

干节点 PPC 连续梁力学性能试验及有限元研究

程东辉,任曼妮,刘 芬

(东北林业大学土木工程学院,黑龙江 哈尔滨 150040)

摘 要 目的 研究预制装配式混凝土连续梁的力学性能,探索连续梁新型节点力学性能. 方法 设计并制作了4根混凝土连续梁,4根连续梁均采用分段预制,分别由预埋钢板+钢盖板焊接和预埋钢板+钢盖板螺栓的干式连接方式连接而成. 通过对连续梁每跨进行三分点静载试验,得到试验梁承载力、裂缝分布和变形等实验数据. 基于实测数据,利用 ABAQUS 建立了21根装配式连续梁的有限元模型并对其塑性性能进行了分析. 结果 结果表明:在配筋条件相同的情况下,预埋钢板+钢盖板焊接节点试验梁比预埋钢板+钢盖板螺栓节点试验梁的承载力高,并且节点连接方式对预制装配式混凝土连续梁的受弯破坏形态没有影响;采用无粘结预应力配筋的试验梁,可显著改善预制装配式混凝土连续梁的受力性能. 由有限元分析结果可知:在相同配筋情况下,预制装配式预应力混凝土连续梁的弯矩调幅系数小于整浇预应力混凝土连续梁;预埋钢板+钢盖板焊接节点连接的装配式预应力混凝土连续梁的弯矩调幅系数比预埋钢板+钢盖板螺栓节点连接的装配式预应力混凝土连续梁略小. 结论 干节点预制预应力混凝土连续梁有良好的力学性能,能够满足承载力与节点塑性性能要求.

关键词 装配式混凝土;节点连接方式;连续梁;ABAQUS 分析;塑性内力重分布

中图分类号 TU37

文献标志码 A

Mechanical Performances Experiment and Finite Element Analysis of Dry Joint of PPC Continuous Beams

CHENG Donghui, REN Manni, LIU Fen

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

Abstract: In order to study the mechanical properties of the precast reinforced concrete continuous beams, four two-span continuous beams are designed and each span was precast separately. Two types of connections are used. The embedded plates at the joints are connected either by welding or

收稿日期:2018-04-26

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基金项目(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,教授,博士,主要从事混凝土结构与预应力混凝土结构方面研究.

by bolts. A static loading test with two-point loading types is carried out. The test result such as flexural, crack distribution and deformation are obtained. The finite element analysis of the plastic behavior of 21 continuous beams are carried out by using ABAQUS. The results show that: the bearing capacities of precast reinforced concrete continuous beams in the form of welded connection are higher than that of bolted connection under the same reinforcement condition. Failure mode is not related to the different connection types. The unbonded prestressed reinforcement can significantly improve the mechanical performance of precast continuous beam. The results of finite element analysis indicated that moment modification coefficient of precast prestressed concrete continuous beam is smaller than of cast-in-place continuous beam under the same reinforcement conditions. The moment modification coefficient of continuous beam with bolted connection is larger than that of continuous beam with welded connection. Precast prestressed concrete continuous beams with dry joints have satisfying mechanical properties. The equation to calculate the moment modification coefficient is proposed, which involves the comprehensive reinforcement ratio of the middle supporting as an independent variable.

Key words: precast concrete structure; connection mode; continuous beam; ABAQUS analysis; plastic internal force redistribution

预制装配式混凝土结构(Prefabricated Concrete Structure, PC 结构)的主要构件在工厂预制完成、在现场装配并以可靠方式连接而成。与现浇混凝土结构相比,装配式混凝土结构具有构件质量可靠、节材环保、施工效率高、现场湿作业少和节约劳动力等特点^[1-9]。我国现阶段建筑行业面临劳动力短缺、环境污染严重等问题。因此,PC 结构对我国建筑工业化发展、提高生产效率和节约能源有重大意义。

PC 结构中预制构件的连接节点是影响结构整体性的关键。根据连接方式的不同,PC 结构的连接节点可以分为“湿”连接节点和“干”连接节点两种方式。“湿”连接是预制构件之间利用现浇混凝土等方式结合成整体。由于这种连接需要现场支模、浇筑混凝土以及混凝土养护等工序,在一定程度上阻碍了 PC 结构的发展与应用。“干”连接是在施工现场通过预应力筋、预埋件、螺栓及拉杆等将预制构件连接成一体方式。PC 结构的干式连接具有施工速度快、湿作业少、节约材料等优势,在美国等国家应用比较广泛。国内外也有很多科研机构及学者对装配式混凝土干式连接节点的形式及性能做了一定的研

究^[10-17]。曹杨等^[18]设计了3类(工字型钢、双腹板工字型钢、组合角钢)型钢连接的预制装配式混凝土梁柱节点,并开展了拟静力试验研究,结果表明:与现浇混凝土节点相比,采用工字型钢连接节点和组合角钢连接节点的节点承载力显著提高,而采用双腹板工字型钢连接节点的节点承载力略有降低。黄祥海等^[19]对预制装配式混凝土框架连续梁结构的各种干式节点连接方式进行了探索,并提出有关新型全预制装配式混凝土节点的设想。杨晓波等^[20]对两层两跨预制装配式预应力混凝土框架连续梁做了拟静力及拟动力加载试验,试验结论为该类结构在连续梁的拼接节点处具有良好的转动能力及延性。

综合当前研究结果,干节点连接应用于连续梁的研究尚属空白。基于此,笔者设计了两种预制装配式混凝土梁干式节点,并对其施加预应力,形成预制预应力装配式混凝土连续梁(Prefabricated Prestressed Concrete Continuous Beam, PPC 连续梁),对连续梁进行静力加载,得到不同连接节点形式下试验梁的承载力、裂缝分布变形,以此为基础并结合有限元数值分析,开展了这类构件的力学

性能研究.

1 试验设计

1.1 试验梁设计

设计制作了 4 根两跨连续梁,计算跨度为 3.9 m,连续梁总长度为 8 m,连接节点位于中支座处.

节点采用钢板连接:在预制段端部(连接节点处)的梁顶和梁底分别预埋钢板,然后利用连接钢板将两侧的预埋钢板连接.连接钢板与预埋钢板的连接方式有两种:分别是螺栓连接节点(Bolted Connection, BC节点)和焊接连接节点(Welded Connection, WC节点).为了考察预应力对这两种连接方

式的影响,试验中基于上述两种连接方式设计制作了两根无粘结预应力装配式混凝土连续梁,梁中分别设置直径为 15.2 mm、抗拉强度标准值均为 1 860 MPa 的钢绞线. 四根装配式混凝土连续梁在连接处除了利用连接钢板进行连接外,还在拼接处利用环氧树脂胶灌缝.

4 根试验梁截面尺寸 200 mm × 300 mm, 混凝土强度等级 C40, 普通纵向受力钢筋强度等级 HRB400, 箍筋强度等级 HPB300, 无粘结预应力钢绞线按标准二次抛物线布置。各试验梁连接方式、尺寸、配筋等参数如图 1、2 所示。试验前对各材料进行力学性能测试, 结果如表 1 所示。

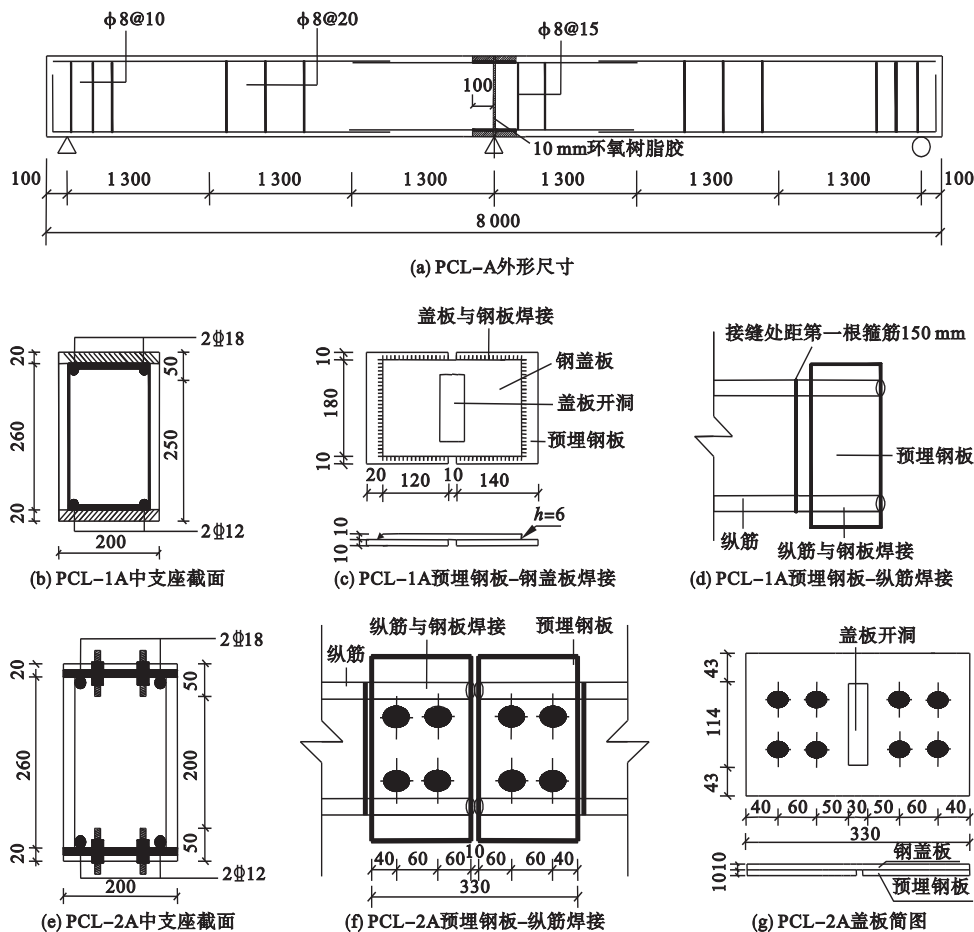


图1 试验梁 PCL-A 配筋详图

Fig. 1 The failure mode of the PCL-A test beam

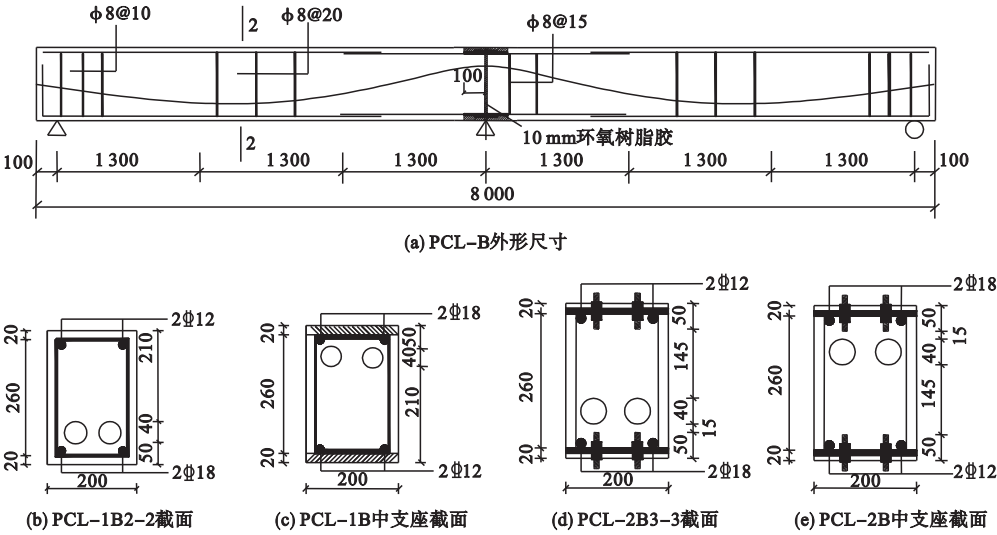


图 2 试验梁 PCL-B 配筋详图

Fig. 2 The failure mode of the PCL-B test beam

表 1 材料性能

Table 1 The material properties

混凝土		钢筋		钢绞线	
f_{cu}/MPa	E_c/MPa	d/mm	f_y/MPa	d/mm	f_{py}/MPa
40.6	3.2×10^4	18	446	15.2	1842

注: f_{cu} 为混凝土立方体轴心抗压强度; E_c 为混凝土的弹性模量; f_y 为钢筋抗拉强度实测值; f_{py} 为钢绞线抗拉强度实测值。

试验梁按以下工艺流程制作:

钢筋绑扎、波纹管定位→浇筑预制梁段→预制梁段就位→在预制梁段穿预应力钢筋→节点连接(接缝灌胶)→预应力筋张拉至 1395 MPa 后锚固。

1.2 加载及测量方案

利用千斤顶对试验梁进行两点加载。初期加载采用荷载控制,每级加载 3 kN;当纵向受拉钢筋屈服后,加载转为由跨中截面挠

度控制,每级加载 5 mm,直至跨中受压区混凝土达到极限压应变或试验梁出现挠度持续增大而荷载持续降低现象,表明试验梁达到承载力极限状态。

为了采集试验数据,在中支座控制截面处和跨中控制截面处的普通纵向受拉钢筋表面粘贴应变片,用以测量在试验过程中钢筋应力变化状况;在中支座处和跨中控制截面处沿梁截面高度方向粘贴混凝土应变片,用以监测沿梁截面高度方向混凝土应变分布;在无粘结预应力钢绞线表面粘贴 5 片应变片,以测量钢绞线的应力变化。为测量试验梁加载过程中的变形,在各支座处及跨中控制截面处设置了位移传感器。试验梁的无粘结预应力钢筋布置、加载及量测方案见图 3。

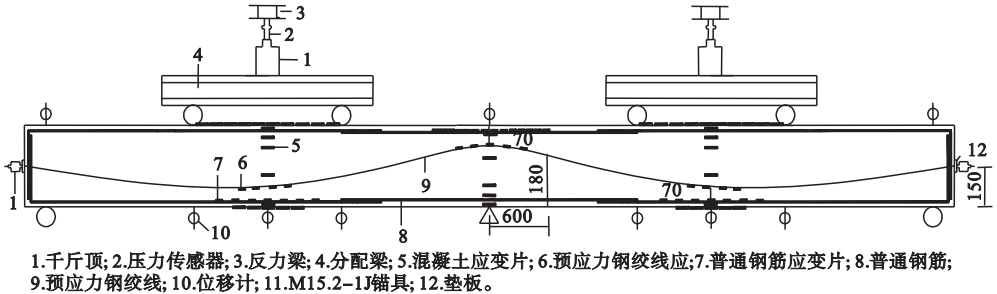


图 3 预应力钢筋布置及加载量测简图

Fig. 3 Prestressed steel arrangement and equipment of load measurement

2 试验现象

试验过程中,随着荷载的增加,PCL - 1A 和 PCL - 2A 梁的受力状态和破坏形式比较相近.两根试验梁的混凝土开裂均出现在中支座受拉区,随着荷载的增加,跨中受拉区混凝土出现裂缝;当加至大约 0.2 倍极限荷载时,中支座拼接处环氧树脂胶开裂;继续加载至 0.68 倍极限荷载时,中支座负弯矩区纵向受拉钢筋屈服、中支座处焊接钢盖板开始向上翘曲,此时试验梁仍能继续受荷;加载至两跨跨中纵向受拉钢筋屈服,试件梁的变形

显著增大.达到极限荷载时,中支座处纵向受拉钢筋被拉断,试验梁宣告破坏.

对试验梁 PCL - 1B 和 PCL - 2B 进行加载,中支座负弯矩区域混凝土及右跨加载点下边缘处混凝土先后开裂;随着荷载的增加,裂缝数量不断增多,加载至 0.7 倍极限荷载时,中支座处纵向受拉普通钢筋首先屈服,临近破坏时,跨中纵向受拉普通钢筋屈服,试验梁加载点处受压区混凝土被压碎,中支座拼接处钢盖板略微翘曲,试验梁宣告破坏,此时预应力钢筋未屈服.各试验梁破坏形态如图 4 所示.

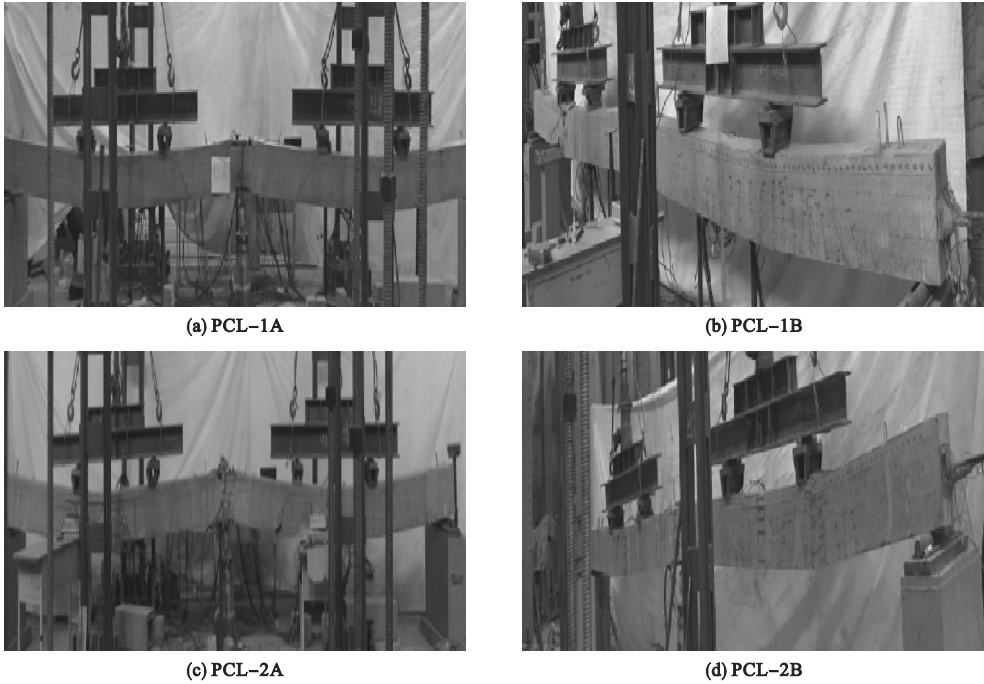


图 4 试验梁破坏形态
Fig. 4 The failure mode of test beam

3 试验结果分析

3.1 承载力分析

由试验过程中布置的荷载传感器可测得试验梁在各阶段的荷载特征值,如表 2 所示.由表 2 实测数据可知;当截面配筋相同时,采用不同形式的连接节点,试验梁加载过程中特征荷载的实测值是不同的.采用 WC 节点试验梁实测的中支座纵向受力钢筋屈服

表 2 试验梁特征荷载实测值

Table 2 Characteristic measured value of test beams

编号	P_{cr}^t/kN	$P_{y中}^t/\text{kN}$	$P_{y跨}^t/\text{kN}$	P_u^t/kN
PCI - 1A	15	93	129	142
PCL - 1B	51	195	210	275
PCL - 2A	15	87	111	127
PCL - 2B	51	174	204	257

注: P_{cr}^t 为开裂荷载实测值; $P_{y中}^t$ 为中支座普通纵向受力钢筋屈服时刻荷载实测值; $P_{y跨}^t$ 为跨中普通纵向受力钢筋屈服时刻荷载实测值; P_u^t 为试验梁达到承载力极限状态时刻的极限荷载实测值.

荷载、跨中受拉区纵向受力钢筋屈服荷载、试验梁极限荷载均在不同程度上高于 BC 节点连接方式的试验梁实测荷载. 这主要由于采用 BC 节点连接的试验梁在加载后期连接螺栓有一定的滑移使得中支座节点变为半刚性连接节点, 跨中弯矩增大, 较 WC 节点承载力有所降低.

3.2 裂缝分布

图 5 给出了 4 根试验梁裂缝分布图. 由图可以看出: 连续梁的裂缝都是始于中支座处的混凝土受拉区, 随着荷载的增加, 在跨中

部分逐渐出现更多裂缝, 弯剪区的裂缝逐渐指向加载点; 由于节点连接处的预埋钢板对裂缝开展和延伸有一定的影响, 中支座负弯矩区裂缝形态为弯曲斜裂缝; 对于采用无粘结预应力配筋的试验梁 PCL-1B 和 PCL-2B, 由于预应力钢筋的预压作用, 混凝土裂缝出现时间较晚, 同等荷载作用下裂缝宽度小, 裂缝高度发展缓慢. 同时可以看出, 节点连接方式对裂缝的分布形态、裂缝宽度及高度影响不大.

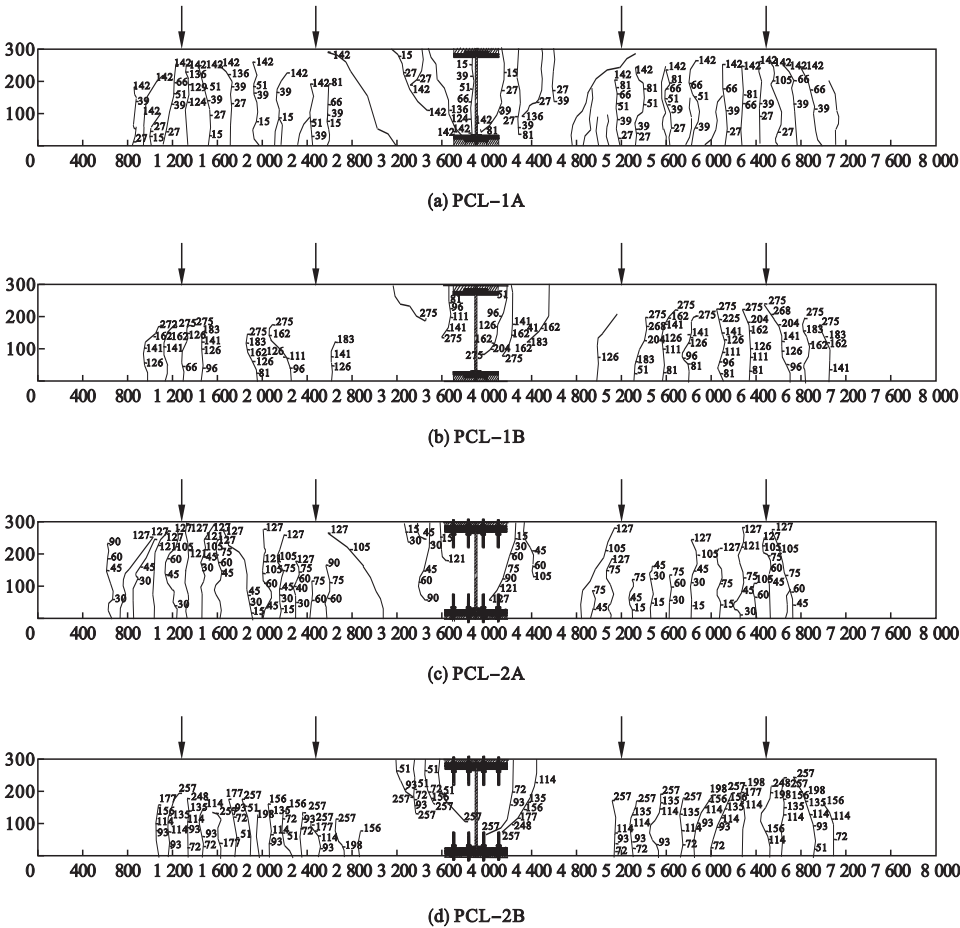


图 5 试验梁裂缝分布图

Fig. 5 The crack distribution of the test beam

3.3 挠度分析

图 6 给出了 4 根试验梁加载过程中荷载-挠度实测曲线. 由图 6 可以看出: 由于预制装配式混凝土先天存在的施工裂缝, 使构件中混凝土开裂对挠度曲线未有显著影

响; 此外, 在同级荷载作用下 WC 节点试验梁的挠度变形明显小于 BC 节点连接试验梁的挠度变形值. 说明采用 WC 节点连接的装配式混凝土连续梁节点刚度较好.

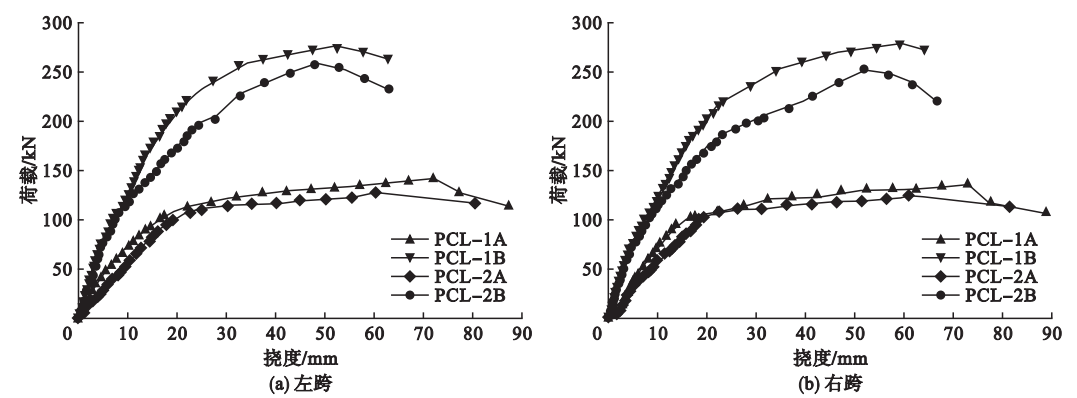


图6 试验梁跨中挠度实测值

Fig. 6 Measured value of the mid-span deflection of the test beam

4 干式节点预制预应力混凝土连续梁力学性能非线性分析

4.1 模型建立

为了进一步开展装配式预应力混凝土连续梁力学性能尤其是塑性性能的研究,以4根试验梁实测数据为基础,基于有限元软件ABAQUS,对4根试验梁进行有限元力学性能分析.分析模型中混凝土采用实体单元C3D8R,普通钢筋和预应力钢绞线均采用桁

架单元 T3D2,并采用 embedded 命令嵌入混凝土.混凝土与胶层采用面面接触,对于 WC 连接节点,选择 Tie 模拟预埋钢板与混凝土及钢盖板与预埋钢板的连接.对于 BC 连接节点,钢盖板与预埋件、钢盖板与螺栓、预埋件与螺栓采用面面接触,并用 Fasteners 对螺栓施加预紧力.

图7为跨中挠度试验值与有限元实测值对比.

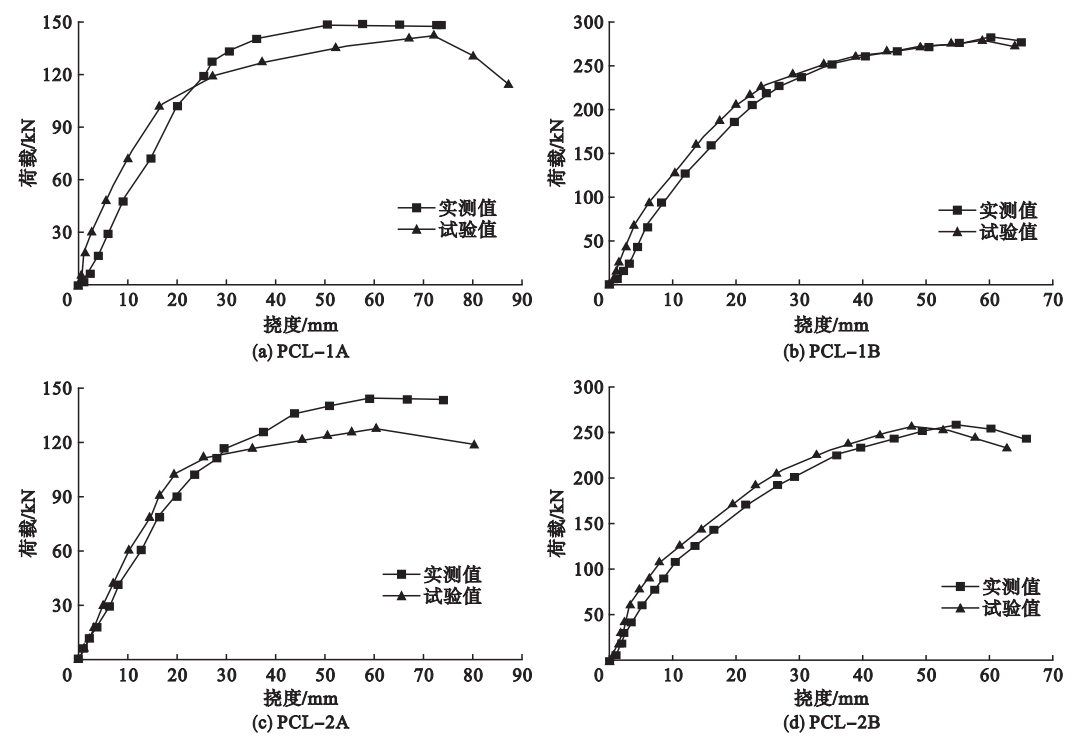


图7 跨中挠度试验值与有限元实测值对比

Fig. 7 The comparison between test value and measured value of the mid-span deflection

从图7中可以看出,有限元分析结果与实验结果吻合较好.在此基础上以跨高比、混凝土强度、预应力度及综合配筋指标为参数,

设计了21根模型梁,对WC节点和BC节点的预制装配式预应力混凝土连续梁进行有限元分析.相关参数见表3.

表3 模型梁参数表

Table 3 The parameter of model beams

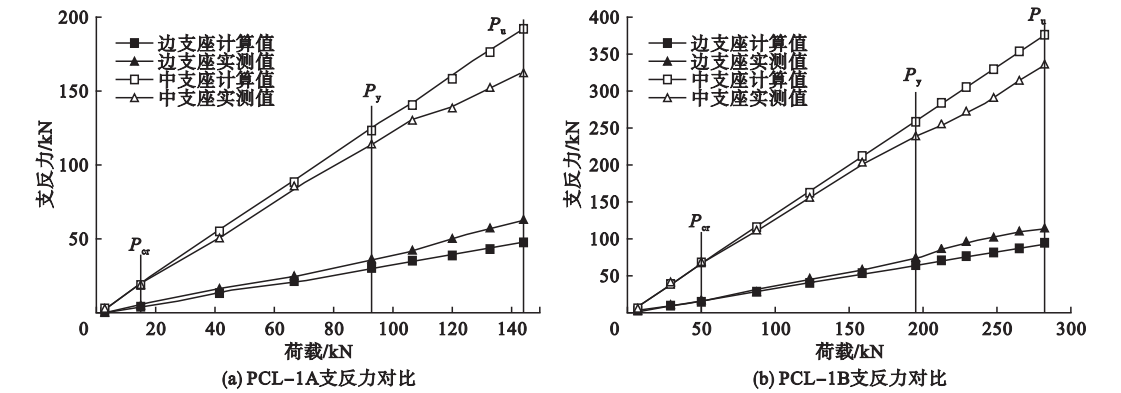
模型梁编号	f_c/MPa	f_y/MPa		f_p/MPa	l_0/mm	λ	ξ	l_0/h
		跨中	中支座					
ZJL	19.1	2Φ18	2Φ18	1Φ ^s 15.2	3 900	0.52	0.43	13
PCL-1A	19.1	2Φ18	2Φ18	—	3 900	0.00	0.21	13
PCL-1B	19.1	2Φ18	2Φ18	2Φ ^s 15.2	3 900	0.68	0.65	13
PCL-1C	19.1	2Φ18	2Φ18	1Φ ^s 15.2	3 900	0.52	0.43	13
PCL-1D	19.1	2Φ18	2Φ18	1Φ ^s 15.2	3 000	0.52	0.43	10
PCL-1E	19.1	2Φ18	2Φ18	1Φ ^s 15.2	4 800	0.52	0.43	16
PCL-1F	19.1	2Φ18	2Φ20	1Φ ^s 15.2	3 900	0.46	0.48	13
PCL-1G	19.1	2Φ20	2Φ22	1Φ ^s 15.2	3 900	0.42	0.53	13
PCL-1H	19.1	2Φ14	2Φ16	1Φ ^s 15.2	3 900	0.57	0.39	13
PCL-1I	16.7	2Φ18	2Φ18	1Φ ^s 15.2	3 900	0.52	0.49	13
PCL-1J	23.1	2Φ18	2Φ18	1Φ ^s 15.2	3 900	0.52	0.36	13
PCL-2A	19.1	2Φ18	2Φ18	—	3 900	0.00	0.21	13
PCL-2B	19.1	2Φ18	2Φ18	2Φ ^s 15.2	3 900	0.68	0.65	13
PCL-2C	19.1	2Φ18	2Φ18	1Φ ^s 15.2	3 900	0.52	0.43	13
PCL-2D	19.1	2Φ18	2Φ18	1Φ ^s 15.2	3 000	0.52	0.43	10
PCL-2E	19.1	2Φ18	2Φ18	1Φ ^s 15.2	4 800	0.52	0.43	16
PCL-2F	19.1	2Φ18	2Φ20	1Φ ^s 15.2	3 900	0.46	0.48	13
PCL-2G	19.1	2Φ20	2Φ22	1Φ ^s 15.2	3 900	0.42	0.53	13
PCL-2H	19.1	2Φ14	2Φ16	1Φ ^s 15.2	3 900	0.57	0.39	13
PCL-2I	16.7	2Φ18	2Φ18	1Φ ^s 15.2	3 900	0.52	0.49	13
PCL-2J	23.1	2Φ18	2Φ18	1Φ ^s 15.2	3 900	0.52	0.36	13

注:PCL-1*i*为不同参数下的WC节点的装配式混凝土连续梁;PCL-2*i*为不同参数下的BC节点的装配式混凝土连续梁;ZJL为整浇预应力混凝土连续梁; l_0 为计算跨度; λ 为预应力度; ξ 为综合配筋指标; $\xi = \frac{\sigma_{pe}A_p + f_yA_s}{f_cbh_p}$; l_0/h 为跨高.

4.2 内力重分布

通过分析可以得到各梁中支座、边支座随荷载增加梁内力重分布的幅度以及引起的支反力变化.选取其中6根模型梁荷载-支

反力变化曲线,列于图8中.图中 P_{cr} 为模型梁开裂荷载、 P_y 为模型梁中支座纵向受拉普通钢筋屈服荷载、 P_u 为模型梁极限破坏荷载.



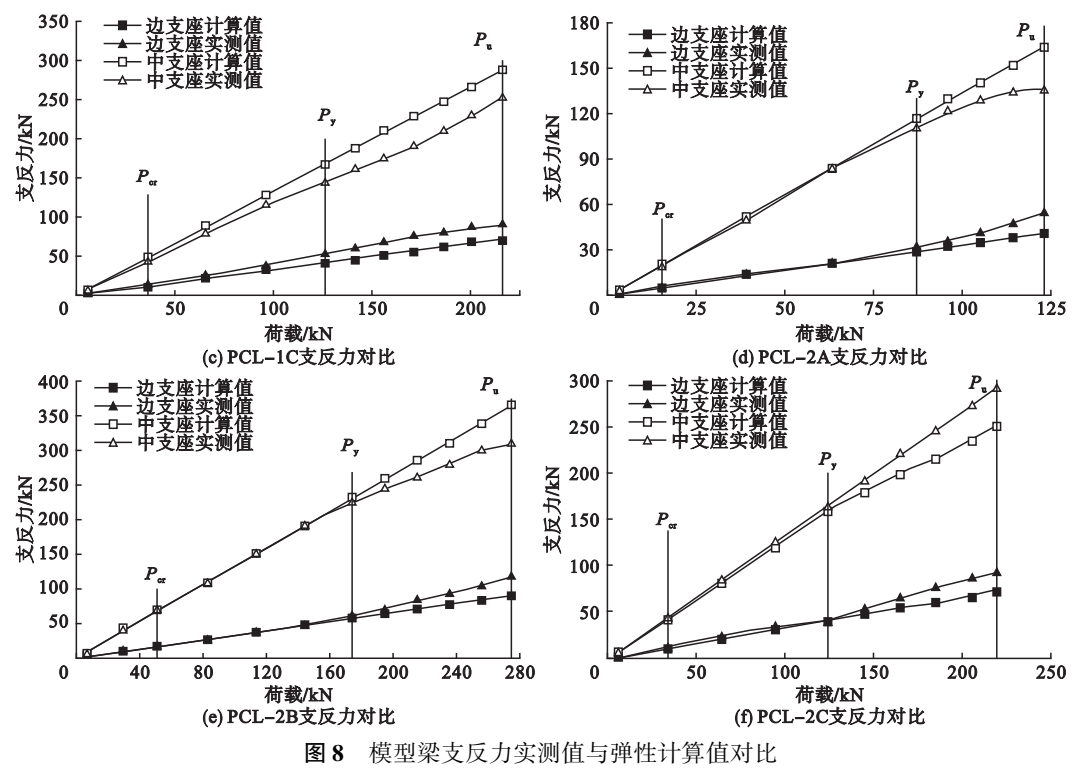


图 8 模型梁支反力实测值与弹性计算值对比

Fig. 8 The comparison between measured value and calculating value of elasticity of model beam

从图 8 中可以看出:中支座负弯矩区混凝土开裂前,连续梁处于弹性阶段,此时边支座反力和中支座反力的实测值与弹性理论计算值基本相同;随着中支座及跨中正弯矩区混凝土的开裂,边支座反力实测值开始向大于计算值的方向偏离,而中支座反力实测值则向小于计算值的方向偏离;当梁内普通受拉钢筋开始屈服后,边支座、中支座反力的实测值与计算值的偏差进一步增大,直到梁体破坏,这表明试验梁已经发生明显的内力重分布。

4.3 弯矩调幅系数的确定

确定弯矩调幅系数是进行连续梁塑性设计的前提.按照弹性方法计算各梁中支座控制截面在极限状态下的弯矩值,得出弯矩调幅系数.弯矩调幅系数公式如下:

$$\delta = \frac{M_{cu}^c - M_u^t}{M_{cu}^c} \quad (1)$$

式中: δ 为弯矩调幅系数; M_{cu}^c 为极限状态下中支座控制截面弹性弯矩计算值; M_u^t 为极限状态下中支座控制截面弯矩实测值。

表 4 给出了各梁通过计算与分析得到的 M_{cu}^c 和 M_u^t ,并按式(1)计算得出弯矩调幅系数 δ .

表 4 极限状态下模型梁内力重分布

Table 4 The redistribution of internal force of model beams

梁编号	M_{cu}^c /kN	M_u^t /kN	δ
ZJL	130.65	52.65	0.597
PCL-1A	93.60	35.10	0.625
PCL-1B	183.30	113.10	0.383
PCL-1C	140.40	70.20	0.500
PCL-1D	140.50	73.50	0.477
PCL-1E	135.20	36.00	0.734
PCL-1F	150.15	79.95	0.468
PCL-1G	155.35	87.75	0.435
PCL-1H	131.95	64.35	0.512
PCL-1I	133.90	74.10	0.447
PCL-1J	150.15	72.15	0.519
PCL-2A	79.95	25.35	0.683
PCL-2B	178.10	105.30	0.409
PCL-2C	141.70	62.40	0.560
PCL-2D	141.00	66.00	0.532
PCL-2E	137.60	33.60	0.756
PCL-2F	151.45	72.15	0.524
PCL-2G	162.50	85.80	0.472
PCL-2H	133.25	56.55	0.576
PCL-2I	135.20	66.30	0.510
PCL-2J	152.10	66.30	0.564

由表 4 可以看出,在其他各参数相同的情况下,预制装配式预应力混凝土连续梁的弯矩调幅系数小于整浇预应力混凝土连续梁,主要由于节段间存在接缝,在极限荷载下塑性铰转动能力与整浇预应力混凝土连续梁相比较低,因此导致预制装配式预应力混凝土连续梁的中支座控制截面的延性较小,弯矩调幅系数小于整浇连续梁;同时在相同配筋情况下,WC 节点的装配式预应力混凝土连续梁的弯矩调幅系数略小于 BC 节点装配式预应力混凝土连续梁的弯矩调幅系数。

以承载能力极限状态弯矩调幅系数 δ 为纵坐标,以综合配筋指标 ξ 为横坐标,得到试验梁试验点分布,如图 9 所示。

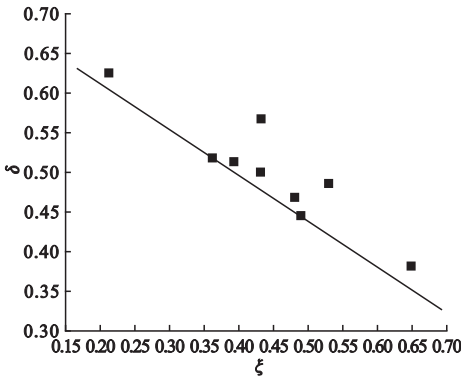


图 9 焊接连接 $\xi-\delta$ 拟合分布图

Fig. 9 Fitting curve of welded connection of $\xi-\delta$

通过线性拟合,得出预制装配式混凝土连续梁以 ξ 为自变量的弯矩调幅系数的计算公式为

$$\delta=0.72-0.57 \xi . \tag{2}$$

5 结 论

(1)在配筋条件相同的情况下,WC 节点试验梁比 BC 节点试验梁的承载力高,并且节点连接方式对预制装配式混凝土连续梁的受弯破坏形态没有影响。

(2)采用无粘结预应力配筋的试验梁,其挠度、裂缝宽度和裂缝高度均小于同等条件下的普通混凝土梁。

(3)通过有限元分析可知,在相同条件

下,预制预应力装配式混凝土连续梁的弯矩调幅系数小于整浇预应力混凝土连续梁;WC 节点连接预制预应力装配式混凝土连续梁弯矩调幅系数略小于 BC 节点连接预制预应力装配式混凝土连续梁。

(4)基于实验及有限元分析,提出了以中支座控制截面综合配筋指标为自变量的 WC 节点预制预应力装配式混凝土连续梁弯矩调幅系数的计算公式。

参考文献

[1] BELLERI A, TORQUATI M, MARINI A, et al. Horizontal cladding panels: in-plane seismic performance in precast concrete buildings [J]. Bulletin of earthquake engineering, 2016, 14(4): 1103 - 1129.

[2] KATAOKA M N, FERREIRA M A, DE CRESCE EL DEBS A L H. Nonlinear FE analysis of slab-beam-column connection in precast concrete structures [J]. Engineering structures. 2017, 143: 306 - 315.

[3] 门进杰,李鹏,郭智峰. 钢筋混凝土柱 - 钢梁组合节点恢复力模型研究 [J]. 工业建筑, 2015, 45(5): 132 - 137. (MEN Jinjie, LI Peng, GUO Zhifeng. Research on restoring force model of RC column-steel beam composite joints [J]. Industrial construction, 2015, 45(5): 132 - 137.)

[4] 周德恒,李爱群,贾洪,等. 预制钢筋混凝土框架结构抗震性能研究进展(I): 节点性能研究 [J]. 工业建筑, 2014, 44(6): 95 - 121. (ZHOU Deheng, LI Aiqun, JIA Hong, et al. Progress of investigation on seismic behavior of precast concrete frame structures(I): study of joint property [J]. Industrial construction, 2014, 44(6): 95 - 121.)

[5] 李向民,高润东,许清风. 预制装配式混凝土框架高效延性节点试验研究 [J]. 中南大学学报, 2013, 44(8): 3453 - 3463. (LI Xiangmin, GAO Rundong, XU Qingfeng. Experimental study on high ductile joints for precast RC frame [J]. Journal of central south university, 2013, 44(8): 3453 - 3463.)

[6] 徐姝亚,李正良,刘红军,等. 装配式套筒连接 CFST 柱 - RC 梁节点抗震性能 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(6): 124 - 131. (XU Shuya, LI Zhengliang, LIU Hongjun, et al. Seismic behavior of precast sleeve-connected CFST column to RC beam connection [J]. Journal of Harbin institute of technology,

- 2016,48(6):124-131.)
- [7] 魏江洋. 浅析预制装配式混凝土(PC)技术在民用建筑中的应用与发展[D]. 南京:南京大学,2016.
(WEI Jiangyang. The development and application states of precast concrete in civil architecture [D]. Nanjing: Nanjing University, 2016.)
- [8] 王燕,马强强,王松森. 装配式钢结构梁柱内套筒组合螺栓连接节点力学性能研究[J]. 天津大学学报,2016,49(增刊):73-79.
(WANG Yan, MA Qiangqiang, WANG Songsen. Mechanical properties of beam-column connection joints using inner sleeve composite bolts in fabricated steel structure[J]. Journal of Tianjin university, 2016,49(S):73-79.)
- [9] 苗小燕. 装配式混凝土框架结构新型梁柱型钢连接节点研究[D]. 北京:北京建筑大学,2016.
(MIAO Xiaoyan. Studies of a new type of column-to-beam joints by embedded steel plate in precast concrete frame structures[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2016.)
- [10] 丁红岩,郭耀华,张浦阳,等. 预制管混凝土柱-梁中节点承载力分析[J]. 建筑结构,2016,46(10):80-86.
(DING Hongyan, GUO Yaohua, ZHANG Puyang, et al. Analysis of bearing capacity of beam-column internal joints for precast concrete tube column structure[J]. Building structure, 2016,46(10):80-86.)
- [11] PARK H G, HWANG H J, LEE C H, et al. Cyclic loading test for concrete-filled U-shaped steel beam-RC column connections [J]. Engineering structures, 2012,36:325-336.
- [12] CHOI H K, CHOI Y C, CHOI C S. Development and testing of precast concrete beam-to-column connections [J]. Engineering structures, 2013,56:1820-1835.
- [13] BAHRAMI S, MADHKHAN M, SHIRMOHAMMADI F, et al. Behavior of two new moment resisting precast beam to column connections subjected to lateral loading [J]. Engineering structures, 2017,132:808-821.
- [14] COLAS A S, GARNIER D, MOREL J C. Yield design modelling of dry joint retaining structures[J]. Construction and building materials, 2013,41:912-917.
- [15] SAIBABU S, SRINIVAS V, LAKSHMANAN N, et al. Performance evaluation of dry and epoxy jointed segmental prestressed box girders under monotonic and cyclic loading [J]. Construction and building materials, 2013,38:931-940.
- [16] 黄慎江,周新潮,袁忠伟,等. 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 Shenjiang, ZHOU Xinchao, YUAN Zhongwei, et al. 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.)
- [17] 范力. 装配式预制混凝土框架结构抗震性能研究[D]. 上海:同济大学,2007.
(FAN Li. Investigation on seismic behavior of jointed precast concrete frame structures [D]. Shanghai: Tongji University, 2007.)
- [18] 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 Qianwei, GONG Wenjun, et al. Experiment on new section steel joints for prefabricated concrete frame [J]. Journal of architecture and civil engineering, 2016,33(2):15-23.)
- [19] 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 Xianghai. Research on the new-style joints of precast concrete frame structure [J]. Nanjing: Southeast University, 2006.)
- [20] 杨晓波,柳炳康,黄慎江,等. 二层二跨预压装配式混凝土框架节点的抗震性能研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2010,33(12):1830-1834.
(YANG Xiaobo, LIU Bingkan, HANG Shenjiang, et al. Research on seismic behavior of two-storey and double-span pre-stressed fabricated concrete frame joints [J]. Journal of Hefei university of technology (natural science), 2010,33(12):1830-1834.)