

学校代号 10532

学 号 S160100149

分 类 号 TU375.4

密 级 公 开



湖南大学  
HUNAN UNIVERSITY

## 硕士学位论文

# 高温下装配式混凝土框架结构 抗连续倒塌性能试验研究

学位申请人姓名 王振生

培 养 单 位 土木工程学院

导师姓名及职称 廖莎副教授

学 科 专 业 结构工程

研 究 方 向 装配式结构

论文提交日期 2019年6月14日

学校代号：10532

学 号：S160100149

密 级：公开

湖南大学硕士学位论文

# 高温下装配式混凝土框架子结构抗连续 倒塌性能试验研究

国家重点研发计划项目(2016YFC0701400, 2016YFC0701308)

湖南省重点研发计划项目(2017SK2220)

长沙市科技计划项目(kq1706019)

学位申请人姓名：王振生

导师姓名及职称：廖莎副教授

培 养 单 位：土木工程学院

专 业 名 称：结构工程

论 文 提 交 日 期：2019 年 6 月 14 日

论 文 答 辩 日 期：2019 年 6 月 19 日

答 辩 委 员 会 主 席：易伟建教授

Experimental study on progressive collapse of precast concrete frame  
structures under fire

by

WANG Zhensheng

June, 2019

B.E. (Hunan University) 2015

A thesis submitted in partial satisfaction of the

Requirements for the degree of

Master of Engineering

in

Structural Engineering

in the

Graduate School

of

Hunan University

Supervisor

Associate Professor LIAO Sha

June, 2019



# 湖南大学

## 学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的论文是本人在导师的指导下独立进行研究所取得的研究成果。除了文中特别加以标注引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写的成果作品。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

作者签名：

日期： 年 月 日

## 学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权湖南大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

本学位论文属于

1、保密 ，在\_\_\_\_\_年解密后适用本授权书。

2、不保密 。

(请在以上相应方框内打“√”)

作者签名：

日期： 年 月 日

导师签名：

日期： 年 月

## 摘 要

建筑火灾已成为影响建筑寿命的最大威胁之一，装配式结构由于其质量好、节能环保、节约人力等优势在工程中已得到广泛应用。偶然荷载如爆炸、撞击、燃气泄漏、车祸往往引起不同程度的火灾，严重影响人民群众生命和财产安全。结构在遭遇偶然荷载受损后，高温受力性能值得研究。火灾引起的结构连续性倒塌，主要是由于结构在高温作用下的承载力下降所致。深入研究装配式梁柱节点高温下和高温后力学性能，对于以后的结构设计，防火设计及火灾后评估具有重要意义。研究装配式混凝土梁柱子结构高温下和高温后抗连续倒塌试验受力性能，讨论高温作用下构件荷载转换机制，主要工作如下：

(1) 按照规范设计了 8 个梁柱子结构试件，装配式试件梁柱分别采用机械套筒连接、90 度弯折锚固连接、键槽钢筋搭接、世构体系节点连接等方式连接。完成了梁柱子结构试件高温下及高温后试验。

(2) 获取高温作用下试件截面温度场随试件变化曲线，为装配式梁柱子结构高温受力分析提供依据。分析对每个试件的荷载位移曲线，柱变形曲线及梁端轴力变化，研究了预制钢筋混凝土梁柱节点的高温应力机理，并进一步分析了梁柱节点的高温抗倒塌力学性能。

(3) 对不同升温加载路径下试件受力性能，破坏形态进行对比，探究不同升温加载途径下，装配式混凝土梁柱子结构承载力及破坏模式异同。对装配式梁柱子结构破坏形态进行分析，同时对试验中构件转动性能进行分析，探究装配式梁柱子结构高温下及高温后变形性能。

(4) 进行了两榀全装配式(PC)试件进行静载试验研究。其中装配式结构在梁柱节点处采用高强螺栓-延性杆-锚固板的连接方式，其中 PC1 试件未设置牛腿，PC2 试件采用暗牛腿，另外结合一榀本团队开展的现浇框架结构 RC 试件进行对比研究。对两个试件分别进行了中柱移除状态下的竖向加载拟静力试验，并对加载过程中测试所获得的结构极限承载力、应变响应、变形性能及失效破坏模式依次进行了分析。

**关键词：**装配式混凝土；防连续倒塌；火灾作用；梁柱节点；力学性能

## Abstract

Building fire has become one of the biggest threats to the life of buildings. The precast concrete structure has been widely used in engineering because of its good quality, energy saving and environmental protection, and manpower saving. Accidental loads such as explosions, impacts, gas leaks, and car accidents cause fire disasters. After the structure is damaged by accident, the high temperature stress performance is worth studying. Structural collapse may be initiated by a stability mechanism as a result of geometry changes caused by thermal expansion effects, particularly when temperatures are not high enough to generate significant reduction in material properties. In-depth study of the mechanical properties of the precast beam-column joints under high temperature is of great significance for future structural design, fire protection design and post-fire evaluation. In this paper, the precast concrete beam column substructure is taken as the research object. The main work is as follows:

(1) In this paper, a space frame structure is designed by PKPM. Eight half-scale beams-column substructure specimens were designed. Each specimen contains one column and two half beams. The precast specimen beam and column were respectively connected by mechanical sleeves joint, 90 bend anchored joint, lap-spliced joint and scope system joint. The test of the beam-column structure specimen under high temperature was completed.

(2) Recording the temperature field of the precast beam-column joints under different fire scenario, and obtaining the temperature variation law of each measuring point of the section, which provides a basis for the high-temperature stress analysis of the precast beam-column structure. The load-displacement curve, column deformation curve and axial force variation of the beam were analyzed. The high-temperature stress mechanism of the precast reinforced concrete beam-column joints was analyzed, and the high-temperature collapse mechanical properties of the beam-column joints were further analyzed.

(3) Comparing the mechanical properties and failure modes of the specimens under different fire scenario and exploring the similarities and differences of the bearing capacity and failure modes of the fabricated concrete beam columns under different heating loading paths. The failure mode of the fabricated beam-column

substructure is analyzed. The position and order of the plastic hinges of the joints are compared at high temperature and high temperature. At the same time, the rotational performance of the components in the test is analyzed to explore the high temperature and high temperature of the fabricated beam and column structure. Post-deformation performance.

(4) To research the progressive collapse resistance performance of fully assembled precast concrete frame structure, two half-scale precast concrete (PC) specimens were designed. The PC specimens were built by high-strength bolt and anchor plate with ductile rod connections in the beam-column joint region, where PC1 was designed without corbel component while the hided corbel was employed in PC2. The static load test was conducted for the specimens under mid-column loss scenario, and the structure response of ultimate loading capacity, strain response, deformation performance and failure mode were discussed, respectively.

**Key Words:** Precast concrete structure; Progressive collapse; Beam-column connection; Exposure to fire

## 目 录

学位论文原创性声明 .....	I
学位论文版权使用授权书 .....	I
摘要 .....	II
<b>第 1 章 绪论</b> .....	<b>1</b>
1.1 选题背景及意义 .....	1
1.2 装配式混凝土框架结构抗连续倒塌研究进展 .....	2
1.2.1 装配式混凝土节点研究进展 .....	2
1.2.2 混凝土结构抗连续倒塌研究进展 .....	4
1.2.3 装配式框架节点抗连续倒塌研究 .....	6
1.3 装配式结构节点在高温下研究进展 .....	7
1.3.1 节点高温研究进展 .....	7
1.3.2 装配式混凝土结构在高温下研究进展 .....	9
1.4 本文研究背景 .....	11
<b>第 2 章 装配式梁柱子结构高温抗连续倒塌试验设计</b> .....	<b>12</b>
2.1 引言 .....	12
2.2 试验目的 .....	12
2.3 原型结构设计 .....	12
2.4 结构设计 .....	13
2.5 试验加载测量方案 .....	18
2.5.1 试验升温设备 .....	18
2.5.2 加载装置 .....	19
2.5.3 试验测量方案 .....	22
<b>第 3 章 高温后梁柱子结构抗连续倒塌试验结果分析</b> .....	<b>25</b>
3.1 引言 .....	25
3.2 高温后试验现象及试件形态 .....	25
3.2.1 PC1 试件 .....	25
3.2.2 PC2 试件 .....	26
3.2.3 PC3 试件 .....	26
3.2.4 PC4 试件 .....	27
3.2.5 小结 .....	28

3.3 升温反应 .....	28
3.3.1 炉内升温曲线 .....	28
3.3.2 温度场测试结果与分析 .....	29
3.3.3 轴力-温度-和轴力-时间试件关系曲线 .....	31
3.4 荷载-位移曲线及轴力-位移曲线 .....	32
3.4.1 PC1 试件 .....	32
3.4.2 PC2 试件 .....	33
3.4.3 PC3 试件 .....	34
3.4.4 PC4 试件 .....	35
3.4.5 荷载-位移及轴力-位移曲线对比分析 .....	36
3.5 弯矩-转角及弯矩-轴力曲线 .....	39
3.5.1 PC1、PC2 试件弯矩转角曲线 .....	39
3.5.2 PC3、PC4 试件弯矩转角曲线 .....	40
3.6 试件裂缝发展及破坏模式 .....	42
3.6.1 PC1 试件裂缝发展及破坏模式 .....	42
3.6.2 PC2 试件裂缝发展及破坏模式 .....	44
3.6.3 PC3 试件裂缝发展及破坏模式 .....	46
3.6.4 PC4 试件裂缝发展及破坏模式 .....	48
3.7 试验结果讨论 .....	50
3.8 本章小结 .....	51
<b>第 4 章 高温下梁柱子结构抗连续倒塌试验结果分析 .....</b>	<b>52</b>
4.1 引言 .....	52
4.2 升温反应 .....	52
4.2.1 炉内升温曲线 .....	52
4.2.2 温度场测试结果与分析 .....	53
4.2.3 轴力温度关系 .....	54
4.3 荷载-位移曲线及轴力-位移曲线 .....	55
4.3.1 PC5 试件 .....	55
4.3.2 PC6 试件 .....	56
4.3.3 PC7 试件 .....	57
4.3.4 PC8 试件 .....	58
4.3.5 荷载-位移曲线对比 .....	59
4.4 转角弯矩曲线及弯矩轴力曲线 .....	60
4.4.1 PC5、PC6 试件 .....	60

4.4.2 PC7、PC8 试件 .....	62
4.5 高温下试件裂缝及破坏模式 .....	63
4.5.1 PC5 试件 .....	63
4.5.2 PC6 试件 .....	64
4.5.3 PC7 试件 .....	65
4.5.4 PC8 试件 .....	65
4.6 试验结果讨论 .....	66
4.7 本章小结 .....	67
<b>第 5 章 延性杆连接节点的全装配式混凝土框架子结构抗连续倒塌试验研究 .....</b>	<b>68</b>
5.1 引言 .....	68
5.2 试件设计与试验装置 .....	68
5.2.1 试件的设计与制作 .....	68
5.2.2 试验装置 .....	71
5.3 试验方案 .....	73
5.3.1 试验测量方案 .....	73
5.3.2 试验加载方案 .....	74
5.4 试验结果 .....	76
5.4.1 荷载位移曲线及边节点侧移曲线 .....	76
5.4.2 边柱反弯点约束刚度 .....	78
5.4.3 截面应变变化 .....	79
5.4.4 结构变形 .....	81
5.4.5 结构失效特征 .....	83
5.4.6 试验结果讨论 .....	86
5.5 本章小结 .....	86
<b>结论与展望 .....</b>	<b>87</b>
<b>参考文献 .....</b>	<b>89</b>
<b>致谢 .....</b>	<b>94</b>
<b>附录 A (攻读学位期间所发表的学术论文) .....</b>	<b>95</b>



# 第1章 绪 论

## 1.1 选题背景及意义

装配式建筑是指建筑的部分或全部构件在建筑的装配厂生产，然后通过相应的运输方式运至施工现场。构件通过可靠的安装和安装机械进行组装，成为具有使用功能的建筑物施工方法。在许多发达国家中，装配式混凝土建筑是建筑工业化最重要的方式，它具有提高施工质量、缩短施工工期、节约人力、减少能源消耗等优点。由于可以通过工厂标准化制造，装配式建筑在质量、效率、环保、等方面较传统建筑方式有明显的优势，大力推广装配式建筑是建筑业工业化和建筑产业化不可逆转的趋势。对比传统现浇建筑，预制建筑可以将建设周期缩短 25-30%，节约用水 50-60%，节约大约 80%的木材，减少建筑能耗约 20%，减少建筑垃圾 70%-80%，并大幅减少施工扬尘和噪声污染。

国务院 71 号文件中明确提出“发展装配式建筑是建造方式的重大变革”，主要是指从传统粗放建造方式向新型工业化建造方式的转变，这是新时代我国建筑业从高速增长阶段向高质量发展阶段转变的必然要求,是推进供给侧结构性改革、培育新产业新动能、促进建筑业转型升级的重要举措。有利于节约资源能源、减少环境污染，装配式建造与传统建造方式相比具有一定的先进性和科学性，这一新的建造方式不仅表现在建造技术上，更重要体现在企业的经营理念、组织内涵和核心能力方面发生了均根本性变革，是一场生产方式的革命。

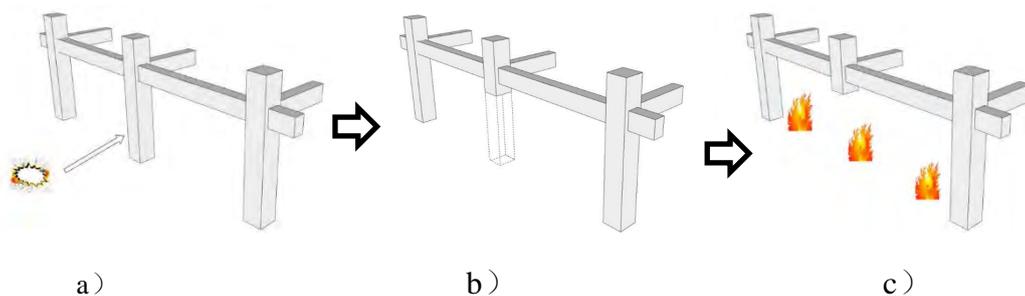


图 1.1 多灾害场景

美国纽约“9.11”世贸中心遭恐怖袭击后而发生倒塌，造成了死亡 2797 人、损失 360 亿美元的举世震惊惨案；湖南衡阳“11.3”大火造成的建筑倒塌事故，原因就是大厦西北部柱子受损，继而引起结构连续倒塌，导致 20 名消防官兵牺牲，创造了新中国一次火灾事故消防官兵牺牲之最。针对结构面临多灾害耦合的现实，框架结构在极端事件(如爆炸或撞击)后发生火灾，容易造成结构的连续性倒塌。本文中所考虑的多灾害场景如图 1.1 所示，依次为:(1)爆炸或撞击等偶然荷载作用

在结构上。(2) 框架柱失效, 荷载重新分配。(3) 在偶然荷载作用位置发生火灾。偶然荷载火灾事故往往先造成结构局部破坏, 再引起结构连续性倒塌。频发的建筑火灾倒塌事故, 为新时期的科学研究提出了严峻的挑战。随着温度的升高, 混凝土的质量损失逐渐增大而抗压强度整体呈下降趋势, 800℃ 的高温作用后混凝土抗压强度基本丧失, 相比于常温其损失程度高达 85.4%<sup>[1]</sup>。高温后钢筋屈服强度、极限强度在 100~400℃ 范围内变化不大甚至极限强度略有提高, 当超过 400℃ 后强度有所降低, 在 600℃ 时屈服强度下降 15%、极限强度下降 12%, 高温下黏结强度变化趋势与混凝土抗拉强度衰减趋势基本一致, 但高于 200℃ 时黏结强度退化趋势明显缓于混凝土抗拉强度, 高温后的钢筋屈服强度退化比极限强度更加严重<sup>[2]</sup>。研究和探讨各类结构建筑在火灾作用下的破坏倒塌特征及规律, 对于减少此类火灾事故中的人员伤亡和财产损失具有重要的现实意义。装配式混凝土结构较传统现浇结构而言, 区别主要在于梁、板等构件的连接方式。开展针对装配式混凝土框架节点高温受力性能研究与分析, 对装配式结构防火和连续性倒塌机理具有重要意义。

## 1.2 装配式混凝土框架结构抗连续倒塌研究进展

### 1.2.1 装配式混凝土节点研究进展

1950 年左右, 欧洲一些国家开始使用工业化方式建造了大量住宅。对此, 各国学者对于装配式混凝土结构开始进行大量的研究。

1995 年 Restrepo 等<sup>[3]</sup>进行了 6 个框架子结构低周往复试验, 2 个试件节点处后浇混凝土, 其余四个采用跨中后浇混凝土连接, 探究不同连接区域框架子结构的延性、刚度及耗能性能。试验表明: 此类预制构件在性能上可以等同现浇结构。

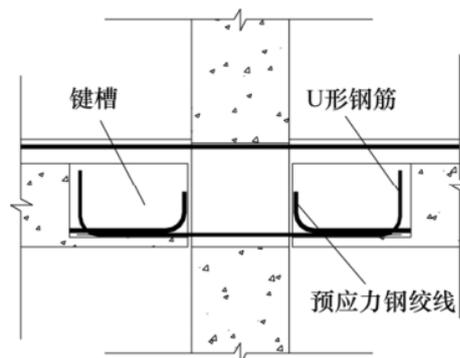


图 1. 结构体系节点图<sup>[3]</sup>

2005 年 Joshi 等<sup>[4]</sup>进行了 4 个梁柱节点试验, 其中 2 个现浇节点, 2 个装配式节点。装配式节点形式分别为 U 型钢筋锚固和钢筋焊接形式。试验结果表明: 低周往复试验下, U 型钢近锚固形式节点性能弱于现浇节点, 而焊接连接节点性能

强于现浇节点。

2006年朱洪进<sup>[5]</sup>进行了不同键槽长度的 Scope(世构)体系中节点(如图 1.2)的低周往复加载试验,分析了不同键槽长度的世构体系滞回曲线、节点延性、耗能情况和刚度变化等情况,对节点的受力机制、破坏类型、失效方式、节点中钢筋滑移情况及塑性铰长度进行讨论。试验表明:世构体系节点抗震性能满足抗震需求。

2006年 Ertas 等<sup>[6]</sup>进行了 5 个混凝土框架节点低周往复试验,其中包括 1 个现浇试件 4 个装配式试件。装配式节点连接形式包括组合梁后浇混凝土及螺栓连接形式。试验结果表明:试验中所采用的装配式节点形式均能达到计算的极限承载力。

2009年蔡建国等<sup>[7]</sup>对一种从法国引进的新型预制预应力混凝土框架结构体系-世构体系(Scope system)进行了相关研究,该体系节点构造由预制预应力叠合梁和预制柱组成,通过键槽内的 U 形钢筋将两者连接。作者通过对三个采用该体系的 U 形钢筋长短不同的梁柱节点进行低周往复试验,并采用 OpenSees 分析软件对一榀两跨三层的框架进行抗震性能分析。研究结果表明:该体系梁柱节点耗能能力强,试验滞回曲线饱满,具有理想的抗震性能;同时 U 形钢筋长短的不同对于采用该体系的梁柱节点屈服荷载影响不大。

2010年窦祖融等<sup>[8]</sup>进行了 2 个足尺 PC 梁柱节点低周往复试验。试验结果表明:剪跨比减小,试验耗能能力提高。

2011年陈适才等<sup>[9]</sup>进行了一个足尺预制梁-柱-胶合板 PC 试件低周往复试验,研究 PC 试件的破坏模式、延性及耗能情况。试验结果与现浇试件进行比较,并运营 OpenSees 对 PC 节点进行数值模拟,分析 PC 试件承载能力。

2013年 Im 等<sup>[10]</sup>进行了 6 个带 U 型键槽的 PC 梁柱节点静力试验,比较了梁配筋、梁端钢筋长度及梁端增设角钢对试件受力影响。试验表明:装配式试件受力性能类似于现浇试件,但由于节点核心区钢筋滑移,节点刚度和耗能能力相对现浇有所欠缺,可通过节点处构造如增设角钢、增大梁配筋率等改善。

2014年 Parastesh 等<sup>[11]</sup>提出了一种通过在梁端键槽内与钢筋搭接再后浇混凝土的节点,节点处增设角钢,减少节点核心区剪切裂缝,避免发生突然破坏。试验证明:该类节点形式延性及耗能能力良好。

2014年 Ha 等<sup>[12]</sup>进行了三个梁柱节点试件试验,提出一种梁底部连接钢筋为封闭 U 型预应力钢绞线形式节点构造,试验表明:在梁端设置附加钢筋及 U 型封闭预应力钢绞线后,节点的性能可以达到等同现浇。

2015年 Yuksel 等<sup>[13]</sup>进行了 PC 湿节点连接形式及 PC 干节点连接形式试件的低周反复试验。试验表明:两类预制节点在层间位移角 2%时具有较好的耗能能力,节点区域在层间位移角 3%时发生破坏。

2016年郭正兴等<sup>[14]</sup>提出一种新型框架节点(如图1.3)。梁端键槽中的箍筋是加密的,钢绞线的一端深入节点的核心区域,一端锚固在预制梁式键槽中。试验研究表明:改进的梁柱节点结构可以有效提高组合整体梁柱节点的承载力。

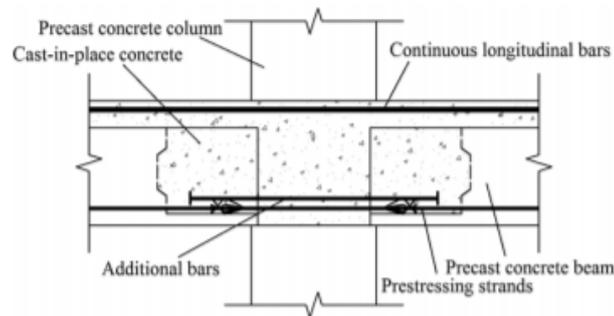


图 1.3 键槽钢绞线节点形式[12]

2016年Eom等<sup>[15]</sup>进行了五个足尺梁柱节点低周往复试验,提供3类新型U型槽形式装配式节点,试验变量为键槽内附加钢筋的配筋和构造。试验表明:试验中采用的装配式节点延性性能较好。

2019年曹徐阳等<sup>[16]</sup>基于OpenSees软件研究了装配式节点数值模拟方法,提出适用于湿式连接节点与干式连接节点的两类分析模型,并同时考虑如键槽、预应力、耗能件等局部构造措施的影响。为验证该文提出模型的有效性与准确性,进行了10个不同类型的装配式节点低周反复加载试验的数值模拟,并给出各类型的建模参数取值。计算结果表明:文中提出的模拟方法不仅可以准确地反映如峰值承载力、刚度退化等,同时可以预测局部材料的微观受力状态与行为,为今后的装配式混凝土节点建模分析提供参考。

装配式梁柱连接的研究主要围绕湿节点展开,大量研究发现,采用湿节点连接的装配式结构承载力展现出“等同现浇”的良好性能。

### 1.2.2 混凝土结构抗连续倒塌研究进展

英国Ronan Point公寓1968年爆炸引起连续倒塌引发工程界及学术界对结构抗连续倒塌的重视。迄今为止,国内外学者对框架结构的连续倒塌问题进行了卓有成效的研究。

2008年Yi等<sup>[17]</sup>进行了一个缩尺三层四跨结构柱失效情况下抗连续倒塌研究,试验表明:基于塑性极限状态的框架的计算容量约为测试的破坏容量的70%,并对框架荷载重分布的连续倒塌力机理进行了探讨。

2009年Su等<sup>[18]</sup>进行了12个RC框架结构试件在竖向荷载作用下防连续倒塌能力。试验表明:提高框架梁的配筋和框架梁的高度能提高压拱效应阶段试件承载力。

2011年何庆锋和易伟建<sup>[19]</sup>进行了5个两端铰支的约束梁试验,试验变量为钢

筋配筋、钢筋等级和加载速率，试验结果表明：试件的配筋率和钢筋强度等级显著影响梁柱子结构的悬索效应并能提高其抗倒塌能力，而加载速率对构件抗倒塌性能影响不大。

2011年 Li 等<sup>[20]</sup>对两个钢筋混凝土框架结构进行数值模拟分析。通过数值模拟验证了改拉进结法，并验证了改进的拉结法的准确性。

2011年 Sasani 等<sup>[21]</sup>进行试验和数值模拟研究钢筋混凝土结构四个相邻柱的同时移除后的响应。在分析研究中，使用了结构的非线性模型，其解释了梁和板的轴向-弯曲相互作用。结果表明：分析结果与试验数据吻合良好。

2011年李易<sup>[22]</sup>建立了 RC 框架结构连续倒塌抗力需求分析的理论框架，为抗连续倒塌设计提供理论依据和计算方法。并改进了现有线性静力拆除构件法中基于经验的抗力需求计算方法。

2011年 Hai 等<sup>[23]</sup>进行了两种足尺框架子结构在柱移出过程中抗连续倒塌试验。试件区别在于抗震等级设置不同。对试件的关键点位移、梁端转角和钢筋应变进行了测试。结合数值模拟结果对试件性能进行讨论。

2013年 Qian 等<sup>[24]</sup>进行了 7 个缩尺的梁柱结构的连续倒塌研究，试验变量为梁横向配筋率、构造条件。在试验中，在角节点处发现了剪切破坏。在角节点严重失效之前，空心效应在载荷再分配机制中起主要作用。在角节点严重失效后，悬臂梁的重新分布机制发挥了重要作用。

2014年 YU 等<sup>[25]</sup>进行了 4 个中柱失效情况下的 RC 框架结构试验，研究了各种构造形式如梁中部增设钢筋层、节点区域底部钢筋剥落、梁端增设铰链。结果表明：采用部分铰链形式能通过增强悬链线效应延缓构件连续性倒塌破坏。

2014年 Qian 等<sup>[26]</sup>进行了试验变量为有无楼板的对比试验。试验结果表明：带楼板的 RC 板承受连续倒塌位移的六成以上，显著提高了构件的抗连续倒塌能力。

2016年 Ren 等<sup>[27]</sup>对梁板系统的 7 个子结构试件进行了研究梁板结构在抗连续抗倒塌时的荷载传递机制。试验变量为梁高度，板宽和板厚。对柱进行了准静态试验，分析不同变量下结构受力性能异同。

2016年 Lu 等<sup>[28]</sup>设计了 5 个 1/3 缩尺的梁板楼板系统子结构，并通过试验方法研究了在侧柱拆除条件下对连续坍塌的力学行为。试验结果表明：梁-板结构承载力在小变形下增加了 146%，在大变形下增加了 98%。

2016年 Pham 等<sup>[29]</sup>利用有限元软件 Ls-Dyna，分别采用准静态加载和动态加载的方法，研究爆炸作用下结构在连续倒塌时的性能。仿真结果表明，增加结构边界约束刚度能提升其抗连续倒塌承载力。

2017年 Yu 等<sup>[30]</sup>对四种不同类型钢筋混凝土框架结构进行了连续倒塌试验。试件设计分为抗震结构和非抗震结构。试验表明：梁柱节点是构件悬链线效应的最

关键部位,梁转角过大内部纵筋可能会失效,钢筋断裂是因为连接处的局部旋转,周围约束会提升构件悬链线能力。

2017年Lim等<sup>[31]</sup>通过对五种钢筋混凝土框架结构的连续倒塌试验,研究了转动能力和水平约束对悬链线效应发展的影响,通过对五个框架的测试和分析,量化并讨论改善转动性能和不充分的约束对悬索效应的影响。并提供了改善节点提高悬链线效应的实用建议。

2019年周云等<sup>[32]</sup>成功校核了Qian论文中ABAQUS软件建立的框架子结构精细有限元分析模型的准确性。在模型校核的基础上,通过改变平面框架两侧边跨的约束,分析了两侧边跨约束对所研究子结构防连续倒塌承载力的影响。最后建立了多层空间框架结构模型,研究了框架底层柱移除过程中结构的承载能力,分析发现楼层数的增加,成倍地提高框架结构承载力。

上述研究可以看出,目前学术界对于结构抗连续倒塌的研究主要集中在子结构性能试验及数值分析方面的研究。

### 1.2.3 装配式框架节点抗连续倒塌研究

节点作为整个建筑框架中的薄弱位置,连接性能的好坏是整个建筑安全性能的关键所在。对此国内外专家学者提出了多种节点的连接形式,并进行了一系列研究分析。

2014年Nimse等<sup>[33]</sup>进行了节点形式分别为钢制暗牛腿和混凝土牛腿的框架结构节点试验。研究了不同节点形式构件的极限承载力、挠度曲线等。试验结果表明,试验中所采用的节点连接形式的极限承载力和节点转动能力均优于现浇构件。

2015年Kang等<sup>[34]</sup>进行5个缩尺PC框架子结构抗连续倒塌静载试验,构件采用预制梁和预制柱拼接节点区域后浇混凝土方式,研究了90度弯钩和键槽内钢筋搭节点形式及键槽内后浇混凝土结合面粗糙度对试件承载力影响。试验表明:增加配筋率能显著提高构件承载能力,装配式节点构造形式是影响压拱效应和悬链线效应的重要因素。

2015年Kang等<sup>[35]</sup>进行了2个PC试件抗连续倒塌试验。梁柱接头和后浇构件采用ECC(高韧性复合材料)。在大变形条件下,ECC材料的高拉伸应变能力减缓了梁中裂缝的发展,特别是在顶部纵向钢筋端柱末端附近。研究了ECC在缓解连续倒塌方面的有效性。

2016年Qian等<sup>[36]</sup>进行了一系列不同节点连接类型的PC框架结构连续倒塌试验,研究不同类型的梁板连接和节点类型在抗连续倒塌中的表现。结果表明:焊接连接方式破坏是脆性的,并不适合于装配式结构,整体连接子结构表现出等同现浇性能,预制空心板与整体板性能相似。

2016年 Kang 等<sup>[37]</sup>进行了4类钢筋锚固形式的PC框架子结构抗连续倒塌研究。试验结果表明：预制混凝土框架结构能够在初始加载阶段发展压缩拱形作用，在边柱和梁柱节点的抗倒塌设计中，压拱效应及悬索效应对节点水平力的影响必须考虑其中。

2017年 Elsanadedy 等<sup>[38]</sup>采用 Ls-Dyna 有限元软件，对常用的预制梁柱节点连接方式进行了抗连续倒塌数值模拟。结果表明：通过在框架梁上端安装角钢，用螺母连接销杆和角钢，提高了节点的连接性能，提高了这种连接的承载能力。但试件的延性较差。

2018年曾奕<sup>[39]</sup>进行了四榀不同周边约束的梁柱结构抗连续倒塌性能试验。其中一榀为装配式结构三榀为现浇结构。试验表明：抗弯承载力装配式与现浇大致相似，但悬索效应阶段受力性能、变形能力均弱于现浇结构。

2018年 Feng 等<sup>[40]</sup>利用 OpenSees 有限元软件建立了预制框架子结构模型，研究了子结构的抗连续倒塌性能。在该模型中，光纤梁元件用于模拟框架梁和框架柱，并且二维节点单元用于模拟梁柱节点。通过改变弹簧的载荷 - 位移关系来模拟锚固肋长度的滑移关系。

2018年陈太平<sup>[41]</sup>进行了三种框架子结构倒塌试验，其中节点形式两个为全装配式一个为现浇节点，试验结果表明：装配式节点承载力偏低，延性不足。

上述研究表明，目前装配式结构抗连续倒塌研究主要针对湿节点，研究主要集中在构件层面。

### 1.3 装配式结构节点在高温下研究进展

高温作用下，节点性能往往发生退化，钢材在经历高温作用后，其弹性模量及抗拉强度均会下降，而混凝土在经历高温作用后，其弹性模量和抗压强度等性能也会下降。高温作用下，混凝土及钢筋受力性能及协同工作性能劣化，严重威胁到建筑安全。

#### 1.3.1 节点高温研究进展

梁柱节点是结构连接中最重要的形式，是结构安全的关键。一旦梁柱节点失效，可能引起整个结构的损坏。结构遭受火灾作用后，梁柱节点性能更是整个结构安全性的关键。

2006年郭士雄<sup>[42]</sup>采用理论分析和试验研究的方法，分析了约束刚度、荷载比、荷载类型、长跨比、温度分布等因素对约束梁的影响，研究了火灾下约束梁及梁端节点破坏问题。分析了梁节点破坏机理，提出了提高节点承载力的措施。

2009年王科<sup>[43]</sup>进行了钢筋混凝土足尺框架节点的耐火性能试验。研究了接头的试件温度场分布、破坏特性和耐火极限。试验表明：当足尺试件达到耐火极限

时，梁的外端达到最大挠度。节点的核心温度明显低于柱子的核心温度。最大弯矩截面不是梁的破坏面，塑性铰向破坏严重的梁段移动。

2009年 Han 等<sup>[44]</sup>对钢筋混凝土梁柱节点进行了试验研究。试验探究了温度场分布、耐火极限、破坏形式以及节点耐火极限的实用计算方法，并进行了有限元分析。

2009年王玉镯<sup>[45]</sup>进行了钢筋混凝土框架节点抗火性能试验。分析对比了试件节点火灾后的损伤，并分析了影响节点损伤的原因，得到火灾后损伤模型。

2008-2010年王广勇等<sup>[46,47]</sup>进行了一个十字节点火灾试验与数值模拟，节点破坏是梁端的弯曲破坏，受火试验过程中，梁端出现了塑性铰。由于梁柱连接处的温度较梁柱中部较低，发现高温下梁端塑性铰外移。

2010年刘池<sup>[48]</sup>进行了磷酸镁混凝土框架节点的耐火性能试验，试验结果与普通现浇混凝土进行了对比。试验结果表明：该类型框架节点耐火极限与普通现浇混凝土基本相同，但该类型节点混凝土高温爆裂现象更为严重。

2009-2010年傅传国等<sup>[49,50]</sup>进行了一系列钢筋混凝土框架节点耐火性能试验，分析了试件截面温度场分布、变形特点、耐火极限等。试验结果表明：梁端竖向位移增长趋势初期较缓慢后期增加迅速，部分试件破坏为脆性破坏。

2010年杨颖<sup>[51]</sup>使用 ANSYS 有限元软件建模得到该梁柱节点在高温下的温度场，并对可能影响节点温度场分布的因素进行了参数化分析，建立了标准升温曲线下求解节点耐火极限的有限元模型，得到了不同参数节点在火灾下的极限耐火时间。

2013年刘文超<sup>[52]</sup>为了探究 RC 框架节点在氯离子侵蚀后的反应及承载力的退化进行了节点耐火性能试验。观察了节点梁柱截面的变形特征、损伤破坏模式和温度分布，研究了不同氯离子侵蚀条件下对节点耐火性能的影响。

2016年谭炎<sup>[53]</sup>进行了高温作用下梁柱子结构抗连续倒塌试验。分析试件温度场变化、荷载位移曲线、水平轴向力等数据。研究子结构受力行为受力机理，研究高温条件下子结构抗连续倒塌性能。

2016年陈华伟<sup>[54]</sup>利用 ABAQUS 有限元软件对钢管混凝土节点升温过程中的温度场进行数值模拟，在利用试验验证模型思路准确的基础上，利用 ABAQUS 有限元软件设计了 3 个钢管混凝土柱和 7 个方钢管混凝土柱-钢梁穿筋节点耐火计算模型，得到相应耐火极限的同时并对此类节点的耐火性能进行了分析。

2016年 Song 等<sup>[55]</sup>进行了火灾后梁柱组合节点试验与数值模拟，试验表明：温度变化和荷载加载路径不同对试件承载力有显著影响，并通过数值模拟与试验分析给出了火灾后剩余刚度系数和剩余承载力系数计算公式。

2016年 Haremza 等<sup>[56]</sup>通过试验研究了受到局部火灾导致柱损失的行为，并预测螺栓复合梁柱节点高温下的响应。

2016年舒赣平等<sup>[57]</sup>对四种十字形钢框架 T 形钢半刚性节点进行了耐火试验。试验主要研究了钢厚度、螺栓直径和楼板对节点抗火性能的影响。结果表明：钢节点在火灾作用下的破坏模式主要取决于钢与高强螺栓的相对承载力。承载能力相对较弱的部位先损坏，混凝土楼板可大大提高节点的耐火性能。

2017年李俊华等<sup>[58]</sup>对四个钢筋混凝土梁柱节点的火灾后试验和两个常温试件的低周反复荷载试验，以研究其滞回性能、延性性能、耗能性能等。分析了刚度退化的规律。分析了火灾时间和轴压比对火灾后这些节点抗震性能的影响。结果表明：高温试件与常温试件的破坏过程和破坏形态大体相同。火灾试件在加载初始阶段刚度下降、等效阻尼比增大。轴压比对火灾后节点的抗震性能产生一定影响。

2018年 Li 等<sup>[59]</sup>进行了六个梁柱子结构试验，其中包括两个高温下试件三个高温后试件以及一个常温试件，研究不同锚固长度对试件抗连续倒塌性能影响。试验表明：锚固长度越长，试件抗连续倒塌性能越好。

上述研究表明，现有的试验研究对结构耐火性能及火灾后剩余承载力研究较多，数值分析主要研究结构的耐火极限研究。针对混凝土试件的高温下抗连续倒塌性能研究相对较少。

### 1.3.2 装配式混凝土结构在高温下研究进展

预制构件在施工现场安装造成连接区域形成薄弱面，造成装配式建筑整体性较差，高温对装配式建筑受力性能影响更为显著。

2001年，Cooke<sup>[60]</sup>进行了 14 个预制钢筋混凝土楼板高温耐火试验，试验研究了保护层厚度、混凝土类型、荷载、板类别及升温曲线对中跨弯曲挠度及板端轴向位移的影响。试验表明：设计活荷载 1.5kN/m 对偏转影响非常小，升温路径对混凝土板挠度变形影响极大，轻质混凝土与普通混凝土相同条件下挠度增加约 30%，具有拱腹保护的板的中跨挠度大约是未受保护板的四分之一。

2006年 Mehmet 等<sup>[61]</sup>对烧毁后土耳其 Kahramanmaras 装配式混凝土结构棉线厂进行研究分析，利用超声波试验机等仪器对现场进行测定。火灾期间的温度估计在 800℃-900℃左右。在这种高温下，15mm 的混凝土保护层是不够的。应该增加保护层厚度，应使用耐火骨料和耐火水泥，对可能暴露在火中的表面应使用陶瓷板和石棉等绝缘材料进行隔热。

2015年 Shakya 等<sup>[62]</sup>进行了 6 个预制空心板的耐火试验，测试变量包括混凝土中的骨料类型，轴向约束条件等，试验表明：轴向约束能提高耐火性能，荷载水平对预制板的耐火性能有着显著影响。与碳酸盐骨料混凝土板相比，硅质骨料混凝土板更容易受到火灾引起的剥落。火灾下作用，碳酸盐骨料混凝土板比硅质骨料混凝土板更容易发生剪切开裂。

2017年王换丽<sup>[63]</sup>采用 ABAQUS 有限元软件对装配整体式柱在火灾下和火灾后的力学性能进行研究。分析了轴压比、偏心比、防火层、火灾模式、钢箍厚度、配筋比、螺栓直径等因素对组合整体螺栓和钢箍连接框架柱耐火性能的影响。受构件轴向变形和耐火性能的影响。建立了相同工况下的现浇柱的有限元分析模型，并与组合柱的耐火性能进行了比较。

2018年谢云翎<sup>[64]</sup>进行了 94 个不同温度下的“Z”型装配式试件（图 1.4）的剪切推出试验，获得试件在不同温度下破坏形式、抗剪承载力及荷载-滑移曲线，分析试验温度、界面粗糙度、界面植筋率、后浇混凝土强度四种参数对混凝土叠合面抗剪性能的影响。试验结果表明，温度越高，装配式试件抗剪承载力越低，合理设置粗糙面能增大试件承载力。

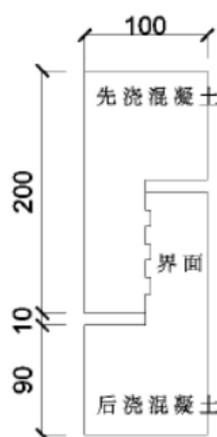


图 1.4 “Z”型装配式试件示意图[62]

2018年张海耀<sup>[65]</sup>进行了 108 个高温后装配式试件的界面抗剪试验，研究温度、混凝土强度、粗糙度、钢筋强度、植筋率对装配式试件抗剪承载力的影响。试验表明，随着温度的升高，试件抗剪承载力减小，在一定的植筋范围内，抗剪承载力增大。

2018年李智<sup>[66]</sup>采用 ABAQUS 有限元软件建立了梁在高温作用下的有限元模型。分析了预制梁与现浇梁的耐火性能差异。讨论了现浇部位的混凝土强度、型钢的屈服强度和型钢的截面尺寸。装配式梁耐火性能的影响。研究表明，现浇梁的耐火性能优于装配式梁。

2018年邓曦<sup>[67]</sup>对 12 个 14mm 钢半套灌浆接头进行了高温下静态拉伸试验，并对 39 个 14mm 钢半套灌浆接头进行了高温静态拉伸试验。在同一批次中加工了 27 个灌浆材料试块，用于高温和高温后的弯曲和压缩试验。试验结果表明：灌浆段钢筋在高温和高温后相对于套管滑动，在 600℃ 高温负荷或高温水冷负荷下，试样注浆加固将被拔出。。

2018年顾为健<sup>[68]</sup>建立了 PC 框架节点模型，分析了轴向约束刚度比、梁长宽高、柱高、柱段长度等几何参数对试件受力性能的影响。比较了混凝土节点与现

浇节点对耐火性能的影响。研究表明：不同参数下，PC节点与RC节点耐火极限几乎相同。

2019年Zhang等<sup>[69]</sup>进行了12个的半灌注套管连接试件在25°C至600°C温度下静态拉伸试验。在试验中，火灾后半灌注套管连接的失效模式只是钢筋拉伸断裂，而不是粘结失效。半灌注套管连接的一些后火拉伸性能明显受峰值温度和混凝土覆盖层的影响。

目前关于装配式高温性能的研究方兴未艾，针对装配式节点高温下防连续倒塌的研究较少。因此，研究装配式结构高温下连续倒塌性能很有必要。

## 1.4 本文研究背景

近年装配式结构由于其独特优势，在我国发展迅速。装配式结构区别与现浇结构的重要特征之一便是节点连接方式。建筑火灾作为最常见的灾害形式，严重影响到人民群众的生命安全。目前国内外鲜见针对装配式框架节点在高温作用下抗倒塌性能的研究。对于预制装配式梁柱节点在高温作用下抗倒塌性能的研究具有重要意义。

本论文是基于国家重点研发计划项目(2016YFC0701400, 2016YFC0701308)、湖南省重点研发计划项目(2017SK2220)和长沙市科技计划项目(kq1706019)资助，为了研究预制装配式混凝土梁柱子结构在高温作用下抗连续倒塌性能，采用试验方法对常见的四种节点形式进行了研究。讨论节点高温作用下的受力性能。文章主要研究内容为：

(1) 依据《混凝土结构设计规范》(GB50010-2010)和《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)设计了一栋8层(6×8跨)预制混凝土框架结构。为了研究其高温作用下受力性能，按照1/2比例缩尺浇筑四种装配式梁柱子结构，节点形式分别为分别为：机械套筒连接、90度弯折锚固、键槽钢筋搭接搭接、世构(Scope)体系节点。

(2) 完成四类不同类型节点在高温下和高温后抗连续倒塌试验，通过对预制装配式混凝土梁柱节点截面温度场的测试，获取截面温度变化。比较不同节点截面的温度变化规律。分析了高温作用下各梁柱子结构荷载位移曲线、梁端轴力位移曲线温度梁端轴力曲线等，分析不同类型节点在高温作用下的受力性能。

(3) 比较了各装配式梁柱子结构破坏形态，分析了不同节点构造形式高温作用下破坏规律，结合弯矩转角关系，对预制装配节点的安全性和可靠性进行评估，并给出改善建议。

(4) 进行了基于延性杆连接的全装配式框架子结构倒塌试验，对构件依次开展了中柱失效情况下的竖向推覆拟静力试验，对结构的极限承载能力、应变响应、位移变形能力及失效破坏模式进行讨论。分析全装配式节点到倒塌性能。

## 第2章 装配式梁柱子结构高温抗连续倒塌试验设计

### 2.1 引言

梁柱子结构是框架结构中重要节点之一，当多灾害发生后，偶然荷载造成中柱失效，引起相邻梁柱节点内力重分布，节点处顶部变为受压状态，底部变为受拉状态。多灾害引发火灾后，结构材料性能在高温作用劣化，容易引起结构连续倒塌。针对以上问题，本文对采用四种不同类型装配式混凝土梁柱连接节点形式的构件进行在高温作用下的抗连续倒塌试验，以研究不同节点形式在高温作用下抗连续倒塌性能。

### 2.2 试验目的

装配式结构在我国大力发展开来，但由于其预制梁柱拼接再后浇连接产生的薄弱区，装配式混凝土框架结构在高温下承载能力和受力性能是工程界一个亟需解决的问题，目前并未出台的装配式混凝土结构高温抗连续倒塌的设计规范。研究装配式混凝土梁柱子结构高温抗连续倒塌受力性能具有极其重要的工程意义。本文以装配式梁柱子结构为研究对象，主要研究目的如下：

(1)研究节点采用机械套筒锚固、90度弯折锚固、键槽钢筋搭接连接、世构体系形式的梁柱子结构，研究高温下及高温后抗连续倒塌受力性能，对比高温下和高温后梁柱子结构的受力性能变形性能及破坏模式，揭示不同受火方式构件受力机制，分析荷载转换差异；

(2)对比不同节点形式装配式试件的承载能力，分析各装配式试件最终破坏模式的异同，对比不同节点形式试件，评价目前不同装配式混凝土框架梁柱连接节点形式的受力性能。

(3)对比装配式节点在高温下及高温后两种路径下承载力及极限位移，解释两种路径下连续倒塌机理差异，对比试件裂缝情况及破坏模式，分析高温后及高温下对装配式试件性能的影响。

### 2.3 原型结构设计

多灾害情况的发生如煤气爆炸、恐怖袭击和车辆撞击等偶然荷载作用造成柱失效后，继而引起火灾，建筑物发生连续倒塌，严重威胁到人民群众的生命和财产安全。本文设计了一栋纵向为8跨，横向为6跨的8层钢筋混凝土框架原型结构，如图2.1所示。该框架横向柱距为6.3m，纵向柱距为6.3m，层高4.8m空间结构，其柱截面尺寸为600mm×600mm，梁截面尺寸为300mm×600mm，楼板厚

度为 120mm，标准层板厚为 100mm。

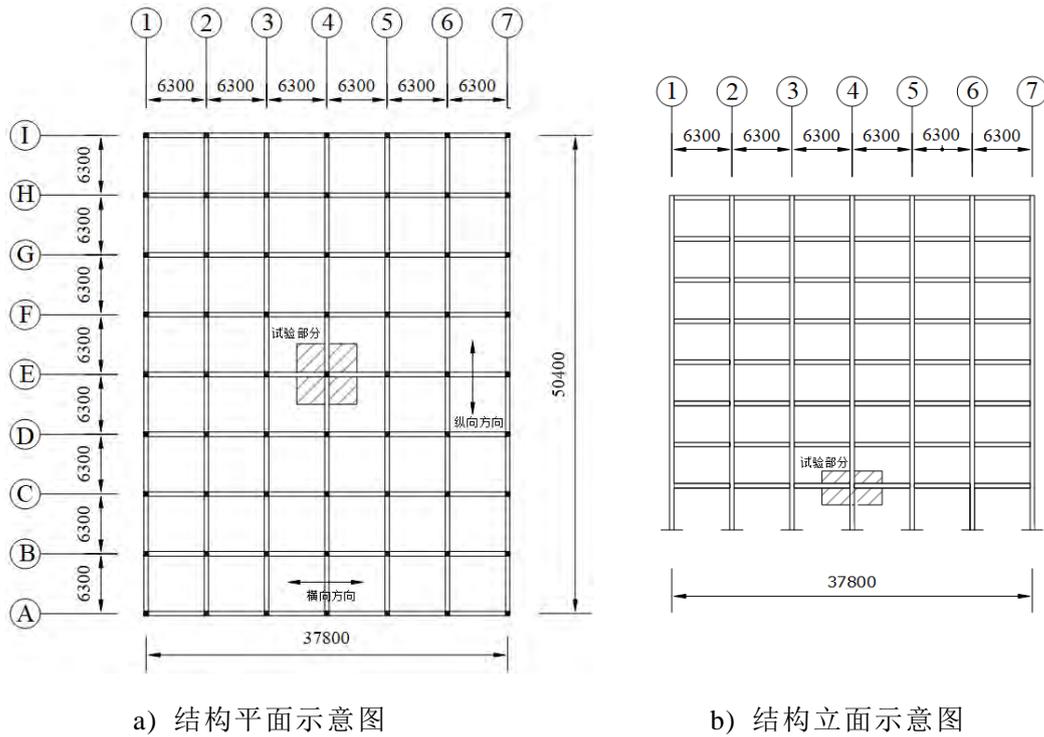


图 2.1 原型结构图（单位 mm）

框架原型结构按照《混凝土结构设计规范》(GB50010-2010)<sup>[70]</sup>和《建筑抗震设计规范》(GB 50011-2010)<sup>[71]</sup>的相关规定进行设计，使用了盈建科结构设计软件中的建筑结构计算模块进行建模计算。恒、活荷载按照《建筑结构荷载规范》(GB 50009-2012)<sup>[72]</sup>规定分别取值为 5.0kN/m 和 2.0kN/m，环境类别设定为二类 a，设计地震分组为第二组，框架抗震等级为一级，结构考虑 8 度设防。

## 2.4 结构设计

完成设计配筋后，提取图 2.1 阴影部分所示的梁柱子结构作为试验研究对象，采用 1/2 比例缩尺设计了两个试件，制作了装配式梁柱子结构试验模型。总共 8 个试件，包括 2 个机械套筒连接节点（PC1、PC5）试件、2 个 90 度弯钩连接节点（PC2、PC6）试件、2 个键槽钢筋搭接连接节点（PC3、PC7）试件、2 个世构体系连接节点（PC4、PC8）试件。子结构试件的详细尺寸见表 2.1，梁柱子结构试件的框架柱截面尺寸为 300mm×300mm，框架梁尺寸为 150mm×300mm，试件总长度为 2840mm。其中箍筋均采用 HPB300 级钢筋其余受力钢筋均采用 HRB400 级钢筋。

表 2.1 试件详细信息表

试件 编号	试件尺寸				纵向钢筋			横向箍筋	受热方式
	柱截面 /(mm <sup>2</sup> )	中柱高 /(mm)	梁截面 /(mm <sup>2</sup> )	梁净长 /(mm)	柱纵 向筋	梁纵 向筋	键槽 钢筋		
PC1	300×300	1200	150×300	1270	4T20	4T18	—	R8@100	高温后
PC2	300×300	1200	150×300	1270	4T20	4T18	—		高温后
PC3	300×300	1200	150×300	1270	4T20	4T18	2T14		高温后
PC4	300×300	1200	150×300	1270	4T20	4T18	2T14		高温后
PC5	300×300	1200	150×300	1270	4T20	4T18	—		高温下
PC6	300×300	1200	150×300	1270	4T20	4T18	—		高温下
PC7	300×300	1200	150×300	1270	4T20	4T18	2T14		高温下
PC8	300×300	1200	150×300	1270	4T20	4T18	2T14		高温下

注：表中 T14 表示直径为 14mm 的变形钢筋，R8 表示直径为 8mm 的光圆钢筋。

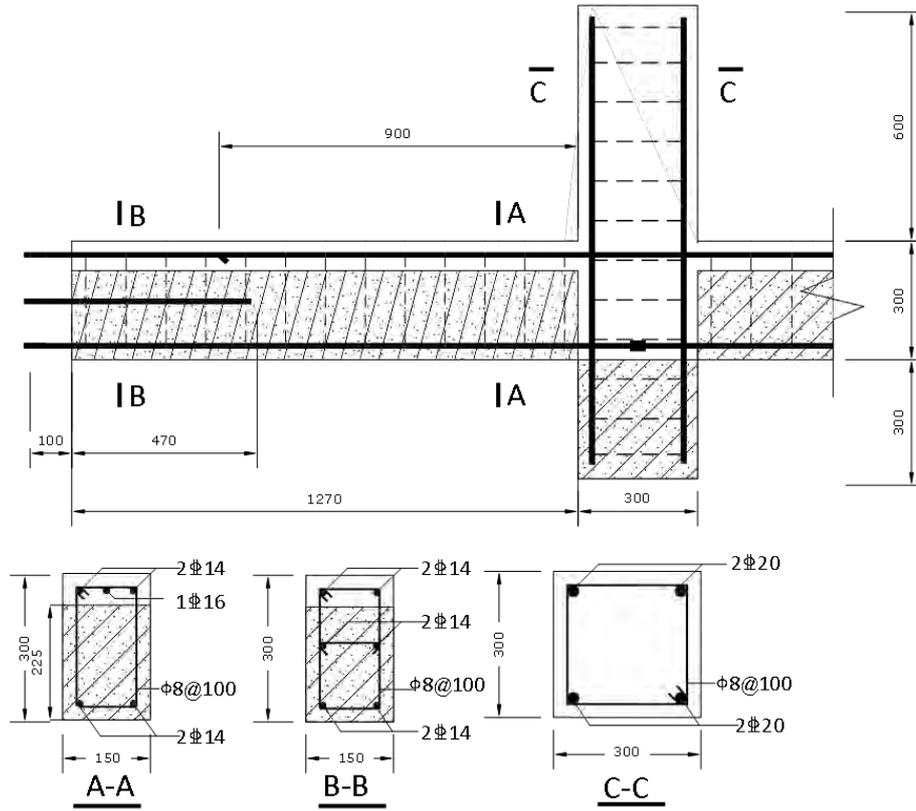
现浇构件以及新型装配式构件所用纵筋均为 HRB400 级，箍筋均为 HPB300 级。按照《金属材料室温拉伸试验方法》(GB/T228-2010)<sup>[78]</sup>的相关规定，选取同一批次的钢筋 3 根，长度为 500mm，在建材实验室使用电液伺服万能试验机对钢筋试件进行试验，如图 2.8 所示，测量其屈服强度( $f_y$ )以及抗拉强度( $f_u$ )等相关参数。其结果见表 2.2。

预制部分及后浇部分采用的是 C40 强度等级的混凝土，在浇筑时均制作有 3 个立方体试块（150mm×150mm×150mm）以及 3 个圆柱体试块（H=300mm，D=150mm），在同等条件下进行标准养护。根据《混凝土强度检测评定标准》(GB/T50107-2010)<sup>[79]</sup>，在实验的同一天进行轴压试验，试验结果数据取平均值，结果见表 2.2。

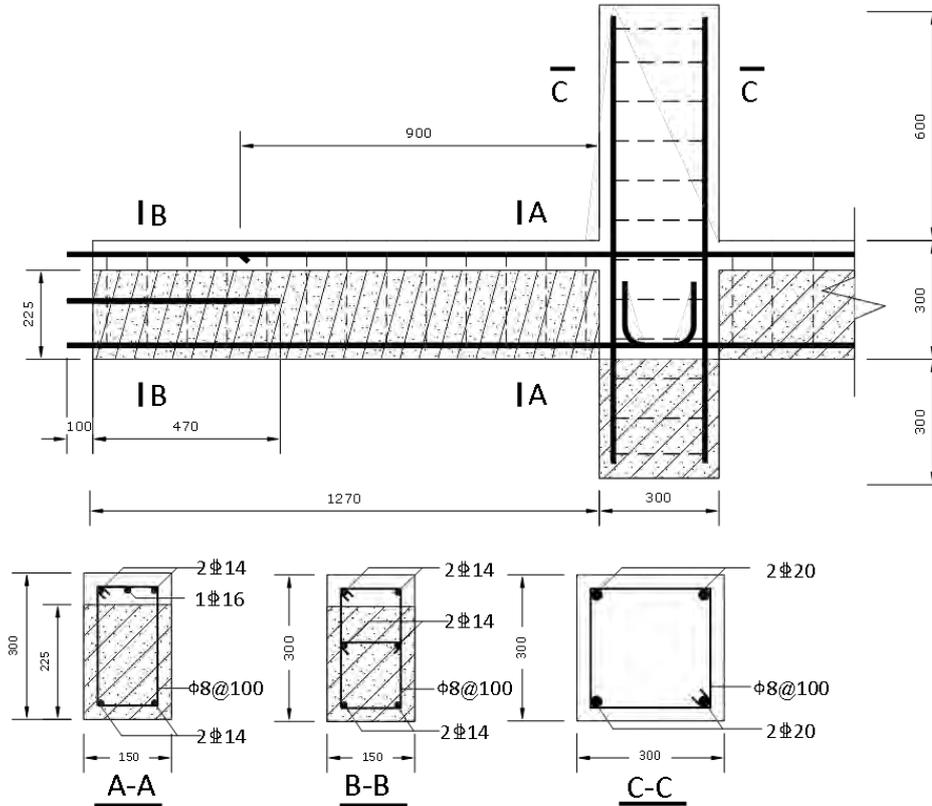
表 2.2 钢筋及混凝土的力学性能参数

项目	钢筋类型	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	伸长率
钢筋	R8	362	517	$\delta=25.3\%$
	D14	465	615	$\delta=22.3\%$
混凝土	预制混凝土			
	立方体(边长 150mm)	34.4 MPa		
	后浇混凝土			
	立方体(边长 150mm)	36.41MPa		

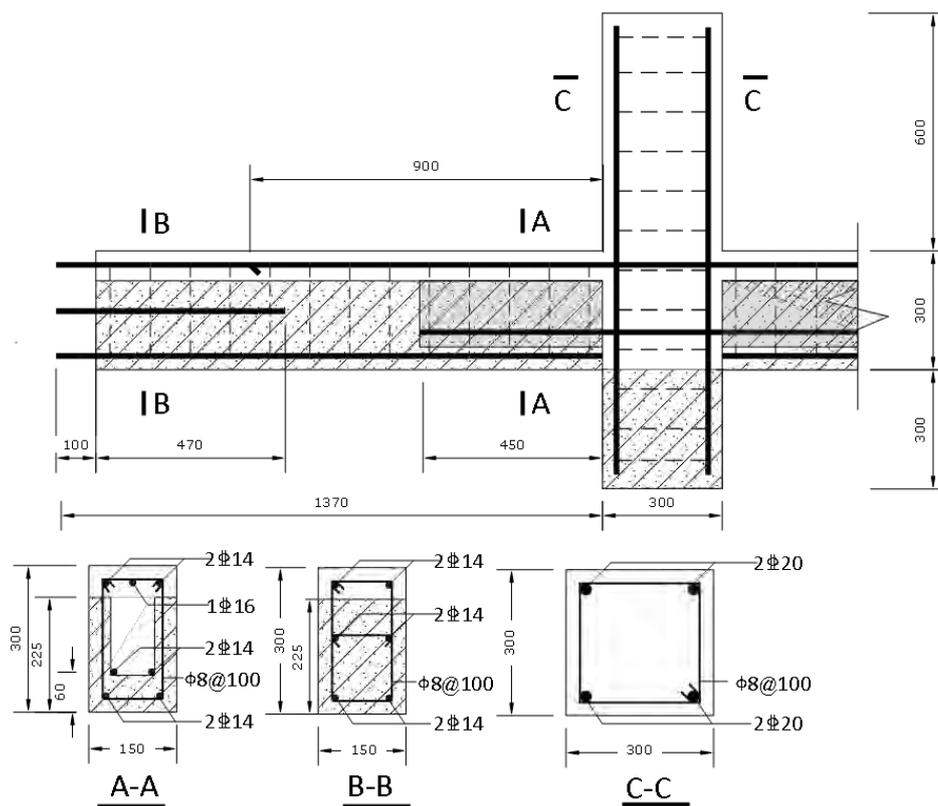
根据 PKPM 计算结果，考虑试件配筋实际情况，最终确定梁柱子结构试验模型结构详细配筋如图 2.2。



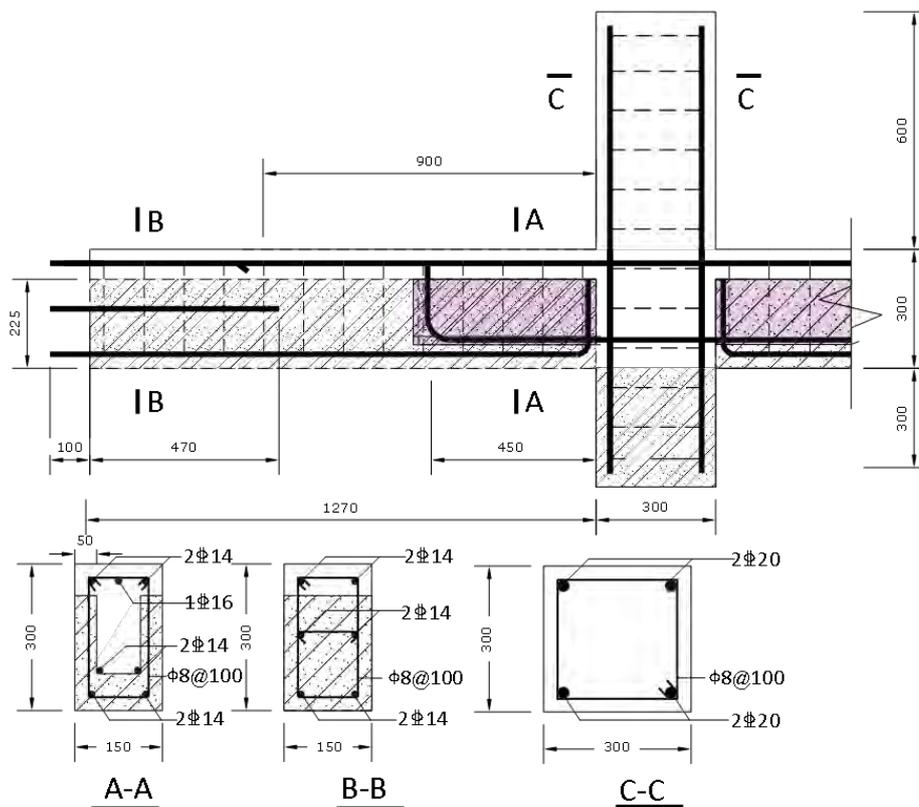
a) 机械套筒连接节点试件 (PC1、PC5)



b) 90度弯钩连接节点试件 (PC2、PC6)



c) 键槽搭接连接节点试件 (PC3、PC7)



d) 世构体系连接节点试件 (PC4、PC8)

图 2.2 框架子结构尺寸及详细配筋图 (单位 mm)

本实验共设计了四种节点连接方式，不同节点之间主要是预制梁之间连接方式不同。预制梁端部按照规范设置粗糙面。

PC1、PC5 试件节点形式为《装配式混凝土建筑技术标准》(GB/T51231-2016)<sup>[73]</sup>中机械套筒连接如图 2.2a)，采用直螺纹机械套筒，两个预制梁底部钢筋通过直螺纹套筒相连。直螺纹套筒如图 2.3(a)所示，试验使用直螺纹套筒外径 25mm，长度 45mm，符合规范《钢筋机械连接用套筒》(JG/T 163-2013)<sup>[74]</sup>要求，图 2.3b)为节点核心区机械套筒连接完成图。

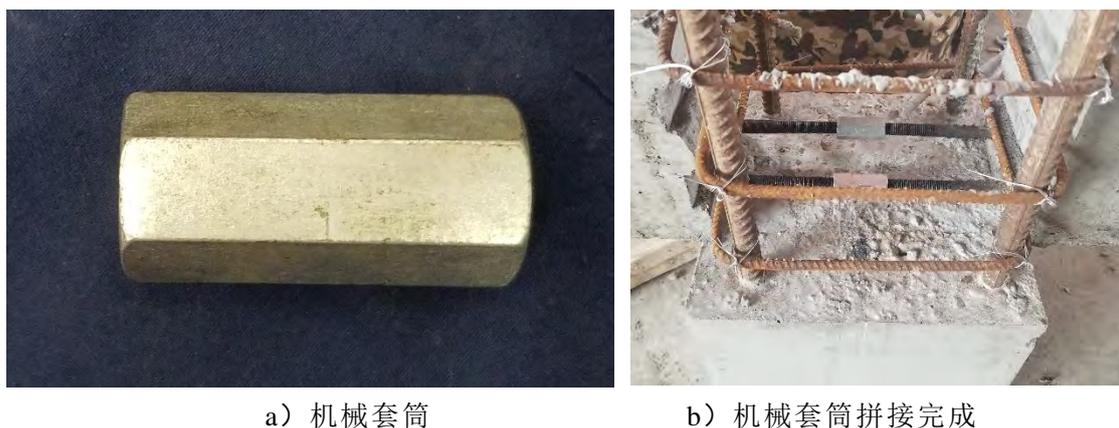


图 2.3 机械套筒连接

PC2、PC5 试件节点采用规范中规定 90 度弯折锚固形式连接如图 2.2b)，其中 90° 弯折锚固按照规范[70]要求平直段长度取 195mm，弯折后直段长度取 170mm。节点下部钢筋采用 90 度弯折形式插入节点内部，预制梁弯起钢筋在节点区域错开。

PC3、PC7 节点为键槽内搭接钢筋形式连接如图 2.2c)，节点连接由预制梁端键槽与键槽内搭接的直钢筋组成，顶部通过通长钢筋连接。预制键槽构造采用《预制预应力混凝土装配整体式框架结构技术规程》(JGJ224-2010)<sup>[75]</sup>规定要求。钢筋锚固长度满足规范[70]要求。

PC4、PC8 节点形式采用法国世构体系如图 2.2d)，世构体系梁柱采用预制混凝土形式，节点连接由三部分组成，分别为梁端键槽、U 型钢筋及现浇混凝土，如图所示，预制混凝土梁的下部纵筋在梁端键槽内搭接，在键槽内布置 U 型钢筋。预制键槽构造采用《预制预应力混凝土装配整体式框架结构技术规程》(JGJ224-2010)<sup>[75]</sup>规定要求。

装配式梁柱子结构分两阶段浇筑，第一阶段，按照标准[73]要求梁浇筑高度为 225mm，柱浇筑高度 300mm，即预制部分，图 2.4 为预制梁图。第二阶段，对预制梁柱进行拼接，拼接完成后如图 2.5 所示。第三阶段，对拼接连接好的梁柱进行第二次浇筑，浇筑梁 75mm，柱 900mm，组成一个整体。预制梁柱与后浇梁柱均采用 C40 混凝土制作。每个构件设计的细部构造，除了在节点处连接构造设置有所不同，其他构造细节基本保持一致。试件编号、节点详情、配筋率及受火

方式见表 2.1。



图 2.4 预制梁示意图



图 2.5 预制部分拼接完成示意图

## 2.5 试验加载测量方案

### 2.5.1 试验升温设备

试验升温采用多功能结构试验高温炉，主要由炉体及高温控制柜如图 2.6a) 组成，高温炉底部由 4 块  $480\text{mm} \times 800\text{mm} \times 150\text{mm}$  保温板组合而成，炉体为 4 块  $800\text{mm} \times 800\text{mm} \times 150\text{mm}$  加热板如图 2.6b) 组合而成，炉顶用保温棉密封，加热板加热元件为内部陶瓷纤维板上的电热丝，加热板外部为金属保护层，加热板设有热电偶，用于测量每块板升温温度。升温控制柜对高温炉加热方式进行控制，通过触摸显示屏设定升温程序对升温曲线进行设定，高温炉温度信息通过电脑进行显示和保存。对于高温试验炉，升温曲线按照 ISO-834 曲线设定，高温试验炉按最大功率加热。高温试验炉配合液化气喷火可以模拟标准升温曲线，但考虑到安全问题，没有使用液化气喷火，造成实际升温曲线与标准升温曲线出现偏差。



a)高温试验炉控制柜

b)组合电加热板

图 2.6 试验升温炉

### 2.5.2 加载装置

抗连续倒塌试验装置由三大部分组成，分别为试验底座、高温试验炉及电液伺服多通道加载仪。梁柱子结构试件通过梁端 40mm 厚钢板用螺栓固定在两端转动铰支座上，连接钢板如图 2.7a) 所示，两端铰支座内装有水平荷载传感器，利用 DH3821 采集仪测量试验过程中梁柱子结构梁端水平反力，铰支座细节如图 2.7b) 所示。水平荷载传感器通过前后两个六角螺帽固定在竖向钢板上，铰支座通过底部螺栓固定在型钢柱上，为了防止支座与型钢柱试验过程中滑移，在每个支座与钢柱之间焊接了两块钢板组成水平夹具，钢板通过四根 36mm 螺杆连接，每个钢板上部设置三个螺帽，用于固定铰支座。试验过程中，可以测量梁端水平荷载。



a) 梁端钢板连接

b) 梁端铰支座

图 2.7 加载装置细节照片

试验前取出梁端铰支座内荷载传感器如图 2.8a) 所示，在微型控制恒加载压力试验机上进行数据标定，如图 2.8b) 所示。



a) 荷载传感器图示

b) 荷载传感器标定

图 2.8 荷载传感器

本试验加载采用计算机控制 JAW-2000K 电液伺服加载系统，加载 L 型横梁两端各有一个作动器，竖向量程为 500mm，最大施加荷载为 1000kN。通过计算机软件控制作动器使加载横梁保持竖向加载，计算机控制作动器软件界面如图 2.9 所示。

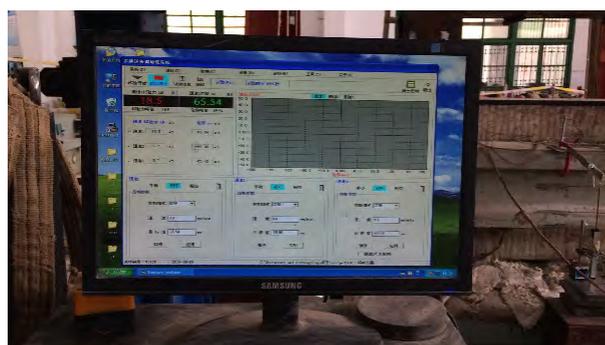
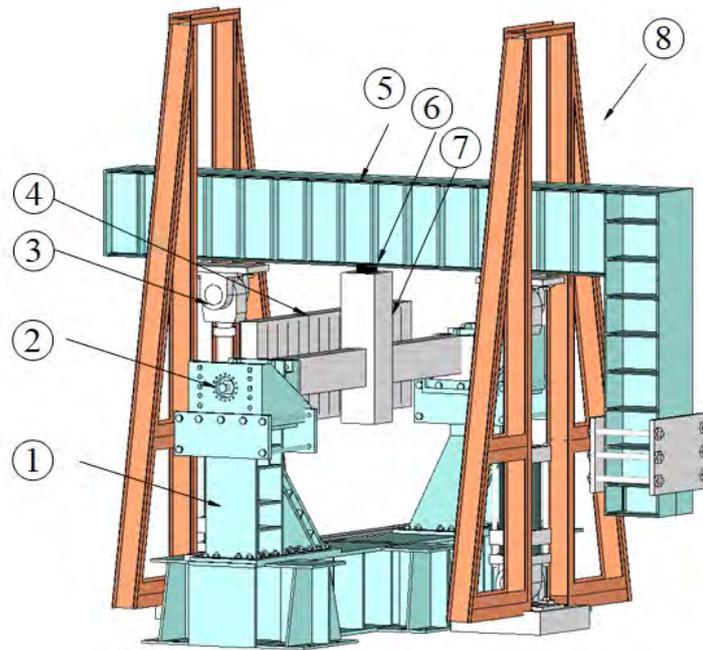


图 2.9 作动器控制台

试验装置如图 2.10 所示，该试验装置主要由加载底座、高温试验炉及作动器组成。加载底座使试件两端约束为梁端铰支座提供支持力；高温试验炉模拟火灾升温情况；作动器在中柱柱头施加竖向荷载。

加载装置与设计完全相符，如图 2.11 所示。梁端铰支座确保试件在平内运动，加载过程中，为了保证中柱柱头始终竖向受力，在柱头与横梁之间放置球铰与 10mm 厚钢板。



注：①加载支承台座；②可滑动铰支座；③竖向作动器；④高温试验炉；⑤L型加载横梁；⑥活动球铰；⑦加载试件；⑧支承反力架

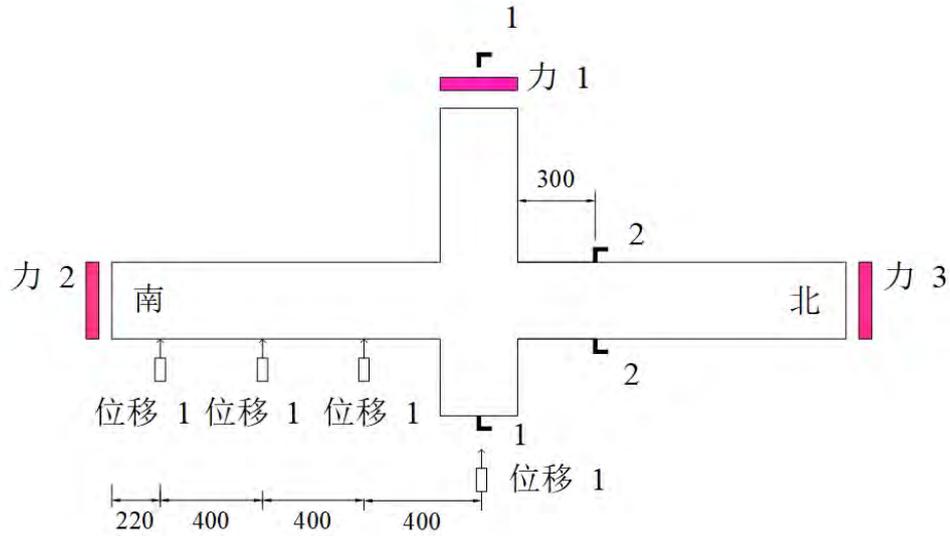
图 2.10 加载装置设计图



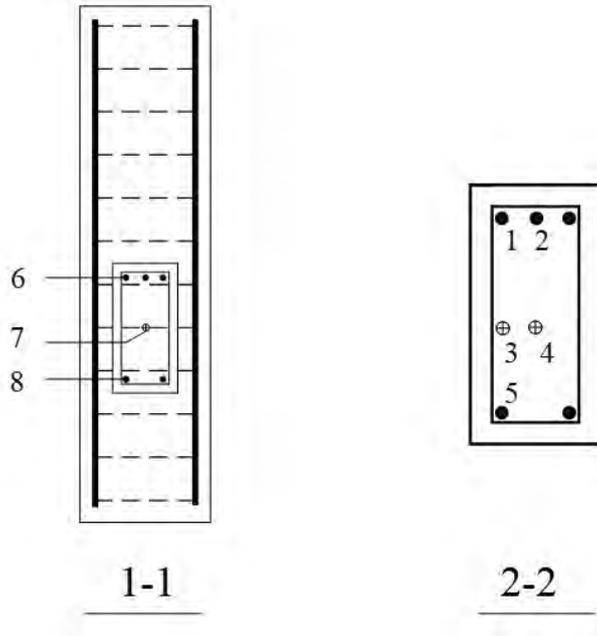
图 2.11 现场试验装置图

### 2.5.3 试验测量方案

为了获取高温试验中装配式混凝土梁柱子结构的承载能力、变形性能，测取炉内温度、试件截面温度、中柱竖向荷载、中柱竖向位移和梁端轴向力，详细测点布置与测点编号如图 2.12 所示。



a) 试件测量方案



b) 截面热电偶测点布置图

图 2.12 梁柱子结构测量方案

图 2.12a) 为梁柱子结构试件荷载与位移测量示意图。测量加载过程中中柱竖向位移、中柱竖向荷载和梁端轴向力。图 2.12b) 为试件截面热电偶布置图，1 号测点热电偶测量梁上部纵筋温度，2 号测点对测量梁上部中间钢筋温度，3 号测点测量梁侧边箍筋温度，4 号测点测量梁中心点温度，5 号测点测量梁底部纵筋温

度，6号测点测量节点核心区梁中上部纵筋温度，7号测点测量节点核心区中心温度，8号测点测量节点核心区梁下部温度。热电偶于混凝土浇筑前预先埋设在指定位置，试验采用的热电偶规格为3mm的K型铠装热电偶如图2.13a)，测量误差为 $\pm 2.5^{\circ}\text{C}$ 。热电偶通过安柏AT4208手持多路温度测试仪记录温度变化，测试仪如图2.13b)所示。



图 2.13 热电偶采集仪器

## 2.1 试验过程

本次试验共八个构件其中 PC1、PC2、PC3、PC4 为高温后试验，高温后实验分三个阶段，第一阶段为升温阶段，试件安装就位后，将升温试验炉打开，按照 ISO-834 曲线设定炉内升温曲线；利用多通道数字采集仪，记录热电偶温度变化；打开 DH3821 采集仪，记录梁端轴力等变化；开启高温试验炉，开始升温过程。试验过程中，每隔 0.5min 就记录一次试件截面热电偶温度变化。第二阶段为降温阶段，升温试件达到 2h 后，关闭高温试验炉，进行自然冷却降温，10min 后，去除试件侧面及顶部保温棉，温度降至  $300^{\circ}\text{C}$  左右时，将试验炉侧面升温板拆除，利用外部电风扇加速降温，同时记录过程中各测点数据变化。第三阶段为加载阶段，待温度降至室温后，利用中柱柱头进行加载，加载过程利用位移控制，以 6mm/min 的速度加载，每加载 6mm 持荷 5min，进行试件裂缝及试验现象的观察与记录。试件 PC5、PC6、PC7、PC8 为高温下试验，高温下试验过程分两个阶段，第一阶段为升温阶段，试验过程与高温后试验相同，第二阶段为加载阶段，升温 2h 后直接进行竖向加载试验，加载过程采用位移控制，加载以 6mm/min 速度进行。当试件承载力急剧下降或钢筋发生断裂时终止试验。

## 2.2 本章小结

为探究装配式梁柱子结构高温作用下抗连续倒塌受力机理，本章设计一栋装配式建筑，从结构中提取出底层两根半梁一根柱的框架子结构作为研究对象，设计了四种不同节点连接形式的装配式试件，进行了高温作用下抗连续倒塌试验研究，对试验的方案、加载装置、加载过程进行了介绍。本章具体内容如下：

(1) 设计一栋纵向 8 跨横向 6 跨的 8 层钢筋混凝土框架结构，利用 PKPM 对结构进行配筋，提取结构底层框架子结构进行抗连续倒塌试验研究，按照 1/2 比例设计了四种装配式混凝土梁柱连接节点，对节点构造进行详细介绍，对试件设计制作及材料性能试验进行了详细介绍。

(2) 介绍了试验加载与测量装置，包括底座、高温试验炉等并对试验装置进行说明，介绍了试验方案，并对试验过程进行了详细说明。