

基于三维数值模拟的洪水期组合围堰 结构水流作用研究

张凯¹, 张程然^{1,2*}, 曹政¹, 李鑫²

(1.四川公路桥梁建设集团有限公司, 四川 成都 610041; 2.西南交通大学)

摘要: 随着深水大跨桥梁的新建, 各类大型围堰作为基础施工的辅助构造物面临更加复杂恶劣的水动力环境, 正确计算桥梁围堰的水流力与压力分布是保证桥梁围堰设计和施工安全的重要课题。但工程实践表明: JTS 144-1-2010《港口工程荷载规范》的计算方法只能简单地计算单桩柱的水流力, 对于非规则的大型墩柱结构的水流力作用问题还没有比较成熟的计算方法。为准确模拟桥梁围堰水流力, 该文采用基于 VOF 方法的水流与结构物相互作用的三维数值模型, 利用所建立的三维数值模型模拟不同流速下, 尤其是洪水期的组合围堰与水流的相互作用, 与实测得到的围堰压力数据进行对比, 获得了围堰周边区域的水流压力分布, 并给出最危险位置。

关键词: 组合围堰; 洪水期; 水流力; 流场分析; 数值模拟

1 前言

伴随中国交通事业的发展, 中国各地不断涌现出一批批特大跨度桥梁, 如已建成的东海大桥、杭州湾跨海大桥、港珠澳大桥以及在建的平潭海峡公铁两用大桥等。在桥梁施工过程中, 围堰作为桥梁基础施工中最为重要的临时止水结构, 是保证安全的首要前提。围堰结构的水流力影响是桥梁设计施工过程中的重要课题, 正确认识、计算桥梁围堰的水流力能够更好地指导桥梁围堰的设计和施工。而洪水是绝大多数桥梁都需要面对的自然灾害之一, 尤其是桥梁下部结构在高水位、大流速下的洪水作用问题, 值得设计者重视。

桥梁围堰的尺寸与特征波长相比 $D/L > 0.2$ (D 为垂直流体传播方向的投影长度, L 为特征波长), 属于大尺度结构, 结构物对波流运动有显著的影响, 同时受到波和流的共同作用。中国桥梁规范目前尚缺成熟的围堰水流力计算方法, 通常只能参考其他海工规范进行计算。其中, JTS 144-1-2010《港口工程荷载规范》可用于估算简单结构物(方柱、圆柱等)水流力。但工程实践表明: 该规范计算方法只能较好地计算单桩柱的水流力。对于桥梁围堰等大型墩柱的水流力作用

问题科研技术人员虽进行过相关研究但还没有比较成熟的设计施工、计算方法。黄博等基于三维波浪与桥梁建筑结构物相互作用的数学模型, 模拟了圆端形、哑铃形围堰下沉施工的波浪力作用; Ti 等通过现场实测和数值模拟的方法比较圆端形跨海桥梁围堰在波浪作用下的压力分布; 刘浪针对现有设计规范仅能计算简单形式桥墩及基础水流力的问题, 提出了圆端形桥墩及群桩承台复合结构水流力计算方法; Kim 等采用数值模拟比较了不同表面的圆柱形围堰的水动力特性, 发现波纹形表面相较于普通表面更有利于抵抗水流引起的动水压力; Yang 等解决了 Morison 方程无法计算中空柱由内部水引起的流体动压力问题, 扩展了 Morison 方程计算外部水流及内部水流引起的动水压应用范围; 杜修力等在大尺度深水圆柱形结构动水压力计算中, 考虑水体可压缩性, 提出了一种计算大直径深水圆柱结构所受动水力的时域算法。为准确模拟桥梁围堰水流力, 该文采用基于 VOF 方法的三维水流与结构物相互作用的数值模型, 利用所建立并验证的三维数值模型模拟不同流速下的水流与组合围堰的相互作用, 与实测得到的围堰压力数据进行对比, 并对模拟的流场进行分析, 观察围堰受水流影响的压力分布, 给出最危险位置。

收稿日期: 2019-05-12

基金项目: 高铁联合基金重点支持项目(编号: U1834207); 四川省应用基础研究重大前沿项目(编号: 2017JY0003)

作者简介: 张凯, 男, 大学本科, 高级工程师, E-mail: 17059304@qq.com

* 通信作者: 张程然, 男, 博士研究生, 工程师, E-mail: 13881940961@163.com

2 研究背景

宜宾临港长江公铁两用大桥(以下简称临港桥)位于四川省宜宾市内,该桥为蓉昆、渝昆高铁,以及宜宾北岸临港区、南岸翠屏区市政交通的共同过江通道。临港桥主跨布置为:(72.5+203+522+203+72.5)m,主桥长度1 073 m(图1),桥梁全长1 724.2 m,该桥为目前中国首座公路与高铁合建钢箱梁斜拉桥,同时也是世界最宽公铁两用桥。

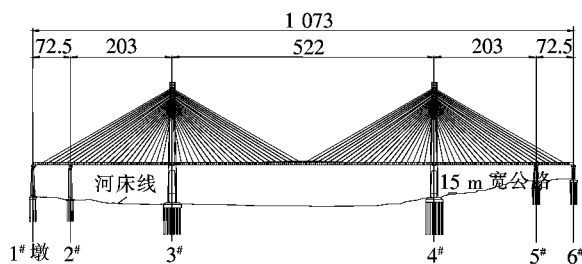


图1 临港桥总体布置(单位:m)

3 工程概况

3.1 围堰设计

临港桥下部基础采用矩形承台设计,整体平面尺寸为67 m×35.75 m。考虑现场施工条件,3#主墩围堰采用“哑铃形”组合围堰构造,下部采用混凝土咬合桩结构,上部采用双壁钢围堰结构,3#主墩围堰构造如图2所示。

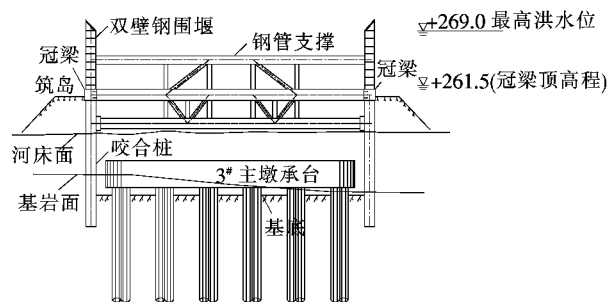
3.2 水文条件

临港桥所在区域位于长江上游,属于雨源性山区河流,水流湍急,水流速度超过4.0 m/s,一年之中水位变化剧烈。每年10月至次年5月为枯水期,枯水期间水位维持在258.0~260.0 m之间。每年6月进入长江水位洪水期,8月中下旬达到最高水位,施工期间,桥区最高水位可达267.0 m。

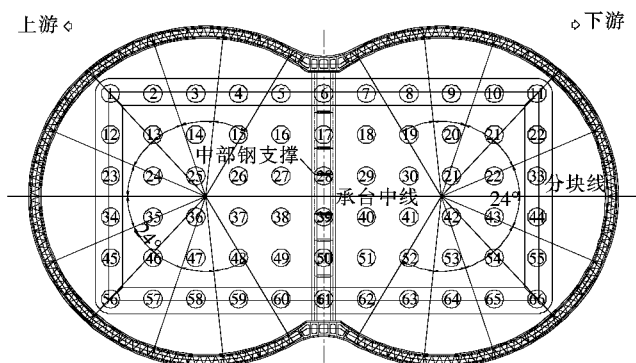
4 数值模拟计算

4.1 控制方程

通过建立三维水流与结构物相互作用的数学模型来模拟围堰水流力。该文模型属于不可压缩流体的湍流流动,基于雷诺平均方程(RANS方程),湍流模型为RNGk-ε模型,采用流体体积函数(VOF)方法进行自由表面的跟踪。其中主要控制方程如下。



(a) 立面图



(b) 平面图

图2 3#墩组合围堰构造图(单位:m)

雷诺平均方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(u_j) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(u_i u_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + g_i - D_i u_i + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{eff} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2)$$

RNGk-ε模型:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \epsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_\epsilon \mu_{eff} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} P_k \cdot \frac{\epsilon}{k} - \rho_f C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (4)$$

其中:

$$C_{1\epsilon}^* = C_{1\epsilon} - \frac{\eta(1-\eta/\eta_0)}{1+\beta\eta^3}, \quad \eta = (2S_{ij}S_{ij})^{0.5} \frac{k}{\epsilon},$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad P_k = \mu_f \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j},$$

$$C_\mu = 0.0845, \alpha_k = \alpha_\epsilon = 1.39, C_{1\epsilon} = 1.42, C_{2\epsilon} = 1.68, \eta_0 = 4.38, \beta = 0.012.$$

式中: x_j 为笛卡尔坐标; u_j 为流体速度; p 为压力; ρ 为流体密度; g 为重力加速度; $\mu_{eff} = \mu + \mu_f$, μ 为流体黏

度, $\mu_f = C_\mu \rho k^2 / \epsilon$ 为湍流涡黏性; k 为湍流动能; ϵ 为紊流脉动动能的耗散率; D_i 为阻尼系数。

考虑到自由液面在结构附近会出现局部扰动变形, 需要追踪自由表面的运动, 在计算域内每一点上定义一个函数 f , f 为时间和空间的函数, 即 $f = f(x, y, t)$, 当该点被流体质点占据时, 此点的 $f = 1$, 反之 $f = 0$ 。在计算域的空间离散为计算网格后, 在二维情况下, 令 F 为一个单元内的流体面积与该单元体面积之比, 即:

$$F(x, y, t) = \frac{1}{\Delta A} \iint_A f(\xi, \eta, t) d\xi d\eta \quad (5)$$

如果 $F = 1$, 说明该单元充满流体, 为流体内部单元; 如果 $F = 0$, 说明该单元不含流体, 为外部单元; 如果 F 为 $0 \sim 1$, 说明该单元为含有自由面的单元, 这些单元或者与自由表面相交, 或者含有比单元尺度小的气泡。 $F = F(x, y, t)$, 可以理解为固结在流体质点上并随流体质点一起运动的没有质量、没有黏性的着色点的运动, 其运动方程为:

$$\frac{\partial F}{\partial t} = 0 \quad (6)$$

通过求解 F 值, 就可确定自由面位于哪些单元内。该文采用流体体积函数 (VOF) 方法, 将计算运动的自由表面问题转化为计算整个计算域内的 F 值问题, 当出现水体变化时, 自由表面的高度值有时会出现多值, 由于 VOF 方法计算的是每个网格内的流体体积函数值, 自由表面的位置和形状是通过计算域的网格内的流体体积函数 F 值重构的, 在采用 VOF 方法后, 计算域必须大于水体能够到达的地方, 如图 3 所示, 阴影部分的 f 值为 1, 而在空白区域 f 为 0。在网格划分后, 自由表面网格的 F 值为 $0 \sim 1$ 。

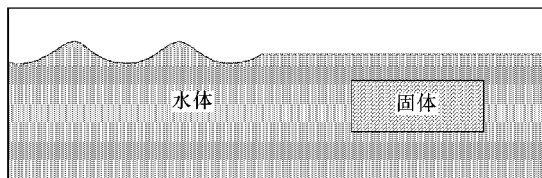


图 3 计算域示意图

4.2 计算区域及网格划分

研究采用与实际比例一致的数值计算模型来进行模拟。为模拟围堰水流的作用, 入口边界采用速度边界, 出口采用压力边界, 计算域左右两侧采用对称边界, 以减小固壁边界的反射流影响。设围堰距离入口边界 120 m, 离出口边界 150 m, 以保证计算工程的流场稳定。其中, 围堰底部标高固定为 30 m, 水深标高

为 50 m。研究时分别设置入口流速为 2、2.5、3、3.5、4 m/s。其中对 4 m/s 的工况进行变水深模拟, 水深分别为 40、45、50 m。

在网格参数方面, 为保证计算精度和计算效率, 通过网格测试和参数调整, 计算域内采用结构网格, 在围堰结构附近进行适当加密, 在计算域边界采用较稀疏的网格, 总网格单元数为 863×10^4 个。

4.3 动水压力实测

实际工程中, 由于围堰结构体积巨大, 一般通过压力测量的方式研究其表面在水流中的动压力分布, 通过与数值模拟进行对比, 可验证数值模拟的可靠性, 并用于对围堰整体受力的估算。

在桥区洪水位来临前, 在围堰表面预先设计 8 个动水压力测点, 将压力传感器固定在围堰外表面。压力传感器采集频率为 8 Hz, 安装高程为 265.0 m, 在水平方向上的布置及编号如图 4 所示。通过防水电缆将压力传感器信号传递至采集仪, 数据保存在现场的工控机上。同时在来流一侧架设多普勒流速仪, 收集同一时间对应的流速信息。由于实际中水流流速相对稳定, 实测 1 min 压力数据的平均值作为对应流速下的水压力统计值。

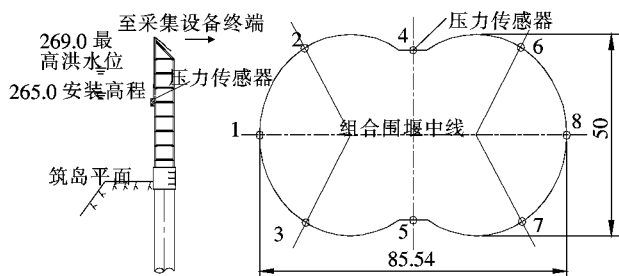


图 4 围堰传感器布置图 (单位: m)

4.4 计算结果与实测数据对比

根据数值模型计算得到的对应位置的点压力数据与实测统计数据进行对比 (其中测点 3、5、7 与测点 2、4、6 对称, 在受到沿围堰纵向作用的水流力时的受力结果相近, 因此该文各只对比其中一组结果), 结果如图 5 所示。

由图 5 可看出: 测点 1 受水流的正向作用, 随着流速的增大受到的水压力增大。测点 4、8 由于水流通过结构时产生的漩涡影响, 受到的水压力也随着流速的增大而增大。测点 2、6 位于结构的边缘位置, 主要受到切向水流的作用, 因此受到的水压力随着流速的增大而减小。由于实际流场比模型更加复杂, 可以看到流速越大, 计算值与实测值的相对差值也越大, 但总体

上模拟数据与实测数据较为吻合,证明数值模拟得到的计算结果是比较准确的。

5 受力及流场分析

首先对围堰在水流力作用下沿水流方向的压力进行分析,得到不同流速、不同水深下围堰的受力结果如图 6、7 所示。

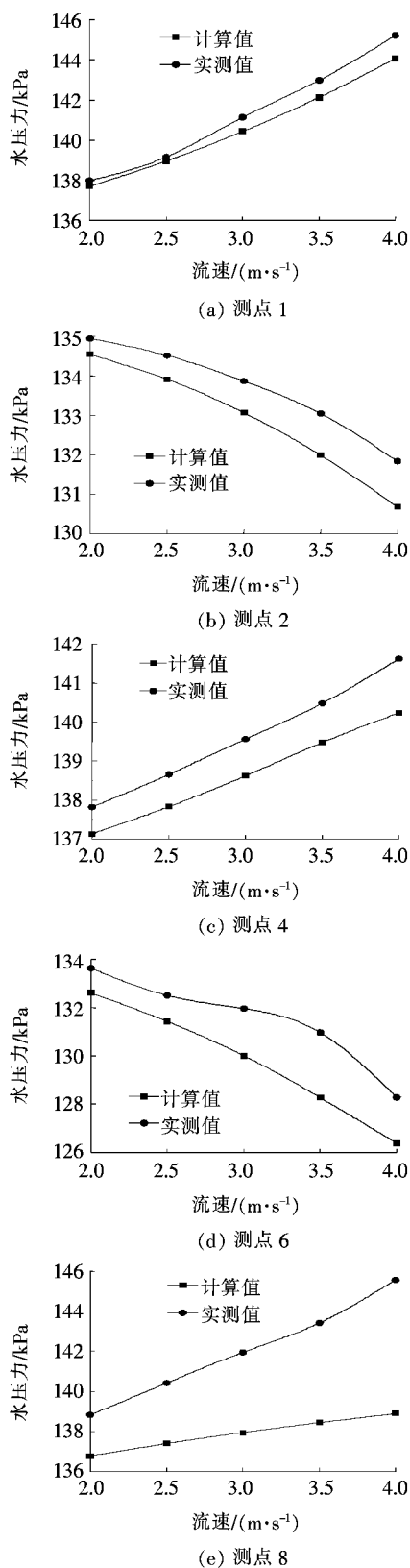
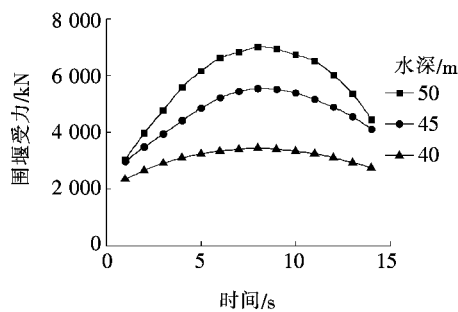
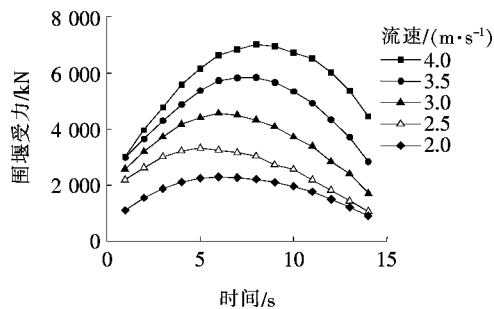


图 5 不同流速下数模结果与实测结果对比图



由图 6 可知:在水深不变的情况下,随着水流速度的增大,围堰受力越大且力的波动幅度越大,越可能受到突然的破坏。由图 7 可知:在固定流速下,随着水深的减小,围堰结构的受力越小,水水力波动也逐渐趋于平缓。

组合围堰结构在不同流速下的压力分布如图 8 所示。

由图 8 可见:水流的作用使围堰结构周围的压力分布发生变化,围堰的迎水侧弧顶、两腰凹陷位置以及围堰尾部会受到更大的水流力作用,尤其是随着水流流速的增加,这部分力的作用效果会更加明显。同时,大尺度的组合围堰结构受水流作用后也会在其四角位置以及围堰后方形成不同程度的漩涡。模拟得到的压力分布图也很好验证了上文数据得到的围堰受力特点。

图 9 为不同水深下围堰周围水压力分布图。由图 9 可见:组合围堰结构在不同水深下的受力特点与流速类似,只是水深的影响比流速更加显著。结构物周

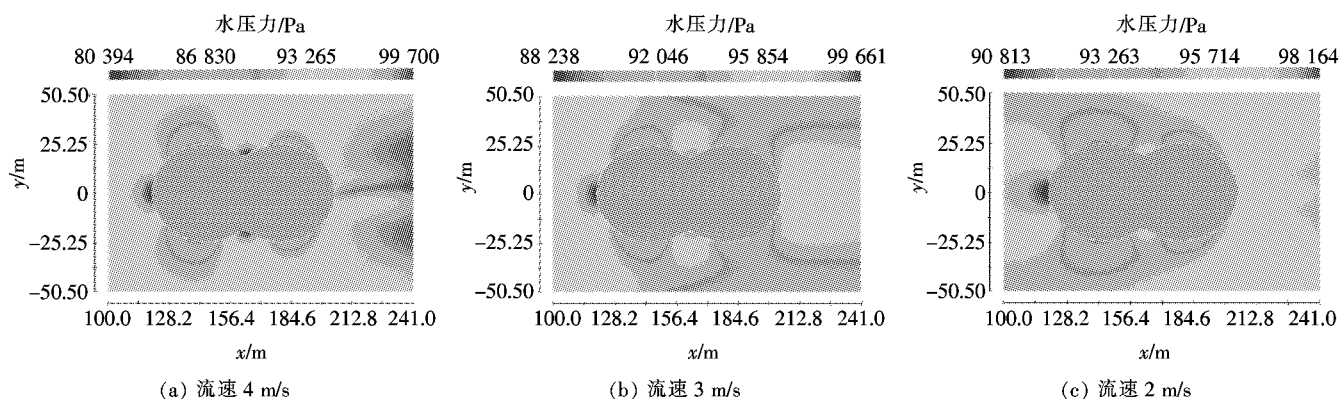


图 8 不同流速下围堰周围水压力分布图

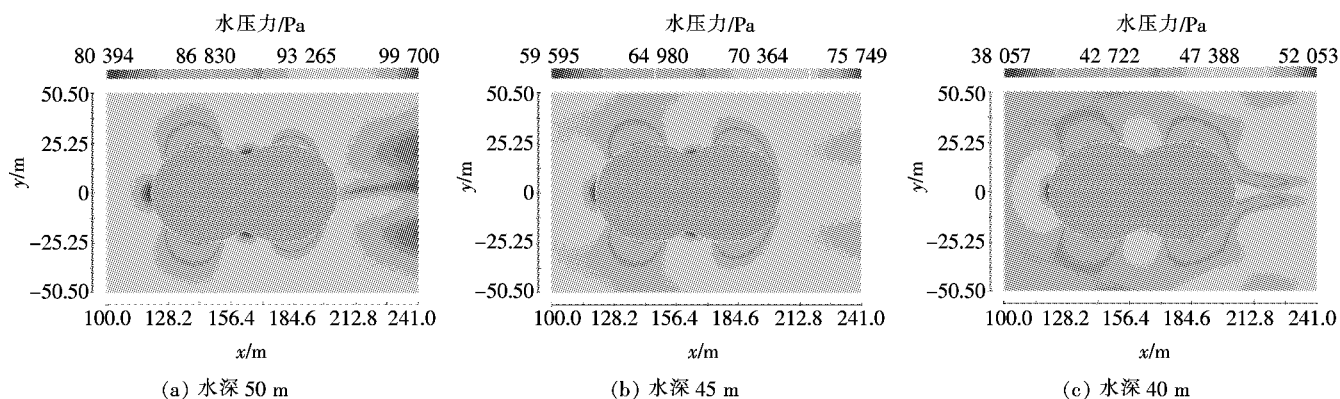


图 9 不同水深下围堰周围水压力分布图

围的流场分布表明:随着结构物的吃水深度增大,结构物对流场的遮挡效应愈发明显,这将直接影响结构物周围的压力场分布,并进一步影响围堰受到的水流量。

6 结论

该文以临港长江大桥 3# 墩的组合围堰结构为研究对象,针对结构洪水期的水文特点,建立三维水流与结构物相互作用的数学模型来模拟围堰水流量,并通过分析围堰受力及流场压力分布得出如下结论:

(1) 水流流速越大,围堰受力越大且力的波动幅度越大,越可能受到突然的破坏;随着水深的减小,围堰结构的受力越小,水流量波动也越趋于平缓。

(2) 水流的作用使围堰结构周围的压力分布发生变化,围堰的迎水侧弧顶以及两腰凹陷位置会受到更大的水流量作用,尤其是随着水流流速的增加和水位的升高,这部分力的作用效果会更加明显。由于受力的不均匀,围堰的迎水侧弧顶以及两腰凹陷处更容易发生破坏,设计施工时应给予足够的重视。

(3) 大尺度的组合围堰结构受水流作用后会在结

构周围形成不同程度的漩涡,且随着结构物吃水深度的增大,结构物对流场的遮挡效应愈发明显。

参考文献:

- [1] JTS 144-1-2010 港口工程荷载规范[S].
- [2] 胡勇,雷丽萍,杨进先.跨海桥梁基础波浪(流)力计算问题探讨[J].水道港口,2012(2).
- [3] 姚德波,殷新锋.基坑锁口钢管桩围堰的受力行为分析[J].中外公路,2017(2).
- [4] 李玉成,刘德良,陈兵,等.大尺度圆柱周围的波流场的耦合计算[J].水动力学研究与进展,2004(2).
- [5] 胡勇,杨进先, HU Yong, 等.施工期桥梁围堰水流量研究[J].桥梁建设,2010(5).
- [6] Kang A, Zhu B. Wave-Current Interaction with A Vertical Square Cylinder at Different Reynolds Numbers[J]. Journal of Modern Transportation, 2013, 21(1):47-57.
- [7] 黄博,段伦良,祝兵.三维波浪作用下网吊箱围堰下放过程受力研究[J].西南交通大学学报,2018(3).
- [8] Ti Z, Wei K, Qin S, et al. Assessment of Random Wave Pressure on the Construction Cofferdam for Sea-Crossing Bridges under Tropical Cyclone[J]. Ocean Engineering, 2018, 160:335-345.

特大跨径悬索桥钢桁梁运梁栈桥结构设计

朱立山¹, 张国刚^{2,3}, 刘武¹

(1.湖南路桥建设集团有限责任公司, 湖南 长沙 410004; 2.湖南省交通规划勘察设计院有限公司;
3.中南公路建设及养护技术湖南省企业重点实验室)

摘要:岳阳洞庭湖大桥为主跨 1 480 m 的钢桁梁悬索桥,两跨式布置,采用跨缆吊机方法安装加劲梁,在边跨、主跨无水区及浅水区搭设钢栈桥进行运梁和存梁。对岳阳侧栈桥进行了结构设计,运梁栈桥由钢管桩、贝雷架、分配梁、轨道梁等组成,采用 Midas/Civil 软件建立了栈桥三维有限元模型,进行了运梁和存梁工况的结构强度和刚度验算,以及存梁状态结构的稳定分析。结果表明:设计的运梁栈桥满足规范要求。此外,采用 Abaqus 软件建立了运梁支座的精细有限元模型,计算结果表明支座的强度和刚度满足规范要求。

关键词:悬索桥;运梁栈桥;钢桁梁;贝雷架;有限元

1 工程概况

杭瑞高速公路湖南段岳阳洞庭湖大桥是临湘至岳阳高速公路全线的控制性工程,是目前中国最大跨径的钢桁梁悬索桥,其主缆跨径组合为:(460+1 480+491) m,主梁跨径组合为:(1 480+453.6) m,锚碇为重力式锚碇;索塔为钢筋混凝土门式塔结构。

加劲梁全宽 35.4 m,梁高 9 m。采用板桁结合钢桁加劲梁,设计时均考虑板桁共同作用。主桁架为带竖腹杆的华伦式结构,由上弦杆、下弦杆、竖腹杆和斜腹杆组成。主桁桁高 9.0 m,桁宽 35.4 m,节间长 8.4 m。每个节间处设置一道主横桁架。一个标准节段长度 16.8 m,由两个节间组成。

目前,悬索桥加劲梁架设主要有 4 种方法:桥面吊机悬拼法、缆索吊拼装法、跨缆吊机安装法以及柔性轨

索滑移法。根据现场情况,选择采用跨缆吊机方法安装加劲梁,由于洞庭湖悬索桥主边跨浅水区及无水区钢桁梁节段架设区域受到地形水文条件的影响,钢桁梁无法采用常规运梁驳船水运就位进行架设施工,故在浅水区及无水区架设栈桥,进行运梁和存梁作业。栈桥的设计是否合理、结构是否安全关系到整个加劲梁的架设安全及进度。该文对岳阳侧运梁栈桥进行详细的结构设计,以及强度、刚度、稳定性等验算,以保证大桥施工进行顺利、安全。

2 运梁栈桥结构设计

运梁栈桥从岳阳侧 A1 索塔延伸至江内,总长约 258.8 m,从沿江大堤中线计起至江内约 143.5 m。标准跨径单跨 9 m。栈桥分左右两幅,分别与加劲梁节点位置对应。

- *****
- [9] 李荣.双壁钢围堰支撑体系优化设计研究[J].中外公路,2018(1).
- [10] 丁巍,张娟.超大哑铃形首节双壁钢围堰施工技术[J].中外公路,2019(1).
- [11] 刘浪.跨海桥梁下部结构波流力计算方法研究[D].西南交通大学博士学位论文,2017.
- [12] Kim J, Jeong Y J, Park M S. Structural Behaviors of Cylindrical Cofferdam with Plane and Corrugated Cross Section under Offshore Conditions [J]. International

- Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, 2017,7(9):334-340.
- [13] Yang W, Li Q. The Expanded Morison Equation Considering Inner and Outer Water Hydrodynamic Pressure of Hollow Piers[J]. Ocean Engineering, 2013,69:79-87.
- [14] 杜修力,赵娟,赵密.大直径深水圆柱结构动水压力的时域算法[J].土木工程学报,2012(S1).