

海啸波作用下岸滩演变与床沙组成变化研究综述

陈杰^{1,2}, 蒋昌波^{1,2}, 邓斌^{1,2}, 隆院男^{1,2}

(1. 长沙理工大学水利工程学院, 湖南 长沙 410004; 2. 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410004)

摘要: 从海啸波作用下岸滩演变、床沙组成变化、建筑物周围淘刷和数值模拟研究4个方面, 总结分析了国内外的研究现状和最新进展, 指出可控环境下的实验和数值模拟研究相对较少、床沙组成变化缺乏关注、建筑物周围局部冲刷机理认识不足、缺少多尺度数值模拟计算等是当前研究存在的主要不足。在特大型波浪水槽内开展实验研究、发展多尺度混合数学模型、完善海啸波作用下的泥沙输移计算理论等是未来研究取得突破的关键方向。

关键词: 海啸; 岸滩演变; 床沙变化; 局部冲刷; 数值模拟

中图分类号: TV14; G353.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2013)05-0750-09

由于海啸的巨大灾害性, 国内外众多学者对于海啸及其相关问题开展大量研究。目前中国对海啸研究还处于起步阶段, 研究成果有限, 主要集中在地震学^[1]、防灾减灾角度^[2]和水动力研究方面^[3-8]。除张振克等^[9]就国际海啸沉积研究进展进行初步总结与展望, 陈杰^[10]和蒋昌波等^[11-13]开展海啸波作用下岸滩演变系列研究外, 国内对海啸作用下泥沙运动、岸滩演变的实验研究和数值模拟鲜有报道。国外对海啸开展广泛的研究工作, 取得许多研究成果, 然而目前仍多以海啸的水动力研究为主。

海啸具有强大破坏力, 不仅表现在通过高水位淹没和浪涌冲击海边地势低平地区, 而且海啸还会引起大范围的泥沙运动, 造成巨大的岸滩侵蚀和淤积变化^[14-15]。但是, 以往的研究常常忽视海啸所裹挟大量泥沙沉积物带来的巨大破坏力。海啸所经之处的公路、大堤、桥梁等建筑物即使没有被海啸冲毁, 也可能因为建筑物基础被海啸强烈淘刷而可能坍塌或损坏, 或因为大量泥沙淤积在各种工程设施上, 严重影响正常使用, 使得工程报废^[16-18]。海啸作用下泥沙运动研究是泥沙运动学的重要组成部分之一, 开展海啸研究, 仅研究海浪的形状或高度是不够的, 应该考虑到海啸引起的泥沙运动和岸滩演变。

因此, 本文对海啸作用下的泥沙运动与岸滩演变研究进行总结与分析, 为今后海啸相关研究工作的开展提供借鉴和参考。

1 海啸波作用下岸滩演变

近岸地区泥沙运动和岸滩演变问题, 国内外众多学者开展了大量的研究^[19-22]。总结发现, 目前众多的海岸泥沙运动和岸滩演变的研究多集中在风浪、涌浪、潮流或风暴潮作用下, 对海啸波作用下的研究相对较少。

目前海啸波作用下岸滩演变研究多集中在现场调研方面^[23-28]。但是现场的波况、地形、泥沙等情况相当复杂, 而且大多数时候缺乏足够的初始地形、泥沙来源、波况等数据。即使不考虑现场调研高额成本、数

收稿日期: 2012-10-08; 网络出版时间: 2013-08-14

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20130814.1037.010.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51239001); 高等学校博士学科点专项科研基金资助课题(20124316120003)

作者简介: 陈杰(1982-), 男, 广西桂林人, 讲师, 博士, 主要从事河流、海岸动力过程及其模拟技术研究。

E-mail: chenjie166@163.com

通信作者: 蒋昌波, E-mail: jcb36@vip.163.com

据观测困难等不利因素,由于复杂的波波相互作用、三维地形、建构物等各种因素的影响,对海啸作用下泥沙运动和岸滩演变机理的理解有很大局限。因此,开展可控环境下的实验研究和数值模拟是解决以上困难最有效的办法。

现阶段仅 Kobayashi 和 Lawrence^[29]、Tsujiimoto 等^[30]、Alsina 等^[31]、Young 等^[32-33]、Xiao 等^[34]、Ca^[35]、Sumer 等^[36]、陈杰^[10]和蒋昌波等^[11-12]开展海啸波作用下岸滩演变实验研究工作。实验结果显示,海啸波作用下地形发生明显的冲淤变化。海啸波的作用可分为上爬和回落两个过程,上爬过程中上冲的水流底部只携带了少量的泥沙,并没有引起剧烈的岸滩变化。冲刷主要发生在回落的时候,高速回落的水流冲走了大量的泥沙,滩肩迅速形成冲刷坑。同时回落水流在离岸区发生水跃现象,水跃处形成淤积沙坝。为此 Ca^[35]设计了专门的实验,研究海啸回流所产生的冲刷。现阶段的实验研究很好地再现了海啸冲淤过程,有助于理解海啸波作用下岸滩演变机理,但仍有如下不完善之处:

(1) 最初的海啸研究认为海啸波的形状为孤立波,这可以解释实际观测到的海啸波经过跨洋传播后能量衰减很小和波形基本不变的现象。因而在大多数情况下,海啸的实验室研究工作中大多采用孤立波作为入射波^[29-34,36]。但是从更多的地震海啸实际观测中发现多数海啸波是由一个大波峰和一个大波谷组成,形状像“N”,例如:1993年9月1日的尼加拉瓜海啸;1994年爪哇岛海啸等。Tadepalli 和 Synolakis^[37]将其称为N波(N-Wave),并最先给出了N波的一般表达式。从大量关于海啸的报道中可以发现,在海啸到来之前多数目击者称曾看到海岸线后退的现象,但经典的孤立波理论无法解释这一现象。对于深海地震来说,特别是沿着断层面上错动为特征的“倾滑型”地震,形成的海面波动为N波。在多数情况下,N波比孤立波能更好地模拟海啸波形态与特征,因而今后实验研究中应更多考虑采用N波作为入射波^[4,10-12]。

(2) 现有实验研究均没有考虑比尺问题^[10-12,29-36]。在实验室波浪水槽内,海啸波的水动力尺度均比实际有所减小,受造波机性能和模型沙选择的限制,实验很难考虑比尺和相似准则。要解决实验研究中的比尺和相似问题,在特大型波浪水槽内开展海啸实验是未来研究的趋势。

(3) 现有实验均在概化岸滩上进行,例如概化为单一坡度^[29-30,32-36]、1:13~1:11组合坡^[31]或1:10~1:20组合坡^[10-12]。海岸类型均考虑沙质海岸,因而实验中地形的铺设全部采用无粘性沙^[10-12,29-36],其实验用沙的中值粒径 d_{50} 范围为0.18~0.48 mm。因此今后实验研究中,可考虑采用其他岸滩概化形式或采用实际岸滩,并考虑其他海岸类型。

2 海啸波作用下床沙组成变化

近岸地区泥沙级配情况是海岸动力环境中非常重要的因素,水动力特性、岸滩形状及其相应泥沙粒径是一个相互作用统一体,岸滩形状及其相应泥沙粒径会随着水动力条件的改变而改变。但是现阶段海啸实验研究更关注于岸滩形态的变化,较少关注海啸波作用下非均匀泥沙的运动以及床沙级配调整过程。床沙组成变化过程之所以受到关注,因为破坏力巨大的海啸波使得水动力特性的实测非常困难,只能根据海啸过后岸滩上的床沙变化情况来反演和推导整个海啸波的水动力过程^[25-28]。

陈杰^[10]和蒋昌波等^[12]等在1/10和1/20的组合坡度上进行海啸波作用下的岸滩剖面 and 床沙组成变化实验研究,斜坡采用不均匀无粘性沙堆砌而成。发现海啸淤积区域顶层泥沙的平均粒径呈现增加趋势,这与 Paris 等^[38]2004年在印尼苏门答腊岛西班达灾区的海啸现场调研结果一致。同时还发现海啸波作用下的沙质岸滩演变及其床沙级配调整规律呈现出与规则波和非规则波作用下不同的特点^[11]。Goto 等^[39]、Richmond 等^[40]、Phantuwongraj 和 Choowong^[41]开展现场钻探获取土层泥沙分布情况研究来分析历史海啸。由于研究地区遭受过海啸和风暴潮两种动力过程的袭击,因此必须解决如何区分海啸淤积和风暴潮淤积的问题。通过对比分析海啸淤积和风暴潮淤积的现场观测结果,指出海啸冲淤过程中床沙级配调整过程有着与风暴潮不同的特点^[39-41]。因此,海啸波作用下床沙组成变化分析应该引起更多的关注。

床沙组成变化研究是泥沙运动力学的重要问题之一,许多学者开展了大量的研究工作。总结发现,国内

对于床沙组成变化的研究主要集中在河流^[44-46]，国外的研究成果也多集中在河流中或是涌浪、风暴潮作用下^[42-43,47-49]。现阶段海啸作用下泥沙级配变化研究主要通过现场取样进行。例如，Paris等^[38]对2004年印尼苏门答腊岛西班牙达灾区的海啸进行现场调查，发现淤积是由回流造成的，并且淤积区域顶层泥沙的平均粒径呈现增加趋势。类似的工作还有 MacInnes等^[50]、Matsumoto等^[51]、Srisutam和Wagner^[52]。由于现场情况常常相当复杂，使得对机理的理解有很大局限。因此，在可控环境内开展波浪水槽实验或数值模拟，对海啸作用下床沙组成变化规律开展相应的研究是未来发展趋势。

现阶段海啸波作用下床沙级配变化实验研究鲜有报道。仅陈杰^[10]和蒋昌波等^[12]开展海啸波作用下床沙级配变化的实验研究工作，对波高和岸滩剖面进行测量，对床沙变化进行采样分析，首次在实验室波浪水槽内揭示海啸波作用下的非均匀输沙、床沙粗化这一独特现象。由于其实验组次有限，同时缺少流场、悬沙浓度、输沙率等关键数据的测量，因而无法开展泥沙起动受力分析、有效分析海啸波对岸滩侵蚀作用的力学机制。同时也无法验证窦国仁、van Rijn等提出的波浪作用下泥沙起动及挟沙力等计算公式是否适用于海啸波作用下的泥沙输移计算。

Young等^[33]在海啸波作用下的岸滩演变实验研究中设置孔隙水压力计，研究发现渗流对岸滩演变影响很大。Butt等^[53]、Elfrink和Baldock^[54]、Horn^[55]、Bakhtyar等^[56]、程永舟等^[57]均认为地下水的出渗与入渗作用对泥沙运动和岸滩演变有影响。因此今后的海啸研究除了关注波高、流速、悬沙浓度、输沙率的测量外，还应该重视孔隙水压力的测量。

悬沙浓度和悬沙粒径分布测量是分析床面粗化过程的基础^[48]。现阶段陈杰^[10]和蒋昌波等^[12]实验对床面粗化过程的理解有限，仅通过床沙采样分析揭示最终的床沙粗化结果，缺少粗细泥沙变化过程的实验记录。激光粒度分析仪可有效测量悬沙粒径分布^[41,45]，因此今后的实验研究中可考虑采用。

3 海啸波作用下建筑物周围局部淘刷

海啸波会引起剧烈的泥沙运动，一种表现就是岸滩侵蚀和淤积变化^[38]，另一种表现就是在建筑物周围产生局部淘刷，特别是建筑物基础淘刷^[16-18]。

近岸地区建筑物周围局部冲刷的研究，一直是国内外学者所关注的热点问题，许多学者开展大量的研究工作。总结发现，现阶段研究主要集中在规则波、不规则波、或涌浪、风暴潮作用下^[58]。海啸波属于频散波，一般表现为一个先行波及其随后的一系列尾波，作用可分为上爬和回落两个过程。其水动力特性有着与规则波或不规则波、涌浪或风暴潮不同的特点，因而海啸波作用下的泥沙运动和局部冲刷特性也会不同^[37,59]。

现阶段对海啸波作用下建筑物周围局部冲刷的研究，国内尚未见报道。国外仅见 Kato等^[60-61]、Yeh等^[62]、Tonkin等^[63]和 Nakamura等^[64-65]分别对海啸波作用下的圆形和方形墩柱的局部冲刷问题开展研究。墩柱周围局部冲刷机理已经得到了很好的阐述，但是近岸地区建筑物形式多样，例如潜堤、防波堤、海堤、沿海公路等，海啸波作用下这些建筑物周围局部冲刷机理有待深入研究。

4 海啸波作用下岸滩演变数值模拟

随着现场调研和实验研究广泛开展，海啸波作用下的泥沙运动和岸滩演变的数值模拟研究也随之开展起来。相比于河流和波浪作用下的数值模拟，现阶段海啸波作用下岸滩剖面演变和泥沙运动的数值模拟相对较少^[13,65-75]。建立海啸波作用下岸滩演变数学模型需要两个基础：一是准确模拟海啸波传播、上爬和回落过程的水流模型；二是海啸波作用下的泥沙运动数学模型。

现有的岸滩演变数学模型中，水流模型主要分为3类：①基于浅水方程模型^[66-71]；②基于 Boussinesq 方程模型^[13,72-73]；③基于 N-S 方程^[65,74]或 RANS 方程^[75]模型。海啸波属于频散波，浅水方程只是对海啸波

的一阶近似,虽然对海啸波到达时间和最大波高能给出比较准确的预报,但对第一波后波形的预报存在较大误差。采用水深积分形式的 Boussinesq 模型可以很好地预报海啸的速度剖面、波峰形状以及在大洋尺度频率色散累计效应。但是海啸在向岸传播过程中,随着水深变浅,波高增加,非线性作用越来越强。经典的 Boussinesq 方程模型局限于弱非线性,而在很多实际情况中,非线性效应却是很强的。当海啸波到达浅水,在海滩开始爬高的时候,波处于快速演化状态,弱非线性 Boussinesq 模型不能有效地描述这一过程。为完善模型的非线性和色散性,就需要对经典的 Boussinesq 方程进行改进。完全非线性的 Boussinesq 方程,能够较好地预测海啸的到达时间和最大波高,并能较好地模拟先行波及其随后的一系列尾波,可较完整地反映海啸的物理性质,揭示各个阶段发生的真实的物理现象。但是海啸波到达岸边后,会发生强烈的波浪破碎和射流,或者遇到障碍物产生复杂的三维流动结构,浅水方程和 Boussinesq 方程这类二维水深积分模型无法很好描述,但这些地区均是泥沙冲淤剧烈的地段。基于 N-S 方程或 RANS 方程的三维模型,加上自由表面跟踪方法(如 MAC 方法,VOF 方法和 Level Set 方法等),可以细致地模拟波浪破碎过程中强烈的射流、卷吸和水气掺混等复杂的多相流现象。但是精细模拟需要较高的计算条件,只能针对局部问题进行数值分析。

最近 Fujima 等^[76-77]提出基于二维模型耦合三维模型的海啸混合模型模拟方法,以此解决多尺度数值模拟计算问题,为今后研究提供全新的科学思路。其唯一不足的是紊流模型仅采用亚格子模型,有待继续改进。随后, Sitanggang 和 Lynett^[78], Narayanaswamy 等^[79]分别将 Boussinesq 方程和 RANS 方程、SPH 和 Boussinesq 方程耦合,模拟波浪从深水至浅水传播变形过程,很好地解决多尺度数值模拟计算问题,效果良好。海啸波从产生到传播至近岸地区属于大尺度问题,但是建筑物周围的局部冲刷属于小尺度问题,发展多尺度混合数学模型是解决以上难题的有效方法。

海啸作用下的岸滩演变数值模拟大多采用求解对流扩散方程和地形变化方程的方法进行^[65-73],其中泥沙模型主要采用 Takahashi 提出的泥沙经验公式、Bagnold 能量模型、van Rijn、Ribberink、Engelund 和 Hansen、Meyer-Peter 和 Müller 等泥沙经验公式,泥沙沉降速度计算采用 Rubey、Fromme、van Rijn 等提出的经验公式。传统经验公式大多来源于小流速和低浓度情况,例如 van Rijn 公式适用于流速小于 2 m/s,浓度小于 150 kg/m³的情况。海啸波在近岸地区流速可达 10 m/s 甚至更大^[71],在这种情况下传统的泥沙经验公式是否适用有待考证。Li 和 Huang^[71]等运用 3 组实验数据和 1 组海啸现场观测结果对 Bagnold、Engelund 和 Hansen、Bijker、Ackers 和 White、Yang 以及 van Rijn 提出的泥沙经验公式进行对比分析。研究发现这 6 个经验公式计算结果与海啸实验数据均吻合良好,但是仅 Bagnold 和 van Rijn 经验公式计算结果与现场数据基本吻合。大量传统的泥沙经验公式是否适用于海啸波作用下的大流速、高浓度情况有待继续讨论,海啸波作用下的泥沙输移计算理论需要不断的丰富与完善。

5 结论与展望

(1) 现阶段国内对海啸的研究大多数从地震学、地学和防灾减灾角度出发。从海岸动力学与泥沙研究角度出发,多以海啸波传播的数值模拟研究为主。海啸作用下泥沙运动和岸滩演变的研究国内尚处于起步阶段。国外多集中在现场调研方面,目前仅少部分学者开展海啸波作用下的泥沙运动和岸滩演变实验研究。在特大型波浪水槽内开展海啸实验是未来研究的趋势,实验中入射波应更多考虑采用 N 波,并考虑采用多种岸滩概化形式或实际岸滩以及其他海岸类型。研究过程中除了关注波高、流速、悬沙浓度、输沙率、地形变化外,还不应该忽视孔隙水压力和悬沙粒径分布的测量。

(2) 现阶段国内外对床沙组成变化的研究多集中于河流中或是涌浪、风暴潮作用下,海啸作用下研究工作目前多在现场进行,相关的实验室研究工作才刚起步。对海啸堆积物研究是反演和推算历史海啸的基础,因而海啸波作用下床沙组成变化分析应该引起更多关注。

(3) 现阶段海啸对建筑物周围淘刷研究均集中在墩柱,其局部冲刷机理已经得到很好的阐述。但是其他建筑物的研究尚未见报道,因而海啸波作用下建筑物周围局部冲刷机理有待深入研究。

(4) 现阶段国内主要是对河流和波浪作用下泥沙运动和岸滩演变开展数值模拟研究, 或是对海啸波的传播变形过程进行数值模拟, 海啸作用下岸滩演变和泥沙级配变化的数值模拟研究国内目前处于起步阶段, 目前国外也仅少部分学者开展研究。多尺度混合数学模型的研究与运用是未来海啸研究的趋势。传统的泥沙经验公式是否适用于海啸波作用下的大流速、高浓度的情况有待继续研究。海啸波对岸滩破坏作用的力学机制有待解决, 海啸波作用下的泥沙输移计算理论需要不断的丰富与完善。

综上所述, 现阶段对海啸波作用下泥沙运动和岸滩演变的研究虽然已取得不少成就, 但是该研究目前正处于起步和发展阶段, 同时由于其问题的复杂性, 仍有众多领域有待深入研究。因此, 掌握海啸作用下泥沙运动和岸滩演变的内在规律, 开展相应的实验研究和数值模拟是今后的研究重点。

参考文献:

- [1] 陶春辉, 戴黎明, 孙耀, 等. 印尼附近海域地震海啸发生的构造背景综述[J]. 海洋学研究, 2008, 6: 59-69. (TAO Chunhui, DAI Liming, SUN Yao, et al. Summary on the tectonic setting of the area around Indonesia where earthquake tsunami happened [J]. Journal of Marine Sciences, 2008, 6: 59-69. (in Chinese))
- [2] 温瑞智, 公茂盛, 谢礼立. 海啸预警系统及我国海啸减灾任务[J]. 自然灾害学报, 2006, 6: 1-7 (WEN Ruizhi, GONG Maosheng, XIE Lili. Development of tsunami warning system and disaster reduction requirements in China [J]. Journal of Natural Disasters, 2006, 6: 1-7. (in Chinese))
- [3] 祝会兵, 于颖, 戴世强. 海啸数值计算研究进展[J]. 水动力学研究与进展, 2006, 11: 714-729. (ZHU Huibing, YU Ying, DAI Shiqiang. The research progress in numerical simulation of tsunami models [J]. Journal of Hydrodynamics, 2006, 11: 714-729. (in Chinese))
- [4] 赵曦. 海啸波生成、传播与爬高的数值模拟[D]. 上海: 上海交通大学, 2011. (ZHAO Xi. Numerical simulation of generation, propagation and runup of tsunamis [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2011. (in Chinese))
- [5] 王岗, 董国海. 滑坡海啸引起港池振荡的实验研究[C]//第十四届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集. 北京: 海洋出版社, 2009: 692-695. (WANG Gang, DONG Guohai. The experimental study of harbor oscillation by landslide tsunami [C]//Proceedings of the 14th China Ocean Engineering Conference. Beijing: China Ocean Press, 2009: 692-695. (in Chinese))
- [6] 王俊. 海岸红树林与海啸波相互作用的实验研究[J]. 广东水利电力职业技术学院学报, 2011, 9(3): 1-4. (WANG Jun. Experimental study on interactions of tsunami wave with coastal mangrove forest [J]. Journal of Guangdong Technical College of Water Resources and Electric Engineering, 2011, 9(3): 1-4. (in Chinese))
- [7] 王登婷, 王锦, 刘清君. 孤立波特性的实验室模拟[J]. 海洋工程, 2012, 30(2): 54-57. (WANG Dengting, WANG Jin, LIU Qingjun. Characteristics of solitary wave simulation in laboratory [J]. The Ocean Engineering, 2012, 30(2): 54-57. (in Chinese))
- [8] 蒋昌波, 王瑞雪, 陈杰, 等. 非淹没刚性植物对孤立波传播变形影响实验研究[J]. 长沙理工大学学报: 自然科学版, 2012, 9(2): 50-56. (JIANG Changbo, WANG Ruixue, CHEN Jie, et al. Laboratory investigation on solitary wave transformation through the emergent rigid vegetation [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology: Natural Science, 2012, 9(2): 50-56. (in Chinese))
- [9] 张振克, 谢丽, 杨达源, 等. 国际海啸沉积研究进展与展望[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2010, 30(6): 132-140. (ZHANG Zhenke, XIE Li, YANG Dayuan, et al. Progress in the study of tsunami deposits in the past 20 years [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2010, 30(6): 132-140. (in Chinese))
- [10] 陈杰. 海啸波作用下岸滩剖面演变规律研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2011. (CHEN Jie. Study of Beach Profile Changes under tsunami waves [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2011. (in Chinese))
- [11] 蒋昌波, 陈杰, 程永舟, 等. 海啸波作用下泥沙运动: I; 岸滩剖面变化分析[J]. 水科学进展, 2012, 23(5): 665-672. (JIANG Changbo, CHEN Jie, CHENG Yongzhou, et al. Study of sediment transport by tsunami waves: I; Beach profile evolution [J]. Advances in Water Science, 2012, 23(5): 665-672. (in Chinese))
- [12] 蒋昌波, 陈杰, 程永舟, 等. 海啸波作用下泥沙运动: II; 床沙组成变化分析[J]. 水科学进展, 2012, 23(6): 802-807. (JIANG Changbo, CHEN Jie, CHENG Yongzhou, et al. Study of sediment transport by tsunami waves: II; Sorting of sand grains on seabed [J]. Advances in Water Science, 2012, 23(6): 802-807. (in Chinese))

- [13] 蒋昌波,陈杰,程永舟,等. 海啸波作用下泥沙运动: III: 数学模型的建立与验证[J]. 水科学进展, 2013, 24(1): 91-97. (JIANG Changbo, CHEN Jie, CHENG Yongzhou, et al. Study of sediment transport by tsunami waves: III: Numerical model development and verification [J]. Advances in Water Science, 2013, 24(1): 91-97. (in Chinese))
- [14] UMITSU M, TANAVID C, PATANAKANOG B. Effects of landforms on tsunami flow in the plains of Banda Aceh, Indonesia, and Nam Khem, Thailand [J]. Marine Geology, 1993, 20: 135-156.
- [15] SRINIVASALU S, THANGADURAI N, SWITZER A, et al. Erosion and sedimentation in Kalpakkam (N Tamil Nadu, India) from the 26th December 2004 tsunami [J]. Marine Geology, 2007, 240: 65-75.
- [16] MAHESHWARI B K, SHARMA M L, NARAYAN J P. Geotechnical and structural damage in Tamil Nadu, India, from the December 2004 Indian Ocean tsunami [J]. Earthquake Spectra, 2006, 22: 475-493.
- [17] LUKKUNAPRASIT P, RUANGRASSAMEE A. Building damage in Thailand in the 2004 Indian Ocean tsunami and clues for tsunami-resistant design [J]. The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering, 2008, 1: 17-30.
- [18] PARIS R, WASSMER P, SARTOHADI J, et al. Tsunamis as geomorphic crises: Lessons from the December 26, 2004 tsunami in Lhok Nga, West Banda Aceh (Sumatra, Indonesia) [J]. Geomorphology, 2009, 104: 59-72.
- [19] BUTT T, RUSSELL P E. Hydrodynamics and cross-shore sediment transport in the swash-zone of natural beaches: A review [J]. Journal of Coastal Research, 2000, 16: 255-268.
- [20] ELFRINK B, BALDOCK T. Hydrodynamics and sediment transport in the swash zone: A review and perspectives [J]. Coastal Engineering, 2002, 45(3/4): 149-167.
- [21] 张向东, 曹广学. 波浪作用下的泥沙问题研究进展[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2009, 32(12): 1900-1904. (ZHANG Xiangdong, CAO Guangxue. Progress of research on sediment movement in wave boundary layer [J]. Journal of Hefei University of Technology, 2009, 32(12): 1900-1904. (in Chinese))
- [22] 陈子燊, 于吉涛, 罗智丰. 近岸过程与海岸侵蚀机制研究进展[J]. 海洋科学进展, 2010, 28(2): 250-257. (CHEN Zishen, YU Jitao, LUO Zhifeng. Progresses on study of nearshore processes and coastal erosion mechanisms [J]. Advances in Marine Science, 2010, 28(2): 250-257. (in Chinese))
- [23] ATWATER B F. Evidence for great Holocene earthquakes along the outer coast of Washington State [J]. Science, 1987, 236: 942-944.
- [24] GEIST E, PARSONS T. Probabilistic analysis of tsunami hazards [J]. Nature Hazards, 2006, 37: 277-314.
- [25] SMITH D E, FOSTER I D L, LONG D, et al. Reconstructing the pattern and depth of flow onshore in a palaeotsunami from associated deposits [J]. Sedimentary Geology, 2007, 200: 362-371.
- [26] SOULSBY R L, SMITH D E, RUFFMAN A. Reconstructing tsunami run-up from sedimentary characteristics: A simple mathematical model [C]// KRAUS N C, ROSATI J D. Coastal Sediment 2007. Reston: Am Soc of Civ Eng, 2007:1075-1088.
- [27] MORTON R A, GOFF J A, NICHOL S L. Hydrodynamical implications of textural trends in sand deposits of the 2004 tsunami in Sri Lanka [J]. Sedimentary Geology, 2008, 207: 56-64.
- [28] CHOOWONG M, MURAKOSHI N, HISADA K, et al. 2004 Indian Ocean tsunami inflow and outflow at Phuket, Thailand [J]. Marine Geology, 2008, 248: 179-192.
- [29] KOBAYASHI N, LAWRENCE A. Cross-shore sediment transport under breaking solitary waves [J]. Journal of Geophysical Research, 2004, 109, C030047.
- [30] TSUJIMOTO G, YAMADA F, KAKINOKI T. Time-space variation and spectral evolution of sandy beach profiles under tsunami and regular waves [C]// Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference, Vancouver: ISOPE, 2008: 523-527.
- [31] ALSINA J M, FALCHETTI S, BALDOCK T E. Measurements and modelling of the advection of suspended sediment in the swash zone by solitary waves [J]. Coastal Engineering, 2009, 56(5/6): 621-631.
- [32] YOUNG Y L, WHITE J A, XIAO H, et al. Liquefaction potential of coastal slopes induced by solitary waves [J]. Acta Geotechnica, 2009, 4(1): 17-34.
- [33] YOUNG Y L, XIAO H, MADDUX T B. Hydro- and morpho-dynamic modeling of breaking solitary waves over sand beach Part I: Experimental study [J]. Marine Geology, 2010, 269: 107-118.
- [34] XIAO H, YOUNG Y L, PRÉVOST J H. Parametric study of breaking solitary wave induced liquefaction of coastal sandy slopes

- [J]. *Ocean Engineering*, 2010, 37(17/18): 1546-1553.
- [35] CA V T, YAMAMOTO Y, CHARUSROJTHANADECH N. Improvement of prediction methods of coastal scour and erosion due to tsunami back-flow [C]//Proceedings of the Twentieth International Offshore and Polar Engineering Conference. Beijing: ISOPE, 2010: 1053-1062.
- [36] SUMER B M, SEN M B, KARAGALI I, et al. Flow and sediment transport induced by a plunging solitary wave [J]. *Journal of Geophysical Research*, 116, C01008. [doi:10.1029/2010JC006435, 2011]
- [37] TADEPALLI S, SYNOLAKIS C E. The run-up of N-waves on sloping beaches [J]. *Proceedings of the Royal Society of London: Ser A*, 1994, 445: 99-112.
- [38] PARIS R, LAVIGNE F, WASSMER P, et al. Coastal sedimentation associated with the December 26, 2004 tsunami in Lhok Nga, west Banda Aceh(Sumatra,Indonesia) [J]. *Marine Geology*, 2007, 238: 93-106.
- [39] GOTO K, MIYAGI K, KAWAMATA H, et al. Discrimination of boulders deposited by tsunamis and storm waves at Ishigaki Island, Japan [J]. *Marine Geology*, 2010, 269: 34-45.
- [40] RICHMOND B M, WATT S, BUCKLEY M, et al. Recent storm and tsunami coarse-clast deposit characteristics, southeast Hawai'i [J]. *Marine Geology*, 2011, 283(1/2/3/4): 79-89.
- [41] PHANTUWONGRAJ S, CHOOWONG M. Tsunamis versus storm deposits from Thailand [J]. *Natural Hazards*. [doi: 10.1007/s11069-011-9717-8, 2011]
- [42] ÇELIKOĞLU Y, YÜKSEL Y, KABDAŞLI M S. Longshore sorting on a beach under wave action [J]. *Ocean Engineering*, 2004, 31(11/12): 1351-1375.
- [43] ÇELIKOĞLU Y, YÜKSEL Y, KABDAŞLI M S. Cross-shore sorting on a beach under wave action [J]. *Journal of Coastal Research*, 2006, 22(3): 487-501.
- [44] 刘金梅,王士强,王光谦. 河流冲刷过程中表层床沙粗化对不平衡输沙的影响[J]. *水科学进展*, 2000, 11(3):229-235. (LIU Jinmei, WANG Shiqiang, WANG Guangqian. Effect of coarsening surface bed material on non-equilibrium sediment transport process during river degradation [J]. *Advances in Water Science*, 2000, 11(3):229-235. (in Chinese))
- [45] 牛占,和瑞勇,李静,等. 激光粒度分析仪应用于黄河泥沙颗粒分析的实验研究[J]. *泥沙研究*, 2002(5): 6-15. (NIU Zhan, HE Ruiyong, LI Jing, et al. Application of laser granule-size instrument to the sediment in Yellow River [J]. *Journal of Sediment Research*, 2002(5): 6-15. (in Chinese))
- [46] 钟德钰,王光谦,丁贇. 沙质河床冲刷过程中床沙级配的模拟[J]. *水科学进展*, 2007, 18(2): 223-229. (ZHONG Deyu, WANG Guangqian, DING Yun. Simulation of bed load graing in alluvial rivers with sand bed [J]. *Advances in Water Science*, 2007, 18(2): 223-229. (in Chinese))
- [47] GRASSO F, MICHALLET H, BARTHÉLEMY E. Experimental simulation of shoreface nourishments under storm events; A morphological, hydrodynamic, and sediment grain size analysis [J]. *Coastal Engineering*, 2011, 58(2): 184-193.
- [48] OKAYASU A, KATAYAMA H. Field experiments on temporal change of suspended sediment concentration and grain size distribution in surf zone [C]// Chiba ;Proceedings of the 27th International Conference on Coastal Engineering, 2000;3359-3372.
- [49] UDO K, MANO A. Backshore coarsening processes triggered by wave-induced sand transport; The critical role of storm events [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2011, 35(11): 1269-1280.
- [50] MACINNES B T, BOURGEOIS J, PINEGINA T K, et al. Tsunami geomorphology: Erosion and deposition from the 15 November 2006 Kuril Island tsunami [J]. *Geology*, 2009, 37(11): 995-998.
- [51] MATSUMOTO D, SHIMAMOTO T, HIROSE T, et al. Thickness and grain-size distribution of the 2004 Indian Ocean tsunami deposits in Periya Kalapuwa Lagoon, eastern Sri Lanka [J]. *Sedimentary Geology*, 2010, 230: 95-104.
- [52] SRISUTAM C, WAGNER J F. Tsunami sediment characteristics at the Thai Andaman Coast [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2010, 167(3): 215-232.
- [53] BUTT T, RUSSELL P, TURNER I. The influence of swash infiltration-exfiltration on beach face sediment transport; Onshore or offshore [J]. *Coastal Engineering*, 2001, 42: 35-52.
- [54] ELFRINK B, BALDOCK T. Hydrodynamics and sediment transport in the swash zone: A review and perspectives [J]. *Coastal Engineering*, 2002, 45: 149-167.
- [55] HORN D P. Measurements and modelling of beach groundwater flow in the swash-zone: A review [J]. *Continental Shelf Research*,

- 2006, 26(5): 622-652.
- [56] BAKHTYAR R, BARRY D A, LI L, et al. Modeling sediment transport in the swash zone: A review [J]. *Ocean Engineering*, 2009, 36: 767-783.
- [57] 程永舟, 蒋昌波, 潘昀, 等. 波浪渗流对泥沙起动的影响 [J]. *水科学进展*, 2012, 23(2): 258-263. (CHENG Yongzhou, JIANG Changbo, PAN Yun, et al. Effect of wave induced seepage force on incipient sediment motion [J]. *Advances in Water Science*, 2012, 23(2): 258-263. (in Chinese))
- [58] SUMER B M, WHITEHOUSE R J S, TøRUM A. Scour around coastal structures: A summary of recent research [J]. *Coastal Engineering*, 2001, 44: 153-190.
- [59] SYNOLAKIS C E. The runup of solitary waves [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1987, 185: 523-545.
- [60] KATO F, SATO S, YEH H. Large-scale experiment on dynamic response of sand bed around a cylinder due to tsunami [J]. *Coastal Engineering Journal*, 1999, 46: 956-960.
- [61] KATO F, TONKIN S, YEH H, et al. The grain-size effects on scour around a cylinder due to tsunami runup [C]//*Proceedings of International Tsunami Symposium*. Seattle: ITS, 2001: 905-918.
- [62] YEH H, KATO F, SATO S. Tsunami scour mechanisms around a cylinder. G T. [C]//HEBENSIREIT G T. *Tsunami Research at the End of a Critical Decade*. [S.l.]: Kluwer Academic Publishers, 2001: 33-46.
- [63] TONKIN S, YEH H, KATO F, et al. Tsunami scour around a cylinder [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2003, 496: 165-192.
- [64] NAKAMURA T, KURAMITSU Y, MIZUTANI N. Tsunami scour around a square structure [J]. *Coastal Engineering Journal*, 2008, 50(2): 209-246.
- [65] NAKAMURA T, MIZUTANI N, YIM S C. A three-dimensional coupled-sediment interaction model with bed-load/suspended-load transport for scour analysis around a fixed structure [J]. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 2009, 131(3): 1-9.
- [66] KABDASLI M S, OZGUR KIRCA V S, AYDINGAKKO A. 2-D numerical modelling of bed profile changes due to tsunami effects on near shore coasts: Kadikoy case study [J]. *Water Science & Technology*, 2005, 51(11): 231-238.
- [67] SIMPSON G, CASTELLTORT S. Coupled model of surface water flow, sediment transport and morphological evolution [J]. *Computers & Geosciences*, 2006, 32: 1600-1614.
- [68] PRITCHARD D, DICKINSON L. Modelling the sedimentary signature of long waves on coasts: Implications for tsunami reconstruction [J]. *Sedimentary Geology*, 2008, 206: 42-57.
- [69] APOTSOS A, GELFENBAUM G, JAFFE B. Process-based modeling of tsunami inundation and sediment transport [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116: F01006. [doi:10.1029/2010JF001797]
- [70] ONTOWIRJO B, PARIS R, MANO A. Modeling of coastal erosion and sediment deposition during the 2004 Indian Ocean tsunami in Lhok Nga, Sumatra, Indonesia [J]. *Natural Hazards*, 2013, 65(3): 1967-1979.
- [71] LI L L, HUANG Z H. Modeling the change of beach profile under tsunami waves: A comparison of selected sediment transport models [C]//*Proceedings of the Sixth International Conference on Asian and Pacific Coasts Hong Kong: Asian and Pacific Coasts*, 2011: 183-190.
- [72] SHIMOZONO T, SATO S, TAJIMA Y. Numerical study of tsunami run-up over erodible sand dunes [C]//*Conference Proceeding Paper*. New Orleans: ASCE, 2000: 1089-1102.
- [73] XIAO H, YOUNG Y L, PRÉVOST J H. Hydro- and morpho-dynamic modeling of breaking solitary waves over a fine sand beach: Part II: Numerical simulation [J]. *Marine Geology*, 2010, 269(3/4): 119-131.
- [74] NAKAMURA T, SOLOMON C, YIM S C. A nonlinear three-dimensional coupled fluid-sediment interaction model for large seabed deformation [J]. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 2011, 133(3): 1-14.
- [75] HSIAO S C, LIN T C. Tsunami-like solitary waves impinging and overtopping an impermeable seawall: Experiment and RANS modeling [J]. *Coastal Engineering*, 2010, 57: 1-18.
- [76] FUJIMA K, MASAMURA K, GOTO C. Development of the 2d/3d hybrid model for tsunami numerical simulation [J]. *Coastal Engineering Journal*, 2002, 44(4): 373-397.
- [77] FUJIMA K. Effect of a submerged bay-mouth breakwater on tsunami behavior analyzed by 2D/3D hybrid model simulation [J]. *Nature Hazards*, 2006, 39: 179-193.

- [78] SITANGGANG K I, LYNETT P J. Multi-scale simulation with a hybrid Boussinesq-RANS hydrodynamic model [J]. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 2010, 62(9): 1013-1046.
- [79] NARAYANASWAMY M, CRESPO A J C, GÓMEZ-GESTEIRA M, et al. SPPhysics-FUNWAVE hybrid model for coastal wave propagation [J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2010, 48(1): 85-93.

Review of beach profile changes and sorting of sand grains by tsunami waves*

CHEN Jie^{1,2}, JIANG Changbo^{1,2}, DENG Bin^{1,2}, LONG Yuannan^{1,2}

- (1. *School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410004, China*;
2. *Key Laboratory of Water-Sediment Sciences and Water Disaster Prevention of Hunan Province, Changsha 410004, China*)

Abstract: Tsunami is one of the worst marine disasters. Coastal lowland areas can be seriously flooded as the result of high tsunami waves, which cause a significant threat to human life and property. High tsunami waves can move an extensive amount of coastal sediments and cause a significant change of beach profiles in flooded regions. This paper summarizes the status quo and advances in the study of tsunami waves from the perspective of beach profile evolution, sand grains sorting, scour around coastal structures and numerical simulation. In general, it has been a lack of experimental study and numerical simulation of tsunami impacts in a controllable manner. Specifically, it has been a lack of concern on sorting of sand grains by tsunami waves and insufficient understanding of the mechanism of scour around structures, as well as a lack of multi-scale numerical simulation. The experimental study in the giant wave flume, the development of multi-scale hybrid mathematical models and the improvement on the sediment transport computation theory should be the focus points in tsunami studies. This review study provides a useful reference for the future research.

Key words: tsunami; beach profile evolution; sorting of sand grains; scouring; numerical simulation

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51239001) and the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education (No. 20124316120003).