

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2013.09.010

板桁组合结构钢-混结合段的受力性能

司秀勇, 赵建波, 白象忠

(燕山大学 建筑工程与力学学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 为研究某公路、铁路两用斜拉桥公路桥面钢-混结合段的受力性能, 对其进行了非线性有限元分析。同时依据相似性原则设计了钢-混结合段的大比例试验模型, 测试了荷载作用下试验模型的控制断面和主要构件的应变和位移。理论分析与试验测试结果表明: 钢-混结合段中钢结构、混凝土结构及栓钉的应力水平较低, 具有较强的安全储备; 钢与混凝土之间相对滑移量较小, 钢结构荷载比较顺畅地传递到混凝土结构, 钢-混结合段的工作性能良好, 构造设计合理。本文的研究结果可供板桁组合结构钢-混结合段的设计参考。

关键词: 桥梁工程; 斜拉桥; 受力性能; 模型试验; 板-桁组合结构; 钢-混结合段; 有限元分析

中图分类号: U448.27; TU398

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2013)09-0061-08

Mechanical Property of Steel-concrete Joint Section of Plate-truss Composite Structure

SI Xiu-yong, ZHAO Jian-bo, BAI Xiang-zhong

(School of Civil Engineering and Mechanics, Yanshan University, Qinhuangdao Hebei 066004, China)

Abstract: To get the mechanical property of steel-concrete joint section of a highway-railway cable stayed bridge deck, the nonlinear finite element analysis is performed, and a large-scale test model of steel-concrete joint section is designed based on the similarity principle. The strain and displacement of the control section and main components of the test model under loading are tested. The theoretical analysis and test result show that (1) the steel structures, concrete structures and studs of the steel-concrete composite joint have low stress levels and a strong safety reserve; (2) the relative slippage between steel and concrete is small, and the steel structure load is smoothly passed to the concrete structure. The steel-concrete composite joint has excellent work performance and reasonable structural design. The result could be a reference for design of the subject structures.

Key words: bridge engineering; cable-stayed bridge; mechanical property; model test; plate-truss composite structure; steel-concrete joint section; finite element analysis

0 引言

钢-混凝土组合梁多采用将混凝土板(顶板或顶、底板)与钢梁(钢板梁或钢箱梁)相连接的方式, 而采用混凝土板与桁架组合的桥梁相对较少。由于混凝土桥面板可以兼做桁架的平联, 能够提高主梁的刚度和稳定性, 因此, 混凝土板-钢桁梁组

合结构在铁路桥梁中得到一定程度的应用。例如, 德国的南滕巴赫铁路桥(主跨208 m的上承式3跨连续梁桥)、法国TGV高速线上的拉德尔桥(跨度90.3 m的下承式简支梁桥)等。国内近年来在芜湖长江大桥^[1-3]、天心洲长江大桥^[4]、郑州黄河大桥等公路、铁路两用桥梁中也采用了板桁组合结构作为公路桥面的承重结构。

收稿日期: 2013-03-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(50875230)

作者简介: 司秀勇(1978-), 男, 吉林洮南人, 博士研究生. (xysi2006@163.com)

板-桁组合结构按照混凝土板与钢桁梁的结合方式可以分为: (1) 纵、横梁与混凝土板组合桥面结构; (2) 密布横梁与混凝土板组合桥面结构; (3) 正交异性整体钢桥面与混凝土板组合桥面结构^[5]。在第3种组合形式中,混凝土板一般是作为非主要受力结构的道砟板,对结构静力行为的影响可以不计。板-桁组合结构除了承受由局部荷载引起的弯曲、剪切作用外,主要受由钢桁梁节点传递的巨大纵向力作用,因此,需在钢桁梁节点范围内密集地布置剪力键。结构承载力对钢与混凝土弹性模量比的取值较敏感,在计算承载力时需要考虑混凝土板的有效宽度。

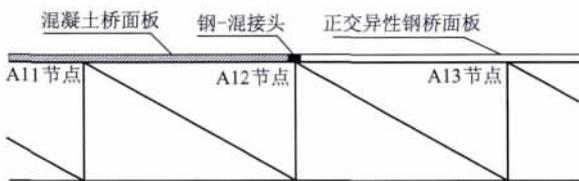


图1 主梁结构布置图

Fig. 1 Layout of main beam structure

某公铁两用斜拉桥主梁为钢桁梁,桁宽30 m,桁高15.2 m,节间长度14 m,斜拉索下端锚固于主桁上弦节点。钢桁梁为N形桁架,3片主桁间距为15 m。主桁弦杆均采用箱形截面,竖杆均采用H形截面,斜杆采用箱形或H形截面。为平衡活载作用下边墩和辅助墩的负反力,该桥公路桥面边跨168 m范围内采用混凝土板与钢桁梁组合桥面,混凝土板与钢桁梁主桁、纵梁上翼缘通过栓钉连接;中跨756 m范围内采用正交异性钢桥面;板桁组合桥面与正交异性钢桥面之间设置钢-混凝土结合段,如图1所示。

国内外钢-混组合结构的规范^[6-8]大多是针对板梁(或箱梁)结合梁,是否可以直接用于指导板桁结合梁中钢-混结合段的设计还有待深入研究。而既有针对钢-混结合段的研究^[9-13],由于结构形式与本文存在较大差异,其研究成果亦不便于直接采用。

由于桥面板宽度较大,受剪力滞效应的影响,钢-混结合段的荷载分布不明确。此外,钢-混结合段的构造复杂,承受巨大的节点力,其局部应力不容忽视。为验证该结合段的安全性,优化该部位的构造细节,研究结合段在大荷载下的受力性能,对公路桥面钢-混凝土结合段进行模型试验研究非常必要。

1 钢-混结合段数值分析

1.1 钢-混结合段构造

上层公路桥面宽30 m,桥面系作为3片主桁的平联参与主桁受力。中跨正交异性整体钢桥面采用纵横梁体系,钢桥面与主桁上翼缘焊接,兼做纵横梁上翼缘。节点上设置1道端横梁,中桁与边桁之间设置4道纵梁。边跨板桁组合结构桥面采用C50混凝土,厚度为320 mm,混凝土板与主桁、纵梁上翼缘通过 $\Phi 22 \times 150$ 栓钉连接。混凝土桥面采用预制混凝土板拼装、现场湿接缝连接方式,接缝位于主桁、纵梁上翼缘。板桁组合结构的主桁高度较正交异性整体钢桥面主桁高度低320 mm。

钢-混结合段长3.2 m,采用有格室的后承压板构造。格室由钢桥面板、T型加劲肋腹板和主桁腹板围成,如图2所示。在格室壁板上焊接 $\Phi 22 \times 150$ 栓钉作为剪力连接件。

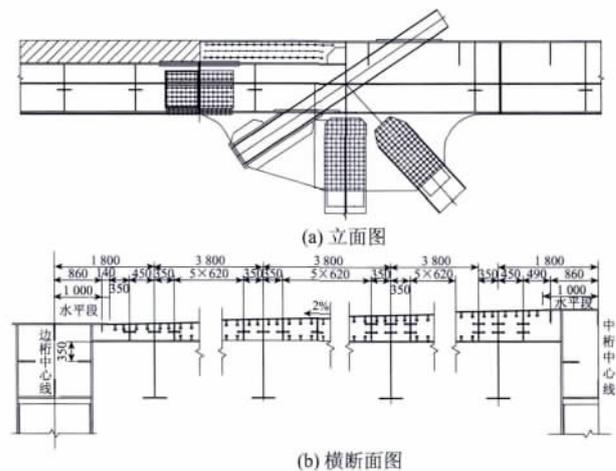


图2 钢-混结合段构造(单位:mm)

Fig. 2 Structure of steel-concrete joint section (unit: mm)

钢-混凝土结合段位于A12节点附近,斜拉索产生的竖向力主要由竖杆和斜撑承担,因此本文主要研究钢-混凝土结合段各部位在纵向荷载作用下的传力途径、应力分布和变形等。

1.2 有限元分析模型

公路桥面钢-混凝土结合段构造繁琐,受力复杂,首先应当通过有限元分析了解其应力分布情况,确定模型试验的研究重点。采用ANSYS建立钢-混凝土结合段的有限元分析模型,模型包括混凝土桥面板、正交异性板段和钢-混凝土结合段部位。

采用实体单元SOLID45模拟混凝土结构,采用板壳单元SHELL181模拟钢板结构部分,用梁单元BEAM188模拟剪力钉。考虑模型复杂性和钢-混结

合段的对称性, 只取半幅桥面进行有限元分析, 所建立的有限元模型如图 3 所示。

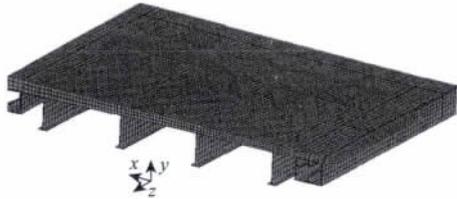


图 3 模型有限元模型

Fig. 3 Finite element model

材料参数如下:

(1) 混凝土: 弹性模量取 $E_c = 3.58 \times 10^4$ MPa (根据试验测试值), 质量密度取 $\rho_c = 2.5 \times 10^3$ kg/m³, 泊松比为 0.167。

(2) 钢材: 弹性模量取 $E_s = 2.1 \times 10^5$ MPa, 质量密度取 $\rho_s = 7.8 \times 10^3$ kg/m³, 泊松比为 0.3。

(3) 剪力钉: 弹性模量取 $E = 2.0 \times 10^5$ MPa, 质量密度取 $\rho_s = 7.8 \times 10^3$ kg/m³, 泊松比为 0.3。

在中桁和边桁的底面施加 y 向约束, 在中桁的外侧施加 x 向约束, 在正交异性板的端部所有节点上施加 z 向约束。以有限元分析荷载采用全桥空间板梁 (SPB) 法分析模型得到的最大纵向力作为设计荷载, 分别考虑 1.0 倍和 1.7 倍的荷载系数施加到模型混凝土端。

1.3 有限元分析结果

限于篇幅, 仅列出在 1.7 倍设计荷载作用下的结果。有限元分析得到部分主桁板件的应力分布如图 4 所示。

由图 4 可知, 1.7 倍设计荷载作用下主桁的所有纵向构件均受纵向压应力作用, 最大纵向正应力为 -192 MPa, 位于中桁顶板上。正交异性板桥面的纵向力主要通过横梁传递至主桁, 其与主桁腹板横向连接处有应力集中现象。

混凝土桥面段的中桁腹板应力比较均衡, 纵向压应力基本上在 -100 MPa 左右。在钢-混凝土结合段处中桁腹板的应力小于混凝土桥面段和正交异性板桥面段, 其原因是结合段处混凝土和钢板共同受力, 使钢板的应力相对较小。

在 1.7 倍设计荷载下, 边桁的受力基本与中桁类似, 应力大小略有不同。边桁的所有纵向构件均受纵向压应力作用, 个别位置有应力集中, 最大纵向正应力为 -180 MPa, 位于边桁顶板上。

正交异性钢桥面板的应力分布如图 5 所示。可

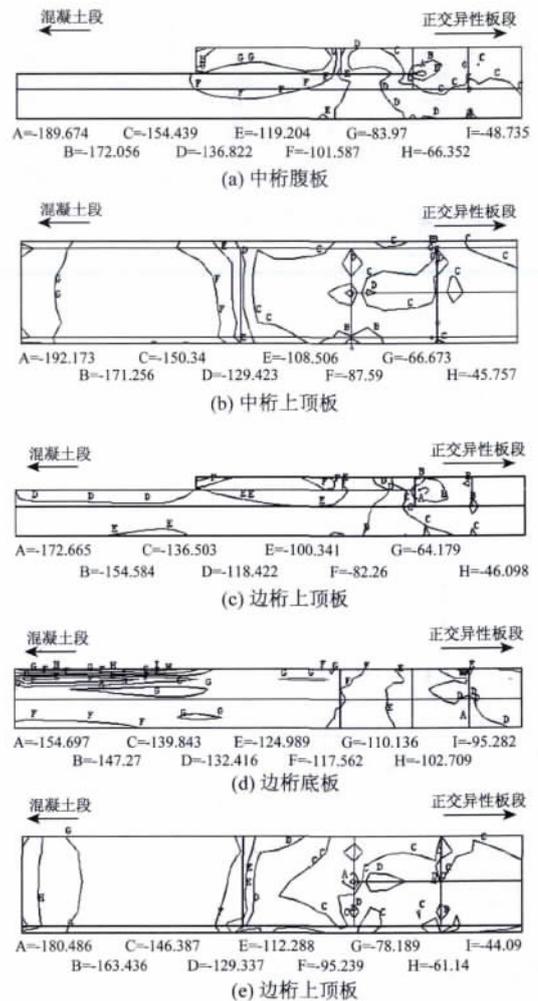


图 4 主桁板件纵向正应力分布 (单位: MPa)

Fig. 4 Longitudinal normal stress distribution in main truss plates (unit: MPa)

以看出, 1.7 倍设计荷载作用下, 面板的最大压应力为 -217 MPa, 最小压应力为 -26 MPa。在钢-混凝土结合段部位, 钢板的纵向压应力较小, 在正交异性板段纵向压应力相对较大, 且纵向压应力沿横向变化不明显。

在横梁与 1# 横肋之间, 纵向压应力逐渐增加, 越靠近 1# 横肋纵向正应力增加越快。在靠近 1# 横肋位置局部有应力集中, 应力集中有规律地分布于纵肋位置上。沿横向, 越靠近中桁的应力越大, 越靠近边桁的应力越小。由图 5 (b) 可知, 当纵肋由 T 型肋向 U 型肋过渡时, 传力过程中在横肋和面板产生额外局部变形, 引起附近构件应力集中。应力集中处最大压应力为 -210 MPa。由于集中范围较小, 应力幅值不是很高, 对结构安全性影响不大。

纵梁与横梁的应力分布如图 6 所示。在实桥结构中, 纵梁在每个节点之间为纵向连续构件, 在节

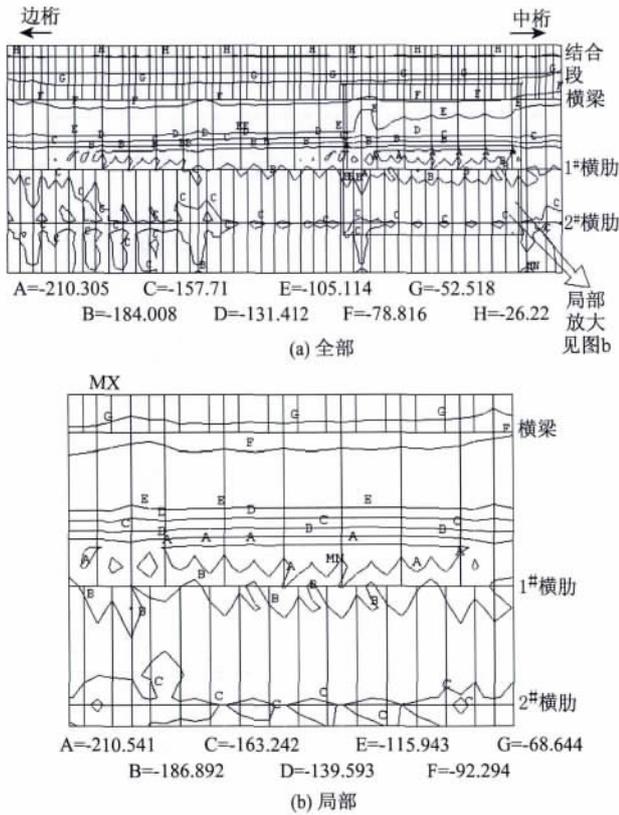


图5 正交异性板纵向正应力分布 (单位: MPa)

Fig. 5 Longitudinal normal stress distribution in orthotropic plate (unit: MPa)

点位置通过螺栓分别连接在横梁上。可以看出, 纵梁在混凝土段应力较小, 但在纵梁高度变化过渡位置有应力集中, 最大纵向压应力为 -181 MPa, 应力集中范围较小, 且对纵梁的整体受力影响不大。本次试验主要研究结合段部位承受纵向力时的行为, 因此横梁结构受力相对较小, 横梁的最大 Von Mises 应力为 70.1 MPa。

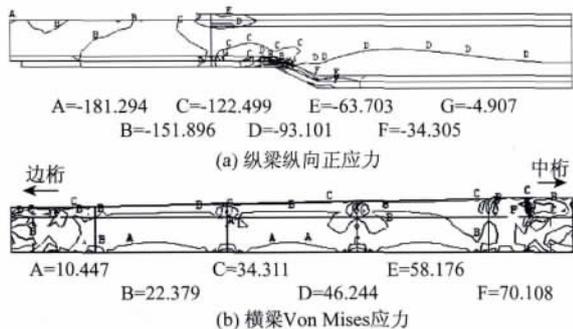


图6 纵、横梁应力分布 (MPa)

Fig. 6 Stress distributions in stringers and crossbeams (unit: MPa)

混凝土板的应力分布如图7所示。由图7可知, 1.7 倍设计荷载作用下混凝土全截面受压, 混凝土的

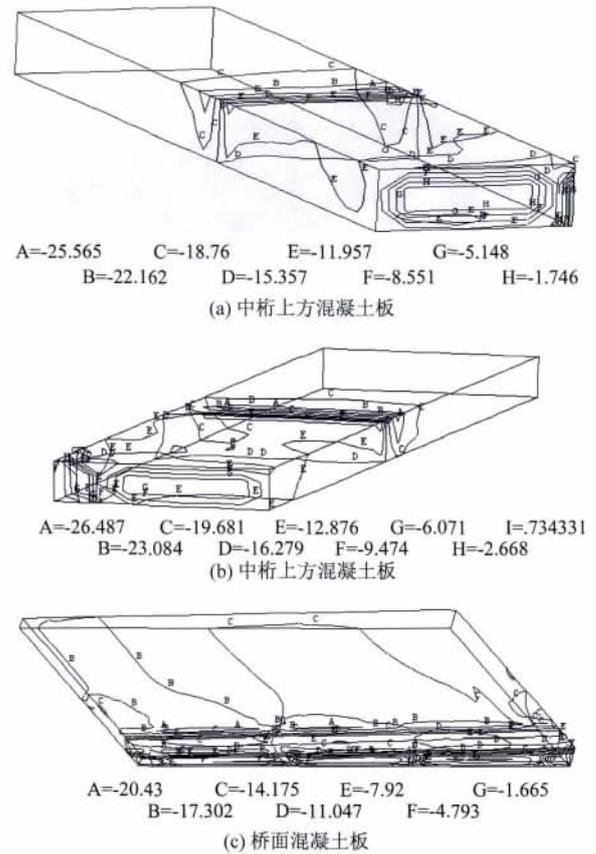


图7 混凝土板纵向正应力分布 (单位: MPa)

Fig. 7 Longitudinal normal stress distribution in concrete slabs (unit: MPa)

应力分布比较平均且应力不大, 大致在 -16 MPa 左右。在板-桁组合桥面与钢-混结合段的交界面, 由于传剪面由 4 个减少为 1 个, 传力路径突变导致一定的应力集中现象, 最大压应力达到 -26.5 MPa。

从正交异性板桥面至板-桁组合桥面, 混凝土压应力逐渐增大, 表明正交异性板的荷载由钢-混结合段中的栓钉逐步传递至混凝土, 传递给剪力钉。剪力钉以剪力的形式传递给钢板。栓钉处的混凝土应力水平较其他部分略高。节点横隔板作为钢-混结合段的承压板, 亦传递了部分纵向荷载, 在一定程度上缓解了结合段部位混凝土的纵向压应力。

2 模型试验方案

2.1 试验模型设计

考虑到实桥的节间和桁宽较大, 模型取横向桁宽的一半, 纵向取 A12 节点左右各一半的节间作为研究对象。综合考虑反力架荷载承受能力和试验加载能力后, 采用 $1:5$ 的缩尺模型进行试验研究。

模型取消或更改了部分对模型结合段局部受力不影响或影响很小的构造, 只取公路桥面构造进行研究。试验模型中包括中桁、边桁、桥面板、纵梁、横梁等构件, 桥面结合段模型包括边桁结合段、中桁结合段、正交异性板 - 混凝土桥面结合段, 同时还包括边桁、中桁与桥面之间的连接。

试验模型长 2.24 m, 宽 3.35 m, 高 0.315 m, 构造如图 8 所示。由于缩尺后的加劲肋板厚不是标准板厚, 采用接近的标准板厚替代, 这样对主体结构的应力状态影响不大。试验模型中钢板、钢筋和混凝土等材料采用与原结构相同的材料, 弹性模量、泊松比的相似常数为 1。

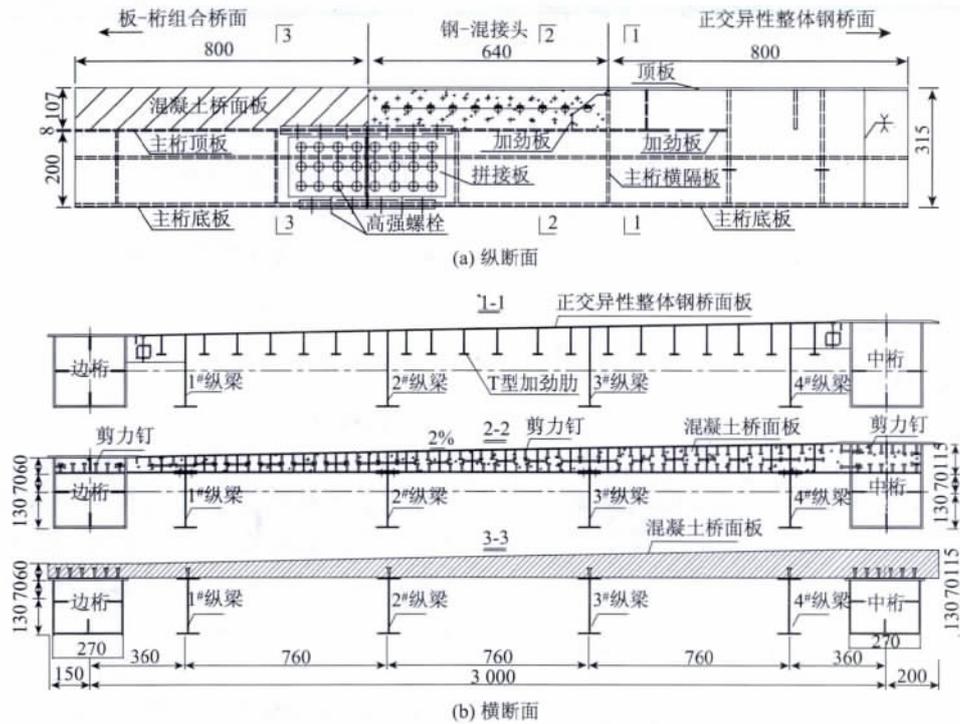


图 8 试验模型构造图 (单位: mm)

Fig. 8 Structure of test model (unit: mm)

按承载力等效原则设计高强螺栓与栓钉。实桥中采用 M30、M24 螺栓, 在试验模型分别改用 M16、M12 高强螺栓根据螺栓承载力比例换算后按等效原则进行设计和布置。实桥混凝土桥面段主桁和纵梁上方的桥面结合段内壁四周均布置有 $\Phi 22 \times 150$ 的剪力钉, 在试验模型中采用 $\Phi 8 \times 40$ 的剪力钉替代, 根据剪力钉的抗剪承载力比例换算后按等效原则进行设计, 并采用与实桥一致的布置原则进行布置。高强螺栓的连接和剪力钉的焊接工艺均与实桥一致。

2.2 试验加载方案

为保证试验模型与实际结构的应力相似性, 试验模型的制作材料和施工工艺与实桥相同, 边界条件模拟也与实际结构的受力情况相符。

按照钢 - 混结合段的实际受力情况, 主要对试验模型进行横截面内压力加载, 研究顺桥向水平压力下钢 - 混结合段的可靠性。在混凝土端设置刚度较大的传力梁对试验模型全截面施加纵向轴力, 轴力由 3 台千斤顶产生, 试验布置如图 9 所示。由于

剪力滞效应, 实际结构中横截面上的应力并非平均分布。对钢 - 混结合段进行有限元分析后发现, 在实际荷载作用下正交异性钢桥面板的应力水平最高, 属于构造薄弱环节。偏于安全考虑, 以正交异性钢桥面板的最大应力作为试验荷载的控制因素。

三维空间有限元分析表明, A12 节点与 A13 节

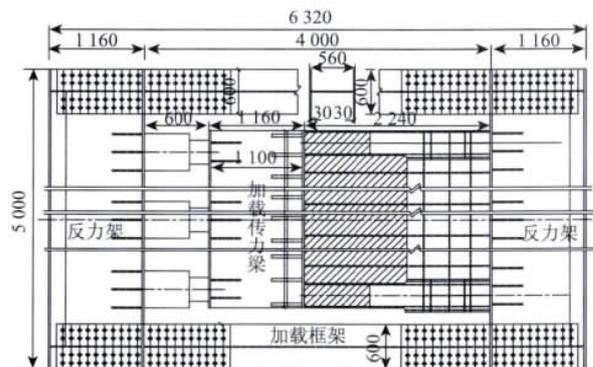


图 9 试验模型加载示意图 (单位: mm)

Fig. 9 Loading on test model (unit: mm)

点之间正交异性板桥面的设计控制应力值为 125 MPa, 因此取正交异性板桥面的最大应力达到 125 MPa 时对应的荷载模型试验设计荷载 P 。试验最大荷载加载至 $1.7P$, 此时正交异性板桥面最大应力为 213 MPa, 荷载为 716 t。

2.3 试验模型测试方案

根据试验的目的、内容和有限元仿真分析结果, 对模型进行了有针对性的测点布置。测点布置主要在钢-混凝土结合段和附近的主要受力构件上, 同时在应力较大位置布置控制测点。测点布置主要满足研究结合段主要构件的应力分布、传力途径、极限承载力等需要。由于本模型仅对模型纵向进行加载, 模型的受力也基本以纵向受力为主, 因而测点布置也主要以沿纵向单片为主, 并在桥面位置横向应力相对较大的位置布置应变花测试其剪应力情况。整个模型总共布置 243 个应变测点, 5 个位移测点。测点布置如图 10 所示。

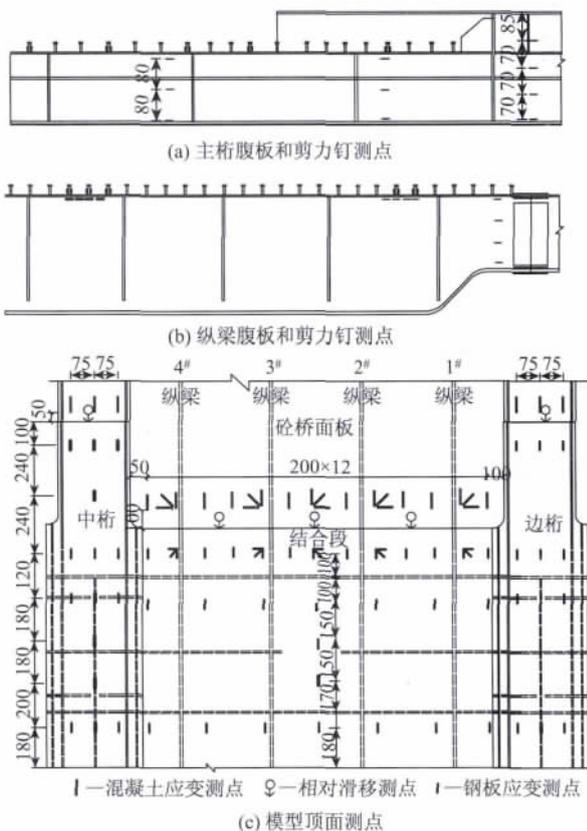


图 10 试验模型应变测点布置示意图 (单位: mm)

Fig. 10 Layout of strain measuring points on test model (unit: mm)

正交异性钢桥面板和钢-混凝土结合段中钢板的应变采用电阻应变片测量。在主桁腹板、纵梁腹板和正交异性板顶面布置测点, 如图 10 (a) ~ (c) 所

示, 了解钢箱应力分布规律, 确定钢-混结合段的强度是否满足设计要求。考虑到钢-混结合段受力复杂, 在钢-混结合段布置应变花测点。

混凝土应变采用电阻应变片测量, 如图 10 (b) 所示。通过混凝土应变的测试, 了解混凝土应力分布规律和混凝土结构的安全性是否满足要求。

栓钉被包裹在混凝土内部, 其应力状态不易直接测量。本文采用电阻应变片测量其弯曲应变, 在纵梁和主桁栓钉上间隔布置应变测点。由于模型主要承受纵向荷载, 因此栓钉应变测点布置在栓钉轴向两侧, 距离焊根 2 cm 处。

在荷载作用下, 钢与混凝土之间可能发生相对滑移。在钢-混结合段表面布置千分表测量钢与混凝土的相对滑移, 测点布置如图 10 (c) 所示,

3 试验结果和分析

3.1 钢板应变

图 11 示出了 $1.7P$ 作用下, 模型试验钢结构的部分应变测试结果及其与有限元分析结果比较。纵向位置以钢混结合段和板-桁组合桥面的交界面为原点, 以正交异性板桥面段方向为正; 横向位置以中桁中心线为原点, 以边桁方向为正。

试验测得钢板的应变值范围为 $-211 \sim -760 \mu\epsilon$, 有限元分析得到的钢板应变值范围为 $-162 \sim -768 \mu\epsilon$, 二者的分布范围较为接近, 得到的应变分布规律也基本一致。试验中所测得的应变值均未超过材料的弹性极限。

钢板纵向应变自正交异性钢桥面板段向板-桁组合桥面板段逐渐衰减, 应变分布较为流畅, 表明正交异性钢桥面板的荷载通过钢-混结合段顺畅地传递至混凝土桥面板中。在荷载传递过程中, 主桁应变经历了 2 次较大的突变, 一是在正交异性钢桥面板段 U 型肋向 T 型肋过渡处, 因为增加了 T 型肋导致截面刚度增大, 钢板应力水平有所突降; 二是在正交异性板与钢-混结合段的结合面处, 由于此处横隔板作为钢-混结合段的承压板传递了较大的纵向力, 使得钢板的应力水平突降。

钢-混结合段中, 钢桥面板的应变沿模型横向呈波浪型分布, 峰值应变正好位于 4 条纵梁上 (横向位置分别为 0.36、1.12、1.88、2.64 m), 此外, 钢桥面板边缘与主桁上缘焊接, 受主桁影响应力水平亦较高。纵向力在钢-混结合段的传递过程中, 虽然主桁、纵梁上翼缘布置了较多的剪力钉能传递更多的荷载, 但由于主桁与纵梁是主要的纵向传力构件, 其

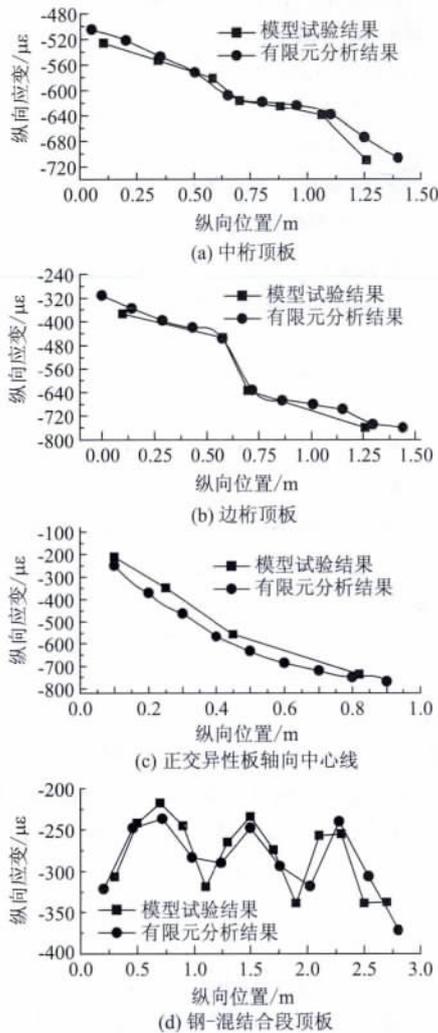


图 11 钢板测点应变分布情况

Fig. 11 Strain measuring point distributions on steel plates

分担的荷载比例较高, 因此应力水平较为突出。

3.2 混凝土应变

模型试验测得钢-混结合段混凝土的纵向应变分布及其与有限元分析结果的对比, 如图 12 所示。图中横向位置以中桁中心线为原点, 以边桁方向为正。与钢桥面的应变分布相似, 混凝土的纵向应变也呈波浪型分布, 在纵梁和桥面板与主桁连接处的混凝土应力水平较高, 其他部位相对较低, 其中 1[#]、4[#]纵梁由于与主桁相距较近, 应力峰值并不明显。

混凝土桥面纵向应力实测值为 -300 ~ -475 $\mu\epsilon$, 有限元计算值为 -365 ~ -540 $\mu\epsilon$, 实测值略小于计算值, 但二者分布规律一致, 表明有限元分析模型能准确模拟实际结构的受力状况。

3.3 栓钉应变

栓钉是钢-混组合结构中的重要传力构件, 其受力一直是钢-混凝土组合结构中最受关心的问题

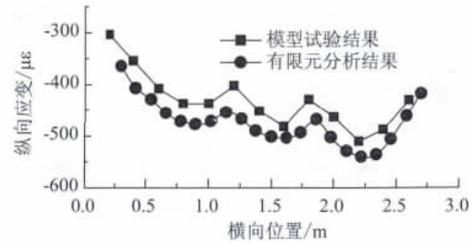


图 12 混凝土桥面板测点应变分布情况

Fig. 12 Strain measuring point distributions on concrete deck

之一。栓钉在结合面上的受力复杂, 影响因素较多, 但概括起来可以分解成上拔力和剪切力。在本文中, 钢-混结合段主要承受轴向力作用, 因此栓钉承受的荷载主要为剪切力。在剪切力的作用下, 栓钉将发生剪切变形和弯曲变形, 并可能引起钢-混凝土界面的相对滑移^[14-15]。由于栓钉的应力状态不易直接测量, 本文通过测量其弯曲应变来分析其受力状态。受轴向力和弯矩作用, 构件的应力水平可以表示为 $\sigma = \frac{N}{A} \pm \frac{Md}{I}$ 。据此, 可以由受力面内剪力钉两侧的实测应变来计算其轴力与弯矩。

1.7P 作用下部分栓钉测点的实测应力和计算得到的荷载如表 1 所示。可以看出, 1.7P 作用下栓钉的应变值和荷载水平都较低, 其安全性满足要求。

表 1 栓钉的应变及荷载

Tab. 1 Strain and loads of studs

构件	应变值/ $\mu\epsilon$		弯矩/($N \cdot m$)	上拔力/ N
	压	拉		
中桁	-47	111	142.2	227.8
2 [#] 纵梁	-149	195	309.5	453.9
3 [#] 纵梁	-173	231	363.5	534.9
边桁	-67	82	134.1	194.4

3.4 相对滑移

在 1.7P 作用下, 钢与混凝土的相对滑移如图 13 所示。相对滑移呈现两端大中间小的趋势。由于主桁承压板与栓钉传递的荷载多, 因此相对滑移较大。纵梁和桥面板传递的荷载少, 因此其相对滑移较小。

试验测得钢与混凝土的相对滑移量为 0.045 ~ 0.115 mm。按照相似关系, 实际结构相对滑移为试验模型的 5 倍, 即实际结构的相对滑移量为 0.225 ~ 0.565 mm。钢与混凝土的相对滑移量较小, 表明钢-混结合段的工作性能良好。

3.5 荷载与应变、位移的关系

图 14 示出了部分测点的荷载-应变曲线。可以看出, 在 1.7P 作用下, 结构的应力与荷载呈线性关系, 表明结合段在弹性范围内工作, 结合段安全性

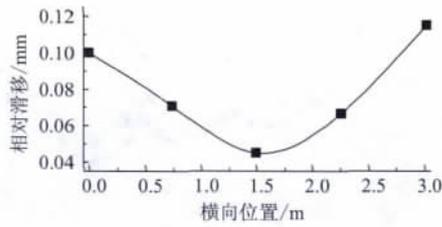


图13 相对滑移分布情况

Fig. 13 Distribution of relative slippage between steel and concrete

满足要求。

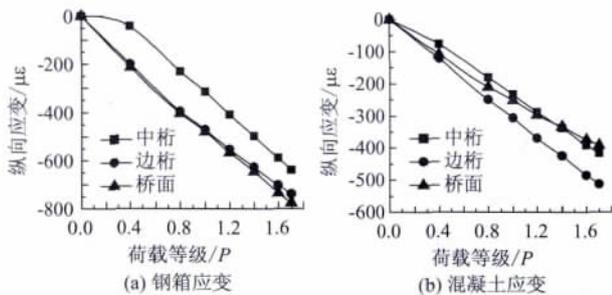


图14 部分测点应变随荷载变化曲线

Fig. 14 Strains at partial measuring points varying with load

从试验结果可以看出,在试验荷载作用下,结合段各部分的竖向压应力均小于材料强度设计值,说明结合段设计有足够的安全系数。

4 结论

依据相似原则,对某公铁两用斜拉桥公路桥面钢-混结合段进行了模型试验;测试了荷载作用下试验模型的控制断面和主要构件的应变、位移情况;结合有限元分析,对钢-混结合段的传力机理和力学性能进行了分析,得到了如下结论:

(1) 在 $1.7P$ 作用下,钢-混结合段钢结构、混凝土结构和栓钉的应变值较小,材料处于线弹性阶段,表明结合段设计的安全性满足要求并具有较高的安全储备。

(2) 钢-混结合段中钢结构、混凝土结构应力分布沿轴向均匀流畅,正交异性整体钢桥面的荷载比较顺畅地传递到板桁组合桥面,钢-混结合段的构造设计比较合理。

(3) 钢与混凝土相对滑移量小,钢-混结合段的工作性能良好。

参考文献:

References:

[1] 叶梅新,江锋. 芜湖桥板桁组合结构的研究 [J]. 铁

道学报,2001,23(5):65-69.

YE Mei-xin, JIANG Feng. Study on the Concrete Slab-steel Truss Composite Structures for Wuhu Yangtze River Bridge [J]. Journal of the China Railway Society, 2001, 23(5):65-69.

[2] 秦顺全. 芜湖长江大桥板桁组合结构斜拉桥建造技术 [J]. 土木工程学报,2005,38(9):94-98.

QIN Shun-quan. Construction Technology of Composite Plate Truss Structure for the Cable-stayed Wuhu Yangtze River Bridge [J]. China Civil Engineering Journal. 2005, 38(9):94-98.

[3] 何畏,强士中. 板桁组合结构中混凝土桥面板有效宽度计算分析 [J]. 中国铁道科学,2002,23(4):57-63.

HE Wei, QIANG Shi-zhong. Effective Width Analysis of Concrete Slab in Plate-truss Composite Structure [J]. China Railway Science, 2002, 23(4):57-63.

[4] 秦顺全,高宗余,潘东发. 武汉天兴洲公铁两用长江大桥关键技术研究 [J]. 工程力学,2007,24(1):99-105.

QIN Shun-quan, GAO Zong-yu, PAN Dong-fa. Research of Key Techniques for Wuhan Tianxingzhou Changjiang River Rail-cum-road Bridge [J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(1):99-105.

[5] 陈佳. 密布横梁与混凝土板组合桥面系高速铁路下承式钢桁梁桥的研究 [D]. 长沙:中南大学,2010.

CHEN Jia. Study on High Speed Railway Steel through Truss Bridge with Multi-crossbeam and Concrete Slab Composite Floor System [D]. Changsha: Central South University, 2010.

[6] GB50017—2003, 钢结构设计规范 [S].

GB 50017—2003, Code for Design of Steel Structures [S].

[7] Eurocode 4-1999. Design of Composite Steel and Concrete Structures, Part 2: Bridge [S].

[8] 钱冬生,强士中. 钢桥、混凝土桥及结合桥 [M]. 成都:西南交通大学出版社,1988.

QIAN Dong-sheng, QIANG Shi-zhong. Steel, Concrete and Composite Bridges [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 1988.

[9] 卫星,李小珍,李俊,等. 钢-混凝土混合结构在大跨度连续刚构桥中的应用 [J]. 中国铁道科学,2007,28(5):43-46.

WEI Xing, LI Xiao-zhen, LI Jun, et al. Using Steel-concrete Hybrid Structure in Long-span Continuous Rigid Frame Bridge [J]. China Railway Science, 2007, 28(5):43-46.

(下转第73页)

- Girder Bridge [J]. Bridge Construction, 1997 (1): 41-45.
- [2] REISSNER E. Analysis of Shear Lag in Box Beams by the Principle of the Minimum Potential Energy [J]. Quarterly of Applied Mathematics, 1946 (3): 268-278.
- [3] DEZI L, MENTRASTI L. Nonuniform Bending-stress Distribution (Shear Lag) [J]. Journal of Structural Engineering, 1985, 111 (12): 2675-2689.
- [4] 郭金琼, 房贞政, 罗孝登. 箱形梁桥剪滞效应分析 [J]. 土木工程学报, 1983, 16 (1): 1-13.
GUO Jin-qiong, FANG Zhen-zheng, LUO Xiao-deng. Analysis of Shear Lag Effect in Box Girder Bridges [J]. China Civil Engineering Journal, 1983, 16 (1): 1-13.
- [5] CHANG S T. Shear Lag Effect in Simply Supported Prestressed Concrete Box Girder [J]. Journal of Bridge Engineering, 2004, 9 (2): 178-184.
- [6] 张元海, 李乔. 箱形梁剪滞效应分析中的广义力矩研究 [J]. 铁道学报, 2007, 29 (1): 77-81.
ZHANG Yuan-hai, LI Qiao. Study on the Generalized Moment in Shear Lag Effect Analysis of the Box Girder [J]. Journal of The China Railway Society, 2007, 29 (1): 77-81.
- [7] 韦成龙, 曾庆元, 刘小燕. 薄壁箱梁剪力滞分析的多参数翘曲位移函数及其有限元法 [J]. 铁道学报, 2000, 22 (5): 60-64.
WEI Cheng-long, ZENG Qing-yuan, LIU Xiao-yan. Warping Displacement Function and Finite Element Method for Calculation of Shear Lag Effect in Box Girder [J]. Journal of The China Railway Society, 2000, 22 (5): 60-64.
- [8] 倪元增, 钱寅泉. 弹性薄壁梁桥分析 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2000.
NI Yuan-zeng, QIAN Yin-quan. Elastic Thin-walled Girder Bridge Analysis [M]. Beijing: China Communications Press, 2000.
- [9] 罗旗帜. 薄壁箱形梁剪力滞计算的梁段有限元法 [J]. 湖南大学学报, 1991, 18 (2): 33-38.
LUO Qi-zhi. Calculation of the Shear Lag in Thin Walled Box Girders by the Finite Segment Method [J]. Journal of Hunan University, 1991, 18 (2): 33-38.
- [10] 张士铎, 邓小华, 王文州. 箱形薄壁梁剪力滞效应 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1998.
ZHANG Shi-duo, DENG Xiao-hua, WANG Wen-zhou. Shear Lag Effects of Thin-walled Box Girders [M]. Beijing: China Communications Press, 1998.
- [11] 蔺鹏臻, 周世军, 刘凤奎. 抛物线型剪滞翘曲挠度函数引起的附加轴力分析 [J]. 工程力学, 2010, 27 (8): 90-93.
LIN Peng-zhen, ZHOU Shi-jun, LIU Feng-kui. Additional Axial Force Analysis Caused by Parabolical Warping Displacement about Shear Lag [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27 (8): 90-93.
- (上接第68页)
- [10] 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.
- [11] 李小珍, 肖林, 苏小波, 等. 空间刚架结构钢-混凝土复合段的力学性能 [J]. 西南交通大学学报, 2012, 47 (6): 907-914.
LI Xiao-zhen, XIAO Lin, SU Xiao-bo, et al. Mechanical Properties of Steel-concrete Composite Section in Space Rigid Frame [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2012, 47 (6): 907-914.
- [12] 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 (3): 33-35.
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 (3): 33-35.
- [13] 樊健生, 聂建国, 吕坚锋, 等. 斜拉桥钢箱梁-混凝土索塔结合段的试验研究 [J]. 土木工程学报, 2008, 41 (7): 61-66.
FAN Jian-sheng, NIE Jian-guo, LÜ Jian-feng, et al. Test on the Composite Joint Section between Steel Box Girder and Concrete Tower of a Cable-stayed Bridge [J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41 (7): 61-66.
- [14] 肖林. 钢混组合结构中剪力连接件试验研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2008.
XIAO Lin. Research and Model Test of Shear Connector in the Steel-concrete Composite Structure [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008.
- [15] 肖林, 强士中, 李小珍, 等. 考虑开孔钢板厚度的PBL剪力键力学性能研究 [J]. 工程力学, 2012, 29 (8): 282-288.
XIAO Lin, QIANG Shi-zhong, LI Xiao-zhen, et al. Research on Mechanical Performance of PBL Shear Connectors Considering the Perforated Plate's Thickness [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29 (8): 282-288.