文章编号：0253-374X(2025)10-1490-09

DOI：10.11908/j.issn.0253-374x.24167

新型上部纵筋外置预制叠合梁抗弯性能研究

刘　威[1,2]，郭建华[3]，段　雄[1]，郭小农[1]，周　森[2]，杨　芸[3]

（1. 同济大学 土木工程学院，上海 200092；2. 上海宝冶集团有限公司，上海 200941；3. 上海宝冶工程技术有限公司，上海 200941）

摘要：目前在工厂中制作钢筋混凝土叠合梁时通常不会将上部纵筋直接绑扎到钢筋笼中，而是在施工现场将上部纵筋穿入钢筋笼再进行绑扎，这使得上部纵筋施工难度大、效率低。针对此问题，提出了一种将上部纵筋直接放置于箍筋上方进行绑扎的连接构造，并设计了有凹槽和无凹槽两种箍筋形式。对尺寸、混凝土标号和配筋完全相同的现浇梁、传统预制叠合梁和新型上部纵筋外置预制叠合梁进行了受弯加载试验，然后使用ABAQUS软件对试验进行了数值模拟，研究了新型绑扎方式对梁力学性能的影响。结果表明，新型预制叠合梁与传统预制叠合梁的承载能力相同，略低于现浇梁，说明所提出的上部纵筋绑扎方式安全可靠，在实际工程中具有一定的应用前景。

关键词：预制叠合梁；纵筋外置；ABAQUS软件；极限承载力

中图分类号：TU375　　**文献标志码**：A

Bending Performance of Novel Prefabricated Reinforced Concrete Composite Beams with Externally Placed Upper Longitudinal Bars

LIU Wei[1,2], *GUO Jianhua*[3], *DUAN Xiong*[1], *GUO Xiaonong*[1], *ZHOU Sen*[2], *YANG Yun*[3]

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Baoye Group Co., Ltd., Shanghai 200941, China; 3. Shanghai Baoye Engineering Technology Co., Ltd., Shanghai 200941, China)

Abstract: Currently, when prefabricating reinforced concrete composite beams in factories, the upper longitudinal bars are typically not directly tied into the rebar cage. Instead, the upper longitudinal bars are passed through the cage and tied on-site, which makes the construction process more difficult and less efficient. To address this issue, this paper proposed a connection design where the upper longitudinal bars were directly placed above the hoop and tied. Two types of hoops were designed: one with a groove and one without. Bending tests were conducted on cast-in-place beams, traditional prefabricated composite beams, and the novel prefabricated composite beams with externally placed upper longitudinal bars, all of which had identical dimensions, concrete grades, and reinforcement configurations. Numerical simulations of the tests were performed using ABAQUS software to investigate the influence of the new tying method on the mechanical properties of the beams. The results indicate that the novel prefabricated composite beams exhibit similar load-bearing capacity to traditional prefabricated composite beams, slightly lower than that of cast-in-place beams. This suggests that the proposed method of tying the upper longitudinal bars is safe and reliable, with promising potential for practical application in engineering.

Keywords: prefabricated composite beam; externally placed longitudinal bars; ABAQUS; ultimate bearing capacity

装配式钢筋混凝土结构是目前我国大力推广的建筑结构之一，相较于传统的现浇结构，装配式结构工业化程度高、构件质量好、施工方便快捷，同时极大地避免了现场湿作业，节能环保，符合绿色建筑的发展要求[1-3]。

钢筋混凝土叠合梁兼具装配式结构与现浇整体式结构的有点，具有施工工期短、模板使用量小、节能环保等优点，诸多学者针对其进行了系统研究。郭瑞等[4]对预制叠合梁的正截面抗弯承载力进行了试验研究，结果显示构件达到承载力极限状态时叠合面没有产生滑移，受压区混凝土也没有被压碎，构件力学性能良好；吴方伯等[5]对预应力预制叠合梁受弯性能进行了试验研究，结果表明对于采用自然粗糙面的叠合梁，可不考虑叠合面相对滑移而按整

收稿日期：2024-05-15

第一作者：刘　威，博士生，高级工程师，一级建造师，主要研究方向为装配式和低碳建筑。E-mail：liuwei@sbc-mcc.com

通信作者：郭小农，副教授，工学博士，主要研究方向为铝合金结构。E-mail：guo-xiao-nong@tongji.edu.cn

论文拓展介绍

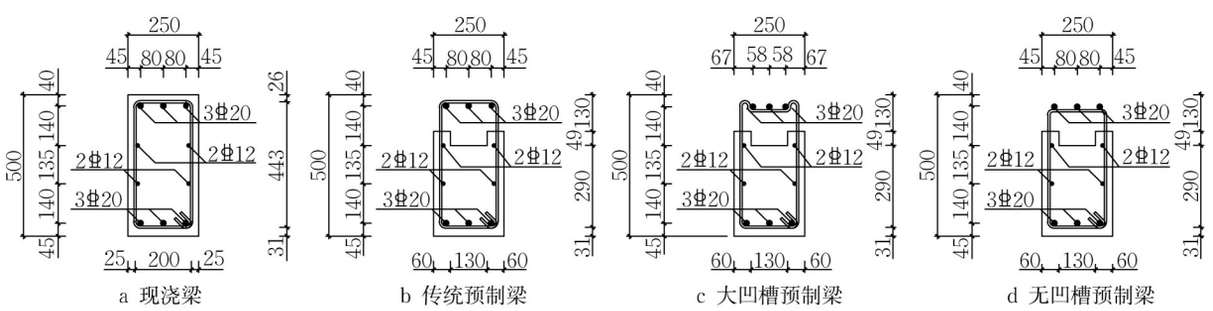
浇梁进行计算分析；熊学玉等[6]提出了一种应用二次预应力技术的新型叠合梁，结果表明新型叠合梁可以削弱一阶段受力对预制叠合梁力学性能的不利影响；刘才玮等[7]对高温作用后预制装配式叠合梁的受弯性能进行了研究，提出了叠合梁受火后受弯承载力计算方法；洪炳钦等[8]对叠合梁的斜截面抗剪承载力进行了研究，研究表明叠合梁的斜截面抗剪承载力与梁的裂缝发展有关，在叠合梁中，箍筋所能承担的剪力比按规范公式计算所得的抗剪承载力更大；张晓光等[9]对叠合梁新旧混凝土结合面抗剪性能现场试验研究，分析了各种结合面处理方法下新旧混凝土之间的结合程度，提出了切槽和植筋对结合面抗剪强度提高的经验公式；杨云俊等[10]设计了一种T型预制叠合梁并对其进行了静力加载试验，研究结果表明两种钢筋混凝土T型叠合梁与现浇对比梁的总体性能均较为接近，均可满足工程设计要求。

上述学者针对预制叠合梁的力学性能和设计方法进行了研究，但当预制叠合梁采用封闭箍筋时便会出现上部纵筋难以穿入梁和柱的箍筋中以形成整体钢筋笼的问题，此工序耗费了大量的人力和时间，严重影响整体结构的施工进度和施工效率。对此，本文提出了一种受压纵筋直接放置于封闭箍筋上方的连接方式，基于抗弯性能试验和有限元分析等方法，研究了纵筋外置预制叠合梁的开裂荷载、屈服荷载、极限承载力等力学参数，确保该类连接形式预制叠合梁的抗弯性能能够“等同现浇”。

1　试验设计

1.1　试件设计

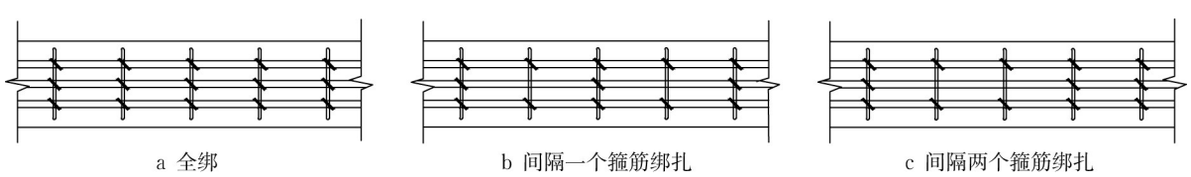
针对传统钢筋混凝土叠合梁中采用封闭箍筋所导致上部纵筋施工难度大、效率低的难题，设计了一种将上部纵筋放置于箍筋上方的连接形式(图1)，新型连接方式包括叠合梁的上部后置纵筋和下部箍筋，其中下部箍筋采用有凹槽和无凹槽两种形式，上部后置纵筋的中心线高度和现浇梁、传统预制梁纵筋中心线高度一致，所设计的有凹槽形式的箍筋上端均采用180°弯折形式，弯曲直径不小于箍筋直径的2.5倍，弯折后平直段的长度依据后置纵筋的直径确定。为进一步探究绑扎方式对有凹槽的纵筋外置叠合梁的力学性能的影响，上部纵筋与箍筋分别采用全绑、间隔一个箍筋绑扎和间隔两个箍筋绑扎的绑扎方式进行绑扎连接(图2)，所用的扎丝和钢筋型号均与现浇梁一致。



a 现浇梁　b 传统预制梁　c 大凹槽预制梁　d 无凹槽预制梁

图1　梁截面配筋图(单位：mm)

Fig. 1　Reinforcement of beam section (unit: mm)



a 全绑　b 间隔一个箍筋绑扎　c 间隔两个箍筋绑扎

图2　受压钢筋绑扎方式

Fig. 2　Binding method for compression steel bar

所有的试验构件中间箍筋间距为200 mm，两端加密区箍筋间距为100 mm，加密区长度为800 mm；试件所采用的钢筋型号为HRB400，混凝土标号为C30，各试件的主要设计参数见表1。

1.2　测点布置

试验过程中测试系统由传感器和采集器组成，为探究加载过程中纵筋外置预制叠合梁上部纵筋的应力应变情况以及可能出现的纵筋屈曲现象，设计了一

表1 构件基本信息

Tab. 1 Basic information of specimens

试件编号	试件数量	截面尺寸/(mm×mm)	叠合层厚度/mm	跨度/m	构件种类	受压纵筋绑扎方式
XL－1/2	2	250×500	130	6	现浇梁	全绑
YLC－1/2	2	250×500	130	6	传统预制梁	全绑
YLD－1/2	2	250×500	130	6		全绑
YLD－3/4	2	250×500	130	6	纵筋外置大凹槽预制梁	间隔一个箍筋
YLD－5/6	2	250×500	130	6		间隔两个箍筋
YLW－1/2	2	250×500	130	6	无凹槽预制梁	全绑

种由三个应变片组成的测点形式,记为“TS”(图3)。

将“TS”布置在所有预制叠合梁上部中间纵筋,以此测量或推算出受压纵筋的应变;所有构件的受拉纵筋在钢筋底部对称布置6个应变片,具体的布置位置如图4所示。由于本次试验仅通过梁挠度的变化来判断试件的破坏,因此仅在支座和跨中布置三个位移计。

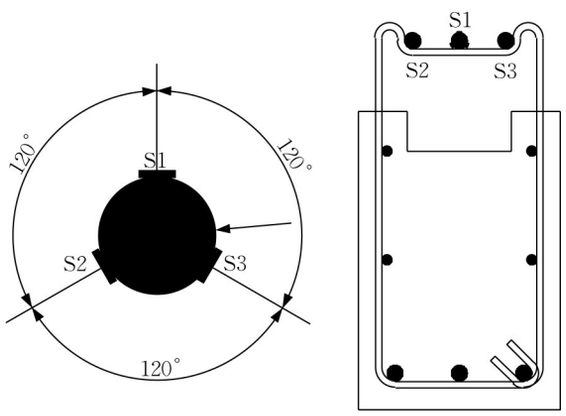


图3 测点“TS”示意图

Fig. 3 Measuring point “TS”

1.3 静载试验

本试验采用四点弯曲加载的加载方式,加载示意图如图5所示。GB/T 50152—2012《混凝土结构试验方法标准》[11],在试件屈服前采用力控制加载每一级荷载为23 kN;试件屈服后按位移控制加载,每一级跨中竖向位移为20 mm(梁长度的1/300);加载过程中观察试件情况及所得到的数据,并依据GB50010—2010《混凝土结构设计规范》[12]中相关要求来判定构件是否达到承载力极限状态。

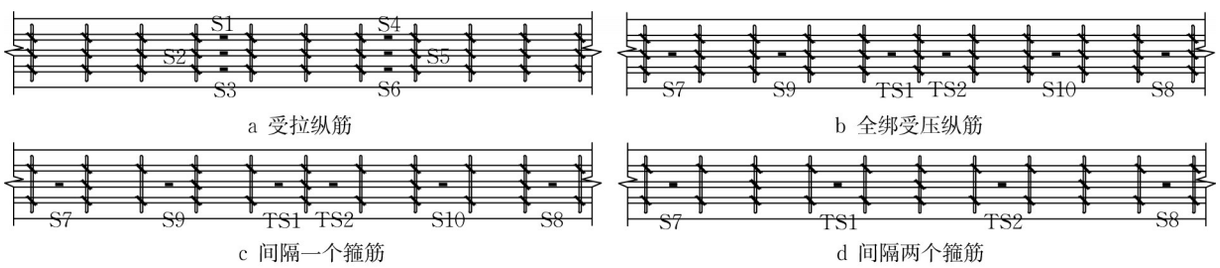


图4 纵筋应变片位置

Fig. 4 Location of longitudinal reinforcement strain gauge

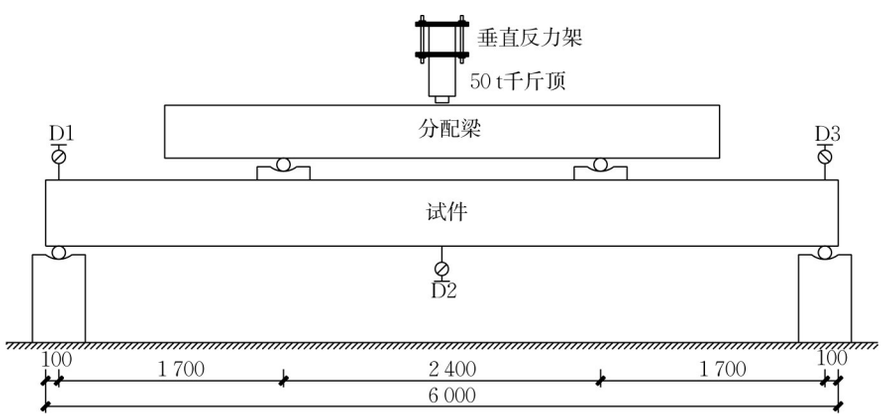


图5 试验装置示意图(单位:mm)

Fig. 5 Experimental setup (unit: mm)

2　试验结果及分析

2.1　裂缝发展过程

所有试件试验现象基本相同，以试件 YLD-3 为例，第一级荷载作用时，梁处于弹性范围内，梁的变形很小，没有裂缝出现；第二级荷载（数值模拟的开裂荷载）施加完成时，梁的纯弯区出现裂缝，最长 23 cm；第四级荷载施加完成时，纯弯区原有的裂缝增长明显，最长 32 cm，原有的两条裂缝之间出现大量新的垂直裂缝，此外，弯剪区也有新的斜裂缝出现；往后几级荷载加载过程中，试件发出轻微的响声，梁上的原有裂缝有所发展，最长 34 cm，纯弯区基本没有出现新的垂直裂缝，但裂缝宽度有所增大；第八级、第九级荷载施加完成时，裂缝发展缓慢，但有部分短的裂缝延伸到长的上合并为一条裂缝，弯剪区斜裂缝有一定的伸长；第十级荷载加载完成时，试件屈服，垂直裂缝延伸到新旧混凝土的叠合面处便停止增长，同时裂缝宽度明显增大，最大宽度约为 1 mm；之后按位移控制加载，第十一级荷载加载过程中，试件变形持续增大，部分纯弯区的垂直裂缝穿越叠合层，最长 40 cm，裂缝宽度迅速增大，试件底部有混凝土碎块脱落；第 12 级荷载加载过程中，裂缝宽度达到 2 mm，停止加载；所有试件试验过程中均没有出现设想的受压区混凝土压碎，纵筋向外屈曲的现象。加载完成时试件上裂缝分布如图 6 所示，由于梁较长，图中将一根梁分为左、中、右三部分展示。

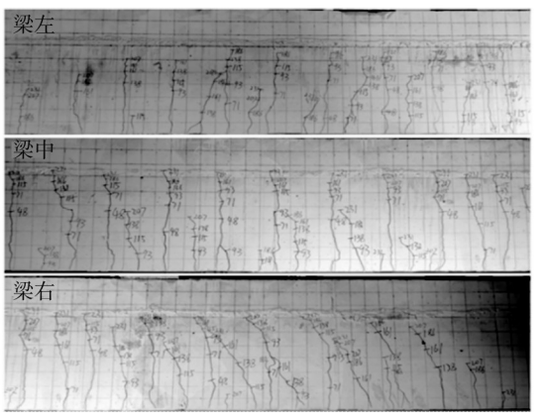


图 6　试件 YLD-3 试验现象

Fig. 6　Test phenomenon of specimen YLD-3

2.2　试验结果分析

各个试件荷载–应变曲线如图 7 所示，其中现浇梁仅关注受拉纵筋的应变。从图中可知，所有试件的受拉纵筋在试件屈服时应变都基本达到 2 500×10^{-6}，表明试件的屈服是由受拉纵筋的屈服引起的，同时当试件处于承载力极限状态时受拉纵筋的应变基本均超过 3 000×10^{-6}；每个试件受压纵筋上的应变数据基本一致，并且在试件破坏时受压纵筋的应变均达到 800×10^{-6}，表明所有构件的受压纵筋均处于弹性范围内；测点“TS”上三个应变片数据接近，表明采用纵筋外置连接方式的受压纵筋没有向外屈曲的趋势。

基于千斤顶的反力和试件的跨中挠度绘制了各个试件的荷载–位移曲线如图 8 所示。从图中可以看出，所有试件的荷载–位移曲线都经历了弹性阶段、裂缝发展阶段、屈服阶段以及略微的强化阶段，但由于材料的离散性、试件加工养护的不确定性以及多重极限状态评判标准等因素的影响，不同试件跨中最终的位移和试件的极限荷载不完全相同，其中试件 YLW2 得到的数据存在一定差异。各个试件的开裂荷载 F_{cr}、屈服荷载 F_y 和极限承载力 F_u 见表 2，以现浇梁 XL-1 的数据（字体加粗）为基准进行对比分析。

排除误差较大的试件，由图 7、8 和表 2 分析可得：①所有试件的开裂荷载基本相同，最大差距仅有 4 kN 左右；②预制叠合梁的屈服荷载和极限承载力略低于现浇梁，符合实际情况；③采用有凹槽和无凹槽箍筋的纵筋外置预制叠合梁力学性能基本相同，箍筋的弯折形式对纵筋外置梁的力学性能基本没有影响；④试件达到极限承载力状态就停止加载的情况下，所有试件受压区混凝土不会被压碎，上部受压纵筋与箍筋的绑扎方式对纵筋外置梁的力学性能没有任何影响，同时也不会出现受压纵筋向外屈曲的现象；⑤在承载力达到极限状态但是构件不发生破坏的情况下，可以认为纵筋外置预制叠合梁与传统的预制叠梁在力学性能上没有差异，纵筋外置预制叠合梁的力学性能基本“等同现浇”；⑥由于所有试件试验程序完全一致，YLW-2 的试验数据异常是由于混凝土材料存在离散性或试件加工过程中存在误差。

3　数值模拟结果及分析

3.1　模型概况

采用 ABAQUS 建立考虑新老混凝土连接的三维有限元模型，对上述各个试件在四点弯曲加载下的承载和变形性状进行计算分析。

计算模型选取预制梁、后浇混凝土、钢筋笼、垫块和现浇梁，模型当中的材料参数均与静载试验一

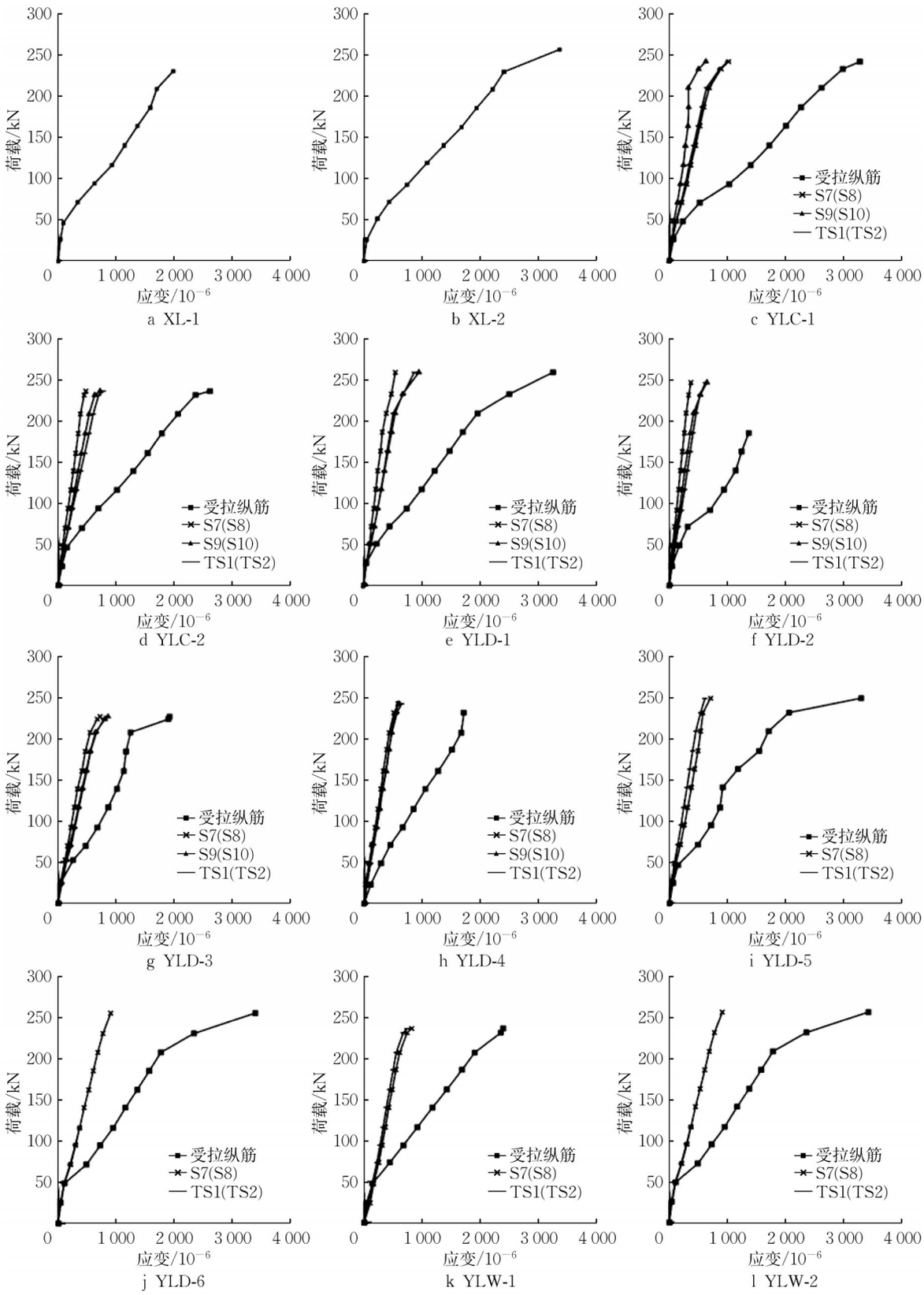


图7 各个试件的荷载–应变曲线

Fig. 7 Load-strain curve of each specimen

致,钢筋位置则与各个试件配筋图中的钢筋位置一致。混凝土单轴受拉的应力–应变本构关系跟据GB50010—2010《混凝土结构设计规范》[12]确定,弹性模量取$E = 3\times10^4$ MPa,抗压强度取$f_c = 20.1$

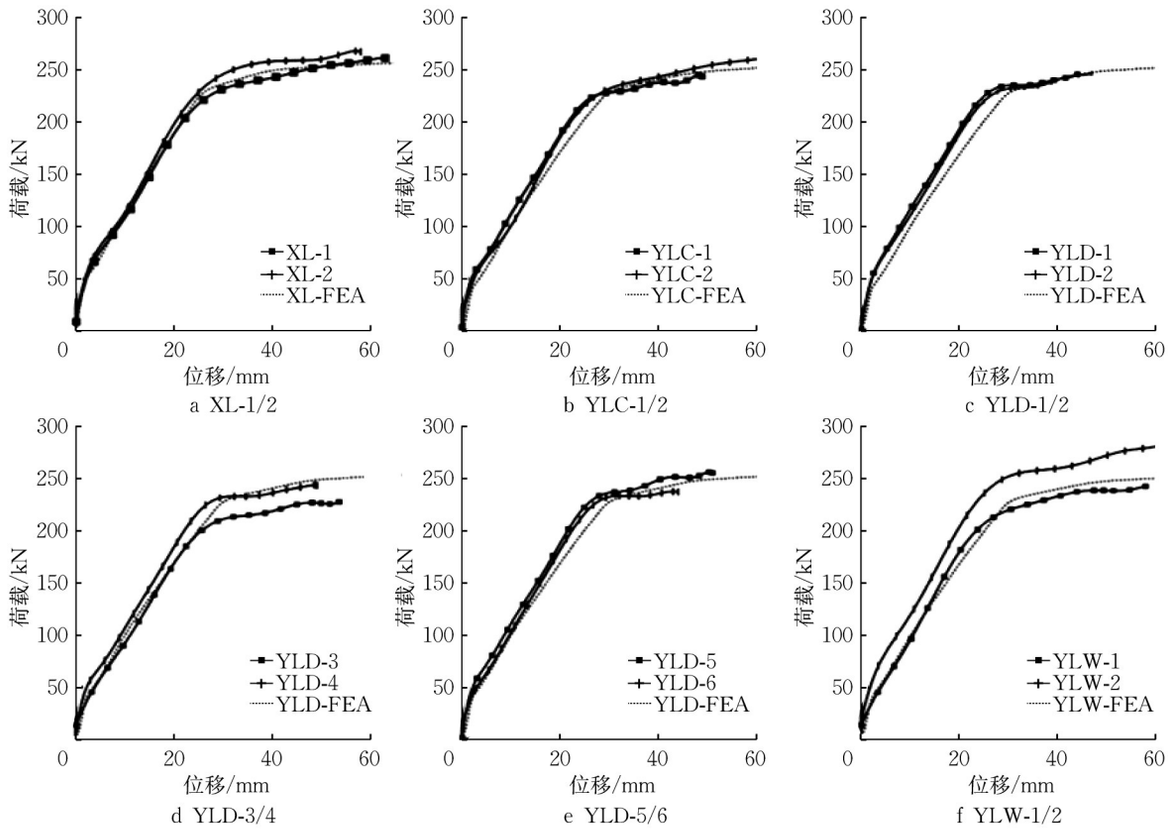


图 8　各个试件的荷载–位移曲线

Fig. 8　Load-displacement curve of each specimen

表 2　试件的各个承载力

Tab. 2　Each bearing capacity of the specimen

试件编号	F_{cr}/kN	相对比值	F_y/kN	相对比值	F_u/kN	相对比值
XL－1	47.2	1.000	231.4	1.000	260.9	1.000
XL－2	46.5	0.985	234.1	1.012	266.7	1.022
YLC－1	49.1	1.040	221.4	0.957	242.2	0.928
YLC－2	45	0.953	229.5	0.992	258.8	0.992
YLD－1	48.4	1.025	228.8	0.989	243.4	0.933
YLD－2	44.7	0.947	227.1	0.981	245.8	0.942
YLD－3	46	0.975	206.7	0.893	226.9	0.870
YLD－4	46.8	0.992	226.7	0.980	242.5	0.929
YLD－5	48	1.017	231.1	0.999	253.4	0.971
YLD－6	44.5	0.943	225.1	0.973	236.5	0.906
YLW－1	45.8	0.970	220	0.951	242.3	0.929
YLW－3	53.2	1.127	244.8	1.058	281.9	1.080

MPa，取f_t＝2.01 MPa。ABAQUS 中采用塑性损伤模型，根据相关文献[13]，混凝土膨胀角取 30°，偏心率取 0，初始双轴压缩屈服应力与初始单轴压缩应力之比为 1.16，第二应力不变量取 2/3，粘性系数取 0。钢筋采用了两折线理想弹塑性模型，根据加工厂提供的材性检测报告，钢筋弹性模量可取$E=2.06\times10^5$ MPa，屈服强度可取f_y＝400 MPa，极限抗拉强度f_u＝560 MPa。

3.2　相互作用、边界条件及荷载工况

梁中的钢筋使用嵌入约束与混凝土连接，垫块使用绑定约束与混凝土梁进行连接；预制叠合梁和后浇混凝土部分的粘结属于新老混凝土结合面，而该结合面之间的非线性接触是保证有限元计算结果是否合理的关键，此模型采用学者吴俊霖[14]所归纳的内聚力–库伦模型来模拟新老混凝土结合面的接触。混凝土梁两端的垫块一块施加铰接约束，另一块则施加竖直方向的链杆约束来模拟试验中简支梁的边界条件，混凝土梁中间两个垫块上分别施加竖直向下 55 mm 的强制位移，模型的边界条件和施加的荷载如图 9 所示。

3.3　单元选取及网格划分

混凝土梁和垫块采用三维实体单元 C3D8R 进行模拟，钢筋则采用两结点线性三维桁架单元 T3D2 进行模拟，不考虑两者之间的黏结滑移效应，划分好网格的模型如图 9 所示。

3.4　数值模拟的结果

由于结构和荷载对称，故本文截取一半的梁和钢筋来展示应力分布情况。图 10、图 11 为各个试件加载完成时混凝土和钢筋的应力分布图。可以发现，加载

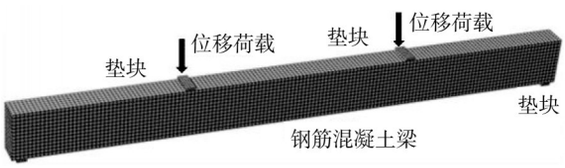


图9 混凝土梁整体模型

Fig. 9 Overall model of beam

完成时,受拉区混凝土已经开裂,应力几乎为零。同时,纯弯段的受拉纵筋和下部的附加钢筋完全屈服,受压纵筋的应力基本达到160 MPa,换算成应变即800 × 10^{-6},与试验结果一致。除此以外可以发现,预制梁纯弯段的受压纵筋和上部附加钢筋的应力水平明显低于现浇梁,说明预制梁的混凝土受压区高度比现浇梁更高,从图10可以观察到这一现象。

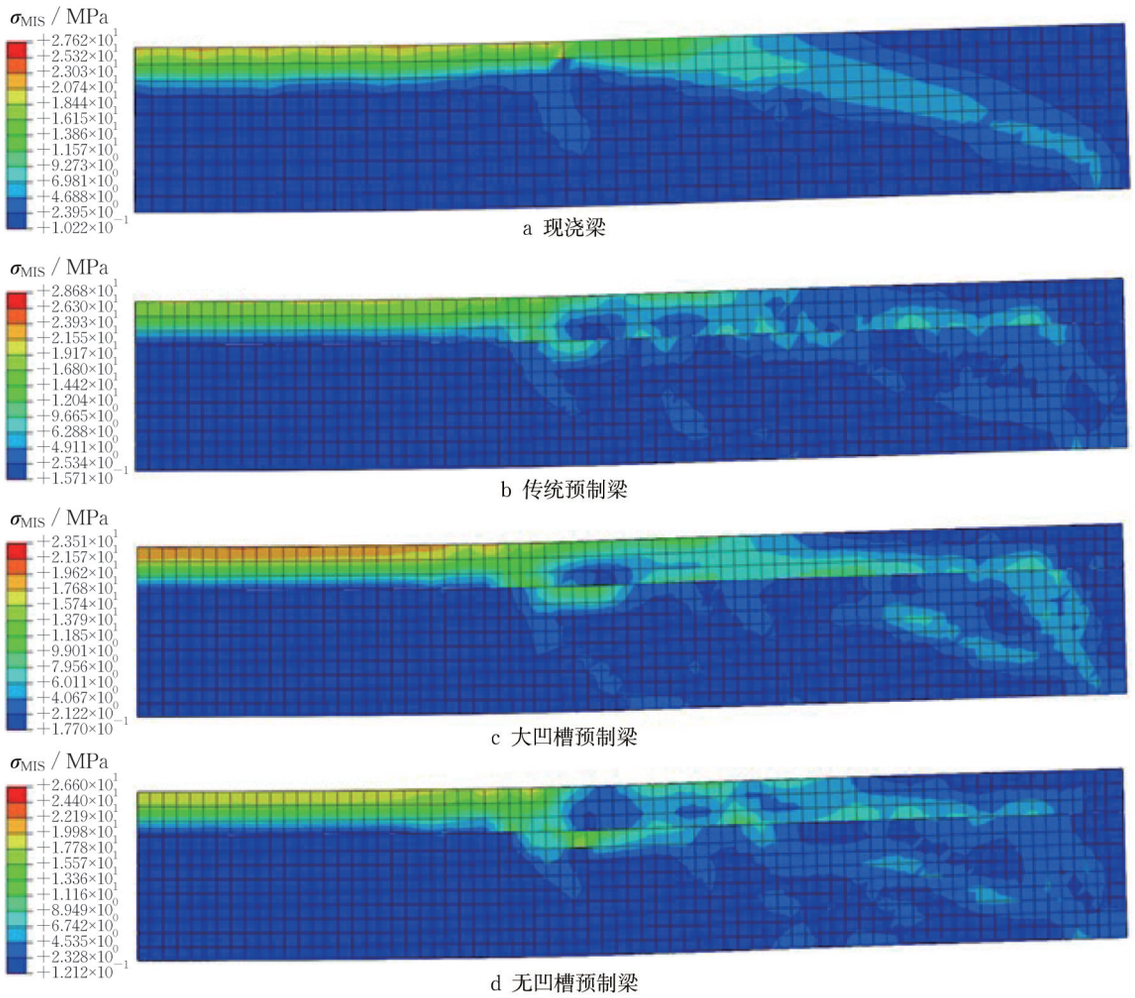


图10 混凝土的应力分布

Fig. 10 Stress distribution of concrete

3.5 数值模拟与试验结果的对比

为方便比较试验和数值模拟的结果,将数值模拟所得荷载–位移曲线绘制到图8中。从图中提取各个试件的开裂荷载 F_{cr}、屈服荷载 F_y 和极限承载力 F_u,并将数值模拟结果与试验结果进行对比,对比结果如表3所示,表格中相对误差 γ 的计算方法见式(1):

$$\gamma = \frac{X_s - X_m}{X_m} \cdot 100\ \% \tag{1}$$

式中:X_s 表示试验结果;X_m 表示数值模拟的结果。

从图8和表3中分析得出:①现浇梁的数值模拟结果与预制梁有较大差异,具体表现为现浇梁的初始刚度远大于预制梁,其开裂荷载 F_{cr} 和屈服荷载 F_y 也较大,但两者的极限承载力 F_u 基本一致;②数值模拟无法体现出三种不同类型预制梁的区别,三者的荷载–位移曲线基本重合;③除试件YLW-2之外,数值模型对各个试验试件的模拟结果较为理想,两种方法获得的屈服荷载和极限荷载十分接近;④数值模型无法较好地模拟出试件的开裂荷载,各个试件的开裂荷载相对误差都比较大。

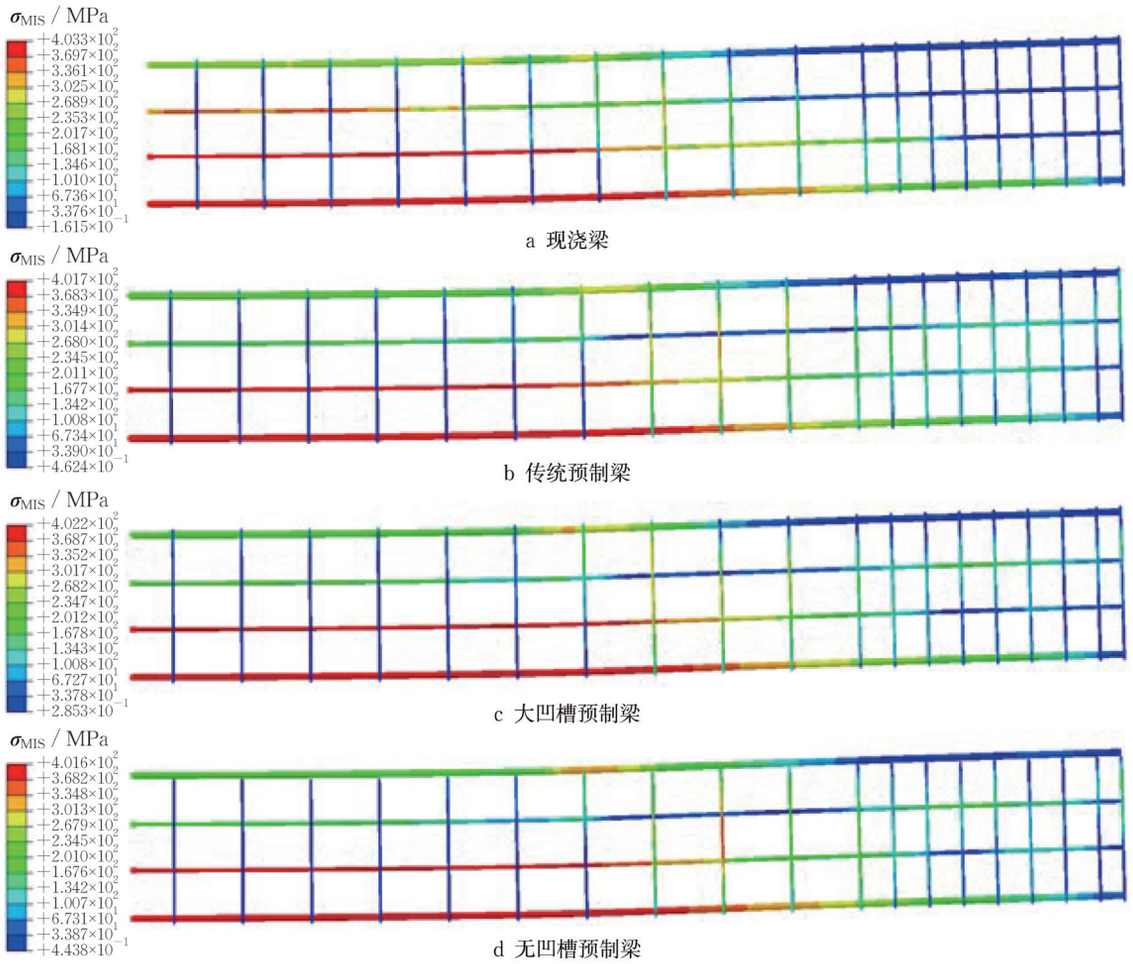


图 11　钢筋的应力分布

Fig. 11　Stress distribution of steel bars

表 3　试验与数值模拟结果比较

Tab. 3　Comparison of test and numerical simulation results

试件编号	F_{cr} / kN	相对误差/ %	F_y / kN	相对误差/ %	F_u / kN	相对误差/ %
XL－1	47.2	－5.2	231.4	0.7	260.9	2.0
XL－2	46.5	－6.6	234.1	1.9	266.7	4.3
XL－FEA	49.8	0	229.8	0	255.8	0
YLC－1	49.1	18.9	221.4	－2.4	242.2	－3.9
YLC－2	45.0	9.0	229.5	1.2	258.8	2.7
YLC－FEA	41.3	0	226.8	0	251.9	0
YLD－1	48.4	15.5	228.8	1.1	243.4	－3.7
YLD－2	44.7	6.7	227.1	0.3	245.8	－2.7
YLD－FEA	41.9	0	226.4	0	252.7	0
YLD－3	46.0	9.8	206.7	－8.7	226.9	－10.2
YLD－4	46.8	11.7	226.7	0.1	242.5	－4.0
YLD－FEA	41.9	0	226.4	0	252.7	0
YLD－5	48.0	14.6	231.1	2.1	253.4	0.3
YLD－6	44.5	6.2	225.1	－0.6	236.5	－6.4
YLD－FEA	41.9	0	226.4	0	252.7	0
YLW－1	45.8	11.7	220.0	－2.9	242.3	－3.4
YLW－2	53.2	29.8	244.8	8.1	281.9	12.4
YLW－FEA	41.0	0	226.5	0	250.9	0

4 结论与展望

4.1 结论

进行了现浇梁、传统预制叠合梁以及4种新型上部纵筋外置预制叠合梁的四点弯曲加载试验,并通过有限元软件对试验进行模拟,对比两种方法的分析结果,得到以下结论。在正弯矩作用下:

(1)上部纵筋外置预制叠合梁与传统的预制叠梁在力学性能上没有明显差异,两者的极限承载力略小于现浇梁,纵筋外置预制叠合梁的力学性能基本"等同现浇"。

(2)除了试件YLW-2以外,其余所有试件的开裂荷载比较接近,开裂荷载与试件类型没有表现出明显的相关性,试件承载力出现误差的原因可能是材料性能的离散性或试件加工时的不确定性导致的。

(3)箍筋的弯折形式对梁的力学性能基本没有影响;受压纵筋与箍筋的绑扎方式不会影响梁的整体力学性能;在梁达到极限承载力状态且停止加载时,受压纵筋不会出现向外屈曲的现象,纵筋外置预制叠合梁的破坏模式与传统现浇钢筋混凝土适筋梁基本一致。

(4)实际工程中,上部纵筋外置预制叠合梁可以施工效率,降低建造成本,具有一定的应用前景。

4.2 展望

本次试验研究仍存在以下的不足和可以继续开展的研究方向:

(1)出于安全考虑,试验中梁达到承载力极限状态后便停止加载,未能做出梁最终的破坏模式,也没有出现预想的受压区混凝土压碎,受压纵筋向外屈曲的现象。

(2)数值模拟中没有考虑纵筋的粘结滑移,无法准确地模拟纵筋与混凝土之间的相互作用,可以在后续展开相关研究。

(3)数值模拟中混凝土采用是塑性损伤模型,无法模拟出混凝土的开裂和裂缝发展,后续可以采用弥散开裂模型进一步探究。

(4)本文未考虑上部外置纵筋受拉的情况,为将这种新型的绑扎方式应用到实际工程中,还需对不同工况作用下的上部纵筋外置钢筋混凝土叠合梁进行研究。

作者贡献声明:

刘 威:调研及整理文献,完成试验和数值计算分析,撰写论文。

郭建华:论文研究内容和试验方案的技术支持,审阅并修订论文。

段 雄:参与技术调研、试验和数值计算分析,审阅并修订论文。

郭小农:论文研究内容的整体规划以及审阅修改,提供技术及经费支持。

周 森:参与试验研究和数值计算分析。

杨 芸:参与试验研究。

参考文献:

[1] 梁晨, 吕彦斌. 试析装配式建筑结构体系设计要点及其发展趋势[J]. 工程建设与设计, 2018(11):56.
LIANG Chen, LV Yanbin. Analysis on the main points and developing trend of the prefabricated building structure system [J]. Construction & Design for Project, 2018(11):56.

[2] 肖从真, 许杰峰, 姜波, 等. 新型装配式混凝土建筑结构体系、设计方法与自主BIM应用技术[J]. 建设科技, 2023(11):101.
XIAO Congzhen, XU Jiefeng, JIANG Bo, *et al*. New structure systems, design method and independent bim application technology of prefabricated concrete building [J]. Construction Science and Technology, 2023(11):101.

[3] 赵汉柏. 混凝土装配式住宅建筑施工技术优势分析[J]. 建筑工程技术与设|计, 2021(12): 1037.
ZHAO Hanbai. Analysis of construction technology advantages of concrete prefabricated residential buildings[J]. Architectural Engineering Technology and Design, 2021(12): 1037.

[4] 郭瑞, 郭盛, 胡运. 预制叠合梁结构承载性能试验研究[J]. 建筑结构, 2022, 52(S2): 1601.
GUO Rui, GUO Sheng, HU Yun. Study on structure experimental bearing capacity of precast composite beam [J]. Building Structure, 2022, 52(S2): 1601.

[5] 吴方伯, 黄海林, 周绪红, 等. 预应力预制叠合梁受弯性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(5): 107.
WU Fangbo, HUANG Hailin, ZHOU Xuhong, *et al*. Experimental study on flexural behavior of prestressed precast component composite beams [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(5): 107.

[6] 熊学玉, 肖启晟. 一阶段受力对混合配预应力筋叠合梁力学性能影响研究[J]. 建筑结构, 2018, 48(8): 46.
XIONG Xueyu, XIAO Qisheng. Research on the first-loading sensibility of composite beams with hybrid prestressed tendons [J]. Building Structure, 2018, 48(8): 46.

[7] 刘才玮, 鲁秀亮, 王鹏霏, 等. 高温后预制装配式叠合梁受弯性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(3): 223.
LIU Caiwei, LU Xiuliang, WANG Pengfei, *et al*. Experimental study on flexural performance of prefabricated composite beams after high temperature[J]. Journal of Building Structures, 2023, 44(3): 223.

(下转第1605页)