

## 第3章 高温后梁柱子结构抗连续倒塌试验结果分析

### 3.1 引言

随着装配式建筑在我国的迅猛发展，对高温后装配式混凝土结构抗连续倒塌性能的研究具有重要的工程意义。本章在装配式混凝土框架结构高温后试验基础上，通过对其试验现象以及数据进行分析，比较了试件荷载位移曲线、裂缝发展规律和破坏模式，探讨了装配式梁柱子结构高温后抗连续倒塌性能。

### 3.2 高温后试验现象及试件形态

高温试验炉升温曲线按照 ISO-834 设定，装配式混凝土试件 PC1-PC4 在高温试验炉中升温 120min，关闭升温炉后自然降温，待温度降到 700℃左右去掉试验炉上部及侧面保温棉，温度降至 200℃左右去掉一侧加热板加速降温。记录试验过程中试验现象，观察降温后试件形态变化。高温后试件在温度降至室温后，用蓝色笔画出温度裂缝，相应地，加载过程中产生的裂缝用黑色笔画出，以此观察裂缝在不同过程中分布与发展规律。

#### 3.2.1 PC1 试件

在装配式混凝土试件 PC1 试验过程中发现，高温炉内升温 15min 时，炉内开始有水蒸气溢出，随着温度的升高，炉顶及试件两侧有大量水蒸气冒出，50min 后水蒸气逐渐减少，60min 后几乎看不到水蒸气冒出。说明升温过程中，混凝土试件内存在的残余水分蒸发。



a) 高温后整体形态

b) 高温后裂缝分布

图 3.1 PC1 试件高温后形态

降温后打开试验炉 PC1 试件形态如图 3.1 所示，发现试件保持较好的完整性，试件侧面呈灰白色，上表面呈暗灰色，梁侧面有粗骨料剥落，试件表面有大量细

微龟裂裂缝，梁表面出现竖向裂缝，柱表面出现横向裂缝，间距均接近箍筋间距，由于混凝土与钢筋导热性能不同，升降温过程中钢筋与混凝土之间不协调变形造成的。同时还发现先浇混凝土与后浇混凝土叠合面上出现水平裂缝，由于装配式结构叠合面上下混凝土高温过程中变形不协调造成。

### 3.2.2 PC2 试件

PC2 试件升温约 10min 左右炉内开始有水蒸气溢出，升温过程中，加载横梁上凝结了大量水珠，试件梁端也有小水珠滴落。升温约 50min 后水蒸气逐渐减少，说明此时装配式构件内水分已经完成迁移并蒸发完毕。开炉后试件形态如图 3.2 所示，发现 PC2 试件保持较好完整性，试件侧面呈灰白色，上表面呈暗灰色，梁侧面有粗骨料掉落痕迹，除高温龟裂裂缝外，梁表面与柱表面沿箍筋方向有温度裂缝产生，由于钢筋与混凝土升降温过程中导热性能差异所致，与 PC1 相比 PC2 混凝土叠合面上温度裂缝相对较少。



a) 高温后整体形态

b) 高温后裂缝分布

图 3.2 PC2 试件高温后形态

### 3.2.3 PC3 试件

试件 PC3 升温约 10min 左右炉内开始有水蒸气溢出，随温度的升高，炉顶及梁端保温棉密封处由大量水蒸汽冒出，加载横梁上凝结了大量水珠，试件梁端也有小水珠滴落，60min 到 90min 内高温炉内陆续发出清晰的噼啪响声。开炉后形态如图 3.3 所示，发现 PC3 梁上侧发生混凝土爆裂，如图 3.3 所示，部分混凝土脱落，造成混凝土爆裂剥落的原因可能有两种，一是试件混凝土内部水分受到高温作用气化产生的孔隙水压力超过混凝土抗拉强度造成的脆性破坏。二是试件表面混凝土在高温作用下受热膨胀但混凝土受到约束产生的破坏。一侧梁完整性遭到破坏。梁柱表面均产生沿箍筋方向温度裂缝及大量的高温龟裂裂缝。混凝土在高温作用下的破裂形式中，高温爆裂是最猛烈的形式，混凝土高温爆裂温度范围一般是 300℃ 到 600℃ 之间。



a) 高温后整体形态



b) 高温后裂缝分布



c) 梁顶混凝土爆裂

图 3.3 PC3 试件高温后形态

### 3.2.4 PC4 试件

PC4 试件升温约 13min 左右炉内开始有水蒸气溢出，加载横梁上凝结了大量水珠，试件梁端也有小水珠滴落。开炉后试件如图 3.4 所示，发现试件侧面呈灰白色，上表面呈暗灰色，除高温龟裂裂缝外，梁表面与柱表面沿箍筋方向有温度裂缝产生，由于钢筋与混凝土升降温过程中导热性能差异所致，与 PC3 类似 PC4 梁上侧混凝土也发生爆裂剥落现象。



a) 高温后整体形态



b) 高温后裂缝分布





c) 梁顶混凝土爆裂

图 3.4. PC4 试件高温后形态

### 3.2.5 小结

从 PC1-PC4 试件高温后形态总结出以下规律：

(1) 装配式混凝土试件降温后试件完整性保持良好，PC3 和 PC4 试件梁身加热过程中混凝土出现轻微爆裂现象，试件保持完整性。

(2) 开炉后观察 PC 试件形态，发现试件均有不同程度向上反拱现象，这是是件受热膨胀，梁端受到约束导致。

(3) 试件加热过程中均出现水汽溢出现象，但随着温度升高，加热时间增长，水汽慢慢消失。

(4) 试件表面在高温后出现裂缝主要为龟裂裂缝，梁表面及柱表面产生裂缝主要沿箍筋分布。

(5) 试件在高温后表面颜色变为灰白色，上表面变为暗灰色。

## 3.3 升温反应

采用高温试验炉对试件进行升温，升温曲线按照 ISO-834 曲线设定，但由于加热板功率及试件周围密封性原因，升温曲线无法完全与 ISO-834 曲线拟合。升降温过程利用装配式试件混凝土浇筑前截面预埋热电偶对截面温度进行测量，炉温采用加热板中心自带热电偶进行记录。

### 3.3.1 炉内升温曲线

图 3.5 为试件 PC1、PC2、PC3、PC4 试验过程中炉膛内加热板自带热电偶实测温度曲线与 ISO-834 曲线对比图，由图 3.5，火灾炉升温前期升温速率较快，当高温试验炉升温约 10min 时，试验炉内温度达到 495℃左右，高温试验炉炉内温度低于 ISO-834 曲线温度，PC2、PC3 和 PC4 升温 120min 后最高温度接近 900℃，升温趋势较好地拟合标准升温曲线，由于密闭性原因 PC1 试件升温过程中最高温度达到 790℃左右，但整体升温趋势仍与标准升温曲线类似。

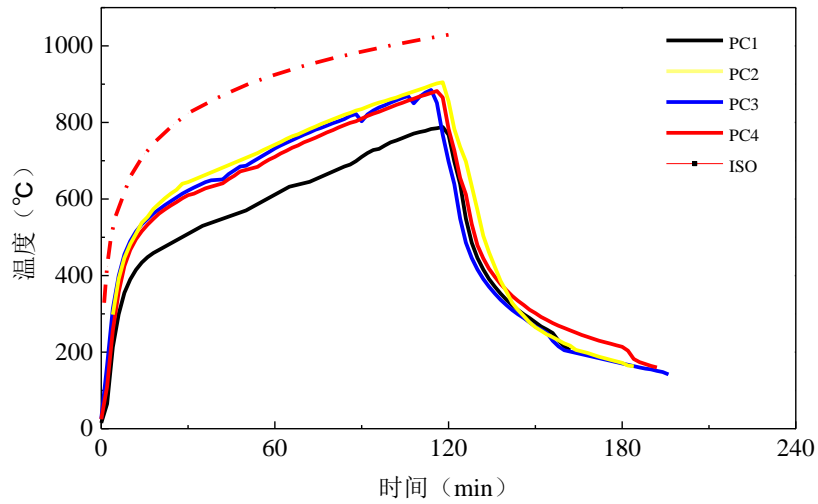
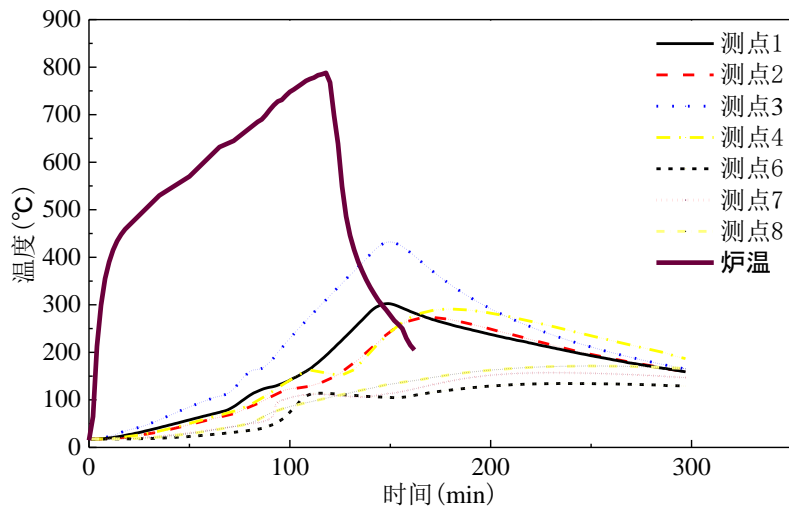


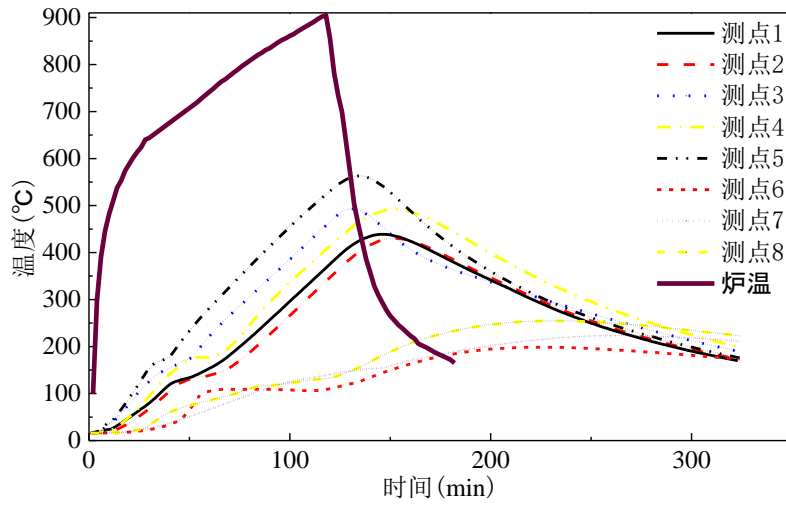
图 3.5 炉内升温曲线

### 3.3.2 温度场测试结果与分析

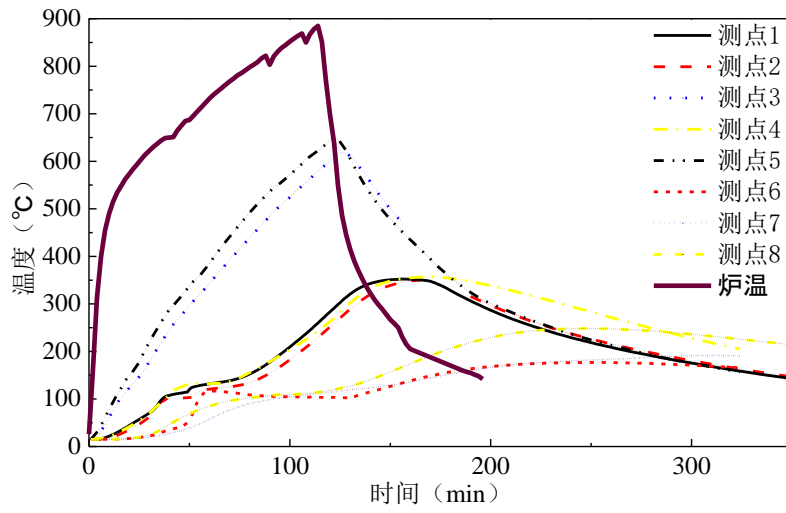
高温作用下试件截面温度场分布对试件受力性能影响很大,为了测量准确性,试验过程中热电偶伸出试件外部分用防火面包裹。图 3.6 给出升温过程中各试件截面内部不同测点温度变化曲线,表 3.1 给出各试件测点内部温度峰值。其中,PC1 试件 5 号测点试件浇筑过程中热电偶损坏,试验过程中读取数据异常,所以该测点数据并未显示在图表中。



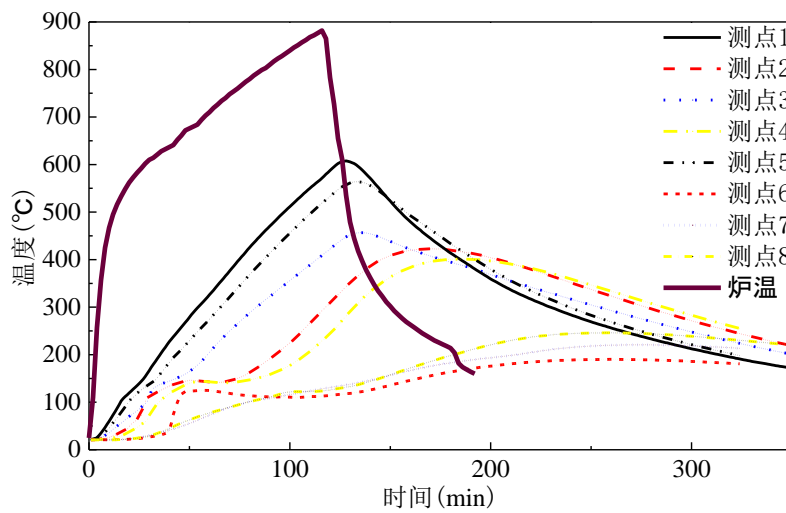
a) PC1 试件



b) PC2 试件



c) PC3 试件



d) PC4 试件

图 3.6 试件截面温度场

表 3.1 PC1-PC4 试件不同测点最高温度

试件 编号	1 号 测点	2 号 测点	3 号 测点	4 号 测点	5 号 测点	6 号 测点	7 号 测点	8 号 测点
PC1	302.5	273.2	432.1	290.9	-	134.5	157.3	171.4
PC2	438.9	430.6	492.9	492.4	563.1	198.6	223.4	254.7
PC3	352.3	349.9	618	357.2	650.1	176.9	191.6	248.4
PC4	607.2	422.8	456.9	401.1	563.8	190.3	220.9	246.2

从图 3.6 及表 3.1 数据可以看出：

(1) 升温过程中，各测点温度变化均呈增大趋势，测点距离受火面越近升温速率越快。部分测点升温曲线出现异常，如 PC4 试件 3 号测点与其他试件同位置相比温度增长速度偏低，可能是因为在混凝土浇筑过程中热电偶的位置偏移导致。

(2) 各个截面温度大部分在 130℃-160℃ 附近有一个温度平台，且该测点位置越靠近试件中心该现象约明显。这是由于当温度达到 100℃ 以后，水蒸气迁徙造成，而中心测点水蒸气挥发较慢且只能往外逸出，所以截面中心该现象更加明显。

(3) 整体来看，截面中心温度远低于侧面温度，侧面温度低于底面温度，以 PC4 试件为例，测点 1 与测点 5 距离受火面距离一致，但测点 1 最高温度为 607.2℃，测点 5 最高温度为 563.8℃，说明混凝土截面在高温作用下截面温度场分布不均匀。

### 3.3.3 轴力-温度-和轴力-时间试件关系曲线

图 3.7 为高温后试验时间升降温过程中梁端轴向力随炉温的变化规律，可以看出随着温度的升高，试件受热产生轴向压力，550℃ 以前，轴力随温度升高变化较慢，550℃ 到 900℃ 左右轴向压力随温度增高发展速度较快。降温过程中，900℃ 下降到 300℃，轴力下降缓慢，300℃ 以后轴力下降速度较快。其中 PC1 试件由于密闭性原因，升温温度低于其他 PC 试件，相应的，PC1 试件梁端轴力也相对较低。

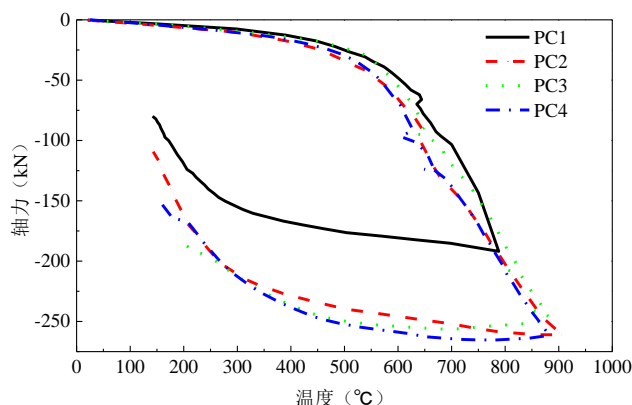


图 3.7 梁端轴力温度关系

### 3.4 荷载-位移曲线及轴力-位移曲线

图 3.8 为试件梁端及中柱位移及荷载测试示意图。试件荷载位移曲线是判断结构受力阶段反映，梁端轴向力的变化是划分压拱效应与悬索效应的重要依据。

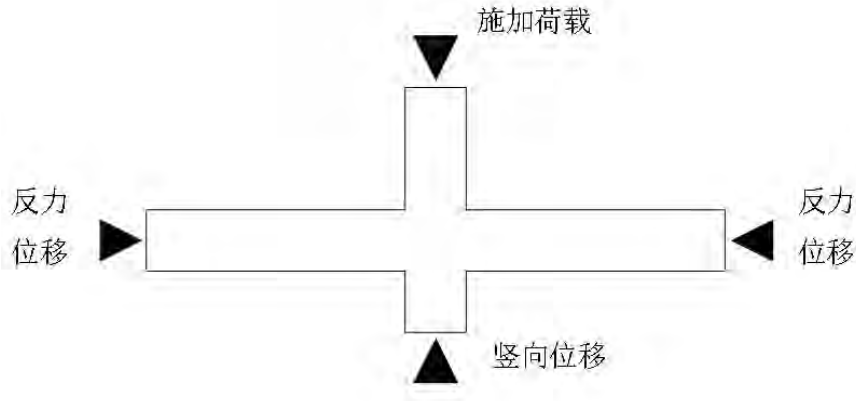


图 3.8 梁柱子结构位移荷载测试图

#### 3.4.1 PC1 试件

图 3.9 为 PC1 试件荷载位移曲线。表 3.2 为 PC1 试件加载过程中受力性能描述。

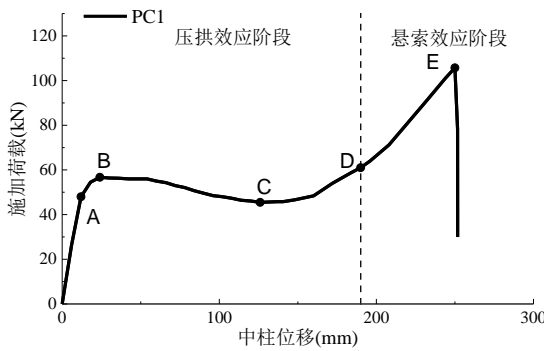


图 3.9 PC1 试件荷载位移曲线

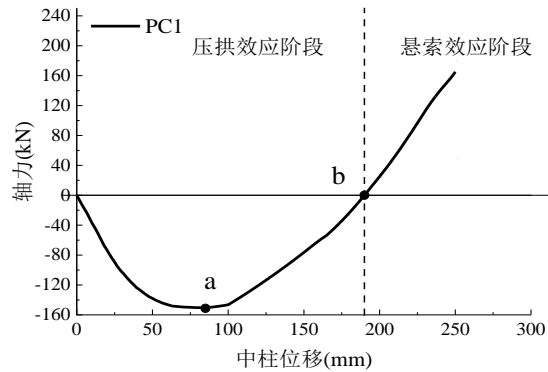


图 3.10 PC1 试件轴力位移曲线

图 3.9 中可以看出，试验受力主要分两个阶段，压拱效应阶段和悬索效应阶段。OD 段为压拱效应阶段，梁端约束反力为压力，DE 为悬索效应阶段，梁端约束反力为拉力。压拱效应分为弹性阶段（OA）、弹塑性阶段（AB）、塑性铰发展阶段（BD）。中柱竖向位移 12mm 以内，梁经历弹性范围内的弯曲变形，梁身无裂缝产生，此阶段为弹性阶段。当中柱位移超过 12mm 后，梁截面下边缘混凝土出现开裂，梁中性轴上移，进入弹塑性阶段。中柱位移超过 24mm 后进入塑性铰发展阶段，裂缝开始向受压区发展，梁端压力逐渐减小，拱效应逐渐消失，中柱竖向位移达到 190mm 时梁端压力变为零，进入悬索效应阶段，试件承载力上升，梁端拉力逐渐增加，当中柱位移达到 251.7mm 时，靠近中柱北侧梁端下部钢筋断裂，



构件失去承载能力。PC1 试件受力过程可看出，压拱效应峰值之后试件承载力有所下降，但悬索效应峰值荷载远高于压拱效应峰值荷载。

表 3.2 PC1 加载过程中受力性能描述

曲线	关键点 /mm	荷载 /kN	受力描述
荷载 位移	A (12)	48.0	梁出现首条受拉裂缝。
	B (24)	56.7	压拱效应阶段荷载峰值点。
	C(126)	45.5	峰值荷载之后，中柱施加荷载逐渐减小，此时中柱柱头荷载降为最小值，此后荷载又逐渐增大。
	D (190)	61.1	梁端压力变为零，此后压力转变为拉力，为压拱效应和悬索效应的分界点。
	E (250.1)	105.7	悬索效应荷载峰值点，靠近中柱北侧梁端下部两根钢筋断裂。
轴力	a (85)	50.3	梁端水平压力达到最大值 151kN。
位移	b (190)	61.1	梁端压力变为零，相对应于荷载位移曲线 D 点。

图 3.10 为试件加载过程中梁端轴力随加载位移变化曲线，梁端轴力先表现为压力，竖向位移达到 85mm 时达到轴向压力峰值 151kN，竖向位移为 190mm 时为轴向压力与轴向拉力分界点，此时轴向压力转变为轴向拉力，试件进入悬索效应阶段。

### 3.4.2 PC2 试件

图 3.11 为 PC2 试件荷载位移曲线，表 3.3 为 PC2 试件加载过程中受力性能描述。

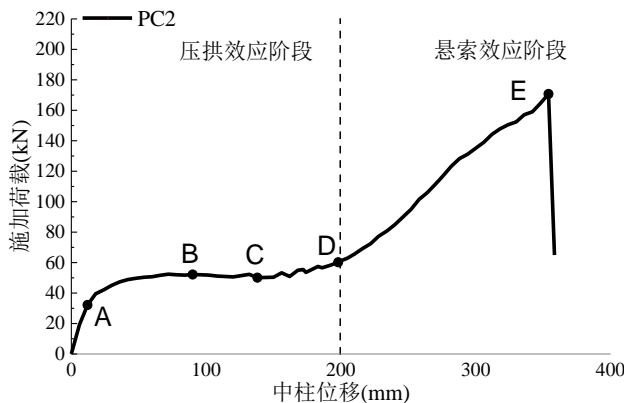


图 3.11 PC2 试件荷载位移曲线

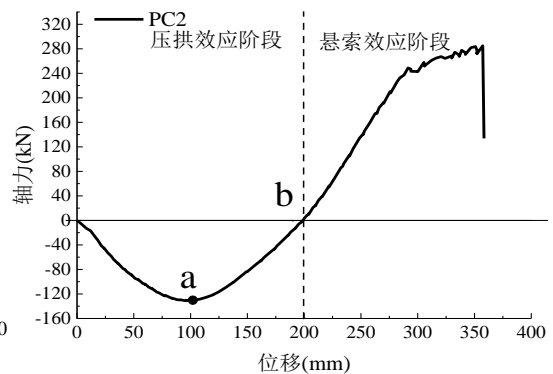


图 3.12 PC2 试件轴力位移曲线

表 3.3 PC2 加载过程中受力性能描述

曲线	关键点 /mm	荷载 /kN	受力描述
	A (12)	32.2	梁身出现首条裂缝。
	B (90)	52.2	压拱效应阶段荷载峰值点。
荷载 位移 曲线	C(138)	50.1	峰值荷载之后，，中柱施加荷载慢慢减小，此时中柱柱头荷载降至最小值，此点过后荷载又慢慢增大。
	D (199.5)	63.0	梁端压力变为零，此后压力转变为拉力，为压拱效应和悬索效应的分界点。
	E (354)	170.7	悬索效应荷载峰值点，此点过后近中柱南侧梁端下部两根钢筋断裂。
轴力	a (96)	51.6	梁端水平压力达到最大值 131kN。
位移	b (199.5)	63	梁端压力变为零，相对应于荷载位移曲线 D 点。

从图中曲线可以看出，整个试验过程主要分为压拱效应和悬索效应两个阶段，OD 为压拱效应作用阶段，梁端轴力表现为为压力，DE 为悬索效应，梁端水平力为拉力。压拱效应分三个阶段，OA 段中柱竖向位移 12mm 以内为弹性阶段，梁发生线弹性范围内的变形，AB 段为弹塑性阶段，梁身出现混凝土开裂，梁截面中性轴上移，BD 段为塑性较发展阶段，梁端压力逐渐减小为零，梁身裂缝向受压区发展。DE 段为悬索效应阶段，试件承载能力随变形增加而增大，南侧梁内钢筋断裂，试件失去承载能力。从 PC2 整个受力过程来看，压拱效应峰值过后荷载位移曲线下降段比较平缓，悬链线效应发展充分，悬链线阶段峰值远高于压拱效应峰值。

图 3.12 为试件加载过程中梁端轴力随加载位移变化曲线，梁端轴力先表现为压力，竖向位移达到 96mm 时达到轴向压力峰值 131kN，竖向位移为 199.5mm 时为轴向压力与轴向拉力分界点，试件进入悬索效应阶段。

### 3.4.3 PC3 试件

图 3.13 为 PC3 试件荷载位移曲线，表 3.4 为 PC3 试件加载过程中受力性能描述。

从图中可以看出，PC3 试件受力过程主要经历压拱效应阶段（OD）和悬链线效应阶段（DE）。其中压拱效应阶段中 OA 段为弹性阶段，弹性阶段中，混凝土未开裂，试件经历弹性受力。AB 段为弹塑性阶段，弹塑性阶段中，试件梁身开始出现裂缝。BD 段为塑性较发展阶段。D 点以后梁端水平力变为拉力，进入悬索效应阶段。可以看出 PC3 试件压拱效应峰值过后荷载下降较严重，塑性较发展阶段试件承载力较低。悬链线效应发展充分，悬链线效应荷载峰值远高于压拱效应荷

载峰值。

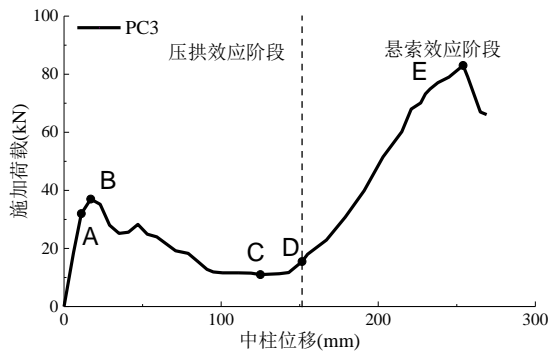


图 3.13 PC3 试件荷载位移曲线

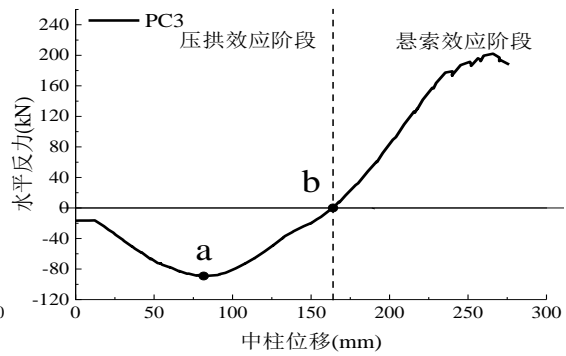


图 3.14 PC3 试件轴力位移曲线

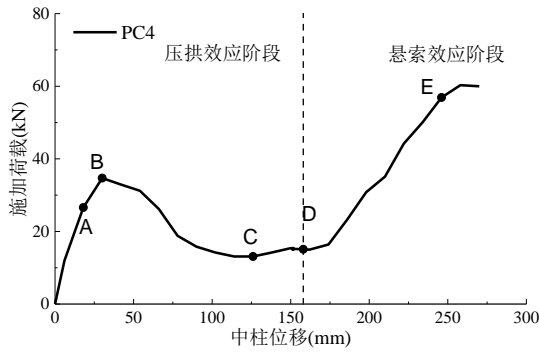
表 3.4 PC3 加载过程中受力性能描述

曲线	关键点 /mm	荷载 /kN	受力描述
荷载 位移 曲线	A (11)	32	梁身出现首条裂缝。
	B (17)	37	压拱效应阶段荷载峰值点。
	C(125)	11	峰值荷载之后,随着中柱竖向位移的增加,中柱施加荷载逐渐减小,此时施加荷载降为最小值,此后荷载又逐渐增大。
	D (154)	17.5	梁端压力变为零,此后压力转变为拉力,为压拱效应和悬索效应的分界点。
	E (254)	83	悬链线效应峰值。
	F (269)	66	键槽内钢筋滑移失效。
轴力	a (83.9)	51.6	梁端水平压力达到最大值 89.8kN。
位移	b (154)	17.5	梁端压力变为零,对应荷载位移曲线 D 点。

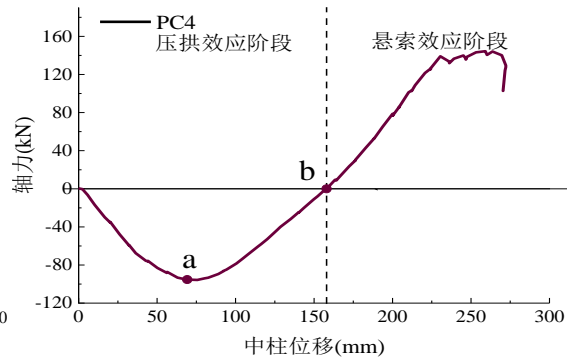
试件加载过程中梁端轴力与中柱竖向加载位移关系曲线如图 3.14 所示,压拱效应阶段,梁端轴力表现为压力,试件中柱位移达到 78mm 时,梁端轴向压力达到峰值 88.6kN,中柱位移增加至 154mm 时,梁端轴力转变为拉力。

### 3.4.4 PC4 试件

图 3.15 为 PC4 试件荷载位移曲线,表 3.5 为 PC4 试件加载过程中受力性能描述。



3.15 PC4 试件荷载位移曲线



3.16 PC4 试件轴力位移曲线

表 3.5 PC4 加载过程中受力性能描述

曲线	关键点 /mm	荷载 /kN	受力描述
荷载 位移 曲线	A (18)	26.6	梁身第一次出现裂缝。
	B (30)	34.7	压拱效应阶段荷载峰值点。
	C (126)	13.1	峰值荷载之后,随着中柱竖向位移的增加,中柱施加荷载逐渐减小,此时施加荷载降为最小值,此后荷载又逐渐增大。
	D (158)	14	梁端压力变为零,此后压力转变为拉力,为压拱效应和悬索效应的分界点。
	E (258)	60.3	悬链线阶段峰值。
	F (270)	60	U 型钢筋滑移失效。
轴力 位移	a (75.6)	51.6	梁端水平压力达到最大值 95.7kN。
	b (158)	14	梁端压力变为零,对应荷载位移曲线 D 点。

从图中可以看出, PC4 试件受力过程主要经历压拱效应阶段 (OD) 和悬链线效应阶段 (DE)。压拱效应阶段中 OA 段为弹性阶段, AB 段为弹塑性阶段, BD 段为塑性较发展阶段。D 点以后梁端水平力变为拉力,进入悬索效应阶段。可以看出 PC4 试件压拱效应峰值过后荷载下降趋势明显,塑性较发展阶段试件承载力较低。悬链线效应发展充分,悬链线效应荷载峰值远高于压拱效应荷载峰值。

图 3.16 为试件 PC4 加载过程中梁端轴力随中柱竖向位移变化关系曲线,可以看出,梁端先表现为压力,竖向位移达到 102.1mm 时,轴向压力达到峰值,竖向位移达到 158mm 时,梁端压力变为拉力,试件进入悬索效应阶段。

### 3.4.5 荷载-位移及轴力-位移曲线对比分析

图 3.17 为高温后试件荷载位移曲线对比示意图。本文中 RC 数据引用文献[59]高温后 PC 试件受力过程与 RC 试件相似,主要经历压拱效应阶段和悬索效应阶段。PC1、PC2 试件受力充分,其中 PC1 试件压拱效应作用阶段峰值荷载为 56.7kN,

悬索效应作用阶段峰值荷载为 105.7kN，较压拱效应作用阶段峰值荷载提升了约 86%。PC2 试件压拱效应作用阶段峰值荷载为 52.2kN，悬索效应作用阶段峰值荷载为 170.7kN，较压拱效应荷载峰值提升了约 118.5%。节点采用键槽形式连接的 PC3、PC4 试件破坏均为键槽内钢筋滑移失效，PC3 试件压拱效应作用阶段峰值荷载为 37kN，悬索效应作用阶段峰值荷载为 83kN,较压拱效应峰值荷载提升了约 124%。PC4 试件压拱效应作用阶段峰值荷载为 34.7kN，悬索效应作用阶段峰值荷载为 60kN,较压拱效应峰值荷载提升了约 78%。

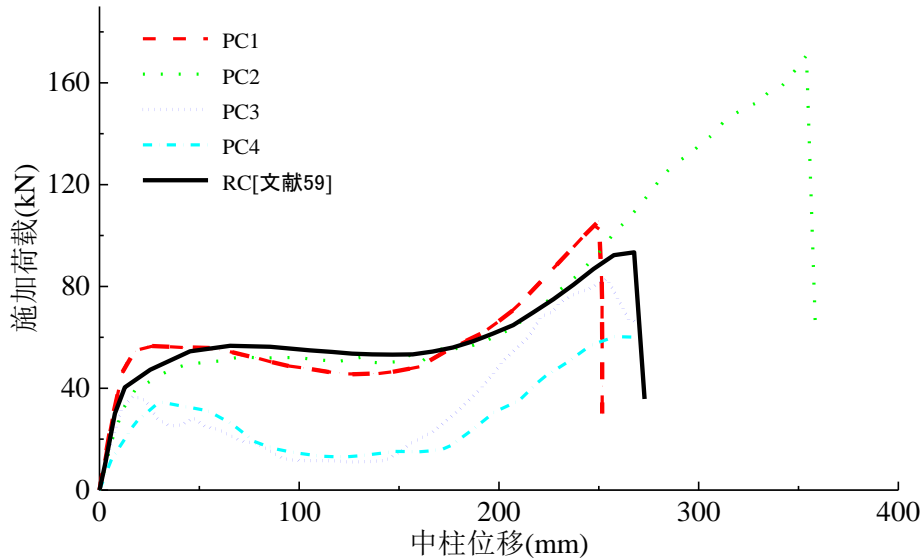


图 3.17 高温后试件荷载位移曲线对比图

表 3.6 为高温后试件试验结果，表中可以看出相较于 PC1、PC2 采用键槽方式的 PC3、PC4 承载力略低，其中 PC1 试件压拱效应峰值最高，PC4 试件拱效应峰值最低，参考文献[57]的现浇构件试验数据，现浇 RC 构件拱效应峰值为 56.8kN，试件 PC1、PC2、PC3、PC4 压拱效应峰值荷载分别为 RC 构件压拱效应峰值荷载的 99.8%、91.9%、65.1%、61.1%，压拱效应峰值过后，PC1、PC2 试件荷载与 RC 结构类似，发展比较平缓基本保持稳定，相比之下，采用键槽方式的 PC3、PC4 下降明显。装配式试件在悬链线阶段承载力有显著提升，其中 RC 试件悬链线峰值为 95.1kN，PC1、PC2、PC3、PC4 试件悬链线阶段峰值分别为 RC 构件的 110.4%、178.3%、86.7%、63.0%。试件破坏时 RC 构件位移为 265mm，PC1、PC2、PC3、PC4 试件破坏时位移分别为 RC 构件的 94.4%、133.5%、95.8%、97.4%。

图 3.18 为试件梁端水平反力与中柱竖向位移之间关系曲线，水平反力负表示梁端表现为压力，正值梁端表现为拉力。试件在受力过程中，梁端先产生轴向压力，轴向压力在中柱竖向位移约 75mm 达到峰值，此后压力逐渐减小到零后梁端产生逐渐轴拉力。中柱加载后，受到弯矩作用影响导致试件混凝土开始开裂，随



着裂缝的发展，子结构产生压拱效应，梁端产生轴向压力，支座在梁身变形下向外移动，随着中柱位移的不断增加，裂缝向受压区发展，子结构逐渐出现悬索效应，梁端产生轴向拉力，支座向内运动。

表 3.6 试验结果汇总表

试件 编号	压拱效应峰值		最低点* /kN	回原点* /mm	悬索效应峰值		水平轴力 峰值/kN	破坏形式
	荷载 /kN	位移 /mm			荷载 /kN	位移 /mm		
RC	56.7	65.5	53.2	198	93.4	267.6	114/150	梁钢筋拉断
PC1	56.7	24	45.5	190	105.7	250.1	151/165	梁钢筋拉断
PC2	52.2	90	50.1	199	170.7	354	131/270	梁钢筋滑移+拉断
PC3	37	17	11	164	83	254	89/193	梁钢筋滑移
PC4	34.7	30	13.1	158	60.3	258	95/140	梁钢筋滑移

注：“最低点”表示压拱效应峰值荷载过后下降至最小值时的荷载；“回原点”表示水平轴力由受压转变为受拉的临界点时的中柱竖向位移.RC 数据引用自文献[57]

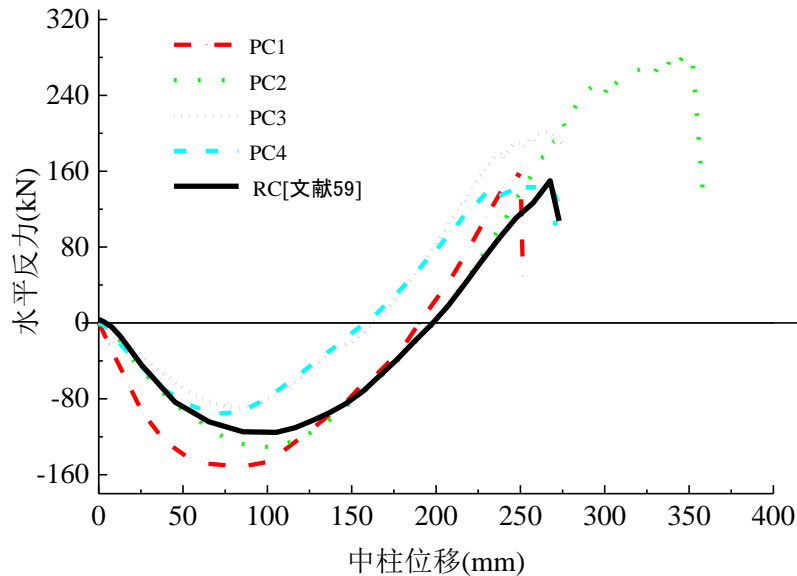


图 3.18 高温后试件轴力位移曲线对比图

表 3.6 列出了轴向压力轴向拉力的最大值，现浇试件 RC 轴向压力最大值为 114kN，之后逐渐减小到 0，转为轴向拉力后继续增大，轴向拉力最大值为 150kN，装配式试件 PC1 轴向压力最大值为 151kN，轴向拉力最大值为 165kN，与 RC 试件类似。PC2 试件轴向压力最大值为 131kN，轴向拉力最大值为 270kN，说明 PC2 悬索效应阶段发展充分。PC3、PC4 试件轴向拉力最大值分别为 89kN 与 95kN，轴向拉力最大值分别为 193kN 和 140kN。说明装配式连接中直螺纹套筒连接与 90 度弯钩连接受力性能优于键槽连接方式。

### 3.5 弯矩-转角及弯矩-轴力曲线

对高温后 PC 系列试件弯矩转角图及弯矩轴力图进行分析, 探究装配式梁柱子结构不同节点形式对试件转动性能的影响。弯矩考虑  $N-\delta$  效应在梁柱界面交界处产生的二阶弯矩, 取  $M = R \cdot L_n - N \cdot \delta$ 。其中  $R$  为支座竖向反力,  $L_n$  为中柱与梁交界面到铰接点的距离,  $N$  为水平力,  $\delta$  为中柱竖向位移。

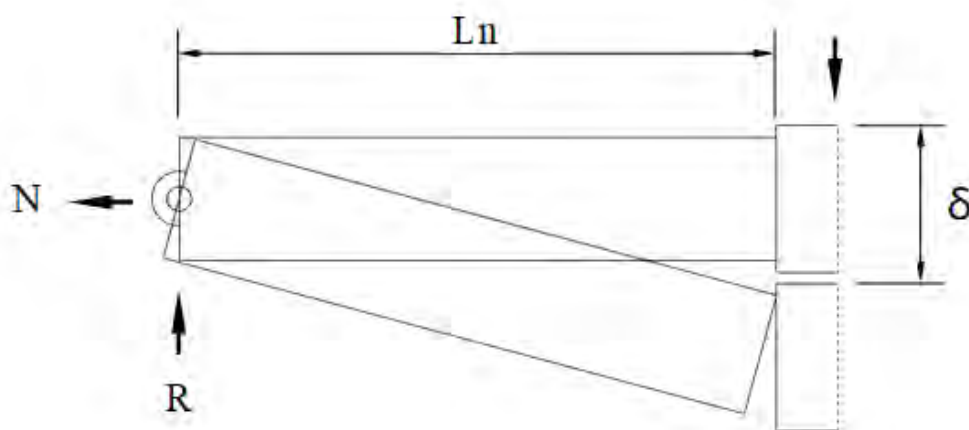


图 3.19 弯矩计算示意图

#### 3.5.1 PC1、PC2 试件弯矩转角曲线

图 3.20 件 PC1、PC2、RC 试件弯矩转角曲线对比图, 由图中可以看出, 转角较小时, 试件弯矩线性增加, 梁柱交界面抗弯刚度最大, 随着转角逐渐增大, 弯矩增长速率开始变慢, 达到峰值后, 随着转角增大, 弯矩开始慢慢减小, 当梁下部纵筋被拉断时, 弯矩急剧下降。装配式试件 PC1 与 PC2 峰值弯矩分别为  $51.4\text{kN}\cdot\text{m}$ 、 $54.5\text{kN}\cdot\text{m}$ , 分别为现浇试件峰值弯矩的  $94.8\%$ 、 $100.5\%$ 。对于装配式结构 PC1、PC2 试件弯矩转角关系与 RC 试件发展趋势相同, PC1 试件呈现了几乎和 RC 试件相同的发展规律, 最终破坏也是梁底钢筋被拉断, PC2 试件前期发展趋势与 RC 试件相同, 但随着转角逐渐增大, 底部 90 度弯钩锚固钢筋出现滑移, 反而呈现出更好的延性, 最终破坏也是底部钢筋被拉断。

图 3.21 试件 PC1、PC2、RC 梁柱交界处弯矩轴力关系。由图可以看出, 试件主要经历四个阶段, 抗弯阶段、压弯强化阶段、压弯退化阶段、拉弯阶段。可以看出, RC、PC1、PC2 试件曲线发展趋势类似。抗弯阶段, 弯矩增长较快, 但轴向压力增长速率较慢。压弯强化阶段, 弯矩增长速率变慢, 而轴向压力增长速率变快。压弯退化阶段, 轴向压力与弯矩达到峰值后均逐渐减小。随着水平反力变

为正值，试件进入拉弯状态。此时，试件进入悬索受力机制。RC 轴向拉力极值为 150kN，PC1 试件轴向拉力极值为 165kN，而 PC2 轴向拉力极值为 270kN，说明 PC2 试件高温后悬索效应发挥更充分。

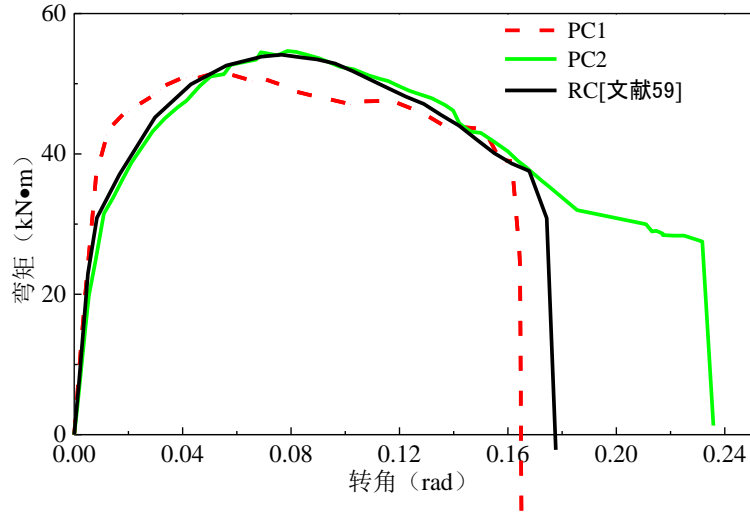


图 3.20 PC1、PC2 弯矩转角曲线

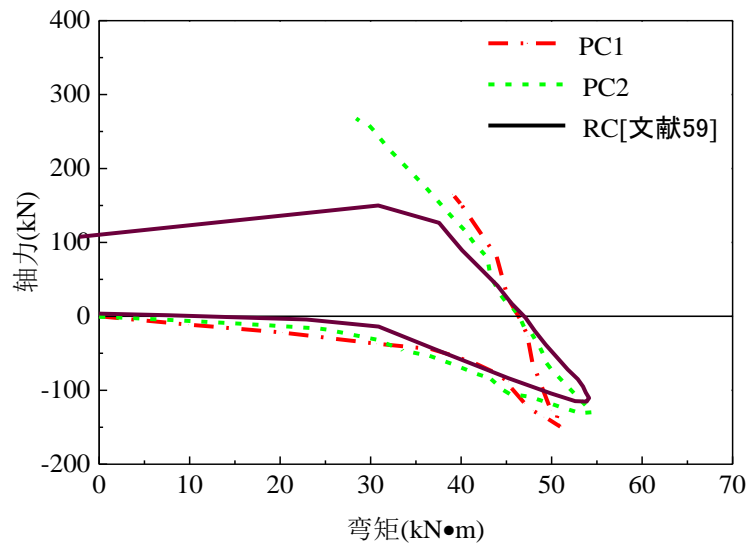


图 3.21 PC1、PC2 试件弯矩轴力曲线

### 3.5.2 PC3、PC4 试件弯矩转角曲线

图 3.22 为 PC3、PC4 和 RC 试件弯矩转角曲线。由图可以看出，试件转角较小时，PC3、PC4 弯矩线性增加，达到峰值后弯矩逐渐下降。当转角小于 0.02 时，PC3、PC4 试件弯矩增长趋势与 RC 试件类似，弯矩达到峰值之后，采用键槽的装配式试件弯矩承载力下降明显，其中 PC3、PC4 试件峰值弯矩分别为 29.5kN·m 和 31.3kN·m，分别为现浇试件弯矩峰值的 55% 和 58%。可以看出，本试验中采用的键槽连接的节点形式试件，高温后抗连续倒塌性能弱于 RC 试件。

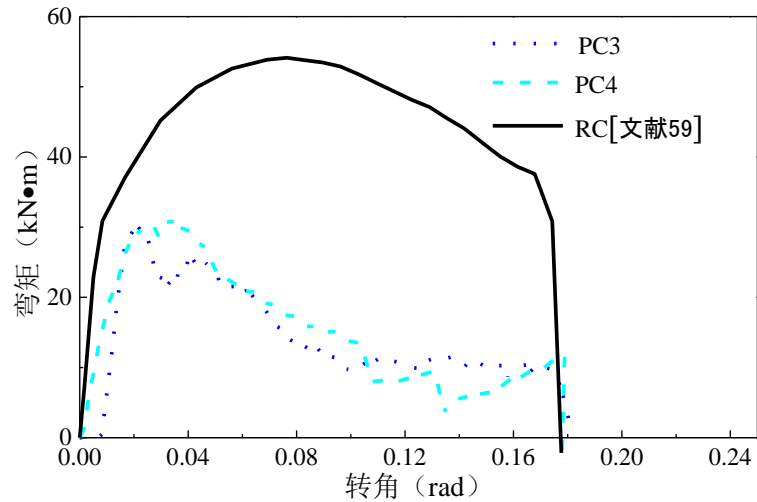


图 3.22 PC3、PC4 试件转角弯矩曲线

图 3.23 为 PC3、PC4 试件弯矩轴力曲线图形，可以看出 PC3、PC4 试件经历了压弯阶段、压弯退化阶段、拉弯阶段。装配式试件 PC3、PC4 弯矩与轴力曲线相似，压弯阶段，结构弯矩与梁端压力呈现线性增长趋势，与试件 PC1、PC2 不同的是，试件 PC3、PC4 的  $N-M$  曲线为凹函数，说明加载初期，装配式试件 PC3、PC4 轴向压力增长迅速，加载期间，采用键槽连接的试件加载前期不足以提供足够的弯矩来抵抗竖向荷载，压拱机制提前介入分担了承受的荷载，文献[53]也呈现出此现象。随后试件进入压弯退化阶段，由于中柱竖向承载力急剧降低，竖向变形还在增大，所以呈现出轴向压力增大而截面弯矩减小的现象，最终试件进入拉弯阶段，PC3、PC4 试件最终破坏是键槽内钢筋滑移失效。

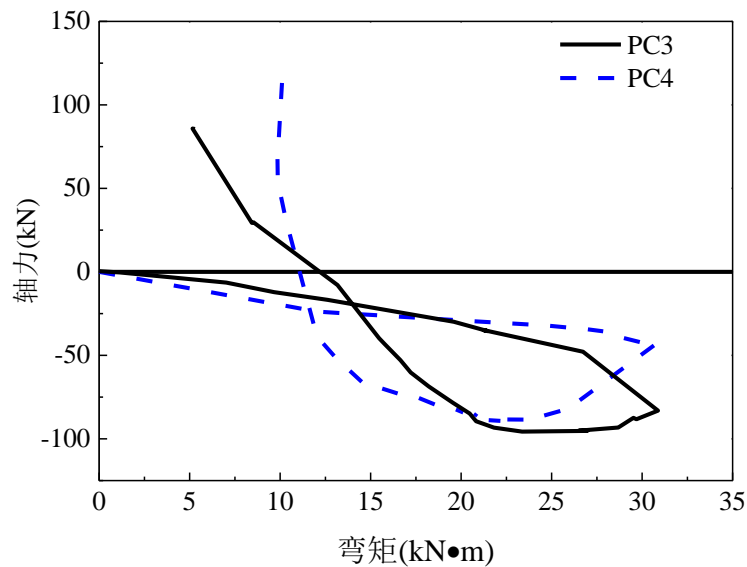


图 3.23 PC3、PC4 试件弯矩轴力曲线

## 3.6 试件裂缝发展及破坏模式

### 3.6.1 PC1 试件裂缝发展及破坏模式

#### 3.6.1.1 压拱效应阶段裂缝图

图 3.24 为 PC1 试件压拱效应阶段过程中裂缝图。PC1 试件加载位移至 12mm 时，梁柱区域节点下部温度裂缝开始扩展，如图 3.23a)，此刻柱头竖向荷载为 48kN。继续加载，梁端沿温度裂缝扩展出新的裂缝，并慢慢发展。当中柱位移达到 24mm 时，达到压拱效应峰值荷载 56.7kN。此时 PC1 试件两侧梁身裂缝呈现左右对称状态，裂缝集中在梁柱交界面均垂直于梁轴线如图 3.23b)所示。随着中柱位移增大，裂缝开始逐渐向两端发展，当中柱位移为 126mm 时，中柱柱头荷载由峰值降为 45.5kN，此阶段加载产生的裂缝主要集中在柱头至 L/3 内，出现较宽的斜裂缝，如图 3.23c)。

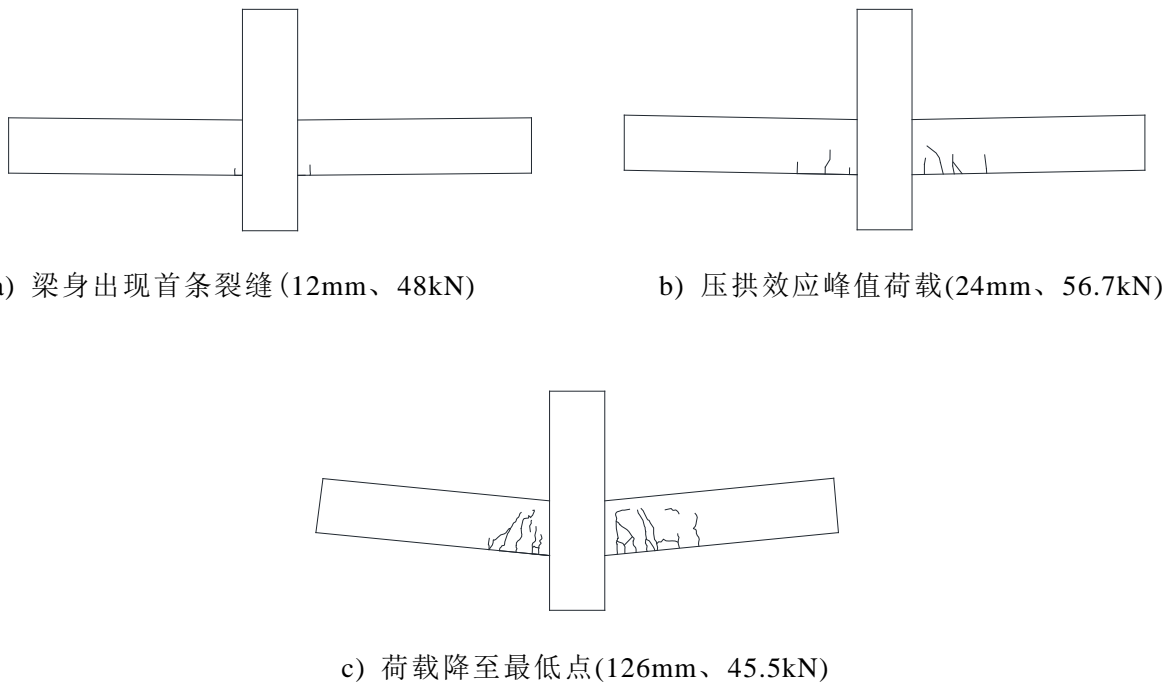
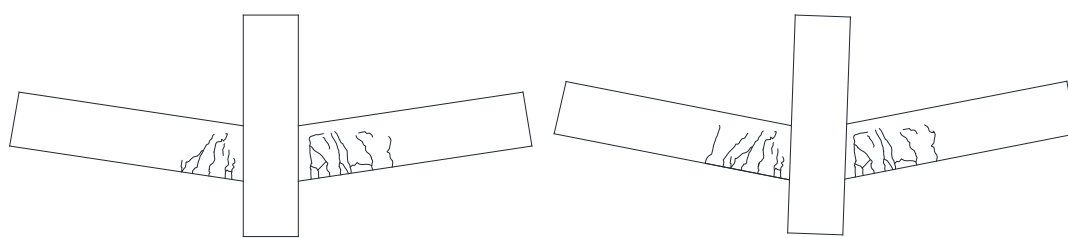


图 3.24 PC1 试件压拱作用效应阶段裂缝图

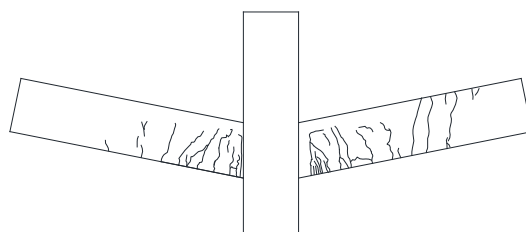
#### 3.6.1.2 悬链线效应阶段裂缝图

图 3.25 为 PC1 试件悬链线效应阶段过程中裂缝图。图 3.25a)中柱位移为 190mm，是梁端轴向压力转为轴向拉力的分界点，此时裂缝主要集中在柱头至 L/3 处继续沿梁高延伸并变宽，继续加载，裂缝开始向梁端发展，中柱位移达到 251mm 时，北侧靠近中柱梁低纵筋同时被拉断试件梁身出现通长裂缝如图 3.245)所示。





a) 压拱效应与悬索效应分界(190mm、61.1kN) b) 悬索效应峰值荷载(250.1mm、105.7kN)



c) 试件最终破坏裂缝(613.9mm)

图 3.25 PC1 试件悬索作用效应阶段裂缝图

图 3.25c)为 PC1 试件最终破坏裂缝分布图。可以看出，在试件梁身均出现了竖向贯穿裂缝，压拱效应阶段没有出现裂缝  $2L/3$  截面的也出现了裂缝，为梁在悬索作用下受到了轴向的拉力所致。北侧梁身裂缝发展更加密集、数量更多。裂缝在梁身分布均匀，是由于试件最终破坏是中柱北侧钢筋断裂造成。加载过程中混凝土剥落严重，说明高温后钢筋混凝土粘结性能变差。

### 3.6.1.3 PC1 试件破坏模式

图 3.26 为 PC1 试件破坏模式照片。试件破坏时中柱北侧梁下部两根钢筋断裂。梁身产生了较多的裂缝，中柱与梁接触面附近尤为严重，这是由于梁钢筋断裂后，混凝土迅速张开，并且高温作用后钢筋混凝土性能变差。两侧梁近中柱端上侧混凝土均被压溃脱落。

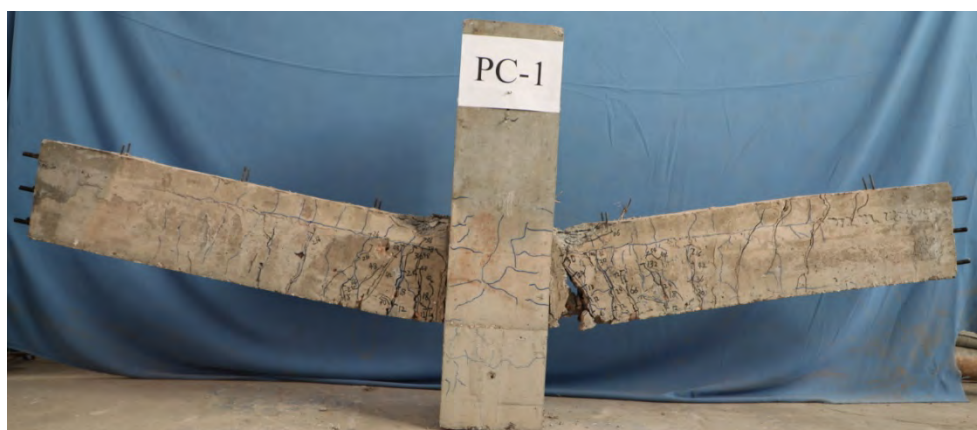


图 3.26 PC1 试件破坏模式图

### 3.6.2 PC2 试件裂缝发展及破坏模式

#### 3.6.2.1 压拱效应阶段裂缝图

图 3.27 为 PC2 试件压拱效应过程中的裂缝分布图。PC2 试件加载至 12mm 时，梁柱交界面处出现首条裂缝，如图 3.27a)所示，此时中柱竖向荷载为 32.2kN。继续加载，梁柱交界面裂缝沿温度裂缝开始发展，中柱位移达到 90mm 时，达到压拱效应峰值荷载 52.2kN，此时梁身裂缝垂直于梁轴线方向，如图 3.27b)所示。之后中柱位移达到 138mm 时，峰值荷载稍有降低为 50.1kN，此时柱头到梁 L/3 处裂缝变宽，并且出现梁底向梁顶的斜向裂缝，如图 3.27c)所示。

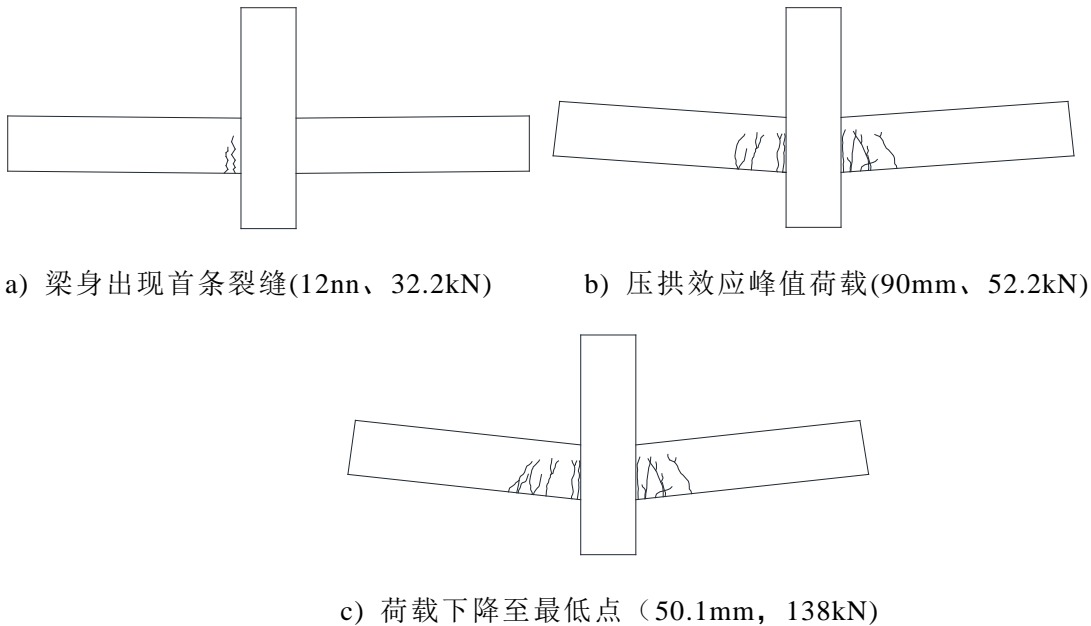
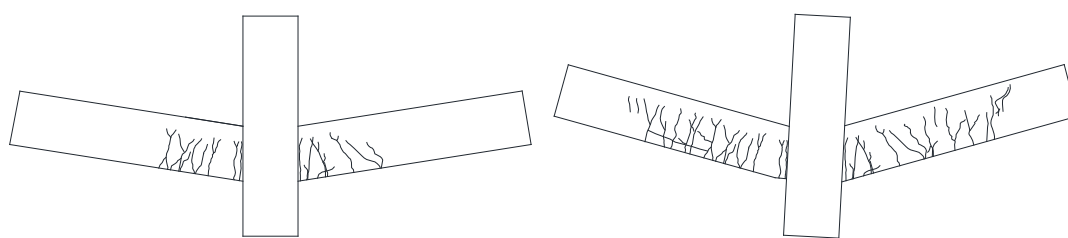


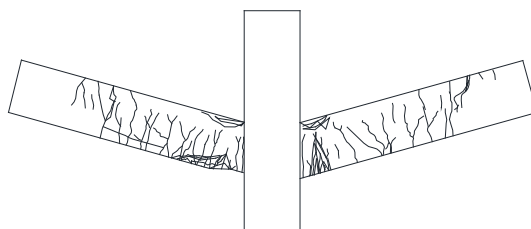
图 3.27 PC2 试件压拱效应裂缝图

#### 3.6.2.2 悬索效应阶段裂缝图

图 3.28 为 PC2 梁柱子结构悬链线阶段裂缝发展图。图 3.28a)中柱位移为 199.5mm，是梁端轴向压力转为轴向拉力的分界点，裂缝集中在柱头至 L/3 梁处继续沿梁高延伸。随着中柱竖向位移的增加，裂缝开始向梁端发展，中柱位移达到 354mm 时，施加荷载升高至第二峰值荷载 170.7kN，南侧靠近中柱梁低纵筋同时被拉断试件梁身出现通长裂缝，梁身裂缝发展均匀，拱效应阶段没有出现裂缝的梁端区域也出现了大量裂缝，说明梁在悬索作用下轴心受拉。由于南侧梁底钢筋断裂，造成南侧裂缝发展更加密集，但南北两侧裂缝出现时间基本一致，说明试件受力约束时对称的，如图 3.28b)所示。



a) 拱效应与悬索效应分界(199.5mm、63kN)    b) 悬索效应峰值荷载 (354mm、170.7kN)

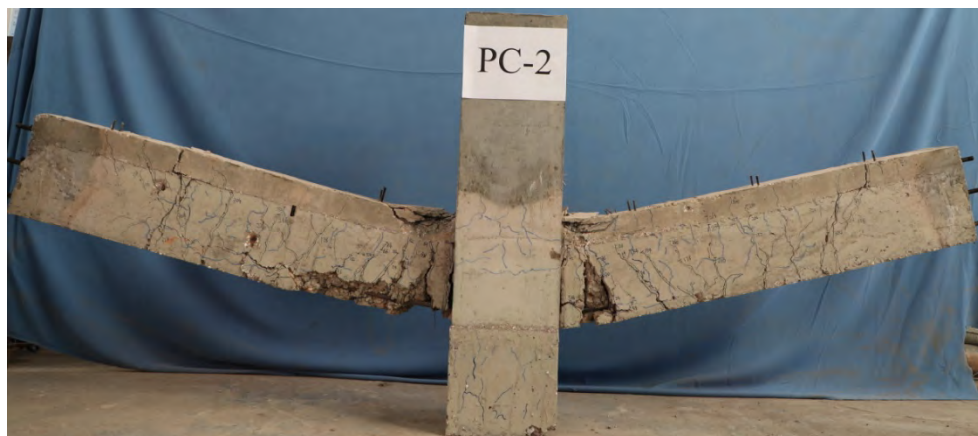


c) 试件最终破坏裂缝(613.9mm)

图 3.28 PC2 试件悬索效应裂缝图

### 3.6.2.3 PC2 试件破坏模式

图 3.29a)为 PC2 试件破坏模式图。中节点南侧梁下表面混凝土全部脱落，梁底钢筋完全暴露。靠近中柱两侧的梁上部混凝土被完全压溃。梁柱交界面处出现一条很宽的裂缝，试件加载过程中梁底 90°锚固钢筋出现滑移现象，这也解释了 PC2 试件悬索效应阶段受力性能强于 RC 试件的原因，试件最终破坏是南侧梁底纵筋被同时拉断造成，图 3.29b)为节点核心区钢筋断裂图。



a) PC2 试件破坏模式图



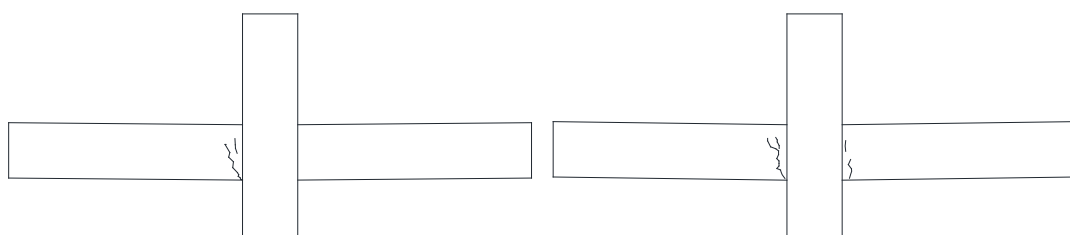
b) 90° 锚固钢筋滑移

图 3.29 PC2 试件破坏模式图

### 3.6.3 PC3 试件裂缝发展及破坏模式

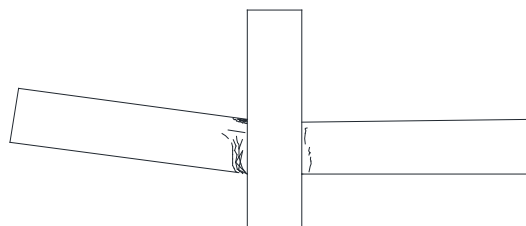
#### 3.6.3.1 压拱效应阶段裂缝图

图 3.30a)为 PC3 试件框架梁开裂图。PC3 试件加载至 11mm 时，梁下侧出现首条裂缝，此时加载荷载为 32kN。加载位移 17mm 时，加载荷载达到拱效应阶段峰值 37kN,此时裂缝主要出现在中柱于南侧梁交界处，如图 3.30b) 所示。随着中柱位移的增加，拱效应阶段荷载逐渐减小，南侧梁柱交界处裂缝扩张，梁身没有新的裂缝产生。加载至 125mm 时，中柱荷载降为 11kN，此时南侧梁柱交界面处现浇混凝土完全开裂，完全露出后浇键槽内混凝土，梁身裂缝较少，如图 3.30c) 所示。



a) 框架梁开裂(11mm、32kN)

b) 压拱效应峰值荷载(17mm、37kN)



c) 荷载下降至最低点(95.95mm、96.9kN)

图 3.30 PC3 试件拱效应阶段裂缝图

### 3.6.3.2 悬链线阶段裂缝图

当中柱竖向位移加载至 154mm 时，中柱施加荷载为 17.5kN，为拱效应与悬索效应分界点，如图 3.31a) 所示，中柱于南侧梁交界处裂缝宽度继续扩展，梁顶部混凝土压溃脱落，北侧梁裂缝较少且发展不明显。继续加载，梁端 2L/3 截面附近出现斜裂缝，加载位移至 254mm 时，承载力达到悬索效应峰值 83kN，如图 3.31b) 所示，中柱与南侧梁交界处裂缝发展，南侧梁端混凝土叠合面处混凝土开裂并沿叠合面延伸。

图 3.31c) 为 PC3 试件破坏时裂缝图，键槽内钢筋滑移失效，承载力突然降低，此时试件梁混凝土叠合层出现较大裂缝，中柱与南侧梁交界处开裂严重，混凝土脱落，箍筋外露，南北两侧均出现贯穿裂缝，但两侧试件梁裂缝发展不均匀，南侧钢筋滑移失效造成南侧梁身裂缝发展数量多宽度大。

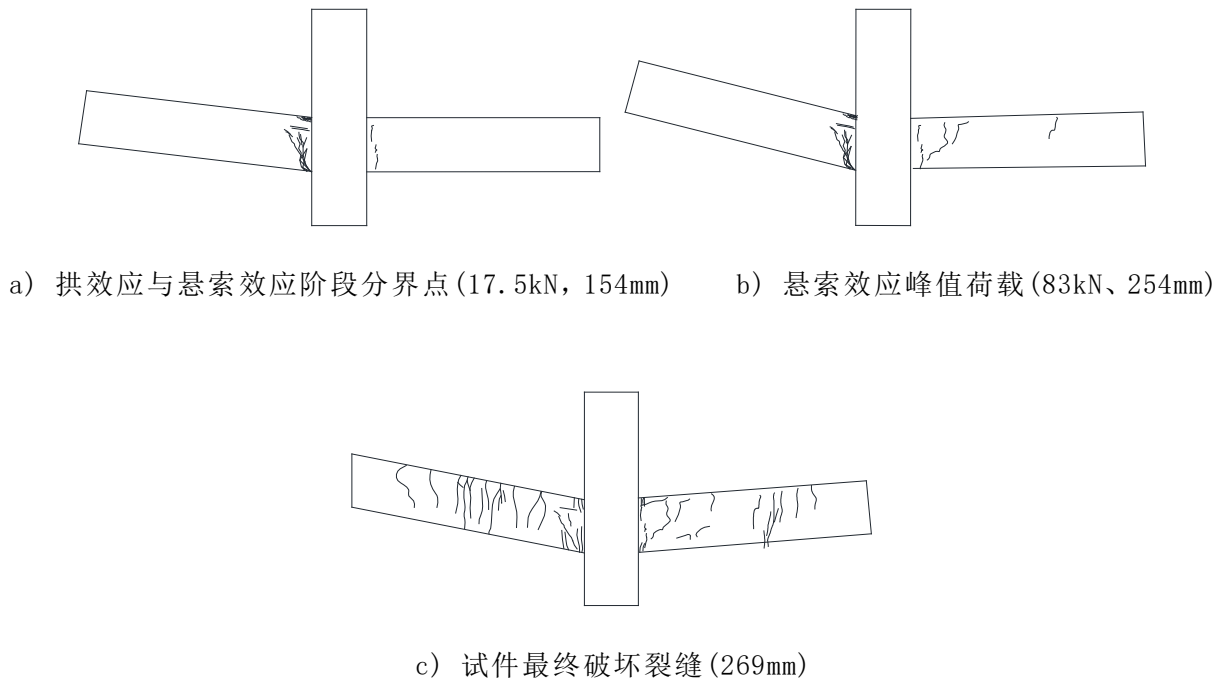


图 3.31 PC3 试件悬索效应阶段裂缝图

### 3.6.3.3 PC3 试件破坏模式

图 3.32 为 PC3 试件破坏模式图。南北两侧梁顶混凝土被压溃脱落，北侧梁柱交界面处出现一条较宽裂缝，南侧梁柱交界面处裂缝开展宽度有 13mm，箱型键槽整体脱出，梁上部混凝土沿叠合面开裂严重，南侧键槽内钢筋滑移导致承载力迅速降低，构件失效。



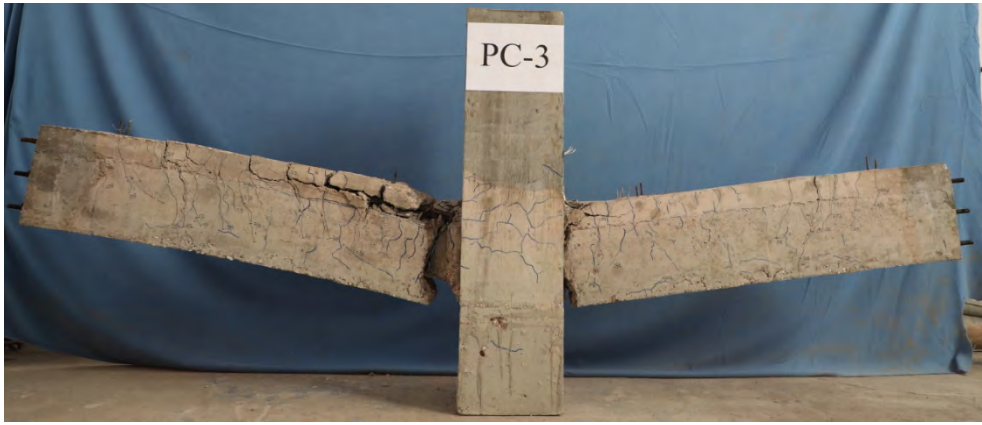
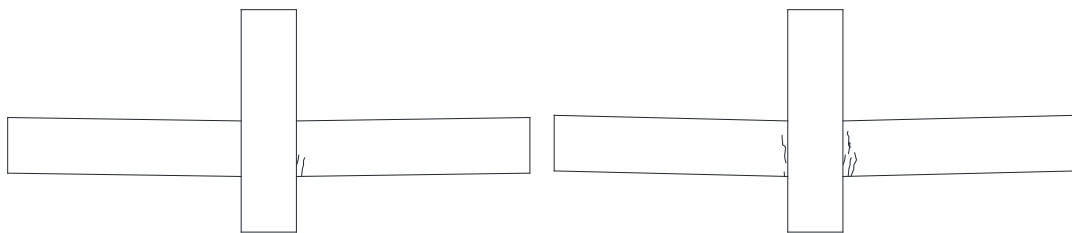


图 3.32 PC3 试件破坏模式图

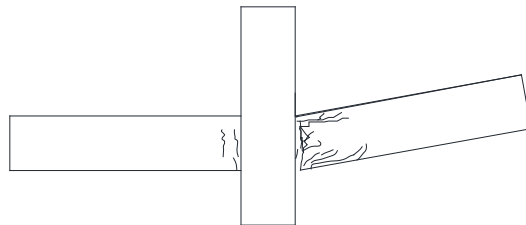
### 3.6.4 PC4 试件裂缝发展及破坏模式

#### 3.6.4.1 压拱效应阶段裂缝图

PC4 试件框架梁开裂图如图 3.33 所示。试件加载至 18mm 施加荷载为 26.6kN 时，北侧梁靠近中柱下侧出现首条裂缝，如图 3.33a)所示。加载位移 30mm 时，达到拱效应阶段峰值 34.7kN,此时，裂缝主要出现并发展在中柱于北侧梁交界处，继续加载，拱效应阶段峰值荷载减小，北侧梁柱交界处裂缝扩张，梁身没有新的裂缝产生，如图 3.33b)所示。加载至 126mm 时，中柱荷载下降至最低点为 14kN，如图 3.33c)所示，此时北侧梁柱交界面处现浇混凝土完全开裂，交界面处梁上侧混凝土被压溃掉落，键槽内混凝土外露，裂缝比较少主要在北侧梁柱交界面处扩张，北侧梁靠近中柱端沿着混凝土叠合面开裂。



a) 试件梁开裂(26.6kN, 18mm)    b) 压拱效应峰值荷载 34.7kN, 30mm)

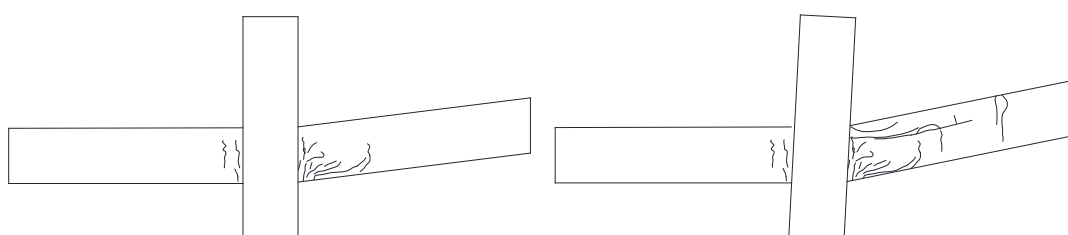


c) 荷载下降至最低点(13.1kN, 126mm)

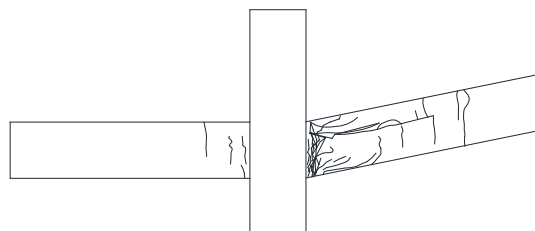
图 3.33 PC4 试件悬索效应阶段裂缝图

### 3.6.4.2 悬链线阶段裂缝图

当中柱位移达到 158mm 中柱施加荷载为 14kN 时，为压拱效应与悬链线效应分界点，北侧梁柱交界面裂缝继续扩展箍筋露出，北侧梁叠合面裂缝向梁端发展且变宽，键槽内混凝土外露如图 3.34a)。加载至 258mm 时达到悬索效应峰值荷载 60.3kN，此时南侧梁几乎无裂缝，裂缝主要发展在北侧梁身，梁柱交界面处裂缝开裂严重，且与梁上侧叠合面裂缝相连在一起，键槽内混凝土及底部钢筋外露，北侧梁身从混凝土叠合面处开裂。图 3.34c)为 PC4 破坏时裂缝图，中柱位移达到 258mm 后，位移继续增加，中柱柱头施加荷载降低，试件梁身变形主要在中节点北侧，梁身裂缝延伸，产生数条贯穿裂缝，北侧近中柱梁端叠合面处裂缝延伸并扩展，键槽内混凝土及钢筋露出。



a) 拱效应与悬索效应阶段分界点(14kN, 158mm)    b) 悬索效应峰值荷载(60.3kN、258mm)



c) 试件最终破坏裂缝(270mm)

图 3.34 PC4 试件悬索效应阶段裂缝图

### 3.6.4.3 PC4 试件破坏模式

试件 PC4 最终破坏图如 3.35 所示，PC4 试件破坏为北侧键槽内混凝土被拉出，北侧梁与中柱接触面处出现很大裂缝，北侧近中柱梁端混凝土叠合面处裂缝张开，北侧梁身出现贯穿裂缝但数量比较少，中柱与南侧梁交界处几乎没有破坏，中柱平面内顺时针转动。



图 3.35 PC4 试件破坏模式图

### 3.7 试验结果讨论

经过对四个 PC 试件试验结果包括升温反应、荷载-位移曲线、轴力-位移曲线、弯矩-转角曲线、弯矩-轴力曲线等对比分析，研究了装配式梁柱子结构高温后受力性能。得到如下讨论：

(1)采用直螺纹套筒连接的 PC1 试件，试件压拱效应峰值荷载与 RC 试件相似，试件最终变形及破坏形态也与现浇构件类似，显示出了“等同现浇”的性能。

(2)采用 90° 弯折锚固节点的 PC2 试件，试验中压拱效应峰值荷载与 RC 试件类似，但悬索效应峰值及最终变形能力均优于 RC 试件，试验过程中弯折钢筋出现滑移，梁底纵筋被拉断导致试件最终破坏。

(3)试验过程中 PC1、PC2 两侧梁裂缝发展类似，在混凝土叠合面处未发展出较宽裂缝，叠合面处未出现明显破坏形态，说明节点处设置的粗糙面使预制部分与后浇部分结合良好。

(4)采用键槽形式连接的 PC3、PC4 试件在试验中受力过程明显区别于 RC 试件，键槽形式连接试件其压拱效应峰值荷载较低，且峰值过后，试件承载力急剧下降。PC3、PC4 试件两边梁裂缝发展不一致，加载过程中均出现柱头偏移情况，试件破坏在梁柱交界面处开始，逐渐在混凝土叠合面处产生，键槽内混凝土箱型脱出，说明预制部分与后浇部分混凝土协同工作性能较差，此类节点预制部分与后浇部分协同性能需进一步加强，如采用更有效的粗糙面设置、键槽内混凝土结合面设置粗糙面等。

(5)不同节点形式对高温后试件受力性能影响很大，本实验采用的四类节点中，高温后受力性能，90°弯折锚固节点性能最好，直螺纹套筒连接性能次之，键槽形式连接的两类节点受力性能相对较差。

### 3.8 本章小结

本章对四梁柱子结构高温后倒塌试验的结果进行了整理分析，对包括极限荷载、极限位移和破坏模式等结果进行了探讨研究，可以得到以下结论：

(1) 本试验高温炉采用电加热方式，升温过程中，各测点温度变化均呈增大趋势，测点距离受火面越近升温速率越快。截面测点温度在 100℃左右会存在一个温度平台，约靠近截面中心此现象越明显。

(2) 通过对四个试件结果的分析，揭示了子结构在移除中柱过程中的受力性能。试件整个受力过程包括压拱效应阶段和悬索效应阶段，尤其是悬索效应阶段的发展，为结构提供防倒塌保障

(3) 装配式试件承载力展现出显示出了“等同现浇”的性能，展示出较了结构防连续倒塌能力。装配式试件 PC1、PC2、PC3、PC4 拱效应峰值荷载分别为 RC 构件的 99.8%、91.9%、65.1%、61.1%，装配式试件 PC1、PC2、PC3、PC4 试件极限位移分别为 RC 构件的 94.4%、133.5%、95.8%、97.4%。展示出较好延性性能。

(4) 现浇试件最终的破坏模式是梁端钢筋被拉断，不能继续承载，钢筋性能得到充分的发挥。装配式试件 PC1 试件破坏模式是梁端钢筋被拉断，PC2 破坏模式为钢筋发生滑移最终被拉断，PC3、PC4 试件破坏模式为键槽内钢筋滑移失效。

## 第4章 高温下梁柱子结构抗连续倒塌试验结果分析

### 4.1 引言

为了研究不同升温-加载路径下装配式混凝土结构抗连续倒塌受力性能,本章基于装配式混凝土梁柱子结构在高温下试验,对四个试件的荷载位移曲线、梁端轴力破坏模式等试验结果进行整理分析,对比极限承载能力和极限位移值的大小。探讨装配式试件高温下荷载转换机制及力学性能变化。

### 4.2 升温反应

高温下试件材料性能劣化严重,高温对混凝土与钢筋之间的粘结性能影响更为严重,高温下试验炉内升温曲线按照 ISO-834 曲线设置,升温 120min 后,为保证试验安全关闭高温炉电源立即进行竖向加载试验,记录试验过程中炉温,预埋热电偶温度、中柱施加荷载及竖向位移、梁端轴力等数据。

#### 4.2.1 炉内升温曲线

图 4.1 为试件 PC5、PC6、PC7 和 PC8 在升温试验过程中炉膛内实测温度曲线与 ISO-834 标准升温曲线对比,火灾炉升温前期升温速率较快,当升温时间达到 10min 时,炉内平均温度达到 460℃左右,升温后期炉内平均温度低于 ISO-834 标准升温曲线,PC 系列试件升温 120min 后炉内最高温度约为 900℃,升温趋势较好地拟合标准升温曲线。

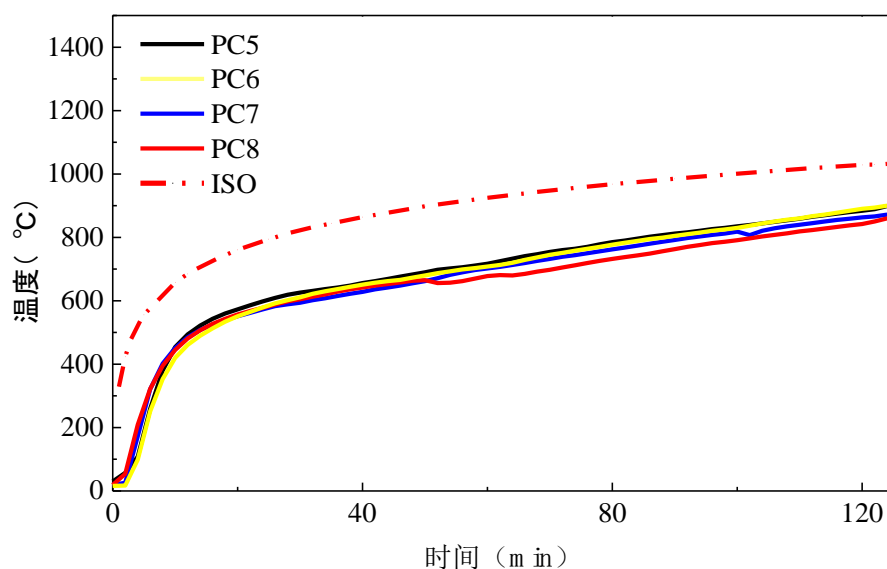
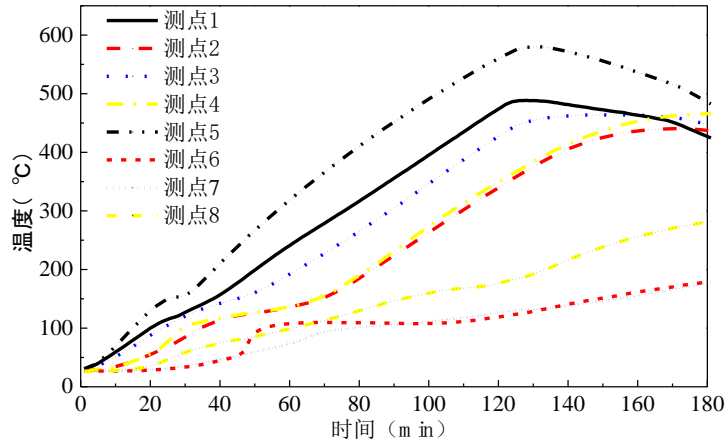


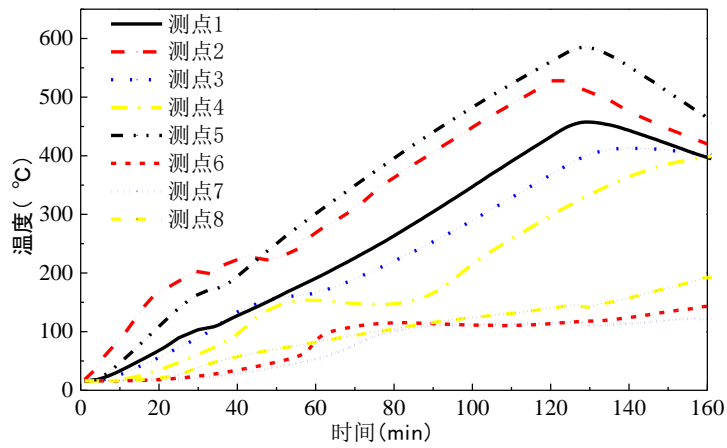
图 4.1 高温下试件升温曲线图

### 4.2.2 温度场测试结果与分析

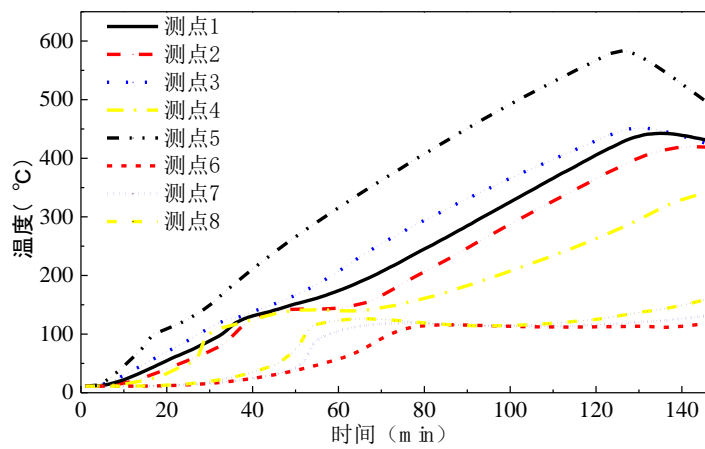
PC 试件的温度场对高温下试件的受力性能影响尤为重要。图 4.2 给出各试件截面内部不同测点温度变化曲线，表 4.1 给出各试件测点内部温度峰值。



a) PC5 试件

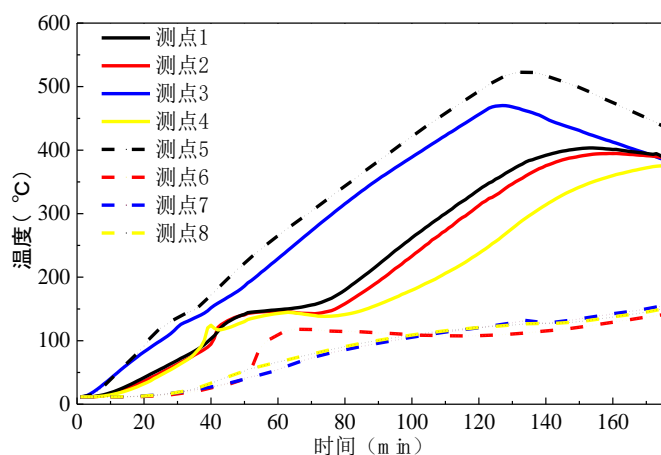


b) PC6 试件



c) PC7 试件





d) PC8 试件

图 4.2 试件截面温度场

表 4.1 PC1-PC4 试件不同测点最高温度

试件 编号	1 号 测点	2 号 测点	3 号 测点	4 号 测点	5 号 测点	6 号 测点	7 号 测点	8 号 测点
PC5	488.5	440.6	463.9	466	580	201.4	209.7	296.6
PC6	457.5	531.6	413	402.1	585	155.4	127.4	201.1
PC7	442.6	419.7	451.3	342.4	583.4	118.5	131.4	159.6
PC8	403.4	394.8	470.2	376.4	522.8	142.5	142.5	152.7

由热电偶温度场可以看出，试件升温 120min 后，进行抗连续倒塌试验过程中，虽然关闭升温炉，但试验内部温度变化不大，表明试验很好的模拟了高温下试验工况。

从表 4.1 及图 4.2 中数据可以看出：

(1) 升温过程中，各测点温度均呈现增大趋势，距离受火面近的测点升温快，部分测点升温曲线出现异常，可能时因为在混凝土浇筑过程中热电偶的位置偏移导致。

(2) 截面温度与高温后试件类似，大部分在 130°C-160°C 附近有一个温度平台，且该测点位置越靠近试件中心该现象约明显。

(3) 整体来看，截面中心温度远低于侧面温度，侧面温度低于底面温度，说明混凝土截面在高温作用下截面温度场分布不均匀，混凝土保护层厚度能减缓钢筋温度增长速度。

### 4.2.3 轴力温度关系

高温下试验轴力与温度变化展现出与高温后相似规律，如图 4.3 所示，总体来看，梁端轴力随温度升高而增大，高温炉内温度在 550°C 之前，轴力增长速度较慢，550°C 之后，轴力增长速度加快。不同试件增长趋势及轴力峰值类似。

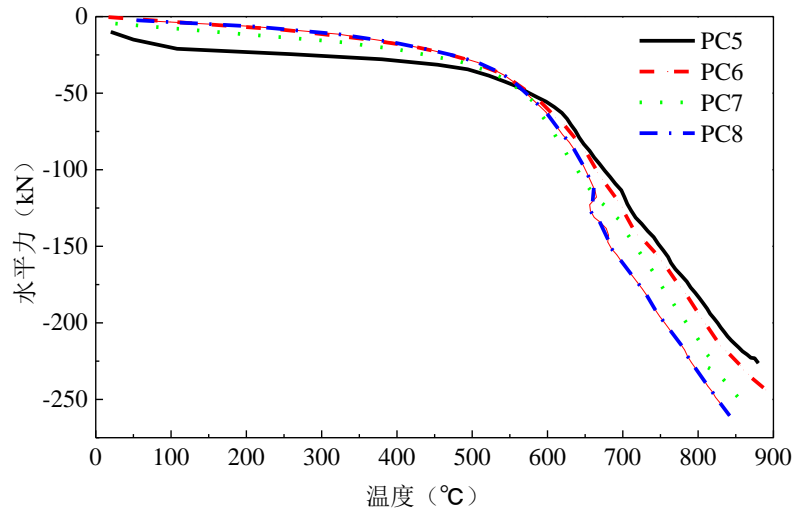


图 4.3 梁端轴力温度关系

### 4.3 荷载-位移曲线及轴力-位移曲线

#### 4.3.1 PC5 试件

图 4.4 为 PC5 试件的荷载位移曲线，图中可以看出，PC5 试件受力过程经历压拱效应阶段，其中 OA 段为弹性阶段，AB 段为塑性阶段，B 点以后为下降段。中柱位移 18mm 内为弹性阶段，试件承载力随中柱位移增加呈现线性增加状态，当中柱位移增加至 36mm 时，中柱施加荷载达到压拱效应峰值 67.1kN，从图中可以看出，荷载位移曲线达到峰值后下降比较陡峭，下降至最低点后荷载并未进入强化阶段，即没有进入悬链线效应阶段。

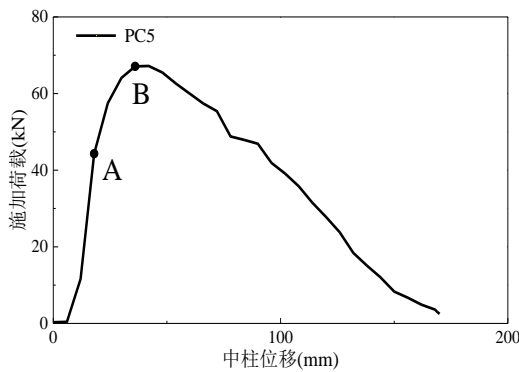


图 4.4 PC5 试件荷载位移曲线

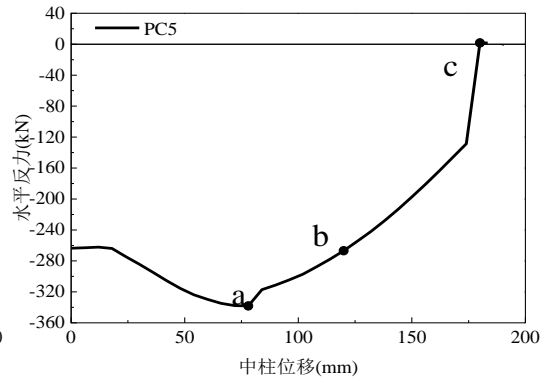


图 4.5 PC5 试件轴力位移曲线

图 4.5 为 PC5 试件加载过程中中柱位移与梁端轴力关系，可以看出，开始加载时，梁端轴向压力比较大，随着中柱位移增大，梁端轴向压力呈现出先增大后减小的趋势，最终破坏时，梁端轴向力减小到 0。整体变化规律与高温后试件类似。试件最终破坏时，梁端轴向力由-128.6kN 变为 1.69kN。

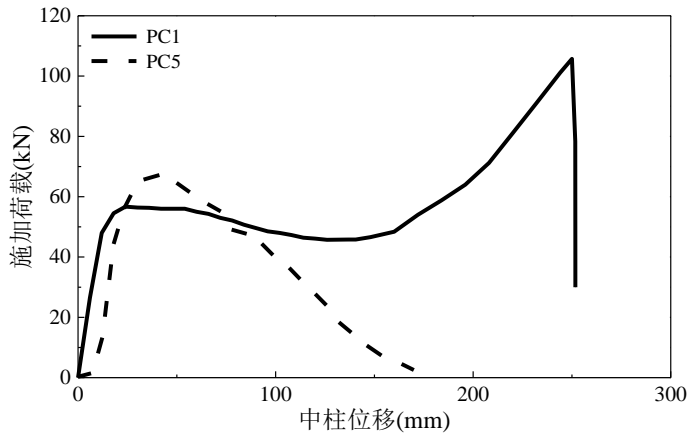


图 4.6 PC1、PC5 试件荷载位移曲线对比

图 4.6 为 PC1 与 PC2 试件荷载位移曲线对比图，高温后试件 PC1 经历了压拱效应和悬索效应两个阶段，而高温下试件 PC5 只经历了压拱效应阶段，PC5 试件压拱效应峰值荷载为 67.1kN，比 PC1 试件压拱效应峰值 56.7kN 提高了 18.3%。试件破坏时，PC1 试件竖向位移为 251.7mm，相比于 PC5 试件破坏时的竖向位移 170mm 提高了 48%，高温下机械套筒节点连接试件虽然提高了压拱效应峰值但试件变形能力大大降低。

### 4.3.2 PC6 试件

图 4.7 为 PC6 试件荷载位移曲线，可以看出 PC6 试件经历了压拱效应和悬索效应两个阶段，其中 OA 段即中柱竖向位移加载至 18.7mm 为弹性阶段，此阶段梁主要经历线弹性范围内的变形，AB 段为弹塑性阶段，B 点为压拱效应峰值，此时中柱竖向位移为 43.9mm，中柱柱头荷载为 67.7kN，压拱效应峰值过后荷载曲线下落比较陡峭，竖向位移为 170.4mm 时，竖向荷载达到最小值 25.4kN 后，荷载逐渐升高，进入强化阶段即悬链线阶段，悬链线阶段峰值荷载为 55.3kN，此时中柱竖向位移为 264.1mm。

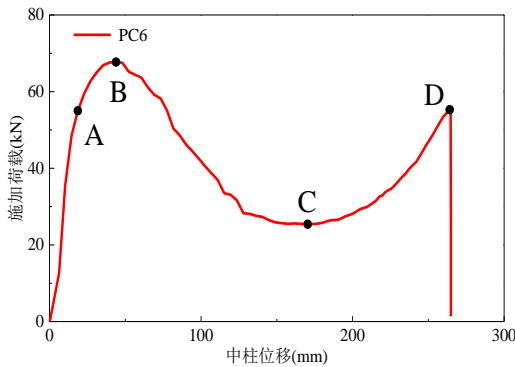


图 4.7 PC6 试件荷载位移曲线

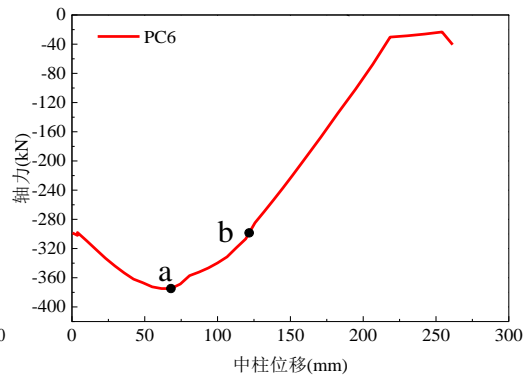


图 4.8 PC6 试件轴力位移曲线

图 4.8 为 PC6 试件加载过程中梁端轴向力变化，可以看出，梁端轴向力始终

未压力，呈现出先增加后减小的发展趋势，试件开始竖向加载时，高温作用在梁端产生轴向压力初始值 298.5kN，其中 a 点为轴向压力峰值 374.8kN，此时竖向位移为 68mm，b 点为轴向压力回到初始加载值的点，此时中柱竖向位移为 121.7mm。

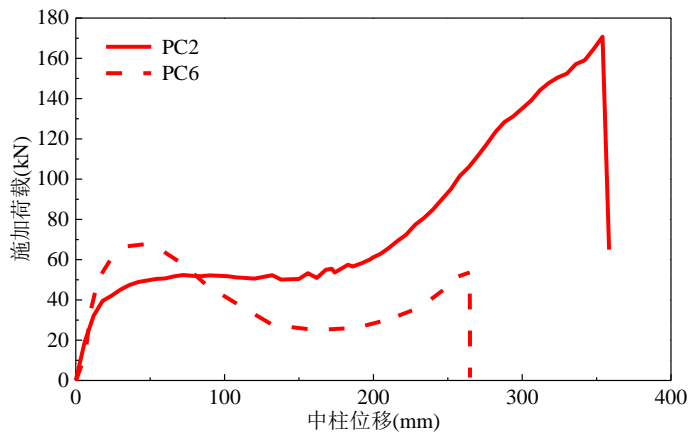


图 4.9 PC2、PC6 试件荷载位移曲线对比

图 4.9 为 PC2 与 PC6 试件荷载位移曲线对比图，可以看出，高温下试件与高温后试件均经历了压拱效应和悬索效应两个阶段，高温下 90°弯钩试件压拱效应峰值为 67.7kN，比高温后压拱效应峰值 52.4kN 高出 29.2%，高温后悬索效应峰值为 170.7 kN，比高温下悬索效应峰值 55.3kN 高出 208%，其中高温后试件达到悬索效应峰值荷载时位移为 354mm，比高温下试件悬索峰值荷载位移 264.1mm 高出 34%。

### 4.3.3 PC7 试件

图 4.10 为 PC7 试件高温下荷载位移曲线，可以看出，高温下 PC7 试件主要经历压拱效应一个阶段，其中加载位移为 0mm-6.69mm 的 OA 段为弹性阶段，6.69mm-45.15mm 的 AB 段为弹塑性阶段，B 点达到压拱效应峰值荷载 72.3kN，B 点以后试件承载力急剧下降。

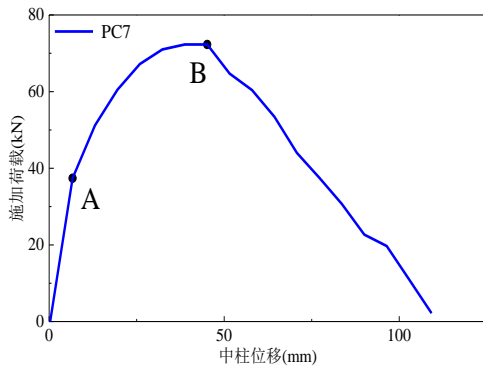


图 4.10 PC7 试件荷载位移曲线

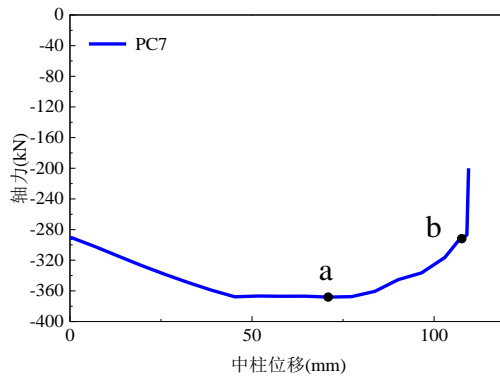


图 4.11 PC7 试件轴力位移曲线

图 4.11 为 PC7 试件加载过程中梁端轴力与中柱竖向位移关系曲线，可以看

出，梁端轴力在试验过程中始终表现为轴向压力，发展趋势为先增大后减小，加载初始阶段由于高温作用，梁端轴向压力为 291kN，当竖向位移加载至 70.91 时，轴向压力达到峰值 368kN，中柱竖向位移达到 109mm 时，梁端轴向压力突然减小。

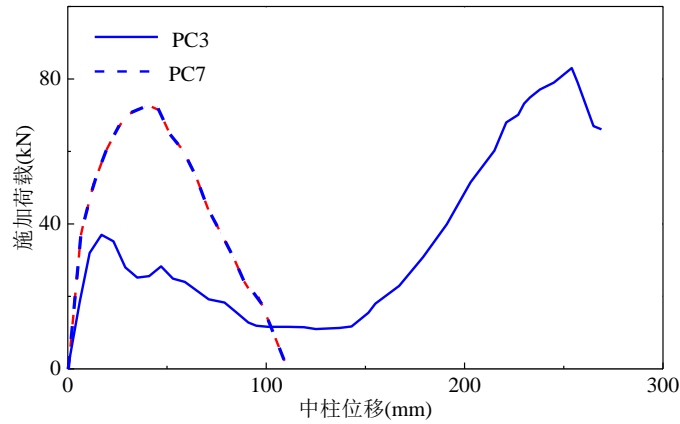


图 4.12 PC3、PC7 试件荷载位移曲线对比

图 4.12 为键槽直钢筋搭接连接节点形式高温后及高温下荷载位移曲线对比图，PC3 为高温后加载，PC7 为高温下加载。可以看出，高温后试件加载过程经历了压拱效应和悬索效应两个阶段，高温下试件加载过程只经历压拱效应阶段。高温下试件压拱效应峰值高出高温后试件 95.4%，但高温后试件破坏时极限位移为高温下试件的 146%，可以看出高温显著影响键槽钢筋搭接节点试件的变形能力。

#### 4.3.4 PC8 试件

图 4.13 为 PC8 试件高温下荷载位移曲线，可以看出，PC8 试件在中柱加载过程中经历了压拱效应和悬索效应两个阶段，其中中柱竖向位移为 0mm-6mm 的 OA 段为弹性阶段，试件梁主要经历弹性变形，中柱竖向位移为 6mm-36mm 的 AB 段为弹塑性阶段，B 点达到压拱效应峰值荷载 70.6kN，中柱继续施加荷载，试件进入塑性铰发展阶段。拱效应峰值过后，中柱荷载下降比较陡峭，中柱位移进行到 162mm 时，荷载达到最小值，此时柱头荷载为 15.4kN，随着中柱位移增加，荷载逐渐上升，进入悬索效应阶段，当中柱位移达到 240mm 时，达到悬索效应峰值 43.6kN。

图 4.14 为 PC8 试件加载过程中梁端轴向力随加载位移变化曲线，可以看出，梁端轴力在加载过程中首先呈现出逐渐增大的轴向压力，随着中柱位移增加，轴向压力逐渐增大到峰值后又减小至 0，最终呈现为逐渐增大的轴向拉力。图中 a 点为轴向压力峰值点，此时中柱竖向位移为 51.8mm，梁端轴向压力为 369.3kN。b 点轴向压力由峰值减小到初始轴向压力，此时中柱位移为 119mm。c 点为轴向压

力转化为轴向拉力的临界点，此时中柱竖向位移为 213mm。

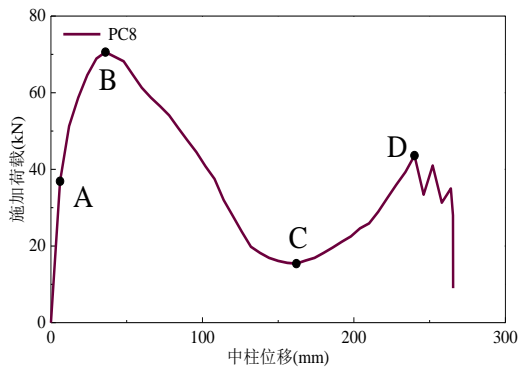


图 4.13 PC8 试件荷载位移曲线

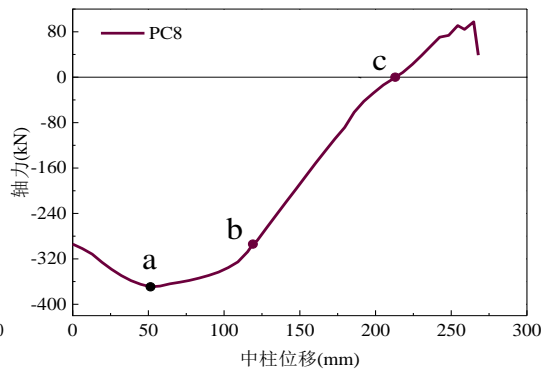


图 4.14 PC8 试件轴力位移曲线

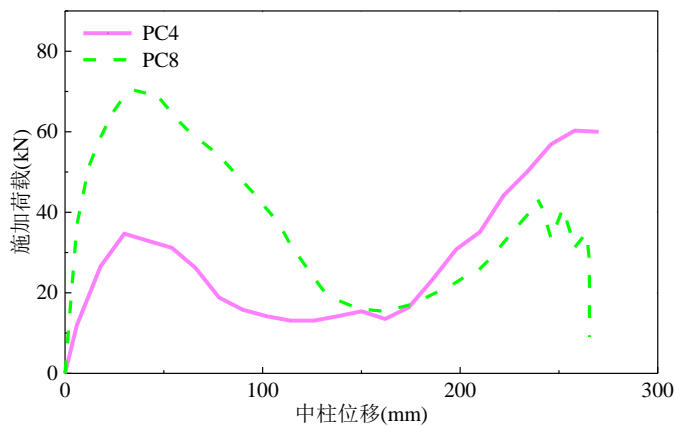


图 4.15 PC4、PC8 试件荷载位移曲线对比

图 4.15 为世构体系连接节点形式高温后及高温下荷载位移曲线对比图，PC4 为高温后加载，PC8 为高温下加载。可以看出，高温后及高温下试件加载过程经历了压拱效应和悬索效应两个阶段，高温下试件压拱效应峰值 70.6kN，高温后试件压拱效应峰值仅为 34.7kN，高温下悬索效应荷载峰值为 43.6kN，低于高温后悬索效应峰值 60.3kN，悬索效应峰值时，高温下试件极限位移为 252mm，高温后试件极限位移为 258mm。

#### 4.3.5 荷载-位移曲线对比

图 4.16 为高温下系列装配式混凝土梁柱子结构荷载位移曲线对比示意图，可以看出 PC5 和 PC7 试件加载过程荷载达到峰值后迅速下降，直到试件破坏，可认为其受力过程主要经历压拱效应一个阶段。而 PC6 和 PC8 试件加载过程中试件达到压拱效应峰值后荷载下降，但随着加载继续进行，柱头荷载又增长至第二峰值，可认为其受力过程分为压拱效应与悬索效应两个阶段。PC6 试件压拱效应峰值荷载为 67.7kN，悬索效应峰值荷载为 55.3kN，是压拱效应荷载峰值地 82%。PC8 试件压拱效应峰值荷载为 70.6kN，悬索效应峰值荷载为 43.6kN，是压拱效应



峰值荷载的 62%。相比之下，PC5 和 PC7 试件近经历压拱效应一个阶段，压拱效应峰值荷载分别为 67.2kN 和 72.3kN。可以看出，高温下试件压拱效应峰值过后荷载位移曲线下降较为陡峭。PC5 和 PC7 试件破坏时极限位移较小，分别为 170mm 和 109.2mm，相比之下，PC6 和 PC8 试件破坏时极限位移分别为 264.9mm 和 265.5mm。结果表明，高温下抗连续倒塌试验中采用 90 度弯钩节点连接和采用世构体系节点连接的 PC 试件受力性能优于采用直螺纹套筒节点连接和键槽搭接节点连接的 PC 试件。

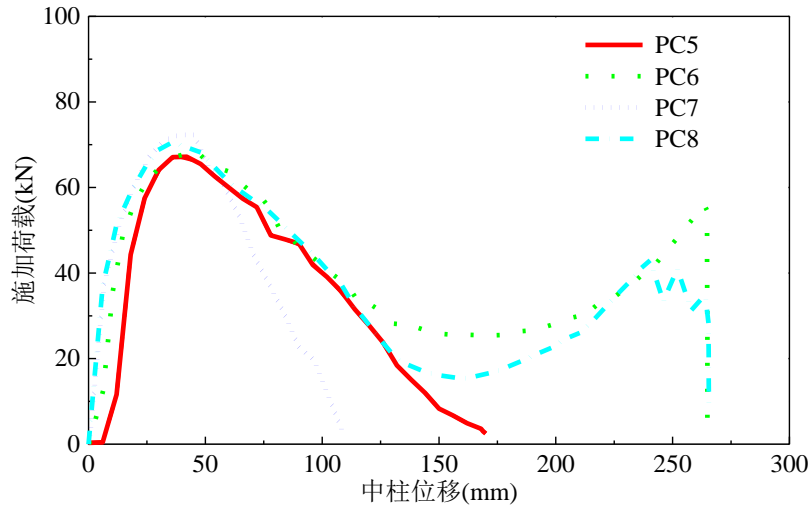


图 4.16 高温下试件荷载位移曲线对比

## 4.4 转角弯矩曲线及弯矩轴力曲线

### 4.4.1 PC5、PC6 试件

图 4.17 为 PC5、PC6 试件在加载过程中梁柱交界面处弯矩转角关系曲线，可以看出，试件转角较小时，弯矩呈现出线性增加趋势，此阶段梁柱交界面处抗弯刚度最大。此后，随着转角增加，梁截面抗弯刚度开始下降。界面弯矩达到峰值后，弯矩开始下降，PC5、PC6 试件，当梁底纵筋被拉断后，弯矩急剧下降。试件 PC5、PC6 峰值弯矩分别为 68.3kN·m、70.1 kN·m。极限转角分别为 0.120rad 和 0.171rad。

图 4.18 为 PC1、PC2、PC5、PC6 试件转角弯矩曲线对比图，可以看出，高温下 PC 试件峰值弯矩大于高温后 PC 试件峰值弯矩，这与初始加载时，高温下试件梁端轴向压力有关。达到弯矩承载力峰值后，高温下试件弯矩承载力退化比较快，高温后试件转动能力优于高温下试件。

图 4.19 为 PC5、PC6 试件弯矩水平反力变化曲线图，由图可知，试件在加载过程中梁端轴力始终表现为压力，加载过程可以分为压弯阶段和压弯退化阶段。在压弯阶段，由于高温作用对试件产生了初始轴向压力，试件在加载初始阶段就