

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2023.05.023

某连续刚构桥防船撞设计方案研究*

阮云龙¹, 张恒^{2,3}

(1.佛山市三水区公路养护中心, 广东 佛山 528100; 2.佛山市交通运输事务中心, 广东 佛山 528000; 3.广州大学土木工程学院, 广东 广州 510006)

摘要: 随着船舶的大型化和航道的扩能升级, 部分早期建设的桥梁因通航净空较小、防撞标准较低存在一定船舶碰撞桥梁安全隐患。文中以某大跨径连续刚构桥为研究对象, 验算主桥在原设计 1 000 t 级、现状 2 000 t 级代表船型撞击力作用下的抗撞性能标准, 确定主桥承台增设固定式复合材料防撞块、墩身采用自浮式复合材料柔性防撞套筒, 过渡墩承台采用型钢或钢管连接及承台、墩身横桥向正面、临近通航孔侧一面增设橡胶护舷的加固设计方案, 验算结果表明按上述方案加固后可满足主墩 2 000 t 级内河轮船撞击力要求。

关键词: 桥梁; 连续刚构桥; 船舶碰撞; 防撞套筒; 防撞护舷

中图分类号: U442.5

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2023)05-0107-04

近年来, 船撞桥事故不断发生, 给人民生命财产安全造成严重威胁^[1]。文献[2-6]通过航道条件分析、通航环境分析、设防代表船型及撞击力研究, 采用现场调查、有限元模拟、概率风险分析等方法对通航桥梁安全风险及桥梁抗撞性能进行了评估。有些学者对桥梁防船撞设计及相关加固方法进行了研究, 如王淑等利用红外光、可见光、激光复合探测及多源数据融合技术建立桥梁防船撞主动预警系统, 实现桥梁防船撞主动预警, 减少船撞桥概率^[7]; 陈龙涛以梅山水道桥主墩承台为研究对象, 对可能撞损的部位设置 SA400 橡胶护舷进行局部防护, 计算结果表明该方法可延缓船头与桥墩相撞时间、降低撞击力、保护承台、分散应力集中^[8]; 王纪锋等以京港澳(北京—香港—澳门)高速公路沙河大桥桥墩为研究对象, 设计自浮式钢覆复合材料防撞设施, 有限元计算结果表明该设施可有效提高桥墩抗撞能力^[9]; 刘政伟等通过参数敏感度分析优化防撞结构尺寸, 并采用显式有限元法验证了桩式桥梁防船撞设施设计方案的合理性^[10]。本文根据某大跨径连续刚构桥抗船撞验算结果及所在航道代表船型研究防船撞设计标准和防船撞加固措施。

1 工程概况

1.1 桥梁概况

某大跨径连续刚构桥全长 3 001 m, 分左右两

幅, 单幅净宽 16 m, 分为主桥、南引桥和北引桥。主桥采用预应力混凝土连续刚构, 跨径组合为 62 m+2×100 m+62 m; 两端引桥分别采用 20 m 空心板梁、30 m 简支小箱梁、连续箱梁(28.0 m+40.0 m+28.0 m, 27.5 m+2×40.0 m+27.5 m, 4×45.0 m, 5×45.0 m, 43.0 m+50.0 m+43.0 m)、预应力混凝土连续刚构(49 m+82 m+49 m)。2007 年建成通车。

主墩墩身采用单薄壁、分离式空心墩, 承台以上设 9 m 实心段, 承台为左右幅整体式承台, 基础为 12 根 $D200$ cm 钻孔灌注桩。过渡墩采用分离式薄壁空心墩, 基础为 4 根 $D150$ cm 钻孔灌注桩。墩柱构造见图 1。等高度连续箱梁桥墩采用花瓶墩, 基础为钻孔灌注桩。20 m 空心板梁、30 m 简支小箱

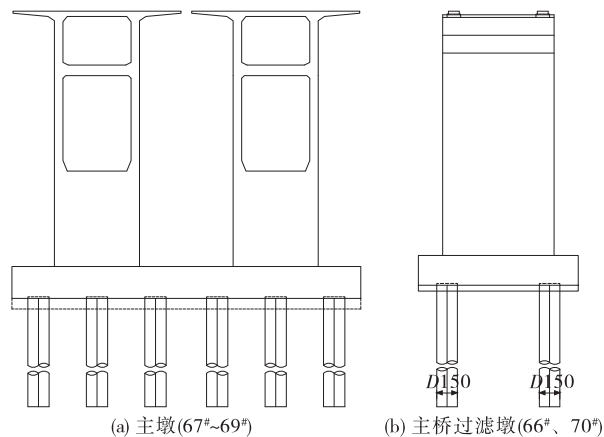


图 1 墩柱构造横断面(单位: cm)

* 基金项目: 广东省交通运输行业重点科技项目(2022-QD2-04)

梁墩身采用分离式双柱墩,基础为钻孔灌注桩。墩身、承台采用 C40 混凝土。

主桥及引桥的单箱单室箱梁采用盆式支座。全桥采用型钢伸缩缝,桥面铺装为沥青混凝土。

1.2 航道概况

桥梁设计时桥位处航道等级为Ⅲ级,代表船型为1 000 t 级驳船,对应船型尺度为 67.5 m×10.8 m×2.0 m(总长×型宽×满载吃水)。现状航道等级为Ⅱ级,代表船型为 2 000 t 级驳船,船型尺度为 75.0 m×14.0 m×2.6 m,航道维护尺度为 4.0 m×80.0 m×400.0 m(水深×航宽×弯曲半径),维护水深年保证率为 98%,航道中心线与桥梁中心线的夹角为 92°。

2 桥梁抗船撞验算

2.1 计算模型

按照结构实际情况建立主桥 MIDAS/Civil 有限元模型,主梁采用梁单元模拟。建立桩基全长模型,并考虑一般冲刷对桩基的影响,土体对桩基的作用采用土弹簧约束模拟。采用 JTG/T 3360-02-2020《公路桥梁抗撞设计规范》^[1]推荐的强迫振动法进行验算,撞击点为距离承台顶面 8.7 m,1 000 t 级、2 000 t 级驳船撞击速度分别取 4.84 m/s、4.82 m/s。采用 MIDAS/Civil 中时程分析方法,输入节点动力荷载,计算得到相应船撞效应值。主桥有限元模型见图 2,强迫振动时程函数见图 3。

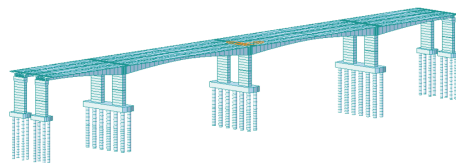


图 2 主桥 MIDAS/Civil 有限元模型

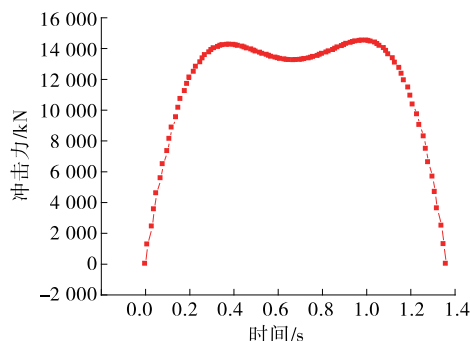


图 3 2 000 t 级驳船撞击下强迫振动时程函数示意图

2.2 验算结果

原设计 1 000 t 级驳船及现状 2 000 t 级驳船撞击计算结果见表 1、表 2。

由表 1、表 2 可知:采用高水位撞击点(1 000 t 级内河轮船)撞击桥梁主墩时,偶然组合作用下,主墩的墩身及桩基承载力均满足要求,墩身截面最小安全系数为 4.5,桩基截面最小安全系数为 1.6。采用高水位撞击点(2 000 t 级内河轮船)撞击桥梁主墩时,偶然组合作用下,67# 桥墩的桩基承载力不满足要求,桩基截面最小安全系数为 0.8,部分桩基剪

表 1 1 000 t 级内河船撞击计算结果

墩号	撞击方向	控制截面	船舶撞击效应			轴向抗力/kN	抗剪承载力/kN	等效屈服弯矩/(kN·m)	剪力安全系数	弯矩/轴力安全系数
			轴力/kN	剪力/kN	弯矩/(kN·m)					
67	横桥向	墩身	-53 078.5	-2 881.1	-47 471.2	—	35 856.1	396 600	12.4	8.4
		桩基	-9 112.8	2 206.9	4 406.9	18 737.4	3 481.6	—	1.6	2.1
	顺桥向	墩身	-45 668.8	3 186.2	-27 728.1	—	27 186.6	123 500	8.5	4.5
		桩基	-10 761.7	1 099.4	1 986.7	31 176.0	3 481.6	—	3.2	2.9
68	横桥向	墩身	-54 522.7	-2 828.0	-45 788.2	—	35 856.1	400 700	12.7	8.8
		桩基	-9 562.7	2 243.7	4 503.8	19 279.8	3 481.6	—	1.6	2.0
	顺桥向	墩身	-47 506.9	-3 714.6	20 115.8	—	27 186.6	123 300	7.3	6.1
		桩基	-10 676.7	1 721.4	3 428.9	25 064.0	3 481.6	—	2.0	2.3
69	横桥向	墩身	-52 925.1	-2 732.9	-44 838.8	—	35 856.1	396 200	13.1	8.8
		桩基	-8 054.7	-699.1	-5 382.2	—	3 481.6	10 280	5.0	1.9
	顺桥向	墩身	-45 713.5	-5 452.4	41 854.0	—	27 186.6	123 500	5.0	3.0
		桩基	-10 820.1	298.2	390.3	38 580.4	3 481.6	—	11.7	3.6

表2 2000 t级内河船撞击计算结果

墩号	撞击方向	控制截面	船舶撞击效应			轴向抗力/kN	抗剪承载力/kN	等效屈服弯矩/(kN·m)	剪力安全系数	弯矩/轴力安全系数
			轴力/kN	剪力/kN	弯矩/(kN·m)					
67	横桥向	墩身	-53 050.9	-4 289.1	-75 982.3	—	35 856.1	396 600	8.4	5.2
		桩基	-4 099.3	3 741.4	7 481.9	3 082.2	3 481.6	—	0.9	0.8
	顺桥向	墩身	-52 850.2	5 062.9	43 783.6	—	27 186.6	130 400	5.4	3.0
		桩基	-7 190.3	3 358.6	5 661.2	10 825.0	3 481.6	—	1.0	1.5
68	横桥向	墩身	-55 681.9	-4 117.0	-70 594.2	—	35 856.1	403 900	8.7	5.7
		桩基	-8 782.9	3 846.3	7 729.5	9 317.5	3 481.6	—	0.9	1.1
	顺桥向	墩身	-48 537.5	3 913.8	30 704.3	—	27 186.6	126 300	6.9	4.1
		桩基	-10 296.3	3 124.2	6 270.1	14 954.0	3 481.6	—	1.1	1.5
69	横桥向	墩身	-52 977.6	-4 075.7	-70 711.9	—	35 856.1	396 300	8.8	5.6
		桩基	-2 587.3	-1 172.7	-8 690.7	—	3 481.6	9 941	3.0	1.1
	顺桥向	墩身	-45 713.5	-5 452.4	41 854.0	—	27 186.6	123 500	5.0	3.0
		桩基	-5 684.2	848.2	3 811.7	—	3 481.6	11 770	4.1	3.1

跨比小于1.5,出现斜压破坏,属于剪力脆性破坏;68#桥墩的桩基承载力不满足要求,桩基截面最小安全系数为0.9,部分桩基剪跨比小于1.5,出现斜压破坏,属于剪力脆性破坏;69#桥墩的墩身及桩基承载力均满足要求,墩身截面最小安全系数为3.0,桩基截面最小安全系数为1.1。

3 桥梁防船撞加固设计

3.1 设计目标

根据桥梁所在航道通航等级、上下游桥梁影响、桥址冲刷、桩基结构形式、实际通航船舶吨位及船舶

流量等情况确定防船撞设计标准如下:

(1) 对于主通航孔主墩,结合现状航道等级,满足2000 t级内河船代表船型要求,不满足时采取措施进行整治提升。

(2) 对于非通航孔过渡墩,维持现状防撞能力,适当增加防撞措施,减少混凝土结构局部破损,保护船舶。

(3) 对于非通航孔引桥墩,结合主动防撞预警系统、航标等进行防护,暂不采取被动防撞措施。

3.2 设计方案

根据设计目标制定表3所示各桥墩防船撞加固

表3 防船撞加固方案

航道	墩号	结构形式	防船撞设计标准	防船撞加固措施
通航孔	主墩	薄壁空心墩群桩基础	2000 t级内河船	墩身设置防撞套筒(消能30%);承台增设复合材料防撞块(横桥向消能25%)
非通航孔	过渡墩	薄壁空心墩群桩基础	维持现状防撞能力	左右幅墩身承台设置型钢连接;墩身和承台周围增设橡胶护舷

方案。

3.3 主墩防船撞设计

对于67#~69#主墩,承台增设固定式复合材料防撞块,墩身增设自浮式复合材料柔性防撞套筒,保护桥梁混凝土结构,减小对船舶的损伤。增设的自浮式复合材料柔性防撞套筒及固定式复合材料防撞块均采用橘红色,起到警示、诱导作用。主墩防船

撞设施布置见图4。

3.4 过渡墩防船撞设计

对于66#、70#过渡墩,左右幅承台采用型钢或钢管连接,适当增强横桥向抗船撞能力;承台、墩身横桥向正面、临近通航孔侧一面增设黑色橡胶护舷,保护桥梁混凝土结构,减小对船舶的损伤(见图5、图6)。

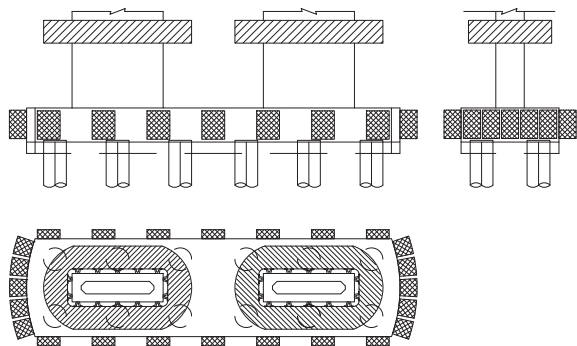


图4 主墩防船撞设施布置示意图

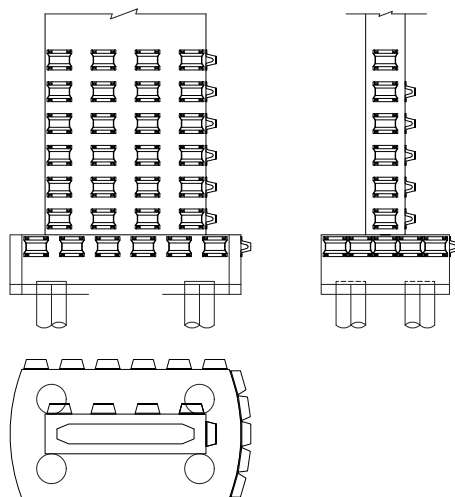


图6 过渡墩防船撞护舷布置示意图

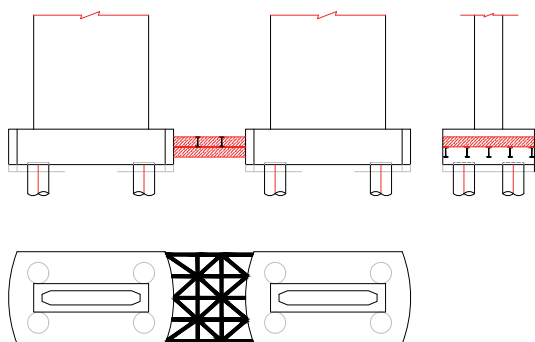


图5 过渡墩承台工字钢连接

4 加固后验算

采用上述方案对 67# ~ 69# 主墩进行加固后,对墩身防撞套箱采用消能 30%进行验算,所施加撞击力进行相应折减。加固后 2 000 t 级内河轮船撞击桥梁主墩时验算结果见表 4。

表 4 主墩加固后 2 000 t 级内河轮船撞击时验算结果

墩号	撞击方向	控制截面	船舶撞击效应			轴向抗力/kN	抗剪承载力/kN	等效屈服弯矩/(kN·m)	剪力安全系数	弯矩/轴力安全系数
			轴力/kN	剪力/kN	弯矩/(kN·m)					
67	横桥向	墩身	-128 643.8	-9 572.5	-160 894.1	—	35 856.1	524 300	3.7	3.3
		桩基	-13 077.7	3 232.7	6 456.9	20 320.0	3 481.6	—	1.1	1.6
	顺桥向	墩身	-47 294.1	4 198.4	-31 415.7	—	27 186.6	125 100	6.5	4.0
		桩基	-13 109.2	-1 331.9	-2 824.6	30 451.8	3 481.6	—	2.6	2.3
68	横桥向	墩身	-132 060.7	-9 488.8	-169 736.3	—	35 856.1	526 700	3.8	3.1
		桩基	-15 624.3	3 248.6	6 523.3	22 652.4	3 481.6	—	1.1	1.4
	顺桥向	墩身	-132 079.3	-6 020.0	-29 595.9	—	27 186.6	188 300	4.5	6.4
		桩基	-14 426.9	-2 407.1	-4 793.4	25 631.2	3 481.6	—	1.4	1.8
69	横桥向	墩身	-128 607.1	-9 155.4	-159 593.2	—	35 856.1	524 300	3.9	3.3
		桩基	-9 988.9	-1 023.2	-7 877.2	—	3 481.6	13 890	3.4	1.8
	顺桥向	墩身	-47 282.9	-3 980.3	31 107.9	—	27 186.6	125 000	6.8	4.0
		桩基	-12 054.3	-476.7	-2 175.0	32 877.8	3 481.6	—	7.3	2.7

从表 4 可以看出:在保证墩身防撞套箱消能不低于 30%时,高水位撞击点(2 000 t 级内河轮船)撞击桥梁主墩时,偶然组合作用下,墩身和桩基承载力均满足要求,墩身截面最小安全系数为 3.1,桩基截面最小安全系数为 1.1。

5 结论

本文以某大跨径连续刚构桥为研究对象,研究主桥在原设计 1 000 t 级、现状 2 000 t 级代表船型

(下转第 114 页)

杆应力比右侧腹杆应力大,左、右侧最大应力之比为1.6 : 1.0。

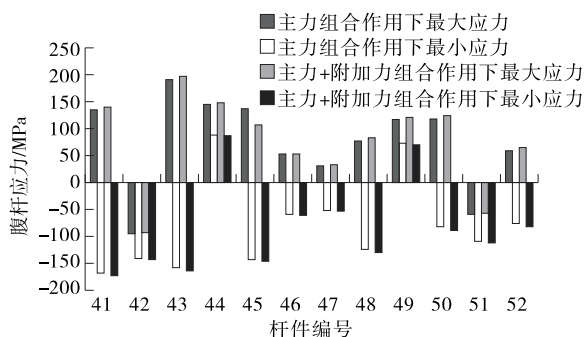


图 13 55 m 主桁腹杆应力

由于 77 m 主桁的竖向位移比 55 m 主桁大,引起主桁横向倾斜变形,导致腹杆的次内力较大,应力也较大。

4 结论

对于横向非对称简支钢桁梁,上下弦杆竖向位移关于各主桁中心对称,与常规钢桁梁规律基本一致;上弦杆横向位移很大,主要由两侧主桁竖向位移差引起主桁横向变形,风荷载作用影响较小;上下弦杆应力规律正常,与常规钢桁梁规律基本一致;两侧

主桁腹杆应力均不对称,主桁横向变形产生的结构内力对受力性能影响很大,若采用常规计算方式,即将钢桁梁划分为若干平面、各平面只承受该平面荷载,则计算结果将与实际有较大出入。

参考文献:

[1] 张兴,徐晖,白兴蓉,等.跨采空区上承式 120 m 简支钢桁梁的设计研究[J].公路,2022,67(4):133-140.

[2] 肖文义.穗莞深城际东江南特大桥主桥加劲连续钢桁梁静动力计算分析[D].成都:西南交通大学,2013.

[3] 贺胜.96 m 简支钢桁梁结构分析[J].价值工程,2018,37(14):149-150.

[4] 谭金华,杨吉新,陈响平.桥梁钢结构[M].武汉:武汉理工大学出版社,2013.

[5] 铁道部第三勘察设计院.铁路桥涵设计基本规范:TB 10002.1-2005[S].北京:中国铁道出版社,2005.

[6] 董宇航,张谢东,郭子会,等.蝴蝶兰异形拱塔斜拉桥受力研究[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2018,42(3):520-524.

[7] 戴新安,郭子会,张谢东,等.非对称变高度连续钢桁梁桥受力性能研究[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2019,43(4):774-778.

收稿日期:2022-09-20

(上接第 110 页)

撞击力作用下的性能标准,确定主桥承台增设固定式复合材料防撞块、墩身采用自浮式复合材料柔性防撞套筒,过渡墩承台采用型钢或钢管连接及承台、墩身横桥向正面、临近通航孔侧一面增设橡胶护舷的加固措施,验算结果表明在保证防撞套筒消能不低于 30%、防撞块横桥向消能不低于 25%时,该加固方法可行。

参考文献:

[1] 戴彤宇,聂武,刘伟力.长江干线船舶桥事事故分析[J].中国航海,2002,25(4):44-47.

[2] 王颖丰.船桥碰撞动力响应及风险评估研究[D].上海:上海交通大学,2020.

[3] 赵英策,冯清海.跨海大桥船舶撞击力设防标准研究[J].公路,2019,64(10):127-130.

[4] 殷浩.船舶与跨海大桥碰撞精细化数值模拟研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.

[5] 文传勇,刘超越.万州长江大桥船舶撞击风险概率分析[J].公路与汽运,2016(5):163-166+170.

[6] 许富琳,陈立新.桥梁防撞设计中船舶撞击力计算方法分析[J].公路与汽运,2016(6):162-165.

[7] 王淑,任慧,云霄,等.通航桥梁主动防船撞系统及其性能分析[J].中国公路学报,2012,25(6):94-100.

[8] 陈龙涛.梅山水道桥主墩承台抗船撞性能分析及防撞设施设计[J].工程技术研究,2023(3):160-162.

[9] 王纪锋,关梁超,葛晶,等.京港澳高速沙河大桥桥墩抗船撞能力评估及防撞设施方案研究[J].中国水运,2019,19(10):62-66.

[10] 刘政伟,许明财,潘晋.桩式桥梁防船撞设施设计方法研究[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2018,42(6):919-924.

[11] 中交公路规划设计院有限公司.公路桥梁抗撞设计规范:JTG/T 3360-02-2020[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2020.

收稿日期:2023-04-28