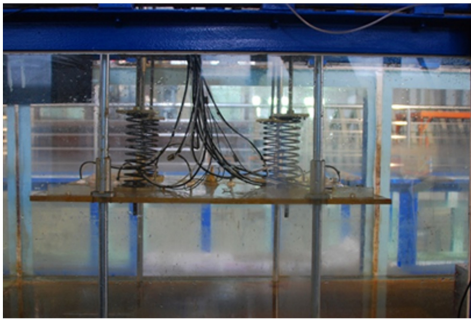
图 2 压力和加速度传感器布置

Fig. 2 Layout of pressure and acceleration transducer

表 1 结构物动力特性参数

Tab. 1 Dynamic characteristic parameters of structure

模型	f/Hz	M/kg	$K/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	ζ
Model01	4.6	8.8	7.3	0.23
Model02	7.5	8.8	19.9	0.20
Model03	36.6	8.8	464.9	0.08



b) Model02



c) Model03

图 3 Model01~Model03 试验照片

Fig. 3 Experimental photos of Model01~Model03



a) Model01

2 波浪冲击压力分析

2.1 冲击压力变化特点及过程划分

一个周期的波浪冲击作用过程，冲击压力历时曲线(图 4)表现为一个短历时、大幅值的冲击压力和一个变化相对、历时相对较长的缓慢平稳的动水压力。在时间分布上，波浪与平板接触后，冲击作用从冲击点开始随着波浪向前传输；在空间分布上，冲击作用沿板底面向前推移。

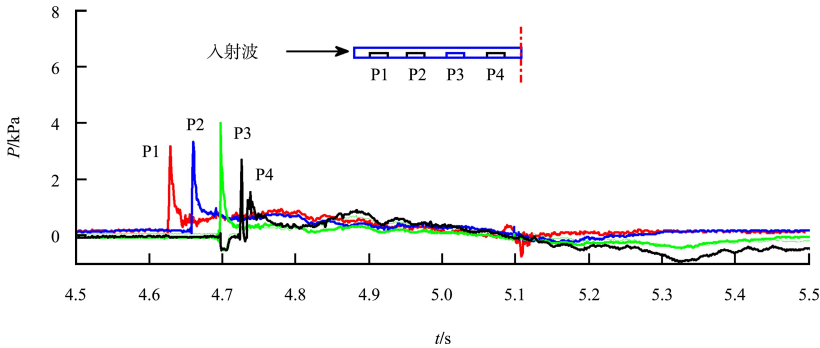


图 4 板底下测点冲击压力历时曲线

Fig. 4 Time history curve of impact pressure at measuring points under plate

一个作用周期内结构物底板冲击压力历时曲线见图 5、6。从中看出，波浪冲击过程可分为典型的 4 个不同阶段：1) 冲击阶段，波浪与水平

板底部刚发生接触，出现一个短历时、大幅值的脉冲压力；2) 淹没阶段，波浪与水平板底的接触面积逐渐增大，并且在净空较小时淹没板体；

3) 脱水阶段, 水体与水平板板底刚开始分离时, 板底部与水面之间形成空腔, 外界空气未能及时补充该空腔区域, 使得动水压力由正压力变为负压力; 此过程受到水气混掺的影响, 呈现出有大量气泡的生成与破灭现象; 4) 脱离阶段, 水体与板底部测点所在区域完全分离, 水体与板底部之间的空隙逐渐变大, 外界空气得以补充进来, 冲击作用过程结束。

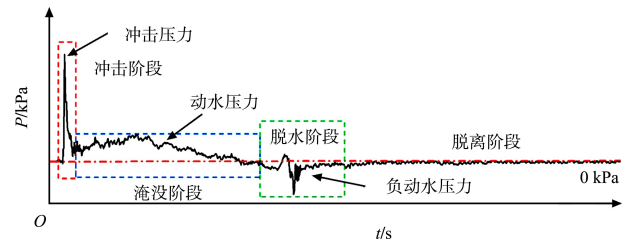


图 5 波浪冲击不同阶段

Fig. 5 Wave impact at different stages

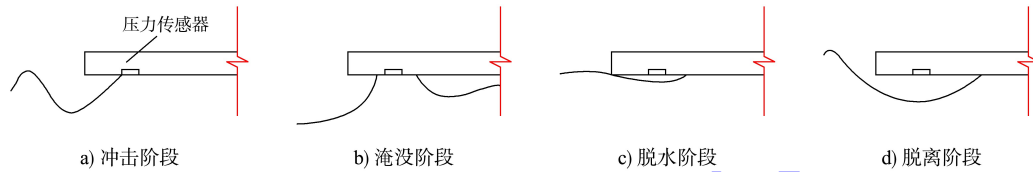


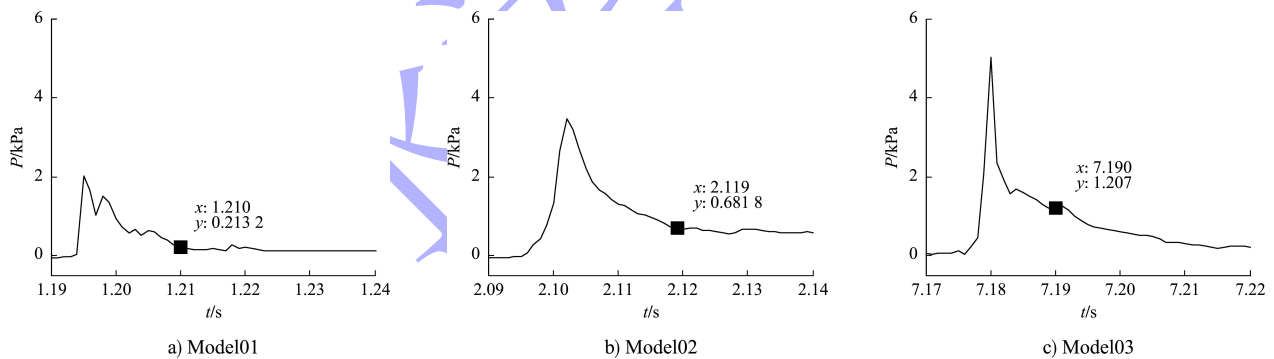
图 6 不同阶段的水体与板体接触情形

Fig. 6 Contact condition between water bodies and plates at different stages

2.2 刚度对冲击持续时间的影响

定义 T_r 为冲击作用持续时间, 表征波浪冲击过程中的冲击阶段。Model01 ~ Model03 水平板底部 P3(5[#]) 压力测点在冲击作用发生时的局部历时

曲线见图 7。从中看出, T_r 随支撑刚度的增加而减小。模型 Model01 支撑刚度最小, 波浪与板体接触后, 板体整体向上运动, 结构弹性响应大, 增加了水体与板体的作用时间; 模型 Model03 支撑刚度最大, 波浪与板体接触后, 结构弹性响应小。



注: 压力曲线中的 x 为压力幅值, y 为横坐标时间。

图 7 3 种模型冲击持续时间 ($H=12$ cm, $T=1.3$ s, $s/H=0.2$)Fig. 7 Impact duration of three models ($H=12$ cm, $T=1.3$ s, $s/H=0.2$)

2.3 刚度对较大压力沿板底分布的影响

为了研究波浪传播方向冲击压力沿水平板板底的分布情况, 对采样序列内 (总点数为 N_0) 的采集样点幅值在 P_0 ($P_0=2$ kPa) 之上的个数进行了统计分析, 见图 8。从图中可以看到大于 P_0 的较大冲击压力幅值沿板底的分布情况。

Model01 ~ Model03 在同一条件下满足统计条

件的采样点数 (较大压力幅值) 沿板底部的分布情况见图 9。可以看出: 较大幅值压力出现的频率 Model03 最多, Model02 次之, Model01 最少。支撑刚度越大, 水平板底部更容易出现较大冲击压力。较大冲击压力主要分布在板底的前半部分, 并且随着波浪周期的增大, 较大压力出现位置呈向水平板后半部分移动的趋势。

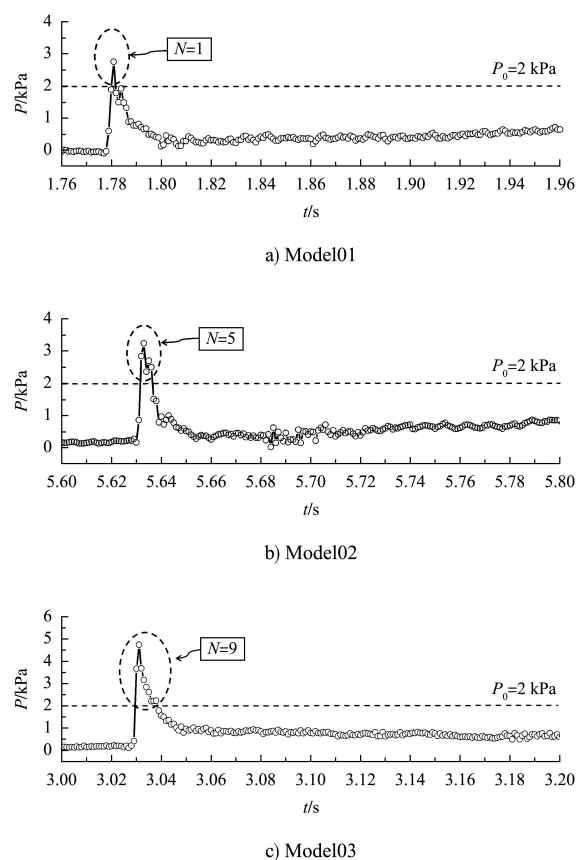


图 8 满足统计条件的采样点数
($H=12\text{ cm}, T=1.3\text{ s}, s/H=0.2$)
Fig. 8 Number of sampling points meeting
statistical conditions ($H=12\text{ cm}, T=1.3\text{ s}, s/H=0.2$)

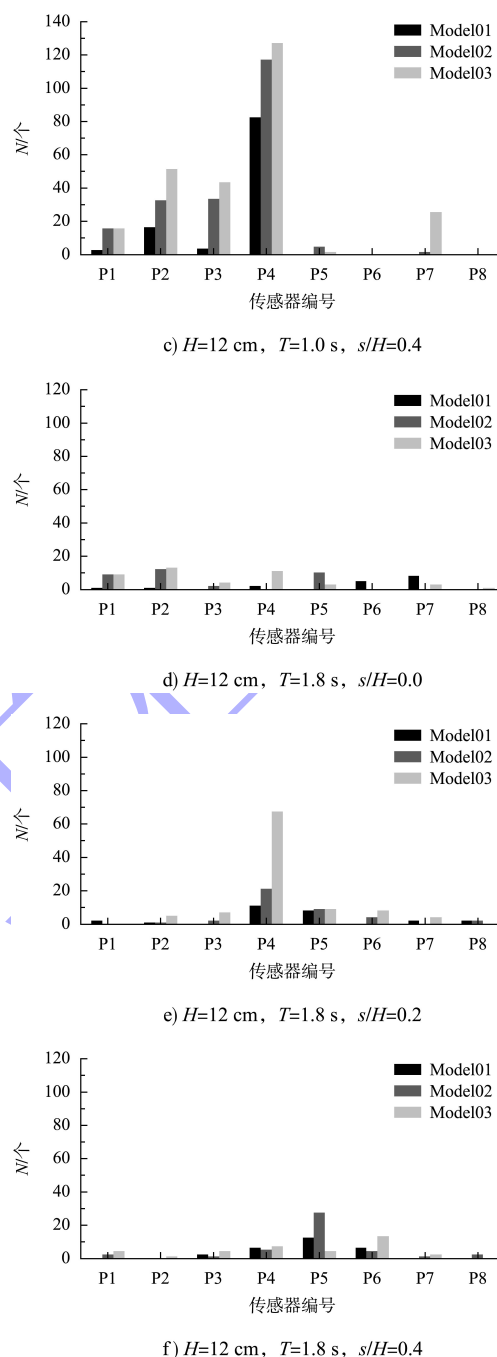
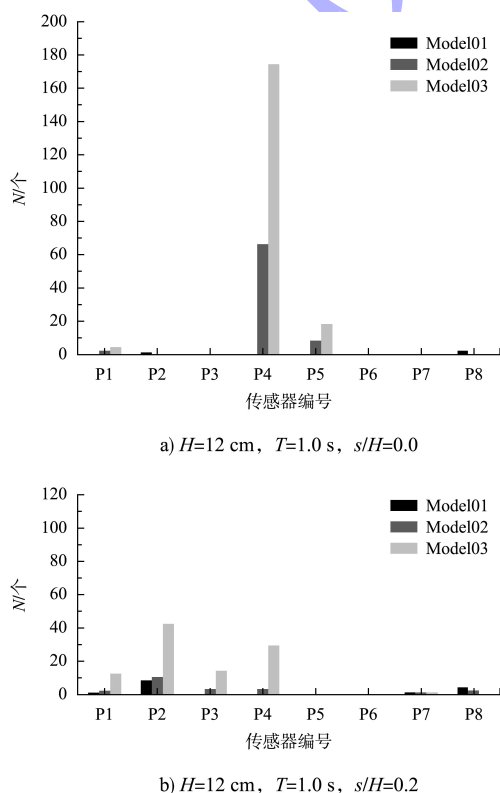


图 9 3 种模型相同条件下满足统计条件采样点数沿板底的分布
Fig. 9 Distribution of number of sampling points
along bottom of plate meeting statistical conditions
under same conditions for three models

3 动力响应分析

研究结构的动态特性时,通常要分析结构的加速度、速度或者动态位移等响应信号,它们之间是微分或者积分的关系。实际工程应用中,大多通过传感器采集加速度作为响应信号。为方便研究,定义振动加速度平均值:

$$\bar{A}_0 = |\bar{A}_p - \bar{A}_N| \quad (1)$$

其中: $\bar{A}_p = \sum_N A_{p_i}/n$ (2)

$\bar{A}_N = \sum_N A_{N_i}/n$ (3)

式中: $\bar{A}_0$ 为振动加速度平均值; A_{p_i} 为加速度峰值的正值; A_{N_i} 为加速度峰值负值; n 为周期数。

为了便于总结变化规律, 对相关物理量采取无量纲化处理:

1) 定义 μ_{av} 为相对加速度, 表示加速度幅值变化。

$$\mu_{av} = \bar{A}_0 T^2 / L \quad (4)$$

式中: T 为入射波浪周期; L 为入射波浪的波长。

2) 定义 $\lambda = f_T / f_G$ 为相对支撑刚度, 表示结构物支撑刚度变化。

$$\lambda = f_T / f_G \quad (5)$$

式中: f_T 为入射波浪的入射频率; f_G 为测得的结构物固有频率。

λ 不同工况下的数值见表 2。

表 2 不同工况下 λ 的数值

Tab. 2 Numerical value of λ under different conditions

T/s	λ		
	Model01	Model02	Model03
1.0	0.217	0.133	0.027
1.3	0.167	0.103	0.021
1.6	0.136	0.083	0.017
1.8	0.121	0.074	0.015

3.1 波浪冲击下结构动力响应时域分析

结构物振动响应与支撑刚度变化紧密相关。波浪冲击作用发生时, 支撑刚度较小的结构物振动对应一种整体效应, 发生“弹性振动”; 支撑刚度很大的结构物对应的则是局部效应, 发生结构“颤振”。

Model01~Model03 模型在相同条件下, 3 个周期内的加速度 A1 历时曲线见图 10、11。Model01、Model02 在冲击和脱水阶段加速度历时形态变化剧烈, 出现加速度最大幅值, 幅值对称性不好, 衰减周期长; Model03 在冲击和脱水阶段出现振动加速度最大值, 且历时曲线呈现明显的衰减特性, 幅值对称性良好。

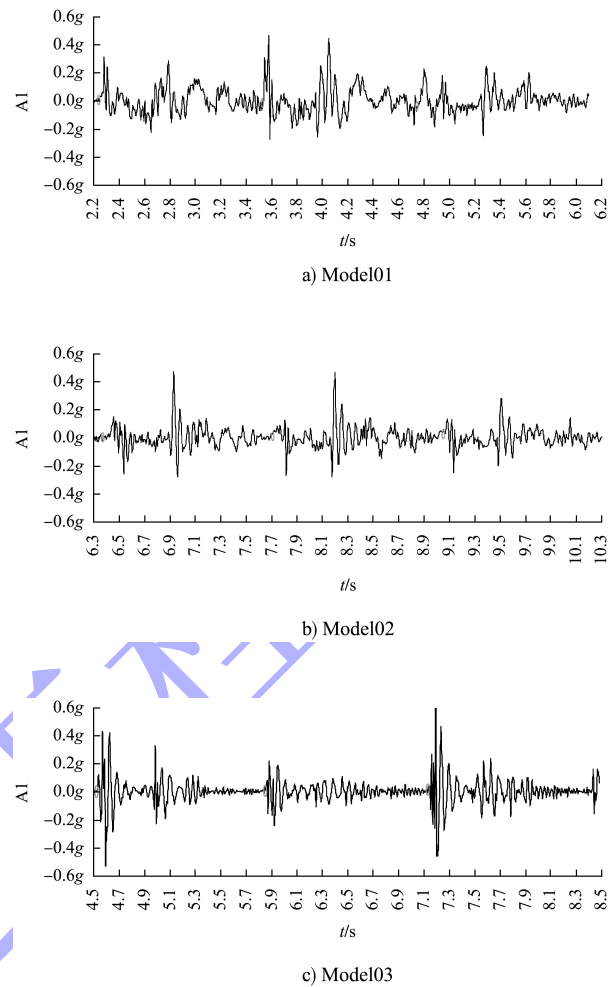
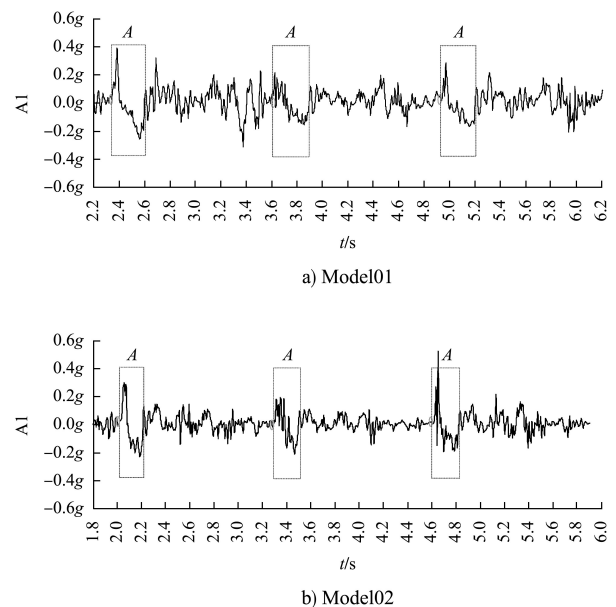


图 10 3 种模型 A1 加速度历时曲线
($H=12$ cm, $T=1.3$ s, $s/H=0.0$)

Fig. 10 A1 acceleration-time curve of three models
($H=12$ cm, $T=1.3$ s, $s/H=0.0$)



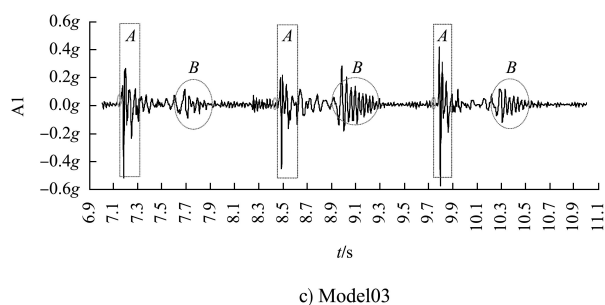


图 11 3 种模型 A1 加速度历时曲线
($H=12\text{ cm}$, $T=1.3\text{ s}$, $s/H=0.2$)

Fig. 11 A1 acceleration-time curve of three models
($H=12\text{ cm}$, $T=1.3\text{ s}$, $s/H=0.2$)

图 11 中, 把差异性较大的区域用虚线框分为 A、B 两个区域; 在 A 区域, 随着支撑刚度增加, 振动持续时间越来越短; Model01 和 Model02 的加速度历时曲线均呈现出相同的变化规律, 即先增

加到最大正值, 再减小到 0, 然后再增加到最大负值, 完成周期性的“弹性振动”; Model03 对应时段的加速度历时曲线呈现明显不同的变化规律, 表现周期性的“振颤”。Model03 在 B 区域与 Model01、Model02 有着明显差异。“弹性振动”对应结构物的整体运动效应, 结构阻尼对这种整体运动效应影响较大, 由于运动阻尼的影响能量在波浪冲击结束后而缓慢耗散; “振颤”对应结构物的局部效应, 结构阻尼对这种局部效应影响较小, 表现为在波浪冲击结束后, 振动历时曲线先表现为一段平缓的变化后急剧耗散。

不同波浪要素条件下, 相对加速度随着相对支撑刚度变化的情况见图 12。随着相对支撑刚度增大, 相对加速度呈现减小趋势。

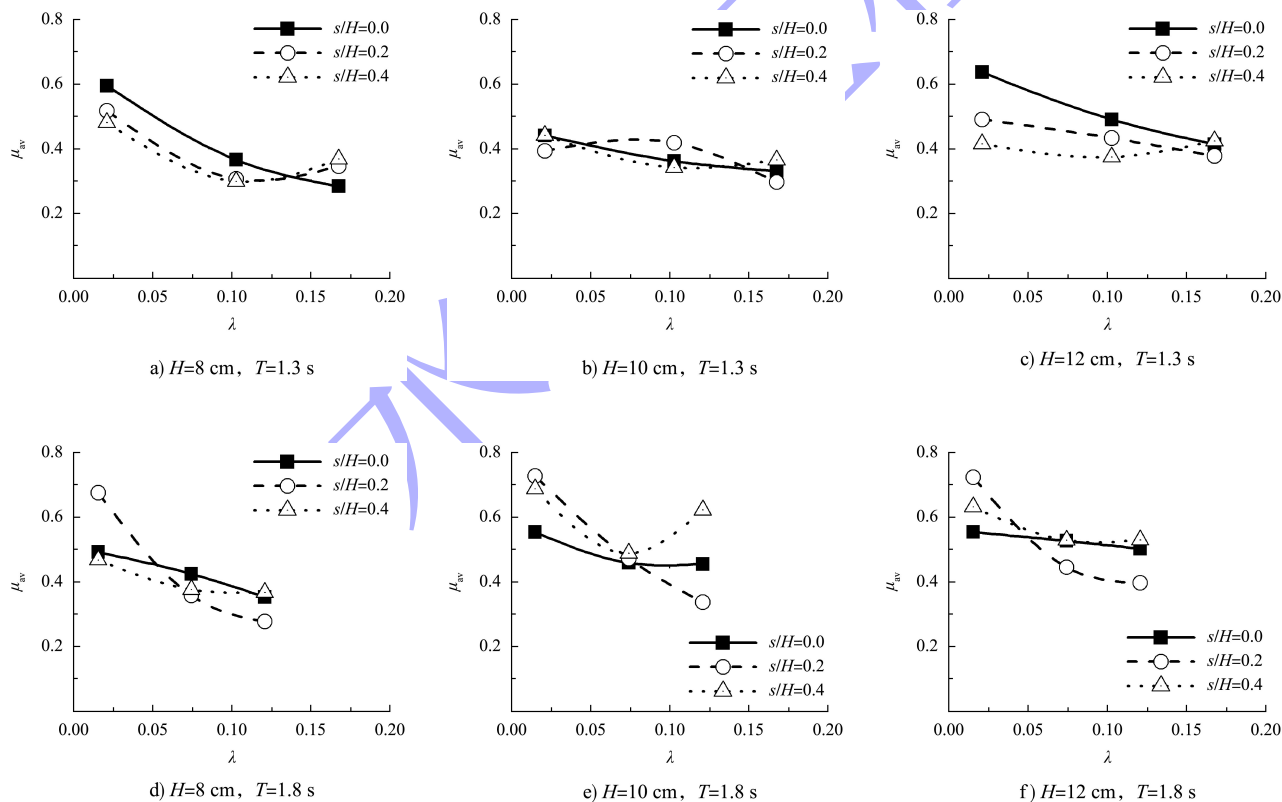


图 12 相对加速度与相对支撑刚度之间的关系

Fig. 12 Relationship between relative acceleration and relative support stiffness

3.2 波浪冲击作用下结构动力响应频域分析

Model01 ~ Model03 模型的加速度 A1 历时曲线经过 FFT 变换后得到的频谱分布见图 13。弹

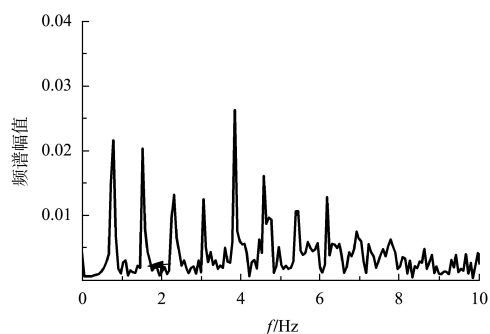
性支撑刚度的变化对加速度频谱沿频域轴的分布和频谱峰值大小的影响主要表现在以下几个方面。

1) 不同弹性支撑刚度, 频谱峰值分布具有明

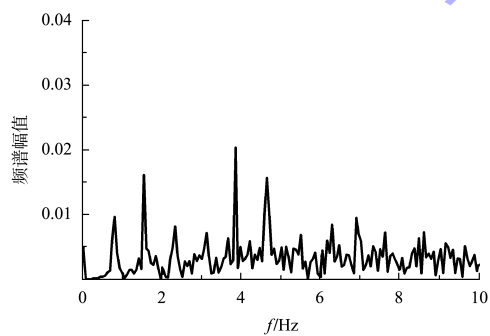
显差异。具体表现为支撑刚度较小时, 频谱峰值集中分布在 $0 \sim 4$ Hz (Model01)、 $4 \sim 6$ Hz (Model02), 支撑刚度较大时, 在 $0 \sim 10$ Hz 没有较大谱峰值分布, 频谱峰值主要分布在 $12 \sim 32$ Hz (Model03)。

2) 加速度响应谱具有多个峰值, 弹性支撑刚度越小, 峰值数量越多; 峰值频率对应于入射波浪的频率、倍频。

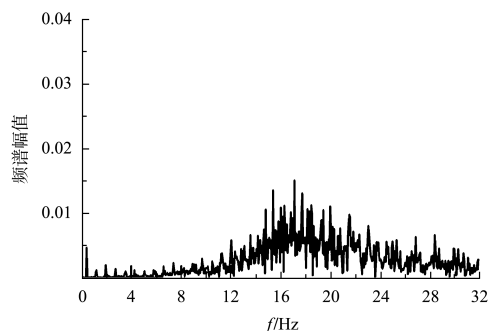
3) 弹性支撑刚度较小时, 能量主要集中在入射波浪的低倍频段; 弹性支撑刚度较大时, 能量比较分散, 主要集中在高倍频段。



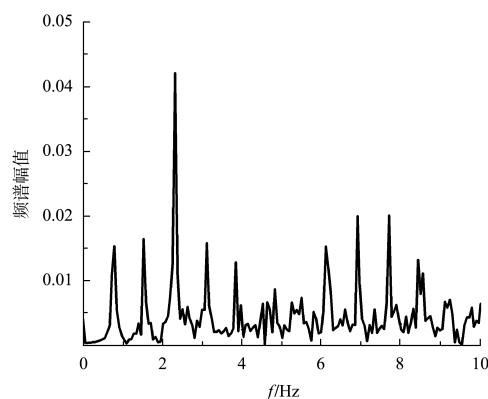
a) Model01, $H=12$ cm, $T=1.3$ s, $s/H=0.0$



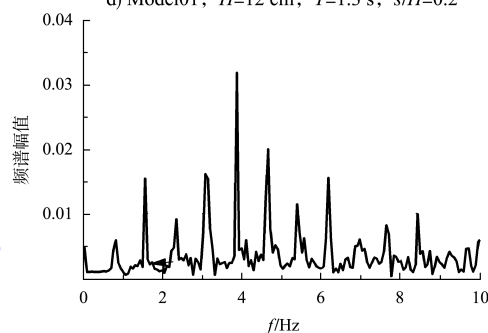
b) Model02, $H=12$ cm, $T=1.3$ s, $s/H=0.0$



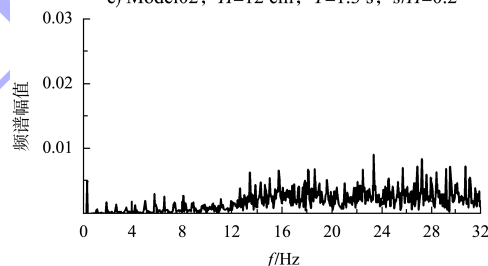
c) Model03, $H=12$ cm, $T=1.3$ s, $s/H=0.0$



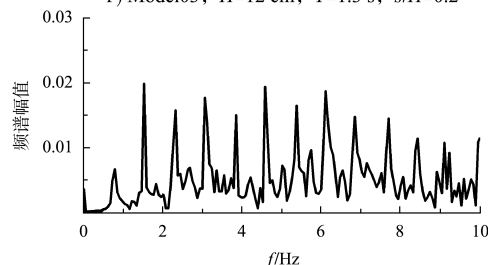
d) Model01, $H=12$ cm, $T=1.3$ s, $s/H=0.2$



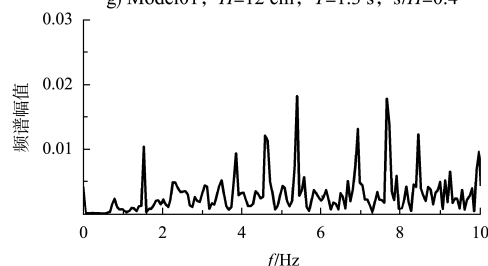
e) Model02, $H=12$ cm, $T=1.3$ s, $s/H=0.2$



f) Model03, $H=12$ cm, $T=1.3$ s, $s/H=0.2$



g) Model01, $H=12$ cm, $T=1.3$ s, $s/H=0.4$



h) Model02, $H=12$ cm, $T=1.3$ s, $s/H=0.4$

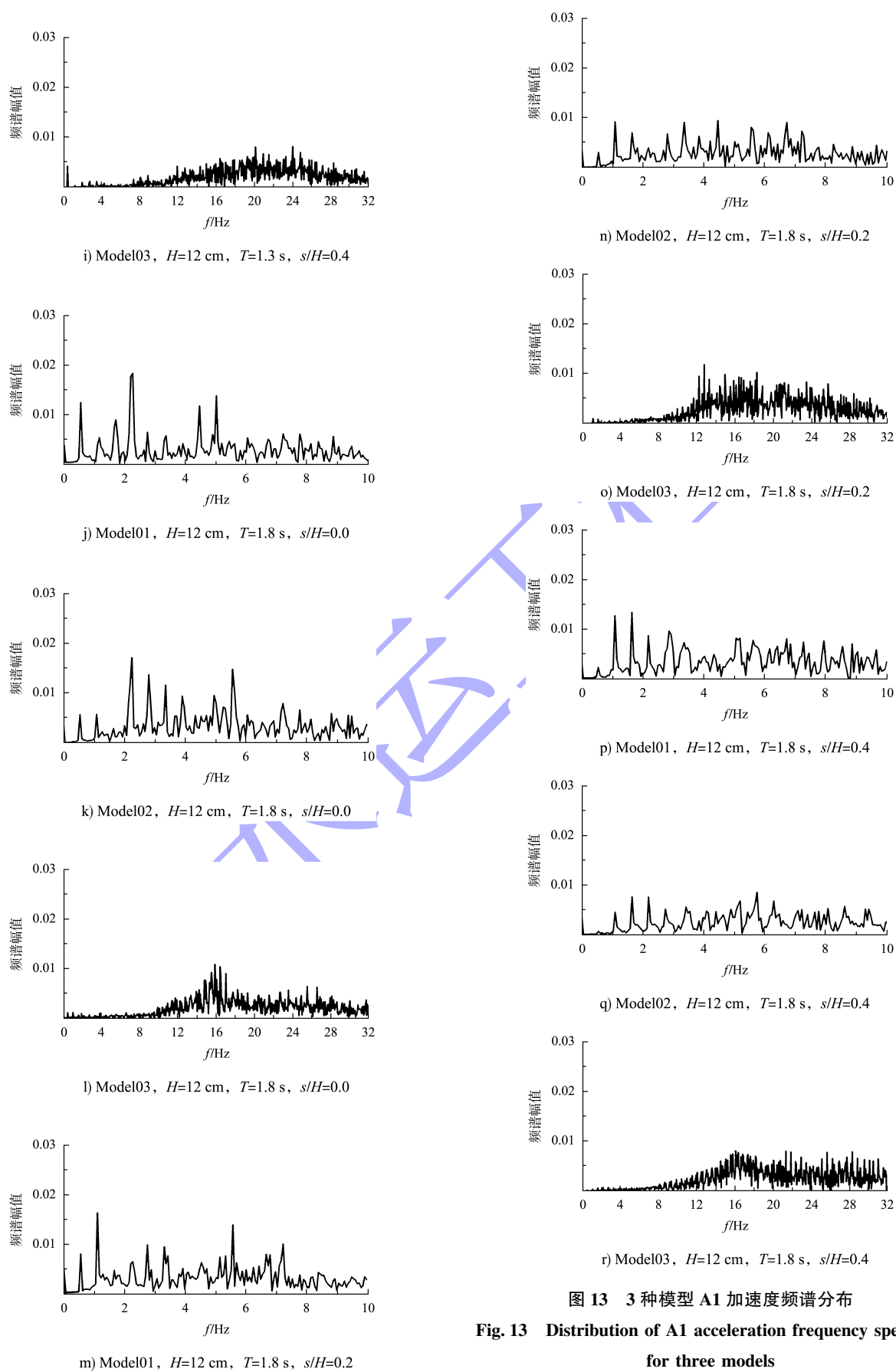


图 13 3 种模型 A1 加速度频谱分布

Fig. 13 Distribution of A1 acceleration frequency spectrum for three models

4 结论

1) 波浪冲击过程可分为冲击阶段、淹没阶段、脱水阶段、脱离阶段等 4 个不同阶段; 弹性支撑刚度的减小延长了冲击作用时间, 在波浪冲击发生瞬间起到了缓冲作用。

2) 支撑刚度越大, 水平板底部更容易出现较大冲击压力。较大冲击压力主要分布在板底的前半部分, 并且随着波浪周期的增大, 较大压力出现位置有向水平板后半部分移动的趋势。在弹性支撑范围内, 相对加速度随着相对支撑刚度减小而呈现增大趋势。

3) 结构动力响应时域分析表明, 相对支撑刚度越大, 相对加速度越小; 结构动力响应频域分析表明, 加速度频谱中频率成份包含结构的遭遇频率和多个倍频成分。弹性支撑刚度较小时, 频谱峰值主要分布在 0~6 Hz, 能量主要集中在入射波浪的低倍频段; 弹性刚度支撑较大时, 在 0~10 Hz 没有较大谱峰值分布, 能量比较分散, 主要集中在高倍频段。

参考文献:

- [1] KAPLAN P, SILBERT M N. Impact forces on platform horizontal members in the splash zone[C]//Proceeding of the 8th Annual Offshore Technology Conference. Houston: [s. n.], 1976: 749-758.
- [2] MILLER B L. Wave slamming loads on horizontal circular elements of offshore structures[J]. Naval architect, 1978(3): 81-98.
- [3] FALTINSEN O M, KJÆRLAND O, NØTTVEIT A, et al. Water impact loads and dynamic response of horizontal circular cylinders in offshore structures [C]//The 9th Annual Offshore Technology Conference. Houston: [s. n.], 1977: 119-126.
- [4] SARPKAYA T. Wave impact loads on cylinders[C]//The 10th Annual Offshore Technology Conference. Houston: [s. n.], 1978: 169-176.
- [5] WANG H. Water wave pressure on horizontal plate[J]. Journal of the hydraulics division, 1970, 96 (10): 1997-2017.
- [6] KAPLAN P. Wave impact forces on offshore structures: re-examination and new interpretations [C]//Offshore Technology Conference. Houston: [s. n.], 1992: OTC 6814.
- [7] GODA Y, SUZUKI Y. Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments [C]//Coastal Engineering 1976. American Society of Civil Engineers, 1977: 828-845.
- [8] REN B, WANG Y X. Numerical simulation of random wave slamming on structures in the splash zone[J]. Ocean engineering, 2004, 31(5/6): 547-560.
- [9] 金凤. 波浪冲击平板过程流场的数值模拟[J]. 水运工程, 2013(4): 52-56.
JIN F. Numerical simulation of flow field in the process of wave impact on open-piled structures[J]. Port & waterway engineering, 2013(4): 52-56.
- [10] 任冰, 高睿, 金钊, 等. 波浪对透空式结构物冲击作用的光滑粒子流体动力学数值模拟[J]. 海洋学报, 2012, 34(1): 163-177.
REN B, GAO R, JIN Z, et al. The numerical simulation of wave slamming on an open-piled structure using the SPH model[J]. Acta oceanologica sinica (Chinese edition), 2012, 34(1): 163-177.
- [11] FALTINSEN O M, KVÅLSVOLD J, AARSNES J V. Wave impact on a horizontal elastic plate[J]. Journal of marine science and technology, 1997, 2(2): 87-100.
- [12] SUMI Y, OKADA S, MUKAI H, et al. Study on water impact of elastic plate with small deadrise angles[J]. Journal of the society of naval architects of Japan, 1997(182): 639-646.
- [13] SULISZ W, WILDE P, WISNIEWSKI M. Wave impact on elastically supported horizontal deck[J]. Journal of fluids and structures, 2005, 21(3): 305-319.

(本文编辑 赵娟)