

波形钢腹板组合箱梁桥荷载试验研究

李晓刚

(中交基础设施养护集团有限公司甘肃分公司, 甘肃 兰州 730030)

摘要:为检验某新建波形钢腹板-钢底板-混凝土顶板组合箱梁桥的施工质量及实际承载能力,分析该桥在等效车辆荷载作用下的静、动力特性,运用结构有限元分析软件 MIDAS CIVIL 对该桥建立有限元仿真模型。通过现场静载试验及动载试验,实测桥梁结构在等效车辆荷载下的静、动态数据并与理论计算值进行对比分析,以此验证简化模型的合理性和准确性,并对桥梁施工质量和实际承载能力做出评价。

关键词:桥梁工程;波形钢腹板;静载试验;组合箱梁;动载试验;承载能力

中图分类号: U446

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2023)06-0226-04

0 引言

波形钢腹板组合箱梁桥比传统预应力混凝土桥梁具有结构自重轻、材料利用充分、预应力效率高等优点,尤其避免了混凝土桥梁在长期运营后由于腹板裂缝导致的下挠问题。基于这些优点,波形钢腹板组合箱梁桥自从出现以来便得到极大关注,并在一些项目中逐步得到运用。近年来,一种新型的波形钢腹板-钢底板-混凝土顶板组合箱梁桥得到大量运用。由于该种箱梁结构在工厂中便于拼装及焊接,上部结构施工质量能够得到保证。同时,由于钢结构自重较轻、易于架设、施工进度较快等优点,该种桥型越来越多地被运用到目前的新建项目中。

本文以甘肃省内某新建项目四跨波形钢腹板-钢底板-混凝土顶板组合箱梁桥为例,对该桥建立有限元仿真模型进行理论分析,通过现场静动载试验得出实测数据并与理论计算值进行对比分析,进而对桥梁施工质量及实际承载能力做出评价,为桥梁将来的运营及养护提供一定理论依据。

1 工程概况

该桥建于2020年,桥梁上部结构采用 4×30 m等截面连续波形钢腹板-钢底板-混凝土顶板组合箱梁,下部结构采用柱式墩台、钻孔灌注桩基础。箱梁为双箱单室,箱梁之间采用K型撑连接,现浇桥面板。钢箱梁高1.25 m,底板宽3 m,上翼板与底板钢材采用Q390。波形钢腹板钢材采用Q345,型号为

BCSW1200型。现浇混凝土顶板厚25 cm,采用C50混凝土。桥梁中支点两侧8 m范围内腹板厚度12 mm,底板厚度14 mm,并在底板浇筑23 cm C50微膨胀混凝土。距边支点7.2 m范围内腹板厚度12 mm,底板厚度14 mm。跨中部分腹板厚度10 mm,底板厚度16 mm。桥面设计宽度 $(0.5+11.25+0.5)$ m;设计荷载为公路I级。桥梁立面及横断面见图1~图3。

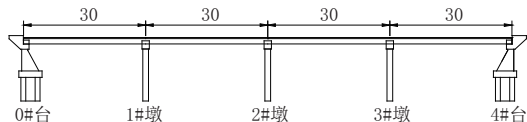


图1 桥梁立面图(单位:m)

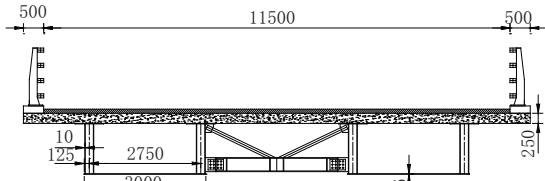


图2 跨中断面图(单位:mm)

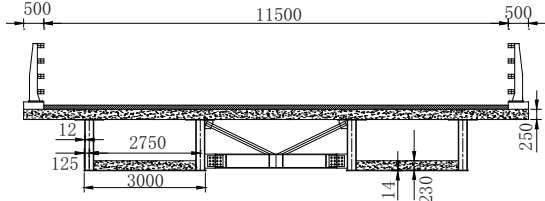


图3 梁端断面图(单位:mm)

2 截面特性计算

2.1 抗弯惯性矩

波形钢腹板由于折皱效应导致其纵向刚度非常小,因此截面竖向抗弯惯性矩计算仅计入混凝土顶板与钢底板组成的有效截面^[1](见图4)。

2.2 剪切面积

波形钢腹板组合梁剪力由波形钢腹板承担且波

收稿日期: 2022-07-23

作者简介: 李晓刚(1987—),男,本科,工程师,从事桥梁检测及结构分析工作。

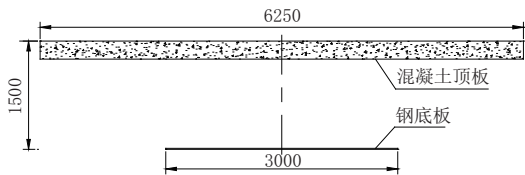


图 4 抗弯惯性矩计算截面(单位:mm)

形钢腹板剪应力沿梁高均匀分布^[1],腹板剪切变形对波形钢腹板整体变形行为影响显著,波形钢腹板剪切变形引起的主梁挠度不可忽略^[2]。波形钢腹板有效剪切面积按下式计算^[1]:

$$A_w = h_w t_w \eta$$
$$\eta = (a_w + b_w) / (a_w + c_w)$$

式中: A_w 为波形钢腹板的等效面积, mm^2 ; h_w 为波形钢腹板竖直方向的高度, mm ; t_w 为波形钢腹板的厚度, mm ; η 为波形钢腹板形状系数; a_w 为波形钢腹板直幅段长度, mm (见图 5); b_w 为波形钢腹板斜幅段投影长度, mm (见图 5); c_w 为波形钢腹板斜幅段长度, mm (见图 5)。

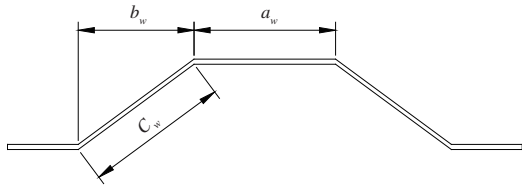


图 5 波形钢腹板形状图示

2.3 扭转惯性矩

波形钢腹板组合梁扭转惯性矩按下式计算^[1]:

$$J_t = \frac{4A_m^2}{\frac{h_0}{n_s t_1 (1+\alpha)} + \frac{h_0}{n_s t_2 (1+\alpha)} + \frac{b_0}{t_3 (1+\alpha)} + \frac{b_0}{t_4 (1+\alpha)}}$$

式中: J_t 为扭转惯性矩, mm^4 ; A_m 为箱型薄壁中心线所围面积, mm^2 ; n_s 为波形钢腹板和混凝土的剪切变形模量比; t_1 、 t_2 为波形钢腹板厚度, mm ; t_3 、 t_4 为顶板、底板厚度, mm ; α 为修正系数, $\alpha=0.4h_0/b_0-0.06$,且当 $h_0/b_0 \leq 0.2$ 时, $\alpha=0$; h_0 为顶板、底板中线间的距离, mm ; b_0 为波形钢腹板中线间的距离, mm 。

3 静载试验

3.1 建立模型

采用 MIDAS CIVIL 对该桥建立仿真模型,横向分为两片箱梁。箱梁截面采用程序组合梁截面,将波形钢腹板按照剪切面积相等原则等效为直腹板,按照本文 2.1~2.3 条计算结果对截面特性进行修正。桥梁有限元模型见图 6。

3.2 试验方案

3.2.1 加载效率

按照设计活载对桥梁进行加载,得到桥梁在活



图 6 桥梁有限元模型

载作用下的内力包络图,选择受力最不利截面为试验控制截面,以最不利截面内力为控制内力。经计算,确定本桥共 3 个控制截面,分别为 I-I 边跨最大正弯矩截面、II-II 墩顶最大负弯矩截面、III-III 中跨最大正弯矩截面。每个截面分偏载和中载两种试验工况,全桥共 6 个试验工况。每个工况采用 4 辆三轴加载车作为等代荷载进行加载,单辆车重 40 t,车辆轴载分布为前轴 8 t,中后轴各 16 t,每个加载位横向布置两辆车。各工况加载纵向布置图见图 7。

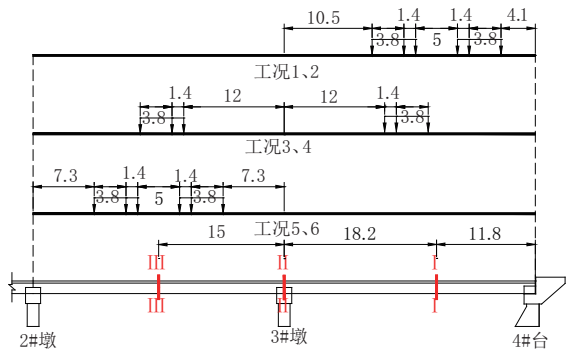


图 7 各工况加载纵向布置图(单位:m)

经计算,各工况加载效率均介于 0.85~1.05 之间,满足规范要求^[3],具体荷载效率见表 1。

表 1 加载效率表

工况	控制荷载	试验弯矩 / (kN·m)	控制弯矩 / (kN·m)	加载效率	控制梁号
1	I-I 截面偏载	3 964.5	4 121.3	0.96	4-1# 梁
2	I-I 截面中载	3 068.2	3 096.4	0.99	4-1# 梁
3	II-II 截面偏载	-3 457.3	-3 819.5	0.91	4-1# 梁
4	II-II 截面中载	-2 410.4	-2 673.6	0.90	4-1# 梁
5	III-III 截面偏载	3 029.7	3 333.3	0.91	3-1# 梁
6	III-III 截面中载	2 437.5	2 538.3	0.96	3-1# 梁

3.2.2 测点布置

控制截面应变及挠度测点布置见图 8、图 9。

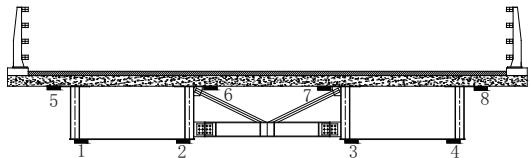


图 8 应变测点布置图

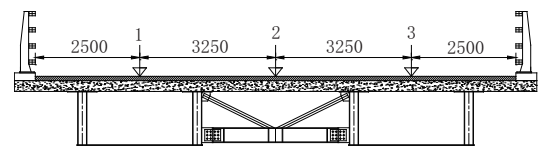


图 9 挠度测点布置图(单位:mm)

3.3 试验结果

由表 2 可知, 试验桥跨在各工况车辆荷载作用下实测挠度横向分布与理论计算结果基本相符, 反映了主梁在各加载工况下的变形趋势。各工况作用下挠度实测值均小于理论值, 校验系数最大值为 0.85, 满足规范^[4]中校验系数应小于 1 的要求; 相对残余挠度最大值为 7.80%, 满足规范^[4]中相对残余挠度应小于 20%的要求。

表 2 各工况下挠度测试结果

工况	项 目	测点编号		
		1	2	3
1	实测值 /mm	15.79	12.05	9.49
	计算值 /mm	20.52	16.32	12.12
	校验系数	0.77	0.74	0.78
	相对残余挠度 /%	3.20	2.10	2.80
2	实测值 /mm	13.81	12.94	12.28
	计算值 /mm	16.33	16.33	16.33
	校验系数	0.85	0.79	0.75
	相对残余挠度 /%	0.30	0.20	0.60
5	实测值 /mm	13.09	9.87	7.02
	计算值 /mm	16.84	13.26	9.69
	校验系数	0.78	0.74	0.72
	相对残余挠度 /%	7.80	1.10	0.30
6	实测值 /mm	10.67	10.01	10.15
	计算值 /mm	13.27	13.27	13.27
	校验系数	0.80	0.75	0.76
	相对残余挠度 /%	1.40	0.90	0.60

表 3 各工况下应变测试结果

工况	项目	测点编号							
		1	2	3	4	5	6	7	8
1	实测值 / $\mu\epsilon$	222	235	132	145	-25	-21	-10	-13
	计算值 / $\mu\epsilon$	266	266	162	162	-31	-31	-19	-19
	校验系数	0.84	0.89	0.82	0.90	0.82	0.69	0.53	0.69
2	实测值 / $\mu\epsilon$	202	196	173	185	-17	-19	-15	-12
	计算值 / $\mu\epsilon$	215	215	212	212	-25	-25	-23	-23
	校验系数	0.94	0.91	0.82	0.87	0.67	0.75	0.66	0.53
3	实测值 / $\mu\epsilon$	-72	-71	-31	-35	25	33	9	13
	计算值 / $\mu\epsilon$	-115	-115	-43	-43	39	39	17	17
	校验系数	0.63	0.62	0.73	0.82	0.64	0.84	0.53	0.77
4	实测值 / $\mu\epsilon$	-58	-51	-61	-54	21	19	20	17
	计算值 / $\mu\epsilon$	-81	-81	-78	-78	29	29	27	27
	校验系数	0.72	0.63	0.78	0.69	0.72	0.65	0.75	0.64
5	实测值 / $\mu\epsilon$	168	162	107	112	-21	-18	-8	-10
	计算值 / $\mu\epsilon$	204	204	137	137	-27	-27	-13	-13
	校验系数	0.82	0.79	0.78	0.82	0.77	0.66	0.61	0.76
6	实测值 / $\mu\epsilon$	115	102	156	145	-10	-14	-12	-9
	计算值 / $\mu\epsilon$	169	169	169	169	-19	-19	-19	-19
	校验系数	0.68	0.60	0.92	0.86	0.52	0.72	0.63	0.48

由表 3 可知, 试验桥跨在各工况荷载作用下应变横向分布与理论计算结果基本相符, 反映了主梁在各加载工况下的受力特点。各工况作用下应变实测值均小于理论值, 校验系数最大值为 0.94, 满足规范^[4]中校验系数应小于 1 的要求。

4 动载试验

4.1 试验工况

动载试验选择无障碍行车试验, 测试截面选择 I-I 截面, 并在该截面布置拾振器和应变传感器。试验车辆分别以 30 km/h、40 km/h、50 km/h 的速度匀速通过桥梁, 利用动态测试系统记录车辆行驶过程中桥梁振动加速度和动应变时域曲线。由车辆驶离桥面后引起的加速度余振信号分析桥梁自振频率, 由动应变曲线分析冲击系数。

通过计算, 桥梁竖向第一阶频率为 2.631 Hz, 对应振型图见图 10。

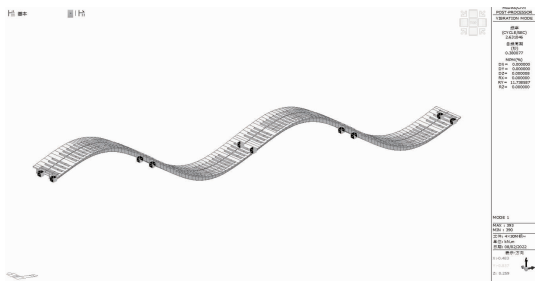


图 10 桥梁竖向第一阶振型图
根据规范^[5], 该桥冲击系数计算值:

$$\mu = 0.176\ 7\ \ln f - 0.015\ 7 = 0.155$$

4.2 试验结果

4.2.1 自振频率

选取 50 km 时速下测试截面振动加速度曲线(见图 11),对车辆驶离桥面后余振加速度曲线进行自谱分析,得到桥梁实测竖向第一阶频率为 2.875 Hz,大于理论计算值 2.631 Hz,说明桥梁实际刚度大于理论刚度,桥梁结构实际状态良好。

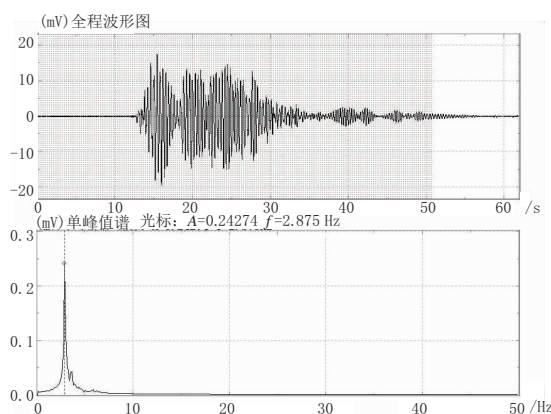


图 11 50 km 时速下余振加速度曲线自谱分析图

4.2.2 冲击系数

选取 50 km 时速下测试截面动应变时程曲线(见图 12)。采用三点法对冲击系数进行分析,选取动应变时程曲线中最大动应变峰值及相邻两侧动应变波谷值(图中 1、2、3 点),得到最大动应变幅值为 $-52.7 \mu\epsilon$, 1、2、3 点动应变平均值为 $-46.0 \mu\epsilon$, 计算出实测冲击系数为 0.146, 小于理论计算值 0.155, 说明桥梁行车性能良好。

5 结论

(1)试验桥跨在各工况车辆荷载作用下实测挠度变形趋势与理论分析基本相符, 校验系数最大值为 0.85, 满足规范^[4]中校验系数应小于 1 的要求, 桥梁实际刚度满足设计要求。相对残余挠度最大值为 7.8%, 满足规范^[4]中相对残余挠度应小于 20%的要求, 说明桥梁处于弹性工作状态, 变形后恢复能力较好。

(2)试验桥跨在各工况车辆荷载作用下应变横

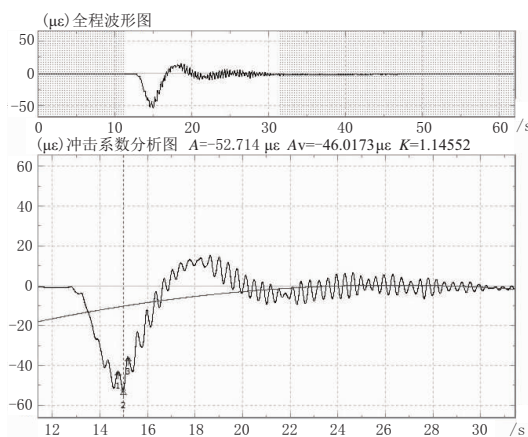


图 12 50 km 时速下动应变时程曲线

向分布与理论分析基本相符, 校验系数最大值为 0.94, 满足规范^[4]中校验系数应小于 1 的要求, 说明桥梁强度满足设计要求。

(3)桥梁实测竖向一阶频率 2.875 Hz, 大于理论计算值 2.631 Hz, 说明桥梁实际刚度大于理论刚度, 桥梁结构实际状态良好。实测冲击系数 0.146, 小于理论计算值 0.155, 说明桥梁行车性能良好。

(4)以上静力测试结果表明, 该桥试验跨处于弹性工作状态, 桥梁横向联接性能良好, 结构刚度及强度满足规范要求。动力测试结果表明, 该桥试验跨动力性能良好, 桥梁结构实际状态良好。该桥试验跨承载能力满足设计规范要求。

(5)该桥计算模型分析结果与荷载试验实测结果一致, 表明本次试验模型计算方法及加载过程合理可靠, 能准确反映波形钢腹板组合箱梁桥在各试验工况作用下的实际受力特征, 可为同类型桥梁简化分析计算提供参考。

参考文献:

- [1] CJJ/T 272—2017, 波形钢腹板组合梁桥技术标准[S].
- [2] 聂建国, 李发雄, 等. 考虑腹板剪切行为的波形钢腹板梁理论模型 [A]. 中国公路学报, 2011, 24(6): 47.
- [3] JTG/T J21-01—2015, 公路桥梁荷载试验规程[S].
- [4] JTG/T J21—2011, 公路桥梁承载能力检测评定规程[S].
- [5] JTG/T D60—2015, 公路桥涵设计通用规范[S].

(上接第 187 页)

艺。在项目的实施过程中, 成墩后线形良好, 质量符合规范及设计要求。为此类型及工况下 V 形墩提供了一种行之有效的施工工艺。

参考文献:

- [1] 闵凡华. V 型墩施工技术及其质量控制[J]. 城市建设理论研究(电子

版), 2011(34).

- [2] 程翠. 赤峰市友谊大桥 V 型墩连续刚构桥施工技术[J]. 北方交通, 2018(2): 21-23.
- [3] 崔仁海, 刘春燕. 南岸三桥预应力混凝土 V 型墩施工技术[J]. 广东土木与建筑, 2006(3): 47-49.