

文章编号:1005-0523(2013)05-0076-05

# 基于双层梁单元法的船撞受损桥梁结构分析

王晓玉<sup>1</sup>,文方针<sup>2</sup>

(1. 广东晶通公路工程建设集团有限公司,广东 广州 510635; 2. 广东省公路建设有限公司,广东 广州 510000)

**摘要:**以一座IV级航道预应力砼梁桥为例,对其受船撞后的病害进行了现场调查,建立了双层梁单元仿真模型,通过激活与钝化双层单元边界条件的方法,模拟船撞桥后桥梁结构边界条件的变化,对受损梁结构进行了力学分析,为受损梁应急处理决策提供了理论依据。调查及分析结果表明,结构虽然出现了开裂等病害,但受损结构临时加固后仍具有一定的安全富裕度,梁体置换前可维持半封闭车道通行,这一结果与实际情况相符。

**关键词:**船撞桥;病害调查;双层梁单元法;应急处理

**中图分类号:**TU311.2;U441

**文献标志码:**A

随着运输船舶日益大型化,早期修建的桥梁由于前瞻性不足,部分桥梁通航净空净宽已不能适应现代交通运输要求,客观上对船舶通航形成了障碍,给船舶航行增加了难度和安全风险,稍有不慎就可能导致船撞桥事故的发生<sup>[1]</sup>,桥梁遭受船舶撞击的风险越来越大<sup>[2]</sup>。对船撞桥事故的研究,主要集中在两个方面,一个是桥墩防撞设施,另一个是船与桥之间碰撞力及能量的计算<sup>[3]</sup>,但对桥被撞后本身的安全及应急处理鲜有研究。本文以一座跨越运海IV级航道的预应力梁桥为例,分析船撞桥后梁体发生的主要病害,并在此基础上用大型通用结构分析软件Midas/civil 2012建立双层梁单元三维仿真分析模型,用钝化、激活边界条件的方法对受撞击后的梁体进行了力学分析<sup>[4]</sup>,分析了4种模型3种工况下受损桥梁现状及结构维修后的安全性,通过工程实际和理论计算相结合,合理提出了船撞梁体后的应急处理方案,具有工程实用价值。

## 1 工程背景

某桥修建于上世纪90年代初,桥梁上部结构跨径组合为32.50 m+51.25 m+3×70.00 m+51.25 m+10×32.50 m。该桥跨越运海水道,为国家内河IV级航道,通航船舶500 t,其中F2~F4号墩为通航孔,设计通航净高为6 m,净宽为40 m。该桥第1跨、第7跨~第16跨为预应力钢筋混凝土简支T梁,其余5跨均为带挂梁的框架式预应力T构,其中挂梁为预应力钢筋混凝土简支T梁。挂梁单幅均由5片T梁组成,具体横断面见图1。2013年4月24日,某船船顶因超高撞击了本桥F3~F4挂梁底部,导致挂梁最外侧梁体受损。

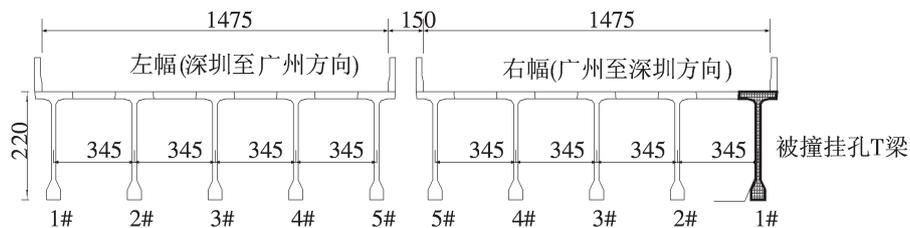


图1 挂孔T梁跨中横断面构造图(单位:cm)

Fig.1 Construction drawing for mid-span cross section of hanging hole T-beam (Unit:cm)

收稿日期:2013-06-20

基金项目:广东省科技厅科技项目(2011-02-050)

作者简介:王晓玉(1982—),女,从事路桥施工及管理工作。

## 2 受损梁体病害调查

经检查,1#挂孔T梁船撞后主要病害如下:

1) 1#挂孔T梁腹板内外侧距顶板倒角部位下缘 17~25 cm 处存在一条水平裂缝。腹板外侧裂缝长 18.33 m,腹板外侧表面裂缝最大宽度约 8.2 mm,且该水平裂缝与绝大部分腹板斜向裂缝贯通,腹板内侧裂缝长 11.66 m,裂缝最大宽度 2 mm,裂缝处混凝土已压溃,T梁腹板上部水平裂缝分布见图3所示。

2) 腹板水平裂缝开裂面上、下部存在明显水平错位现象,腹板内、外侧开裂面下部相对开裂面上部均向外侧错位 2 mm,如图2所示。选取腹板外侧水平裂缝宽度较宽处凿开后发现内部竖向箍筋已轻微弯曲,说明箍筋与混凝土的正常粘结力已破坏。

3) 1#挂孔T梁腹板外侧存在密集的斜向裂缝,部分开裂面处存在错位现象,裂缝以距梁中心呈平面正八字形分布,腹板斜向裂缝最大宽度 1.5 mm。大部分腹板裂缝已裂至T梁底板,腹板内侧亦存在部分八字形分布斜向裂缝,裂缝最大宽度 1.2 mm。腹板裂缝已裂至T梁底板,腹板内外侧裂缝空间分布呈典型的剪切及扭转开裂形态,被撞梁体腹板开裂状况见图3所示。

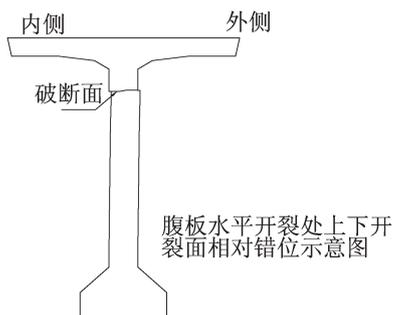


图2 腹板水平开裂后梁体形态

Fig.2 Beam form after horizontal crack of the web

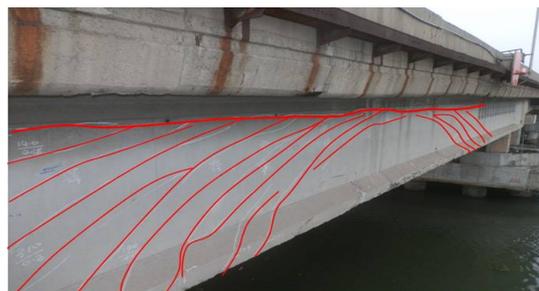


图3 1#梁腹板外侧斜向及水平开裂状况

Fig.3 The inclined and horizontal cracking condition outside the web

## 3 基于双层梁单元法的船撞桥结构分析

本次碰撞对挂孔1#T梁造成严重损伤,以下考虑损伤对梁体受力的影响进行分析,为应急处理措施及封道方案提供依据。

### 3.1 三维仿真双层梁单元模型

采用Midas/civil 2012程序<sup>[4]</sup>建立双层梁单元模型,将现有梁单元根据被撞点的位置,分为上层梁单元和下层梁单元(见图4),梁单元对应节点之间采用刚性连接,模拟从预制梁阶段至梁体被撞前阶段的受力状态。被撞后,将撞击破碎带位置的刚性连接钝化<sup>[5]</sup>,改为仅有竖向支撑的连接方式,形成耦合力学统一模型<sup>[6]</sup>,模拟现有梁体受力状态。模型见图5所示。

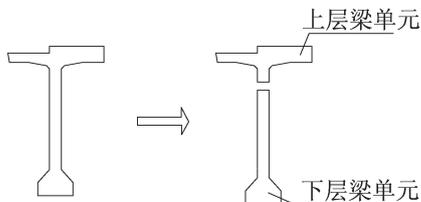


图4 上、下层梁单元示意图

Fig.4 The sketch map of the upper and the lower beam elements

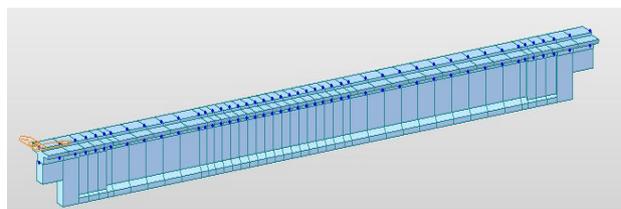


图5 模型示意图

Fig.5 The sketch map of the FE model

### 3.2 现状及维修结构安全性分析

针对事故桥梁现状的安全性以及拆除换梁方案的安全性进行分析,重点分析受船撞影响最大的事故边梁以及相邻的次边梁。同时,对内侧边梁以及换梁阶段T构的安全性也进行分析。

事故桥梁T梁无中横隔板,横向联系弱,因此采用横向刚接板梁法计算其横向分布系数。由于该桥边梁与次边梁、中梁的预应力配束相同,恒载(以标准跨中截面计算)与汽车荷载<sup>[7]</sup>也基本相同(见表1)。其中恒载最大相差0.5%,汽车荷载最大相差6.5%,因此可基本判断事故发生前5片T梁的结构受力基本一致。选取1号梁验算,T形截面在短期和长期荷载组合下,未出现拉应力,在标准组合<sup>[8]</sup>下,最大压应力为8.9 MPa(见图6),满足规范要求。事故发生后,2号梁~5号梁恒载和汽车荷载变化不大,同时考虑到T形截面有一定的结构安全富裕度,可以基本判断2号梁~5号梁结构安全。因此主要针对事故边梁1号梁现状进行结构安全性分析。

表1 各梁恒载及横向分布系数表

Tab.1 The dead load and the load distribution coefficients

项目	1号梁	2号梁	3号梁	4号梁	5号梁
恒载/(kN·m <sup>-1</sup> )	43.300	44.500	44.500	44.500	43.30
汽车荷载横向分布系数	0.844	0.792	0.795	0.792	0.84

注:从桥梁外侧向桥梁中心线依次为1号梁、2号梁直至5号梁。



图6 T形截面标准压应力包络图

Fig.6 Compressive stress envelop diagram of T-section

计算采用Midas/civil 2012进行平面杆系分析,目前受损边梁存在裂缝贯通、横向错位、钢筋屈服、应力重分布,其受力是处于较为复杂的状态,较难完全真实的模拟。为确保安全,采用T梁分离为翼板和I型梁这种极端状况进行分析。主要建立了以下4个模型对事故边梁进行了应力分析:

模型1:全封闭汽车荷载。截面取用I形截面,主要荷载为:自重+防撞栏+铺装,其中顶板部分作为外荷载施加在I形梁上,不参与结构受力。

模型2:半封闭汽车荷载。截面取用I形截面,主要荷载为:半封闭状态汽车荷载,即只封闭近事故边梁侧一个行车道,横向分布系数取0.012,并分别计算超载100%以及超载200%。

模型3:半封闭汽车荷载。截面取用组合截面,主要荷载为:半封闭状态汽车荷载。即在模型二的基础上,通过加固措施使顶板部分与I形截面重新连接,共同承担半封闭状态汽车荷载,横向分布系数模型二取0.012,并分别计算超载100%以及超载200%的情况。

模型4:不封闭状态汽车荷载。截面取用I形截面,主要荷载为:不封闭状态汽车荷载。即近事故边梁一侧2.8 m宽紧急停车带内不行车,横向分布系数取0.322。

对于简支结构,结构分析主要关心跨中截面的抗弯能力和支点附近截面的抗剪能力,由于船撞后边梁的抗弯刚度以及中性轴位置变化较大,现阶段的分析主要以跨中I形截面的上下缘应力分析为主。各个模型的主要计算结果如下表2所示。

由上述分析结果可知,边梁受船撞后,I形截面上缘压应力较大,已经超过施工阶段规范<sup>[8]</sup>允许的压应力限值 $0.7 \times 28.48 = 19.9$  MPa,并已接近T梁抗压强度标准值<sup>[9]</sup>28.48 MPa,临近破坏,因此I形截面上缘应力是结构安全的主要关注点。针对该点,在上述计算的基础上进行了以下几个工况进行荷载组合,见表3。

### 3.3 计算分析结果

根据上述计算,可以得到以下结论:

1) 船撞事故发生后有一天未封闭车道(相当于工况2),计算I形截面上缘有33.9 MPa的压应力,超过规范规定的施工阶段<sup>[9]</sup>的允许压应力限值19.9 MPa和标准值28.5 MPa,事故边梁尚未破坏,说明其实际应

力要比计算的至少低 $33.9-28.5=5.4$  MPa。其原因有以下两点:①上部结构恒载部分通过桥面板横向联系传递给了次边梁承担;②T形截面未完全分离为顶板截面和I形截面两部分,由于竖向钢筋的作用,顶板截面也参与了部分受力。上述作用的有限元模拟分析计算基于不同的假设有不同的计算结果,本文的计算仍偏安全的假设事故边梁的上部结构恒载和汽车荷载仍全部由I形截面承担,如结构在该假设下仍能满足规范要求,则说明结构安全并具有一定的安全富裕度。

表2 各模型主要计算结果

Tab.2 Calculation result of each model

有限元模型	主受力截面	荷载情况	跨中I形截面应力/MPa		说明
			上缘应力	下缘应力	
模型1	I形截面	全封闭状态汽车荷载	-24.5	-2.2	
			-0.3	0.2	不超载
模型2	I形截面	半封闭状态汽车荷载	-0.7	0.4	超载100%
			-1.0	0.6	超载200%
模型3	组合截面	半封闭状态汽车荷载	-0.02	0.1	不超载
			-0.05	0.2	超载100%
模型4	I形截面	不封闭状态汽车荷载	-0.07	0.3	超载200%
			-9.3	5.8	不超载

注:应力以拉应力为正,压应力为负,均为标准组合。

表3 各工况下主要计算结果

Tab.3 Calculation result for each load case

荷载工况	主受力截面	荷载情况	标准组合/MPa			验算结果/%	说明
			上缘应力	下缘应力	规范压应力限值		
工况1	I形截面	自重+防撞栏+铺装	-24.9	-2.0	-19.9	-25	不超载
		装+半封闭状态汽车荷载	-25.2	-1.8	-19.9	-27	超载100%
			-25.6	-1.5	-19.9	-28	超载200%
工况2	I形截面	自重+防撞栏+铺装+不封闭状态汽车荷载	-33.9	3.6	-19.9	-70	不超载
工况3	I形截面-组合截面	自重+铺装+防撞	-24.6	-2.1	-19.9	-23	不超载
		栏+半封闭状态汽车荷载	-24.6	-2.0	-19.9	-23	超载100%
			-24.6	-1.9	-19.9	-23	超载200%

注:应力以拉应力为正,压应力为负,上下缘均为I形截面上下缘,验算结果负号表示超标欠缺比例。

2) 通过第1点的分析,可以判断,在控制超载低于100%的半封闭状况下(即工况1),I型截面的最大压应力( $25.2-5.4=19.8<19.9$  MPa)的情况下未超过规范限值。

3) 封闭近事故边梁侧一个行车道后,事故边梁的汽车荷载横向分布系数由原来的0.844降为0.012,即使超载200%对结构的影响也不大。

4) 通过加固措施使顶板部分与I形截面重新连接形成组合截面使之共同承受汽车荷载(相当于工况3)对改善现状应力情况作用不大。其主要的的作用在于提高以下工况下边梁的安全性:①超重力车冲过临时防撞墩到边梁;②在解除边梁与次边梁的横向联系后,车辆冲过临时防撞墩并撞击到边梁护栏;③边梁起吊

时由于倾斜产生横向弯矩,在目前断缝处产生破坏。

#### 4 结论与展望

算例桥受船撞后,决策者根据本文分析结果,决定对受撞边梁进行更换。在更换前约两个月时间内,先采用钢板使受撞T梁上下结构加强连接,以确保达到计算理论中的组合截面形式。同时,封闭最外侧一个车道,并限制超载车辆通行。

目前,本桥成功地在两个月时间内安全地对受损T梁进行了置换,确保了安全,由于没全封车道,也将社会影响和经济影响降到了最低。这说明,本文基于双层梁单元法研究船撞受损后桥梁的病害及结构安全性问题的方法是正确合理的,结果与实际情况是相符的,可以在其他类似事故中加以应用。

在船撞事件发生后,如何在确保安全的情况下,尽可能减少对交通的影响,将社会影响和经济损失降到最低,是桥梁工作者急需解决的课题。如何结合现场病害调查和结构分析结果,给出合理的加固措施,确定船撞事发生后桥上通行和桥下通航方案,是需要进一步研究的问题。

#### 参考文献:

- [1] 李华文. 防范船撞桥事故的思考[J]. 世界海运, 2012, 35(3): 41-42.
- [2] 王增忠, 王君杰, 范立础. 船撞桥风险评估与管理[J]. 自然灾害学报, 2008, 17(4): 7-11.
- [3] 刘俊, 谢宝强. 船撞桥风险评估方法概述[J]. 企业技术开发, 2010, 29(5): 59-62.
- [4] 王昌兴, MIDAS/Gen应用实例教程及疑难解答[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [5] 彭可, 贺国京. 组合梁桥的耦合计算模型研究[J]. 华东交通大学学报, 2004, 21(2): 41-45.
- [6] 王健, 雷晓燕. 移动单元法在车辆—无砟轨道—路基模型中的应用[J]. 华东交通大学学报, 2011, 28(6): 12-16.
- [7] 中华人民共和国交通运输部. JTG D60-2004, 公路桥涵设计通用规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [8] 中华人民共和国交通运输部. JTG D62-2004, 公路钢筋混凝土及预应力钢筋混凝土桥涵设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [9] 中华人民共和国交通运输部. JTJ 041-2000, 公路桥涵施工技术规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2000.

## Analysis of Ship -damaged Bridge Structure Based on Double-layer Beam Finite Element Method

Wang Xiaoyu<sup>1</sup>, Wen Fangzhen<sup>2</sup>

(1. Guangdong Gaintop Highway Engineering Construction Group Co. Ltd., Guangzhou 510635, China; 2. Guangdong Provincial Highway Construction Group Co. Ltd., Guangzhou 510000, China)

**Abstract:** Based on double-layer beam finite element method (FEM), this paper focuses on the damage and the structure safety of bridges damaged by ship. Taking a pre-stressed concrete beam over class IV channel as the example, this study carried out the field investigation after it was collided by a ship. A 3D FEM model with double-layer beam elements is developed to simulate the change of boundary condition after the collision and conduct the mechanical behavior by using activation and conduct inactivation methods. The results present a theoretical basis for emergency response decision making. According to the investigation and analysis, though with cracks on the beam, the damaged bridge structure is still safe with certain margin after temporary fixation, and can be open to traffic in half before the replacement of girders, which is in correspondence with the reality. In conclusion, the double-layer beam method is sound for analyzing the bridge damaged by ship.

**Key words:** bridge damaged by ship; damage investigation; double-layer beam finite element method; emergency response