

基于 FLUENT 的跨海桥梁升阻力与 波浪冲击高度相关性研究

张宪堂^{1,2}, 高康宁^{1,2}, 周红敏², 王洪立¹

(1. 山东科技大学 山东省土木工程防灾减灾重点实验室, 山东 青岛 266590; 2. 山东科技大学 土木建筑学院, 山东 青岛 266590)

摘要: 由于跨海桥梁在设计时要考虑与两岸道路高程的衔接和与周围景观协调等因素的影响, 桥面高程会受到限制。当跨海桥梁上部结构以下水位升高时, 桥梁主梁可能部分或全部被淹没在水中, 桥梁上部结构会受到巨大的波浪力冲击作用, 对桥梁的安全构成威胁。利用 FLUENT12.0 软件建立的二维数值波浪水槽, 建立了不同波浪工况条件下的数值计算模型, 分析了桥梁上部结构所受到的波浪力大小与波浪冲击高度之间的相关性, 研究了升阻力系数与冲击高度的关系。根据分析结果对主梁进行优化设计, 有助于提高桥梁主梁抵抗波浪荷载的能力, 并为寻求减少波浪冲击作用的有效措施提供参考依据。

关键词: 跨海桥梁; FLUENT; 波浪冲击高度; 相关性

中图分类号: TV139.2⁺6

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2013)04-0057-05

Study of Correlation Between Lift and Drag Forces with Wave Attacking Height of Cross-sea Bridge Based on FLUENT

Zhang Xiantang^{1,2}, Gao Kangning^{1,2}, Zhou Hongmin², Wang Hongli¹

(1. Shandong Provincial Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention and Mitigation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;
2. College of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: During the designing of cross-sea bridge, bridge elevation agreement with the road of both sides and coordination with the surrounding landscape and other factors should be considered, so the bridge elevation will be limited. When the water level below cross-sea bridge deck becomes higher, the bridge may be partly or totally submerged in the water. Huge hydraulic wave impact will act on the bridge superstructure and have a bad effect on the safety and reliability of the bridge. In this paper, two-dimensional wave tank was established by FLUENT12.0 software, and various numerical models under different wave working conditions were established to analyze correlation between wave force on the bridge superstructure and wave attacking height. Moreover, the relationship between the lift and drag coefficients and wave attacking height was studied. According to the results, optimizing bridge girder design will help improve the ability to resist the wave loads and also provide a reference in seeking effective means and measures to reduce the impact of wave.

Key words: cross-sea bridge; FLUENT; wave attacking height; correlation

收稿日期: 2013-04-09

基金资助: 中国博士后科学基金项目(2013T60681, 2012M521364); 山东省高等学校科技计划项目(J11LE10); 青岛经济技术开发区重点科技计划项目(2012-2-49)。

作者简介: 张宪堂(1973—), 男, 河北井陘人, 副教授, 博士后, 主要从事桥梁结构抗风浪与抗爆方面的研究。

E-mail: zzxhtm@163.com

当跨海桥梁主梁以下水位变高时,主梁有可能部分或全部淹没在水中,桥梁上部结构将会受到巨大的波浪力冲击,对桥梁的安全可靠性存在不利影响^[1-5]。若能正确估计桥梁上部结构所受到的外部荷载大小与波浪冲击高度之间的相关性,对桥梁结构优化设计和评估波浪冲击的破坏程度具有重要的意义。数值波浪水槽由于其建模方便,计算省时省力,可以实现多种模型的模拟分析,近年来常被应用在工程实际当中^[6-9]。数值波浪水槽用数值计算模拟物理波浪水槽中的试验,一方面要数值模拟波浪的生成,另一方面要数值求解波浪与试验模型之间的作用。数值波浪水槽可以对物理波浪水槽的试验起到指导和部分取代作用^[1,6-11]。由于这类问题的复杂性,实际应用中多半是通过模型试验的方法进行研究。但是模型试验耗时、耗力、投资大,而且很难做到模型和实物的完全相似,许多细节问题也无法深入研究。随着计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics,CFD)在海洋工程领域的发展和运用,人们对数学模型的应用越来越重视,开始利用国际上广泛使用的 FLUENT 流体计算软件进行理论研究和工程模拟计算^[7-9]。

本研究采用数值模拟的方法,利用 FLUENT12.0 软件,建立了二维数值波浪水槽,用来分析桥梁上部结构所受到的外部荷载大小与海浪淹没程度之间的相关性,研究升阻力系数与冲击高度的关系。根据分析结果,可以对主梁进行优化设计,提高桥梁主梁抵抗波浪荷载的能力,并寻求降低波浪冲击作用的有效措施。

1 桥址水文地质条件与设计波浪要素

以福建省沿海地区某一海峡大桥的实测数据资料建立数值模型,以此桥的主梁断面数据作为参考,来研究跨海桥梁上部结构物所受的波浪荷载效应。

1.1 桥址水文地质条件

桥梁所处近海岸位置的水深比较浅,大部分区域为 1~2 m,最深处水深约 6 m。主航道区的最大水深约为 25 m。对桥梁可能构成威胁较大的主要是外海波浪,基本上从 SE—SSE 方向之间的区域进行传播。参考当地多年实测资料,该桥梁所处位置平均风速为 6.9 m/s,最大风速为 34 m/s,常风向 NNE,频率为 43%。全年平均 107.2 天风级不小于 8 级,最多时可达 172 天^[1]。

1.2 设计波浪要素

根据桥梁所处地理位置和该处水文气象条件,设计波浪与水流要素(横桥向)拟选用 100 年一遇、50 年一遇和 20 年一遇三种工况。设计波浪要素如表 1 所示。

表 1 设计波浪要素表
Tab. 1 Design elements of wave

波浪要素	水位/m	水深/m	波要素点位 $H_{1\%}/m$	平均波高 \bar{H}/m	最大波高 \bar{T}/m	波长 L/m
100 年	+5.18	21.63	5.69	2.53	6.6	65.79
50 年	+5.00	21.45	5.10	2.25	6.1	57.02
20 年	+4.73	21.18	4.24	1.85	5.5	46.86

2 数值模型建立

根据表 1 中的设计波浪要素,利用 FLUENT12.0 建立数值波浪水槽,并生成主梁与波浪不同冲击高度的相互作用模型,依次对 100 年、50 年和 20 年一遇三种作用工况设计水位产生的波浪进行数值模拟计算。根据求得各个模型中作用在桥梁主梁上的总波浪力系数时程曲线,进一步推算各主梁所受波浪力大小,并对比分析模拟结果。桥梁主梁为箱梁横断面,箱梁顶板宽 17 m,底板宽 9 m,高 3.5 m,箱梁顶板厚为 0.3~0.5 m 渐变。桥梁横断面示意图如图 1 所示。

考虑到波浪冲击桥梁主梁的可能高度和箱梁的实际高度为 3.5 m,分别根据三种作用工况设计高水位下的波浪条件,建立波浪冲击主梁侧面高度分别为 0.5,1.0,1.5,2.0,2.5,3.0 和 3.5 m 等七种计算模型。

水位深度取 10, 15 和 21 m 三种深度, 共需建立 63 个模型。

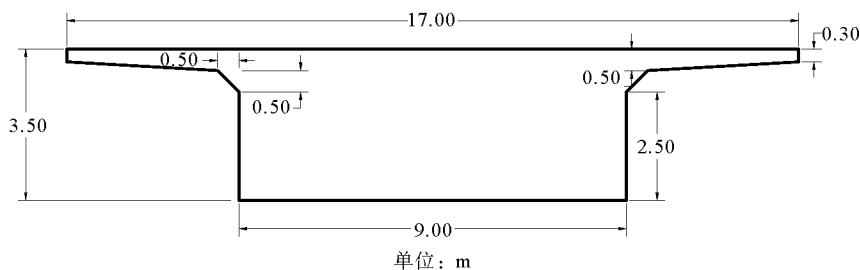


图 1 桥梁横断面示意图

Fig. 1 Diagram of bridge cross section

根据一般的建模原则, 主梁模型在整个数值波浪水槽中的长度所占比例最好保持在 1 : 8 到 1 : 10 左右^[6]。既能保证波浪能够充分发展, 又不会因为波浪水槽建立太大而浪费计算时间和电脑空间。桥梁模型在波浪水槽中的位置根据模型尺寸及波浪波长等因素综合确定, 最好保证主梁前面有 1~2 个充分发展的波长, 而主梁后面有足够的波浪消波及缓冲区域。

根据桥面宽度, 取 10 倍左右桥面宽度即 180 m 作为波浪水槽的长度, 波浪水槽中主梁前面的长度取 100 m, 即能够包含 1~2 个充分发展的波长, 主梁后面区域为 117~180 m。该尺寸可以保证数值波浪水槽中的波浪冲击桥梁主梁后, 向主梁后面流动时有充分的缓冲区, 不至于因缓冲区长度不够而出现波浪反射的现象^[1]。主梁上部自由空气的高度取 15 m 即可, 而波浪水槽中水流深度则因所模拟工况的不同而取不同值。

本研究采用 FLUENT VOF 方法求解波浪水槽中水气分界自由液面, 采用 Segregated、标准 $k-\epsilon$ 模型以及压力速度耦合的 PISO 算法进行流场的计算^[10-11]。FLUENT VOF 模型中边界条件设置如下: 底部设定为固壁(wall)边界条件; 上边界设定为对称边界(Symmetry), 设置成对称边界类型时, 此边界的内外没有质量和动量的交换, 有利于计算快速收敛; 左边界和右边界分别为波浪和空气入流边界和出流边界, 以水面为界面, 左边界和右边界分别设定为入流(Velocity-Inlet)和出流(Outflow)边界^[10]。

3 模拟计算与结果分析

模型读入后, 根据模型的波浪波长和周期确定波速, 输入波长、波速水面高度等参数后, 逐个进行迭代计算。计算过程中主要监视波浪的升力系数和阻力系数的发展时程。为得到最大作用力状态, 一般计算 2~3 个周期。迭代计算时间间隔设为 0.001 s, 在每个时间间隔内迭代计算 20 次^[10-11]。为了防止计算初始时刻因模型计算不稳定而出现数值过大失真的现象, 作者在设定升阻力监视曲线之前, 先进行一小段时间的初步试算, 监视残差的收敛情形, 以使计算误差控制在合理范围内。当残差收敛稳定后, 进行模型的计算迭代, 并监视升阻力系数。模型残差收敛时如图 2 所示。由图 2 可知, 当迭代计算 100 次左右时, 计算误差已基本稳定, 此后可进行模型的数值模拟计算。

待所建立的 63 种模型模拟全部完成后, 分析每一模型中主梁截面所受到的最大波浪力系数(包括升力和阻力), 统计各工况下主梁受力最大时的升力系数和阻力系数。不同工况下升阻力系数的变化规律, 如图 3—图 5 所示。

图 3 表示 20 年一遇工况下波浪升阻力系数随波浪冲击主梁高度的变化规律, 图中也显示了同种波浪要素下, 不同水流深度时升阻力系数的变化规律。如图 3 所示, 升阻力系数对应不同水深的变化规律曲线是基本一致的, 波浪冲击高度在 0.5~2.0 m 时, 系数逐渐增大, 到 2.0 m 时出现一个小的峰值点; 在冲击高度 2.5 m 左右有较小程度的回落, 在 3.0 m 时出现较大峰值点。这说明波浪冲击高度为 2.0 和 3.0 m 时桥梁所受的波浪力较大。因此, 应重点研究波浪冲击高度为 2.0 和 3.0 m 的波浪作用力。

从图 3 还可看出, 波浪冲击高度在 2.0 m 及以下时, 三种水流深度下升阻力系数能够保持较高的一致

性,彼此之间数值差距并不大。冲击高度高于 2.0 m 后,随水深的不同,升阻力系数开始出现较大的不一致性,尤其是在水深 10 m 的情况下,在冲击高度为 3.0 和 3.5 m 时,与另外两种水深的升阻力系数有明显的差距。

图 4 表示 50 年一遇工况下波浪升阻力系数随波浪冲击主梁高度的变化规律以及不同水流深度时升阻力系数的相关关系。升阻力系数曲线随水深的变化规律与 20 年一遇工况基本类似。两种工况的区别在于,不同水深情况下,50 年的升阻力系数差别幅度要大于 20 年的。该差别主要是因为 50 年一遇的波浪条件比 20 年一遇的更加复杂,主梁波浪力不确定性所导致。在水深为 10 m 时,升力系数的变化曲线明显区别于另外两种工况。

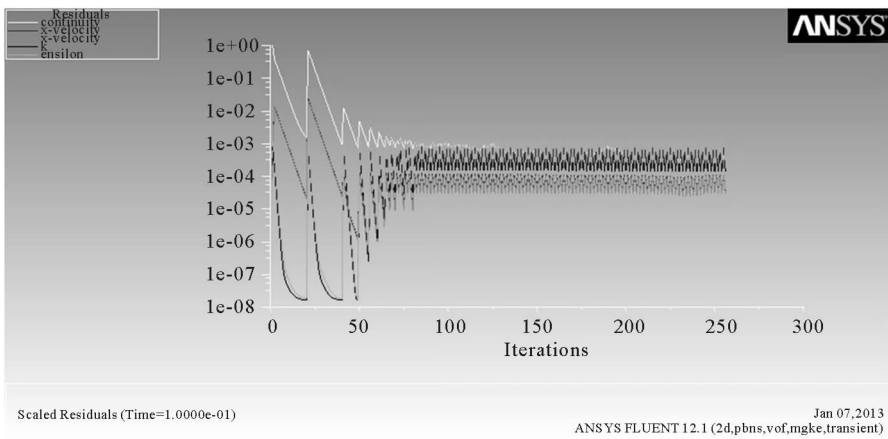


图 2 模拟计算残差图

Fig. 2 Residual error of simulation calculation

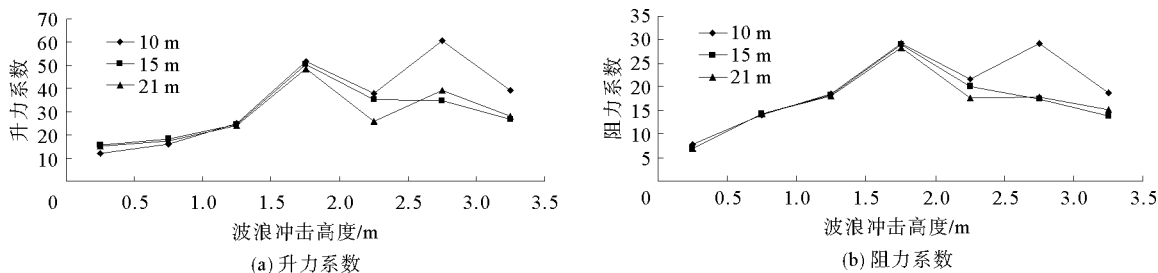


图 3 20 年一遇工况不同水深的升力系数和阻力系数图

Fig. 3 Lift and drag coefficients of different water depths of 20 years return period

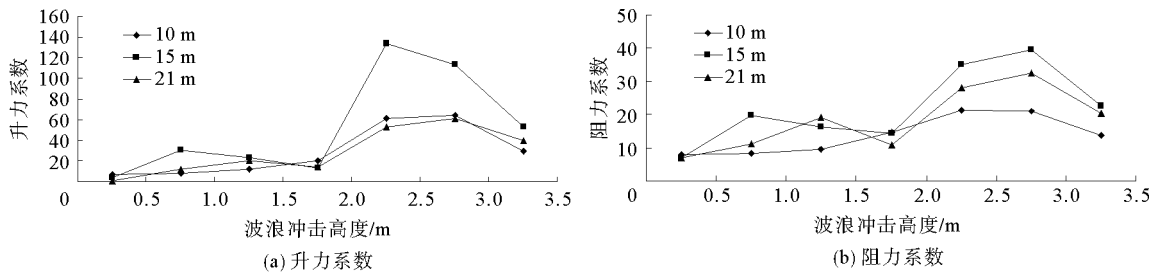


图 4 50 年一遇工况不同水深的升力系数和阻力系数图

Fig. 4 Lift and drag coefficients of different water depths of 50 years return period

在图 5 所示的 100 年一遇工况下波浪升阻力系数随波浪冲击主梁高度的变化规律图中。水深为 15 m 和 21 m 时的曲线表现为较稳定的变化趋势,且曲线中各点之间没有较大的峰值点出现。

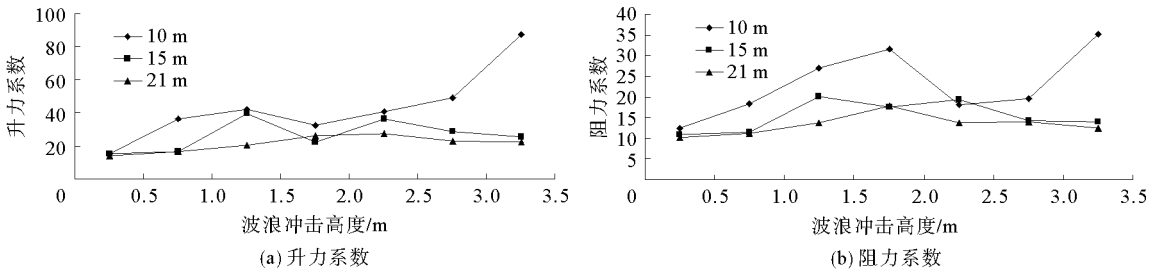


图 5 100 年一遇工况不同水深的升力系数和阻力系数图

Fig. 5 Lift and drag coefficients of different water depths of 100 years return period

对比以上几种工况下的升阻力系数变化曲线,可以看出:主梁出现较大波浪力作用的高度均有两个数值,20 年一遇工况时为 2.0 和 3.0 m;50 年一遇工况时为 2.5 和 3.0 m;100 年一遇工况时升力系数为 1.5 和 3.5 m,阻力系数为 2.0 和 3.5 m。三种水深波浪工况下,水位深度为 10 m 时升阻力曲线的波动范围很大,一旦出现较大的波浪的作用,波浪会由于水流较浅不能很好地传播,会对桥梁产生较大的波浪力作用。因此,在选择桥址时,不推荐在 10 m 左右水深的情况下建造。

4 结论

1)对于每种工况,主梁出现较大波浪力系数的冲击高度均存在两个高程,且在 1.5~3.5 m,此时相应的桥梁所受冲击力也会越大,在研究升阻力系数与冲击高度的关系时,可将这两种冲击高度单独进行对比分析。

2)50 年和 100 年一遇的波浪作用过程比 20 年一遇的复杂,主梁受力存在较大的不稳定性。在桥梁结构波浪力预测计算过程中,应根据桥梁设计使用寿命期限有针对性地进行波浪力数值模拟计算分析。

3)三种水深波浪工况下,水位深度为 10 m 时升阻力曲线的波动范围很大,在桥梁选址时,应避免在 10 m 左右水深且风浪较频繁的位置建造。

参考文献:

[1]张宪堂. 风浪流作用下桥梁荷载效应分析及设计方法[D]. 上海:同济大学,2011:57-125.
[2]Zhang X T,Zhou H M,Wang H L, et al. Analysis on wave forces acting on box girder of twin-decks offshore bridge[J]. Przeglad Elektrotechniczny,2012,88(9b):29-32.
[3]杨斌,郑银功,度瑶,等. 洪水对桥梁结构的压力测试试验与桥梁安全分析[J]. 重庆交通学院学报,1997,16(1):1-7.
Yang Bin,Zheng Yingong,To Yao, et al. Floodwater pressure testing and safety analysis of the bridge constructure[J]. Journal of Chongqing Jiaotong Institute,1997,16(1):1-7.
[4]Okeil A M,Cai S. Storm surge damage to bridges. Louisiana State University,2006:1-13.
[5]Zhang X T,Chen A R. Analysis on influence factors of the calculation of horizontal wave forces acting on main girders of bridge[C]//International Symposium on Life-cycle Performance of Bridges and Structures. Beijing: Science Press,2010:972-977.
[6]李胜忠. 基于 FLUENT 的二维数值波浪水槽研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2006:27-35.
[7]Zhang X T,Chen A R, Wang C, et al. Numerical simulation on wave forces acting on superstructure of twin-decks bridges [C]//The 1st/2011 International Conference on Structures and Building Materials, Guangzhou, Jan. 7-9,2011:4083-4088.
[8]刘加海,杨永全,张洪雨,等. 二维数值水槽波浪生成过程及波浪形态分析[J]. 四川大学学报:工程科学版,2004,36(6):28-31.
Liu Jiahai, Yang Yongquan, Zhang Hongyu, et al. Making waves in 2-D numerical flume and feature analysis of the numerical waves[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition,2004,36(6):28-31.
[9]李玉成. 波浪与水流共同作用下的流速场[J]. 海洋工程,1983(4):12-23.
Li Yucheng. Velocity field for interacting waves and currents[J]. The Ocean Engineering,1983(4):12-23.
[10]温正,石良臣,任毅如. FLUENT 流体计算应用教程[M]. 北京:清华大学出版社,2009:15-19.
[11]程用胜. 基于 VOF 方法的二维数值波浪水槽的建立在应用[D]. 上海:上海交通大学,2002:28-56.