

文章编号:1674-2869(2010)03-0057-05

# 基于静动载试验的大型桥梁健康评估

宋金强<sup>1</sup>, 朱宏平<sup>1</sup>, 黄民水<sup>1,2</sup>

(1. 华中科技大学 a) 土木工程与力学学院, b) 控制结构湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430074;

2. 武汉工程大学交通研究中心, 湖北 武汉 430074)

**摘要:**对某公跨铁立交桥进行了现场静动载试验,测得桥梁结构的力学特性和性能指标,并基于 ANSYS 建立了该桥的有限元模型,进行了静力分析.通过试验值与理论计算值的比较分析,可以看出该桥承载能力和动力性能均有一定程度的降低,安全性能不能满足营运需要,需要进行大修.本文的研究方法可应用于桥梁结构的损伤识别、健康监测、结构控制以及结构的承载力评定.

**关键词:**健康评估;静载试验;动载试验;大型桥梁

中图分类号:TU311

文献标识码:A

doi:10.3969/j.issn.1674-2869.2010.03.015

## 0 引言

随着我国交通事业的快速发展,桥梁作为交通枢纽,在国民经济中发挥着越来越重要的作用,特别是近20年来,我国兴建了很多类型各异的桥梁,这些桥梁在建设和运营期间经常需要进行结构检测,以保证其工程质量和运营安全.尤其是在役桥梁,在各种因素作用下在不同程度上出现质量问题,比如承载力、刚度以及耐久性降低等,进而缩短了桥梁使用寿命,甚至发生垮塌事故.因此对在役桥梁进行健康评估具有十分重要的意义<sup>[1-2]</sup>.

对桥梁结构进行健康评估,其目的就是通过检测,对桥梁结构在特殊气候、交通条件下的营运安全状况进行评估,为桥梁管养决策提供指导<sup>[3-4]</sup>.在健康监测中,静载试验常用来评估桥梁结构的承载能力,其检测过程和结果都比较直观.而近年来,动载试验由于工作量较小、费用低、试验时间短、操作方便且可不中断交通,得到了迅速的发展和广泛的应用.在一定的时期内,T构带挂梁的结构体系得到了一定的应用,但是经过一段时间的运营,普遍出现了一些质量

问题,比如T构上部箱梁下挠和开裂等<sup>[5-6]</sup>.

本实验采用现场静载试验和动载试验相结合的检测方法,并结合有限元理论分析,对某公跨铁立交桥的健康状况进行了评估,为今后的维修、加固补强提供了详实的技术资料.

## 1 工程背景

该桥全长226.57 m,横跨京广铁路,与铁路交角为59°.主桥的结构型式为:20 m挂梁+40 m预应力混凝土T构+20 m挂梁+40 m预应力混凝土T构+20 m挂梁.T构悬臂梁根部高4 m,端部高1.8 m,T构横截面为双箱形,挂梁采用斜跨径20 m装配式混凝土T形简支梁,每孔8片并列,梁高1.5 m,主梁中心间距2.0 m.该桥原设计荷载等级为汽车—超20级、挂车—120,桥面宽度为17 m,其中行车道宽15 m,两侧人行道各宽1 m,桥下净空为8.5 m.

## 2 试验方案

根据相关规范、规程、技术标准及双方签订的技术合同要求,本次检测内容和项目如表1.

表1 检测内容及项目

Table 1 The testing contents and items

序号	检测项目	检测内容	备注
1	静载试验	分级静力加载试验,检测内力控制截面混凝土和钢筋的应力状况及挠度	通过桥梁的静、动载试验,结合桥梁的有限元理论分析,通过综合测试和理论演算的结果,并根据有关的规程和标准,评定桥梁的承载能力和综合技术状态.
2	动载试验	不同车速跑车,检测各种动力特征参数 不同位置跳车,检测各种动力特征参数	

收稿日期:2009-08-26

基金资助:国家自然科学基金(No. 50778077),武汉工程大学科学研究基金(No. 13095081)

作者简介:宋金强(1981-),男,湖北当阳人,博士研究生,研究方向:工程结构损伤识别及健康监测.

通信作者:黄民水(1976-),男,湖南麻阳人,讲师,博士.研究方向:工程结构损伤识别及健康监测.

## 2.1 测试截面

测试控制截面为:1) 1-1 截面,挂梁跨中(最大正弯矩);2) 2-2 截面,挂梁支点(最大剪力);3) 3-3 截面,T 构悬臂梁根部(最大负弯矩和最大剪力);4) 4-4 截面,T 构悬臂梁跨中;5) 5-5 截面,桥墩(最大竖向反力);6) 6-6 截面,T 构悬臂梁端部(最大位移)。测试截面位置分布如图 1。

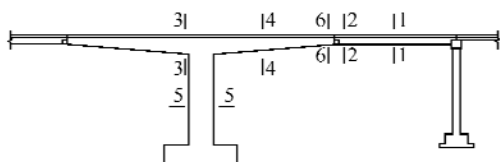


图 1 测试截面分布图

Fig. 1 Distribution plan of testing section

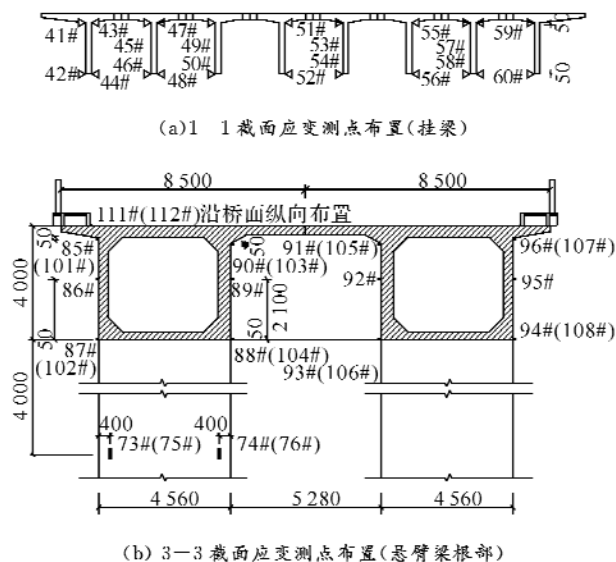


图 2 静载试验测点布置图

Fig. 2 Static testing location

## 2.3 加载车辆

在静载试验中,设计汽车荷载等级为原汽车一超 20 级,其中的重车(550 kN)很少见,为试验方便,将其由两辆 300 kN 汽车分别加载到 300 kN、250 kN 来代替(如图 3),使其对测试截面产生与汽车一超 20 级重车相当的荷载效应。试验车队采用 8 辆东风自卸车,其中 4 辆装载后总重 300 kN,另 4 辆装载后总重 250 kN,分偏载和中载两种情况进行加载。偏载采用六辆车加载,分三级加载,即累计荷载分别为 50 %、80 % 和 100 %,中载采用 8 辆车加载,一次加载到 100 % 荷载。

动载试验采用一辆 300 kN 的载重汽车作为试验荷载。

## 2.2 静载试验测点布置

a. 混凝土应变测点布置. 1-1 截面处在挂梁各片 T 梁的腹板上布设应变测点,具体位置如图 2(a)所示. T 构悬臂梁根部 3-3 截面测点布置如图 2(b)所示, T 构悬臂梁跨中 4-4 截面测点布置如图 2(c)所示。

b. 钢筋应变测点布置. 钢筋应变测点均布置在 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup> 桥墩之间的 4<sup>#</sup> 梁上(从南往北),两测点布置在同一根钢筋上。

c. 挠度测点布置. 除布置机电位移计外,还使用数字水准仪同步观测挂梁的竖向挠度,测点布置如图 2(d)、图 2(e)。

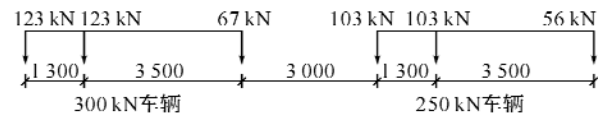
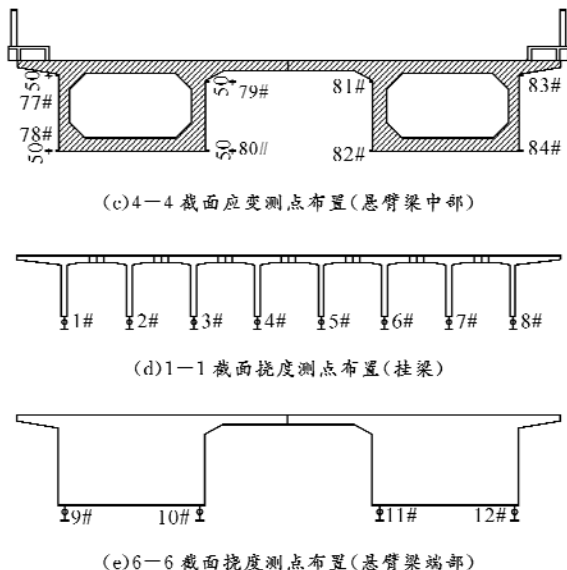


图 3 试验车辆荷载

Fig. 3 Testing vehicle load

## 3 静载试验结果分析

在桥梁检测试验中,常用校验系数( $\eta$ )来评判桥梁承载能力和工作状态,桥梁检定试验所得数据(应力、挠度)与理论计算值(应力、挠度)之比称之为校验系数, $\eta$  大于 1 则说明结构设计强度不足而不安全.在大多数情况下, $\eta$  小于 1,其值过大或过小都应该仔细分析原因.值过小的原因可能是材料弹性模量高出设计值较多,桥梁结构整体工作性能好,计算理论或简化计算偏于安全.根据

《公路旧桥承载能力鉴定方法》<sup>[7]</sup>附录表1,对于预应力钢筋混凝土梁,应力校验系数 $\eta=0.9\sim 1.0$ ,挠度校验系数 $\eta=0.7\sim 0.8$ ,而对于钢筋混凝土梁,应力校验系数 $\eta=0.4\sim 0.8$ ,挠度校验系数 $\eta=0.5\sim 0.9$ 。

a. 挠度校验系数.挂梁跨中及T构悬臂梁端部的挠度 $\eta$ 均大于1.0,挂梁和T构悬臂梁的刚度严重不足,弹性工作性能已经受到影响,竖向刚度不满足设计要求。

b. 应变校验系数.挂梁跨中、T构悬臂梁根部及跨中的应变 $\eta$ 均大于1.0,挂梁和T构悬臂承载力不足.T构桥墩的应变 $\eta$ 均接近1.0,说明T构桥墩满足强度要求,并有安全储备。

c. 荷载横向分布特性.截面1-1、3-3、4-4各应变测点 $\eta$ 分布非常不均匀,截面1-1、6-6各挠度测点 $\eta$ 分布也不均匀,说明荷载横向分布特性发生了明显变化,结构整体性已受到破坏。

## 1 动载试验分析

在1-1截面、6-6截面处选取1<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>、9<sup>#</sup>、10<sup>#</sup>挠度测点,以及14<sup>#</sup>钢筋应变测点共5个测点,作为动态测点.CCD数字图像动态位移监测系统检测点选在T构悬臂梁端及挂梁跨中。

a. 跑车试验:试验汽车以10、20、30、40、60 km/h的速度匀速过桥产生激振。

b. 跳车试验:试验汽车以10、20 km/h的速度分别越过6-6截面(T构悬臂梁端部)、1-1截面(挂梁跨中)桥面上设置的高4.5 cm的减速板激振。

通过测试,跑车工况下的冲击系数测定值为1.30~1.63,接近或大于常值,说明该桥正常工作状态下的动力性能较差.在跳车工况下冲击系数为1.60~1.90,明显增大,较多地大于常值,须保持桥面铺装平顺,以利于桥梁结构安全运营。

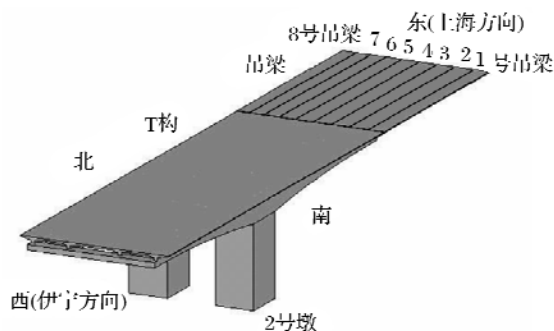
## 5 有限元仿真分析

### 5.1 有限元建模

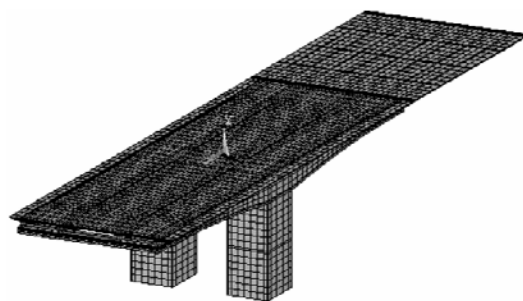
建立了2<sup>#</sup>墩T构以及2<sup>#</sup>墩与1<sup>#</sup>墩之间挂梁的有限元模型,其中混凝土采用六面体单元Solid65;预应力钢筋采用Link8单元,用降温法考虑预应力的作用.搭在1<sup>#</sup>墩上的挂梁做简支处理,搭在T构上的挂梁与T构之间设置Combin14弹簧单元模拟橡胶支座.T构另外一端承担两T构之间挂梁一半的自重荷载作用,此时将此作用转换为面力施加在T构另一端,墩底固接<sup>[8-9]</sup>.T构自重1 186.21 kN,挂梁自重294.4 kN,总计自重1 480.6 kN.有限元模型如图4(a)。

T构悬臂梁混凝土为C40,弹性模量为 $3.25 \times 10^{10}$  N/m<sup>2</sup>,T构墩身及挂梁混凝土为C30,弹性模量为 $3.0 \times 10^{10}$  N/m<sup>2</sup>,混凝土质量密度为2 600 kg/m<sup>3</sup>,泊松比0.167.预应力钢索弹性模量为 $1.95 \times 10^{11}$  N/m<sup>2</sup>,质量密度为7 800 kg/m<sup>3</sup>,泊松比为0.3.预应力钢筋降温值=控制应力/( $E \times \alpha$ )=237 ℃。

对于桥面铺装,本模型没有加以考虑,只是在施加荷载的时候,作为桥面单元面力施加.网格划分单元棱长在10~50 cm左右,可保证计算精度,共划分为19 680个混凝土单元,2 440个预应力钢筋单元.模型网格划分如图4(b)。



(a)模型示意图



(b)有限元模型单元划分图

图4 桥梁模型示意图和单元划分图

Fig. 4 Schematic diagram of model and meshed element

### 5.2 试验与有限元结果对比分析

a. T构悬臂梁端位移对比分析.2<sup>#</sup>墩T构悬臂端,偏载试验最大变形的校验系数为1.34,中载试验为1.22,表明偏载和中载作用下,T构受力状况均较差。

b. 挂梁中位移对比分析.1<sup>#</sup>~2<sup>#</sup>墩间挂梁,偏载试验中T构悬臂梁端最大变形的 $\eta$ 为1.41.有限元理论分析显示在中载试验中,挂梁跨中位移检测值比计算值要大许多,挂梁已经进入非线性工作状态,承载力储备不足.4<sup>#</sup>梁的位移测试值和理论分析值如图5。

c. 各挂梁位移横向分布对比分析.位移的横向分布检测结果显示边梁以及4<sup>#</sup>梁位移偏大,说

明整个挂梁的连接较差, 1<sup>#</sup> 梁损伤大于其它梁。

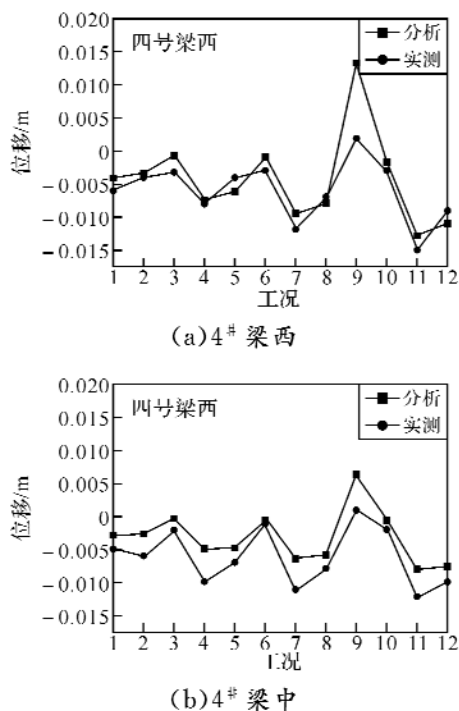


图 5 位移试验值与理论值(4<sup>#</sup> 梁)

Fig. 5 Experimental and theoretical displacement (beam 4<sup>#</sup>)

## 6 结 语

经过该桥的静动载试验, 得出如下结论:

a. 校验系数均接近或大于规范中的常值, 这说明该桥刚度、承载力不足, 弹性工作性能已经受到影响, 竖向刚度不满足设计要求。

b. 挂梁部分荷载横向分布特性发生了明显变化, 结构整体性已受到破坏。

c. 冲击系数测定值接近或大于常值, 动力性能不是很好, 在跳车工况下动力系数明显增大, 均大于规范计算值较多, 因此必须保持桥面铺装平顺, 以利于桥梁结构安全运营。

总的来说, 该桥存在较大的安全隐患, 需要进行大修, 以满足安全营运的需要。

## 参考文献:

- [1] 陈玲莉, 应德星, 周岩勇. 某 T 刚构带挂梁结构承载能力分析[J]. 山西建筑, 2007, 33(8): 77-78.
- [2] Dalmy Dencs. Static and dynamic load testing of concrete bridges before and after retrofitting [J]. Structures Congress - Proceedings, 1995 (2): 1369-1372.
- [3] Li Zhijun, Li Aiqun, Han Xiaolin. Operational modal identification of suspension bridge based on structural health monitoring system [J]. Journal of Southeast University (English Edition), 2009, 25 (1): 104-107.
- [4] Yi Jin-Hak, Kim Dookie, Feng Maria Q. Periodic seismic performance evaluation of highway bridges using structural health monitoring system [J]. Structural Engineering and Mechanics, 2009, 31(5): 527-544.
- [5] 李庆华, 金立成, 卢雨乐. 两 T 构中间带挂梁的结构分析[J]. 河南建材, 2008(4): 53-54.
- [6] Prato Carlos A, Hunicken Diego R, Huerta Pedro J F. Dynamic and static tests of bridges and viaducts of the Rosario-Victoria highway link project [C]// Metropolis and Beyond-Proceedings of the 2005 Structures Congress and the 2005 Forensic Engineering Symposium. New York: American Society of Civil Engineers, 2005, 1525-1538.
- [7] 交通部第公路二勘察设计院. 公路旧桥承载能力鉴定方法[M]. 北京: 人民交通出版社, 1988.
- [8] 孙庆新, 陈旭勇, 杨冬波. 刚构连续弯板桥空间有限元分析[J]. 武汉工程大学学报, 2009, 31(5): 41-44.
- [9] Mufti Aftab A, Hassan Tarek K. Finite element analysis and theoretical study of punching shear strength of concrete bridge decks [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2005, 32(2): 449-453.

## Study on health assessment of large-scale bridge based on static and dynamic testing

**SONG Jin-qiang<sup>1</sup>, ZHU Hong-ping<sup>1</sup>, HUANG Min-shui<sup>1,2</sup>**

(1. Huazhong University of Science and Technology, a) School of Civil Engineering  
and Mechanics, b) Hubei Key Laboratory of Control Structure, Wuhan 430074, China;

2. Transportation Research Center, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The mechanical characteristic and performance index of a highway bridge over a railroad are acquired after the field static and dynamic testing are carried through, then the finite element model of the bridge is set up based on ANSYS and static analysis is performed. Through the comparative analysis between the analytical and theoretical values, it can be seen that the bearing capacity and dynamic performance debased for a certain degree, its safety cannot meet the need of operation. It needs to be completely repaired. The research method can be used in many applications of bridge structures like damage identification, health monitoring, structural control, structural evaluation and assessment.

**Key words:** health assessment; static testing; dynamic testing; large-scale bridge

本文编辑:龚晓宁



(上接第 56 页)

## Analysis on mechanical behavior of lining of shallow-buried and hidden excavated metro tunnel

**WANG Li-hong, ZHANG Dian-ji**

(School of Environment and Civil Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** In order to know of the mechanical behavior of the lining of the shallow buried and hidden excavated metro tunnel, ANSYS, a major commercial software, is used to analyze the internal force and deformation mechanism of lining under the designed case and supportive conditions. This paper, based on the active load and passive load among load-structure model, calculates the internal force of the lining and checks its bearing capacity, and provides a feasible reference for the design and calculation of the tunnel in the same geological conditions.

**Key words:** shallow-buried and hidden excavated tunnel; soft surrounding rock; lining; ANSYS; load-structure model

本文编辑:龚晓宁