

固定海洋平台立柱波浪爬高的数值模拟

摘要

对海洋平台来说,立柱的波浪爬高是一种常见现象,研究海洋平台立柱波浪爬高可以为海洋平台设计中气隙高度的选取提供重要参考,本毕业设计主要对固定海洋平台立柱的波浪爬高问题进行了数值模拟。本文工作主要基于开源代码 OpenFOAM,通过有限体积法数值离散求解流体控制方程,采用 VOF 方法处理自由面,使用推板方法造波,并以阻尼消波方式消波,建立数值波浪水池。首先通过二维数值水池造波试验,验证了数值方法的可行性。在此基础上,对三维数值水池中周期波沿圆柱表面的爬高进行了模拟,得到了与模型试验数据比较一致的波浪爬高值,以及作用在圆柱上的波浪力。此外,还模拟了入射波为孤立波的圆柱波浪爬高,通过网格收敛性试验得到了可信的不同波高入射波沿圆柱表面不同位置处的爬高值和作用于圆柱的波浪力,并分析了变化规律。

关键词: 周期波, 孤立波, 波浪爬高, 数值模拟, OpenFOAM

NUMERICAL SIMULATION OF WAVE RUN-UP OF PILES OF FIXED PLATFORM

ABSTRACT

To an offshore platform, wave run-up along the pile is a common phenomenon. Researching into the wave run-up of piles of the platform can provide important references to determine the required air gap when designing a platform. In this paper, wave run-up of piles of a fixed platform is investigated through numerical simulation. All the work is based on the open source code OpenFOAM. The Finite Volume Method is applied to discretize the governing equations to solve them numerically, and the free surface is tracked by the Volume of Fluid method. To develop a numerical wave tank, a piston is added to generate the wave, and a damping zone is set to avoid the wave reflection at the right end of the tank. First of all, the numerical method is validated to be feasible by conducting a series of wave generation tests in a 2D numerical wave tank. On that basis, the wave run-up of periodic waves along a cylinder is simulated in a 3D numerical wave tank. The computation results of wave run-up height are in good agreement with experimental data. The wave forces acting on the cylinder are also calculated. What's more, the simulation on the wave run-up of solitary waves along a cylinder is carried out as well. By implementing the mesh convergence tests, authentic results of the wave run-up height of different incident waves with diverse wave height along a cylinder and wave forces acting on the cylinder are obtained, and the variation pattern of these data is analyzed.

Key words: periodic wave, solitary wave, wave run-up, numerical simulation, OpenFOAM

目录

第一章 绪论.....	1
1.1 课题研究背景及进展.....	1
1.2 关于 OpenFOAM.....	1
1.3 主要内容介绍.....	2
第二章 数值模拟的基本理论和方法.....	3
2.1 控制方程.....	3
2.2 数值方法.....	3
2.2.1 方程离散.....	3
2.2.2 流场速度压力解耦.....	6
2.2.3 自由表面处理.....	6
2.2.4 计算流程.....	7
第三章 二维数值水池波浪模拟.....	8
3.1 数值波浪水池.....	8
3.2 数值造波与消波技术.....	8
3.2.1 数值造波技术.....	8
3.2.2 数值消波技术.....	9
3.3 二维造波试验.....	9
3.3.1 消波区参数.....	10
3.3.2 时间步长.....	13
3.3.3 网格精度.....	15
3.3.4 参数设置小结.....	17
3.4 本章小结.....	21
第四章 三维数值水池周期波爬高的数值模拟.....	22
4.1 从二维到三维.....	22
4.2 试验模型介绍.....	23
4.3 4.22m 波高的周期波沿圆柱爬高结果.....	24
4.3.1 波浪爬高值.....	25
4.3.2 模型试验与数值模拟结果比较.....	28
4.3.3 压力与速度分布和波浪力曲线.....	31
4.4 7.99m 波高的周期波沿圆柱爬高结果.....	32
4.4.1 波浪爬高值.....	33
4.4.2 模型试验与数值模拟结果比较.....	37
4.4.3 压力与速度分布和波浪力曲线.....	38
4.5 本章小结.....	39
第五章 三维数值水池孤立波爬高的数值模拟.....	40
5.1 孤立波与造波理论.....	40
5.2 试验模型介绍.....	40
5.3 数值模拟.....	41
5.3.1 造波试验.....	41
5.3.2 网格收敛性试验.....	42



5.3.3 沿圆柱表面波浪爬高值比较.....	45
5.4 本章小结.....	46
第六章 总结与展望.....	48
6.1 总结.....	48
6.2 展望.....	48
参考文献.....	49
谢辞.....	50

第一章 绪论

1.1 课题研究背景及进展

21 世纪是海洋的世纪^[1]。随着工业社会高速发展,人类对能源的需求也越来越大。经过常年开采,陆上油气资源已经不足以满足社会需求;而占据地球总面积约 70% 的海洋中却蕴藏着丰富的自然资源尚未被人们所利用^[2],若能充分利用这部分资源,必将为经济社会发展注入新的活力。向海洋进军成为必然选择。

作为开发海上油气资源的装备,海洋平台起着非常重要的作用,它为在海上进行钻井、采油、生产、集运等活动提供生产和生活设施。依其结构特性和工作状态,可将海洋平台分为固定式、移动式和半固定式三大类。固定式海洋平台作为其中一种较为常见的结构形式,其特点是平台本体离水面有一定高度,平台上设置采油、处理设备及人员的生活舱室等;而平台则通常由下部的立柱支撑。

在设计海洋平台时,通常需要考虑气隙大小这个因素。气隙是自由面与甲板下沿之间的空隙,它的选取与波浪爬高现象有着十分密切的联系。所谓波浪爬高^[3],是指波浪在向前传播的过程中,如果遇到结构物,水体会沿着结构物在垂直方向上爬升一定高度这样一种现象。从定义可以看出,波浪爬高为气隙大小的选取提供了依据。如果计算中发现一个平台的波浪爬高现象十分明显,这就要求平台设计时应相应增加气隙的值,使得波浪不会打到甲板下沿,以保证整个海洋平台的安全性;反之则可适当减小气隙值来增加平台稳定性,并降低制造成本,以保证经济性。

正因为波浪爬高对海洋平台设计具有如此重要的意义,近几十年来,国内外许多学者和研究机构从水池试验或数值模拟的角度都对这一现象进行了较深入细致的研究。Nielsen^[4]等人对周期波沿单个圆柱、方柱以及半潜式平台的爬高做了大量的模型试验,积累了一些重要的试验数据。Weihua Mo^[5]等人采用“两级投影有限体积法”(two-step projection finite volume scheme)分别对孤立波、周期波与三维细长型立柱的相互作用进行了数值模拟,并利用流体体积法(Volume Of Fluid, 简称为 VOF)记录自由表面位移,得到的结果与模型试验数据十分接近。A. J. Martin^[6]等人采用几种不同的理论方法对深水、大波陡条件下的立柱波浪爬高现象进行了模拟,通过与试验数据进行比较分析,发现了理论的不足。Bjarne Büchmann^[7]等人在时域内建立一个三维二阶边界元模型,考察了数值波浪水产中波浪——流——立柱三者的相互作用。Nitin Repalle^[8]等人基于不可压粘性雷诺时均 NS 方程(Reynolds-Averaged Navier-Stokes, 简称为 RANS)建立了一个 Spar 平台圆柱模型,通过与试验数据比较,得到了比较一致的结果。

1.2 关于 OpenFOAM

从数值模拟的角度对流体流动进行研究,属于计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics, 简称为 CFD)的范畴。经过多年的发展,已经有不少公司开发出了许多具有相当影响力的 CFD 软件,OpenFOAM(Open Field Operation And Manipulation)就是其中的后起之秀。本毕业设计就主要使用其对波浪爬高问题进行数值模拟,所以有必要先对它做简单介绍。

与大多数商业 CFD 软件(如著名的 ANSYS 公司出品的大名鼎鼎的 Fluent)不同的是,OpenFOAM 是一个开源的 CFD 软件包,这一点从其名称中的 Open 即可看出,用户可以方便地在其官方网站^[9]上下载最新版本的代码自行编译。对于开源软件来说,其源代码可以免

费被公众使用，并且此软件的使用，修改和分发也不受许可证的限制。或许正是因为其开源特性，OpenFOAM 拥有非常强大的功能，而且并不逊色于其它商业 CFD 软件。OpenFOAM 可以求解的问题范围非常广，除了化学反应、湍流、热传递等复杂流动外，还能对固体动力学和电磁学等问题求解。

OpenFOAM 是一个完全由 C++ 编写的面向对象的 CFD 类库，采用类似于我们日常习惯的方法在软件中描述偏微分方程的有限体积离散化，阅读起来比较方便；支持多面体网格（比如 CD-adapco 公司推出的 CCM+ 生成的多面体网格），因而可以处理复杂的几何外形，支持大型并行计算等。另外，OpenFOAM 还具有以下功能和特点：

- (1) 支持用户为特定问题自行修改或编写程序；
- (2) 可以自动生成网格；
- (3) 模拟拉格朗日粒子追踪及射流；
- (4) 支持滑移网格，网格层消等；
- (5) 各种各样的工具箱，包括各种 ODE 求解器、ChemKIN 接口等；
- (6) 具备网格转换工具，支持多种网格接口，可以转换多种网格形式为 OpenFOAM 可以处理的网格形式。

1.3 主要内容介绍

本毕业设计主要利用开源代码 OpenFOAM，对不同波浪情况下单个圆柱的波浪爬高现象进行了数值模拟，并得到了爬升高度及作用于圆柱上波浪力的值。这里，固定海洋平台的立柱被简化为一根固定的垂直圆柱，但是这并不会影响试验结果。本文的主要内容可分为以下几个部分：

首先在第二章中对数值模拟所涉及的理论知识做了较详细的介绍，包括建立控制方程以及对方程进行数值求解所用到的一些数值方法。

第三章主要介绍了二维数值水池中造波和消波所用到的理论，并通过数值收敛性测试对设置参数进行比较，得到了一组相对较优的值，可以应用于后续的三维数值水池模拟。

在第四章，从二维扩展到三维，对三维数值水池中波高分别为 4.22m 和 7.99m 的两种周期波沿单个圆柱的爬高现象进行了数值模拟，并与模型试验得到的爬高值进行了比较，还得到了圆柱附近流场的压力与速度分布和作用于圆柱上的波浪力。

第五章介绍了 10m、15m、20m 和 25m 四种不同波高的入射孤立波沿圆柱的爬高，对最大波高值和沿水池长度方向的波浪力作了比较。

第六章对上述工作做出总结，并从几个方面对后续工作进行了展望。

第二章 数值模拟的基本理论和方法

要采用 CFD 的方法对流体流动问题进行数值模拟，首先应当建立能正确反映工程问题或物理题本质的数学模型，即能反映问题所涉及各个量之间关系的微分方程，通常称之为控制方程；为了能求解这些微分方程，还需要使用一些数值方法对方程进行处理。本章主要对建立数值波浪水池所采用的控制方程及数值方法这两部分内容进行介绍。

2.1 控制方程

数值波浪水池中的水面波动问题涉及到水和空气两种不同态的物质，属于气液两相流问题。通常可将水看作不可压缩流体；对于空气，由于流速较低，也将其视为不可压缩的。对于这样一个涉及不可压粘性流的气液两相流问题，其基本控制方程包含两部分：连续性方程和动量方程，具体形式如下所示：

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (2-1)$$

$$\frac{\partial(\rho\vec{u})}{\partial t} + \nabla(\rho\vec{u}\vec{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu\nabla\vec{u}) + \rho\vec{g} + \vec{F}_s \quad (2-2)$$

其中， \vec{u} 、 ρ 、 p 、 μ 、 \vec{g} 分别表示流体的速度、密度、压力、动力粘性系数和重力加速度； \vec{F}_s 表示自由表面张力沿界面法向的分量，其作用是平衡界面两边的压力差，故仅在水气界面处起作用，而在其他位置处的值为零，它可由下面的表达式确定：

$$\vec{F}_s = \sigma\kappa(x)\vec{n} \quad (2-3)$$

其中， σ 是张力系数，表示自由面每增加单位面积所需做的功，为常量； \vec{n} 为界面处的单位法向量； κ 表示界面处曲率，即：

$$\kappa(x) = \nabla \cdot \vec{n} \quad (2-4)$$

对于这类问题，由于流体域存在一个不能事先预知其形状与位置的自由边界，即所谓的自由面，如何处理这个自由面就相当关键。

2.2 数值方法

上一节给出了针对气液两相流问题的控制方程。对于这样一个非线性二阶偏微分方程组，要想通过理论求解得到解析解，一般来说是非常困难的，所以通常会采取一些数值方法对方程进行处理以达到数值求解。下面将对本文用到的一些数值方法进行介绍。

2.2.1 方程离散

对于在求解域内所建立的偏微分方程，理论上是有解析解的；但是，由于所处理问题自身的复杂性，通常很难直接得到其解析解，因此就需要通过数值方法把计算域内的有限数量位置上的因变量值当作基本未知量来处理，从而建立一组关于这些未知量的代数方程。通过求解相对简单的代数方程得到特定位置处的变量值，进而确定计算域内其他位置处的值。在这种求解思路里，最重要的一点就是将连续的计算域划分成了有限的离散点，正是通过这样离散化处理，使得原先不可解的问题变得可解。

经过多年的发展，已经产生了诸如有限差分法(Finite Difference Method, 简称为 FDM)，有限元法(Finite Element Method, 简称为 FEM)和有限体积法(Finite Volume Method, 简称为 FVM)等多种离散化方法。而其中的有限体积法由于有着基本思路易于理解，能得出直接的物理解释，以及计算效率高等众多优点，在 CFD 中有着广泛的应用，本毕业设计中所使用的 OpenFOAM 就是基于有限体积法编写的。

这里对有限体积法的基本思路做一个简单的介绍。首先将计算区域划分为不同的网格区域，并使每个网格点周围都有一个互不重复的控制体积；然后将待求解的微分方程对每一个控制体积积分，这样就得到一组离散方程，其中的未知数就是网格点上的因变量。为了求出控制体积的积分，必须假定因变量值在网格点间的变化规律。从积分区域的选取方法来看，有限体积法属于加权余量法中的子域法；从未知解的近似方法来看，有限体积法属于采用局部近似的离散方法。

下面结合一个二维瞬态对流-扩散问题的例子来说明离散过程^[10]。首先写出控制方程的通用形式：

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\vec{u}\phi) = \nabla \cdot (\Gamma\nabla\phi) + S \quad (2-5)$$

其中， ρ 是密度， ϕ 是广义变量， \vec{u} 是速度矢量， Γ 是广义扩散系数， S 是广义源项。方程(2-5)左边第一项为时间导数项，也可称为瞬态项，左边第二项为对流项；方程右边第一项为扩散项，右边第二项为源项。对于动量方程中的压力梯度项，也将其放到广义源项 S 中。

参照上面所述有限体积法基本思路，需要将整个计算域划分为许多网格区域，这里结合图2-1对计算网格做简单介绍。

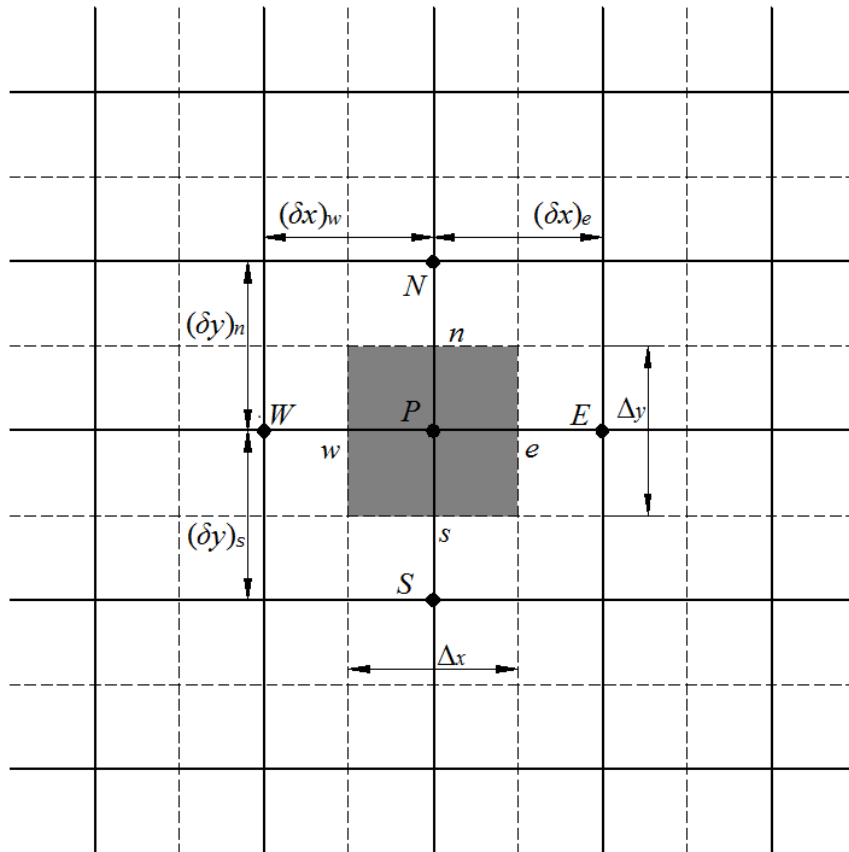


图 2-1 有限体积法的计算网格与控制体积

网格中实线的交点是计算节点，每个实线方格被纵横两条虚线分割成四块；图中所示的阴影由相邻的四个小方格组成，是控制体。这样，虚线组成了控制体积的界面，并且每个控制体积中都包含了一个节点。对于图中所示的节点P，分别用大写的E、W、S和N来表示与之相邻的东、西、南和北四个方位的节点，用小写的e、w、s和n来表示控制体积相应方位的界面，与节点对应的控制体积也用表示该节点的字母来表示。例如，图中所示的阴影部分即为节点P对应的控制体积P。 Δx 和 Δy 分别表示控制体积在x与y方向的宽度，体积值 $\Delta V = \Delta x \times \Delta y$ ，而节点P到E、W、S和N各个节点的距离分别用 $(\delta x)_e$ 、 $(\delta x)_w$ 、 $(\delta y)_s$ 和

$(\delta y)_n$ 表示。

现在对方程 (2-5) 从控制体积 P 的体积值 ΔV 和时间段 t 到 $t+\Delta t$ 上积分, 得:

$$\begin{aligned} & \int_t^{t+\Delta t} \int_{\Delta V} \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} dVdt + \int_t^{t+\Delta t} \int_{\Delta V} \nabla \cdot (\rho\bar{u}\phi) dVdt \\ &= \int_t^{t+\Delta t} \int_{\Delta V} \nabla \cdot (\Gamma\nabla\phi) dVdt + \int_t^{t+\Delta t} \int_{\Delta V} S dVdt \end{aligned} \quad (2-6)$$

接下来需要对方程 (2-6) 的各项分别处理。

首先对于瞬态项, 假定可以用节点 P 处变量 ϕ 的值 ϕ_P 来表示整个控制体积 P 上变量 ϕ 的值, 而且密度 ρ 在时间段 t 到 $t+\Delta t$ 上为常量, 则方程 (2-6) 中的瞬态项可变为:

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_{\Delta V} \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} dVdt = \int_{\Delta V} \left[\int_t^{t+\Delta t} \rho \frac{\partial\phi}{\partial t} dt \right] dV = \rho(\phi_P - \phi_P^t) \Delta V \quad (2-7)$$

需要说明的是, 上式右边那项中 ϕ_P^t 表示 t 时刻变量 ϕ 的值, 而 ϕ_P 表示 $t + \Delta t$ 时刻变量 ϕ 的值, 为方便书写, 而省略了上标 $t + \Delta t$, 后面也将采用同样的表示方法。

对于源项, 采用将其局部线性化的方法进行处理, 假定在未知量微小的变动范围内, 源项 S 可以表示为该未知量的线性函数:

$$S = S_C + S_P \phi_P \quad (2-8)$$

其中, S_C 是常数部分, S_P 是 S 随 ϕ 变化的曲线在 P 点的斜率。

这样, 方程 (2-6) 中的源项可变为:

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_{\Delta V} S dVdt = \int_t^{t+\Delta t} (S_C + S_P \phi_P) \int_{\Delta V} dVdt = \int_t^{t+\Delta t} (S_C \Delta V + S_P \phi_P \Delta V) dt \quad (2-9)$$

对于对流项, 可以根据 Gauss 散度定理, 将体积分转变为面积分, 可得:

$$\begin{aligned} & \int_t^{t+\Delta t} \int_{\Delta V} \nabla \cdot (\rho\bar{u}\phi) dVdt \\ &= \int_t^{t+\Delta t} [(\rho u \phi A)_e - (\rho u \phi A)_w + (\rho v \phi A)_n - (\rho v \phi A)_s] dt \\ &= \int_t^{t+\Delta t} [(\rho u)_e A_e \phi_e - (\rho u)_w A_w \phi_w + (\rho v)_n A_n \phi_n - (\rho v)_s A_s \phi_s] dt \end{aligned} \quad (2-10)$$

式中, A 表示控制体积界面处的面积值。

对于扩散项, 采用与上面相同的方法, 利用 Gauss 散度定理, 将体积分转变为面积分; 同时, 对于界面上的 ϕ 值, 使用中心差分格式做离散处理, 可得:

$$\begin{aligned} & \int_t^{t+\Delta t} \int_{\Delta V} \nabla \cdot (\Gamma\nabla\phi) dVdt \\ &= \int_t^{t+\Delta t} \left[\left(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial x} A \right)_e - \left(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial x} A \right)_w + \left(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial y} A \right)_n - \left(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial y} A \right)_s \right] dt \\ &= \int_t^{t+\Delta t} \left[\Gamma_e A_e \frac{\phi_E - \phi_P}{(\delta x)_e} - \Gamma_w A_w \frac{\phi_P - \phi_W}{(\delta x)_w} + \Gamma_n A_n \frac{\phi_N - \phi_P}{(\delta y)_n} - \Gamma_s A_s \frac{\phi_P - \phi_S}{(\delta y)_s} \right] dt \end{aligned} \quad (2-11)$$

现在得到了方程 (2-6) 经过处理后各项的表达式, 另外还需要做以下两方面工作:

第一, 对流项 (2-10) 中界面上的 ϕ 值, 需要引入特定的离散格式, 由节点的物理量表示, 就和 (2-11) 所做的一样;

第二, 在对流项、扩散项和源项中引入全隐式的时间积分方案, 例如 $\int_t^{t+\Delta t} \phi_P dt = \phi_P \Delta t$ 。

这样，方程（2-6）就可变为：

$$a_P \phi_P = a_W \phi_W + a_E \phi_E + a_S \phi_S + a_N \phi_N + b \quad (2-12)$$

这就是全隐式时间积分方案下得到的二位瞬态对流-扩散问题的离散方程，式中的系数 a_W 、 a_E 、 a_S 和 a_N 取决于在对流项中引入的离散格式的特定形式。

2.2.2 流场速度压力解耦

上一小节介绍了使用有限体积法建立与控制方程相对应的离散方程的过程，然而对于通常大部分流场的流动问题，所生成的离散方程组仍然不能直接求解。考察 2.1 节中的控制方程，不难发现，速度不仅在连续性方程（2-1）中出现，也同时出现在动量方程（2-2）中，导致各方程错综复杂地耦合在一起；更为复杂的是，压力项也出现在了动量方程中，而又没有可以直接求解压力的方程。方程间的耦合，再加上压力与速度的耦合，这样就导致流场的求解变得相当困难。

为了解决这个问题，发展出了两种解决方法，分别是耦合式解法（coupled method）和分离式解法（segregated method）。耦合式解法的思想是，同时求解离散化的控制方程组，联立求解出各个变量。这种方法虽然可行，但是要想求解这样一个庞大而且复杂的方程组，需要耗费大量的计算资源和时间。相比之下，分离式解法由于并不直接求解整个方程组，而是顺序地、逐个地求解各变量代数方程组，所以效率更高，从而得到了广泛应用。OpenFOAM 就采用了分离式解法中的 PISO（Pressure Implicit with Splitting of Operators）算法，意思是压力的隐式算子分割算法。下面将对 PISO 算法做一些简单介绍。

PISO 算法由 Issa 于 1986 年提出^[11]，最早是针对非定常可压流动问题而建立，后来在定常的流动问题中也得到了广泛应用。PISO 算法采用的是一步预测、两步修正的方法来求解每一时刻的流动物理量，即先使用一个预估的速度或压力值，求解出相应的压力或速度值，然后再通过两次修正，得到满足精度的物理量。具体来说，其计算步骤^[12, 13]为：

- （1）预测步：利用假定或上一时刻计算得到的压力场 p^* ，求解动量离散方程，得到当前时刻的速度场 u^* 和 v^* ；
- （2）第一修正步：定义压力修正值 p' ，速度修正值 u' 、 v' ，求解压力修正方程，要求与 p' 相应的速度修正值 u' 、 v' 能使 $(u^* + u')$ 和 $(v^* + v')$ 满足连续性方程，得到经修正后的 p^{**} 、 u^{**} 和 v^{**} ；
- （3）第二修正步：类似于上一步，定义二次压力修正值 p'' ，求解二次压力修正方程，得到 p'' ，进而得到经二次修正的压力场：

$$p^{***} = p^{**} + p'' = p^* + p' + p'' \quad (2-13)$$

通过 p^{***} ，可得到经二次修正的速度场 u^{***} 和 v^{***} 。

通常认为经过两次修正后得到的速度场和压力场已经满足精度要求，可以作为初值代入下一时刻计算。

2.2.3 自由表面处理

在 2.1 节中提到过，数值波浪水池中的水面波动问题属于气液两相流问题，其中相当重要的一点就是自由表面的处理。伴随着 CFD 的发展，人们逐渐提出了一些处理自由面问题的数值方法。按照处理自由面方式的不同，可以将这些方法分为界面追踪法（Interface Tracking Method）和界面捕捉法（Interface Capturing Method）两大类。其中，OpenFOAM 使用的 VOF（Volume Of Fluid）法就属于界面捕捉法中应用最广泛的方法之一。下面对 VOF 方法做简单介绍。

VOF 方法的思想^[14-16]是，首先定义一个体积分函数 F ，并定义对于流场内有流体一（如水）存在的点，取 $F=1$ ；而对于有流体二（如空气）存在的点，则取 $F=0$ 。这样，对于

一个网格单元来说, F 的平均值就代表该单元内流体一所占的比例, 也即体积分数。因此, 可以用体积分数函数 F 来表示整个流场内两种流体的分布情况:

$$F \begin{cases} = 1, & \text{网格内是流体一} \\ = 0, & \text{网格内是流体二} \\ \in (0,1), & \text{网格内包含自由界面} \end{cases} \quad (2-14)$$

F 是空间点与时间的函数, 满足下面的方程:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \bar{u} \cdot \nabla F = 0 \quad (2-15)$$

通过求解该方程, 就能确定自由表面位于那些单元内, 进而确定其位置。

2.2.4 计算流程

结合上面的数值方法, 现将整个计算流程做简单介绍:

- (1) 读取预先创建好网格、初始条件和边界条件;
- (2) 初始化流场;
- (3) 开始当前时间步的计算, 求解体积分数方程, 确定自由面位置;
- (4) 调用 PISO 算法求解离散化的控制方程, 求得当前时间步的速度场和压力场, 输出结果;
- (5) 更新网格, 校正流量, 重复执行步骤 3、4、5, 直至设定的最后时刻终止计算。

2.3 本章小结

本章主要对采用 CFD 的方法研究流体流动问题的基本理论和方法进行了介绍。首先介绍了流动问题的基本方程, 即控制方程。为了求解控制方程组, 解析方法往往行不通, 可以考虑采用数值方法, 这里结合一个二维瞬态-对流问题介绍了使用有限体积法离散方程的过程。为了将流场内速度和压力解耦, 又对 PISO 算法进行了介绍。为了解决两相流中的自由面问题, 又简单介绍了 VOF 方法。最后对整个计算流程做了介绍。

第三章 二维数值水池波浪模拟

上一章介绍的 CFD 中常用的基本理论和方法,将在本章得到初步应用。本章将讨论二维数值波浪水池的造波问题,首先简单介绍数值波浪水池中常用的造波与消波手段与技术,随后将通过二维造波试验考察若干参数设置的影响。

3.1 数值波浪水池

本节对数值波浪水池与物理试验水池做了简单对比,并讨论了数值波浪水池在船舶与海洋工程中的重要意义。

对于船舶与海洋工程结构物,工作地点总是位于江河湖海,由于常年工作的水域不可能一直风平浪静,船舶与海洋工程结构物与波浪的相互作用,就因此成为结构物设计过程中必须考虑的一个重要因素。长期以来,在物理试验水池中进行模型试验一直是研究探讨结构物与风浪流相互作用的主要途径。虽然模型试验能直接测得需要的流动参数,但也存在着诸如成本高、时间长、对测量技术要求高、不易改变工况以及存在比尺效应影响等诸多局限。

上个世纪中后期,电子计算机的问世与发展,逐渐催生出计算流体力学作为一门独立的学科分支出现。伴随着高性能计算的快速发展,以及数值模拟技术的日趋成熟,利用数值模拟手段在数值水池中模拟结构物与风浪流相互作用成为可能。

与物理试验水池相比,数值水池有着较大的优势。第一,使用数值水池进行数值模拟成本低,耗费的人力、物力少,周期短;第二,可重复性好,对于某一问题可多次、反复模拟,同时保持结果不变;第三,能进行较大范围全尺度模拟,不存在比尺效应的影响。当然必须承认,数值水池并非十全十美,也存在一定的局限性。比如,往往受到理论模型和数值模型的局限,离散解法只是一种近似解法,存在计算误差,模拟精度还有待提高等等。虽然如此,应该同时看到数值水池的优越性与局限性,将其放在适当位置。在工程研究中,数值水池模拟与物理水池模型试验,以及理论分析都是解决问题的重要手段,应该将其有机结合起来。

3.2 数值造波与消波技术

数值波浪水池中很重要的一个技术就是造波。物理试验水池中通常会配备专用的造波机,通过控制造波机依照特定的方式运动带动水体运动,进而模拟出所需要的波浪状况。与此类似,数值波浪水池也需要有这样一个专用模块实现波浪的模拟。此外,物理试验水池往往也会有消波滩之类的消波装置,用以消除波浪在边界处的反射对试验段波场的影响。同样,数值水池中也需要有相应的功能。这一节就主要对数值造波和消波这两个方面的基本理论作一些介绍。

3.2.1 数值造波技术

目前出现了多种数值造波技术,按照是否可以物理实现,大致可将其分为两大类^[17]:物理造波(physical wave generation)和人工造波(artificial wave generation)。所谓物理造波,就是通过数值方法,根据较为成熟的试验造波理论设定数值造波板的运动模式,模仿物理造波机造波;而人工造波则是利用数值模拟的优势创造出来的理想化造波方式,实际的物理试验水池中无法实现。由于物理造波方法所运用的理论与物理试验水池中的造波机一致,已经发展得相当成熟,并且可以很方便移植过来,所以得到了广泛的应用。

推板式造波是物理造波方法中较为常用的一种造波方式,其基本原理是强迫水质点以给定的水平速度运动,最终达到模拟相应波动的目的。根据线性造波理论^[18],在水深为 d 的水池中,一系列周期波的波面方程可表示为:

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) \quad (3-1)$$

其中, H 为波高, k 为波数, ω 是圆频率; x 是造波板运动的水平位移, 是时间 t 的函数, 由下式给出:

$$x(t) = \frac{S}{2} \sin \omega t \quad (3-2)$$

这里, S 表示造波板水平运动的最大位移, 即冲程, 它与波高 H 和水深 d 存在着如下关系:

$$S = H \left(\frac{2kd + \sinh(2kd)}{4 \sinh^2(kd)} \right) \quad (3-3)$$

本毕业设计中采用的是给定造波板的运动速度 $u(t)$, 可以通过对位移 $x(t)$ 关于时间 t 求导数得到:

$$u(t) = \frac{dx}{dt} = \frac{S\omega}{2} \cos \omega t \quad (3-4)$$

实际造波中, 可以先由式 (3-3) 算得与目标波对应的造波板水平运动冲程, 然后再由式 (3-4) 确定造波板的运动速度函数。

3.2.2 数值消波技术

物理试验水池中通常采用的消波滩属于被动式消波, 更复杂的还有主动式消波。与之类似, 数值波浪水池中也有这两种消波手段, 另外还有一种特有的辐射边界条件式消波。

最为常用的被动式数值消波方法, 是在数值水池的后端设置一定长度的阻尼消波区^[19] (damping zone), 又称为数字沙滩或海绵吸收层 (sponge layer)。顾名思义, 其基本思想就是模拟沙滩和海绵的吸收方式, 在消波区内对自由面边界条件或动量方程添加一项阻尼耗散项, 已达到阻尼消波的目的。例如, 在动量方程中添加阻尼耗散项后, 可以将其改写为如下形式:

$$\frac{\partial(\rho \bar{u})}{\partial t} + \nabla(\rho \bar{u} \bar{u}) + \rho \theta \bar{u} = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu \nabla \bar{u}) + \rho \bar{g} + \bar{F}_s \quad (3-5)$$

其中, θ 为消波系数, 可由下面得表达式确定:

$$\theta = \begin{cases} \alpha \frac{x - x_0}{x_1 - x_0}, & x \in [x_0, x_1] \\ 0, & x \in [0, x_0] \end{cases} \quad (3-6)$$

这里的 α 是一个无因次量, 可以通过调整它的大小来调整消波系数的值; x_1 和 x_0 分别表示数值水池的长度以及开始设置消波区的位置。从这里可以看出, 越靠近消波区后段, 消波系数 θ 的值越大, 这样对消波更有利。

3.3 二维造波试验

这一节介绍二维数值水池中的波浪模拟试验。在数值模拟中, 网格形式和时间步长是会对计算结果产生直接影响的重要因素, 必须对其进行系列试验, 以确定合适的值。另外, 尽管网格越密, 时间步长越短, 计算结果越精确, 但是计算时间也必然相应增加, 因此, 也需要通过试验确定一个保证结果有足够精确度而同时计算时间又耗费最少的参数值, 这个过程通常可称为数值收敛测试。

具体来说, 本毕业设计从以下几个方面对二维波浪模拟进行了试验: 消波区参数、时间步长和网格精度。在对参数设置进行试验时, 采用控制变量法的思想, 即每一次只改变多变

量中的某一个变量，而控制其余几个变量不变，从而研究被改变的这个变量对结果影响，最后再综合分析。

首先有必要对试验中所模拟波浪以及水池模型的参数做一个简单介绍。试验中选取的波浪周期 T 为 9s，波高 h 在下面的试验中有 1.0m 和 4.22m 两种情况；数值水池长 L 为 759m，高度 H 为 124m（其中水深 d 为 100m，另有 24m 位于水面以上，作为空气区域，具体形式可参照图 3-1）。

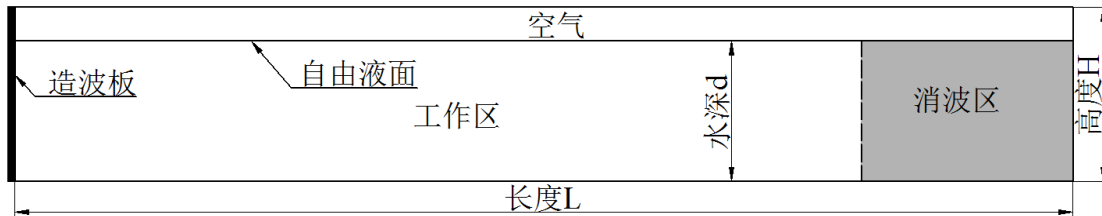


图 3-1 二维数值水池示意图

这里需要说明的有两点：

- (1) 由于本毕业设计中考察波浪为深水波，根据线性波浪理论中深水波的色散关系：

$$\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 = g \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3-7)$$

可以计算得波长 λ 为 126.5m；将其与水深 d 比较，也的确满足 $d > \frac{\lambda}{2}$ 的深水波条件。

- (2) OpenFOAM 中对于二维情况的处理实际也是通过简化三维模型，将其宽度设为单位长度值来实现的；所以这里水池存在 1m 的宽度值，但是并不影响造波过程。

3.3.1 消波区参数

前面曾提到，设置消波区的目的在于消除波浪反射的影响，为了能在数值收敛测试中得到可信的结果，有必要先对消波区参数的选取进行试验。消波区的参数主要包括消波段的长度和消波系数，此外还对消波区网格形式进行了测试。

这部分试验中波高值均设为 1.0m。

3.3.1.1 消波区长度

保证其他参数相同的情况下，设置了两种消波区长度，分别为 75.9m（即 0.6 个波长，或十分之一的水池长度）和 151.8m（即前面长度的两倍）。在离推板 500m 处设置探测点，将 200s 到 225s 这段时间内自由面高度随时间变化的曲线绘出：

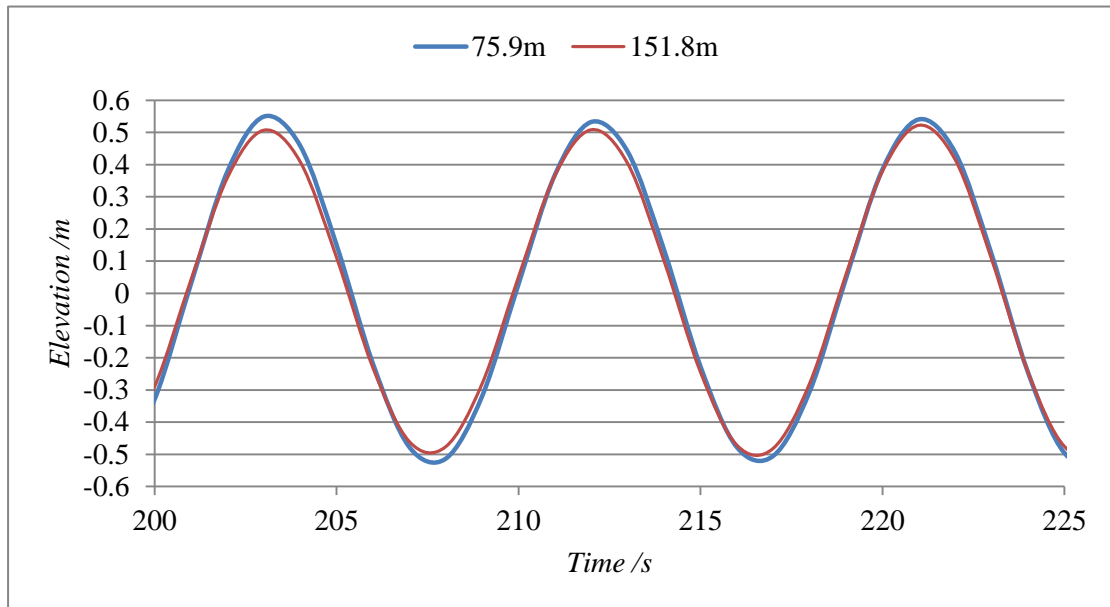


图 3-2 消波区长度分别设为 75.9m 和 151.8m 时，离推板 500m 处自由面高度随时间变化的曲线比较（波高为 1.0m）

从图 3-2 可以看出：消波区长度设为 75.9m 时，波峰值有比较大的起伏，说明并没有起到很好的消波效果，反射波对试验段波场产生了干扰；而当消波区长度增大至 151.8m 时，波峰的起伏明显变小了，这说明消波区长度的设置对于消波效果有比较大的影响，在不影响试验段长度的条件下，应该设置稍长的消波段。在本章后面的试验中，都将消波区长度设置为 151.8m。

但是也应该看到，即使是消波区长度设为较大的 151.8m 的红色曲线，图中显示的波峰值也随着时间增加而略微增大。对于这一点，猜测可能与设置的消波系数的值有关，将在下面的试验中对其进行验证。

3.3.1.2 消波系数

在 3.2.2 中曾对消波系数做过简单介绍，从中可以发现消波系数 θ 与无因次量 α 直接相关：在消波区长度一定的情况下， α 越大则消波区内同一位置的消波系数 θ 就越大，所以通常用无因次量 α 的值来表征消波系数的大小。应该指出，消波系数并非越大越好。过大的消波系数也会引起波浪反射！为了说明这个问题，考察一种极端情况，将 α 设为无穷大，这样即可将消波区视为壁面边界。当波浪传播到消波区时，将直接发生反射，与未设置消波区时的情况一样，根本没有起到消波的作用。

为了得到合适的消波系数，这里设置了三种不同的情况，将无因次量 α 的值分别取为 4、2 和 1.5。其中， α 取为 4 的结果对应的是 3.3.1.1 中消波区长度设为 151.8m 时的结果。现将三种情况下，离推板 500m 处的探测点上记录的 200s 到 225s 这段时间内自由面高度随时间变化的曲线绘出：

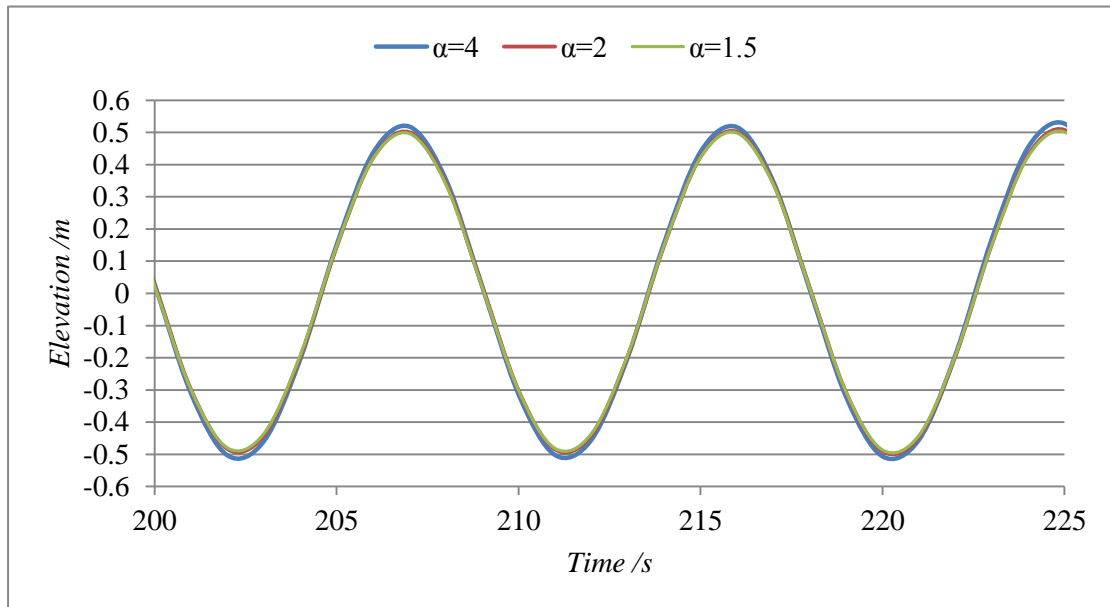


图 3-3 无量纲参数 α 分别取为 4、2 和 1.5 时，离推板 500m 处自由面高度随时间变化的曲线比较（波高为 1.0m）

从图 3-3 中可以看出，当无量纲参数 α 减小时，3.3.1.1 中波峰值随着时间增加而略微增大的情况得到了明显改善， α 为 2 和 1.5 所代表的红色与绿色曲线比 α 为 4 所代表的蓝色曲线在波峰处更加平缓。考虑到后面试验中会出现波高值更大的波浪，在不影响消波效果的情况下，在本章后面的试验中，都将 α 取为 1.5。

3.3.1.3 消波区网格形式

在 3.3.1.2 中，消波区设置成前面一段为均匀（uniform）网格，后面一段为非均匀（nonuniform）网格，这一部分将讨论消波区网格形式对消波效果的影响。所谓均匀网格，就是网格单元的间距是一致的；与此相对应的非均匀网格则意味着网格单元的间距不一致，譬如逐渐加密或减疏，具体形式可参见图 3-4。非均匀网格的出现是为了解决网格量过多的问题，只在重要的区域加密网格，而在对问题影响相对较小的区域则可相应减少网格的布置。

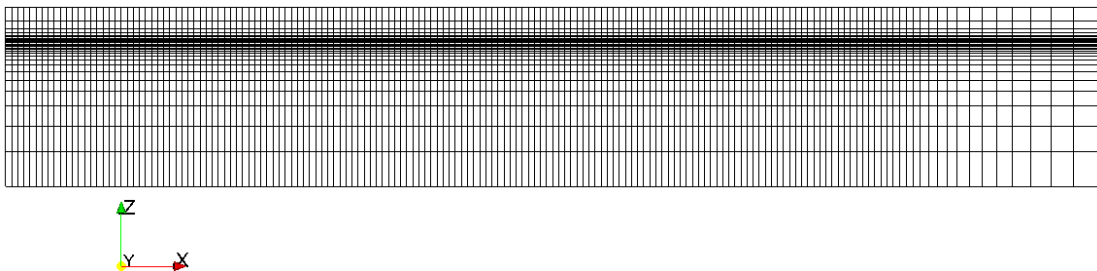


图 3-4 非均匀网格

用 u&n 表示 3.3.1.2 中 α 为 1.5 的情况，另外再设置两种情况：使用名称 uniform 表示消波区全部采用均匀网格的情况，使用名称 nonuniform 表示消波区全部采用非均匀网格的情况，如前所述，所有的情况都取 α 为 1.5。现将三种情况下，离推板 500m 处的探测点上记录的 200s 到 225s 这段时间内自由面高度随时间变化的曲线绘出：

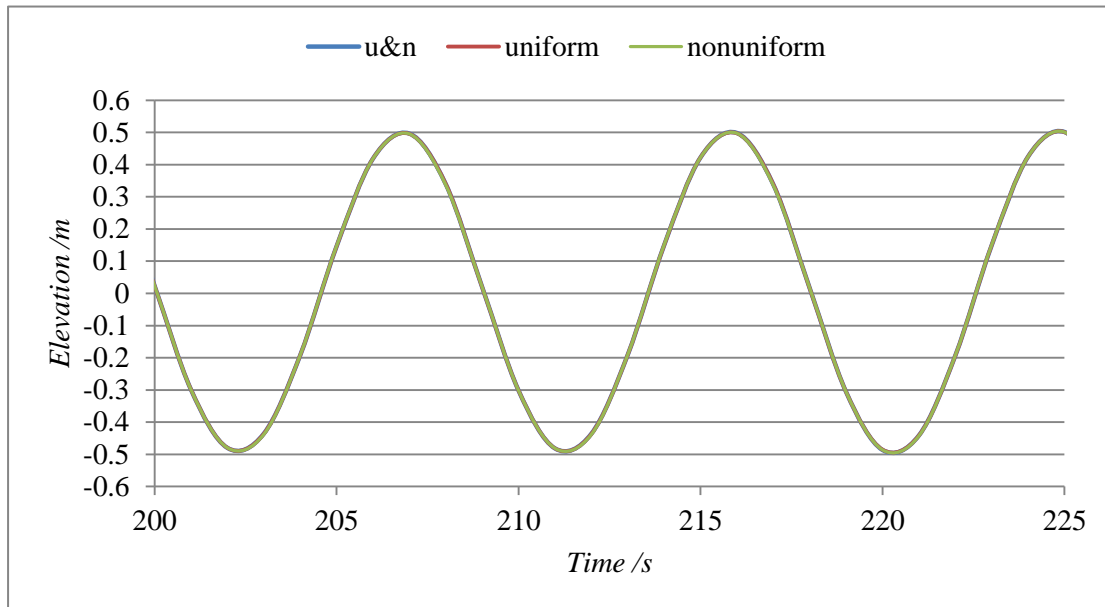


图 3-5 消波区内布置不同的网格形式，离推板 500m 处自由面高度随时间变化的曲线比较（波高为 1.0m）

从图 3-5 中可以看出，三条曲线几乎重合，而且都有稳定的波形产生。这说明，在消波区内布置不同的网格形式，并不会对消波效果产生影响。换句话说，对消波效果有较大影响的因素只包括两方面，即消波区的长度与消波系数的值。

然而，有一点必须说明。对比三种情况的网格数量，可以发现在消波区全部采用非均匀网格形式的情况网格量为 4,374，而采用一半均匀另一半非均匀的网格形式的情况网格量为 4,860。通过简单计算就能发现，前一种情况的网格量比后一种情况少了 10%，比起全部采用均匀网格形式的情况则会少得更多。在简单的二维情况中，可能并不能体现这部分网格量减少的优势，但是三维情况下由于网格量基数大，能够减少 10%的网格量就能节约相当可观的计算时间。所以，在保证消波效果较好的情况下，本章后面的试验中，都会将消波区的网格形式设置为全部非均匀。

3.3.2 时间步长

在数值模拟中，涉及到两个时间步长的概念：计算时间步长和输出时间步长。计算程序进行计算时，通常需要将整个计算时间分成若干段时间间隔，逐段计算，其中每一小段的时间间隔就是计算时间步长；而输出时间步长则是用户控制程序将模拟结果输出为文件保存的时间间隔。需要说明的是，这里的时间是指程序里面所定义的模拟时间，而并非现实生活中的时间。

从这一节开始到本章结束，剩下的试验都将波高值设为 4.22m。

3.3.2.1 计算时间步长

从定义可以看出，计算时间步长的选取会影响计算结果的精度，计算时间步长越短，所分的时间间隔数越多，计算结果将越精确，当然相应的总计算时间也会增加。为了确定一个比较合适的计算时间步长，这里设置了三种不同的情况：0.04s、0.02s 和 0.01s。现将三种情况下，离推板 500m 处的探测点上记录的 150s 到 175s 这段时间内自由面高度随时间变化的曲线绘出：

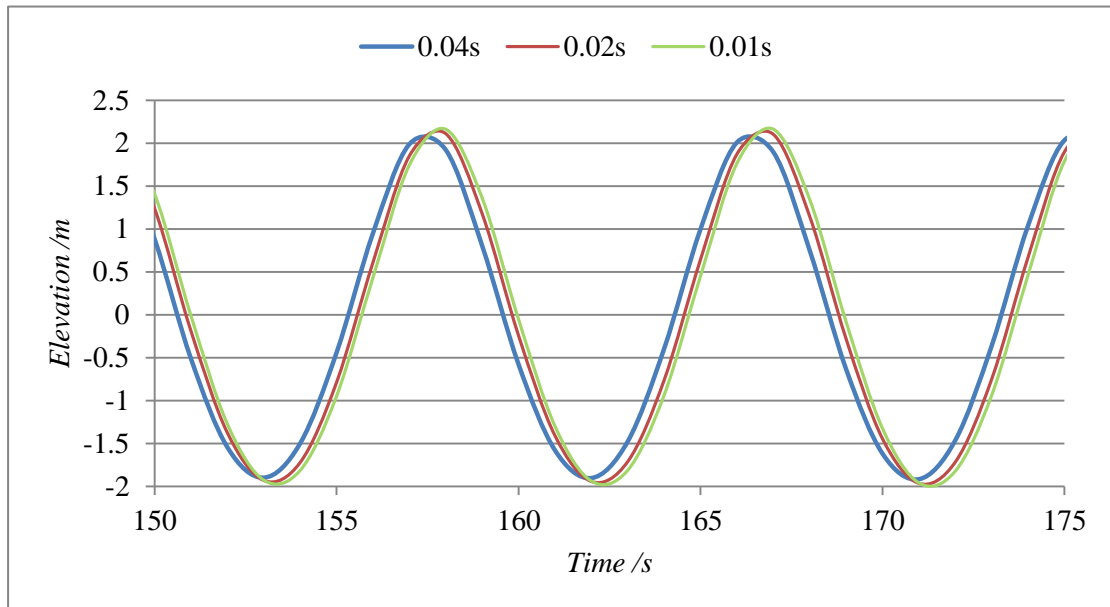


图 3-6 计算时间步长分别取为 0.04s、0.02s 和 0.01s 时，离推板 500m 处自由面高度随时间变化的曲线比较（波高为 4.22m）

从图 3-6 中可以看出：计算时间步长越大，波峰值也越大，越接近于要求的值。当计算时间步长取为 0.02s 时，得到的波峰值已经很接近所要求波高值的一半，即 2.11m；虽然 0.01s 的计算时间步长所得的波峰值更大，但考虑到总计算时间的因素影响，认为 **0.02s 的计算时间步长比较合适**，本章后面的试验中都将这样设置。

另外，有两点需要说明：

- (1) 三种情况的波形图有相位偏差，这正是由于计算时间步长不一致导致推板运动有偏差，属于正常情况；
- (2) 波浪的波谷部分的值要小于波峰值，这是由于造波所采用的是线性波浪理论，只是在小波幅情况下比较符合，4.22m 波高稍显偏大，但是在研究波浪爬高时仅关心波峰值，故影响不大，这里不再讨论。

3.3.2.2 输出时间步长

与计算时间步长不同，从定义即可看出，输出时间步长的选取并不会影响计算结果的精度；然而，它的取值会直接决定用于分析的数据点的数量，并影响数据曲线的光顺程度。对于时历曲线这种斜率变化比较大的曲线，如果所取的点太少，就有可能漏掉某些极值点或者变化剧烈的点。有鉴于此，有必要对输出时间步长的取值进行比较试验。

这里设置了三种不同的情况：将模拟时间里的 90s 到 200s 这段时间的输出时间步长分别设置为 1s、0.5s 和 0.3s，而前 90s 统一设为 1s。之所以这样设置，是因为初始阶段生成的波浪并不稳定，并不是我所关心的，而且后面的结果也不会受到输出时间步长设置的影响。现将三种情况下，离推板 500m 处的探测点上记录的 150s 到 175s 这段时间内自由面高度随时间变化的曲线绘出：

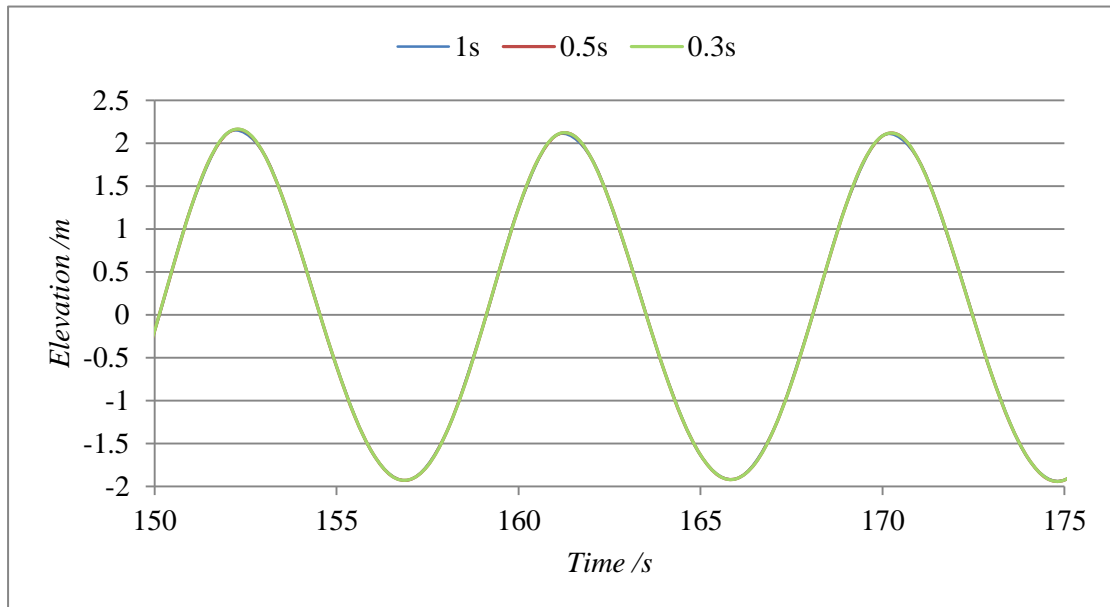


图 3-7 输出时间步长分别取为 1s、0.5s 和 0.3s 时，离推板 500m 处自由面高度随时间变化的曲线比较（波高为 4.22m）

从图 3-7 中可以看出，输出时间步长取为 0.5s 的红色曲线比取为 1s 的蓝色曲线在波峰和波谷处更光滑，而与输出时间步长更小的绿色曲线则几乎重合。这说明，输出时间步长的选取的确可以影响曲线的形状，如果取得太大则会影响对结果的分析；而另一方面，本试验中 0.5s 的输出时间步长已经可以满足结果分析精度的要求，更小的值也不会有明显的改进，反而会增加输出文件数量，占用更多的硬盘空间。综合以上两方面考虑，可以认为在所考察的时间段内，**将输出时间步长设置为 0.5s 是合适的，本章后面的试验中都将这样设置。**

3.3.3 网格精度

通常从两个方面考察网格精度的影响：波高内每单位长度上的单元数、波长与波高内每单位长度上单元数的比值（简称为细长比）。增加波高内单位长度上的单元数，或者减小细长比，都会使网格量有很大的增加，直接带来总计算时间的增加。

3.3.3.1 波高内每单位长度上的单元数

对于该波高为 4.22m 的波浪，在划分网格时，将自由面上下 2.5m 范围内设为均匀网格，而该范围以上和以下的其他区域并不影响自由面变化，则按一定的比例相应减少网格单元的布置，具体网格布置形式参见下图 3-8。

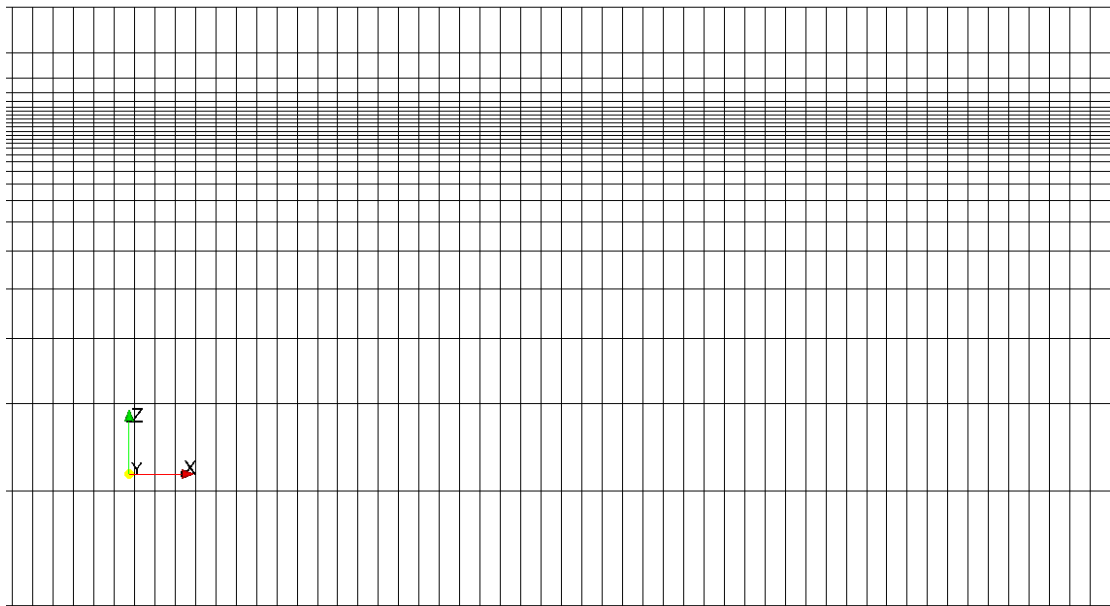


图 3-8 自由面附近网格布置形式

设置的两种情况为：自由面附近 5m 范围内分别布置 6 个和 10 个网格单元，即波高内每 1m 布置的单元数分别为 1.2 和 2。现将这两种情况下，离推板 500m 处的探测点上记录的 150s 到 175s 这段时间内自由面高度随时间变化的曲线绘出：

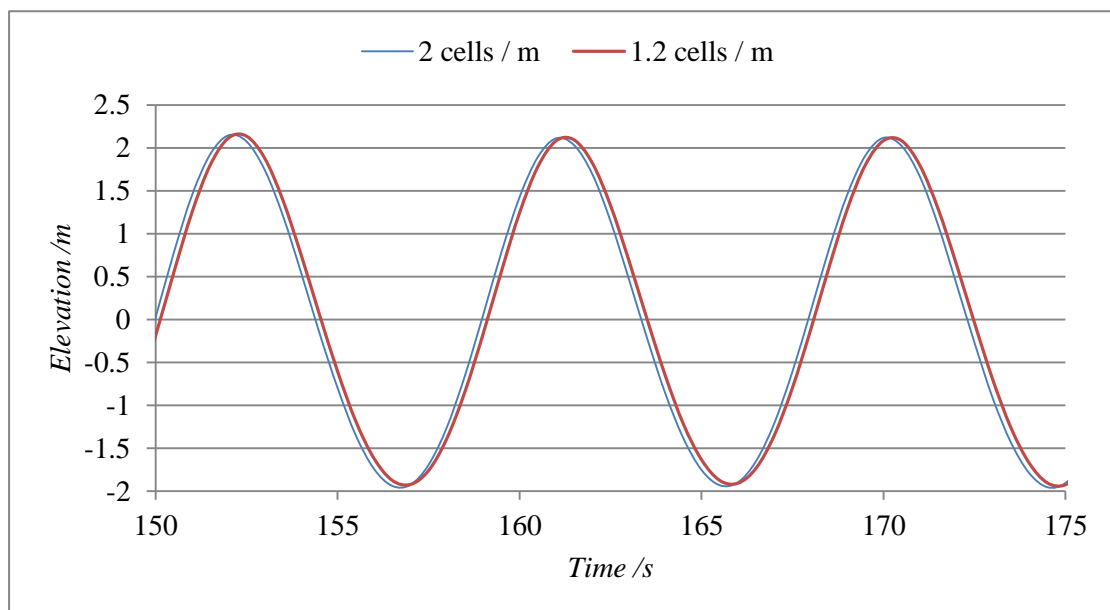


图 3-9 波高内每 1m 布置的单元数分别为 1.2 和 2 时，离推板 500m 处自由面高度随时间变化的曲线比较（波高为 4.22m）

从图 3-9 中可以看出，两条曲线波峰值并没有明显的差别，这就表明波高内每 1m 布置 1.2 个单元是满足造波精度要求的。而另一方面，波高内每 1m 布置 2 个单元情况的总网格量为 12,150；相比之下，第二种情况的总网格量只有 4,374，约为前者的三分之一。相应地，第二种情况的总计算时间也只有第一种情况的约三分之一。综合考虑造波精度和总计算时间两方面影响，在本章后面的试验中，都将波高内每 1m 布置的单元数设置为 1.2。

3.3.3.2 细长比

在保持波高内每 1m 布置的单元数不变的情况下，增大细长比会减少波长范围内每 1m 单元数，从而减少总网格量。这里设置了三种情况以考察细长比的影响：保持波高内每 1m

布置的单元数为 1.2 不变，细长比分别取为 5、2.5 和 9。现将这三种情况下，离推板 500m 处的探测点上记录的 150s 到 175s 这段时间内自由面高度随时间变化的曲线绘出：

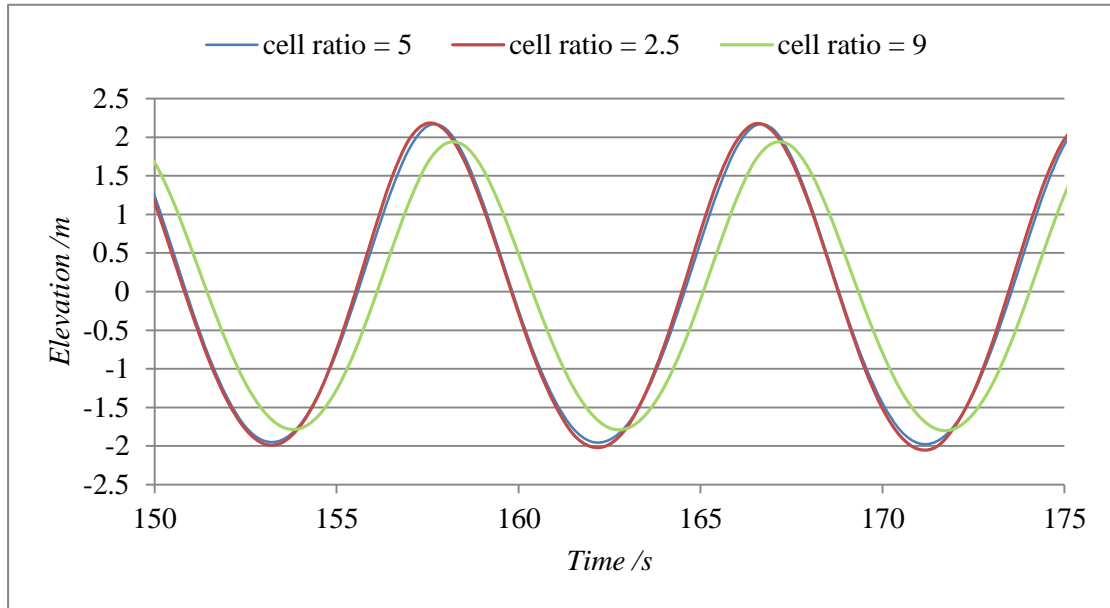


图 3-10 细长比分别设置为 5、2.5 和 9 时，离推板 500m 处自由面高度随时间变化的曲线比较（波高为 4.22m）

从图 3-10 中可以看出，细长比为 9 时，波峰值仅有约 2m，不能满足要求；而细长比为 5 和 2.5 时均能很好地满足波峰值要求，且曲线在波峰处并没有出现明显差别。另一方面，考虑到网格量的因素，细长比为 5 的情况下的网格量为 4,374，而细长比为 2.5 时翻倍增加至 8,748。在满足波峰值要求的情况下，细长比设为 5 可以减少网格量，进而减少总计算时间，比细长比设为 2.5 更有优势。综合考虑造波精度和总计算时间两方面影响，在本章后面的试验中，都将细长比设为 5。

3.3.4 参数设置小结

前面几个小节探讨了可能对波浪模拟结果产生影响的若干因素，通过控制变量法对这些参数不同取值的试验结果进行了比较分析，最终对各个参数都确定了一个相对较优的值。现将各参数的最优值进行小结，列于下表：

表 3-1 参数设置小结

参数	取值
消波区长度	151.8m，亦即 1/5 水池长度
消波系数无量纲量 α	1.5
消波区网格形式	整个区域内均为非均匀网格
计算时间步长	0.02s
输出时间步长	0s 到 90s 为 1s，90s 到 200s 为 0.5s
波高内每 1m 布置单元数	1.2
细长比	5

根据表 3-1 中的参数设置，得到的应该是既满足波峰值要求，又保证总计算时间最短的情况。下面针对该种设置下的试验情况，从不同探测点处自由面高度随时间的变化，以及不同时刻自由面高度随与推板距离的变化等两方面，对试验结果进行展示。

下面首先给出离推板 125m、250m、350m 和 500m 处自由面高度随时间变化的曲线。

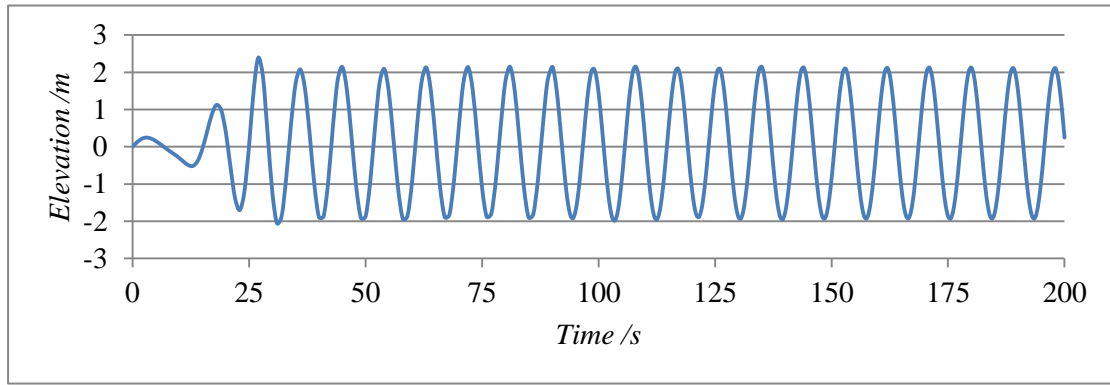


图 3-11 离推板 125m 处自由面高度随时间变化的曲线

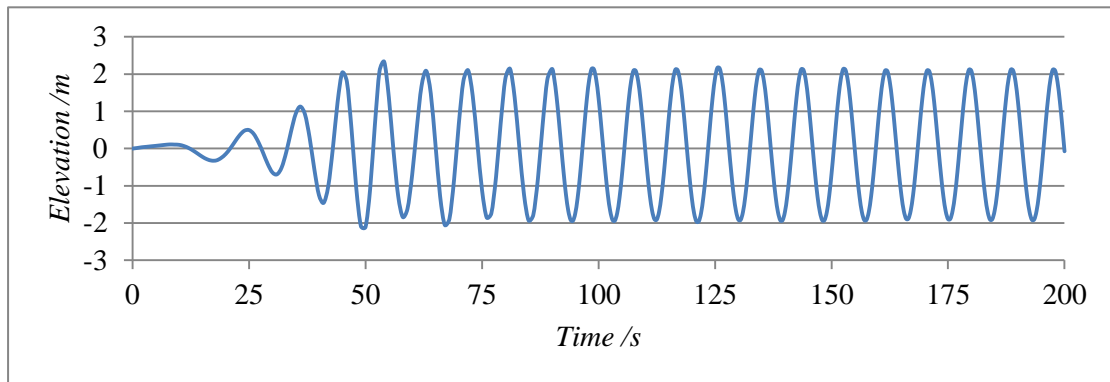


图 3-12 离推板 250m 处自由面高度随时间变化的曲线

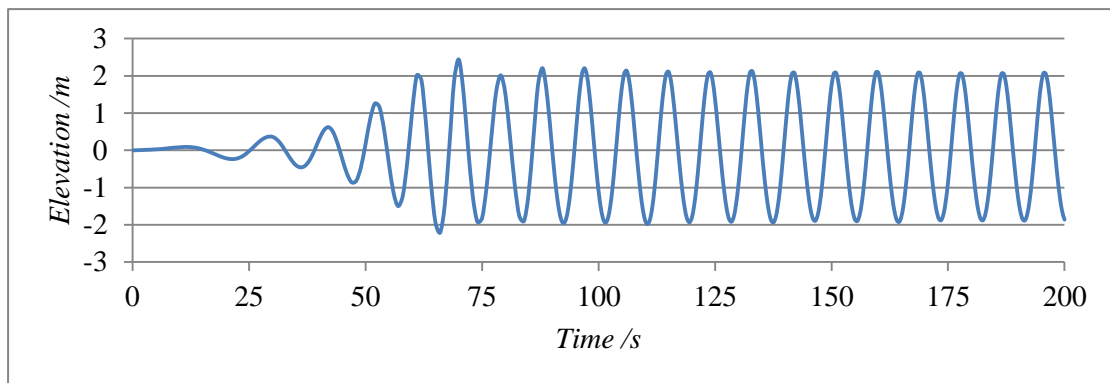


图 3-13 离推板 350m 处自由面高度随时间变化的曲线

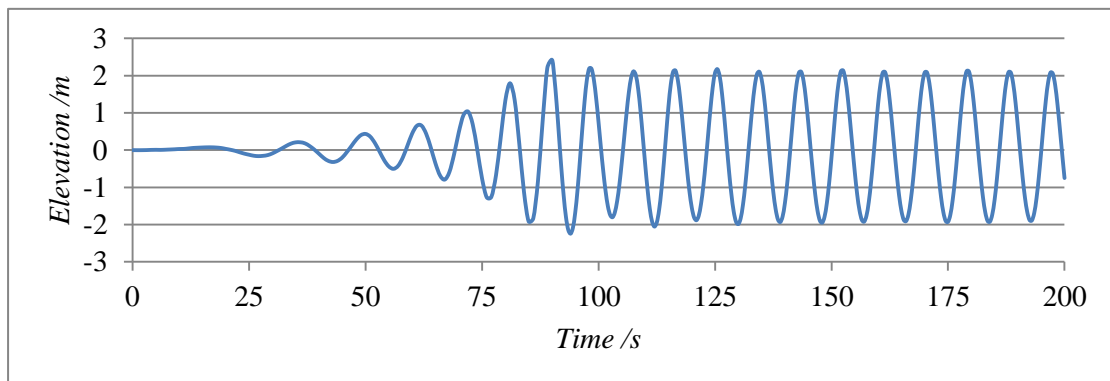


图 3-14 离推板 500m 处自由面高度随时间变化的曲线

下面给出 9s、27s、54s、81s、108s、111s、114s 以及 117s 这些时刻，自由面高度随与推板距离变化的曲线。其中，108s 到 117s 可以表示波形在一个周期内的变化情况。

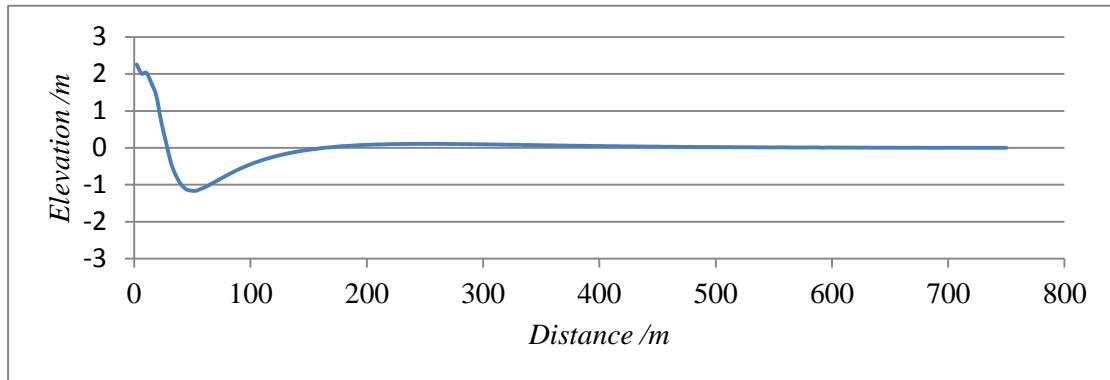


图 3-15 9s 时刻自由面高度随与推板距离变化的曲线

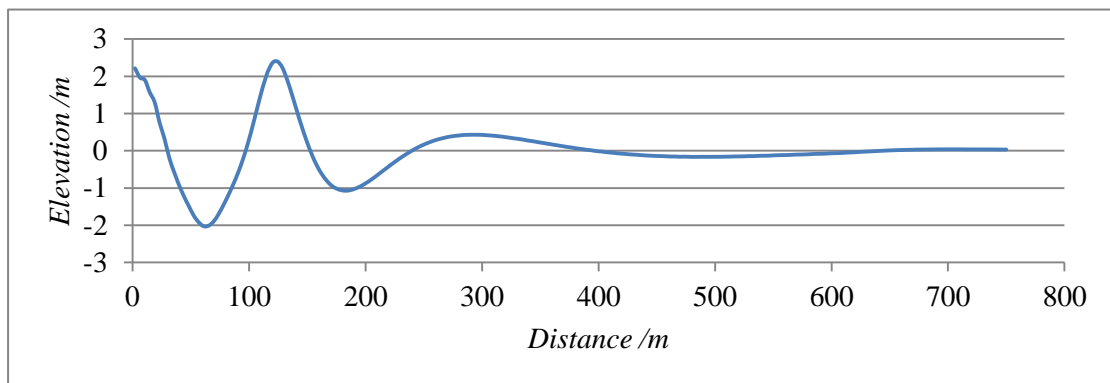


图 3-16 27s 时刻自由面高度随与推板距离变化的曲线

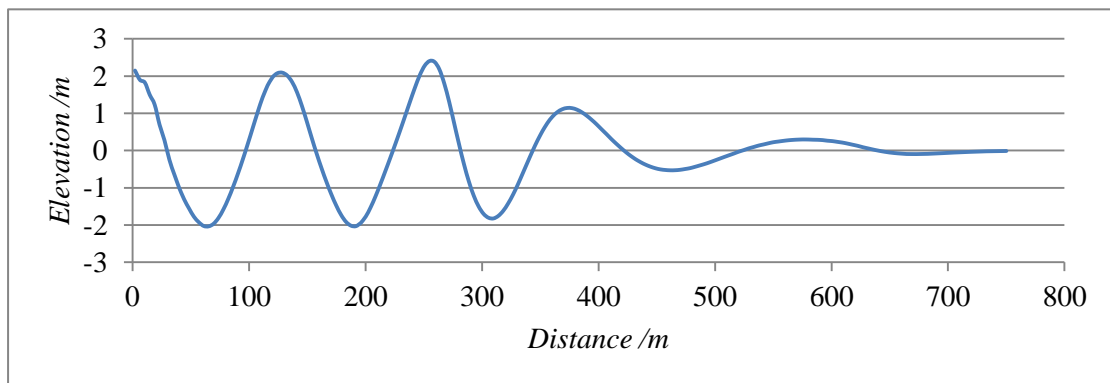


图 3-17 54s 时刻自由面高度随与推板距离变化的曲线

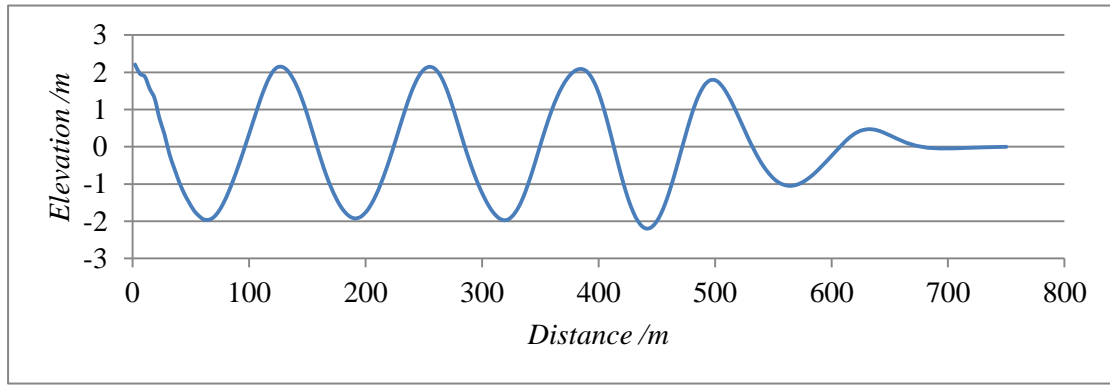


图 3-18 81s 时刻自由面高度随与推板距离变化的曲线

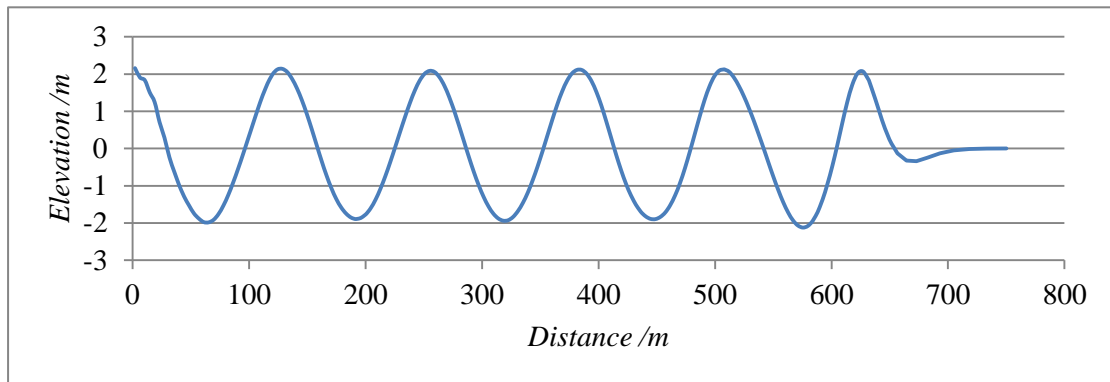


图 3-19 108s 时刻自由面高度随与推板距离变化的曲线

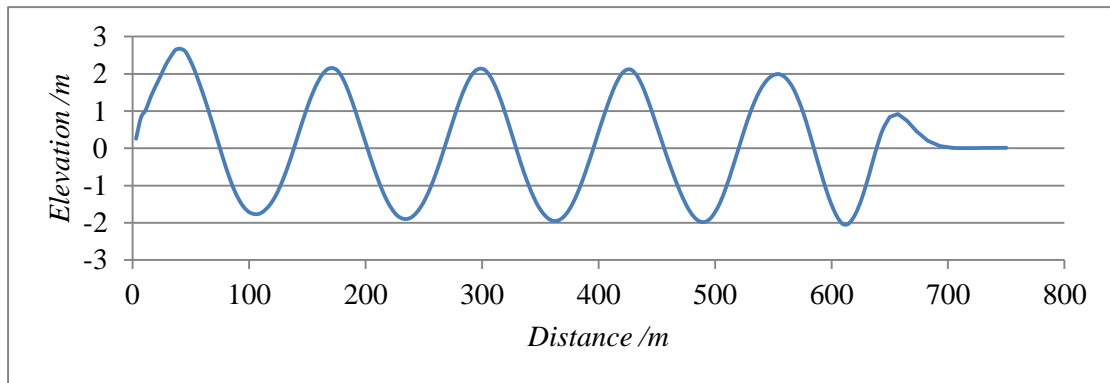


图 3-20 111s 时刻自由面高度随与推板距离变化的曲线

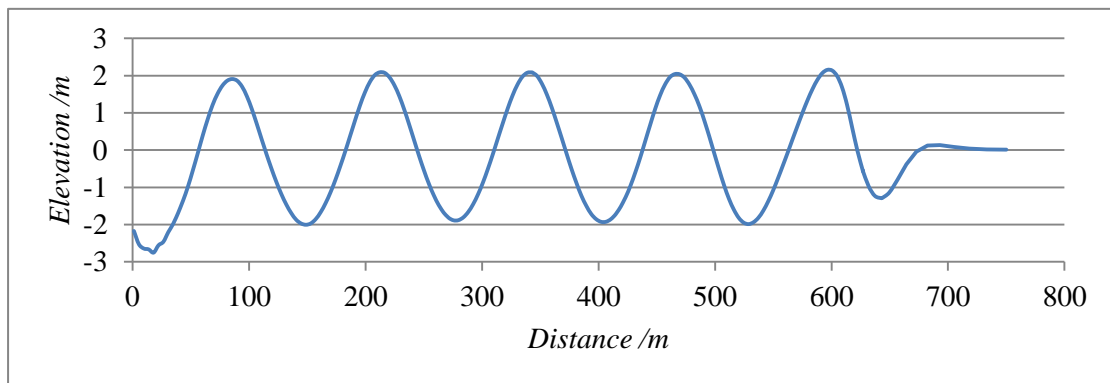


图 3-21 114s 时刻自由面高度随与推板距离变化的曲线

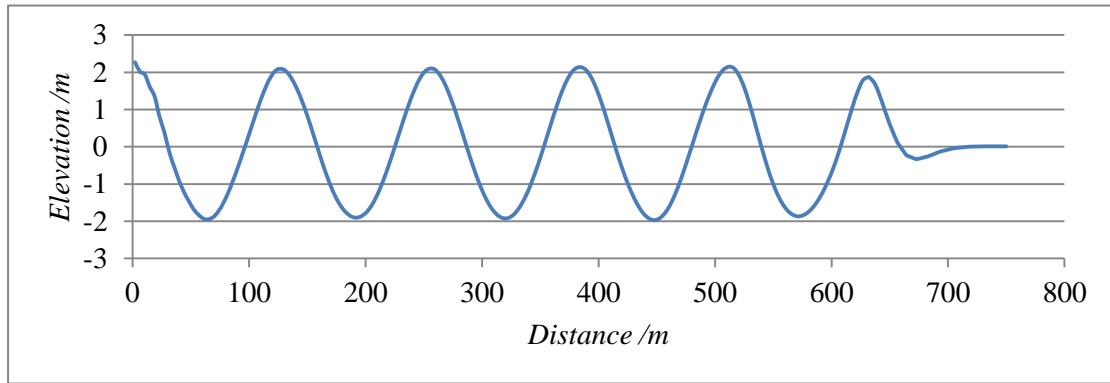


图 3-22 117s 时刻自由面高度随与推板距离变化的曲线

从上面的几张图中可以看出，模拟推板造波所得的波形能够满足波峰值的要求，并且能形成稳定的波。

3.4 本章小结

本章开始对数值波浪水池进行了简单介绍，并与物理试验水池比较了各自存在的优势与不足。随后介绍了数值波浪水池中所运用的数值造波与消波技术理论。最后采用控制变量法的思想，从消波区参数、时间步长和网格精度等方面对二维数值波浪水池波浪模拟中所涉及参数进行了分析比较与选择，并最终得到了满足波峰高度值要求的波形，也验证了数值模拟的可靠性。其中，参数的选取过程为后面章节从二维扩展到三维数值水池，并进而模拟波浪爬高提供了参考与经验。

第四章 三维数值水池周期波爬高的数值模拟

上一章中讨论了二维数值波浪水池中波浪的模拟，并且得到了比较好的结果。但是，波浪爬高毕竟是三维情况下才会出现的现象，要模拟波浪爬高就必须建立三维数值波浪水池。这一章就将从二维扩展到三维数值水池造波，并进而模拟入射波浪为周期波的圆柱波浪爬高现象。

Nielsen 曾于 2003 年在挪威的 Marintek 水池做过圆柱波浪爬高的模型试验，得到了 4.22m 和 7.99m 两种周期波作用下的波浪爬高值。为了与模型试验值比较，本章将对 4.22m 和 7.99m 这两种波高的周期波沿圆柱爬高进行数值模拟。

4.1 从二维到三维

在上一章 3.3 节中曾提到，OpenFOAM 对二维水池的处理是通过简化三维水池模型，将宽度设为单位长度来实现的。这样，如果将上一章中二维试验的水池宽度设为一个较大的值，即完成了从二维到三维的转换。设置水池宽度为 130m，沿该方向单位长度的网格单元数布置为与沿水池长度方向一致。下面考察二维与三维这两种情况下的数值波浪水池波浪模拟，并将离推板 500m 处的探测点上记录的 150s 到 175s 这段时间内自由面高度随时间变化的曲线绘出：

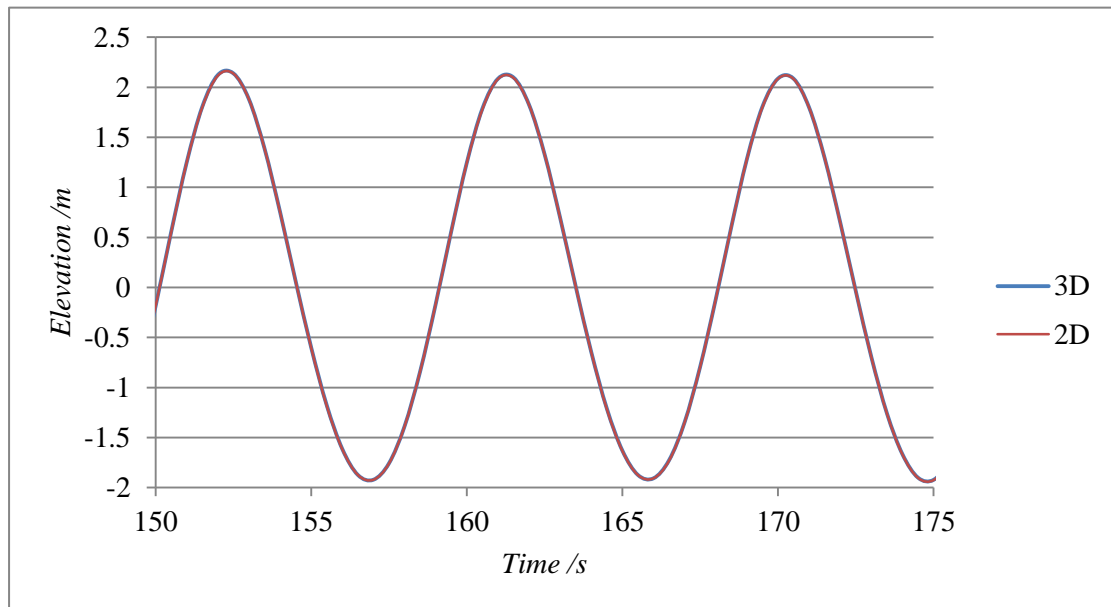


图 4-1 二维与三维数值波浪水池中，离推板 500m 处自由面高度随时间变化的曲线比较（波高为 4.22m）

从图 4-1 中可以看出，三维数值波浪水池下造波所得结果与二维情况相比并未出现明显差别，两条曲线几乎重合。这就说明可以直接使用上一章中造波试验所得优化参数，只需要增大宽度值扩充到三维，再加入圆柱模型，便可直接模拟三维数值波浪水池中的波浪爬高，而不需要再做三维水池中的造波试验。

由于有了上面的结论，今后对于需要造波的三维水池数值模拟，即可先在二维水池中进行造波试验得到满足精度要求的波浪，之后再扩展到三维水池中。由于二维情况下的网格量通常只有三维的几分之一，相应的总计算时间往往也比三维短很多，这样做便可以大大减少耗费在造波试验中的时间。

4.2 试验模型介绍

本节主要介绍三维数值水池中波浪爬高试验的模型。与二维水池类似，水池左侧布置有造波用的推板，右侧布置有消波用的消波区，如图 4-2 所示。

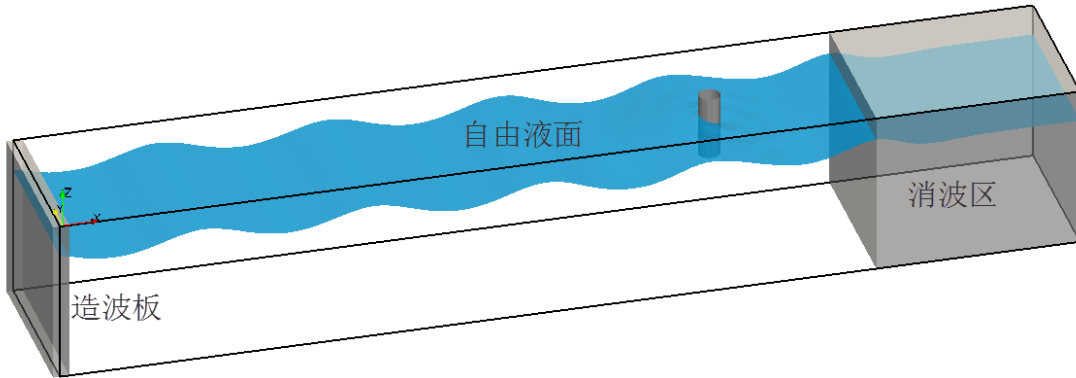


图 4-2 三维数值水池波浪爬高试验模型

Nielsen 所做的模型试验对应的全尺度圆柱直径为 16m，这里设为同样的值，并将圆柱中心放置于离推板 500m 的水池中央位置，吃水为 24m，具体布置形式可参见图 4-3。

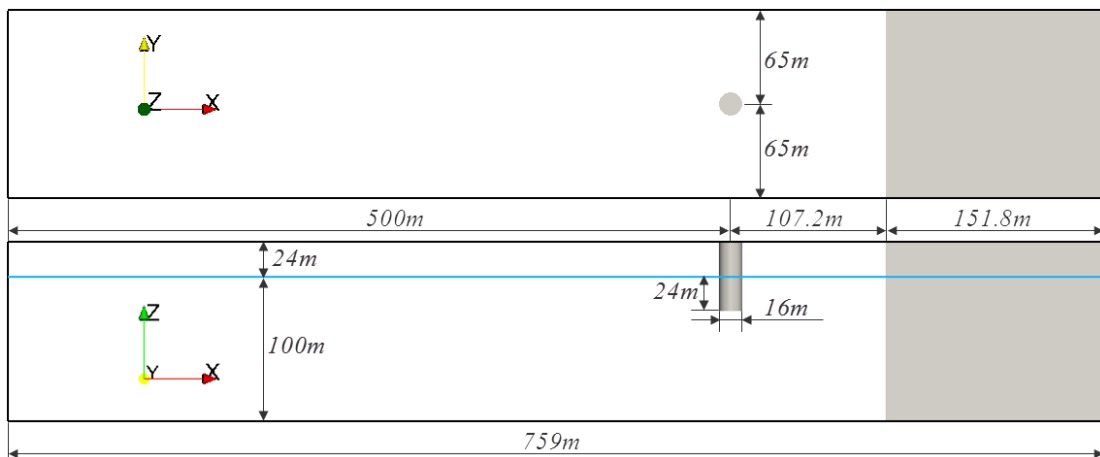


图 4-3 水池及圆柱模型尺寸

为探测圆柱周围的波浪爬高，在其周围布置 12 个探测点，探测点的位置由下图 4-4 给出，并将具体取值列于下表 4-1 和表 4-2。

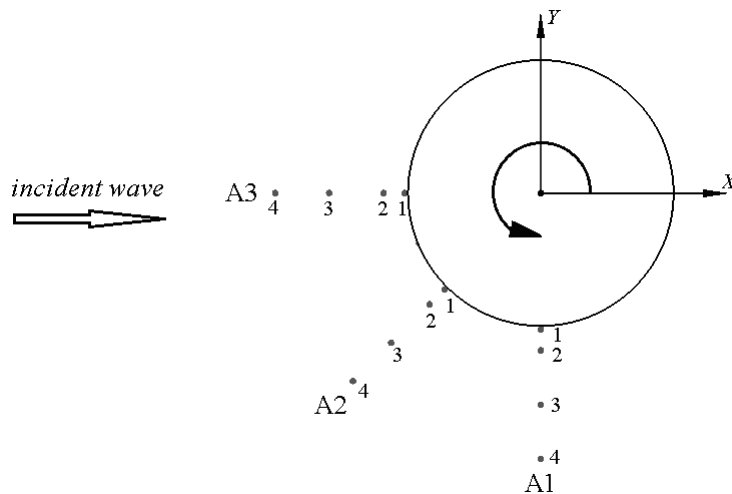


图 4-4 圆柱周围探测点位置

表 4-1 各探测点所在列与 x 轴正向的夹角

位置	A1	A2	A3
角度 (°)	270	225	180

表 4-2 处于同一列上的四个探测点离圆柱中心的距离

位置	1	2	3	4
离圆柱中心 (m)	8.05	9.47	12.75	16.0

因为要探测圆柱附近波浪爬高，为了得到较精确的结果，有必要对圆柱周围的网格采用非均匀形式进行加密处理，具体布置形式可参见图 4-5，图 4-6 则给出了圆柱附近更详细的网格布置图。

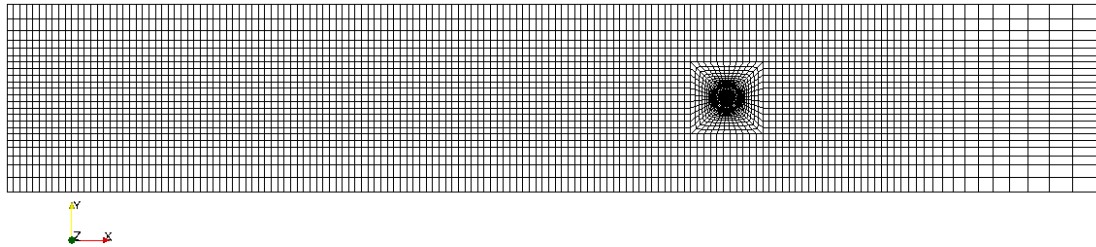


图 4-5 三维波浪水池网格布置

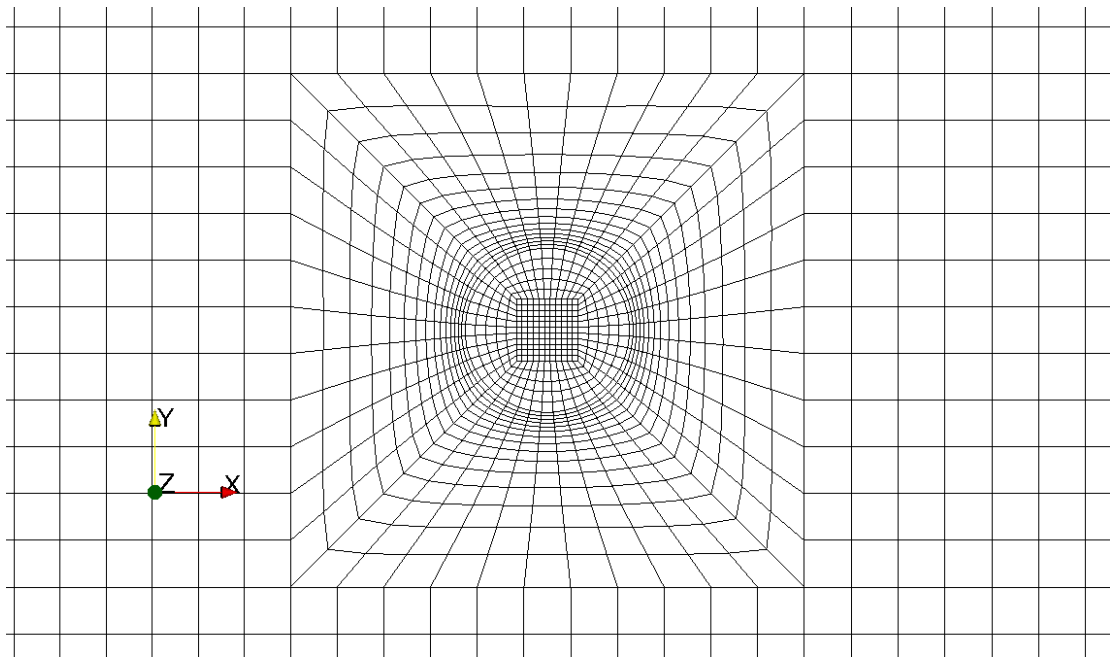


图 4-6 圆柱附近网格布置

这里有两点需要说明：

(1) 由于波浪传到圆柱时会爬高，如果仍然按照二维情况仅在自由面上下 2.5m 的范围内采用较密的均匀网格，以上及下区域采用非均匀网格而逐渐减疏，则会因为爬高的自由面超出该范围而不能得到可信的数据。所以，在三维波浪爬高试验中，特意将该区域向上下扩展，同时保持波高内每 1m 布置的单元数为 1.2 个不变。对于 4.22m 波高的周期波，这个区域扩展为自由面上下 4.5m；对于 7.99m 波高的周期波，这个区域则扩展为自由面上下 7.5m。

(2) 沿宽度方向，由于超出包含圆柱的矩形框以外的区域并不会对圆柱附近爬高造成影响，所以将其布置为非均匀网格，以减少网格量。

4.3.4. 22m 波高的周期波沿圆柱爬高结果

4.3.1 波浪爬高值

经过计算和数据处理，将各探测点处探测得到的自由面高度随时间变化的曲线绘出：

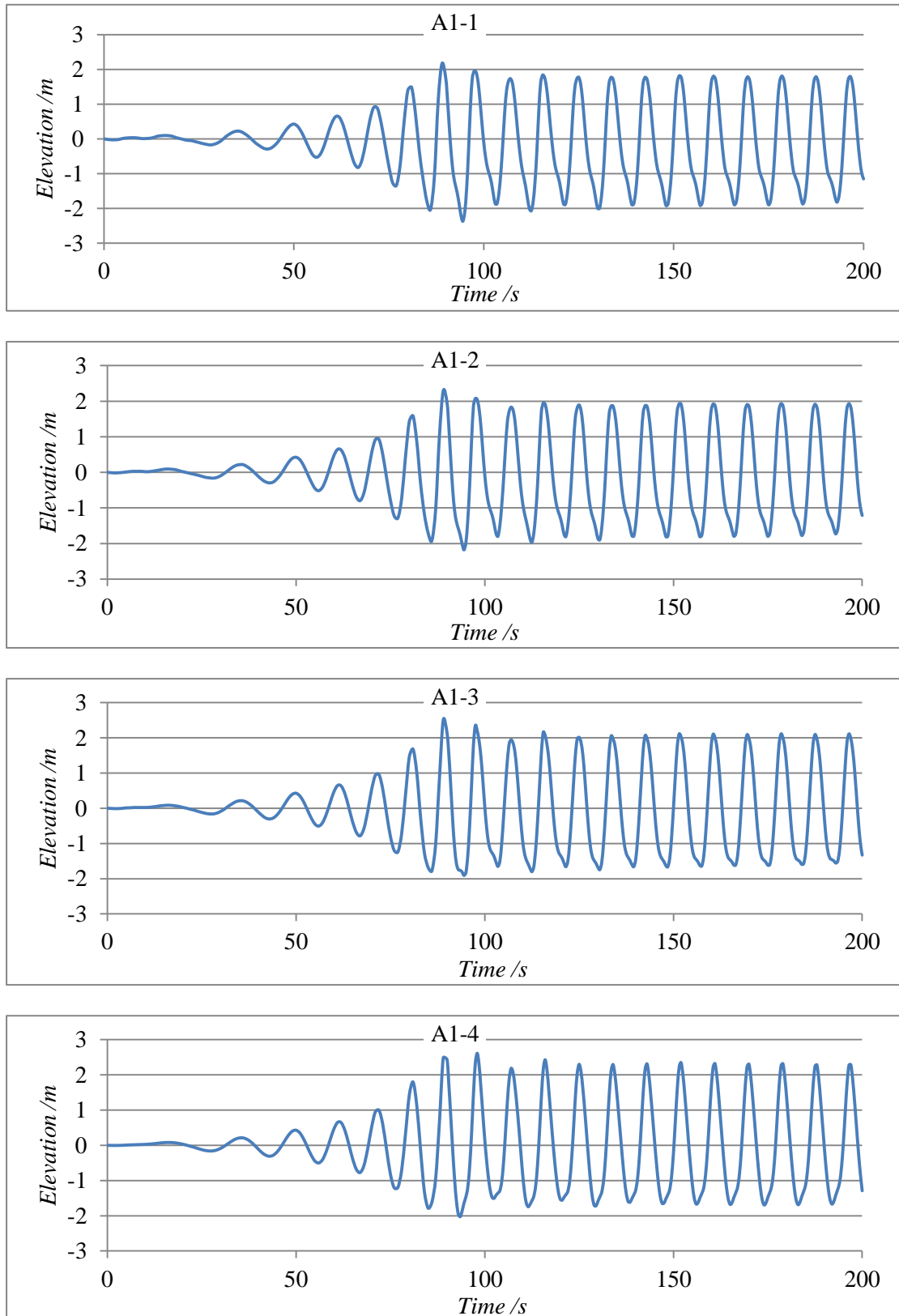


图 4-7 A1 列四个探测点处探测得到的自由面高度随时间变化曲线

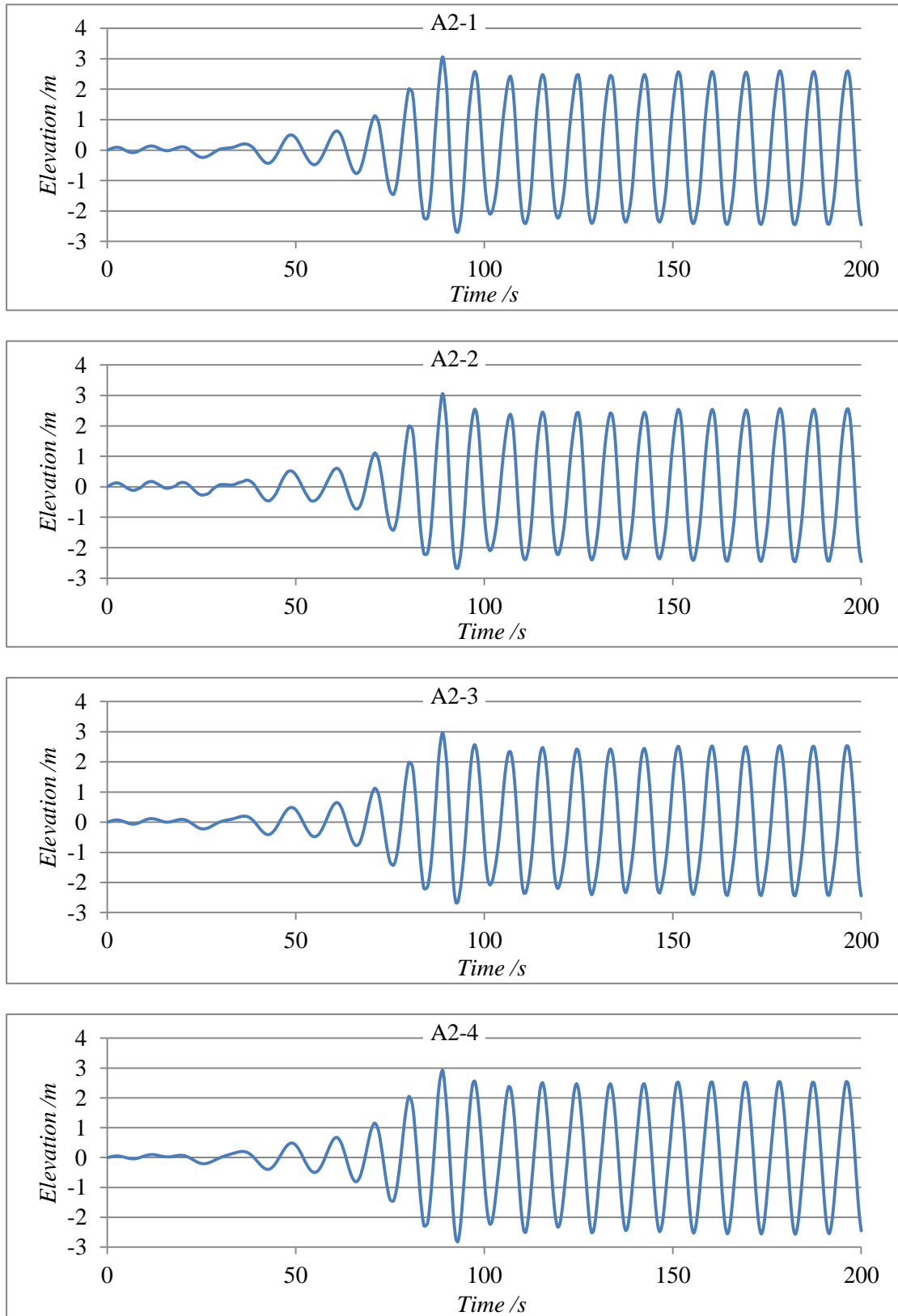


图 4-8 A2 列四个探测点处探测得到的自由面高度随时间变化曲线

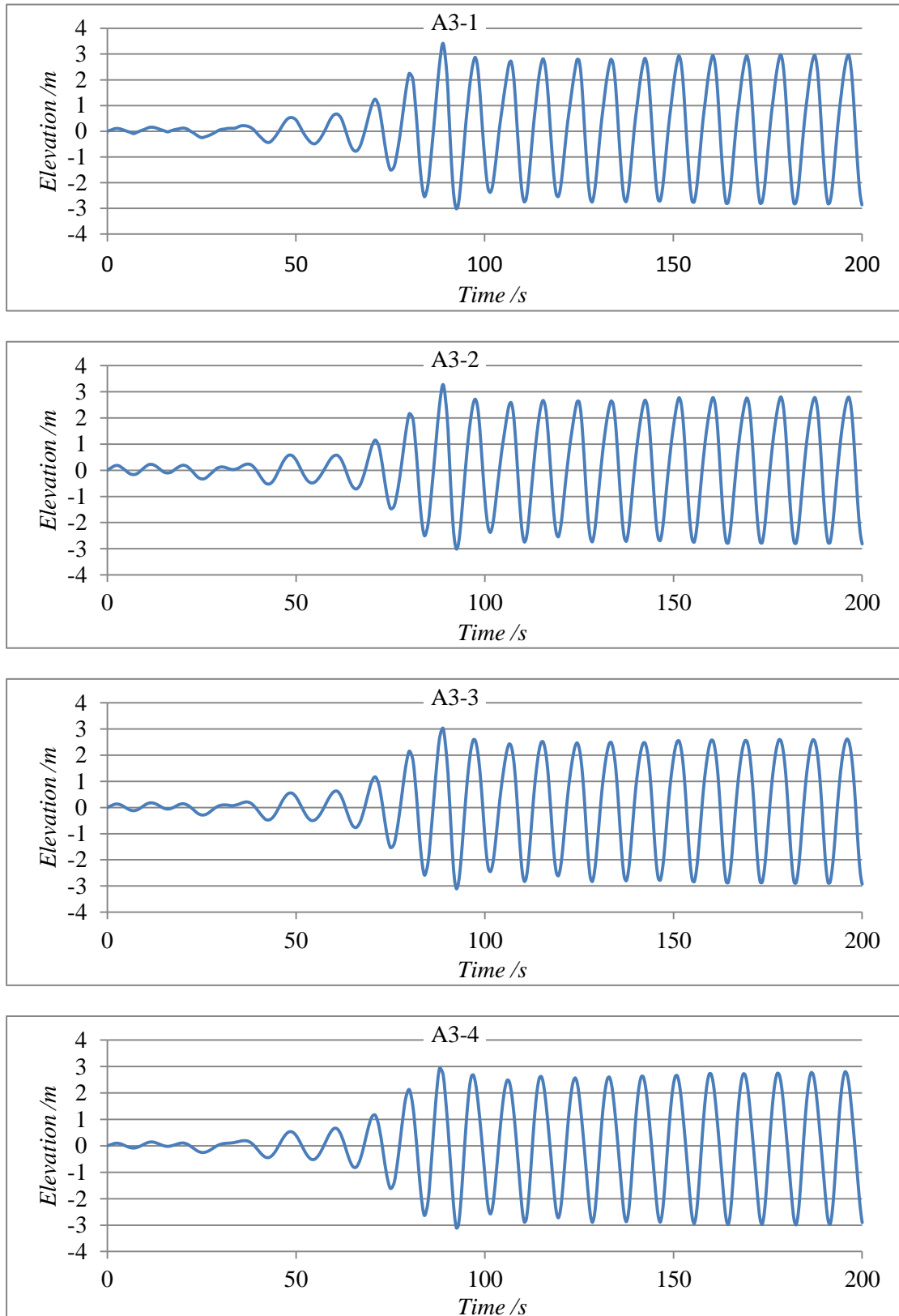


图 4-9 A3 列四个探测点处探测得到的自由面高度随时间变化曲线

从以上图片中可以看出以下几点:

- (1) 在 150s 以前, 波幅值有很大的波动, 在 90s 左右还有一个比较大峰值出现, 随后又下降, 之后才逐渐稳定;

(2) 圆柱上 A3 列各探测点处的波浪爬高值普遍高于另外两列;

(3) A1 列的爬高则最不明显, 甚至有些探测点处的波峰值比入射波的波幅还要小。

对于第一点, 应该与推板造出的波浪还未稳定有关, 由于本试验主要讨论稳定周期波的波浪爬高情况, 故结果中并不计算这个峰值。对于第二点, 由于 A3 列探测点正对着波浪, 首当其冲, 爬高值应该最大。至于第三点, 在下面的比较中会看到模型试验中也出现了同样情况, 推测可能与波浪发生绕射有关。

下面给出 153s 到 162s 一个周期内的自由面高度云图:

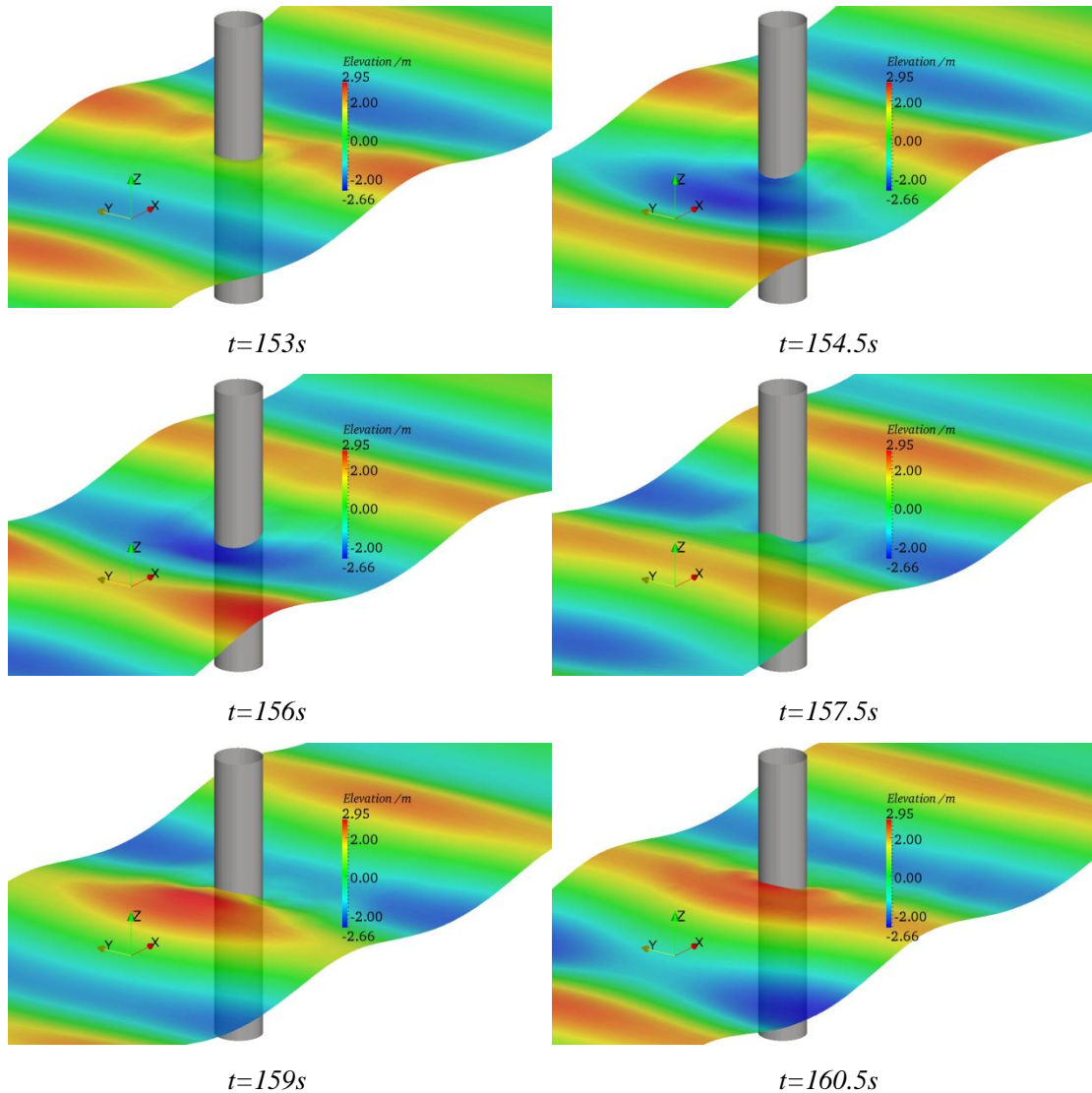


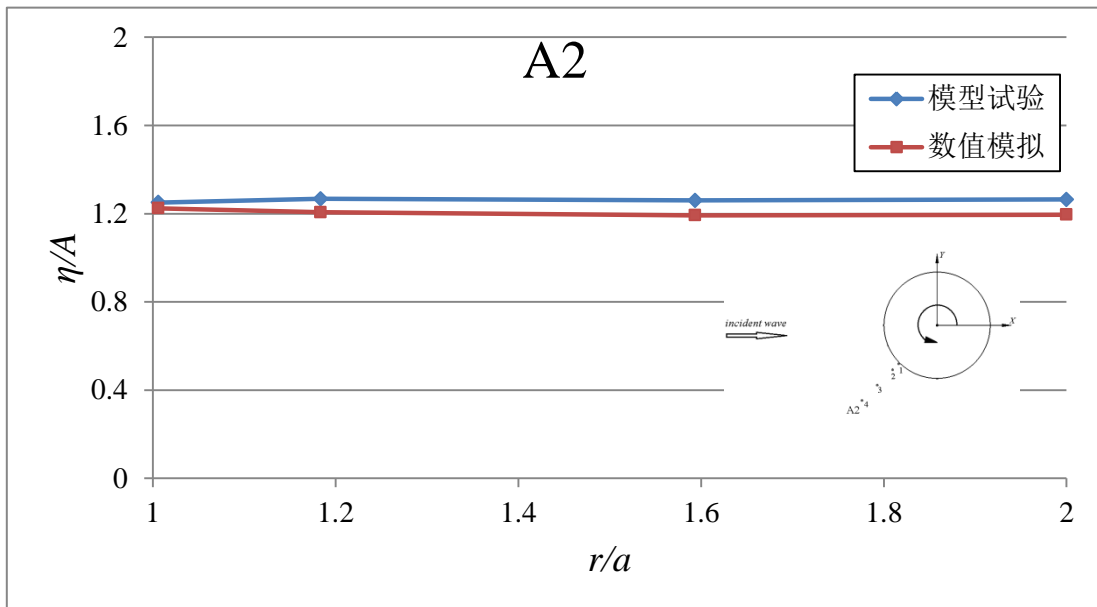
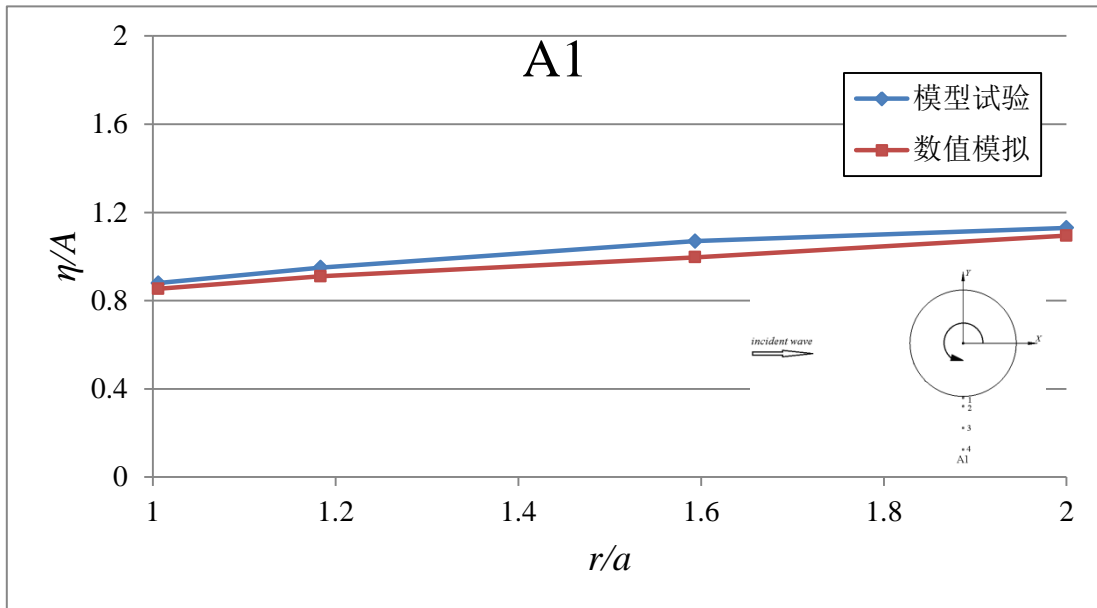
图 4-10 一个周期内的自由面高度云图

4.3.2 模型试验与数值模拟结果比较

Nielsen 在文章中并没有直接给出波浪爬高值, 而是给出了各个探测点处的相对爬高值, 即用测得的该点处自由面最大高度的平均值比上波幅值 2.11m。为了与 Nielsen 的模型试验值比较, 对所得的数据采取同样的方法进行处理。

需要说明的是, 为了得到某探测点处自由面最大高度的平均值, 采用的是 Nielsen 在处理模型试验数据时所使用的方法: 对上一小节中得到的各探测点处的自由面高度随时间变化曲线, 在 150s 到 200s 这段时间内的峰值取平均, 并剔除掉由于曲线波动而产生的过大、过小点, 使得所取到的各峰值中的最大、最小值与平均值之间的差距不大于 3%, 以保证数据的可靠性。

下面给出数值模拟与模型试验所得到相对爬高值的比较结果。图中横轴表示探测点离圆柱中心的距离 r 与圆柱半径 a 的比值，而纵轴则表示自由面最大高度的平均值 η 与波幅值 A 的比值。



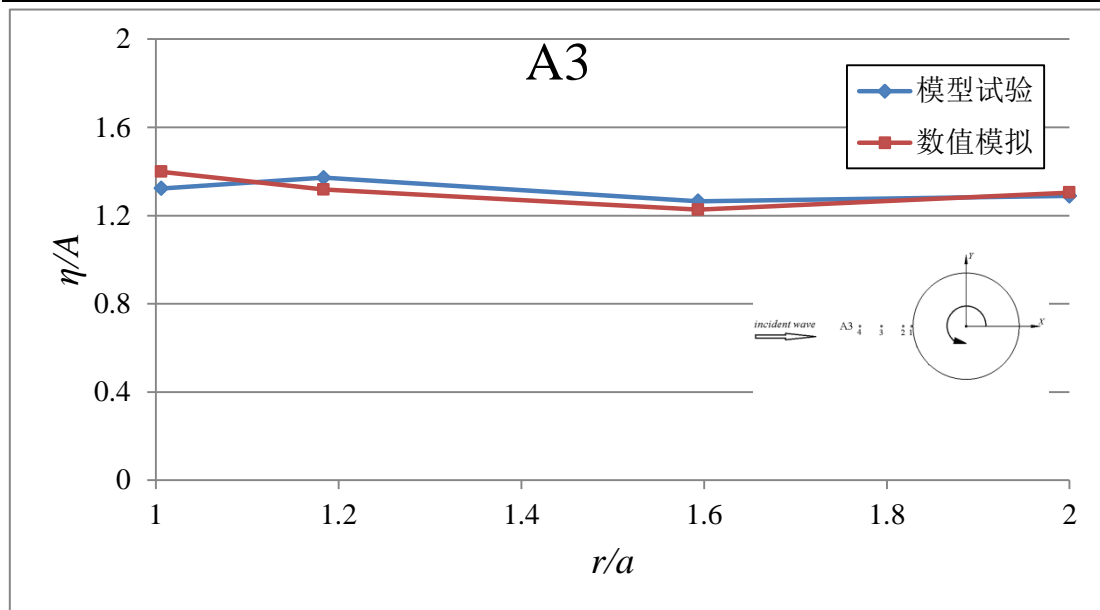


图 4-11 模型试验与数值模拟所得波浪爬高结果比较

从图 4-11 中可以看出，数值模拟的结果与模型试验符合得较好：

(1) A1 列离圆柱表面越近的探测点，测得的自由面高度越小；越远的探测点处的自由面高度反而越大。Nielsen 在他的文章中解释了这个现象，认为入射波的波峰经过圆柱时，靠近圆柱表面水质点的水平速度大约是远离点的两倍，两者之间的压力差引起了自由液面的高度差。

(2) A2 列四个探测点处的自由面高度值均没有明显变化。

(3) A3 列离圆柱表面最远的那个探测点 4 处的自由面高度值都要大于探测点 3 处的值，这可能是因为入射波传播到圆柱时发生了反射，反射波与后面传来的入射波叠加，在探测点 4 处形成叠加后的峰值。

但是，应该看到，二者之间也存在一些不一致：

(1) 数值模拟得到的结果普遍略小于模型试验。考虑到数值模拟中造波采用的是线性波浪理论，这会对波浪爬高造成比较大的影响。如果能采用非线性的高阶入射波，应该能得到与模型试验更一致的结果。

(2) 模型试验中最大的爬高值出现在 A3 列探测点 2 处，而数值模拟则出在探测点 1 处。模型试验中的现象可以用反射波与入射波叠加来解释，与探测点 4 处的抬升一样。事实上，数值模拟中在探测点 1 前面也观测到了类似的现象，下面的图 4-12 中就能看到，只是出现在不同的位置。

另外，0.5s 的输出时间步长对于捕捉波浪爬高这个细节或许仍然太长，如果输出的时间点更多一些应该会对结果有所改善。

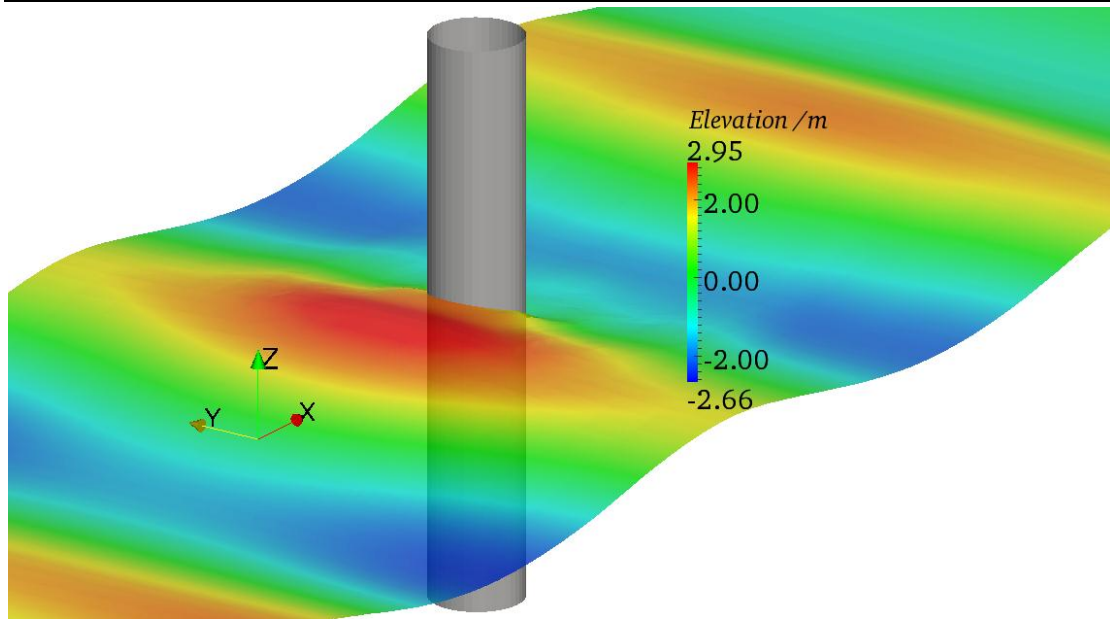


图 4-12 一个周期内最大爬高时刻 (159.5s) 自由面高度云图

4.3.3 压力与速度分布和波浪力曲线

Nielsen 的试验中并没有涉及到压力与速度的比较，这里仅仅给出最大爬高时刻的压力与速度分布云图，并绘出 150s 到 200s 这段时间内圆柱所受波浪力曲线。

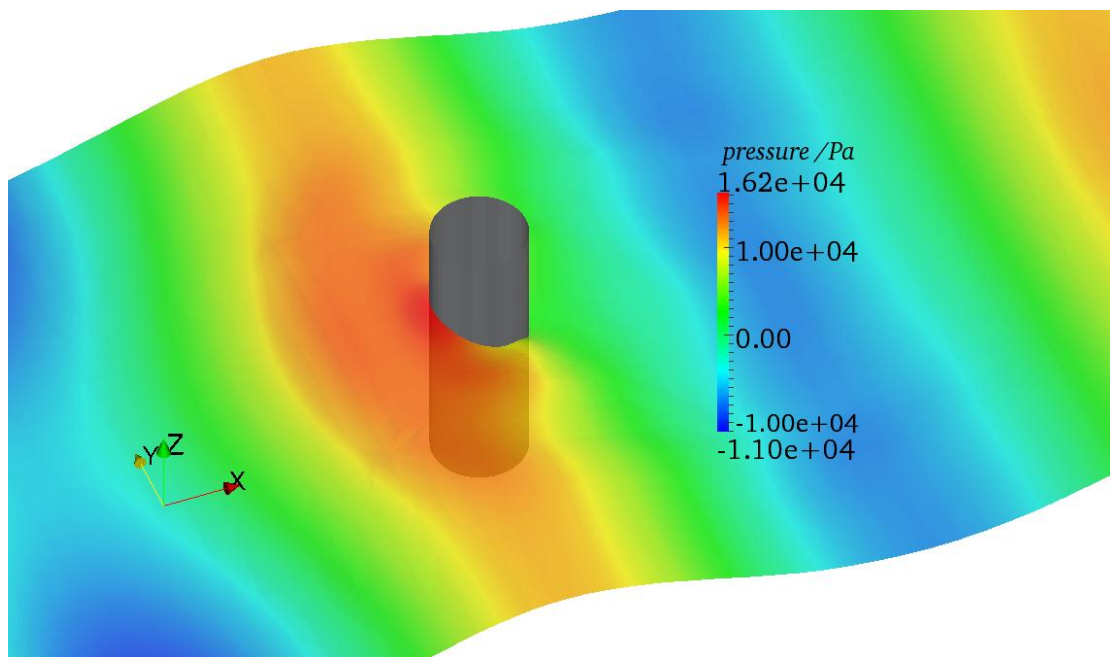


图 4-13 最大爬高时刻压力分布云图

从图 4-13 中可以看出，圆柱迎着波浪的那一面所受压力最大，另一面则压力比较小。

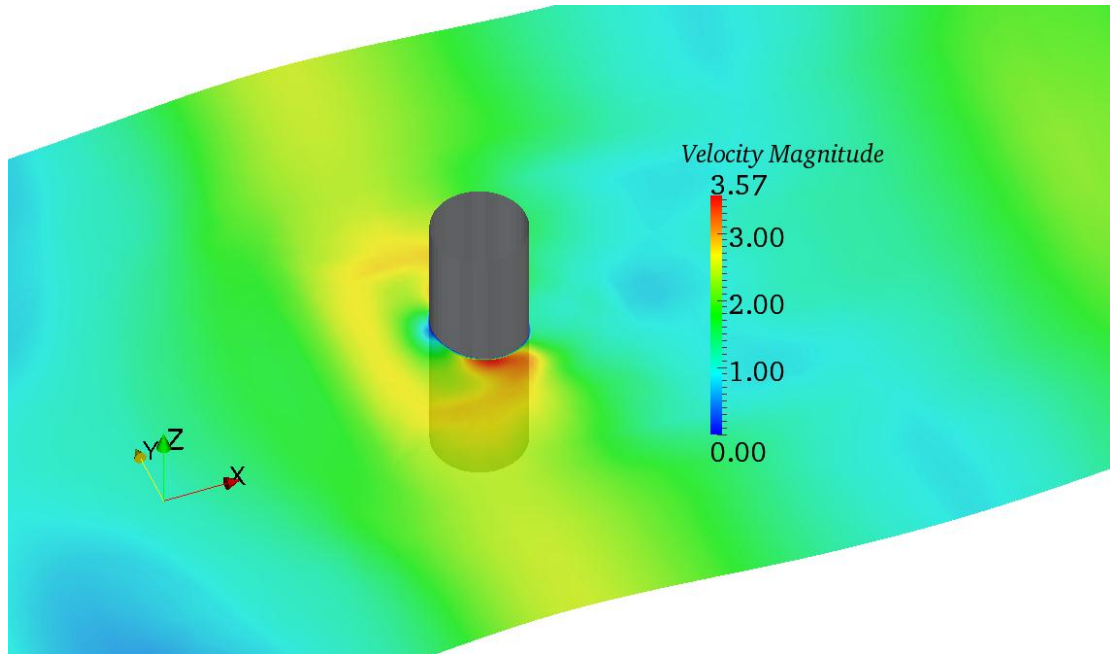


图 4-14 最大爬高时刻速度分布云图

从图 4-14 中看出，圆柱迎浪点处的速度很小，侧面靠近圆柱处则有较高速度出现，应该是由波浪传播至圆柱发生绕射引起的，这也证实了 4.3.2 中提到的 Nielsen 对侧面处自由面高度降低的解释。

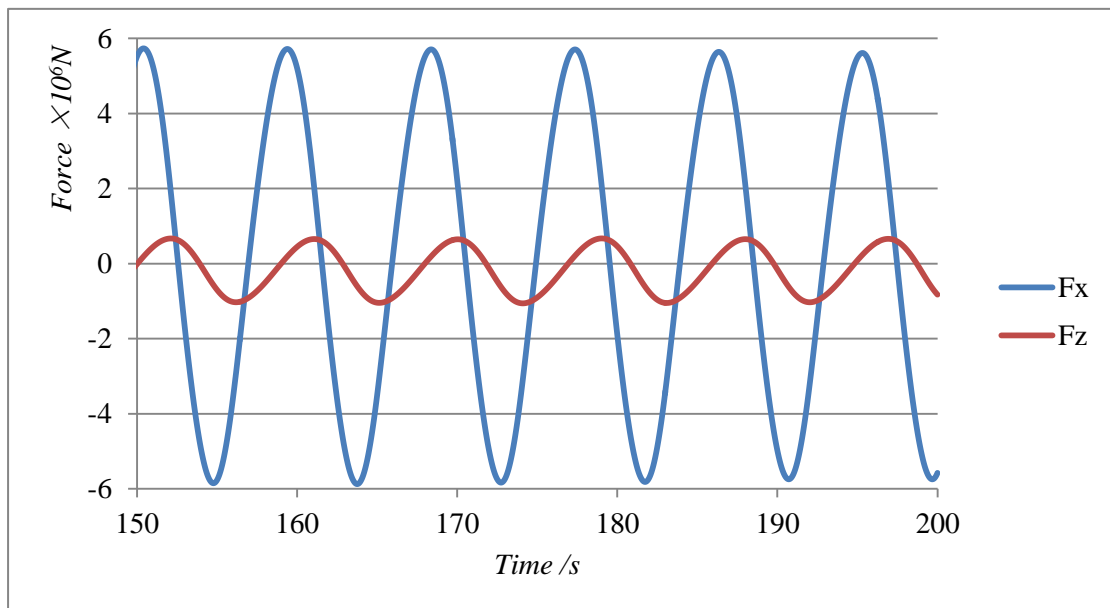


图 4-15 150s 到 200s 这段时间内圆柱所受波浪力曲线

图 4-15 中给出了 x 与 z 两个方向，即沿着波浪传播方向与水池高度方向，的波浪力曲线。从图中可以看出，圆柱在 x 方向所受的波浪力很大，达到近 $6 \times 10^6 \text{N}$ ；z 方向的力要小于 x 方向，约为 $7 \times 10^5 \text{N}$ 。

4.4.7. 99m 波高的周期波沿圆柱爬高结果

与 4.22m 波高的情况类似，7.99m 波高也将从以上几个方面给出结果。在这之前，有必要先给出二维造波试验的结果，试验过程与 4.22m 类似，这里只绘出离推板 500m 处自由面高度随时间变化的曲线：

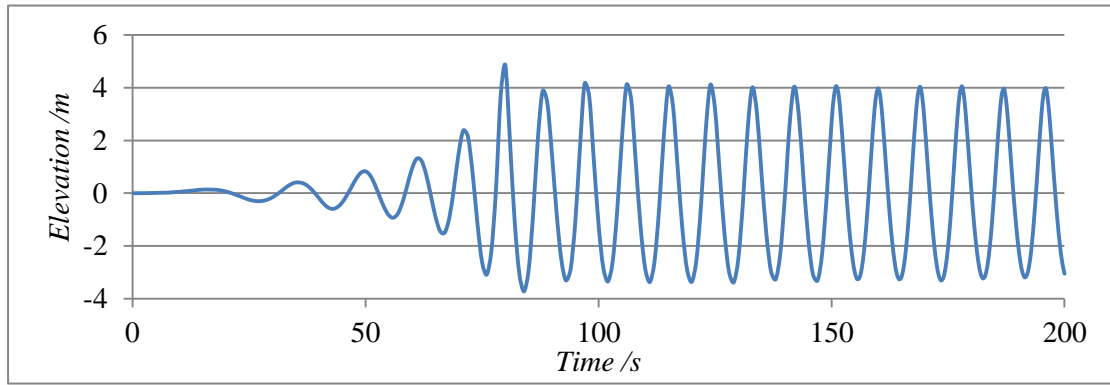
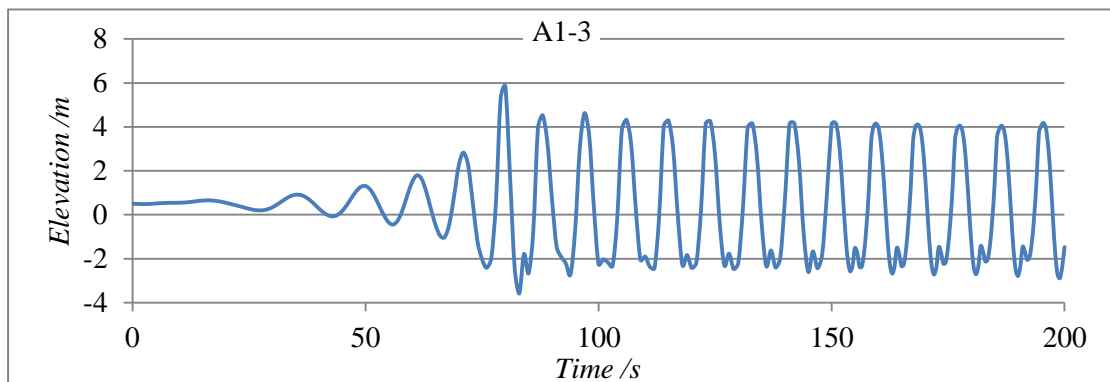
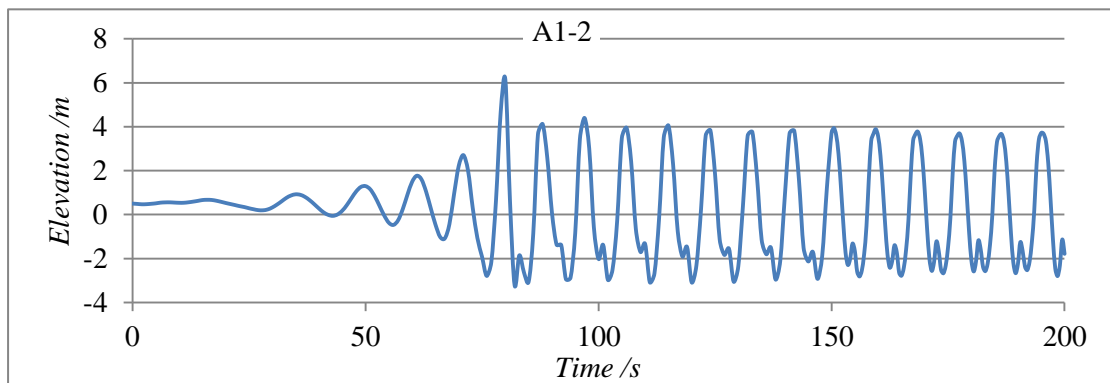
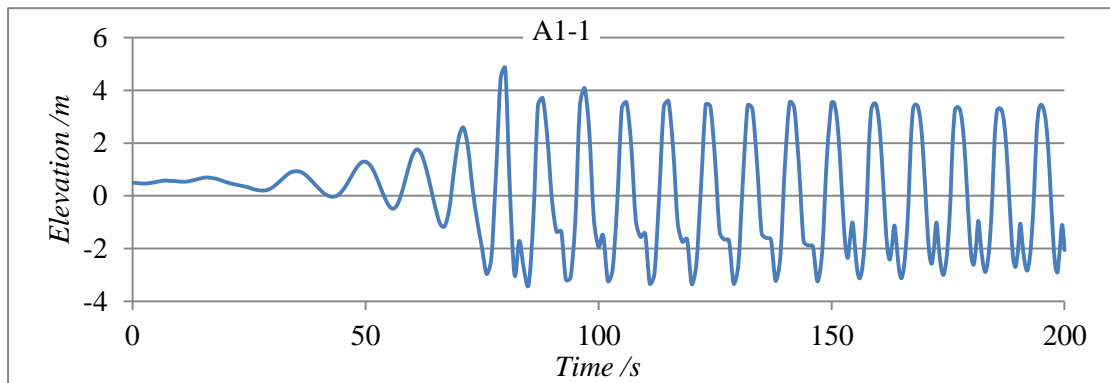


图 4-16 离推板 500m 处自由面高度随时间变化曲线

从图 4-16 中可以看出，波峰值稳定在约 4.0m，满足 7.99m 波高要求。

4. 4. 1 波浪爬高值

经过计算和数据处理，将各探测点处探测得到的自由面高度随时间变化的曲线绘出：



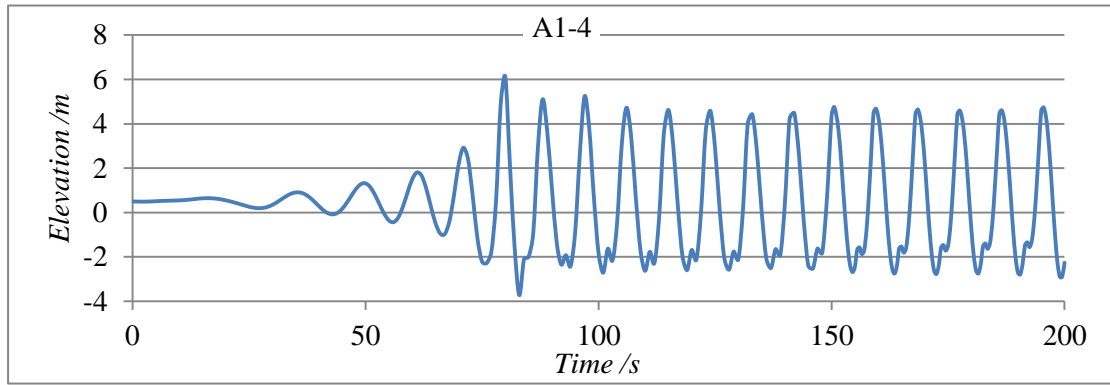
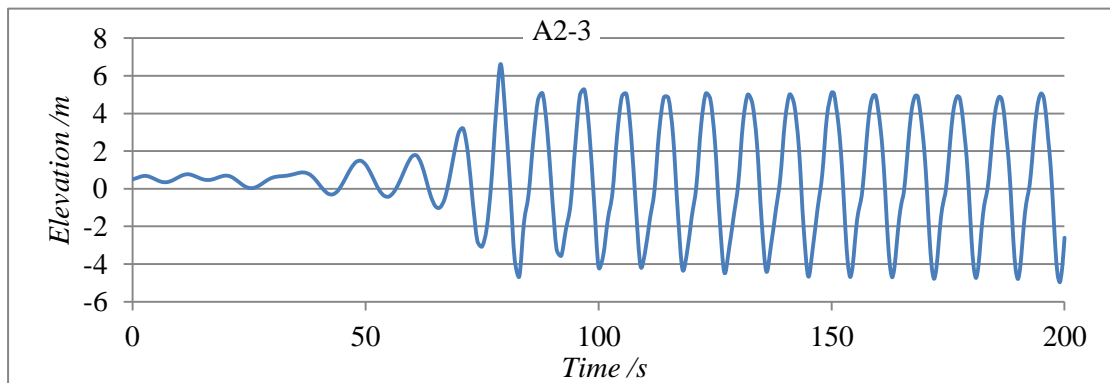
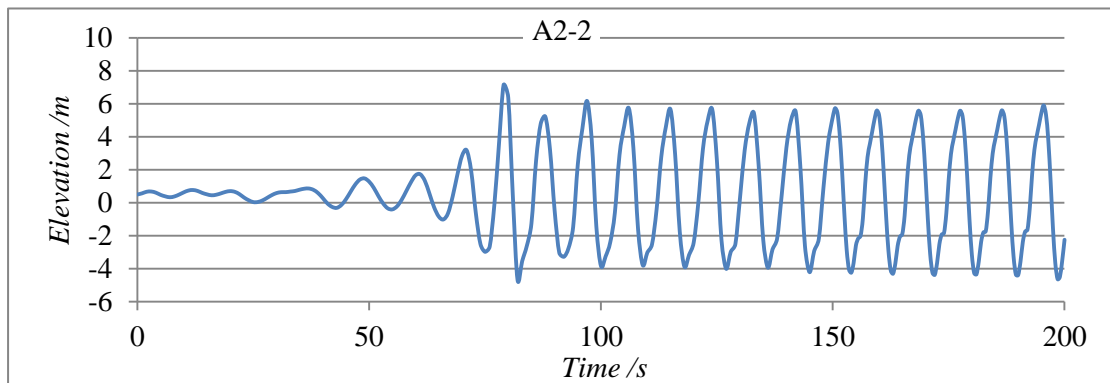
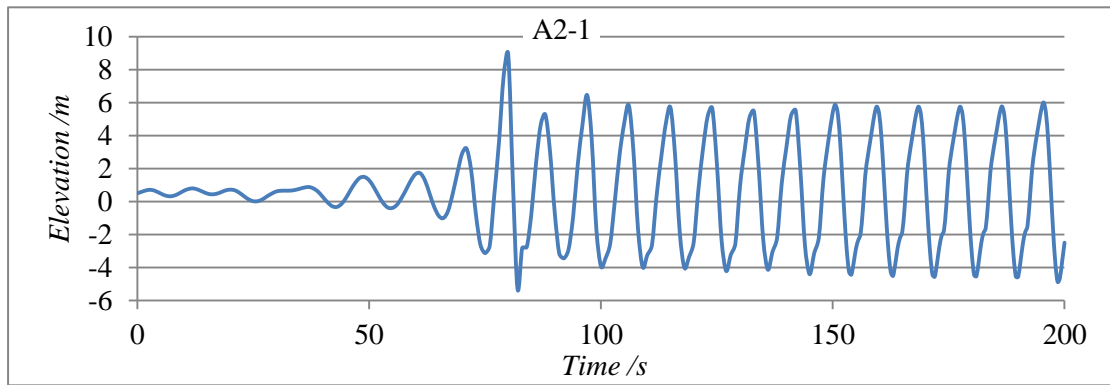


图 4-17 A1 列四个探测点处探测得到的自由面高度随时间变化曲线



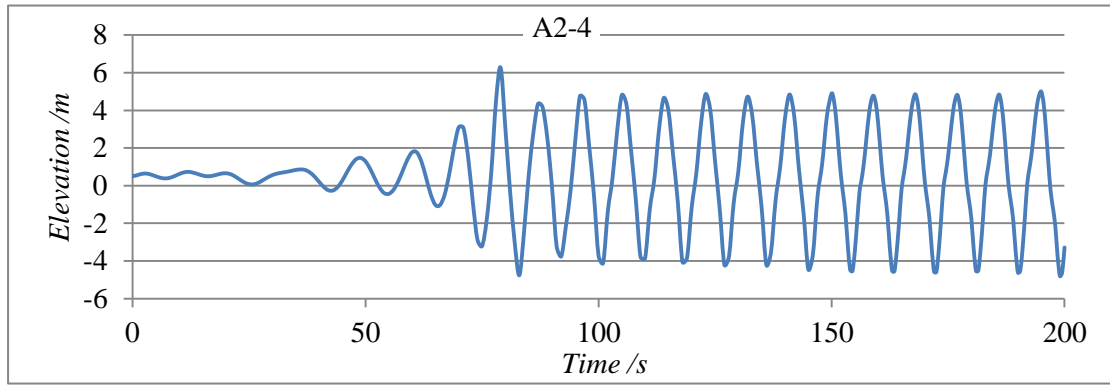
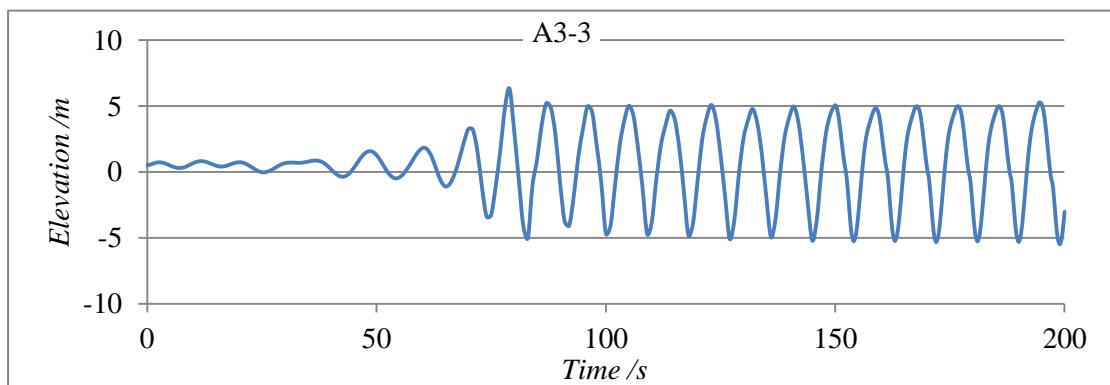
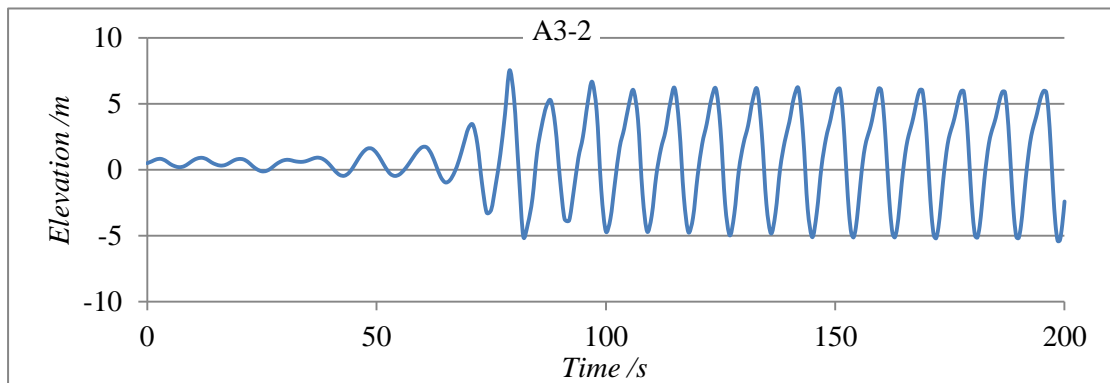
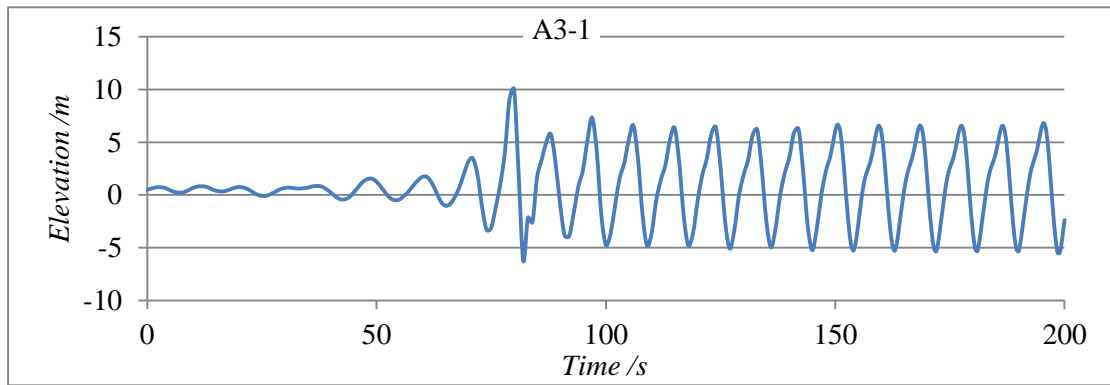


图 4-18 A2 列四个探测点处探测得到的自由面高度随时间变化曲线



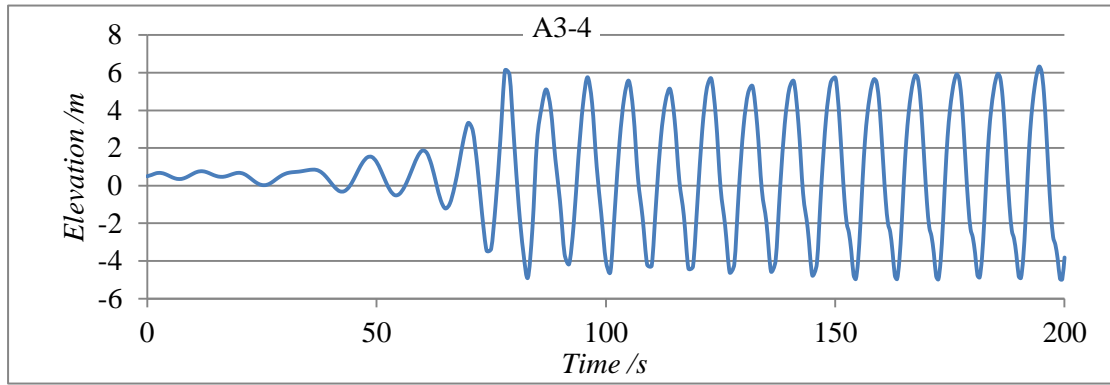


图 4-19 A3 列四个探测点处探测得到的自由面高度随时间变化曲线

从以上图片中可以看出，不同波高的周期波爬高具有相似的规律。不过需要注意的是：A1 列四个探测点处波谷处均出现了所谓的“二次波峰”现象，即波谷处有轻微震荡，推测与波浪在水池宽度方向的反射波有关，反射波沿宽度方向传播，与沿水池长度方向的入射波叠加。事实上，仔细观察 4.22m 波高的波浪也有类似的现象，只是由于波高较小而不太明显。

下面给出 153s 到 162s 一个周期内的自由面高度云图：

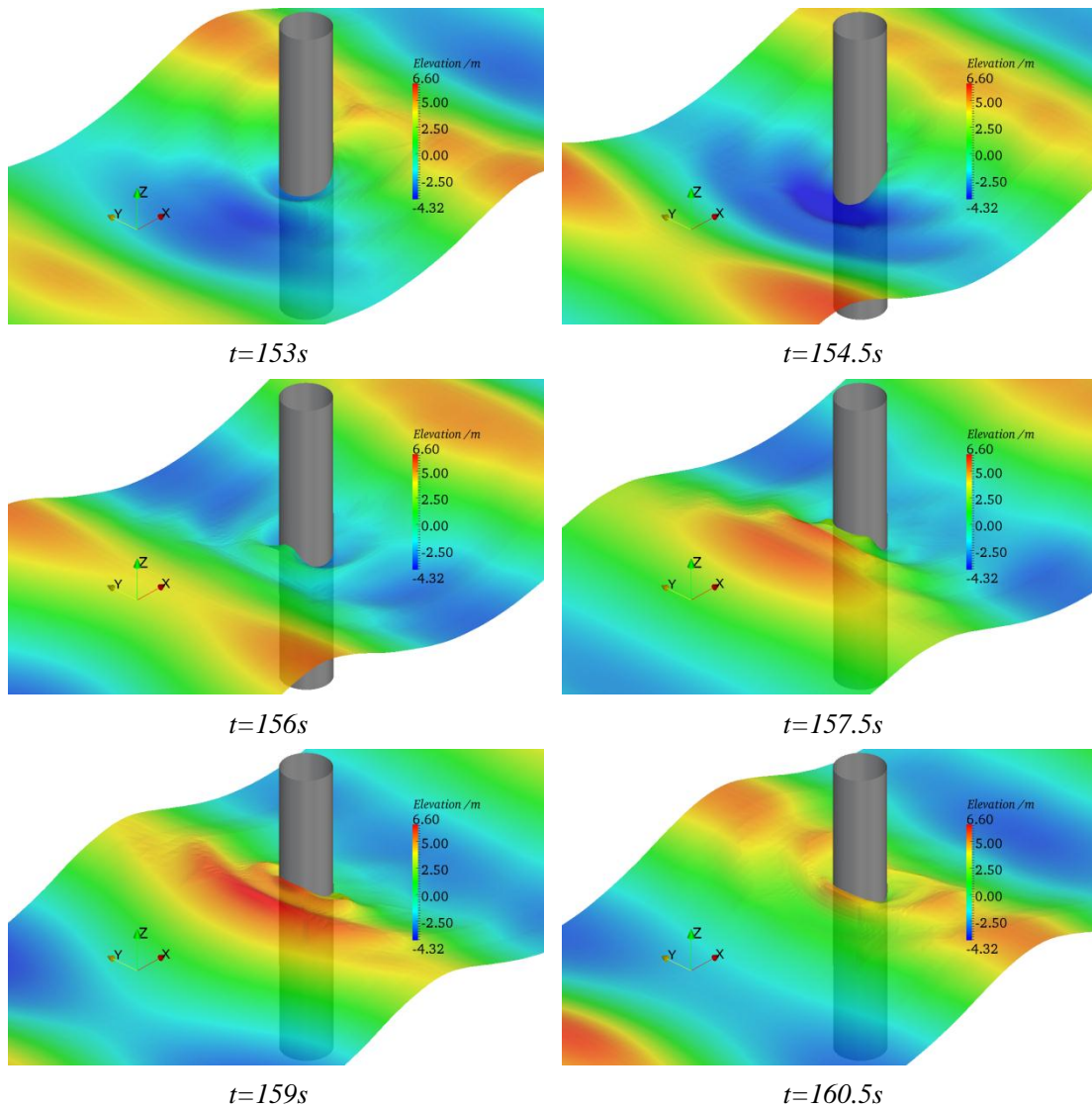
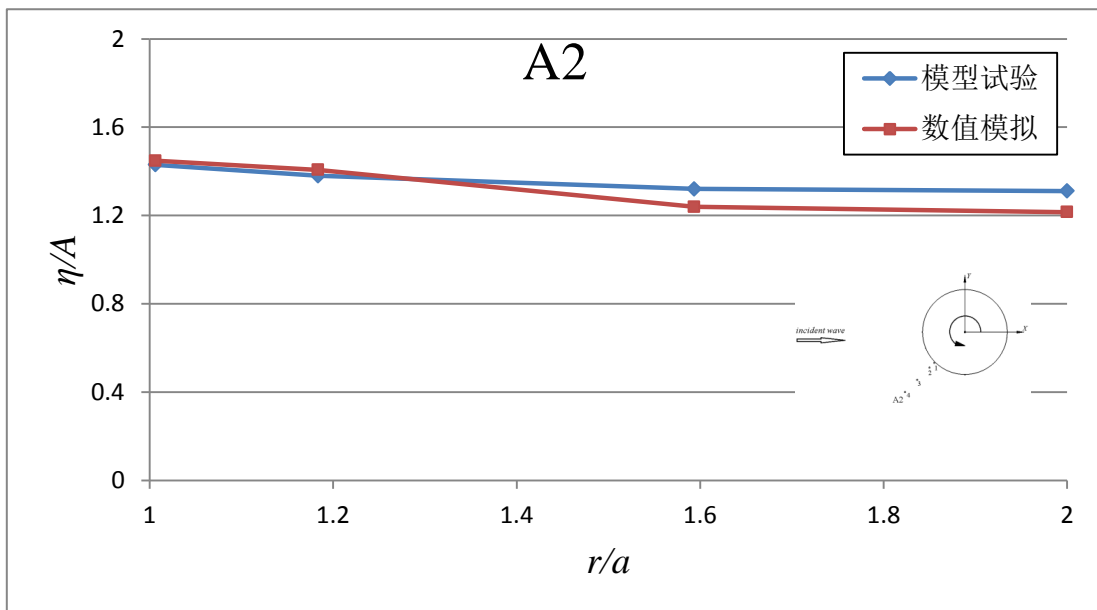
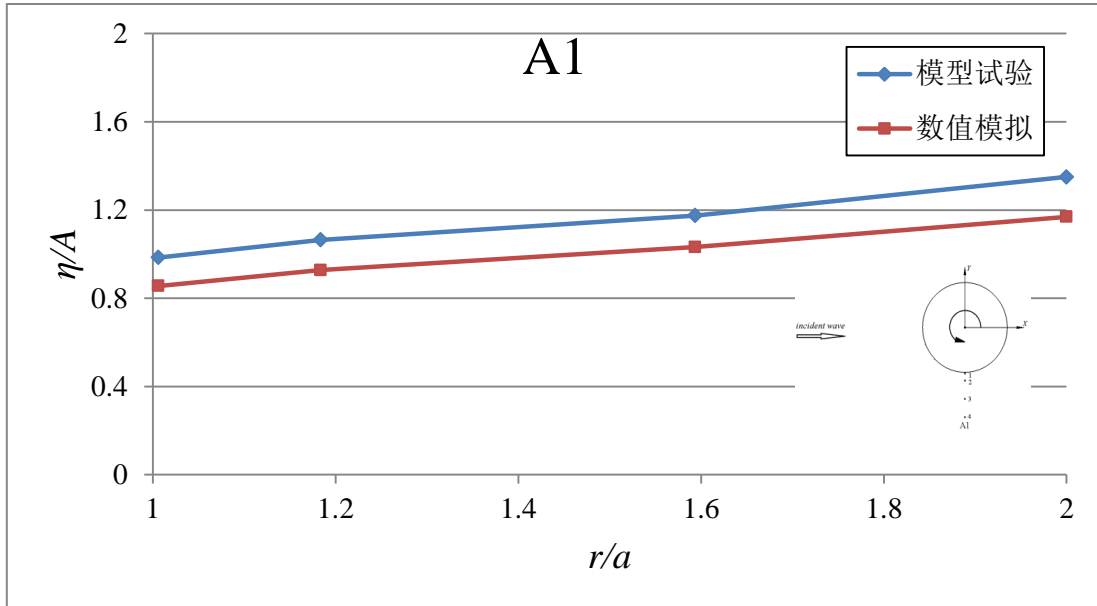


图 4-20 一个周期内的自由面高度云图

4.4.2 模型试验与数值模拟结果比较

下面给出数值模拟与模型试验所得到相对爬高值的比较结果。图中横轴表示探测点离圆柱中心的距离 r 与圆柱半径 a 的比值，而纵轴则表示自由面最大高度的平均值 η 与波幅值 A 的比值。



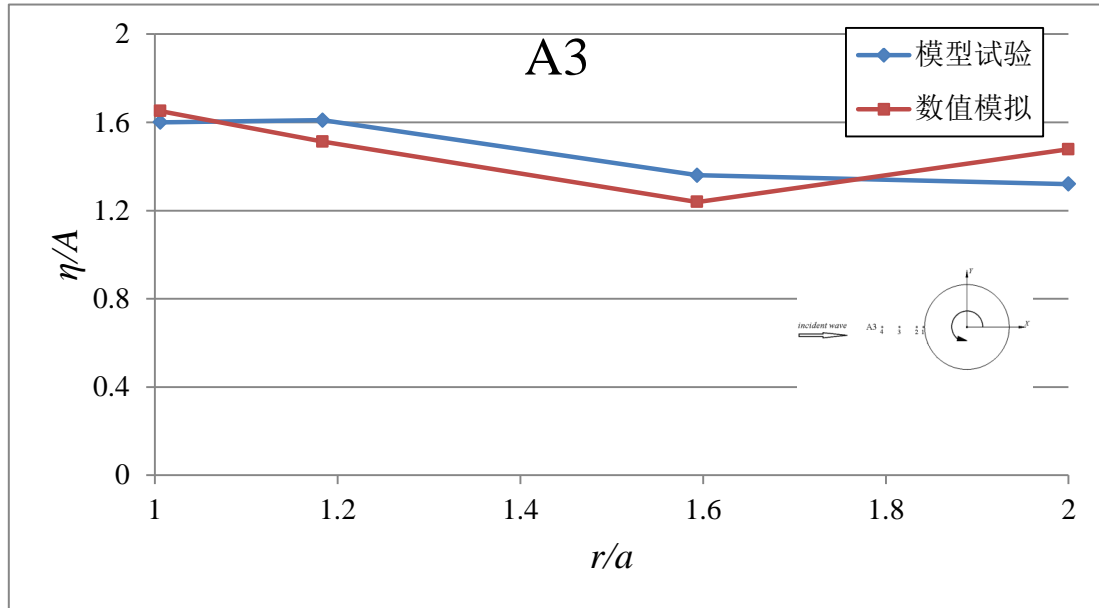


图 4-21 模型试验与数值模拟所得波浪爬高结果比较

从图 4-21 与 4.3.2 中图 4-11 的对比可以看出，入射波浪波高值越大，沿圆柱爬高越明显，相对爬高值也越大，但都呈现相同趋势。

4.4.3 压力与速度分布和波浪力曲线

下面给出最大爬高时刻的压力与速度分布云图，并绘出 150s 到 200s 这段时间内圆柱所受波浪力曲线。

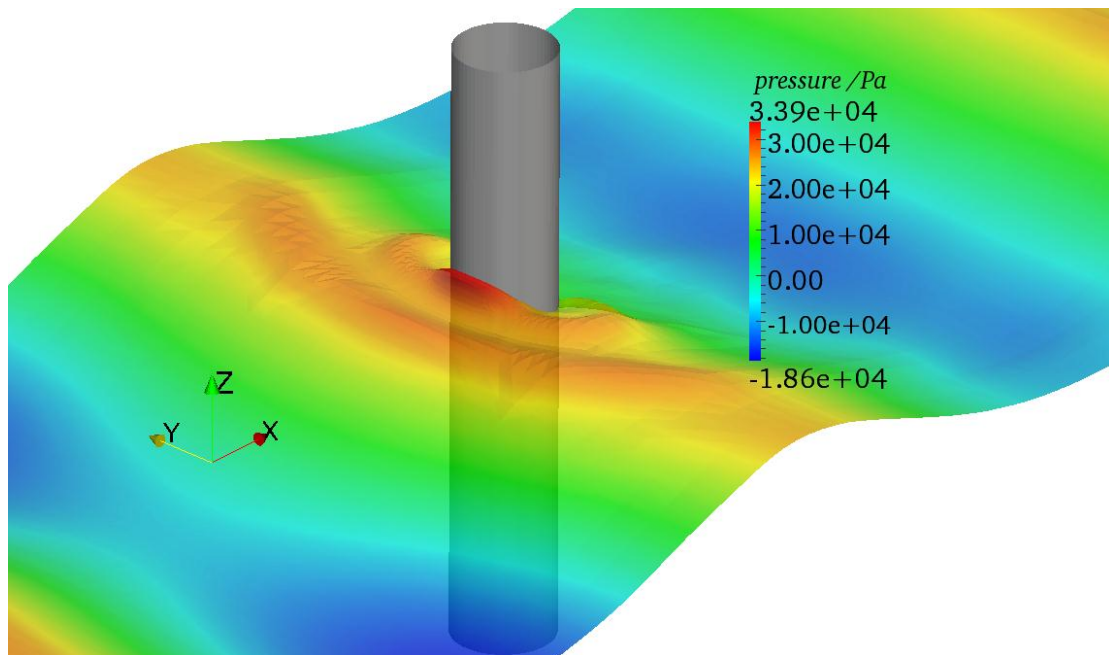


图 4-22 最大爬高时刻压力分布云图

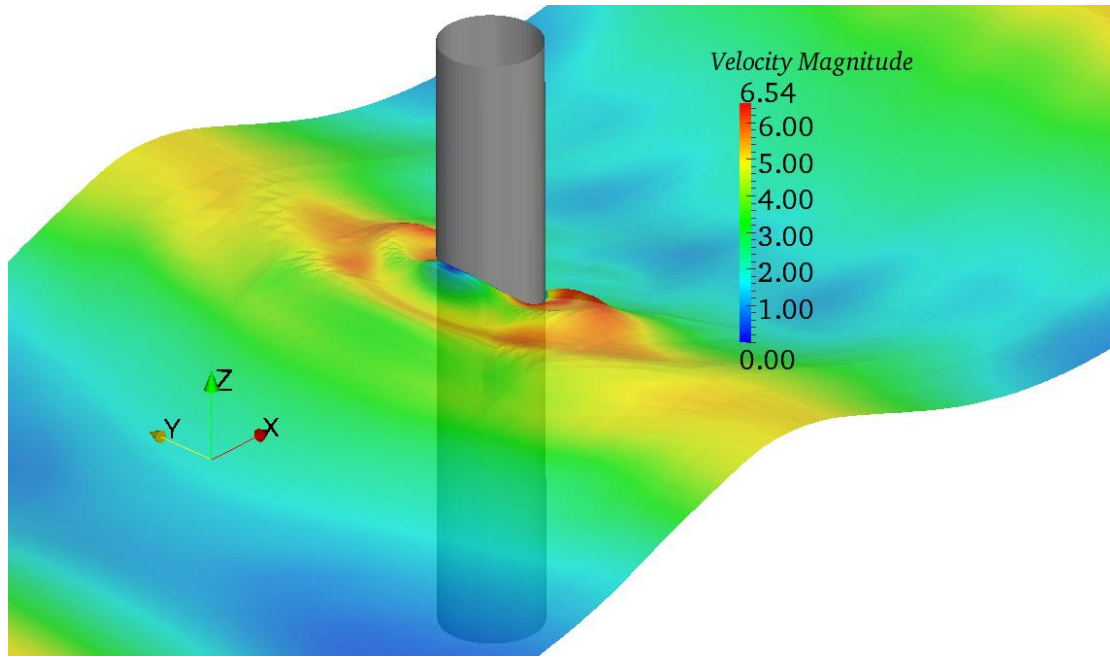


图 4-23 最大爬高时刻速度分布云图

上面两张图与 4.3.3 中压力与速度分布云图呈现相似特性。

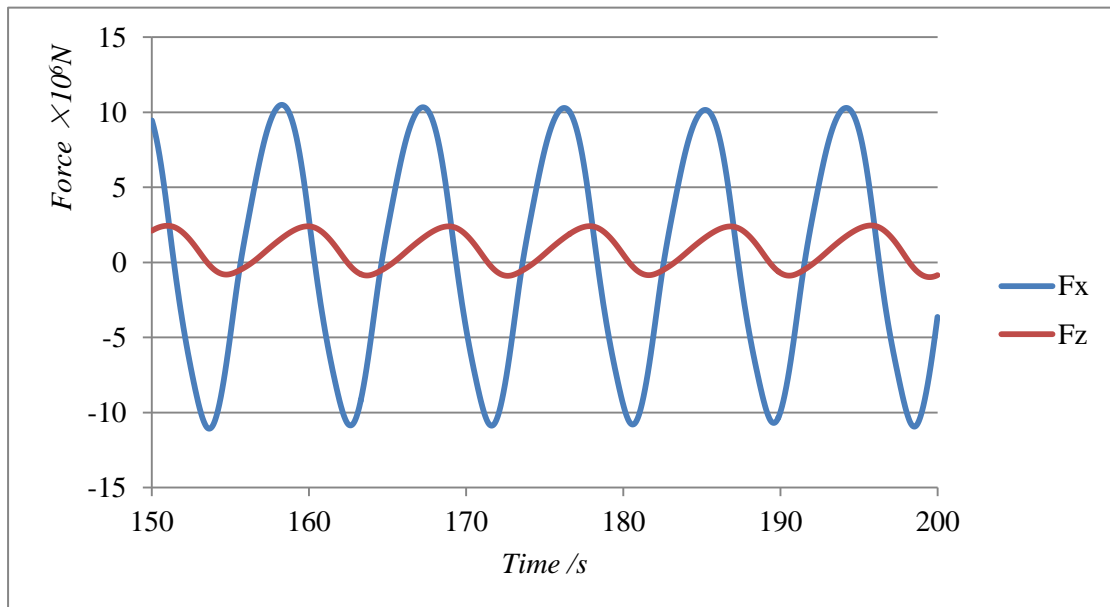


图 4-24 150s 到 200s 这段时间内圆柱所受波浪力曲线

从图 4-24 中可以看出，圆柱在 7.99m 波高下的受力要大于 4.22m，在 x 方向所受的波浪力达到近 $1.0 \times 10^7 \text{N}$ ，z 方向的力也增大至约 $2.5 \times 10^6 \text{N}$ 。

4.5 本章小结

本章将数值水池从二维扩展到三维，对 4.22m 和 7.99m 两种周期波入射下沿圆柱波浪爬高现象进行了模拟，并将爬高结果与模型试验值进行了比较，得到了较一致的结果，进一步验证了数值模拟的可靠性。另外，本章还给出了波浪爬高时圆柱周围流场压力与速度分布情况，以及圆柱所受到的沿入射波方向与沿圆柱高度方向的波浪力，可作为海洋结构物所受波浪外力，用于结构物强度设计与校核。

第五章 三维数值水池孤立波爬高的数值模拟

上一章讨论了周期波作用下圆柱波浪爬高现象，这一章将进一步扩展到孤立波的情况，模拟 10m、15m、20m 和 25m 四种波高的孤立波沿圆柱爬高的现象。由于并没有找到相应的物理水池模型试验，将主要通过网格收敛性试验对结果进行验证。

5.1 孤立波与造波理论

孤立波是一种典型的强非线性长波，其典型特征长度可达数百米乃至上千米，可以用来描述海啸和风暴引起的巨浪的某些特征，在以往的研究中常以孤立波来表示海啸来研究极限波浪与海洋结构物的相互作用。当孤立波在传播过程中遇到海洋结构物时，会出现明显的爬高现象，并对结构物产生很大的冲击。

本毕业设计中，孤立波的造波方法与周期波类似，同样采用推板造波。根据势流理论，当水深为 d 时，孤立波的自由波面方程为：

$$\eta = H \operatorname{sech}^2[k(x - ct)] \quad (5-1)$$

其中， H 表示入射波波高， $k = \sqrt{\frac{3H}{4d^3}}$ ， x 表示波峰处对应坐标， $c = \sqrt{g(H + d)}$ 表示

孤立波波速。为确定造波板的水平位移函数 $X(t)$ ，可以求解下面的微分方程^[20]：

$$\frac{dX(t)}{dt} = \frac{c\eta}{d + \eta} \quad (5-2)$$

解得：

$$X(t) = \frac{H}{kd} \tanh(k(ct - X)) \quad (5-3)$$

造波板的冲程也可由下式求得：

$$S = X(\infty) - X(-\infty) = \sqrt{\frac{16Hd}{3}} \quad (5-4)$$

需要注意的是，由于孤立波的理论周期是无限大的，因此在数值模拟时通常取 $\tanh(k(ct - X)) \approx \pm 0.9$ 来代替 $\tanh(k(ct - X)) = \pm 1$ 。

5.2 试验模型介绍

由于孤立波的波长较长，这里水池尺度也相应增大了：水池长度设为 1500m，宽度为 300m，高度为 100m，水深 50m，自由面以上部分 50m。圆柱直径为 30m，吃水 25m，布置位置参见图 5-1 和图 5-2。图中的 p1、p2 和 p3 表示三个探测点。

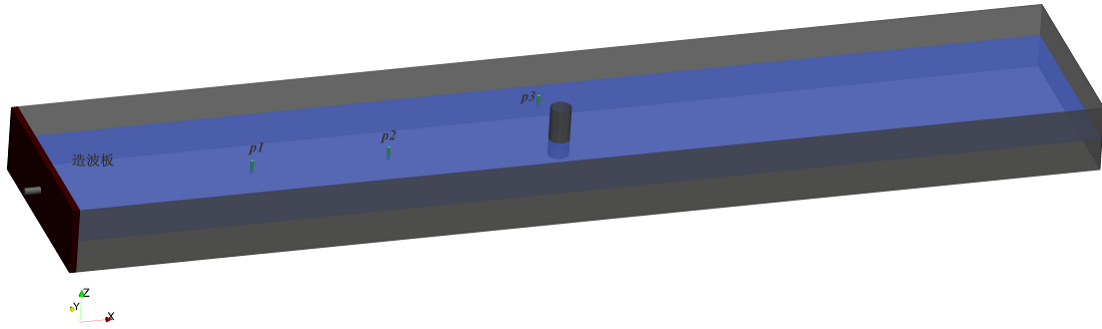


图 5-1 水池模型三维示意图

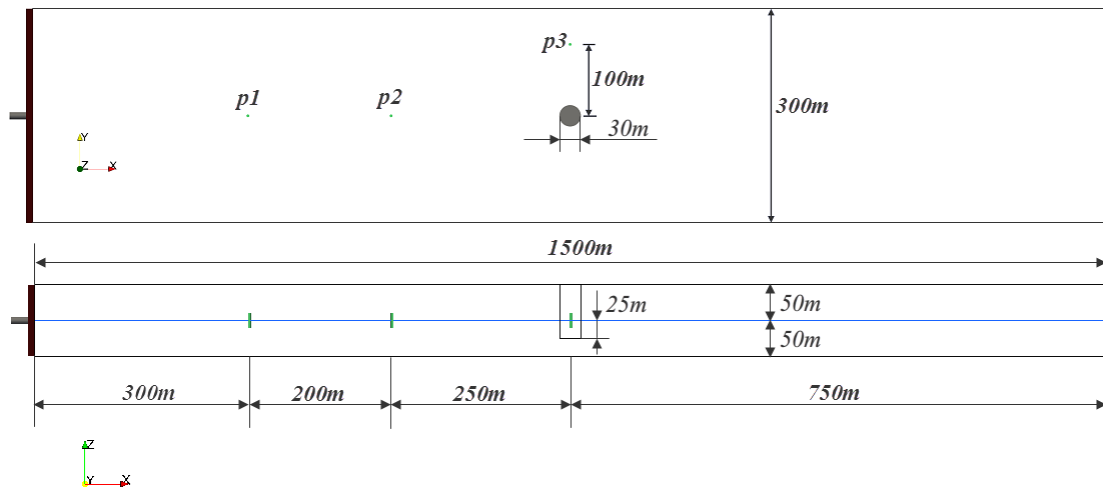


图 5-2 水池模型平面图

需要说明的是，由于孤立波波长太长，而且设置的波高也比较大，阻尼消波的效果并不明显，反而会因为消波系数的存在产生前面曾提到的“壁面边界”，这里就没有设置阻尼消波段。不过为了减少网格量，依然将 1000m 到 1500m 这段区域布置为非均匀形式网格，如图 5-3 所示。

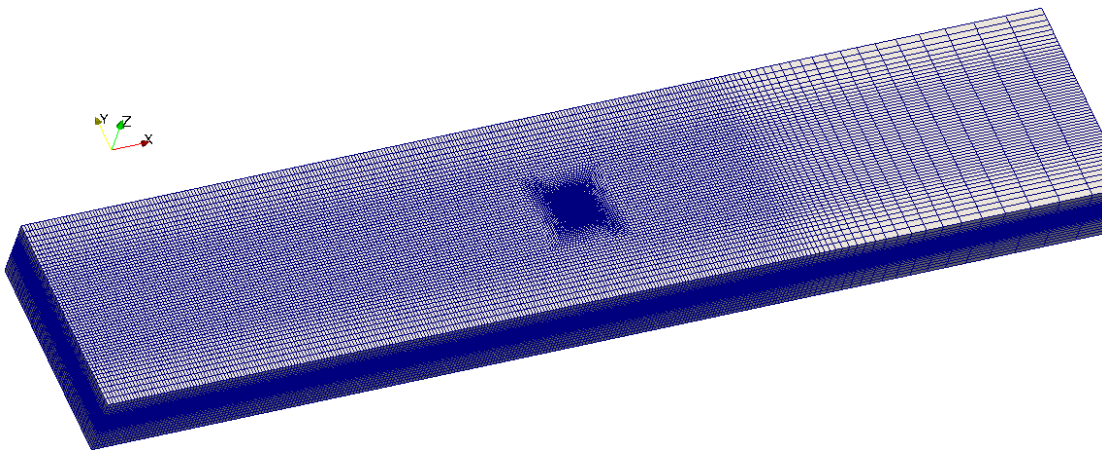


图 5-3 试验模型网格布置

5.3 数值模拟

由于涉及到四种波高的情况，具体试验过程又都类似，这里仅介绍 10m 波高的试验过程，其他三种波高则直接给出最后结果，过程不再详述。

5.3.1 造波试验

图 5-4 给出的是 10m 波高的孤立波入射下，三个探测点处测得的自由面高度随时间变化的曲线。从图中可以看出，孤立波的波形在传播过程中保持得非常稳定，仅仅有十分微弱的衰减，这就说明网格布置与其他参数的设置是适当的。

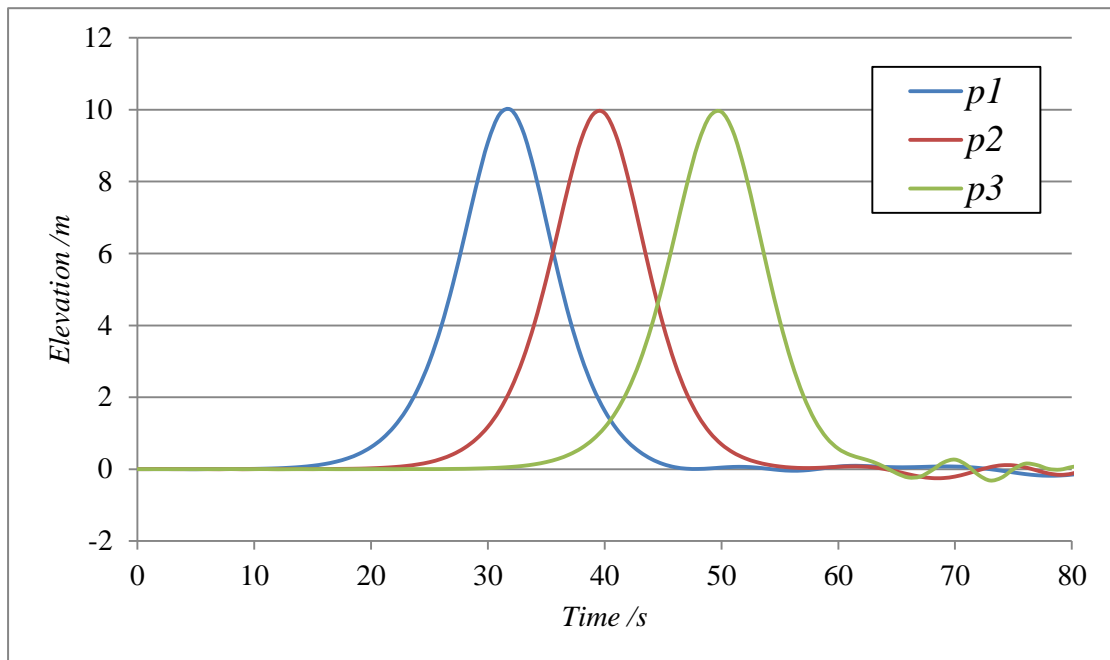


图 5-4 探测点处测得自由面高度随时间变化曲线

5.3.2 网格收敛性试验

由于没有相关的模型试验数据，就需要通过网格收敛性测试来检验得到的结果是否可信。具体来说，就是按照一定规律增加网格量，比较不同网格量下的数据。如果达到一定网格量后，数据保持相对稳定，不再出现较大变化，即认为此时的数据是可信的。这里对 10m 波高情况下，圆柱迎浪点处自由面最大高度值以及沿水池长度方向的波浪力进行网格收敛性验证。

前面章节中曾提到，影响网格量的主要因素包括：自由面以上一定高度内布置的均匀网格单元数与细长比。为避免得到不可信的结果，有必要首先采用控制变量法的手段，来验证两个因素对试验结果的影响。有一点需要说明：之所以第一个参数选择自由面以上一定高度，而不是像周期波中那样选择自由面上下一定区域，是因为孤立波没有波谷，这从图 5-4 中就能看出，不需要考虑加密自由面以下区域。

5.3.2.1 波高内均匀网格单元数影响

以 10m 波高的情况为例，首先保持细长比为 5，设置自由面以上 15m 内布置的均匀网格单元数分别为 10、12 和 15，总网格量也相应地增加，将自由面最大高度值与波浪力的结果列于下表 5-1：

表 5-1 细长比为 5 时，不同网格量对应的最大波高与波浪力比较

15m 内布置单元数	10	12	15
网格量	183,936	320,712	607,008
最大波高 H_{\max} (m)	11.67	11.71	11.77
波浪力 F_x ($\times 10^7$ N)	2.36	2.36	2.36

为直观反映差距，将表 5-1 中数据绘成图 5-5：

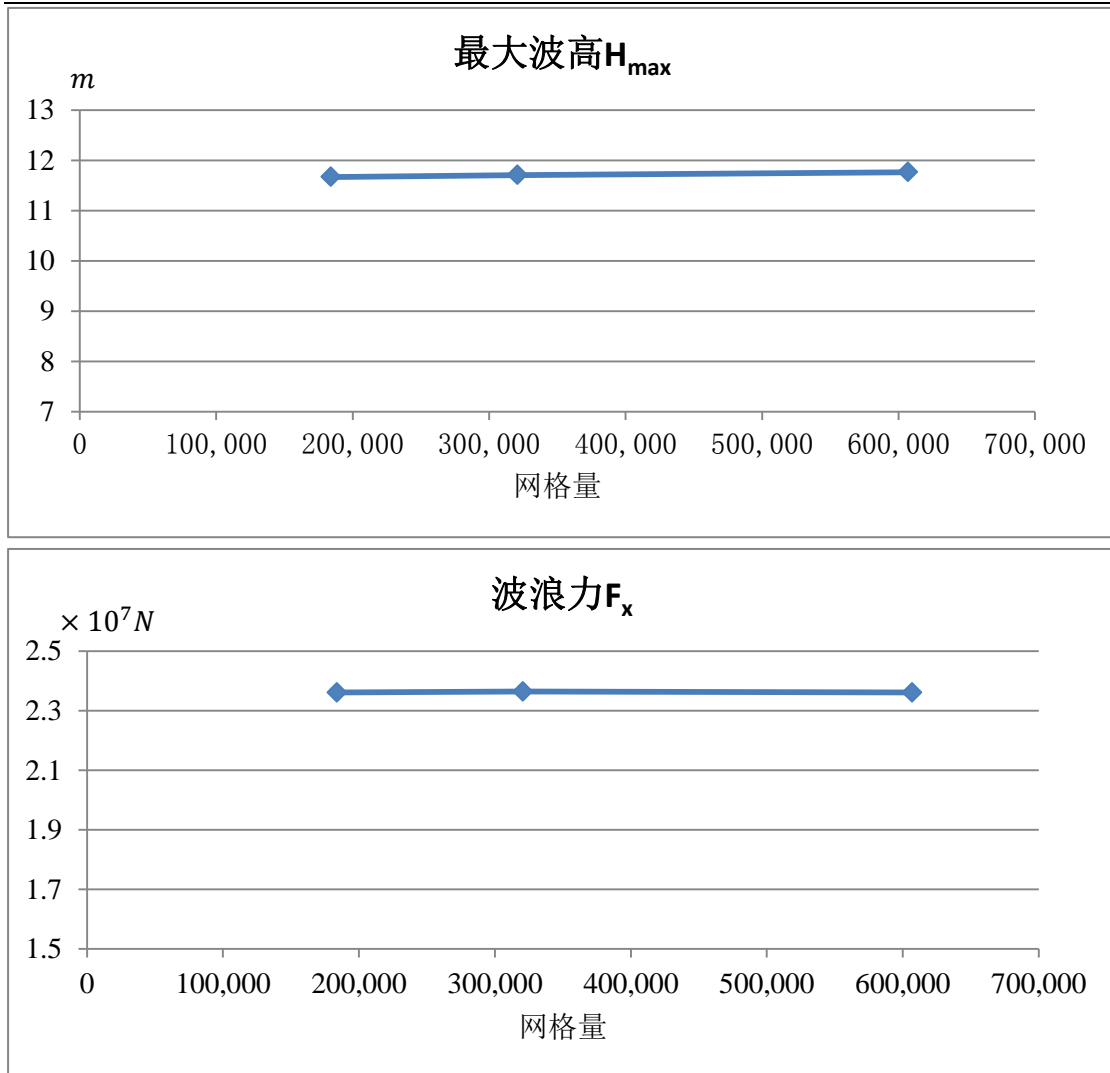


图 5-5 细长比为 5 时，不同网格量对应的最大波高与波浪力比较

结合表 5-1 与图 5-5，可以看出：三种网格量下的最大波高基本不变，而波浪力则完全相同。这就说明，试验结果对通过改变自由面以上 15m 内布置的均匀网格单元数引起的网格量变化并不敏感。换句话说，细长比一定时，通过改变自由面以上一定高度内布置的均匀网格单元数来改变网格量，并不能起到网格收敛性试验的验证作用。

5.3.2.2 细长比影响

接下来看看细长比的影响。保持自由面以上 15m 内布置的均匀网格单元数为 12 不变，设置细长比分别为 12、8、5 和 3，将自由面最大高度值与波浪力的结果列于下：

表 5-2 自由面以上 15m 内布置的均匀网格单元数为 12 时，
不同网格量对应的最大波高与波浪力比较

细长比	12	8	5	3
网格量	58,752	130,104	320,712	640,526
最大波高 H_{\max} (m)	11.39	11.58	11.71	11.76
波浪力 F_x ($\times 10^7 N$)	2.32	2.35	2.36	2.37

同样将表 5-1 中数据绘成图 5-6：

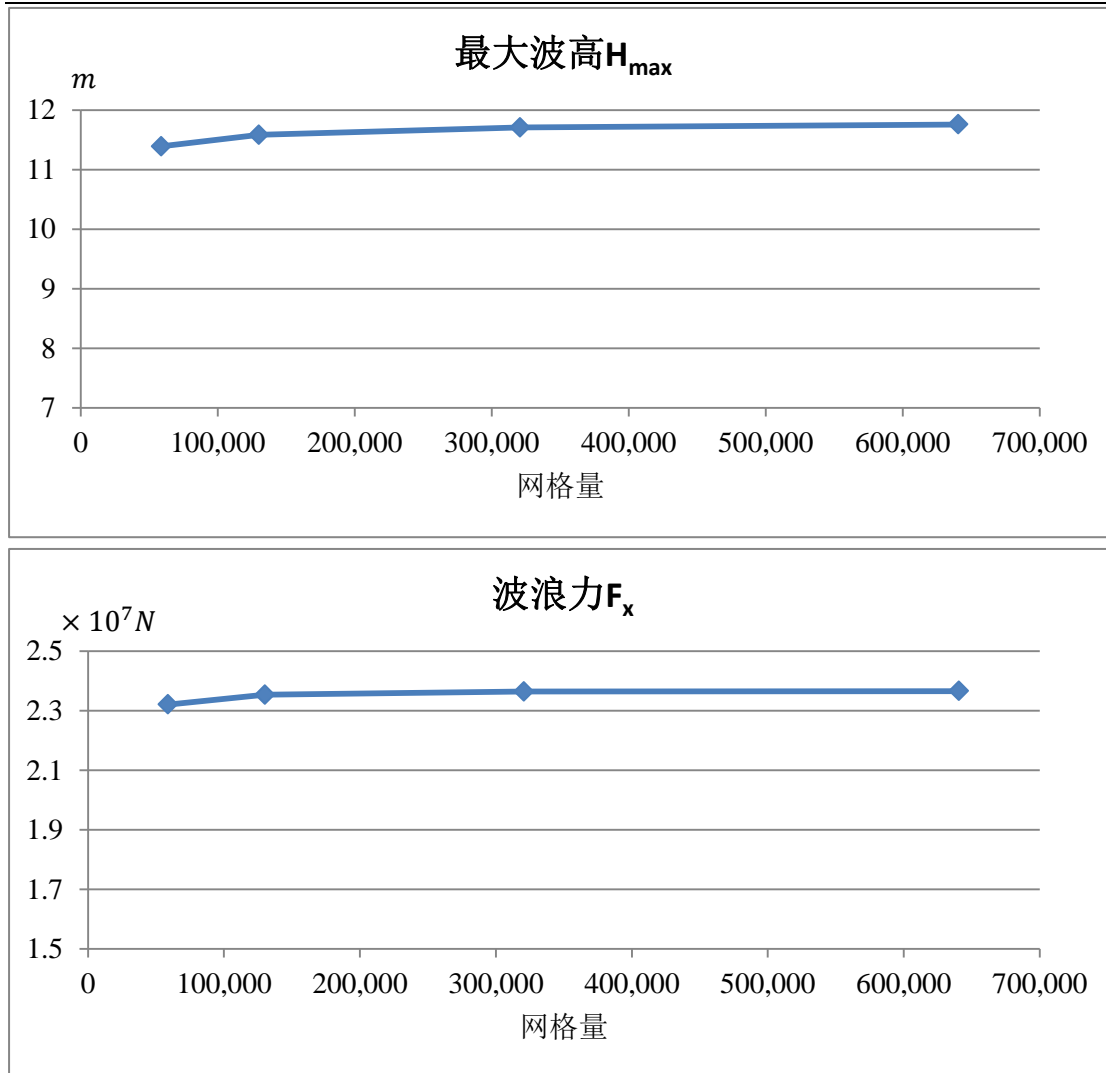


图 5-6 自由面以上 15m 内布置的均匀网格单元数为 12 时，
不同网格量对应的最大波高与波浪力比较

从表 5-2 和图 5-6 中可以看出：随着细长比逐渐减小，网格量逐渐增大，最大波高与波浪力先逐渐上升，然后趋于稳定。这就说明，采用改变细长比引起网格量变化的方法进行网格收敛性试验是可行的。对于其他波高的入射波，后面也将采用该方法得到可信的最大波高与波浪力。

5.3.2.3 试验结果

对于其他波高的情况，进行同样的网格收敛性试验，将得到的可信的结果汇总与下表 5-3:

表 5-3 不同波高的入射波试验结果汇总

波高 (m)	10	15	20	25
布置均匀网格的高度 (m)	15	20	30	40
均匀网格单元数	12	17	25	32
网格量	640,526	843,111	831,318	975,852
最大波高 H_{\max} (m)	11.76	19.25	28.65	40.06
波浪力 F_x ($\times 10^7 N$)	2.37	4.59	7.35	10.90

需要说明的是，四种情况下细长比均设为 3。将表 5-3 中数据绘成图 5-7:

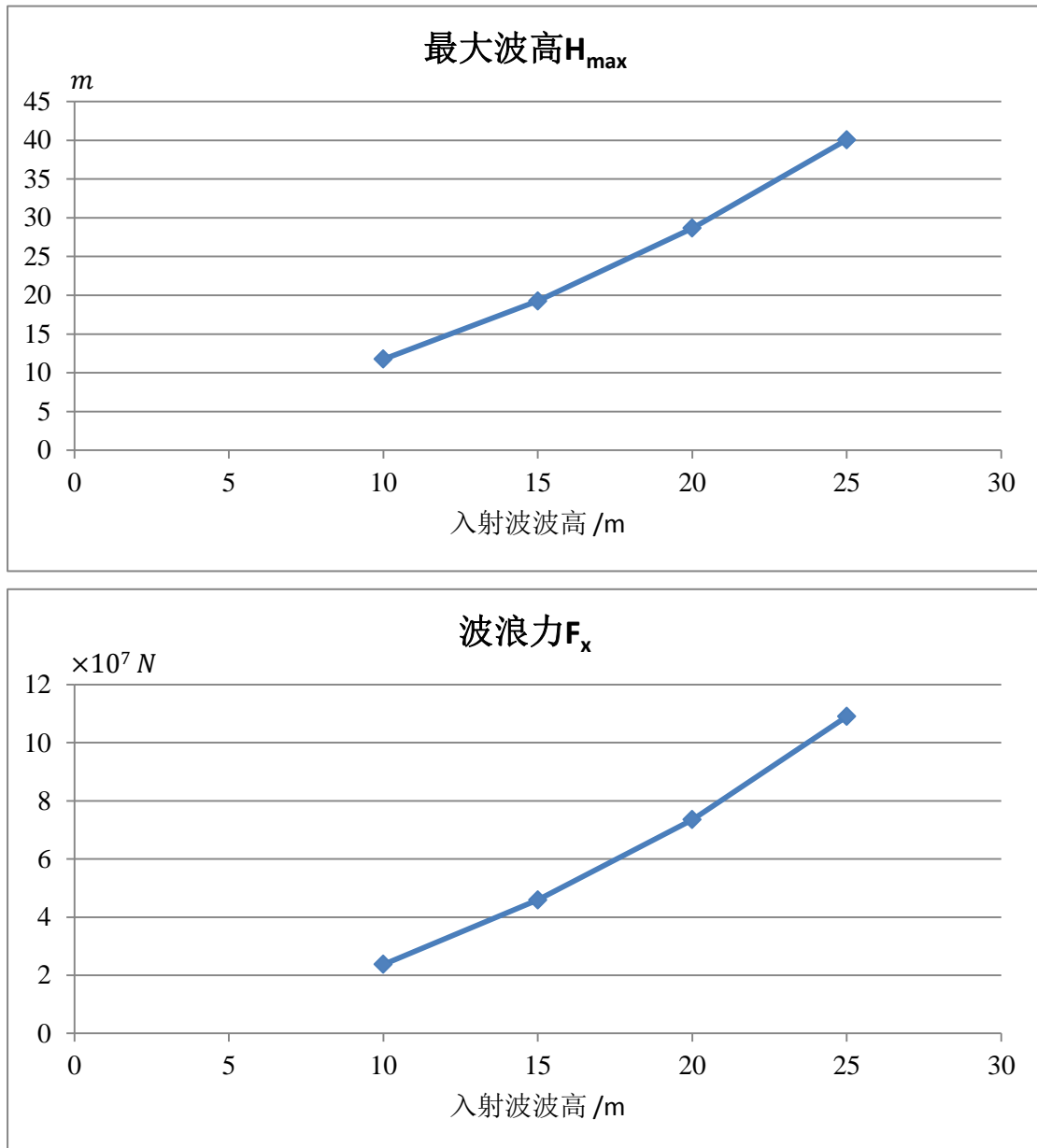


图 5-7 不同波高的入射波试验结果汇总

从图 5-7 中可以看出，两条曲线的斜率均有逐渐增大的趋势。以最大波高曲线为例，波高值越大，爬高值增加得越多，而不是线性增加。如果入射波波高为 30m，最大波高预计将超过 50m。对于海洋平台来说，这么大的爬高将极有可能引起平台甲板底部受到冲击，造成平台破坏。

5.3.3 沿圆柱表面波浪爬高值比较

在离圆柱表面 0.01m 处，每隔 11.25° 布置一个探测点，将各点处测得的最大波高按照角度变化连成曲线，绘出最大自由面高度沿圆柱变化的曲线。需要说明的是，由于整个模型在水池宽度方向是对称的，那么自由面高度也应该关于该对称轴对称。为了减少数据量，仅在 0° 到 180° 的位置布置探测点，而 180° 到 360° 位置处的自由面高度值则取对称点处测得的值。

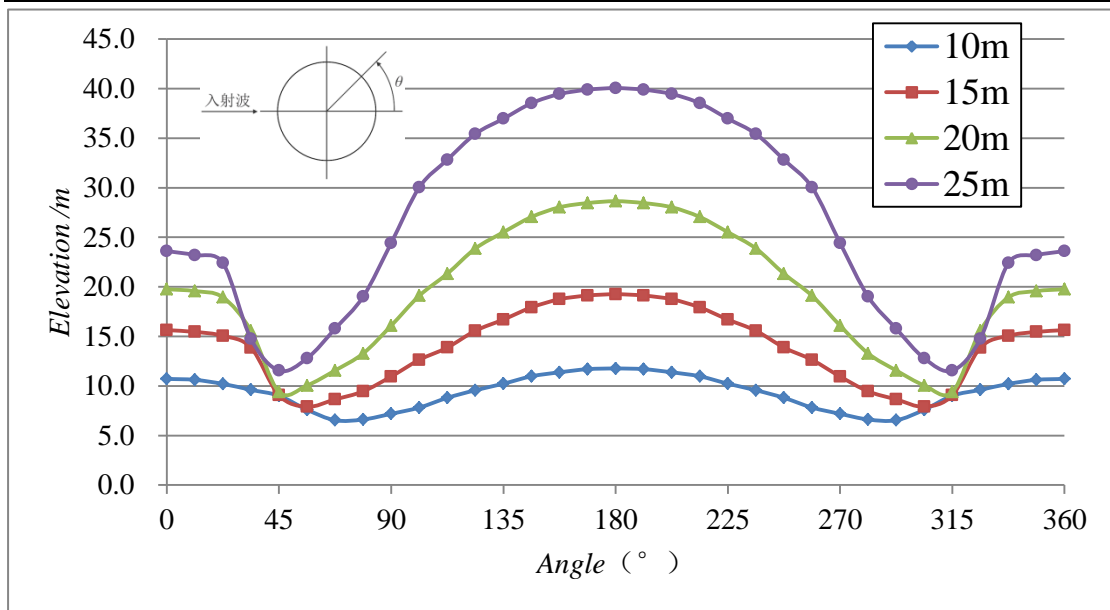


图 5-8 不同波高下最大自由面高度沿圆柱表面不同角度变化的曲线

从图 5-8 中可以看出：

- (1) 180° 方向，即迎着波浪的探测点处，自由面高度值最大，这一点在前面周期波部分已有说明。
- (2) 左右 45° 方向附近，自由面高度值最小。对于 25m 波高的入射波，该方向的自由面甚至只能达到 11.5m，还不到入射波高度的一半，其他波高的情况也有类似的下降，这应该与波浪传播至圆柱发生绕射有关，如图 5-9 所示。

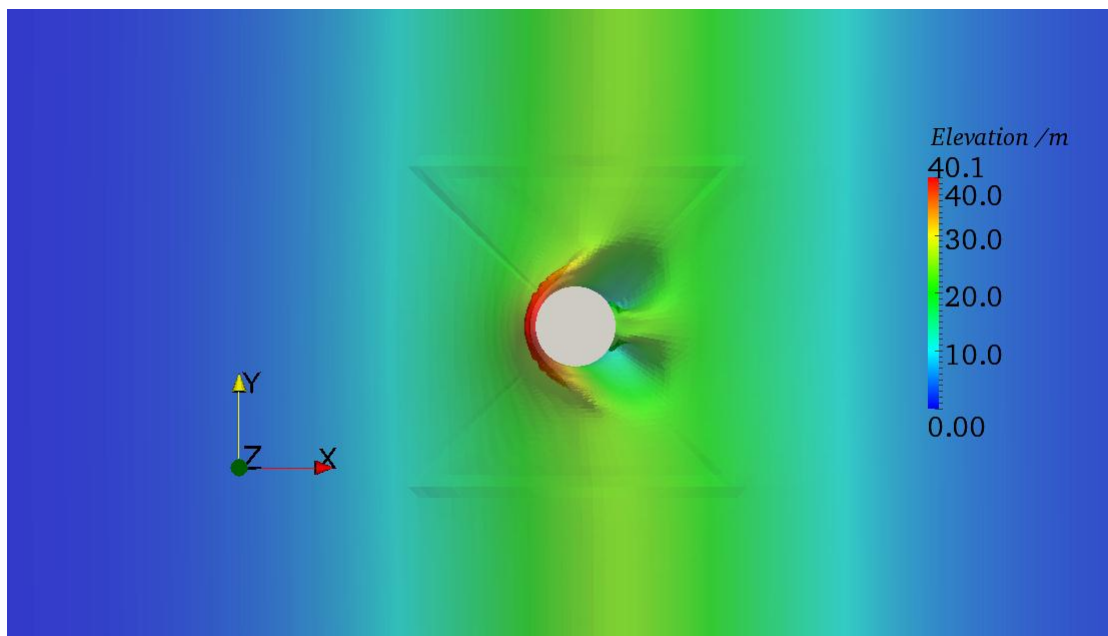


图 5-9 波浪传播至圆柱发生绕射

5.4 本章小结

本章介绍了入射波浪为孤立波时，沿圆柱表面的爬高。由于没有相关模型试验数据，为了验证数值模拟得到的数据是可信的，需要进行网格收敛性试验。通过对波高内布置的均匀网格单元数与细长比两个影响网格量因素进行试验，决定采取改变细长比来变化网格量的方

法。通过对 10m、15m、20m 和 25m 四种波高情况下最大爬高值与沿水池长度方向圆柱所受波浪力的比较，发现入射波的波高越大，这两个物理量将增加越多，而并非线性增加。此外，还对沿圆柱表面 360° 不同位置处的最大爬高作了比较，发现左右 45° 方向的波面会有很大降低。

第六章 总结与展望

6.1 总结

本毕业设计基于粘性流体 CFD 理论方法,使用开源代码 OpenFOAM,对不同波高的周期波和孤立波入射下单个圆柱的波浪爬高现象进行了数值模拟。

以连续性方程和动量方程为控制方程,通过有限体积法对方程进行离散,采用 VOF 方法处理气液两相流问题中的自由面,利用推板式造波方法数值造波,添加阻尼消波区消除反射波干扰,建立了二维数值波浪水池。通过二维造波试验,讨论了包括消波区参数、时间步长和网格精度等若干影响二维造波试验结果精度和总计算时间的参数,得到了兼顾结果精度与总计算时间的参数设置方案,数值模拟所得到的波形也满足了后续试验对波峰高度值要求,从而验证了数值模拟的可行性与可靠性。

在二维造波试验的基础上,将数值波浪水池扩展到三维情况。比较了三维数值波浪水池中,4.22m 和 7.99m 两个波高的周期波沿圆柱表面的波浪爬高值与物理水池模型试验的数据,得到了较一致的结果,进一步验证了数值模拟的可靠性。同时给出了波浪爬高时圆柱周围流场压力与速度分布情况,以及圆柱所受到的沿入射波方向与沿圆柱高度方向的波浪力。其中,得到的波浪力可作为海洋结构物所受波浪外力,用于结构物强度设计与校核。

之后,又考虑了入射波为孤立波的情况,以模拟极限海况下的圆柱波浪爬高现象。介绍了孤立波造波理论,并通过造波试验验证了孤立波数值模拟的可行性。考察了自由面以上一定高度内布置的均匀网格单元数与细长比这两个影响网格量变化的因素对网格收敛性试验结果的影响,确定了通过变化细长比来改变网格量的方法进行网格收敛性试验。通过一系列的网格收敛性试验,得到了 10m、15m、20m 和 25m 波高的入射波沿圆柱表面爬升的高度值,以及沿水池长度方向的波浪力,并注意到它们的差值随入射波波高变化而呈现出逐渐增大的趋势。此外,还对沿圆柱表面 360° 不同方向探测点处的最大自由面高度作了比较,发现了左右 45° 方向波面出现剧烈下降。

本毕业设计通过一系列数值模拟试验,对圆柱波浪爬高现象有了深入的了解,并得到了部分物理量的数据,所确定的爬高值可以为设计海洋平台时“气隙”高度的选取提供参考,而波浪力则可用于结构物强度分析。

6.2 展望

今后,对于圆柱波浪爬高数值模拟的研究还可以向以下几方面发展:

- (1) 利用其他波浪理论造出不同类型的波。实际海域中遇到的波浪并不只有周期波与孤立波两种,要模拟可能遭遇的其他类型的波,就需要采用不同的波浪理论。
- (2) 比较不同直径、不同吃水的圆柱遭遇同样波高波浪的爬高。研究圆柱尺寸对波浪爬高的影响,可以为海洋平台立柱尺寸的设计提供参考。
- (3) 在数值水池中有序放置多个圆柱,研究多圆柱下波浪爬高现象。随着油气开采逐渐进入远海,半潜式海洋平台越来越多地应用于海洋工程。多圆柱波浪爬高的研究对于这类有多个立柱支撑甲板的海洋平台设计有着重要意义。
- (4) 比较不同网格构成形式对数值模拟试验结果的影响。按照构成形式,网格可分为结构化与非结构化两种。由于网格对数值模拟结果有比较大的影响,有必要对同一问题选择不同的网格构成形式进行数值模拟所得的结果进行比较,以确定其影响程度。

参考文献

- [1] 杨建民, 肖龙飞, 盛振邦. 海洋工程水动力学试验研究[M]. 上海:上海交通大学出版社, 2008:1-17.
- [2] 曾一非. 海洋工程环境[M]. 上海:上海交通大学出版社, 2007:1-12.
- [3] 翁克勤. 波浪爬高[J]. 海洋工程,1986,(01):79-91.
- [4] Nielsen F G. Comparative study on airgap under floating platforms and run-up along platform columns[J]. Marine Structures,2003,16(2):97-134.
- [5] Weihua M, Irschik K, Oumeraci H, etc. A 3D numerical model for computing non-breaking wave forces on slender piles[J]. Journal of Engineering Mathematics,2007,58(1):19-30-30.
- [6] Martin A J, Easson W J, Bruce T. Runup on Columns in Steep, Deep Water Regular Waves[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering,2001,127(1):26-32.
- [7] Büchmann B, Skourup J, Fai Cheung K. Run-up on a structure due to second-order waves and a current in a numerical wave tank[J]. Applied Ocean Research,1998,20(5):297-308.
- [8] Nitin R, Krish T, Michael M-T. CFD simulation of wave run-up on a spar cylinder[A]. 16th Australasian Fluid Mechanics Conference[C]. 2007:1091-1094.
- [9] <http://www.openfoam.com/>
- [10] 王福军. 计算流体力学分析: CFD 软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2004:54-57.
- [11] Issa R I. Solution of the implicitly discretised fluid flow equations by operator-splitting[J]. Journal of Computational Physics,1986,62(1):40-65.
- [12] 王彤, 谷传纲, 杨波, etc. 非定常流动计算的 PISO 算法[J]. 水动力学研究与进展(A 辑),2003,(02):233-239.
- [13] 王为术, 徐维晖, 翟肇江, etc. PISO 算法的实现及与 SIMPLE,SIMPLER,SIMPLEC 算法收敛性的比较[J]. 华北水利水电学院学报,2007,(04):33-36.
- [14] 王志东, 汪德燿. VOF 方法中自由液面重构的方法研究[J]. 水动力学研究与进展(A 辑),2003,(01):52-56.
- [15] Hirt C W, Nichols B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries[J]. Journal of Computational Physics,1981,39(1):201-225.
- [16] Henrik R. Computational Fluid Dynamics of Dispersed Two-Phase Flows at High Phase Fractions[D]. London: University of London, 2003.
- [17] 高山. 二维数值波浪水槽模式的建立和应用及浪流相互作用研究[D]. 中国海洋大学, 2003.
- [18] Ursell F, Dean R G, Yu Y S. Forced small-amplitude water waves: a comparison of theory and experiment[J]. Journal of Fluid Mechanics,1960,7(01):33-52.
- [19] Larsen J, Dancy H. Open boundaries in short wave simulations -- A new approach[J]. Coastal Engineering,1983,7(3):285-297.
- [20] Dong C-M, Huang C-J. Generation and Propagation of Water Waves in a Two-Dimensional Numerical Viscous Wave Flume[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering,2004,130(3):143-153.

谢辞

时光荏苒，光阴似箭。为期半年的毕业设计即将完成，也意味着本科四年的学习生活已经接近尾声。作为对四年学习成果的检验，毕业设计的过程充满了太多的苦与乐，这些都将伴随着本科毕业成为大学生活中的最美好回忆。毕业设计的完成离不开许多人的帮助与支持，如交大校训所言，“饮水思源”，在此向他们表达我最诚挚的谢意。

首先感谢万德成教授。万老师学识渊博、治学严谨，在毕业设计过程中给我指明了方向，对于出现的问题也总是循循善诱、悉心指导；生活中，万老师也总是对学生嘘寒问暖，提醒大家注意休息、锻炼身体。

感谢沈志荣师兄、曹洪建师兄，在学习 OpenFOAM 的过程中给予了极大的帮助，在我遇到问题时也总是耐心解答，并且经常提供给我非常有价值的建议。感谢张雨新师兄，理论基础十分扎实，对于我在 CFD 理论上的困惑，总是能深入浅出地讲解清楚。感谢万老师门下的其他师兄、师姐们，他们也都在我做毕业设计时给予了很大的关心与帮助。

感谢我的同学们和朋友们，特别是一起住在 D3 楼 206 室的王子龙、赵萌和李良三位室友，以及同组的缪莎同学，在这段日子里，大家的关心与鼓励让我在遇到挫折时还能继续坚持下去。

感谢我的家人，你们一直以来默默的支持与关爱，始终是我人生道路上不断前进的不竭动力。

NUMERICAL SIMULATION OF WAVE RUN-UP OF PILES OF FIXED PLATFORM

A platform is a large offshore structure which can provide production and living facilities for activities such as drilling, oil extraction, oil production and consolidation on the sea. The most common structure form of a platform is a tremendous deck supported by one or more huge piles. When designing a platform, air gap is a very important factor which must be taken into account. Air gap is the clearance between the bottom of the deck and the free surface of the sea, and it's determined by the maximum height to which the wave can run up along a pile. The reason why it is so significant to obtain the required air gap is that the wave will hit the deck and then cause damage to the whole platform if the air gap is not sufficient. On the other hand, if the air gap is too large, the cost to construct the platform will increase. What's worse, it may even bring down the stability and security. For a long time, model tests were the most frequently used method to study the phenomenon of wave run-up. Ever since the first one was invented in 1946, computers have been developing rapidly, and numerical simulation was gradually introduced to solve fluid flow problems. Having advantages of low cost and short time consumption over model tests, numerical simulation is now playing a more and more important role in researching into plenty of these fluid problems. In the present work, numerical methods will be adopted to simulate the wave run-up phenomenon along a fixed vertical cylinder, which is the simplified model of wave run-up of one pile of a fixed platform. All the work is based on OpenFOAM which runs on Linux operating systems. OpenFOAM is very powerful and can solve many different types of fluid flow problems. Furthermore, the source code of OpenFOAM is open to people all over the world, thus anyone can download it from its official website and modify it to do his or her research freely.

In this paper, the basic theories and methods of numerical simulation are first introduced. The governing equations are established with no consideration of the effects of energy dissipation. In order to solve the governing equations numerically, the Finite Volume Method (FVM) is applied to discretize them, and the commonly used PISO algorithm is employed to deal with the coupling problem between the velocity and pressure in the fluid field. Because this is an air-water two-phase flow problem, the free surface can never be ignored. Here, the Volume of Fluid method is made use of to track the free surface.

With regard to the wave run-up problem, whether or not the wave with required wave height and wave profile can be generated is a key factor. Wave is generated in a numerical wave tank, which is the same as the model tests. To generate certain wave, a piston is used and it's forced to move under given horizontal velocity. Besides, a damping zone or sponge layer is placed in the right side of the numerical wave tank. If there is no such a damping zone, when the wave propagates to the wall of the tank, reflected wave will come into being and interfere with the incident wave. In that case, proper wave cannot be generated.

In order to validate whether the numerical method is feasible or not, a series of wave generation tests is conducted in a 2D numerical wave tank. Several parameters, which may have effects on the wave profile, are investigated under the control variate method to get appropriate values which can minimize the influence they will act on the results. The parameters include those

in relation to the damping zone, time step and those affecting the total cell number.

As for the parameters of the damping zone, they are the length of the zone, the damping coefficient and the mesh form of the zone. In general, the length had better be set long enough, which should not less than one wave length. In hope of getting the best wave absorbing effect and not causing much reflected wave, the damping coefficient should neither be too small nor too large, which means two or more tests are necessary. Whether the mesh form of the damping zone is set to be uniform or nonuniform or even one half of it is uniform while the other half nonuniform does not have much influence on the results. But nonuniform mesh form is recommended to cut down the total cell number.

The time step part consists of that of computation and output. The computation time step has much to do with the total computation time. Theoretically, shorter the computation time step is, more accurate the result will be, but the total computation time will correspondingly increase sharply. Tests are carried out here to strike the right balance between result accuracy and time consumption. Actually, the output time step does not influence the computation results. But if there are more data to analyze, there is much more chance to capture the details such as the maximum wave height. For this reason, the output time step is set shorter in the time range which you are interested in, while longer at other time to balance the details and the time spent in processing data.

The cell number per unit length in the wave height region is one of the factors which can have great effects on the total cell number. Larger the value is, more cell number the whole model will have, and more reliable the result will be, but more computation time will be spent. An appropriate value is applied to strike the balance. The ratio of the cell number per unit length in the wave height region to that in the wave length region is another important factor influencing the total cell number. Larger cell ratio results in more cells. In fact, when the ratio is less than certain value, the result remains virtually unchanged, so just like the first factor, a value neither too large nor small is obtained.

With all the parameters optimized, the final result comes up in good agreement with the one required. The wave profile is stable, and the wave crest is almost the same as the incident wave. However, the wave trough is a bit smaller. This may be caused by the linear wave theory applied to generate wave. To wave run-up problems, the wave crest is a more important parameter than the wave trough. So it can be concluded that the numerical method is practical, and future tests can be implemented.

With the consequence obtained above, a 3D numerical wave tank is set up, which is easily transformed from a 2D tank by widening the width of the tank from one unit length to a larger value. The wave generation test does not show much difference, so a cylinder is added in the wave tank to simulate the wave run-up. A train of periodic waves with the wave height of 4.22 meters is generated, and 12 probes are placed in specific positions according to the model tests performed by Nielsen in 2003. The numerical simulation result shows a good agreement with the model tests, but the maximum wave crest height detected in most probes is a bit smaller than the model test value. If high order incident wave is generated, better results are sure to come out. In addition, the wave force acted on the cylinder is calculated, together with the velocity and pressure field in the vicinity of the cylinder. On account of no model test results of these parameters, they are only listed and analyzed qualitatively. Similar simulation is performed with the wave height set to 7.99 meters. The results are analogical, but the nonlinear effect is bigger as the wave height is larger.

The wave run-up phenomenon is also simulated with several trains of solitary waves with the wave height ranging from 10 meters to 25 meters. As there are no such data from model tests, to obtain authentic results, a series of mesh convergence tests is performed. More specifically, the results of several models with different total cell numbers are compared. If the results remain unchanged when the total cell number is larger than certain amount, it can be summarized that the results is reliable. Two parameters which determine the total cell number are tested to verify their influence on the results. They are the cell number per unit length in the wave height region and the cell number ratio, which have been mentioned in previous paragraphs. The cell ratio seems have greater impact on the results, so it is chosen to vary the total cell number with the cell ratio. The results of different incident wave height are compared in terms of the maximum wave height in the front probe and horizontal wave force acted on the cylinder. Moreover, the comparison among the maximum wave height in several probes placed along the cylinder is also carried out, and a few conclusions are made.

In conclusion, the comparison between the results of both numerical simulation and model tests show the feasibility and reliability of numerical simulation of wave run-up along one cylinder. The results of maximum wave height and wave forces can also be adopted to provide useful guidance for designing a platform.