

外设复合材料圈的独立桩柱防船撞系统设计与模拟

廖圆圆¹, 刘煜², 祝露², 方海^{2*}, 张晋瑞³, 韩娟²

(1.湖南省高速公路建设开发总公司, 湖南 长沙 410001; 2.南京工业大学 土木工程学院, 江苏 南京 211816;

3.湖南省交通规划勘察设计院有限公司, 湖南 长沙 410008)

摘要:为评估船舶撞击桥梁过程中结构的安全性并设计合理有效的防撞系统,准确计算船桥碰撞力具有重要的意义。该文针对湘潭湘江芙蓉大桥的防船撞问题进行研究,基于有限元分析软件Ansys/LS-DYNA计算各典型撞击角度、撞击位置工况下的船撞力,并与经验公式计算结果进行对比,从而确定桥墩结构的设防船撞力。根据桥梁双肢薄壁墩抗撞能力弱的结构特点,设计并实施了复合材料与钢管混凝土独立桩柱相组合的隔离式防船撞系统。对有无防撞设施工况下的桥墩及独立桩柱结构所受的船撞力进行对比,结果表明:设置组合防撞系统后,桥墩在典型不利船撞工况下所受的横桥向和顺桥向撞击力均大幅削减,验证了该防撞系统的有效性。

关键词:船-桥碰撞;独立桩柱;复合材料;数值模拟;防撞系统

图分类号:U445

文献标志码:A

Design and Simulation of Anti-Collision System on Independent Pile with External Composite

LIAO Yuanyuan¹, LIU Yu², ZHU Lu², FANG Hai^{2*}, ZHANG Jinrui³, HAN Juan²

(1.Hunan Provincial Highway Construction and Development Corporation, Changsha, Hunan 410001, China; 2.College of Civil Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing, Jiangsu 211816, China; 3.Hunan Provincial Communications Planning, Survey &

Design Institute Co., Ltd., Changsha, Hunan 410008, China)

Abstract: The precise calculation of the ship-bridge collision force is necessary for the assessment of the structural safety of the bridge and the design of an effective anti-collision system. Taking the ship-bridge issue in Furong Bridge in Xiangtan City, this paper compared the collision forces from different angles and in different locations calculated through the finite element software Ansys/LS-DYNA with the results calculated through the empirical formula, thereby determining the fortification collision forces of the bridge piers. Based on the weak anti-collision ability of the bridge double-limb thin-walled pier, the paper designed and implemented a new anti-collision system combined with composite and concrete-filled steel independent piles. The comparison between collision forces on the pier and independent pile with and without anti-collision devices shows that, with the anti-collision system, transverse and longitudinal collision forces under typical unfavorable conditions have a sharp decrease, which verifies the effectiveness of the system.

Keywords: ship-bridge collision; independent pile; composite; numerical simulation; anti-collision system

0 引言

根据统计资料,桥梁遭受船舶碰撞事故的发生

频率远高于地震和飓风,且易引起桥梁破坏、船舶沉没、环境污染等严重后果,经济损失巨大,已成为桥梁领域的重要灾种^[1]。而中国既有跨航道大桥及特大桥众多,船舶呈大型化、快速化和高密度化态势,

收稿日期:2022-11-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:52078248);江苏省科技计划专项资金(港澳台科技合作计划)项目(编号:BZ2024058)

作者简介:廖圆圆,男,硕士,高级工程师.E-mail:31525660@qq.com

*通信作者:方海,男,博士,教授.E-mail:fanghainjut@163.com

船舶碰撞风险持续增高。因此,近年来桥梁防船舶碰撞问题已引起中国桥梁界的高度关注。

船舶撞击力是桥梁结构设计中所需的重要参数之一^[1]。船舶碰撞过程接触时间短、速度快,影响因素多,计算撞击荷载较为复杂。目前主要有经验公式法、数值模拟法和撞击试验法。中国船舶碰撞力的经验公式主要来源于中国《铁路桥涵设计基本规范》(TB 10002—2017)^[2]、《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)^[3],国外的经验公式包括国际桥梁和结构工程协会(IABSE)指南船撞力计算公式^[4]、美国 AASHTO 公式^[5]和欧洲规范船撞力计算公式^[6];此外,还有 Minorsky 碰撞理论^[7]和汉斯—德鲁彻理论^[8]。数值模拟法^[9-12]是另一种研究船撞的有效方法,利用非线性有限元软件模拟通行船舶撞击桥墩以及防撞系统过程中的撞击力、变形、能量转化时程等。撞击试验包括构件撞击^[13]、实船实桥撞击^[14]和缩比模型撞击,可测出实际船撞力等关键参数,用于校验理论计算和数值模拟的合理性。

本文围绕湘潭市湘江芙蓉大桥主通航孔 15#~17#双肢薄壁墩结构,主要开展设置防撞系统前后的桥墩遭受船舶撞击全过程数值模拟研究。由于双肢薄壁墩的抗撞能力弱,本文结合间接式与直接式防撞系统的各自优点,提出复合材料与钢管混凝土独立桩柱组合防船撞系统,以达到同时保护桥梁结构和船舶行驶安全的需要。

1 工程概况

1.1 桥梁概况

湘潭市湘江芙蓉大桥属于城市快速路,双向六车道,设计车速 60 km/h,该桥坐落于株洲湘江古桑洲与湘潭第二大桥之间,通航等级为Ⅱ-(3)级。大桥全长为 1 607.04 m,其中主桥结构为连续刚构混凝土箱梁桥。

湘江芙蓉大桥可以满足 2 000 t 级船舶通航要求,主桥两个通航孔的 15#~17#主墩为水上桥墩,船撞风险均较大。此外,由于该桥主墩采用双肢薄壁墩结构,结构抗船撞能力较弱,因此需对其设计抗撞能力较强的防护系统。

1.2 代表船型及相关计算参数的确定

针对该桥的防撞设计,代表船型取 2000 DWT 级船舶,满载时船舶总排水量可达 3 000 t。本文计算船

舶撞击力时,取船舶下行速度为 4.1 m/s。

2 有限元数值仿真计算

2.1 船-桥碰撞仿真计算条件

本文基于 ANSYS/LS-DYNA 软件进行数值模拟,桥墩采用 Solid164 实体单元模拟,采用 PLASTIC-KINEMATIC 混凝土材料模型,此材料模型不考虑开裂损伤,故本文在对比后续防撞设施的效果时,主要关注桥墩所受撞击力的削减程度。桥墩材料为 C40 混凝土,强度为 40 MPa,弹性模量为 32.5 GPa。船舶包括船艏和船身两部分,但在船舶碰撞过程中,主要由船艏部分和桥墩发生接触碰撞,起主要作用。因此为了简化模型,节省计算时间,将船身设置为刚性体,在碰撞中仅提供刚度和质量,不发生变形,船舶的建模也在实际船舶的基础上进行简化。

不同于静力载荷,船舶撞击桥墩的过程中采用 Cowper-Symonds 本构方程考虑船舶材料应变率的影响^[15],强化参数 $\beta=0$ 、 $D=40$ 、 $q=5$;材料静屈服应力 $\sigma_0=310$ MPa;钢材的失效对模拟结果也会产生一定的影响,通过最大塑性失效原则定义其失效准则^[16-17],材料最大失效应变 $\epsilon=0.35$ 。此外,船舶碰撞接触过程中,船舶与桥墩将发生复杂的摩擦运动,钢与混凝土之间的摩擦系数一般为 0.3 左右,但考虑水介质的存在,本文将动、静摩擦系数简化处理,保守取为 0.1^[18]。根据实际土质条件,确定模拟桩土共同作用的等效弹簧刚度,并利用 Midas/Civil 软件,建立群桩模型,在群桩顶施加单位水平力,以桩顶位移为变量,通过控制变量法将在弹簧作用下实际长度的桩等效为桩底固结而长度为 4 倍桩径的群桩^[19]。

2.2 船-桥碰撞仿真模拟工况

综合考虑撞击角度及部位不同,本文对 5 种工况进行了数值模拟。工况 1:船与双肢桥墩满载正撞;工况 2:船与单肢桥墩满载正撞;工况 3:船与顺桥向桥墩中部满载 20°侧撞;工况 4:船与顺桥向桥墩角部满载 20°侧撞;工况 5:船与横桥向桥墩中部满载 20°侧撞。各工况碰撞示意图见图 1。

2.2.1 工况 1:船与双肢桥墩满载正撞

2000 DWT 级船舶以 4.1 m/s 的船速与双肢桥墩满载正撞,撞击点位于桥墩中点处。船舶和桥墩正撞有限元模型仿真图和船艏变形及应力分布如图 2

所示。正撞碰撞力时程曲线如图3(a)所示,正撞能量时程曲线如图3(b)所示。

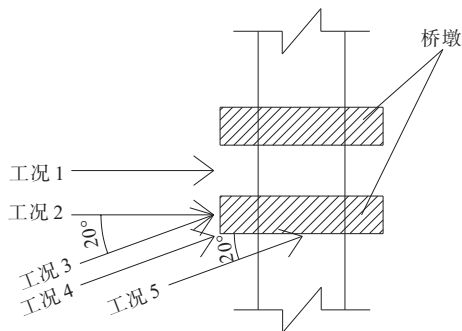
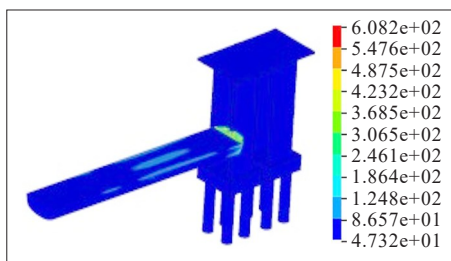
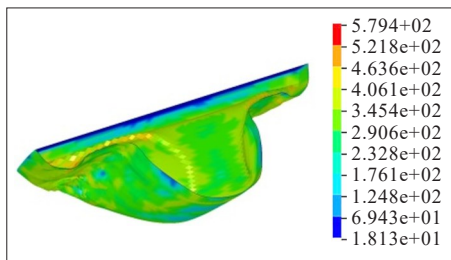


图1 碰撞工况示意图

Figure 1 Collision conditions



(a) 应力分布(单位:MPa)

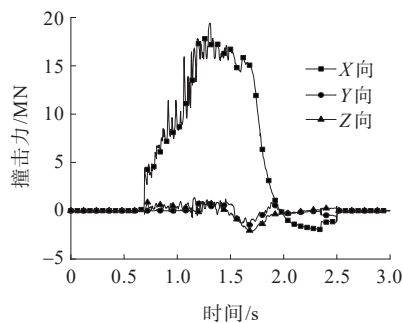


(b) 变形分布(单位:mm)

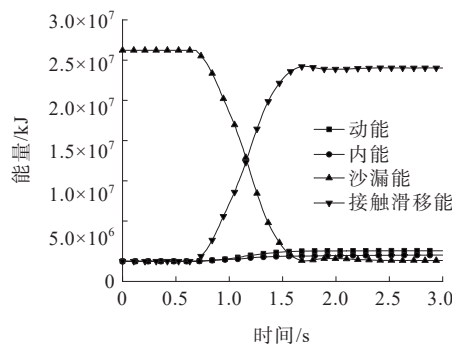
图2 应力分布和船舶变形

Figure 2 Stress distribution and ship bow deformation

由图2可知:船与桥墩满载正撞时,船舶发生严重塑性变形;由图3可知:0.7 s时船舶与桥墩开始发生碰撞,船舶撞击力急剧增大,1.2 s时撞击力达到峰值19.42 MN,随后船舶继续向前行驶,但撞击力开始逐渐减小,直到1.7 s时船舶速度降为0并在桥墩作用下开始沿反方向行驶,此时船舶变形达到峰值,碰撞过程持续时间约1.35 s,期间船舶动能持续减小,系统内能呈现增长趋势。由撞击力时程曲线与能量曲线可以看出:当船舶直接撞击无防撞系统的桥墩时,在碰撞末期,随着撞击力与撞击能量的消耗,系统内能大幅增加,导致船舶和桥墩均发生严重破坏。



(a) 工况1 碰撞力时程曲线



(b) 工况1 能量时程曲线

图3 工况1碰撞力和能量时程计算结果

Figure 3 Time-history curves of collision forces and energy in condition 1

但从曲线中可发现碰撞力出现了较小的负值,其原因在于当船舶撞击双肢薄壁墩时,船舶发生较大变形使其嵌入桥墩未能反弹;而当船舶撞击单肢桥墩或桥墩角部时,船舶会因发生凹陷而对桥墩形成一定的包裹作用,考虑到以上两种情况船舶仍有剩余反方向速度,参见图3(b)中动能减小为0后又略微增加,因此碰撞力为负值表示船与桥墩两者之间存在一定程度的拉力。

2.2.2 工况2:船与单肢桥墩满载正撞

2000DWT级船舶与湘潭芙蓉大桥的单肢桥墩满载正撞,船舶撞击点位于单肢桥墩中点处。图4为船与单肢桥墩满载正撞有限元模型以及船舶变形,图5为船舶正撞碰撞力时程曲线图。

由图4可知:船舶与单肢桥墩满载正撞时,船舶尖端凹陷,撞损部位及形状与工况1显著不同。由图5可知:船舶撞击桥梁接触时间2.05 s,比工况1时间长51.9%;最大撞击力出现在0.6~0.8 s,其正撞横桥向峰值撞击力约为11.33 MN,顺桥向峰值撞击力为0.29 MN。

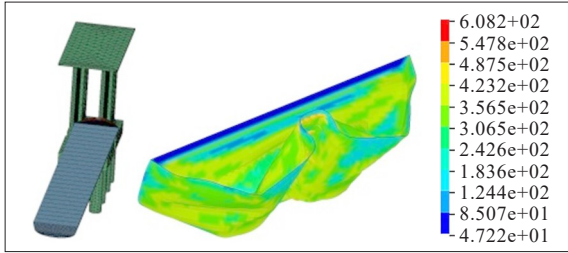


图4 工况2正撞有限元模型及船艏变形(单位:mm)

Figure 4 Finite element model and ship bow deformation after normal collision in condition 2 (unit:mm)

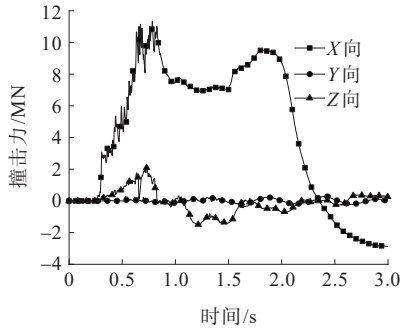


图5 工况2碰撞力时程曲线

Figure 5 Time-history curves of collision forces in condition 2

2.2.3 工况3:船与顺桥向桥墩中部满载20°侧撞

该工况船舶撞击点位于单肢桥墩中点处,船舶损伤形状与工况2类似,但呈斜凹现象。图6为船与顺桥向桥墩中部满载20°侧撞有限元模型以及船舶变形,图7为船舶侧撞碰撞力时程曲线图,船舶撞击桥梁时碰撞接触时间2.01 s,与工况2接近;最大撞击力出现在0.55~0.7 s,其横桥向峰值撞击力约为11.12 MN,顺桥向峰值撞击力约为4.01 MN。

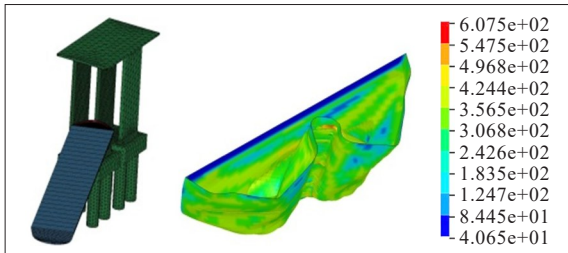


图6 工况3侧撞有限元模型及船艏变形(单位:mm)

Figure 6 Finite element model and ship bow deformation after side collision in condition 3 (unit:mm)

2.2.4 工况4:船满载20°撞击顺桥向桥墩角部

该工况船舶撞击点位于单肢桥墩角部,船舶呈正中尖凹形破坏现象。图8为船满载20°撞击顺桥向桥墩角部有限元模型以及船舶变形,图9为碰撞力时

程曲线,船舶撞击桥梁时碰撞接触时间2.13 s,略大于工况2、3;最大撞击力出现在1.0~1.2 s,横桥向撞击力峰值达到9.47 MN,顺桥向撞击力峰值达到4.52 MN。

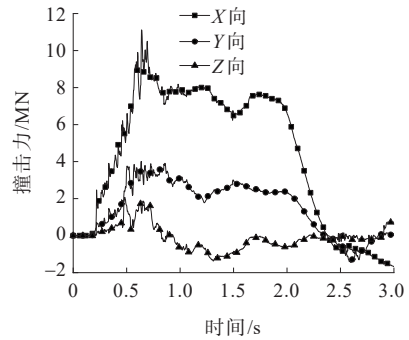


图7 工况3碰撞力时程曲线

Figure 7 Time-history curves of collision forces in condition 3

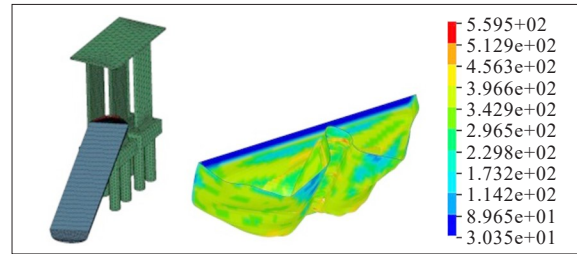


图8 工况4侧撞有限元模型及船艏变形(单位:mm)

Figure 8 Finite element model and ship bow deformation after side collision in condition 4 (unit:mm)

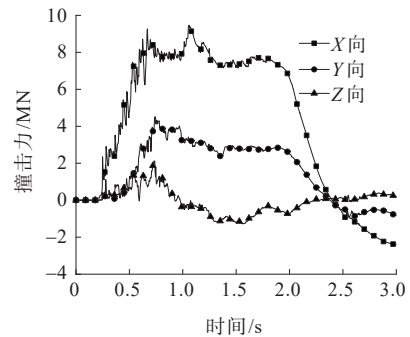


图9 工况4碰撞力时程曲线

Figure 9 Time-history curves of collision forces in condition 4

2.2.5 工况5:船满载20°撞击横桥向桥墩中部

该工况船舶撞击点位于单肢桥墩侧面的中部,船舶单侧压扁,局部尖凹破坏。图10为工况5有限元模型以及船舶变形,图11为碰撞力时程曲线,船舶撞击桥梁时碰撞接触时间1.88 s,略小于工况3、4;最大撞击力出现在0.5~0.7 s,其横桥向峰值撞击力约为10.42 MN,顺桥向峰值撞击力约为6.55 MN。

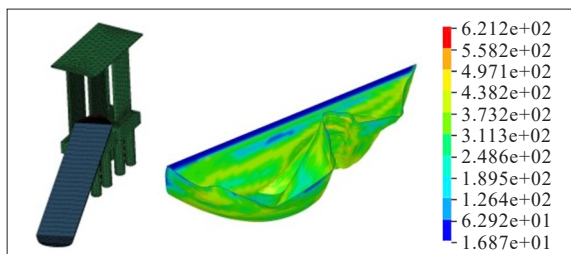


图10 工况5侧撞有限元模型及船艏变形(单位:mm)

Figure 10 Finite element model and ship bow deformation after side collision in condition 5 (unit:mm)

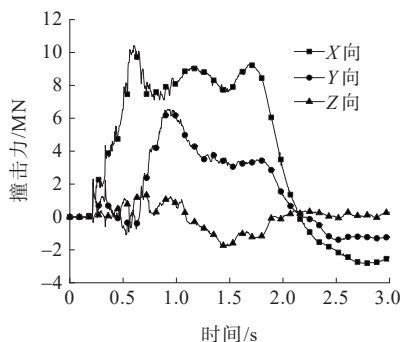


图11 工况5碰撞力时程曲线

Figure 11 Time-history curves of collision forces in condition 5

将上述5种工况下最大碰撞力汇总于表1,可以发现:工况1时桥墩受到的横桥向撞击力最大,工况5时桥墩受到的顺桥向撞击力最大;顺桥向峰值船撞力(6.55 MN)小于横桥向峰值船撞力(19.42 MN)的50%。

表1 桥墩船撞力有限元计算结果

Table 1 Finite element calculation results of ship-bridge collision forces

计算工况	撞击力/MN	
	横桥向	顺桥向
满载正撞双肢桥墩	19.42	1.22
满载正撞单肢桥墩	11.33	0.29
满载20°侧撞桥墩顺桥向中部	11.12	4.01
满载20°侧撞桥墩顺桥向角部	9.47	4.52
满载20°侧撞桥墩横桥向中部	10.42	6.55

3 防撞系统结构与数值模拟

3.1 复合材料防撞系统结构设计

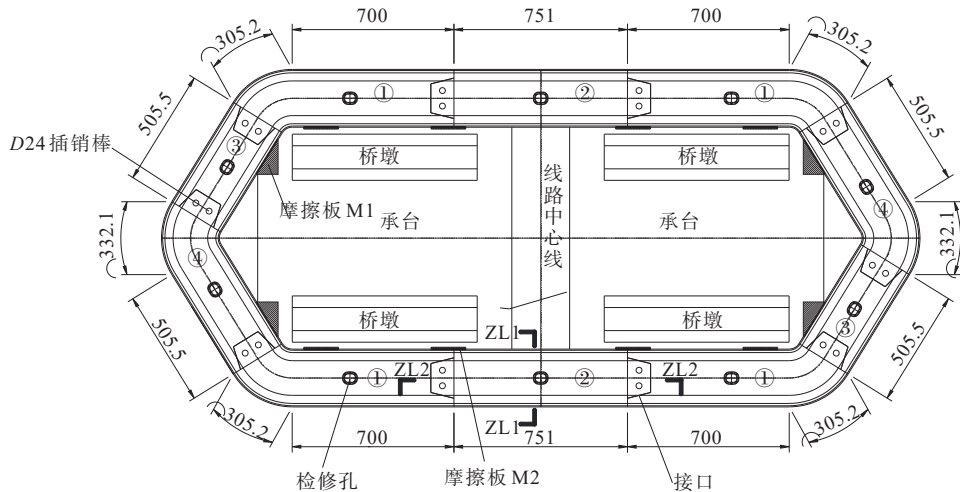
由于本桥主墩为双肢薄壁墩结构,桥墩肢宽仅1 m,抗撞能力较弱,若仅直接在桥墩外围安装浮式套

箱,船撞力削减有限,传至墩身上的撞击力仍然较大。为充分保证桥墩结构的安全性,本文提出并设计了自浮式复合材料圈与隔离式钢管混凝土独立桩柱组合防船撞系统,参见图12。

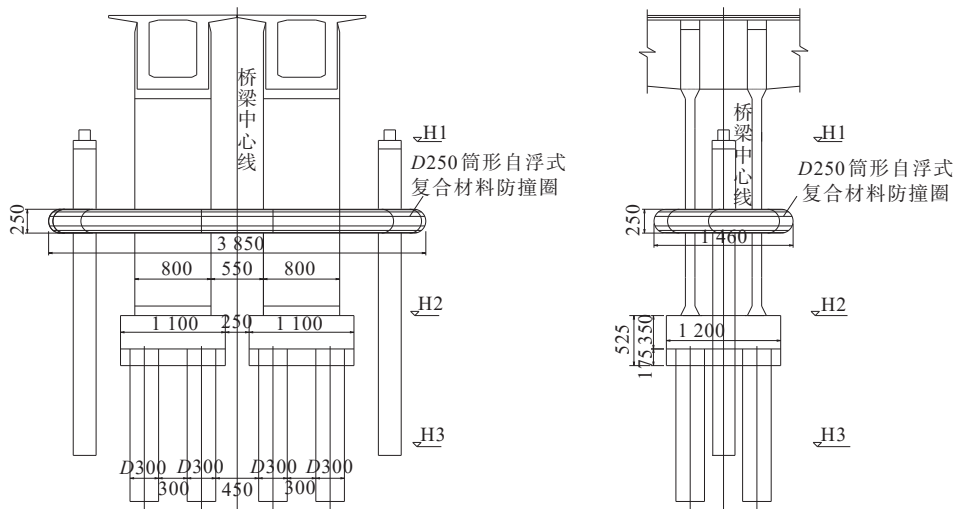
在15#~17#桥墩上下游侧各设置一根D240钢管约束混凝土桩柱(桩直径2.4 m,钢管壁厚16 mm,桩总长31.5 m,内填C30混凝土),桩柱外径边缘距离双肢薄壁墩的承台边最小距离为1.55 m,距离墩身的最小距离为3.05 m,该桩柱与桥墩不存在结构联系,具有隔离式防撞功能,将有效抵御船舶最不利的正撞灾害。同时为扩大防撞保护的范围,达到同时保护桥墩和船舶安全的目的,在围绕钢管混凝土桩和桥墩外侧设置3组可随水位上下浮动的D250圆形截面复合材料防撞系统,该防撞系统质量轻强度高,在腐蚀环境下也能正常发挥作用,具有良好的缓冲性能。

通过凹凸榫卯式插销将10根直线形构件与弯头形节段构件连接成连续光滑的多边形防撞圈,每个标准节段构件的圆形横断面外径为2.5 m,内径为1.8 m,腹板横向与纵向相邻格构之间的间隔均为0.4 m,如图13所示,其中ZL1为防撞系统标准节段构件的圆形横截面剖面图,ZL2为垂直于圆形横截面方向的构件剖面图,具体剖切位置见图12(a)。防撞系统的外壳为树脂基玻璃纤维增强复合材料,内部的填充料密度为500 kg/m³,通过挤压摩擦耗能,其中内外筒之间填充于腹板格构间隔处的材料为增强聚氨酯泡沫吸能材料,格构腹板材料为树脂基玻璃纤维增强复合材料,与内外筒一次成型,提供一定的抗剪能力,并为面层与芯材之间提供了较高的界面抗剥离能力。内部密实填灌的摩擦颗粒缓冲耗能材料,整体刚度得到保证。接头连接参见图12(a),采用两根直径为18 cm的超高分子量聚乙烯棒插销将凹凸接头连接。

复合材料防撞系统内侧与钢管混凝土柱接触部位安装有角度匹配的消能元件系统,消能元件系统由三角形复合材料卡块、橡胶护舷、聚四氟乙烯摩擦板组成,如图12(a)所示。复合材料卡块与节段一次成型,能确保防撞系统与墩身侧面保持至少0.7 m的缓冲距离,以抵御船舶侧向撞击墩身。当D250自浮式复合材料防撞圈受到船舶撞击时,首先由消能元件系统发挥作用,此时部分撞击力被传递给钢管混凝土桩,再由钢管混凝土桩直接传递至桩基础,桥墩



(a) 防撞系统平面图



(b) 立面布置图

图 12 复合材料与独立桩柱组合防船撞系统(单位:cm)

Figure 12 Anti-collision system combined with composite and independent piles (unit:cm)

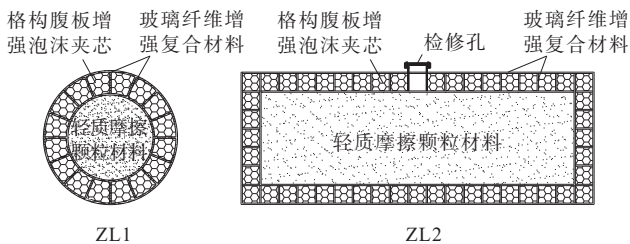


图 13 防撞系统节段剖面

Figure 13 Cross section of anti-collision system

不受船撞力;但当遭受超大吨位船舶高能碰撞时,钢管混凝土桩发生较大的挠曲变形,可能会与桥梁承台接触,从而将部分船撞力传递至桥梁承台,并最终传至桥墩桩基。本文设计的复合材料防撞系统为自浮式,安装完成后的效果如图 14 所示。

3.2 防撞系统数值仿真模拟

3.2.1 数值模拟基本参数

在上述船-桥模型基础上,建立复合材料与独立桩柱组合防船撞系统的有限元模型,计算防撞系统的效果,计算工况包括满载正撞和满载 20° 侧撞。有限元模型中,建模时假设各节段之间为刚性连接。且不考虑内外复合材料面层、横纵向格构腹板、聚氨酯泡沫以及内部摩擦颗粒材料之间的黏结滑移。复合材料采用正交各向异性的复合材料损伤模型 Composite Damage Model 模拟,该模型采用 Chang-Chang 失效准则,且根据材性试验,测出复合材料的环向弹性模量为 20.4 GPa,长度方向和径向的弹性模量均为 6.5 GPa,环形拉伸强度 $f_t=322.9$ MPa。聚

氨酯泡沫采用可压碎泡沫模型“Crushable Foam Model”,弹性模量 $E=5.534\text{ MPa}$,压缩强度 $f_c=0.28\text{ MPa}$;剪切模量 $G=2.08\text{ MPa}$,剪切强度 $\tau=0.29\text{ MPa}$,泊松比 $\nu=0.3$ 。摩擦颗粒材料采用散体砂粒模型“*MAT_SOIL_AND_FOAM Mass”,剪切模量 0.64 MPa ,屈服强度 3.20 MPa 。



(a) 防撞系统总体布置



(b) 防撞系统局部效果

图 14 工程实际效果图

Figure 14 Practical application

按照实际截面尺寸建立钢管混凝土桩的模型,因撞击力与被撞体的刚度密切相关,因此保守将钢管混凝土桩底按泥线位置做固结处理。

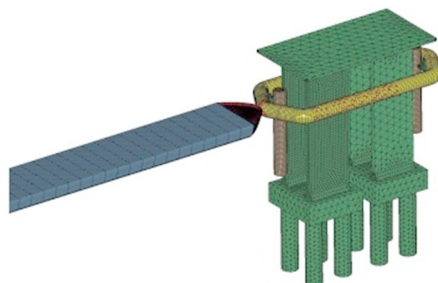
3.2.2 防撞工况 1:防撞系统受到船舶满载正撞

当防撞系统受到 2000DWT 级船舶满载正撞时,船速为 4.1 m/s ,撞击点位于复合材料防撞系统的正面尖端处。有限元模型如图 15(a)所示,正撞时,独立桩柱未与桥墩接触,因此桥墩受到的撞击力为 0;而钢管混凝土桩柱所受的 X 向峰值撞击力为 10.20 MN ,Y 向峰值撞击力为 0.66 MN ,参见图 15(b)。在此极端工况下,钢管桩底部钢材的最大应力达到 410.8 MPa ,进入屈服破坏。

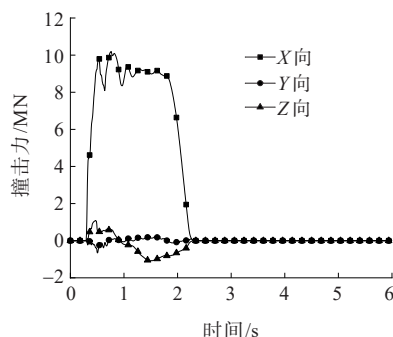
3.2.3 防撞工况 2:防撞系统受到船舶满载侧撞

当 2000DWT 级船舶与防撞系统满载侧向 20° 撞击,其有限元模型如图 16(a)所示,此时独立桩柱与单肢墩身斜向接触,桥墩受到的撞击力值较小,其中横桥向峰值撞击力为 0.82 MN ,顺桥向峰值撞击力为

0.20 MN ,参见图 16(b)。而钢管混凝土桩柱所受的 X 向峰值撞击力为 6.79 MN ,Y 向峰值撞击力为 5.37 MN ,参见图 16(c)。在此工况下,钢管桩底部钢材的最大应力达到 331.3 MPa 。



(a) 防撞工况 1 有限元模型



(b) 防撞工况 1 桩柱碰撞力时程曲线

图 15 防撞工况 1 有限元模型与计算结果

Figure 15 Finite element model and calculation results in anti-collision condition 1

由上分析可知:复合材料与独立桩柱组合防撞系统有效地隔离了船舶撞击,极大地保护了桥墩结构的安全。

4 结论

本文围绕湘潭市湘江芙蓉大桥主通航孔 15#~17# 双肢薄壁桥墩结构的防撞设计需求,基于有限元仿真模拟,计算桥墩在不同撞击角度、撞击位置等典型工况下所受的船撞力,设计并实施了复合材料与钢管混凝土独立桩柱组合的隔离式防船撞系统,并完成了代表工况的有限元模拟研究,得出如下结论:

(1) 船舶与双肢桥墩满载正撞时,桥墩主要受横桥向撞击力影响,最大撞击力为 19.42 MN ;船满载 20° 撞击横桥向桥墩中部时,桥墩主要受顺桥向撞击力影响,最大撞击力为 6.55 MN ;顺桥向峰值船撞力 (6.55 MN) 小于横桥向峰值船撞力 (19.42 MN) 的 50%。

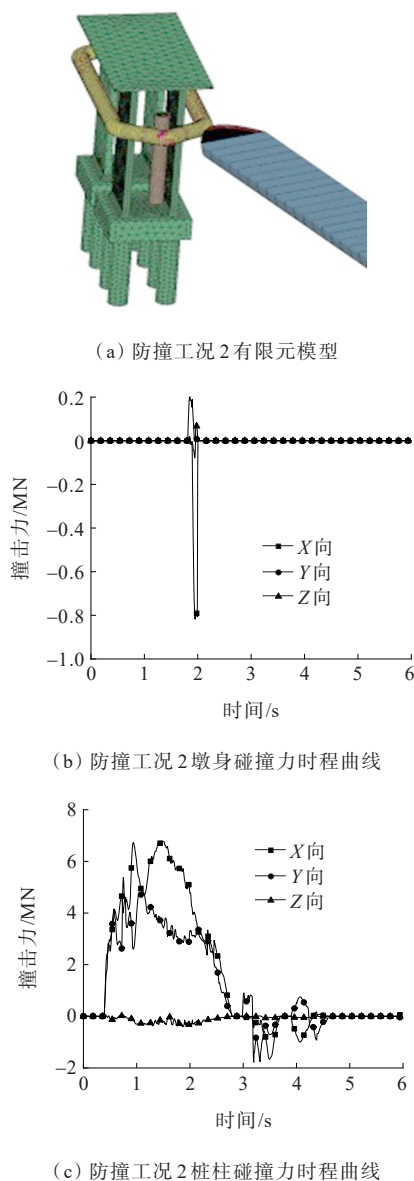


图 16 防撞工况 2 有限元模型与计算结果

Figure 16 Finite element model and calculation results in anti-collision condition 2

(2) 复合材料与独立桩柱组合防船撞系统具有隔离式防撞功能,将有效抵御船舶最不利的正撞灾害,适用于自身抗撞能力较弱的桥墩;同时自浮式复合材料防撞系统能扩大防撞保护的范围,并达到同时保护桥墩和船舶安全的目的,该防撞系统质量轻、强度高,在腐蚀环境下能正常发挥作用,具有良好的缓冲性能。

(3) 设置组合防撞系统后,正撞时,独立桩柱未与桥墩接触;侧撞时,桥墩受到的撞击力值较小,其中横桥向峰值撞击力仅为 0.82 MN,顺桥向峰值撞击力为 0.20 MN。

参考文献:

References:

- [1] 耿波,王君杰,汪宏,等.桥梁船撞风险评估系统总体研究[J].土木工程学报,2007,40(5):34-40.
GENG Bo, WANG Junjie, WANG Hong, et al. Risk assessment system for bridges against vessel impacts[J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(5): 34-40.
- [2] 中华人民共和国铁道部.铁路桥涵设计基本规范:TB 10002—2017[S].北京:中国铁道出版社,2005.
Ministry of Railways of the People's Republic of China. Fundamental code for design on railway bridge and culvert: TB 10002—2017[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2005.
- [3] 中交公路规划设计院.公路桥涵设计通用规范:JTG D60—2015[S].北京:人民交通出版社,2015.
CCCC Highway Consultants. General specifications for design of highway bridges and culverts: JTG D60—2015 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2015.
- [4] 交通部公路规划设计院标准规范室.交通船只与桥梁结构的相互影响:综述与指南[Z].上海:同济大学桥梁工程系,1991.
Standard and Norms Office, Highway Planning and Design Institute, Ministry of Transport. Interaction between traffic vessels and bridge structures: Overview and guidelines[Z]. Shanghai: Department of Bridge Engineering, Tongji University, 1991.
- [5] AASHTO. Guide specification and commentary for vessel collision design of highway bridges[S]. Washington, D.C., 2009.
- [6] VROUWENVELDER A C W M. Design for ship impact according to Eurocode 1, Part 2.7[C]//Ship Collision Analysis. Copenhagen(DK): Routledge, 2017: 123-133.
- [7] MINORSKY V U. An analysis of ship collisions with reference to protection of nuclear power plants[J]. Journal of ship research, 1958, 3(2): 1-4.
- [8] DERUCHER K N. Analysis of concrete bridge piers for vessel impact[C]. Proceeding of Sino-American Symposium on Bridge and Structural Engineering, 1982.
- [9] 张文明,王涛,张华兵,等.基于 ANSYS/LS-DYNA 的船桥碰撞分析[J].中国水运(学术版),2006,6(11):21-23.
ZHANG Wenming, WANG Tao, ZHANG Huabing, et al. Analysis of ship-bridge collision based on ANSYS/

- LS-DYNA[J]. China Water Transport (Academic Version), 2006, 6(11): 21-23.
- [10] 刘建成, 顾永宁. 基于整船整桥模型的船桥碰撞数值仿真[J]. 工程力学, 2003, 20(5): 155-162.
- LIU Jiancheng, GU Yongning. Simulation of ship-bridge head-on collision based on finite element model of whole ship-bridge[J]. Engineering Mechanics, 2003, 20(5): 155-162.
- [11] 张雪锋, 叶以挺, 吴刚, 等. 某跨海大桥主墩承台防撞钢套箱设计与施工[J]. 中外公路, 2019, 39(6): 97-102.
- ZHANG Xuefeng, YE Yiting, WU Gang, et al. Design and construction of anti-collision steel box for main pier cap of a sea-crossing bridge[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2019, 39(6): 97-102.
- [12] 刘昆, 王自力, 张延昌, 等. 基于全耦合技术的船体结构碰撞性能研究[J]. 船舶力学, 2015, 19(5): 574-581.
- LIU Kun, WANG Zili, ZHANG Yanchang, et al. Collision behavior of structural analysis in ship collisions based on full-coupling technology[J]. Journal of Ship Mechanics, 2015, 19(5): 574-581.
- [13] 樊伟, 张志勇, 孙洋, 等. 配筋超高性能纤维增强混凝土梁抗冲击性能的多目标优化[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2019, 39(2): 82-90.
- FAN Wei, ZHANG Zhiyong, SUN Yang, et al. Multi-objective crashworthiness optimization of ultra-high performance fiber-reinforced concrete beams with steel bars under impact loading[J]. Journal of Chang' an University (Natural Science Edition), 2019, 39(2): 82-90.
- [14] CONSOLAZIO G R, COOK R A, MCVAY M C, et al. Barge impact testing of the St. George Island Causeway Bridge: Phase III: Physical testing and data interpretation [R]. Florida: University of Florida, 2006.
- [15] 王自力, 顾永宁. 应变率敏感性对船体结构碰撞性能的影响[J]. 上海交通大学学报, 2000, 34(12): 1704-1707.
- WANG Zili, GU Yongning. Effect of strain-rate sensitivity on the behavior of ship structure in collision[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2000, 34(12): 1704-1707.
- [16] 潘晋, 吴卫国, 王德禹, 等. 船-桥墩防护装置碰撞的有限元仿真[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2005, 29(2): 178-181.
- PAN Jin, WU Weiguo, WANG Deyu, et al. Finite element simulation to the collision between ship and anti-collision equipment[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2005, 29(2): 178-181.
- [17] GLYKAS A, DAS P K, BARLTROP N. Application of failure and fracture criteria during a tanker head-on collision[J]. Ocean Engineering, 2001, 28(4): 375-395.
- [18] 王自力. 船舶碰撞损伤机理与结构耐撞性研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2000.
- WANG Zili. Study on ship collision damage mechanism and structural crashworthiness[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2000.
- [19] 葛继平, 管仲国, 李建中. 群桩基础桥梁抗震分析简化模型[J]. 结构工程师, 2006, 22(6): 64-67.
- GE Jiping, GUAN Zhongguo, LI Jianzhong. Simplified model for seismic analysis of bridges with pile foundations [J]. Structural Engineers, 2006, 22(6): 64-67.