

橡胶-焊钉组合连接件对钢-混组合梁受力性能影响分析

苏庆田^{1,2}, 苏航¹, 吴飞¹

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 上海高性能组合结构桥梁工程技术研究中心, 上海 200092)

摘要: 为了研究橡胶-焊钉组合连接件力学性能及其对组合梁受力性能的影响, 设计制作了5组15个推出试件, 通过静力加载试验测试了橡胶-焊钉组合连接件的受力性能, 并采用有限元模型针对组合焊钉连接件对于组合梁受力性能的影响进行了分析。试验及有限元分析结果表明: 组合焊钉连接件在不改变推出试件承载能力的情况下有效减小了试件的抗剪刚度, 且橡胶-焊钉组合连接件对连续组合梁挠度以及钢梁应力的影响很小, 但对中支点位置的混凝土应力降低作用明显。对于布置直径为22和19 mm焊钉的组合梁桥, 采用组合连接件后组合梁负弯矩区混凝土应力降低比例可达26%以及13%。针对刚度变化位置产生较大的应力突变问题, 在正弯矩区与负弯矩区的交接部分设置2 m的过渡区域能够使应力突变大小减小30%, 有效改善了变刚度区域应力突变的现象。

关键词: 连接件; 组合梁; 橡胶套; 焊钉; 试验; 有限元

中图分类号: U443.32

文献标志码: A

Mechanical Analysis of the Influence of Rubber-Sleeved Stud Connector on the Steel-Concrete Composite Girder

SU Qingtian^{1,2}, SU Hang¹, WU Fei¹

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Engineering Research Center of High Performance Composite Bridges, Shanghai 200092, China)

Abstract: To study the mechanical properties of the rubber-sleeved stud connector and its influence on the steel-concrete composite girder, 5 groups of 15 push-out test specimens are designed and fabricated. The mechanical behavior of the rubber-sleeved stud connector is revealed by using the static loading test while the influence of the rubber-sleeved stud connector on the steel-concrete composite girder is analyzed by using the FEM (finite element method) models. The test and finite element analysis results show that the rubber-

sleeved stud connector helps to reduce the shear stiffness of the push-out test specimens without decreasing the carrying capacity. Meanwhile, the rubber sleeve has little impact on the mid-span deflection and the stress in the steel girder but magnificently decreases the stress in the concrete slab at the mid-support. For composite bridges using shear connectors with a diameter of 22 mm and 19 mm, the tensile stress in concrete slab decreases by 26% and 13% respectively. As for the problem of sudden stress change, a transition area of 2 m at the intersection of the positive moment region and the negative moment region can reduce the stress mutation by 30%, which effectively improve the adverse condition in the stiffness changing region.

Key words: connector; composite girder; rubber sleeve; stud; test; finite element analysis

针对钢-混凝土连续组合梁的负弯矩区会出现钢梁受压、混凝土受拉的不利状况, 各国学者提出了许多不同的方法改善混凝土受力状态。从结构角度考虑, 增大配筋率^[1-2]、施加预应力^[3-5]、采用双结合截面^[6-7]均可大幅提高负弯矩区混凝土初始开裂荷载。从材料方面考虑, 采用高性能混凝土^[8-11]能够提高混凝土的抗拉强度以增强其抗裂性能。从施工工艺方面考虑, 采用粘贴纤维增强复合材料(FRP)阻裂增强层^[12-13]、顶升支座、预加荷载等方法均可改善混凝土抗裂性能, 大幅提高结构耐久性和承载力。

从连接程度方面, 目前大多数钢-混组合梁沿全桥采用密布单一规格的焊钉连接件, 使得钢梁与混凝土形成完全组合截面, 该方法会在负弯矩区的混凝土中产生很大的拉应力而导致其开裂。若是全桥采用稀疏布置刚度小的连接件, 使得钢梁与混凝土之间形成非完全组合截面, 可以适当降低负弯矩区

收稿日期: 2021-04-23

基金项目: 国家自然科学基金(51978501), 浙江省交通运输厅科技项目(2020031)

第一作者: 苏庆田(1974—), 男, 工学博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为钢混组合梁桥。

E-mail: sqt@tongji.edu.cn

通信作者: 吴飞(1987—), 男, 博士生, 主要研究方向为钢与组合结构桥梁研究。E-mail: 1910392@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

混凝土拉应力,但这会增加跨中钢梁的受力和梁体挠度,可能出现连接件拔出、界面滑移等现象。部分结合是指正弯矩区组合梁保持完全组合,仅将负弯矩区设计成非组合或者柔性组合结构,从而改善负弯矩区混凝土板开裂等问题^[14-15]。部分结合的实施方式主要分为两种,其一为改变负弯矩区连接件纵向间距,其二为在负弯矩区采用柔性连接件,两者本质都是通过改变连接件抗剪刚度从而控制混凝土与钢梁的结合程度。橡胶-焊钉组合连接件属于一种柔性连接件,具体实施方式为在普通焊钉连接件的根部包裹橡胶套,以此达到降低连接件初始刚度的作用。目前已有文献研究了19 mm直径的橡胶-焊钉组合连接件的初始刚度、承载能力以及刚度退化等受力性能,而组合连接件对组合梁整体受力的影响尚未涉及。本文根据桥梁工程中应用最广泛的直径22 mm焊钉,首先设计制作了15个推出试件,测试直径22 mm组合焊钉的受力特性,并结合文献^[16]中19 mm直径组合焊钉的试验结果,通过有限元模型计算分析橡胶-焊钉组合焊钉连接件对组合梁整体受力的影响,并提出了常用连续组合梁桥中的组合焊钉布置方法。

1 橡胶-焊钉组合连接件试验设计

1.1 试件设计

试验共设计了5组共15个推出试件。试件的构造细节如图1所示,在两片T形钢构件和混凝土块之间布置连接件。T形钢构件翼缘板厚20 mm,腹板厚12 mm。混凝土块的设计强度等级为C50,尺寸为350 mm×600 mm×500 mm。为了减小混凝土的浇筑方向对于焊钉力学性能的影响,混凝土均采用焊钉直立的方式进行浇筑。焊钉连接件采用ML15材质,其直径为22 mm,高度为220 mm,焊钉单侧布置个数为2根,间距为130 mm,双侧一共4根。橡胶套的高度分别为50,100 mm,厚度分别为2,4,6 mm。钢筋采用HRB400,直径为20 mm。推出试件的部分加工制作步骤如图2所示。试件分组及编号如表1所示。

1.2 加载方案

采用YAJ-10000微型控制电液伺服压剪试验机对试件顶部的钢结构进行加载,加载装置如图3所示。试件钢板顶部设置球形支座,通过对钢翼缘施加压力,测试翼缘板上的连接件抗剪性能。在混凝土底部布置沙垫层以确保结构两侧受力的均匀。每

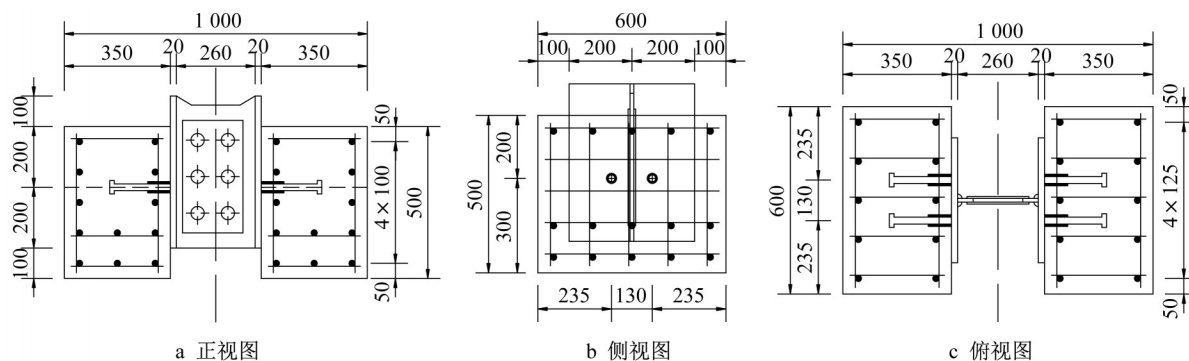


图1 试件尺寸(单位: mm)

Fig. 1 Configurations of test specimen (unit: mm)

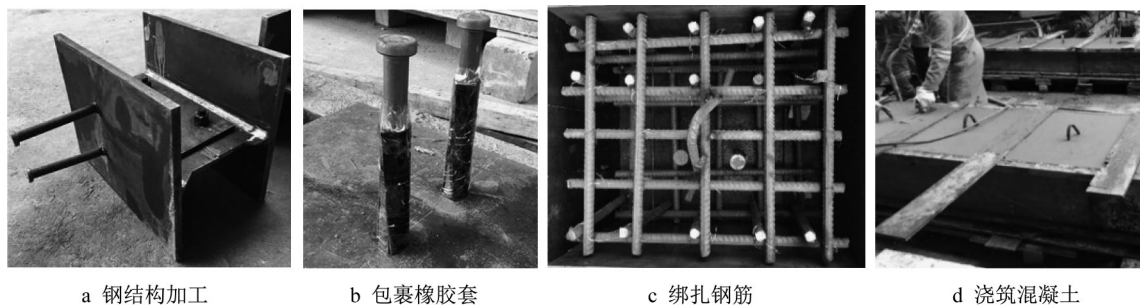


图2 试件加工制作

Fig. 2 Fabrication process of test specimen

表 1 试件分组

Tab. 1 Grouping of test specimens.

组别	焊钉直径/ mm	橡胶套高 度/mm	橡胶套厚 度/mm	试件数量
SCC-0	22	0	0	3
SCC-1	22	50	4	3
SCC-2	22	100	2	3
SCC-3	22	100	4	3
SCC-4	22	100	6	3

组三个试件均采用单调加载,加载的速率是 $2\text{ kN}\cdot\text{s}^{-1}$,当达到0.6倍预估最大承载力时,采用位移控制加载至结构破坏,速度为 $0.01\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

推出试验试件两侧共布置4个位移计测试钢板与混凝土块之间的相对滑移,位于与焊钉连接件等高度处。试验主要测试结构的加载值、钢与混凝土的滑移值,从而得到焊钉连接件剪力-滑移曲线;并观察焊钉连接件推出试件破坏模态,包括混凝土表面开裂和焊钉连接件断裂等。

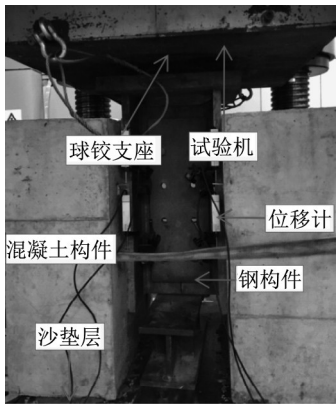


图3 试验装置

Fig. 3 Test setup

1.3 材料性能

C50混凝土材性试验采用边长150 mm的三个立方体试块,在28 d时测得抗压强度分别为57.0、55.3和57.2 MPa,平均强度为56.5 MPa。测试得到3根ML15焊钉的极限抗拉强度分别为487.5、481.8和508.6 MPa,平均抗拉强度为492.6 MPa。橡胶套采用NR45天然橡胶,橡胶材性数据见表2。

表 2 NR45 橡胶材料性能

Tab. 2 Material property of NR45 rubber

抗拉强度/MPa	延伸率/%	脆化温度/°C
≥18	≥400	-40

2 测试结果及分析

2.1 破坏模态

普通焊钉连接件推出试件以及橡胶套-焊钉组合连接件推出试件的破坏模态如图4及图5所示。所有试件的破坏模式均为焊钉连接件根部剪断。从混凝土侧看,焊钉附近受压侧的混凝土有局部压溃,但未出现混凝土开裂现象。从钢结构侧看,焊钉根部出现明显的塑性变形,剪切破坏断面光滑平整。在加载初期剪力的作用破坏了焊钉晶体原子间的结合力而引起局部断裂,导致焊钉有效抗剪截面逐渐减小,随后剪切断面的晶格滑移量迅速增加,焊钉根部截面被剪断。普通焊钉连接件仅在焊钉根部产生了较大的局部变形导致构件发生剪切破坏,而组合焊钉连接件沿焊钉高度方向均产生较大位移,并在焊钉根部发生了弯剪破坏。组合焊钉在受压侧的橡胶产生了较大变形,且受拉侧的橡胶与焊钉脱离。

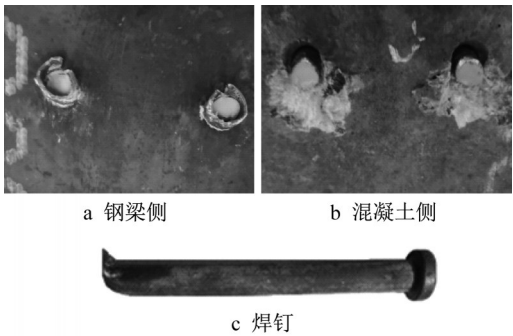


图4 普通焊钉连接件破坏模态

Fig. 4 Failure modes of ordinary stud specimen

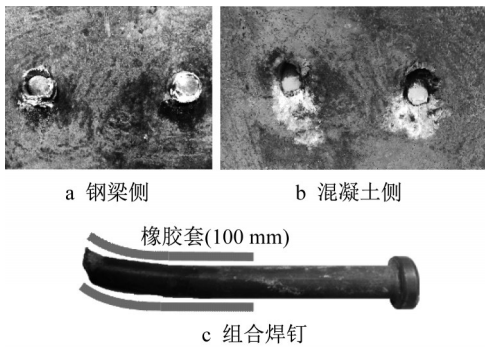


图5 组合焊钉连接件破坏模态

Fig. 5 Failure modes of rubber-sleeved stud specimen

2.2 荷载-位移曲线

试件组 SCC-0 至 SCC-4 的荷载-位移曲线如图6所示。荷载-位移曲线中纵轴为单个焊钉连接件承受的剪力,横轴为位移计测得的钢板与混凝土之间

相对滑移。由图6可以看到每组试验中三个试件的荷载-位移曲线重复性良好,个别试件如SCC-3-c的曲线偏差可能由手工包裹橡胶套时的制作误差造成。所有试件的荷载-位移曲线均有明显的弹性阶段以及塑性阶段。在弹性阶段,钢与混凝土间的滑移随荷载的增长而线性增长。在塑性阶段,随着焊钉下部的混凝土逐渐压溃,曲线开始软化,钢与混凝土间的滑移随荷载的增长而快速增长。比较图6b~图6e与图6a,图中, T_r 为橡胶套厚度, H_r 为橡胶套高度。可以发现相比普通焊钉推出试件,组合焊钉推出试件在相同荷载大小下变形明显偏大。不同组合焊钉试件的刚度变化趋势如图7所示,其中 $V_{0.2\text{mm}}$ 为滑移量为0.2 mm时的荷载大小。对于不同组别

的组合焊钉推出试件,橡胶套厚度对曲线的影响较大,软化位置随橡胶套厚度的增加而延后。可以看到橡胶套厚度对试件前期抗剪刚度影响较大,试件的前期刚度随橡胶套厚度的增加而明显减小。由图7可以看到相比其他试件组,SCC-4试件组的前期刚度有上升趋势,主要是由于该组试件橡胶套厚度最厚,在焊钉和混凝土之间具有更大的变形,在滑移量为0.2 mm时连接件根部还没有对混凝土产生较大的挤压作用,连接件的刚度较小;但随着荷载和滑移量的增加,混凝土对焊钉的挤压力增大,连接件的刚度呈现出增大的特征,后期当混凝土出现压碎或焊钉出现屈服时连接件的刚度出现了随荷载增加而变小的特点。

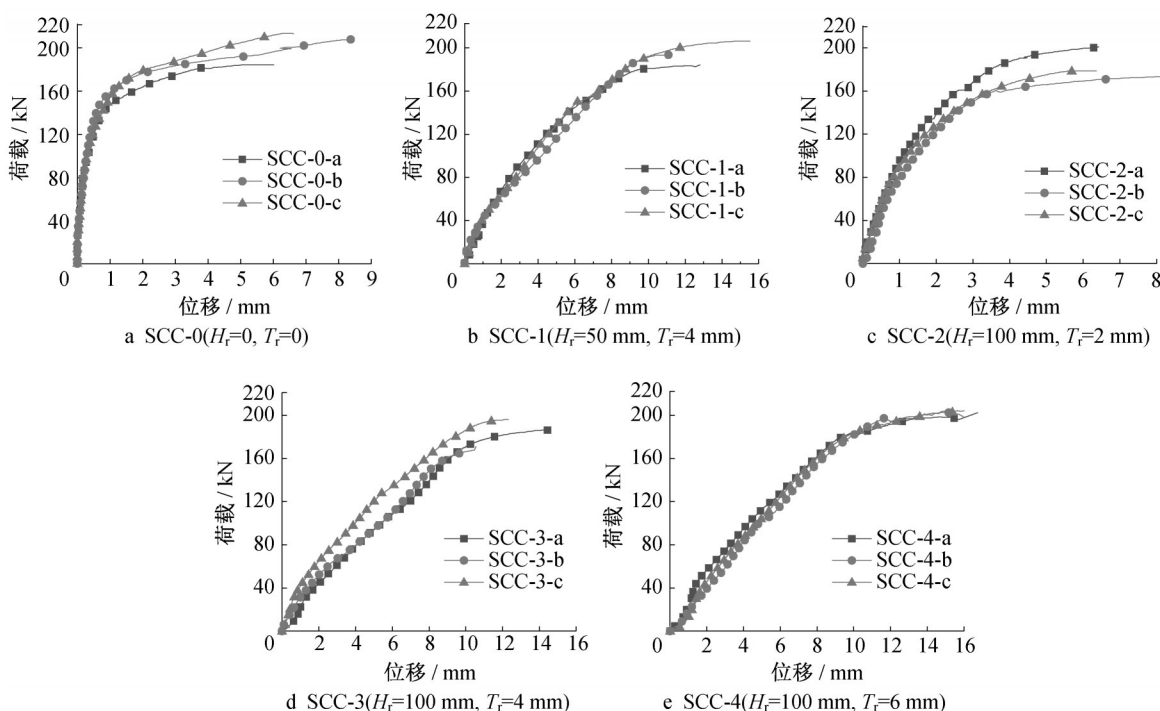


图6 荷载-位移曲线

Fig. 6 Load-slip curves

2.3 试验结果分析

各试件承载能力、滑移以及刚度测试结果见表3。其中极限抗剪承载力 V_u 为单个焊钉连接件所能承担最大剪力。最大滑移量 S_u 为极限抗剪承载力 V_u 对应的钢与混凝土之间滑移值。抗剪刚度 K_{s1} 及 K_{s2} 为单个焊钉连接件剪力-滑移曲线中30% V_u 及50% V_u 位置的割线斜率^[17-18]。

所有试件的极限承载力 V_u 相差在10%以内,可见在焊钉上包裹橡胶套并不会降低焊钉的抗剪承载能力。而钢与混凝土间的滑移 S_p 随橡胶套尺寸的增加而有所增加。随着橡胶套厚度的增加,橡胶套-焊

钉试件组SCC-2, SCC-3以及SCC-4的最大滑移 S_p 相比普通焊钉试件组SCC-0分别增长4%、78%和117%。随着橡胶套高度的增加,橡胶套-焊钉试件组SCC-1以及SCC-3的最大滑移 S_p 相比普通焊钉试件组SCC-0分别增长88%和78%。

橡胶套尺寸对抗剪刚度的影响如图8所示。可以看到当橡胶套厚度不大于4 mm,高度不大于50 mm时抗剪刚度下降最明显,橡胶套-焊钉试件组SCC-1的抗剪刚度 K_{s1} 及 K_{s2} 相比普通焊钉试件组SCC-0分别增长92.1%及91.8%。由于过厚或过高的橡胶套无法在加载过程中充分变形,因此对于

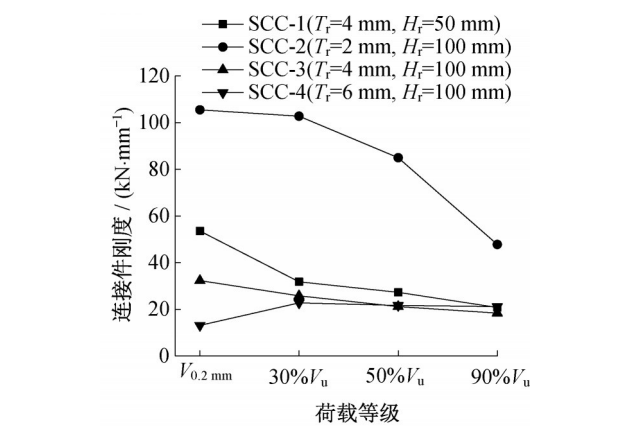


图 7 组合焊钉试件刚度变化趋势

Fig. 7 Stiffness variation tendency of rubber-sleeved stud specimens

直径为 22 mm 的橡胶-焊钉组合连接件来说,本次试验最合适的橡胶套尺寸应为厚 4 mm,高 50 mm。

表 3 试验结果及对比

Tab. 3 Test results and comparison

试验组	V_u/kN	S_p/mm	$K_{s1}/(kN\cdot mm^{-1})$	$K_{s2}/(kN\cdot mm^{-1})$
SCC-0 (a)	202.0	7.03	403.0	332.3
SCC-1 (b)	194.9	13.21	31.8	27.3
SCC-2 (c)	184.7	7.31	102.8	85.0
SCC-3 (d)	184.7	12.49	25.8	21.2
SCC-4 (e)	202.7	15.27	22.8	21.7
(b)值与(a)值之比	0.96	1.88	0.08	0.08
(c)值与(a)值之比	0.91	1.04	0.26	0.26
(d)值与(a)值之比	0.91	1.78	0.06	0.06
(e)值与(a)值之比	1	2.17	0.06	0.07

3 橡胶-焊钉连接件对组合梁受力影响

3.1 建模方法

计算橡胶-焊钉连接件对组合梁受力影响时采用局部加密刚臂间距的双梁杆系模型^[19],包括混凝土梁以及钢梁,并采用梁单元模拟连接件刚臂(如图 9 所示,经模型优化后考虑刚臂间距 1 m,加密区刚臂间距 0.5 m)。虽然双梁杆系模型的框架效应及集中力效应会导致混凝土与钢梁弯矩失真,但是由于当梁高较大时,可以忽略混凝土板的弯矩作用,将其作为轴心受力构件。而钢梁由于本身具有较大的抗弯刚度,因此框架效应产生的附加弯矩对其影响甚微。

在混凝土梁与钢梁间设置刚臂单元模拟连接件。为避免混凝土和钢梁之间产生过大的相对竖向变形,设置较大的连接件单元截面面积来减小轴向变形,且忽略梁单元的转角因素引起的变形。如图 9a

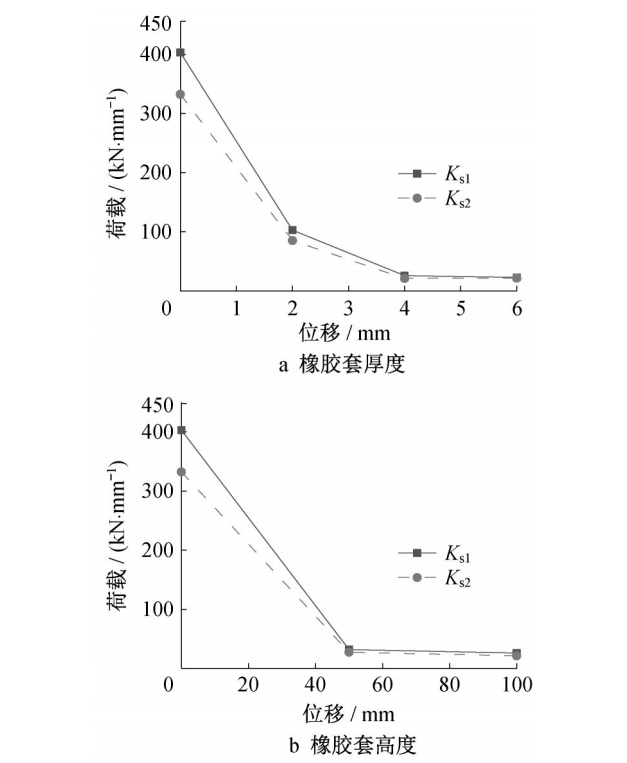


图 8 橡胶套尺寸对抗剪刚度的影响

Fig. 8 Influence of sleeve size on shear stiffness

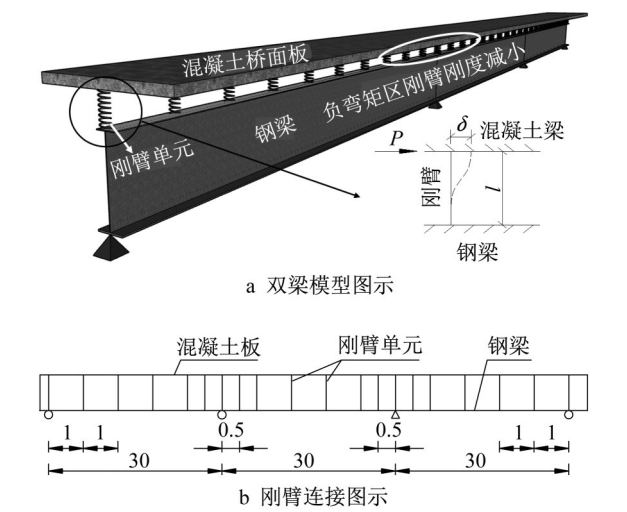


图 9 双梁杆系模型图示

Fig. 9 Double-beam model

示意图,当刚臂一端作用水平力 P 时刚臂产生的挠度 δ 为

$$\delta = 2P\left(\frac{l}{2}\right)^3 / (3EI) \tag{1}$$

设 $k = P/\delta$ 为连接件抗剪刚度,则有:

$$k = 12EI/l^3 \tag{2}$$

其中: EI 为梁单元的抗弯刚度。已知连接件抗剪刚度 k ,保持刚臂单元的长度 l 不变,则得刚臂单元抗弯

惯性矩 I 为

$$I = kl^3/12E \quad (3)$$

3.2 连接件刚度对组合梁受力影响

工程中使用较广的组合梁跨径在 30~40 m 之间^[20],本文以 3×40 m 组合梁为研究对象,其标准断面见图 10,桥宽 12.65 m,梁间桥面板厚度 240 mm。钢梁尺寸全桥统一,详见表 4。焊钉连接件采用直径 22 mm,纵向间距 200 mm,横向间距 150 mm,单根主梁横向布置三根焊钉。建模时考虑刚臂纵桥向间距为 1 000 mm,根据 2.3 节得到的普通焊钉连接件 50 % V_u 位置的割线刚度 K_{s2} 为 $3.32 \times 10^5 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$,则正弯矩区单根刚臂单元刚度取为 $4.9 \times 10^6 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 。仅改变负弯矩区连接件刚度,组合梁在恒载作用下混凝土桥面板以及钢梁的应力分布如图 11 所示。提取应力时忽略混凝土桥面板承担的弯矩,仅考虑其轴向应力。可以看到负弯矩区连接刚度的变化对正弯矩区混凝土桥面板上表面及钢梁上翼缘应力基本没有影响,但对负弯矩区的混凝土桥面板上表面有明显的降低作用。根据不同负弯矩区连接件刚度模型得到的数据,采用最小二乘法拟合出中支点截面处钢结构及混凝土应力随负弯矩区连接件刚度变化函数及曲线如图 12 所示,关键截面挠度随负弯矩区连接件刚度变化如图 13 所示。拟合公式中回归平方和占总误差平方和的比例均大于 95%,可见拟合函数可靠。根据图 12 可以看到负弯矩区连接件刚度大于 $1 \times 10^6 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 时混凝土桥面板应力变化幅度基本保持在 0.1 MPa 以内,而钢梁应力变化幅度保持在 5 MPa 以内。当负弯矩区连接件刚度小于 $1 \times 10^6 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 时,混凝土桥面板应力有较为明显的减小。根据图 13 可以得到负弯矩区连接件刚度对边跨跨中挠度影响极小,在设计时可以不考

虑包裹橡胶套对边跨跨中挠度的影响。

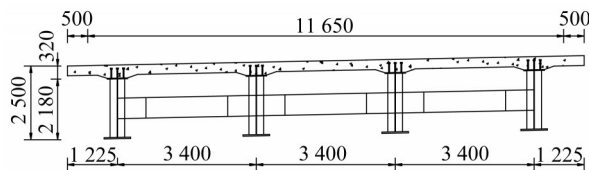


图 10 标准横断面布置(单位: mm)

Fig. 10 Configuration of cross section(unit:mm)

表 4 主梁结构参数表

Tab. 4 Structural parameters of the main girder

mm								
上翼缘		下翼缘		腹板		钢梁	桥面板	组合梁
宽度	厚度	宽度	厚度	高度	厚度	高度	高度	高度
500	30	700	40	2 110	16	2 180	320	2 500

考虑在中支点两侧各 10 m 范围内的焊钉上包裹橡胶套,根据 2.3 节橡胶-焊钉组合连接件试验结果以及文献[16]中对于直径为 19 mm 橡胶-焊钉组合连接件的试验结果,取 50 % V_u 位置的割线刚度作为连接刚度计算得到不同组合连接件对于组合梁受力性能的影响如表 5 所示。对于直径为 19 mm 的焊钉连接件,考虑调整焊钉的纵桥向及横桥向布置使其在正弯矩区连接刚度与直径为 22 mm 焊钉连接件相同。由表 5 可知橡胶-焊钉组合连接件对组合梁中跨跨中挠度以及钢梁应力的影响非常有限。对于直径 22 mm 的焊钉挠度上升比例不超过 7 %,钢梁上翼缘应力上升比例不超过 10 %;对于直径 19 mm 的焊钉挠度上升比例不超过 4 %,钢梁上翼缘应力上升比例不超过 5 %。然而橡胶-焊钉组合连接件对中支点位置的混凝土应力降低作用明显,对于 22 以及 19 mm 直径的焊钉混凝土应力降低比例可达 26 % 以及 13 %。相对来说,采用较大直径焊钉的组合焊钉对改善负弯矩区混凝土受力效果更明显。

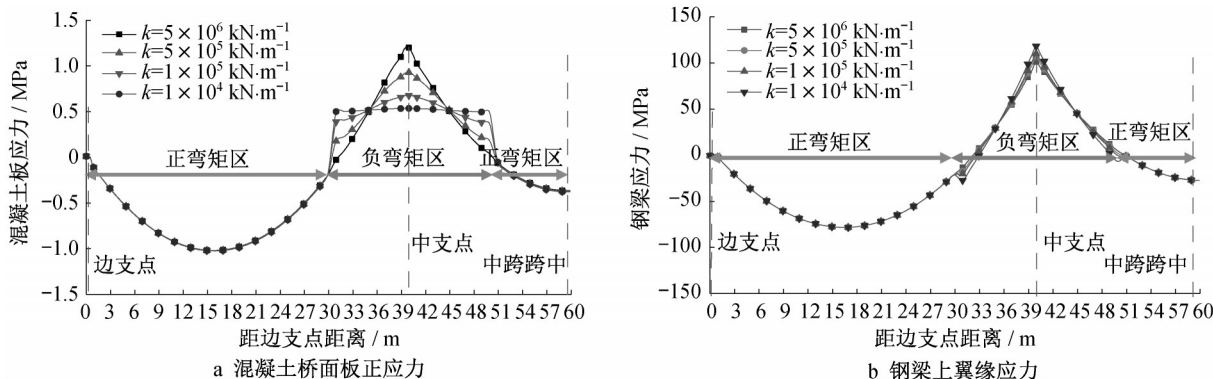


图 11 连接件抗剪刚度对应力分布的影响

Fig. 11 Influence of connector shear stiffness on stress distribution

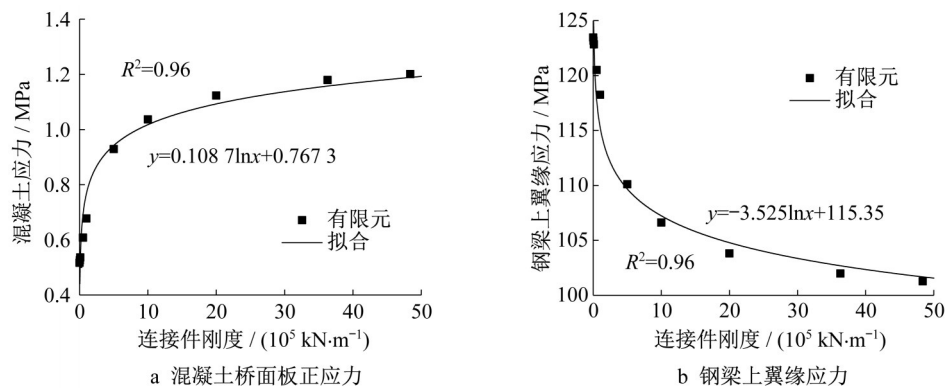


图 12 中支点截面应力变化及拟合函数

Fig. 12 Stress versus fitting function in the mid-support section

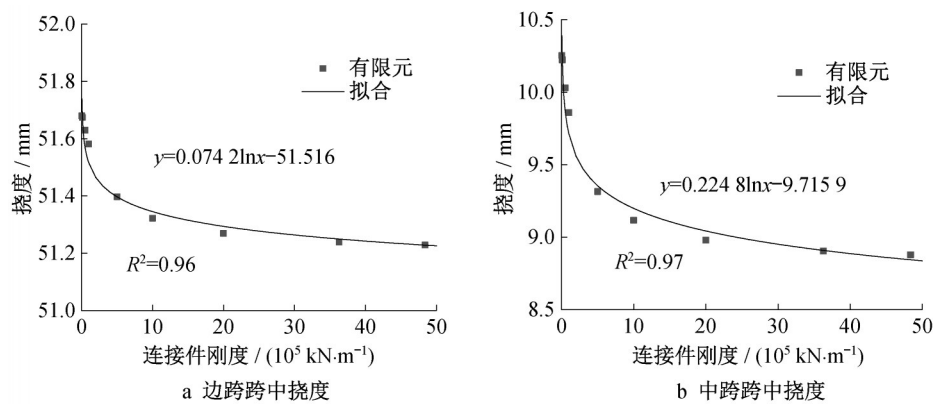


图 13 关键截面挠度变化及拟合函数

Fig. 13 Deflection versus fitting function in the key section

表 5 组合连接件对组合梁受力性能影响

Tab. 5 Influence of rubber sleeved stud connector on the composite girder

试件编号	焊钉直径/ mm	橡胶套厚 度/mm	橡胶套高 度/mm	中跨跨中挠 度/mm	上升比例/ %	混凝土应 力/MPa	降低比例 /%	钢梁应力/ Mpa	上升比例/ %
SCC-0	22	0	0	-8.84		1.19		101.63	
SCC-1	22	4	50	-9.41	6	0.92	23	110.53	9
SCC-2	22	2	100	-9.14	3	1.04	13	106.38	5
SCC-3	22	4	100	-9.47	7	0.88	26	111.55	10
SCC-4	22	6	100	-9.44	7	0.90	24	111.01	9
S1	19	0	0	-8.84		1.19		101.63	
SR1	19	5	25	-9.01	2	1.11	7	104.29	3
SR2	19	2.5	50	-9.14	3	1.05	12	106.25	5
SR3	19	5	50	-9.10	3	1.07	10	105.65	4
SR4	19	7.5	50	-9.16	4	1.04	13	106.66	5
SR5	19	5	75	-9.15	4	1.04	13	106.52	5

3.3 变刚度截面优化设计

根据图 11 可以看出,在普通焊钉连接件变为组合焊钉连接件的区域存在较大的应力突变。统计焊钉刚度变化位置附近的混凝土正应力,并采用最小二乘法拟合出应力随负弯矩区连接件刚度变化函数及曲线如图 14b、图 14c 所示。拟合公式中回归平方和占总误差平方和的比例均大于 95 %,可见拟合函

数可靠。

依据拟合得到的公式可以得到不同负弯矩区连接件刚度 k 下刚度变化截面以及刚度变化截面左侧 1 m 位置处截面的混凝土应力差值大小 σ_c^- 如式(4)所示。不采用组合焊钉时,代入对应刚度后得到混凝土应力变化大小为 0.167 MPa。若在负弯矩采用 SCC-3 组合焊钉连接件,代入对应刚度后得到混凝

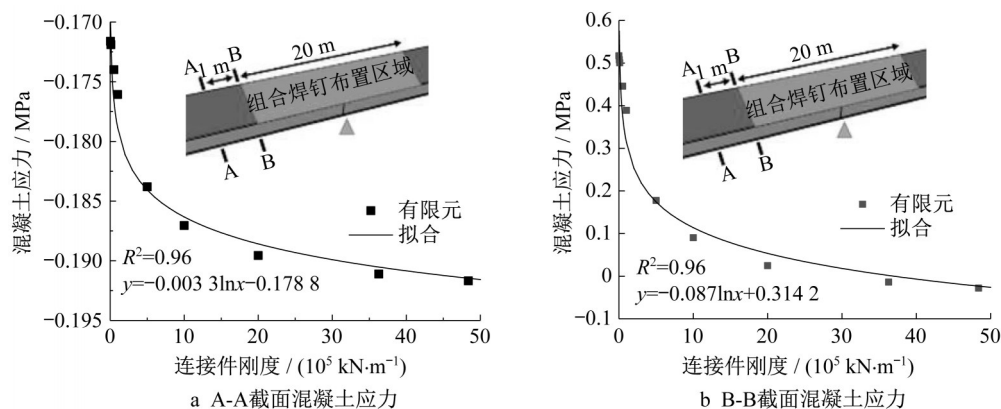


图14 普通焊钉连接件变为组合焊钉连接件区域应力变化及拟合函数

Fig. 14 Stress versus fitting function in stiffness mutation sections

土应力变化大小为0.402 MPa,较全桥采用普通焊钉上升了141 %。

$$\sigma_c = 0.0033 \ln k - 0.087 \ln k + 0.493 \quad (4)$$

为减小采用组合连接件导致的应力突变问题,考虑在正弯矩区与负弯矩区的交接部分设置2 m的过渡区域,在过渡区域采用刚度变化较小的SCC-2组合焊钉,在负弯矩区的其他部分采用刚度变化较大的SCC-3组合焊钉连接件。建立对应杆系模型,提取应力沿跨径分布结果如图15所示。可以看到设置过渡区域后应力突变有了较为明显的改善,应力突变大小从0.40 MPa下降至0.28 MPa,下降比例达到30 %,在不增加峰值应力的情况下有效改善了普通焊钉变组合焊钉区域的应力突变现象。

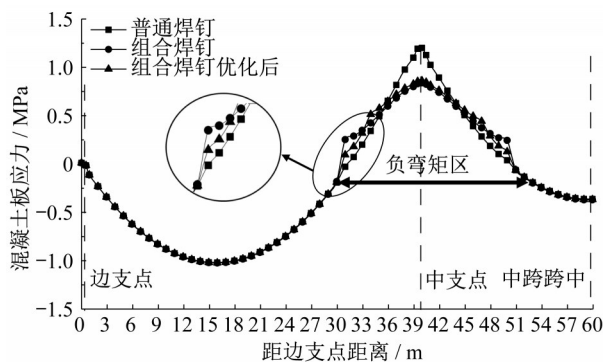


图15 设置过渡段后全桥应力分布情况

Fig. 15 Stress of the girder versus changeover portion

因此,对于连续组合梁在正弯矩区设置常规的焊钉连接件、在负弯矩区设置包裹较厚橡胶组合连接件可有效减少负弯矩区混凝土拉应力,同时在正、负弯矩区交界附近较小范围(本例为2 m)再设置一种一种包裹了中等厚度橡胶组合焊钉,可以有效减少该范围的混凝土应力突变。

4 结语

本文以橡胶-焊钉组合连接件为研究对象,对5组15个推出试件进行了静力试验,并建立有限元模型分析了橡胶-焊钉组合连接件对组合梁受力性能的影响,得到以下结论:

(1)普通焊钉及组合焊钉推出试件的破坏模式均为焊钉连接件根部剪断破坏。相比普通焊钉连接件仅在焊钉根部产生了较大的局部变形并发生剪切破坏,组合焊钉连接件沿焊钉高度方向均产生较大位移,且在焊钉根部发生了弯剪破坏。

(2)在焊钉上包裹橡胶套不会降低焊钉的抗剪承载能力,所有推出试验试件的极限承载力相差在10%以内。但钢与混凝土间的滑移随橡胶套尺寸的增加而有所增加,橡胶套-焊钉试件组的滑移大小相比普通焊钉试件组最大增长可达117 %。

(3)当橡胶套厚度不大于4 mm,高度不大于50 mm时推出试件抗剪刚度下降最明显,其抗剪刚度 K_{s1} 及 K_{s2} 相比普通焊钉分别增长92.1%及91.8%。由于过厚或过高的橡胶套无法在加载过程中充分变形,因此对于直径为22 mm的橡胶-焊钉组合连接件来说,较优的橡胶套尺寸应为厚4 mm,高50 mm。

(4)橡胶-焊钉组合连接件对组合梁中跨跨中挠度以及钢梁应力的影响很小,但对中支点位置的混凝土应力降低作用明显,对于22 mm以及19 mm直径的焊钉混凝土应力降低比例可达26 %以及13 %。相对来说,组合连接件对于采用较大直径焊钉的组合梁影响较为明显。

(5)采用橡胶-焊钉组合连接件会在刚度变化位置产生较大的应力突变,在正弯矩区与负弯矩区的交接部分设置2 m的过渡区域能够使应力突变值减

小30%,有效改善了变刚度区域应力突变的现象。

作者贡献说明:

苏庆田:论文的选题、指导及修改论文。

苏航:具体研究工作的开展和论文初稿撰写。

吴飞:负责论文思路的把控和核准。

参考文献:

- [1] EL-GENDY M , EL-SALAKAWY E . Effect of flexural reinforcement type and ratio on the punching behavior of RC slab-column edge connections subjected to reversed-cyclic lateral loads[J]. *Engineering Structures*, 2019, 200:109703.
- [2] 戴昌源,苏庆田.钢-混凝土组合桥面板负弯矩区裂缝宽度计算[J].*同济大学学报(自然科学版)*,2017,45(6):806.
DAI Changyuan, SU Qingtian. Crack width calculation of steel-concrete composite bridge deck in negative moment region[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)* , 2017, 45(6):806.
- [3] CHIN C L , KHUN M C , AWANG A Z , *et al.* Confining stress path dependent stress-strain model for pre-tensioned steel-confined concrete [J]. *Engineering Structures*, 2019, 201: 109769.
- [4] MASSARO F M , MALO K A . Stress-laminated timber decks in bridges: friction between lamellas, butt joints and pre-stressing system [J]. *Engineering Structures*, 2020, 213: 110592.
- [5] STEENSELS R , VANDOREN B , VANDEWALLE L , *et al.* Evaluation of end-zone detailing of pre-tensioned concrete girders[J]. *Engineering Structures*, 2019, 187(15):372.
- [6] KIM C E , KIM J K , YUN N R , *et al.* Structural behavior of a continuous composite truss with a composite bottom chord [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2015,105:1.
- [7] KIM H H , SHIM C S . Experimental investigation of double composite twin-girder railway bridges [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2009, 65(6):1355.
- [8] MESZOELY T , RANDL N . Shear behavior of fiber-reinforced ultra-high performance concrete beams [J]. *Engineering Structures*, 2018, 168(1):119.
- [9] WAN-WENDNER L , WAN-WENDNER R , CUSATIS G . Age-dependent size effect and fracture characteristics of ultra-high performance concrete [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2018,85:67.
- [10] 陈宝春,季韬,黄卿维,等.超高性能混凝土研究综述[J].*建筑科学与工程学报*,2014,31(3):1.
CHEN Baochun, JI Tao, HUANG Qingwei, *et al.* Review of research on ultra-high performance concrete [J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2014, 31(3):1.
- [11] POON C S , KOU S C , LAM L . Compressive strength, chloride diffusivity and pore structure of high performance metakaolin and silica fume concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2006, 20(10):858.
- [12] RIBEIRO F , SENA-CRUZ J , BRANCO F G , *et al.* 3D finite element model for hybrid FRP-confined concrete in compression using modified CDPM [J]. *Engineering Structures*, 2019, 190(1):459.
- [13] ABDULLAH A , BAILEY C G . Punching behaviour of column-slab connection strengthened with non-prestressed or prestressed FRP plates [J]. *Engineering Structures*, 2018, 160:229.
- [14] OEHLERS D J , COUGHLAN C G . The shear stiffness of stud shear connections in composite beams [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 1986, 6(4):273.
- [15] KEO P , NGUYEN Q H , SOMJA H , *et al.* Exact finite element formulation for an elastic hybrid beam-column in partial interaction with shear-deformable encasing component [J]. *Engineering Structures*, 2016, 125(15):494.
- [16] XU X , LIU Y , HE J . Study on mechanical behavior of rubber-sleeved studs for steel and concrete composite structures [J]. *Construction & Building Materials*, 2014, 53(28):533.
- [17] European Committee For Standardization. Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures (EN 1994-1-1:2004) [S]. British: CEN, 2004.
- [18] International Federation For Structural Concrete. Model code 2010 (First complete draft-Volume 1) [S]. Switzerland: FIP, 2010.
- [19] 曹沛.部分结合预应力连续组合梁受力分析[D].上海:同济大学,2017.
CAO Pei. Analysis of partial-combination prestressed continuous composite beam[D]. Shanghai: Tongji University, 2017.
- [20] 吴冲.现代钢桥(上)[M].北京:人民交通出版社,2006.
WU Chong. Modern steel bridge (vol.1) [M]. Beijing: China Communication Press, 2006.