

构的受力性能进行分析，其中所有关于 RC 试件的数据曲线引用文献[39]。如图 5.8 所示。相比 RC 试件,PC 试件在整个受力过程中只存在压拱效应阶段。对于装配式结构而言，PC1 试件在压拱效应阶段的峰值荷载约为 113.6kN，略低于 RC 试件的峰值荷载，但其持荷过程却发展地相对不够充分；PC2 试件在加载过程中同样未形成悬链线效应，但其压拱阶段峰值荷载却达到 146.9kN，远高于相应 RC 试件的极限承载力。当外部施加荷载达到最大值时，由于节点处延性杆发生断裂，从而导致试件的荷载-位移曲线发生突然下降。

该装配式试件的荷载-位移曲线大概可以分为四个阶段：

(1)第一阶段为弹性阶段，即试件混凝土未发生开裂，构件处于弹性受力状态；
(2)第二阶段为弹塑性阶段，即混凝土框架梁端部位置已经出现裂缝，但纵向受力钢筋并未产生屈服现象；

(3)第三阶段为塑性铰发展阶段，该阶段过程中试件框架梁端纵筋已经发生屈服；

(4)第四阶段为失效阶段，即延性杆开始产生紧缩断裂，直至试件发生破坏。虽然该试验所设计的装配式试件的破坏区域均集中在节点延性杆处，但 PC2 试件的峰值荷载为 146.9kN 比 PC1 试件的峰值荷载 113.6kN 高约 29.3%左右，且 PC2 试件失效后的中柱竖向位移为 378.1mm 比 PC1 试件的 278.9mm 高约 48.6%左右。该现象表明 PC2 试件可凭借其暗牛腿构造良好的抗压能力有效提升试件的极限承载力。

测试所得的结构特征响应值如表 5.3 所示。与现浇试件相比，该类型装配式试件的承载能力相对较低，其中 PC1 和 PC2 试件的峰值荷载分别为 RC 试件在压拱效应阶段峰值荷载的 95%和 123%。当达至峰值荷载后，PC 试件中所承受荷载迅速下降，且并未产生悬链线效应，其抗倒塌极限承载能力远低于相应 RC 试件。

表 5.3 试验结果汇总表

试件编号	压拱效应峰值	最终破坏
	荷载/kN	位移/mm
PC1	113.6	278.9
PC2	146.9	378.1

针对所设计的框架子结构，本试验过程中测试所得到的试件边节点侧移曲线如图 5.9 所示。边节点向框架外侧的移动用负值表示，正值表示向框架内侧的移动。所测试构件的边节点均先呈现出向外的水平位移，并在中柱发展至 200mm 时达到向外侧位移最大值；随后位移逐渐减小。PC 试件分别在向外的位移减小至 6.01mm 及 7.05mm 时，整体结构因延性杆断裂而失去承载能力，并未产生向内的水平位移。

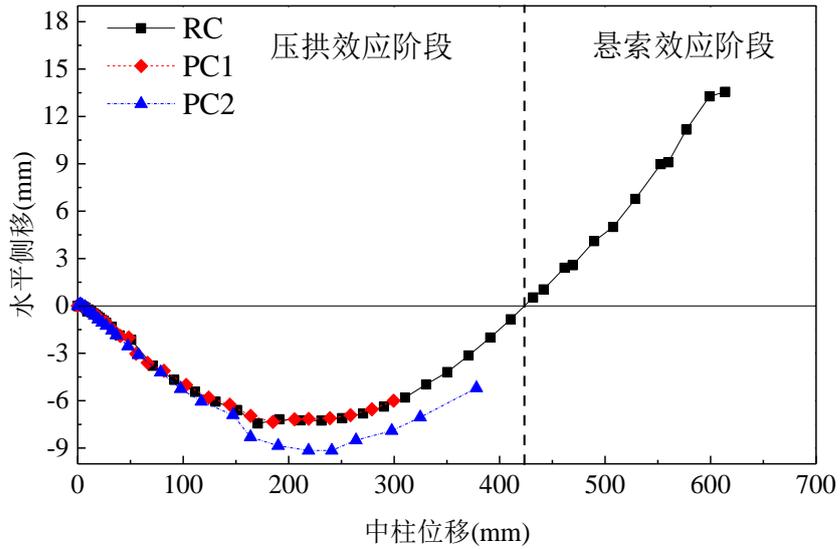


图 5.9 试件边节点侧移对比图

整个加载过程中，PC1 试件向外的最大水平位移为 7.11mm，PC2 试件则为 9.15mm。然而 PC 试件并没有产生向平面框架内侧发展的水平位移，表明其在抗倒塌过程中并未产生悬链线效应。

5.4.2 边柱反弯点约束刚度

测试所得框架结构边柱反弯点处的水平约束反力响应情况如图 5.10 所示。其中现浇试件和装配式试件在试验前期均先产生了水平压力，但现浇试件在加载后期产生水平拉力。其中现浇试件水平约束的最大压力为 40.8kN，小于装配式试件 PC1 和 PC2 的 58.8kN 和 96.9kN。

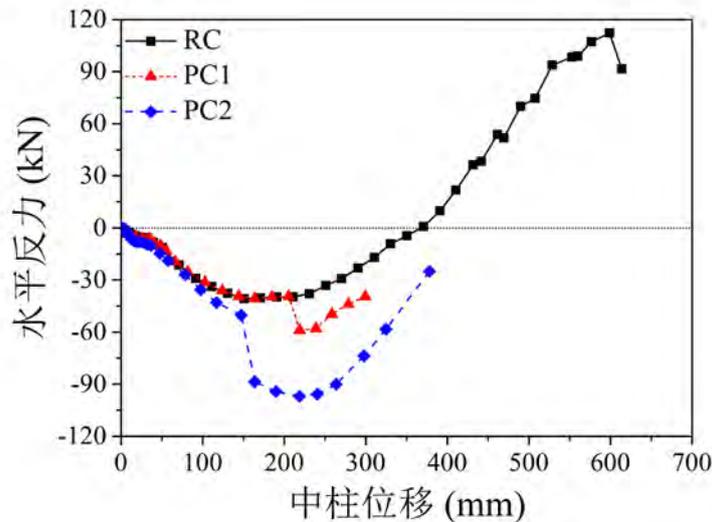


图 5.10 边柱反弯点荷载曲线

测试所得框架结构反弯点处水平位移如图 5.11 所示。PC 试件只产生了向外部的位移，且 PC1 试件与 PC2 试件的峰值位移相差不大。其中，装配式试件

PC1 和 PC2 向外的最大水平位移 6.96mm 和 6.90mm；RC 试件向内的水平约束位移最终发展至 11.09mm。

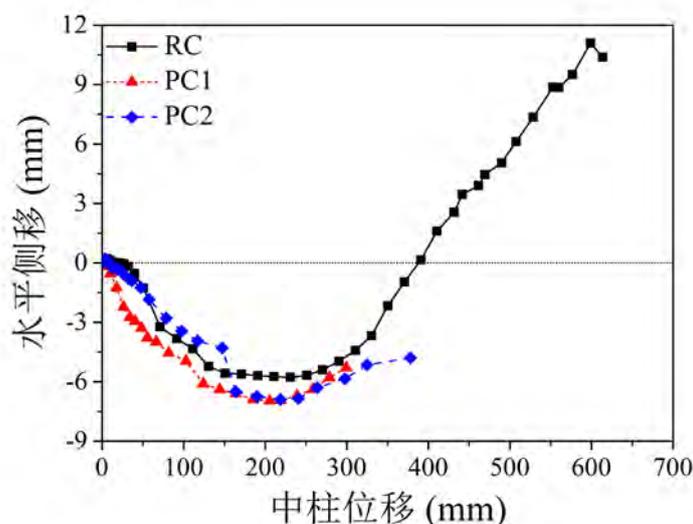


图 5.11 边柱反弯点侧移曲线

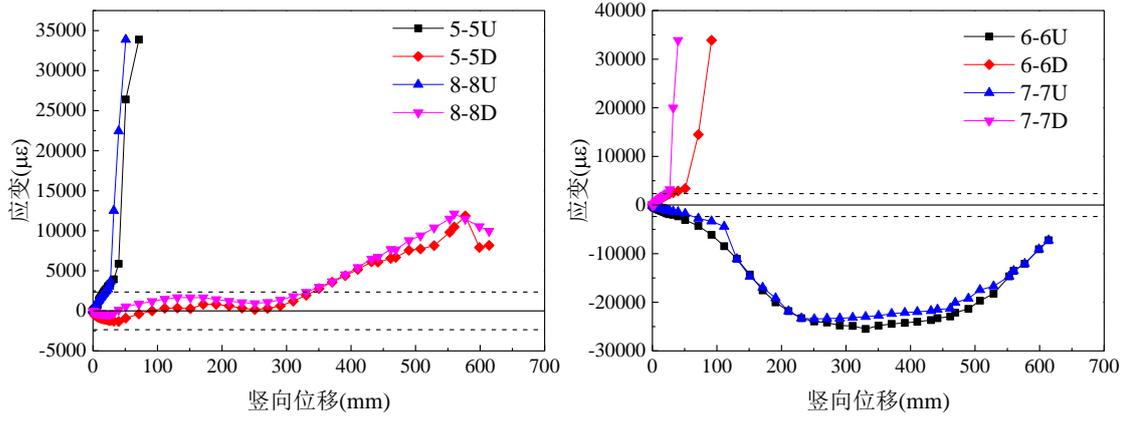
5.4.3 截面应变变化

对加载过程中试件梁端钢筋应变响应进行观测，结果如图 5.12 所示，对加载过程中试件梁端延性杆应变响应进行观测，结果如图 5.13 所示。

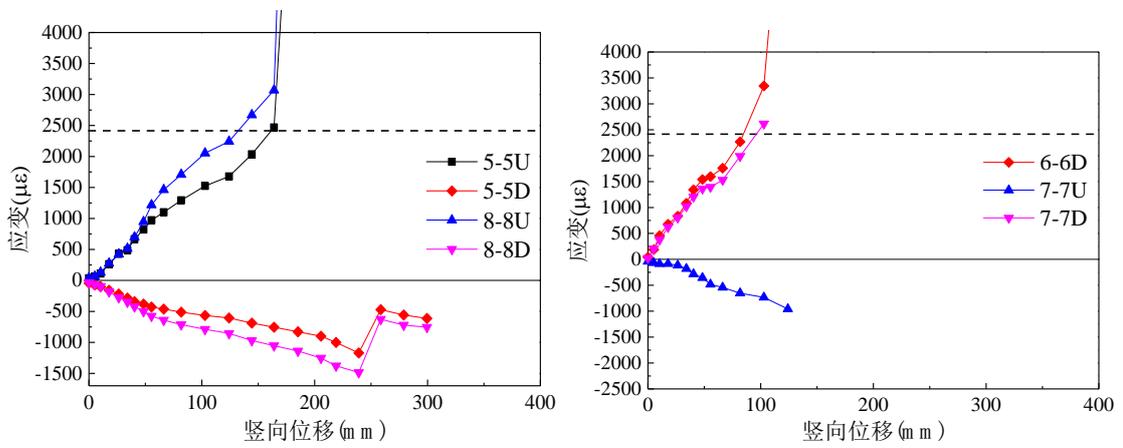
在试验加载过程中，PC1 试件边节点梁端上部纵筋为受拉状态、下部则呈现受压状态，该位置截面处上部延性杆呈现受拉状态。当结构进入压拱效应阶段后，受拉应变均达到屈服状态。中节点截面处梁端纵筋呈现出上部受压、下部受拉的状态，且下部延性杆在试验开始后应变响应发展迅速，并最终达到受拉屈服状态。表明试件中钢筋的延性得到有效利用，但延性杆与锚固板连接处则由于应力集中现象而造成局部破坏，其材料利用率相对较低。

对于 PC2 试件，其边节点上部截面处延性杆及钢筋在试验初期应变响应迅速增长。其中，延性杆处突然产生的下降段可能是由于其应变响应增长幅度过快、从而导致钢筋应变片发生失效所致。随着试验的持续进行，边节点处钢筋发生屈服；而边节点截面处下部延性杆及纵筋则一直处于受压状态，并在中柱竖向位移发展至 150mm 左右时达到最大值。同时，纵筋受压应变响应在 150mm 处发生波动，可能是由于延性杆与锚固板连接处发生断裂所致。

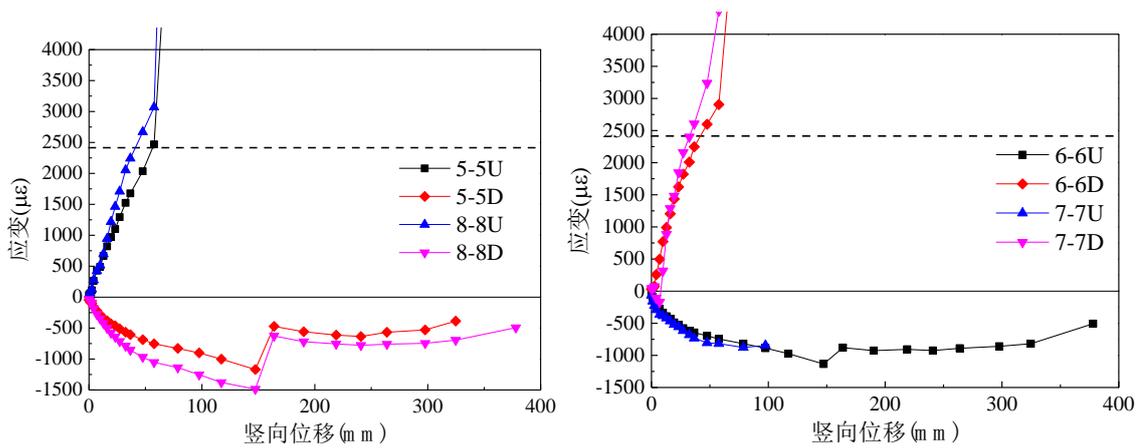
对于文[41]中的 RC 试件，靠近边柱处框架梁端截面上部钢筋应变在试验初期迅速增长至屈服状态，而下部钢筋则起初处于受压状态，并在中柱位移达到 50.2mm 时转为受拉状态；除此之外，靠近中柱处框架梁端截面钢筋在中柱位移为 40.4mm 和 100.6mm 时突然迅速增大；上部钢筋则一直处于受压状态，并在中柱位移为 350.6mm 左右时达至最大值，随后逐渐减小。



a) RC 试件钢筋应变

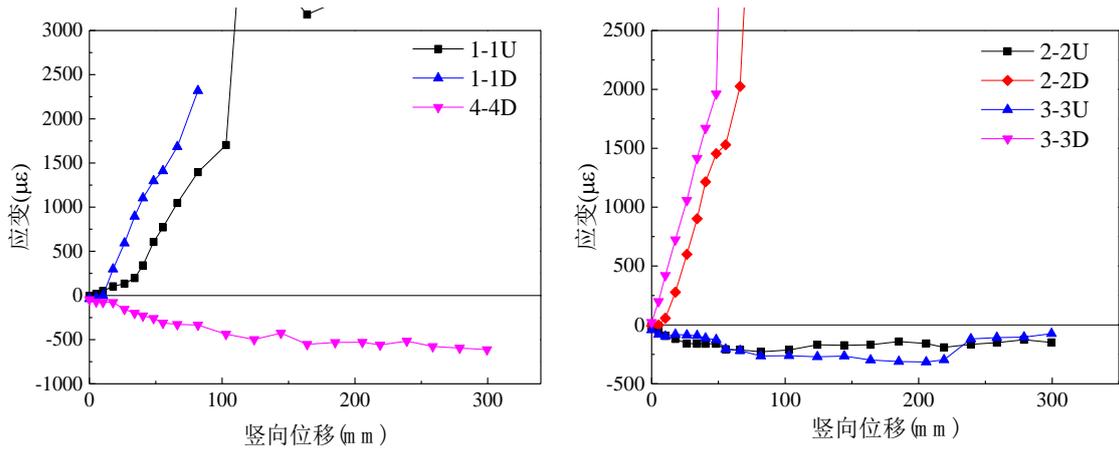


b) PC1 试件钢筋应变

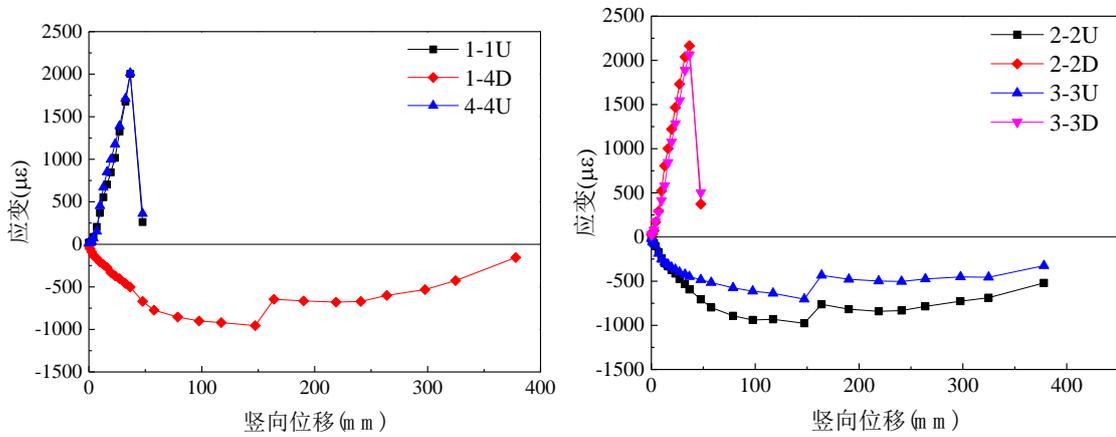


c) PC2 试件钢筋应变

图 5.12 框架梁钢筋应变响应



a)PC1 试件延性杆应变

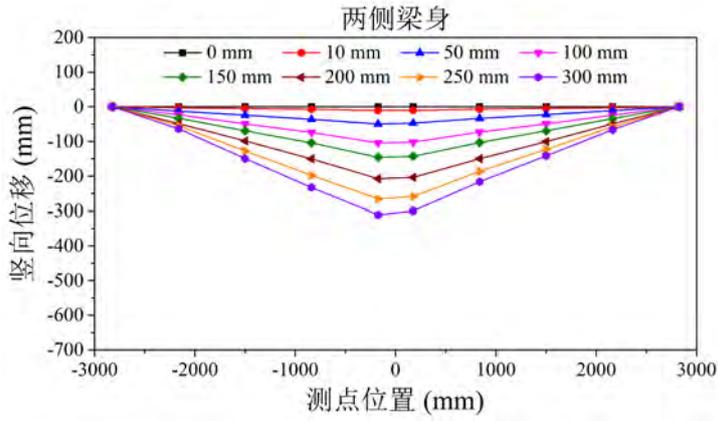


b)PC2 试件延性杆应变

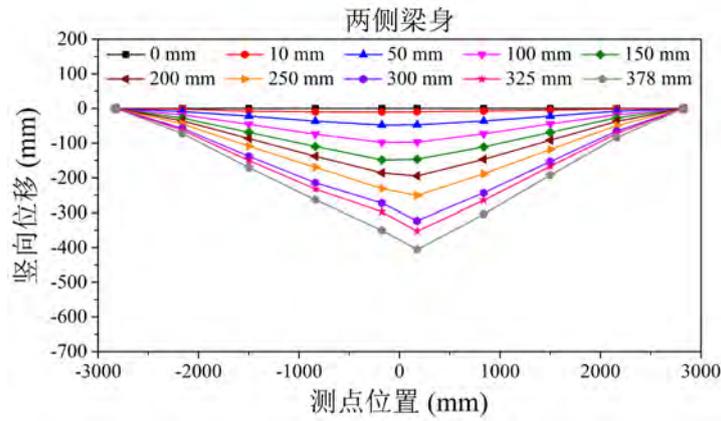
图 5.13 装配式试件延性杆应变响应

5.4.4 结构变形

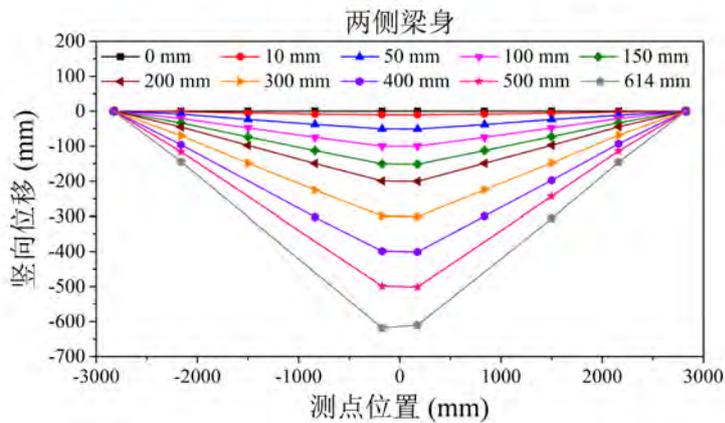
通过利用沿梁身均匀布置的电子尺对结构竖向位移进行记录，从而评估整体结构的变形能力，如图 5.14 所示。对于 PC 试件，其中柱竖向位移发展得相对较小。试验加载初期，南北两侧梁身变形处于对称状态；PC1 试件中柱位移发展至约 200mm 时，PC2 试件中柱位移发展至约 150mm 时，靠近中柱处梁端延性杆与锚固板连接处产生断裂，导致中柱发生平面内倾斜。随着试验的持续进行，试件中梁身未发生变形，其损伤区域主要集中在节点连接处。RC 试件在加载初期南北两侧梁身变形大致上处于对称状态；中柱位移达到 614mm，由于靠近中节点处梁端纵筋被拉断，从而导致中柱两侧梁身变形产生差别。



a) PC1 试件框架梁变形图



b) PC2 试件框架梁变形图



c) RC 试件框架梁变形示意图

图 5.14 框架梁变形图

图 5.15 为 PC1、PC2 试验过程中中柱梁端局部转角对比示意图，由图可以看出，PC 试件中柱位移与梁端转角大致呈现出线性关系，PC1 极限转角为 8.9rad，PC2 极限转角为 7.15rad，试件 PC1 转动能力大于 PC2。

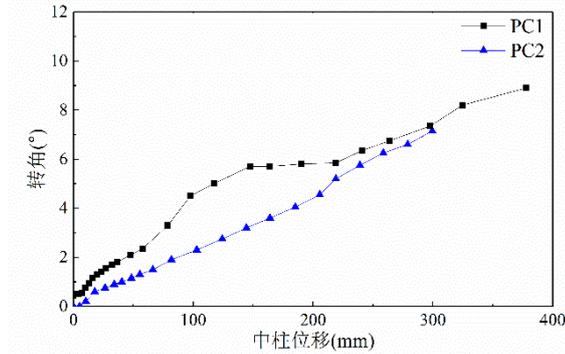


图 5.15 中柱梁端转角

5.4.5 结构失效特征

装配式试件在试验过程中，梁身裂缝在试验前期发展较少，主要集中在节点连接处。在中柱竖向位移为 278.9mm 时，PC1 试件达至峰值荷载 113.6kN。随着试验的持续进行，中节点南侧下部与北侧边节点上部处延性杆与锚固板连接处被先后拉断，如图 5.16 所示。中节点南侧梁端与框架柱的接触面处也出现了较大裂缝，其表面混凝土发生脱落；在中节点南侧延性杆断裂后，中柱发生平面内倾斜。同时，在北侧边节点延性杆发生断裂后，其梁端区域内迅速产生大量裂缝，但未出现贯通型裂缝。

对于 PC2 试件，在竖向位移为 378.1mm 时达到峰值荷载 146.9kN。随着加载过程的进行，试件牛腿外侧混凝土发生开裂，中节点牛腿处混凝土陆续掉落；且中节点内延性杆与锚固板连接处被拉断，导致荷载产生突然下降。边节点牛腿混凝土脱落，牛腿内钢筋暴露。最终整体结构因边节点上部延性杆与锚固板连接处破坏而发生失效。其中沿梁身分布裂缝并不多，表明结构受力主要集中在节点连接处，从而造成节点延性杆端部产生应力集中现象。

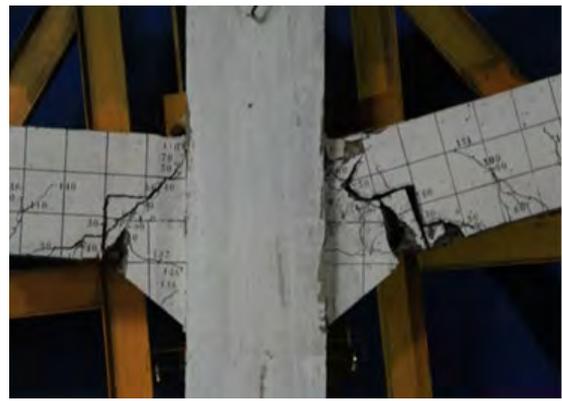
表 5.4 试验结果汇总表

试件编号	中节点处	边节点处
PC1	两边底部延性杆均发生破坏	两边顶部延性杆均发生破坏
PC2	南侧底部延性杆发生破坏	北侧顶部延性杆破坏

现浇试件试验过程中梁端截面在加载初期产生了少数受弯裂缝，且产生了压拱效应以抵抗外加荷载。随着试验的持续进行，靠近中柱处梁端下部钢筋及靠近边柱处梁端上部钢筋均发生屈服，梁身整体刚度随之产生明显下降。随着中柱位移的持续增加，结构所施加的荷载随之逐渐减小。荷载达至最小值之后又逐步上升。产生了沿梁高分布的贯通裂缝。该现浇试件最终因梁端纵向受力钢筋被拉断而发生破坏。



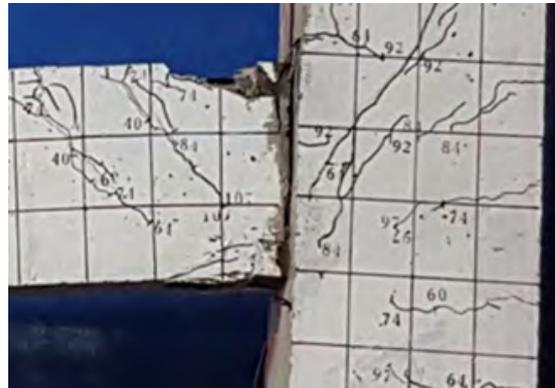
a) PC1 中节点



b) PC2 中节点



c) PC1 试件边节点



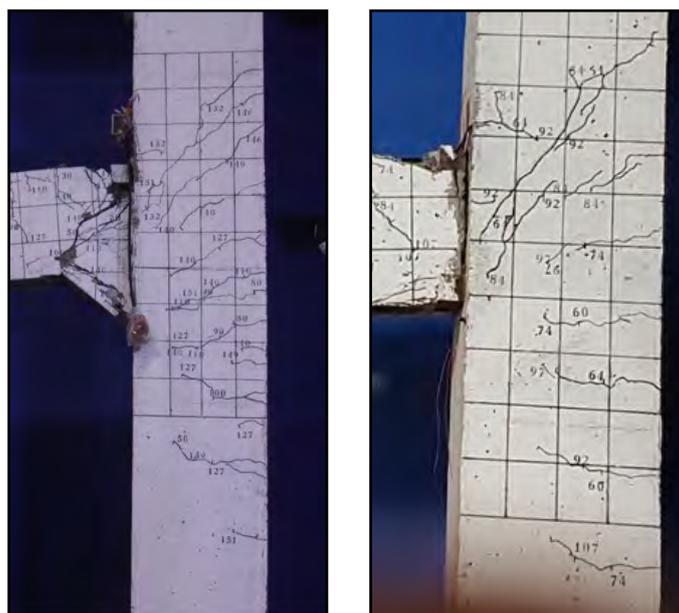
d) PC2 试件边节点裂



e) 中节点失效部位



f) 延性杆断裂



g) PC1 试件边柱

h) PC2 试件边柱

图 5.16 PC 试件破坏模式

装配式试件整个试验过程中，其框架内纵筋均未发生断裂，整体结构均因节点区域内延性杆与锚固板连接处发生断裂而失效，如表 5.4 所示。对于 PC1 试件，其中节点南侧下部延性杆(一根)、边节点北侧上部延性杆(一根)先后发生破坏；对于 PC2 试件，其中节点两侧下部延性杆(各一根)、边节点两侧上部延性杆(各一根)先后发生断裂。荷载传递路径方面，受框架梁身整体变形影响，装配式试件中两侧边柱产生向框架外部的水平移动，结构进入压拱效应阶段。由于梁端纵向钢筋处缺乏有效的通长连接构造，使得钢筋强度利用率相对有限。在压拱效应阶段，主要由梁端底部支撑提供水平压力。因此，PC1 及 PC2 边柱裂缝主要集中在柱节点外侧区域，如图 5.16g)和 5.16h)所示。在延性杆发生屈服后，边节点内上部锚固板受拉，边柱牛腿上方截面处产生了一系列剪切型裂缝，但其数量和宽度均发展有限。当 PC 试件中压拱效应失效后，其整体承载能力迅速下降，并最终因延性杆与锚固板连接处断裂而发生破坏，其材料的性能均未充分发挥。现浇试件靠近中柱处梁端裂缝宽度发展最大。同时，共有五根纵向受力钢筋被先后拉断，分别为中节点南侧梁端下部钢筋(两根)、中节点北侧梁端下部钢筋(一根)和北侧边节点梁端上部钢筋(两根)。除此之外，靠近边柱梁端下部区域和中柱梁端上部区域处混凝土均被压溃。与现浇结构相比，该类型采用高强螺栓-延性杆-锚固板的全装配式混凝土框架子结构的抗连续倒塌能力相对有限。可通过加强延性杆与锚固板连接处构造或将延性杆在中柱内贯穿等措施增加延性节点可靠性来增强其抗连续倒塌能力。

5.4.6 试验结果讨论

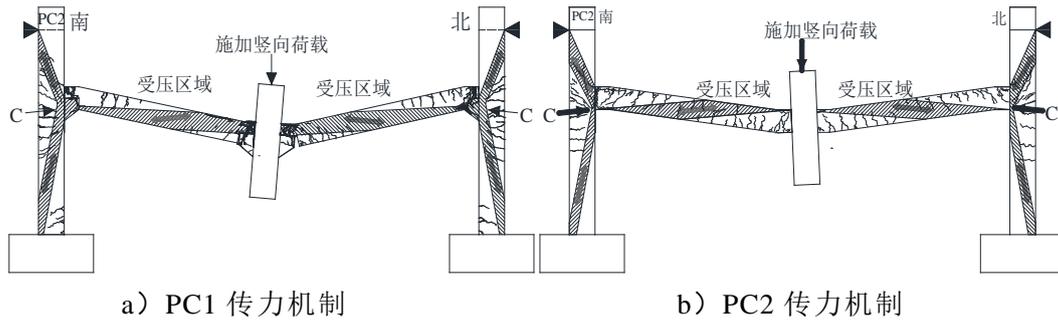


图 5.17 试件荷载转换机制图

图 5.17 为 PC1、PC2 试件荷载转换机制图，参考现浇构件发展模式，试件主要经历压拱效应阶段，未进入悬链线阶段。中柱竖向加载，框架梁变形，框架边柱向两侧移动，为压拱效应阶段，但由于延性杆节点处应力集中，造成延性杆与锚固版连接处破坏。PC 试件的破坏集中发生在节点连接处，延性杆的延性为充分发挥作用。

5.5 本章小结

为研究采用延性杆节点连接方式的全装配式混凝土框架结构的静力抗连续倒塌能力，本文按照 1/2 缩尺比例，分别设计两个全装配式(PC1, PC2)框架结构，并结合文献[39]RC 框架结构试验结果进行对比。其中装配式试件在梁柱节点处采用高强螺栓-延性杆-锚固版的连接方式。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。相关结论如下：

(1)通过对全装配式构件延性节点的试验测试结果进行分析，揭示了该类型混凝土框架结构在中柱失效下的受力特征和荷载传递机制。PC1 与 PC2 受力过程中主要经历了弹性阶段、弹塑性阶段、塑性铰发展阶段。试验表明该类型全装配式框架结构连续倒塌主要经历压拱效应阶段，尚未进入到悬链线效应阶段。

(2)对该类型全装配式结构的承载力及变形性能分别进行了评估。PC1 及 PC2 试件荷载峰值分别为现浇试件在压拱效应阶段峰值荷载的 95%和 123%左右，其抗连续倒塌能力相对较弱；同时，PC1 及 PC2 试件的中柱竖向极限位移约为现浇 RC 试件的 48%和 61%左右，表明该类型装配式试件的延性相对不足。

(3)试验过程中 PC 试件的受力和变形主要发生在梁柱连接处，框架梁裂缝主要集中在梁端，梁跨中截面处裂缝发展较少，整体结构最终因节点区域延性杆与锚固板连接处断裂而失效，材料的整体利用率相对较低。装配式试件则在节点区域延性杆与锚固板连接处发生断裂。可通过加强延性杆端部连接可靠性等方式来增强该类型全装配式结构的抗连续倒塌能力。

结论与展望

本文对预制装配式框架结构进行了高温下抗连续倒塌受力性能试验，研究了装配式混凝土梁柱子结构在高温后及高温下防连续倒塌的受力性能和破坏模式，研究了目前建筑行业中使用较多的预制装配式节点可靠性，得出以下主要结论：

(1) 根据我国相关规范设计了一栋钢筋混凝土框架原型结构，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，对节点构造进行详细介绍，对试件设计制作过程及材料性能试验进行了详细介绍。介绍了试验加载装置，包括底座、高温试验炉等并对试验装置进行说明，介绍了试验测量布置，并对试验过程进行了详细说明。

(2) 完成了四种节点形式八个装配式试件火灾试验，对每个试升温过程中升温曲线及截面温度场进行了详细的介绍，对高温后试件加载过程中裂缝发展进行了描述，讨论了荷载转换机制。对高温下试件最终破坏形态及裂缝情况进行描述，讨论荷载转换机制。高温后试件受力经历压拱效应和悬索效应两个阶段，悬索效应阶段承载力较压拱效应阶段承载力有所提升。而高温下试件，PC6 和 PC8 试件受力经历压拱效应和悬索效应两个阶段，PC5、PC7 试件受力过程主要为压拱效应阶段。

(3) 对比文献[57]中现浇构件承载力性能，PC1、PC2 拱效应峰值荷载分别为 RC 构件的 99.8%、91.9%。PC1、PC2 试件悬链线阶段峰值分别为 RC 构件的 110.4%、178.3%。PC1、PC2 试件破坏时位移分别为 RC 构件的 94.4%、133.5%。展现出“等同现浇”的性能。采用键槽方式的 PC3、PC4 抗连续倒塌性能弱于现浇试件 PC3、PC4 拱效应峰值荷载分别为 RC 构件的 65.1%、61.1%，PC3、PC4 试件悬链线阶段峰值分别为 RC 构件的 86.7%、63.0%，PC3、PC4 试件破坏时位移分别为 RC 构件的 95.8%、97.4%。采用键槽形式连接的试件承载力相对不足。

(4) RC 试件最终的破坏模式是中节点北侧梁底两根钢筋被拉断，试件不能继续承载，PC1 试件破坏时中柱北侧梁下部两根钢筋断裂，PC2 试件破坏是锚固钢筋滑移后北侧梁底钢筋断裂，PC1、PC2 试件与 RC 试件中受拉钢筋的性能得到比较充分的发挥，PC1、PC2 试件与 RC 试件类似，梁裂缝发展充分。而 PC4、PC5 试件均为键槽内钢筋滑移，造成试件不能继续承载，PC3、PC4 试件裂缝主要集中在梁身，破坏在混凝土叠合面处发展。

(5) 高温下试件 PC5、PC6 最终破坏模式是靠近中柱梁底纵筋被拉断，试件失去承载能力，PC7、PC8 试件最终破坏是键槽内钢筋滑移失效，不能继续承载。PC6 试件最终破时，两根梁身裂缝发展充分，两根梁裂缝基本呈对称形态，PC5、PC7、PC8 试件变形和破坏主要集中在梁柱连接节点处，另一侧梁身裂缝和

变形较少。

(6) 设计并进行了两个全装配式(PC1, PC2)框架结构拟静力试验研究,并结合文献[41]RC 框架结构进行对比讨论了全装配式试件连续倒塌中荷载转换机制,通过对全装配式构件延性节点的试验测试结果进行分析,揭示了该类型混凝土框架结构在中柱失效下的受力特征和荷载传递机制。PC1 与 PC2 在加载过程中经历了弹性阶段、弹塑性阶段、塑性铰发展阶段。试验表明该类型全装配式框架结构连续倒塌主要经历压拱效应阶段,尚未进入到悬链线效应阶段。

(7) 对该类型全装配式结构的承载力及变形性能分别进行了评估。PC1 及 PC2 试件的极限承载力分别为现浇试件在压拱效应阶段峰值荷载的 95% 和 123% 左右,其抗连续倒塌能力相对较弱;同时,PC1 及 PC2 试件的中柱竖向极限位移约为现浇 RC 试件的 48% 和 61% 左右,表明该类型装配式试件的延性相对不足。试验过程中 PC 试件的受力和变形则集中在梁柱节点处,框架梁裂缝主要集中在梁端,梁跨中截面处裂缝发展较少,整体结构最终因节点区域延性杆与锚固板连接处断裂而失效,材料的整体利用率相对较低。

受到试验条件以及作者的水平限制,本文的研究仍然有很多方面的不足需要进一步完善,主要有以下几个方面:

(1) 对节点高温后及高温下受力性能进行有限元分析,进一步了解了各种因素对于装配式框架结构高温抗连续倒塌性能的影响。

(2) 装配式梁柱节点只选取了中柱失效时进行研究,没有进行边柱或角柱失效时进行研究,需要对不同工况设计更多试验,完善装配式节点高温抗连续倒塌性能的研究。

参考文献

- [1] 张白, 陈俊, 杨鸥. 高温后混凝土质量损失及抗压强度退化规律试验研究. 建筑结构, 2019, 49(04): 76–81
- [2] 杨鸥, 王朝阳, 霍静思. 高温下钢筋与混凝土的黏结性能试验与分析. 湖南大学学报(自然科学版), 2018, 45(09): 10-19
- [3] Restrepo J I, Park R, Buchanan A H. Design of Connections of Earthquake Resisting Precast Reinforced Concrete Perimeter Frames. *Pci Journal*, 1995, 40(4): 44–61.
- [4] Joshi M K, Murty C V R, Jaisingh M P. Cyclic behaviour of precast RC connections. 79. 2005: 43–50
- [5] 朱洪进, 预制预应力混凝土装配整体式框架结构(世构体系)节点试验研究. 东南大学, 2006
- [6] Ertas O, Ozden S, Ozturan T. Ductile Connections in Precast Concrete Moment Resisting Frames. *PCI journal*, 2006, 51(3): 66–76
- [7] 蔡建国, 冯健, 王赞. 预制预应力混凝土装配整体式框架抗震性能研究. 中山大学学报(自然科学版), 2009, 48(2): 136–140
- [8] 窦祖融, 王怡, 薛伟辰. 低周反复荷载下装配整体式混凝土框架边节点的抗震性能. 建筑科学与工程学报, 2010, 27(02): 61–66
- [9] 陈适才, 闫维明, 王文明. 大型预制混凝土结构梁-柱-叠合板边节点抗震性能研究. 建筑结构学报, 2011, 32(06): 60–67
- [10] Im H J, Park H G, Eom T S. Cyclic loading test for reinforced-concrete-emulated beam-column connection of precast concrete moment frame. *Aci Structural Journal*, 2013, 110(1): 115–126
- [11] Parastesh H, Hajirasouliha I, Ramezani R. A new ductile moment-resisting connection for precast concrete frames in seismic regions: An experimental investigation. *Engineering Structures*, 2014, 70(9): 144–157
- [12] Ha S S, Kim S H, Lee M S, et al. Performance Evaluation of Semi Precast Concrete Beam-Column Connections with U-Shaped Strands. *Advances in Structural Engineering*, 2014, 17(11): 1585–1600
- [13] Yuksel E, Karadogan H F, Bal İ E, et al. Seismic behavior of two exterior beam-column connections made of normal-strength concrete developed for precast construction. *Engineering Structures*, 2015, 99: 157–172
- [14] Guan D, Guo Z, Xiao Q, et al. Experimental study of a new beam-to-column connection for precast concrete frames under reversal cyclic loading. *Advances in Structural Engineering*, 2016, 19(3): 529–545

- [15] Eom T S, Park H G, Hwang H J, et al. Plastic Hinge Relocation Methods for Emulative PC Beam–Column Connections. *Journal of Structural Engineering*, 2016, 142(2): 04015111
- [16] 曹徐阳, 冯德成, 王淳. 基于 OpenSEES 的装配式混凝土框架节点数值模拟方法研究. *土木工程学报*, 2019, 52(04): 13–27
- [17] Yi W J, He Q F, Xiao Y, et al. Experimental Study on Progressive Collapse-Resistant Behavior of Reinforced Concrete Frame Structures. *Aci Structural Journal*, 2008, 105(4): 433–439
- [18] Youpo S, Ying T, Xiaosheng S. Progressive Collapse Resistance of Axially-Restrained Frame Beams. *ACI Structural Journal*, 2009, 106(5): 600–607
- [19] 何庆锋, 易伟建. 考虑悬索作用钢筋混凝土梁柱子结构抗倒塌性能试验研究 *土木工程学报*, 2011, (4): 52–59
- [20] Li Y, Lu X, Guan H, et al. An improved tie force method for progressive collapse resistance design of reinforced concrete frame structures. *Engineering Structures*, 2011, 33(10): 2931–2942
- [21] Sasani M. Experimental and Analytical Evaluation of Progressive Collapse Resistance of a Full-Scale Structure Following Sever Loss of Load Bearing Elements. 82. 2011
- [22] 李易. RC 框架结构抗连续倒塌设计方法研究. 清华大学, 2011
- [23] S. Lew H, Bao Y, Sadek F, et al. An Experimental and Computational Study of Reinforced Concrete Assemblies under a Column Removal Scenario. 2011
- [24] Kai Q, Bing L. Performance of Three-Dimensional Reinforced Concrete Beam-Column Substructures under Loss of a Corner Column Scenario. *Journal of Structural Engineering*, 2013, 139(4): 584–594
- [25] Yu J, Kang H T. Special Detailing Techniques to Improve Structural Resistance against Progressive Collapse. *Journal of Structural Engineering*, 2014, 140(3): 04013077
- [26] Qian K, Li B, Ma J X. Load-Carrying Mechanism to Resist Progressive Collapse of RC Buildings. *Journal of Structural Engineering*, 2014, 141(2): 4014107–4014101
- [27] Ren P, Li Y, Lu X, et al. Experimental investigation of progressive collapse resistance of one-way reinforced concrete beam–slab substructures under a middle-column-removal scenario. 118.2016: 28-40
- [28] Lu X, Lin K, Li Y, et al. Experimental investigation of RC beam-slab substructures against progressive collapse subject to an edge-column-removal scenario. *Engineering Structures*, 2017, 149: 91-103
- [29] Pham A T, Tan K H, Yu J. Numerical investigations on static and dynamic

- responses of reinforced concrete sub-assemblages under progressive collapse. *Engineering Structures*, 2017, 149: 2–20
- [30] Yu J, Tan K-H. Structural Behavior of Reinforced Concrete Frames Subjected to Progressive Collapse. 114. 2017
- [31] Lim N S, Tan K H, Lee C K. Effects of rotational capacity and horizontal restraint on development of catenary action in 2-D RC frames. *Engineering Structures*, 2017, 153: 613–627
- [32] 周云, 陈太平, 胡翔. 考虑周边结构约束影响的 RC 框架结构防连续倒塌性能研究. *工程力学*, 2019, 36(01): 216–226+237
- [33] Nimse R B, Joshi D D, Patel P V. Behavior of wet precast beam column connections under progressive collapse scenario: an experimental study. *International Journal of Advanced Structural Engineering*, 2014, 6(4): 149–159
- [34] Kang S-B, Tan K H. Behaviour of precast concrete beam–column sub-assemblages subject to column removal. *Engineering Structures*, 2015, 93: 85–96
- [35] Kang S B, Tan K H, Yang E H. Progressive collapse resistance of precast beam–column sub-assemblages with engineered cementitious composites. *Engineering Structures*, 2015, 98: 186–200
- [36] Kai Q, Liu Y. Integrity of Precast Concrete Structures to Resist Progressive Collapse. 2016: 1976–1986
- [37] Kang S B, Tan K H. Robustness Assessment of Exterior Precast Concrete Frames under Column Removal Scenarios. *Journal of Structural Engineering*, 2016, 142(12): 04016131
- [38] Elsanadedy H M, Almusallam T H, Al-Salloum Y A, et al. Investigation of precast RC beam-column assemblies under column-loss scenario. *Construction and Building Materials*, 2017, 142: 552–571
- [39] 曾奕. 考虑周边约束钢筋混凝土梁柱结构抗倒塌性能试验研究. 湖南大学, 2018
- [40] Feng D-C, Wu G, Lu Y. Numerical Investigation on the Progressive Collapse Behavior of Precast Reinforced Concrete Frame Subassemblages. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2018, 32(3): 04018027
- [41] 陈太平. 全装配式混凝土框架结构抗连续倒塌静载试验研究. 湖南大学, 2018
- [42] 郭士雄. 约束钢梁在升温段和降温段的反应及梁柱节点的破坏研究. 同济大学, 2006
- [43] 王科. 钢筋混凝土框架节点的抗火性能试验研究. 山东建筑大学, 2009
- [44] Han L-H, Tao P Z, Zheng Y Q. Fire performance of steel-reinforced concrete beam–column joints. 61. 2009: 499–518

- [45] 王玉镯, 傅传国, 邱洪兴. 火灾后钢筋混凝土框架节点抗震性能试验研究. 建筑结构学报, 2009, 30(S2): 121–126
- [46] 王广勇. 钢筋混凝土框架结构抗火性能理论与试验研究. 北京工业大学, 2008
- [47] 王广勇, 韩林海, 余红霞. 钢筋混凝土梁-钢筋混凝土柱平面节点的耐火性能研究. 工程力学, 2010, 27(12): 164–173
- [48] 刘池. 磷酸镁混凝土框架节点抗火性能试验研究. 山东建筑大学, 2010
- [49] 傅传国, 王广勇, 宫梅. 钢筋混凝土框架节点火灾反应非线性分析. 山东建筑大学学报, 2009, 24(06): 495–499+521
- [50] 傅传国, 王广勇, 王玉镯. 钢筋混凝土框架节点抗火性能试验研究及理论分析. 东南大学学报(自然科学版), 2010, 40(04): 822–828
- [51] 杨颖. 钢管混凝土柱—钢梁节点抗火性能数值分析. 大连理工大学, 2010
- [52] 刘文超. 考虑海洋环境损伤的混凝土节点抗火性能基础试验研究. 青岛理工大学, 2013
- [53] 谭炎. 高温下梁柱边节点竖向腿覆试验研究. 湖南大学 2016
- [54] 陈华伟. 火灾下钢管混凝土柱—钢梁穿筋节点受力性能分析. 大连理工大学, 2016
- [55] Song T, Han L-H, Tao P Z. Performance of Steel-Reinforced Concrete Beam-to-Column Joints after Exposure to Fire. 142. 2016
- [56] Haremza C, Santiago A, Demonceau J-F, et al. Composite joints under M-N at elevated temperatures. Journal of Constructional Steel Research, 2016, 124: 173–186
- [57] 舒赣平, 杜二峰, 张欣欣. T型钢连接梁柱节点抗火性能试验研究. 工程力学, 2016, 33(07): 136–143
- [58] 李俊华, 章子华, 池玉宇. 火灾后型钢混凝土梁柱节点抗震性能试验研究. 工程力学, 2017, 34(07): 156–165
- [59] Li Z, Liu Y, Huo J, et al. Experimental assessment of fire-exposed RC beam-column connections with varying reinforcement development lengths subjected to column removal. Fire Safety Journal, 2018, 99: 38–48
- [60] Cooke G M E. Behaviour of precast concrete floor slabs exposed to standardised fires. Fire Safety Journal, 2001, 36(5): 459–475
- [61] Kose M M, Temiz H, Binici H. Effects of fire on precast members: A case study. Engineering Failure Analysis, 2006, 13(8): 1191–1201
- [62] Shakya A M, Kodur V K R. Response of precast prestressed concrete hollowcore slabs under fire conditions. Engineering Structures, 2015, 87: 126–138
- [63] 王换丽. 装配整体式螺栓钢板箍连接框架柱抗火性能研究. 西安建筑科技大学, 2017

- [64] 谢云翎. 高温下预制装配式混凝土界面抗剪性能研究. 苏州科技大学, 2018
- [65] 张海耀. 高温后预制装配式混凝土界面抗剪性能研究. 苏州科技大学, 2018
- [66] 李智. 高温下预制装配式型钢混凝土梁抗火性能研究. 江苏建筑, 2018, (04): 40-43
- [67] 邓曦. 钢筋半套筒灌浆连接在高温下及高温后的力学性能研究. 湖南大学, 2018
- [68] 顾为健, 毛小勇. 高温下预制装配式混凝土框架节点抗火性能分析. 苏州科技大学学报(工程技术版), 2018, 31(04): 41-49
- [69] Zhang W, He C, Zhang J, et al. Mechanical behavior of post-fire half-grouted sleeve connection covered by concrete. *Construction and Building Materials*, 2019, 201: 218-231
- [70] 中华人民共和国国家标准. 混凝土结构设计规范(GB50010). 北京, 建筑工业出版社, 2010
- [71] 中华人民共和国国家标准. 建筑抗震设计规范(GB50011). 北京, 建筑工业出版社, 2010
- [72] 中华人民共和国国家标准. 建筑结构荷载规范(GB50009). 北京, 建筑工业出版社, 2012
- [73] 中华人民共和国国家标准. 装配式混凝土建筑技术标准(GB/T51231-2016) 北京, 中国建筑工业出版社, 2010
- [74] 中华人民共和国建筑工业行业标准. 《钢筋机械连接用套筒》(JG/T 163-2013). 北京, 中国建筑工业出版社, 2013
- [75] 中华人民共和国建筑行业标准. 《预制预应力混凝土装配整体式框架结构技术规程》(JGJ224-2010). 北京, 建筑工业出版社, 2011
- [76] 中华人民共和国国家建筑标准. 《混凝土结构施工图平面整体表示方法制图规则和构造详图》(11G101-1). 北京, 中国计划出版社, 2011
- [77] 中华人民共和国建筑行业标准. 《预制预应力混凝土装配整体式框架结构技术规程》(JGJ224-2010) 北京, 建筑工业出版社, 2010
- [78] 中华人民共和国国家标准. 金属材料室温拉伸试验方法(GB/T228). 北京, 中国建筑工业出版社, 2010, 297-332
- [79] 中华人民共和国国家标准. 混凝土强度检测评定标准(GB/T50107). 北京, 中国建筑工业出版社, 2010, 1-24

致 谢

匆匆三年转眼即逝,在这里充满了太多的艰辛与困苦,但更多的成长与幸福,是难以忘怀的恩情和友谊。三年的研究生生涯,既是一段学术的攀登,也是一次丰富的成长。而今毕业在即,心怀许多感慨与感激,借着此次机会,感谢陪伴、帮助、支持和鼓励我的所有人。首先要感谢导师廖莎副教授和周云教授在学业上对我的指导和帮助,师恩之情,没齿难忘,既是我学业上的导师,更是我人生中的指路人。

感谢师兄陈太平、胡翔、奚树杭,师姐方亮、刘蒙,同门曾雅丽思、李紫玮、彭涵钰、张琴,以及师弟师妹裴熠麟、周赛、程依婷、阳建波、赵瑜、胡健鑫在三年之中对我的帮助与关心。

感谢我的家人,感谢我的父母,你们一直以来都是我成长的源泉与动力,感谢父亲对我学业无私的支持,感谢母亲时时的牵挂。最后感谢与好友愉快相处的时光,在平淡的生活中为彼此增添了无穷的乐趣。感谢湖大的一草一木,于孤独的时光中为我带来春花秋月的好时节。

感谢所有评委老师百忙之中抽出宝贵的时间参与本次评审和的答辩,祝各位老师身体健康,工作顺心!

王振生

2019年6月14日于长沙

附录 A 攻读学位期间所发表的学术论文

- [1] 廖莎, 王振生, 周云等. 全装配式延性杆节点连接的混凝土框架子结构抗连续倒塌静载试验研究. 湖南大学学报.