

韦 锋,罗慧文,梁立农,等. 基于实桥测试的大跨度混合梁斜拉桥钢混结合段受力性能分析 [J]. 长安大学学报(自然科学版), 2021, 41(5): 54-65.

WEI Feng, LUO Hui-wen, LIANG Li-nong, et al. Mechanical performance analysis of steel-concrete joint section of a long-span hybrid girder cable-stayed bridge based on field test[J]. Journal of Chang'an University(Natural Science Edition), 2021, 41(5): 54-65.

DOI:10.19721/j.cnki.1671-8879.2021.05.006

基于实桥测试的大跨度混合梁斜拉桥 钢混结合段受力性能分析

韦 锋¹, 罗慧文¹, 梁立农², 肖勇波¹, 苏 成¹

(1. 华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510641; 2. 广东省交通规划设计研究院股份有限公司, 广东 广州 510507)

摘 要: 为了研究大跨斜拉桥主梁无格室后承压板式钢混结合段的受力性能, 并检验其纵向应力传递的可靠性, 以大跨度混合梁斜拉桥(江顺大桥)为工程背景, 通过实桥应变测试以及数值分析, 研究其主梁的钢混结合段及相邻梁段在施工及运营过程中的应力分布情况。首先, 对测试节段的钢板和混凝土的应变进行长期监测, 获取钢混结合段、相邻钢箱梁加强段和预应力混凝土(PC)箱梁段的应力及分布规律, 然后, 采用 ANSYS 软件建立测试节段的局部三维精细有限元模型进行了数值分析, 最后, 将得到的有限元分析结果与实测数据进行对比。研究表明: 钢混结合段及其相邻梁段在全测试过程中压应力水平都较低, 其中最大钢板应力为-159.4 MPa, 最大混凝土应力为-15.8 MPa, 测试节段结构受力性能良好, 不仅可以有效控制施工应力, 而且在运营阶段仍能保持在原有的设计要求范围内。钢箱梁加强段上部各构件中上 T 肋的压应力水平最大, 下部各构件中下 U 肋的压应力水平大于底板和下 T 肋, 钢箱梁加强段的 T 肋和 U 肋可以有效地传递纵向应力, 使桥梁刚度过渡平稳, 协同受力情况良好。钢板应力与混凝土应力的有限元计算结果与实测结果基本吻合, 且应力分布规律基本一致, 表明钢混结合段局部有限元建模及边界条件合理, 可以较为准确地模拟实桥钢混结合段的受力状态。

关键词: 桥梁工程; 受力性能; 实桥应变测试; 钢混结合段; 应力分布

中图分类号: U446 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-8879(2021)05-0054-12

Mechanical performance analysis of steel-concrete joint section of a long-span hybrid girder cable-stayed bridge based on field test

WEI Feng¹, LUO Hui-wen¹, LIANG Li-nong², XIAO Yong-bo¹, SU Cheng¹

(1. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510641, Guangdong, China; 2. Guangdong Communication Planning & Design Institute Co., Ltd, Guangzhou 510507, Guangdong, China)

Abstract: In order to study the mechanical performance of the back bearing plate (without steel grids) steel-concrete joint section of the long-span cable-stayed bridge and to verify the reliability

收稿日期: 2021-06-19

基金项目: 交通运输部建设科技项目(2011318223390)

作者简介: 韦 锋(1970-), 男, 广西玉林人, 副教授, 工学博士, E-mail: ctfwei@scut.edu.cn.

of its longitudinal stress transmission, stress distributions of the steel-concrete joint section of the girder and adjacent girder sections during construction and operation stages were studied, with field strain test and numerical analysis on a long-span hybrid-girder cable-stayed bridge (Jiangshun Bridge). First, the strains of steel plate and concrete of test sections were monitored over time. Based on the monitored strain values, the stresses and distribution laws of the steel-concrete joint section, the adjacent strengthened steel box girder section and the adjacent prestressed concrete (PC) box girder section were obtained. Then the local 3-dimension finite element model of the test segment was established in ANSYS software and the related numerical analysis was conducted. Finally, the finite element analysis results were compared with the field test data. The results show that the compressive stress levels of the steel-concrete joint section and its adjacent girder sections are relatively low during the entire test period. The maximum stress of steel plate is -159.4 MPa and the maximum concrete stress is -15.8 MPa. The structure of test sections is stressed with good performance. The stresses not only be effectively controlled in the construction stage but also satisfy the original design requirements during the operation stage. The largest compressive stress is observed on the upper T-rib of the upper part of the reinforced steel box girder section, and there are higher compressive stresses on the lower U-rib in the lower part than those on the bottom plate and the lower T-rib. The longitudinal stress can be effectively transmitted on the T-rib and U-rib of the reinforced steel box girder section. So that the stiffness transition is smooth, and the coordinated load bearing capacity is favorable in the steel-concrete joint section and adjacent sections of the girder. The finite element calculation results of steel plate stress and concrete stress, and the stress distribution laws are basically consistent with the actual field test results, which indicates that the finite element modeling and boundary conditions of the steel-concrete joint section are reasonable, and the numerical simulation on the stress state of the steel-concrete joint section and the adjacent sections are relatively accurate. 5 tabs, 13 figs, 29 refs.

Key words: bridge engineering; mechanical performance; strain test of real bridge; steel-concrete joint section; stress distribution

0 引言

自从 1972 年世界上第一座混合梁斜拉桥——库尔特·舒马赫桥(Kurt-Schumacher)建成以来,国内外混合梁斜拉桥的应用日益增多^[1]。混合梁斜拉桥是指主梁主跨部分为钢箱梁,边跨或边跨的一部分为预应力混凝土(PC)箱梁的斜拉桥。为使钢箱梁与混凝土箱梁之间的刚度平稳过渡,通常在连接处设置钢混结合段,并在钢混结合段相邻设置钢箱梁加强段。钢混结合段一般由剪力钉、PBL 剪力键、承压板、钢格室、预应力钢绞线等元件组成。

为掌握钢混结合段构造的力学特性,部分学者通过缩尺模型试验、有限元分析方法和对比研究等方法,对钢混结合段的应力分布、应力沿纵向的传递以及钢与混凝土的界面滑移规律进行了研究,结果表明钢混结合段沿纵向的应力传递具有一定的可靠

性^[2-6]。部分学者通过缩尺模型试验对钢混结合段的受力情况与应力分布进行分析,结果表明钢混结合段刚度过渡较平稳^[7-9]。Yang 等通过钢混结合段缩尺模型试验得出,钢混结合段在 2 倍的设计荷载作用下仍具有足够的强度和良好的变形性能,且钢混结合段的抗弯强度高于相邻的混凝土梁^[10]。以上研究结果说明,经合理设计的钢混结合段具有足够的安全储备,但钢混结合段构造复杂,有必要进一步研究各组成部位对其力学性能的影响。Hosaka 等通过推出试验指出,群钉连接件中的单根剪力钉的抗剪承载力比单钉的抗剪承载力低约 30%^[11]。Lebet 等研究发现,当剪力钉的间距大于 13 倍的剪力钉直径时,群钉效应不明显^[12]。蒲黔辉等通过模型试验结合有限元局部计算模型分析得出,钢混结合段主要传力构件为承压板,传力比例近 44.58%,且该比例随着承压板厚度和剪力钉间距增加而增

大^[13]。姚亚东等利用钢混结合段的三维有限元模型研究了各部位的轴力传力比例,结果表明,承压板传递了54%的轴力,剪力键轴力传递呈马鞍形分布^[14]。刘荣等在钢混结合段有限元模型中考虑了相对滑移、承压接触以及连接件受力,研究表明,连接件与承压板各传力50%^[15]。黄彩萍等基于有限元模型对2种不同的钢混结合段传力机理进行了研究,结果表明剪力钉的剪切刚度对传力影响较大^[16]。以上分析结果均说明承压板与连接件是钢混结合段传力的主要构件。钢混结合段一般通过有无钢格室和前后承压板来分类,本文的研究对象为无格室后承压板式钢混结合段,已有学者研究了其受力性能。如陈开利等通过1:2的钢混结合段局部模型试验研究,得出该结构类型的抗裂性能良好^[17]。张凯等基于无室式钢混结合段的有限元模型计算发现,靠近承压板的连接件受力较大,加劲肋和等高U肋突变处出现局部应力集中现象^[18]。吴文明等利用混合有限元法探讨了无格室钢混结合段的受力性能,结果表明,相比承压板厚度,抗剪连接件的数量和刚度以及混凝土预应力对其受力性能的影响更大^[19]。综上所述可以看出,有限元分析法是研究钢混结合段性能的有效手段,但为了更接近工程实际,还需对其模拟的准确性开展研究。周萌等研究发现4-D多尺度模型不受失真区的影响,可以计算监测钢混结合段从施工至大桥运营全过程的实时力学响应及其变化,并综合考虑各个关键阶段的力学响应,使设计依据更加安全可靠^[20]。张景峰等验证

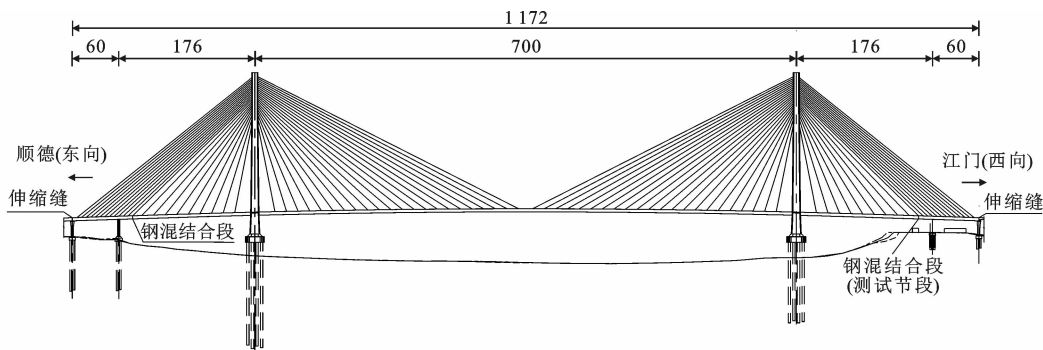
了在有限元计算中考虑非线性黏结-滑移效应的数值模型假定的合理性^[21]。李小珍等验证了钢混结合段构造的合理性以及有限元模型模拟的准确性^[22]。

以上研究表明,只要钢混结合段构造设计合理,可保证其传力可靠,安全储备充足。但是现有的研究无论是采用模型试验还是有限元模拟,大都是针对特定工况下的钢混结合段进行研究,而对实桥钢混结合段从施工到运营全过程的研究成果较少。因此,为检验无格室后承压板式钢混结合段设计的有效性与安全性,本文以江顺大桥为研究对象,开展大跨度混合梁斜拉桥实桥钢混结合段从施工到运营阶段的应变测试,研究了无格室后承压板钢混结合段及其相邻钢箱梁加强段和PC箱梁节段的受力性能,以为同类桥梁设计及运维管理提供参考。

1 实桥测试方案

1.1 工程概况

江顺大桥为大跨度双塔双索面混合梁斜拉桥,跨径布置为60+176+700+176+60 m^[23-24]。中跨及两边跨的一部份为钢箱梁,总长1 016 m,宽39 m,采用Q345qD钢;预应力混凝土(PC)箱梁总长76 m,宽36.9 m,混凝土强度等级为C55。主桥桥型总体布置如图1所示。主梁钢混结合段设置在边跨距离辅助墩中心18 m处,采用无格室后承压板的构造方式,钢混结合段构造如图2所示。



单位:m

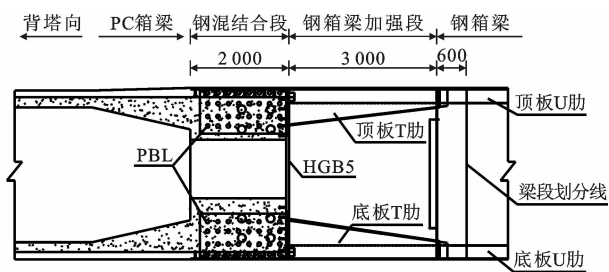
图1 大跨度斜拉桥(江顺大桥)整体示意

Fig.1 General layout of a long-span cable-stayed bridge (Jiangshun Bridge)

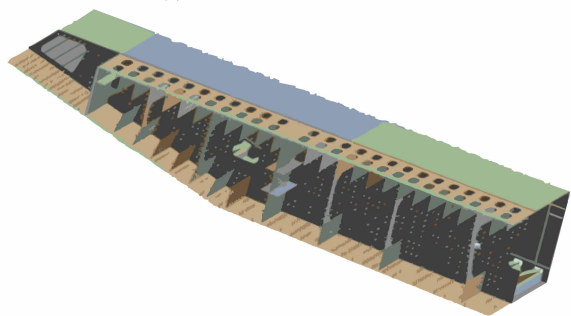
1.2 测点布置

为了检验主梁钢混结合段应力沿纵向传递的可靠性,并考察无格室后承压板钢混结合段的受力特征,在钢箱梁加强段、钢混结合段和相邻PC箱梁段关键受力部位设置了纵桥向应变测点,并在钢混结合段内设置了横桥向应变测点。钢箱梁加强段的测

点布置在顶板、底板、内外腹板、上下U肋与T肋,钢混结合段的测点布置在顶部、中部与底部,PC箱梁段的测点布置在上缘和下缘。将测试节段的钢箱梁加强段表示为A段,钢混结合段为B段,PC箱梁段为C段,各段顶板和底板测点横断面布置如图3所示,各纵断面测点分布如图4所示,U肋及T肋



(a) 主梁钢混结合段结构形式



(b) 主梁钢混结合段三维透视图

图 2 主梁钢混结合段构造

Fig. 2 Structural details of steel-concrete joint section in girder

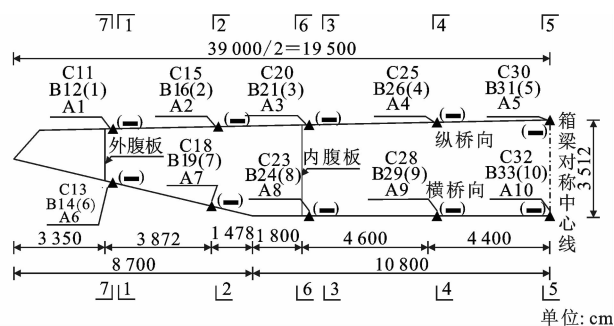


图 3 顶板和底板测点横断面布置

Fig. 3 Test points cross section layout of top slab and bottom slab

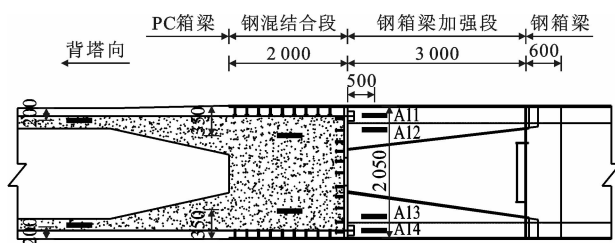
上的应变传感器均置于其高度中部。各段测点分布详见文献[24], A1~C30 均为测点编号。

1.3 测试仪器

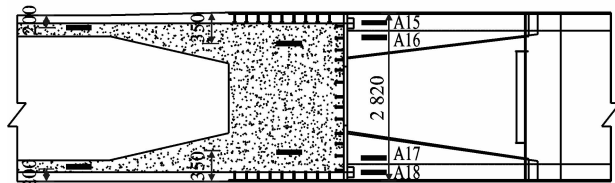
因实桥试验持续时间较长,数据采集次数较多,故采用自动采集方式。选用基康 BGK4200 表面式振弦传感器测量钢箱梁加强段钢板的应变,基康 BGK4200 埋入式振弦传感器测量钢混结合段及相邻 PC 箱梁混凝土的应变,表面式振弦传感器与埋入式振弦传感器现场布置如图 5 所示。通过基康 BGK-MICRO-40 自动化数据采集仪长期监测钢板和混凝土的应变,见图 6。

1.4 数据处理

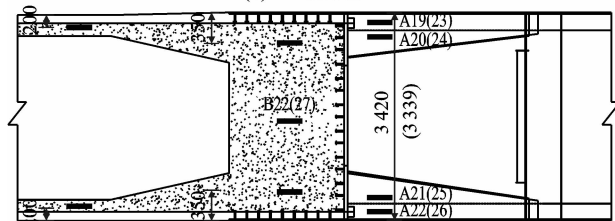
钢箱梁加强段初次测量时间为 2013 年 12 月 24 日;钢混结合段和 PC 箱梁段混凝土浇筑日期为 2014 年 1 月 15 日,初次测试时间为 2014 年 1 月 22



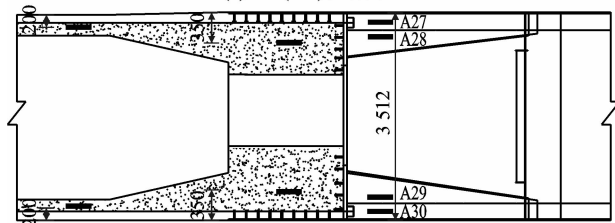
(a) 1-1纵断面



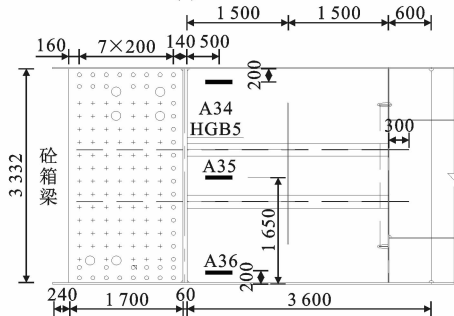
(b) 2-2纵断面



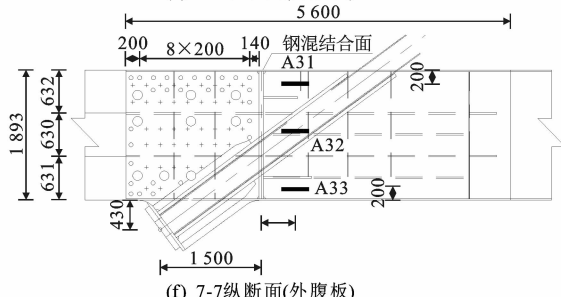
(c) 3-3(4-4)纵断面



(d) 5-5纵断面



(e) 6-6纵断面(内腹板)

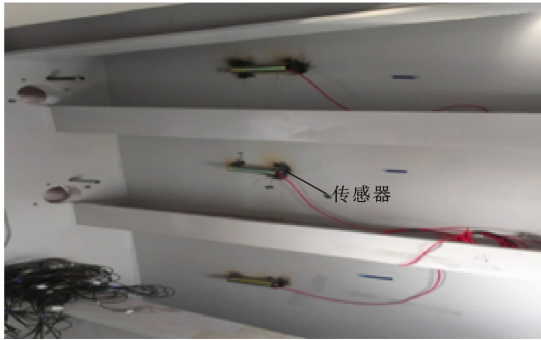


(f) 7-7纵断面(外腹板)

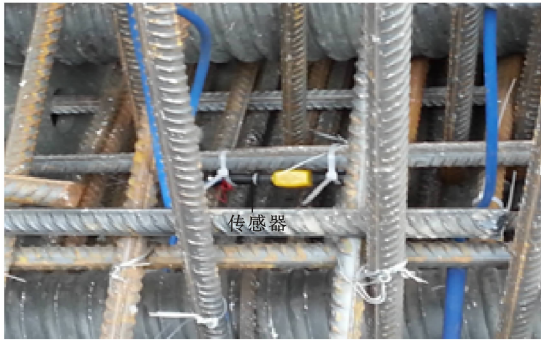
单位: cm

图 4 各纵断面测点分布

Fig. 4 Test points distributions along longitudinal direction. Test termination date is 2017 March 5, total test time is 1167 d. Table 1 only gives the load change from construction to operation stage.



(a) 表面式振弦传感器



(b) 埋入式振弦传感器

图5 传感器现场布置

Fig. 5 Layout of sensors in site



图6 基康 BGK-MICRO-40 自动化数据采集仪

Fig. 6 Jikang BGK-MICRO-40 automated data acquisition instrument

表1 桥梁从施工到运营阶段的关键工况与对应测试日期

Tab. 1 Key construction conditions and corresponding test date from construction to operation stage

| 关键工况 | 测试日期 | 钢板测量天数/d | 混凝土龄期/d |
|--------|------------|----------|---------|
| 张拉9号索 | 2014/01/25 | 32 | 10 |
| 边跨合龙 | 2014/02/14 | 52 | 30 |
| 张拉19号索 | 2014/05/05 | 132 | 110 |
| 张拉21号索 | 2014/05/18 | 145 | 123 |
| 桥面压重 | 2014/05/24 | 151 | 129 |
| 中跨合龙 | 2014/06/24 | 182 | 160 |
| 拆除桥面吊机 | 2014/08/06 | 225 | 203 |
| 二期调索 | 2014/08/31 | 250 | 228 |
| 二期荷载 | 2015/02/01 | 404 | 382 |
| 试通车 | 2015/06/27 | 550 | 528 |

化较大的关键工况与对应测试日期。

将测得的表面式传感器频率进行换算可得到钢板的实测总应变。因钢构件从施工到运营阶段都还处于弹性受力阶段,根据实测总应变及弹性模量可直接求得钢构件实测弹性应力。混凝土实测应力需要经过一些数据处理手段才能获得。混凝土线膨胀系数为 $10 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$,而钢弦线膨胀系数为 $12.2 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$,因此将测得的埋入式传感器频率通过换算得到总变形,然后再进行温度修正才能得到混凝土的实测总应变。考虑到收缩徐变影响,混凝土实测总应变还需要进一步修正。陈晋等通过试验和数值模拟对比得出,在几种具有代表性的混凝土收缩徐变模型中,《fib Model Code for Concrete Structures 2010》中的 CEB-FIP(2010)模型在高强混凝土的收缩预测中精度最高,因此,本文的混凝土收缩徐变模型采用 CEB-FIP(2010)模型,并在此基础上考虑粉煤灰相关影响系数进行修正^[25-29]。综上,将混凝土的实测总应变扣除混凝土收缩徐变的影响,得到混凝土在荷载作用下的弹性应变,最终根据混凝土的本构关系得到混凝土实测应力。

2 结果分析

2.1 各测点应力实测结果

表2为测试节段在整个施工到运营过程中各测点应力实测值的范围 and 对应材料的强度设计值。

表2 各测点实测应力值范围和对应材料强度设计值

Tab. 2 Values of measured stress range of test points and corresponding design strength of materials MPa

| 测点 | 位置 | 实测应力值范围 | 强度设计值 |
|-----------|-----|-------------|-------|
| 钢箱梁加强段纵桥向 | 顶板 | -63.6~23.3 | 310.0 |
| | 底板 | -80.1~21.5 | 310.0 |
| | 内腹板 | -41.6~20.6 | 310.0 |
| | 外腹板 | -97.0~17.9 | 310.0 |
| | 上U肋 | -48.8~29.9 | 310.0 |
| | 下U肋 | -159.4~18.6 | 310.0 |
| | 上T肋 | -79.6~48.0 | 310.0 |
| | 下T肋 | -105.4~30.1 | 310.0 |
| 钢混结合段横桥向 | 上部 | -8.7~0.7 | 25.3 |
| | 下部 | -7.1~2.2 | 25.3 |
| 钢混结合段纵桥向 | 上部 | -7.7~0.2 | 25.3 |
| | 中部 | -3.7~2.3 | 25.3 |
| PC箱梁段纵桥向 | 上缘 | -15.8~2.5 | 25.3 |
| | 下缘 | -11.3~2.4 | 25.3 |

由表2可知:整个测试过程中,钢箱梁加强段最大纵桥向应力值出现在下U肋,为-159.4 MPa;

最大横向向应力值出现在上部,为 -8.7 MPa ,钢混结合段最大纵桥向应力出现在下部,为 -14.5 MPa ;PC 箱梁段最大纵桥向应力值出现在上缘,为 -15.8 MPa 。钢混结合段及相邻钢箱梁、PC 箱梁的压应力水平都较低,材料设计强度尚有较大富余,说明测试节段在全过程中基本处于弹性阶段,受力性能良好。

2.2 各测点应力随时间的变化规律

2.2.1 各段纵桥向应力

各纵桥向测点应力随时间的变化如图 7 所示。

由图 7(a)~图 7(g)可以看出,在边跨合龙前,钢箱梁加强段除外腹板的测点外,其余部位均是受拉状态,且拉应力随着时间逐渐增大。这是由于钢箱梁加强段的测点布置在靠近钢混结合段承压板附近,在边跨合龙前,随着斜拉索的张拉远离外腹板测点位置均受拉,但外腹板底部是离斜拉索张拉端最近的位置,外腹板底部和中部处于受压状态,顶部先受拉后受压。从边跨合龙到最后的斜拉索张拉完成,所有测点都是压应力逐渐增大的趋势,并且这个时期压应力增长速度较快。边跨合龙后,边跨自重等

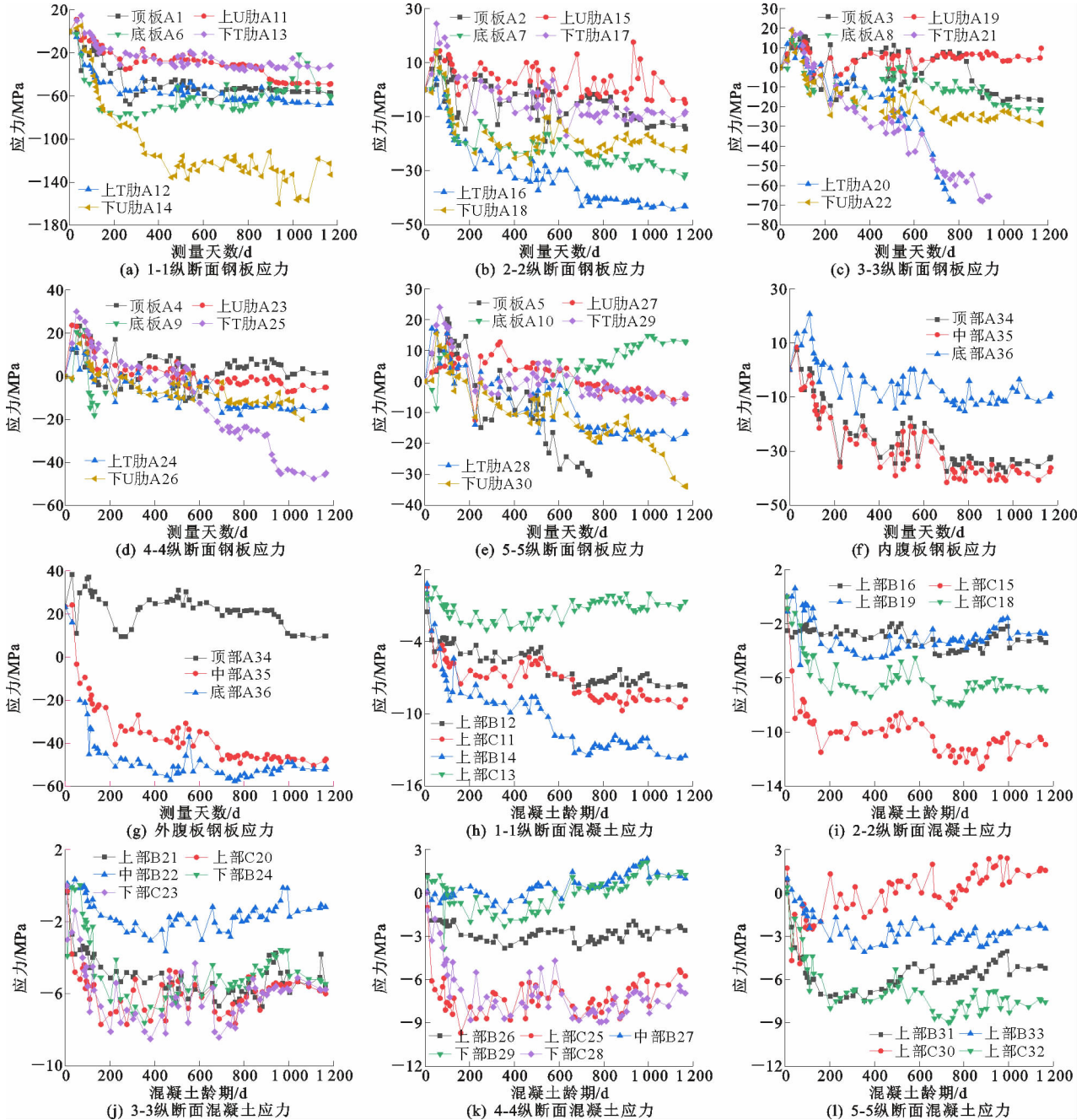


图 7 测试节段各纵桥向测点应力随时间的变化

Fig. 7 Stress variations with time of test points along longitudinal bridge direction of the test segment

恒载通过斜拉索张拉的方式以压力施加到钢箱梁加强段,因此随着恒载的增加,压力也随之变大。从桥面压重到中跨合龙所有测点应力变化不大,说明桥面压重位置和吨位比较合理,体现了钢箱梁架设高精度合龙的状态。在后续施工过程中,压应力增速缓慢,基本处于稳定状态,说明钢箱梁加强段的合理构造能有效控制施工应力。通车后大部分测点压应力处于平稳状态,部分测点数据不符合该规律,判断是因为施工单位未及时把钢箱梁加强段积水排出,所以部分测点传感器失灵导致测量数据异常,可忽略。

从各纵断面的钢板应力分布情况来看,在边跨合龙后,钢箱梁加强段主要承受轴力,同时承受着由荷载产生的逐渐增大的负弯矩,主要出现在更靠近斜拉索张拉端的 1-1 和 2-2 纵断面,通车后,从 1-1~5-5 纵断面均承受了由荷载产生的负弯矩。因此总体而言,下部各构件的压应力水平大于上部各构件。对于上部各构件,上 T 肋的压应力水平最大,顶板与上 U 肋相当。对于下部各构件而言,下 U 肋的压应力水平大于底板和下 T 肋,底板与下 T 肋基本相当。说明上 T 肋和下 U 肋可以有效地传递纵向应力。

由图 7(h)~图 7(l)可以看出,在斜拉索张拉工况结束前,混凝土应力主要为压应力,且随着斜拉索的张拉,压应力逐渐增大。该阶段钢混结合段以及边跨预应力混凝土箱梁的自重逐渐由斜拉索的拉力承担,其水平分量施加到钢混结合段和 PC 箱梁段,因此压应力增加速度较快。在桥面压重到二期荷载等关键施工工况作用阶段,混凝土应力基本保持稳定。通车开始 6 个月左右,混凝土应力有些波动,是由于通车后车辆荷载等活载增加所导致的,之后混凝土应力趋于稳定,说明桥梁主梁的关键控制截面应力在通车后 3 年内经过温度、风雨、车辆等作用仍能保持在原有的设计要求范围内。从各纵断面的混凝土应力分布情况来看,钢混结合段在 1-1 纵断面承受负弯矩,在 4-4 和 5-5 纵断面承受正弯矩,3-3 和 4-4 纵断面上中部测点应力远小于上部和下部测点应力。说明压力从钢箱梁传递到钢混结合段时,主要受力部位是截面的上、下部,中部受力较小。PC 箱梁段在 1-1 和 2-2 纵断面承受正弯矩,在 5-5 纵断面承受负弯矩。除了 5-5 纵断面,PC 箱梁段上部应力均大于钢混结合段;除 1-1 纵断面,PC 箱梁段下部应力均大于钢混结合段下部应力。说明混凝土应力从钢混结合段到 PC 箱梁的纵向传力顺畅、合理。

2.2.2 钢混结合段横桥向应力

钢混结合段各横桥向测点的应力随时间的变化如图 8 所示。可以看出,横桥向各测点随时间的变化规律与钢混结合段纵桥向测点基本一致。1-1 纵断面测点压应力大于其余纵断面测点,因其靠近斜拉索的张拉端,所以受到的轴压力较为集中。3-3 纵断面测点压应力小于其余纵断面测点,底部测点在全过程中基本为拉应力,这是由于靠近内腹板处的预应力损失所致。底部横向弯矩大于顶部横向弯矩,所以底部各纵断面测点的应力差大于顶部。

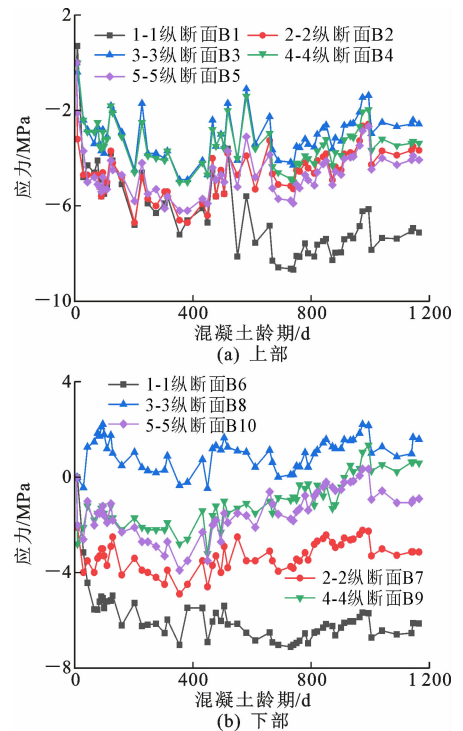


图 8 钢混结合段各横桥向测点应力随时间的变化

Fig. 8 Stress variations with time of test points in transverse bridge direction of steel-concrete joint section

2.3 成桥状态与运营状态的各段横截面应力分布

为了研究各测点顶部和底部应力的横向分布规律,选取 2014 年 8 月 6 日测点应力作为成桥状态分析数据,选取 2015 年 9 月 18 日测点应力作为运营状态分析数据。成桥状态与运营状态的各段横截面的应力分布如图 9 所示。

成桥状态以及运营状态钢箱梁加强段横截面的纵桥向应力分布如图 9(a)~图 9(c)所示。可知,运营状态相较于成桥状态,顶板压应力明显增加,底板压应力减小,在内外腹板处较明显。上 U 肋在成桥状态和运营状态应力基本一致,运营状态的下 U 肋在外腹板处的压应力较成桥状态增长较多,其余位置略有减小。运营状态下,上 T 肋除内腹板处,其

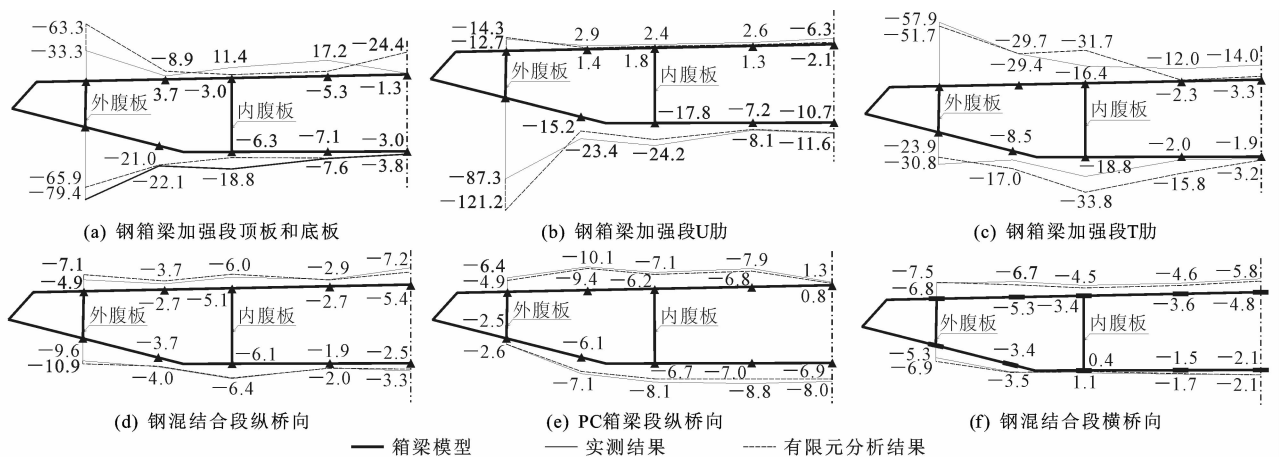
单位: 10^{-6}

图 9 成桥状态以及运营状态测试节段横截面的应力分布

Fig. 9 Stress distributions of test points on test segment in completion and operation stages

余位置测点压应力均有所降低,但下 T 肋除外腹板处,其余横向位置测点压应力均有所增加。总体而言,运营状态相比成桥状态,在内外腹板处应力变化较大。钢箱梁加强段各构件在外腹板附近的测点均有不同程度的压应力集中现象,剪力滞效应明显。因为斜拉索张拉后产生的巨大拉力使其张拉端附近产生较大压应力,而外腹板又靠近斜拉索的张拉端,所以外腹板附近测点压应力值要大于其余横向位置的测点。在钢箱梁变截面处和内腹板处,上 T 肋压应力较大而上 U 肋的拉应力较小,下 T 肋与下 U 肋压应力相当,表明加劲钢板对纵向应力传递起到了关键作用。对于其余横向位置测点,应力在横截面上的分布较均匀,钢箱梁加强段受力性能良好。不管是成桥状态还是运营状态,不同构件的上部与下部测点应力的横截面分布规律基本一致,U 肋应力分布最不均匀,其次是顶底板,最后是 T 肋。

成桥状态以及运营状态钢混结合段以及 PC 箱梁段横截面的应力分布如图 9(d)~图 9(f)所示。可以看出,混凝土应力在横截面上的应力分布比钢板更均匀。运营状态与成桥状态混凝土应力变化不大,在横截面上的分布规律也基本一致。钢混结合段上部和下部纵桥向应力在横截面上的应力分布呈波形,在外腹板、内腹板和桥梁中心线处压应力较大。PC 箱梁段上部纵桥向应力分布也是波形,但与钢混结合段恰好相反,在外腹板、内腹板和桥梁中心线处压应力较小。PC 箱梁段下部除外腹板处,其余横向位置压应力基本一致。钢混结合段上部横桥向应力分布较均匀,下部除外腹板和变截面处,其余横向位置应力较小。由此可以看出,钢混结合段到 PC 箱梁段刚度过渡平稳,协同受力情况良好。

3 有限元计算

3.1 模型建立

采用有限元软件 ANSYS workbench 对上述测试阶段建立其三维精细有限元分析模型,见图 10。

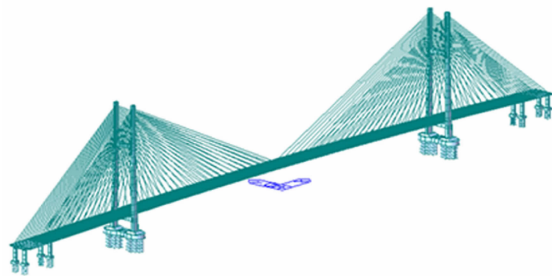


图 10 桥梁整体有限元模型

Fig. 10 Finite element model of bridge

根据圣维南原理,建模所取箱梁长度参数为:钢箱梁及其加强段共 15 m,钢混结合段 2 m,PC 箱梁段 16 m,总长为 33 m。由于桥梁以中心线为对称轴,故仅取一半结构进行建模。对钢板、剪力钉、混凝土及预应力钢筋分别采用 Shell181、Beam188、Solid186 及 Link180 单元,钢混结合段局部模型有限元网格划分见图 11(a)。采用 MIDAS/Civil 软件建立全桥模型,考虑成桥状态不利荷载组合进行整体分析,即结构自重、二期铺装恒载以及斜拉索的初拉力,这对应于表 1 中的二期荷载工况^[24]。

选取材料参数与实际桥梁所用材料的测试值对比见表 3。提取全桥整体分析结果中辅助墩处主梁的内力值作为局部模型预应力混凝土箱梁端部的边界条件,钢箱梁端部则简化为固端。局部模型采用实体钢筋降温法模拟预应力钢筋有效预应力的等效荷载,并且考虑了剪力钉与 PBL 剪力键的作用、预

应力筋及钢板与混凝土之间的相互作用。成桥状态斜拉索的索力值见表4,辅助墩处主梁的内力值见表5。局部模型边界条件及荷载见图11(b)。

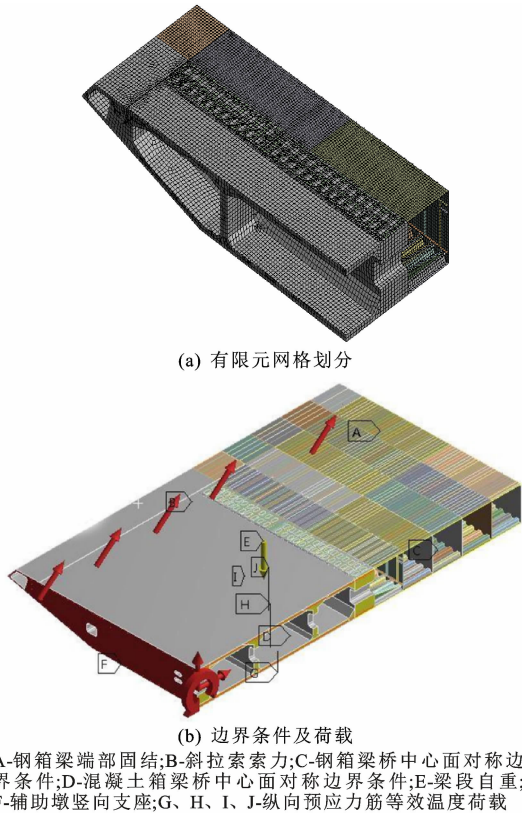


图11 钢混结合段局部有限元模型

Fig. 11 Partial finite element model of steel-concrete joint section

表3 材料参数

Tab. 3 Material parameters

| 材料 | 实桥 | | 有限元模型 | |
|-----------|-------------|----------|----------|----------|
| | 材料强度测试值/MPa | 弹性模量/GPa | 材料参数/MPa | 弹性模量/GPa |
| C55 混凝土 | 76.1 | 37.6 | 55.0 | 36.2 |
| Q345qD 钢材 | 391.0 | 203.0 | 345.0 | 210.0 |

表4 节段成桥状态斜拉索索力

Tab. 4 Cable force of stayed cables in completion state kN

| 索号 | A9 | A10 | A11 | A12 | A13 |
|----|---------|---------|---------|---------|---------|
| 索力 | 2 571.1 | 3 263.6 | 3 495.3 | 3 670.8 | 3 984.2 |

表5 辅助墩处主梁的内力

Tab. 5 Internal force of girder at auxiliary pier

| 参数 | 轴力/kN | 弯矩/(kN·m) | 剪力/kN |
|-----|---------|-----------|--------|
| 参数值 | -22 011 | 6 019 | 81 768 |

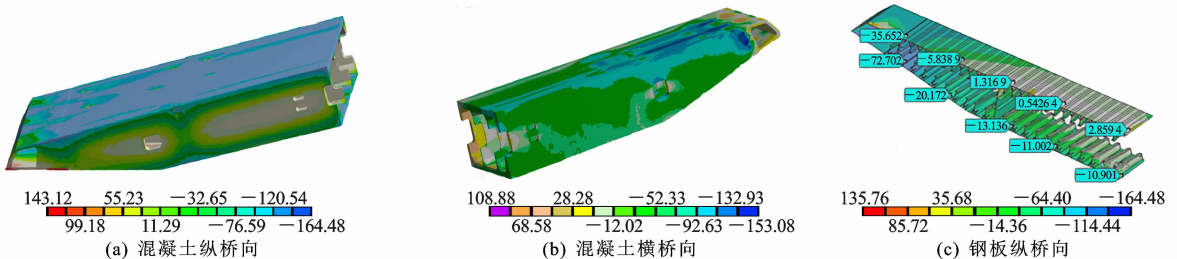
3.2 有限元分析结果

钢混结合段局部模型在成桥状态不利荷载组合作用下的应力分布情况如图12所示。从图12可以看出:混凝土纵桥向应力分布相对比较均匀,顶部和底部应力大于腹板应力,腹板应力又大于其他中部应力,顶板外腹板附近应力最大,底板外腹板附近为拉应力,总体应力水平较低;混凝土横桥向相对于纵桥向应力分布更不均匀,顶板靠近外腹板部位出现了局部拉应力,顶板横桥向应力小于纵桥向应力,符合成桥时的应力状态;钢板纵桥向应力均为压应力,外腹板附近压应力最大,其他部位受压且压应力较小,U肋、T肋在成桥荷载作用下应力较小。

3.3 实测与有限元结果对比

实桥结构中有许多因素影响应力的分布,并且应力数据具有一定离散性,因此取二期荷载加载后连续6次实测应力的平均值与有限元计算结果进行对比,如图13所示。由图13可以看出,钢板应力有限元结果相比实测结果,在横截面上的分布更均匀。顶板和底板部位在靠近外腹板和内腹板测点的误差相对于其他测点更大,U肋测点也是在靠近外腹板处误差较大,特别是靠近外腹板的下U肋测点,误差达到41.6 MPa,T肋在外腹板、变截面以及内腹板处均有误差。总的来看,顶部比底部测点的有限元分析与实测应力吻合程度更高。

混凝土应力的有限元与实测结果基本吻合,最大误差发生于钢混结合段下部靠近外腹板的测点,误差为3.1 MPa。钢混结合段上部5个测点纵桥向应力的有限元与实测结果均存在误差,但误



单位: MPa

图12 成桥荷载作用下的应力分布

Fig. 12 Stress distributions under loadings of completed bridge

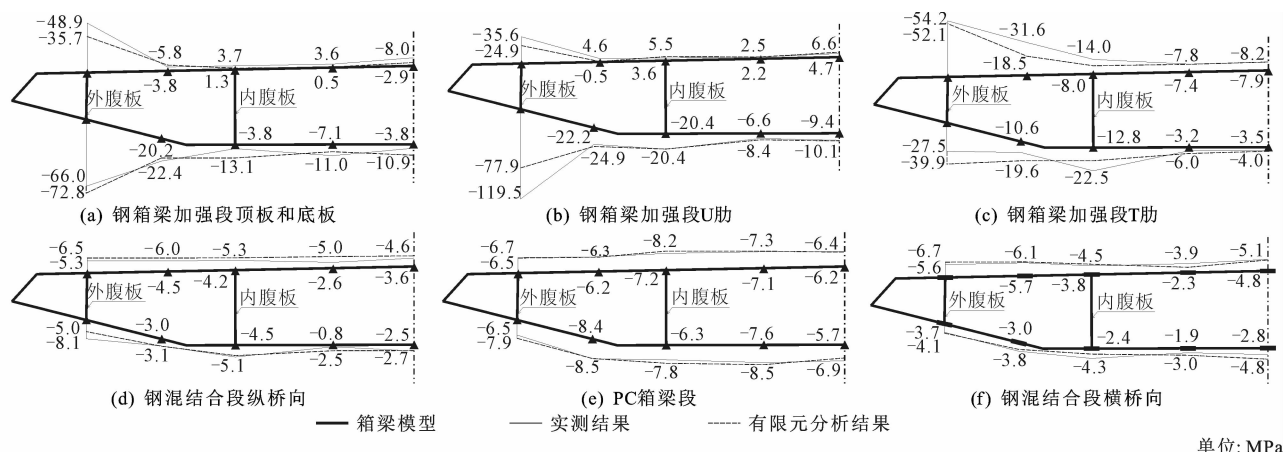


图13 有限元分析结果与实测应力对比

Fig. 13 Comparisons of finite element analysis results and measured stress

差值较小,因此在横截面上的应力分布规律基本一致。PC箱梁段纵桥向应力和钢混结合段横桥向应力的有限元与实测结果误差较小,吻合程度良好。

与实际桥梁相比,有限元模型具有更好的整体性,因此有限元计算结果相对于实测结果在横截面上的应力分布更均匀。有限元分析结果与实测结果整体误差不大,且应力分布规律基本一致,表明测试节段的有限元建模及边界条件合理。

4 结 语

(1)从施工到运营阶段,钢混结合段以及相邻的钢箱梁加强段和PC箱梁段应力总体水平较低,测试节段在全过程中基本处于弹性状态,具有足够安全储备。钢混结合段和PC箱梁段部分测点产生拉应力,应注意相关部位混凝土的抗裂设计。

(2)钢箱梁加强段外腹板附近测点出现不同程度纵桥向应力集中,剪力滞效应明显,U肋与T肋可以有效传递纵向应力。钢混结合段中部应力明显小于上、下部应力,因此截面上、下部是主要承力部位。

(3)通过钢板以及混凝土应力的有限元分析结果与实测结果对比发现,二者整体误差不大,且应力分布基本一致。说明钢混结合段局部有限元建模及边界条件合理,能较好地模拟实桥受力状态。

(4)本文结果可为大跨度斜拉桥主梁钢混结合段的结构设计提供一定参考。但因测点数量有限,本文在应力沿纵桥向传递规律方面的研究尚不够全面,后续可开展进一步的研究。

参考文献:

References:

- [1] 陈开利,余天庆,习 刚. 混合梁斜拉桥的发展与展望[J]. 桥梁建设,2005,35(2):1-4.
CHEN Kai-li, YU Tian-qing, XI Gang. Development and prospective of hybrid girder cable-stayed bridge[J]. Bridge Construction,2005,35(2):1-4.
- [2] XU S, YANG Y W, DENG L, et al. Experimental study on the steel-concrete composite girder joint of a single pylon cable-stayed bridge[J]. Journal of Steel Structures & Construction,2017,4(1):1-7.
- [3] GUO J F. Analysis on steel-concrete joint section of hybrid girder cable-stayed bridge[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 490(3):032022.
- [4] 徐重财,郑舟军. 九江长江公路大桥宽幅主梁结合段剪力滞效应分析[J]. 桥梁建设,2010,40(3):11-14,28.
XU Zhong-cai, ZHENG Zhou-jun. Analysis of shear lag effect of joint section of wide main girder of Jiujiang Changjiang River Highway Bridge[J]. Bridge Construction,2010,40(3):11-14,28.
- [5] 唐细彪,王亚飞,伍贤智,等. 混合梁斜拉桥钢-混结合段模型试验研究[J]. 桥梁建设,2019,49(增1):92-97.
TANG Xi-biao, WANG Ya-fei, WU Xian-zhi, et al. Model test for steel-concrete joint section of hybrid girder cable-stayed bridge[J]. Bridge Construction, 2019,49(S1):92-97.
- [6] 伍彦斌,黄方林. 红水河特大桥主梁钢-混结合段传力机理分析[J]. 桥梁建设,2018,48(4):56-61.
WU Yan-bin, HUANG Fang-lin. Analysis of force

- transfer mechanism of steel and concrete joint section of main girder of Hongshui River Bridge[J]. Bridge Construction, 2018, 48(4): 56-61.
- [7] 姚亚东, 杨永清, 刘振标, 等. 大跨度铁路钢箱梁混合斜拉桥钢混结合段模型试验研究[J]. 铁道学报, 2015, 37(3): 79-84.
- YAO Ya-dong, YANG Yong-qing, LIU Zhen-biao, et al. Model tests on the steel-concrete joint section of hybrid cable-stayed railway bridge with long-span steel box girder[J]. Journal of the China Railway Society, 2015, 37(3): 79-84.
- [8] 张仲先, 黄彩萍, 党志杰. 混合梁斜拉桥钢混结合段静力试验研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2010, 38(4): 121-124.
- ZHANG Zhong-xian, HUANG Cai-ping, DANG Zhi-jie. Static experiments of steel-concrete composite structure of hybrid cable-stayed bridges[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2010, 38(4): 121-124.
- [9] 刘琼, 黄彩萍, 党志杰, 等. 斜拉桥箱梁钢-混结合段受力的试验研究[J]. 铁道工程学报, 2009, 26(9): 46-49.
- LIU Qiong, HUANG Cai-ping, DANG Zhi-jie, et al. Experimental research on the load carrying performance of steel-concrete junction in box girder of cable-stayed bridge[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2009, 26(9): 46-49.
- [10] YANG S, PU Q, SHI Z, et al. Mechanical behavior of steel-concrete composite joints in railway hybrid cable-stayed bridges[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2020, 173(11): 106242.
- [11] HOSAKA T, HIRAGI H, KOEDA Y, et al. An experimental study on characteristics of shear connectors in composite continuous girders for railway bridges[J]. Journal of Structure Engineering, 1998, 44(S): 1497-1504.
- [12] LEBET J P, YODA T, OKADA J. A study of the grouped arrangements of stud connectors on shear strength behavior[J]. Journal of Structural Mechanics and Earthquake Engineering, 2004, 23(1): 75-89.
- [13] 蒲黔辉, 周阳, 施洲. 铁路混合梁斜拉桥钢-混结合段受力及参数分析[J]. 桥梁建设, 2016, 46(1): 12-17.
- PU Qian-hui, ZHOU Yang, SHI Zhou. Mechanical behavior and parametric analysis of steel and concrete joint section of railway hybrid girder cable-stayed bridge[J]. Bridge Construction, 2016, 46(1): 12-17.
- [14] 姚亚东, 杨永清, 刘振标, 等. 铁路箱形混合梁斜拉桥钢-混结合段有限元分析[J]. 桥梁建设, 2015, 45(1): 45-50.
- YAO Ya-dong, YANG Yong-qing, LIU Zhen-biao, et al. Finite element analysis of steel and concrete joint section of railway hybrid box girder cable-stayed bridge[J]. Bridge Construction, 2015, 45(1): 45-50.
- [15] 刘荣, 余俊林, 刘玉擎, 等. 鄂东长江大桥混合梁结合段受力分析[J]. 桥梁建设, 2010, 40(3): 33-35, 62.
- LIU Rong, YU Jun-lin, LIU Yu-qing, et al. Mechanical analysis of joint sections of hybrid girder of Edong Changjiang River Bridge[J]. Bridge Construction, 2010, 40(3): 33-35, 62.
- [16] 黄彩萍, 张仲先, 陈开利. 混合梁斜拉桥钢混结合段试验与传力机理研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2012, 40(1): 67-71.
- HUANG Cai-ping, ZHANG Zhong-xian, CHEN Kai-li. Model test and transfer mechanism of steel-concrete composite structure for hybrid girder cable-stayed bridges[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2012, 40(1): 67-71.
- [17] 陈开利, 王戒躁, 安群慧. 舟山桃夭门大桥钢与混凝土结合段模型试验研究[J]. 土木工程学报, 2006, 39(3): 86-90.
- CHEN Kai-li, WANG Jie-zao, AN Qun-hui. Model tests on steel-concrete joining section of main girder of a cable-stayed bridge[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(3): 86-90.
- [18] 张凯, 刘永健, 琚明杰, 等. 无格室钢-混结合段构造形式与受力性能分析[J]. 公路交通科技, 2016, 33(4): 73-79, 95.
- ZHANG Kai, LIU Yong-jian, JU Ming-jie, et al. Analysis of structural types and mechanical performance in steel-concrete connections without cell[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016, 33(4): 73-79, 95.
- [19] 吴文明, 刘高, 徐国平, 等. 无格室-承压板钢-混凝土结合部构造的结构特性[J]. 公路交通科技, 2010, 27(3): 75-80.
- WU Wen-ming, LIU Gao, XU Guo-ping, et al. Structural characteristics of steel-concrete connection joint with full-connection bearing-plate type[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27(3): 75-80.
- [20] 周萌, 宁晓旭, 聂建国. 混合梁斜拉桥钢混结合区4-D多尺度有限元分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2014, 54(10): 1321-1326.
- ZHOU Meng, NING Xiao-xu, NIE Jian-guo. 4-D mul-

- tiscal finite element analysis of the hybrid zone for cable-stayed bridges with steel-concrete hybrid girders[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2014, 54(10): 1321-1326.
- [21] 张景峰,李小珍,肖林,等. 混合梁斜拉桥钢-混结合段受力行为仿真分析[J]. 西南交通大学学报, 2014, 49(4): 619-625, 699.
ZHANG Jing-feng, LI Xiao-zhen, XIAO Lin, et al. Numerical simulation analysis of steel-concrete joint section in hybrid girder of cable-stayed bridge[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2014, 49(4): 619-625, 699.
- [22] 李小珍,肖林,黄玲,等. 混合梁斜拉桥钢-混结合段静力行为[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2013, 45(6): 75-82.
LI Xiao-zhen, XIAO Lin, HUANG Ling, et al. Static mechanical behavior of steel-concrete joint section of hybrid beam cable-stayed bridges[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2013, 45(6): 75-82.
- [23] 梁立农,万志勇,陈枝洪,等. 广东江顺大桥总体设计[J]. 广东土木与建筑, 2014, 21(10): 51-54.
LIANG Li-nong, WAN Zhi-yong, CHEN Zhi-hong, et al. Overall design of the Guangdong Jiangshun Bridge[J]. Guangdong Architecture Civil Engineering, 2014, 21(10): 51-54.
- [24] 肖勇波. 大跨度混合梁斜拉桥主梁钢混结合段受力性能分析[D]. 广州:华南理工大学, 2016.
XIAO Yong-bo. Analysis on the behavior of the steel-concrete composite structure of the hybrid girder of a long-span cable-stayed bridge[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.
- [25] 陈晋,丁晗,邓岚青,等. 欧美最新混凝土收缩徐变理论的数值对比及应用[J]. 建筑结构, 2019, 49(17): 90-97.
CHEN Jin, DING Han, DENG Lan-qing, et al. Numerical comparison and application of latest European and American creep and shrinkage theories[J]. Building Structure, 2019, 49(17): 90-97.
- [26] 闫建国. 粉煤灰高强混凝土性能及其对桥梁预应力损失的影响[D]. 北京:北京交通大学, 2015.
YAN Jian-guo. Performance of fly ash high strength concrete and its influence on prestress loss of bridge[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.
- [27] LIU Jiang, LIU Yong-jian, ZHANG Chen-yu, et al. Temperature action and effect of concrete-filled steel tubular bridges: A review[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 2020, 7(2): 174-191.
- [28] 陈波,张亚梅,郭丽萍. 大掺量粉煤灰混凝土干燥收缩性能[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2007, 37(2): 334-338.
CHEN Bo, ZHANG Ya-mei, GUO Li-ping. Investigation of drying shrinkage of high volume fly ash concrete[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2007, 37(2): 334-338.
- [29] 赵庆新,孙伟,缪昌文. 粉煤灰掺量和水胶比对高性能混凝土徐变性能的影响及其机理[J]. 土木工程学报, 2009, 42(12): 76-82.
ZHAO Qing-xin, SUN Wei, MIAO Chang-wen. Effect and mechanism of interaction between fly ash proportion and water-binder ratio on the creep characteristics of high performance concrete[J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(12): 76-82.