



跨海大桥桥墩防撞方案设计

张峰, 顾祥奎

(中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032)

摘要: 以东海大桥桥墩防撞方案设计为背景, 论述复杂环境下桥墩防撞设计的基本方法, 对比若干可行方案。引入港口工程中常见的大直径薄壁圆筒结构, 构造一种新型的桥墩防撞系统, 并给出具体构造, 其良好的受力条件和地基适应性表明: 用于桥墩防撞设施具备一定的可行性。设计构造措施对同类环境下桥梁防撞设计具有一定的参考意义。

关键词: 船桥碰撞; 防撞装置; 东海大桥; 大直径薄壁圆筒结构

中图分类号: U 661

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)10-0194-04

Design of ship-bridge collision-prevention for Donghai bridge

ZHANG Feng, GU Xiang-kui

(CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: The ship-bridge collision-prevention design of Donghai bridge is taken as an example to discuss the design of ship-bridge collision-prevention for the bridge located in complicated environment and several schemes with feasibilities are compared. Large-diameter thin shell cylindrical structures widely used in the port engineering are introduced to construct a new type of anti-collision system, with detailed structures presented. It can be a reasonable selection for the ship-bridge collision avoidance system due to the favorable mechanical properties and adaptability of foundations of large-diameter thin shell cylindrical structures. The detailed structures of ship-bridge collision avoidance system presented in this paper may provide some reference for the design of ship-bridge collision avoidance system of bridges under similar environment.

Key words: ship-bridge collision; anti-collision device; Donghai bridge; large-diameter thin shell cylindrical structure

防撞系统的作用是防止桥梁因船舶撞击超过桥墩的承受能力而遭受破坏。采用不同形式的防护系统可以阻止船舶撞击力直接传至桥墩, 或者通过缓冲消能延长碰撞时间、减小船舶撞击力, 保护桥梁安全。防护系统的设计应根据桥墩的自身抗撞能力、桥墩的位置和结构形式、通航船舶类型和碰撞速度、桥区水文地质情况等因素进行。

目前存在多种桥梁船撞力简化公式, 包括经验公式(如Wosin公式、Petersen公式)和规范公式(如中国公路桥涵通用规范、中铁路桥涵设计规范、AASHTO规范、IABSE规范、Euro-code 1

规范、挪威公共道路管理局规定、北欧公共道路管理局规定等)。上述公式的适用范围及计算值存在一定的差异, 如Petersen公式、Euro-code 1规范计算值为最大撞击力; 北欧、挪威、中国铁路桥梁规范等公式计算值为撞击力设计值; Wosin、AASHTO规范的计算值为平均撞击力^[1]。船撞桥梁是个高度非线性问题, 涉及材料、几何、边界3大非线性, 其表现包括船体屈曲破坏、混凝土桥梁结构破坏等, 较为细致的撞击力分析一般需采用显式动力计算软件(如Ls-Dyna、Dytran等), 分析内容包括不同撞击角度、速度、船体吨位等^[2-4],

收稿日期: 2013-08-10

作者简介: 张峰(1973—), 男, 高级工程师, 主要从事道路、桥梁及港口工程设计工作。

给出撞击力时程;必要时可进行物理模型试验^[5]。由于上述细致有限元分析对计算资源要求高、计算不方便等原因,不少研究者提出了较为方便的简化方法,如樊伟^[6]基于两自由度碰撞模型,推导了船撞作用加载和卸载的持时计算公式;孟德巍^[7]基于Ls-Dyna平台对典型船舶进行有限元碰撞分析,提出了一种基本的撞击力-撞深关系的简化公式并给出相应参数表达式。

本文以东海大桥为背景,论述了复杂环境下桥墩防撞设计的基本方法,对比了具有一定可行性的几种方案;引入港口工程中常见的大直径薄壁圆筒结构,构造了一种新型的桥墩防撞系统,并给出了具体构造;对同类环境桥梁防撞设计具有重要参考意义。

1 常见防护系统及分析

目前存在多种防护系统,如人工岛、薄壳筑沙围堰、漂浮网状结构、钢飘或浮箱、船型防撞承台(或钢套箱)、防撞桩、缓冲材料(橡胶护舷)、重力式结构等。其中船型防撞承台(或钢套箱)防护系统,除了通过自身的变形、破坏吸收部分撞击能量外,其突出优点是当碰撞船体轴线与船形防撞承台轴线不共线时,承台尖端在碰撞瞬间可改变船舶的运动方向,使其动能较多地保留在碰撞后的船上,避免桥墩破坏。其不足之处在于船形防撞承台需支承在桥墩承台上,并需适应一定的活动范围。

防护系统的选择应根据各部位设计船撞力、撞击动能和承台的水平抗力、对撞击振动位移的敏感性来决定。桥墩承台正面(通航方向)的撞击能量要显著大于承台侧面的撞击能量,这种撞击模式具有破坏严重但概率低的特点,因此其防撞结构应通过自身的破坏吸收船舶撞击能量或使船舶改变方向,达到减小桥墩承台所受撞击力的目的。在不发生撞击事故的情况下,应有良好的生存能力和足够长的使用年限。船舶斜向撞击承台侧面时,其法向速度较小,且船舶将发生迴转,故承台受到的撞击能量相对较小,但是其发生概率较高,因此防撞结构应尽可能减小破坏,

降低维修费用。

在桥墩承台正面根据不同通航孔处的撞击能量和桥墩承台结构形式可采用分离式防撞墩或附着式防撞结构方案。

2 东海大桥桥墩防护系统设计

2.1 工程特点

作为跨海大桥,由于要承受较大的风、浪、水流荷载以及汽车制动力、地震惯性力等水平荷载,桥墩应具较大的水平承载力。东海大桥按六车道设计,自重和地震惯性力都很大,桥墩承台的水平承载力能够满足设计撞击力,但是墩柱的抗撞击能力比较差,对撞击振动比较敏感,因此需采取合适的防撞措施避免船舶直接撞击并尽量减少碰撞船只损伤。

东海大桥桥墩防撞系统设置存在以下难点:

1)海底表层为淤泥,承载能力较差,地基土持力层埋藏较深,不适宜采用重力式或围堰等水平抗力大的结构形式。2)海上构筑物生存条件较恶劣,波浪、潮差、潮流流速均较大。漂浮式结构需要较大的活动范围,因此本工程桥墩不宜采用附着式浮箱防护结构。3)海水中抗腐蚀性能要求高,轻微破坏亦会增加防腐难度。4)海上救护困难,应采取措施尽量避免船只损毁。5)海上施工困难,防护设施应采用便于安装和快速修复的结构形式。

2.2 船舶撞击力计算

东海大桥撞击力计算之前,经过调研通航船型,然后确定防撞设计船型,采用美国公路桥梁设计规范^[8]中的有关船舶撞击力计算公式(1);计算船舶对桥墩的撞击力,根据规范桥墩侧撞力(纵桥向)为50%的墩首正撞力。据此理论根据不同通航等级,设计船撞力计算结果如表1所示。

$$P_s = 1.2 \times 10^5 v \cdot DWT^{0.5} \quad (1)$$

式中: P_s 为船舶撞击力(N); DWT 为船只载质量(t); v 为船只撞击速度(m/s),通航孔取 $v=4.0$ m/s,非通航孔取 $v=2.0$ m/s。

2.3 防护系统吸收能量

船舶撞击能量根据英国标准BS 6349计算,该

表1 设计船撞力计算

位置	DWT/t	碰撞模式	碰撞速度/(m·s ⁻¹)	船撞力/kN	说明
主通航孔	10 000	墩首正撞	4	48 000	设计航速
		墩侧斜撞	4	24 010	
		墩首横撞	2	24 000	漂流速度
	5 000	墩首正撞	4	34 000	设计航速
		墩侧斜撞	4	17 000	
		墩首横撞	2	22 830	漂流速度
辅通航孔	1 000	墩首正撞	4	15 200	设计航速
		墩侧斜撞	4	7 600	
		墩首横撞	2	4 830	漂流速度
	500	墩首正撞	4	10 700	设计航速
		墩侧斜撞	4	5 400	
		墩首横撞	2	2 380	漂流速度
非通航孔	100	墩首正撞	2	2 400	漂流速度
		墩身横撞	2	1 200	

公式体系与汉斯-德鲁彻理论的能量计算公式具有相同的结构形式,但因各项经验参数比较齐全而在海港工程设计中得到较多应用。其中由防护系统吸收能量如式(2)所示,计算的结果如表2所示。

$$E_f = \frac{1}{2} C_m M_d v_b^2 C_e C_s C_c \quad (2)$$

式中: E_f 为防护系统吸收的撞击能量(kN/m); C_m 为流体动力系数; M_d 为船舶排水量(t); v_b 为垂直于撞击接触面的法向速度(m/s), $v_b = v_0 \sin \theta$; C_e 为偏心系数; 根据船舶回转半径及撞击点至船舶质心的距离, 计算后取 $C_e = 0.31$, C_d 为柔性系数, 取 $C_s = 0.9$; C_c 为形状系数, 对于透空式高桩承台结构, 取 $C_c = 1.0$ 。

表2 防护系统吸收能量计算

船舶等级 DWT/t	满载排水量 M_d /t	水动力系数 C_m	碰撞速度 v_0 /(m·s ⁻¹)	有效撞击动能 E_f /(kN·m)		
				$\theta=0^\circ$	$\theta=30^\circ$	$\theta=60^\circ$
10 000	13 840	1.11	4.0	110 610	8 570	10 050
			2.5			
5 000	6 960	1.10	4.0	55 120	4 270	5 010
			2.5			
1 000	1 420	1.12	4.0	11 450	890	1 040
			2.5			
500	720	1.12	4.0	5 810	450	530
			2.5			

2.4 主通航孔桥墩防撞方案

主通航孔为420 m斜拉桥,主墩按1万吨级通航船舶考虑防撞设计。本桥2002年6月动工,2005年10月建成通车,关于主墩的防撞设计方案经历了数次变化,防撞结构的施工图设计在2004年初基本结束,为了减少施工难度及降低这部分造价,最终实施方案又进行了一次较大的改动,该结构直到2006年6月才施工完毕。主桥桥墩防撞设计方

案虽然经历了多次变化,但是初步设计阶段提出的两个防撞方案对同类环境桥梁防撞设计具有重要参考意义,以下主要介绍初步设计阶段主桥桥墩防撞设计方案。

主通航孔塔柱基础采用高桩承台结构,基桩为 $\phi 2\ 500$ mm钻孔灌注桩。主墩承台能承受1万吨级船舶的撞击力(不保护时,碰撞速度为4.0 m/s),上部桥梁为斜拉悬浮式结构,对桥墩承台的振动

位移适应性较好, 因此保护的目的是避免船舶直接撞击墩柱和尽量减少船只损伤。主墩承台设计了两种防撞结构方案, 一为混凝土防撞承台与橡胶护舷混合型, 二为大直径薄壁圆筒结构。

1) 方案1: 混凝土防撞承台与橡胶护舷混合型方案。采用桩基混凝土套箱作船型防撞承台, 并靠在主墩承台上, 避免船舶直接撞击承台, 如图1所示。套箱内填砂并现浇混凝土封顶, 对船舶撞击可起到一定的缓冲作用。套箱下面为钢管桩支承, 套箱外面用拱型橡胶护舷加钢质防冲板围护。主墩承台侧面采用H2 500 mm鼓型橡胶护舷加钢质防冲板围护, 能有效地吸收5 000 DWT以下船舶的撞击能量及1万DWT船舶的大部分撞击能量, 其护舷反力要小于不设保护时船舶直接撞击承台时的撞击力。

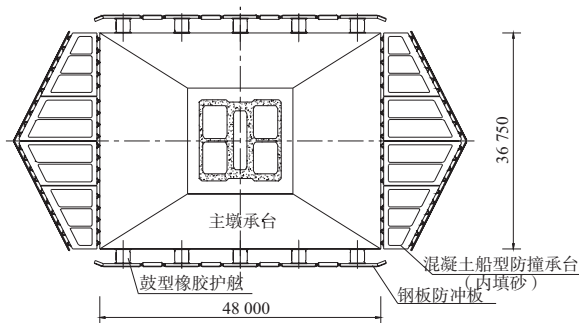


图1 混凝土防撞承台与橡胶护舷混合型方案

2) 方案2: 大直径薄壁圆筒结构。这是一种较先进的港口工程结构形式, 由于其结构简单、受力条件好、材料省、施工速度快和工程造价低等特点, 已成功应用于码头、防波堤以及护岸等水工建筑物。大直径薄壳圆筒结构的基本组成单元为无底的薄壳圆柱壳, 其特点是对地基的适应性好, 可直接建造于基床上或硬基上, 且土

体的嵌固作用可增强其稳定性。大直径薄壳圆筒结构的径高较大, 通常在0.45以上; 厚径比一般小于0.03。从力学特征看, 为一桩壳结构的受力特点, 即在壳体中以中面力为主而弯曲应力(环向或纵向)较小; 因而可充分发挥混凝土材料抗压特点, 可节省钢筋用量。此外, 大直径圆筒结构刚度大, 具有重力式结构的特征。筒内填料不仅可作为配重以增强其稳定性, 尚可与筒体结构共同承载, 因此回填料物理力学性质亦影响其受力特性, 有别于一般重力式结构(方块和沉箱结构)。对于淤泥质海床采用插入式大直径薄壳圆筒结构可不设基床, 减少开挖方量。

3) 方案3: 大直径薄壁圆筒与橡胶护舷混合型方案。采用预制大直径薄壁圆筒结构作为分离式防撞墩(图2)。由于承台的宽度较大, 圆筒呈三角形布置。直径与高度分别为15 m和30 m, 分两节预制, 利用大型起重船在现场拼接沉放, 筒内换填海砂并振冲密实, 然后现浇混凝土盖板。大圆筒周围采取抛石护底措施。主墩承台侧面采用4 300超大型桥墩浮护舷作为防撞设施, 能有效地吸收5 000 DWT以下船舶的撞击能量及1万DWT船舶的大部分撞击能量, 其护舷反力要小于不设保护时船舶直接撞击承台时的撞击力。

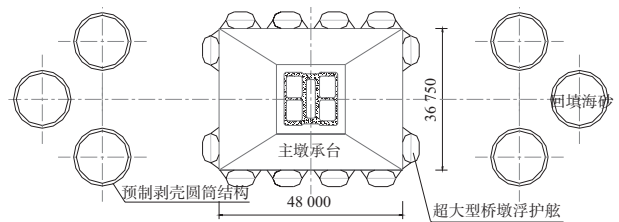


图2 大直薄壁圆筒与橡胶护舷混合型方案

主通航孔主墩承台防撞方案比较见表3。

表3 主通航孔主墩承台防撞方案比较

项目	结构可靠性	环境适应性	施工可行性
混凝土防撞承台与橡胶护舷 混合型方案(推荐方案)	1. 偏转船舶方向, 减少有效撞击动能, 套箱变形耗能 2. 有效隔离船舶与桥墩、承台需承受较大撞击力	1. 对波浪、水流的影响适应性较好 2. 钢管桩防腐措施要求高	1. 对桥址处地质条件适应性较好 2. 施工工艺与非通航孔基础相同, 施工技术较成熟且容易修复
大直径薄壁圆筒与橡胶护舷 混合型方案	1. 能较好地消耗船舶撞击能量保护桥墩, 降低船舶损伤程度 2. 可采用外加缓冲材料或局部调整圆筒壁厚等措施避免小能量撞击时的破坏	1. 对波浪、水流的影响适应性较好 2. 耐久性较好、透空性差, 对水流有影响, 需采取护底措施防止局部冲刷	1. 插入式大圆筒结构, 对软土地基适应性较好 2. 需较大的预制、吊运设备, 施工工艺要求高 3. 施工质量难控且修复较困难

(下转第211页)