

文章编号: 1000-5641(2019)04-0202-10

强潮河口海岸冲蚀对海堤安全的影响研究

李 路^{1,2}, 刘新成^{1,2}, 宋永港^{1,2}, 赵庚润^{1,2}

(1. 上海市水利工程设计研究院有限公司, 上海 200061;
2. 上海滩涂海岸工程技术研究中心, 上海 200061)

摘要: 采用杭州湾北岸典型冲蚀岸段——华电灰坝大堤堤前高分辨率的地形资料, 分析了该岸段近年来的岸滩变化, 并通过建立长江口杭州湾波浪数学模型, 结合相关设计规范计算了该岸段现状地形下的波浪要素, 分析了不同滩地冲蚀深度对堤前波浪要素、海堤设防高度和外坡护面的影响。计算结果表明, 在 200 年一遇设计标准下, 随着堤前滩地的冲蚀, 平均波高和波周期变化不大, 但波长和 $H_{1\%}$ 显著增加, 导致波浪爬高增加、大堤设防标准下降, 其中波长增加是导致波浪爬高增加的主要原因。此外, 随着滩地的冲蚀, 外坡护面的设计厚度显著增加, 在实际设计中应充分考虑安全富余度。

关键词: 海岸冲蚀; 海堤安全; 波浪要素; 堤顶高程; 护坡强度

中图分类号: P731.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1000-5641.2019.04.019

Study on the safety of sea dikes against coastal erosion in a strong tidal estuary

LI Lu^{1,2}, LIU Xin-cheng^{1,2}, SONG Yong-gang^{1,2}, ZHAO Geng-run^{1,2}

(1. Shanghai Water Engineering Design and Research Institute Co. Ltd.,
Shanghai 200061, China;
2. Shanghai Engineering Research Center of Coastal Zones, Shanghai 200061, China)

Abstract: High resolution bathymetric data along the Huadianhuiba sea dike, a typical eroding coast on the northern coastline of Hangzhou Bay, was collected to analyze seabed evolution. A wave model covering the Changjiang Estuary and Hangzhou Bay was built to obtain the wave elements along the sea dike. Then, sensitivity analyses were carried out to calculate the impacts of coastal erosion on the wave elements, the required crest elevation, and the intensity of the seaside dike revetment. The results indicate that under a design condition of a 200 year return period with increasing water depth in front of the sea dike, the mean wave height and wave period are almost stable, while the wave length and $H_{1\%}$ are significantly increased. The increased wave length, due to the topography deepening, is found to be a major factor for the subsequent wave run-up, which reduces the defense standard of sea dikes at crest elevation. In addition, the required intensity of the seaside

收稿日期: 2018-07-29

基金项目: 上海市科学技术委员会科研项目(14DZ1205200, 18DZ1206400); 上海市海洋局科研项目(沪海科 2014-05, 沪海科 2017-05)

第一作者: 李 路,男,高级工程师,博士,主要从事河口海岸动力学研究. E-mail: liliuswedri@gmail.com.

dike revetment increases significantly with the depth of water in front of the sea dike. This indicates that a safety margin should be accounted for in design of the sea dike.

Keywords: coastal erosion; safety of sea dike; wave elements; crest elevation; intensity of the seaside dike revetment

0 引言

位于长江口和杭州湾的一线海堤,是上海抵御风暴潮灾害的第一道防线,肩负着全市防汛安全的重要任务。河口地区的海堤建立在滩地之上,受人类活动和自然灾害的影响,堤前滩地的稳定具有较大的不确定性,这给海堤的安全带来较大的风险。随着三峡工程的建设和运行,长江上游来沙已急剧下降,长江口杭州湾滩地的发育演变已发生了较明显的变化,杭州湾湾口北部水域近10年来已由过去的淤积状态转为冲刷状态^[1-2];同时,近年大规模的圈围造地工程的实施,拦截了大量泥沙,使得长江口杭州湾滩地出现了局部的冲淤变化^[3-4];此外,破坏力极强的台风风暴潮等自然灾害频发,巨大的风浪可造成岸滩在短时间内迅速侵蚀,使得一线海堤及滩地的安全形势越来越严峻。2005年8月在麦莎台风侵袭下,奉贤柘林塘、华电灰坝的促淤坝体结构遭到严重损坏,化学工业区一线海堤半数丁坝群损毁,海堤外侧滩面发生剧烈冲刷,给海堤的安全造成严重威胁^[5-6]。

在长江口上游来沙减少以及圈围工程拦截大量泥沙的背景下,加上台风等不确定性因素的影响,长江口、杭州湾北岸冲蚀型滩地前沿有继续冲蚀的可能,需要系统分析一线海堤应对滩地冲蚀的防讯能力,为提高海堤的防讯安全水平提供有效对策。本文选取杭州湾北岸奉贤段的华电灰坝大堤及其前沿滩地为研究对象,分析滩地冲蚀对海堤安全的影响。

1 研究区域概况

杭州湾是一个典型的喇叭形强潮河口湾,在强劲的潮流动力作用下,湾内冲淤强烈,地貌演变复杂^[7]。根据1990—2014年的实测地形资料,杭州湾北岸奉贤岸段的金汇港至中港岸段是典型的冲蚀岸段,0 m、2 m和5 m等深线全线内移,岸滩坡度变陡,高滩丧失,岸滩侵蚀严重^[8]。华电灰坝大堤位于杭州湾北岸奉贤段的中部,奉贤碧海金沙东侧,处于上述典型冲蚀岸段中(见图1)。华电灰坝大堤长约4.65 km,轴线呈西南—东北走向。圈围大堤采用复式斜坡堤,大堤向海侧建有促淤坝,该促淤坝工程为永久性工程,除了满足促淤功能外,同时是圈围大堤保滩工程的一部分(见图2)。

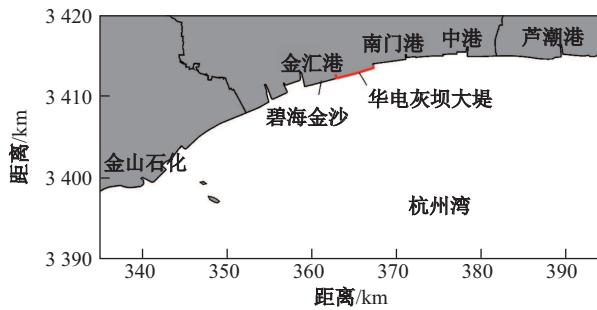
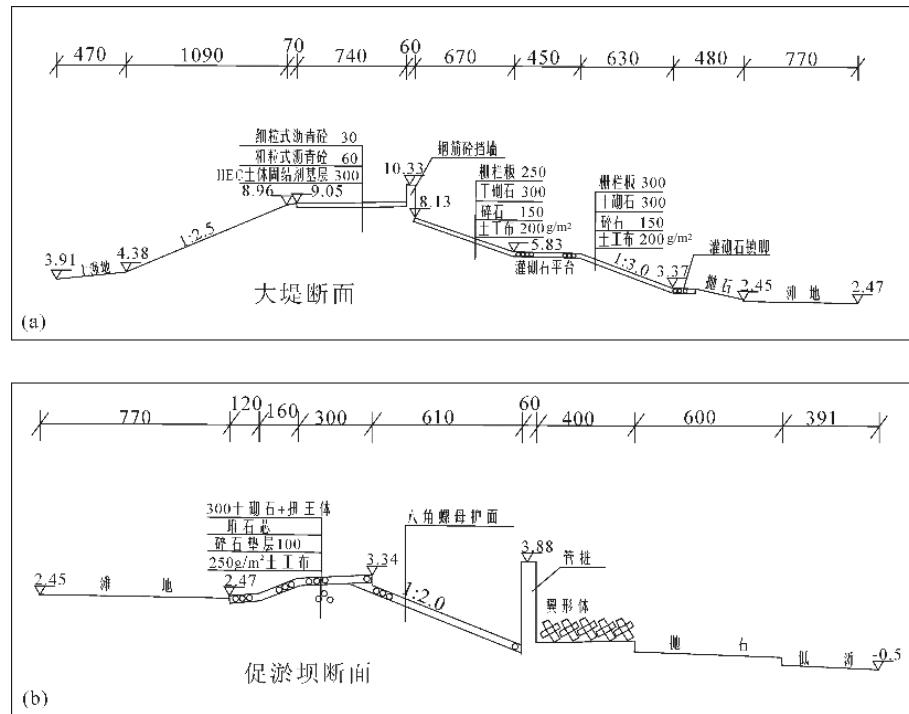


图1 杭州湾北岸岸线和华电灰坝大堤位置

Fig. 1 The coastline of the north coast of Hangzhou Bay and position of the Hudianhuiba (HDHB) sea dike



注: 长度单位为 cm, 厚度单位为 mm, 高程单位为 m

图 2 华电灰坝大堤(a)和促淤坝(b)断面

Fig. 2 The cross sections of the HDHB sea dike (a) and the siltation-promoting project (b)

从华电灰坝大堤前沿 2005 和 2009 年的 1:6 000 高分辨率的地形资料可以看出, 0 m、2 m、5 m 等深线基本与大堤平行(见图 3a). 相比 2005 年, 2009 年圈围大堤 2 m 和 5 m 等深线较 2005 年明显向岸后退, 表明堤前滩地存在明显的冲刷现象. 从大堤提前纵向水深变化来看, 自西向东各断面均发生了不同程度的冲刷, 冲刷最明显的范围在促淤坝前 20~250 m, 300 m 以外水深变化较小(见图 3(b-f)). 大堤两侧堤前滩地的冲刷程度强于中段, 最大冲刷深度约 1.5~2.5 m. 5 m 等深线后退约 60~80 m, 2 m 等深线后退约 15~50 m, 0 m 等深线基本没有变化. 根据 2009—2014 年实测资料以及分形理论分析^[9], 华电灰坝岸段在 2009 年后有进一步冲刷的趋势, 岸滩的持续冲刷对海堤的安全构成严重威胁.

2 波浪模型的建立

2.1 模型介绍

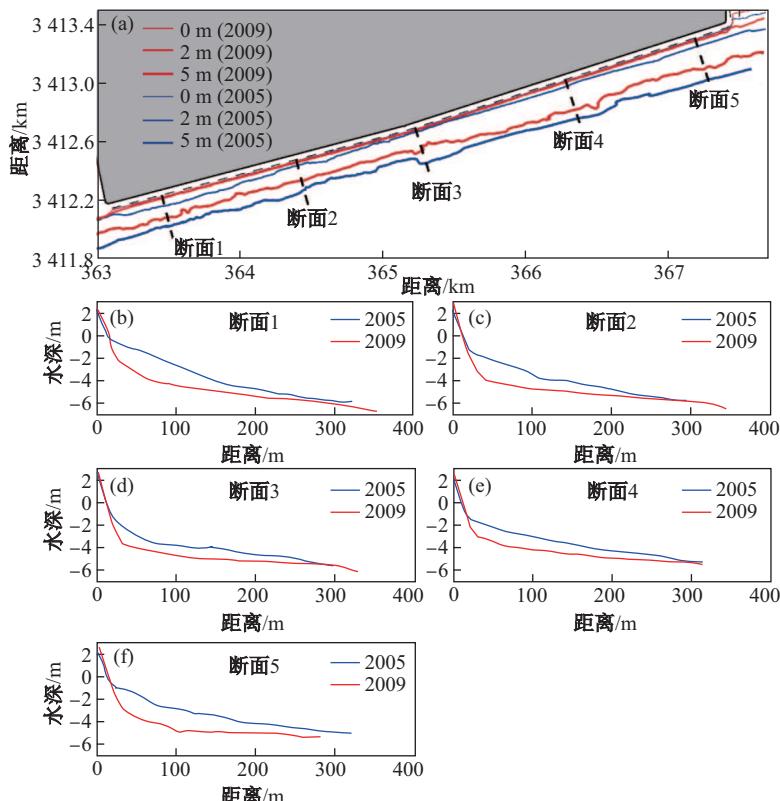
本研究关注的重点是滩地冲蚀后对海堤前沿的波浪要素以及海堤安全的影响. 杭州湾口外为开敞海域, 湾内岛屿众多、地形复杂, 外海波浪传入时受舟山群岛的影响较大. 同时堤前滩地水深较浅, 水位和潮流对波浪参数的影响较大, 应充分考虑水位和潮流的作用. 本研究采用丹麦水利研究所(DHI)的 MIKE21 Spectral Wave(SW) 模型^[10]对长江口、杭州湾及其附近水域的波浪场进行计算. 该模型已广泛应用于大洋^[11]、河口^[12]、海岸^[13-15]和潟湖^[16]的波浪模拟和研究.

MIKE21 SW 模型根据波作用守恒原理模拟近海及海岸地区风生浪和涌浪的生长、衰减以及水深变化引起的折射和浅水变形, 可以考虑水位和流速对波浪场的影响, 并方便与 MIKE21 FM 水动力模型进行耦合. 模型基于无结构网格, 能较好地拟合岸线和岛屿. 模型基

于如下波作用力守恒方程^[10]:

$$\frac{\partial}{\partial t}N + \frac{\partial}{\partial x}c_xN + \frac{\partial}{\partial y}c_yN + \frac{\partial}{\partial \sigma}c_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta}c_\theta N = \frac{S}{\sigma}. \quad (1)$$

式中, N 为波浪作用密度谱; σ 为相对角频率; θ 为波向; c_x 、 c_y 、 c_σ 、 c_θ 分别为波浪在 x 、 y 、 σ 、 θ 方向上的群速; S 表示源函数. 方程左端第1项为波能随时间的变化项, 第2、3项为波作用量的空间对流项, 第4项为由于水深变化和水流作用造成的波作用量在频域上的变化, 第5项为由水深、水流变化引起的折射; 方程右端表示能量的输入和耗散, 包括由风产生的能量输入、波-波间非线性相互作用、破波耗散、底摩阻损耗以及波浪破碎等.



注: (a) 中黑色细虚线表示促淤坝的位置, 黑色粗虚线表示纵断面位置; 滩面高程为吴淞高程

图3 2005年和2009年华电灰坝促淤坝前0、2、5 m等深线分布(a)和纵断面1—5沿程水深变化(b—f)

Fig. 3 The distributions of 0, 2, and 5 m isobaths in front of the HDHB in 2005 and 2009 (a) and the distributions of water depth along Sections 1—5 (b—f)

2.2 模型设置

波浪模型的计算范围包括整个长江口、杭州湾和邻近海域, 上游边界位于长江大通和钱塘江盐官. 长江口和杭州湾网格分辨率约 1~1.5 km, 外海开边界网格较粗, 分辨率约 15 km (见图 4a). 对奉贤岸段的网格进行加密, 并对华电灰坝大堤堤前网格进行了局部加密, 分辨率最高为 10 m (见图 4b). 模型的地形主要通过长江口杭州湾沿岸最新实测地形以及近年新出版的海图资料插值得到, 其中华电灰坝大堤堤前的水深采用 2009 年 2 月实测的高分辨率地形资料.

在近岸水深较浅的区域, 潮位变化对总水深影响较大, 在同一位置潮位较高时波浪要素也相应较大。波浪模型在计算华电灰坝大堤设计条件下的波浪参数时, 采用定常水位和定常正向风。在模拟实际过程时, 充分考虑风应力、水位和流速对波浪场的影响, 其中海表面风场采用中尺度的大气数值模式 Weather Research and Forecasting (WRF) 计算得到, 水位和流速由 MIKE21 FM 计算给出, 计算网格同波浪模型。波浪模型的开边界设置波浪可以自由传出, 避免因边界反射波浪影响计算区域。

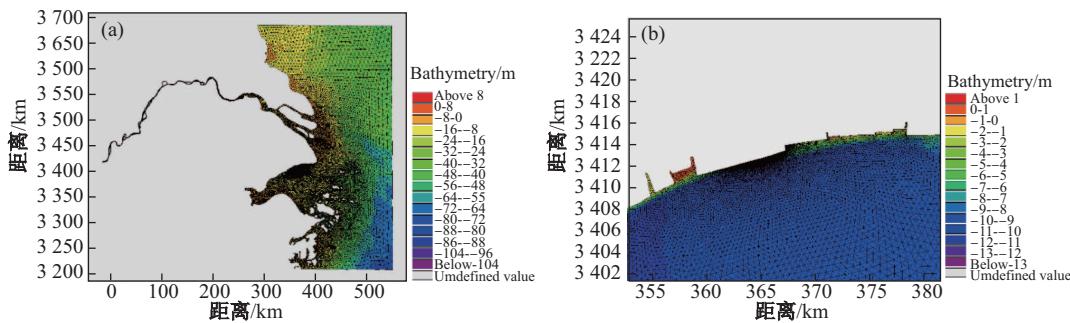


图 4 波浪模型计算范围和网格(a)和奉贤岸段局部加密网格(b)

Fig. 4 The model domain and mesh (a) and enlarged area in the Fengxian Coast (b)

2.3 模型验证

采用 2005 年对上海地区影响较大的麦莎(0509 号)和卡努(0515 号)台风期间长江口和杭州湾实测的波浪数据对建立的波浪模型进行验证。两次台风期间, 长江口杭州湾的最大风速分别出现在 8 月 6 日 12:00 和 9 月 12 日 0:00 前后, 各测站的有效波高和平均波周期总体上随风速的增大而增大(见图 5 和图 6)。麦莎台风期间, 金山卫波浪站实测最大有效波高 2.9 m, 最大平均波周期 7.5 s。卡努台风期间, 金山卫站的波浪参数整体上小于麦莎台风期间; 大戢山、嵊山、滩浒岛和余山站均不同程度的受到台风影响, 嵊山站观测到的最大有效波高约 3 m, 而其他测站观测到的最大有效波高不超过 2 m。

从波浪模型计算的两次台风过程中波浪要素来看, 有效波高和波周期量值与变化过程与观测资料整体上吻合良好, 部分时段的波高和周期与实测资料有一定误差, 有效波高平均绝对误差为 0.38 m, 波周期平均绝对误差为 0.52 s, 主要与台风风场计算的误差有关。总体上, 建立的波浪模型可应用于长江口杭州湾近岸的波浪要素的模拟计算。

2.4 计算潮位与风速

大堤堤前设计波要素根据其设防标准相应的高潮位和风速计算。华电灰坝大堤的设防标准为 200 年一遇高潮位加 12 级风下限 (32.7 m/s)。华电灰坝大堤 200 和 100 年一遇高潮位分别为 6.33 和 6.14 m (吴淞高程)^[8]。

3 滩地冲蚀对堤前波浪要素的影响

3.1 现状地形条件下堤前波浪要素计算结果分析

由于华电灰坝堤前高分辨率的地形资料较少, 本研究采用 2009 年 2 月的实测资料作为现状地形。根据《海堤工程设计规范》^[17]的相关规定, 海堤工程的设计波要素应取堤脚前约 1/2 波长处的波浪要素。根据文献 8 的研究, 该水域在 200 年一遇高潮位和 12 级风下限设计标准下的波长约 50~60 m。华电灰坝大堤和促淤坝断面如图 2 所示, 堤脚前 1/2 波长处为大

堤促淤坝前的低滩, 现状高程为 -0.5 m , 设计波要素取该位置的波浪要素.

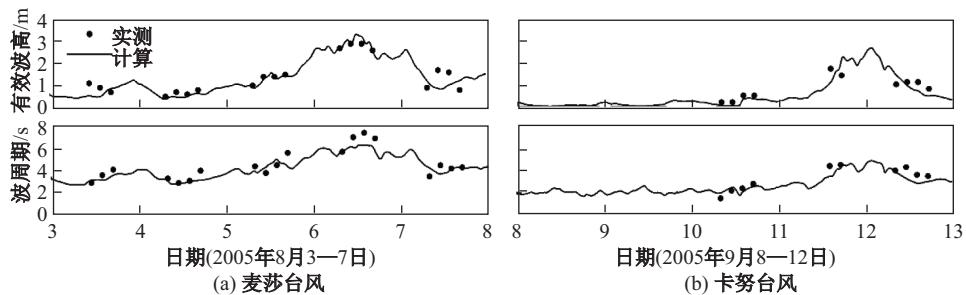


图5 麦莎台风和卡努台风期间金山卫站计算有效波高和平均波周期与实测资料比较

Fig. 5 Comparison of the observed and modeled significant wave height and period at Jinshanwei Station during 3–7 August and 8–12 September 2005

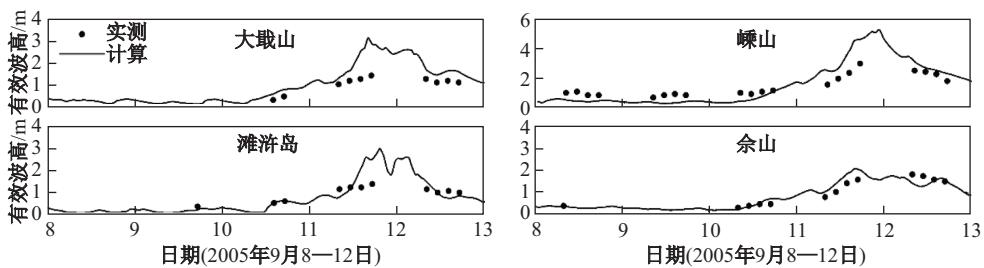


图6 卡努台风期间大戢山、嵊山、滩浒岛和余山站计算有效波高与实测资料比较

Fig. 6 Comparison of the observed and modeled significant wave height at stations during 8–12 September 2005

按照华电灰坝大堤 200 年一遇高潮位加 12 级风下限风速的设防标准, 波浪模型的水位和风速取定常, 分别设置为 6.33 m 和 32.7 m/s. 通过波浪模型计算比较发现, 波向基本与风向一致, 风向为正向和正向偏东 22.5° 下计算的波浪要素大小比较接近, 均大于风向为正向偏西 22.5° 下的波浪要素. 考虑到相同波要素条件下波浪正向入射对大堤的影响更大, 从工程设计偏安全的角度考虑, 本研究取正向入射的波浪要素分析.

根据堤前地形资料, 华电灰坝促淤坝前的等深线基本与岸线平行(见图 3a), 且促淤坝前 30 m 为低滩, 水深变化相对较缓, 波浪模型的计算结果比较稳定可靠, 因此将波浪模型的输出点取在促淤坝前 30 m 处. 由于波浪向浅水区传播时会产生浅水变形效应, 引起波高的增大或减小, 因此需要将促淤坝前 30 m 处的波浪要素进行浅水变形计算, 得到促淤坝前低滩处的波浪要素, 浅水变形按照《滩涂促淤圈围造地工程设计规范》^[18]中近距离波浪传播变形的规定计算. 考虑到促淤坝的顶高程为 3.34 m, 宽 3 m, 具有一定的消浪作用, 根据《海堤工程设计规范》^[17]中的相关规定进行潜堤消浪计算. 华电灰坝大堤现状地形条件下的设计波浪要素如下: 波周期和波长分别为 6.56 s 和 47.95 m, $H_{1\%}$ 、 $H_{13\%}$ (有效波高)和平均波高分别为 3.77、2.81 和 1.92 m(见表 1).

3.2 滩地冲刷条件下堤前波浪要素的计算结果分析

从华电灰坝大堤堤前 2005 和 2009 年的水深断面图来看(见图 3), 在促淤坝前 300~350 m 范围内, 水深小于 5~6 m 的滩地冲刷较为明显. 为了模拟在现状条件下近岸滩地进一

步冲深对波浪要素的影响, 将波浪模型中促淤坝前 500 m 范围内、水深小于 6 m 的网格水深进行修改, 修改后的水深 h_1 和现状水深 h_0 之间关系为

$$h_1 = \max(h_0 + \Delta h, -6). \quad (2)$$

其中, $\Delta h < 0$, 表示冲刷深度, 从而可以使修改水深的区域与周围相对平滑, 避免因修改水深导致的地形突变。本研究设置了 $\Delta h = -1, -2, -3, -4$ 和 -5 m, 共 5 组对比试验, 分别表示堤前滩地冲刷 1、2、3、4 和 5 m。

修改地形后采用波浪模型重新计算促淤坝前波浪要素, 并经过潜水变形和潜堤消浪计算后得到不同滩地冲刷深度下华电灰坝大堤的设计波浪要素, 计算结果如表 1 所示。华电灰坝大堤滩地从现状变化至冲深 5 m, 平均波高从 1.92 m 增至 1.96 m, 波周期从 6.56 s 减至 6.53 s, 二者变化较小。这主要是由于该水域滩地为低滩, 叠加 200 年一遇高潮位后堤前总水深较深, 水深进一步加深对平均波高和波周期影响不大。随着滩地冲刷 1 ~ 5 m, 波长分别增加 5%、9%、13%、16% 和 20%, 说明华电灰坝堤前滩地冲深对波长影响较大。不同累积频率波高随着滩地的冲刷而增加, $H_{1\%}$ 波高增幅相对较大, 随着滩地冲刷 1 ~ 5 m, 分别增加 3%、6%、8%、10% 和 12%。

表 1 200 年一遇设防标准现状地形及不同冲刷深度下的波浪要素

Tab. 1 The wave elements under current bathymetry and different erosion depths

in the 200 year return period

工况	低滩高程/m	平均波高/m	波周期/s	波长/m	$H_{1\%}/m$	$H_{4\%}/m$	$H_{13\%}/m$
现状	-0.50	1.92	6.56	47.95	3.77	3.31	2.81
冲深1 m	-1.50	1.94	6.56	50.44	3.90	3.41	2.87
冲深2 m	-2.50	1.94	6.54	52.44	3.99	3.47	2.91
冲深3 m	-3.50	1.94	6.53	54.23	4.07	3.53	2.94
冲深4 m	-4.50	1.95	6.53	55.85	4.15	3.58	2.97
冲深5 m	-5.50	1.96	6.53	57.32	4.21	3.63	3.00

4 滩地冲刷对海堤安全的影响

滩地冲刷增加了堤前波浪要素, 从而增加了波浪爬高, 很可能造成大堤的设防高度不足。另一方面, 波要素的增加加大了对护面的冲击, 很可能造成外坡护面的损毁。接下从大堤设防高度和外坡护面安全两方面定量分析滩地冲刷对海堤安全的影响。

4.1 对大堤设防高度的影响

海堤的设防高度是大堤安全与否的重要因素, 根据《海堤工程设计规范》^[17]对堤顶高程设计的规定, 堤顶高程由设计高潮(水)位、波浪爬高及安全加高 3 部分决定, 其中波浪爬高根据规范中的波浪爬高公式计算。堤前滩地冲刷引起的波浪要素增加, 将直接影响波浪爬高, 从而对海堤的设防安全产生影响。

华电灰坝大堤的设计堤顶高程为 10.33 m。在 200 年一遇设计条件下, 现状滩地下计算的波浪爬高为 2.84 m, 满足设计安全的堤顶高程为 10.17 m, 未超过设计堤顶高程(见表 2)。当堤前滩地冲深 2 m 后, 波浪爬高增至 3.06 m, 相应堤顶高程为 10.39 m, 已超过大堤设计的堤顶高程, 大堤有漫溢风险。当堤前滩地冲深 5 m 后, 波浪爬高增至 3.20 m, 相应的堤顶高程为 10.53 m, 超过设计堤顶高程 0.20 m。随着堤前滩地冲刷 1 ~ 5 m, 波浪爬高增加 5%、8%、10%、11% 和 13%, 堤顶高程增加 1%、2%、3%、3% 和 4%。随着滩地的不断冲深, 堤顶高程增加的趋势逐渐减缓,

滩地从现状变化至冲深 1 m, 堤顶高程增加 0.13 m。而滩地从冲深 4 m 变化至冲深 5 m, 堤顶高程仅增加了 0.04 m。表明堤前水深越深, 冲刷相同深度对大堤的安全风险影响越小。

表 2 200 年一遇设防标准现状地形及不同冲刷深度下的波浪爬高和设计堤顶高程

Tab. 2 The wave run-up and design crest elevation under current bathymetry and different erosion depths in the 200 year return period

工况	低滩高程/m	平均波高/m	波周期/s	波长/m	$H_{1\%}/m$	波浪爬高/m	堤顶高程/m
现状	-0.50	1.92	6.56	47.95	3.77	2.84	10.17
冲深1 m	-1.50	1.94	6.56	50.44	3.90	2.97	10.30
冲深2 m	-2.50	1.94	6.54	52.44	3.99	3.06	10.39
冲深3 m	-3.50	1.94	6.53	54.23	4.07	3.12	10.45
冲深4 m	-4.50	1.95	6.53	55.85	4.15	3.16	10.49
冲深5 m	-5.50	1.96	6.53	57.32	4.21	3.20	10.53

从 3.2 节的分析可知, 滩地的冲刷虽对平均波高和波周期影响不大, 但显著增加了浅水波长和 $H_{1\%}$ 。从波浪爬高的计算公式看, 在同一计算工况下, 对于某一固定断面, 波浪爬高由堤前水深、波长和 $H_{1\%}$ 决定。下面以华电灰坝大堤现状滩地的堤前水深、波长和 $H_{1\%}$ 为基准, 分别分析这三个因子单独增加对波浪爬高的影响。从图 7(a) 可以看出, 在波长和 $H_{1\%}$ 保持不变的情况下, 仅增加堤前水深, 波浪爬高减小; 从图 7(b) 可以看出, 增加波长或 $H_{1\%}$, 波浪爬高均增加, 并且波长增加对波浪爬高增加的贡献明显大于 $H_{1\%}$ 。由此可见, 堤前滩地冲刷后波浪爬高的增加主要是波长增加引起的。

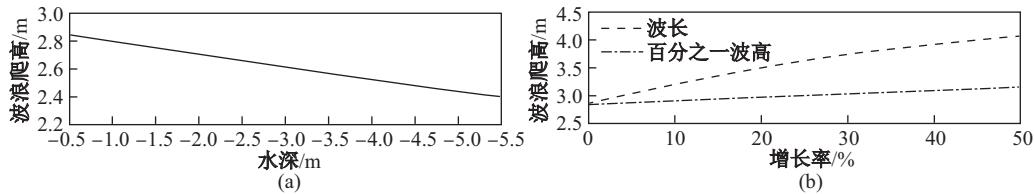


图 7 堤前水深增加 (a) 及波长 (L)、百分之一波高 ($H_{1\%}$) 增加不同百分比 (b) 对波浪爬高的影响

Fig. 7 The increased of water depth (a) and increased percentage of wave length and wave height (b) induced variations of wave run-up

滩地冲刷增加了堤前的波浪要素, 使得设计堤顶高程挡水的防御能力下降, 为了定量分析滩地冲刷对海堤防御能力的降低程度, 本文计算了 100 年一遇条件下(水位 6.14 m, 风速 30.1 m/s), 在现状滩地以及不同冲刷深度下的波浪爬高和相应的设计堤顶高程, 结果如表 3 所示。现状滩地地形条件下的波浪爬高为 2.72 m, 相应的设计堤顶高程为 9.86 m, 比 200 年一遇条件下减低 0.31 m。随着滩地的冲深, 波浪爬高和堤顶高程增加。堤前滩地冲深 5 m 时, 波浪爬高为 3.04 m, 相应的堤顶高程为 10.18 m, 与 200 年一遇条件下现状滩地的堤顶高程 10.17 m 基本一致。这表明若华电灰坝大堤堤前滩地冲深 5 m, 海堤设防高度的防御能力将从 200 年一遇下降为 100 年一遇。

4.2 对外坡护面的影响

海堤护坡结构主要为栅栏板、浆砌块石、异型块体等, 其厚度或重量的设计安全值可通过《海堤工程设计规范》^[17]计算获得。本节从设计规范中的公式出发, 通过计算比较不同滩地冲刷深度下护坡结构的设计安全值, 分析滩地冲刷对外坡护面安全的影响。

华电灰坝大堤外侧护坡为栅栏板, 上坡设计厚度为 25 cm, 下坡为 30 cm。栅栏板的厚度根据《海堤工程设计规范》^[17]计算确定。200 年一遇条件下, 华电灰坝大堤在现状滩地下的栅栏

板厚度为 25.2 cm (见表 4). 根据栅栏板厚度的计算公式, 其大小与 $H_{13\%}$ 以及堤前水深成正比, 随滩地的冲深而增加. 随着滩地冲蚀 1~5 m, 栅栏板厚度增加显著, 增幅分别为 7%, 13%, 19%, 25% 和 31%. 在 100 年一遇条件, 相同地形条件下的栅栏板厚度均小于 200 年一遇, 但量值相差较小, 均在 2 cm 以内. 当滩地冲深 1 m 后, 栅栏板厚度为 25.6 m, 已大于 200 年一遇条件下现状滩地栅栏板厚度. 这表明滩地冲蚀 1 m 引起的栅栏板设计厚度差异, 与相同地形下 100 和 200 年一遇设计标准引起的差异相近, 因此在护面的设计中应充分考虑安全富余度.

表 3 100年一遇设防标准现状地形及不同冲刷深度下的波浪爬高和设计堤顶高程

Tab. 3 The wave run-up and design crest elevation under current bathymetry and different erosion depths in the 100 year return period

工况	低滩高程/m	平均波高/m	波周期/s	波长/m	$H_{1\%}/m$	波浪爬高/m	堤顶高程/m
现状	-0.50	1.79	6.41	46.09	3.55	2.72	9.86
冲深 1 m	-1.50	1.81	6.40	48.43	3.68	2.84	9.98
冲深 2 m	-2.50	1.82	6.38	50.38	3.76	2.91	10.05
冲深 3 m	-3.50	1.82	6.37	52.11	3.83	2.97	10.11
冲深 4 m	-4.50	1.83	6.37	53.64	3.90	3.01	10.15
冲深 5 m	-5.50	1.84	6.37	55.04	3.97	3.04	10.18

表 4 200年和100年一遇标准现状地形及不同冲刷深度下的栅栏板厚度

Tab. 4 The design thickness of barrier board under current bathymetry and different erosion depths in the 200 and 100 year return periods

工况	200 年一遇	100 年一遇	cm
现状	25.2	23.9	
冲深 1 m	26.9	25.6	
冲深 2 m	28.4	27.1	
冲深 3 m	29.9	28.6	
冲深 4 m	31.4	30.1	
冲深 5 m	33.0	31.6	

5 结 论

本研究分析了华电灰坝大堤堤前的岸滩变化, 通过建立长江口杭州湾波浪数学模型, 结合相关设计规范计算了该岸段现状地形下的波浪要素, 分析了不同滩地冲蚀深度对堤前波浪要素、海堤设防高度和外坡护面的影响. 主要结论如下:

(1) 华电灰坝大堤前沿滩地是杭州湾北岸典型的冲蚀岸段, 在 200 年一遇设计标准和现状地形条件下的平均波高、 $H_{1\%}$ 波高、波周期和波长分别为 1.92 m、3.77 m、6.56 s 和 47.95 m. 随着滩地冲蚀 1~5 m, 波长分别增加 5%~20%, $H_{1\%}$ 波高增分别增加 3%~12%, 但平均波高和波周期变化不大.

(2) 在 200 年一遇设计标准下, 现状滩地下的波浪爬高为 2.84 m, 堤顶高程为 10.17 m, 随着堤前滩地冲蚀 1~5 m, 波浪爬高增加 5%~13%, 堤顶高程增加 1%~4%. 当堤前滩地冲深 2 m 以上, 现状堤顶高程不足, 大堤有漫溢风险. 堤前滩地冲蚀引起波浪爬高增加和设计堤顶高程的增加, 其主要原因是堤前浅水波长的增加. 当堤前滩地刷深 5 m, 海堤设防高度的防御能力将从 200 年一遇下降为 100 年一遇.

(3) 在 200 年一遇设计标准下, 现状滩地下的外坡栅栏板所需厚度为 25.2 cm, 随着滩地冲蚀 1~5 m, 栅栏板厚度分别增加 7%~31%, 增幅显著. 同时滩地冲蚀 1 m 引起的栅栏板厚度差

异, 与相同地形下 100 和 200 年一遇设计标准引起的差异相近。应在外坡护面安全设计中充分考虑安全富余度。

需要说明的是, 本研究的结果均基于设计高潮位, 且选取的华电灰坝断面堤前滩面高程较低。若在设计低水位或者堤前滩面高程较高的岸段, 滩地冲刷引起的波浪要素变化将更加显著, 很可能对大堤安全的影响更大。应在今后做进一步研究。

[参 考 文 献]

- [1] 黎兵. 上海近岸海域近 30 年来的地形演变和机制探讨 [J]. 上海地质, 2010, 31(3): 29-34.
- [2] 谢东风, 潘存鸿, 曹颖, 等. 近 50a 来杭州湾冲淤变化规律与机制研究 [J]. 海洋学报, 2013, 35(4): 121-128.
- [3] 李九发, 戴志军, 刘新成, 等. 长江河口南汇嘴潮流圈围工程前后水沙运动和冲淤演变研究 [J]. 泥沙研究, 2010 (3): 31-37.
- [4] 王颖, 刘桦, 张景新. 杭州湾北岸水下地形冲淤演变分析 [J]. 水道港口, 2011, 32(3): 173-178.
- [5] 肖志桥, 莫敦全, 程松明. “麦莎”台风对促淤工程的破坏分析及修复加固措施 [C]. 上海市水利学会学术年会, 2005: 323-327.
- [6] 戴志军, 张小玲, 闫虹, 等. 台风作用下淤泥质海岸动力地貌响应 [J]. 海洋工程, 2009, 27(2): 63-70.
- [7] 茅志昌, 郭建强, 虞志英, 等. 杭州湾北岸岸滩冲淤分析 [J]. 海洋工程, 2008, 26(1): 108-113.
- [8] 上海市水利工程设计研究院有限公司. 上海冲蚀性海岸防汛风险及预警研究 [R]. 上海, 2016.
- [9] 李路, 刘新成. 分形理论在杭州湾北岸岸滩演变预测中的应用 [J]. 上海水务, 2016, 32(3): 56-60.
- [10] Danish Hydraulic Institute (DHI). MIKE 21 spectral wave module. Scientific documentation[R]. Denmark, 2012.
- [11] REMYA P G, KUMAR R, BASU S, et al. Wave hindcast experiments in the Indian Ocean using MIKE 21 SW model [J]. Journal of Earth System Science, 2012, 121(2): 385-392.
- [12] 孔令双, 戚定满, 万远扬, 等. 长江口海域波浪场模拟研究 [J]. 水运工程, 2010(2): 46-49.
- [13] KURIAN N P, RAJITH K, HAMEED T S, et al. Wind waves and sediment transport regime off the south-central Kerala coast, India [J]. Natural Hazards, 2009, 49(1): 325-345.
- [14] KRISTENSEN S E, DRØNNEN N, DEIGAARD R. Hybrid morphological modelling of shoreline response to a detached breakwater [J]. Coastal Engineering, 2013, 71: 13-27.
- [15] ELISA C, ALESSIO R, ANDREA P, et al. Study of wave runup using numerical models and low-altitude aerial photogrammetry: A tool for coastal management [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2014, 149: 160-167.
- [16] RYAN J L, COLIN H, CHARITHA B P. Morphological constraints to wave-driven circulation in coastal reef-lagoon systems: A numerical study [J]. Journal of geophysical research, 2010, 115(C09021). DOI: 10.1029/2009JC005753.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 海堤工程设计规范: GB/T 51015-2014 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [18] 上海市城乡建设和交通委员会. 滩涂促淤圈围造地工程设计规范: DG/TJ08-2111-2012 [S]. 上海, 2012.

(责任编辑: 李万会)