

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.166



开放科学(资源服务)标识码(OSID):



可循环使用全装配钢-混凝土组合梁抗弯性能试验研究

侯和涛¹, 鲁玉曦¹, 臧增运¹, 高梦起², 熊方明³

(1. 山东大学 土建与水利工程学院, 济南 250061; 2. 郑州城建集团投资有限公司, 郑州 450001;
3. 青岛鑫光正钢结构股份有限公司, 山东 青岛 266700)

摘要: 研究了一种可循环使用的全装配钢-混凝土组合梁, 组合梁由预制混凝土楼板和钢梁通过新型剪力连接件(以下简称“紧固件”)组合为一体, 紧固件固定于预制楼板的钢导槽上, 通过钢梁和预制楼板交界面的摩擦来传递两者之间的剪力。为研究此新型全装配钢-混凝土组合梁在静荷载作用下的受弯性能, 进行了6组足尺试件在简支条件下的四点弯曲试验。6组试件均为部分剪力连接, 包括5组可循环使用全装配钢-混凝土组合梁和1组采用栓钉作为剪力连接件的现浇组合梁, 主要变化参数为预制混凝土楼板的数量及纯弯段的长度。结果表明: 在单调荷载作用下, 组合梁表现出一定的组合作用; 预制板数量越多, 试件的初始刚度越小, 但对试件的受弯极限承载力没有明显影响, 纯弯段的长度变化对试件的初始刚度和受弯极限承载力均没有明显影响。

关键词: 全装配; 钢-混凝土组合梁; 弯曲试验; 受力性能

中图分类号: TU398 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2022)04-0087-09

Experimental study on flexural resistance of recyclable fully assembled steel-concrete composite beams

HOU Hetao¹, LU Yuxi¹, ZANG Zengyun¹, GAO Mengqi², XIONG Fangming³

(1. School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250061, P. R. China; 2. Zhengzhou City Construction Group Investment Co., Ltd, Zhengzhou 450001, P. R. China; 3. Qingdao Xinguangzheng Steel Structure Co., Ltd, Qingdao 266700, Shandong, P. R. China)

Abstract: This article mainly studies a recyclable fully assembled steel-concrete composite beam, which is composed of several precast concrete slabs and a steel beam through a new type of shear connector (hereinafter referred to as "fastener"). The fastener is fixed on the steel channel beneath the concrete slab. Moreover, the shear force between the steel beam and the prefabricated concrete slab is transmitted through the friction between those two. In order to study the flexural performance of this new fully assembled steel-concrete composite beam under static load, six sets of full-scale specimens were subjected to four-point bending tests under simply supported conditions. The six sets of test pieces are all partially

收稿日期: 2021-03-22

基金项目: 国家自然科学基金(51878390、51508331、51578324)

作者简介: 侯和涛(1970-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事钢-混组合结构、装配式建筑及防震减灾研究, E-mail: houhetao@sdu.edu.cn.

Received: 2021-03-22

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 51878390, 51508331, 51578324)

Author brief: HOU Hetao (1970-), professor, doctoral supervisor, main research interests: steel-concrete composite structure, prefabricated construction, earthquake prevention and disaster reduction, E-mail: houhetao@sdu.edu.cn.

shear connections, including five groups of recyclable fully assembled steel-concrete composite beams and one group of cast-in-place composite beams with studs as shear connectors. The main variables are the number of precast concrete floor slabs and the distance between loading points. The test results show that the composite beam exhibits a certain combination effect under monotonic load. The larger the number of prefabricated plates, the lower the initial stiffness of the specimen, but it has no obvious effect on the ultimate flexural capacity of the specimen. The length change of the pure bending section has no significant effect on either the initial stiffness nor the ultimate flexural capacity of the specimen.

Keywords: fully assemble; steel-concrete composite beams; bending test; mechanical performance

钢-混凝土组合梁是现代钢框架建筑楼面结构体系中常用的结构形式,由混凝土板、钢梁和剪力连接件组成。通过在钢梁和混凝土楼板之间设置剪力连接件,抵抗两者在交界面处的竖向掀起及相对滑移,使二者共同工作。与无组合作用的梁相比,其利用了混凝土的高抗压强度和钢的高抗拉强度,显著提高了梁的抗弯承载力。

作为钢-混凝土组合梁的关键部位,剪力连接件的力学性能直接影响到整个组合梁的承载能力^[1-2]。根据剪力连接件的不同进行分类,可分为采用刚性剪力连接件和采用柔性剪力连接件的钢-混凝土组合梁。柔性剪力连接件的刚度较小,作用面上的剪力会使连接件变形,当混凝土板与钢梁产生一定滑移时,其抗剪强度不会降低,建筑领域组合梁中使用的剪力连接件多为柔性剪力连接件^[3-4]。常用的柔性剪力连接件有栓钉、C形钢和PBL剪力连接件等。自20世纪50年代开始,栓钉作为剪力连接件的钢-混凝土组合梁得到了广泛的研究和推广^[5-8]。与栓钉相比,C形剪力连接件具有更高的承载力,可以更加轻松地焊接在钢梁上,因此,C形剪力连接件逐渐成为替代栓钉的一种选择,并且得到了众多学者的关注^[9-13]。近年来,PBL剪力连接件由于其力学性能优良、施工方便、使用寿命长等特点,在钢-混凝土组合梁中得到了广泛的应用和研究^[14-16]。

根据剪力连接程度的不同,可将钢-混凝土组合梁分为完全剪力连接组合梁和部分剪力连接组合梁。部分组合作用组合梁是指剪力连接件所能承担的剪力小于极限弯矩作用下在钢梁和混凝土楼板交界面处产生的纵向剪力^[17-18]。在钢-混凝土组合梁的承载力和变形许可的情况下,采用部分剪力连接可以减少连接件用量、降低造价并方便施工。Nie等^[19]对异形板的部分剪力连接钢-混凝土组合梁进行了试验研究,结果表明,在连续组合梁的正弯矩

和负弯矩区段均可采用部分剪力连接。

传统的钢-混凝土组合梁通常是将剪力连接件焊接在钢梁上,然后浇筑在混凝土中,这使得钢-混凝土组合梁的拆除和其中某些构件的重复利用难以实现。为了实现全装配式施工,减少现场湿作业,加快施工速度,近年来出现了许多新的装配式钢-混凝土组合梁形式。Kwon等^[20-21]介绍了3种后装螺栓的剪力连接件形式,对单个剪力连接件进行了疲劳加载试验和足尺组合梁的抗弯试验,以及得克萨斯州翁多镇附近的真实桥梁的加固试验。Wang等^[22]进行了装配整体式钢-混凝土组合梁的试验研究,发现使用栓钉组和钢块作为剪力连接件时装配整体式钢-混凝土组合梁的弹性刚度分别提高了50%和174%。Ataei等^[23]提出了一种使用可拆卸抗剪螺栓作为剪力连接件和聚合物混凝土代替普通硅酸盐水泥的钢-混凝土组合梁并进行了试验研究,证实了此种组合梁在使用寿命结束时可以实现快速拆卸,部分构件可以重复使用。

针对目前组合梁领域无法实现的全装配与可循环使用的问题,笔者提出了一种可循环使用的全装配钢-混凝土组合梁结构,主要由预制混凝土楼板、T型剪力连接件^[24-25](以下简称紧固件)、碗状连接件^[26]和钢梁组成,如图1所示。焊有栓钉的钢导槽预埋在预制楼板内给紧固件提供卡位,先将预制楼板吊装到钢框架梁预定位置处,再将紧固件放置到钢导槽内并拧紧螺杆便可完成安装。通过拧紧紧固件上的螺杆来提供预紧力,限制预制楼板与钢梁的竖向掀起,通过预制楼板与钢梁上翼缘的摩擦力来抵抗钢梁与预制楼板的相对滑移,以实现部分组合作用。碗状连接件因其形状类似“碗”而命名,用作多块预制混凝土板的连接件。为研究此钢-混凝土组合梁的力学性能,设计了6组足尺组合梁试件,包括1组采用栓钉抗剪的现浇钢-混凝土组合梁和5组新型全装配钢-混凝土组合梁,对其进行四点弯曲试验。

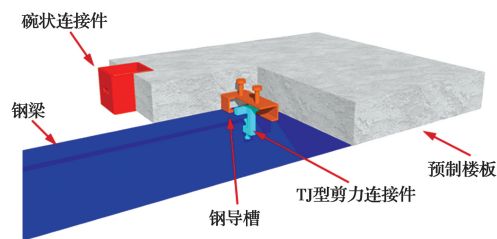


图 1 新型全装配钢-混凝土组合梁示意图

Fig. 1 Diagram of new prefabricated steel-concrete composite beams

1 试件概况

1.1 试件设计

所有试件的设计跨度均为 4 800 mm,钢梁的高度取 200 mm,选用 Q235B 级热轧 H 型钢 HN200 mm×100 mm×5.5 mm×8 mm。为保证安全,钢梁长度取 5 000 mm,在支座两端各长出 100 mm。同时,为防止钢梁在支座处因剪力过大发生局部屈曲,在支座处钢梁腹板焊接加劲板,钢材等级为 Q235B,板厚 5 mm。钢-混凝土组合梁试件共 6 组,分为 A、B 两类试件,A 类试件为现浇钢-混凝土组合梁,采用栓钉连接,B 类为新型全装配钢-混凝土组合梁,主要变化参数为预制楼板的数量和纯弯段的长度,以此作为依据对试件进行编号,如表 1 所示。所有组合梁试件的楼板宽度和厚度一致,分别为 900、120 mm,混凝土等级 C30。分别在预制楼板的顶部和底部布置钢筋网,纵向和横向间距均为

150 mm,保护层厚度为 15 mm,采用 HRB400 级钢筋,直径 10 mm。

表 1 试件参数及编号			
Table 1 Specimen parameters and numbers			
试件编号	预制楼板数量	单块楼板长度/mm	纯弯段长度/mm
A-1-400	现浇	4 800	400
B-2-400	2	2 400	400
B-2-900	2	2 400	900
B-2-1700	2	2 400	1 700
B-3-900	3	1 600	900
B-4-900	4	1 200	900

注:以 B-2-400 为例,B 代表预制楼板的类型为预制;2 代表预制楼板的数量为 2 块;400 代表纯弯段的长度为 400 mm。

A 组试件采用栓钉作为剪力连接件,浇筑前在钢梁上翼缘中线处焊接单排栓钉,栓钉尺寸 $\phi 13 \times 60$,纵向间距 500 mm,在构件加工厂内一次性浇筑完成。B 组试件的预制楼板内预埋放置紧固件的钢导槽,边距 100 mm,跨中处间距 600 mm,其余位置间距 400 mm,半跨梁内钢导槽分布如图 2 所示。钢导槽由截面 100 mm×50 mm、厚度 5 mm 的矩形钢管切割而成,两端焊封板,防止浇筑时混凝土进入槽内,同时可以增加钢导槽的刚度,不易在竖向掀起时变形,穿过钢导槽的纵向和横向钢筋分别焊接在钢导槽的侧面和封板上,顶面焊接 3 个栓钉,栓钉尺寸 $\phi 16 \times 100$,间距 100 mm,如图 3 所示。

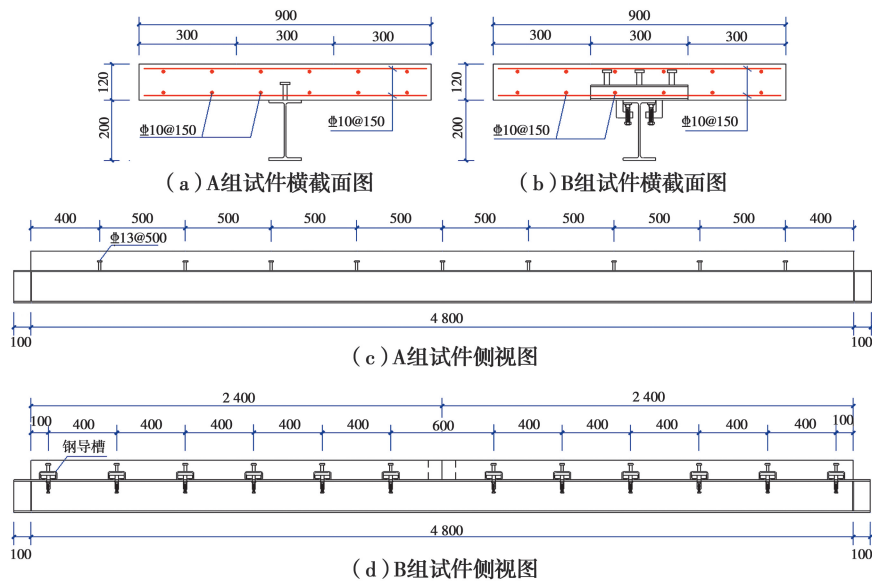


图 2 试件尺寸详图及钢筋和钢导槽分布图 (单位:mm)

Fig. 2 Detailed geometries and rebar and channels distributions of specimens (unit: mm)

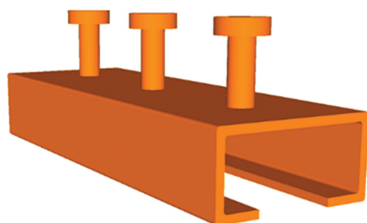


图 3 钢导槽

Fig. 3 Sketch of channels

B 组试件的预制楼板由多块组成,预制楼板间采用碗状连接件连接,如图 4 所示。在浇筑时,预制楼板连接处预留放置碗状连接件的缺口,并预埋内丝套筒。此碗状连接件由 150×150 的方钢管切割而成,在其两侧开方向垂直的长圆孔,并在底部焊接封板。连接时只需将碗状连接件放入到预制楼板的预留缺口内,将开孔对准楼板内预埋的内丝套筒并拧紧螺丝即可。

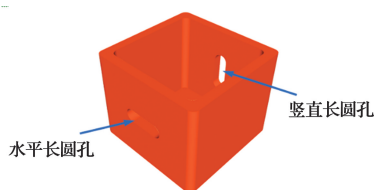


图 4 碗状连接件

Fig. 4 Sketch of bowl connector

B 组试件预制楼板与钢梁通过紧固件来连接,为实现紧固件与钢梁表面的紧密贴合,将高强螺杆设计为万向铰形式,对高强螺杆端部做切削处理,如图 5 所示。螺杆强度取 12.9 级 M12 高强螺杆,螺杆长度 60 mm,万向铰材质为 45 号钢,紧固件采用 Q345B 级钢材。

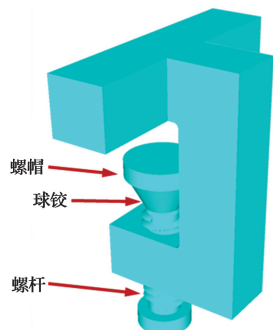


图 5 紧固件

Fig. 5 Sketch of fastener

1.2 材料性能

通过材性试验确定混凝土、钢梁、紧固件和钢筋

的材料性能,如表 2 所示。所有钢材的材性试件均按照《金属材料 室内拉伸试验方法》(GB/T 228.1—2002)^[27] 的规定制作和测试,由拉伸试验测得 H 型钢腹板和翼缘、紧固件和钢筋的屈服强度 f_y 、抗拉强度 f_u 、弹性模量 E_s 等材性数据,如表 3 所示。混凝土的实际抗压强度由 $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 的立方体标准试块测得,试验测得的立方体抗压强度实测值 f_{cu} 为 34.3 MPa。根据《混凝土结构试验方法标准》(GB/T 50152—2012)^[28],由立方体抗压强度实测值推算得到混凝土轴心抗压强度 f_c 、轴心抗拉强度 f_t 和弹性模量 E_c ,如表 3 所示。栓钉的材料性能没有通过试验测量,根据供应商提供的质量证明书,其抗拉强度为 400 MPa。

表 2 钢材的实测性能

Table 2 Measured properties of the steel

钢材的类型	t 或 d /mm	f_y /MPa	f_u /MPa	$E_s/10^2$ GPa
腹板	5.5	357.3	515.7	2.21
翼缘	8.0	316.7	490.8	2.15
紧固件	20.0	375.3	549.8	1.86
钢筋	10.0	457.1	564.4	2.03

注: t 为钢板厚度; d 为钢筋直径。

表 3 混凝土的实测性能

Table 3 Measured properties of the concrete

强度等级	f_{cu} /MPa	f_{ck} /MPa	f_t /MPa	E_c /MPa
C30	34.31	26.08	2.76	3.11×10^4

2 试验方案

2.1 加载方式

对 6 组试件进行四点弯曲试验,采用液压伺服作动器进行单调静力加载,两端支座均为滚动铰支座,加载装置如图 6 所示。安装及加载步骤:1)试件的拼装;2)用扭矩扳手将钢梁两侧 24 个紧固件的螺杆施加 $24.6 \text{ N} \cdot \text{m}$ 的扭矩(使紧固件内外侧应变均处于弹性范围内),同时采集紧固件弓背处内外侧应变数据;3)以跨中挠度控制加载,作动器以 0.02 mm/s 的速率下压,以 2 mm 跨中挠度为 1 级,每级持荷 5 min,单调加载至跨中挠度达到 100 mm 时停止加载。

2.2 测点布置

测试内容主要有:组合梁沿跨长的挠度;预制板

和钢梁的相对滑移;组合梁跨中处不同截面高度的应变。



图6 加载装置

Fig. 6 Loading device

应变片沿跨长的分布如图7(a)所示。同时,应变片在跨中截面处的分布如图7(b)所示,C1~C3、C4、C5用来测量混凝土板上下表面不同位置处的应变,C4、C5用来测量混凝土板不同高度处的应变。S1~S5用来测量钢梁不同截面高度处的应变。布置5个量程为100 mm的位移计来测量试件的挠度,分别位于组合梁的1/4处、加载点处和跨中处,编号为T1~T5。布置3个位移计来测量混凝土板与钢梁的相对滑移,分别位于组合梁的梁端和加载点处,编号为T6~T8。

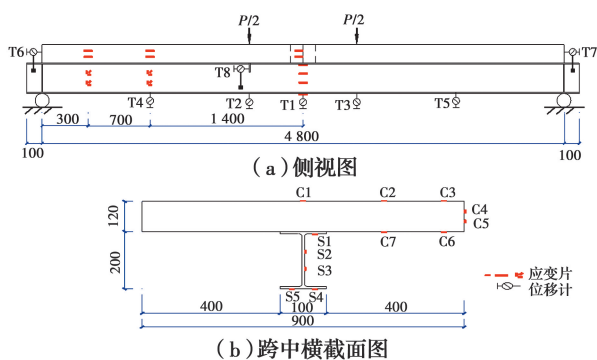


图7 应变片及位移计布置

Fig. 7 Arrangement of strain gauge and displacement gauge

3 试验结果

3.1 破坏现象

A组试件在跨中挠度达到96 mm时,混凝土板下表面及侧面出现宽度达1 mm的裂缝,上表面混凝土并未出现压碎,跨中处钢梁全截面屈服。B组试件的破坏形态基本一致,典型的破坏形态为:加载过程中,预制板接缝处上表面混凝土出现压碎,内丝套筒处预制板侧面及底面出现宽度1 mm的裂缝,

如图8所示。以试件B-2-400为例:当跨中挠度达到10 mm时,加载点处混凝土底面出现第一条裂缝;跨中挠度达到16 mm时,加载时紧固件发出清脆响声,试件产生明显相对滑移,并在后续加载过程中周期性地发出响声;跨中挠度达到26 mm时,内丝套筒处混凝土底面产生明显裂缝;跨中挠度达到44 mm后,钢梁下翼缘屈服;当跨中挠度达到50 mm后,承载力基本不再上升,而相对滑移随着挠度的不断增加而增加。增加预制板数量后,破坏现象类似,仍然发生在跨中拼接处,远离跨中的预制板拼接处破坏现象并不明显。纯弯段长度的改变对试件的破坏现象无明显影响。加载过程中B组试件的钢导槽与预制板无明显相对滑移,也没有发生变形。加载结束后,紧固件均未出现变形,拆卸方便。

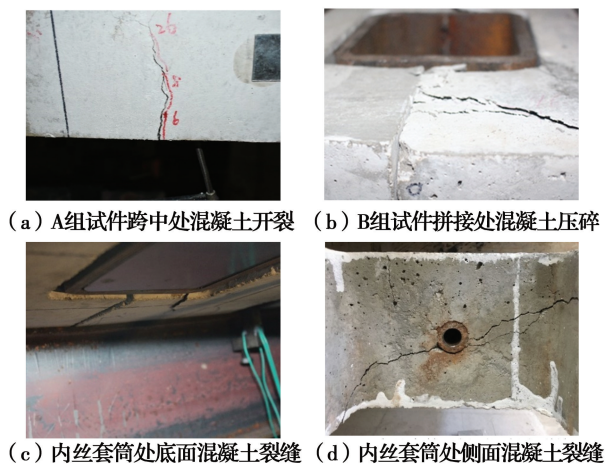


图8 试件混凝土破坏图

Fig. 8 The failure modes of specimen

3.2 弯矩-挠度曲线

通过作动器的荷载数据计算得到各组试件纯弯段弯矩(即跨中弯矩),并根据跨中位移计得到跨中挠度,作出各试件的弯矩-挠度曲线,如图9所示。由图9(a)可知,尽管各组试件拥有不同的设计参数,但其弯矩-挠度曲线趋势基本一致。在初始阶段,弯矩-挠度曲线基本保持线性,因此,所有试件的刚度值保持不变。跨中挠度达到大约16 mm后,各组试件因为相对滑移开始增加,刚度开始下降。此处B组试件的下降是由于达到抗剪承载力之后,紧固件开始滑动,预制混凝土板和钢梁之间的抗剪强度仅由混凝土和钢梁交界面的摩擦提供。随着挠度的继续增加,预制混凝土板和钢梁开始进入塑性阶段,荷载-挠度曲线趋于平缓。不同的是,跨中挠度

达到大约 40 mm 后,随着挠度的增加,B 组试件的荷载基本不再增长,而 A 组试件的荷载以不断减小的速率继续增长。A 组试件跨中挠度达到 96 mm 后,因为界面相对滑移太大,组合作用减弱,荷载开始下降,而 B 组试件荷载并没有下降,延性更好。由图 9(a)可知,现浇试件 A-1-400 的初始刚度和极限弯矩均大于 B 组试件,具有较明显的优势。

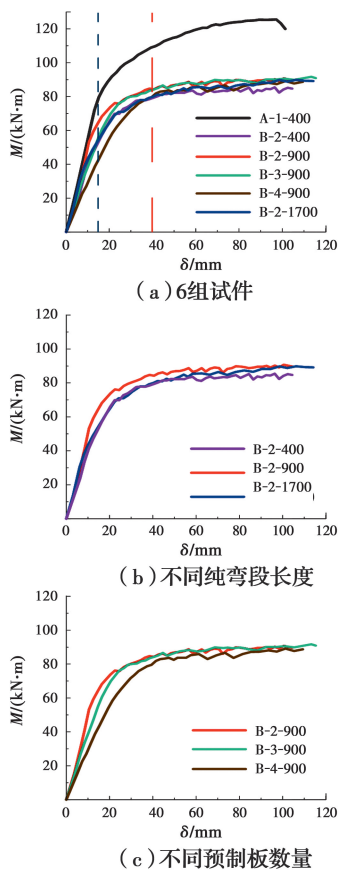


图9 试件弯矩-挠度曲线

Fig. 9 Load-deflection curve of each group

由图 9(b)可知,纯弯段对于全预制组合梁的极限抗弯承载力无影响,3 组试件的极限抗弯承载力均在 $85 \sim 90 \text{ kN} \cdot \text{m}$,且相差不超过 6%,说明加载点的位置对全预制组合梁的抗弯承载力无显著影响。在挠度为 $0 \sim 16 \text{ mm}$ 时,3 组试件的刚度变化趋于一致,说明纯弯段对全预制组合梁的抗弯刚度无明显影响。

在图 9(c)中,预制板的数量对于全预制组合梁的极限抗弯承载力无影响,3 组试件的极限抗弯承载力均在 $90 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 左右,且相差不超过 3%。但预制板的数量对组合梁弹性阶段的抗弯刚度有影响,使用预制板的数量越多,梁的刚度越小。

对具有不同参数试件的弯矩-挠度曲线进行比较,讨论不同参数对试件抗弯刚度和极限承载力的影响,包括预制板的数量和纯弯段的长度。如图 9(b)所示,虽然 3 组试件的纯弯段长度不同,但其弯矩-挠度曲线趋势相同,具有相近的初始刚度和极限弯矩。如图 9(c)所示,随着预制板数量的增加,试件的初始刚度变小,并且试件 B-4-900 的初始刚度具有明显的降低。说明预制板数量越多,组合梁的整体性越差,但对于其极限弯矩的影响并不明显。

3.3 挠度沿跨长分布

将沿组合梁跨长布置的位移计所采集得到的挠度数据制成曲线,如图 10 所示,横坐标为位移计到跨中的距离,纵坐标为竖向位移。 P 为极限荷载,图中各条曲线为在不同荷载下组合梁的挠度分布。可以看出,在达到 0.6 倍极限荷载前,组合梁的挠度增长较慢,达到 0.6 倍极限荷载之后,挠度增长变快,达到极限荷载之后,在两侧近似线性分布,最大挠度出现在跨中。从图 10 可以看出,在加载过程中,全预制组合梁的挠度随着预制板的数量增加而增大,而纯弯段的长度对于全预制组合梁影响不大。图 10(d)所示极限弯矩下的挠度小于其对照组图 10(c)、(e),因为在选取试验数据时,是选取试件弯矩最大值点时的挠度分布,而试件 B-3-900 的弯矩最大值是在挠度为 68 mm 时取得,在超过这一挠度后,随着挠度的增加,极限弯矩在一定范围内波动。

3.4 跨中截面应变

在荷载作用下,B 组试件预制板的拉力主要通过碗状连接件及内丝套筒传递,因而拉应变主要集中在内丝套筒附近,预制板侧面及底面应变片测得的拉应变数据较小,6 组试件的跨中截面应变分布如图 11 所示,纵坐标为截面高度,横坐标为应变, P 为极限荷载,图中 4 条曲线分别代表荷载达到 $0.2P$ 、 $0.4P$ 、 $0.6P$ 和 $0.8P$ 时试件跨中截面的应变分布。

从图 11(a)中可以看出,试件 A-1-400 在加载初期钢梁全截面受拉,截面应变分布近似线性,在荷载达到 $0.8P$ 后,钢梁上翼缘开始受压,此时钢梁和混凝土拥有各自的中和轴。对于 B 组试件,在荷载分别达到 $0.6P$ 和 $0.4P$ 后,B-4-900 和 B-3-900 钢梁上翼缘开始受压。因为接缝处在跨中,B-2-400、B-2-900 和 B-2-1700 跨中处初始刚度较小,在荷载达到 $0.2P$ 后,

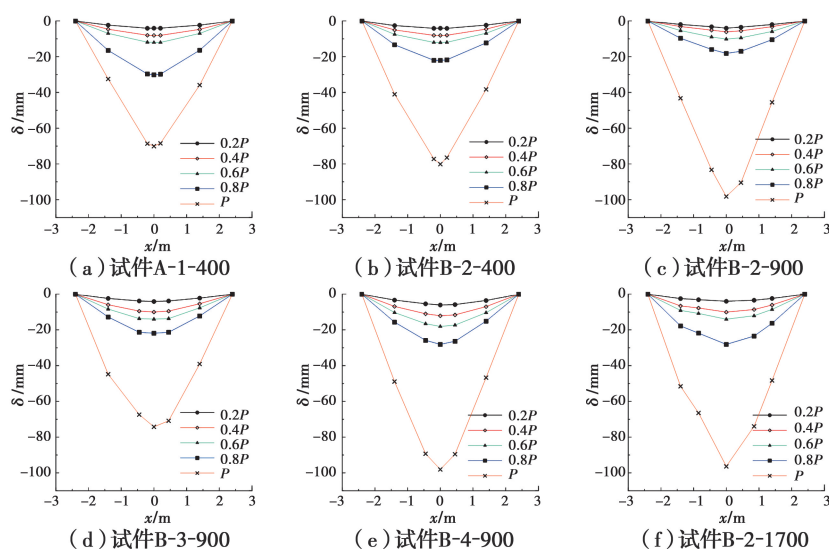


图 10 组合梁挠度分布

Fig. 10 Deflection distribution of composite beams

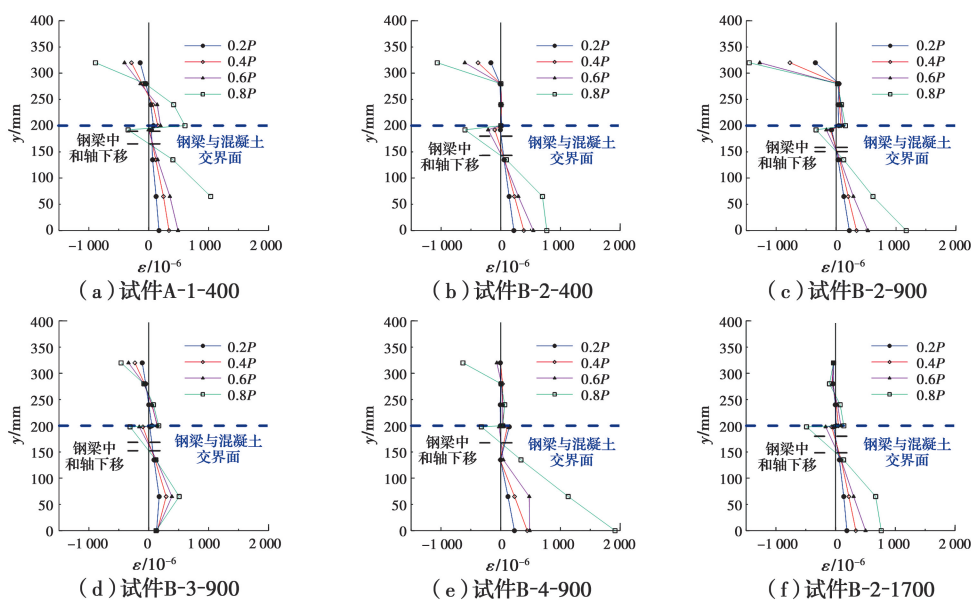


图 11 跨中截面应变分布

Fig. 11 Strain distributions along the beam depth at midspan

钢梁上翼缘开始受压,均早于 A 组试件。与设计试件时的预期一致,6 组试件均表现为部分组合作用,钢梁上表面与混凝土翼缘下表面间的相对滑移较大,在达到极限状态时会出现两个分别位于混凝土翼缘和钢梁截面的中和轴,不再符合平截面假定,但钢梁截面与混凝土截面在各自的中和轴上基本符合平截面假定。

3.5 相对滑移

与完全剪力连接组合梁相比,部分剪力连接组合梁具有更大的界面相对滑移。根据沿梁跨布置的 3 个位移计测得的相对滑移数据,作出相对滑移沿

梁跨的分布图,如图 12 所示, s 为相对滑移, x 为位移计到跨中的距离, P 为极限荷载,图中 5 条折线分别为荷载在 $0.2P$ 、 $0.4P$ 、 $0.6P$ 、 $0.8P$ 和 P 时测得的相对滑移数据。

由图 12 可知,在荷载达到 $0.8P$ 之前,各组试件的相对滑移值均较小且沿梁跨分布比较均匀,荷载达到 $0.8P$ 后,相对滑移增长加快,最大相对滑移发生在梁端。虽然在设计时 6 组试件具有相同的剪力连接程度,B 组试件的最大相对滑移是 A 组试件的 $1.3 \sim 2.0$ 倍,A 组试件表现出比 B 组试件更好的组合作用。

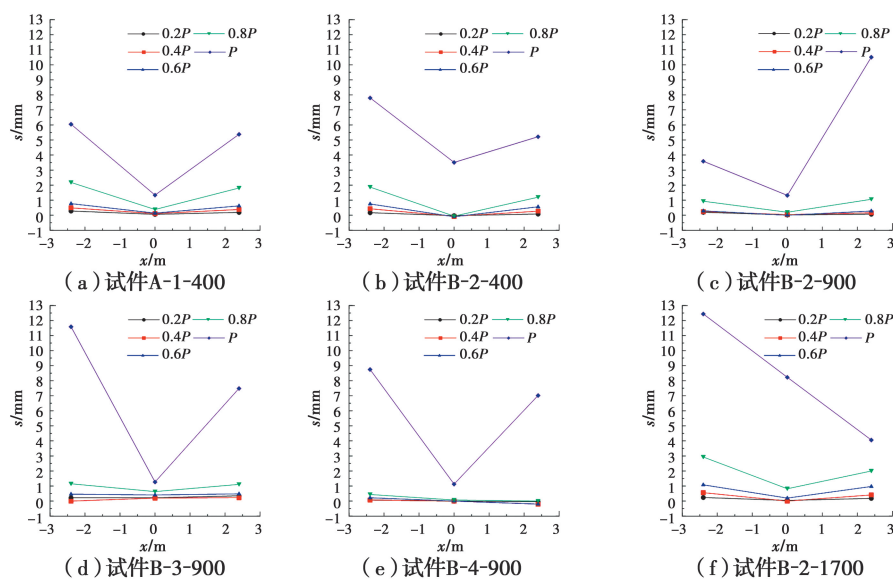


图 12 相对滑移分布

Fig. 12 Distributions of interface relative slip

4 结论

1) 6 组试件的荷载-挠度曲线走势基本一致, 每组试件的荷载-挠度曲线可划分为 3 段。与使用栓钉作为剪力连接件的传统钢混-混凝土组合梁相比, 使用紧固件作为剪力连接件的 B 组试件延性更好, 但初始刚度更低, 且预制板数量越多, 初始刚度越低。

2) 可循环使用全装配钢-混凝土组合梁在四点弯曲时, 改变纯弯段的长度对其初始刚度和极限受弯承载力没有明显影响。

3) 6 组试件均表现出部分组合作用, 在跨中截面处, 混凝土板和钢梁具有各自的中和轴, 跨中截面不符合平截面假定。试件的最大滑移均发生在梁端, 且在达到 0.8 倍的极限荷载之前, 各组试件的滑移较小且沿梁跨分布比较均匀, 达到 0.8 倍极限荷载之后, 滑移增长变快。

4) 试件达到极限状态后, 在跨中两侧, 挠度近似线性分布, 最大挠度发生在跨中。碗状连接件处存在应力集中现象, 导致裂缝较多, 同时, 弯曲后楼板会产生上窄下宽的缝隙, 后期应继续改进。

相较于现浇组合梁, 可循环使用全装配钢-混凝土组合梁在抗弯性能上存在一定差距, 但其优势在于全装配、快速拆卸和部分循环使用, 在承受荷载较小的情况下, 甚至可以实现全部重复使用, 因此, 更加适用于临时性建筑, 如现场临时办公室和宿舍等。针对此类建筑的整体结构体系还需进一步研发, 使其能够得到更好的推广和应用。

参考文献:

- [1] ZHANG Q H, JIA D L, BAO Y, et al. Internal force transfer effect-based fatigue damage evaluation for PBL shear connector groups [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2018, 148: 469-478.
- [2] CLASSEN M. Limitations on the use of partial shear connection in composite beams with steel T-sections and uniformly spaced rib shear connectors [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2018, 142: 99-112.
- [3] 聂建国, 崔玉萍. 钢-混凝土组合梁在单调荷载下的变形及延性[J]. 建筑结构学报, 1998, 19(2): 30-36.
NIE J G, CUI Y P. Analysis and calculation of deformation and ductility of composite steel concrete beam under monotonic loading [J]. Journal of Building Structures, 1998, 19(2): 30-36. (in Chinese)
- [4] DENG W Q, XIONG Y Q, LIU D, et al. Static and fatigue behavior of shear connectors for a steel-concrete composite girder [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2019, 159: 134-146.
- [5] BONILLA J, BEZERRA L M, MIRAMBELL E. Resistance of stud shear connectors in composite beams using profiled steel sheeting [J]. Engineering Structures, 2019, 187: 478-489.
- [6] HUO J S, WANG H T, LI L, et al. Experimental study on impact behaviour of stud shear connectors in composite beams with profiled steel sheeting [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2019, 161: 436-449.
- [7] WANG J Q, QI J N, TONG T, et al. Static behavior of large stud shear connectors in steel-UHPC composite structures [J]. Engineering Structures, 2019, 178:

- 534-542.
- [8] MOLKENS T, DOBRIĆ J, ROSSI B. Shear resistance of headed shear studs welded on welded plates in composite floors [J]. *Engineering Structures*, 2019, 197: 109412.
- [9] SHARIATI M, SHARIATI A, RAMLI SULONG N H, et al. Fatigue energy dissipation and failure analysis of angle shear connectors embedded in high strength concrete [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2014, 41: 124-134.
- [10] LIU Y, GUO L H, QU B, et al. Experimental investigation on the flexural behavior of steel-concrete composite beams with U-shaped steel girders and angle connectors [J]. *Engineering Structures*, 2017, 131: 492-502.
- [11] GUO L H, LIU Y, QU B. Fully composite beams with U-shaped steel girders: Full-scale tests, computer simulations, and simplified analysis models [J]. *Engineering Structures*, 2018, 177: 724-738.
- [12] SHARIATI M, RAMLI SULONG N H, SUHATRIL M, et al. Comparison of behaviour between channel and angle shear connectors under monotonic and fully reversed cyclic loading [J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 38: 582-593.
- [13] CHEN L H, WANG S Y, LOU Y, et al. Seismic behavior of double-skin composite wall with L-shaped and C-shaped connectors [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2019, 160: 255-270.
- [14] CHENG B, XIANG S, ZUO W, et al. Behaviors of partially concrete-filled welded integral T-joints in steel truss bridges [J]. *Engineering Structures*, 2018, 166: 16-30.
- [15] OGUEJIOFOR E C, HOSAIN M U. Numerical analysis of push-out specimens with perfobond rib connectors [J]. *Computers & Structures*, 1997, 62 (4): 617-624.
- [16] ZHAO C H, LI Z X, DENG K L, et al. Experimental investigation on the bearing mechanism of perfobond rib shear connectors [J]. *Engineering Structures*, 2018, 159: 172-184.
- [17] LAWSON R M, LAM D, AGGELOPOULOS E, et al. Serviceability performance of composite cellular beams with partial shear connection [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2018, 150: 491-504.
- [18] LAWSON R M, TAUFIQ H. Partial shear connection in light steel composite beams [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2019, 154: 55-66.
- [19] NIE J G, FAN J S, CAI C S. Experimental study of partially shear-connected composite beams with profiled sheeting [J]. *Engineering Structures*, 2008, 30(1): 1-12.
- [20] KWON G, ENGELHARDT M D, KLINGNER R E. Strengthening bridges by developing composite action in existing non-composite bridge girders [J]. *Structural Engineering International*, 2009, 19(4): 432-437.
- [21] KWON G, ENGELHARDT M D, KLINGNER R E. Behavior of post-installed shear connectors under static and fatigue loading [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2010, 66(4): 532-541.
- [22] WANG Y H, YU J, LIU J P, et al. Experimental study on assembled monolithic steel-concrete composite beam in positive moment [J]. *Engineering Structures*, 2019, 180: 494-509.
- [23] ATAIE A, BRADFORD M A, LIU X P. Experimental study of composite beams having a precast geopolymer concrete slab and deconstructable bolted shear connectors [J]. *Engineering Structures*, 2016, 114: 1-13.
- [24] 侯和涛, 臧增运, 鲁玉曦, 等. 新型全装配钢-混凝土组合梁连接件推出试验研究[J]. *工程力学*, 2020, 37(2): 201-210.
- HOU H T, ZANG Z Y, LU Y X, et al. Push-out tests of shear connectors for new fully assembled steel-concrete composite beams [J]. *Engineering Mechanics*, 2020, 37(2): 201-210. (in Chinese)
- [25] 曲冰, 程积润, 侯和涛, 等. 全装配式钢-预制混凝土楼板组合梁: CN106869385A [P]. 2017-06-20.
- QU B, CHENG J R, HOU H T, et al. Fully assembled steel-precast concrete slab composite beam: CN106869385A [P]. 2017-06-20. (in Chinese)
- [26] 曲冰, 程积润, 侯和涛, 等. 连接构件、预制楼板构件及全装配式预制楼板: CN206957012U [P]. 2018-02-02.
- QU B, CHENG J R, HOU H T, et al. Connecting elements, precast floor plank component and completely assembling formula precast floor plank: CN206957012U [P]. 2018-02-02. (in Chinese)
- [27] 金属材料 室温拉伸试验方法: GB/T 228—2002 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- Metallic materials-Tensile testing at ambient temperature: GB/T 228-2002 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2002. (in Chinese)
- [28] 混凝土结构试验方法标准: GB/T 50152—2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- Standard for test method of concrete structures: GB/T 50152-2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)