

文章编号:1674-599X(2022)04-0078-09

## 组合-混合梁结合段传力机理研究

董梅<sup>1</sup>,赵灿晖<sup>2</sup>,张永明<sup>3</sup>,张育智<sup>2</sup>,舒本安<sup>4</sup>,刘志文<sup>2</sup>

(1. 佛山市交通投资集团有限公司,广东 佛山 528300;2. 西南交通大学,四川 成都 610000;  
3. 佛山市建盈发展有限公司,广东 佛山 528300;4. 佛山市交通科技有限公司,广东 佛山 528300)

**摘要:**为研究大跨度组合-混合梁斜拉桥结合段的传力机理,以主跨为580 m的富龙西江大桥为例,对中腹板区域进行1:2缩尺模型试验和有限元模型分析,研究组合梁截面各参数对结合段轴向力传递路径的影响规律。研究结果表明:组合梁-混凝土梁结合段中传递轴向力的部件为结合段混凝土、桥面板及各类埋入钢板上的剪力连接件;承压交界面上的承压板、桥面板与剪力件群传递轴向力占比分别是32.2%、45.0%、22.8%;增大桥面板厚度,可有效提升桥面板的传力占比,并减少承压板传力占比,而增大组合梁顶钢板厚度能提高剪力件群的传力占比,减小桥面板传力占比;承压板较薄时,增大承压板厚度,可增大承压板的传力占比,减小桥面板及剪力连接件的传力比,但承压板厚度达到一定数值后,增加承压板厚度不会改变各部分传递的轴力占比。

**关键词:**斜拉桥;组合-混合梁;组合梁-混凝土梁结合段;传力机理;缩尺试验

中图分类号:U442.55

文献标志码:A

### Study on force transfer mechanism of composite-hybrid beam joint section of long span cable-stayed bridge

DONG Mei<sup>1</sup>, ZHAO Canhui<sup>2</sup>, ZHANG Yongming<sup>3</sup>, ZHANG Yuzhi<sup>2</sup>, SHU Ben'an<sup>4</sup>, LIU Zhiwen<sup>2</sup>

(1.Foshan Communications Investment Group Co., Ltd., Foshan 528300, China; 2.Southwest Jiaotong University, Chengdu 610000, China; 3.Foshan Jianying Development Co., Ltd., Foshan 528300, China; 4.Foshan Traffic Technology Co., Ltd., Foshan 528300, China)

**Abstract:** In order to study the force transfer mechanism of the composite-hybrid beam joint section of long-span cable-stayed bridge, the 1/2 scale model test and finite element analysis were carried out based on the Fulong Bridge with 580 m main span. The influence of various parameters of the composite beam section on the axial force transfer path of the joint section was obtained. The results show that the axial force in the composite-hybrid beam joint section is transferred by the concrete, the deck, and the shear connectors on the embedded steel plates. The ratios of axial force carried by the bearing plate, the deck and the shear connector group are 32.2%, 45% and 22.8%, respectively. By increasing the thickness of the bridge panel, the force transfer ratio of the bridge panel can be effectively improved and the force transfer ratio of the bearing plate can be reduced. By increasing the thickness of the top plate of composite beam, the force transfer ratio of shear connectors will be increased and the force transfer ratio of bridge deck can be reduced. When the bearing plate is thin, with the increase of the bearing plate thickness, the force transfer ratio of the bearing plate will be increased, and the force transfer ratio of the bridge deck and the shear connectors will be decreased. However, when the thickness of the bearing plate reaches a certain value, the load transfer ratio of each part can not be affected by the increase of bearing plate thickness.

**Key words:** cable-stayed bridge; composite-hybrid beam; composite beam-concrete beam joint section; force transfer mechanism; scale test

收稿日期:2022-01-26

作者简介:董梅(1990—),女,佛山市交通投资集团有限公司工程师。

混合梁斜拉桥因具有受力明确、施工快捷等特点,近年来在国内大跨径斜拉桥中被广泛应用<sup>[1-3]</sup>。钢混结合段作为混合梁斜拉桥主梁中钢梁与混凝土梁的关键连接节段,因构造复杂且传递荷载大,其力学行为受到国内外学者的广泛关注。钢混结合段的研究重点:①荷载分配或传递路径(即钢混结合段中承压板与剪力连接件所传递荷载占总荷载的比例);②钢混结合段中剪力钉、PBL等连接件的剪切刚度、疲劳性能等力学性能。黄彩萍等人<sup>[4]</sup>以武汉二七长江大桥为研究对象,分析表明荷载分配与剪力钉剪切刚度密切相关。李小珍等人<sup>[5]</sup>通过厦门马新大桥的缩尺试验,得到承压板与PBL剪力件所传递荷载各占50%。姚亚东等人<sup>[6]</sup>以甬江特大桥为原型,制作了缩尺比为1:5的全截面模型进行试验研究和有限元分析,发现承压板对结构轴向力的传递有重分配作用。HE等人<sup>[7]</sup>以UHPC灌浆的钢混结合段为研究对象,通过试验研究发现,承压板承受总荷载的65%,其余35%由剪力件承担。针对剪力连接件的研究,黄翔等人<sup>[8]</sup>采用推出试验方法,得出了钢混结合段中PBL剪力件的极限承载力和抗剪刚度计算公式。周阳等人<sup>[9]</sup>设计并制作了甬江特大桥结合段中典型钢格室的足尺模型,对剪力钉和PBL剪力件群进行了疲劳荷载试验,剪力栓钉与PBL剪力

件的配合使用,提高了结构的安全储备与抗疲劳性能。

组合梁是近年来桥梁设计的热点<sup>[10-12]</sup>,其截面中的混凝土桥面板面积较大,对截面的轴向刚度及抗弯刚度均有较大贡献,当组合梁用于结合段时,由于混凝土桥面板的存在,导致轴向力在截面上的分布规律、结合段内荷载传递机理与常规的钢-混凝土结合段有较大差异。为研究组合-混合梁结合段的传力机理,本研究拟以主跨为580 m富龙西江大桥为例,对中腹板区域进行1:2缩尺模型试验,并采用Abaqus软件建立有限元模型,研究组合-混合梁截面各参数对结合段轴向传力路径的影响规律,以为该类桥型结合段的设计提供参考。

## 1 模型试验

### 1.1 模型设计

富龙西江大桥主跨为580 m,主梁宽为41.4 m,主跨侧采用组合钢箱梁,边跨侧采用混凝土箱梁,结合段设置于辅助墩上,如图1所示。以该桥组合梁-混凝土梁结合段为例,选取主梁横断面中受力最显著的中腹板区域进行1:2缩尺模型试验,如图2(a)所示。模型主体由组合梁、结合段和混凝土箱梁组成,对应的长度分别为1.30、1.07和2.50 m。

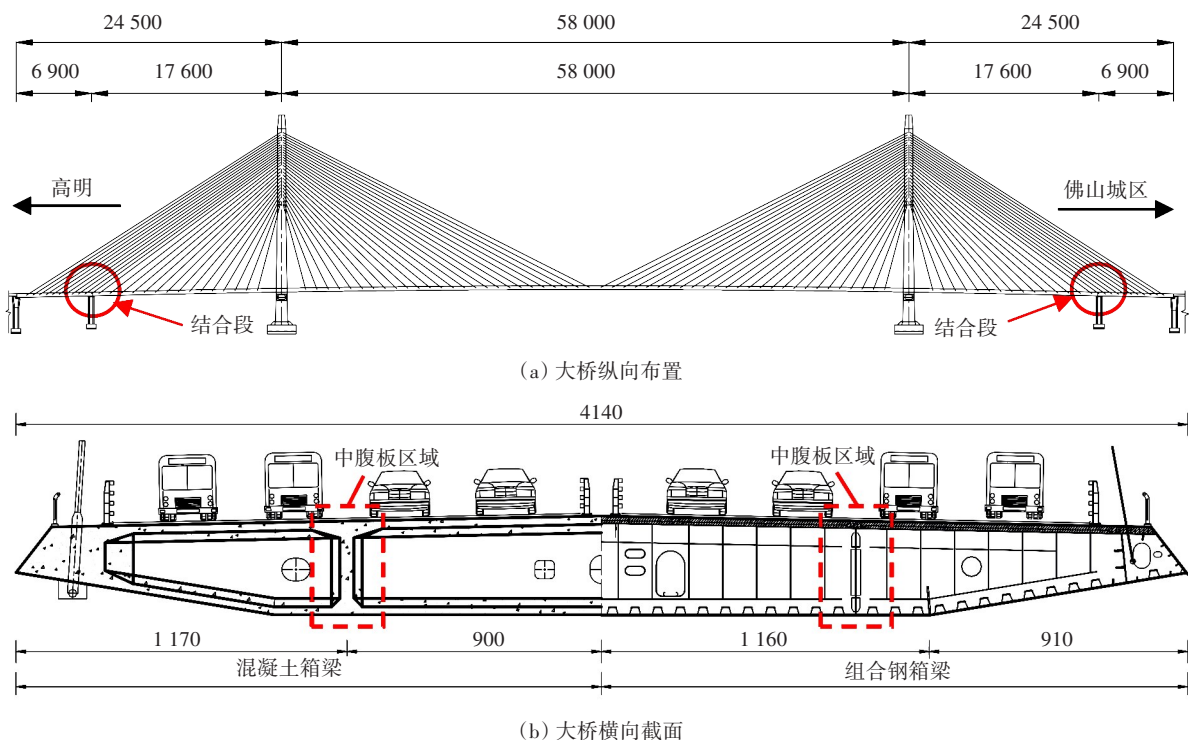


图1 富龙西江大桥钢混结合段布置(单位:cm)

Fig. 1 The layout of steel-concrete joint section of the Fulong Xijiang Bridge (unit: cm)

横断面尺寸为1.85 m×1.67 m,其中,组合梁截面内桥面板厚度为0.125 m,如图2(b)所示。板内分两层,共设置36根Φ12的HRB400纵向钢筋,钢梁顶、底板厚度为10 mm,腹板、顶板加劲与底板U肋为8 mm,底板加劲为12 mm,钢材为Q345。结合

段与组合梁交界面上设有厚30 mm的承压钢板,组合梁各板件经承压板伸入结合段内,利用PBL剪力件和剪力栓钉与结合段混凝土相连,剪力件的布置如图2(d)、(e)所示。混凝土梁截面为工字型,其端部与加载锚座相连。

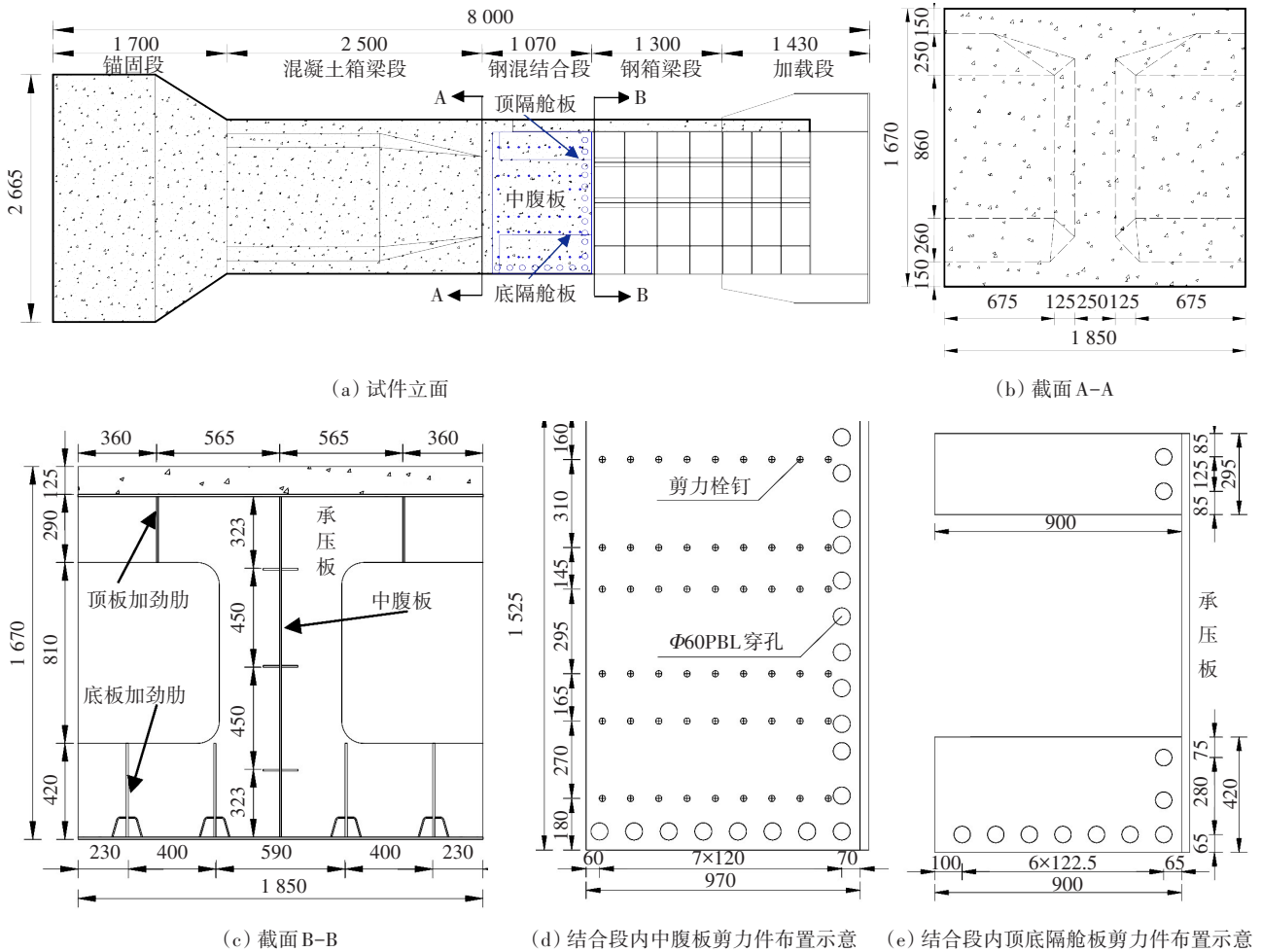


图2 模型结构布置图(单位:mm)

Fig. 2 The layout diagram of model structure(unit:mm)

1.2 加载方案

模型采用两组水平千斤顶进行加载,如图3所示。加载端截面上部布设2台250 t千斤顶,下部布设2台200 t千斤顶,利用锚座中预埋预应力钢绞线施加荷载。各千斤顶同步加载,各级荷载值如图4所示。最终结合段内总轴力为4 800 kN,总弯矩为2 500 kN·m,该荷载对应实桥中最不利轴力工况。

1.3 应变测试方案

模型测点布置分为组合梁、结合段埋入区两个部分,如图5(a)所示。中腹板沿高度方向共设置9行轴向应变测点。结合段埋入区1列,组合梁

内1列,编号分别为M1-1至M1-9、M2-1至M2-9。底钢板沿截面宽度方向设置4行轴向应变测点,组合梁内1列,结合段埋入区1列,编号分别为D1-1至D1-4、D2-1至D2-4,如图5(b)所示。顶钢板与底钢板测点布置相似,编号为T1-1至T1-4、T2-1至T2-4,如图5(c)所示。结合段埋入区的顶、底隔舱板上分别布置了3行1列、3行1列的轴向应变测点,对应的编号为TC1-1至TC1-3以及BC1-1至BC1-3,如图5(d)所示。桥面板内对应承压板的位置设置3个钢筋应变测点,编号为R1至R3,如图5(e)所示。

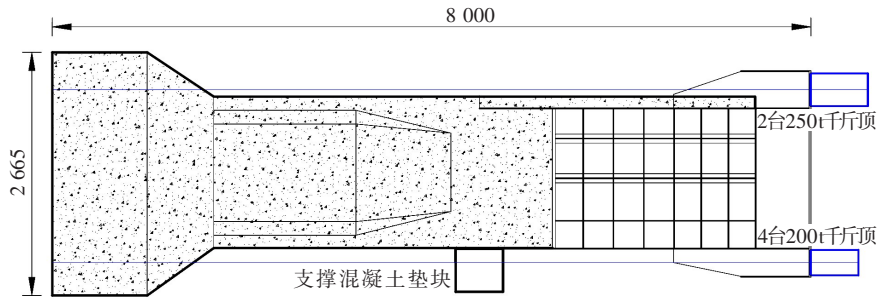


图3 加载示意(单位:mm)

Fig. 3 Loading schematic(Unit:mm)

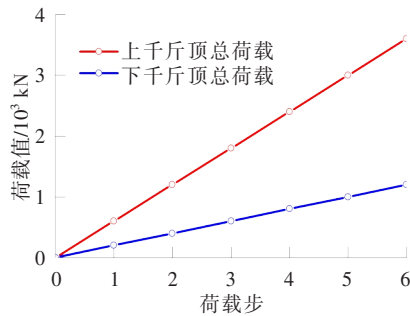


图4 加载步骤

Fig. 4 Loading procedure

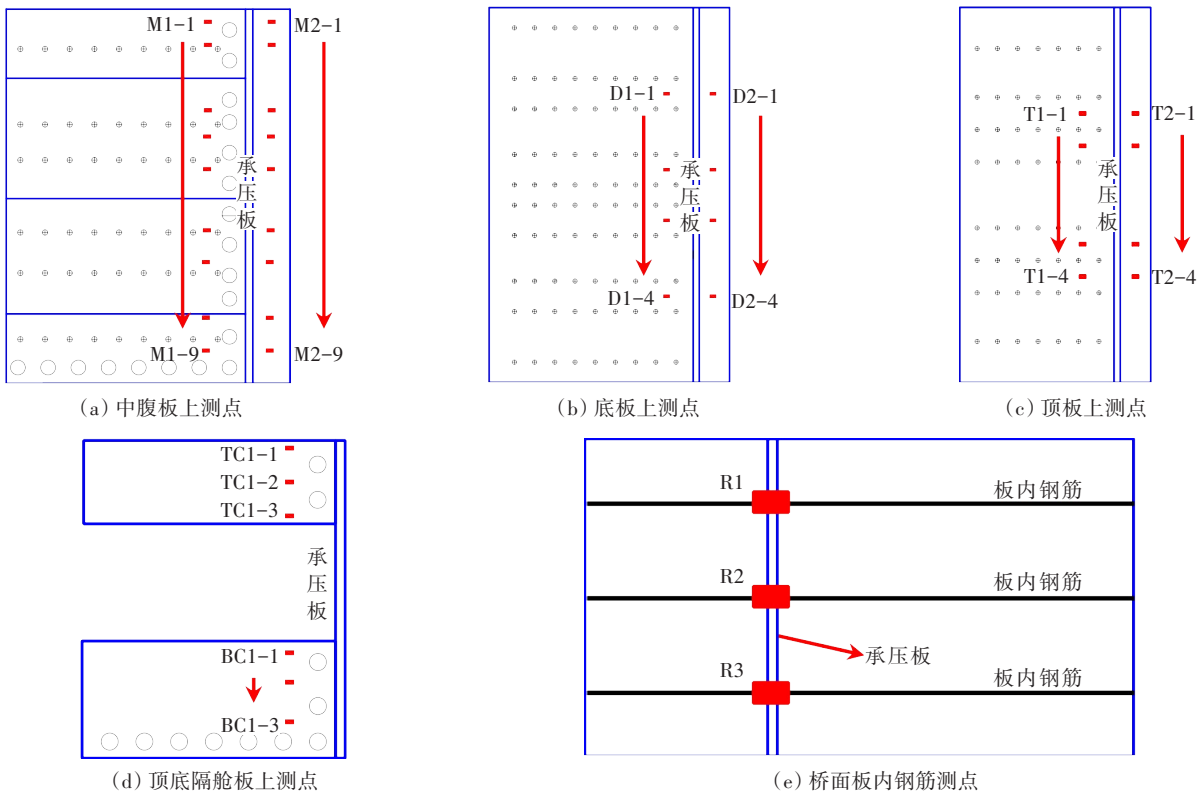


图5 应变测点布置

Fig. 5 The layout diagram of strain measuring points

## 2 试验结果

组合梁区域内腹板不同高度处的轴向应变如图6(a)所示。从图6(a)可以看出,各点应变随荷载

增大呈线性增长,并且在轴压力+正弯矩组合作用下压应变从上到下呈依次减小的分布形式,最大应变值为 $-343\mu\epsilon$ 。组合梁内顶板整体截面均匀受压,平均压应变为 $-275\mu\epsilon$ ,组合梁内底板受压也较为均匀,但压应变较顶板小,平均压应变为 $-50\mu\epsilon$ 。



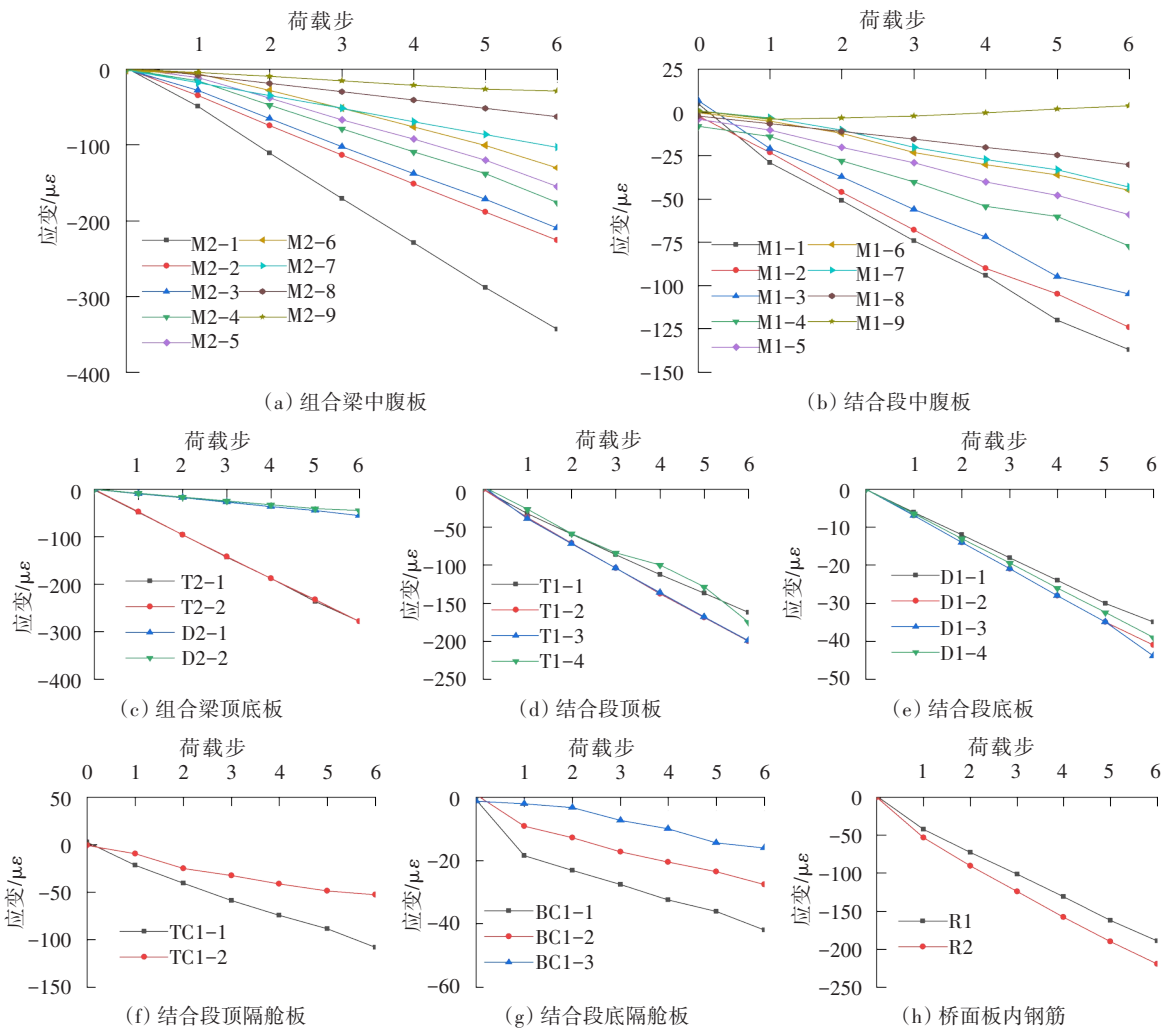


图6 应变测试结果

Fig. 6 Test results of strain

结合段内各钢板件在各荷载级下的中腹板上各测点的应变测试结果如图6(b)所示,其应变分布规律与组合梁区域测点相似,但同一荷载下的应变值较组合梁区域测点小,最大压应变为 $-141\mu\epsilon$ 。结合段内顶板与底板中测点测试结果如图6(d)和图6(e)所示,顶板与底板中各测点与承压板的距离一致,因此应变值相近。与顶钢板相连的顶隔舱板受压,如图6(f)所示。压应变达到 $-108\mu\epsilon$ 。底隔舱板全截面受压,压应变从上至下呈递减趋势,与底钢板相连处压应变最小为 $-16\mu\epsilon$ ,如图6(g)所示。桥面板内钢筋测点的应变结果如图6(h)所示,最大压应变达到 $-220\mu\epsilon$ ,测点TC1-3与R3受到破坏,无读数。

从图6还可以看出,承压板两侧的结合段截面和组合梁截面上同名板件具有相同的应变分布规律和不同应变大小,因此截面内力发生了重分布。

承压板截面的受力构件包括:桥面板、承压板、各类钢板(中腹板、顶钢板、底钢板、顶隔舱板及底隔舱板)和结合段混凝土,该截面轴力传递的途径有3种:①桥面板自身传递;②承压板面压传递给结合段混凝土;③结合段内各纵向钢板通过剪力件群传递至结合段混凝土。

### 3 有限元计算及验证

为分析结合段的传力机理,采用Abaqus软件建立结合段全截面有限元模型,如图7所示。桥面板与混凝土箱梁均采用C3D8R实体单元,钢箱梁则采用S4R壳单元进行模拟。结合段中设置剪切弹簧,模拟剪力钉与PBL剪力件;桥面板内埋入Truss单元,模拟纵向钢筋。考虑承压板与结合段内结合段混凝土的接触效应,混凝土取规范<sup>[13]</sup>中C60混凝土

的本构曲线,弹性模量为36.0 GPa,钢材料弹性模量取200 GPa,剪力钉与PBL剪力件的剪切刚度分别为575 kN/mm<sup>[14]</sup>与682 kN/mm<sup>[15]</sup>。

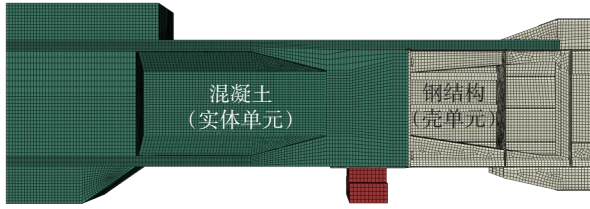


图7 有限元模型

Fig. 7 Finite element model

有限元计算结果与试验实测值的对比如图8所示。从图8可以看出,有限元计算结果与实测应变吻合良好,表明可以利用有限元计算结果对结合段的受力特征及传力路径进行分析。

根据试验中的三种轴力传递方式,为计算结合段各部分所传轴向力准确数值,利用有限元模型取

多个截面如图9(a)所示。通过节点力积分的方式得到各部分传递的轴力及其占比,计算结果如图9(b)所示。从图9可以看出,C0截面处承压板所传递的轴力荷载占总轴力的32.2%,桥面板传递的轴力占总轴力的45.0%,剪力连接件传递给混凝土梁的轴力占比为22.8%。随着截面与承压板距离的增大,混凝土中的轴力持续增大,这是因为由剪力连接件传递给混凝土的轴向力持续增大,在C4截面处,混凝土承受的轴力占比达到56.2%,桥面板的轴力占比为38.5%,由于组合梁钢顶板在C3截面与C4截面间结束,C4截面上剪力连接件的合计轴力占比仅为5.3%。在整个传力过程中,各类钢板承受的轴力及桥面板中的部分轴力通过剪力件群逐渐传给结合段混凝土,桥面板中剩余轴力则由桥面板与混凝土箱梁的结合面直接传递给混凝土箱梁。

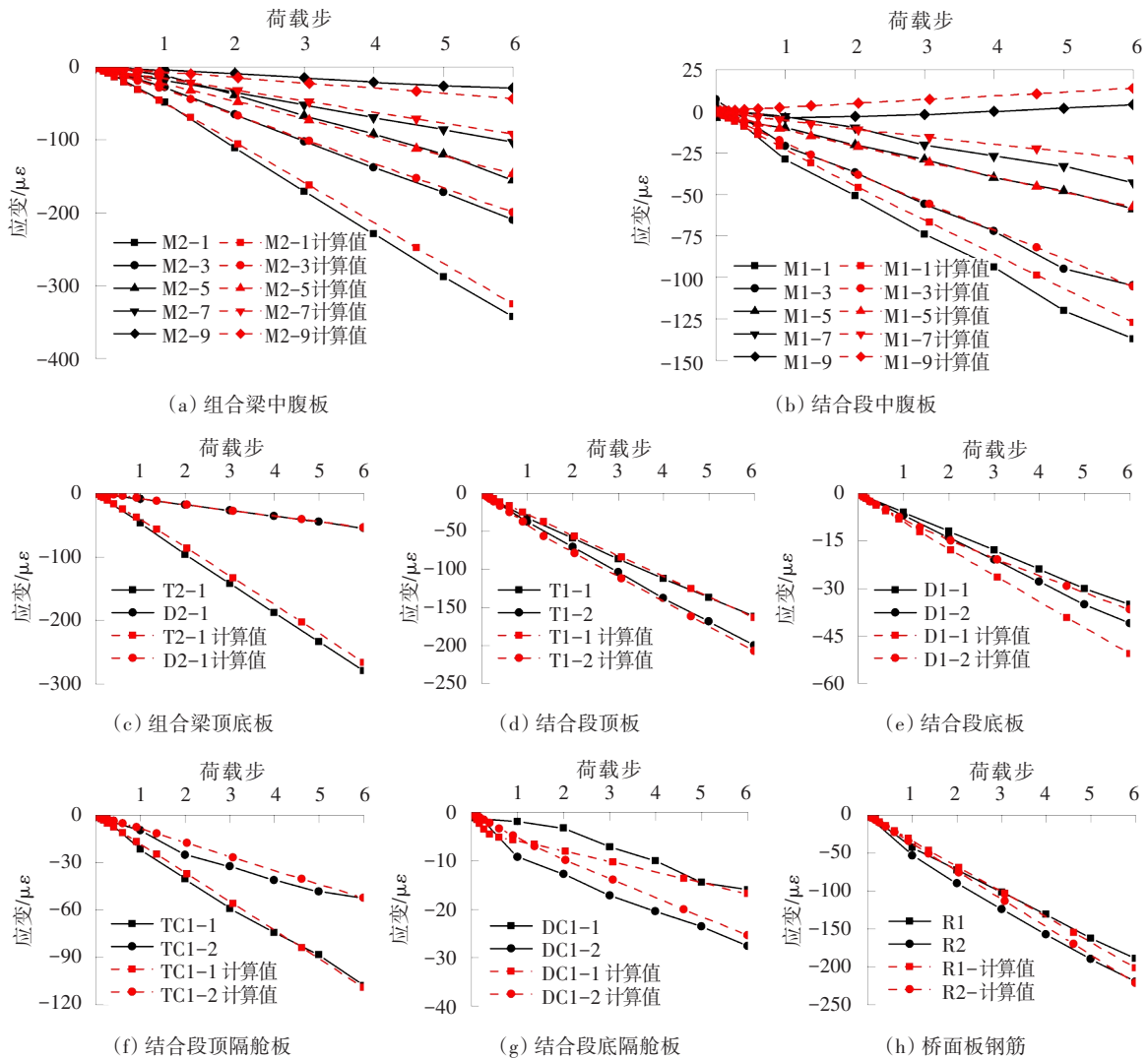
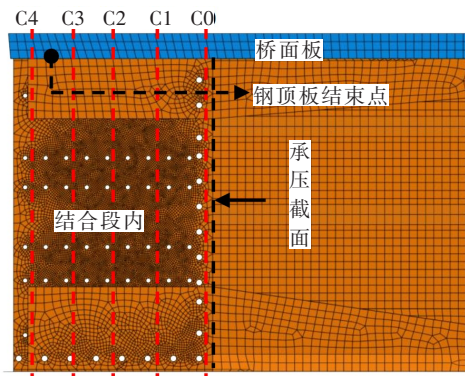
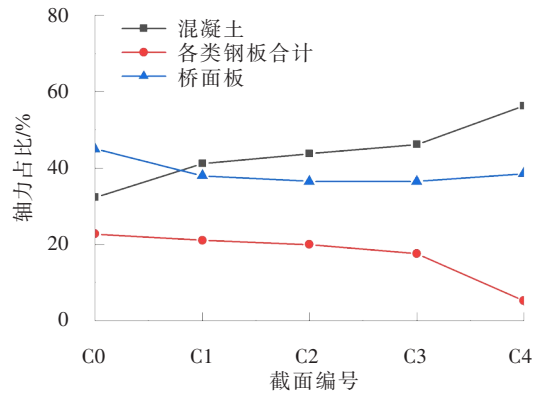


图8 有限元结果与试验结果对比

Fig. 8 Results comparison of finite element and test



(a) 积分截面相对位置



(b) 各截面组成部分轴力占比

图9 组合梁-混合梁结合段轴力传递机理

Fig. 9 Axial force transmission mechanism of composite beam-concrete joint section

### 4 参数分析

为分析各种设计参数对组合-混合梁结合段轴力传递路径的影响规律,针对组合梁-混凝土梁结合段的桥面板厚度、承压板厚度、钢板(中腹板、顶底板、顶底隔舱板)厚度及剪力连接件刚度对结合段轴向力传递路径的影响进行了研究,各参数变化见表1。其中,Z1为原型,Z8的剪力键总刚度为Z1的一半。

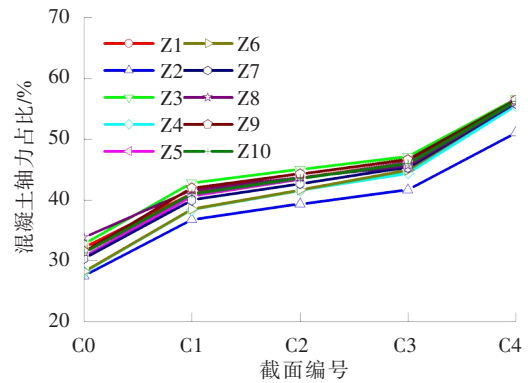
表1 参数分析表

Table 1 Parameters of the finite element model mm

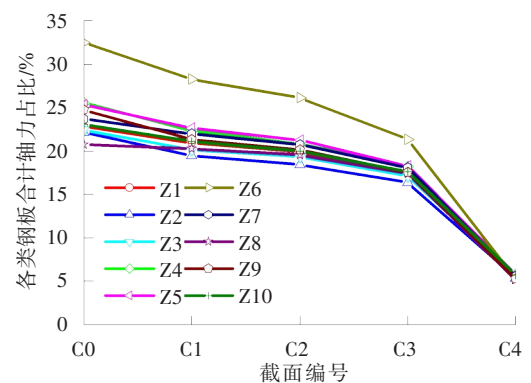
名称	桥面板厚度	承压板厚度	中腹板厚度	顶钢板厚度	底钢板厚度	顶隔舱板厚度	底隔舱板厚度
Z1	125	30	8	10	10	8	12
Z2	175	30	8	10	10	8	12
Z3	125	60	8	10	10	8	12
Z4	125	16	8	10	10	8	12
Z5	125	30	16	10	10	8	12
Z6	125	30	16	20	10	8	12
Z7	125	30	16	10	20	8	12
Z8	125	30	16	10	10	8	12
Z9	125	30	16	10	10	16	12
Z10	125	30	16	10	10	8	24

各参数模型计算结果如图10所示。当增大桥面板厚度时,Z2模型在C0截面处的桥面板轴力占比从45.0%提升至50.4%,承压板传递给结合段混

凝土轴力占比有所减少,由32.2%变为28.1%,而剪力件的轴力占比有轻微减少,由22.8%降为21.5%。这是因为桥面板厚度增加时,加大了桥面板轴向刚度在组合梁截面轴向刚度中的比例,从而使桥面板传递的轴力比例增大。同时,由组合梁的钢结构部分传递的轴力比例减小,由承压板直接通过面压传递给结合段混凝土的轴力为组合梁的钢结构传递的轴力中的一部分,因此,由承压板直接传递给结合段混凝土的轴力占比随之减少。

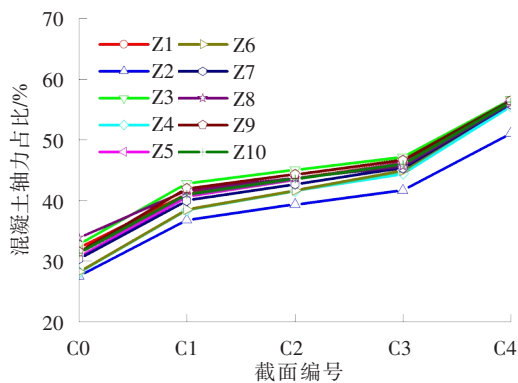


(a) 各参数模型混凝土轴力占比



(b) 各参数模型剪力连接件合计轴力占比





(c) 各参数模型桥面板轴力占比

图 10 各模型计算结果对比

Fig. 10 Comparison of calculation results of each model

增大组合梁钢顶板厚度时, Z6 模型中 C0 截面处剪力连接件的轴向力占比有明显提升, 从 22.8% 提升至 32.5%, 同时桥面板所传递的轴力明显减少, 由 45% 降低至 39.3%, 承压板传递给结合段混凝土的轴力也从 32.2% 降低至 28.2%。这是因为组合梁钢顶板厚度增大时, 减小了桥面板轴向刚度在组合梁全截面轴向刚度中的比例, 因此, 桥面板承担的轴向力比例减小。组合梁钢顶板厚度增大时, 减小了组合梁截面中除钢顶板外的钢结构轴向刚度在组合梁全截面轴向刚度中的占比, 也会减小由承压板传递给结合段混凝土的轴向力。组合梁钢顶板厚度增大时, 增加了钢顶板轴向刚度在组合梁截面纵向轴向刚度中的占比, 增加了钢顶板传递的轴向力, 而这部分轴向力会通过钢顶板上的剪力键传递给结合段混凝土, 增大了剪力连接件传递轴力的占比。

由 Z2~Z4 号模型的计算结果可知, 将承压板从 30 mm 增大到 60 mm, 不会明显改变各部分所传递轴力大小, 但承压板厚度从 30 mm 减小到 16 mm 时, 将使 C0 截面承压板传递的轴力占比从 32.2% 降低至 28.0%, 剪力连接件传递的轴力占比由 22.8% 提升至 25.5%, 桥面板由 45.0% 提升至 46.5%。这是因为在承压板较薄情况下, 增大承压板厚度, 能够提高承压板的面外刚度, 从而提高由承压板与结合段混凝土间的接触刚度, 进而提高由承压板传递给结合段混凝土的轴力占比。当承压板达到一定厚度 (30 mm) 后, 再加大承压板厚度不会显著提高承压板与结合段混凝土间的接触刚度, 因此不会显著影响各部分传递轴力的占比。

组合-混合梁结合段影响轴力传递机理的关键参数是桥面板厚度、组合梁顶板厚度及承压板的厚度, 改变其中任一参数都将使结合段内轴力分布发

生一定程度的变化。当提升桥面板厚度时, 桥面板自身轴力增大, 组合梁截面中钢梁轴力减小, 导致承压板与剪力件轴力占比减小。当提升钢顶板厚度时, 组合梁截面内钢梁轴力占比增大, 桥面板轴力占比减小, 剪力件轴力占比增大, 相应的承压板轴力占比减小。当承压板厚度较薄时, 增大承压板厚度能够提高承压板直接传递给结合段混凝土的轴力占比, 但承压板厚度达到一定厚度时, 再增大承压板厚度则不会显著改变各部分传递轴力的占比。

传统的钢箱梁-混凝土梁结合段中, 轴力传递路径的控制因素是钢箱梁板件的厚度与承压板的厚度。组合-混合梁结合段中控制轴向力分配的因素中多了桥面板的厚度, 根本原因是组合梁将桥面板作为传递轴力的重要部件, 大幅减少了组合梁钢板传递的轴力。因此, 轴力通过结合段时, 剪力连接件与承压板传递的轴力占比明显比传统钢-混结合段中的小。组合-混合梁结合段较传统钢箱梁-混凝土梁结合段的优势是可以通过调整桥面板的厚度使结合段内的轴力分布达到预期的设计状态, 同时桥面板的存在减小了对承压板与剪力连接件的设计需求。

## 5 结论

1) 组合梁-混凝土梁结合段的轴向传力部件为桥面板、埋入区的各类钢板上的剪力连接件及结合段混凝土。在承压板界面处, 结合段混凝土承担的轴力为承压板所传递的轴力。轴力在结合段传递的过程中, 埋入区各类钢板的轴力通过剪力连接件传递至结合段混凝土, 结合段混凝土中的轴力不断增大, 桥面板中的轴力通过组合梁钢顶板上的剪力连接件及桥面板与混凝土箱梁的接触面传递给结合段混凝土。

2) 组合-混合梁结合段中, 影响其轴向力传递路径的参数是桥面板厚度、组合梁顶钢板厚度及承压板厚度。增大桥面板厚度, 能显著减小承压板所传递的轴力, 提高桥面板传递轴力的占比。增大组合梁钢顶板的厚度, 能减小桥面板所传递轴向荷载, 提高剪力连接件传递的轴力占比。在某一范围内增大承压板厚度能增大承压板传递的轴向力占比, 但承压板厚度达到某一值后, 再增大承压板厚度对轴向力的传递路径影响不大。



## 参考文献(References):

- [1] 鲜荣,徐源庆,刘得运,等.黄茅海超大跨三塔斜拉桥结构体系研究[J].桥梁建设,2021,51(6):9-15.(XIAN Rong, XU Yuanqing, LIU Deyun, et al. Research on structural system of a super-long-span triple-pylon cable-stayed bridge of Huangmaohai link [J]. Bridge Construction, 2021, 51(6):9-15.(in Chinese))
- [2] 胡可,王胜斌,王波,等.超大跨径柱式塔斜拉桥结构创新与应用[J].桥梁建设,2021,51(4):88-95.(HU Ke, WANG Shengbin, WANG Bo, et al. Innovation of super-long-span cable-stayed bridge with columned pylons and engineering practice [J]. Bridge Construction, 2021, 51(4):88-95.(in Chinese))
- [3] 张玉平,高树威,李传习,等.基于钢纤维混凝土弹塑性损伤模型的钢混结合段吊装分析[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2020,17(4):32-41,84.(ZHANG Yuping, GAO Shuwei, LI Chuanxi, et al. Hoisting analysis of steel-concrete joint section based on steel fiber reinforced concrete elastoplastic damage model [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2020, 17(4):32-41, 84.(in Chinese))
- [4] 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 Caiping, ZHANG Zhongxian, CHEN Kaili, et al. Model test and transfer mechanism of steel-concrete composite structure for hybrid girder cable-stayed bridges [J]. Journal Huazhong University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2012, 40(1):67-71.(in Chinese))
- [5] 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 Xiaozhen, 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.(in Chinese))
- [6] 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 Yadong, YANG Yongqing, LIU Zhenbiao, 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.(in Chinese))
- [7] HE SH, MOSALLAM A S, FANG Z, et al. Structural evaluation of steel-concrete joint with UHPC grout in single cable-plane hybrid cable-stayed bridges [J]. Journal of Bridge Engineering, 2019, 24(4):04019022.
- [8] 黄翔,李力,岳磊.某大跨径斜拉桥钢-混结合段PBL剪力键承载力研究[J].桥梁建设,2010,40(3):19-23.(HUANG Xiang, LI Li, YUE Lei, et al. Study of bearing capacity of PBL shear connectors for steel-concrete joint section of a long span cable-stayed bridge [J]. Bridge Construction, 2010, 40(3):19-23.(in Chinese))
- [9] 周阳,蒲黔辉,施洲,等.混合梁斜拉桥钢-混结合段剪力连接件群力学性能研究[J].铁道学报,2017,39(10):134-141.(ZHOU Yang, PU Qianhui, SHI Zhou, et al. Study on mechanical behavior of group shear connectors for steel-concrete composite joint of hybrid girder cable-stayed bridge [J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(10):134-141.(in Chinese))
- [10] 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):110-122.(NIE Jianguo, TAO Muxuan, WU Lili, et al. Advances of research on steel-concrete composite bridges [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(6):110-122.(in Chinese))
- [11] 聂建国,余志武.钢-混凝土组合梁在我国的研究及应用[J].土木工程学报,1999,32(2):3-8.(NIE Jianguo, YU Zhiwu. Research and Practice of composite steel-concrete beams in China [J]. China Civil Engineering Journal, 1999, 32(2):3-8.(in Chinese))
- [12] 张丰,颜东煌,陈常松.大跨度组合梁斜拉桥成桥状态参数敏感性分析[J].交通科学与工程,2021,37(2):91-97.(ZHANG Feng, YAN Donghuang, CHEN Changsong. Parameter sensitivity analysis of the long-span composite girder cable-stayed bridge in the finished bridge state [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2021, 37(2):91-97.(in Chinese))
- [13] 中国建筑科学研究院.混凝土结构设计规范:GB 50010—2010 [S].北京:中国建筑工业出版社,2011.(China Academy of Building Research. Code for design of concrete structures: GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.(in Chinese))
- [14] LIN Z, LIU Y, HE J. Behavior of stud connectors under combined shear and tension loads [J]. Engineering Structures, 2014, 81:362-376.
- [15] LI Z, ZHAO C, DENG K, et al. Load sharing and slip distribution in multiple holes of a perfbond rib shear connector [J]. Journal of Structural Engineering, 2018, 144(9):04018147.

(责任编辑:欧兆虎;校对:罗容 李脉;英文编辑:陈璐)