

水利水运工程学报

HYDRO-SCIENCE AND ENGINEERING

港珠澳大桥沿线极端风暴增水特征研究

曾凡兴, 麦权想, 路川藤, 丁佩, 罗小峰, 高正荣

Study on the characteristics of extreme storm surge along Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge

ZENG Fanxing, MAI Quanxiang, LU Chuanteng, DING Pei, LUO Xiaofeng, GAO Zhengrong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12170/20220615001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

长江口登陆台风增水数值模拟

Numerical simulation on surge due to landfall of typhoon in the Yangtze Estuary: Ampil (No. 1810) as an example
水利水运工程学报. 2021(1): 70 <https://doi.org/10.12170/20200525002>

“烟花”台风影响下长江南通以下河段的增水分布特征

Spatio-temporal distribution characteristics of surge in the reach below Nantong of Yangtze Estuary under the influence of Typhoon In-Fa
水利水运工程学报. 2021(6): 25 <https://doi.org/10.12170/20210930003>

通州湾规划港区对台风风暴潮的冲淤响应研究

Response of the erosion and siltation in the planning port area in the Tongzhou Bay to storm surges induced by typhoons
水利水运工程学报. 2021(4): 114 <https://doi.org/10.12170/20200805001>

城镇化背景下平原河网区暴雨洪水重现期变化分析——以太湖流域武澄锡虞区为例

Change in return period of storm flood in plain river network area under urbanization—taking Wuchengxiyu region of Taihu Lake basin as a case study
水利水运工程学报. 2019(5): 27 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.05.004>

潮汐河口闸下风暴潮特征模拟

Numerical simulation of storm surge characteristics in downstream of tide sluice located at tidal estuary
水利水运工程学报. 2018(2): 1 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.02.001>

施工期台风浪作用下沉箱碰撞破坏分析

Pounding damage analysis of caissons during construction under action of storm wave
水利水运工程学报. 2018(4): 112 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.04.016>





扫码进入官网，阅读更多精彩文章

关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI:10.12170/20220615001

曾凡兴, 麦权想, 路川藤, 等. 港珠澳大桥沿线极端风暴增水特征研究 [J]. 水利水运工程学报, 2023(3): 1-9. (ZENG Fanxing, MAI Quanxiang, LU Chuanteng, et al. Study on the characteristics of extreme storm surge along Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge[J]. Hydro-Science and Engineering, 2023(3): 1-9. (in Chinese))

港珠澳大桥沿线极端风暴增水特征研究

曾凡兴¹, 麦权想², 路川藤³, 丁 佩³, 罗小峰³, 高正荣³

(1. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 港珠澳大桥管理局, 广东 珠海 519060; 3. 南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要: 开展风暴潮作用下跨海交通设施沿线增水的特征研究, 对交通工程运维期的防灾减灾和结构安全评估具有重要意义。基于 1951—2020 年实测台风资料, 统计分析了以港珠澳大桥为中心的不同范围台风参数变化特征, 发现自 1951 年以来, 珠江口附近水域的年均台风数量、台风最大风速、台风中心最低气压趋势性变化不明显。构建了西太平洋风暴潮数学模型, 计算了港珠澳大桥沿线不同区域的增水特征值, 研究认为港珠澳大桥自西向东风暴增水值逐渐降低, 大桥西侧珠海人工岛处 200 年一遇风暴增水值为 3.17 m, 50 年一遇为 2.31 m, 东侧东西人工岛处 200 年一遇风暴增水值约为 2.30 m, 50 年一遇约为 1.70 m。研究结果可为港珠澳大桥运维期安全评估提供技术支撑。

关 键 词: 港珠澳大桥; 风暴增水; 数值模拟; 重现期; 台风

中图分类号: TV124

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2023)03-0001-09

港珠澳大桥位于珠江口伶仃洋海域内, 连接香港、珠海和澳门, 大桥于 2009 年开工建设, 2017 年实现主体工程全线贯通, 2018 年完成主体工程验收并开通运营。大桥全线贯通后, 珠三角地区接连遭遇超强台风“天鸽”“山竹”的袭击, 造成极大的社会、经济灾害^[1], 也为大桥的应急处置与管理带来了挑战。随着高强度台风的频发, 台风风暴潮引起的安全问题受到众多学者的重视^[2-3]。台风风暴潮的研究手段主要包括现场监测分析、遥感反演、数值模拟等。现场监测利用地面自动气象站、雷达、卫星等获取台风风暴潮实时数据^[4], 为后期相关预报、研究提供数据支撑; 遥感反演主要用于大范围的风场、气压场计算, 修正现有的台风经验公式^[5]; 数值模拟是目前研究台风风暴潮的主要手段, 研究主要包括台风风暴潮的成因与机理^[6-7], 台风风暴潮的时空分布特征^[8], 台风风暴潮期间的降雨、风、增水、波浪等因子特征^[9-10]及台风风暴潮下的工程与民生安全^[11]等。在珠江口水域, 众多学者对风暴潮引起的区域工程安全^[12-13]、城市安全^[14-15]研究较多, 而针对港珠澳大桥的研究较少^[16-17]。港珠澳大桥设计寿命 120 年, 工程运维期将经历多次台风风暴潮侵袭, 港珠澳大桥为桥岛隧集群设施, 海中人工岛岛体高程相对较低, 易受台风风暴潮引发的增水影响。

本文在前人研究的基础上, 收集 1951—2020 年实测台风资料(中国台风网 <http://tcdata.typhoon.org.cn>), 在分析珠江口水域台风参数变化特征的基础上, 构建大范围风暴潮数学模型, 研究港珠澳大桥沿线不同区域增水变化特征, 为港珠澳大桥在台风风暴潮期间的应急管理与运营维护提供技术支撑。

收稿日期: 2022-06-15

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2019YFB1600700); 澳门科学技术发展基金资助项目(0089/2020/A)

作者简介: 曾凡兴(1995—), 男, 湖南常德人, 硕士研究生, 主要从事河口海岸水动力学研究。

E-mail: 769771325@qq.com 通信作者: 路川藤(E-mail: ctlu@nhri.cn)

1 珠江口台风特征统计分析

采用 1951—2020 年实测台风资料,统计以港珠澳大桥中部为核心的周边 100、200、300 km 范围内的台风路径、数量、最大风速和台风中心最低气压(统计范围内)的变化趋势特征(图 1)。由图 1 可见,经过珠江口的台风大多由西太平洋生成,台风路径方向基本为西南-东北向,珠江口西侧登陆台风数量相对较多。根据历年台风路径资料统计,经过以港珠澳大桥中部为核心周边 100 km 范围内的台风平均每年 1.0 个,200 km 范围内平均每年 2.1 个,300 km 范围内平均每年 3.2 个。并且,不同统计范围内,经过珠江口水域的年均台风数量、台风最大风速和台风中心最低气压趋势性变化不明显。

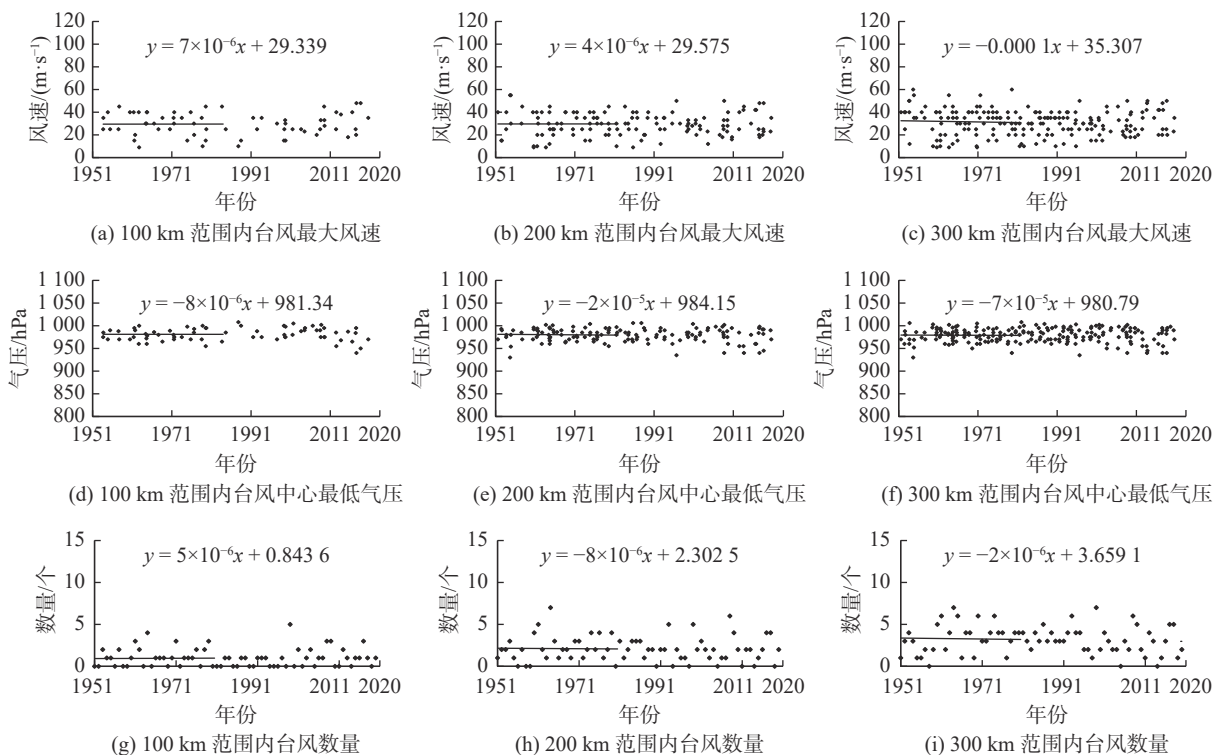


图 1 港珠澳大桥周边 100~300 km 范围内台风数量、最大风速和中心最低气压变化趋势

Fig. 1 Variation Trend of typhoon numbers, maximum wind speed and minimum pressure within 100~300 km around Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge

2 风暴潮数学模型

2.1 风暴潮数值模拟方法

本文数值模拟采用南京水利科学研究院研发的河口海岸潮流泥沙数值模拟系统。笛卡尔坐标系下的二维水流运动方程^[18]为:

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial(Hu)}{\partial x} + \frac{\partial(Hv)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Hu}{\partial t} + u \frac{\partial Hu}{\partial x} + v \frac{\partial Hu}{\partial y} + gH \frac{\partial z}{\partial x} - fHv + \frac{H}{\rho_0} \frac{\partial P_a}{\partial x} = \frac{\tau_{sx} - \tau_{bx}}{\rho_0} + \frac{\partial}{\partial x} \left(N_x H \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(N_y H \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial H_v}{\partial t} + u \frac{\partial H_v}{\partial x} + v \frac{\partial H_v}{\partial y} + gH \frac{\partial z}{\partial y} + fHu + \frac{H}{\rho_0} \frac{\partial P_a}{\partial y} = \frac{\tau_{sy} - \tau_{by}}{\rho_0} + \frac{\partial}{\partial x} \left(N_x H \frac{\partial^2 v}{\partial^2 x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(N_y H \frac{\partial^2 v}{\partial^2 y} \right) \quad (3)$$

式中: z 为水位(m); H 为水深(m); u 、 v 为流速分量(m/s); t 为时间(s); f 为科氏力(s^{-1}); g 为重力加速度(m/s^2); N_x 、 N_y 为 x 、 y 向水流紊动黏性系数(m^2/s); P_a 为大气压强(Pa); ρ_0 为海水密度(kg/m^3); τ_{sx} 、 τ_{sy} 为 x 、 y 向的风切应力($kg/(m \cdot s^2)$); τ_{bx} 、 τ_{by} 为 x 、 y 向的切应力($kg/(m \cdot s^2)$)。

采用三角形网格有限体积法求解方程(1)~(3), 方程离散过程见文献[18]。风暴潮数值模拟过程中, 气压场与风场的计算尤为重要, 其中气压场由 Holland 模型^[19] 计算:

$$p(r) = p_c + \Delta p \exp[-(R_M/r)]^B \quad (4)$$

$$B = 1.881 + 0.005\,57R_M - 0.012\,95\varphi \quad (5)$$

$$R_M = -18.04 \ln \Delta p + 110.22 \quad (6)$$

式中: $p(r)$ 为距离台风中心 r 处的气压(hPa); p_c 为台风中心最低气压(hPa); Δp 为外围与中心最低气压的差值(hPa); R_M 为最大风速半径(km); B 为 Holland 引入描述气压剖面形状的参数; φ 为台风中心所在纬度。

台风实际风速 V 由台风移行速度 V_c 和环行速度 V_s 叠加而成, V_s 采用 Miller 经验修正模型^[20] 计算:

$$\begin{cases} V_s = V_{\max}(r/R_M), & 0 \leq r < R_M \\ V_s = V_{\max}(R_M/r)^Y, & R_M \leq r < \infty \end{cases} \quad (7)$$

式中: $V_{\max}$ 为环流最大风速(m/s), 实际计算时认为该值近似于气象资料中给出的最大风速; Y 为常数, 可调节最大风速半径外的风速分布, 一般取值为 0.5~0.7, 本文取 0.65。

移行风速 V_c 采用 Jelesnianski 模型^[21] 计算, 计算式如下:

$$\begin{cases} V_c = v_0 \frac{r}{R_M + r}, & 0 \leq r < R_M \\ V_c = v_0 \frac{R_M}{R_M + r}, & R_M \leq r < \infty \end{cases} \quad (8)$$

式中: v_0 为台风移动速度(m/s)。

风的切应力计算^[22] 如下:

$$\tau_s = \rho_a C_D U_{10}^2 \quad (9)$$

式中: ρ_a 为空气密度(kg/m^3); U_{10} 为距离海面 10 m 处的风速(m/s); C_D 为风拖曳力系数^[22], 表达如下:

$$C_D = \begin{cases} 1.287\,5 \times 10^{-3}, & U_{10} \leq 7.5 \text{ m/s} \\ (0.8 + 0.065 U_{10}) \times 10^{-3}, & U_{10} > 7.5 \text{ m/s} \end{cases} \quad (10)$$

2.2 数学模拟范围与参数

数学模拟范围包括西太平洋和中国近海, 模型西边界至越南与马来西亚西侧连线, 东经 108°附近, 东侧边界到东经 134°附近, 珠江口海域地形采用 2013—2019 年组合水下地形, 港珠澳大桥沿线水域采用 2020 年实测 1:500 的水下地形, 我国近岸地区采用最新海图水下地形, 其他海域采用 NOAA 全球海洋水深数据, 基面统一至 85 高程。整个计算区域采用三角形网格, 珠江口水域网格加密, 模型范围与网格见图 2, 模型网格总数 99 417 个, 节点总数 51 926 个, 最小网格边长为 63.5 m, 最大网格边长 69 791 m, 时间步长取 3 s, 紊动黏性系数取 $0.1Hu_*$ (u_* 为摩阻流速), 计算过程采用基于 CUDA 技术的并行加速技术^[23]。

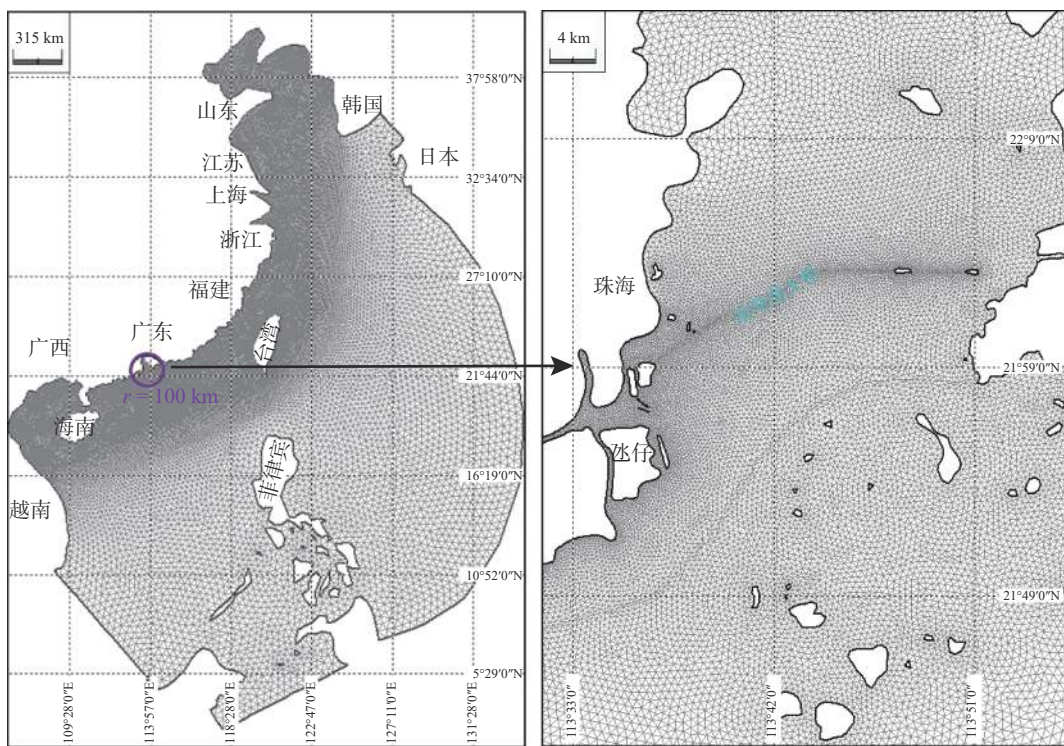


图 2 数学模拟范围及局部网格示意

Fig. 2 Schematic diagram of mathematical model range and local grids

2.3 模型验证

以“山竹”台风发生期间的水位过程对数学模型进行验证。验证分为天文潮验证和风暴增水验证两部分,天文潮验证用于检验数学模型计算参数的合理性及大范围模型潮波传播能力,风暴增水验证用于检验数学模型计算增水值的准确性。“山竹”台风于 2018 年 9 月 7 日 20:00 生成,于 9 月 16 日 17:00 在广东台山海宴镇二次登陆,各潮位站最大增水均出现于 9 月 16 日,因此潮位验证时间选取 2018 年 9 月 14—17 日。数学模型计算初始条件采用“冷启动”,即模型区域给定初始潮位,流速取 0,为不影响验证时间段的潮位过程,数学模型实际计算时间为 2018 年 9 月 8—17 日。模型外海开边界采用潮位控制,潮位过程通过天文潮预报软件 Nao99 获得。

2.3.1 天文潮验证 天文潮验证选取香港、大九洲和内伶仃 3 个站点的潮位过程,潮位站位置见图 3, 3 个站点覆盖了港珠澳大桥沿线南北侧水域。天文潮数据采用国家海洋信息中心发布的潮汐表数据,天文潮过程验证见图 4。可见,数学模型计算的天文潮过程与潮汐表预报值吻合较好,这说明本文数学模型能够较好地模拟潮波的传播。

2.3.2 风暴增水验证 台风期间的气压与风速资料分别引用自香港天文台(<https://www.hko.gov.hk/sc/cis/statistic.htm>)逐日资料和文献 [24]。图 5 为“山竹”台风期间的气压与风速验证,可见本文数学模型计算的气压及风速与实测值基本吻合。风暴潮期间的水位验证选取香港、大九洲和内伶仃 3 个站

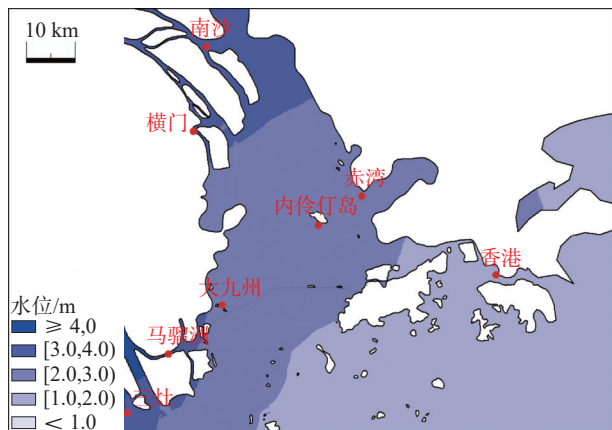


图 3 “山竹”台风期间珠江口最大增水分布

Fig. 3 Storm surge distribution in the Pearl River Estuary during typhoon “Shanzhu”

“山竹”台风期间的实测水位过程(图 6)。可见, 台风期间的水位过程与实测值基本一致。台风期间水位与天文潮间的差值即为增减水值, 除上述 3 个站点外, 本文还收集了三灶、南沙、横门和澳门站的最大增水值, 引自文献 [25] 和 <https://www.smg.gov.mo/zh>(见表 1)。可见本文计算的各站最大增水值与实测值偏差大多在 10% 以内, 这说明本文构建的风暴潮数学模型能够较好地复演“山竹”台风期间珠江口风暴增水特征。

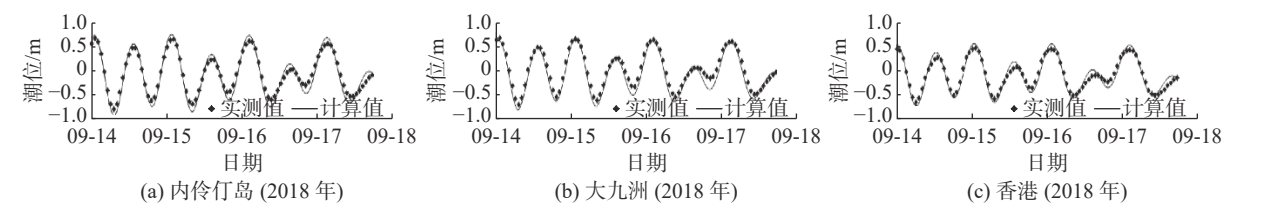


图 4 “山竹”台风期间珠江口天文潮验证

Fig. 4 Astronomical tide verification in the Pearl River Estuary during typhoon “Shanzhu”

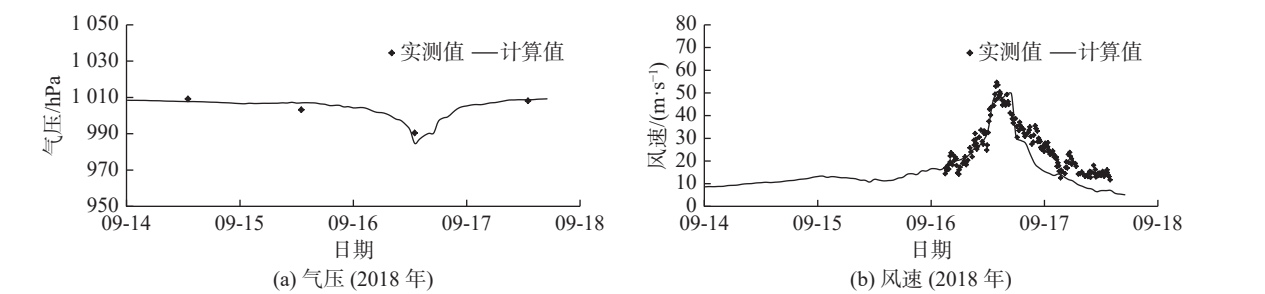


图 5 “山竹”台风期间气压与风速过程验证

Fig. 5 The barometric pressure and wind speed verification during typhoon “Shanzhu”

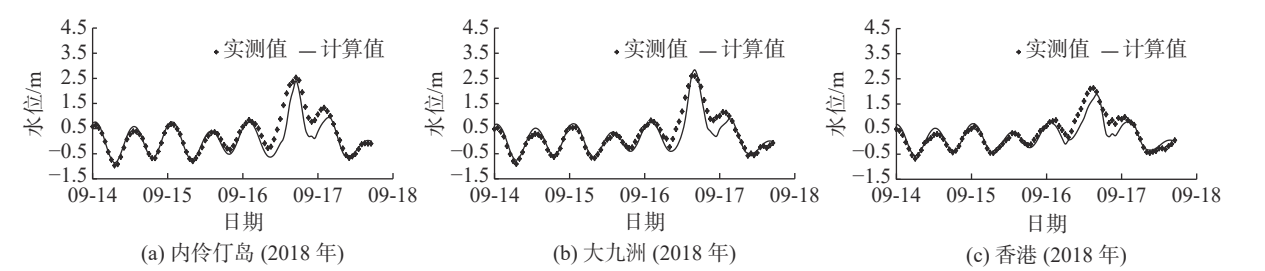


图 6 “山竹”台风期间珠江口水位过程验证

Fig. 6 Water level verification in the Pearl River Estuary during typhoon “Shanzhu”

3 港珠澳大桥沿线增水特征

3.1 增水沿线分布特征

以港珠澳大桥中部为核心周边 100 km 的范围包含珠江八大口门、大鹏湾和部分大亚湾水域, 外海至-55 m 等深线(见图 2), 能够捕获近年来诸如“天鸽”“山竹”“海高斯”等对珠江口影响较大的台风路径。1951—2020 年, 经过该范围的台风共约 70 场, 以此 70 场台风为基础资料, 通过风场、气压

表 1 “山竹”台风期间珠江口站点增水值比较			
Tab. 1 Storm surge comparison in the Pearl River Estuary during typhoon “Shanzhu”			
站名	实测值/m	计算值/m	偏差/%
香港	1.90	1.76	-7.49
内伶仃岛	2.28	2.43	6.66
大九洲	2.35	2.65	12.77
三灶	3.22	3.63	12.73
南沙	2.97	3.26	9.76
横门	3.01	3.11	3.32
澳门	3.40	3.32	-2.35

场反演,结合边界天文潮,计算港珠澳大桥沿线不同区域的增水特征值,采样点位置见图 7。表 2 统计了不同采样点的最大 3 场台风期间增水值。可见,自港珠澳大桥西侧珠澳人工岛至大桥东侧东西人工岛处,风暴增水值整体呈降低趋势,主要原因是影响珠江口的台风从东南向西北方向运动,大桥东侧水域受香港岛、离岛等陆域掩护,降低了台风影响,而大桥西侧水域受掩护程度相对较差,因此,大桥西侧增水幅度明显较大。港珠澳大桥沿线增水最大值均出现在 2018 年“山竹”台风期间,西侧珠澳人工岛最大增水值约 2.66 m,东侧人工岛附近增水值为 2.11~2.15 m;港珠澳大桥沿线第 2、3 大增水值西侧主要出现在 2017 年“天鸽”台风和 2020 年“海高斯”台风期间,而东侧主要出现在 1957 年“GLORIA”台风和 2020 年“海高斯”台风期间。可见,不同台风引起港珠澳大桥沿线增水值的差异较大。

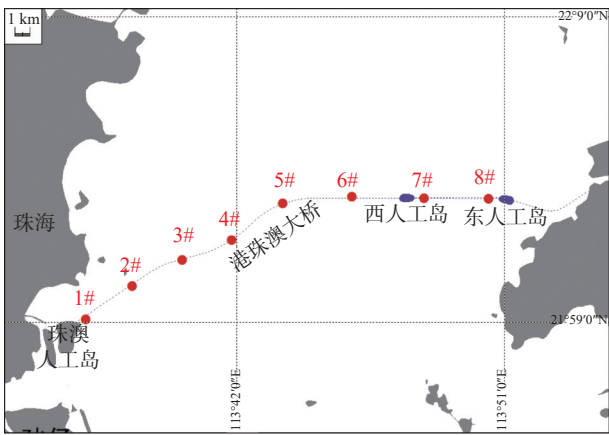


图 7 港珠澳大桥风暴增水分析点位置示意

Fig. 7 Location of storm surge analysis points of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge

表 2 港珠澳大桥沿线采样点风暴增水特征值统计

Tab. 2 Statistics of storm surge characteristic values at sampling points along Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge

序号	排序1		排序2		排序3	
	增水/m	日期	增水/m	日期	增水/m	日期
1#	2.66	2018-09-16	2.39	2017-08-23	2.20	2020-08-19
2#	2.50	2018-09-16	2.10	2020-08-19	2.02	2017-08-23
3#	2.33	2018-09-16	1.97	2020-08-19	1.78	1957-09-22
4#	2.26	2018-09-16	1.82	2020-08-19	1.68	1957-09-22
5#	2.25	2018-09-16	1.70	2020-08-19	1.67	1957-09-22
6#	2.19	2018-09-16	1.58	1957-09-22	1.56	2020-08-19
7#	2.15	2018-09-16	1.51	1957-09-22	1.47	2020-08-19
8#	2.11	2018-09-16	1.44	1957-09-22	1.39	2020-08-19

3.2 增水特征值分析

不同重现期的增水特征值对工程设计及后期的工程维护具有重要意义。本文将数学模型计算的以港珠澳大桥中部为核心周边 100 km 范围内台风增水值,进行 P-Ⅲ 曲线拟合(见图 8,其中 C_V 为变差系数, C_S 为偏态系数),计算得到港珠澳大桥沿线不同采样点不同重现期增水值(见表 3)。由表 3 可见,港珠澳大桥沿线不同重现期的风暴增水值在平面分布上呈西侧大东侧小的特征,这主要与两个因素有关。首先根据文献 [26] 的研究,广东地区台风登陆地点以广东南部地区居多,因此大桥东侧水域受台风影响相对更小。此外,由图 1 可见影响珠江口水域的台风路径大多从东南向西北,而大桥东侧水域受香港侧众多岛屿的掩护作用更强。由表 3 可知,港珠澳大桥西侧珠澳人工岛处 200 年一遇风暴增水值可达 3.17 m,100 年一遇为 2.71 m,50 年一遇为 2.31 m。自珠澳人工岛向东侧,不同重现期风暴增水值呈逐渐降低趋势。东侧西人工岛处 7#采样点,200 年一遇风暴增水值为 2.30 m,相比大桥西侧增水值减小约 0.8 m;100 年一遇为 2.04 m,50 年一遇为 1.70 m。东人工岛处 8#采样点,200 年一遇风暴增水值为 2.26 m,100 年一遇为 2.01 m,50 年一遇为 1.67 m,与西人工岛处风暴增水总体接近。

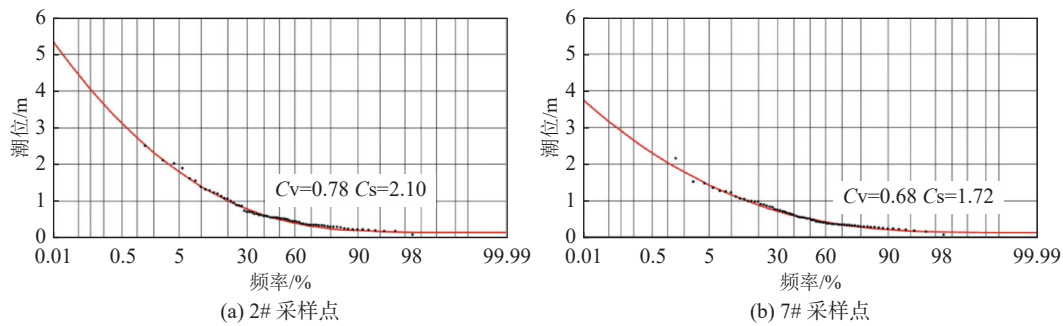


图 8 港珠澳大桥沿线部分采样点不同重现期增水值 P-Ⅲ曲线拟合

Fig. 8 P-Ⅲ curve of storm surge in different return periods at some sampling points along Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge

表 3 港珠澳大桥沿线采样点不同重现期风暴增水特征值统计

Tab. 3	Storm surges of different periods at different sampling points along Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge							单位: m
重现期/a	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#
200	3.17	3.08	2.88	2.68	2.64	2.37	2.30	2.26
100	2.71	2.65	2.47	2.36	2.32	2.10	2.04	2.01
50	2.31	2.25	2.14	1.93	1.90	1.73	1.70	1.67
10	1.35	1.34	1.33	1.27	1.25	1.17	1.16	1.14

4 结 语

自 1951 年以来, 珠江口附近水域的年均台风数量、台风最大风速、台风中心最低气压趋势性变化不明显。通过风暴潮数学模型计算了港珠澳大桥沿线不同区域的增水值, 可见港珠澳大桥自西向东风暴增水值逐渐降低, 最大增水值出现在“山竹”台风期间, 珠澳人工岛附近最大增水值约 2.66 m, 东西人工岛附近约 2.15 m。采用 P-Ⅲ 频率曲线计算了港珠澳大桥沿线不同区域不同重现期增水值, 珠澳人工岛处 200 年一遇风暴增水值为 3.17 m, 50 年一遇为 2.31 m, 东西人工岛处 200 年一遇风暴增水值约为 2.30 m, 50 年一遇约为 1.70 m。研究结果可为港珠澳大桥运维期安全评估提供技术支撑。

参 考 文 献:

[1] 涂金良, 罗庆锋, 刘海洋. “天鸽”和“山竹”台风沿海部分海堤损毁调查及对策分析[J]. 广东水利水电, 2021(5): 12-16, 39. (TU Jinliang, LUO Qingfeng, LIU Haiyang. Investigation and countermeasures analysis of damages of coastal seawalls by typhoons Hato (1713) and Mangkhut (1822)[J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2021(5): 12-16, 39. (in Chinese))

[2] 纪汗青. 渔港的台风风暴波浪模拟与风险分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2018. (JI Hanqing. Simulation of typhoon surge-wave and risk analysis of fishing port[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018. (in Chinese))

[3] 严盛. 超标准风暴潮作用下的钱塘江北岸海塘安全措施研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010. (YAN Sheng. Study on safety measures of northern seawalls in Qiantang River under the storm surges over design[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010. (in Chinese))

[4] 周冠博, 钱奇峰, 吕心艳, 等. 人工智能在台风监测和预报中的探索与展望[J]. 气象研究与应用, 2022, 43(2): 1-8. (ZHOU Guanbo, QIAN Qifeng, LÜ Xinyan, et al. Application and expectation of artificial intelligence in typhoon monitoring and forecasting[J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2022, 43(2): 1-8. (in Chinese))

[5] 刘逸洁. 基于卫星云导风提取技术的风暴潮模型风场优化研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2020. (LIU Yijie. Research on optimization method of storm surge wind field based on satellite cloud motion wind extraction technology[D]. Nanjing:

Nanjing Normal University, 2020. (in Chinese))

- [6] 褚芹芹, 张万磊, 洪新, 等. 河北省沿海风暴潮特征及成因分析[J]. *海洋预报*, 2020, 37(1): 18-27. (CHU Qinqin, ZHANG Wanlei, HONG Xin, et al. Characteristic and affecting factors of storm surges along the coast of Hebei Province[J]. *Marine Forecasts*, 2020, 37(1): 18-27. (in Chinese))
- [7] FANG J Y, WAHL T, FANG J, et al. Compound flood potential from storm surge and heavy precipitation in coastal China: dependence, drivers, and impacts[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2021, 25(8): 4403-4416.
- [8] 张海燕. 南海区台风风暴潮时空分布特征[J]. *海洋预报*, 2019, 36(6): 1-8. (ZHANG Haiyan. Spatio-temporal distribution of typhoon storm surge along the South China Sea coast[J]. *Marine Forecasts*, 2019, 36(6): 1-8. (in Chinese))
- [9] 秦鹏, 黄浩辉, 李春梅. 珠江口海域热带气旋气候特征及最大风速计算[J]. *气象研究与应用*, 2013, 34(2): 26-30. (QIN Peng, HUANG Haohui, LI Chunmei. Climatic characteristics of tropical cyclones and its maximum wind speed calculation in Pearl River Estuary and the nearby sea area[J]. *Journal of Meteorological Research and Application*, 2013, 34(2): 26-30. (in Chinese))
- [10] 张光宇. 渤海风暴潮特征及增水影响因素数值模拟研究[D]. 天津: 天津大学, 2018. (ZHANG Guangyu. Study on characteristics and effect factors of storm surges in Bohai Sea[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018. (in Chinese))
- [11] 王晓红. 强台风条件下浙东海塘安全评价及可靠度[D]. 杭州: 浙江大学, 2015. (WANG Xiaohong. Safety assessment and reliability of seawall in the East Zhejiang under powerful typhoon[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015. (in Chinese))
- [12] 王千. 恶劣海况对珠江口水域桥梁的影响分析[J]. *南通航运职业技术学院学报*, 2021, 20(2): 56-59. (WANG Qian. Analysis of the impact of severe sea conditions on bridges in the Pearl River Estuary[J]. *Journal of Nantong Vocational & Technical Shipping College*, 2021, 20(2): 56-59. (in Chinese))
- [13] 侯棚, 王其松, 彭石. 风暴潮漫堤风险分析——以茅洲河为例[J]. *广西科学*, 2021, 28(1): 37-45. (HOU Peng, WANG Qisong, PENG Shi. Risk analysis of flood inundation by storm surge——a case study of Maozhou River[J]. *Guangxi Sciences*, 2021, 28(1): 37-45. (in Chinese))
- [14] 陈文想. 2008—2018年强台风对珠江口—横门及其上游的增水影响分析[J]. *广东水利水电*, 2019(5): 28-31. (CHEN Wenxiang. Influence analysis of 2008—2018 strong typhoon setup on Pearl River Estuary-Hengmen[J]. *Guangdong Water Resources and Hydropower*, 2019(5): 28-31. (in Chinese))
- [15] 邹宛彤, 刘峰, 郭智亮, 等. 台风“山竹”引致广州白云机场极端大风分析[J]. *民航管理*, 2019(8): 68-71. (ZOU Wantong, LIU Feng, GUO Zhiliang, et al. Analysis of extreme winds caused by Mangkhut Diagnostic in Baiyun Airport[J]. *Civil Aviation Management*, 2019(8): 68-71. (in Chinese))
- [16] 王红川, 杨汜, 潘军宁. 考虑极端天气时港珠澳大桥人工岛设计波浪要素——II. 设计波要素校核方法[J]. *水科学进展*, 2019, 30(6): 902-907. (WANG Hongchuan, YANG Fan, PAN Junning. Study on the design wave on the artificial island of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge while considering the extreme weather: II. checking method of design wave elements[J]. *Advances in Water Science*, 2019, 30(6): 902-907. (in Chinese))
- [17] 莫涛涛, 张原. 大型直立锁边金属屋面抗风性能——港珠澳大桥珠海口岸旅检大楼工程实践[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2020, 60(1): 66-75. (MO Taotao, ZHANG Yuan. Wind resistance of large vertical locked side metal roof—engineering practice of the Travel Inspection Building on the Zhuhai Port of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2020, 60(1): 66-75. (in Chinese))
- [18] 路川藤, 罗小峰. 基于非结构网格的高分辨率隐式算法研究及应用[J]. *海洋通报*, 2015, 34(1): 59-64. (LU Chuanteng, LUO Xiaofeng. Study of the unstructured grid implicit algorithm and its application[J]. *Marine Science Bulletin*, 2015, 34(1): 59-64. (in Chinese))
- [19] HOLLAND G J. An analytic model of the wind and pressure profiles in hurricanes[J]. *Monthly Weather Review*, 1980, 108(8): 1212-1218.
- [20] MILLER B I. Characteristics of hurricanes[J]. *Science*, 1967, 157(3795): 1389-1399.
- [21] JELESNIANSKI C P. A numerical calculation of storm tides induced by a tropical storm impinging on a continental shelf[J]. *Monthly Weather Review*, 1965, 93(6): 343-358.
- [22] WU J. Wind-stress coefficients over sea surface from breeze to hurricane[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1982, 87(C12): 9704-9706.

- [23] 孟江山, 路川藤, 罗小峰, 等. 基于GPU并行的厦门附近海域潮波传播数值模拟研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2021, 19(4): 424-433. (MENG Jiangshan, LU Chuanteng, LUO Xiaofeng, et al. The tidal wave propagation simulation in sea area near Xiamen with GPU parallel computation[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2021, 19(4): 424-433. (in Chinese))
- [24] 毛华健. 华南地区登陆台风风场特征及风灾评估[D]. 广州: 广州大学, 2021. (MAO Huajian. Wind field characteristics and wind disaster assessment of landing typhoons in South China[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2021. (in Chinese))
- [25] 刘士诚, 陈永平, 谭亚, 等. 珠江河网1822号台风“山竹”期间风暴增水模拟及特性分析[J]. 海洋预报, 2021, 38(2): 12-20. (LIU Shicheng, CHEN Yongping, TAN Ya, et al. Storm surge simulation and characteristic analysis during typhoon “Mangkhut” 2018 in the Pearl River Estuary[J]. Marine Forecasts, 2021, 38(2): 12-20. (in Chinese))
- [26] 韩鹏, 郭桂祯, 孙宁, 等. 广东省台风灾害时空格局及影响因素研究[J/OL]. 灾害学. (2022-01-11)[2022-05-30]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/611097.P.20220527.1915.005.html>. (HAN Peng, GUO Guizhen, SUN Ning, et al. Spatiotemporal patterns and influencing factors of typhoon disasters in Guangdong Province, China[J/OL]. Journal of Catastrophology. (2022-01-11)[2022-05-30]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/611097.P.20220527.1915.005.html>. (in Chinese))

Study on the characteristics of extreme storm surge along Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge

ZENG Fanxing¹, MAI Quanxiang², LU Chuanteng³, DING Pei³, LUO Xiaofeng³, GAO Zhengrong³

(1. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge Authority, Zhuhai 519060, China; 3. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: The research on the characteristics of water increase along the sea crossing transportation facilities under the action of storm surge is of great significance to the disaster prevention and mitigation and structural safety assessment during the operation and maintenance period of transportation projects. Based on the measured typhoon data from 1951 to 2020, the variation characteristics of typhoon parameters in different ranges centered on Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge are statistically analyzed. It is found that the annual average number of typhoons, the maximum wind speed of typhoons and the minimum pressure in the center of typhoons in the waters near the Pearl River Estuary have not changed significantly since 1951. The storm surge mathematical model in the Western Pacific is established, and the characteristic values of storm surge in different areas along the Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge are calculated. The research shows that the storm surge of the Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge gradually decreases from west to East. The 200 years storm surge at the Zhuhai-Macao artificial island on the west side of the bridge is 3.17 m, the 50 years is 2.31 m, and the 200 years storm surge at the East-West artificial island is about 2.30 m, and the 50 years is about 1.70 m. The research results can provide technical support for the safety assessment of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge during operation and maintenance period.

Key words: Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge; storm surge; numerical simulation; return period; typhoon