

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2019.136



风暴潮、浪作用下中小型跨海桥梁 破坏形式与数值模拟研究

王玉琦

(中铁十九局集团第六工程有限公司, 江苏 无锡 214028)

摘要:强台风形成的巨浪、风暴潮对跨海桥梁的安全造成了严重威胁,为探讨台风风暴潮、浪共同作用下中小型跨海桥梁上部结构和下部结构的破坏机理及台风风暴潮期间不同水位下的波浪对下部结构的作用规律,开展了台风风暴潮、浪共同作用下中小型跨海桥梁破坏形式调研,发现风暴潮、浪作用下中小型跨海桥梁上部结构的破坏形式主要有梁体离位、梁体脱落和梁体断裂,主要原因为梁体被迫发生无约束运动;下部结构破坏主要表现为结构偏移、倒塌以及盖梁连接失效破坏,主要原因为水动力作用较强及上部结构撞击。通过 CFD 三维数值模拟研究了桥梁下部结构波浪荷载,给出了考虑风暴潮水位下波浪冲击桥墩的经验公式。根据调研及数值模拟,提出了设计及施工建议。

关键词:风暴潮;跨海桥梁;破坏形式;破坏原因;水动力

中图分类号:U447 文献标志码:A 文章编号:2096-6717(2019)06-0152-06

Failure forms and numerical simulation of small and medium-sized sea-crossing bridges under storm surge and wave

Wang Yuqi

(China Railway 19th Bureau Group Sixth Engineering Co., Ltd, Wuxi 214028, Jiangsu, P. R. China)

Abstract: Waves and storm surges induced by strong typhoons pose a serious threat to the safety of sea-crossing bridges. In order to study the damage mechanism of the superstructure and the substructure of the small and medium-sized sea-crossing bridges under the combined action of storm surge and wave, and the affecting law of wave under different water levels during the storm surge on the substructure, the damage patterns of the small and medium-sized sea-crossing bridges induced by the combined action of typhoon storm surge and wave are investigated. Survey results show that the failure patterns of the superstructure of the small and medium-sized sea-crossing bridge under the action of storm surge and wave mainly include beam body dislocation, beam body shedding and beam body fracture. The main failure reasons are that the beam is forced to undergo unconstrained movement. The failure patterns of the substructure are mainly structural deviation, collapse and failure of the girder connection failure, and the main cause is large hydrodynamic effect and impact of superstructure. Subsequently, wave loads on bridge substructure are studied by CFD three-dimensional numerical simulation and an empirical formula of wave impact on pier under storm surge is obtained. Finally, based on the investigation and numerical simulation, some

收稿日期:2019-06-25

作者简介:王玉琦(1971-),男,高级工程师,主要从事桥梁工程研究,E-mail:lzq1102dd@163.com.

Received:2019-06-25

Author brief:Wang Yuqi (1971-), senior engineer, main research interest: bridge engineering, E-mail: lzq1102dd@163.com.

suggestions and measures are proposed for structural design and structural construction.

Keywords: storm surge; sea-crossing bridge; damage modes; damage reason; hydrodynamic

跨海桥梁在沿海交通建设中具有重要作用,是国家经济大动脉上的关键和重大基础设施^[1-2]。截至 2016 年底,东海大桥、杭州湾跨海大桥、舟山跨海连岛工程、青岛海湾大桥和港珠澳大桥相继建成。大量中小型跨海桥梁也遍布中国东南沿海地区。中国东南沿海地区普遍受到西北太平洋台风生成区和东亚季风区的影响,台风、寒潮等恶劣天气引发的极端波浪灾害频发^[3]。台风伴随的强风和气压骤变,除了引发巨浪之外,还会引起海面的剧烈震荡、海面的异常升高或降低,从而产生严重的风暴潮^[4-5]。由于中国沿海地区桥梁结构常年受台风风暴潮、浪的影响,所以探究台风风暴潮、浪共同作用下跨海桥梁的破坏机理对跨海桥梁的设计具有重要意义。现场灾后调研,是研究灾害机理的重要手段。2005 年 Katrina 飓风造成了美国墨西哥湾沿岸数十座高速公路桥梁损坏^[2,6-7],Okeil 等^[8]现场调研了部分桥梁的桥梁损坏形式,为台风风暴潮、浪共同作用桥梁损坏研究提供了宝贵的资料。徐淑颂^[9]通过现场调研,研究了海洋环境因素对沿海公路桥梁的影响,并提出了相应的防治对策。

桥梁结构通常由上部结构、支座和下部结构 3 部分组成,上部结构与下部结构之间采用支座结构传递力学行为。对于小跨径的预制桥梁,当上部结构由于台风及风暴潮造成损坏时,可进行更换,对灾后救援和重建影响较小;但下部结构发生损坏时,灾后工作将受到严重制约,故跨海桥梁下部结构对结构性损坏的要求较上部结构更为严格^[8]。风暴潮是强烈的大气扰动造成的海面异常升高现象(如强风)^[10]。台风、风暴潮期间,风暴潮对波浪作用的桥梁下部结构波浪荷载分布有显著影响。邓江源^[11]对现有的跨海大桥下部结构波浪力的计算方法进行了比较研究。房忱等^[12]研究了跨海大桥桩基、桥墩等小尺度下部结构波浪荷载的非线性特性,研究发现,对于浅水区的桥墩,非线性波的非线性作用较为显著,与采用 Morison 方程确定的线性波浪力有 14% 的差异。由于中小跨径跨海桥梁大多修建在近海浅水区域,波浪、波浪荷载的非线性显著,采用 Morison 方程可能低估了波浪荷载,同时,已有研究^[13-15]大多局限于研究不同下部结构类型、不同波浪入射方向角、不同波浪条件等下部结构波浪力的计算方法及规律,较少关注不同风暴潮增水情形对

下部结构波浪力的影响。因此,研究台风风暴潮期间不同水位下的波浪对下部结构的作用规律,对跨海桥梁下部结构的设计具有重要意义。

笔者调研了历史台风风暴潮、浪共同作用下中小型跨海桥梁破坏情况,分析了台风风暴潮、浪共同作用下跨海桥梁上部结构和下部结构的破坏原因;为获得台风风暴潮期间不同水位下的波浪对下部结构的作用规律,开展了 CFD 三维数值模拟,探讨了不同风暴增水对波浪作用桥墩的影响,提出了风暴潮、浪作用下中小型跨海桥梁的设计与施工建议。

1 桥梁结构破坏形式调研及成因分析

根据美国沿海桥梁在 2005 年 Katrina 飓风期间在台风风暴潮、浪的共同作用下桥梁结构发生的结构损伤特征,可将上部结构的破坏形式分为梁体移位、梁体脱落和梁体断裂等;下部结构的破坏形式可分为结构偏移、倒塌及盖梁连接失效等。每种破坏形式的形成原因有所不同。

1.1 上部结构梁体移位

梁体移位主要是由于台风引起的风暴潮冲击梁体,使梁体发生了沿横桥向的位移。梁体移位原因如图 1 所示。由图 1 可知,对于沿海桥梁而言,梁体主要受到两个方向的力,一个是沿横桥向的冲击力,另一个是沿竖向的浮力。当风暴潮到达梁位,梁体部分或整体被淹没,梁体将受到竖向的浮力,浮力的存在削弱了梁体与支座之间沿横桥向的抗力,使梁体在横桥向的冲击力下更容易被推动,此时,梁体保持完好,但丧失通行能力。

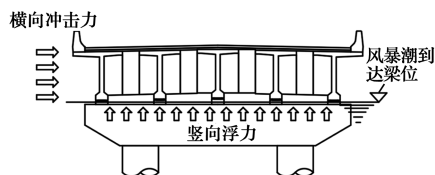


图 1 梁体移位(脱落)成因

Fig. 1 Cause of beam displacement (shedding)

1.2 上部结构梁体脱落

梁体脱落指部分梁体被整体完好地推落至海域里,出现脱落现象^[8]。出现该种破坏形式的原因与梁体移位类似,主要是由于竖向浮力高于横向冲击力而先使梁体脱离支座约束,再在横向冲击力的作用下出现脱落破坏。

1.3 上部结构梁体断裂

沿海桥梁在台风风暴潮、浪的共同作用下出现的梁体断裂主要出现在跨中位置^[8]。该破坏形式主要是由于台风引起的海面异常升高和降低,使海面时高时低。当支座不具备抗拉能力或抗拉能力较弱时,梁体在浮力的作用下时而上升、时而降落,在反复循环作用下损坏。对于简支梁桥而言,跨中弯矩最大,最容易进入极限状态,出现塑性破坏,如图2所示。

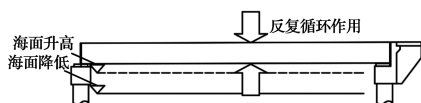


图2 梁体断裂成因图

Fig. 2 Cause diagram of fracture of beam body

桥梁上部结构还包括桥面构造。桥面构造主要包括桥面铺装、排水防水系统、人行道、路缘石、栏杆、护栏、照明灯和伸缩缝等。栏杆、护栏和照明灯阻水面积较大,水动力效应显著,所以,在风暴潮的作用下较容易发生损坏;护栏结构目前很少进行具体计算设计,其考虑最多的因素是车辆的撞击力^[16],护栏设计通常只布置了抵抗汽车撞击的顶部钢筋,没有设置抵抗来自外部冲击的底部钢筋,当护栏承受风暴潮冲击时,由于阻水面积大,又没有设计抵抗外部冲击力的构造,容易造成护栏与桥面板的连接失效,如图3所示。



图3 护栏结构破坏形式^[8]

Fig. 3 Damage form of guardrail structure

从桥梁上部结构的损伤可以看出,梁体在台风风暴潮、浪作用下发生损坏的原因大部分都可以归结于梁体无约束运动。所以,支座的设计对上部结构的安全具有重要意义。对于跨海桥梁,为了适应台风、龙卷风、雷暴等极端灾害性天气,跨海桥梁支座不仅要适应桥梁的变形行为,还要考虑极端灾害的影响。

1.4 下部结构破坏

桥梁下部结构是支撑上部结构的建筑物,包括桥墩、桥台和墩台基础。由于跨海桥梁桥墩的墩基础直接立于海中,受到台风风暴潮、浪的影响更加直接。公路桥墩大部分为圆形桥墩、矩形桥墩,铁路桥

墩大部分为圆端形桥墩。桥墩的阻水面积较小,对水流还有引导作用,抵抗台风风暴潮、浪的能力较强,但在极端的台风风暴潮和浪作用下也可能发生损伤,其破坏形式如图4所示。

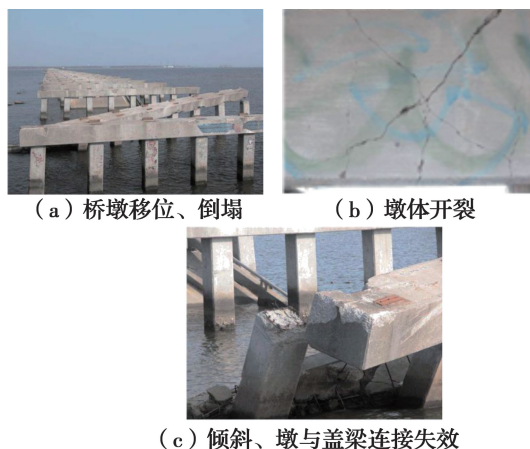


图4 下部结构损伤破坏形式^[8]

Fig. 4 Damage and failure modes of substructure

由图4可知,台风风暴潮、浪对桥梁下部结构的破坏极为严重。沿海桥梁下部结构为柱式桥墩时,在台风风暴潮、浪的作用下,柱发生了移位、倒塌、开裂、倾斜及柱与盖梁连接失效等损坏形式。破坏的原因主要有水动力显著、上部结构撞击、下部结构严重冲刷等。同时可以发现,发生严重结构性损伤的位置为盖梁和柱的连接处,这里是抗震设计中布置塑性铰的位置,所以,不能排除台风风暴潮、浪对结构的作用为周期性的作用。从部分柱的倾斜和移位也可以发现,在台风风暴潮、浪的短时间作用下,柱底周围发生了严重的冲刷。

桥梁下部结构施工工期长,对于深海桥梁还具有施工难度大等特点,当桥梁下部结构发生结构性损伤无法使用时,会严重制约线路的抢修。风暴潮引起的桥墩冲刷值得进行深入研究,并需要采用有效的防护措施来保护桥墩,使其免于遭受严重冲刷。同时,需加强桥墩与盖梁之间的连接,使桥墩和盖梁在风暴潮的作用下不至于连接失效。

2 风暴潮、浪作用下桥梁下部结构受力数值模拟

下部结构发生损坏时,灾后工作将受到严重制约。采用CFD分析软件Flow-3D,通过选用不同的水位模拟不同的风暴增水情形,研究风暴潮、浪作用下桥梁下部结构的受力特点。假设水位对波浪冲击

桥墩的影响即风暴潮对波浪冲击桥墩的影响,不考虑风暴潮和波浪的非线性耦合。在数值计算中,考虑水体为连续不可压缩粘性流体,通过雷诺时均法求解流体连续性方程和动量守恒方程(RANS 方程),得到流体的运动状态,同时,采用 $k-\omega$ 模型考虑水体的湍流。很多文献都对 RANS 方程、 $k-\omega$ 模型等流体计算方法进行了介绍^[17],本文不再赘述。数值试验设计的桥梁下部结构为半径($D/2$)1.8 m 的近海圆形桥墩,未进行缩尺;波浪选用孤立波,共设计了孤立波波高(H)分别为 3、5、7 m,水深(d)分别为 10、12、15 m 的 9 个数值试验工况。

先建立如图 5 所示的三维数值水槽。在兼顾数值准确性的前提下,采用嵌套网格方式节约计算资源。数值水槽长 150 m、宽 20 m、高 20 m,在入口侧选用源入口造波法进行造波,并在出流侧设置消波块进行消波。数值水槽的边界条件设置为:前侧为波浪边界,后侧为出流边界,两侧为对称边界,上侧为压力边界(大气压),下侧为墙边界。为验证所建立数值模型的准确性,采用波高为 5 m,水深分别为 10、12、15 m 的数值波形与理论波形进行对比。数值波形取水槽前端 3 m 处水质点的波动轨迹,对比结果如图 6 所示。由图 6 可知,数值水槽造波波形

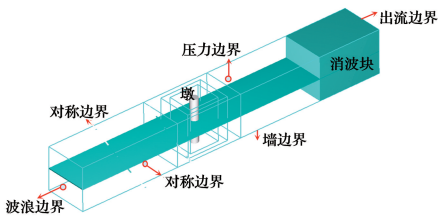


图 5 数值水槽示意图

Fig. 5 Diagram of numerical calculation of flume

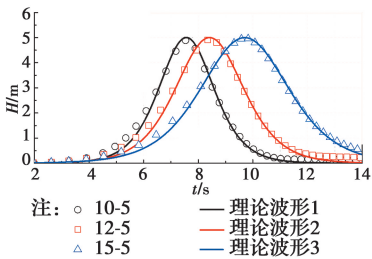


图 6 数值波形验证

Fig. 6 Validation of numerical waveform

与理论波形吻合良好,其中水深 10 m、波高 5 m 时,造波的最大波高衰减 2.2%;水深 12 m、波高 5 m 时,最大波高衰减 1.6%;水深 15 m、波高 5 m 时,最大波高衰减 0.5%,说明造波受破碎指标 H/d (波

高/水深)的影响。在同一网格下,破碎指标越大,造波的最大波高误差越大,当达到破碎临界时,孤立波将发生破碎。总体而言,数值水槽造波波形与理论波形吻合良好,满足研究需求。在正式开展数值试验时,将模型置于水槽中部,如图 5 所示。

3 不同风暴增水下桥梁下部结构的波浪力

各工况数值模拟得到的水平波浪力、纵向弯矩(矩矢垂直波浪前进方向)如图 7、图 8 所示。由图 7、图 8 可知,最大水平波浪力随着水深的增加而减小;除水深 10 m、波高 7 m 的工况,最大纵向弯矩随着水深的增加而增加,最大水平波浪力与最大纵向弯矩几乎发生在相同时刻。

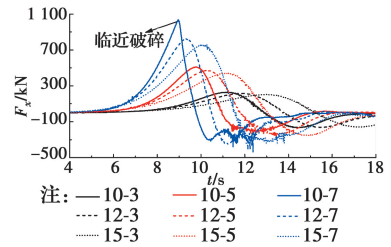


图 7 水平波浪力历程

Fig. 7 Horizontal wave force time history

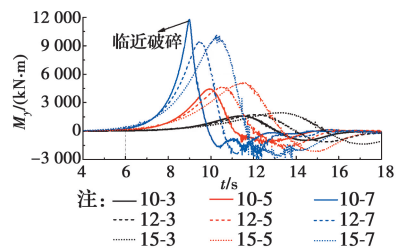


图 8 纵向弯矩时程

Fig. 8 Longitudinal moment duration

孤立波的性质由破碎指标 H/d 决定,不少学者给出的 H/d 的极限值介于 0.714~1.03 之间,常用值为 0.78^[18]。对于水深 10 m、波高 7 m 的工况,其破碎指标 $H/d=0.7$,临近破碎,所以,水平波浪力和纵向弯矩时程较为陡峭,最大水平波浪力与最大纵向弯矩较破碎指标 H/d 较小的工况大很多。波浪破碎时与结构物作用,伴随着更剧烈的能量交换^[19],所以,沿岸工程应更关注破碎波与结构物之间的响应;但这不是讨论的重点,本文仅讨论未临近破碎的波浪与结构物的响应,对临近破碎的工况 10-7(10-7 代表水深为 10 m、波高为 7 m 的工况)进行了剔除,只关心未临近破碎的孤立波作用圆形桥墩

的受力规律。

为得到未破碎(H/d 较小)的孤立波作用圆形桥墩的受力规律,采用无量纲分析的方法建立了无因次的最大水平波浪力、最大纵向弯矩力矩与破碎指标(H/d)的关系,如图9、图10所示。无因次的最大水平波浪力采用指数形式拟合,最大纵向弯矩力矩采用线性拟合,拟合结果如图9、图10及式(1)、式(2)所示。采用式(1)、式(2)、式(3)即可进行未临近破碎的孤立波作用圆形桥墩的最大波浪力及最大弯矩计算,这将有助于近海工程结构波浪荷载的初步估计。

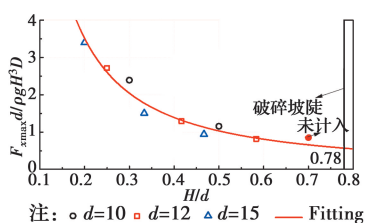


图9 最大水平波浪力拟合

Fig. 9 Fitting results of maximum horizontal wave force

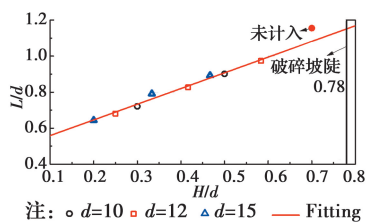


图10 最大纵向弯矩力矩拟合

Fig. 10 Fitting results of maximum longitudinal moment

$$\frac{F_{rmax}}{\rho g H^2 D} \cdot \frac{d}{H} = 0.41 \times \left(\frac{H}{d}\right)^{-1.34} \quad (1)$$

$$\frac{L}{d} = 0.87 \times \frac{d}{H} + 0.47 \quad (2)$$

$$M_{jmax} = F_{rmax} \times L \quad (3)$$

式中: ρ 为水的密度; g 为重力加速度; D 为圆形桥墩直径; L 为最大纵向弯矩力矩。

4 结论与设计施工建议

根据台风风暴潮、浪共同作用下中小型跨海桥梁破坏情况调研,分析了台风风暴潮、浪共同作用下跨海桥梁上部结构和下部结构的破坏原因,并开展了CFD三维数值模拟,探讨了不同风暴增水对波浪作用桥墩的影响,得到以下结论:

1)根据桥梁上部结构破坏形式调研,发现风暴

潮、浪作用下跨海桥梁上部结构的破坏形式主要有梁体离位、梁体脱落和梁体断裂,主要原因为风暴潮伴随的海面异常升降、风暴潮的冲击力过大、桥梁结构设计不合理(阻水面积大、上部结构与下部结构连接欠考虑)导致中小跨径跨海桥梁梁体在台风风暴潮、浪共同作用下被迫发生无约束运动。

2)根据桥梁下部结构破坏形式调研,发现下部结构破坏主要表现为结构偏移、倒塌以及盖梁连接失效破坏,主要原因为下部结构严重冲刷、水动力显著、上部结构撞击。

3)桥梁下部结构最大水平波浪力随着水深的增加而减小;最大纵向弯矩在未临近破碎的波浪作用下随着水深的增加而增加。给出了不同风暴增水下近海波浪作用下桥墩的最大波浪力、最大纵向弯矩力矩的经验公式,在确定桥墩直径、桥址水深、来波波高、天文潮+风暴潮总水位后,即可对桥墩受到的波浪力进行简单的初步估计。

在台风风暴潮、浪的共同作用下,桥梁受力是一个复杂的空间问题;浮力、各方向的冲击力都是造成桥梁损坏的因素。为了使跨海桥梁免遭严重破坏,必须制定合理的解决对策,但一味地增大结构抗力不经济。根据台风风暴潮、浪共同作用下的桥梁破坏分析,可采取如下对策:

1)采用阻水面积较小的护栏,采用带有孔洞的桥面板,释放桥面板下聚积的空气和压力。

2)妥善处理上部结构与下部结构的连接,使支座在竖向、横向都具有耗能能力,并允许具有一定的位移;为了保护下部结构,允许在一定冲击力下发生剪切破坏。

3)采用具有导流作用的桥墩,以减少风暴潮的冲击力。

4)设置防护装置,如在桥墩周围设置防波堤等。

5)加大基础埋深,对桥墩发生的局部冲刷进行防护。

参考文献:

- [1] CAI C S, ALBRECHT P, BOSCH H R. Flutter and buffeting analysis. II: Luling and Deer Isle Bridges [J]. Journal of Bridge Engineering, 1999, 4(3): 181-188.
- [2] FOSSIER P. Hurricane Katrina accelerated repairs to interstate 10 louisiana twin span bridge [J]. PCI Journal, 2005: 50(6): 121-125.
- [3] 刘天绍, 刘孙俊, 杨玺, 等. 1951—2015影响广东沿海

- 台风的统计分析[J]. 海洋预报, 2018, 35(4): 68-74.
LIU T S, LIU S J, YANG X, et al. Statistical analysis of the typhoon influencing Guangdong province during 1951-2015 [J]. Marine Forecasts, 2018, 35(4): 68-74. (in Chinese)
- [4] GHOBARAH A, SAATCIOGLU M, NISTOR I. The impact of the 26 December 2004 earthquake and tsunami on structures and infrastructure [J]. Engineering Structures, 2006, 28(2): 312-326.
- [5] KNABB R D, ROHME J R, BROWN D P. Tropical cyclone report: Hurricane Katrina August 23-30, 2005 [J]. Fire Engineering, 2006, 159(5): 32, 35-37.
- [6] DOUGLASS S L. The impact of Hurricane Ivan on the coastal roads of Florida and Alabama: A preliminary report [R]. Alabama: University of South Alabama, 2004.
- [7] ROBERTSON I N, RIGGS H R, YIM S C, et al. Lessons from Hurricane Katrina storm surge on bridges and buildings [J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 2007, 133(6): 463-483.
- [8] OKEIL A M, CAI C S. Survey of short- and medium-span bridge damage induced by Hurricane Katrina[J]. Journal of Bridge Engineering, 2008, 13(4): 377-387.
- [9] 徐淑颂. 海洋环境因素对沿海公路桥梁的影响及防治对策的研究[D]. 西安: 长安大学, 2013.
XU S S, Research on the impact and countermeasures of the coastal highway and bridge which in the influence of marine environmental factors [D]. Xi'an: Chang'an University, 2013. (in Chinese)
- [10] 冯士筌. 风暴潮导论[M]. 北京: 科学出版社, 1982.
FENG S Z. Introduction to storm surge [M]. Beijing: Science Press, 1982. (in Chinese)
- [11] 邓江源. 桥梁波浪力计算方法比较研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
DENG J Y. The comparative study on wave force calculation methods of bridges [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016. (in Chinese)
- [12] 房忱, 李永乐. 跨海大桥小尺度下部结构非线性波浪荷载分析[J]. 铁道标准设计, 2017(5): 100-104.
FANG C, LI Y L. Analysis of nonlinear wave load on small size substructure of cross-sea bridge [J]. Railway Standard Design, 2017(5): 100-104. (in Chinese)
- [13] 黄雯. 波浪与海流作用下跨海大桥下部结构受力特性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
HUANG W. Study on mechanical properties of cross-sea bridges substructure under the effects of wave and current [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016. (in Chinese)
- [14] 刘浪. 跨海桥梁下部结构波流力计算方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
LIU L. Research on computing method of wave-current force on sea-crossing bridge substructures [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017. (in Chinese)
- [15] 邹艳荣, 齐梅兰, 李金钊. 近海岸桥梁下部结构波浪力分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2018, 52(12): 2356-2364.
KUAI Y R, QI M L, LI J Z. Analysis of wave forces on bridge substructure in near-shore [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2018, 52(12): 2356-2364. (in Chinese)
- [16] 李明飞, 张博, 姚启明, 等. 公路桥梁钢筋混凝土墙式护栏设计[J]. 沈阳建筑工程学院学报(自然科学版), 2002, 18(3): 167-169.
LI M F, ZHANG B, YAO Q M, et al. The design of reinforced concrete safety barrier of highway bridges [J]. Journal of Shenyang Architectural and Civil Engineering University (Nature Science), 2002, 18(3): 167-169. (in Chinese)
- [17] YANG S L, YANG W L, QIN S Q, et al. Numerical study on characteristics of dam-break wave [J]. Ocean Engineering, 2018, 159: 358-371.
- [18] 王树青, 梁丙臣. 海洋工程波浪力学[M]. 山东 青岛: 中国海洋大学出版社, 2013.
WANG S Q, LIANG B C. Wave mechanics for ocean engineering [M]. Qingdao, Shandong: China Ocean University Press, 2013. (in Chinese)
- [19] HOSSEN M B, ROSHID H O, ALI M Z. Characteristics of the solitary waves and rogue waves with interaction phenomena in a $(2+1)$ -dimensional Breaking Soliton equation [J]. Physics Letters A, 2018, 382(19): 1268-1274.