



海啸初期诱发形成阶段的研究

刘双庆^{1,2}, 朱元清²

(1. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000;

2. 上海市地震局, 上海 200062)

摘要:对近年来有关海啸初期阶段几种激发模式的理论与实验研究的成果做了总体的回顾与阐述, 同时对一些存在的问题和前人未给予说明的地方做了些扩充。

关键词: 海啸; 海啸激发模式; 传递函数; 流固耦合; 衰减性

中图分类号: P731.25 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2008)01-0079-09

Introduction of Research Development for the Tsunami Incitement Stage

LIU Shuang-qing^{1,2}, ZHU Yuan-qing²

(1. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, China;

2. Earthquake Administration of Shanghai, Shanghai 200062, China)

Abstract: The development of accumulating researches for tsunami excitation stage in theories and experiments are described, which refer to the earthquake, landslide, volcano, asteroid, man-made experiments and so on. Some new illuminations and complements for existent problems and points have not deal with are given also in the paper.

Key words: Tsunami; Model of tsunami excitation; Transition function; The couple of structure-fluid; Attenuation

0 引言

2004年12月在印尼 Sumatra 岛北部发生了一次震级 $M_w 9.0$ 的大地震, 引发了海啸大灾难。实际上历来在世界沿海许多地区都存在地震海浪的灾难性侵袭, 主要代表有 1946 年阿拉斯加消减带逆断层产生的海啸; 1958 年 Lituya 湾滑坡海啸; 1975 年夏威夷希洛市海啸; 1993 年日本 Okushiri 地震海啸等事件。大批的包括考古、地质滑坡、地震、水力动力学、海岸工程防护、气象, 甚至是星体研究的人员参加进了对海啸的研究, 主要从各个方面初步地研究海啸的产生机制及特征。在研究中认识到海啸的触发主要有地震、滑坡、大陆架崩陷、火山爆发、天体撞击等方式。海啸初期形成、传播、海岸爬坡是三个不

同的阶段, 对应的研究方法一般也不一样。当前的理论可归结为两种: 一是整体法, 就是把三个阶段作为一个整体研究, 计算过程方程基本不变, 如文献 [1], 但是由于方程推导的前提条件和适用条件及方程离散过程简化的限制, 常常对三个阶段中的一些阶段进行简化或假定; 另一种方法是分段法, 就是对每一个阶段进行不同的方法, 然后将前一阶段的计算结果作为下一阶段的初始条件。大多数学者都采用整体法来研究海啸, 或者是只研究其中的一个阶段。而研究的方法分为解析和数值分析两种。由于国内对海啸的研究涉及很少, 对海啸初期阶段的诱发过程研究更少, 因此本文旨在对国内外海啸研究情况进行论述。

收稿日期: 2007-01-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(40576022)及地震科学联合基金(106078)

作者简介: 刘双庆(1982-), 男(汉族), 广西人, 在读硕士, 现主要运用有限元做大变形流固耦合正演。

1 滑坡海啸模式

在海啸研究中最多的工作是围绕滑坡海啸,因为海底地震、火山突发、或是大陆架的沉积物由于某些环境条件变化导致的崩塌,其随之而来常常是滑坡,而且现今观测到的大海啸许多是由滑坡直接接触的,并且在流体力学相似性的前提下在室内可做滑坡类比实验以及解析解推导。

1.1 解析解与数值解计算工作

在这部分研究者们常常不是单独研究其中一个方面。理论中从能量考虑方面考虑,有 Milne^[2], Gutenberg^[3] 讨论滑坡给海啸能量传递的有效性问题。Tinti^[4] 对 Sicily 滑坡海啸的研究,并提及在线性浅水波的方程中 Voit 等给出了水平方向 X、Y 的作用力下,水平冲击给激发域水体的能量转换公式。在参数影响方面,Okal 等^[5] 分析了巴布亚新几内亚海啸,并用参数 I1(爬高与海底位错之比),I2(爬高与海滨宽度之比),I3(爬高与初始海平面起伏最大高度之比)来分析,认为这些参数可以对近源海啸机制进行分类;同时他们也认为纯垂向运动的位移并不是好的触发源;且文中提到了 Ward(1980),Okal(1988)研究正断层相类似的结果。Voit 等^[6], Voltsinger 等^[7] 做了水体在触发源具有水平速度或加速度情况的海啸方向性辐射的工作。Grilli 等^[8] 用边界元方法分析滑坡过程对海啸非线性的影响因素,采用了 snake(AP)吸收边界条件,结果指出当激发海啸的几何震源宽度或长度超过一定大小时,海啸的高度将以更小的斜率增加。

在数值算法方面,Liu 等^[9] 模拟滑块在斜坡滑下时对水的影响,利用 Smagorinsky 子网格模型提供扰动扩散,而用流体体积法 (VOF) 来追踪自由表面和边坡与水面接触线的运动情况,发展了一个大旋度条件下的计算模型;Todorovska 等^[10] 做了滑坡性质的海啸初期二维模拟;Heinrich 等^[11] 通过浅水波近似模拟了一个有限差方法下的滑坡和近场海啸,其滑坡体被假定为由重力引起的遵守流体力学定律的各向同性物质流;Iwasaki^[12] 和 Verriere 以及 Lenoir^[13] 使用线性势函数理论来模拟移动边界的水波产生情况。Watts 等^[14] 用非线性模型和 Boussinesq 传播模型组合得出了阿拉斯加 1946 年 Unimak 和 1994 年 Skaway 及 1998 年巴布亚新几内亚海啸事件的较好模拟;Monaghan^[15], Monaghan 等^[16], Monaghan 和 Kos^[17] 运用拉格朗日光滑粒子法 (SPH) 进行水波产生过程的模拟。在解析

式的分析方面,Dobrokhotov 等^[18], Garder 等^[19] 研究海底滑坡产生海啸的解析式;Watts 等^[20] 给出二维,三维的海啸初期经验预测公式。对于数值解,因为在计算域为近源区,非线性相当的严重,需要变网格技术的应用。ALE, SPH 算法在 ANSYS 模块 LS-DYNA 中已经初步具有了计算该类大变形、非线性、流固耦合情况的功能^[21-22]。图 1 是依据上海交通大学做的滑坡解析解的图像,其沿袭了 Todorovska 等^[23-25] 在线性浅水波中给出的经典解析解理论,基本理论如下^[26]:

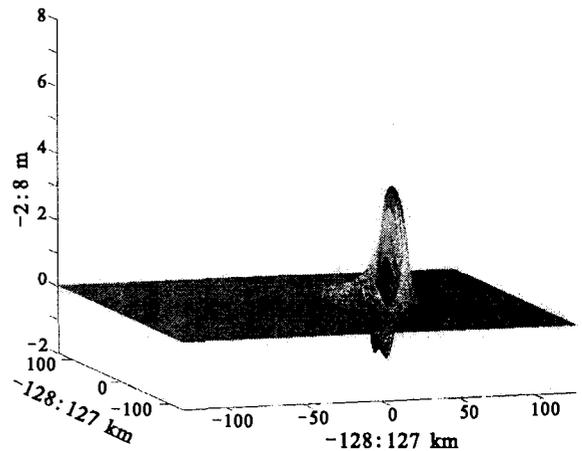


图 1 一种滑坡模式引发的初始海啸图像
Fig. 1 Image of a kind of tsunami in initial stage caused by landslide.

对 $\nabla \cdot \vec{V} = 0$ 的非旋不可压缩流,存在势函数满足

$$\Delta \varphi = 0 \tag{1}$$

边界条件

$$\begin{aligned} \varphi_z &= \eta_t + \varphi_x \eta_x + \varphi_y \eta_y, \quad \text{on } z = \eta(x, y, t) \\ \varphi_z &= \zeta_t + \varphi_x \zeta_x + \varphi_y \zeta_y, \quad \text{on } z = -h + \zeta(x, y, t) \end{aligned} \tag{2}$$

以及

$$\varphi_t + \frac{1}{2} (\nabla \varphi)^2 + g\eta = 0 \quad \text{on } z = \eta(x, y, t) \tag{3}$$

在浅水波中,丢掉高阶项 $\varphi_x \eta_x, \varphi_x \zeta_x, \varphi_y \eta_y, \varphi_y \zeta_y$ 和 $(\nabla \varphi)^2$, 为了计算分析方便转入 Laplace 域和 Fourier 域,有

$$\bar{\varphi}_{zz}(\vec{k}, z; s) - k^2 \bar{\varphi}(\vec{k}, z; s) = 0 \tag{4}$$

$$\bar{\varphi}_z(\vec{k}, -h; s) = s \bar{\zeta}(\vec{k}; s) \tag{5}$$

和

$$\bar{\varphi}_z(\vec{k}, 0; s) + (s^2/g) \bar{\varphi}(\vec{k}, 0; s) = 0 \tag{6}$$

对式(4)有一般形式解

$$\bar{\varphi}(\vec{k}, z; s) = A(\vec{k}; s) \cosh kz + B(\vec{k}; s) \sinh kz \quad (7)$$

最后得

$$\bar{\eta}(\vec{k}; s) = \left(\frac{s^2}{s^2 + \omega^2} \frac{1}{\cosh(kh)} \right) \bar{\zeta}(\vec{k}; s) \quad (8)$$

其中 $\omega^2 = gk \tanh(kh)$, $k = \sqrt{k_1^2 + k_2^2}$ 。

从而由 $\zeta(x, y; t)$ 计算 $\bar{\zeta}(\vec{k}; s)$, 计算 $\bar{\eta}(\vec{k}; s)$, 最终算出 $\eta(x, y; t)$ 。其中 $\zeta(x, y; t)$ 为海底变形; $\eta(x, y; t)$ 为海浪变形。以上即为线性浅水波的数学方程, 即内质所在。假设不同的海底变形函数, 则计算出不同的海浪初始变形。式(8)的右端前括号部分即为传递函数, 当 $(k_1, k_2) \in (-\pi, \pi)$, $s=25$, $h=2$ 时的频率域三维分布图见图2。

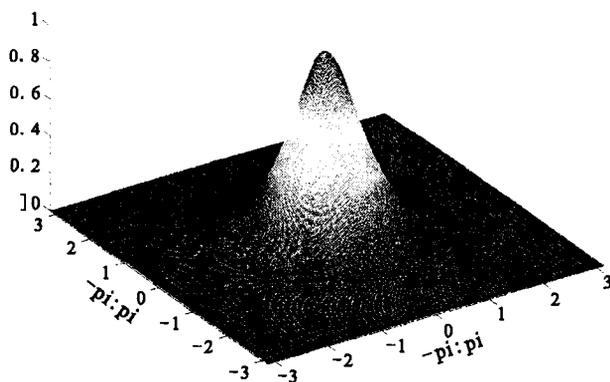


图2 传递函数的频域特征(归一化)图像

Fig. 2 Normalized distribution of the transition function in frequency domain.

在该部分研究的归结性方面, Murty^[27], Pelinovsky等^[28]对海啸起源于海底地震、水下滑坡、火山突发、以及大气压快速异常变化的情况都做了些阐述。Honolulu^[29]在文章中做了很多全面的有关海啸的总结, 包括完全的 Navier—Stokes 模型以及光滑粒子水动力学模型在未来将更理想且更多地应用于海啸激发的模拟; 波幅的方向性是滑坡海啸的主要特征。理论解常常只适合一部分条件, 在一些非线性区域无效。大多数的数值模拟都人为地将滑坡运动作为一个初始瞬时激励或简单的扩展组合, 而不是持续的系统运动激发过程。波高与传播方向的关系依然不很清楚。一些物理实验模型仅仅围绕着固体滑块模型, 而没有准确地模拟滑块的变形、孔隙度、以及滑块的位移变化过程。对海啸机械性的产生机制的研究应该拓展到更宽的频域范围。更多的物理实验还需要去做, 因为理论分析常常无法考虑尺度问题的影响, 包括滑坡海啸的能量转换效率、

波高、波长、波速、水下滑坡体速度、滑坡体停止时的空间分布之间的相互影响。对于滑坡体的初始加速度也处于一个未知的待研究领域。当前一个比较可行的对于初始加速度的例子是 Voight (1981) 对 1980 年圣海伦山的滑塌照片分析估计出来的。

1.2 实验工作部分

Enel 等^[30]2003 年做一个几何形状为高斯分布的滑块在斜面上滑下激发水槽里水面的波的实验, 并且用边界元计算理论结果; Monaghan 等^[31]实验和模拟计算由下沉块体引发的水波过程; Noda^[32]获得了一个线性理论解, 该解是假设在一堵水平运动的水墙的激发情况, 这个解与 Miller 和 White^[33]; Das 和 Wiegel^[34]的实验结果吻合, 然而这个结果完全不适合三个以上影响因子的测量结果(与 Lituya Bay 事件的分析结果比较); Sander^[35]通过实验, 分析渗透、半渗透、垂直、倾向移动边界的单向浅水波激发结果, 得出产生的波的高度和宽度与楔形滑块形状和 Froude 数有关; Rzedkiewicz 等^[36]进行了颗粒堆的水下滑坡实验与数值分析, 在二维 Navier—Stokes 模型下利用 Bingham Law 对流变系数从固体到牛顿流体条件下的二维扩散模型来描述沉积物的运动行为。在传播方向上波高的依赖性于滑坡和爆炸是有本质不同的(LeMéhauté 和 Wang^[37])。

2 地震(断层)海啸模式

地震能够产生海啸, 是因为它具备使被海水覆盖的海底发生大面积快速变化的位移。同时地震又是滑坡型海啸的触发源, 它不仅仅通过弹性波的方式诱发滑坡, 而且地震激发的水波会改变大陆架等地方的沉积物周围压力、孔隙压力、以及含水饱和度, 这些因素会导致沙土液化(Wright 等^[38])。这部分理论的研究常常出现地震海啸和海啸地震这两个词, 前者表明海啸的触发源性质, 后者因固体地震的主周期与海啸的主周期的差异, 使得地震触发相当于一瞬时的激励, 使“地震”概念泛化到“水震”这个概念上。这部分的研究大致划分如下两方面。

2.1 倾向能量方面的研究工作

Green^[39]给出在其他条件相同的情况下, 深水处激发源导致的近岸海浪爬坡效应要比浅水处的强; Zhdanov^[40]分析了海啸能量与地震震源深度的关系; Dotsenko 等^[41]使用了“elastic”海啸产生方式通过实验参数来模拟海啸初期情况, 主要是针对不同海底变形和海水特性, 从而将理论值和现实观测的相应海啸对比。文章提到了 Belokon 等研究的,

当重力波和弹性波的周期靠近时,海啸能量与激发能量之间可以进行相互传递。对近源海啸模拟, Matsuyama 等^[42]给出了一个在 Sissano 区域海啸能量集中的因子主要是海水深度,其 2 维数值模型包括几何衰减和海水深度变化的集中效应影响,计算表明陡立的逆断层也是激发海啸的地震断层模式; Rao 等^[43]讲了 Sumatra 地震的应力集中过程,指出地震更易出现于板块连接点(如三联点)附近以及出现于应力拐点附近,俯冲板块的俯冲角大小是内部应力大小的一个特征; Gussyakov 等^[44-45]对地壳内地震引发的海波全场进行细节分析,目的是进一步完善 Podyapol'skiy's 提出的看法; Goi, Tkachev^[46]讨论了引发海啸的“震动”物理机制; Arguchintsev 等^[47], Belokon's 等^[48], Zhmur^[49]记述了一些专家对于海啸产生机制的讨论。有些假设认为海啸是不同周期不同速度的表面地震波共振从而诱发的结果,但也受反驳,因为记录到的 Rayleigh 和 Love 波的速度比海啸的速度快,而且周期比海啸的短很多。Soloviev^[50]对苏联 1987—1989 年所做的有关海啸的研究工作进行了总结,其中涉及到了活塞(piston)式海啸激发; Goi 等^[51-52]阐述了具有空间分布的海底形变模型激发式; Bobrovich 等^[53-54]分析了非同时破裂或非瞬时破裂的地震断层作用能力,指出活塞激发式的风暴也存在地球离心旋转能; Dotsemko 等^[55-56]进一步讨论活塞式激发海啸的理论,分析了在地震引起海底位移又回复到起初未变形的时刻海啸才引发的结果,但指出海底形变的时间应该大到足够可以和海啸主周期相比拟。文章的结果分析表明与未回退的地形变的海啸不同,这种假设使得负半周期朝下的海水形变比正半周期上跃的海水形变要大得多。Voi 等关于海啸方向性辐射的工作^[57-59]考虑了非惯性坐标系的科里奥利力和存在局部地形的影响,得出在这种情况下即使海啸只获得 0.1 或 1% 的弹性能量也会产生可观的大海啸;当存在水平运动的地形跃高或滑坡时,将产生双向旋度,而不是活塞式的单向形式。Dorfman^[60]分析了活塞式的带非线性和小频散的海啸激发模式。Burroughs^[61]用了美国国家地球物理数据中心的岸边海浪爬高的海啸数据和日本 10 个海啸观测点的数据,进行爬高尺度相差一个数量级和时间跨越几十年的数据的爬高与年累积发生数的统计,来刻画它们之间的幂型分布规律,得出了具有高阶截止的统计特征。另外有部分学者做了海啸矩与地震矩的大小比值统计和地震中高频能量与低频地震矩的比

值统计,这些都是零碎的,还没有具体规律和意义。

2.2 倾向几何变形的研究工作

Piatanesi 等^[62]用数值方法模拟具有 40 度和 70 度倾角的逆断层产生的海啸,通过 1994 年日本 Shikotan 地震引发的海啸的观测数据来检验两个模型哪个更合适。结果表明不能进行取舍,主要的原因可能与检验的数据点多少、海啸传播路径的测量精度有关。为了进一步说明情况,还对低倾角的逆断层加高斯噪声,以检验系统噪声放大水平,同时对断层进行整体和分段组合的方式进行了分析,这些结果都表明正演中有关因子的作用不是和想象中的作用那么明显。Plafker^[63]分析 1964 年阿拉斯加海啸地震位移的大小。Ohmachi 等^[64]用边界元法模拟海底地面动态变化,用有限差分求解海水控制方程,使它们得到耦合,出现了瑞利项,但海啸传播速度过快。Narayan 等^[65]给出了地震海啸方向性的很好说明:由于地震破裂的方向性,沿 Tamilnadu 海岸线由南向北海啸波高逐渐变小;同时在传播路径上若有大的障碍物阻挡,可以降低海啸强度,如斯里兰卡岛的存在,从 Kanyakumari 到 Pudukkottai 区域(东部海线)受的灾害最小;但是由于海峡变窄,以及斯里兰卡对水波的反射作用,使得沿 Chennai 沿岸区域的浪高普遍升高很多。Tanioka^[66]用线性 Boussinesq 方程利用地震远场位移解,考虑科里奥利力,使用有限差分法解之,其数值解支持陡峭逆断层作为海啸源的观点以及巴布亚新几内亚地震以一组具有加速度的长条体组合而成的震源破裂过程。Ward^[67-68]在地震海啸理论中给出了以矩张量为自变量的海啸频域表达式(该理论推导可部分沿袭上一节滑坡体诱发海啸的数学分析过程),并且还做了其他许多值得借鉴的理论工作。Nowikova 等^[69]运用了正断层理论模型和 Thomson—Haskell 矩阵进行有限尺度线形震源激发的表面波的模拟以及传播,推导了层状半空间分层各向同性介质中点源在固液交界面产生的位移表达式。Nakamura^[70]借用数值方法和实地考察,提出 1771 年日本 Yaeyama 海啸只由地震断层错动产生,否定了其他的产生机制;在各调查点的海啸波高异常主要由海啸传播路径的不同,以及海啸能量在该点集中的结果。Satake 等^[71]讨论了消减带的三种诱发海啸的地震模式以及它们的有效性。基于线性浅水波的数值方法没有给它们带来可区分性,恰恰说明了海啸的产生并不简单依赖于地震的假设模式。

对地震诱发海啸的研究,其实很重要的一部分

是对震源在固体中近场、远场位移解在不同环境下的研究。实际上不少从事海啸初期阶段研究的工作者他们在对近场固体位移解方面常常设定一个很粗糙的模型或数值,大量的数学分析可参考陈^[72],郑^[73]。当然地震反演本身的精度现今还不够令人满意;各国地震台站及海啸监测仪在数量和质量上都还需改进,特别是海洋中的相关监测仪器很少,分布也不均匀,从而导致数据集不完备;另外地震断层本身的复杂性、地震断层静态位移反演呈非均匀分布^[1]、地下爆破的压力分形^[22]、挪威 Norsar^[74]做的 S 波三维正演显示高度分裂等,这些都给地震触发源的研究带来挑战。另一方面,水下核爆实验^[75]却显示了另一个问题,就是激发海啸向外辐射的有效性。有一批人从 SPH 的角度来研究这个问题,现在主要是做水下爆炸研究和水库坝基塌方等,如 Liu 等^[76],韩^[77](译者)以及美国西北大学的一些研究者(EFG 方法)等。

3 火山以及天体撞击和大气气压异常变化模式

纯粹由火山爆发引起海啸是很少的,但是它可引起滑坡海啸,当然海底火山大喷发也可以产生海啸。而天体撞击则是从上往下,释放的动能以及它自身的可爆炸性都可以诱使海啸的产生。大气气压大面积突变也可以导致海浪的急剧变化(这和风暴潮有些区别)。研究者不仅仅做正演,也做反演,主要有:Levin^[78]利用近岸海啸参数来进行估计火山爆发的能量;对史前时代的 Santorin 火山滑坡地震海啸的追溯^[79];Efimov 等^[80],Rabinovich^[81]对大气引发的海啸源以不同速度、不同方向的情况及机制进行了调查;Pelinovsky 等^[82]研究大气扰动产生海啸的模型(线性和非线性浅水模型),对于具有共鸣效应的情况采用 Korteweg-de Vries 方程;Rabinovich 和 Monserrat^[83]记录由大气引发的海啸曾在地中海和 Okhotsk 海发生。对一些特殊情况,如近 Balearic 海岛群时大气运移速度接近此处的海浪长波速度,这样共振响应会很明显。一些人依据前人理论推导出来的结果有非线性色散共振的模型(基于 Akylas^[84]);以及孤立波在移动压力源下的传播与相互作用(基于 Grimshaw 等^[85]),并提到由风力产生的波常常有反常波或假波。Ward 等^[86]应用浅水波理论和贝塞尔函数研究对称球形天体 Eltanin 在 2.15 百万年前撞击南太平洋引发的海啸。Ward^[67-68]对多种诱发模式的海啸进行浅水波理论

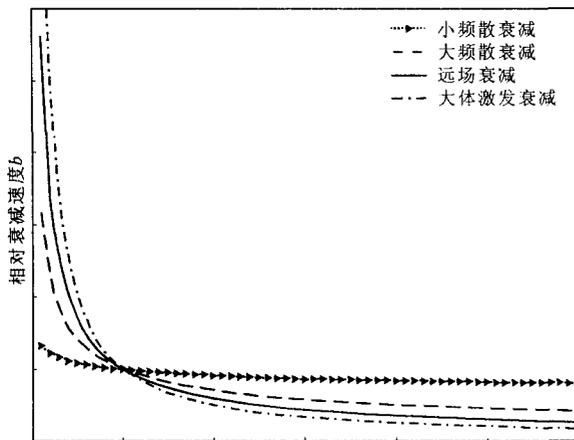
下的一阶摄动近似展开,导出它们的解析表达式。Murty^[27],Pelinovsky 等^[28]对海啸起源于海底地震、水下滑坡、火山突发、以及大气压快速异常变化的情况都做了些阐述。

除此之外,对海啸的研究还有其他值得借鉴的文章,包括:Steinbrugge^[87]对 1960 年智利海啸的长篇调查和工程建议;Nakamura 等^[88]用层状模型水声射线传播法,考虑水的温度和盐度,研究海啸来临之前海水中水声的情况;Tadepalli 等^[89]主要采用 Leading-N Wave 理论讨论一个传统框架下没解决好的理论结果,即用传统 Boussinesq 浅水波理论进行孤立波在靠岸爬坡时,没有得到现实中海啸来临时海水先回退的情况,当然这与 Ward 有关于地震几何辐射因子的影响不属一个范畴;Yuichiro Tanioka^[90]主要讲 1994 年 Kuril 地震引发的异常海啸,仪器上的观测到时比预计的早了 50 分钟(据 Nakamura 等^[91]),而当作者只考虑地形为纯上下运动时,激发的海啸到时与 5 个观测的相符;Geist 等^[92]记录了一个地震海啸却比预计时间晚了 16 分钟。

4 认识与结论

当前的海啸初期阶段的理论研究,解析解基于浅水波理论分析为多,处理方法也主要是局限于环境条件比较单一和激励瞬时完成的情形;数值方法中在流固交界面上也只考虑固体对流体的作用。但这样给出的结果在很多情况下模拟海岸的浪高还是令人满意的,这主要是因为初期阶段的海水跃高在传播的过程中不断扩散和频散衰减,原本的强方向性与尖锐性逐渐消减掉,因此虽然各学者所做的模型存在差异,结果依然和实际观测值有好的吻合度。但方程的假设条件与最终的解析结果分辨率上的不匹配是有所反映的,很明显的就是解析解比数值解多了很多高频成分(也许是因 Heaviside 函数引入,而传递函数为光滑低通滤波器所造成的伪成分,见图 1,2)。而且很多的数值解相互差距也不小,对一些现实记录也没法解释。图 3 显示小频散衰减、大频散衰减、波浪在远场的衰减、天体诱发海啸的波幅衰减速度对比(参数来自 Ward^[86])。这可以给出水中核爆巨浪未有海啸的解释:一是核爆处于水面附近,激发的大多是高频波,按公式 $c = \sqrt{g \tanh(ah) / a}$ (其中 h 为水深, g 重力加速度, a 为波数)^[26]知,频率越大(波数越大)波走得越慢,也就是频散衰减越快;二是没有方向性,是圆形扩散的,而

能量在方向上的分布很重要,如滑坡、断层错动方向都使得海啸波在空间分布上很不一致,这种不一致一直影响到海啸最终的爬坡高度,如参考文献[93]对 Sumatra 海底地形效应的调查。但是在海啸有关流固耦合能量传递影响因子的统计特征的深入研究方面几乎空白,传统水波理论并不对 Navier—Stokes 方程组中的能量方程进行联合计算。



随距离 r 扩展而衰减的对比示意图
 $b=r^{**}(-a)$, a 分别为1/8.1/2.3/4, 1

图3 几种衰减速度对比图

Fig. 3 The comparison between different kinds of attenuation.

另一方面,有些学者想在 Todorovska 滑坡的解析解模式的基础上,将地震引起的远场位移特征转化成一种等效的以一定速度扩展的模式。这种等效本人认为有一个相对使用范围,对于小震在震中区附近的位移变形过程用一定的跃高向周围扩展的模式就不太合理,因为这样的水平扩展速度(视速度)非常大,当利用传递函数转换时这个视速度或等效速度就会给整个模型引入了强非线性特征。用线性浅水波模型来耦合强非线性问题就存在物理上的不耦合。对于大震此类有较长破裂时间的事件可以粗略使用 Todorovska 理论来模拟。这可以反向类比精确定位偏向选择小震来做研究的道理。

海啸初期模拟的很难解决的问题还是海啸源区的各种触发组合、环境反射等的影响因素。现在还没有很好的解析解分析,数值解方面做的也不多,大多定性半定量分析。同时地震辐射和波动本身的复杂性,固体中的复杂必然带来固液耦合的困难(多种耦合方式和参数控制特征未给予系统化分析),多学科知识交叉借鉴是应该的(其他领域有很多类似的例子^[22])。能找到一个既简单又反映出物理现实大部分本质的方法切待更多更深的研究工作。

[参考文献]

- [1] 王本龙. 基于高阶 Boussinesq 方程的海岸破裂带数学模型研究[D]. 上海:上海交通大学,2005.
- [2] Milne. Earthquakes and other earth movements[M]. London: Paul, Trench, Trubner & Co., 1898.
- [3] Gutenberg B. Tsunamis and earthquakes[J]. Bull. Seism. Soc. Am., 1939, 29: 517-526.
- [4] S Tinti, E Guidoboni. Revision of The Tsunamis Occurred in 1783 in Calabria and Sicily (Italy) [J]. Science of Tsunami Hazards, The International Journal of The Tsunami Society, 1988, 6(1): 17-23.
- [5] Emile A Okal, Costas E Synolakis. Source discriminants for near-field tsunamis[J]. Geophys. J. int. 2004, 158: 899-912.
- [6] Voit S S, Sebekin B I. On the energy of tsunami waves and the role of horizontal impulse in the formation of directed waves [A] // Proceedings of the International Tsunami Symposium [C]. Vancouver, 1987: 140-143.
- [7] Voltsinger N E, Klevanniy K A, Pelinovskiy E N. Long-wave dynamics of the coasted zone (English summary) [R]. Lenin-grad: Gidrometeoizdat, 1989: 271.
- [8] Stephan T Grilli, Sylvia Vogelmann, Philip Watts. Development of a 3D numerical wave tank of modeling tsunami generation by underwater landslides[J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2002, 26: 301-313.
- [9] P L -F. LIU, T -R WU, F RAICHLLEN, et al.. Runup and rundown generated by three-dimensional sliding masses[J]. J. Fluid. Mech. 2005, 536: 107-144.
- [10] M I Todorovska, A Hayir, M D Trifunac. A note on tsunami amplitudes above submarine slides and slumps[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2002, 22: 129-141.
- [11] Heinrich Ph, Piatanesi A, Hebert H. Numerical modeling of tsunami generation and propagation from submarine slumps: The 1998 Papua New Guinea Event [J]. Geophys. J. Int. 2001, 145: 97-111.
- [12] Iwasaki S. On the estimation of a tsunami generated by a submarine [A] // Proc. Int. Tsunami Symp. [C]. Vancouver, B. C., 1987: 134-138.
- [13] Verriere M, Lenoir M. Computation of waves generated by submarine landslides [J]. Int. J. Num. Methods Fluids, 1992, 14: 403-421.
- [14] P Watts, S T Grilli, J T Kirby, et al.. Landslide tsunami case studies using a Boussinesq model and a fully nonlinear tsunami generation model [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2003, (3): 391-402.
- [15] Monaghan J J. Smoothed particle hydrodynamics [J]. Ann. Rev. Astron. Astrophys., 1992, 30: 543-574.
- [16] Monaghan J J, Cas R A F, Kos A M, et al.. Gravity currents descending a ramp in a stratified tank [J]. J. Fluid Mech., 1999, 379: 39-69.
- [17] Monaghan J J, Kos A M. Solitary waves on a cretan beach [J]. J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engrg., ASCE, 1999, 125(3): 145-154.

- [18] Dobrokhotov S Yu, Zhevandrov P N. Surface waves generated by a moving submerged body in a variable — depth area [R]. OWL, 1988;32-41.
- [19] Garder O I, Ivanov V V, Poplavskiy A A. Can bottom landslides bring about tsunamis? [R]. CMT, 1988;54.
- [20] Philip Watts, Stephan T Grilli, M Asce, et al. . Tsunami Generation by Submarine Mass Failure II : Predictive Equations and Case Studies [J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 2005,131(6).
- [21] 王勳成. 有限单元法[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [22] 时党勇,等. 基于 ANSYS/LS-DYNA8.1 进行显式动力学分析[M]. 北京:清华大学出版社,2005.
- [23] Maria I Todorovska, Mihailo D Trifunac. Generation of tsunamis by a slowly spreading uplift of the sea floor[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering,2001,21;151-167.
- [24] M I Todorovska, A Hayir, M D Trifunac. A note on tsunami amplitudes above submarine slides and slumps[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering,2002,22;129-141.
- [25] M D Trifunac, A Hayir, M I Todorovska. A note on tsunami caused by submarine slides and slumps spreading in one dimension with non-uniform displacement amplitudes[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering,2003, 23;223-234.
- [26] 张兆顺,崔桂香. 流体力学[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [27] Murty T. Seismic sea waves—Tsunamis[M]. Canada Ottawa,Bull. Fish. Res. Board,1977;198.
- [28] Pelinovsky E N, Poplavsky A. Simplified model of tsunami generation by submarine landslides[J]. Phys. Chem. Earth, 1996,21;13-17.
- [29] W S Honolulu. The state-of-the-art in experimental tsunami models and future physical experiments suited for benchmarking and validation of numerical simulations[R]. NSF-Workshop-Report, Experimental part,2004.
- [30] Francois Enel, Stephan T Grilli, Philip Watts. Laboratory Experiments for Tsunamis Generated by Underwater Landslides: Comparison with Numerical Modeling[A]//Proceedings of The Thirteenth (2003) International Offshore and Polar Engineering Conference[C]. Honolulu, Hawaii, USA, 2003;25-30.
- [31] Monaghan J J, Kos A M. Scott Russell's wave generator[J]. Physics of Fluids ,2000,12 (3):622-630.
- [32] Noda E. Water waves generated by landslides[J]. J. Waterway Port, Coastal and Ocean Engrg. , 1970,96;663-670.
- [33] Miller R L, White R V. A single-impulse system for generating solitary, undulating surge, and gravity shock waves in the laboratory [R]. OWT. Fluid Dynamics and Sediment Transport Laboratory Report 5,Dept. Geophys. Sci. , Univ. Chicago,1966.
- [34] Das M M, Wiegel R L. Waves generated by the horizontal motion of a wall[J]. J. Waterway Port, Coastal and Ocean Engrg. 1972,98;49-65.
- [35] Sander D. Weakly nonlinear unidirectional shallow water waves generated by a moving boundary[R]. Versuchsanstalt fur Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zurich, 1990.
- [36] Rzedkiewicz S A, Mariotti C, Heinrich P. Numerical simulations of submarine landslides and their hydraulic effects[J]. J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engrg. , 1997,123 (4);149-157.
- [37] LeMéhauté B, Wang S. Water wave generated by underwater explosions[A] // Advanced series on ocean engineering 10, World Scientific[C]. Singapore,1995.
- [38] S G Wright, E M Rathje. Triggering Mechanisms of Slope Instability and their Relationship to Earthquakes and Tsunamis[J]. Pure appl. Geophys,2003, 160;1865-1877.
- [39] Green G. On the motion of waves in a variable canal of small depth and width[J]. Proc. Camb. Phil. Soc. , 1838, 6;457-462.
- [40] Zhdanov M A, Soloviev S L. Relationship between the energy of tsunami and the depth of the earthquake source in the case of a vertical fault[R]. TMT. 1988; 81-83.
- [41] S F Dotsenko, S L Soloviev. Mathematical simulation of Tsunami excitation by dislocations of ocean bottom[J]. Science of Tsunami hazards, The international Journal of The tsunami society, 1988,6(1);31-37.
- [42] Matsuyama M, Walsh J, Yeh H. The effect of bathymetry on tsunami characteristics at the Sissano Lagoon, Papua New Guinea[J]. Geophys. Res. Lett. 1999,26;3513-3516.
- [43] N Purnachandra Rao, A Hanmantha Chary. What caused the great Sumatran earthquakes of 26 December 2004 and 28 March 2005[M]. scientific correspondence.
- [44] Gusyakov V K, Chubarov L V. Numerical simulation of tsunami generation and propagation in a near-shore zone[R]. PhE. 1987;53-64.
- [45] Gusyakov V K, Marchuk An G, Titov V V. Influence of the form of initial disturbance at source on tsunami characteristics near the shore[R]. CMT. 1987;38.
- [46] Goi A A, Tkachev O G. Reverting to the question of a tsunami excitation "shock" mechanism [R]. CMT. 1987;29-31.
- [47] Arguchintsev A V, Terletskiy V A. Tsunami waves excited by bottom movements[R]. CMT. 1987;7-8.
- [48] Belokon's V L, Rodkin A F, Smal' N A. Tsunamic forerunners[A]// "Man, Sea, Technics" [G]. Leningrad, 1987; 87-96.
- [49] Zhmur V V. Surface phenomena over the foci of large underwater earthquakes[R]. IT, (2),1987;62-71.
- [50] S L Soloviev. Survey of research studies and technological development on the problem of tsunami in the USSR in 1987—1989, Science of tsunami hazards[J]. The international journal of the tsunami society,1990,8(1); 3-34.
- [51] Goi A A, Sus'kov C E. About gravity influence on large-scale deformations of the Earth's surface at earthquakes[R]. CMT. 1987;27-29.
- [52] Goi A A, Umnikov A Yu. Deformation of the Earth's surface

- during earthquakes[R]. IT, (2), 1987; 35-41.
- [53] Bobrovich A V. Tsunamis excited by spreading bottom faults [R]. TMT. 1988; 36-37.
- [54] Dobrokhotov S Yu, Zhevandrov P N. Asymptotics of surface waves excited by moving bottom fault [R]. CMT, 1987; 41-43.
- [55] Dotsemko S F. A "drum" model of tsunami wave generation [R]. CMT. 1987; 44-45.
- [56] Dotsemko S F, Soloviev S L. Mathematical simulation of tsunami excitation caused by dislocation in the ocean bottom[J]. Science of Tsunami Hazards, 1988, 6(1); 31-36.
- [57] Bobrovich A V. Directional radiation of nonstationary long waves in rotating media[R]. IT. (2), 1987; 51-61.
- [58] Sebekin B I. The effect of the Earth's revolution on the directional propagation of tsunami [R]. IT. (2), 1987; 42-50.
- [59] Voit S S, Sebekin B I. On the energy of tsunami waves and the role of horizontal impulse in the formation of directed waves[A]// Proceedings of the International Tsunami Symposium[C]. Vancouver, 1987; 140-143.
- [60] Dorfman A A. The axisymmetric problem for unstationary long waves of finite amplitude caused by basin bottom displacements. — Theoretical and Experimental Research of Tsunami Problem[M]. Nauka, Moskow, 1977; 26-36 (in Russian).
- [61] Stephen M Burroughs, Sarah F Tebbens. Power-law Scaling and Probabilistic Forecasting of Tsunami runup Heights[J]. Pure appl. geophys. 2005, 162; 331-342.
- [62] Alessio Piatanesi, Philippe Heinrich, Stefano Tinti. The October 4, 1994 Shikotan (Kurile Islands) Tsunamigenic Earthquake: An Open Problem on the Source Mechanism[J]. Pure appl. Geophys. 1999, 154; 555-574.
- [63] Plafker G. Tectonic deformation associated with the 1964 Alaskan earthquake[J]. Science, 1965, 148; 1675-1687.
- [64] Tatsuo Ohmachi, Hiroshi Tsukiyama, Hiroyuki Matsumoto. Simulation of Tsunami induced by Dynamic Displacement of Seabed due to Seismic Faulting[J]. Bulletin of the seismological society of America, 2001, 91(6); 1989-1090.
- [65] J P Narayan, M L Sharma, B K Maheshwari. Tsunami Intensity Mapping Along the Coast of Tamilnadu(India) During the Deadliest Indian Ocean Tsunami of December 26, 2004 [J]. Pure appl. Geophys. 2006, 163; 1279-1304.
- [66] Tanioka Y. Analysis of the Far-field Tsunamis Generated by the 1998 Papua New Guinea Earthquake[J]. Geophys. Res. Lett. , 1999, 26; 3393-3396.
- [67] Steven N Ward. Classical Tsunai Theory [M]. la Ward, 2003.
- [68] Steven N Ward. Tsunamis [M]. Encyclopedia of Physical Science and Technology Academic Press. (http://www.es.ucsc.edu/~ward/papers/tsunami_ency.pdf).
- [69] Tatyana Nowikova, Bor-Shouh Huang, Kuo-Liang Wen. Application of Analytical Modeling to the Far-field Investigation of Tsunami and Oceanic Rayleigh Waves from the 1998 Papua New Guinea Earthquake [J]. Pure appl. geophys. 2005, 162; 2071-2093.
- [70] Mamoru Nakamura. Source Fault Model of the 1771 Yaeyama Tsunami, Southern Ryukyu Islands, Japan, Inferred from Numerical Simulation [J]. Pure appl. geophys. 2006, 163; 41-54.
- [71] K Satake, Y Tanioka. Sources of Tsunami and Tsunamigenic Earthquakes in Subduction Zones [J]. Pure appl. geophys. 1999, 154(3-4); 467-483.
- [72] 陈运泰, 顾浩鼎. 震源理论基础(上册) [M]. 北京: 中国科学院研究生院教材. 2004.
- [73] M 巴特著. 郑治真译. 朱传镇校. 地震学的数学问题 [M]. 北京: 科学出版社, 1976.
- [74] Norsar. Arsmelding Annual Report 2004. [EB/OL] <http://www.norsar.no>.
- [75] UNESCO. Presented at the International Coordination Meeting for the Development of a Tsunami Warning and Mitigation System for the Indian Ocean. Pairs, 2005.
- [76] Liu M B, Liu G R, Zong Z, et al. Smoothed particle hydrodynamics for numerical simulation of underwater explosions [J]. Computational Mechanics, 2003, 30(2); 106-118.
- [77] G R Liu, M B Liu 著. 韩旭, 杨刚, 强洪夫, 译. 光滑粒子流体动力学——一种无网格粒子法 [M]. 长沙: 湖南大学出版社, 2005.
- [78] Levin B V, Trubnikov V A. On possibility of surface wave generation by a seaquake-like source [R]. CMT, 1987; 81-83.
- [79] George Pararas-Carayannis. The Tsunami generation from the eruption of the volcano of Santorin in the BRONZE AGE [J]. Science of Tsunami Hazards, The International Journal of The Tsunami Society, 1988, 6(1); 23-31.
- [80] Efimov V V, Kulikov E A, Rabinovich A B, et al. Waves in the marginal areas of the ocean [M]. Leningrad; Gidrometeoizdat, 1985.
- [81] Rabinovich A B. Long gravity waves in the ocean; capture, resonance, leaking [M]. St. Petersburg; Gidrometeoizdat, 1993.
- [82] E Pelinovsky, T Talipova, A Kurkin, et al. Nonlinear mechanism of tsunami wave generation by atmospheric disturbances [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2001, (1); 243-250.
- [83] Rabinovich, Monserrat S. Generation of meteorological tsunamis (large amplitude seiches) near the Balearic and Kuril Islands [J]. Natural Hazards, 1998, 18; 27-55.
- [84] Akylas T R. On excitation of long nonlinear water waves by a moving pressure distribution [J]. J. Fluid Mech. , 1984, 141; 455-466.
- [85] Grimshaw R, Pelinovsky E, Tian, X. Interaction of Solitary Wave with an External Force [J]. Physica. D. , 1994, 77; 405-433.
- [86] Steven N Ward, Erik Asphaug. Impact tsunami — Eltanin [J]. Deep-Sea Research II, 2002, 49; 1073-1079.

- [87] Karl V Steinbrugge, Rodrigo Flores A. The Chilean Earthquakes of May, 1960: A Structural Engineering Viewpoint [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1963, 53(2):225-307.
- [88] S Nakamura, Katada — Hatasaki, Shirahama. On audible Tsunami on the coast , Wakayama[J]. Science of Tsunami hazards ,The international Journal of The tsunami society, 1988, 6(1):5-11.
- [89] Srinivas Tadepalli. Costas Emmanuel Synolakis, Model for the leading waves of tsunamis[J]. Physical review letters, 1996, 77(10): 2.
- [90] Yuichiro Tanioka, Generation of Tsunamis in the Okhotsk Sea Caused by the 1994 Great Kuril Earthquake[J]. Pure appl. geophys. 2000, 157:977-988.
- [91] Nakamura K, Arai K. A Small Tsunami Observed along the Coast of Okhotsk Sea Accompanied with the 1994 Hokkaido Toho—oki Earthquake[J]. Jishin, 1995, 2(48):451-461 (in Japanese).
- [92] Geist E L, Zoback, M L. Analysis of the tsunami generated by the M_w 7. 8 1906 San Francisco earthquakes[J]. Geology, 1999, 27:15-18.
- [93] Earthquake, Tsunamis. Frequently Asked Questions & 12/2004 Asian Event Ellen Prager [M]. PhD . Storm Center Communications, Inc.