

海啸波引起的近岸房屋局部冲刷试验

陈杰^{1,2}, 段自豪¹, 蒋昌波^{1,2}, 高清洋¹, 管喆¹

(1. 长沙理工大学水利工程学院, 湖南长沙 410114; 2. 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 湖南长沙 410114)

摘要:基于波浪水槽, 分别考虑独栋和房屋群两种情况, 开展海啸波引起的近岸房屋局部冲刷试验研究, 分别建立了独栋房屋情况下相对最大冲刷深度与海啸波相对越顶高度关系式和房屋群情况下局部最大冲刷深度与海啸波波高、房屋宽度、房屋高度、房屋数量、房屋间的中心间距的关系式。试验结果表明在海啸波越顶水流产生的水跌以及海啸波通过房屋时产生的扰流共同作用下, 房屋周围, 特别是海侧会产生明显的局部冲刷坑; 回流水流水跌是局部冲刷坑产生的主要因素, 扰流是次要因素。所建立的关系式揭示了最大局部冲刷深度与海啸波、房屋尺寸、房屋布局的内在联系。
关键词:波浪水槽; 海啸波; 局部冲刷; 近岸房屋; 试验研究

中图分类号: TV14 文献标志码: A 文章编号: 1006-7647(2017)01-0033-05

Experimental study of local scour around seaside houses by tsunami waves//CHEN Jie^{1,2}, DUAN Zihao¹, JIANG Changbo^{1,2}, GAO Qingyang¹, GUAN Zhe¹ (1. School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China; 2. Key Laboratory of Water, Sediment Sciences and Flood Hazard Prevention of Hunan Province, Changsha 410114, China)

Abstract: An experimental study of local scour around a seaside single house and a group of houses by tsunami waves was carried out in a wave tank. The experimental results show that local scour occurs around the house, especially on the sea side due to a hydraulic drop generated by tsunami wave overtopping and the disturbed flow generated by tsunami waves passing through the house. The hydraulic drop is the main cause of local scour and disturbed flow is the secondary cause. For a single house, the empirical relationship between the relative maximum scour depth and relative overtopping height of the tsunami wave was established. For a group of houses, the empirical relationships between the maximum local scour depth and the tsunami wave height, house width, house height, the number of houses, and center spacing of houses were established. The internal relation between the maximum local scour depth and the incident wave height, house size and layout was determined.

Key words: wave tank; tsunami wave; local scour; seaside house; experimental study

近年来海啸灾害频发, 不仅造成了大量的近岸建筑物坍塌或损毁, 而且严重威胁着沿岸人民的生命安全^[1]。

我国以往的海啸研究多集中在海啸成因、海啸波传播以及防灾减灾等方面^[1]。大量现场调研表明, 海啸波引起的岸滩冲刷危害巨大, 很多近岸建筑物不是被海啸波的冲击水流损毁, 而是因海啸波引起的建筑物局部冲刷而坍塌或损毁^[2-3]。因此, 近年国内外学者开始逐渐关注海啸波作用下的泥沙运动现象, 先后开展了海啸波作用下的泥沙起动和推移质运动^[4], 岸滩剖面变化的试验研究^[5-8]和数值模拟^[9-10], 墩柱^[11-13]、沿海公路^[14]、潜堤^[15]和直立堤^[16]的局部冲

刷等研究工作。近期的海啸现场调研发现, 近岸地区的房屋基础产生了较严重的局部冲刷^[2-3], 但冲刷机理不明确。为弥补现有研究不足, 本文拟基于波浪水槽试验, 开展海啸波引起的近岸房屋局部冲刷研究, 为海啸防灾减灾工作提供科学依据。

1 试验概述

试验在长沙理工大学波浪水槽内进行, 水槽长 40.0 m, 宽 0.5 m, 高 0.8 m, 试验布置如图 1 所示。在水槽内建立三维直角坐标系, 以斜坡起点为原点, 波浪传播方向为 x 方向, 水槽宽度方向为 y 方向, 垂直向上方向为 z 方向。

考虑到造波机性能和水槽尺寸,几何比尺采用 1 : 200。试验采用断面尺寸为 10.0 cm×10.0 cm 的混凝土方块来模拟房屋,方块埋入岸滩中并露出水面 1.5 cm,其中心距水陆分界线 0.5 m,对应原型尺寸为 20.0 m×20.0 m、高度为 3.0 m 的单层正方形房屋,房屋中心距离海边 100 m。试验分别考虑独栋房屋和房屋群两种情况,共设计 3 种方案,房屋模型间距取 0.2 m,对应实际距离为 40.0 m(图 1)。

参考蒋昌波等^[7-8]和陈杰等^[14-16]的试验,考虑到水槽长度的限制等因素,将海岸地形简化为 1 : 10 和 1 : 20 组合斜坡,在试验水深 $h = 35.0$ cm 处变坡。斜坡采用筛分好的无黏性细沙堆成,估算其粒径以保证试验条件下泥沙会发生起动。对细沙进行 5 次随机取样,筛分试验结果显示细沙平均中值粒径 $d_{50} = 0.369$ mm,平均不均匀系数 $C_u = d_{60}/d_{10} = 2.82$,平均曲率系数 $C_c = d_{30}^2/(d_{10}d_{60}) = 1.117$ 。沙密度 $s_d = 2.51 \times 10^3$ kg/m³。试验采用孤立波来模拟海啸波。考虑到海啸波常是多次侵袭,因此进行多个波逐个作用^[4-6]。预备试验和已有试验研究成果表明,6 个波作用后地形基本不发生变化,可认为达到平衡状态,且水槽边壁对试验地形变化结果无影响。试验工况如表 1 所示,入射波波高分别选取 6 cm、9 cm 和 12 cm,对应实际海啸波高分别为 12 m、18 m 和 24 m。

表 1 研究工况					
组次	房屋布置形式	入射波高 H/cm	组次	房屋布置形式	入射波高 H/cm
1	无房屋	6.02	7	双栋房屋 (模型布置 2)	6.21
2		9.22	8		8.98
3		12.08	9		11.85
4	独栋房屋 (模型布置 1)	6.19	10	四栋房屋 (模型布置 3)	6.00
5		9.22	11		9.24
6		12.18	12		11.88

波高测量采用加拿大 WG-50 型浪高仪和超声波水位计,仪器位置随组次而调整。浪高仪最小测量周期为 1.5 μs ,误差为 0.4%,采样频率为 50 Hz。超声波水位计采样频率为 20 Hz,测量精度为 0.2 mm。地形测量采用 URI-IIU 超声波地形仪,用已知地形对仪器进行校准后使用,测量精度为 1 mm。试验同时采用分辨率为 1920×1080 的 Logitech C910 高清摄像头从水槽侧面进行拍摄记录,视频的采样频率为 15 Hz。

试验首先将斜坡铺好整平,安装好房屋模型,水槽灌满水,浸泡沙质斜坡 12 h 以后,再缓慢将水位降低到试验水深,约 30 min 后开始造波,测量波高数据。待水面充分平静后,进行下一次造波,共进行 6 个波的逐个作用,最后测量最终三维地形。正式试验开始前开展大量预备试验,对造波机可靠性和重复性、地形变化重复性、仪器设备的可靠性进行验证。完成一个组次的试验之后,把整个斜坡的沙子全部翻动搅拌,使沙均匀混合,再重新铺好斜坡并整平,接着重复上述步骤开始下一组次试验。

2 结果分析与讨论

图 2 为波高为 12.18 cm 的 6 个孤立波(组次 6)作用后独栋房屋(模型布置 1)局部三维地形变化结果。可以看出在孤立波的作用下岸滩在 x 方向 3.2 ~ 4.5 m 范围发生冲刷并形成冲刷坑,在 2.5 ~ 3.2 m 处淤积,同时房屋模型周围产生明显的局部冲刷坑。试验录像显示,岸滩冲刷发生在水流回落时,泥沙在离岸区水跃发生处堆积,呈沙坝剖面,结果与 Jiang 等^[4-7]的试验一致。孤立波上爬阶段,波浪越过房屋模型形成水跌,同时能看见很明显的扰流现象,房屋岸侧开始出现局部冲刷坑。在孤立波回落阶段,水流迅速回落,受房屋模型的阻挡,两侧出现扰流,越顶水流则在房屋海侧的根部形成明显的水跌。在水

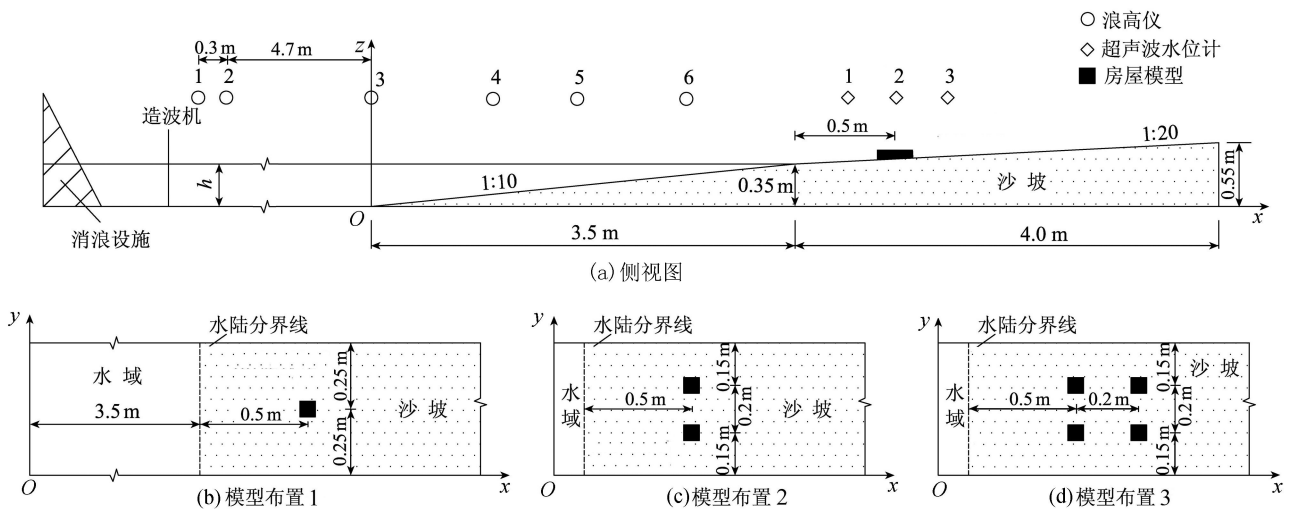


图 1 试验布置示意图

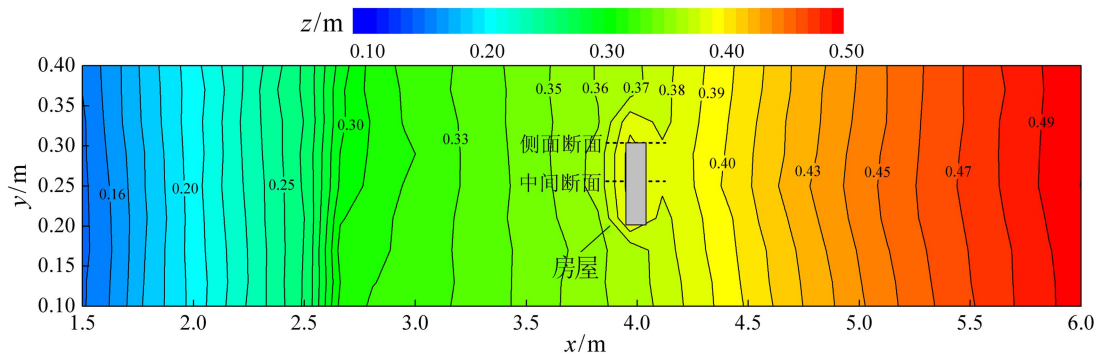


图2 波高 12.18 cm 作用下模型布置 1 局部冲刷试验结果(组次 6)

跌和扰流的共同作用下,房屋向海侧的局部冲刷坑迅速增大。2 栋和 4 栋房屋试验均呈现类似的结果,房屋的局部冲刷均是由水跌和扰流的共同作用形成的。

图 3 分别为 3 种模型布置方式下每栋房屋中心线断面的地形变化(6 个孤立波作用后的最终高程减去初始高程),其中房屋中间断面与侧面断面位置如图 2 所示。从图 3 可以看出房屋均坐落在岸滩发生冲刷的位置,特别是房屋中心线向岸和向海侧均发生了局部冲刷,向海侧的局部冲刷更为严重,且入射波波高越大,局部冲刷坑越深。在最大波高作用下,模型布置 1 房屋向海侧局部冲刷深度最大,达

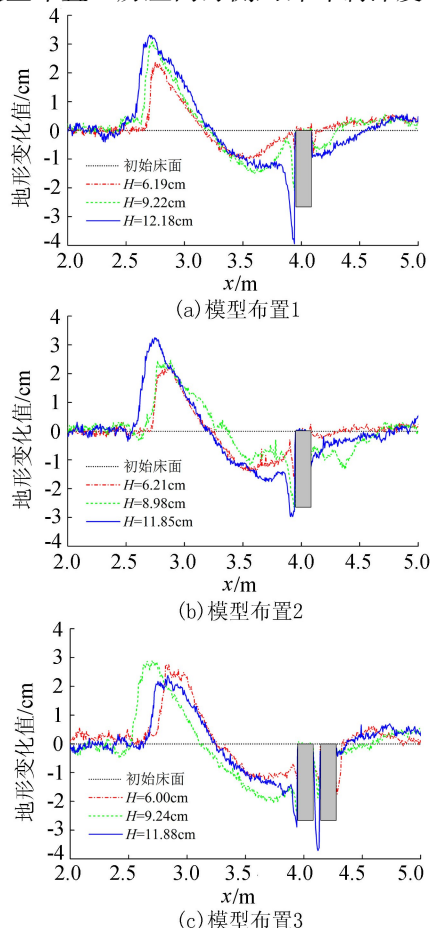


图3 房屋中间断面地形变化

到 3.9 cm;模型布置 2 房屋向海侧局部冲刷深度略小,为 2.9 cm;模型布置 3 房屋间的局部冲刷深度相对较大,达到 3.7 cm,靠海房屋的向海侧局部冲刷深度略小,为 2.8 cm。

图 4 分别为 3 种模型布置方式下房屋的侧面断面地形变化。从图 4 可以看出房屋两侧均出现局部冲刷,入射波波高越大,局部冲刷坑越深。和中间断面结果相比较,侧面断面局部冲刷明显减小。

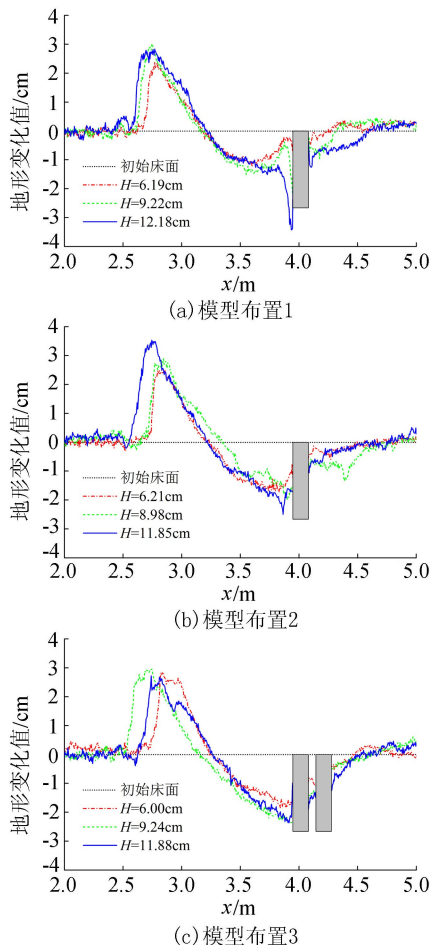


图4 房屋侧面断面地形变化

海啸波作用下引起的近岸房屋局部冲刷,会造成基础破坏,房屋倒塌,因此最大局部冲刷深度是学者们最关注的问题。最大局部冲刷深度 $z_{\max}$ 受到海

海啸波、房屋尺寸、房屋布局等共同作用的影响,试验发现其主要影响因素有海啸波波高 H 、房屋宽度 B 、房屋高度 d_w 、房屋数量 n 、房屋之间的中心间距 s ,可用下式进行描述:

$$z_{\max} = f(H, B, d_w, n, s) \tag{1}$$

根据试验观测结果,分独栋房屋和房屋群两种情况进行讨论。可采用无量纲参数对海啸波作用下引起的独栋房屋局部最大冲刷深度进行描述:

$$\frac{z_{\max}}{B} = f\left(\frac{H - d_w}{d_w}\right) \tag{2}$$

式中: $H-d_w$ 为海啸波的越顶高度; $z_{\max}/B$ 为相对最大冲刷深度; $(H-d_w)/d_w$ 为海啸波相对越顶高度。分别取独栋房屋中轴线和侧面局部最大冲刷深度数据,拟合得到相对最大冲刷深度与海啸波相对越顶高度的关系如图 5(a) 所示,趋势线拟合度为 0.845, $z_{\max}/B$ 与 $(H-d_w)/d_w$ 呈良好的自然对数关系:

$$\frac{z_{\max}}{B} = 0.27 \ln\left(\frac{H - d_w}{d_w}\right) - 0.156 \tag{3}$$

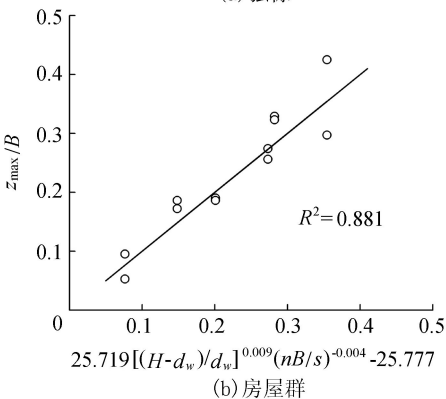
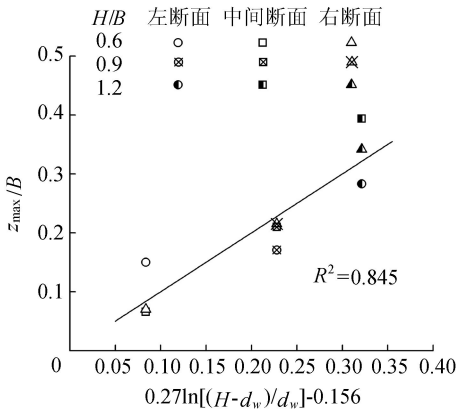


图5 房屋局部最大冲刷深度与入射波高、房屋尺寸、房屋数量的关系

可以看出随着海啸波相对越顶高度 $(H-d_w)/d_w$ 的增加,相对最大冲刷深度 $z_{\max}/B$ 随之增大。试验结果表明,房屋的局部冲刷是由水跌和扰流共同作用形成的,海啸波越顶水流产生的水跌是局部冲刷坑产生的主要因素,扰流是次要因素,这与 Arikawa

等^[17]的防波堤试验结果一致。海啸波的越顶高度越高,产生的水跌强度越大,局部冲刷坑的深度越深。基于式(3)计算本试验条件下组次 4~6 独栋房屋局部最大冲刷深度,并与实测值进行对比,平均相对误差如表 2 所示,计算结果较为合理。绘制房屋局部最大冲刷深度与入射波高、房屋高度、房屋数量的关系如图 6 所示。若增加房屋高度,如 $H = 25\text{ cm}$, $d_w = 3\text{ cm}$ 时,根据式(3)预测房屋最大局部冲刷深度为 3.82 cm。结合图 6(a) 可以看出,当房屋高度不变时,房屋局部最大冲刷深度随波高的增大而增大;当波高不变时,最大局部冲刷深度随房屋高度的增加而减小。

表2 公式(3)试验值与预测值对比

组次	试验值/cm	拟合值/cm	平均相对误差/%
4	0.95	0.95	0
5	1.99	2.36	15.68
6	3.40	3.26	-4.29

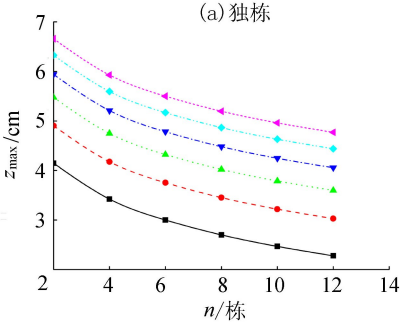
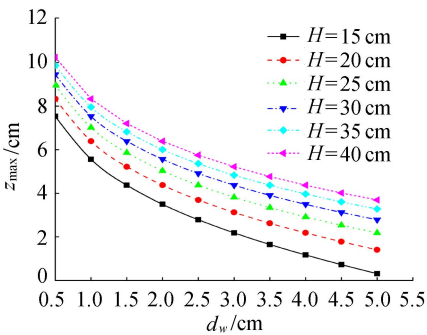


图6 房屋局部最大冲刷深度与入射波高、房屋高度、房屋数量的关系

针对房屋群情况,可采用无量纲参数对海啸波作用下引起的房屋群局部最大冲刷深度进行描述:

$$\frac{z_{\max}}{B} = f\left(\frac{H - d_w}{d_w}, \frac{nB}{s}\right) \tag{4}$$

式中 nB/s 表征房屋分布情况。分别取两栋和四栋房屋局部最大冲刷深度数据,绘制关系图,建立了局部最大冲刷深度与海啸波波高 H 、房屋宽度 B 、房屋高度 d_w 、房屋数量 n 、房屋间的中心间距 s 的关系如图 5(b) 所示,趋势线拟合度为 0.881,呈良好的幂函数关系:

$$\frac{z_{\max}}{B} = 25.719[(H - d_w)/d_w]^{0.009} \cdot (nB/s)^{-0.004} - 25.777 \quad (5)$$

由图 5(b)可以看出,随着海啸波相对越顶高度 $(H-d_w)/d_w$ 的增加,以及房屋数量 n 变少,房屋尺寸 B 减小,房屋间的中心间距 s 增大,即房屋分布 nB/s 越稀疏,相对最大局部冲刷深度 $z_{\max}/B$ 越大。房屋的局部冲刷是水跌和扰流共同作用的产物,随着房屋分布越来越密集,水流阻力增大,房屋越顶水流强度降低,同时房屋间的扰流强度受到一定的抑制,因此最大局部冲刷深度减小。特别是水流回落时,受到靠岸房屋的保护,靠海房屋扰流明显减弱,因此出现房屋间的局部冲刷深度相对较大,靠海房屋的向海侧局部冲刷深度相对较小的情况(图 3(c))。基于式(5)计算本试验条件下组次 7~12 最大局部冲刷深度,并与实测值比较,平均相对误差如表 3 所示,结果较为合理。绘制房屋群房屋局部最大冲刷深度与入射波高、房屋高度、房屋数量的关系如图 6(b)所示。若增加房屋数量,如 $H=25\text{ cm}$, $n=8$ 时,根据式(5)预测房屋最大局部冲刷深度为 4.02 cm 。结合图 6(b)可以看出,当房屋数量不变时,房屋局部最大冲刷深度随波高的增大而增大;当波高不变时,最大局部冲刷深度随房屋数量的增大而减小。

表 3 公式(5)试验值与计算值对比

组次	房屋布置形式	试验值/ cm	拟合值/ cm	平均相 对误差/%
7	双栋房屋 (模型布置 2)	1.79	1.59	12.58
8		2.65	2.72	2.57
9		3.61	3.51	-2.85
10	四栋房屋 (模型布置 3)	0.74	0.76	2.63
11		1.88	2.09	10.05
12		3.26	2.79	-15.41

3 结 语

在波浪水槽试验的基础上,对海啸波引起的近岸房屋局部冲刷机理开展研究。依据前人研究成果,采用无黏性细沙堆砌而成的 $1/10\sim 1/20$ 组合坡概化岸滩,选取孤立波模拟海啸波,分别考虑独栋房屋和房屋群两种情况。海啸波试验研究结果表明,在海啸波越顶水流产生的水跌以及海啸波流过房屋时产生的扰流共同作用下,房屋模型周围产生明显的局部冲刷坑,且水流回落时水跌和扰流强度更大,造成房屋向海侧局部冲刷深度相对较大。海啸波越顶水流产生的水跌是局部冲刷坑产生的主要因素,扰流是次要因素。基于本文试验数据,分别建立独栋房屋情况下相对最大冲刷深度与海啸波相对越顶

高度的关系式,房屋群情况下局部最大冲刷深度与海啸波波高 H 、房屋宽度 B 、房屋高度 d_w 、房屋数量 n 、房屋间的中心间距 s 的关系式,得到了最大局部冲刷深度与海啸波、房屋尺寸、房屋布局的内在联系,并将试验数据回代到公式中,验证其准确性。建议在海啸可能发生区域修建房屋时,其基础周围应采取防冲刷措施,以防止局部冲刷危害建筑物安全。

参考文献:

[1] 陈杰,蒋昌波,邓斌,等. 海啸作用下岸滩演变与床沙组成变化研究综述[J]. 水科学进展,2013,24(5): 750-758. (CHEN Jie, JIANG Changbo, DENG Bin, et al. Review of beach profile changes and sorting of sand grains by tsunami waves[J]. Advances in Water Science,2013, 24(5): 750-758. (in Chinese))

[2] YEH H, LI W, 2008. Tsunami scour and sedimentation [C]//Four International Conference on Scour and Erosion 2008. Tokyo: The Japanese Geotechnical Society, 2008: 95-106.

[3] FRANCIS M J, YEH H. Tsunami inundation scour of roadways, bridges and foundations [R]. Oakland: Earthquake Engineering Research Institute, 2006.

[4] JIANG C B, CHEN J, YAO Y, et al. Study on threshold motion of sediment and bedload transport by tsunami waves[J]. Ocean Engineering, 2015, 100: 97-106.

[5] KOBAYASHI N, LAWRENCE A R. Cross-shore sediment transport under breaking solitary waves [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2004, 109(3): 325-347.

[6] YOUNG Y L, XIAO H, MADDUX T. Hydro-and morpho-dynamic modeling of breaking solitary waves over a fine sand beach. Part I: Experimental study [J]. Marine Geology, 2010, 269(3): 107-118.

[7] 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))

[8] 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))

[9] 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))

(下转第 78 页)

- ZHANG Lin, et al. moisture-physical characteristics of three types of soils in Tianjin Binhai area[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2011, 39(4): 431-435. (in Chinese)
 - [15] 蔡国庆, 纪小彬. 温度对非饱和土土水特征曲线的影响研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2010, 30(增刊1): 161-165. (CAI Guoqing, JI Xiaobin. Effect of temperature on soil-water characteristic curve of unsaturated soil[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2010, 30(Sup1): 161-165. (in Chinese))
 - [16] 嵇晓雷, 杨平. 狗牙根根系形态对边坡稳定性的影响[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2013, 37(5): 531-535. (JI Xiaolei, YANG Ping. Effects of roots of bermuda grass on the stability of slopes[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 2013, 37(5): 531-535. (in Chinese))
 - [17] 张永杰, 王桂尧, 王玲, 等. 路堑边坡植被防护固土效果室内外试验[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2012, 12(3): 9-14. (ZHANG Yongjie, WANG Guiyao, WANG Ling, et al. Solidify effect of cut slope ecology protection with indoor and outdoor tests[J]. Changsha University of Science and Technology (Natural Science), 2012, 12(3): 9-14. (in Chinese))
 - [18] 吕晶, 高甲荣, 王颖, 等. 不同护坡植物对岸坡土壤性质的影响及效应分析[J]. 水土保持研究, 2010, 17(3): 101-104. (LÜ Jing, GAO Jiarong, WANG Ying, et al. Effects of different plant revetments on the soil physical feature[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2010, 17(3): 101-104. (in Chinese))
 - [19] 张雪东, 赵成刚, 刘艳. 变形对非饱和土渗透系数影响规律模拟研究[J]. 工程地质学报, 2010, 18(1): 132-139. (ZHANG Xuedong, ZHAO Chenggang, LIU Yan. Probability based model for influence of deformation on hydraulic conductivity function of unsaturated soils[J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(1): 132-139. (in Chinese))
 - [20] MUALEM Y. Hydraulic conductivity of unsaturated porous media: generalized macroscopic approach[J]. Water Resources Research, 1978, 14(2): 325-334.
 - [21] 李永乐, 刘翠然, 刘海宁, 等. 非饱和土的渗透特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(22): 3861-3865. (LI Yongle, LIU Cuiran, LIU Haining, et al. Testing study on permeability characteristics of unsaturated soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(22): 3861-3865. (in Chinese))
 - [22] 彭书生, 王永波, 盛谦, 等. 植被增加边坡降雨入渗对边坡稳定性影响研究[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(增刊1): 1274-1278. (PENG Shusheng, WANG Yongbo, SHENG Qian, et al. Study on enhancement of precipitation infiltration by vegetation and its effect on slope stability[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(Sup1): 1274-1278. (in Chinese))
- (收稿日期: 2016-07-21 编辑: 熊水斌)
- +++++
- (上接第 37 页)
- [10] 蒋昌波, 邓涯, 陈杰, 等. 孤立波作用下岸滩剖面变化成因的水动力数值分析[J]. 水动力研究与进展: A 辑, 2014, 29(6): 713-722. (JIANG Changbo, DENG Ya, CHEN Jie, et al. Hydrodynamic numerical study on the reasons of beach profile change under solitary wave[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2014, 29(6): 713-722. (in Chinese))
 - [11] 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.
 - [12] TONKIN S, YEH H, KATO F, SATO S. Tsunami scour around a cylinder[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2003, 496: 165-192.
 - [13] NAKAMURA T, KURAMITSU Y, MIZUTANI N. Tsunami scour around a square structure[J]. Coastal Engineering Journal, 2008, 50(2): 209-246.
 - [14] 陈杰, 蒋昌波, 隆院男, 等. 海啸波作用下泥沙运动: IV 建筑物局部冲刷[J]. 水科学进展, 2013, 24(6): 832-837. (CHEN Jie, JIANG Changbo, LONG Yuannan, et al. Study of sediment transport by tsunami waves: IV. local scour around structures[J]. Advances in Water Science, 2013, 24(6): 832-837. (in Chinese))
 - [15] 陈杰, 肖桂振, 蒋昌波, 等. 潜堤对海啸波作用下岸滩剖面变化影响试验[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2014, 11(3): 58-64. (CHEN Jie, XIAO Guizhen, JIANG Changbo, et al. Experimental study on sandy beach profile changes by tsunami waves under effect of submerged breakwater[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science), 2014, 11(3): 58-64. (in Chinese))
 - [16] 陈杰, 杨武, 蒋昌波, 等. 海啸波作用下直立堤局部冲刷试验研究[J]. 海洋通报, 2015, 34(6): 616-622. (CHEN Jie, YANG Wu, JIANG Changbo, et al. Experimental study of local scour around vertical breakwater by tsunami waves[J]. Marine Science Bulletin, 2015, 34(6): 616-622. (in Chinese))
 - [17] ARIKAWA T, SATO M, SHIMOSAKO K, et al. Failure mechanism of Kamaishi breakwaters due to the Great East Japan Earthquake Tsunami[J]. Coastal Engineering Proceedings, 2012, 1(33): 16.
- (收稿日期: 2016-06-15 编辑: 郑孝宇)