

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2022.11.025

# 公路钢板组合梁桥监测与检测试验研究

季云峰<sup>1</sup>, 申 璞<sup>1</sup>, 王晓宇<sup>2</sup>, 马明雷<sup>2</sup>

(1. 同济大学桥梁工程系, 上海市 200092; 2. 上海浦江桥隧运营管理有限公司, 上海市 200231)

**摘 要:** 针对一座公路连续钢板组合梁桥, 对其施工过程中及成桥状态的力学性能进行检测与监测的试验研究。研究钢板组合梁施工过程中及成桥状态的力学性能, 为类似钢板组合梁桥的设计优化等提供技术支撑。结果表明: 实测应力及挠度变化与理论值相吻合; 施工过程中结构应力满足规范要求; 成桥状态静力测试过程中试验桥梁处于弹性工作阶段。

**关键词:** 连续钢板组合梁; 施工监测; 静载试验

中图分类号: U446

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2022)11-0089-04

## 0 引言

钢-混凝土组合结构可以充分利用钢材与混凝土材料的优点来合理设置钢与混凝土位置, 并通过连接件把两者有效结合起来。相比于混凝土结构可以具有较轻的结构自重、较大的跨越能力、较高的结构强度和快速的施工速度<sup>[1]</sup>; 相比于钢结构可以具有更高的结构刚度、较强的稳定性和抗疲劳抗腐蚀能力。借鉴国外发达国家的桥梁建设经验, 在我国中小跨径桥梁中推广使用钢-混凝土组合结构是桥梁建设的重要发展方向。

现以一座 5 × 35 m 公路连续钢板组合梁桥为背景, 并对其施工过程中及成桥状态的力学性能进行检测与监测的试验研究, 采用 ANSYS 软件建立全桥板壳实体有限元模型分析计算, 将实测值与理论值进行对比分析, 从而准确掌握钢板组合梁施工过程中及成桥状态钢板组合梁的力学性能, 为类似钢板组合梁桥的设计优化、施工、成桥验收提供技术依据。

## 1 工程项目概况

背景工程为一座 5 × 35 m 跨径的双幅八主梁钢板组合梁(见图 1), 上部桥面板以预制为主, 墩顶受拉力较大区域采用现浇桥面板。桥面横向全幅范围内设四块预制桥面板, 预制桥面板纵横向通过湿接

缝连成整体; 在墩顶受拉力较大区域采用现浇桥面板。钢主梁采用 I 字型, 主要由上翼缘板、腹板、下翼缘板、腹板加劲肋、横隔板及横梁组成, 钢主梁梁高 1.65 m, 上翼缘板等宽, 宽度取 600 mm, 板厚以 20 mm 为主, 取值 20~34 mm。下翼缘板等宽, 宽度取 650 mm, 板厚取值 25~56 mm; 腹板厚度中墩附近(35 m 跨径取中墩附近 14 m) 范围内采用 18 mm, 其余均采用 16 mm。钢梁采用连续结构, 跨中及支点分别受正、负弯矩。选取左幅进行研究, 包括施工过程的监测及成桥状态的整体性能检测。

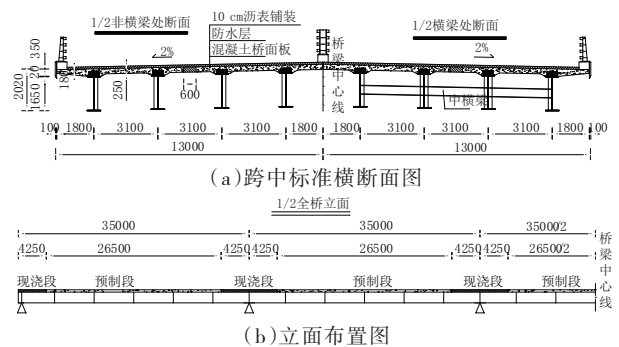


图 1 钢板组合梁桥标准布置图(单位: mm)

## 2 施工过程中钢板组合梁性能监测与分析

### 2.1 施工过程概述

该桥钢板梁分五个节段依次进行吊装, 最后一个钢梁节段吊装就位便形成 5 跨连续梁结构, 此后吊装正弯矩区混凝土板并浇筑湿接缝, 待钢梁与正弯矩区混凝土形成组合截面后浇筑负弯矩区混凝土, 达到强度后落梁至永久支座, 后续施工护栏以及桥面铺装。根据施工方案, 模型计算中将整个施工过程可分为九个阶段。阶段一到阶段五: 依次吊装第一段至第五段

收稿日期: 2022-02-24

基金项目: 浙江省公路管理局科研项目(ZJXL-SGL-201803); 台州市路泽太高架快速路有限公司研究项目(201807); 上海市道路运输管理局科研项目(JT2021-KY-013)

作者简介: 季云峰(1977—), 男, 博士, 讲师, 从事桥梁健康监测、桥梁结构测试等研究工作。

钢梁;阶段六:吊装正弯矩区混凝土板,此时钢结构尚未与混凝土形成组合截面,正弯矩区混凝土板自重全部由钢梁承受;阶段七:浇筑负弯矩区混凝土,此时正弯矩区混凝土已与钢结构形成组合截面;阶段八:负弯矩区混凝土达到强度后落梁至永久支座;阶段九:施工护栏与桥面铺装,此时全桥形成组合结构,二期恒载由钢与混凝土共同承受。

### 2.2 钢板组合梁有限元精细化建模

钢板组合梁的整体力学性能的理论计算采用通用有限元程序 ANSYS 对该桥进行精细化建模分析(见图2)。钢材采用 Q345qD 钢,容重为 78.5 kN/m<sup>3</sup>,弹性模量为 2.06 × 10<sup>5</sup> MPa,泊松比为 0.3;混凝土标号为 C50,容重为 26 kN/m<sup>3</sup>,弹性模量 3.45 × 10<sup>4</sup> MPa,泊松比 0.2。钢结构板件采用 SHELL181 板壳单元模拟,混凝土板采用 SOLID95 实体单元模拟,在钢与混凝土之间的交界面建立约束方程将钢与混凝土连成整体,计算不考虑钢与混凝土之间的滑移。

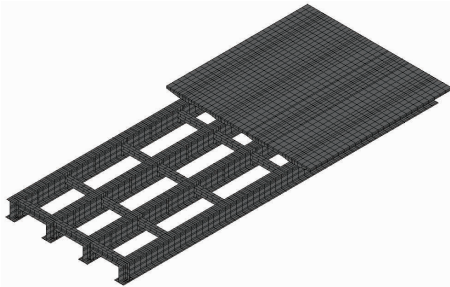


图2 钢板组合梁节段有限元模型

### 2.3 监测控制断面及测点布置

在该桥选取荷载基本组合下弯矩较大的 S1~S4 共 4 个控制断面,对施工阶段的钢板组合梁进行受力性能监测,具体位置见图3所示。

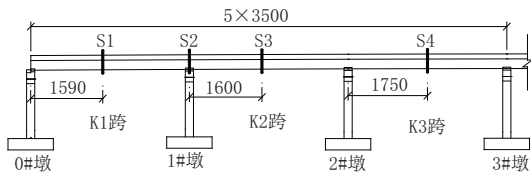


图3 监测控制断面示意图(单位:cm)

试验钢板组合梁 S1~S4 断面测点包括钢梁表面应力测点、桥面板表面应力测点、混凝土湿接缝内部应力测点和挠度测点,应变片均沿主梁纵向布置,其中 S2 断面不设挠度测点,图4为监测断面测点布置示意图。S1~S4 断面各测点的编号规则如下:(1)钢梁编号从左至右依次编号 1~4;(2)钢梁应力测点编号按从顶板到腹板再到底板的顺序,依次编号为 1~6,倘若某个位置无应变片,其编号依然不改变;(3)混凝土应力测点编号从左至右依次编号为 1~3;

(4)挠度测点编号同钢梁编号。例如:S1-3S-2 表示 S1 断面,第 3 根钢梁上第 2 个测点的应力。

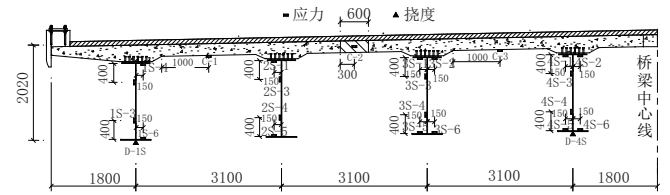


图4 钢板组合梁监测断面测点布置示意图(单位:mm)

### 2.4 施工阶段监测断面应力及挠度理论值

各施工阶段钢梁最大应力及位置见表1所列及图5所示,最大应力位置均在 S1~S3 断面,且大部分为 S1 断面,其中最大拉应力位置大部分是 S1 断面钢梁底板,最大压应力位置绝大部分为 S1 断面钢梁顶板。各施工阶段最大压应力绝对值均大于最大拉应力;在施工阶段一至五,只有钢梁参与受力,整体应力较小,拉压应力均小于 30 MPa;施工阶段六正弯矩区混凝土板自重全部由钢梁承受,因而应力相比施工阶段五大幅度提升;阶段七浇筑负弯矩区混凝土,钢梁最大应力略微上升;阶段八落梁至永久支座,最大拉应力基本不变,最大压应力有所下降;阶段九施工护栏与桥面铺装,钢梁最大应力显著提升,拉压应力均达到最大,最大拉应力为 94.7 MPa,位置为 S3 断面钢梁底板,最大压应力为 -100.6 MPa,位置为 S2 断面钢梁底顶板。根据《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015)<sup>[2]</sup>第 3.2.1 条,该桥钢材抗拉、抗压强度设计值均为 270 MPa,各施工阶段拉压应力均远小于设计值,满足要求。

表1 各施工阶段钢梁最大应力及位置一览表

施工阶段	最大拉应力 /MPa	位置	最大压应力 /MPa	位置
一	19.9	S1 底板	-27.3	S1 顶板
二	15.9	S3 底板	-21.2	S1 顶板
三	14.6	S1 底板	-22.9	S1 顶板
四	14.3	S1 底板	-22.4	S1 顶板
五	14.4	S1 底板	-22.6	S1 顶板
六	77.2	S2 顶板	-84.6	S1 顶板
七	83.7	S2 顶板	-94.5	S2 底板
八	83.4	S3 底板	-87.1	S1 顶板
九	94.7	S3 底板	-100.6	S2 顶板

各施工阶段混凝土最大应力及位置见表2所列。施工阶段七,浇筑负弯矩区混凝土,正弯矩区混凝土已与钢结构形成组合截面,此时正弯矩区混凝土开始有应力,但应力较小,且全截面受压;施工阶段八负弯矩区混凝土开始受力,混凝土拉压应力达到最大,最大值截面为 S2 截面,最大压应力值为 -3.78 MPa,最大拉应力值为 0.15 MPa;施工阶段九

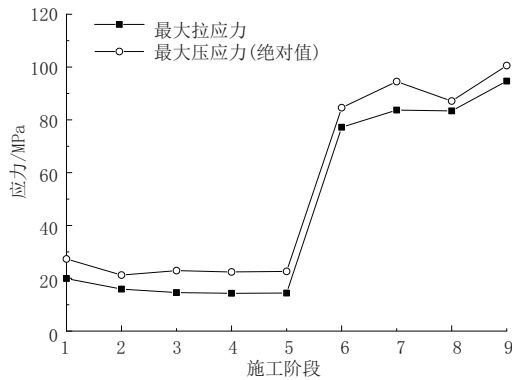


图5 各施工阶段钢梁最大应力图

全截面受压,最大压应力为  $-3.26\text{ MPa}$ ,位置为#2墩顶截面。根据《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)<sup>[3]</sup>第3.1.4条,该桥面板混凝土抗压强度设计值为  $22.4\text{ MPa}$ ,抗拉强度设计值为  $1.83\text{ MPa}$ ,各施工阶段拉压应力均远小于设计值,满足要求。

表2 各阶段 S1~S4 截面最不利位置混凝土应力一览表

施工阶段	最大压应力 /MPa	位置	最大拉应力 /MPa	位置
七	-0.47	S2 截面	-	-
八	-3.78	S2 截面	0.15	S2 截面
九	-3.26	#2 墩顶	-	-

### 2.5 典型施工阶段监测断面应力与挠度实测值

在上部结构施工过程中,现场应力监测仪器是根据施工进度情况逐步布设的,测试记录了钢板组合梁施工阶段六~九工况下,各监测控制断面应力实测值(应力增量值),分析发现钢梁在阶段六应力增量最大,混凝土在阶段八应力增量最大。施工阶段六 S1~S4 断面最不利位置的钢梁应力见表3所列;最大拉应力位置为 S1 断面第3根钢梁上第6个测点,最大压应力位置为 S1 断面第4根钢梁上第1个测点;实测值与计算值之比基本在  $0.8\sim 0.9$  范围;施工阶段八 S1~S4 断面最不利位置的混凝土应力见表4所列,实测值与计算值之比在  $0.85\sim 0.88$  范围。钢板组合梁实际应力变化与理论值基本吻合,且实测值均小于理论计算值,理论计算偏安全。

表3 阶段六 S1~S4 断面最不利位置的钢梁应力一览表

断面应力	位置	实测值 /MPa	计算值 /MPa	实测 / 计算
S1 拉应力	S1-3S-6	33.46	38.40	0.87
S1 压应力	S1-4S-1	-48.78	-60.31	0.81
S2 拉应力	S2-4S-1	26.45	34.13	0.77
S2 压应力	S2-1S-6	-37.57	-42.01	0.89
S3 拉应力	S3-2S-5	16.34	20.46	0.80
S3 压应力	S3-4S-1	-26.58	-30.30	0.88
S4 拉应力	S4-3S-6	27.17	29.48	0.92
S4 压应力	S4-4S-1	-36.05	-42.64	0.85

表4 阶段八 S1~S4 断面最不利位置的混凝土应力一览表

断面	具体位置	实测值 /MPa	计算值 /MPa	实测 / 计算
S1	S1-C-2	-0.86	-1.00	0.86
S2	S2-C-2	-1.85	-2.16	0.85
S3	S3-C-2	-1.68	-1.97	0.85
S4	S4-C-2	-1.33	-1.52	0.88

## 3 成桥状态钢板组合梁静力性能测试

### 3.1 测试概况

根据《公路桥梁荷载试验规程》(JTG/T J21-01—2015)<sup>[4]</sup>和《公路桥梁承载能力检测评定规程》(JTG/T J21—2011)<sup>[5]</sup>中关于静力荷载效率的要求,该联主要控制断面的设计内力计算结果,以及加载车辆的现场组织条件,选用了4辆单车总重约  $400\text{ kN}$  的四轴载重车作为加载车辆。静载试验各加载工况的主要结构内力的理论计算值,以及相应的加载效率  $\eta$  见表5所列,各断面相应最不利加载工况的荷载效率系数介于  $0.85\sim 1.05$  之间,满足相应规范要求。由有限元计算分析确定的各工况最不利位置,各断面车辆对称加载及偏载布置示意图见图6所示。

表5 测试控制断面加载效率一览表

加载工况	工况说明	设计荷载效应 /( $\text{kN}\cdot\text{m}$ )	试验荷载效应 /( $\text{kN}\cdot\text{m}$ )	荷载效率 $\eta$	加载车辆
工况一	S1 断面正弯矩对称加载	9 768.34	9 049.06	0.93	4
工况二	S1 断面正弯矩偏载				
工况三	S2 断面正弯矩对称加载	-7 151.87	-6 209.52	0.87	4
工况四	S3 断面正弯矩对称加载	8 059.86	7 395.44	0.92	4
工况五	S3 断面正弯矩偏载				
工况六	S3 断面正弯矩对称加载	8 222.70	8 269.83	1.01	4
工况七	S3 断面正弯矩偏载				

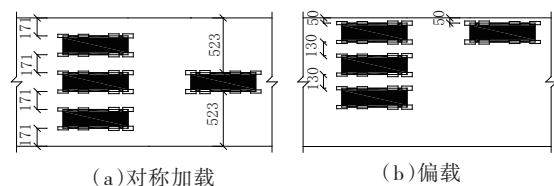


图6 车辆加载布置示意图(单位:cm)

### 3.2 测试结果

对静载测试中测量得到的应变和挠度原始数据进行处理,得到各工况的实测最大应力和挠度,与理论值对比,见表6、表7所列。在静力测试过程中,荷载卸载后钢板梁的相对残余应变和相对残余挠度均



小于5%,试验桥梁处于弹性工作阶段。各工况下钢梁最大应力的实测值与理论计算值之比均在0.83~0.93范围,各工况下混凝土最大应力理论计算值之比均在0.74~0.88范围,各工况下钢梁最大挠度实测值与理论计算值之比均在0.77~0.82范围。静载测试中钢板组合梁实际应力及挠度与理论值基本吻合,且实测值均小于理论计算值,理论计算偏安全。

表6 各工况下钢梁及混凝土最大应力表 单位:MPa

加载工况	钢梁			混凝土		
	实测值	计算值	实测/计算	实测值	计算值	实测/计算
工况一	36.9	42.96	0.86	-0.88	-1.12	0.79
工况二	38.67	46.52	0.83	-0.90	-1.26	0.74
工况三	-19.23	-21.80	0.88	0.40	0.50	0.80
工况四	30.68	34.90	0.88	-0.61	-0.71	0.86
工况五	33.46	36.10	0.93	-0.83	-0.98	0.85
工况六	35.58	39.40	0.90	-0.72	-0.82	0.88
工况七	37.37	42.67	0.88	-0.94	-1.07	0.88

## 4 结论

(1)各施工阶段,该钢板组合梁施工阶段的应力绝对值在正常范围内,其应力变化与理论值相吻合,

表7 各工况下钢梁最大挠度表

单位:mm

加载工况	实测值	计算值	实测/计算
工况一	-11.45	-14.77	0.78
工况二	-12.08	-14.89	0.81
工况四	-9.76	-12.43	0.79
工况五	-10.27	-13.03	0.79
工况六	-10.78	-13.17	0.82
工况七	-11.67	-15.23	0.77

且实测值均小于理论计算值,理论计算偏安全。

(2)成桥状态静力荷载作用下,包括对称加载和偏载,该钢板组合梁应力及挠度变化与理论值相吻合,且实测值均小于理论计算值,理论计算偏安全。静力测试过程中,荷载卸载后钢板梁的相对残余应变和相对残余挠度均远小于20%,试验桥梁处于弹性工作阶段。

### 参考文献:

- [1] 聂建国,陶慕轩,吴丽丽,等. 钢-混凝土组合结构桥梁研究新进展[J]. 土木工程学报, 2012, 45(6): 111-122.
- [2] JTG D 64—2015, 公路钢结构桥梁设计规范[S].
- [3] JTG 3362—2018, 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
- [4] JTG/T J21-01—2015, 公路桥梁荷载试验规程[S].
- [5] JTG/T J21—2011, 公路桥梁承载能力检测评定规程[S].

~~~~~  
(上接第79页)

## 6 结语

截至2021年底,盐铁塘大桥主体结构已经全部施工完成,如图14所示。在整个主桥施工过程中,确保了航道的正常运营。盐铁塘大桥结构受力合理,桥型简洁美观,充满力量感。本文着重就主桥的结构设计、受力分析及施工要点进行了论证,可以为今后类似钢桁架桥的设计提供参考。

### 参考文献:

- [1] 上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司. 沪通铁路太仓南站配套基础设施工程-正夫路(江申大道~G204)新建工程[Z]. 上海:上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司, 2020.
- [2] GB 50017—2017, 钢结构设计标准[S].



图14 盐铁塘大桥

- [3] 太仓路桥工程有限公司. 盐铁塘桥主桥钢梁安装专项施工方案[Z]. 太仓:太仓路桥工程有限公司, 2020.
- [4] JTG 3362—2018, 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].