

混合梁斜拉桥开口格室结合部承载性能试验研究

王太奇¹, 王淑敏², 马广², 杨欣然², 刘玉擎^{1*}

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 中国铁路设计集团有限公司, 天津 300308)

摘要: 为明确开口格室混合梁钢混结合部的承载性能, 基于在建广湛高铁东平水道混合梁斜拉桥结合部构造, 设计两个开口格室结合部局部缩尺试件, 开展了轴压承载力试验。分析了开口格室结合部的破坏模式、钢底板与混凝土之间的相对滑移、应变分布, 对比了钢底板分别采用焊钉和槽口型开孔板连接件对承载性能的影响。结果表明: 两试件的承载力约为实桥设计荷载的6.8倍。钢底板上采用焊钉的试件的承载力比采用槽口型开孔板的高约6%, 两试件的破坏模式均为混凝土受压破坏, 剪力连接件均未被剪断, 连接件类型对结合部的承载力和破坏模式影响不显著; 两试件承压板附近混凝土在加载过程中未因局部承压而压碎, 试件破坏时钢板仍处于弹性受力状态。槽口型开孔板连接件可增强钢底板与混凝土之间的结合性能。

关键词: 混合梁斜拉桥; 开口格室结合部; 焊钉; 槽口型开孔板; 承载性能

中图分类号: U446.1, U448.27 文献标志码: A 文章编号: 1671-9379(2025)03-0032-06

DOI: 10.13969/j.jzgjgiz.20231009001

Experimental Study on Bearing Properties of the Composite Joint with Opened Cell Used in Hybrid Girder Cable-Stayed Bridges

WANG Taiqi¹, WANG Shumin², MA Guang², YANG Xinran², LIU Yuqing^{1*}

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. China Railway Design Corporation, Tianjin 300308, China)

*Corresponding author: yql@tongji.edu.cn

Abstract: To investigate the load-bearing capability of an opened cell steel-concrete composite joint, two reduced-scaled composite joints were specially designed based on the steel-concrete composite joint of Dongping hybrid cable-stayed bridge in the Guangzhan high-speed railway and subjected to axial compression capacity tests. The failure mode, relative slip curve between steel bottom plate and concrete, and strain distribution were explored, and the influence of using stud and notched perfobond connector on the bearing capacity of steel bottom plate was compared. The results show that the bearing capacity of the specimen is about 6.8 times that of the actual bridge design. The specimen using stud on the steel bottom plate is about 6% higher than that of the specimen using notched perfobond connector. Notably, the failure mode of both specimens is predominantly characterized by compression failure of concrete, with the connectors not being sheared off, indicating that the influence of connector type on the bearing capacity and failure mode of the joint is not significant. The concrete near the bearing plate of the two specimens was not crushed due to local pressure during the loading process, and the steel

收稿日期: 2023-10-09

作者简介:

王太奇(1996—), 男, 博士研究生, 主要从事钢与组合结构桥梁、混合梁桥方面的研究。E-mail: wangtaiqi@tongji.edu.cn。

王淑敏(1972—), 女, 学士, 正高级工程师, 主要从事桥梁设计方面的工作。

通信作者:

刘玉擎(1962—), 男, 博士, 教授, 主要从事组合结构桥梁、混合梁斜拉桥等方面的研究。E-mail: yql@tongji.edu.cn。

bottom plate was still in an elastic stage when the specimens were damaged. The notched perfbond connector can enhance the bonding performance between the steel bottom plate and concrete.

Keywords: hybrid girder cable-stayed bridge; opened cell composite joint; stud; notched perfbond connector; load-bearing capacity

混合梁能够充分发挥钢与混凝土各自的材料优势,具有边跨中跨重力均衡、跨越能力强、整体刚度大、经济性好等优点,目前已得到较为广泛的工程应用^[1-2]。钢-混凝土结合部是混凝土梁与钢梁共同受力、内力传递的关键部位,其构造及受力复杂,需要通过合理设置连接构造避免应力集中^[3-4]。依据钢-混凝土结合部内混凝土有无钢格室包裹,可分为有格室型和无格室型结合部,根据轴向力从钢构件传递至混凝土的方式,可分为承压型、传剪型和承压传剪型结合部^[1]。基于以上分类,本文根据有无钢格室顶板,将有格室型结合部分为闭口格室结合部和开口格室结合部。闭口格室结合部为封闭截面,混凝土四面受约束,会增强混凝土的强度,而开口格室结合部去除了钢顶板,浇筑混凝土更加方便,混凝土与钢板之间的结合更易保证,不会形成脱空^[5]。

近年来,有学者对不同形式的钢-混凝土结合部进行了承载力试验研究。江祥林等^[6]以九江长江大桥为背景,采用在承压板和混凝土间放置塑料泡沫的方法,研究了闭口格室承压传剪型和传剪型结合部的承载力及传力机理的差异。CHENG等^[7]以永川长江大桥为背景,通过改变承压板厚度、在承压板与混凝土间放置塑料泡沫、改变剪力连接件数量的方法,探究了闭口格室结合部的传力机理。文献^[5,8]以银洲湖大桥为背景,研究了钢格室顶板、钢梁过渡段、承压板、连接件类型对结合部承载力和破坏模式的影响。上述研究主要针对闭口格室结合部,对开口格室结合部的研究较少,而开口格室可以降低混凝土的浇筑难度,保证施工质量。而且上述研究中钢格室的底板或顶板均采用焊钉连接件,未采用传剪刚度和承载力更大的开孔板连接件^[9-10]。槽口型开孔板解决了从侧面穿钢筋的难题,施工较普通开孔板连接件更方便,且开槽口对抗剪承载力的影响不超过10%,对刚度的影响不超过8%^[11]。

因此,本文以主跨为350 m的在建广湛高铁东平水道混合梁斜拉桥为研究背景^[12],考虑钢底板剪力连接件类型的影响,设计两个缩尺比为1:2的局部缩尺试件,对其开展轴压承载力试验,探究开口格室结合部的承载性能,并分析钢底板采用焊钉和槽口型开孔板连接件对其受力性能的影响。

1 承载性能试验设计

1.1 试件构造

广湛高铁东平水道混合梁斜拉桥实桥结合部设计如

图1所示。结合部箱梁截面底板由开孔隔板分隔成规则的开口格室构造,开孔隔板间距为800 mm;底板结合部长度为5 000 mm,混凝土厚度为976 mm,内部设置焊钉和开孔板连接件,结合部构造较为复杂^[12]。以实桥结构为基础,缩短结合部长度至2 000 mm,减小混凝土厚度至500 mm,横向宽度取为1 600 mm,设计包含两块开孔隔板的局部典型构造以反映结合部的实际受力特点。其余构造尺寸均与实桥的构造尺寸一致,钢底板上分别采用焊钉和槽口型开孔板连接件,按照1:2的缩尺比设计两个局部模型试件。模型试件为实桥的简化构造,但二者均为开口格室构造,均通过承压板承压、钢底板和开孔隔板上的剪力连接件抗剪传力,可以反映实桥的受力特点。按照结合部设计方法验算并通过有限元模型计算复核后,试件在实桥设计荷载1 850 kN作用下,混凝土最大压应力约为10.3 MPa,钢结构最大压应力为58.1 MPa^[13]。

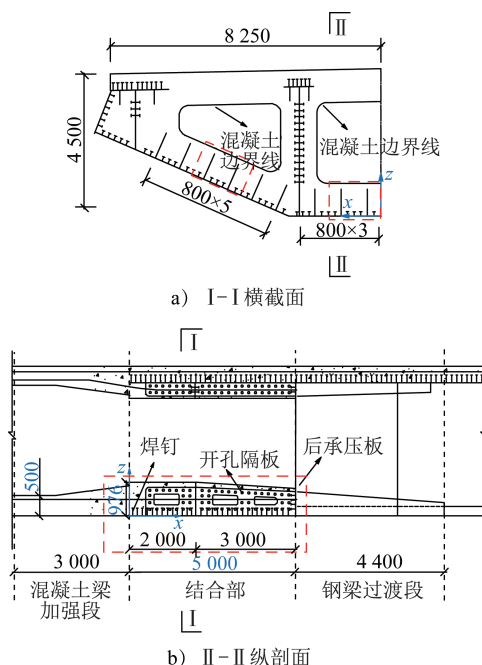


图1 钢-混凝土实桥结合部设计(单位:mm)

Fig. 1 Design of steel-concrete composite joint of Dongping bridge (unit: mm)

试件的构造和尺寸如图2所示,结合部长1 000 mm,混凝土高250 mm、宽800 mm。实桥结合部和试件的其他构造尺寸如表1所示,其中 d_s 为焊钉直径, d_r 为穿孔钢筋直径, d_h 为开孔隔板和槽口型开孔板开孔直径, t_b 为钢底板厚度, t_p 为开孔隔板和槽口型开孔板厚度, t_c 为承压板厚度。

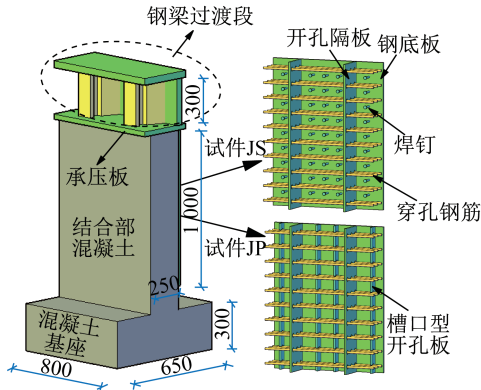


图2 试件构造(单位:mm)

Fig. 2 Specimen detail (unit: mm)

表1 实桥和试件尺寸

Table 1 Dimensions of bridge and specimens mm

类型	连接件类型	d_s	d_r	d_b	t_b	t_p	t_c
实桥	焊钉	22	25	60	28	25	60
试件JS	焊钉	10	12	30	14	12	30
试件JP	槽口型开孔板	—	12	30	14	12	30

试验目的是研究结合部的承载性能,为了保证破坏位置不发生在钢梁过渡段,在实桥尺寸缩尺的基础上,将钢梁过渡段中U形肋、T形肋、钢底板进行了加厚,尺寸为实桥设计缩尺后厚度的3倍,且板的中线面位置与原设计位置保持一致,确保三者的传力比例不发生变化。根据有限元模拟分析,上述设计可以确保结合部破坏前不会因钢梁过渡段屈服过快而导致试件无法继续承载,进而确保可以观测到结合部的破坏模式^[14]。

1.2 材料特性

试件的钢材牌号均与实桥的钢材牌号相同,混凝土强度等级为C55,钢板材料的牌号均为Q345qD,钢筋牌号为HRB400,且试件的混凝土在实际桥梁施工现场浇筑。浇筑试件的同时,采用同一批混凝土浇筑5个尺寸为150 mm×150 mm×150 mm的标准立方体试块,测试混凝土的立方体抗压强度,试验加载得到(龄期为42 d)的抗压强度为70.8 MPa。制作试件时预留钢材材性试件进行拉伸试验,每种尺寸设计3个相同的材性试件,材性如表2所示,其中 t 为钢板厚度, d 为钢筋直径, f_y 为屈服强度, f_0 为抗拉强度。

1.3 加载与测试

试验加载装置和试件布置如图3所示,采用荷载限值为30 000 kN的压剪试验机进行轴向加载。试验加载制度为前期采用力加载,后期采用位移加载,加载程序如下:(1)预加载到0.2倍的预估承载力 N_p 并卸载,加

表2 钢材材性

Table 2 Material properties of steel

牌号	t/mm	d/mm	f_y/MPa	f_0/MPa
Q345qD	12	—	416	533
Q345qD	14	—	419	496
Q345qD	30	—	394	525
HRB400	—	12	434	613

载速度为 $3\text{ kN}\cdot\text{s}^{-1}$; (2) 采用力控制加载至 $0.6N_p$, 加载速度为 $3\text{ kN}\cdot\text{s}^{-1}$; (3) 采用位移控制加载至破坏, 加载速度为 $0.2\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 。其中, 预估承载力通过数值模拟获得。

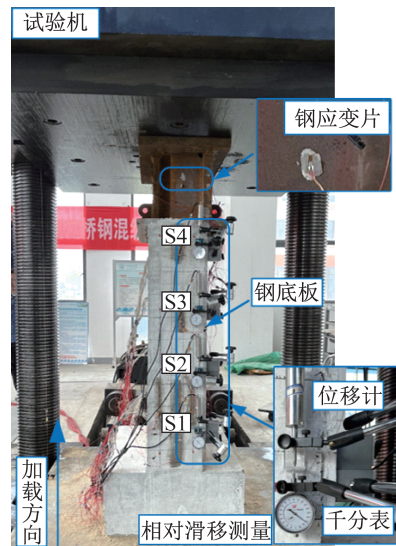


图3 试件整体布置

Fig. 3 Overall arrangement of specimens

如图3所示,采用位移计和千分表测量钢底板与混凝土之间的相对滑移,通过应变片测量钢板应力变化并监测加载过程中加载端的受力情况。在钢底板外侧布置应变片B1~B8,测量钢底板的应变分布,如图4所示。

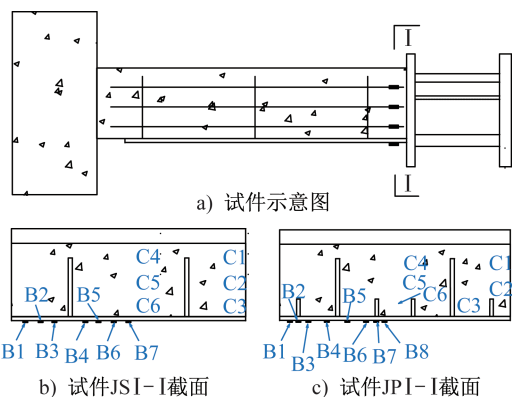


图4 应变测点布置

Fig. 4 Arrangement of strain measuring points

在后承压板附近混凝土内部的分布钢筋上布置6个应变测点,其中测点C1~C3布置在开口隔板外侧,测点C4~C6布置在两块开口隔板内侧,如图4所示。在混凝土出现裂缝前,钢筋与混凝土变形协调,可认为混凝土内部应变与其相同位置的钢筋应变相同,钢筋上测点可以反映混凝土内部的应力分布规律。

2 试验结果与分析

2.1 承载力与破坏模式

试验机控制台记录了加载端的位移和施加在试件上的荷载,可以反映试件的受力变化过程。如图5所示,受加载控制程序设置的影响,曲线前段较缓部分并不能反映试件的受力特点,用图中虚线来反映试件在弹性受力阶段的受力特点。试件JS和JP的承载力分别为13 400 kN、12 600 kN,约为实桥设计荷载的6.8倍,试件JS的承载力比试件JP的承载力高约6%。由图中虚线倾斜角度可以看出二者的弹性受力阶段抗压刚度 k 基本相同,随着位移增大,荷载呈非线性增长且二者趋势相似。在达到极限承载力后试件的抗压刚度均骤然下降,原因是开口格室结合部无钢顶板,格室未对混凝土形成足够的套箍作用。

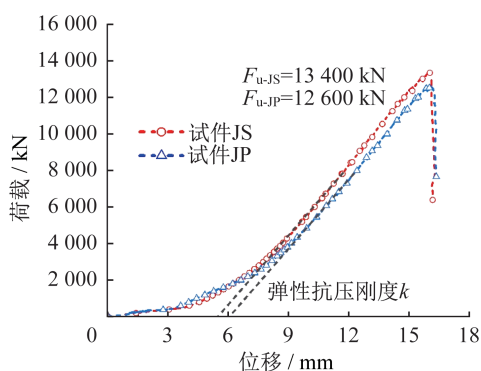


图5 荷载-位移曲线

Fig. 5 Load-displacement curves

试件JS和JP的破坏模式均为结合部的混凝土受压破坏,钢底板侧底部混凝土先出现压溃,随着荷载增加,试件底部的侧面出现竖向裂缝,并向无钢板侧和上方扩展,最终竖向裂缝贯通形成斜向破坏面导致试件不能继续承载。

如图6所示,试件JS、JP加载至8 400 kN、8 600 kN时,底部混凝土压溃,荷载达到11 000 kN、9 300 kN时开口隔板上方的混凝土出现纵向裂缝,试件侧面靠近钢底板的混凝土在荷载为12 400 kN、10 700 kN时出现多条纵向裂缝,并且随着加载纵向裂缝继续增加和发展,最后在荷载约为13 400 kN、12 600 kN时纵向裂缝贯通形成斜向破坏面,底部混凝土严重压溃,试件丧失承载力。以上

分析表明,钢底板使用焊钉或槽口型开孔板连接件对开口格室结合部的承载性能影响不显著。

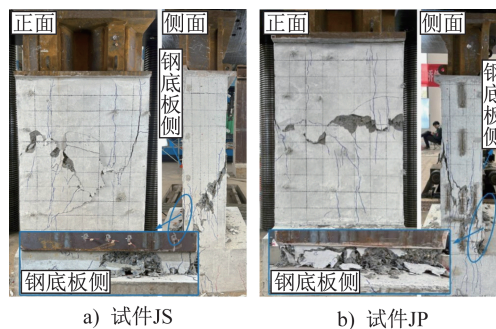


图6 混凝土破坏模式

Fig. 6 Failure modes of concrete

如图7所示,凿开试件后发现焊钉和穿孔钢筋未被剪断,钢底板上的焊钉和槽口型开孔板不能继续承载,这是结合部混凝土被压碎导致的。这与闭口格室结合部远离后承压板的焊钉剪断的破坏模式是不同的^[6]。

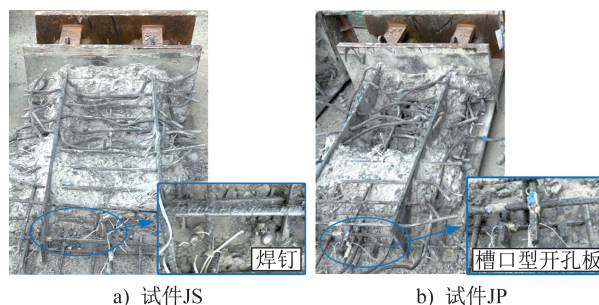


图7 焊钉和槽口型开孔板破坏模式

Fig. 7 Failure modes of stud and notched perfbond connector

2.2 钢底板-混凝土相对滑移分析

钢底板与混凝土之间的相对滑移随荷载的变化如图8所示。试件JS承压板远端测点S1的钢底板-混凝土相对滑移远大于承压板近端的相对滑移,表明承压板远端焊钉的剪力较大。试件JP的相对滑移分布规律与试件JS的相对滑移分布规律相同,故不再给出其分布规律图。

试件JS、JP最底部测点S1的荷载-相对滑移曲线如图9所示,荷载小于12 000 kN时,试件JS的相对滑移大于试件JP的相对滑移,表明槽口型开孔板连接件可以增强钢底板与混凝土的结合;荷载超过12 000 kN时,试件JP的相对滑移突然增大,这是因为荷载接近破坏荷载时,混凝土已被压碎,而试件JS在接近破坏荷载时,相对滑移并未突然变大,表明试件破坏时远端槽口型开孔板连接件处混凝土压溃程度大于焊钉连接件处混凝土的压溃程度。

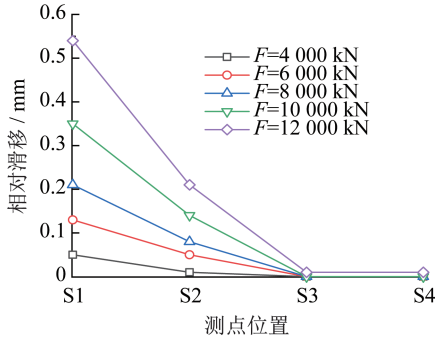


图8 试件JS钢底板与混凝土的相对滑移

Fig. 8 Relative slippage of specimen JS between steel bottom plate and concrete

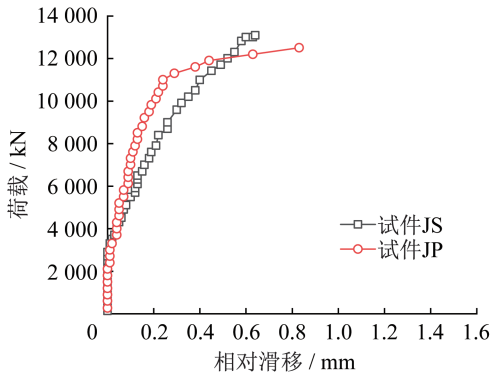


图9 荷载-相对滑移曲线

Fig. 9 Load-relative slippage curves

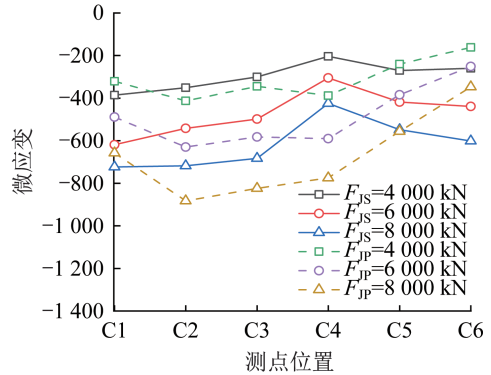


图10 混凝土应变分布

Fig. 10 Strain distribution of concrete

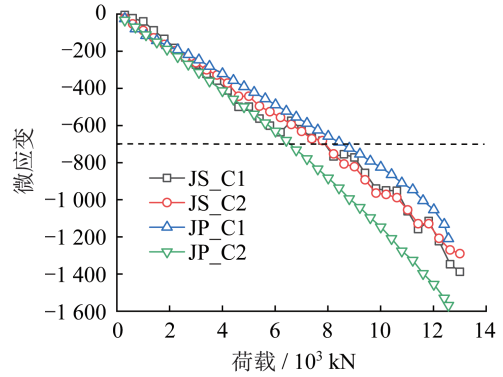


图11 混凝土应变-荷载曲线

Fig. 11 Strain-load curves of concrete

2.3 混凝土应变分析

承压板附近混凝土的应变分布如图10所示。试件JS、JP开孔隔板外侧测点C1、C2、C3的压应变大于开孔隔板内侧测点C4、C5、C6的压应变，这是因为开孔隔板内侧测点距离开孔隔板更远，约为开孔隔板外侧测点与开孔隔板距离的两倍。这表明承压板承压传力时在横向会发生弯曲变形，导致远离开孔隔板的混凝土受力小于靠近开孔隔板的混凝土受力，靠近开孔隔板的混凝土受力更加不利。试件JS测点C1处的压应变大于其他测点的压应变，而试件JP测点C2处的压应变大于其他测点的压应变。与试件JS相比，试件JP的应变最大值点靠近钢底板。表明试件JP钢底板侧的抗压刚度更大，分配到的轴向力大于试件JS的轴压力。

试件JS和JP开孔隔板外侧应变较大测点C1、C2随荷载的变化规律，如图11所示。加载过程中混凝土压应变均小于 2.5×10^{-3} ，说明混凝土未达到极限抗压强度^[15]。荷载达到6 000 kN时，混凝土应变小于 0.7×10^{-3} ，仍处于弹性受力阶段^[14]。这表明在加载过程中承压板附近的混凝土不会被压溃，与破坏模态相符。

2.4 钢底板应变分析

承压板附近钢底板应变分布如图12所示。试件JS

的钢底板压应变均小于试件JP的钢底板压应变，这表明试件JP钢底板连接件通过传递剪力承担的轴向荷载大于试件JS的对应值。

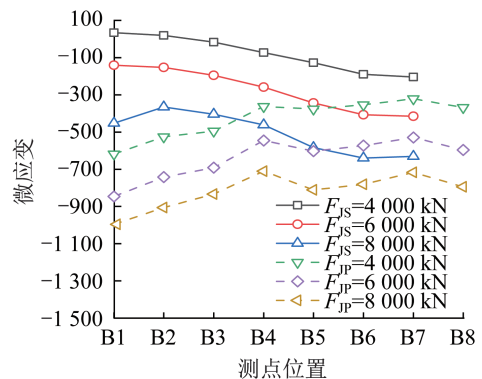


图12 钢底板应变分布

Fig. 12 Strain distribution of steel bottom plate

分别在试件JS、JP上选取受力较大的测点来分析钢底板应变随荷载的变化规律，如图13所示。加载初期，试件JS钢底板应变为正值，说明承压板附近的钢底板外侧受拉。加载至最大荷载时，钢底板的应变均小于 1.4×10^{-3} ，对应应力约为290 MPa，表明钢底板仍处于弹性状态，试件破坏时钢底板尚未屈服。

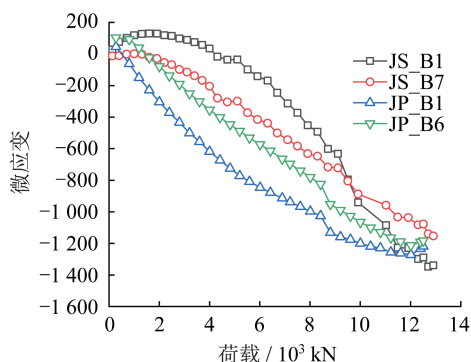


图13 钢底板应变-荷载曲线

Fig. 13 Strain-load curves of steel bottom plate

3 结论

本文以广湛高铁东平水道混合梁斜拉桥为研究背景,设计了两个缩尺比为1:2的局部缩尺试件,开展了轴压承载力试验。研究了开口格室结合部的承载性能,并分析了钢底板分别采用焊钉和槽口型开孔板连接件对承载性能的影响。可以得到以下结论:

(1) 钢底板采用焊钉和槽口型开孔板连接件的试件极限承载力分别为13 400 kN、12 600 kN,相差约6%,说明连接件类型对结合部承载力影响较小。试件的极限承载力约为实桥设计荷载的6.8倍。

(2) 钢底板采用焊钉和槽口型开孔板连接件的试件破坏模态均为混凝土受压破坏,钢底板连接件均未被剪断,侧面的纵向裂缝贯通形成斜向破坏面导致试件不能继续承载。

(3) 承压板附近混凝土在加载过程中未出现局部压碎,钢底板在试件达到承载力后依然处于弹性阶段。

(4) 槽口型开口板连接件可增强钢底板与混凝土之间的结合性能。加载过程中,钢底板使用槽口型开孔板连接件的试件相对滑移明显小于使用焊钉的试件相对滑移。

参考文献:

[1] 刘玉擎.混合梁接合部设计技术的发展[J].世界桥梁,2005,33(4):9-12.DOI:10.3969/j.issn.1671-7767.2005.04.003.
LIU Yuqing. Development of design technique for joint parts of hybrid girder[J]. World Bridges, 2005, 33(4): 9-12. DOI: 10.3969/j.issn.1671-7767.2005.04.003. (in Chinese)

[2] YANG K K, GAO L Q, ZHENG K K, et al. Mechanical behavior of a novel steel-concrete joint for long-span arch bridges-application to Yachi River Bridge [J]. Engineering Structures, 2022, 265: 114492. DOI: 10.1016/j. engstruct. 2022.114492.

[3] LIU R, LIU Y Q. Analysis of auxiliary ribs in steel - concrete joint of hybrid girder [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2015, 112: 363-372. DOI: 10.1016/j. jcsr. 2015.

05.015.

[4] 范慧敏,郑双杰,李海峰,等.整体式桥台与组合梁结合部受力机理分析[J].建筑钢结构进展,2023,25(7):85-94.DOI:10.13969/j.cnki.cn31-1893.2023.07.009.
FAN Huimin, ZHENG Shuangjie, LI Haifeng, et al. Stress mechanism analysis of the joint between integral abutment and composite beam[J]. Progress in Steel Building Structures, 2023, 25(7): 85-94. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2023.07.009. (in Chinese)

[5] 韩建秋,顾奕伟,商程宇,等.钢格室顶板对斜拉桥结合段受力性能的影响研究[J].桥梁建设,2020,50(4):61-65.DOI:10.3969/j.issn.1003-4722.2020.04.010.
HAN Jianqiu, GU Yiwei, SHANG Chengyu, et al. Study of influence of top plates over latticed chamber on load bearing behavior of steel-concrete joint section of cable-stayed bridge[J]. Bridge Construction, 2020, 50(4): 61-65. DOI: 10.3969/j.issn.1003-4722.2020.04.010. (in Chinese)

[6] 江祥林,刘玉擎,孙璇.混合梁结合部受力机理模型试验研究[J].土木建筑与环境工程,2014,36(6):48-53.DOI:10.11835/j.issn.1674-4764.2014.06.008.
JIANG Xianglin, LIU Yuqing, SUN Xuan. Model test and mechanical behavior analysis of steel-concrete joint of hybrid girder [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2014, 36(6): 48-53. DOI: 10.11835/j.issn.1674-4764.2014.06.008. (in Chinese)

[7] CHENG X, NIE X, FAN J S. Structural performance and strength prediction of steel-to-concrete box girder deck transition zone of hybrid steel-concrete cable-stayed bridges [J]. Journal of Bridge Engineering, 2016, 21(11): 04016083. DOI: 10.1061/(ASCE) BE.1943-5592.0000958.

[8] GU Y W, NIE X, LIU Y F, et al. Experimental and numerical study of steel-to-concrete joint section in hybrid cable-stayed bridges [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2021, 187: 106982. DOI: 10.1016/j. jcsr. 2021.106982.

[9] 贺绍华,方志,张龙,等.混合梁钢-混结合段PBL剪力键的受力性能研究[J].铁道学报,2015,37(10):100-109.DOI:10.3969/j.issn.1001-8360.2015.10.014.
HE Shaohua, FANG Zhi, ZHANG Long, et al. Research on mechanical performance of PBL shear connectors for steel-concrete joint section of hybrid girder bridge [J]. Journal of the China Railway Society, 2015, 37(10): 100-109. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8360.2015.10.014. (in Chinese)

[10] 周阳,么超逸.开孔板连接件力学性能研究综述[J].成都大学学报(自然科学版),2019,38(4):431-437.DOI:10.3969/j.issn.1004-5422.2019.04.021.
ZHOU Yang, YAO Chaoyi. Literature review on mechanical properties of PBL shear connectors [J]. Journal of Chengdu University (Natural Science Edition), 2019, 38(4): 431-437. DOI: 10.3969/j.issn.1004-5422.2019.04.021. (in Chinese)