

CD型装配式公路钢桥通载性能研究

冯绍攀¹, 姚文奇², 辛雷¹, 毕登山¹

(1. 中冶建筑研究总院有限公司, 北京市 100088; 2. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司)

摘要:对 CD 型装配式公路钢桥进行通载试验, 并采用 Ansys 有限元软件进行试验全过程模拟。结果表明: 实测数值与理论计算值符合程度较好, 钢材、构件加工制造工艺可以满足预定指标要求。桥梁在活载与恒载的组合效应下, 通行承载力满足设计要求。

关键词:CD 型装配式钢桥; 通载试验; 动力响应; 力学性能

CD 型装配式公路钢桥(下文简称 CD 型钢桥)作为一种适用于灾后大跨径桥梁的快速抢通战备钢桥, 还可用于危桥改造、施工栈桥、施工条件不足的桥梁建设。其是在德国 Krupp 钢桥的基础上, 结合中国现有钢材和加工制造技术而设计的应急抢修桥梁。由于工程需要, 架设前为检验 CD 钢桥的通载性能是否满足要求, 对该桥进行通载性能测试, 试验在工厂进行, 该文结合有限元计算结果与实测结果对比, 以验证 CD 型钢桥的实用性。

1 CD 型装配式公路钢桥特点及构造

CD 型钢桥设计有 Q345 和 Q390 两种钢材类型, 可适应公路 I 级、公路 II 级、汽车 20 级、HS-15、HS-20、HS-25、城-A、HA 共 8 个通行荷载等级, 其他荷载等级根据相应荷载标准另行验算是否可以通过, 车道类型设计有单车道和双车道两种类型。

CD 型钢桥的基本单元为等腰三角形和直角三角形(图 1), 基本单元腹杆为 H200 mm×150 mm×6 mm×8 mm, 弦杆为 200 mm×200 mm×6 mm×8 mm。可通过拼装不同的节段、不同层数、增设加强弦杆来组合不同跨径桥梁。当采用 Q345 时, 对公路 II 级荷载作用的临时性桥梁, 单车道跨径为 25.6~86.4 m, 双车道跨径为 25.6~67.2 m; 若采用 Q390 钢, 上述相同拼装截面形式桥梁最大跨径可增加一节, 因而 CD 型钢桥最大跨径为 89.6 m。

CD 钢桥针对 60~90 m 跨径桥梁快速应急抢修有较大的优势, 目前中国已有的 321 型和 200 型钢桥主要用于 60 m 以下桥梁的应急抢修。CD 钢桥单个

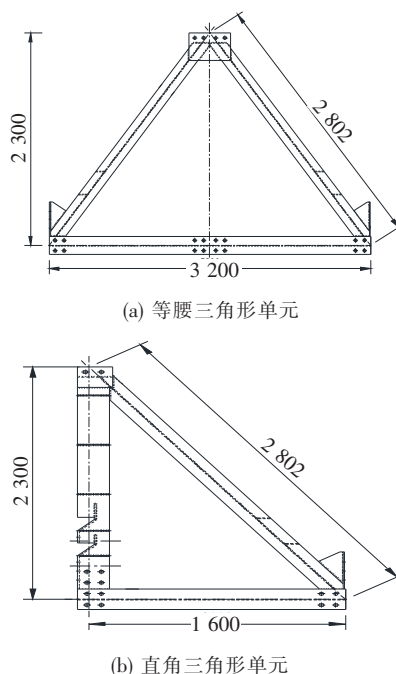


图 1 桁架基本单元(单位: mm)

三角形拼装单元最大质量为 400 kg, 安装、起吊方便, 拼装速度快。

2 CD 型装配式公路钢桥通载试验

2.1 试验桥概况

试验桥为有第三弦杆(图 2)的双排单层(C3DS)型单车道桥梁, 桥面净宽 4.2 m, 单层桁高 2.3 m, 钢材采用 Q390 钢, 该类桥在公路 II 级荷载下, 最大跨径为 54.4 m, 试验桥跨径为 54.4 m, 每节段长 3.2 m, 共 17 节。



图 2 试验桥全景

2.2 试验内容

试验内容包括静载试验和动载试验,静载试验测试汽车荷载作用下桥梁整体非弹性变形、静载挠度、控制杆件轴向应力;动载试验测试跨中弦杆轴向应力及挠度。

应变测试杆件为受力最不利的跨中上下弦杆、端部斜腹杆正应变,应变片均贴在基本单元面内的杆件上;挠度测点布置在下弦底部跨中,应变测定布置如图 3、4 所示。

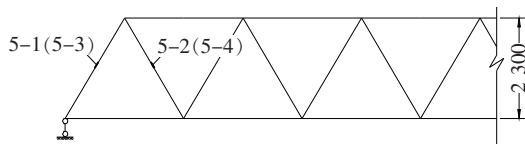


图 3 腹杆应力测点(单位:mm)

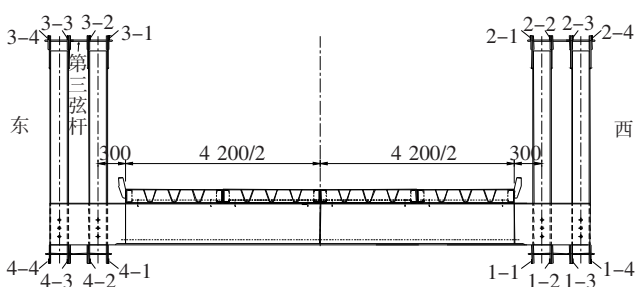


图 4 跨中弦杆应力测点(单位:mm)

2.3 加载方案

静载加载:现场采用两辆 20 t 标准车和一辆 30 t 重车加载,加载方式为一次性加载,车载纵向布置如图 5 所示,横向车轮距桥面板边缘 200 mm 偏载布置。

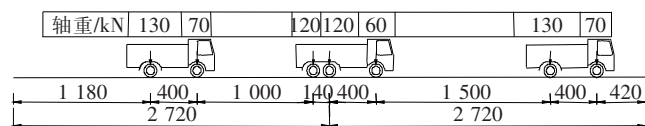


图 5 试验荷载布置图(单位:cm)

荷载车实际重量如表 1 所示。

动载测试:采用表 1 中的单辆重车以速度 10 km/h

表 1 荷载车实测轴重 kg

车辆类型	总重 G	前轴重 G1	后轴重 (G2+G3)	后轴重 G2
重车	30 460	6 300	24 160	—
主车 1	20 520	6 900	—	13 620
主车 2	19 380	6 360	—	13 020

进行无障碍跑车试验,从桥头跑至桥尾,测定在跑车荷载作用下,桥梁敏感杆件的应变动力响应。

2.4 试验结果

(1) 静载试验结果

为减小拼装间隙对测试结果的不确定性影响,获得更可靠的数据,静载试验预先进行了两次预加载,第 1 次西侧偏载加载,第 2 次东侧偏载加载,第 3 次正式加载(偏东侧)。

应力测试结果:车辆偏载作用下,应力测试结果如表 2 所示。应力 σ 由实测应变按式(1)求得:

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (1)$$

表 2 静态应力测试结果

应变片编号	应力/MPa			
	测次 1 (偏西侧)	测次 2 (偏东侧)	测次 3 (偏东侧)	
测杆 1	1-1	65.3	47.0	48.9
	1-2	84.2	59.2	64.3
	1-3	79.7	50.4	60.5
	1-4	63.5	40.7	49.0
测杆 2	2-1	-89.1	-77.2	-75.6
	2-2	-102.9	-68.1	-69.9
	2-3	-79.0	-56.7	-65.2
	2-4	-100.2	-71.4	-86.1
测杆 3	3-2	-73.6	-92.9	-91.0
	3-3	-69.5	-80.2	-76.9
	3-4	-73.3	-71.9	-99.1
	4-1	61.1	84.3	60.2
测杆 4	4-2	57.2	66.9	73.2
	4-3	54.7	69.0	78.9
	4-4	44.4	52.4	63.6
	测杆 5-1	5-1	28.8	29.5
5-3		—	—	—
5-2		-38.2	-31.9	-31.0
测杆 5-2	5-4	-36.5	-52.9	-51.2

注:因同一节并排的 2 根杆件受力相似,将同一位置的杆件统称为一个测杆,并取其应力平均值与模拟结果对比更有可比性。

式中: ϵ 为实测应变($\mu\epsilon$); E 为材料弹性模量(MPa),取 2.06×10^5 MPa。

挠度测试结果见表3。空载时,跨中挠度为150 mm,车辆静载作用下,最大挠度为145 mm。

表3 挠度测试结果

项目	跨中挠度/mm		
	西侧桁架	东侧桁架	平均值
自重(空载)	150	150	150
静载挠度	123	145	132

(2) 跑车试验测试结果

跑车试验可测得各测点应力时程曲线,进一步得到各测点应力最大值,为保证试验数据的可靠性,试验进行了两次跑车试验,两次测试结果换算为应力如表4所示,取其平均值作为测点实测应力值。

表4 动态应力测试结果

应变片编号	应力/MPa			
	测次1	测次2	平均值	
测杆1	1-1	37.8	36.1	36.9
	1-2	42.6	41.2	41.9
	1-3	43.7	42.0	42.8
	1-4	32.9	31.7	32.3
测杆2	2-1	-51.9	-51.2	-51.6
	2-2	-40.8	-	-40.8
	2-3	-43.8	-42.5	-43.1
	2-4	-56.1	-55.1	-55.6
测杆3	3-2	-50.3	-52.7	-51.5
	3-3	-43.4	-44.1	-43.7
	3-4	-56.3	-57.9	-57.1
	4-1	32.0	33.8	32.9
测杆4	4-2	42.8	41.8	41.8
	4-3	42.5	44.9	43.7
	4-4	35.1	36.6	35.8
	5-1	21.3	21.2	21.3
测杆5-1	5-3	-	-	-
	5-2	-21.7	-22.8	-22.3
	5-4	-53.6	-52.2	-54.8

跑车时,跨中最大挠度测试结果如表5所示。

表5 动载挠度测试结果 mm

跨中西侧	跨中东侧	平均值
54	56	55

3 有限元模拟结果与试验对比

3.1 模型介绍

采用有限元软件 Ansys 对试验过程进行仿真分析,弦杆、横梁、腹杆采用 Beam188 单元模拟,抗风拉杆采用 Link8 单元模拟,全桥共 1 552 个单元。不考虑结构单元间的装配间隙,节点间连接假定为刚性连接。将弦杆与加强弦杆单元节点自由度全部耦合。因桥面板仅作为传力构件,因此模型中不建桥面板单元,将其自重等效折算为横梁的自重,模型中材料参数如表6所示。

表6 材料参数

部件	弹性模量/ MPa	阻尼比	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	泊松比
主结构	2.06×10^5	0.02	7 850.0	0.3
虚梁	2.06×10^2	0.02	7.85	0.3
端横梁	2.06×10^5	0.02	26 447.6	0.3
中横梁	2.06×10^5	0.02	45 045.3	0.3

将车轮荷载等效为集中荷载进行施加,为方便施加车轮荷载,在纵向车辙位置建立虚梁,虚梁与横梁间采用弹簧单元(Combin14 单元)连接,弹簧单元只传递竖向力,不传递水平力,整体模型如图6所示。

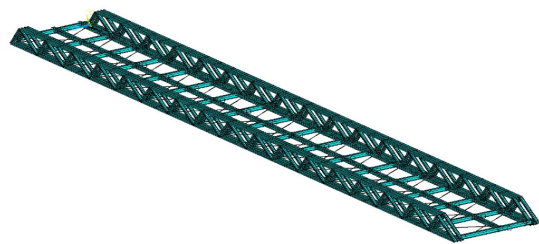


图6 模型图

荷载工况包括:①只有自重作用;②只有静车载作用;③只有移动车载作用。

3.2 结果对比

将试验测试结果与有限元模拟结果进行对比,因实际结构采用螺栓连接,存在不均匀拼装间隙,从而引起杆件受力不均匀,测试结果不确定性大,而有限元模拟则忽略了拼装间隙。在第2次、第3次加载时,连接间隙得到很大程度的压实,因此,静载测试结果取第2、3次的平均值与理论值对比。

3.2.1 自重作用下对比

(1) 模拟结果

模型中不考虑装配间隙、加工误差,由自重引起的跨中最大位移为 79 mm。自重引起的上弦杆最大压应力为 -62.9 MPa,下弦杆最大拉应力为 62.3 MPa。

(2) 模拟与实测对比

结构自重引起的挠度实测值(150 mm)与计算值(79 mm)相差较大。实测挠度较大主要是由于实际结构杆件装配间隙而引起了额外的挠度。

3.2.2 静载作用下对比

(1) 模拟结果

将实测加载车轮轴重(表 1)施加于模型中相应位置。静车载引起的结构最大位移为 96 mm,位于偏载侧的跨中。静车载引起的上弦杆最大压应力为 -86.1 MPa,下弦杆最大拉应力为 81.4 MPa。

由于各杆件除了受轴力外,还受弯矩作用,因此杆件应力沿截面高度变化,最大拉压应力发生在上下边缘。经计算,试验中各测杆粘贴应变片位置处的平均应力模拟值如表 7 所示。

(2) 模拟与实测对比

静载引起的杆件应力:除个别杆件测试值与理论值有偏差外,其余杆件实测值与理论值偏差在 15% 以内,符合程度较好(表 7)。

表 7 静载下测杆应力对比

测杆编号	实测值/MPa			计算值/MPa	相对偏差/%
	测次 2	测次 3	平均值		
1	49.33	55.68	52.50	54.70	4.18
2	-68.35	-74.20	-71.25	-62.60	-12.17
3	-81.67	-89.00	-85.34	-77.90	-8.71
4	68.15	68.98	68.56	67.90	-0.97
5-1	29.50	27.50	28.50	-29.90	4.91
5-2	-42.40	-41.10	-41.75	29.10	-30.30

车辆荷载引起的挠度实测值与计算值相差较大,其结果见表 8。实测挠度较大主要是由于实际结构杆件装配间隙而引起了额外的挠度。

表 8 静载下挠度对比 mm

项目	跨中西侧	跨中东侧	平均值
实测值	145	123	132
计算值	96	78	87

3.2.3 跑车试验对比

(1) 模拟结果

重车以 10 km/h 的速度从桥头跑至桥尾,对该过

程进行动力时程分析,由跑车荷载引起的跨中挠度和测杆应力如图 7~10 所示。

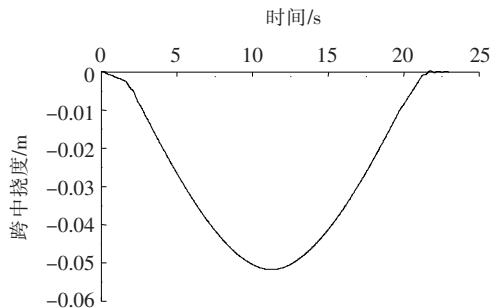


图 7 跨中挠度时程曲线

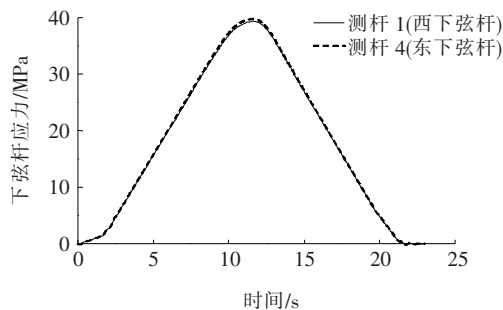


图 8 测杆 1、4 应力时程曲线

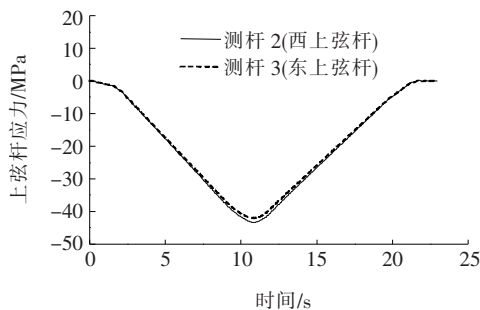


图 9 测杆 2、3 应力时程曲线

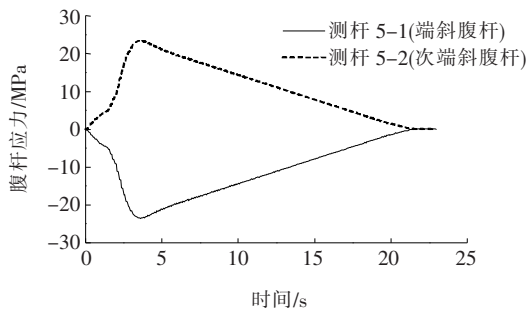


图 10 测杆 5-1、5-2 应力时程曲线

由图 7 可知:跨中挠度最大值为 5.2 cm。

由图 8 可知:下弦杆测杆 1 轴向应力最大值为 39.3 MPa,下弦杆测杆 4 轴向应力最大值为 39.8 MPa。

由图9可知:上弦杆测杆2轴向应力最大值为 -43.3 MPa,上弦杆测杆3轴向应力最大值为 -42.1 MPa。

由图10可知:受压端腹杆测杆5-1轴向应力最大值为 -23.4 MPa,受拉端腹杆测杆5-2轴向应力最大值为 23.5 MPa。

(2) 模拟与实测对比

跑车荷载作用下,挠度实测值与计算值基本一致,其结果见表9,主要原因是经过前次加载,装配间隙得到有效压实,杆件受力更加均匀。

表9 跑车荷载挠度对比 mm

项目	跨中西侧	跨中东侧	平均值
实测值	54	56	55
计算值	52	52	52

跑车荷载引起的杆件应力:杆件应力测试值与理论值整体上符合程度较好(表10)。由表10可得:偏差在15%以内,主要原因为模型未考虑桥面不平顺性的影响。对比实测值与理论值,可求得速度 10 km/h时,桥梁冲击系数为 1.147 。

表10 跑车荷载下测杆平均应力对比

测杆 编号	实测值/MPa			计算值/ MPa	相对偏 差/%
	测次1	测次2	平均值		
1	39.25	37.75	38.48	39.30	2.13
2	-48.15	-49.60	-47.78	-42.10	-11.89
3	-50.00	-51.57	-50.77	-43.30	-14.71
4	38.10	39.275	38.55	39.80	3.24
5-1	21.30	21.20	21.30	23.50	10.33
5-2	-21.70	-22.80	-22.30	-23.40	4.93

4 自重与跑车组合下受力分析

通过前文通载试验数据与有限元模拟结果进行对比,因实际结构中构件的加工、装配等误差使构件的受力性能与理论值存在一定的偏差,但差值在15%以内,证明了材料冶炼、构件加工、结构拼装质量可满足桥梁预定性能的要求。

因实测应力仅为相对应力,即车辆荷载引起的应力,而非杆件的绝对应力,对桥梁的安全性评价还应考虑车辆荷载与恒载的组合效应。

将表2中偏载引起的应力实测值与自重引起的应力计算值进行叠加,得到弦杆最大拉应力为 146.6 MPa,最大压应力为 -162.0 MPa,腹杆最大拉应力为 61.9 MPa,最大压应力为 -73.0 MPa,以上应力均小于Q345钢材的容许应力值。

5 结论

(1) 通载试验实测数据与模拟结果符合程度较好,说明实际结构的材料冶炼、构件加工、结构拼装等质量可满足桥梁预定性能的要求。

(2) 通载试验实测应力与有限元计算值差异在15%范围内,桥梁冲击系数为 1.147 ,测试结果可用来指导设计分析。

(3) 静活载与自重引起的组合应力均小于材料的容许应力,活载引起的挠度值小于计算跨径的 $1/400$,结构安全可靠,可以投入使用。

(4) 该文未考虑装配间隙对桥梁刚度的影响,仅对车辆荷载作用下挠度进行了验算,当该桥设计为永久桥梁时,还应对桥梁绝对挠度进行研究并加以控制。

参考文献:

- [1] 谭昌富,段孟霞,喻忠权,等. 浅谈CD型装配式公路钢桥[J]. 公路,2014(6).
- [2] 吴涛,陈勇. 装配式钢桥的检测与评估方法的研究[J]. 华东公路,2016(1).
- [3] 杨兆麟. 321型装配式公路钢桥在公路抢险救援中的应用[J]. 四川建材,2017(7).
- [4] 喻忠权,张传凡,尧丹伟. HD200型装配式公路钢桥应力测试与评估[J]. 公路,2003(4).
- [5] 黄海棠,蒙方成. ZB-200型钢桥挠度研究及实桥加载试验验证[J]. 中外公路,2018(6).
- [6] 刘源,马鹏,张学玲. 装配式公路钢桥结构静、动态有限元分析[J]. 军事交通学院学报,2018(2).
- [7] JTG D64—2015 公路桥涵钢结构及木结构设计规范[S].