

# 某连续刚构桥荷载试验

何佳, 冉舵兵, 梁波, 王兵

(重庆市建筑科学研究院, 重庆市 400016)

**摘要:**荷载试验作为桥梁投入使用前的一种验收手段,对桥梁整体承载能力的评定至关重要。成桥荷载试验能够检验桥梁结构设计是否合理,掌握桥梁结构的实际工作状态,判断结构受力是否满足设计要求,对结构的承载能力及工作状态作出综合评价,并为后续的运营养护提供原始数据。该文以某连续刚构桥为例,对荷载试验的准备工作、现场试验及数据处理等问题展开研究。

**关键词:**连续刚构; 荷载试验; 静载试验; 动载试验

连续刚构桥源于1964年的联邦德国,当时建成的桥梁为主跨208 m的本道夫桥。中国于20世纪80年代开始引入连续刚构桥,经过几十年的高速发展,部分领域已达到世界先进水平。

桥梁荷载试验作为桥梁投入使用前的一种验收手段,是对桥梁的结构设计和施工质量的一种校核和评判。试验过程中通过对控制截面关键参数(如挠度、应变、裂缝等)的采集,能够准确反映结构的受力性能和实际工作状态,进而对桥梁整体结构的承载能力进行评判。另外,成桥荷载试验报告,也是桥梁投入运营后管养部门进行现场管理及养护的原始资料。

## 1 工程概况

某连续刚构桥位于重庆市巫山县,跨径组成为(55+100+55) m 预应力混凝土连续刚构+5×30 m 预应力混凝土简支梁+6×16 m 钢筋混凝土连续板,桥梁全长466.28 m,其中连续刚构桥分左右两幅布置,如图1所示。右幅桥面宽度布置为7.5 m(车行道)+6 m(人行道)=13.5 m。设计汽车荷载:城-A级,人群荷载3.0 kN/m<sup>2</sup>;设计行车速度:40 km/h。

## 2 试验内容

### 2.1 外观检查

选取右幅桥为试验对象,荷载试验前,对桥梁上部结构、下部结构、桥面系及附属结构进行外观检查。

上部结构检查包括梁体混凝土有无风化、剥落、破损、钢筋外露、锈蚀等病害,并检查梁体是否存在不正常的变位;梁体是否有裂缝出现或裂缝的分布情况。

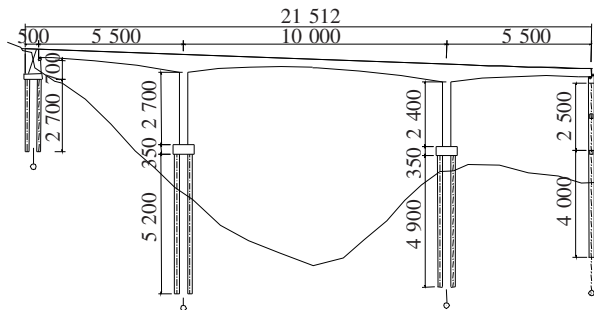


图1 某连续刚构桥桥型布置图(单位:cm)

下部结构检查桥墩及基础是否滑动、开裂和下沉,墩台有无破损等,支座是否发生剪切变形、脱空等。

桥面系构造检查铺装、护栏、排水构造物、桥上交通设施等。

### 2.2 静载试验

#### (1) 应变测试

根据试验规范设置试验控制截面,按照设计荷载计算控制截面的位置及最不利效应值(内力或变位),然后在控制截面附近施加试验荷载,使试验荷载在控制截面产生的最不利效应与设计荷载在控制截面产生的最不利效应的比值满足0.85~1.05的要求。试验过程中,对设置在控制截面顶板、腹板及底板的应变测点进行应变测试(图2、3),并计算各测点处的应力,以此来判定结构强度。

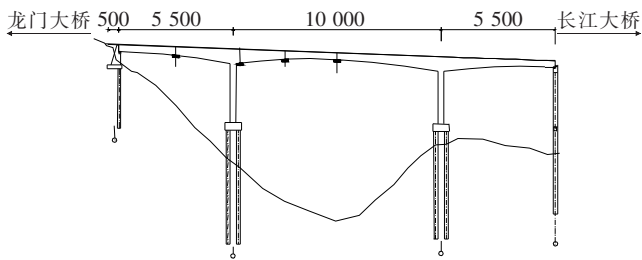


图 2 纵桥向应变测试断面布置示意图(单位:cm)

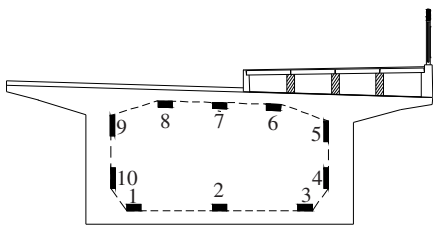


图 3 控制截面应变测点布置示意图

### (2) 挠度测试

试验过程中,在控制截面设置挠度测点(图 4、5),分析辨识结构控制截面变形状态,检验桥跨结构刚度。

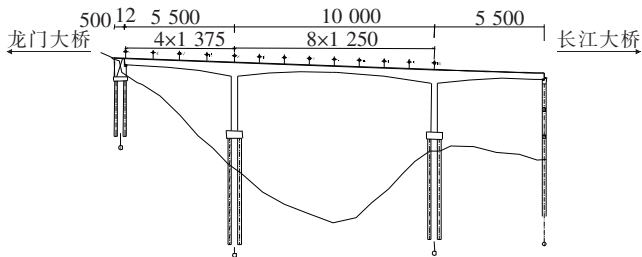


图 4 纵桥向挠度测试断面布置示意图(单位:cm)

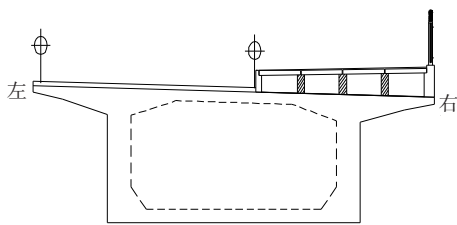


图 5 横桥向测点布置示意图

### (3) 裂缝测试

根据外观检查结果,若在控制截面附近发现裂缝,则选择具有代表性的裂缝,观察裂缝在试验过程中宽度、长度的变化情况;同时观察控制截面附近是否出现新裂缝,若有,则记录裂缝出现的时间、宽度、长度及变化情况,通过以上数据,判断桥跨结构的抗裂性。

### 2.3 动载试验

桥梁结构的动态性能包括动力特性和动力响应:动力特性包括自振频率、阻尼比和振型等;动力响应包括动应变、动挠度、冲击系数测试等。通过动载试验得到的动态参数评价桥梁的整体动力性能。

#### (1) 脉动试验

采用随机环境激励法,在桥梁不受任何车辆荷载作用下,通过高灵敏度拾振器拾取桥梁在大地振动、风荷载、水荷载等环境荷载作用下,桥梁的时域曲线,通过频谱分析得出桥梁主要频率成分(频域曲线),然后从频域曲线中得到桥梁 1 阶自振频率。

#### (2) 跑车试验

在桥面无障碍的情况下,选用一辆 450 kN 试验车辆,分别以 10、20、30、40 km/h 的速度匀速往返通过试验桥梁。测定桥梁结构在移动荷载作用下的受迫振动响应:动应变、动挠度及衰减性能。

#### (3) 刹车试验

在桥面无障碍的情况下,选用一辆 450 kN 试验车辆,以 20 km/h 的速度行驶,行驶至中跨跨中处突然制动。测定桥梁结构在制动荷载作用下的受迫振动响应:动应变、动挠度及衰减性能。

## 3 模型建立

为了使理论分析与实际结构更接近,采用 Midas/Civil 和桥梁博士分别建立计算模型。在两套模型结果相近或一致的情况下,提取控制截面内力、应力及挠度理论结果。

右幅桥桥梁整体受力模型中将上下部结构(含主梁及墩柱)划分成 121 个梁单元。梁体的自重采用软件中自带的自重工况功能(自重系数为  $Z$  方向,值为 -1);其余二期铺装荷载及人行道构件荷载均采用梁单元荷载进行模拟,车道荷载、人群荷载分别采用软件自带的车道功能按正、偏载进行施加;横、纵向折减系数均为 1.00。

主要计算参数如下:

计算跨径:  $(54.5 + 100 + 54.5) \text{ m}$ 。

主梁 C50 混凝土:弹性模量  $E = 3.45 \times 10^4 \text{ MPa}$ 、线膨胀系数为  $1.0 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ 、重度为  $25 \text{ kN/m}^3$ 。

墩柱 C40 混凝土:弹性模量  $E = 3.25 \times 10^4 \text{ MPa}$ 、线膨胀系数为  $1.0 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ 、重度为  $25 \text{ kN/m}^3$ 。

全桥边界条件采用以下方式:在墩底设置固定支座,限制节点处的转动、平动共计 6 个方向的自由度;边跨主梁端部设置活动支座,限制  $Z$  方向平动自由度,释放其余方向转动及平动自由度;主梁与墩柱处采用刚性连接进行处理,限制所有方向的转动及平动自由度。理论计算模型如图 6、7 所示,控制内力及效率系数如表 1 所示。

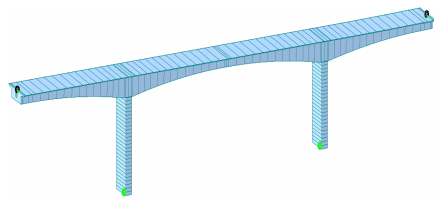


图6 Midas/Civil 计算模型

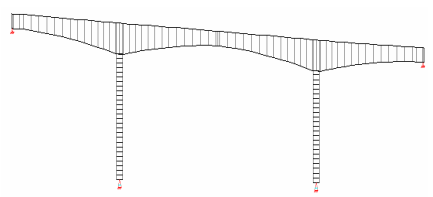


图7 桥梁博士计算模型

表1 试验工况、控制内力、效率系数

试验工况	控制内力值/ (kN·m)	试验内力值/ (kN·m)	效率系数
工况1 右幅0~1跨最大正弯矩(J1截面偏载)	17 944	17 900	1.00
工况2 右幅0~1跨最大正弯矩(J1截面正载)	17 944	17 900	1.00
工况3 右幅1号墩顶最大负弯矩(J2截面偏载)	-53 850	-47 800	0.89
工况4 右幅1号墩顶最大负弯矩(J2截面正载)	-53 850	-47 800	0.89
工况5 右幅1~2跨最大正弯矩(J3截面偏载)	19 467	17 900	0.92
工况6 右幅1~2跨最大正弯矩(J3截面正载)	19 467	17 900	0.92

4 试验过程及测试结果

为了消除环境对试验结果的影响,宜选择温度变化不大的凌晨或早上进行试验。

由于应变测试对温度变化较为敏感,室外试验应采用半桥方式粘贴应变片,以减小温漂影响。

动载试验时,桥梁附近不可有其他人为振动源。

4.1 试验过程

荷载试验开始前对称重过的车辆进行编组,将配载车辆进行分组,分组完成之后按照以下顺序对相应工况进行试验:

- (1) 首先安排部分试验车辆驶过桥梁,对结构进行预载。
- (2) 预载完成之后将所有车辆进行分级加载,加载完成待受力状态稳定后(加载完成后 10 min 内)开始采集检测数据。
- (3) 数据采集完毕,对结构进行卸载,待车辆离开桥面读数稳定后,采集卸载后的数据。
- (4) 第一个工况完成之后依次按照第(2)、(3)步的顺序进行下一个工况的试验。
- (5) 所有试验工况完成之后,拆除应变连接导线、检测设备拆除,并将桥面遗留杂物清理干净后离开试验现场。

4.2 应变测试结果

应变采用无线静态应变仪进行采集。表2为部分

工况下控制截面的应变。

表2 工况1下S1截面应变结果

测点	$S_t / \mu\epsilon$	$S_e / \mu\epsilon$	$S_p / \mu\epsilon$	$S_s / \mu\epsilon$	$S_e / S_s$	$(S_p / S_t) / \%$
1	24.9	24.5	0.4	32.17	0.76	1.61
2	23.6	23.2	0.4	32.52	0.71	1.69
3	21.4	21.1	0.3	32.86	0.64	1.40
4	0.2	0.2	0	0.28	0.71	0.00
5	-18.5	-17.8	-0.7	-21.70	0.82	3.78
6	-17.2	-16.9	-0.3	-28.27	0.60	1.74
7	-15.5	-15.1	-0.4	-27.64	0.55	2.58
8	-12.3	-11.6	-0.7	-26.96	0.43	5.69
9	-12.8	-11.9	-0.9	-19.52	0.61	7.03
10	-0.2	-0.2	0.0	-0.52	0.39	0.00

注: $S_t$  为总应变; $S_e$  为弹性应变; $S_p$  为残余应变; $S_s$  为理论应变。

从测试结果来看:S1截面各测点应力校验系数处于0.39~0.82之间,小于规范限值( $f_{1p} \leq 1.0$ )的要求,主梁处于弹性工作状态;卸载后最大相对残余变形为7.03%,满足规范要求。

4.3 挠度测试结果

挠度采用精密水准仪进行测试。表3为部分工况下控制截面的挠度。

从测试结果来看:0~1跨各测点挠度校验系数为0.52~0.75,小于规范限值( $f_{1p} \leq 1.0$ )的要求,主梁处

于弹性工作状态;卸载后最大相对残余挠度为12.82%,满足规范要求。

表 3 工况 1 挠度测试结果

测点		$S_t/$	$S_e/$	$S_p/$	$S_s/$	$(S_p/S_t)/$	
		mm	mm	mm	mm	$S_e/S_s$	%
N1	左	0.51	0.61	-0.10			
	右	-0.01	-0.09	0.08			
N2	左	-4.29	-3.74	-0.55	-5.00	0.75	12.82
	右	-3.40	-3.01	-0.39	-5.00	0.60	11.47
N3	左	-3.28	-3.08	-0.20	-5.55	0.55	6.10
	右	-3.43	-3.42	-0.01	-5.55	0.62	0.29
N4	左	-1.89	-1.67	-0.22	-2.81	0.59	11.64
	右	-1.64	-1.45	-0.19	-2.81	0.52	11.59
N5	左	-0.32	0.14	-0.46			
	右	0.15	0.22	-0.07			

注: $S_t$  为总挠度; $S_e$  为弹性挠度; $S_p$  为残余挠度; $S_s$  为理论挠度。

4.4 裂缝测试结果

试验前对控制截面进行外观检测,未发现控制截面处有裂缝存在。各工况加载、卸载后,控制截面均未发现混凝土有开裂现象。

4.5 动载试验结果

在箱梁内部布置加速度传感器,对桥梁的振动信号进行采集,通过频谱分析得到桥梁振动频域曲线(图8),然后得到桥梁的1阶自振频率(表4)。

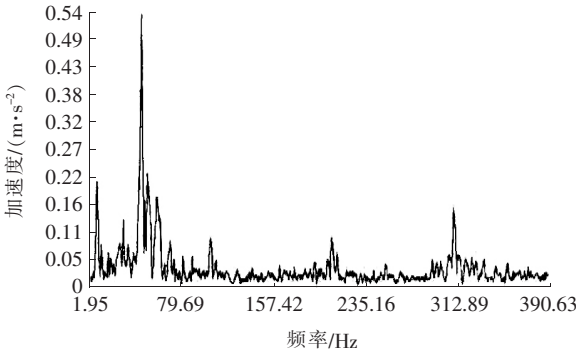


图 8 桥梁频域曲线

将加速度传感器采集到的行车余振时域曲线及刹车余振时域曲线进行波形分析,得到桥梁的阻尼比,如表4所示。

由表4可知:桥梁1阶实测频率值为1.286 Hz,

表 4 阻尼比及频率测试结果

跑车车速/ (km · h <sup>-1</sup> )	阻尼比	实测 1 阶 频率/Hz	理论 1 阶 频率/Hz
10	0.014		
20	0.018		
20	0.014	1.286	0.998
30	0.009		
40	0.009		

大于计算值0.998 Hz,表明结构实际刚度大于理论刚度;阻尼比平均值为0.013,属小阻尼振动。

5 结语

荷载试验作为一种客观和精密的检测手段,能够准确地反映桥梁的受力状态。检测方案中,目标参数的选取必须能够反映桥梁的特征:比如应变反映结构强度、挠度反映结构刚度等。试验过程中,首先应对外观进行检查,确定实际结构的外观病害状态,然后进行预载,使桥梁进入工作状态,然后对试验加载及卸载过程中的目标参数进行采集,用实测数据与理论数据进行对比,以此判别桥梁的实际强度、刚度及抗裂性。

另外,根据规范的规定,当无法在箱梁内部布置应变测点时,可将测点布置在外表面。但结果评定时提取理论值的位置须与实际测点位置一致,且对测点布置在底板(顶板)顶面或底面而言,在某一工况下,底板的顶面和底面均位于截面中性轴的同一侧(受拉区或受压区),只是应力数值大小区别而已,对结果评定没有影响。振动信号测点布置亦是如此,测点处采集到的信号是对桥梁整体动态性能的反映,放在桥面或箱梁内部均可作为桥梁动力性能评价的依据,对结果无影响。

参考文献:

[1] 张军辉.大跨度连续刚构梁桥荷载试验评定与研究[D].武汉理工大学硕士学位论文.2009.

[2] JTG/T J21-01-2015 公路桥梁荷载试验规程[S].

[3] CJJ/T 233-2015 城市桥梁检测与评定技术规范[S].

[4] 湛润水,胡钊芳.公路桥梁荷载试验[M].北京:人民交通出版社,2003.

[5] 鲁洁.高墩大跨径预应力混凝土连续刚构桥梁荷载试验评定技术研究[D].长安大学硕士学位论文.2006.