

基于荷载试验的装配式钢便桥承载能力评定

张锴

中铁第一勘察设计院集团有限公司

摘要: 为了保障某铁路建设过程中的工程车辆、施工机械等设备的运输安全,需对既有公路桥梁进行静力及动力荷载试验。基于装配式钢梁错孔挠度理论,提出了桥梁由加载产生的挠度实测值的理论修正公式,对比计算结果表明,考虑错孔挠度修正的桥梁挠度校验系数明显降低;在外部激励作用下,桥梁结构更易产生水平向振动,但竖向振动加速度幅值显著大于水平向振动;相较于简支梁,连续梁更易在外部激励下产生水平横向和竖向振动,且竖向的动力响应大于简支梁;桥梁的竖向自振频率实测值小于计算值,在长期使用后结构性能有一定程度的退化。

关键词: 装配式钢便桥;荷载试验;承载能力;数值模型;结构响应

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2024.04.015

某铁路建设线路穿行于地势高低起伏的峡谷地带,为了保障铁路建设过程中的工程车辆、施工机械等设备的运输安全,需对铁路建设沿线的既有公路桥梁进行静力及动力荷载试验,并依据试验结果和有限元计算分析和评定桥梁的承载能力及结构性能。

为了对装配式钢便桥结构性能进行分析和评定,目前主要采用现场荷载试验或室内模型试验的方式,其中现场荷载试验由于能够反映实际荷载工况下的结构响应,在桥梁的荷载试验及结构性能分析和评定中得以广泛的应用^[1-2]。Darius Bacinskas^[3]等对既有窄轨铁路钢桥进行了静态和动态测试,并建立了分析模型用以评估桥梁结构的承载能力。吴坤平^[4]对装配式贝雷梁钢桥在试验荷载作用下的线型进行了研究,基于几何原理形成了理想状态下桥跨最大错孔挠度的计算理论。

目前针对既有钢便桥的荷载试验及结构性能评估的相关案例和研究较多,但尚未有结合有限元分析对装配式钢便桥实施动、静荷载试验并进行结构性能综合分析的案例。本文以对某铁路沿线公路的钢便桥承载能力评定为工程案例,开展了现场动、静荷载试验以及相关的

结构性能测试,采用MIDAS Civil有限元软件建立钢便桥的数值模型,结合现场采集的数据结果,对桥梁结构的承载能力和结构性能进行了分析和评定。同时基于装配式贝雷梁错孔挠度理论,提出了桥梁由加载产生的挠度实测值的理论修正公式。

一、钢便桥概况

装配式钢便桥由主梁桁架、支撑杆、桥面系等构件组成,某公路钢便桥为跨越某水库而建设,该桥上部结构为1跨(简支梁)下承式钢桥+3跨(连续梁)上承式钢桥,跨径布置为1×27m+3×45m,桥梁全长172.4m,设计为单车道,荷载等级为公路-II级,桥面宽度为4.5m,贝雷架类型为HD-200型。主梁桁架高度为2134mm,简支梁高跨比约为1/12,连续梁高跨比约为1/20。通过对桥梁进行现场动、静荷载试验,取得关键部位在荷载作用下的应力(应变)、变位等重要数据后,经过综合分析,评估桥梁现状的结构性能及承载能力,为桥梁运营的安全性提供技术依据,并为装配式钢便桥的荷载试验、日常维护提供可选择的技术路线和思路。

二、试验方法

(一) 静载测试内容及传感器布置

基于本次试验钢桥的结构类型和跨度分布,选择简支梁跨、连续梁边跨及中间跨作为加载试验对象。桥梁上部结构共布置6个监测断面,各断面均设置于结构响应较大的位置(图1),具体的监测断面、测点布置和测试内容如表1所示。

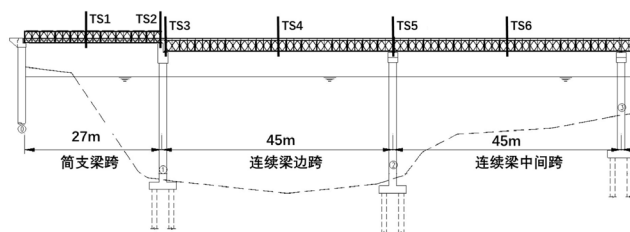


图1 监测断面布置图

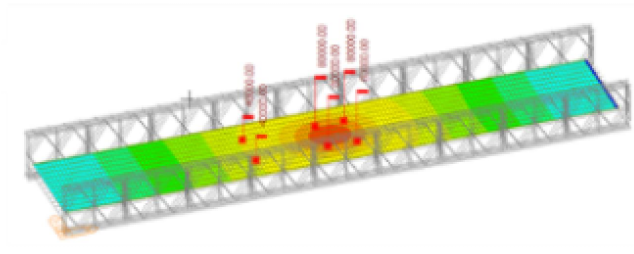
表1 桥梁监测断面和试验内容

序号	控制截面	测点位置及编号
1	TS1 (跨中截面)	上弦杆应变测点: 1-1~1-6; 下弦杆应变测点: 1-7~1-12; 竖杆应变测点: 1-13~1-20; 横向分配梁应变测点: 1-21~1-22; 挠度测点: d-1
2	TS2 (1#墩支座截面)	竖杆应变测点: 1-23~1-25; 斜腹杆应变测点: 1-26~1-31; 竖向位移测点: d-2
3	TS3 (1#墩支座截面)	竖杆应变测点: 2-1~2-10;
4	TS4 (边跨跨中截面)	上弦杆应变测点: 2-11~2-12; 下弦杆应变测点: 2-13~2-22; 挠度测点: d-3
5	TS5 (2#墩支座截面)	上弦杆应变测点: 3-1~3-2; 下弦杆应变测点: 3-3~3-6; 竖向位移测点: d-4
6	TS6 (中间跨跨中截面)	上弦杆应变测点: 3-7~3-8; 下弦杆应变测点: 3-9~3-18; 竖向位移测点: d-5

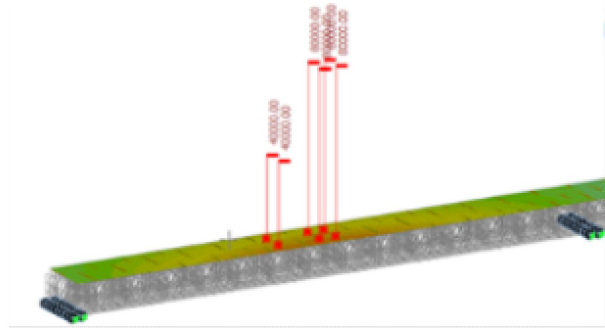
(二) 静载试验加载方案

根据有限元模型计算结果，结合现场实施的可行性及试验效率，采用三轴重型卡车对桥梁施加不同等

级的试验荷载。根据试验项目的不同要求，试验车辆横桥向居中布置，加载分3级进行。详细载位布置如图2所示。



(a) 简支梁车辆荷载加载位置示意图 (第1级)



(b) 连续梁车辆荷载加载位置示意图 (第1级)

图2 车辆荷载加载位置示意图

(三) 动载测试及传感器布置

本次主要测试内容为桥梁在环境激励下的振动特性以及正常行车作用下的冲击试验。

(1) 桥梁环境激励下的自振性能测试，在桥面跨中部位进行，加速度传感器与桥面粘贴牢固，测试桥梁在环境激励作用下的自由振动响应。测点分别布置于27m简支梁跨中以及3×45m连续梁中间跨跨中处。

(2) 桥梁冲击试验利用提前在钢结构表面粘贴应变片进行测试，测试点位于跨中截面下弦杆底部。

三、静载试验结果及分析

(一) 挠度测试结果

(1) 测试结果

该桥简支梁跨中截面 (TS1)、连续梁边跨及中间跨跨中截面 (TS4、TS6) 测点的挠度实测值、计算值及其校验系数详见表2~4:

在最大试验荷载作用下，简支梁跨中截面 (TS1) 测点d-1实测挠度值略小于其对应的计算值，TS1挠度校验系数为0.72，卸载后的相对残余变位为3.74%；在第1级试验荷载作用下，连续梁边跨跨中截面 (TS4) 测点d-3实测挠度值已超过其对应的计算值，TS4挠度校验系数为1.07，卸载后的相对残余变位范围为3.07%；在第2级试验荷载作用下，连续梁中间跨跨中截面 (TS6) 测点d-5实测挠度值已超过其对应的计算值，TS6挠度校验系数为1.81，卸载后的相对残余变位范围为1.20%。

表2 静载作用下TS1测点挠度校验系数表

测点	加载等级	挠度实测值 /mm	挠度计算值 /mm	校验系数	相对残余位移/%
d-1	1级加载	13.9	20.0	0.70	/
	2级加载	19.7	25.0	0.79	/
	3级加载	21.4	29.9	0.72	/
	卸载	0.8	/	/	3.74

表3 静载作用下TS4测点挠度校验系数表

测点	加载等级	挠度实测值 /mm	挠度计算值 /mm	校验系数	相对残余位移/%
d-3	1级加载	39.1	23.7	1.07	/
	2级加载	/	29.6	/	/
	3级加载	/	35.5	/	/
	卸载	1.1	/	/	3.07

表4 静载作用下TS6测点挠度校验系数表

测点	加载等级	挠度实测值 /mm	挠度计算值 /mm	校验系数	相对残余位移/%
d-5	1级加载	37.9	21.2	/	/
	2级加载	58.2	26.4	1.81	/
	3级加载	/	31.7	/	/
	卸载	0.7	/	/	1.20

(2) 结果分析

根据测试结果，连续梁边跨及中间跨的校验系数分别为1.07及1.81，校验系数已超出规范的允许值，但考虑到装配式钢便桥的销孔错位变形特点，依据销孔挠度变形理论，按最保守假定，即认为在第1级加载作用下桥梁产生最大的销孔错位变形，采用公式 (1) 对跨中挠度进行以下修正：

$$f'_i = f_i - \Delta \left(1 - \frac{f_{sg}}{f_{s1}} \right) \quad (1)$$

其中， f'_i 为修正销孔影响后测点处由加载产生的实测挠度； f_i 为测点处由加载产生的实测挠度； Δ 为装配式钢便桥在测点处销孔位移最大计算值； f_{sg} 为自重作用下的测点处的挠度计算值； f_{s1} 为第1级加载作用下的测点处的挠度计算值。

连续梁边跨 (TS4) 经过修正后的第1级加载产生的挠度为34.1mm，修正后的校验系数为0.98，满足规范要求；连续梁中间跨 (TS6) 经过修正后的第2级加载产生的挠度为48.7mm，修正后的校验系数为1.53，不满足规

范要求。

(二) 应变测试结果

本次应变测试点较多，此处限于篇幅仅对TS1部分测点应变测试结果分析，TS1处的1-2、1-8测点校验系数均大于1.0，经过对比，发现以上2处测点的相邻测点实测值及校验系数均处于正常范围，各测点的相对残余应变也均小于20%，结合钢便桥的空间协同受力特点，经综合判断，认为简支梁跨各构件处于正常受力状态。

四、动载试验结果及分析

(一) 环境激励

采用有限元分析软件对该桥梁进行特征值分析计算，得到该桥27m简支梁竖向自振频率为5.82Hz，3×45m连续梁竖向自振频率为3.09Hz，桥梁计算冲击系数分别为0.295、0.184。

分别对简支梁跨及连续梁跨进行环境激励下的振动响应现场实测，简支梁前3阶自振频率分别为1.34Hz、4.06Hz及4.78Hz，其中前2阶均为水平横向振动，第3阶振型为竖向振动；连续梁前3阶自振频率分别为0.88 Hz、2.34Hz及2.81Hz，其中第1阶为横向振动，第2、3阶为竖向振动。通过对比分析，简支梁及连续梁第1阶振型方向为水平横向，第3阶振型方向为竖向，且竖向振动加速度均显著大于水平横向振动加速度，表明桥梁结构容易在风荷载等外部水平激励下发生水平横向振动，但更应关注其在汽车冲击等竖向激励下的动力响应。

将竖向自振频率实测值与计算值进行比较（表5），实测值小于理论值，说明现状结构刚度小于理论计算刚度，表明在长期使用后该桥梁结构性能有一定的退化，结构刚度不满足设计要求。

表5 竖向自振频率实测值与计算值对比表

结构类型	阶次	自振频率计算值/Hz	自振频率实测值/Hz	实测阻尼/%	振型说明
简支梁	3	5.82	4.78	1.51	竖向振动
连续梁	3	3.09	2.81	1.16	竖向振动

(二) 行车测试结果

试验桥跨行车测试是在无任何障碍的情况下，采用测试车辆（载重约40 t）以5 km/h、10 km/h、20 km/h的速度匀速通过各桥跨最不利截面，采用动态挠度测试仪测定桥跨结构在测试车辆匀速行驶作用下的动态反应，并计算其冲击系数。

在行车测试过程中采集各测点处结构动挠度值，采用公式（2）计算主桥冲击系数：

$$1 + \mu = \frac{\eta_{d \max}}{\eta_{s \max}} \quad (2)$$

其中： $\eta_{d \max}$ 为测点处桥梁最大动挠度值； $\eta_{s \max}$ 为测点处桥梁最大静挠度值。

根据动态挠度实测值计算，最不利截面在不同车速条件下行车试验的冲击系数值在0.026~0.092之间，简支梁冲击系数平均值为0.069，连续梁中间跨冲击系

数平均值为0.064，结构实测冲击系数均小于理论计算值，表明桥面平整、行车条件良好。

五、结论

本研究通过对装配式钢便桥实施现场荷载试验，得到了其在外荷载作用下的结构效应实测结果，通过对各项测试结果及有限元模型计算值进行对比分析，可以得出以下结论：

(1) 在静力试验荷载作用下，简支梁跨中截面（TS1）挠度校验系数为0.90，满足我国现行规范中校验系数不大于1的要求；连续梁边跨跨中截面（TS4）及中间跨跨中截面（TS6）挠度实测校验系数分别为1.07和1.81，但考虑到错孔挠度的影响，按照假定总结了公式（1）对跨中挠度实测值进行修正，经过修正后的TS4、TS6挠度校验系数分别为0.98和1.53，其中TS6挠度校验系数仍不满足现行规范要求，桥梁连续梁跨承载能力无法满足设计要求。

(2) 构件应变实测值及校验系数在静力试验荷载作用下处于正常工作范围，结合挠度试验结果，简支梁结构承载能力满足使用要求。

(3) 桥梁结构容易在风荷载等外部水平激励下发生水平横向振动，但在汽车冲击等竖向激励下的动力响应实测数值显著大于水平向激励下的响应幅值。

(4) 钢便桥的竖向自振频率实测值小于计算值，说明实际结构刚度小于理论计算刚度，表明在长期使用后该桥梁结构性能有一定的退化，结构刚度不满足设计要求。

(5) 在不同车速条件下行车试验的冲击系数实测值在0.026~0.092之间，结构实测冲击系数均小于理论计算值，表明桥面平整、行车条件良好。

参考文献

[1] 邓海, 许宏伟. 车辆荷载作用下的装配式钢桁架桥应力分析与试验研究[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(12): 127-131.

[2] 许贵满, 韩海娅. 贝雷梁钢便桥动力响应影响因素分析[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2020, 33(1): 20-24.

[3] Darius Bacinskas, Zenonas Kamaitis, Donatas Jatulis et al. Field Testing of Old Narrow-Gauge Railway Steel Truss Bridge[J]. Procedia Engineering, 2013, 57: 136-143.

[4] 吴坤平. 考虑错孔挠度影响的装配贝雷梁桥荷载试验线形评价研究[J]. 湖南交通科技, 2017, 43(2): 191-196.

[5] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥梁承载能力检测评定规程: JTG/T J21-2011[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.

作者简介: 张锴(1987—), 男, 汉族, 硕士, 工程师, 主要从事桥梁检测研究工作。