

桥梁防撞钢套箱设计与连接方式比较研究

——船舶正面碰撞下的有限元分析

张繁森¹, 廖 军²

(1. 交通运输部公路科学研究院, 北京 100088; 2. 北京公科固桥技术有限公司, 北京 100080)

摘要:建立了嘉绍大桥防撞钢套箱有限元模型, 改变其钢板厚度, 分析钢板厚度变化对钢套箱抗撞性能的影响; 改变钢套箱与桥墩之间的连接方式, 模拟不同连接方式对钢套箱抗撞性能的影响; 改变套箱厚度, 分析其对钢套箱抗撞性能的影响。结果表明, 缓冲距离足够的情况下, 钢板厚度减小, 船舶撞击力峰值会减小; 在相同条件下, 密贴这种连接方式的抗撞性能弱于有浮动或者固定连接件连接这 2 种方式; 套箱厚度变化对抗撞性能的影响不大, 但是采用密贴连接时, 需注意其缓冲距离是否足够。

关键词:防撞钢套箱; 抗撞性能; 钢板厚度; 连接方式; 套箱厚度

中图分类号: U443.26 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2024)02-0022-06

防撞钢套箱是安装在承台或桥墩周围, 主要依靠自身钢材变形或破损来消耗撞击能量, 由多个钢质箱室构成, 每个箱式之间由竖向隔板隔开, 箱式内部有竖向肋和横向肋的一种被动防船撞设施。根据不同需求可在其内部填充耗能芯材, 外部设置橡胶护舷等其他元件^[1-3]。

文献[4]、文献[5]从动力学的角度提出了柔性(波阻抗低)防撞的概念。文献[6]、文献[7]则将防撞钢套箱简化为质点弹簧模型, 认为防船撞设施刚度与船舶刚度的比值与船撞力峰值折减率存在负相关的关系。文献[8]研究发现钢板厚度越小, 其船撞力峰值越小, 但是船撞力峰值并不是随着钢板厚度减小一直减小, 当钢板厚度减小到一定数值后, 船撞力不减反增, 其原因是防护装置的破坏已不足以消耗撞击船的动能。文献[9]发现船舶撞穿钢套箱与桥墩直接接触和船舶未撞穿钢套箱 2 种情况下, 船舶对基础的撞击力后者远小于前者。因此, 可以认为, 钢板厚度减小后导致船撞力突然增加, 是因为船舶撞穿钢套箱后与桥墩发生直接碰撞, 而在钢套箱和基础之间设置一部分支撑结构将其隔开, 防止其撞穿钢套箱后直接接触桥墩, 有效避免船撞力突然增加的情况发生。在防船撞设施结构设计方面, 各学者研究了钢板厚度变化、加劲肋间距变化、有无填充材料等对防撞设施抗撞性能的影响。本文拟研究钢套箱与桥墩连接方式和套箱厚度变化对其抗撞性能的影响。

1 钢套箱构造

计算用钢套箱系嘉绍大桥防撞钢套箱, 其主体结构由内、外壁板, 底板, 上甲板, 以及 L 型和 T 型加劲肋构成的主次框架组成。主体材料采用 Q235B 钢材。钢套箱平立面布置如图 1 所示。

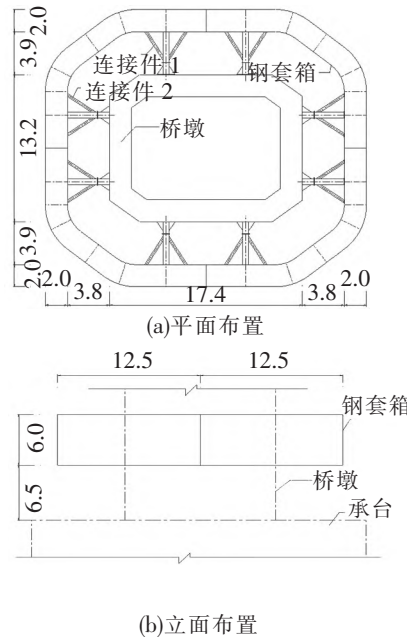


图 1 钢套箱平立面布置(单位:m)

收稿日期: 2023-12-27 责任编辑: 车轩玉 DOI: 10.13319/j.cnki.sjztdxxb.20230367

作者简介: 张繁森(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为桥梁工程。E-mail: 1246253431@qq.com

张繁森, 廖军. 桥梁防撞钢套箱设计与连接方式比较研究: 船舶正面碰撞下的有限元分析[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2024, 37(2): 22-27.

2 有限元模型及工况

2.1 桥墩-钢套筒-船舶有限元碰撞模型

2.1.1 钢套筒模拟

钢套筒横桥向尺寸为 29.6 m,顺桥向为 25.6 m,套筒厚度为 2 m,高度为 6 m。防撞钢套筒采用壳单元进行模拟,其中钢套筒外壁板和底板厚度为 14 mm,箱室的下隔板厚度为 20 mm,其余板材均为 12 mm。钢套筒采用 Belytschko-Tsay 壳单元进行计算,面内采用单点积分。船撞过程中仅钢套筒和船舶碰撞的局部区域变形和内力明显,因此,钢套筒发生碰撞区域的单元尺寸采用 100 mm,非碰撞区域单元尺寸为 200 mm,钢套筒共划分单元 185 104 个。钢套筒模型有限元模型见图 2。

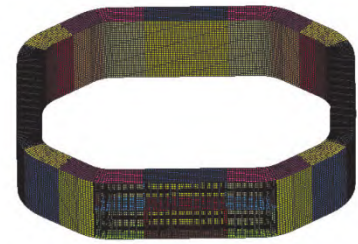


图 2 钢套筒有限元模型

2.1.2 船舶模拟

船舶选取 3 000 t 海轮,船舶总长 101 m,宽 13.8 m,深 6.5 m。船舶在碰撞过程中,其变形和破损均发生在船艏区域,因此,仅建立船艏模型,船身部分用质量点进行代替。船艏结构包括外壁板和内部肋板,对内板做了简化模拟,船艏结构如图 3 所示。船艏模型采用 Belytschko-Tsay 壳单元,单元尺寸为 150 mm,单元厚度取为 20 mm,共划分单元 32 882 个。



图 3 船艏有限元模型

2.1.3 桥墩模拟

由于船舶与桥墩发生碰撞的冲击作用时间较短,且桥墩刚度远大于船艏和防撞设施的刚度,桥墩刚度的变化对防撞设施抗撞性能的影响微乎其微,并且主要是对防撞设施抗撞性能进行定性分析,因此对桥墩进行简化模拟。仅建立部分桥墩模型,为混凝土空心桥墩,墩底固结,上端自由,采用常应力实体单元,网格尺寸为 400 mm。

2.1.4 连接方式模拟

防撞钢套筒与桥墩或承台的连接方式有 3 种:一种是密贴,防撞套筒采用挂腿挂于承台之上,防撞套筒内围钢板与承台密贴,中间无其余构件;一种是采用固定式连接件进行连接,钢套筒无法随水位的浮动而浮动,如嘉绍大桥防撞钢套筒采用桁架结构将钢套筒固定在桥墩上;还有一种则是采用浮动式连接件进行连接,浮动式连接件则多种多样,有滚轮、鼓型橡胶、V 型橡胶、减磨擦架等。对 3 种连接方式分别进行模拟,探讨连接方式变化对钢套筒抗撞性能的影响。其中,浮动式连接件多种多样,采用混凝土垫块的方式进行简化模拟。3 种不同连接方式下有限元碰撞模型分别见图 4、图 5、图 6。

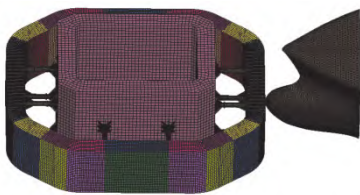


图 4 桁架连接有限元碰撞模型

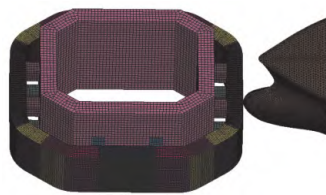


图 5 垫块连接有限元碰撞模型



图 6 密贴连接有限元碰撞模型

2.2 计算参数和本构模型

钢套筒和船舶钢材采用 Q235 钢,定义为双线性弹塑性模型。钢材密度为 7 850 kg/m³,弹性模量取 2.1×10¹¹ Pa,切线模量取 1.18×10⁹ Pa,泊松比为 0.3,屈服强度为 235 MPa,失效应变取 0.34。考虑应变率对钢材塑性行为的影响,采用 Cowper-Symonds 本构方程

$$\frac{\dot{\sigma}_0}{\sigma_0} = 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{D} \right)^q \quad (1)$$

式中, $\dot{\sigma}_0$ 为塑性应变率为 $\dot{\epsilon}$ 时的屈服应力; σ_0 为相应的静屈服力; D 、 q 为材料常数,本文钢材取 $D=40.4$ 、 $q=5$ 。

桥墩混凝土材料密度为 2 350 kg /m³,弹性模量取 3.25×10⁴ MPa。

2.3 计算工况

采用设防船型在设防船速下(4.59 m/s)正撞防船撞设施。分别模拟 3 种不同连接方式下钢套箱钢板厚度在原设计基础上 -11、-10、-9、-8、-7、-6、-5、-4、-3、-2、-1、0、1、2 mm 共计 42 种工况,并模拟了连接方式为密贴和垫块时钢套箱厚度分别为 1.6、2.0、2.4 m 6 种工况。

3 数值模拟结果与分析

在分析中沙漏变形的出现使结果无效,应尽量减小或避免,查看所有计算工况的能量转化数据曲线,沙漏能最大的工况为桁架连接下套箱钢板厚度 -11 mm,其碰撞过程的系统能量转化曲线如图 7 所示,沙漏能占总能量比例为 6.1%,各个工况有限元计算结果可靠。

3.1 设计钢套箱抗撞性能结果与分析

设计钢套箱采用桁架连接,对比其不同钢板厚度下的船舶位移、撞击力、套箱吸能和船艏变形与破坏情况。

3.1.1 船舶最大位移

通过图 8 可以看出,船舶位移峰值随着套箱板厚的增加而减小。当板厚减小 10 mm 时,船舶位移已经超过套箱所能提供的最大缓冲距离,船舶开始直接撞击桥墩。

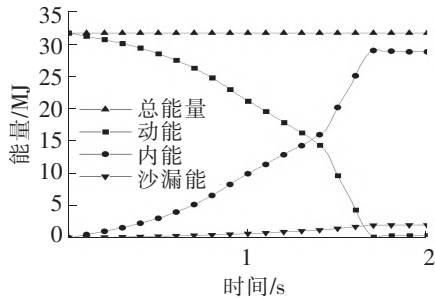


图 7 钢板厚度 -11 mm 碰撞过程系统能量转化图

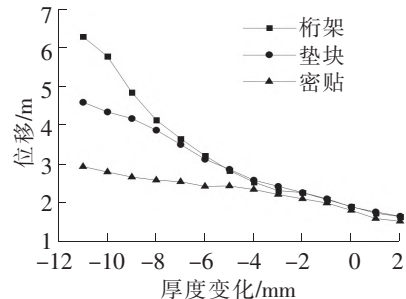


图 8 不同连接方式下船舶最大位移对比图

3.1.2 撞击力

从图 9 可以看出,钢板厚度减小 9 mm 以内,其船撞力峰值大致随着板厚减小而减小,撞击持续时间则越来越长,但是当钢板厚度减小 10 mm,船撞力有 2 次增大的趋势,当钢板厚度减小 11 mm,船撞力峰值将迅速增大至 48.8 MN。对比船舶最大位移发现,当钢套箱提供的缓冲距离不足时,船撞力可能迅速增加,因此缓冲距离不足的钢套箱设计应当避免。

3.1.3 钢套箱吸收能量

从图 10 可以看出,吸能随板厚变化的关系并不明显,但是当套箱缓冲距离不够时,钢套箱吸能显著降低,降低部分能量被船艏吸收。分析发现,设计工况下受到直接撞击的钢箱段吸能达到 21.58 MJ,占整个钢套箱吸能的 78%,桁架连接件吸能 4.71 MJ,占比 17%,其余段钢箱吸能合计 1.39 MJ,占比 5%,钢套箱吸能具有明显的局域化现象。受到直接撞击段的钢箱各构件中外壁板吸能最多,而后依次是位于箱室中部的平台板、箱式的内部框架、2 个箱室之间的连接面、内壁版、底板、顶板和隔板,各构件吸能情况如表 1 所示。

表 1 被撞击箱室各构件吸能

构件	外壁板	平台板	内部框架	连接面	内壁版	底板	顶板	隔板
吸能/MJ	7.05	4.31	3.70	2.90	1.47	0.85	0.71	0.59

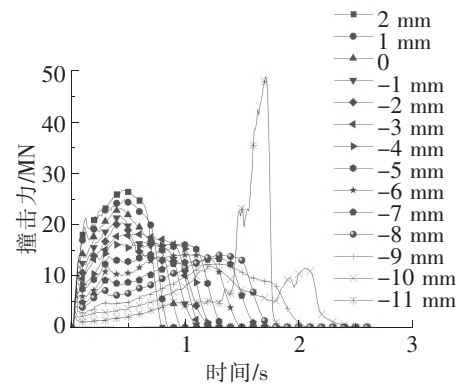


图 9 桁架连接下撞击力时程曲线

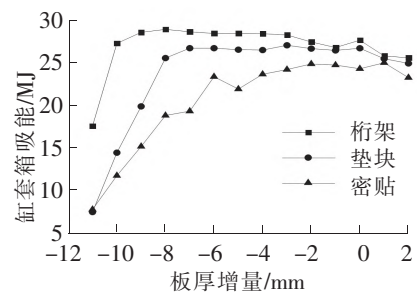


图 10 不同连接方式下钢套箱吸能对比图

3.1.4 钢套箱变形与破坏

用钢套箱的最大撞深来表征钢套箱的变形,用钢套箱的最大塑性应变来表征其是否发生失效破坏。从图 11 可以看出,在钢套箱内壁尚未接触到桥墩时,钢套箱变形随着板厚的减小而增大,并且其变形并不是线性增加的,变形的增量是逐渐增大的;各种计算板厚下钢套箱均出现了失效破坏,最先发生失效破坏的位置均是船艏接触位置钢套箱的内部结构,外壁板出现失效破坏的时间均较晚。

3.1.5 船舶变形与破坏

同样,用船舶撞深表征船舶变形,船舶最大塑性变形表征其船舶是否发生失效破坏。从图 12 可以看出,船舶撞深-钢套箱板厚关系曲线与撞击力峰值-钢套箱板厚关系曲线基本一致,均先随着钢套箱板厚的减小而减小,当板厚减小 11 mm 时,其撞深与撞击力均剧增。查看钢套箱不同板厚变化下的船舶最大塑性应变,发现当板厚为 -10、1、2 mm 时船舶均出现了失效,未发生失效的工况下,钢套箱板厚越小,其塑性应变越小。

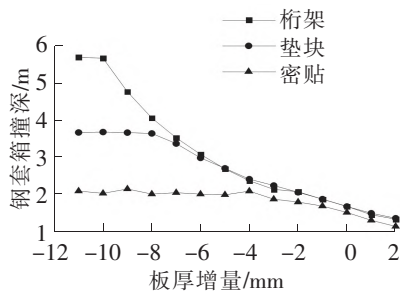


图 11 不同连接方式下钢套箱撞击深度对比图

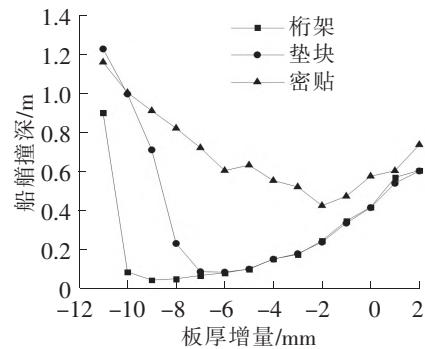


图 12 不同连接方式下船舶撞深对比图

3.2 不同连接方式下钢套箱抗船撞性能比较

3.2.1 船舶最大位移

从图 8 可以看出,垫块和密贴 2 种情况下,钢套箱分别在厚度减小 7、3 mm 开始出现缓冲距离不足的情况。对比发现缓冲距离充足的情况下,采用垫块和桁架连接这 2 种方式,船舶最大位移大致相等。而采用密贴这种方式,船舶的最大位移小于前 2 种连接方式。

3.2.2 撞击力峰值

从图 13 可以看出,在缓冲距离足够的情况下,桁架连接和垫块连接的船撞力峰值接近,密贴情况下的撞击力峰值远大于其余 2 种连接方式的撞击力峰值,最大差值达到 10.9 MN。这是因为钢套箱采用密贴的连接方式相当于改变了钢套箱内壁板的边界条件,增加了钢套箱的刚度。

3.2.3 钢套箱吸能

从图 10 可以看出,采用密贴的连接方式,钢套箱吸能明显小于采用垫块和桁架连接。这是因为采用垫块连接和桁架连接时钢套箱在受到船舶碰撞发生溃缩时可带动周边的钢箱一起参与变形吸能;而采用密贴方式时,桥墩会阻止钢套箱变形,钢套箱的局域化变形更加明显,参与变形吸能的构件减少,吸能能力变小。

3.2.4 钢套箱变形与破坏

从图 11 可以看出,钢套箱变形与船舶最大位移变化趋势基本一致;在缓冲距离充足的情况下,桁架连接和垫块连接下钢套箱撞深深度较为一致,而密贴连接撞深深度略小于前两者。3 种连接方式下钢套箱均出现了失效单元,失效单元数量与撞深呈正相关。

3.2.5 船舶变形与破坏

从图 12 可以看出,缓冲距离充足的情况下,桁架连接和垫块连接对船舶撞深基本无影响,而密贴连接情况下船舶撞深大于前两者。密贴连接情况下的船舶最大塑性应变不超过失效应变的钢套箱板厚区

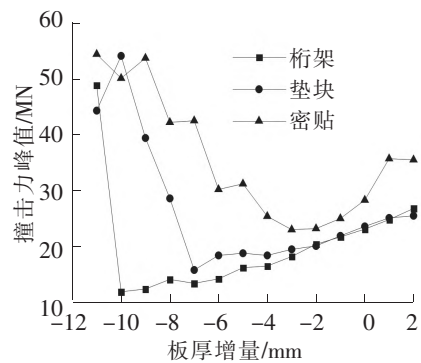


图 13 不同连接方式下撞击力峰值对比图

间,较其余两者小。

3.3 钢套箱厚度变化对抗撞性能的影响比较

通过前文对比分析发现,在缓冲距离足够的情况下,桁架连接和垫块连接下的钢套箱抗撞性能基本一致。因此,仅模拟计算了钢套箱厚度分别为 1.6、2.0、2.4 m 的钢套箱在垫块连接和密贴 2 种场景下的撞击力、能量吸收、船舶最大位移、船艏撞深,如图 14—图 18 所示。

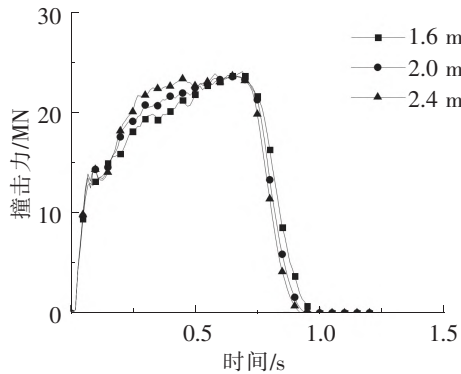


图 14 垫块连接时不同厚度变化撞击力时程曲线

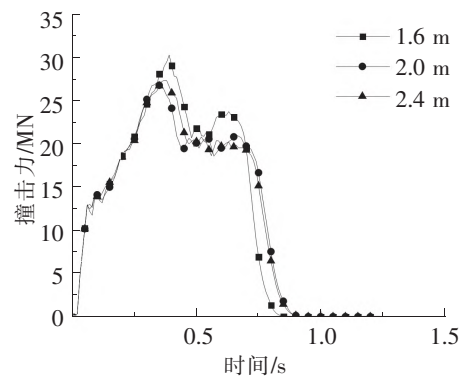


图 15 密贴时不同厚度变化撞击力时程曲线

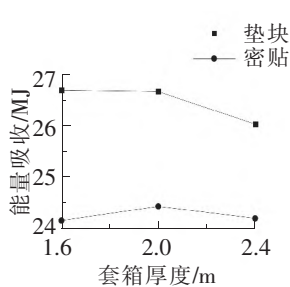


图 16 不同套箱厚度能量吸收对比

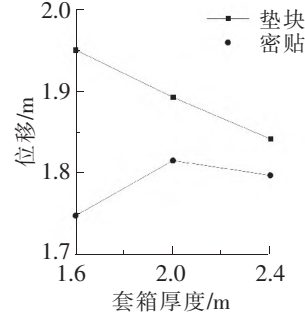


图 17 不同套箱厚度船舶最大位移对比

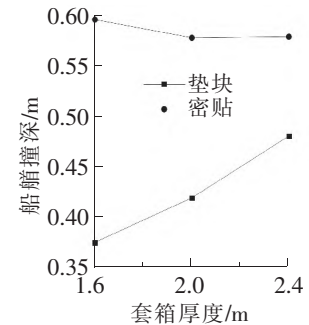


图 18 不同套箱厚度船舶撞深对比

在此 3 种套箱厚度、船舶撞击工况下,有如下现象:从船撞力时程曲线来看,垫块连接时,钢套箱厚度变化对套箱撞击力峰值、撞击力持续时间几乎无影响;密贴时,钢套箱厚度增加对撞击力峰值影响不明显,但是钢套箱厚度减小会造成撞击力峰值的明显增大。观察碰撞过程发现,造成这一现象的原因是因为钢套箱厚度太小,且套箱内壁紧贴桥墩,无法为船舶提供足够的缓冲厚度,船艏在钢套箱极度压缩的情况下,其船撞力峰值得到进一步加大。从能量吸收来看,同一种连接方式下,套箱厚度的变化对结果几乎无影响,不同连接方式对结果影响明显。从船舶最大位移来看,同一种连接方式下,套箱厚度变化会对结果产生影响,且套箱越厚,其船舶最大位移越小。在密贴场景下,套箱厚度为 1.6 m 和 2.0 m 时似乎并不符合这一规律,这是因为套箱厚度为 1.6 m 时钢套箱被撞击位置被压缩得很薄,刚度变大,对船舶的阻挡作用变强了,从而减小了船舶最大位移。从船艏损伤来看,不同连接方式下,密贴船舶位移小于垫块连接这一方式下的船舶位移。垫块连接时,船艏撞深随套箱厚度增大而变大,船艏的塑性应变均小于失效应变;而密贴情况下则是套箱厚度为 1.6 m 时船艏撞深略有增大。3 种方式其船艏均达到失效应变。

4 结论

利用嘉绍大桥防撞钢套箱建立有限元模型,对嘉绍大桥设计钢套箱在受船舶撞击过程中的撞击力时程曲线、能量吸收情况和船舶位移进行了分析描述,研究了套箱钢板厚度对钢套箱抗撞性能的影响趋势,发现了钢套箱所能提供的缓冲距离是影响船撞力峰值的关键,并且在缓冲距离充足的情况下,钢板厚度越小,船撞力峰值越小,撞击持续时间越长,钢套箱变形越大,船舶位移越大,船舶损伤越小。

在嘉绍大桥防撞钢套箱的基础上改变其与桥墩的连接方式,利用垫块模拟钢套箱与桥墩采用浮动连

接件这一结构型式,对比其对抗撞性能的影响,发现桁架连接与垫块连接情况下钢套箱的抗撞能力较为相似,钢套箱密贴在降低船撞力峰值、吸收能量、减小船舶损伤等方面的能力均小于前两者。

通过改变钢套箱的套箱厚度发现,此套箱厚度下及其船撞工况下,只要钢套箱能够给船舶提供足够的缓冲距离,套箱厚度变化对其撞击力峰值、能量吸收几乎无影响,缓冲距离不足,则容易造成降低撞击力的作用不及预期,在防撞钢套箱之间设置支撑结构可避免这一现象。

参 考 文 献

- [1]中华人民共和国交通运输部.公路桥梁防船撞装置通用技术条件:JT/T 1414—2022[S].北京:人民交通出版社,2022.
- [2]冯清海,刘明虎,李国亮.港珠澳大桥青州航道桥塔墩防船撞数值模拟与性能分析[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2014,38(1):143-146.
- [3]姜河蓉,黄伟忠,金允龙.嘉绍大桥主墩防撞设施结构方案研究[J].上海船舶运输科学研究所报,2011,34(2):103-108.
- [4]陈国虞,王礼立,杨黎明,等.桥梁防撞理论和防撞装置设计[M].北京:人民交通出版社,2013.
- [5]王礼立,陈国虞,杨黎明.船桥碰撞过程引发的冲击动力学论题[J].振动与冲击,2015,34(3):14-22.
- [6]耿波,李嵩林,郑植.基于刚度匹配的桥梁附着式防船撞设施合理刚度取值研究[J].公路交通技术,2017,33(5):41-46.
- [7]耿波,李嵩林,郑植.基于系统刚度的附着式防船撞设施简化动力分析方法研究[J].公路交通技术,2018,34(2):22-25.
- [8]潘晋,吴卫国,王德禹,等.船-桥墩防护装置碰撞中的影响因素研究[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2005,29(4):538-541.
- [9]冯清海.特大型桥梁钢套箱防撞性能研究及碰撞过程推理[J].力学季刊,2018,39(4):859-865.

A Comparative Study on the Design and Connection Mode of Bridge Anti-collision Steel Box ——Finite Element Analysis of Ship Frontal Collision

ZHANG Fansen¹, LIAO Jun²

(1. Research Institute of Highway Ministry of Transport, Beijing 100088, China;
2. Beijing Gongke Bridge Technology Co. Ltd., Beijing 100080, China)

Abstract: The finite element model of the steel box of Jiashao Bridge was established, and the influence of the steel plate thickness on the collision resistance of the steel box was analyzed by changing the thickness of the steel plate. The influence of different connection modes on the collision resistance was simulated by changing the connection mode between steel case and bridge pier. The thickness of steel box was changed for analyzing its influence on collision resistance. The results show that when the buffering distance is enough, the peak value of ship impact force will decrease with the decrease of the thickness of steel plate; Under the same condition, the collision resistance of the close-fit connection is weaker than that of the floating or fixed connection; The change of the thickness of the anti-collision steel box has little influence on the collision resistance, but when the close-fit connection is used, attention should be paid to the adequacy of its buffering distance.

Key words: anti-collision steel box; collision resistance; thickness of steel plate; connection mode; thickness of the box