



波浪与防波堤护面块体相互作用 模拟研究新进展

胡昕¹, 赵颖²

(1. 中交第二航务工程勘察设计院有限公司广州分公司, 广东广州 511442;
2. 中国科学院力学研究所, 北京 100190)

摘要: 通过流固耦合三维数值模型与先进的GPU计算技术相结合, 为模拟分析波浪与防波堤护面块体等水工构筑物的相互作用提供突破性的研究计算手段, 能够克服现有连续介质波浪数学模型的不足, 解决许多目前需要波浪物理模型才能解决的问题。该模型具有边界改变方便、成本低、分析速度快的特点, 能满足多方案设计对科研的要求, 因此在工程领域有广泛的应用前景。

关键词: 流固耦合三维数值模型; 波浪; 防波堤护面块体; 新进展

中图分类号: U 656.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2012)05-0030-04

New development of researches on simulation analysis of interaction between waves and breakwater armor units

HU Xin¹, ZHAO Ying²

(1. Guangzhou Branch, CCCC Second Harbor Consultants Co., Ltd., Guangzhou 511442, China;
2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: The method of fluid-solid coupling three-dimensional numerical model combined with advanced GPU computing technology, provides a breakthrough calculation method for the simulation analysis on the interaction between waves and hydraulic structures, which overcomes the shortcomings of the existing mathematical model for continuous medium, and can solve many problems that used to be solved only by wave physical models. The model mentioned has several advantages such as convenient boundary change, low cost, fast analysis speed, etc., which can meet the scientific requirements for several design schemes, therefore this model has a broad application prospect in engineering fields.

Key words: fluid-solid coupling three-dimensional numerical model; wave; breakwater armor units; new development

随着我国港口大规模建设的持续进行, 目前国内优良岸线已基本开发殆尽。而港口作为交通运输的枢纽、水陆交通的咽喉和国内外贸易的门户, 对沿海社会经济发展起着重要作用。因此, 未来大型港口的建设将越来越多的选址在外海深水区。加上世界范围内的海平面上升、风暴潮的加剧等因素的作用, 将直接导致外海港口建筑物

受到波浪的直接重大威胁。因此深入防波堤(海堤)与波浪的相互作用具有深远的工程意义。本文重点阐述波浪与防波堤护面块体相互作用的研究进展。

1 目前防波堤设计的一般方法^[1-2]

防波堤护面块体属于堆石体结构, 目前研究

收稿日期: 2012-03-09

作者简介: 胡昕(1976—), 男, 高级工程师, 从事港口、交通、物流业咨询研究及规划设计工作。

波浪荷载与堆石体结构相互作用的主要手段有: 现场观测、半经验公式、物理模型实验、数值模拟及不同手段相结合的复合模型。现场观测由于耗资巨大, 观测周期长, 另外也存在观测上的其他困难, 如设备、现场条件、典型现象的捕捉等问题, 一般在设计中很少涉及。

目前, 我国工程设计单位主要依靠JTJ 213—1998《海港水文规范》和JTJ 298—1998《防波堤设计与施工规范》中的经验公式来初步确定斜坡式建筑物上的波浪爬高、斜坡堤顶平均越浪量、斜坡护面单个块体的质量及波浪力等。有时也参照国际上的其它的经验公式, 如Van der Meer公式等。在根据以上经验公式初步确定防波堤断面及护面块体重量后, 主要通过断面物理模型实验(或结合整体物理模型实验)的方法来验证和修正设计参数和设计断面, 从而完成一个常规的设计周期。

但是, 由于波浪对防波堤的作用非常复杂, 现有的经验公式使用起来有很大的局限性, 且彼此之间的计算结果差异也很大, 例如斜坡堤堤顶平均越浪量的经验公式就与实际情况有较大差异, 不规则波越浪实验表明, 在一个波列作用过程中, 防波堤后坡的冲刷性破坏经常由一个大波的越浪水体引起, 而这个单体大波越浪量要远远大于平均越浪量。因此, 只有对越浪量的分布做进一步研究, 即研究单体大波越浪水体越过堤顶的速度和水体厚度, 才能更准确直接的预测越浪流的动力参数; 又例如工程设计中普遍采用的Hudson公式(1958)没有考虑波长和周期的影响, 也造成了经验公式计算结果与实际情况存在差异的状况等。

此外, 虽然物理模型实验能比较真实地反映工程实际, 尤其是流态复杂的工况, 但存在着比尺效应, 具有投资大、周期长、可移植性差、占用场地大、边界条件改变困难、操作复杂等特点, 很难完全适应工程设计初期多方案、多因素、多调整、大范围、短周期的工程总体设计的要求, 因此, 通过数值模拟的方法来快速、方便的对工程总体方案进行快速研究将对更合理的确定工程总体布置方案及设计关键参数具有重大

意义。近几十年来, 随着计算机及计算技术的发展, 数值模拟应用于解决近岸工程实际问题变得越来越现实。

2 波浪与堆石体结构动力耦合数值模型^[3]

2.1 波浪与堆石体结构相互作用的流体模型及数值模拟

目前, 研究波浪与堆石体结构的动力耦合作用, 流体控制方程主要有基于势流理论和基于不可压缩黏性流理论两大类。势流模型没有直接从黏性流体运动的Navier-Stokes(N-S)方程或雷诺方程出发, 黏性或以能量耗散项的形式计入, 或略去不计。而直接用不可压缩黏性流体运动的N-S方程或雷诺方程模拟水波运动, 存在诸如不可压缩流体流动问题的求解、非线性方程求解、快速变化的自由表面处理、破碎波及建筑物后涡流的描述等问题。常用的不可压缩黏性流体运动计算方法有人工压缩法、投影法、流量函数方法和迭代法等。对于自由表面的追踪, 常用的方法有MAC(Marker And Cell)方法、VOF (Volume of Fluid)方法和Level Set方法等。虽然这些方法在不同的问题上都有成功的应用, 但是他们的应用范围都有一定的限制, 例如, MAC法需要较多的存储空间和计算时间来跟踪标记点的运动, 且对不规则边界的适应性差; 而VOF法三维模型仅适合于解决较小流体区域上的波浪-结构相互作用问题; Level set方法通常用于求解两相流问题, 由于需要同时求解两相流动问题, 在仅仅需要知道水体的流动问题时, 却也增加了求解气相的计算。

由于传统欧拉描述的N-S方程或雷诺方程的求解具有以上困难, 目前, 基于拉格朗日描述的颗粒方法开始得到应用。这种方法首先由Gingold和Monaghan在解决天体物理学的流体力学问题时, 以光滑粒子流体动力学(SPH)方法提出。此后, 一系列解决结构和流体力学问题的无网格方法被发展起来。颗粒有限元方法(PFEM)将拉格朗日方法与特殊形式有限元法相结合, 集合了颗粒(无网格)技术和有限元法的优点, 将流体域和固体域中的每个网格点看作颗粒, 这些颗粒可以自由移动并且可以和整体流域分离, 例如水

滴的效果。对工程应用领域而言, PFEM 方法具有以下优点:

1) 以模拟波浪破碎状态下的运行轨迹及对块体失稳状态进行描述。

PFEM 是基于节点的, 也就是说单元网格主要用于获得节点上的状态变量(如速度, 压力等)。可以确定流体的自由边界和运动到流体域外的单个颗粒的自由边界。这就使得该方法在波浪破碎和流体飞溅问题中追踪流体表面大位移颗粒具有很大优势。

2) 可以模拟破碎状态下的波浪与运动中的块体间的相互作用。

关于流体和固体相互作用问题, PFEM方法可以解决流体和快速移动的固体域接触面信息的转化, 流体域中固体的较大运动, 以及流体域和固体域的网格修订等难题。目前, PFEM 方法已应用于船舶水动力学问题模拟、体积成形过程模拟、储液容器等诸多流固耦合相互作用问题研究。

此外, 由于非线性水波和结构物相互作用时, 结构物附近波面不均匀变形很大, 产生的破碎波及结构物后面的涡系发展也很复杂, 模拟这一现象必须要求高分辨率格式, 这就要求使用快速计算方法和高性能并行计算机。近些年来, GPU (Graphics Processing Units, 图形处理器) 技术飞速发展, 现代GPU 可以提供比标准CPU 大几十倍的内存带宽和计算性能, 这就使得通过数值模拟的方法解决上述问题成为可能。

2.2 波浪与堆石体结构相互作用的固体模型及数值模拟

研究波浪与堆石体结构的动力耦合作用, 固体控制方程主要有固体动力学运动方程和弹性动力学方程。固体动力学模型只能描述块体在波浪荷载作用下的滑移和转动, 即刚体运动; 而护面块体属于脆性材料, 初始作为不含任何裂隙或损伤的完整结构, 在大应力状态或大荷载作用下, 除了滑移和转动外, 块体自身变形不容忽视。在这种情况下, 需要采用弹性动力学模型研究块体的滑移、转动、变形和破坏。

堆石体结构这类多孔隙离散介质存在的上述特性, 要求数值计算模型既能够处理块体的有限位移、有限转动(相对于小位移、小转动而言)等问题, 又能计算块体的变形(或破坏)与应力。但目前适用于连续介质的数值方法如有限差分法、有限元法、边界元法、无网格法等, 在模拟堆石体结构力学行为方面存在诸多限制, 包括接触关系的变更, 块体的相互碰撞、分离及旋转, 大量非连续界面的模拟, 仿真计算等, 因此很难模拟出由具有一定尺度的块体构成的堆石体结构的局部块体失稳和整体失稳过程。因此, 有限元、边界元等方法只能给出堆石体结构的宏观解, 无法分析结构中具体块体的情况。近几十年来, 针对于堆石体结构这类非连续介质的数值分析方法得到了发展。除早期的刚体极限平衡法外, 块体理论(Block Theory), 不连续变形分析方法(DDA)、流形元法(Manifold Method)、离散单元法(DEM)等都是对堆石体结构进行分析的方法。

防波堤护面块体(大块石或人工异型块体)属于脆性材料, 在冲击、侵彻等动载荷作用下产生的损伤和破坏, 其实质是力学模型从连续体到非连续体的转变过程。上述方法均存在不同程度的缺点, 而中国科学院力学研究所李世海等提出的基于连续介质的离散元方法(CDEM)将有限元与离散元进行耦合, 在块体内部进行有限元计算, 在块体边界进行离散元计算。在三维不规则、可变形块体离散元模型中引入一种基于块体细化的界面裂纹扩展方法, 使得裂纹可以穿过初始网格, 从而消除破坏位置对划分单元依赖性问题, 实现岩石材料的脆性破裂过程模拟。此外, CDEM 方法的GPU化, 将计算速度提升了两个数量级, 计算规模提升了一个数量级。

总之, 为了更好地描述防波堤护面块体这类脆性材料的失效(滑移、转动、变形和破坏)机理, 发展引入脆性破坏准则、块体破裂模型、以单个块体为研究对象的三维可变形块体离散元方法是研究堆石防波堤、堆石护岸和堆石基床结构这类堆石体结构稳定性问题的必要手段。

2.3 波浪与堆石体结构相互作用的耦合模型及数值模拟

目前的波浪与堆石体结构动力耦合模型多基于上述流体模型和固体模型的组合,其流体部分和固体部分的数值计算方法也依据上述模型对应的计算方法。而流固耦合模型中的流固界面处理方法可依据所采用的流固耦合模型类型的不同大致分为两类:

1) 对于流体采用欧拉描述、固体采用拉格朗日描述的流固耦合模型,流体欧拉网格与固体拉格朗日网格的流固界面处理方法主要有切割单元法(Cut Cell Method)和浸入边界法(Immersed Boundary Method)。

2) 对于流体和固体都采用拉格朗日描述的流固耦合模型,例如,PFEM的流固耦合模型就是采用拉格朗日描述的黏流模型N-S方程作为波浪的数值模型,采用固体动力学模型作为固体控制方程。流体和固体计算模型均采用拉格朗日网格,将流体域和固体域中的每个网格点看作颗粒,这些颗粒可以自由的移动并且可以和整体流域分离,单元网格主要用于获得节点上的状态变量(如速度、压力等)。利用Alpha Shape技术确定流体的自由边界和运动到流体域外的单个颗粒的自由边界,可在波浪破碎和流体飞溅问题中有效追踪流体表面大位移颗粒,解决流体和快速移动的固体域接触面信息的转化,流体域中固体(刚体)的较大运动,以及流体域和固体域的网格修订等难题。

综上所述,采用PFEM法的流固耦合模型来描述波浪与防波堤之间的相互作用,利用快速计算方法和高性能并行计算机,实现数值波浪水槽大的计算域和人工异型块体高分辨率所要求的高效计算是解决未来波浪与堆石体结构相互作用的研究发展方向。

3 结论及展望

综上所述,目前工程设计领域主要依赖于经验公式和物理模型实验验证相结合的方式进行波浪作用下的水工建构物设计。但目前普遍

采用的经验计算公式仍存在一定的缺陷,同时物理模型实验也存在着投资大、周期长、可移植性差、占用场地大、边界条件改变困难、操作复杂等特点,很难完全适应工程设计初期多方案、多因素、多调整、大范围、短周期的工程总体设计的要求。为此,采用更加有效的三维数值模拟手段来进行工程前期的总体布局研究及主要设计参数的确定就更加必要和迫切了。

现行的波浪整体数学模型试验只能模拟波浪不破碎情况下的波浪传播、折射、绕射、反射运动,无法模拟发生破碎后的波浪与防波堤(堤岸)、堤后水域的相互作用过程;现行的描述堆石体结构的固体模型也无法模拟块体在波浪荷载作用下的变形和破坏,而这些又是实际相互作用不可避免的重要方面。因此,现有流固耦合数值模型尚无法真实模拟堆石体结构与波浪动力耦合作用的重要特点。

为此,从科学研究与工程应用相结合的角度出发,中国科学院力学研究所与中交二航院有限公司(广州分公司)共同开展了直接用不可压缩黏性流体运动的N-S方程模拟水波运动,用弹性动力学模型模拟堆石体结构的动力响应,将颗粒有限元方法和引入块体破裂模型的可变形离散元方法相结合,利用GPU并行技术,进行考虑波浪破碎和块体变形破坏的堆石体结构与流体动力耦合研究。

这一研究将解决数值模拟破碎波与堆石体结构相互作用的瓶颈,能通过数值计算的方式解决目前需物理模型实验才能解决的工程问题,从而缩短研究周期,适应工程总体设计中多方案、多因素调整的要求,为工程设计的精细性与准确性提供可靠支撑。

参考文献:

- [1] JTJ 213—1998 海港水文规范[S].
- [2] JTJ 298—1998 防波堤设计与施工规范[S].
- [3] 赵颖,李世海,刘晓宇,等.波浪与非连续介质相互作用研究进展[R].北京:中国科学院力学研究所,2011.

(本文编辑 郭雪珍)