

钱塘江鱼鳞石塘涌潮作用力动态测试与分析

沈跃军, 陈振华, 张开伟, 张鉴伟

(浙江省钱塘江管理局勘测设计院, 浙江 杭州 310016)

摘要: 动态测试了钱塘江北岸海宁段鱼鳞石塘在涌潮作用过程中受到的作用力, 初步探索了涌潮与鱼鳞石塘相互作用特性, 得到了鱼鳞石塘迎潮面条石所受作用力随时间和空间的分布特征. 在分析涌潮入射方向和潮头高度影响涌潮压力的同时, 还观测并初步分析了台风与大潮共同作用时的涌潮压力. 分析表明, 涌潮冲击对鱼鳞石塘迎潮面结构物具有一定破坏作用. 此次分析研究结果可为保护设计钱塘江临海一线古海塘提供可靠的参考依据.

关键词: 钱塘江; 涌潮作用力; 鱼鳞石塘

中图分类号: TV139.2

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2013)06-0081-07

钱塘江涌潮是因潮波受到杭州湾喇叭口地形和水下沙坎影响剧烈变形的结果. 涌潮的动力及破坏性极大. 钱塘江海塘是钱塘江河口地区防洪御潮的重要屏障. 嘉兴海宁段明清古海塘^[1] 又称“鱼鳞石塘”, 下部为木桩桩基, 上部由条石砌筑而成, 历经数百年潮水冲击, 可以明显看到底部条石灰缝脱落, 尤其是下部几层条石有多处发生裂隙或缺失, 需要对其进行保护和加固整修.

涌潮的作用力是鱼鳞石塘的主要破坏因素之一, 而目前缺少相关的实测资料, 因此需要对鱼鳞石塘受到的涌潮作用力进行观测, 分析古海塘破坏机理, 为保护设计提供依据.

涌潮对建筑物有两方面作用^[2]: 一是当涌潮经过时, 两岸海塘、丁坝、码头等建筑物将受到涌潮打击; 二是涌潮淘刷河床, 降低了建筑物的稳定性. 涌潮的水动力按成因可以分为4种: 静水压力差、涌潮冲击力、绕流阻力和附加惯性力.

钱塘江涌潮本身变化莫测, 水动力特性复杂. 已有的涌潮与涉水建筑物相互作用的原型观测和模型试验以及数值模拟主要针对丁坝、护坦、桥墩、排桩等. 1968和1988年^[3], 技术人员在萧山新湾和海宁旧仓、钱江二桥工地进行过涌潮动力测试. 陈希海等^[4]在钱塘江河口下游段的旧仓海塘测量了织物模袋混凝土护坦顶面和底面的涨潮压力过程, 同时测量了涌潮动力强度. 郦丽娟等^[5]对海宁八堡44#丁坝坝头环梁和挂桩进行受力观测, 同时进行了涌潮动力强度测试, 得到坝头环梁涌潮压力平面分布规律以及涌潮高度与坝头动压的关系曲线. 林炳尧等^[6]对排桩式丁坝局部冲刷及涌潮作用力进行了模型试验研究. 邵卫云等^[7]利用波浪力经验公式对涌潮压力进行计算并与实测的涌潮压力进行对比分析. 徐长节等^[8]对排桩式丁坝上的涌潮压力进行过现场测试, 并对此进行了数值模拟计算. 周建炯等^[9]对曹娥江口门大闸涌潮作用力进行了模型试验研究, 考虑了不同潮向时闸门受力特性. 潘冬子等^[10-11]对钱塘江南岸直立墙涌潮压力进行了原型观测, 得到不同高程位置涌潮高度与涌潮压力关系图.

目前涌潮对直立墙的作用力研究非常少. 现有的物理模型试验, 很难依靠建立的比尺关系来精确描述涌潮作用下结构物的动力响应. 数值模拟的主要难点在于阻力、动边界以及水沙耦合等技术问题. 因此, 现场试验研究成为目前深层次了解涌潮与结构物的相互作用最有效的方法.

收稿日期: 2013-05-15

基金项目: 水利部公益性行业科研专项经费资助项目 (No. 201001071)

作者简介: 沈跃军 (1970-), 男, 浙江宁波人, 高级工程师, 主要从事水利工程设计工作. E-mail: lixiang1987jkl@163.com

1 观测设备和试验方法

为了解海宁段鱼鳞石塘在强涌潮作用过程中的受力特性,在海宁大缺口下游(桩号 98+200 处)海塘迎潮面布置观测断面,测量石塘表面受到的涌潮作用力。该地点涌潮强度较大,测量断面处海塘走向为凹弧段,潮波波能聚集,条石缺失、灰缝脱落的现象较其他区段明显,对破坏机理的研究具有代表性。本次涌潮作用力测试的地理位置见图 1。

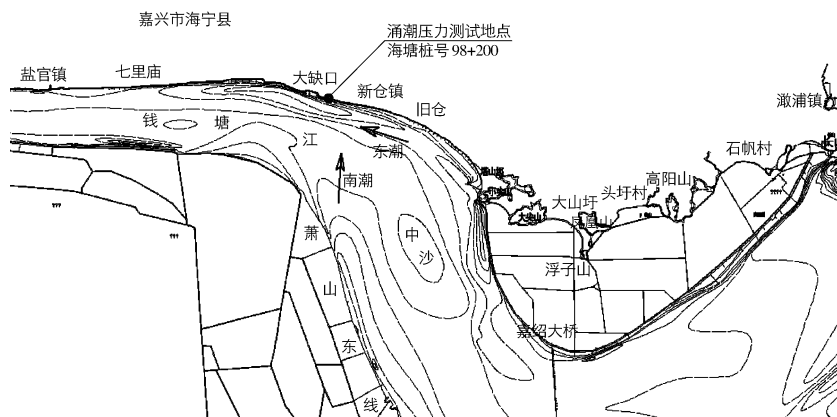


图 1 涌潮测试地理位置(测量地点海塘桩号 98+200)

Fig. 1 Measurement location: stake 98+200 in Haining

1.1 试验设备

压力传感器采用专门定制的 TXR 系列应变式微型压力盒,传感器直径 24 mm,厚度 8 mm,量程 0 ~ 200 kPa,精度 0.5%,分辨率 ≤ 0.08 (% F.S.). 压力传感器尺寸小,便于安装,灵敏度高,导线长 25 m,带线标定,经过前期的现场测试和分析对比,能够满足压力观测的精度需求。该种型号传感器已消除温度变化的影响。采集器采用东华测试公司 5922 动态信号测试分析系统,数据采集频率 100 Hz,每秒采集 100 个点,根据涌潮作用特性,该采样间隔的频率响应足以满足测试要求。

1.2 试验方法

石塘迎潮面护坦以上共 16 层条石,测量布置 2 个垂直断面,自下而上布置 8 个测点,由于下部条石受到潮水的冲击力较大,测点上疏下密。压力传感器埋设在四周砌缝完好的条石内,表面保持竖直,并与条石表面齐平。

埋设方案经过多次现场试验后确定,安装时首先在条石上钻孔,在钻孔侧面磨槽,将压力盒及部分导线埋入条石,将其完全固定。传感器完全固定在条石中,因此本次测量中,传感器本身的自震影响忽略不计。每根导线穿入细钢管,在导线入口处包裹土工布,以起到保护作用。每根细钢管通过一个三通管与测点上游 60 cm 处直径 30 mm 的大钢管相连,将导线引至塘顶。钢管架通过粗钢丝与打在侧边条石上的膨胀螺栓相连,从而将整个测量断面牢牢地安装在鱼鳞石塘表面,可抗击潮水冲击,在观测时段内,具有足够的耐久性。传感器安装布置见图 2。

本次观测时间为 2012 年农历五月至七月的大潮汛,每次测量时间 5 ~ 10 min。其中,8 月 8 日为 2012 年第 11 号台风“海葵”登陆浙江象山,恰逢天文大潮与风暴潮相遇,进行了连续 14 h 观测。本次观测内容有:(1)涌潮形态,包括涌潮潮头高度、入射方向、潮到时间以及潮前低水位;(2)鱼鳞石塘直立墙条石竖直表面不同高程处受到的涌潮作用力;(3)涌潮与鱼鳞石塘相互作用形态。

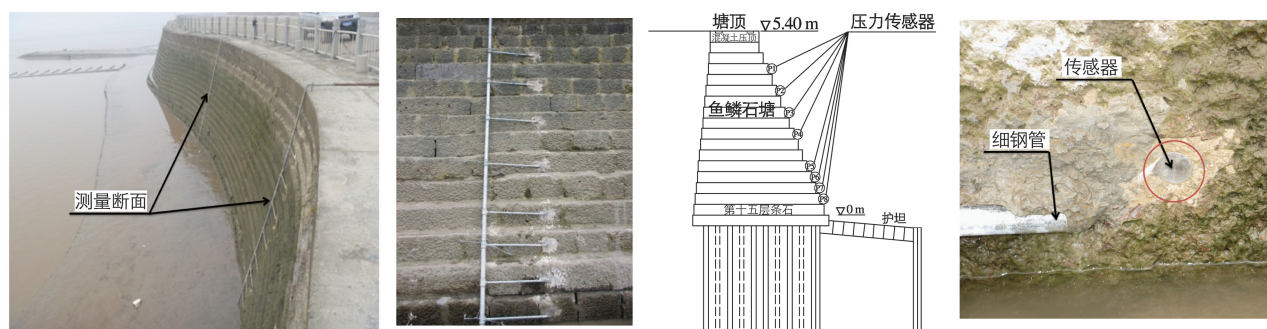


图2 传感器安装布置

Fig.2 Sensor installation diagram

2 观测结果分析

2.1 涌潮要素观测结果

钱塘江涌潮受地形、径流、风速、风向等因素影响,每日形态和动力强度不尽相同.涌潮观测结果见表1.2012年为丰水年,江道容积较大,主槽走北,涌潮较大.受到上游新仓附近江道大片中沙的影响,测量断面处的涌潮有南潮、东潮和东南潮,南潮先到,约10 min后东潮抵达.8月和9月,东潮潮头不明显,有时仅有一股潮波经过测量位置.本次涌潮高度的取值通过离岸50 m潮头高度的目测值,再根据上下游涌潮观测点的记录值加以订正.测得涌潮潮头高度为1.2~1.7 m,主要为南潮,南潮波峰线与海塘轴线的夹角约为 $0^{\circ}\sim 20^{\circ}$,8月和9月东潮潮头高度较小,约为0.3~0.8 m.

表1 涌潮要素观测结果

Tab.1 Observation results of tidal bore elements

测量日期	潮到时间	低潮位/m	潮头高度/m	潮向
2012-07-08(农历五月二十)	南潮 14:37	-0.6	1.7	南潮
	东潮 14:47		1.7	东潮
2012-08-04(农历六月十七)	0:10	0.2	1.5	南潮
2012-08-04(农历六月十七)	12:43	0.2	1.6	南潮
2012-08-05(农历六月十八)	13:25	0.2	1.4	南潮
2012-08-08日(台风海葵)(农历六月廿一)	01:40	0.5	1.2	南潮
2012-09-02(农历七月十七)	12:22	-0.4	1.4	南潮
2012-09-03(农历七月十八)	12:54	-0.5	1.5	南潮
2012-09-04(农历七月十九)	13:18	-0.5	1.5	南潮
2012-09-05(农历七月二十)	13:43	-0.5	1.5	南潮

2012年7月8日南潮过后水位回落,东潮到达时潮头高度与南潮相当,动力强劲.而8月和9月的测量中,东潮抵达时水位较高,东潮潮头高度较小,不具有冲击特性,因此仅7月8日列出了东潮的潮头高度.9月份仅出现南潮,南潮过后江道水位即开始上涨,东潮难以辨别,因此相应地缩短了测量时间.

2.2 涌潮与鱼鳞石塘相互作用形态

涌潮对石塘的作用力与两者之间的相互作用形态密切相关.涌潮的作用形态主要与潮涌的大小、入射方向、塘前水位、塘前地形以及风速等因素有关.观测到的近岸浅水变形主要有两种:(1)潮头高度持续增高,破碎更加剧烈,潮头可直接冲击直立墙;(2)在爬滩的过程中,潮头破碎带高度逐渐减小,表面上“潮头逐渐消失”,行进至塘前,水面突然上涨,然后直扑海塘,也有可能直扑塘前发生二次破碎(如卷破),消耗部分能量.潮波在直立墙前发生反射,与其后上涌的大量水体相叠加,使得水面雍高,波涛激荡,潮水动力强劲时,离岸约5 m处可激起5~7 m高的浪花.潮头过后水位回落,在中部第7和8层条石(高程2.5 m)上下跌宕,潮头到达后约1~2 h,钱塘江水位上涨至高潮位.涌潮到达石塘后的作用形态见图3.

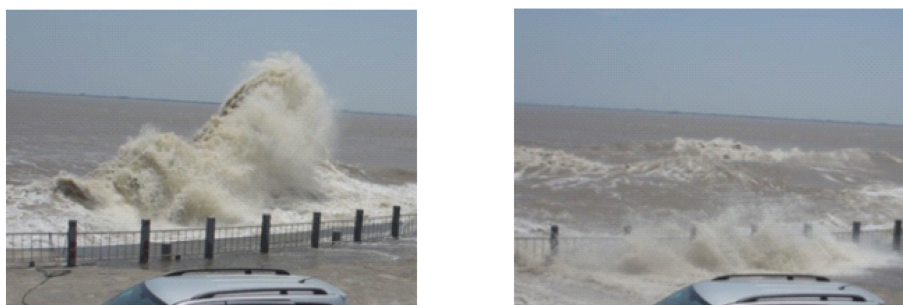


图 3 潮头反射和潮水涌上塘顶

Fig. 3 Tidal bore reflection and overtopping

2.3 涌潮对鱼鳞石塘的作用力观测结果分析

2.3.1 涌潮压力随入射方向的变化关系 本文主要研究涌潮潮头作用时的荷载,取潮到 20 s 内的压力值进行分析.根据实测压力数据,当涌潮动力强劲正向入射时,会产生冲击压强,作用时间短暂,测得最大冲击压强在 40 ~ 50 kPa 之间,作用时间小于 0.5 s,如图 4.

本次观测到的南潮入射角在 $0^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 之间,当潮头没有正面撞塘而是斜向入射时,直立墙受到的冲击荷载并不明显.如图 5,8 月 4 日潮到 20 s 内压力过程曲线,潮头行进至塘前时破碎加剧,能量耗散,但是在潮波反射叠加后,压力在短时间内达到最大,现场可见潮波叠加后水面迅速雍高,在后方潮水的推动下,再次扑向海塘.

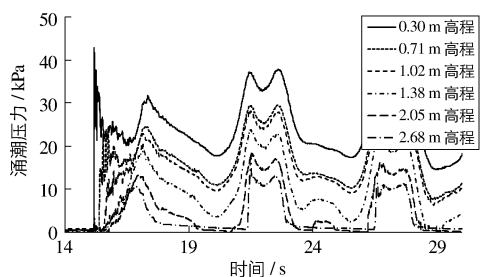


图 4 9 月 4 日涌潮作用力过程曲线(潮到 20 s)

Fig. 4 Hydrograph of bore pressure on Sep. 4 (20 s)

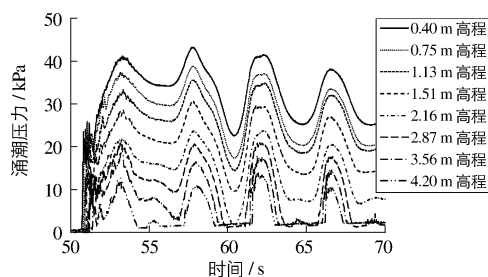


图 5 8 月 4 日涌潮作用力过程曲线(潮到 20 s)

Fig. 5 Hydrograph of bore pressure on Aug. 4 (20 s)

当东潮和南潮的潮头高度相近时,两者动力强度相近,如图 6,7 月 8 日,南潮和东潮的最大冲击压强分别为 46.3 kPa 和 47.5 kPa.南潮压力最大值发生在潮头反射叠加后再次撞塘的时刻,东潮的压力最大值发生在潮头经过的瞬间.虽然南潮和东潮的作用形态不同,但两者产生的压力峰值相近.

2.3.2 涌潮压力最大值随潮头高度的变化关系 石塘下部 4 层条石受到的涌潮作用力相对较大,测得不同高程处涌潮压力与涌潮高度的关系见图 7.由图可知,不同高程处压力基本上随涌潮高度的增大而增大.石塘高程 0.40 ~ 1.51 m 部分,受到的涌潮压力在 25 ~ 50 kPa 之间.

涌潮压力最大值与涌潮高度的相关关系见图 8.本次测得潮到 20 s 内压力最大值 35.0 ~ 47.5 kPa,对应潮头高度 1.4 ~ 1.7 m.由图 8 可知,除台风期外,观测到的涌潮压力最大值随潮头高度的增大而增大,经初步拟合得到以下公式:

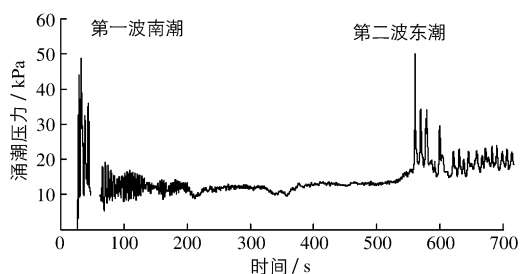


图 6 7 月 8 日涌潮压力作用过程曲线(高程 0.3 m)

Fig. 6 The process of bore pressure on July 8 (elevation of 0.3 m)

$$P = 22.14 \times H^{1.518} \quad (1)$$

式中: P 为涌潮压力; H 为涌潮潮头高度.由于现场测量条件限制,石塘最底部条石受到的压力可能更大,因此式(1)仅可作为该地区鱼鳞石塘最大涌潮压力的计算参考.本文将本次鱼鳞石塘的涌潮压力观测值与44#丁坝进行对比,两处测量地点都在海宁大缺口附近,比较可知,拟合的趋势基本一致.由于测点高程的不同以及涌潮高度观测地点的不同,鱼鳞石塘底部条石受到的涌潮压力相比44#丁坝偏大.

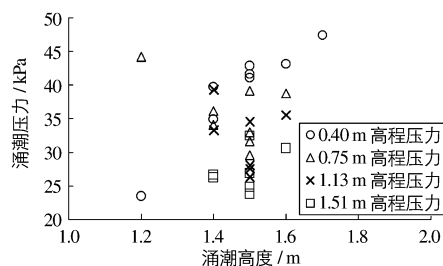


图7 不同高程涌潮压力与涌潮高度关系

Fig. 7 Relationship between pressure and bore height at different elevations

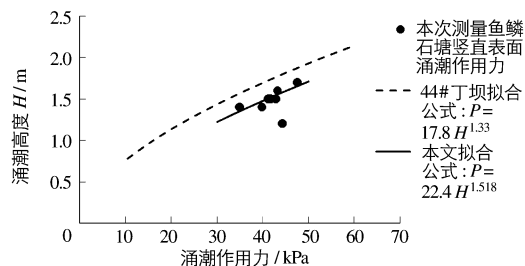


图8 鱼鳞石塘与44#丁坝涌潮压力观测值对比

Fig. 8 Comparison between observation values of bore pressure on the ancient seawall and No. 44 groin

2.3.3 涌潮压力最大值沿竖直断面分布特征 潮到20 s内,涌潮压力最大值沿测量断面的分布见图9.由图可知,下部条石受到的涌潮作用力最大.涌潮压力最大值的分布形状也与潮头高度和入射角度有关,分布形状为抛物线形或三角形.受江道低水位的影响,底部4层条石上均可能发生最大压强.

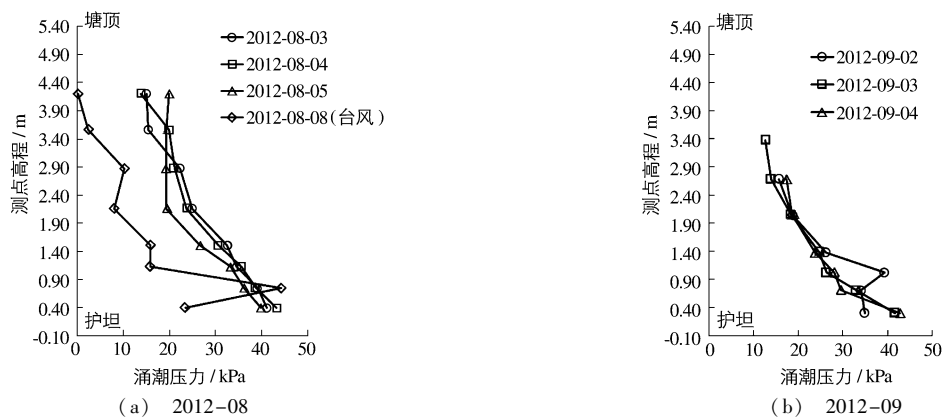


图9 涌潮压力最大值沿断面分布

Fig. 9 Vertical distribution of max. bore pressure

2.4 台风影响下涌潮作用力特征

台风与大潮共同作用下,对鱼鳞石塘产生的破坏影响是古海塘保护和钱塘江海塘设计中考虑的重要因素之一.2012年第11号强台风“海葵”于8月8日凌晨3时20分(农历6月廿一日)在浙江象山县鹤浦镇登陆,登陆时最大风力14级,测量地点位于10级风圈以内.测量从8月7日晚6:00开始,持续观测时间14.24 h.

受台风低气压影响,杭州湾水位增高,大缺口处江道低水位比正常情况下抬高30 cm以上.涌潮来临时,由于江道水深较深,潮头破碎不明显,潮头高度1.2 m,相比正常情况下偏小.测得潮到20 s内最大压力为44.22 kPa,作用在高程0.75 m处,为冲击荷载,下部条石受到的缓变荷载为10~20 kPa.潮到20 s内的涌潮压力过程见图10,压力最大值沿断面分布见图9.观测时段内测得最大压强值52.46 kPa,发生在最高潮位时刻.8月7日涌潮到达塘前的形态见图11.结合上文涌潮潮头高度的影响分析,同时参见图10可知:受强台风影响,江道水位较高,潮头高度较小,但潮头对海塘的冲击荷载依然较大,而潮到后的缓变荷载则相对较小.

由于台风影响下的涌潮作用力特征受天文潮汐、涌潮时刻的低潮位状况、风速风向等多种因素影响,其影响特性还有待进一步的试验论证。

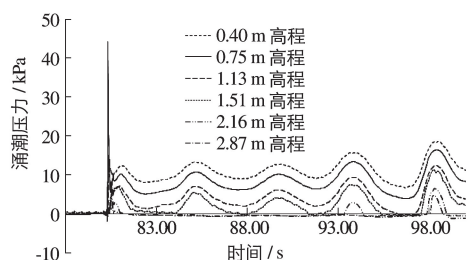


图 10 台风影响时涌潮作用力过程(潮到 20 s)

Fig. 10 Hydrograph bore pressure process by the action of typhoon (20 s)



图 11 台风影响时涌潮作用形态

Fig. 11 Tidal bore by the action of typhoon

3 结 语

潮水的冲击作用对鱼鳞石塘下部条石及接缝材料具有一定的破坏作用. 本文对海宁大缺口东侧鱼鳞石塘条石表面受到的涌潮作用力进行了测量和分析, 主要结论如下:

(1) 鱼鳞石塘条石竖直表面受到的潮水作用力与涌潮的入射方向和潮头高度有密切的关系. 当涌潮较大且入射方向垂直或平行于海塘轴线时, 通常会产生冲击荷载. 涌潮压力最大值随潮头高度的增大而增大. 本次测得潮到 20 s 内涌潮压力最大值为 35.0 ~ 47.5 kPa, 对应潮头高度 1.4 ~ 1.7 m, 并给出了海宁大缺口处最大涌潮压力计算参考公式.

(2) 鱼鳞石塘迎潮面受到的涌潮压力分布形态主要为抛物线形和三角形, 底部 4 层条石上均可能出现最大压力.

(3) 本次观测中, 受强台风影响时, 江道低水位较高, 潮头高度较小, 但潮头对海塘的冲击荷载依然较大, 而潮到后的缓变荷载则相对较小.

参 考 文 献:

- [1] 陶存焕, 周潮生. 明清钱塘江海塘[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001. (TAO Cun-huan, ZHOU Chao-sheng. The Qiantang River seawall of Ming and Qing dynasty[M]. Beijing: China WaterPower Press, 2001. (in Chinese))
- [2] 韩曾萃, 戴泽衡, 李光炳, 等. 钱塘江河口治理开发[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003. (HAN Zeng-cui, DAI Ze-heng, LI Guang-bing, et al. Regulation and exploitation of Qiantang Estuary[M]. Beijing: China WaterPower Press, 2003. (in Chinese))
- [3] 陈希海. 钱塘江涌潮动力浅析[J]. 河口与海岸工程, 1993(1-2): 35-50. (CHEN Xi-hai. An simple analysis of tidal bore power in Qiantang river estuary[J]. Estuarine and Coastal Engineering, 1993(1-2): 35-50. (in Chinese))
- [4] 陈希海, 庄娟芳. 钱塘江海塘织物模袋混凝土护坦涌潮压力测试与分析[J]. 浙江水利科技, 1989(4): 33-38. (CHEN Xi-hai, ZHUANG Juan-fang. Measurement and analysis of tidal bore forces on membrane bag concrete apron[J]. Zhejiang Hydrotechnics, 1989(4): 33-38. (in Chinese))
- [5] 酆丽娟, 周建炯, 金振国. 海宁八堡 44 号丁坝及涌潮压力特性现场观测研究报告[R]. 杭州: 浙江省水利河口研究院, 1996. (LI Li-juan, ZHOU Jian-jiong, JIN Zhen-guo, et al. Field observation research report of the tidal bore pressure on the No. 44 groin[R]. Hangzhou: Zhejiang Institute of Hydraulics and Estuary, 1996. (in Chinese))
- [6] 林炳尧, 杨火其. 排桩式丁坝局部冲刷及涌潮作用力试验研究[R]. 杭州: 浙江省水利河口研究院, 2000. (LIN Bing-yao, YANG Huo-qi. Test study of local scour and tidal bore pressure on pile groin[R]. Hangzhou: Zhejiang Institute of Hydraulics and Estuary, 2000. (in Chinese))

- [7] 邵卫云,毛根海. 钱塘江涌潮压力的动态测试与分析研究[J]. 浙江大学学报:工学版, 2002, 36(3): 247-251. (SHAO Wei-yun, MAO Gen-hai. Dynamic measurement and analysis of the bore pressure in the Qiantang River[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2002, 36(3): 247-251. (in Chinese))
- [8] 陈海军,严盛,徐长节,等. 直立方桩上涌潮压力动态测试及分析研究[J]. 水动力学研究与进展: A辑, 2006, 21(3): 411-417. (CHEN Hai-jun, YAN Shen, XU Chang-jie, et al. Dynamic measurement and study of the bore pressure on a vertical square cylinder in Qiantang River[J]. Journal of Hydrodynamics(SerA), 2006, 21(3): 411-417. (in Chinese))
- [9] 周建炯,杨火其. 曹娥江口门大闸涌潮作用力试验研究[J]. 浙江水利科技, 2004(4): 13-14. (ZHOU Jian-jiong, YANG Huo-qi. Test study of the tidal bore pressure on Cao'e River floodgate[J]. Zhejiang Hydrotechnics, 2004(4): 13-14. (in Chinese))
- [10] 潘冬子,潘存鸿,曾剑,等. 极端水动力条件下钱塘江河床的响应研究[R]. 杭州:浙江省水利河口研究院, 2011. (PAN Dong-zi, PAN Cun-hong, ZENG Jian, et al. Response of the Qiantang River riverbed under conditions of extreme hydrodynamic[R]. Hangzhou: Zhejiang Institute of Hydraulics and Estuary, 2011. (in Chinese))
- [11] PAN Dong-zi, HAN Hai-qian, LI Ying. Signal analysis of impact test due to tidal bore using empirical mode decomposition (EMD)[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 105: 2059-2062.

Dynamic measurement and analysis of bore pressure on the ancient seawall in Qiantang River

SHEN Yue-jun, CHEN Zhen-hua, ZHANG Kai-wei, ZHANG Jian-wei

(*Reconnaissance and Design Institute, Qiantang River Administration of Zhejiang Province, Hangzhou 310016, China*)

Abstract: In order to conduct a preliminary exploration of the interaction characteristics of the tidal bore acting on the ancient seawall, the tidal bore pressure on the ancient seawall is observed on the north bank of Haining reach of the Qiantang River. The upper structure of the ancient seawall was built with big strip stones. The time and space distribution characteristics of the tidal bore forces on these stones are analyzed in this paper, considering the effects of the bore height and the incidence directions. The combined action of the typhoon with tide bore is preliminarily analyzed by use of dynamic measurements. This analysis results can provide a reliable reference basis for the protection and design of the ancient seawall in the Qiantang River.

Key words: Qiantang River; bore pressure; ancient seawall