

暗梁式全预制板翼缘 T 型叠合梁抗弯性能

李 明¹,周稚竣¹,樊志超²,綦 韦¹,杨 贺¹

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168; 2. 中建二局第四建筑工程有限公司,天津 300457)

摘 要 目的 研究暗梁式全预制板翼缘 T 型叠合梁(PTB)的抗弯力学性能。方法 采用 ABAQUS 建立试件模型与已有试验进行对比,验证模拟方法的准确性,分析了 PTB 与现浇 T 型梁(CTB)的力学性能。研究新旧混凝土之间摩擦系数、连接处后浇混凝土强度、纵向钢筋强度等参数对 PTB 抗弯力学性能的影响。结果 PTB 与 CTB 抗弯承载力相差不大,最大相差不足 9%;新旧混凝土之间摩擦系数、连接处后浇混凝土强度和纵向钢筋强度对其抗弯承载力几乎无影响;纵向钢筋直径对其抗弯承载力影响较小,最大相差不足 5%;预制板搭接长度、抗剪箍筋截面面积、间距对其抗弯承载力影响相对较大,最小相差超过 6%。结论 抗剪箍筋截面面积、抗剪箍筋间距和预制板搭接长度是影响 PTB 承载力的主要因素,随着抗剪箍筋截面面积增加、抗剪箍筋间距和预制板搭接长度减小,PTB 承载力增大。

关键词 预制 T 梁;抗弯承载力;抗剪箍筋间距;预制板搭接长度;抗剪箍筋截面面积

中图分类号 TU398.1 文献标志码 A

Bending Behavior of Composite T-beam with Dark Beam Type Full Prefabricated Plates Flange

LI Ming¹, ZHOU Zhijun¹, FAN Zhichao², QI Wei¹, YANG He¹

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. The Fourth Construction Engineering Co. Ltd., China Construction Second Engineering Bureau, Tianjin, China, 300457)

Abstract: In order to study the bending mechanical properties of the T-composite beam with dark beam type full prefabricated plates as its' flange (PTB). The specimen model established by ABAQUS was compared with the existing test to verify the accuracy of the simulation method. The mechanical properties of PTB and cast-in-situ T-beam (CTB) were compared. How the parameters influence the mechanical property of it was also analyzed, such as the friction coefficient between the old and the new concrete, the strength of post pouring concrete at the connection area, the strength of longitudinal reinforcement etc. It shows that the difference between the bending capacity of PTB and CTB is not big, the maximum difference of which is less than 9%. it has

收稿日期:2021-11-25

基金项目:国家自然科学基金项目(51978422);辽宁省教育厅面上项目(LJKZ0561);住房和城乡建设部项目(2019-K-080);辽宁省教育厅青年育苗项目(LNQN201907)

作者简介:李 明(1979—),男,副教授,博士,主要从事装配式混凝土结构、组合结构等方面研究。

almost no effect on its bending capacity by changing the friction coefficient, the strength of post pouring concrete and the longitudinal reinforcement strength. Increasing the diameter of longitudinal reinforcement has little effect on it, and the maximum difference among them is less than 5%. The lap length of prefabricated plates, the section area of shear stirrup and spacing has a relatively large influence on its bending capacity, and the minimum difference is more than 6%. The shear stirrup section area, shear stirrup spacing and precast slab lap length are the main factors affecting the bearing capacity of PTB. With the increasing of the section area of shear stirrup, the decreasing of the shear stirrup spacing and the lap length of prefabricated plates, the bearing capacity of PTB increases.

Key words: precast T-beam; bending capacity; shear stirrup spacing; the lap length of prefabricated plate; section area of shear stirrup

装配式混凝土结构具有工期短、节能环保、施工速度快等优点,在建筑领域得到了广泛应用。预制楼板是装配式混凝土结构的重要承重构件,国内外房屋建筑中常采用的预制楼板主要包括叠合板^[1-2]和全预制板^[3],其中全预制板整体由工厂预制,然后运输到施工现场进行拼装。与叠合板相比,其具有施工速度更快、湿作业更少、装配率更高等优点。但由于全预制板受施工技术水平限制,连接后楼板的整体性不好,抗震性能差。随着科学技术的发展,研发新型的全预制板及连接技术,使其具有良好的抗震性能已成为亟待解决的问题。部分学者开展了该方面的研究,郭伟强等^[4]提出暗梁式全预制板及连接技术,并通过有限元模拟得出暗梁式全预制板具有良好的传力机制,抗剪钢条的长度、抗剪钢条的长度是影响其力学性能的主要因素。谭刚等^[5]提出蜂窝式全预制板,并通过有限元分析得出该板可以提高结构刚度。林霞娟等^[6]通过理论分析提出了对锯齿形全预制板齿条设计、拆分方案及生产工艺的建

议。唐元昊等^[7]提出卡扣式全预制板连接技术,并通过有限元模拟得出预制连接钢板厚度和数量是影响板连接结构受力性能的主要因素。

笔者在文献[4]的基础上,利用ABAQUS有限元软件,对暗梁式全预制板与预制矩形梁连接形成T型叠合梁(PTB)的抗弯力学性能进行研究。研究结果表明,PTB具有良好的力学性能,随着抗剪箍筋截面面积的增加、抗剪箍筋间距和预制板搭接长度的减小,PTB承载力增大。

1 暗梁式全预制板翼缘预制T型叠合梁结构

暗梁式全预制板结构如图1(a)所示。图中板底部的纵向和横向钢筋伸出板侧并向上弯折成U形筋,弯折后U型筋的端部埋于板内。预制矩形梁如图1(b)所示,梁顶部设置抗剪箍筋。暗梁式全预制板翼缘预制T型叠合梁是将两块暗梁式预制板分别搭接在矩形梁上形成的T型梁(见图1(c))。

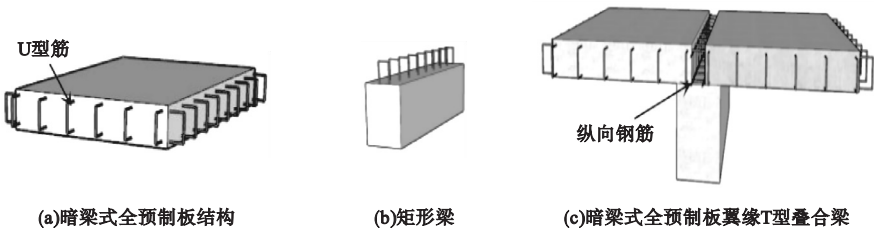


图1 暗梁式全预制板翼缘T型叠合梁结构

Fig. 1 Structure of PTB

装配时,两块预制板板侧预留的 U 形筋分别与预留在梁上的箍筋相互搭接形成封闭箍,在箍内插入 4 根纵向钢筋,兼做梁上部的纵向受力筋,分别绑扎于封闭箍的 4 个角部,最后在连接处浇筑混凝土完成连接。全预制板翼缘与矩形梁间的剪力通过后浇混凝土与矩形梁顶部的摩擦力及梁箍筋传递。

2 有限元模拟方法及验证

采用 ABAQUS^[8-9] 模拟前,参照文献[10]中的现浇 T 型梁试验来验证文中模拟方法。试验试件参数如下:长度为 6 300 mm,跨度为 4 500 mm,截面尺寸及配筋如图 2 所示。

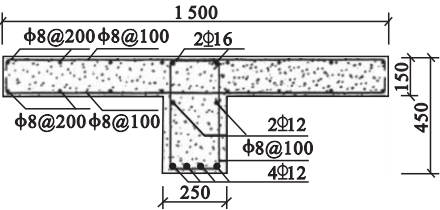


图 2 试件截面尺寸及配筋图

Fig. 2 Specimen section size and steel detailing

试件采用的混凝土强度等级为 C40,梁纵向钢筋为 HRB335,板纵筋、分布筋及箍筋均采用 HPB235 级钢。试验时混凝土的实测力学性能指标和钢筋的实测力学性能指标见表 1、表 2^[10]。

表 1 混凝土实测力学性能指标

Table 1 Measured mechanical property indexes of concrete				
混凝土强度等级	立方体抗压强度/MPa	棱柱体抗压强度/MPa	劈裂强度/MPa	弹性模量/10 ⁴ MPa
C40	53.0	38.5	3.6	3.48

表 2 钢筋实测力学性能指标

Table 2 Measured mechanical property indexes of reinforcement				
钢筋直径/mm	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	弹性模量/10 ⁵ MPa	延伸率/%
8	316	439	216	32.4
12	389	567	1.83	31.3
16	348	522	1.83	28.8

模拟时混凝土和加载垫块本构采用塑性损伤模型^[11-12],单元类型为 C3DR8^[13],泊松比为 0.2;钢筋采用双折线模型^[13],钢筋混凝土材料参数按试验取值;不考虑钢筋与混凝土之间的滑移^[14];边界条件和加载方式与试验相近,即板两端铰接,三分点加载^[15]。三分点加载通过设置两个分配梁,然后将分配梁的上表面耦合成 1 点,然后在耦合点上加载实现。建立的有限元模型如图 3 所示,其中加载点和支座处设置垫块以避免局压破坏。采用 Newdon-rapson 方法求解。需要说明的是,为与试验试件一致,验证及后续建模研究时都保留了梁的悬臂部分。

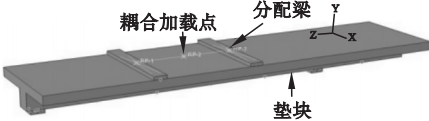


图 3 试验试件的有限元模型

Fig. 3 Finite element model of specimen from test

笔者采用上述有限元方法模拟试验试件的受力过程,并与试验结果进行对比。跨中荷载-挠度曲线如图 4 所示,试验与模拟初始刚度及承载力对比结果见表 3。表中初始刚度定义为屈服荷载 20% 时荷载-位移曲线的斜率,开裂荷载定义为梁底混凝土最大主应力达到抗拉强度时对应的荷载,屈服荷载定义为纵向受力钢筋屈服时对应的荷载,极限荷载定义为受拉钢筋应变达到 0.01 时对应的荷载值。

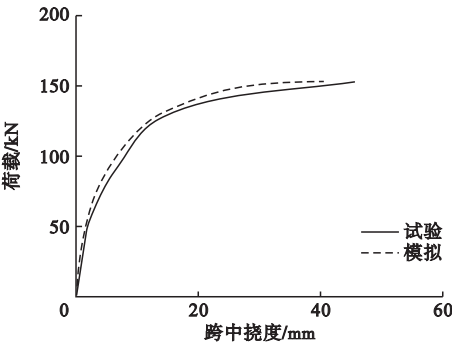


图 4 跨中荷载-挠度曲线对比

Fig. 4 Comparison of load-deflection curves in mid-span

表3 试验与模拟初始刚度及承载力对比

Table 3 Comparison of bearing capacity and initial stiffness between test and simulation

类型	初始刚度/ (kN·mm ⁻¹)	开裂荷载/ kN	屈服荷载/ kN	极限荷载/ kN
试验	24.50	40.48	125.48	152.86
模拟	24.78	43.81	128.36	153.63

从图4和表3可以看出,模拟与试验荷载-挠度曲线相近,初始刚度、开裂荷载、屈服荷载和极限荷载相差很小,分别相差1.14%、8.23%、2.30%和0.50%。

图5为试验与模拟的破坏区域对比结果,其中模拟的破坏区域通过塑性损伤云图反应。从图5可以看出,模拟和试验的破坏区域范围相近,两者破坏区域主要出现于纯弯段。综上可以看出,建立的有限元模拟方法具有准确性,可用于后续模拟研究。

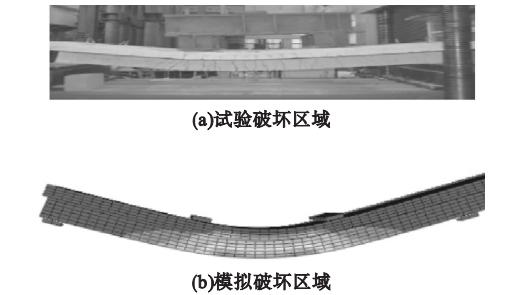


图5 试验与模拟破坏区域对比

Fig. 5 Comparison between failure region from test and simulation

3 PTB 可行性分析

3.1 PTB 的设计

为探讨PTB的可行性,笔者参照上述试验^[7],设计了预制T型叠合梁试件PTB,并与相同条件下现浇T型梁试件CTB的力学性能进行对比,PTB尺寸及配筋如图6所示。两者不同之处在于PTB翼缘是由两块暗梁式全预制板搭接在预制梁上构成,搭接长度为75 mm。其中预制板的长×宽×厚为6 300 mm×700 mm×150 mm,预制梁的长×宽×高为6 300 mm×250 mm×300 mm。

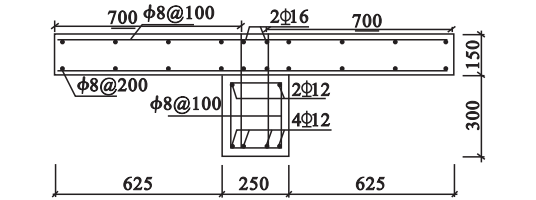


图6 PTB 截面图

Fig. 6 Section diagram of PTB

3.2 PTB 与现浇T型梁的受弯承载力对比

PTB与CTB的跨中荷载-挠度曲线对比如图7所示,初始刚度及承载力对比结果见表4。

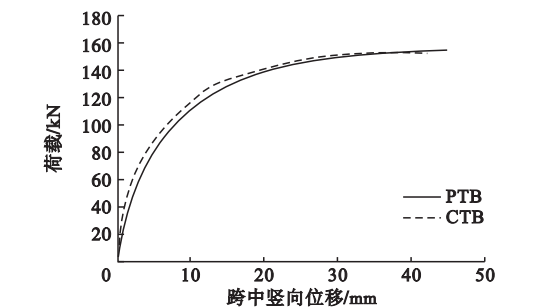


图7 PTB 与 CTB 跨中荷载-挠度曲线对比

Fig. 7 Comparison of load-deflection curves in mid-span between PTB and CTB

表4 PTB 与 CTB 初始刚度及承载力对比

Table 4 Comparison of bearing capacity and initial stiffness between PTB and CTB

类型	初始刚度/ (kN·m ⁻¹)	开裂荷载/ kN	屈服荷载/ kN	极限荷载/ kN
CTB	25.07	36.01	124.21	153.63
PTB	24.84	33.16	128.36	155.70

从图7和表4可以看出,PTB的跨中荷载-挠度曲线在初始阶段略低于CTB曲线,初始刚度、开裂荷载分别较后者降低了0.92%和7.91%,在后期逐渐升高,屈服荷载和极限荷载分别提高了3.34%和1.35%。分析原因是因为加载初期,PTB连接处后浇混凝土与预制构件间存在结合面,该处新旧混凝土模拟时按摩擦接触设置,抗剪较弱,因此PTB的初始刚度和开裂荷载略低。加载后期,相互搭接U型筋形成封闭箍的作用进一步增加,因此PTB的屈服荷载和极限荷载增加。由此说明PTB与CTB相比,初始刚度

和开裂荷载虽然略低,屈服和极限承载力略高,但相差程度不大,因此 PTB 具有可行性。

3.3 PTB 与现浇 T 型梁的破坏状态对比

为了对比 PTB 与 CTB 的破坏状态,提

取了极限荷载时混凝土等效塑性拉应变云图(见图 8)以及极限荷载时两者钢筋骨架的 Mises 应力云图(见图 9)进行分析。

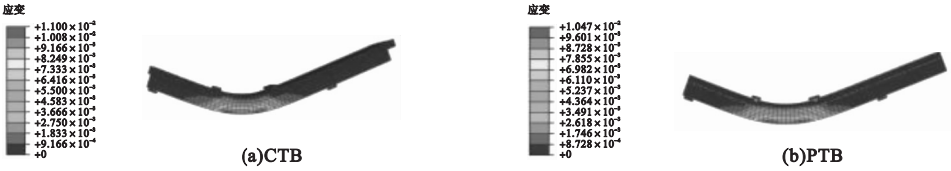


图 8 极限荷载时混凝土等效塑性拉应变云图

Fig. 8 Plots of equivalent plastic tensile strain of concrete under ultimate load

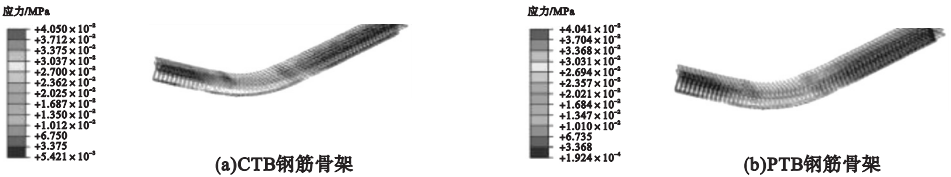


图 9 极限荷载时钢筋 Mises 应力云图

Fig. 9 Mises stress plots under ultimate load

从图 8 可以看出,PTB 与 CTB 的梁底混凝土等效塑性应变分布范围相近,两者的最大主应力分布区域几乎相同,主要分布于梁底部。从图 9 可以看出,两者的 Mises 应力分布区域几乎相同,加载垫梁间的钢筋几乎均达到屈服应力,且屈服区域逐渐向梁两端延伸。由此说明,PTB 与 CTB 的破坏状态基本一致,两者的抗弯受力机制几乎相同。

4 PTB 抗弯性能影响因素分析

为分析不同参数对 PTB 受弯性能的影响,

笔者设计了 29 个试件,变化参数包括连接处新旧混凝土之间摩擦系数、预制板连接处后浇混凝土强度、连接处纵向钢筋强度和直径、预制板搭接长度、抗剪箍筋截面面积及间距(见表 5)。表中, DJ 表示搭接长度、HCQD 表示后浇混凝土强度、GJQD 表示钢筋强度、GJZJ 表示钢筋直径、MCXS 表示摩擦系数、GJJJ 表示箍筋间距、GJMJ 表示箍筋截面面积,各参数后的数值为该参数的取值。模拟结果表明,新旧混凝土之间摩擦系数、连接处后浇混凝土和纵向钢筋强度对 PTB 的

表 5 试件参数

Table 5 List of the specimens

试件编号	搭接长度/ mm	后浇混凝土 强度等级	连接处纵筋 种类	连接处纵筋 直径/mm	摩擦 系数	抗剪箍筋 间距/mm	抗剪箍筋 面积/mm ²
DJ100	100	C40	HRB400	16	0.8	100	4 627.6
DJ87.5	87.5	C40	HRB400	16	0.8	100	4 627.6
DJ75	75	C40	HRB400	16	0.8	100	4 627.6
DJ62.5	62.5	C40	HRB400	16	0.8	100	4 627.6
DJ50	50	C40	HRB400	16	0.8	100	4 627.6
HCQD30	75	C30	HRB400	16	0.8	100	4 627.6
HCQD35	75	C35	HRB400	16	0.8	100	4 627.6
HCQD40	75	C40	HRB400	16	0.8	100	4 627.6
HCQD45	75	C45	HRB400	16	0.8	100	4 627.6

续表 5

试件编号	搭接长度/ mm	后浇混凝土 强度等级	连接处纵筋 种类	连接处纵筋 直径/mm	摩擦 系数	抗剪箍筋 间距/mm	抗剪箍筋 面积/mm ²
GJQD335	75	C40	HRB335	16	0.8	100	4 627.6
GJQD400	75	C40	HRB400	16	0.8	100	4 627.6
GJQD500	75	C40	HRB500	16	0.8	100	4 627.6
GJZJ12	75	C40	HRB400	12	0.8	100	4 627.6
GJZJ14	75	C40	HRB400	14	0.8	100	4 627.6
GJZJ16	75	C40	HRB400	16	0.8	100	4 627.6
GJZJ18	75	C40	HRB400	18	0.8	100	4 627.6
MCXS06	75	C40	HRB400	16	0.6	100	4 627.6
MCXS07	75	C40	HRB400	16	0.7	100	4 627.6
MCXS08	75	C40	HRB400	16	0.8	100	4 627.6
MCXS09	75	C40	HRB400	16	0.9	100	4 627.6
GJJJ50	75	C40	HRB400	16	0.8	50	4 627.6
GJJJ100	75	C40	HRB400	16	0.8	100	4 627.6
GJJJ150	75	C40	HRB400	16	0.8	150	4 627.6
GJJJ200	75	C40	HRB400	16	0.8	200	4 627.6
GJJJ250	75	C40	HRB400	16	0.8	250	4 627.6
GJJJ300	75	C40	HRB400	16	0.8	300	4 627.6
GJMJ50.3	75	C40	HRB400	16	0.8	100	4 627.6
GJMJ78.5	75	C40	HRB400	16	0.8	100	7 222
GJMJ113.1	75	C40	HRB400	16	0.8	100	10 405.2

受弯性能几乎无影响。摩擦系数由 0.6 增加到 0.9、连接处后浇混凝土强度等级从 C30 增加到 C45、连接处纵向钢筋强度等级从 HRB335 增加到 HRB500,跨中荷载-挠度曲线几乎重合,开裂荷载、屈服荷载、极限荷载对应的破坏形态基本相同。连接处纵向钢筋的直径仅对 PTB 的极限荷载略有影响,对其他受弯性能几乎无影响。钢筋直径由 12 mm 增加至 18 mm,极限荷载由 154.78 kN 增加到 161.03 kN,增大 4.04%,小于 5%。因此笔者仅对预制板搭接长度、抗剪箍筋截面面积、抗剪箍筋间距进行分析。

4.1 搭接长度影响

试件 DJ50、DJ62.5、DJ75、DJ87.5、DJ100 的跨中荷载-位移曲线如图 10 所示,各试件抗弯承载力对比结果见表 6。

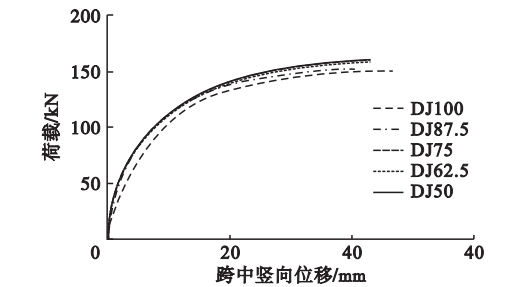


图 10 不同预制板搭接长度下跨中荷载-位移曲线

Fig. 10 Load-deflection curves under different lap length of precast slabs

表 6 不同预制板搭接长度下 PTB 的抗弯承载力

Table 6 Bearing capacity of precast T-Beams with different lap length of precast slabs kN

试件	开裂荷载	屈服荷载	极限荷载
DJ100	30.04	124.61	150.04
DJ87.5	30.76	125.11	151.65
DJ75	31.19	131.52	159.29
DJ62.5	32.77	132.19	159.47
DJ50	33.95	132.63	159.74

从图 10 和表 6 可以看出,随搭接长度增加,各试件的跨中荷载-位移曲线逐渐降低,当搭接长度由 100 mm 减小到 50 mm 时,试件的开裂、屈服和极限抗弯承载力分别提高了 13.02%、6.44% 和 6.46%。分析原因是因触连接,未形成整体,因此搭接长度越大,PTB 的抗弯承载力反而越低。由此说明,随搭接长度增加 PTB 的抗弯承载力降低,并且与屈服、极限荷载相比,其对开裂荷载影响更明显。

4.2 抗剪箍筋截面面积影响

试件 GJMJ50.3、GJMJ78.5、GJMJ113.1 的跨中荷载-位移曲线如图 11 所示,各试件抗弯承载力对比结果见表 7。

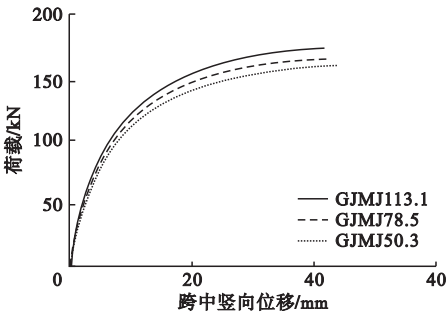


图 11 不同抗剪箍筋截面面积下跨中荷载-挠度曲线

Fig. 11 Mid-span load-deflection curves of PTB with different shear stirrup section area

表 7 不同抗剪箍筋截面面积下 PTB 的抗弯承载力

Table 7 Bearing capacity of PTB with different shear stirrup cross section area kN			
试件	开裂荷载	屈服荷载	极限荷载
GJMJ50.3	31.19	131.52	159.29
GJMJ78.5	32.73	136.56	165.22
GJMJ113.1	33.39	142.60	172.42

从图 11 和表 7 可以看出,在弹性阶段,各试件的跨中荷载-位移曲线几乎重合,进入弹塑性阶段后,曲线明显分离,抗剪箍筋的截面面积越大,试件的抗弯承载力越大。当单根抗剪箍筋截面面积由 50.3 mm² 减小到 113.1 mm² 时,试件的开裂、屈服和极限荷载分别提高了 7.05%、8.42% 和 8.24%。由此说明,随抗剪箍筋截面面积增大,PTB 的抗

弯承载力增加,且其对开裂、屈服、极限荷载影响程度相近。

4.3 抗剪箍筋间距影响

试件 GJJJ50、GJJJ100、GJJJ150、GJJJ200、GJJJ250、GJJJ300 的跨中荷载-位移曲线如图 12 所示,各试件抗弯承载力对比结果见表 8。

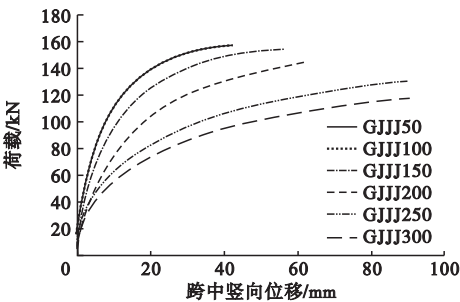


图 12 不同抗剪箍筋间距下 PTB 的荷载-位移曲线

Fig. 12 Mid-span load-deflection curves of PTB with different stirrup spacing

表 8 不同抗剪箍筋间距下 PTB 抗弯承载力

Table 8 Bearing capacity of PTB with different stirrup spacing kN			
试件	开裂荷载	屈服荷载	极限荷载
GJJJ50	31.25	130.71	158.61
GJJJ100	31.19	131.52	159.29
GJJJ150	26.89	114.93	155.22
GJJJ200	25.52	94.89	145.74
GJJJ250	24.68	74.72	131.45
GJJJ300	23.95	66.34	117.74

从图 12 和表 8 可以看出,随着抗剪箍筋间距增加,各试件的跨中荷载-位移曲线明显降低,当抗剪箍筋间距由 50 mm 增大至 300 时,试件的开裂、屈服和极限荷载分别降低了 23.36%、49.25% 和 25.77%。分析原因是因为,全预制板与预制矩形梁间的相对错动形成的剪力是通过后浇混凝土与预制矩形梁上表面的摩擦及抗剪箍筋的横截面抗剪共同承担,因此抗剪箍筋间距越小,界面间的抗剪抗弯承载力越大,PTB 的整体性越好,抗弯承载力越高。由此说明,随抗剪箍筋间距减小,PTB 的抗弯承载力明显增加,且其对屈服荷载影响最大。

5 结 论

(1)PTB 与现浇 T 型梁相比,初始刚度和开裂荷载略低,屈服和极限抗弯承载力略高,但相差程度不大。同时两者的破坏状态基本一致,因此 PTB 具有可行性。

(2)新旧混凝土之间摩擦系数、连接处后浇混凝土强度和连接处纵向钢筋强度对 PTB 受弯性能几乎无影响,连接处纵向钢筋的直径对其受弯性能影响很小。

(3)抗剪箍筋截面面积、抗剪箍筋间距和预制板搭接长度是影响 PTB 承载力的主要因素,随着抗剪箍筋截面面积增加、抗剪箍筋间距和预制板搭接长度减小,PTB 承载力增大。

参考文献

- [1] 刘香,倪东阳,李娟. 预制带肋钢筋桁架叠合板的试验与有限元分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2018,34(1):42-52.
(LIU Xiang, NI Dongyang, LI Juan. Experimental study and finite element analysis of prefabricated ribbed steel truss laminated slabs [J]. Journal of Shenyang Jianzhu university (natural science), 2018, 34(1): 42-52.)
- [2] ZHAO H, SHENG L. Microstructure and mechanical properties of the Ag/316L composite plate fabricated by explosive welding [J]. Journal of manufacturing processes, 2021, 64: 265-275.
- [3] 贾斌,吴体,魏明宇,等. 新型自承式钢筋桁架楼承板体系施工阶段力学性能研究[J]. 建筑钢结构进展,2019,21(2):56-63.
(JIA Bin, WU Ti, WEI Mingyu, et al. The mechanical behavior of a new steel-Bar truss slab in construction [J]. Progress in steel building structures, 2019, 21(2): 56-63.)
- [4] 郭伟强. 暗梁式全预制板连接力学性能研究[D]. 沈阳:沈阳建筑大学,2020.
(GUO Weiqiang. Study on mechanical properties of fully prefabricated slabs connected with concealed-beam [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2020.)
- [5] 谭刚,刘亚东. 新型蜂窝全预制免撑楼板研究[J]. 城市住宅,2019,26(6):78-82.
(TAN Gang, LIU Yadong. Study on new honeycomb fully-prefabricated unbraced floor [J]. City & house, 2019, 26(6): 78-82.)
- [6] 林霞娟,黄莉萍. 装配式建筑全预制锯齿型楼板探讨与应用[J]. 科技创新与应用,2020(4):178-180.
(LIN Xiajuan, HUANG Liping. Discussion and application of prefabricated sawtooth floor in

- prefabricated buildings [J]. Technology innovation and application, 2020 (4): 178-180.)
- [7] 唐元昊. 卡扣式全预制板连接力学性能研究[D]. 沈阳:沈阳建筑大学,2021.
(TANG Yuanhao. Study on mechanical properties of fully prefabricated slabs connected with concealed-beam [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2021.)
- [8] 华和贵. 钢筋混凝土拼接叠合板试验研究与非线性数值模拟[D]. 合肥:合肥工业大学,2009.
(HUA Hegui. Experimental study on reinforced concrete superimposed slabs with connections and nonlinear numerical simulation based on ANSYS [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2009.)
- [9] 梁军,张大林. 非线性有限元法及实例分析[J]. 水利科技与经济,2007,13(4):222-224.
- [10] 薛伟辰,杨云俊,窦祖融,等. 钢筋混凝土 T 型叠合梁抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2008,29(6):1-8.
(XUE Weichen, YANG Yunjun, DOU Zurong, et al. Experimental study on seismic behavior of reinforced concrete T-shaped composite beams [J]. Journal of building structures, 2008, 29(6): 1-8.)
- [11] LUBLINER J, OLIVER J, OLLER S, et al. A plastic-damage model for concrete [J]. International journal of solids and structures, 1989, 25(3): 299-326.
- [12] 熊进刚,丁利,田钦. 混凝土损伤塑性模型参数计算方法及试验验证[J]. 南昌大学学报(工科版),2019,41(1):21-26.
(XIONG Jingang, DING Li, TIAN Qin. Parameter calculation method and experimental verification for concrete damage plastic model [J]. Journal of Nanchang university (engineering & technology), 2019, 41(1): 21-26.)
- [13] 王立国. 带抗剪键叠合板的力学性能及影响因素研究[D]. 沈阳:沈阳建筑大学,2016.
(WANG Ligu. Study on mechanical properties and influencing factors of laminated plates with shear bond [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2016.)
- [14] 刘凯,张英彤,段万国,等. 国内外装配式建筑发展现状及趋势[J]. 北方建筑,2021,6(3):5-9.
(LIU Kai, ZHANG Yingtong, DUAN Wanguo, et al. Development status and future direction of prefabricated buildings at home and abroad [J]. Northern architecture, 2021, 6(3): 5-9.)
- [15] 李科. 房屋建筑装配式混凝土结构施工技术[J]. 四川建材,2021,47(10):136-137.
(LI Ke. Construction technology of prefabricated concrete structure in building [J]. Sichuan building materials, 2021, 47(10): 136-137.)
(责任编辑:杨永生 英文审校:刘永军)