

相位解析有旋数值模拟在近海近岸非静压海浪荷载计算和风险分布评估上的应用

张尧,陈新平,石先武,王宇星,国志兴,林雨霏,石晓勇,谭骏,刘钦政

(国家海洋局海洋减灾中心 北京 100194)

摘要:区域尺度精细化水动力数值模拟是解决大量工程、地质、环境等问题的重要手段。水动力荷载的直接冲击是近海近岸结构物、设施破坏的主要动力因素。本文章旨在介绍 Boussinesq-Green-Naghdi 有旋非静压水动力模型及其在区域尺度灾害性海浪的非静压水动力荷载分析和风险分布评价上的应用。这套模型利用了 Boussinesq 量纲和 Green-Naghdi 加权积分的结构。速度和压力被用多项式假设来表达和非线性重排法的应用,有效地提高了模型性能,避免了无旋假设的使用,更好地模拟计算了右旋流速和非静态压力场等复杂水动力参数。模拟重现美国和菲律宾沿海台风浪过程,深入分析非静压海浪荷载作用机理,计算海浪荷载的时空分布,与巨石迁移和结构物损坏的调查数据进行对比验证,构建海浪荷载与区域结构物破坏程度分布的相关性,量化各项影响要素如流速、浪高、结构物特征等的风险权重,通过回归分析法推导基于多影响要素的区域海浪风险参数化定量评价方法。为非静压相位解析有旋水动力理论和海浪灾害机理的科学探索提供原创性基础。为沿海人类活动、区域规划、工程设计、防灾减灾等提供科学指导。

关键词:相位解析;近海近岸;海浪荷载;风险分布

中图分类号:TV139.2

文献标志码:A

文章编号:1005-9857(2016)S2-0079-10

Nonhydrostatic Simulation and Risk Assessment for Nearshore Hydrodynamics Using Phase-Resolving Rotational Model

ZHANG Yao, CHEN Xinping, SHI Xianwu, WANG Yuxing, GUO Zhixing,
LIN Yufei, SHI Xiaoyong, TAN Jun, LIU Qinzheng

(National Marine Hazard Mitigation Service, State Oceanic Administration, Beijing, 100194, China)

Abstract: The nearshore wave is a dominant hydrodynamic impact for engineering, geophysics and environmental problems. Nonhydrostatic impact could be a major factor for the failure of coastal structures during extreme marine events. This paper introduced, tested and applied Boussinesq-Green-Naghdi rotational hydrodynamic model to regional-scale assessment of the non-hydrostatic wave load and risk assessment in near-coast areas during extreme marine events. It also simulated selected study areas in United States and Philippines devastated by hurricane storms with detailed

flow thickness, orbital velocities, and wave forces computed. The boulder transport was found initiated by the infragravity swash bore. The intermittent loading of boulders onshore by swash bores has direct implications for loading on manmade structures, which might locate in similar regions and will experience similar forces. The non-hydrostatic wave load and the house damage state distribution are correlated with a proportional expectation. The weight analysis of velocities, wave heights and relative shielding were carried out. The regional-scale assessment method of the wave risk were derived and parameterized based on this study. The research would contribute significantly to the further exploration of the rotational phase-resolving hydrodynamics theory and the wave disaster mechanism. The assessment method would be useful to engineers and planners to design coastal communities that will withstand future marine hazards.

Key words: Non hydrostatic, Wave Loads, Phase-resolving

1 引言

随着我国海洋战略的推进,海洋经济的发展,越来越多的人口、工业、商业、生活社区向沿海地区转移增加。近岸的波浪、海流作用对海岸海洋工程、船舶航行、港口防波堤、水产养殖设施、能源设施、旅游休闲等人类活动造成长期持续的影响。尤其在极端海洋环境下形成的海浪灾害(如台风浪、涌浪、海啸、冷空气浪和气旋浪等)威胁近海近岸人们的生命财产安全。我国是海洋灾害多发国家,每年大量的热带气旋形成的强台风会登陆我国东南沿海地区,造成巨大海洋灾害损失。据《2015 年中国海洋灾害公报》^[1]统计,2013—2015 年我国海洋灾害造成的直接经济损失累计达到 371 亿元,累计造成 178 人死亡(含失踪人数)。不同于风暴增水和淹没等渐进式灾害过程,灾害性海浪的直接拍打对于沿海结构物、设施和生命财产安全是最不稳定和最具破坏性的冲击。灾害性海浪是造成死亡人数最多、船只倾覆损坏最多、近海近岸结构物破坏最多的海洋动力灾害。我国有 70% 的海岸线由海堤保护,但在每次海洋灾害过程仍然受到不同程度的冲毁;电厂和核电设施也大量分布在东南沿海,长期存在受到灾害性海浪冲击而损坏的风险;近岸的港口码头船舶设施以及房屋结构物都容易遭到海浪的拍打破坏。因此灾害性海浪的冲击荷载分析和定量风险评估不仅是世界前沿的海洋动力和海洋灾害机理的科研热点,也是社会防灾减灾的迫切需求。

国内外对灾害性海浪风险分析研究最初始于海上能源开发平台的安全以及航行安全需要。之后随着大量的研究工作和研究资金的投入,海浪的科学研究取得了飞速的发展。随着现在高性能计算机的发展,数值模型逐渐发展为一项成熟高效的预判、分析灾害性海浪的方法。目前海浪动力模型根据计算速度和精确度可大致分为 3 类,也有着不同的应用范围。①全三维 Navier-Stokes solver 模型(Openfoam CDF 类)适用于小尺度模拟,有极高的精确度和计算成本;②相位平均(phase-averaged)的大尺度线性海浪模型,近似度最低但计算速度快,有着很大应用范围(比如整个东海、南海);③相位解析(phase-resolving)中尺度模型是介于两者之间,有良好的精确度和合理的计算速度,适用于中尺度模拟(几十千米)波浪海流等所有水动力现象。然而大尺度数值模型通常精度较低、网格较大、无非线性特征和忽略辐射应力,无法在人类活动密集区域的中尺度进行精细化模拟,更多地应用在大尺度海洋模拟。小尺度模型的计算范围小,计算成本非常高,因此限制了其在更大范围沿海区域的应用。

在过去的半个世纪,由于人类活动密集的近海区域能源开发的发展和工程航行安全的需要,近岸中尺度相位解析类模型发展迅速。由于其优良的计算速度和精度,应用非常广泛。相位解析类模型有非常多的版本,大致分为 Boussinesq 和 Green-Naghdi 两类。具有代表性的有 DHI 公司的商业软

件 MIKE 和美国特拉华大学的学术开放代码 FUN-WAVE。他们都采用了非线性渐进重排法改进了非线性弥散参数特性,使得计算精度进一步向深水扩大,可计算波浪,近岸流速,非静态水压等海水动力现象。加上波浪破碎模型和使用高阶近似迭代,使得此类模型在工程和环境问题上发挥了非常巨大的作用^[2-6]。

可是在相位解析模型的发展过程中遇到了 3 个瓶颈:①现存的几乎所有的模型都完全或部分地采用了无旋假设,即在数学推导上假设水流是无旋的。虽然这一假设很好地帮助完善了模型的基础理论,并且适用于比较深的海域,可是当逐渐逼近近岸时,波浪开始破碎,紊流出现,无旋假设就完全违背了自然现象,并且严重影响对有旋流的模拟和计算精度,尤其是速度场垂直结构的计算。一些研究者试图强制增加有旋项或公式来部分弥补这一不足,可是这种方式也无法自然地有旋模拟,无旋假设依然存在模型中。②经典的 Boussinesq 理论里的泰勒展开速度场表达式,随着水深增加而无法收敛。③在静态压力理论的基础上推导非静态压力项的修正,这些修正项数量都随着近似阶度的提高而增多,使得模型公式结构变得异常复杂,这也是制约相位解析模型近似精度和计算效率的主要原因,如果无法到达高阶精度,非静态压力场的计算将无法达到预期的准确程度,进而影响各项参数的计算如速度和水面变化的计算。为了突破这 3 个瓶颈大多数研究者试图在模型公式的近似方法上进行优化,或者采用数学方法对速度压力进行多项式近似表达,可是这些尝试要么效果有限要么计算成本极高。

除此之外,对灾害性海浪的研究和模拟分析多集中在灾害过程本身以及其对地质环境造成的影响,也就是水动力现象本身和其强度,包括灾害过程的模拟和分析包括淹没范围,淹没水深、有效波高等区域水动力参数;或是集中于一些工程问题的解决如沿海港口码头设施、结构物的波浪荷载分析,这些大多基于直接简捷的静压经验公式,会导致评估结果严重低估。少有研究将数值模拟分析和实地灾害调查数据相结合,将水动力的破坏强度

进一步与区域结构物的破坏程度相联系,给出基于各动力参数和结构特征的区域海浪风险的量化评价方法。

2 模型理论及测试

数学模型公式系统是在无量纲化基础上进行推衍。基于 Boussinesq 的无量纲化变量定义如下:

$$\begin{aligned}(x, y) &= k_0 (x^*, y^*), z = h_0^{-1} z^*, \\ t &= k_0 (g_0 h_0)^{\frac{1}{2}} t^*, h = h_0^{-1} h^*, \\ \eta &= h_0^{-1} \eta^*, P = (\rho^* g_0 h_0)^{-1} P^*, \\ g &= g_0^{-1} g^*, (u, v) = (g_0 h_0)^{\frac{1}{2}} (u^*, v^*), \\ \omega &= (k_0 h_0)^{-1} (g_0 h_0)^{-1/2} \omega^*, \\ v_t &= h_0^{-1} (g_0 h_0)^{-1/2} (k_0 h_0)^{-1} v_t^*. \quad (1)\end{aligned}$$

式中:上标 * 表示量纲化变量和参数; g^* 是重力加速度; v_t 为涡旋黏性; $X \equiv (x^*, y^*)$ 表示水平和竖直坐标;时间变量 t 被长波浪波速 $(g_0 h_0)^{1/2}$ 和波数 k_0 所量化; η 和 h 分别为水表面高度和水深;压力 P 在无量纲化时暂时被静压化处理。水平和数值速度量纲取自于波浪理论里的轨道速度。这套无量纲化参数可被应用于强非线性波浪,是典型的 Boussinesq 量纲系统。

质量守恒方程和基于动量守恒的 Navier-Stokes 方程会被应用在描述水体的运动上。不同与机械流体力学考虑了介质的可压缩性,质量守恒方程通常会被简化为连续方程应用在海洋水体动力理论上。处理和求解这套公式系统,大致分为 3 种方式:第一种全三维直接求解,对数学公式本身不做过多推导演变处理,而在数值解析方法上进行探索和研究,在全三维坐标下的网格中进行精细化计算,每个动力要素(u 、 v 、 ω 、 P)都是基于 x 、 y 、 z 、 t 这 4 个变量,通过增加水面和空气临界面的追踪方程和表面张力方程,来精确模拟计算小尺度范围内的流体力学现象,但计算成本极高,应用范围有限。第二种是垂向竖直平均解法,将有竖直变化结构的速度未知量直接用垂向平均值代替,这样简化的数学平均法处理会使竖直方向坐标被直接消除,大大降低计算成本,提高计算速度。但求解出来的是平均流速,对于速度竖直方向变化不大的海流或者波长较长的潮来说,应用较好。但如果是紊流、非线性波浪变形、破碎等速度竖直变化较大的动力现

象,这类方程计算结果误差较大。第三种就是本次研究采用的方法,相位解析方法。这类方法大多是通过对这 4 个守恒公式本身的数学推导变形,在竖直积分的基础上消除垂向坐标求解的同时,具有竖直结构的未知量(u 、 v 、 w 、 P)会采用泰勒展开或者多项式修正的表达式,其中每个单项都由坐标分离的水平系数和竖直基础方程组成,利用非线性渐进重排法选择系统最优线性特性所对应的基础方程。在二维系统求解完成之后,将求解后的水平系数代入多项式,还原解析三维未知量。采用泰勒展开方式的多为传统 Boussinesq 类相位解析模型;用多项式展开的多为 Green-Naghdi 类相位解析模型。Boussinesq 类模型遇到的问题是无旋假设在公式处理和推导中的应用严重地违背了自然水体的有旋流现象;Green-Naghdi 类模型虽然没有采用无旋假设,但其复杂的非静态压力的修正表达式,极大地增加了其高阶模型的推导难度和计算成本。

本项研究将采用 Boussinesq-Green-Naghdi 的模型,模型数学理论运用了 Boussinesq 的缩放量纲和 Green-Naghdi 的模型公式结构,巧妙去除了无旋假设和保持了 Boussinesq 的计算速度。速度表达式采用多项式展,多项式项数被保留至相应的近似阶度。每一项都采用了水平和竖直坐标分离,由水平速度参数 u_n 和竖直基础方程 $f_n(q)$ 构成, q 是竖直变量,取代了 z (2)。水平参数之间相互独立,这是有旋流系统的理论基础所在。把水平速度代入连续方程,应用边界条件,可以得出竖直速度的表达式。

$$u = \sum_{n=0}^N \mu^{\beta_n} u_n f_n(q)$$

$$q = \frac{z + h(x, y)}{\eta(x, y, t) + h(x, y)} \quad (2)$$

$$P = \mu^2 \int_z^\eta \frac{\partial w}{\partial t} dz + \mu^2 \int_z^\eta u \cdot \nabla w dz + \mu^2 \int_z^\eta w \frac{\partial w}{\partial z} dz + g(\eta - z) \quad (3)$$

所有系统方程将依然按照 Green-Naghdi 的权重积分结构,多次加权基础方程积分。基础方程

$$f_n = \sum_{m=0}^n a_{nm} q^n, a_{nm} \text{ 可以是任何实数, } m \text{ 取决于近似}$$

阶度。选取不同的 a_{nm} 会导致不同模型性能。因此,非线性重排法的应用可以最优化参数的选择。

$$\int_h^\eta f_m \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u + w \frac{\partial u}{\partial z} + \nabla P \right) dz = 0$$

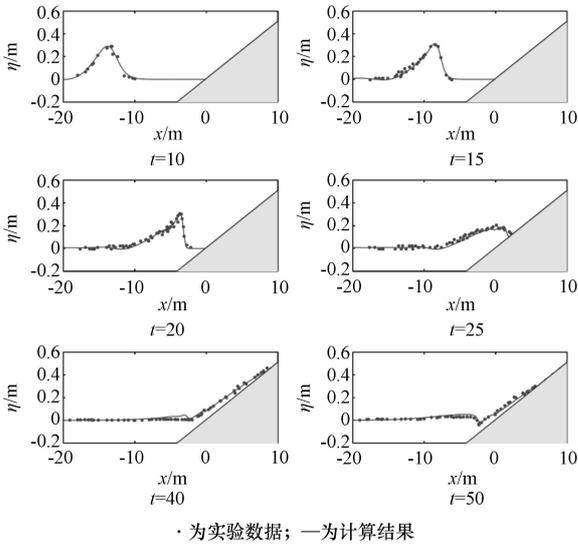
$$(m = 1, \dots, N) \quad (4)$$

必须指出的是,相位解析模型假设了水面一空气和水底一海底的单一交界面。这种假设在大部分海水动力现象上的应用是合理的,但如果遇到波浪破碎的多空气一水的交界面情况时或多气泡状态时,计算精确度就会受到一定限制。所以这套模型一定在高阶近似的某一个阶度,提高近似阶度不再能够带来更精确的计算结果。所以中高近似阶度可能会是取得计算效率和计算精度的平衡的最优选择。而提高同阶度的计算速度恰恰是本项研究的一大基础理论突破。

这里展示两个基础的模型验证测试。二维和三维的测试模拟了海浪、海啸在不同水深地形上的传播、变形、浅变、反射、折射、破碎、爬升等非线性动力现象。模型计算结果与物理实验数据进行比较验证。模型采用四阶近似精度,造波方法采用二阶精度,波浪破碎紊流模型采用基于 TKE 公式 $k-1$ 模型。

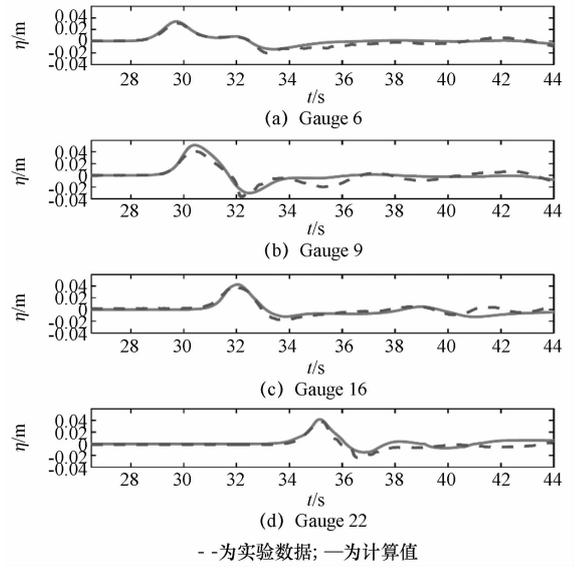
图 1 展示了海啸(固力波)传播变形、破碎和爬升的 6 个瞬间。海滩的坡度为 1/19.85。初始波高水深比 $H/h=0.2$ 。计算水面高度变化和实验测得数据进行对比。图 2(a)至图 2(c)展示了波浪逐渐变形为非对称形状随之开始破碎。图 2(d)、图 2(e),海浪爬高上岸到最高位置。图 2(f)中,水回流形成冲刷涡。计算结果很好地捕捉到了整个过程。

三维的验证采用经典的海啸波对椎体海岛的冲击。整个过程伴随着破碎、绕射、波生流和背坡爬升等动力现象。在海岛模型周围不同的位置测得水面随时间的变化数据。模拟计算结果被对照比较。图 2 为实验基本设置: $H/h=0.2$ 的固力波在 0.32 m 深的水里从左向右沿着 x 轴传播。海啸波冲击并绕过海岛,分别在海岛正面和背面产生爬高。圆锥面的坡度为 1:4。在海岛前、侧和后方向分布 4 个测量点,收集水面高度变化。图 3 描述了在这 4 个点的计算结果和实验数据的对比。波峰、



· 为实验数据; — 为计算结果

图1 海啸爬升岸滩



- - 为实验数据; — 为计算值

图3 在4个测量点的水位随时间变化

亚重力波谷和非线性高阶波调都被模拟的较为准确。图4描述了海啸冲过小岛数值模拟的6个瞬间。由于波高水深比较大,准确地模拟计算难度较大。

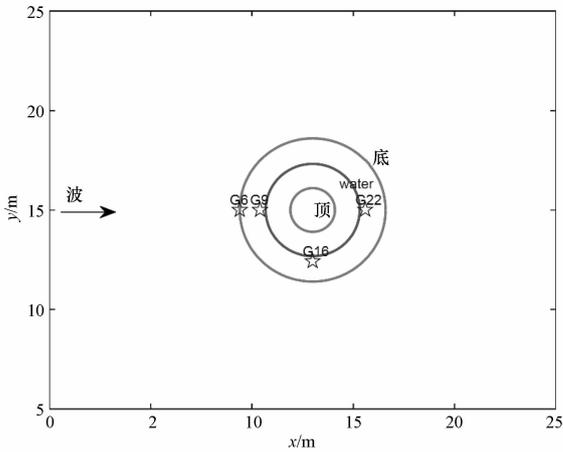


图2 海啸冲击圆锥状小岛试验

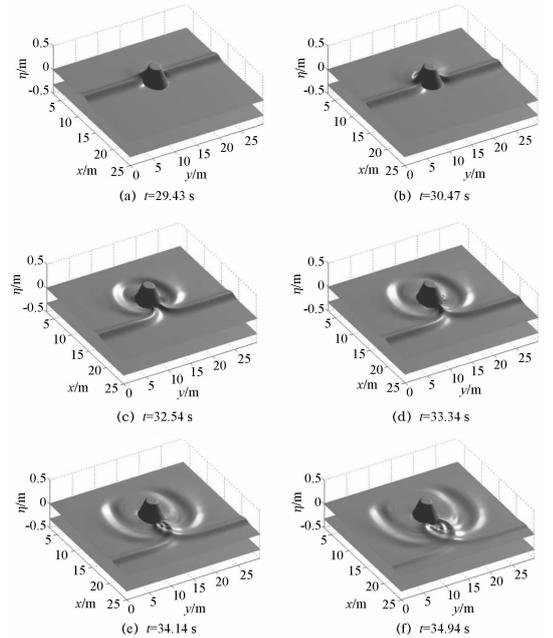


图4 海啸波冲击、爬升海岛过程的6个瞬间

3 模型应用

我们尝试将有旋 Boussinesq-Green-Naghdi 模型应用在美国新泽西海岸在飓风 Sandy 期间的房屋破坏评估和菲律宾东海岸在台风海燕期间的巨石向岸迁移问题,进一步分析水动力荷载的强度与危险性。把 SWAN+ADCIRC 后报和模拟的风暴潮环境条件作为初始水文条件,构建 JONSWAP 波浪谱下的台风浪条件,进行区域尺度水动力过程

模拟,计算浪高、流速等水动力基础要素,与巨石迁移距离、结构物破坏的调查数据对比验证,构建区域水动力荷载与承灾体响应程度的相关性,量化各影响要素如流速、浪高、结构物特征等的风险权重,为建立基于多影响要素的水动力风险参数化定量评价方法提供分析基础。

台风海燕期间数以百计的、质量最大可以达到

30 t 的巨石,被近岸海浪和海流搬运至高程可达 9 m、离海距离可达 180 m 的陆地上。应用 Boussinesq-Green-Naghdi 数值模拟后报的结果显示巨石迁移是在亚重力冲刷涡旋处(前一个波浪破碎后爬升冲刷岸滩的白色水面区域与紧接着的后一个即将破碎的海浪波峰之间的过度区域)被触发的。数据表明,巨石迁移的距离跟台风浪的浪高高度相关。所以关注巨石在陆地上最终的位置是有效粗略评估古风暴潮强度的方法。

研究区域位于菲律宾东海岸的 Samar Island 的东南角(图 5),超过 12 m 向岸爬升高度的巨浪被观测到过。美国土木工程协会和日本土木工程协会于 2014 年初开展了对本地区台风海燕过后的实地灾后调查。在此期间发现了大量的巨石块体散落于海滩上。这些石块的位置在地图上被标出,相对于海岸线的距离也相应被测量记录。这为一个研究巨石在极端海洋环境下的迁移提供了一个很好的机会。可以将水动力要素和巨石迁移过程进行相关性分析。模拟分为 3 步:①根据后报推算水动力条件;②模拟冲刷区的水动力过程;③利用计算出的水动力要素推算巨石受力并驱动其向岸运动。

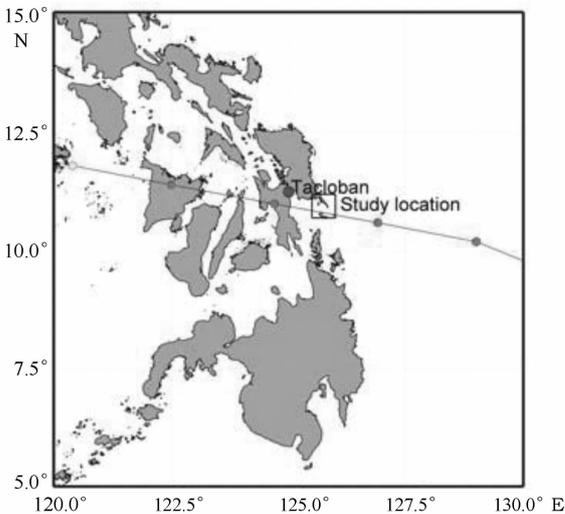


图 5 台风海燕路径及研究区域

台风海燕的初始水文条件后报推算在 Kennedy 2016 年的文章中被详细介绍。研究区域的 Boussinesq 海浪模拟采用了 JOWNSWAP 波谱频率分布。巨石受力迁移模型来自于 Imamura 等。5 种巨

石的直径被模拟,分别为 $D=0.5\text{ m}, 1\text{ m}, 2\text{ m}, 3\text{ m}, 4\text{ m}$ 。虽然从现场看所有巨石的初始海底位置会不同,但我们在数值模拟中假设这几种直径的石块都从 $X=-25\text{ m}$ 的地方开始运动。图 6 描述了所有收集到的巨石迁移最终停止的位置。测量和模拟的结果吻合,小的石块迁移得最远。不同浪高的模拟结果也显示了巨石停止位置对于浪高的敏感性。在对模拟数据的分析中发现,巨石的每次移动都是发生在其遭遇亚重力冲刷涡旋时的速度的不对称。惯性力并没有很多研究中描述的那么不重要,惯性力和黏滞拖拽力的比值, $FiRMS/FdRMS = [0.15, 0.22, 0.36, 0.52, 0.58]$ 。惯性力重要程度随着巨石直径的增加而增加。

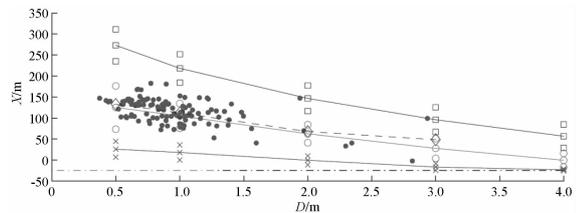


图 6 巨石迁移最终散落位置

2012 年飓风 Sandy 冲击了美国大西洋沿岸的大片地区,导致了大量的基础设施损毁,电力、交通中断,286 人死亡,共计经济损失约为 680 亿美元。圣母大学和普林斯顿大学共同开展了一次对美国新泽西西海岸 Staten Island、Long Island 在飓风 Sandy 期间的海岸结构物损毁情况调查;这次灾害调查详细收集了这个地区沿岸结构物房屋等承灾体的损坏情况和具体位置、高程、结构特征、实地照片等信息。整理分析数据资料和照片,对结构物破坏程度进行标准化分级。因为对破坏标准的界定会因人而异,为了最大限度地减少人为评估差别, Friedland 的评估方法被修改并应用到这些区域的结构物破坏等级分级上。经修改后的破坏程度分为 0~6 级,0 代表基本无破坏,6 代表完全损毁、结构物冲垮消失。分级方法和步骤为:①先按照结构物各个部位分别评估破坏程度等级;②再总体评价结构物破坏程度。拿房屋破坏举个例子,如果房顶瓦片缺失 2%,破坏等级 $DS=1$;墙壁粉刷层缺失 15%,破坏等级 $DS=2$;地基冲刷移位 30 cm,破坏

等级 $DS=3$; 窗户损坏, 破坏等级 $DS=2$; 因此整体的破坏等级取最高值 $DS=3$ 。由于安全原因, 有时调查者被禁止进入结构物内部进行拍照调查, 所以有少量的结构物内部破坏程度没有被考虑到整体破坏分级里。

在多项研究中表明, 海浪荷载是结构物损坏或幸存与否的重要指标。我们将采用波浪力 (wave-force potential) 来计算荷载: $F_{\text{wave}}=u^2(h+\eta)$ 。提取各个被破坏结构物位置所计算出的浪高、流速、荷载等水动力参数情况和所在位置的高程、房屋结构特征进行初步的对照分析, 找出相关性。平均流速、平均水深、最大流速、最大水深会被分别提取分析, 尤其是那些平均水动力条件和结构特征差不多但破坏程度差异较大的结构物, 最大流速和水深随时间变化将需要被仔细分析。

图 7 描述了房屋破坏等级随水动力要素和房屋特征的变化。破坏等级随着流速、水深、非静压水动力荷载、波浪力的增加而加剧; 随着 freeboard 的增加而减轻。

4 风险评价方法

利用基于多水动力要素多种回归分析法 (Backwards Multiple Regression), 构建水动力荷载和结构物破坏风险的定量关系。各项影响要素的前 1% 的极高值将被考虑, 回归分析法中潜在的预测因素包括: 结构物包围防护参数、结构物年龄、流速、水深、浪高、非静压荷载。二阶的非线性组合因素也将被考虑, 例如, 流速 \times 波浪力荷载等, 但流速、水深与波浪力不再重复相乘, 因为波浪力本身已经考虑了流速等要素。量化各项影响要素 (如流速、浪高、海浪荷载、结构物特征等) 的风险权重, 推导基于各项影响要素的区域海浪风险参数化定量评价

$$DS = \begin{cases} -0.783(h+\eta) - 0.558SP \tanh(0.22u_{\max}) + 6.04 \tanh^2(0.22u_{\max}) - 0.897f_b \tanh(0.22u_{\max}), & u_{\max} \geq 6.11 \text{ m/s} \\ -0.558SP \tanh(0.22u_{\max}) + 6.04 \tanh^2(0.22u_{\max}) - 0.897 \tanh(0.22u_{\max})(f_b + h + \eta), & u_{\max} < 6.11 \text{ m/s} \end{cases} \quad (5)$$

在以上公式相对残差方差值为 $RY^2=0.357$ 。图 8 描述了选择不同周围防护系数和不同水深的房屋破坏等级脆弱性随流速的变化。破坏等级随着房屋周围防护的增强而急剧下降, 随着水动力荷载的增加而平稳加剧。而对于水深的变化的敏感性

数学公式、方法。相对残差方差值 RY^2 被用来检查所推导出的风险评价方法的准确性, 越接近于零, 相对越准确。

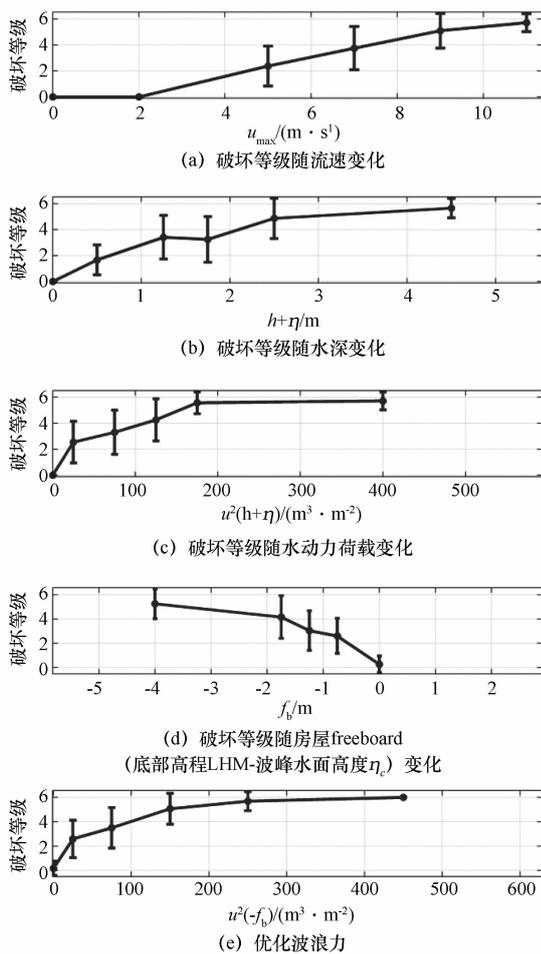


图 7 破坏等级随水动力要素和房屋特征的变化

运用多种回归分析法推导出基于新泽西海岸区域的房屋破坏等级评估脆弱性数学模型, 破坏等级 DS 的推算基于: $(h+\eta)_{\max}$ [m], fb [m], u_{\max} [m/s], and 灾后房屋周围防护系数 SP :

较低, 水深从 1~3 m 导致的脆弱性曲线变化很小。因此, 最重要的统计变量为 $\tanh(0.22u_{\max}) \times (SP)$ 和 $\tanh^2(0.22u_{\max})$ 。相对而言, $(h+\eta)_{\max}$ 和 f_b 对房屋破坏定量预测的影响没有那么多。

将方程(5)进一步简化为一个值包含 u_{\max} 和 SP

的简化公式,其 $RY^2=0.385$,比起式(5)略微偏高。

$$DS = -0.588 \tanh(0.19u_{\max}) SP + 6.55 \tanh^2(0.19u_{\max}), 0 \leq DS \leq 6 \quad (6)$$

图 9 描述了运用这个公式所预测的房屋破坏情况与实地收集到的资料数据进行对比验证。 $SP=0$ 时的房屋破坏等级如果为 6 的话,当其周围防护系数提高到 $SP=3$ 时,破坏等级会降为 4.5, $DS=4.5$ 意味着房屋还是存在被修理好的可能。进一步说明当房屋、结构物周围如果防护、阻挡物体较多时,更多的水动力能量在其漫滩传播时被较多的耗散,危险性进一步降低。因此水泥墩柱、墙体如果被布置在房屋周围将极大有助于减轻海洋灾害的破坏性。 $SP=0$ 时预测结果与调查数据较为吻合,而越大的 SP 值的情况下,实际破坏程度分布的越分散。说明水流、波浪的模拟精确度在房屋密度较高的区域并没有那么准确。在水动力模拟时,进一步将房屋结构特征考虑作为地形可能会大大提高式(5)和式(6)的模拟准确性。因为风速没有被考虑进房屋破坏脆弱性公式,所以由于风导致的破坏在这套方法公式的预测结果中无法被反映,因此在由于高强度的风导致的房屋破坏情况下,不可以运用此公式。

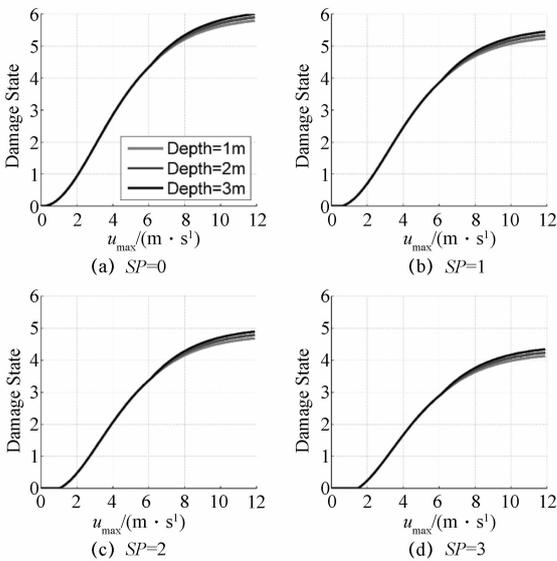


图 8 式(5)对房屋破坏脆弱性的预测

(房屋迎水底部高度被假设为高于地表 0.5 m)

5 总结

文章简要介绍了 Boussinesq-Green-Naghdi 有

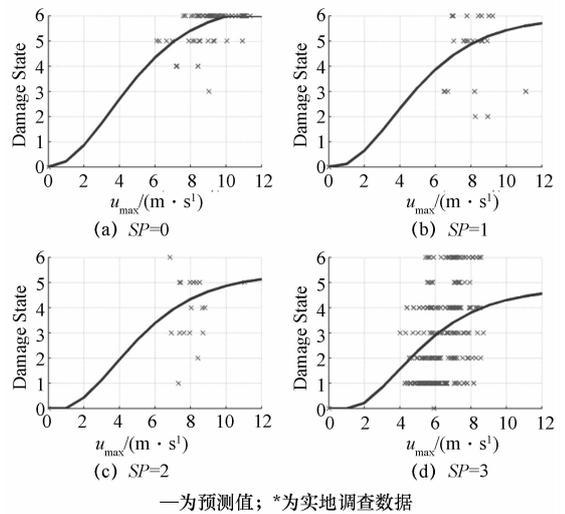


图 9 简化后的公式(6)对破坏等级的预测和实地调查数据的对比

相位解析有旋水动力模型。模型保留了 Boussinesq 类别的近似量纲和 Green-Naghdi 的加权积分的结构。有效地避免了无旋假设在速度表达式推导过程中的采用,提高了紊流、有旋流等复杂动力现象的模拟精度。两个验证案例很好地测试了模型对海浪、海啸的模拟计算性能。尤其在大浪高、强波浪破碎的情况下,对非线性水面的捕捉。但单一水面-空气交界的假设会使相位解析类模型的计算精度在遇到海浪破碎和气泡的多界面情况时受到了一定的限制。

模型很好地被应用在巨石迁移过程的水动力荷载分析和海浪灾害对海岸房屋冲击破坏的风险分析。台风海燕期间在菲律宾东海岸,巨石迁移最远至岸上距海岸线近 200 m 的位置。向岸迁移距离随这石块尺寸的增加而减小。精细化的水动力过程模拟计算分析出巨石的驱动每次都发生在亚重力冲刷涡旋时的速度的不对称区域。在海中的运动是向岸和向海回撤两个方向;一旦巨石被冲击上岸,其移动方向就基本一直向岸,不会向海中回撤。分析发现,水动力的惯性力与黏滞拖拽力相比,并非像很多文献描述的一样很小并可以忽略。惯性力的比重也会随着石块尺寸的增加而增加。模型的精细化模拟和计算速度很适合被应用于模拟多条件下、长时间的风暴海浪、海啸的近岸漫滩动力过程。三维的模拟也会弥补二维模拟在水流

绕射、衍射等现象上的准确性限制。间歇性的亚重力冲刷涡对巨石的非静压荷载也是工程结构物直接承受的冲击荷载,而它并没有在现有的研究或海岸工程设计标准中被考虑,值得在将来的研究中继续研究探讨。

基于美国新泽西海岸房屋在飓风 Sandy 期间遭受破坏的调查数据和漫滩过程水动力数值模拟计算,房屋的破坏程度随着水动力各项参数强度的增加而增加。进一步利用多种回归分析法推导出由于水动力荷载冲击导致的海岸房屋破坏程度的脆弱性预测公式模型,最大流速和防护系数是公式中权重最大的影响因素。这套方法也可以为风荷载引起的破坏预测模型的开发提供方法参考。

两个应用如果都可以将岸上的建筑、结构物特征包括到模拟地形中,应该会大大提高水动力参数计算的准确性,但会增加模型的不稳定性和计算成本。目前正在进行的工作是增加海岸近岸承灾体、结构物的破坏案例分析,结合物理模型实验,改进完善用于结构物破坏风险预测的公式模型,为准确地选取海洋减灾技术和措施提供科学依据。

参考文献

- [1] 国家海洋局. 2015 年中国海洋灾害公报[J]. 北京, 2016.
- [2] WASHINGTON D C. American Wood Council. ASD/LRFD Manual for Engineered Wood Construction[J]. American Forest and Paper Association. 2006.
- [3] ASCE. Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures[J]. ASCE/SEI, 2010, 21—80.
- [4] BLAKE E S, KIMBERLAIN T B, BERG R J, et al. Tropical Cyclone Report; Hurricane Sandy[J]. National Hurricane Center, 2013; 1—157.
- [5] BONNETON P, BARTHELEMY E, CHAZEL F, et al. Recent advances in Serre-Green Naghdi modelling for wave transformation, breaking, and runup[J]. Eur. J. Mech. B-Fluids, 2011, 30: 589—597.
- [6] BONNETON P, CHAZEL F, LANNES D, et al. A splitting approach for the fully nonlinear and weakly dispersive Green-Naghdi model[J]. J. Comp. Phys., 2011, 230: 1479—1498.
- [7] BOOIJ N, RIS R C, HOLTHUIJSEN L H. A third-generation wave model for coastal regions; 1. model description and validation[J]. J. Geophys. Res. Oceans, 1999, 104: 7649—7666.
- [8] Bradner C, Schumacher T, Cox D, et al. Experimental Setup for a Large-Scale Bridge Superstructure Model Subjected to Waves[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering-ASCE, 2011, 137: 3—11.
- [9] BRIGGS M J, SYNOLAKIS C E, HARKINS G S, et al. Laboratory experiments of tsunami runup on a circular island[J]. Pure Appl. Geophys., 1995, 144: 569—593.
- [10] DIETRICH J C, TANAKA S, WESTERINK J J, et al. Performance of the unstructured - mesh, SWAN + ADCIRC Model in computing hurricane waves and surge[J]. J. Sci. Comput., 2012, 52: 468—497.
- [11] DALRYMPLE R A, ROGERS B D. Numerical modeling of water waves with the SPH method[J]. Coast. Eng., 2006, 53: 141—147.
- [12] DOBSON A J, BARNETT A. An introduction to generalized linear models[J]. 3rd ed. Chapman and Hall, 2008; 320.
- [13] DONAHUE A S, ZHANG YAO, KENNEDY A B, et al. A Boussinesq-scaled, pressure-Poisson water wave model[J]. Ocean Modelling, 2014, 86: 36—57.
- [14] FRIEDLAND C J. Residential building damage from hurricane storm surge; proposed methodologies to describe, assess and model building damage[J]. PhD Thesis, 2009.
- [15] GAUCHI J P, CHAGNON P. Comparison of selection methods of explanatory variables in PLS regression with application to manufacturing process data[J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2001, 58: 171—193.
- [16] IRISH J L, LYNETT P J, WEISS R, et al. Buried relic seawall mitigates Hurricane Sandy's Impacts[J]. Coastal Engineering, 2013, 80: 79—82.
- [17] IMAMURA F, GOTO K, OHKUBO S. A numerical model for the transport of a boulder by tsunami[J]. J. Geophys. Res., 2008, 113: C01008.
- [18] JIN J, MENG B. Computation of wave loads on the superstructures of coastal highway bridges[J]. Ocean Engineering, 2011, 38: 2185—2200.
- [19] JESUSDEL M, LARA J L, LOSADA I J. Three-dimensional interaction of waves and porous structures. Part I: Numerical model formulation[J]. Coast. Eng. 2012, 64: 57—72.
- [20] KENNEDY A B, NOBUHITO M, ZHANG Yao, et al. Observations and Modeling of Coastal Boulder Transport and Loading during Super Typhoon Haiyan[J]. Coastal Engineering Journal, World Scientific, 2016, 58(1): 1640004.
- [21] KENNEDY A, ROGERS S, SALLENGER A, et al. Building destruction from waves and surge on the Bolivar Peninsula During Hurricane Ike[J]. J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Eng., 2011, 137(7): 132—141.

(以下内容转至第 104 页)

4 结语

本研究提出基于沿岸陆地基准站、海岛长时段测站控制点、海岛短时段测站控制点 3 级布网的方法快速获取无人机遥感地面控制网数据,解决偏远海岛无人机遥感监测精度受通信信号和控制点制约的问题。该方法在七星列岛的无人机遥感监测实践中表明,基于无人机遥感获取的高精度基础地理信息对海岛资源环境和开发利用状况进行常态化监视监测的方法具有可行性和优越性。

(上接第 87 页内容)

- [22] KENNEDY A, GRAVOIS U, ZACHRY B, et al. Origin of the Hurricane Ike Forerunner Surge [J]. *Geophysical Research Letters*, 2011; L08805.
- [23] KENNEDY A B, KIRBY J T, CHEN Q, et al. Boussinesq-type equations with improved nonlinear performance [J]. *Wave Motion*, 2001, 33; 225-243.
- [24] LEHRMAN J B, HIGGINS C, COX D. Performance of Highway Bridge Girder Anchorages under Simulated Hurricane Wave Induced Loads [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2012, 17; 259-271.
- [25] LIN N, VANMARCKE E, YAU S C. Windborne debris risk analysis; Part II. Application in structural vulnerability modeling [J]. *Wind and Structures*, 2010, 13(2); 207-220.
- [26] LYNETT P J, LIU P L F. A two-layer approach to wave modelling [J]. *Proc. Roy. Soc.*, 2004, 460; 2637-2669.
- [27] MADSEN P A, SCHAFFER H A. Higher order Boussinesq-type equations for surface gravity waves-derivation and analysis [J]. *Phil. Trans. Roy. Soc. A*, 1998, 356; 1-59.
- [28] MUSUMECI R E, SVENDSEN I A, VEERAMONY J. The flow in the surf zone: a fully nonlinear Boussinesq-type of approach [J]. *Coastal Eng.*, 2005, 52; 565-598.
- [29] SHIMOZONO T, TAJIMA Y, KENNEDY A B, et al. Combined infragravity wave and sea-swell runup over fringing reefs by super typhoon Haiyan [J]. *Geophys. Res.-Oceans*,

参考文献

- [1] 林宁, 赵培剑, 丰爱平. 海岛资源调查与监测体系研究 [J]. *海洋开发与管理*, 2013, 30(3); 36-40.
- [2] 邓才龙, 刘焱雄. 无人机遥感在海岛海岸带监测中的应用研究 [J]. *海岸工程*, 2014, 33(4); 41-48.
- [3] 赵庆志, 张书毕. GPS 静态相对定位技术在城市区域控制测量中的应用 [J]. *全球定位系统*, 2012(4); 64-66.
- [4] 袁修孝, 付建红, 楼益栋. 基于精密单点定位技术的 GPS 辅助空中三角测量 [J]. *测绘学报*, 2007, 36(3); 251-255.
- [5] 2015, 120; 1002.
- [30] SYNOLAKIS C E. The run-up of solitary waves [J]. *Fluid Mech*, 1987, 185; 523-545.
- [31] TOMICZEK T, KENNEDY A, ROGERS S. Collapse Limit State Fragilities of Wood-Framed Residences from Storm Surge and Waves during Hurricane Ike [J]. *Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 2014, 140(1); 43-55.
- [32] WESTERINK J J, LUETTICH R A, FEYEN J C, et al. A Basin-To Channel-Scale Unstructured Grid Hurricane Storm Surge Model Applied To Southern Louisiana [J]. *Monthly Weather Review*, 2008, 136(3); 833-864.
- [33] ZHANG Yao, KENNEDY A B, PANDA N, et al. Boussinesq-Green-Naghdi Rotational Water Wave Theory [J]. *Coastal Engineering*, 2013, 73; 13-27.
- [34] ZHANG Yao, KENNEDY A B, PANDA N, et al. Generating-absorbing sponge layers for phase-resolving wave models [J]. *Coastal Engineering*, 2014, 84; 1-9.
- [35] ZHANG Yao, KENNEDY A B, TOMICZEK T, et al. Validation of Boussinesq-Green-Naghdi Modelling for Surf Zone Hydrodynamics [J]. *Ocean Engineering*, ELSEVIER, 2016, 111; 299-309.
- [36] ZHENG JH, MASE H, DEMIRBILEK Z, et al. Implementation and evaluation of alternative wave breaking formulas in a coastal spectral wave model [J]. *Ocean Eng*, 2008, 35; 1090-1101.