

文章编号:1673-2049(2017)03-0031-08

干节点连接装配式混凝土梁静力性能试验研究

程东辉,田晔环,张亮泉,许鹏程

(东北林业大学 土木工程学院,黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要:为了解决装配式混凝土预制构件连接时节点湿作业带来的施工不便,设计制作了7根混凝土简支梁,其中包括1根现浇混凝土简支梁、1根按《装配式混凝土结构连接节点构造》中湿节点连接而成的预制混凝土简支梁以及5根由构造不同干节点连接而成的预制混凝土简支梁,对梁进行两点加载,完成了简支梁静载作用下力学性能试验,获得承载力、变形及裂缝分布等试验数据。结果表明:采用钢板焊接连接和钢板螺栓连接的干节点混凝土试验梁的承载力不弱于现浇混凝土梁,而采用钢板对焊连接、预应力连接和植筋连接的干节点试验梁承载力稍弱于现浇混凝土梁,且其挠度实测值与最大裂缝宽度实测值均比现浇混凝土梁略大。

关键词:装配式混凝土梁;干节点;静载试验;承载力;裂缝

中图分类号:TU378

文献标志码:A

Experimental Study on Static Properties of Fabricated Concrete Beams with Dry Nodes

CHENG Dong-hui, TIAN Ye-huan, ZHANG Liang-quan, XU Peng-cheng

(School of Civil Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

Abstract: In order to solve the construction inconvenience of node wet operations when connecting prefabricated concrete members, seven concrete simply supported beams were made, including one in-situ concrete simply supported beam, one precast concrete simply supported beam connected by wet node according to *Connecting Node Configuration of Prefabricated Concrete Structure* and five precast concrete beams linked by different dry nodes. The mechanical properties of the beams under static load were tested by two-point loading. The test data such as the bearing capacity, deformation and crack distribution were obtained. The results show that the carrying capacity of concrete test beams connected by dry nodes of steel welding and steel bolts are equivalent to in-situ concrete beams. The carrying capacity of concrete test beams connected by steel anchors, prestressing and inserting reinforcing bars are slightly weaker than in-situ concrete beams. The measured values of deflection and maximum crack width of concrete test beams with dry nodes are slightly larger than the in-situ concrete beams.

Key words: fabricated concrete beam; dry node; static load test; bearing capacity; crack

0 引言

现浇混凝土整体性、抗震性能与刚度均较好,适

用于抗震设防及整体性要求较高的建筑。同时,现浇混凝土存在施工周期长、现场湿作业多、所需人工多、材料遗洒和噪声扰民等问题难以解决^[1-11]。针

收稿日期:2016-11-28

基金项目:国家自然科学基金重大研究计划项目(90915003);哈尔滨市科技创新人才研究专项资金项目(2012RFXXS111);中央高校基本科研业务费创新团队与重大项目培育资金项目(2572016EBC1)

作者简介:程东辉(1971-),男,黑龙江哈尔滨人,教授,工学博士,E-mail:chengdonghui2000@126.com。

对上述缺陷,目前从国家层面大力推广装配式混凝土结构在工程领域的应用,2011 年住建部颁布的《建筑业发展“十二五”规划》中,加强技术和创新任务的第 3 项任务就是积极推动建筑工业化;2014 年住建部提出的 10 项工作中的第 7 项工作重点是加快推进节能工作,促进建筑产业化发展。中国相继颁布了一系列装配式混凝土设计规范与技术规程,主要包括《装配式混凝土结构技术规程》、《装配整体式混凝土结构技术规程》及相关图集。各国开展了大量装配式混凝土结构力学性能研究工作^[12-19],薛伟辰等^[20]对 4 个不同位置的现浇柱叠合梁框架节点进行低周反复荷载下的足尺模型试验,研究表明,4 个现浇柱叠合梁框架节点均实现了“强柱弱梁、强节点弱构件”的设计目标,破坏形态均为梁端受弯破坏形式;李楠等^[21]通过足尺模型试验方法,对采用新型连接方式的混凝土后浇整体式梁柱节点构件在低周反复荷载作用下的开裂破坏形态、滞回特性、骨架曲线、延性性能、耗能能力等进行了系统研究。黄远等^[22]通过低周反复荷载试验对 2 个 1:2 比例的 2 层 2 跨现浇柱预制梁框架试件进行研究,相关研究成果表明:现浇柱预制梁框架结构具有稳定的滞回性能及良好的延性,刚度退化主要发生在屈服之前,结构的变形能力得到提高。

从目前研究成果来看,装配式混凝土各预制构件的连接还是以现浇混凝土湿作业连接方式为主,这些连接方式给结构施工带来一定不便。为了解决这一问题,本文自行设计制作了 5 种装配式混凝土干节点连接方式,开展装配式混凝土干式节点静力性能试验。

1 试验设计

1.1 试验梁设计

为了开展纯干法装配式混凝土节点静载性能试验研究,根据节点连接方式的不同,共设计制作了 7 根预制混凝土简支梁。试验梁的设计跨度为 3 m,截面尺寸均为 200 mm×300 mm,采用 C30 混凝土,纵向受力钢筋强度等级为 HRB400,箍筋强度为 HPB300。试验梁 XL 为整根预制混凝土简支梁,对其加载以获得极限承载力及变形,用于与其他试验梁的对比。其余 6 根试验梁在制作时均将试验梁等分成 2 段在工厂预制,然后利用不同的拼接方法将预制段连接成整体。材料性能见表 1,试验梁参数如表 2 所示。

表 1 材料性能
Tab. 1 Material Properties

C30 混凝土		HRB400 级钢筋		φ15.2 钢绞线	
f_{cu} /MPa	E_c /MPa	d /mm	f_y /MPa	d /mm	f_y /MPa
31.3	2.9×10^4	18	448.2	15.2	1 842

注: f_{cu} 为混凝土标准立方体抗压强度; E_c 为混凝土弹性模量; d 为钢筋或钢绞线直径; f_y 为钢筋或钢绞线屈服强度实测值。

1.2 加载与测量方案

试验所用加载与测量方案如图 1 所示。采用 300 kN 液压千斤顶对试验梁进行加载。试验采用分级加荷,每级 6 kN,当受压区混凝土被压碎或出现荷载加不上去的现象时,可视为试验梁达到承载力极限状态。

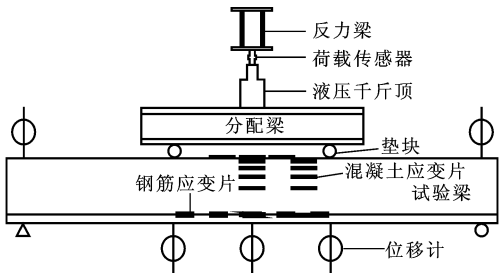


图 1 加载与测量方案

Fig. 1 Scheme of Loading and Measurement

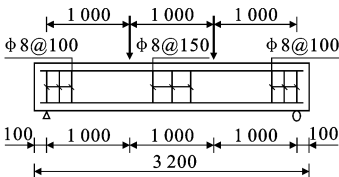
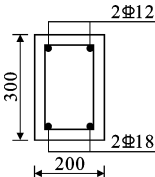
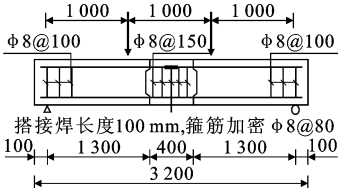
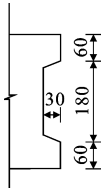
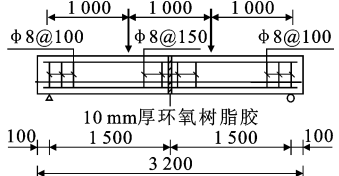
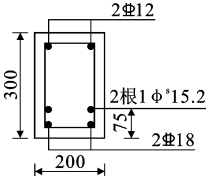
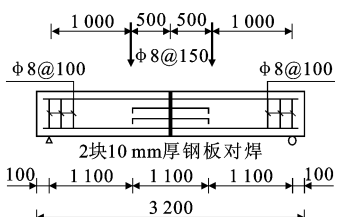
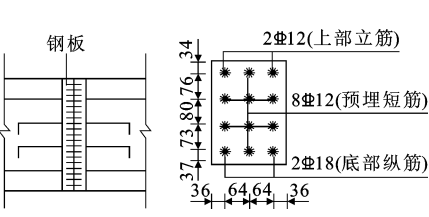
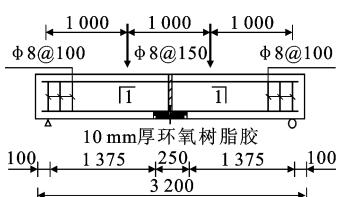
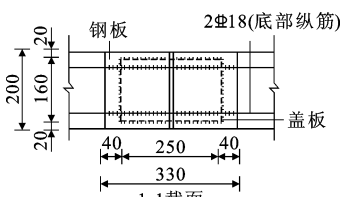
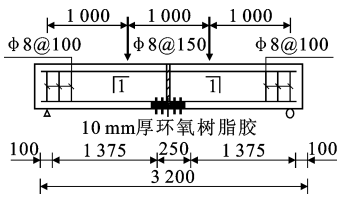
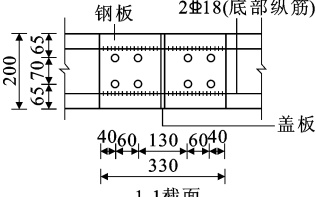
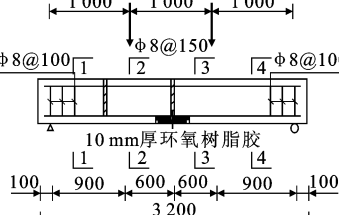
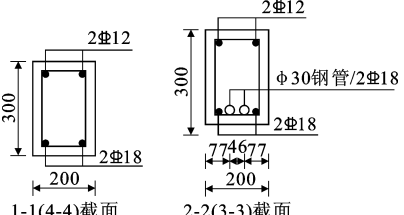
为了监测试验梁加载过程中钢筋应力的变化,在各试验梁加载点间的纵向受力钢筋表面(含普通纵向钢筋和预应力钢筋)等间距布置了若干钢筋应变片。为了监测试验过程中混凝土的应力变化情况,在加载点间梁顶混凝土表面等间距粘贴若干应变片,在跨中截面拼接处沿试验梁截面高度方向粘贴第 1 组混凝土应变片,为了防止拼接处的应变片在试验过程中拉裂,在距拼接处 200 mm 的相邻位置、同一标高处又粘贴同样数量的第 2 组混凝土应变片。在梁支座上方和跨中分别布置位移计用以监测试验过程中试验梁的变形状况。

2 试验现象

由于节点连接方式不同,试验梁的破坏呈现出不同形态,主要包括:

- (1)试验梁 XL 呈现典型的弯曲破坏形态。随着荷载 P 的增加,控制截面附近混凝土裂缝宽度、高度增加较快,临近破坏时,纵向受拉钢筋首先屈服,然后受压区混凝土被压碎。
- (2)对试验梁 YPL-1 进行加载,其受力及破坏形态与现浇混凝土试验梁 XL 相近,加载至极限状态时,跨中混凝土裂缝开展迅速,裂缝宽度较大,且

表 2 试验梁参数
Tab.2 Parameters of Test Beams

试验梁编号	连接方式	外形尺寸(mm)及连接	截面尺寸(mm)及构造
XL	整浇混凝土梁		
YPL-1	2 个预制段长度均为 1 400 mm, 拼接段为后浇节点连接		
YPL-2	预应力筋将 2 个预制段连成整体, 拼接截面利用环氧树脂胶粘贴		
YPL-3	预埋 300 mm×200 mm×10 mm 的 Q235 钢板对焊, 焊脚尺寸为 8 mm×8 mm, 预埋 8 根 Phi 12 短筋与钢板焊接		
YPL-4	预埋 160 mm×200 mm×10 mm 的 Q235 钢板与纵筋焊接, 拼接时用 250 mm×200 mm×10 mm 的 Q235 盖板与钢板焊接		
YPL-5	预埋 160 mm×200 mm×10 mm 的 Q235 钢板与纵筋焊接, 拼接时用 330 mm×200 mm×10 mm 的 Q235 盖板、M20 高强承压型螺栓与钢板连接		
YPL-6	左侧预制段预留 600 mm 孔道, 施工时将右侧预埋的 2 根 Phi 18 钢筋穿入预留孔道内并灌浆		

注:使用环氧树脂胶拼接的梁每段预制长度均为 1 595 mm,后浇节点的梁每段预制长度为 1 400 mm;加载位置、箍筋间距、截面配筋等与整浇对比梁相同,为避免重复,表中均省略。

底部保护层混凝土剥落。

(3)试验梁 YPL-2 在张拉至 $0.55f_{ptk}$ (f_{ptk} 为预应力钢筋屈服强度标准值)时,试验梁 YPL-2 出现较大反拱,环氧树脂胶上部出现裂缝。在加载初期,拼接处的环氧树脂胶首先受拉开裂,但是由于预应力的预压作用,裂缝开展受到限制,随着荷载的增加,环氧树脂胶裂缝向上发展而预制段混凝土裂缝不明显,梁顶混凝土被压碎,普通钢筋受拉屈服,此时预应力筋未屈服。

(4)试验梁 YPL-3 破坏时,由于拉力较大,附加短钢筋与钢板焊接点由下至上逐渐拉断,钢板与混凝土剥离,出现较大裂缝和荷载加不上去的现象时达到了承载力极限状态。

(5)试验梁 YPL-4 破坏时,纵向受拉钢筋屈服,受压区混凝土被压碎,而节点处拼接钢板完好无损。

(6)试验梁 YPL-5 在纵向受拉钢筋屈服后环氧树脂胶开裂,随着荷载继续增加,钢板上部混凝土开始出现裂缝并发展迅速,破坏时受压区混凝土被压碎,节点处拼接钢板完好无损。

(7)试验梁 YPL-6 在纵向受拉钢筋屈服后环氧树脂胶开裂,破坏时环氧树脂胶裂缝贯通,混凝土被压碎。

各试验梁破坏形态如图 2 所示。由压力传感器读数可以测得各试验梁极限状态下的承载力,如表 3 所示。

3 结果分析

3.1 承载力

表 4 给出了各试验梁极限承载力实测特征值与现浇混凝土梁 XL 承载力特征值的比较。由表 4 可以看出:试验梁 YPL-1, YPL-2, YPL-6 的控制截面在跨中拼接处的配筋率相当于现浇梁 XL 的跨中截面配筋率,纵向受拉钢筋受拉屈服现象首先出现在跨中,屈服时刻的荷载值与现浇梁相比有所降低,降低幅度为 13%,极限承载力降低 11%~13%。这是由于拼接处环氧树脂胶的裂缝比混凝土裂缝发展迅速,一旦出现裂缝,则中和轴迅速上移,受拉区只有纵向受拉钢筋参与受力。

试验梁 YPL-3, YPL-4, YPL-5 由于钢板的存在,控制截面由跨中移向两侧。试验梁 YPL-3 钢板与混凝土剥离,附加短筋被逐根拉断,导致纵向受拉钢筋受力不大,未出现屈服,极限承载力降低 6%。YPL-4, YPL-5 纵向受拉钢筋在靠近钢板外侧的位置首先屈服,且屈服时刻的承载力比现浇梁 XL 提

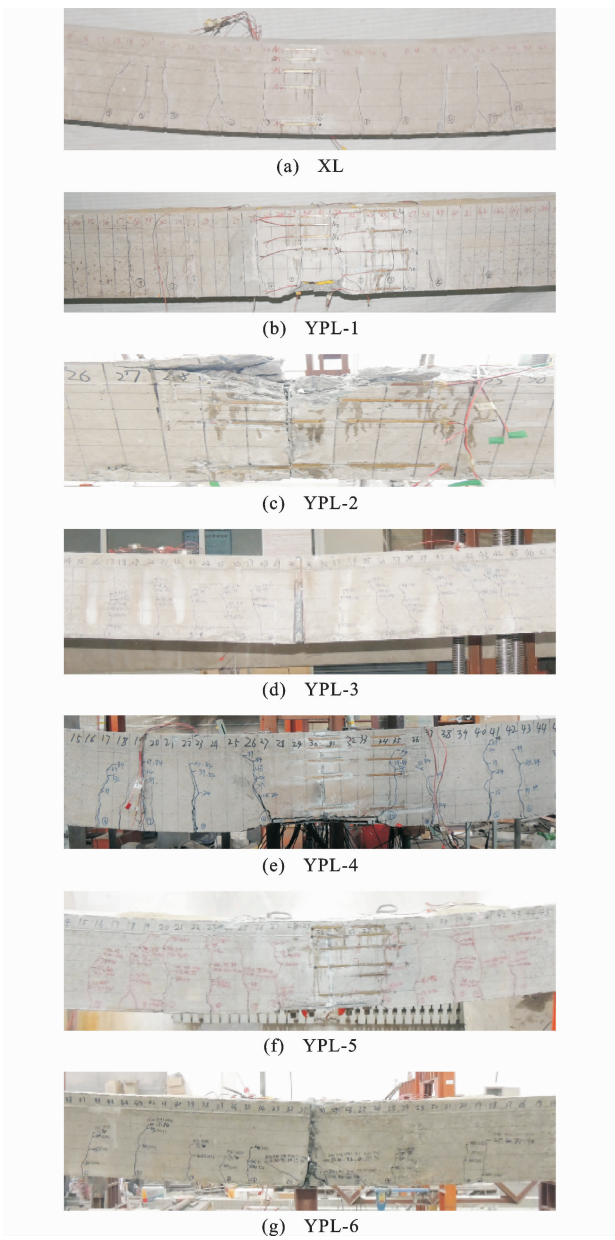


图 2 试验梁破坏形态

Fig. 2 Failure Modes of Test Beams

表 3 试验梁承载力

Tab. 3 Bearing Capacities of Test Beams

试验梁编号	开裂荷载 P_{cr}/kN	屈服荷载 P_y/kN	极限荷载 P_u/kN
XL	18	90	108
YPL-1	15	75	90
YPL-2	15	75	96
YPL-3	15		102
YPL-4	18	96	114
YPL-5	18	96	114
YPL-6	15	75	90

高 7%, 极限承载力提高 6%, 主要原因是控制截面处配筋率与试验梁 XL 相同, 且钢板限制了钢板上

表 4 试验梁正截面受弯承载力对比

Tab. 4 Comparisons of Normal Section Bending Bearing Capacities of Test Beams

试验梁编号	P_{cr}/P_{cr}^x	P_y/P_y^x	P_u/P_u^x
XL	1.00	1.00	1.00
YPL-1	0.83	0.83	0.83
YPL-2	0.83	0.83	0.89
YPL-3	0.83		0.94
YPL-4	1.00	1.07	1.06
YPL-5	1.00	1.07	1.06
YPL-6	0.83	0.83	0.83

注： P_{cr}^x 为试验梁 XL 开裂荷载； P_y^x 为试验梁 XL 屈服荷载； P_u^x 为试验梁 XL 极限荷载。

部混凝土裂缝的开展,增加了试验梁整体刚度。

3.2 试验梁变形

由布置在跨中的位移传感器可测得各试验梁加载过程中的变形曲线,如图 3 所示。参考现有规范中对钢筋混凝土梁挠度的计算方法,计算在正常使用阶段下各试验梁的挠度。正常使用荷载约为设计荷载的 80%,取 $\sigma_{sq}=0.8f_y$ (σ_{sq} 为荷载准永久组合下钢筋混凝土构件受拉区纵向普通钢筋应力),并取对应弯矩 M_{sq} 为

$$M_{sq}=0.87h_0A_s\sigma_{sq}$$

式中： h_0 为截面有效高度； A_s 为受拉区纵向普通钢筋的截面面积。

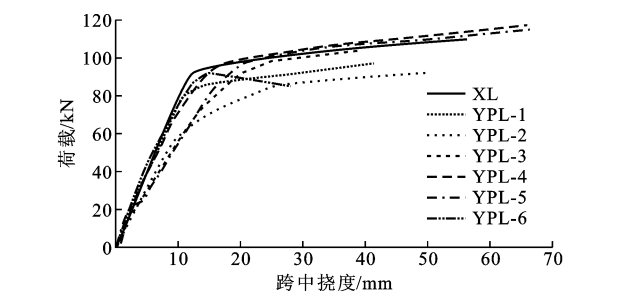


图 3 试验梁跨中挠度实测值

Fig. 3 Measured Values of Mid-span Deflections of Test Beams

试验梁挠度计算值与实测值如表 5 所示。由表 5 可以看出:由于预制拼接干式节点的存在,在一定程度上削弱了控制截面处的抗弯刚度。因此,与现浇混凝土试验梁 XL 相比,预制装配式混凝土试验梁在加载过程中跨中变形都有不同程度的增大,但仍满足《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010) (以下简称《规范》)中对混凝土简支梁的挠度限值要求。

3.3 平截面假定的验证

由位于沿梁高方向粘贴的混凝土应变片可测得

表 5 试验梁挠度

Tab. 5 Deflections of Test Beams

试验梁编号	v_c/mm	v_t/mm	v_t/v_t^x	v_c/v_t	v_{lim}/mm
XL	7.91	9.48	1.00	0.83	15
YPL-1	7.91	9.91	1.05	0.80	15
YPL-2	6.39	17.60	1.86	0.36	15
YPL-3	7.91	14.16	1.49	0.56	15
YPL-4	3.99	10.75	1.13	0.37	15
YPL-5	3.99	13.74	1.45	0.29	15
YPL-6	5.34	9.83	1.04	0.54	15

注： v_c 为挠度计算值； v_t 为挠度实测值； v_t^x 为试验梁 XL 挠度实测值； v_{lim} 为受弯构件挠度限值。

沿梁高的混凝土应变,如图 4 所示。

由图 4 可以看出:试验梁 XL, YPL-1, YPL-4, YPL-5 在受力过程中沿截面高度方向的混凝土应变基本符合平截面假定,说明试验梁采用上述拼接方式整体工作性能较好;其余试验梁在干节点拼接处测得的沿截面高度方向的混凝土应变与平截面假定有较大差距,说明拼接处刚度削弱较大,整体工作性能不佳,但是由于有钢板对截面进行加强,因而承载力并未降低。第 2 组预制段应变片测得的混凝土应变基本符合平截面假定,这表明在拼接节点的相邻截面,钢筋与混凝土仍保持了较好的协同工作性能。

3.4 最大裂缝宽度验算

图 5 为 6 根试验梁一侧的裂缝分布。由图 5 可以看出:试验梁的裂缝分布主要集中在 2 个加载点之间的区域内,裂缝间距比较均匀,弯剪区段也有斜裂缝,但裂缝数量少。

由于试验梁 YPL-2 在预应力钢绞线张拉过程中环氧树脂胶已经开裂,所以加载时裂缝在拼接面发展迅速,而预制段混凝土裂缝出现极少,且高度、宽度很小,故此处没有列出试验梁 YPL-2 的裂缝分布。

利用《规范》中的最大裂缝宽度计算方法对各试验梁的最大裂缝宽度进行验算,结果如表 6 所示。由表 6 可以看出:利用钢板对焊连接、钢板盖板焊接连接和钢板螺栓连接的试验梁,其最大裂缝宽度能够满足《规范》中一类环境最大裂缝宽度 0.3 mm 的限值要求,而其他连接方式制作而成的试验梁其最大裂缝宽度超出限值要求。

4 结 语

(1)采用钢板焊接连接和螺栓连接的干节点装配式混凝土梁,钢板限制了跨中混凝土裂缝的开展,

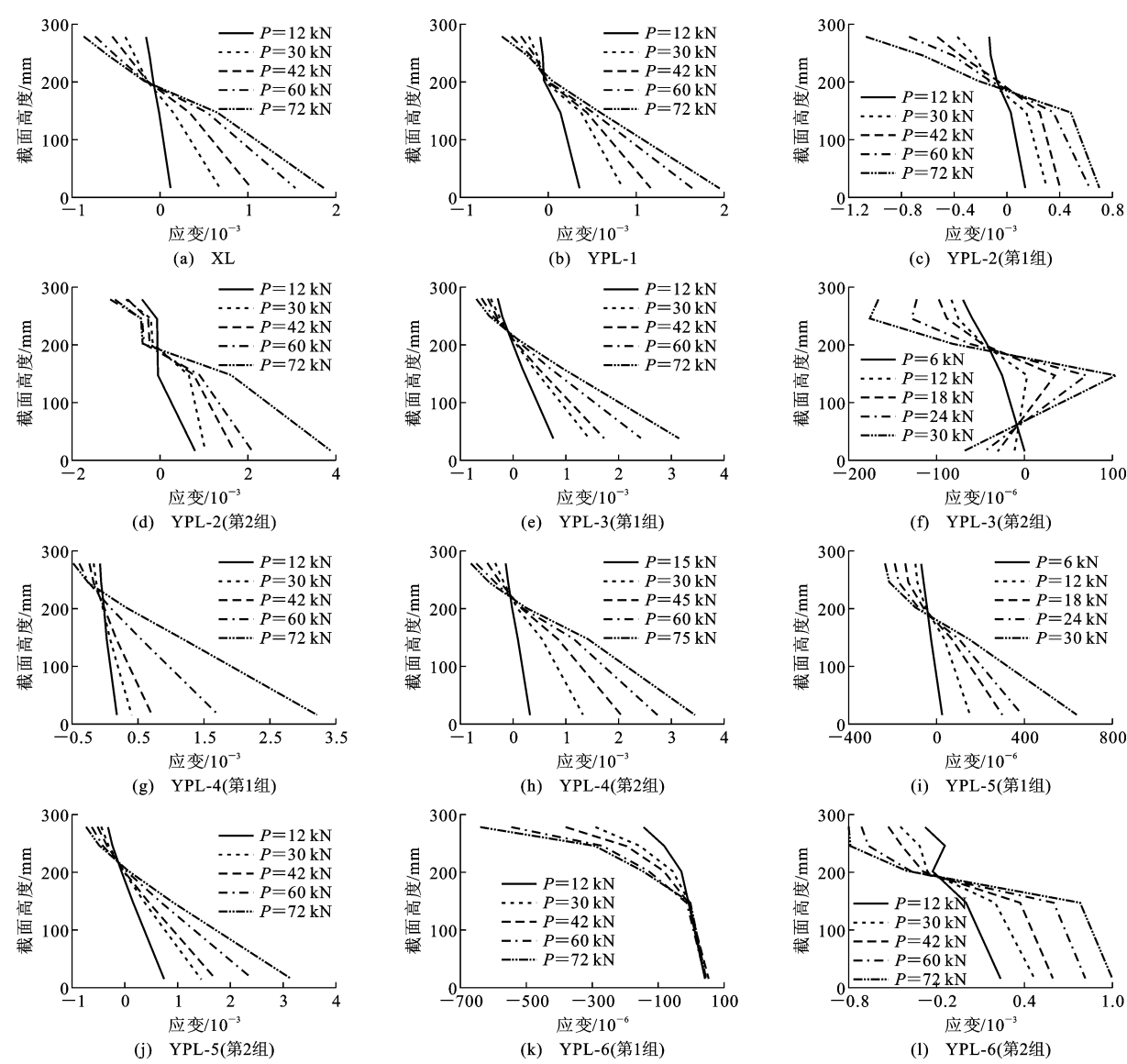


图 4 试验梁混凝土应变分布

Fig. 4 Concrete Strain Distributions of Test Beams

表 6 试验梁裂缝计算结果

Tab. 6 Calculation Results of Cracks of Test Beams

试验梁编号	l_c/mm	l_t/mm	l_t/l_t^x	l_c/l_t	w_{\max}^c/mm	w_{\max}^t/mm	$w_{\max}^t/w_{\max}^{t_x}$	w_{\max}^c/w_{\max}^t
XL	137.90	135.20	1.00	1.02	0.28	0.26	1.00	1.08
YPL-1	137.90	127.30	0.94	1.08	0.36	0.34	1.31	1.06
YPL-3	137.90	152.30	1.13	0.91	0.17	0.26	1.00	0.65
YPL-4	96.09	185.60	1.37	0.52	0.20	0.28	1.08	0.71
YPL-5	96.09	140.90	1.04	0.68	0.22	0.28	1.08	0.79
YPL-6	95.60	175.40	1.30	0.55	0.28	0.32	1.23	0.88

注： l_c 为平均裂缝间距计算值； l_t 为平均裂缝间距实测值； l_t^x 为试验梁 XL 平均裂缝间距实测值； w_{\max}^c 为最大裂缝宽度计算值； w_{\max}^t 为最大裂缝宽度实测值； $w_{\max}^{t_x}$ 为试验梁 XL 最大裂缝宽度实测值。

与现浇混凝土梁相比,承载力有所提高;采用湿节点连接、预应力连接、钢板锚栓连接、植筋连接的混凝土梁环氧树脂胶裂缝、钢板与混凝土黏结裂缝均比混凝土裂缝发展迅速,故承载力有不同程度降低。

(2)采用钢板焊接连接和螺栓连接的干节点装配式混凝土梁控制截面具有较好的刚度,而其他 4 种节点连接的装配式混凝土梁刚度相对于现浇梁刚度略低,但最大挠度均能满足《规范》要求。

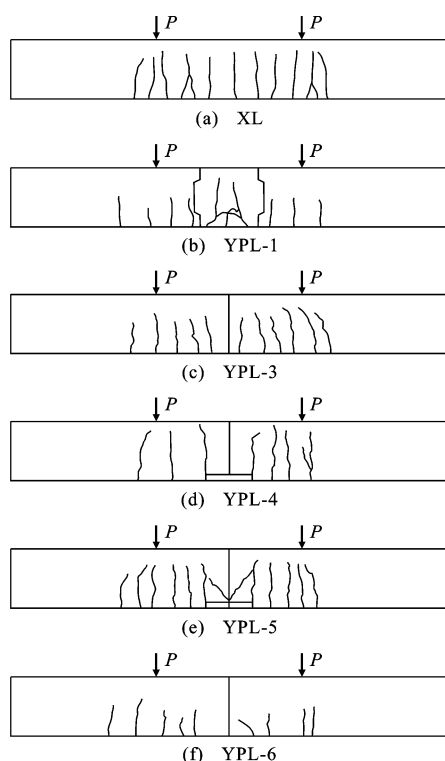


图5 试验梁裂缝分布

Fig. 5 Crack Distributions of Test Beams

(3)采用湿节点连接、钢板焊接连接和螺栓连接的装配式混凝土梁整体工作性能较好,符合平截面假定,其余试验梁跨中拼接处不符合平截面假定,整体工作性能不佳。

(4)在试验梁最大裂缝宽度验算时,钢板对焊连接、钢板盖板焊接连接和螺栓连接的干节点装配式混凝土梁最大裂缝宽度能够满足《规范》的限值要求,其余试验梁最大裂缝宽度超出限值要求。

参考文献:

References:

- [1] EI-SHEIKH M T, SAUSE R, PESSIKI S, et al. Seismic Behavior and Design of Unbonded Post-tensioned Precast Concrete Frames[J]. PCI Journal, 1999, 44(3):54-71.
- [2] RESTREPO J I, PARK R, BUCHANAN A H, et al. Tests on Connections of Earthquake Resisting Precast Reinforced Concrete Perimeter Frames of Buildings[J]. PCI Journal, 1995, 40(4):44-61.
- [3] KHOO J H, LI B, YIP W K. Tests on Precast Concrete Frames with Connections Constructed Away from Column Faces[J]. ACI Structural Journal, 2006, 103(1):18-27.
- [4] OZTURAN T, OZDEN S, ERTAS O. Ductile Connections in Precast Concrete Moment Resisting Frames

[J]. PCI Journal, 2006, 51(3):66-76.

- [5] EN 1992-1-1: 2002, Eurocode2: Design of Concrete Structures — Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings[S].
- [6] NEHPR, Recommended Provisions for the Development of Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures[S].
- [7] 黄祥海. 新型全预制装配式混凝土框架节点的研究[D]. 南京:东南大学, 2006.
HUANG Xiang-hai. Research on the New-style Joints of Precast Concrete Frame Structure [D]. Nanjing: Southeast University, 2006.
- [8] 程 蓓, 苗小燕, 徐建伟. 一种新型装配式混凝土框架结构连接节点试验研究[J]. 工业建筑, 2015, 45(12): 94-98, 199.
CHENG Bei, MIAO Xiao-yan, XU Jian-wei. Experimental Study on a New Type of Column-to-beam Joints in Assembled Reinforced Concrete Frame Structures[J]. Industrial Construction, 2015, 45(12): 94-98, 199.
- [9] 吴从晓, 周 云, 赖伟山, 等. 现浇与预制装配式混凝土框架节点抗震性能试验[J]. 建筑科学与工程学报, 2015, 32(3):60-66.
WU Cong-xiao, ZHOU Yun, LAI Wei-shan, et al. Experiment on Seismic Performance of Cast-in-situ and Prefabricated Concrete Frame Structure Joints[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2015, 32(3):60-66.
- [10] 周天华, 管 宇, 吴函恒, 等. 钢框架-预制混凝土抗侧力墙装配式结构竖向受力性能研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(9):27-34.
ZHOU Tian-hua, GUAN Yu, WU Han-heng, et al. Research on Vertical Mechanical Behavior of Steel Frame-prefabricated Concrete Lateral Resistance Wall Fabricated Structure[J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(9):27-34.
- [11] 高 杰, 田春雨, 郝 玮, 等. 装配式梁-柱-叠合楼板中节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(增2):196-202.
GAO Jie, TIAN Chun-yu, HAO Wei, et al. Experimental Study on Seismic Behavior of Precast Concrete Layered Slab and Beam to Column Interior Joints[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(S2):196-202.
- [12] 曹 杨, 孙千伟, 宫文军, 等. 新型装配式混凝土框架型钢节点试验[J]. 建筑科学与工程学报, 2016, 33(2):15-23.
CAO Yang, SUN Qian-wei, GONG Wen-jun, et al.

- Experiment on New Section Steel Joints for Prefabricated Concrete Frame[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2016, 33(2): 15-23.
- [13] 闫维明, 王文明, 陈适才, 等. 装配式预制混凝土梁-柱-叠合板边节点抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(12): 56-61.
YAN Wei-ming, WANG Wen-ming, CHEN Shi-cai, et al. Experimental Study of the Seismic Behavior of Precast Concrete Layered Slab and Beam to Column Exterior Joints[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(12): 56-61.
- [14] 颜 锋, 田春雨, 郝 玮, 等. 预制梁端与后浇混凝土结合面抗剪性能试验研究[J]. 建筑结构, 2016, 46(10): 74-79.
YAN Feng, TIAN Chun-yu, HAO Wei, et al. Experimental Study on Shear Performance of Joint Surface Between Precast Beam End and Post-cast Concrete[J]. Building Structure, 2016, 46(10): 74-79.
- [15] 吕西林, 范 力, 赵 斌. 装配式预制混凝土框架结构缩尺模型拟动力试验研究[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(4): 58-65.
LU Xi-lin, FAN Li, ZHAO Bin. Pseudodynamic Test on a Reduced Scale Jointed Precast Concrete Frame Structure[J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(4): 58-65.
- [16] 王亚超, 李俊峰, 蒋世林, 等. 装配式混凝土结构设计关键连接技术研究[J]. 建筑结构, 2016, 46(10): 91-94, 106.
WANG Ya-chao, LI Jun-feng, JIANG Shi-lin, et al. Research on Key Connection Techniques of Precast Concrete Structure Design[J]. Building Structure, 2016, 46(10): 91-94, 106.
- [17] 种 迅, 孟少平, 潘其健. 后张预应力预制混凝土框架梁柱节点抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(12): 38-44.
CHONG Xun, MENG Shao-ping, PAN Qi-jian. Experimental Study on Seismic Performance of Post-tensioned Prestressed Precast Concrete Beam-column Assemblages[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(12): 38-44.
- [18] 柳炳康, 黄慎江, 宋满荣, 等. 预压装配式预应力混凝土框架抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(11): 1-8.
LIU Bing-kang, HUANG Shen-jiang, SONG Man-rong, et al. Experimental Study of Seismic Performance of Prestressed Fabricated PC Frames[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(11): 1-8.
- [19] 黄慎江, 周新潮, 袁忠伟. 基于不同预应力度度的半刚性节点预压装配式预应力混凝土框架静力弹塑性分析[J]. 工业建筑, 2016, 46(3): 61-66.
HUANG Shen-jiang, ZHOU Xin-chao, YUAN Zhong-wei. Pushover Analysis of the Prestressed Assembly PC Framework with Semirigid Joints Based on Different Partial Prestressing Ratios[J]. Industrial Construction, 2016, 46(3): 61-66.
- [20] 薛伟辰, 杨新磊, 王 蕴, 等. 现浇柱叠合梁框架节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(6): 9-17.
XUE Wei-chen, YANG Xin-lei, WANG Yun, et al. Experimental Study on Seismic Behavior of Different Type of Frame Connections with Composite Beams and Cast-in-place Columns[J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(6): 9-17.
- [21] 李 楠, 张季超, 楚先锋, 等. 预制混凝土结构后浇整体式梁柱节点抗震性能试验研究[J]. 工程力学, 2009, 26(增 1): 41-44.
LI Nan, ZHANG Ji-chao, CHU Xian-feng, et al. Experimental Study on Seismic Behavior of Pre-cast Concrete Beam-column Sub-assembly with Cast-in-situ Monolithic Joint[J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(S1): 41-44.
- [22] 黄 远, 张 锐, 朱正庚, 等. 现浇柱预制梁混凝土框架结构抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(1): 44-50.
HUANG Yuan, ZHANG Rui, ZHU Zheng-geng, et al. Experimental Study on Seismic Performance of Frame with Precast Beams and Cast-in-place Columns[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(1): 44-50.