

桥墩防撞装置评述

巫祖烈,* 徐东丰

重庆交通大学 结构工程实验室, 重庆 400074

摘要: 阐述了船舶撞击桥墩的危害性及桥墩防护的必要性, 对桥墩的防撞装置进行了系统的分类和评述, 总结目前国内外桥墩防撞装置的优缺点, 并给出了关于防撞装置的两种设计思路。

关键词: 防撞装置; 撞击; 桥墩; 撞击力

中图分类号: U443.26 **文献标识码:** B **文章编号:** 1001-716X(2006)06-0022-05

随着交通运输业和经济建设的蓬勃发展, 横跨江海的大型桥梁越来越多, 城市立交桥、高架桥也比比皆是, 使得撞击桥墩事故急剧增加。史密斯(D. W. Smith)曾对 1847-1975 年间世界各地的 105 例吊桥和 177 例钢桥的垮塌原因进行了分析, 统计结果表明船舶撞击导致桥梁毁坏分别为 37 例和 40 例。美国的统计数字结果显示, 1970-1980 年里, 在通航的大型桥梁运营期间, 就发生了 11 起重大的恶性碰撞事件, 有些交通干线和航道堵塞时间长达两年之久。在我国, 船撞桥事故也是频繁发生, 如武汉长江大桥, 自 1975 年建成到 1999 年 12 月 18 日共发生了 70 起, 其中直接经济损失上百万的大事故超过 10 起, 而发生在我国长江、珠江、黑龙江三大水系干线上的船撞桥事件更达到 300 余起以上。尽管并非每一次碰撞事故都酿成桥毁人亡的重大惨剧, 但桥梁的使用寿命、安全性及抗震能力的降低确是肯定的, 由此造成中断交通、抢修线路的经济损失也逐年严重。针对这种情况, 许多国家的交通部门均要求对一些重要的大型桥梁桥墩予以保护。为此, 国外的学者已率先开展了相关的研究, 提出了船桥碰撞理论, 并设计出了一些桥墩防护设施。我国主要集中在借鉴和参考国外研究成果, 进行实例桥梁的防撞装置的设计和应用, 其成果被部分规范引用, 但桥墩防撞击的研究工作和防撞装置的安装在我国仍然未能引起足够的重视。此外, 现有防撞装置几何尺度偏大, 外形欠美观, 也不能满足现代交通对桥墩防撞装置的要求。本文的目的在于通过对已有的桥墩防撞装置的评述, 谈谈作者对桥墩防撞机理的分析和对改进防撞装置的设想。

1 防撞装置的评述

上世纪 80 年代, 日本岩井聪认为, 桥墩防撞装置按设置场所的不同, 可以分为直接构造型和间接构造型两大类。所谓直接构造是指设施与桥墩相连安装, 间接构造则是距离桥墩安装。两大类中每大类再按吸收船舶碰撞能量方式的不同又可分为弹性变形型、压坏变形型和变位型三种类型。1991 年国际桥梁和结构工程协会(IABSE)将通常使用的桥墩防护结构分为五类: 防护板系统、支撑桩系统、系统桩保护、人工岛或暗礁保护、漂动保护系统。两种分类方法不同, 内涵一致, 我国研究人员一般采用第一种分类方法, 下面仍按岩井聪分类方法对桥墩防护设施进行评述。

1.1 直接构造弹性变形型—缓冲材料方式

1.1.1 防撞原理

直接弹性变形型防护装置依靠结构或材料的自身恢复弹性变形的能力转化并释放撞击能量, 并且由于使用的材料或结构的弹性和柔度较大, 可以延长撞击时间, 从而减小撞击力, 达到保护船及桥梁的作用。

1.1.2 结构形式

缓冲材料结构方式很多, 有橡胶或钢制作的圆型、弓型、槽型、空气型等异型构件和用木材制成的浮箱结构。异型构件通常通过串联或并联安装在桥墩表面。例如, 日本岩黑岛桥 2# 桥墩的角部设计装置了附着式槽型缓冲材料防撞装置, 设施能承受 200t 级船舶以 2.8kN 或 100t 级船舶以 3.4kN 的速度撞击^[1]。而木制设施常与各种类型的防护设施联合使用, 为防护系统提供一个较大的碰撞接触面, 降低

* 收稿日期: 2005-11-08; 修订日期: 2005-12-06

作者简介: 巫祖烈(1964-), 男, 重庆铜梁人, 副教授, 从事复合材料结构和桥梁工程的教学科研工作。

作用在防护系统上的集中荷载,避免墩身或防护系统直接与船舷摩擦,从而提高整个防护系统的工作效率。

1.1.3 优缺点

直接弹性变形型防护设施的优点是设置水域小,安装及维护管理均比较容易,且对桥墩处地质条件要求不高,因此缓冲材料防护设施在世界各国得到广泛应用。但是由于材料自身弹性变形吸能的有限性,直接弹性变形型防护装置一般只能单独用在撞击力较小、撞击角度不大的墩身或承台侧面,或者使用在许多大规模防撞装置的表面而形成总的防护系统。

1.1.4 创新点与评述

陈国虞指出^[2],对于跨江、海的桥梁,其桥墩抗剪能力达几万吨力,甚至几十万吨力,而一艘船舶被撞坏仅需几千吨力。因此,他认为,桥墩防撞的问题可归结为两点:船不撞坏,桥墩表面层不破坏。该思想使得弹性变形型防护装置能够应用于高能量撞击的防护成为现实。因为直接弹性变形型防护设施虽然刚度很低,不利于对大能量撞击的防护,但对改善船舶的损坏有好处,所以对于高能量的撞击,弹性变形型防护装置防撞成功与否的关键就是能否确保桥墩的安全。关于这一关键问题的解决,我国最新专利93224217.0给予了我们启示^[3],该专利是旨在同时保护船和桥墩的吸能防撞器,且能重复使用,其结构是由内摩擦角较高的钢丝绳紧密堆垒压接而组合成的,单个钢丝绳的吸能值达到 10^4J ,按一定方式800个组合后的防撞装置,可吸收能量约为 10^7J ,吸能效率为60%,变形恢复80%。该设施通过改变材料的性能和装置的结构形式成功地对较高的冲撞能量进行了良好的防护,不过,其不足之处也是显而易见的,就是尚不能抵抗特大的冲撞能量。因此,如要满足进一步的防护要求,还需对装置的结构设计及其材料的储能、吸能原理等予以继续研究。

1.2 直接构造抗压变形型—缓冲体方式

1.2.1 防撞原理

直接抗压变形型防护装置的工作原理是靠设施的压屈、弯曲破坏来吸收冲撞能量。

1.2.2 结构形式

设施多采用钢箱格的结构,一方面是利用箱格板梁的塑性变形,大量吸收碰撞能量;另一方面是利用箱格结构的刚度较实体结构为低,可减小船舶对桥墩的冲击荷载。

对于小能量撞击,设施有时也采用梁构造。梁构造比其它构造简单,吸收能量也比较小,并且随冲撞方向的不同其性能也会有较大的改变。由于装置安装时要距桥墩一定距离,同时,还要解决安装支撑点

的问题,所以,目前这种方式使用极少。

1.2.3 优缺点

直接抗压变形型的优点在于通过改变自身的结构形式和刚度,利用设施良好的塑性变形,对高能量的激烈碰撞也能起到较好的防护作用;但其最大缺点就是装置随抵抗能量的增大,自身和船舶的损坏也越严重。顾永宁教授对箱式塑性防撞装置的撞击问题进行了有限元数值模拟^[4],采用了按航速 6m/s 、载重量4万t的船舶撞击而设计的实尺模型,经过有限元模拟分析后,撞击船的撞深为 3.2m ,防撞装置的撞深达到了 11.9m ,而桥墩完好无缺。该研究表明:直接抗压变形型防撞装置一般只保护桥梁而不保护船。

1.2.4 创新点与评述

碰撞过程中,抗压变形型防护装置使船舶和设施俱毁,原因之一是两者的刚度均较大且处于同一量级,文献^[7]曾指出,船舶撞击刚性桥墩装置时,由于两者的刚度均较大,变形量均较小,不能缓解撞击的动能,因此将产生极大的撞击力,从而造成船与装置俱毁的事故;原因之二是装置没有与其它设施配套使用。

为了减少撞击中抗压变形型防护装置和船舶的损坏,最近几年建成的大能量防撞设施大多采用抗压变形型防护装置和直接弹性变形型防护装置联合使用的形式。前者一般附着于桥墩作为后者的支撑,并阻止船舶对桥墩的深度破坏,后者主要用于改变船舶的撞击方向并降低船舶的撞击力来保护前者。如我国黄石长江大桥管理局设计的可随水位涨落而自由升降的柔性防撞护套^[5],该装置外围以装配式充气胶囊为主体,内部是辅以柔性护舷的钢浮箱,其防护原理是船撞设施时,航船的绝大部分动能转化为胶囊的变形能,由于胶囊的柔度大,使冲击碰撞的时间大大延长,从而极大地减少碰撞力,确保船桥安全,而毁坏的胶囊则可以随坏随装,维修简易,如图1所示。

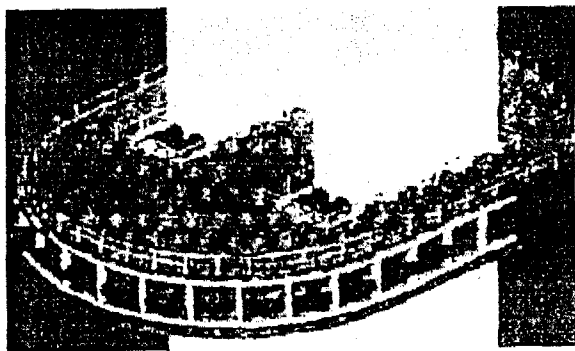


图1 黄石长江大桥主墩浮式消能防撞装置

近几年,有人提出结构的耐撞性设计概念,就是对原有的防护结构进行优化设计,以改善其结构的

耐撞性能.对于抗压变形型防护装置,为了改善其吸能特性,有人利用这个概念在钢结构格子内填塞弹塑性材料如泡沫塑料等以改善其碰撞区域塑性,也达到了很好的效果.对于填充泡沫塑料的结构,之所以能提高抗撞能力与吸能效率,王自力认为^[6],泡沫塑料改变了被撞防护设施的变形损伤模式与吸能特性,内充泡沫塑料使防护设施将损伤变形的范围传递到了整个区域,因此有比较多的构件参与变形吸能,同时也使得撞击力也有所缓解.

直接抗压变形型防护装置所需设置水域小,能量吸收性能较佳,主要用于中、大型防护工程.只是本身的规模和施工安装不是很容易,尤其是撞击后的维修处理更是麻烦,所以,直接抗压变形型防护装置的所要解决的难点就是自身和撞击船舶的安全问题.

1.3 直接构造变位型—重力方式

该方式由重物及其支撑结构组成.其防护的主要机理是利用摩擦力或重力产生的复原力使重物来回移动,从而把船舶的撞击能量转化为重物的势能和重物周围水的动能.该种设施规模大,冲撞时的反力大,宜设在较开阔的水域,可抵抗中型吨位船舶的撞击.由于直接构造变位型防护装置需要重物的支撑结构,且维护管理较复杂,碰撞损坏后维修困难,再加上造价高昂,此种类设施现在已不常用.

1.4 间接构造弹性变形型—桩群方式

1.4.1 防撞原理

这种方式防撞装置特点是利用桩群的联合弹性变形缓冲吸收船舶的冲撞能量.集群式护墩桩一般由斜桩(承受压力)或竖直桩(承受拉力)组成.为适应高能量撞击防护的需要,在桩的顶部互相联接,以使整个防护系统共同变形来吸收船舶动能.另外,还可将更多的单桩合成一根桩,并将桩顶用横梁或锚链联系起来以便共同受力.

1.4.2 结构形式

按照桩的材料使用方式,桩方式防撞装置可分为木桩群、钢桩和砼桩群等结构形式.

1)木桩群形式.木桩来源丰富,加工制作简便,造价较低,但由于木桩桩底不是嵌入河床基岩内,只是一般作为其它防护系统的缓冲设施,所以该种防护设施从经济角度考虑,小能量时较为合理.

2)钢桩形式.钢桩用在需要极高的材料强度及地质条件较差处,鉴于有一定的塑性变形和很大的挠度,并且可以深入岩内并与桩侧土层共同受力,一般单桩和弹塑性好的其它缓冲装置联合使用就能抵抗较大的撞击力.例如,美国的托宾纪念桥3号桥墩推荐防护系统方案四,采用的是带可升降的泡沫橡

胶环行箱的钢管桩,钢管桩内填低标号贫砼,桩外套浮动泡沫橡胶环行箱.设计荷载以40000t的船舶以时速3海里撞击防护系统来控制.当钢管桩埋置线以上的结构长度和埋置深度均取12m计算时,钢管桩与可悬浮的泡沫橡胶环组合结构能吸收75%的撞击动能.此方案特点是由钢管桩的挠度和泡沫橡胶环的压缩共同吸收船舶撞击动能,撞击的反作用力也较低.泡沫橡胶环行箱是一种独特的防护缓冲设施,具有较强的吸收能量的能力,对船体的伤害很小.不过,相比于木桩与砼桩,钢管桩造价较贵,且需要经常维护,只有在水深超过12m时才有可能考虑这种防护设施^[7].

3)砼桩群形式.由于砼桩截面的抗拉变形能力极为有限,且在砼结构开裂后,钢筋极易锈蚀,故砼桩一般联合使用,共同抵抗受力;或者通过锚链形成系缆桩,锚链的作用一方面通过拦截船舶以自身的弹塑性变形消耗一部分动能,另一方面通过船舶对锚链的滑动,利用摩擦力做功和改变船舶撞击方向消散船舶动能,而通过锚链传递到砼桩桩顶的剪力则由各个单桩共同分担.

4)砼桩群的创新与评述.砼桩方式一般设置水域很大,尤其是系缆桩方式.为了减小设置水域,便于就地取材,最近,出现了一种防撞复合基础的构思,即利用基础施工时所采用的围堰作为永久防撞设施,通过堰内填砂,在围堰与桩基间形成弹性抗力来共同承受船撞力.这是一种比较新颖的桩方式防护装置,相比桩群顶部修建承台的防撞装置而言,其更具有经济效益,不过,相比于其它桩方式,由于堰内填砂的原因,它对船舶的损伤也最大.

1.4.3 优缺点

单纯的桩方式防撞装置的能量吸收性一般较差,但通过桩与桩的联合或与其它防护设施的共同使用,就能抵抗比较大的船舶撞击.而且由于其良好的柔性,对船舶与桥梁均有较好的保护.另外,桩方式对设置水域大小的要求不高,并能满足各种水深及基础的需要,因此得到了大量推广使用.不过,其维护管理一般,而且,当桩基出现问题,维修比较困难.

1.5 间接构造抗压变形型—薄壳筑沙围堰和人工岛方式

该类装置主要有薄壳筑沙围堰和人工岛方式.其防护机理是靠材料的压缩、屈曲变形破坏来吸收撞击能量.

1.5.1 薄壳筑沙围堰

薄壳筑沙围堰是针对大型船舶碰撞而设计的,独立于墩身布置,受到船舶撞击时,在撞击力作用

下,锚固在河底的钢板桩被拔出,围堰和船舶的构件屈曲变形、破裂和崩溃,围堰内部的填充材料充分摩擦并部分外泄,从而达到大量吸收撞击动能的目的。其防护机理的实质主要是装置依靠庞大的自重抵抗撞击后自身的倾斜及滑动,并且通过结构的损坏为代价阻止船舶前进。

1.5.2 刚性人工岛

刚性人工岛防护主要是靠在船舶撞击到桥墩之前使其搁浅停止而对桥墩进行保护的。较之薄壳筑沙围堰,刚性人工岛能适应更大型船舶的高能量碰撞。而且在浅水区,人工岛施工简便,造价低廉。

1.5.3 优缺点

间接抗压变形型防撞装置对桥梁具有良好保护作用,但其缺点是其规模、质量较大,而且一般只能设置在水深较小(减少造价),基础良好的河床上,以承受本身巨大的自重。另外,间接抗压变形型防护装置所占有的航道也较多,特别是人工岛,还会压缩过水断面,增大流速,加剧河床冲刷。最重要的是,它对船舶的保护不甚理想,因为虽然装置即使通过改变结构形式增大了柔度,而使碰撞力有所降低,但由于是刚性碰撞,船舶与装置损伤仍然很严重。因此,抗压变形型防撞系统一般只能保护桥而不能保护船。每次剧烈碰撞后装置都需要维修,且维修工程量较大。

1.6 间接构造变位型—浮体系泊方式

变位型装置一般是指浮体系泊方式。其一般由浮体、钢丝绳、锚定物组成。

1.6.1 防护机理

装置利用重力或者浮力的作用使浮体从平衡状态到被拉紧状态所产生的还原力、锚定物在冲撞力作用下沿海底移动产生的摩擦力以及钢丝绳的弹力和变形力做功来吸收船舶的撞击动能,从而使船舶速度降低,直至被浮体之间的钢丝绳张紧拦住。

1.6.2 创新点

鉴于钢丝绳容易腐蚀而需要定期维修,目前有人提出用尼龙绳作为锚缆,与钢绳相比,尼龙绳有较高的抗拉强度,较低的弹性模量及较大的弹性变形,而且这种合成材料作为锚缆很少受到海水腐蚀,并能吸收大量的撞击能量。

1.6.3 优缺点

浮体系泊方式防护设施的优点在于能够抵挡船舶的高能量撞击,并且即使在水深较大的水域,设施造价也相对较低;此外,浮体系泊方式漂浮在水面上,可将能量通过锚链传递至锚定物上,因此,浮体系泊方式防护系统可以布置在航道水很深的桥位处。浮体系泊方式缺点也很明显,由于其防护需要船舶有较大的缓冲位移,所以设施的设置水域一般要

求很大;而且,对于吨位小的船舶,船头的水下部分还可能压迫并掠过拦截设施,继续向桥墩撞击;还有,对于高速行驶的大型船舶,船首如果尖锐,则有可能会切断钢绳。

2 新型防撞装置的设计思路

通过对现有防撞装置优缺点的分析评述,综合考虑桥梁、船舶和航道三方面的安全与使用要求,作者认为可采取如下两种关于防撞装置的设计思路:第一种为储能—释能装置,其防护原理是将装置设计成具有对撞击能量先期储存、后期释放的性能,以延长撞击时间、减小船撞力,并能利用储存的能量释放恢复原状;第二种为吸能装置,主要是利用装置材料的本身特性大量吸收撞击能量,大大减少桥墩与船的损伤。

2.1 储能—释能装置

装置的主体为船形的橡胶箱,附着于桥墩表面,以桥墩为支撑。橡胶箱与桥墩之间设置泡沫塑料制成的缓冲垫层;橡胶箱体内设有带圆孔的纵横橡胶板箱格,以增大箱体整体刚度,并且在箱格内注水以改良装置性能,如图2所示。

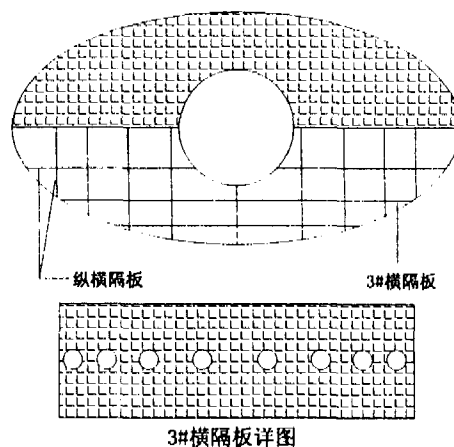


图2 储能—释能装置示意图

当船舶斜向撞击时,由于橡胶箱格体较之缓冲垫层的刚度大,后者将先屈曲变形,装置在冲撞力的切向分力作用下开始绕桥墩转动,与此同时,橡胶箱体因冲撞力作用,将受到拉压、扭弯等弹塑性变形,而箱内流动的水又把撞击能量传递给整个箱体,结果使得水的流动与箱体变形共同消耗和储存撞击能量。碰撞结束后,装置通过释放储存的能量恢复原状。

通过材料的本身性能与结构的优化设计,储能—释能装置综合了传统装置的优点,主要表现有:

1) 设置水域小;

2) 橡胶箱体可悬浮于水面,装置能适应水位变化的要求;

3) 装置材料柔度较大, 能同时保护船和桥;

4) 装置撞后能恢复原状, 故可多次使用。

2.2 吸能装置

泡沫金属铝是一种性能卓越的吸能材料, 文献[8]指出, 密度约为 0.36g/cm^3 的该种材料, 单位体积吸收的能量可达到 $6\text{J/cm}^3 \sim 9\text{J/cm}^3$ 。基于泡沫金属铝的这种良好性能, 作者选用其作为吸能装置的主体材料。

装置结构形式采用圆环柱形, 内部为纵横交错的带有圆孔的泡沫金属铝板以形成箱格。箱格内注水, 一方面改善装置性能, 一方面增大装置在水中的稳定性。为了使装置与桥墩良好接触, 两者之间也采用泡沫塑料作为缓冲垫层, 装置形式如图 3 所示。

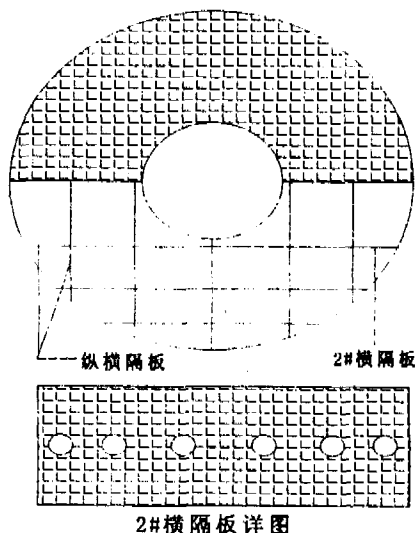


图 3 泡沫金属铝吸能装置示意

泡沫金属铝吸能装置的优点在于装置能吸收更大的撞击能量, 且设置水域可更小; 由于泡沫金属铝在变形过程中, 撞击力的量值不是很大并能基本保持不变, 所以对桥船均有很好的保护作用; 此外, 泡沫金属铝密度较小, 使得装置能适应水位的变化要求、轻微撞击后维修极为简易, 并且由于其不易被腐

蚀, 装置未损坏前无需专门保养。

泡沫金属铝吸能装置应用的缺点是泡沫金属铝破坏时属于脆性材料, 装置一旦受到剧烈撞击, 则局部损坏必将极为严重, 所以事后必须重新安装。

3 结 论

1) 桥墩防撞装置的种类繁多, 某种防护类型的装置采用与否要依据船舶尺寸的大小、类型、航速、河流与河床的断面以及防护体系的施工能力等因素来决定。

2) 每一类型的防护装置都有其自身的优缺点, 结构优化、多种类型的装置巧妙结合通常是解决桥墩防撞问题的好方法。

3) 新设想的储能——释能装置和吸能装置通过合理选材, 结构优化的方式能很好地减少撞击中船、桥的损失, 并不会明显的压缩航道, 具有良好的综合性能。

参考文献:

- [1] 曾克俭. 桥墩防撞设施及其应用综述[J]. 中国公路工程, 1996, 21(4): 40-43.
- [2] 陈国虞, 林树人. 长江中游桥墩防撞(续一)—防撞设施的种类及其特点[J]. 航海科技动态, 1995, (4): 14-17.
- [3] 陈国虞, 倪步友, 贾关林. 长江中游桥墩防撞(续二)—钢绳柔性吸能防撞器试验研究[J]. 航海科技动态, 1995, (5): 16-17.
- [4] 刘建成, 顾永宁. 桥墩塑性防撞装置的力学机理[J]. 上海交通大学学报, 2003, 37(5): 991-993.
- [5] 王克洪. 桥梁主墩浮式柔性防撞护套[J]. 武汉水利电力大学学报, 1994, 27(6): 739-741.
- [6] 王自立, 姜金辉. 一种基于内充泡沫塑料薄壁方管的单壳舷侧防撞结构[J]. 中国造船, 2004, 45(2): 52-53.
- [7] 杨渡军. 桥梁的防撞保护系统极其设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 1990: 12, 213-215.
- [8] 鲁彦平. 汽车保险杠用泡沫金属铝的能量吸收特性[J]. 汽车技术, 1999, (12): 32-33.

Comment on protection device of bridge piers

WU Zu-lie, XU Dong-feng

Structure Engineering Laboratory, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China

Abstract: The paper expands the damage of the ship-bridge collision and the necessity of protected piers. Then, it classifies and comments all kinds of protection devices of bridge piers, and summers the merits and shortcomings of the current protection devices in the domestic and international. Finally, two design ways on the protection device are given.

Key words: protection device; collision; bridge pier; impact force