

文章编号:1005-0523(2020)04-0007-07

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2020.04.002

双幅桁架组合梁空间受力研究

戴文蓉¹,陈建兵¹,周晨²

(1.苏州科技大学土木工程学院,江苏苏州 215011;2.中交一公局第二工程有限公司,江苏苏州 215011)

摘要:双幅桁架组合梁是通过横向联结系将A、B两个单幅桁架组合梁连接到一起组成新结构,为了了解该组合梁的受力性能、变形能力、破坏机理以及各个杆件的内力分布规律等,设计并制作试件,通过对试验梁A幅静力加载试验,分析其位移、沿截面高度纵向应变、混凝土板顶纵向应变、斜腹杆轴向应变以及横向联结系轴向应变随荷载的发展变化。通过ABAQUS有限元分析软件建立相同试件模型并且后处理,比较试验研究成果,验证模型的合理性。研究表明,施加单幅对称荷载时该组合梁具有良好的承载能力和变形能力;破坏形态为A幅弯曲破坏的同时伴随着受拉腹杆节点的冲剪破坏,B幅仅斜腹杆受轴力且影响较小;剪力滞系数在梁肋处达到峰值,说明梁肋处应力分布最不均匀,系数纵向影响范围只位于加载点附近,变形集中于中间区域;下弦杆除了承受轴向力,弯曲效应对杆件的受力影响较大,不容忽视。

关键词:双幅桁架组合梁;试验研究;受力性能;有限元

中图分类号:U446

文献标志码:A

本文引用格式:戴文蓉,陈建兵,周晨.双幅桁架组合梁空间受力研究[J].华东交通大学学报,2020,37(4):7-13.

Citation format:DAI W R, CHEN J B, ZHOU C. Experimental study and finite element analysis of spatial mechanical performance of double-span truss composite beams[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2020, 37(4): 7-13.

空间管桁架组合梁是以一般钢-混凝土组合梁为基础发展而来的新型组合结构,将管桁架和混凝土板通过剪力键连接在一起协同工作、共同受力。双幅桁架组合梁则是通过横向联结系将两幅相同的管桁架组合梁连接在一起。目前位于四川境内的干海子特大桥就是世界上最长的双幅钢管桁架梁公路桥,由混凝土翼板与管桁架组成的新型结构能够更加充分地发挥钢材和混凝土各自的材料性能,整体性强、空间刚度大、结构截面尺寸小、受力合理、承载能力高、抗震性能和动力性能优越、施工方便等优点^[1-2]。

目前已有学者针对单幅钢管混凝土桁架组合梁进行相应试验研究,重点主要包括两个方面:①组合梁的桁架节点承载能力及疲劳性能,例如刘永健等^[3]通过对T、Y形两种桁架节点以及钢管内是否灌注混凝土进行试验研究,得出了节点承载力计算时需要考虑不同的破坏形式。②组合梁整体受力性能,例如姜如^[4]以干海子大桥为参考依据,研究了其结构自振特性,归纳总结了此类桥的静动力学行为的一般规律;潘年等^[5]通过试验实测在结构力学的基础上提出了桁架组合梁的挠度、短期刚度及抗弯承载力计算公式等。但是在诸多空间桁架组合梁试验分析中关于双幅桁架组合梁受力性能的研究成果却很少,国内外涉及该类型组合结构规范中也没有详细的设计理论和计算公式,仅少数文献有相关结构的介绍及分析,但也只是借助于有限元软件的简单模拟分析,对于该结构的受力性能的试验分析几乎没有,模拟与试验结果不能得到验证;因此有必要进一步针对该新型结构进行受力性能试验研究,且实际工程中双幅桁架组合梁桥对于中等跨径与大跨径的桥梁结构更具有竞争力,有较好的工程应用前景。

通过对双幅桁架组合梁进行试验研究,分析该组合梁在单幅对称加载情况下的受力性能,并且与ABAQUS有限元软件后处理结果比较,结合试验实测与模型数据分析试件在单幅对称加载作用下的位移、沿截面高度纵向应变、混凝土板顶纵向应变、斜腹杆轴向应变以及横向联结系轴向应变随荷载的发展变化和分布规律。

收稿日期:2020-02-23

基金项目:苏州市市级建设科研项目(2014-1-12)

作者简介:戴文蓉(1994-),女,硕士研究生,研究方向为桥梁工程。

通信作者:陈建兵(1968-),男,教授,研究方向为桥梁工程。

1 试验概况

1.1 试件设计

试验梁尺寸拟参照某钢管混凝土桁架组合连续梁实桥,试验梁的长宽高按实桥 1/10 的相似比进行设计,各腹杆外径也是采用实桥 1/10 的相似比拟定,缩尺模型以后的双幅桁架组合梁全长 2 100 mm,宽 2 000 mm,计算跨径 1 880 mm,其中单幅混凝土板宽 900 mm,厚 95 mm,单幅管桁架中,管桁架的轴心高 270 mm,上弦杆之间轴心距离 450 mm,试件几何尺寸如图 1 所示。

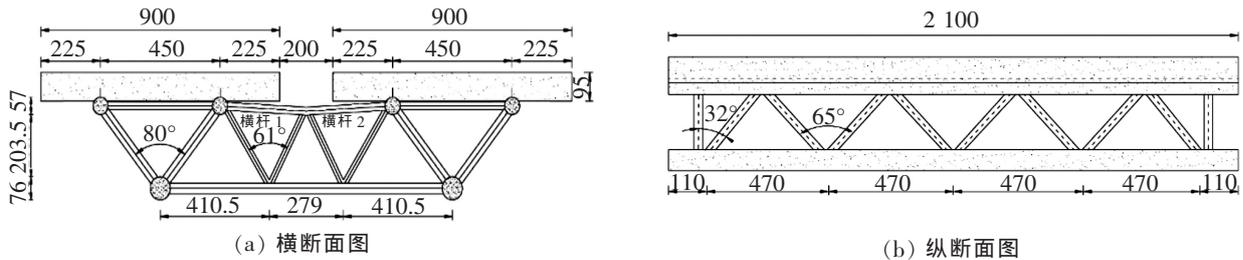


图 1 双幅桁架组合梁几何尺寸图(单位:mm)

Fig.1 Geometrical dimensions of double-span truss composite beams (Unit: mm)

混凝土板采用C40,板内双层配筋,纵筋与横向箍筋均是 $\phi 8@100$ 。在管桁架上焊接抗剪刚度较大,强度较高及抗疲劳能力较强的开孔钢板新型剪力键^[6-7],可以减小混凝土板与桁架交界处滑移效应对试件的影响,每片剪力键长 160 mm、宽 30 mm、厚 3 mm,钢片上钻 2 个直径 12 mm 的孔,2 个孔距离 120 mm,箍筋穿过开孔连接件,让混凝土板与管桁架的连接更牢固。

双幅管桁架的上下弦杆、斜腹杆以及拉杆均采用 Q345 级热轧无缝圆钢管,上弦杆型号为 D57 \times 3,下弦杆型号为 D76 \times 3,腹杆型号为 D32 \times 3,拉杆型号为 D26 \times 3,腹杆与弦杆的节点连接处采用直接焊接。沿组合梁横向,斜腹杆之间的角度是 80°;沿组合梁纵向,其中直腹杆与斜腹杆夹角是 32°,斜腹杆之间角度是 65°,各个斜腹杆相邻节点距离 470 mm。因为加载组合梁时支座处会产生集中力,所以上下弦杆中均灌入强度为 C60 的混凝土砂浆,可以避免弦杆受压内凹和局部屈服^[8]。

横向联结系是由横斜腹杆、横杆以及横向连接下弦杆组成,型号分别是 D20 \times 3, D26 \times 3, D34 \times 3。沿组合梁横向,横斜腹杆之间的角度是 61°,沿组合梁纵向,横斜腹杆之间的角度是 65°。横向联结系中的横杆与上弦杆焊接时,沿组合梁的垂直方向往下偏 14 mm,避免加载时混凝土板下压触碰到横向联结系导致杆件受力。

1.2 材性试验

按照《混凝土结构设计规范》^[9]的相关要求,制作试验梁的同时浇筑尺寸为 150 mm \times 150 mm \times 150 mm 的标准立方体试块,按规定养护并得到 C40 混凝土的平均抗压强度为 37.66 MPa,轴心抗压强度标准值为 25.19 MPa,弹性模量为 3.20 \times 10⁴ MPa。钢材的屈服强度 f_y 、抗拉强度 f_u 和弹性模量 E 如表 1 所示。

表 1 钢材力学性能
Tab.1 Mechanical properties of steel

| 类型 | f_y /MPa | f_u /MPa | $E/\times 10^5$ MPa |
|-------------|------------|------------|---------------------|
| 上弦杆 | 399 | 569 | 1.97 |
| 下弦杆 | 419 | 597 | 2.03 |
| 腹杆 | 368 | 550 | 2.05 |
| $\phi 8$ 钢筋 | 401 | 516 | 2.06 |

1.3 加载方案

试验梁加载装置主要包括2个500 kN的手动液压千斤顶、压力传感器、WH-1000型荷载仪等。在支座处垫上圆柱形钢棒来模拟竖向铰约束。试验采用2个液压千斤顶同步加载,两个加载点位于A幅跨中位置上弦杆正上方。在试验开始前,试件需要通过预加载来消除试件与加载装置之间的缝隙,并且检查测试仪器能否正常工作。

1.4 测点布置

用DH3821Net静态应变测试系统对混凝土板上单向应变片以及管桁架应变片的数据进行采集。试验梁竖向变形采用量程为 ± 100 mm位移计测量。

为了得到混凝土翼缘板各截面纵向应变,在 $L/4, 3L/8, L/2$ 三个测试截面顶部及底部各均匀布置11个混凝土应变片;为了得到双幅桁架组合梁在荷载作用下的挠度,在跨中截面的下弦杆以及混凝土板处都布置了位移计,表2为各个位移计编号;为了得到管桁架腹杆的轴向应变,在各个测试腹杆沿轴线4个方向都贴上应变片;为了得到加载时双幅桁架组合梁的横向联结系的受力状态,横斜腹杆四周以及节点位置处都需要布置应变片。

表2 位移计编号

| Tab.2 Displacement gauge number | |
|---------------------------------|------------|
| 编号 | 位置 |
| U_a | A幅支座处 |
| U_b | B幅支座处 |
| U_1 | A幅混凝土翼缘板外侧 |
| U_2 | A幅混凝土翼缘板内侧 |
| U_3 | B幅混凝土翼缘板内侧 |
| U_4 | B幅混凝土翼缘板外侧 |
| D_1 | A幅跨中下弦杆处 |
| D_2 | B幅跨中下弦杆处 |

2 试验结果及分析

2.1 试件现象及结果

以20 kN为一个荷载等级在试件的A幅施加双点对称集中力,①加载初期,因为施加荷载值较小,通过开孔剪力键连接在一起的混凝土板与管桁架协同工作、共同受力,表现出双幅桁架组合梁在弹性阶段良好的工作性能;②当 $P=100$ kN时,试验梁的A幅混凝土板和下弦杆开始出现明显下挠,而B幅混凝土板外侧则轻微上翘;③当 $P=200$ kN时,混凝土板底以及板侧可以观察到细小裂缝,此后荷载增加速度远远小于跨中挠度的增长速度,表明试件开始进入弹塑性状态;④当 $P=240$ kN时,A幅混凝土板顶加载点附近有明显横向裂缝,随着荷载的增长,其翼板裂缝宽度、长度也在进一步扩展,同时可以观察到A幅梁斜腹杆中受压杆出现明显弯曲,横向联结系中压杆也出现明显的弯曲;⑤最后当 $P=260$ kN时,混凝土翼板顶板横向裂缝变大、顶板压碎,同时伴随着一声巨响,A幅的下弦杆与斜腹杆的焊接处断裂,试件加载破坏。A幅的斜腹杆与弦杆之间发生冲剪破坏,所以试件是由于斜腹杆和上下弦杆之间断裂而提前退出工作,试验以节点的拉断终止,其中焊接工艺的好坏是试件加载破坏的主要原因。

2.2 荷载-挠度曲线

图2为双幅组合梁单幅对称加载作用下A幅跨中截面下弦杆底部荷载-挠度关系曲线,观察可知挠度曲线变化特征体现了试验梁在整个加载过程中经历了弹性、弹塑性以及破坏3个阶段。由挠度的发展趋势可知,当 $P < 200$ kN时,挠度随荷载增加呈线性发展,弹性阶段时双幅桁架组合梁具有良好的整体工作性能;当 $P=240$ kN时,试验梁的挠度增长速率大于荷载的增长速率;直至 $P=260$ kN时,A幅梁发生弯曲破坏,同时斜腹杆与上下弦杆连接处断裂,所以试验梁整体的抗弯极限承载力为260 kN。

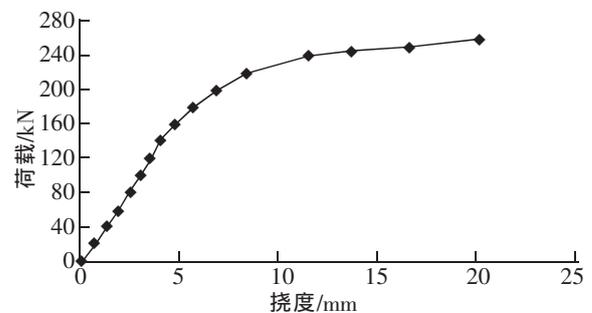


图2 双幅桁架组合梁荷载挠度曲线
Fig.2 Load deflection curve of double-span truss composite beam

图3为试验梁沿宽度方向挠度的变化曲线,可以看出双幅桁架组合梁在屈服前即荷载还未达到200 kN时,加载点所在A幅梁的跨中挠度从中点处向两边逐渐减小,随着荷载的增加,其挠度变形的增量也不断增加。由图可以观察到虽然加载点位于A幅梁,但是B幅梁跨中挠度也有较小幅度的变化,由于横向联结系的作用B幅混凝土板内侧也有向下挠度,而B幅混凝土板外侧有反向位移,位移变化在1 mm左右,B幅跨中下弦杆的位移接近0,所以单侧加载时另一幅梁受力影响小且未发生倾覆情况,该双幅桁架组合梁稳定性较强。

2.3 组合梁沿截面高度纵向应变分布

双幅桁架组合梁跨中沿截面高度纵向应变分布如图4所示,①当组合梁处于弹性工作状态时,混凝土板与管桁架连接处未出现滑移,随着荷载增加,交界面处滑移效应明显;②下弦杆处出现拐点应该是下弦杆同时承受受拉和受弯的内力所导致的;③图中虚线表示忽略上弦杆与混凝土板的滑移效应以及下弦杆的内力作用则纵向应变沿梁高近似呈线性分布,所以组合梁纵向应变沿跨中截面高度分布基本符合平截面假定;④当加载到80%极限荷载时,虚线斜率逐渐减小,且中和轴也随着荷载增加逐步上移,表明跨中混凝土板底发生明显开裂,从而退出工作。

2.4 剪力滞效应分析

单幅加载作用下的组合梁混凝土板沿板宽方向的纵向应变分布有较大的差异,出现了剪力滞后的现象^[10]。如图5所示,混凝土板板顶应变横向分布的变化幅度随着荷载的增加而离散程度越大,并且呈现出混凝土板与管桁架交界处应变值达到最大,向翼板两侧逐渐减小的现象。剪力滞效应较为明显。由此可见,单幅加载作用下双幅桁架组合梁跨中截面沿纵向的最危险(不利)截面在混凝土板与管桁架交界处。所以在实际工程中,我们对双幅桁架组合梁进行设计时,不能忽略单幅加载时组合梁的剪力滞效应。

将各测点纵向应变换算成相应的剪力滞系数,并且绘制剪力滞系数沿组合梁横向分布图,如图6所示。当 $P=220$ kN时,其梁肋处剪力滞系数 λ 分别为1.21,1.42,梁肋处系数达到峰值,向两边逐渐减小,并在跨中截面的中心位置处达到最小。随着荷载的增加,曲线的离散程度也逐渐增大,但是变化趋势相同,梁肋处剪力滞系数越大,表示该处的应力分布越不均匀。

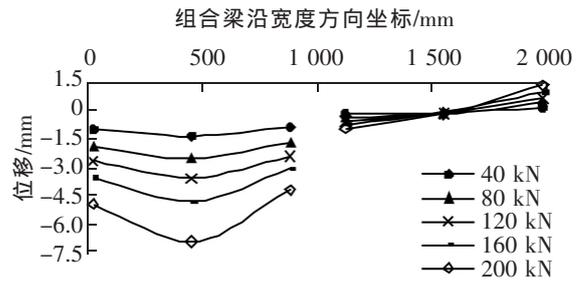


图3 沿梁宽各点挠度曲线
Fig.3 Deflection curves at various points along the width of the beam

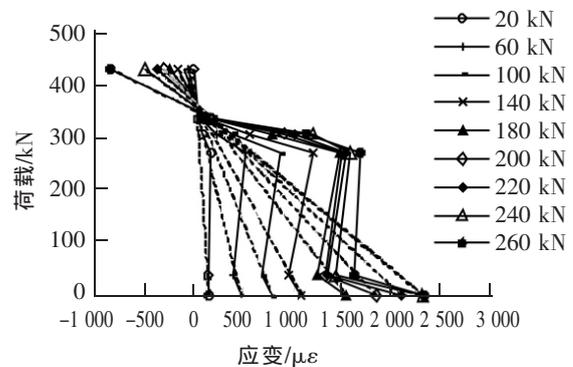


图4 组合梁沿截面高度纵向应变发展
Fig.4 Longitudinal strain development of composite beams along the section height

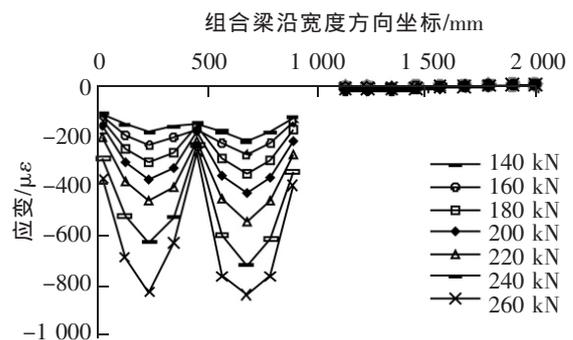


图5 混凝土顶板应变分布
Fig.5 Strain distribution of concrete roof

当 A 幅施加一对集中荷载时,探讨剪力滞效应沿组合梁纵向的分布规律,整个组合梁的计算跨径为 1 880 mm,纵向的参考点分别设置在 1/4 截面(525,1 575 mm),3/8 截面(787.5,1 312.5 mm)以及跨中截面处(1 050 mm),共 5 个参考点,当 $P=100$ kN 和 $P=200$ kN 时,计算出该 5 个参考点的剪力滞系数,同时绘制出剪力滞系数沿桥梁纵向的分布曲线如图 7 所示。由图可知,当荷载为 100 kN,整个组合梁处于弹性阶段时,剪力滞系数的影响范围在 787.5~1 312.5 mm,而且以跨中为对称轴变化。当荷载为 200 kN 时,试件进入屈服阶段,此时对比弹性工作状态,可以明显发现剪力滞效应的影响范围扩大,影响范围在 656.25~1 443.75 mm,可知随着荷载的增大,加载点截面处的应力分布不均匀性也在逐渐扩大。弹性阶段下剪力滞效应沿桥纵向的影响范围很小,主要集中在加载点的位置,而组合梁开始屈服时,剪力滞效应的影响范围扩大,主要由集中力作用处向两边发展,且剪力滞系数峰值也比弹性阶段时有所增加,200 kN 时剪力滞系数曲线可以观察到两边出现拐点突变,主要是加载后期产生明显的端部滑移,且后期变形集中于中间区域^[11]。

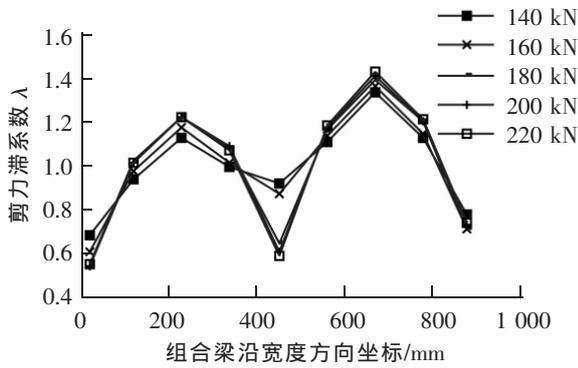


图 6 剪力滞系数横向分布
Fig.6 Lateral distribution of shear lag coefficient

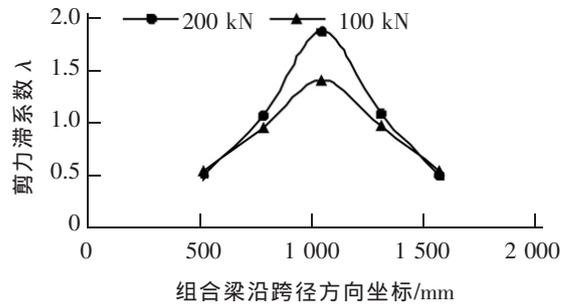


图 7 剪力滞系数纵向分布
Fig.7 Longitudinal distribution of shear lag coefficient

2.5 组合梁腹杆轴向应变

双幅桁架组合梁中 A 幅腹杆的编号如图 8 所示,同时绘制出 A 幅各腹杆的荷载平均轴应变曲线如图 9、图 10 所示。B 幅梁跨中斜腹杆 9 和斜腹杆 10 的荷载平均轴应变如图 11 所示。

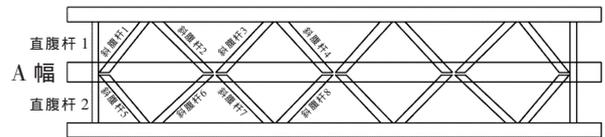


图 8 A 幅腹杆编号
Fig.8 Number of A-frame abdominal rods

斜腹杆 1,3,5,7 为压杆,斜腹杆 2,4,6,8 为拉杆,各个压杆的变化趋势一致,且同等荷载作用下对应的应变大小相近,偏差较小。而各个拉杆之间的偏差较大,表现为同等荷载作用下,支座处的拉杆比跨中处的拉杆应变值变化大。当 $P<200$ kN 时,荷载-轴应变的关系曲线都呈线性发展,当加载至 90% 极限荷载,拉杆的应变值均小于压杆的应变值,从之前的破坏特征来看,拉断的是斜腹杆 2 和斜腹杆 6,这两根拉杆的拉应变值达到屈服值,即 1/8 截面处斜腹杆 6 与上弦杆节点破坏以及 1/4 截面处斜腹杆 2 与下弦杆节点破坏。

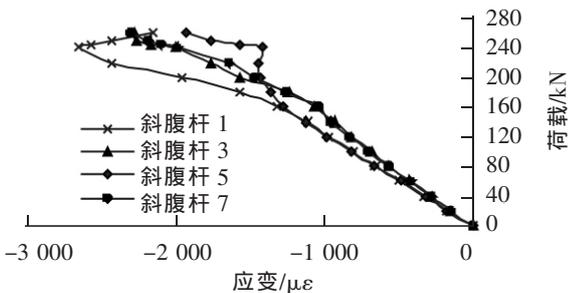


图 9 压杆荷载平均轴应变
Fig.9 Average axial strain of load on compression bar

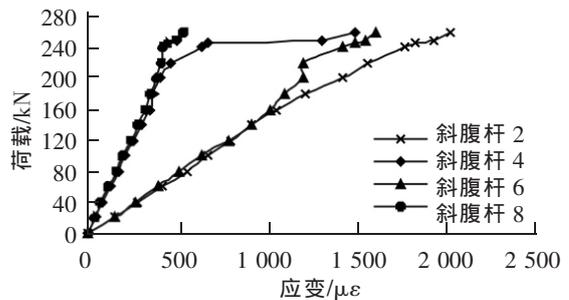
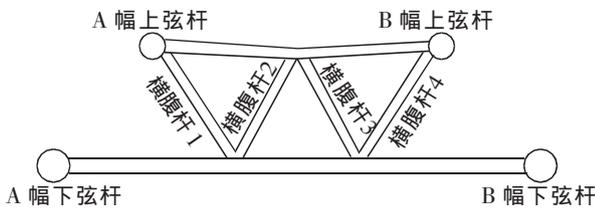


图 10 拉杆荷载平均轴应变
Fig.10 Mean axial strain of tie rod load

2.6 组合梁横向联结系腹杆荷载轴应变分析

试件极限加载破坏后,分析单幅加载作用下横向联结系的受力状态,分别对支座处以及跨中处的横向联结系进行编号,如图 12 所示,并绘制各腹杆荷载轴应变分布图,如图 13,14 所示。

1) 支座处横向联结系,横斜腹杆 1,3 是拉杆,横斜腹杆 2,4 是压杆,该 4 根横斜腹杆的变化规律相同,在荷载达到 200 kN 之前,整个横斜腹杆的荷载应变呈线性发展,之后随着荷载的增加,应变的增长幅度远大于荷载的增长幅度,但是横斜腹杆并没有达到屈服强度,并且发现,在同等荷载作用下,靠近 A 幅梁一侧的横斜腹杆 1,2 的应变绝对值要大于靠近 B 幅梁一侧的横斜腹杆 3,4 的应变绝对值。再对比横斜腹杆 1,2 以及横斜腹杆 3,4,发现对应位置处横斜腹杆的拉应变与压应变绝对值的相差不大。



(a) 支座处横向联结系

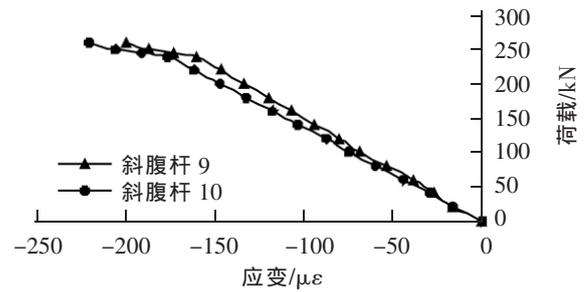
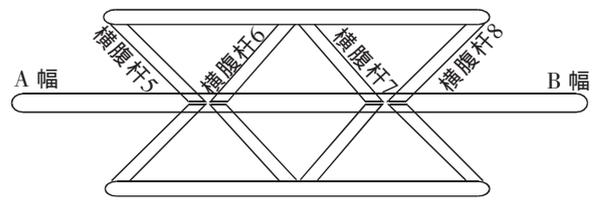


图 11 B 幅跨中腹杆荷载平均轴应变

Fig.11 Mean axial strain of mid-span beam load in B-frame



(b) 跨中处横向联结系

图 12 横向联结系编号

Fig.12 Number of horizontal connections

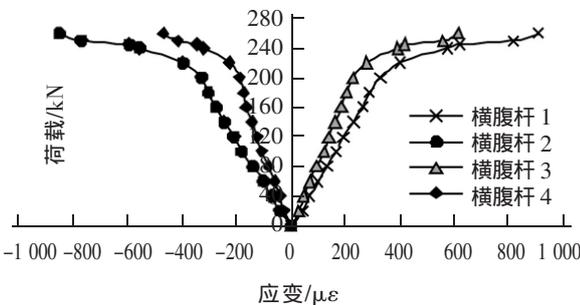


图 13 支座处横斜腹杆荷载轴向应变

Fig.13 Axial strain of the transverse web at the bearing

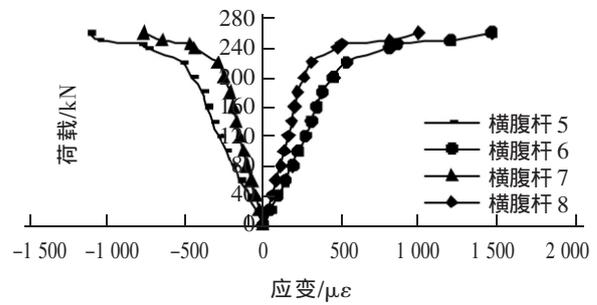


图 14 跨中处横斜腹杆荷载轴向应变

Fig.14 Axial strain of transverse web member under mid-span load

2) 跨中处横向联结系,横斜腹杆 6,8 是拉杆,横斜腹杆 5,7 是压杆,在弹性工作状态下,应变随荷载增加都呈线性发展,与支座处横向联结系的变化规律相同即靠近 A 幅一侧的横斜腹杆的应变绝对值大于另一侧腹杆应变绝对值,但位于同一侧的拉压杆应变绝对值相近,对比支座与跨中位置的横向联结系,支座横斜腹杆轴力均小于跨中横斜腹杆轴力。

3 结论

1) 双幅桁架组合梁在单幅对称加载作用下破坏形态表现为 A 幅弯曲破坏,同时伴随着受拉腹杆节点位置的冲剪破坏,B 幅仅斜腹杆受轴力且影响较小,所以确保节点的焊接质量是工程中不可或缺的一步。

2) 组合梁试验结果表明,当 $P < 200$ kN 时组合梁处于弹性状态,试件屈服后塑性区域不断向上发展,内力重新分布,中性轴上移。组合梁刚度下降,位移增加速率比弹性阶段快,非线性特征明显。

3) 剪力滞系数沿横向分布规律为梁肋处的剪力滞系数达到峰值,且由此向两边逐渐减小,说明梁肋处

应力分布最不均匀;在单幅跨中施加一对集中荷载,剪力滞效应沿组合梁纵向的影响范围很小,主要分布在加载点附近,加载后期曲线出现拐点突变是因为加载后期产生明显的端部滑移,而变形集中于中间区域。

4) 单幅对称加载,组合梁的弦杆、斜腹杆以及横向联结系中横斜腹杆主要承受轴向力,而弯曲效应影响较小,但是下弦杆处弯曲效应对杆件的受力影响较大,不容忽视。

参考文献

- [1] 聂建国. 钢-混凝土组合梁结构—试验、理论与应用[M]. 北京:科学出版社,2005:278-305.
- [2] 朱聘儒. 钢-混凝土组合梁设计原理[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2006:5-33.
- [3] 刘永健,周绪红,刘君平. 矩形钢管混凝土 T、Y 型节点受压性能试验[J]. 长安大学学报(自然科学版),2008(5):48-52.
- [4] 姜如. 钢管及钢管混凝土组合桁架桥梁动静力行为分析[D]. 成都:西南交通大学,2009.
- [5] 潘年,聂建国,余洲亮. 钢桁架-混凝土组合梁的试验研究[J]. 工业建筑,2013,43(10):122-128.
- [6] 胡建华,蒲怀仁. PBL 剪力键钢混结合段设计与试验研究[J]. 钢结构,2007,22(2):62-68.
- [7] 陈建兵,尤元宝,赵文娟. 钢-混组合结构 2 种新型连接件性能及不同间距对比研究[J]. 世界桥梁,2013,41(1):59-63.
- [8] 薛晓楠,袁政杰. 再生钢管混凝土柱黏结滑移性能试验研究[J]. 华东交通大学学报,2018,35(4):39-46.
- [9] 中华人民共和国国家标准. GB 50017-2003 混凝土结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2003:402-406.
- [10] 范立础. 桥梁工程[M]. 上册. 2 版. 北京:人民交通出版社,2012:303-308.
- [11] 刘晓刚,樊健生,聂建国. 预应力波形钢腹板组合梁承载力及变形研究[J]. 建筑结构学报,2013,34(1):28-32.

Analysis of Spatial Mechanical Performance of Double-Span Truss Composite Beams

Dai Wenrong¹, Chen Jianbing¹, Zhou Chen²

(1.School of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011,China;

2. CCCC First Highway Two Engineering Co.,Ltd., Suzhou 215011,China)

Abstract: A double truss composite beam is a new structure that connects two single truss composite beams A and B through a transverse connection system. In order to understand the mechanical performance, deformation capacity, failure mechanism and internal force of each member of the composite beam distribution rules, etc. Design and make test specimens. Through static loading test of A beam of test beam, its displacement, longitudinal strain along the cross-section height, longitudinal strain at the top of concrete slab, axial strain of oblique webs, and the axial direction of transverse coupling system were analyzed. Strain changes with load development. The same specimen model was established and processed by ABAQUS finite element analysis software, and the experimental research results were compared to verify the rationality of the model. The research shows that the composite beam has a good bearing capacity and deformation capacity when a single symmetrical load is applied; the failure mode is A-frame bending failure accompanied by punching and shear failure of the tensioned web rod nodes, and B-frame only oblique web rods receive the axis The force has a small effect; the shear lag coefficient reaches its peak at the ribs, indicating that the stress distribution at the beam ribs is the most uneven. The longitudinal influence range of the coefficients is only near the loading point, and the deformation is concentrated in the middle region. In addition to the axial force of the lower chord The bending effect has a greater influence on the force of the rod, which cannot be ignored.

Key words: double-span truss composite beam; experimental research; mechanical performance; finite element