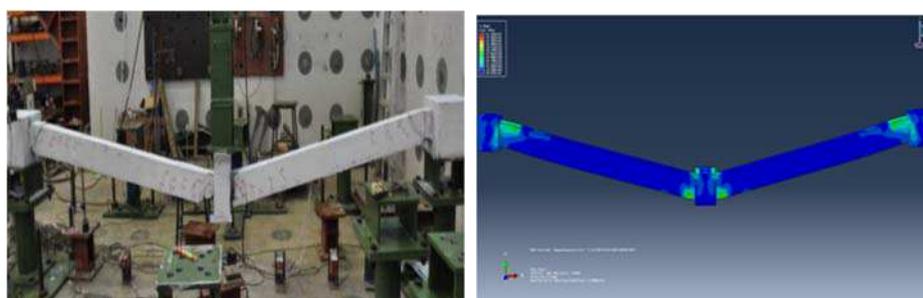


表 5.5 Qian K 等系列试件试验与模拟对比表

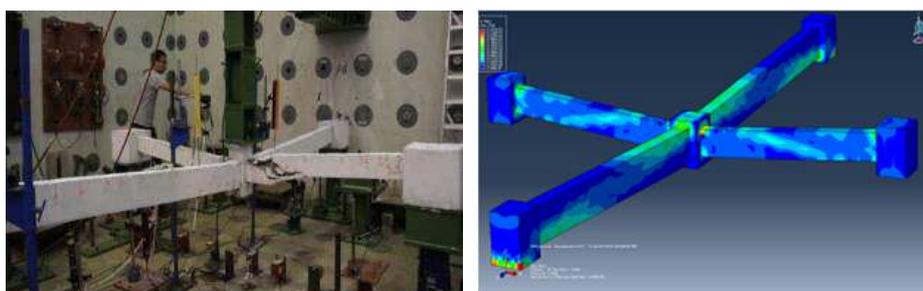
试件		开裂荷载	屈服荷载	拱峰值	拱位移	$\frac{F_{u,模}}{F_{u,试}}$	悬索峰值	悬索位移	$\frac{F_{t,模}}{F_{t,试}}$
		F_{cr}/kN	F_y/kN	F_u/kN	w_u/mm		F_t/kN	w_t/mm	
P1	试验值	8	24	32	35	1.02	47	361	1.043
	模拟值	8.70	23.9	32.82	34.96	6	49	-	
P2	试验值	11	26	36	28	0.96	59	286	1.034
	模拟值	11.9	27.6	34.64	20.27	2	61	-	
T1	试验值	15	48	67	32.9	1.02	79	250.4	1.015
	模拟值	15.7	48.4	68.6	38.5	4	80.2	-	
S1	试验值	44	80	115	41.3	0.90	169	213.8	1.002
	模拟值	46	78.5	102.9	29.4		169.4	-	

注：系列试件的模拟悬链线峰值分别取试验悬链线位移所对应的中柱反力。

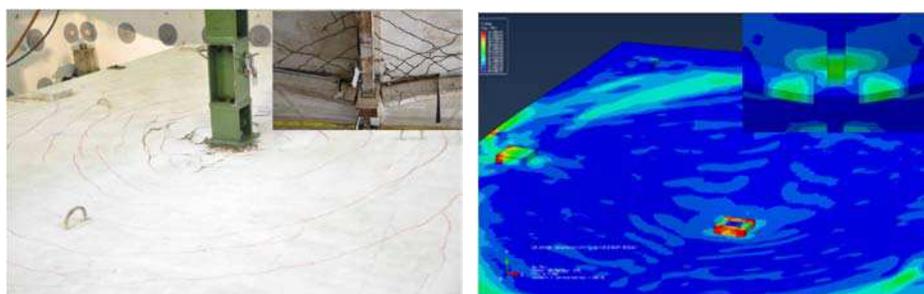
图 5.5 分别为试件 P1、T1 和 S1 试验和模拟破坏裂缝模式对比图。P1 试件的试验破坏裂缝模式与模拟破坏裂缝模式相同，中柱端梁端下部混凝土受拉开裂，上部受压破坏；边柱端梁端上部混凝土受拉开裂，下部受压破坏。T1 试件的试验破坏裂缝模式与模拟结果有所差异，试验试件破坏主要为一根短跨梁在靠近中柱处受剪破坏，而模拟结果为在短跨梁出现剪切裂缝，但子结构长跨方向还可以继续承载；S1 试件试验与模拟破坏裂缝模式显示在楼板上表面均形成裂缝环，靠近板的外边的为受拉裂缝环，靠近中柱位置的为受压开裂环。梁的破坏为靠近中柱的梁端下部混凝土受拉开裂破坏。



a) P1 试件



b) T1 试件

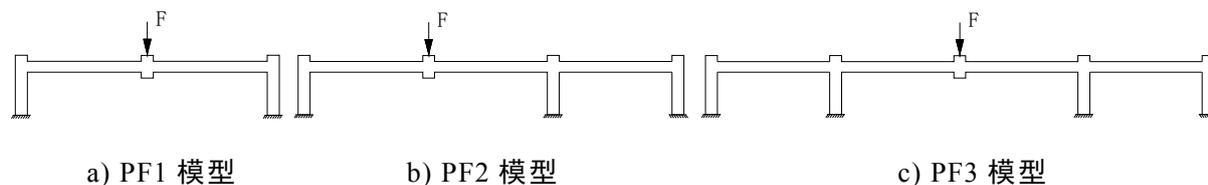


c) S1 试件

图 5.5 试验与模拟破坏模式对比

5.2 不同边跨约束下平面框架结构抗连续倒塌分析

平面框架结构的受力性能与其周围构件的约束情况密切相关，尤其是在结构中柱失效情况下，荷载传递路径依赖于周围构件的完整性。本文根据倒塌跨受到的不同边跨约束作用，建立 ABAQUS 有限元模型，分析倒塌跨在边跨约束下防连续倒塌的性能。边跨约束如图 5.6 所示，a)PF1 模型，表示倒塌跨无边跨约束作用，b)PF2 模型，表示倒塌跨右侧有边跨约束，c)PF3 模型，表示倒塌跨两侧有边跨约束。通过在中柱上表面施加静力线性位移模拟中柱移除过程至梁受力钢筋断裂。



a) PF1 模型

b) PF2 模型

c) PF3 模型

图 5.6 边跨影响下的分析模型

图 5.7 为模型 PF3 在中柱移除过程中边柱节点水平位移与中柱竖向位移之间的关系曲线，负值表示节点向框架外视为位移，正值表示节点向框架内的位移。可以看出，边节点先向外移动，之后又向内移动，据此将框架结构中柱移除过程分为压拱机制和悬链线机制。

图 5.8 为不同边跨约束情况下的框架子结构移除中柱过程中荷载位移关系曲线。采用不同的约束情况，子结构荷载位移曲线发展趋势整体相同，中柱位移在 150mm 之前，三条曲线基本重合，差别很小，位移 150mm 之后，荷载差别逐渐变大，其中 PF3 子结构模型荷载下降最明显，PF1 子结构模型荷载下降最少。悬链线阶段 PF3 子结构荷载增长速率最快，PF1 和 PF2 子结构上升增长速率相当。

图 5.9 为不同边跨约束情况下边节点水平位移与中柱竖向位移之间的关系曲线。PF3 子结构模型边柱节点在竖向位移为 217mm 时回到初始原点，PF1 子结构模型边节点在竖向位移则为 137mm 时回到初始原点。PF2 子结构模型左节点与右节点位移不同，右侧有边跨约束，水平位移很小，左侧无边跨约束，水平位移较大，左右节点回到初始原点的时刻也不相同，分别为 131mm 和 313mm。每个子

结构关键节点的具体荷载和位移见表 5.6。

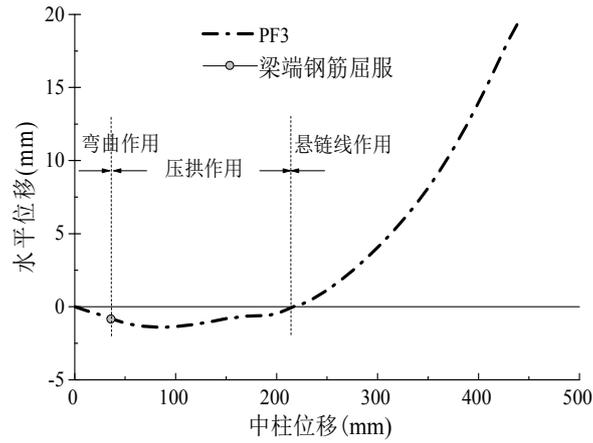


图 5.7 PF3 模型边节点水平位移曲线

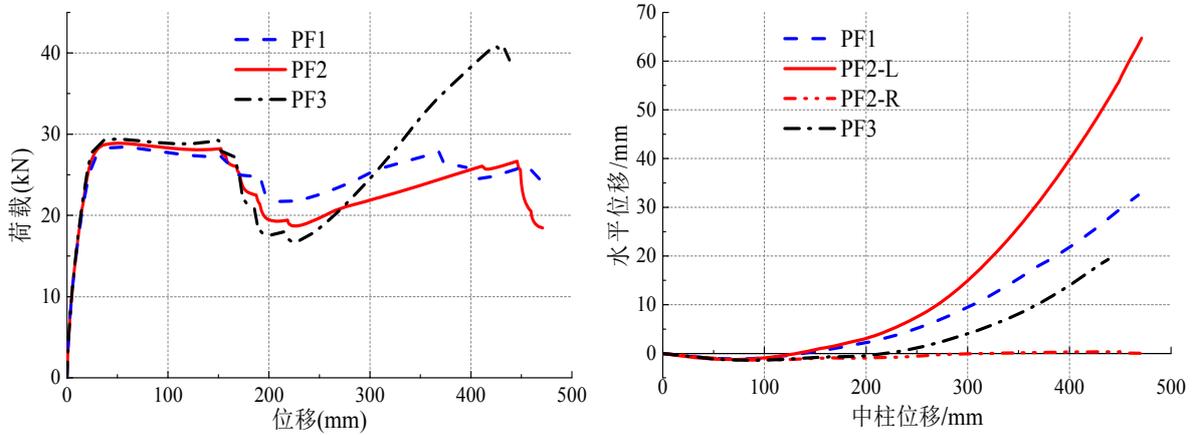


图 5.8 不同边跨约束下荷载位移曲线

图 5.9 不同边跨约束下边节点水平位移曲线

表 5.6 不同边跨约束下子结构承载能力和位移表

模型 编号	屈服荷载 F_y /kN	拱峰值 F_u /kN	拱位移 w_u /mm	悬索峰 值 F_t /kN	悬索位移 w_t /mm	边柱节点相对位移	
						u_{min} /mm	u_{max} /mm
PF1	25.2	28.4	52.4	27.8	369.6	2.21	65.02
PF2	25.6	28.9	51.9	26.7	445.9	-2.52	64.76
PF3	26.3	29.4	48.9	41.0	432.6	-2.80	38.64

表 5.6 为不同边跨约束下子结构关键点的荷载位移值。表中数据可以看出，子结构在弯曲阶段和压拱效应阶段的承载力差异很小，在悬链线效应阶段，子结构承载力差异较大。在悬链线阶段节点水平位移中，PF3 子结构模型左右边节点相对水平位移最小，为 38.64mm，PF1 和 PF2 模型左右边节点水平相对位移相差不大，分别为 65.02mm 和 64.76mm，是 PF3 模型相对位移的 1.683 和 1.675 倍；悬链线阶段的承载力中 PF3 子结构模型为 41kN，PF1 和 PF2 模型为分别 27.8kN 和 26.7kN，是 PF3 模型的 0.678 和 0.651 倍，说明框架子结构承载能力与边跨约

束密切相关。两侧均存在边跨约束时，子结构边节点水平相对位移小，边跨对倒塌跨框架梁的轴向约束大，悬链线阶段的承载能力也高。

5.3 考虑楼板影响的单层空间框架结构抗连续倒塌分析

楼板作为框架结构的组成构件，在结构受力过程中起着非常重要的作用，但在框架结构防连续倒塌中常常被忽略。以单层空间子结构为研究单元，研究不同位置处框架柱失效时框架子结构防连续性倒塌的性能，分析楼板对结构防倒塌承载力的贡献。分析模型如图 5.10 所示，a)SF4 模型，无楼板作用；b)SF5 模型，有楼板作用。对 SF4 和 SF5 模型分别进行移除中柱、长跨边柱、短跨边柱和角柱的防连续倒塌性能分析，比较不同位置处框架柱失效时框架结构防倒塌的能力。通过对比 SF4 和 SF5 模型在同一位置处框架柱失效时防连续倒塌性能，分析楼板在结构防倒塌过程中的作用。通过在失效柱上表面施加静力线性位移来模拟框架柱的移除过程，直至梁受力钢筋断裂。

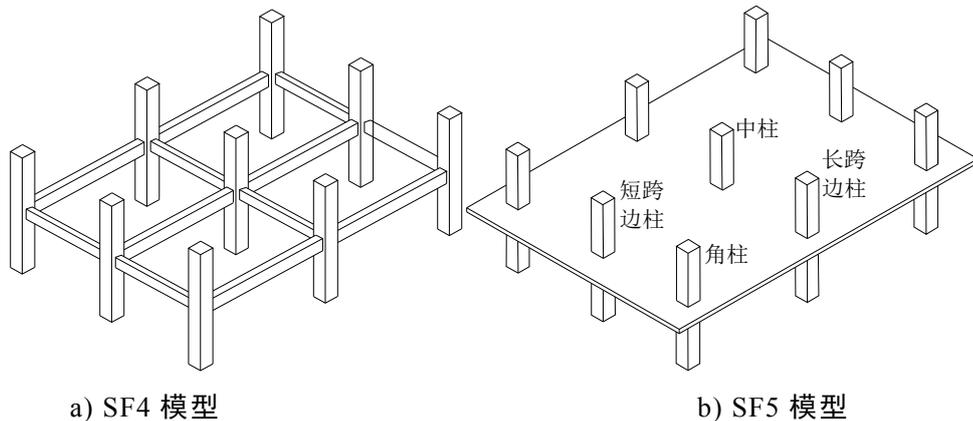


图 5.10 楼板作用下框架结构防连续倒塌分析模型

图 5.11 为 SF4 模型不同位置处框架柱失效过程中荷载位移曲线。图中可以看出，中柱和边柱移除过程中荷载都有两个上升段，压拱效应和悬链线效应明显，角柱移除过程中荷载只有一个上升段，无悬链线效应。比较四条曲线，中柱移除过程中子结构防连续性倒塌的能力最高，拱效应峰值和悬链线效应峰值荷载达 60.7kN 和 90.2kN。短跨边柱与长跨边柱在压拱效应阶段承载力相差不大，在悬链线阶段，短跨边柱移除过程承载力明显高于长跨边柱移除过程。角柱移除过程子结构防连续性倒塌能力最低，拱效应峰值约为移除中柱拱效应峰值的 0.49。

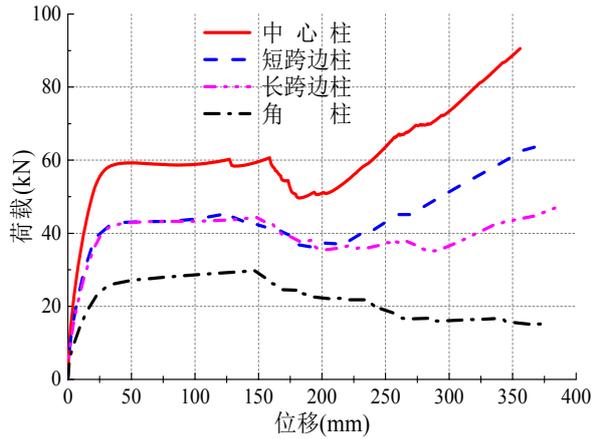


图 5.11 SF4 模型荷载位移曲线

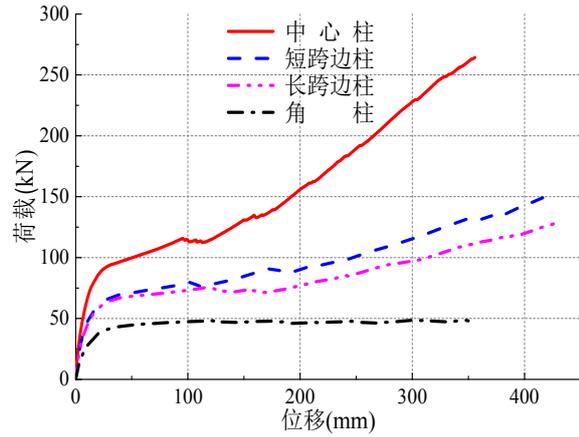


图 5.12 SF5 模型荷载位移曲线

图 5.12 为 SF5 模型不同位置处框架柱失效过程中荷载位移曲线。不同位置处框架柱移除过程中承载力大小关系与 SF4 模型相似，所不同的是，由于楼板作用，移除中柱和边柱移除过程中拱效应峰值之后没有明显的下降段。中柱移除过程中的子结构防连续倒塌能力最高，拱效应峰值和悬链线效应峰值分别为 146.4kN 和 264.3kN。长跨边柱和短跨边柱移除过程中拱效应峰值相差不大，约为中柱移除峰值荷载的 0.5，悬链线效应峰值长跨中柱移除过程小于短跨中柱移除过程。角柱移除过程无悬链线效应发生，拱效应峰值为 48.2kN，为中柱移除拱效应峰值的 0.33。具体承载力值见表 5.7。

表 5.7 考虑楼板作用的空间框架承载力汇总

工况	模型	屈服荷载	$\frac{F_{y.5}}{F_{y.4}}$	拱峰值	拱位移	$\frac{F_{u.5}}{F_{u.4}}$	悬索峰值	悬索位移	$\frac{F_{t.5}}{F_{t.4}}$
		F_y /kN		F_u /kN	w_u /mm		F_t /kN	w_t /mm	
中柱	SF4	52.4	1.27	60.7	158.7	2.41	90.5	355.9	2.92
失效	SF5	66.7		146.4	187.6		264.3	355.8	
长跨	SF4	39.1	1.17	44.5	152.2	1.69	47.5	387.2	2.71
边柱	SF5	45.8		74.7	189.0		128.5	431.0	
短跨	SF4	36.5	1.23	45.5	125.9	1.68	64.2	370.5	2.35
边柱	SF5	45.9		76.4	84.83		151.1	420.9	
角柱	SF4	22.2	1.53	29.8	150.4	1.62	-	-	-
失效	SF5	34.0		48.2	121.2		-	-	

表 5.7 列出了空间框架 SF4 和 SF5 模型不同位置处框架柱失效的承载能力对比结果。相比于 SF4 模型，有楼板作用的 SF5 模型承载力明显更高。同一位置框架柱移除过程中，以框架子结构中柱移除过程为例，悬链线阶段承载力提高最高，

SF5 模型与 SF4 模型悬链线效应峰值比为 2.92, 压拱效应阶段承载力比值为 2.41, 弯曲阶段承载力比值为 1.27。SF4 和 SF5 模型边柱和角柱移除过程也有相同的规律, 同一位置处框架柱移除过程中 SF5 模型承载力均明显高于 SF4 模型, 说明楼板明显提高了框架结构防连续倒塌承载能力, 最高可达 2.92。并且, 楼板对屈服阶段承载力提高系数最小为 1.25, 压拱阶段承载提高 1.85, 悬链线阶段提高最大, 为 2.65。

5.4 考虑楼层影响的多层空间框架结构抗连续倒塌分析

以 1-3 层空间框架结构为研究单元, 建立有限元模型, 分析多层空间框架结构防连续倒塌性能。分析模型示意如图 19 所示, (a)-(c) 分别为一层到三层框架结构模型。通过有限元模型对底层不同位置框架柱移除过程承载能力的分析, 对比每个位置处不同楼层框架模型承载能力, 得到结构承载力与楼层的关系。通过在失效柱上表面施加静力线性位移来模拟框架柱的移除过程, 直至梁受力钢筋断裂。

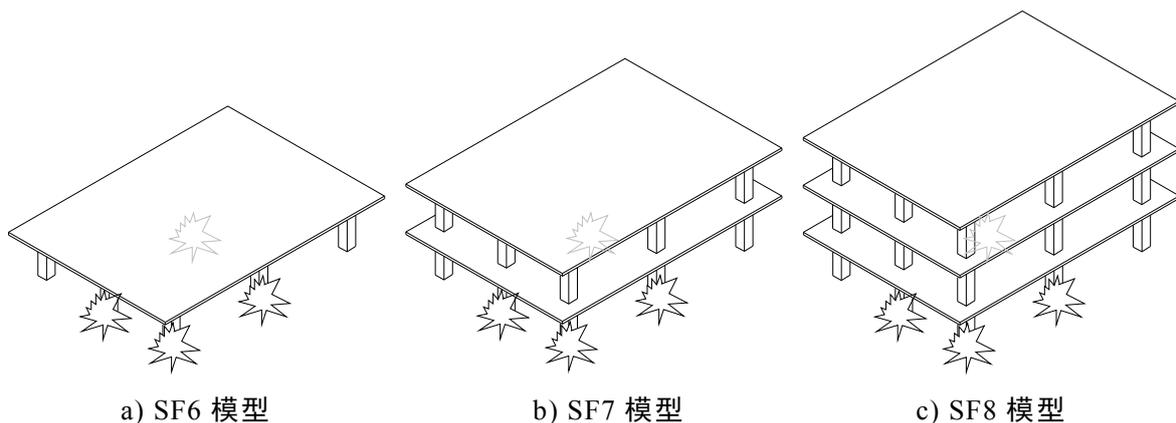


图 5.13 楼层作用下多层框架结构防连续倒塌分析模型

图 5.14 为模型 SF6 框架柱移除过程荷载与中柱竖向位移的关系曲线。分别研究了移除中柱、短跨边柱、长跨边柱和角柱时结构的承载能力。图中可以看出, 中柱移除过程承载力最高, 悬链线效应峰值荷载达 262.7kN, 长跨边柱与短跨边柱移除过程承载力相差不大, 约为中柱移除过程承载力的 0.39, 角柱移除过程承载力最低, 为 48.2kN, 且无悬链线效应阶段。图 5.15 为模型 SF7 在底层框架柱移除过程中的荷载位移曲线。中柱移除过程承载力为 490.8kN, 长跨边柱和短跨边柱移除过程承载力差异很小, 约为中柱移除过程承载力的 0.49, 角柱移除过程承载力最小, 为 100.67kN, 且没有悬链线阶段。图 5.16 为模型 SF8 在底层框架柱移除过程中的荷载位移曲线。与模型 SF6 和 SF7 有相似的规律, 中柱移除过程承载力最大, 为 469kN, 长跨边柱和短跨边柱移除过程承载力差异很小, 角柱移除过程承载力为 155.36kN。具体荷载位移值见表 5.8。

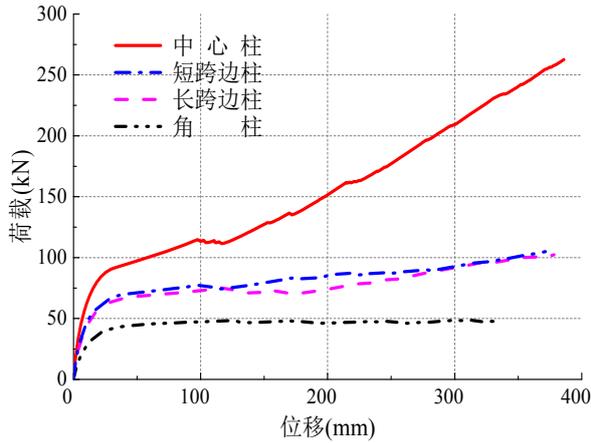


图 5.14 SF6 模型荷载位移曲线

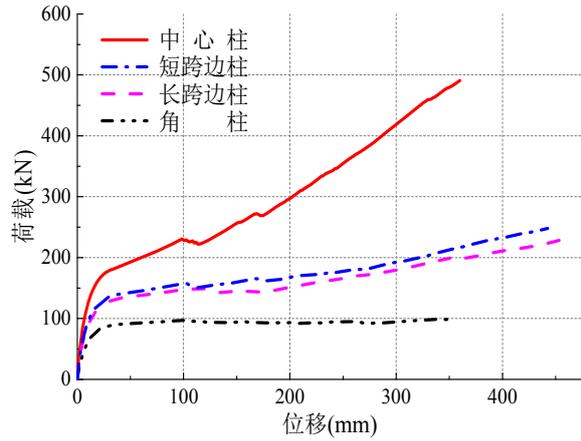


图 5.15 SF7 模型荷载位移曲线

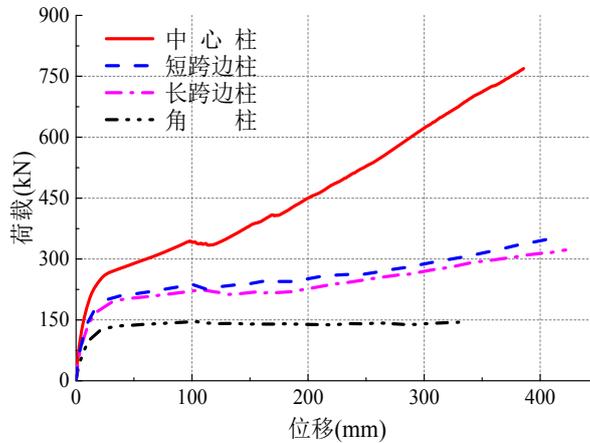


图 5.16 SF8 模型荷载位移曲线

表 5.8 给出了不同楼层框架结构在移除中柱、边柱和角柱过程中荷载位移对比值。中柱移除过程中，SF7 框架模型和 SF8 框架模型的拱效应峰值荷载分别为 SF6 框架模型的 2.17 和 3.24 倍，悬链线效应峰值则分别为 SF6 框架模型的 1.87 和 2.93 倍。可以看出，随着框架结构层数的增加，结构的承载力成倍的增加，同样的规律在边柱和角柱移除过程也可以看到。说明楼层的增加，可以大幅度地提高结构防连续倒塌的能力。在相同层数分析时，中柱移除过程中，屈服阶段的承载力随楼层的增长幅度最大，压拱阶段次之，悬链线阶段最小。而边柱移除过程却有相反的规律，悬链线阶段增长幅度最大，屈服阶段增长最小。

表 5.8 空间框架不同楼层防连续倒塌承载力汇总

工况	模型	屈服荷载	$\frac{F_{y,n}}{F_{y,6}}$	拱峰值	拱位移	$\frac{F_{u,n}}{F_{u,6}}$	悬索峰值	悬索位移	$\frac{F_{t,n}}{F_{t,6}}$
	编号	F_y/kN		F_u/kN	w_u/mm		F_t/kN	w_t/mm	
中柱 失效	SF6	61.8	1	106.1	76.10	1	262.7	385.94	1
	SF7	135.9	2.20	230.5	98.37	2.17	490.8	360.07	1.87
	SF8	208.2	3.4	344.0	98.44	3.24	769.0	385.73	2.93
长跨	SF6	54.4	1	71.7	160.29	1	102.3	378.27	1
中柱 失效	SF7	96.5	1.77	158.2	220.42	2.21	230.2	457.17	2.25
	SF8	143.9	2.64	233.9	214.28	3.26	342.2	422.16	3.35
	SF6	46.1	1	73.8	72.14	1	104.5	371.46	1
短跨 中柱 失效	SF7	106.9	2.32	173.4	101.11	2.35	247.9	442.71	2.37
	SF8	145.2	3.15	236.0	102.09	3.20	354.5	416.56	3.39
	SF6	36.4	1	48.2	120.28	1	-	-	-
角柱 失效	SF7	71.1	1.95	97.1	100.67	2.01	-	-	-
	SF8	107.2	2.95	140.4	155.36	2.91	-	-	-

注： $F_{y,n}$ 表示编号为 n 框架结构的屈服荷载， n 为 6-8， $F_{u,n}$ 、 $F_{t,n}$ 意义相同。

5.5 本章小结

利用有限元软件 ABAQUS 的强大非线性分析能力，对 Qian K 等框架子结构拟静力试验结果进行了精细有限元模拟。在此基础上，根据框架结构周围约束的不同，分析了平面子结构在左右不同跨约束下的防连续倒塌性能；建立了单层空间框架模型，分析了楼板对空间框架防倒塌性能的影响；进一步的建立了多层空间框架模型，分析了多层框架结构的防倒塌性能。本文主要结论为以下四点：

(1) ABAQUS 软件对 Qian K 等框架子结构的精细化模拟与试验结构吻合良好，S1 试件拱效应峰值误差为 10%，其余试件误差均在 5% 以内。说明塑性损伤模型能够很好地模拟混凝土的受力性能，ABAQUS 对大变形下 RC 框架结构的模拟是可行的。采用《规范》推荐的混凝土本构和线性强化钢筋本构是可取的。

(2) 分析了平面 RC 框架子结构在受到两侧不同的边跨约束时的承载能力。两侧均有边跨约束子结构承载力最高，尤其是悬链线阶段，承载力增长明显；两侧均无边跨约束的子结构悬链线阶段承载力略高于一侧有边跨约束的子结构，但只有两侧均有边跨约束子结构承载能力的 0.68。

(3) 分析了考虑楼板作用的单层空间框架结构除框架柱过程中结构防连续倒塌性能。在框架中柱、边柱和角柱移除过程中，考虑楼板作用的模型框架柱移除过程承载力均高于不考虑楼板作用的模型，且随着结构受力阶段的发展，楼板作

用对屈服、压拱和悬链线各阶段的承载力提高幅度逐渐变大，悬链线阶段最明显，楼板可将其防连续倒塌承载力提高至 2.92 倍，大幅度提高了结构承载力。

(4) 分析了 1-3 层空间框架结构移除底层框架柱过程中结构防连续倒塌性能。RC 框架结构随着楼层的增多，不同位置处框架柱除过程中承载能力都成倍的增长。相同位置时，中柱移除过程屈服阶段承载力增长幅度最大，压拱阶段次之，悬链线阶段最小；而边柱移除过程有着相反的规律，悬链线阶段增长幅度最大，屈服阶段增长最小。

结论与展望

本文以预制全装配式混凝土框架结构试验为研究对象，研究了全装配式混凝土框架结构在中柱移除过程中，防连续性倒塌的受力性能、荷载转换机制和最终破坏模式，以及梁柱连接节点的可靠性，得出了以下主要结论：

(1) 根据我国规范设计了一栋纵横向均为四跨的七层装配式框架结构，利用结构设计软件 PKPM 对其进行计算配筋，梁柱节点分别采用刚接和铰接两种计算模型。提取了结构中底部框架结构进行中柱移除拟静力试验研究，对装配式梁柱连接节点和试件设计进行了详细介绍。根据试验目的，设计并制作了试验加载与测量装置，包括试件约束与加载钢架，测量支撑等。

(2) 完成了包括一个现浇试件和两个装配式试件的试验加载过程，对每个试件试验过程中的不同受力阶段裂缝发展进行了详细描述，讨论了裂缝发展与中柱移除荷载转换机制的关系。揭示了子结构在移除中柱过程中的受力性能和荷载转换机理。现浇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，为结构提供第二次防倒塌保障；而装配式试件 PC1 在中柱移除过程中主要经历了压拱效应一个阶段，虽然 PC2 有短暂的悬索效应发展，但其承载力远不及现浇试件。

(3) 现浇试件承载能力高于装配式试件，尤其是悬索效应峰值较拱效应峰值提高 22%，大大增强了结构防连续倒塌能力。装配式试件 PC1 和 PC2 承载力分别为 RC 试件拱效应峰值的 76% 和 81%。相比极限位移，装配式试件的极限位移仅为现浇试件极限位移的 72% 和 77%，延性不足。

(4) 现浇试件最终的破坏模式是包括中节点梁端三根钢筋和边节点两根钢筋被拉断，不能继续承载，钢筋性能得到充分的发挥，二次防御承载能力提高。PC1 试件最终破坏是由于边节点梁端连接区三根插梢杆被剪断，失去承载能力，PC2 则是由于梁端连接区混凝土被压溃脱落，无法承载。现浇试件梁柱裂缝发展很充分，装配式试件的受力和变形主要集中在连接节点，框架梁跨中裂缝和变形较少。

(5) 利用 ABAQUS 有限元软件对三个试件进行了精细化的有限元模拟，详细介绍了有限元模型的建立过程，包括采用的单元、网格划分方法、边界约束条件模拟和加载方式等。对比了模拟结果与试验结果，荷载位移曲线和破坏模式等结果吻合良好，模型能够正确模拟试验的整个过程，能反应试件在各个加载阶段的受力性能。

(6) 在模拟验证的基础上，针对节点的试验破坏模式，对梁柱连接方式进行了优化设计，采取高强螺杆替代插梢钢筋、增大插梢钢筋直径等方式加强了插梢杆的性能。分别对明牛腿和暗牛腿两种连接方式进行了加强分析，分析表明，PC1-

1 和 PC1-2 拱效应承载能力较试验值分别提高了 31%和 13%，且出现了悬索效应，悬索效应承载力均高于拱效应承载力，二次防御能力得以提升。PC2-1 和 PC2-2 拱效应承载力与试验值相当，悬索效应承载力得到明显提高，分别提高 121%和 120%，二次防御性能优于现浇试验。相比破坏模式来说，PC1-2 模型最终破坏是由于插梢杆被剪断，其余模型破坏方式均为试件框架梁纵向受力钢筋被拉断。优化后的模型延性增大，PC1-1 和 PC1-2 模型破坏时的极限位移都在 500mm 以上，PC2-1 和 PC2-2 模型破坏时的极限位移都在 600mm 以上。在此基础上，分析了连接节点角型钢板对试件承载力的影响，加劲钢肋和等边角型钢板的设置对试件承载能力影响较大。

(7) ABAQUS 软件对 Qian K 等框架子结构的精细化模拟与试验结构吻合良好，S1 试件拱效应峰值误差为 10%，其余试件误差均在 5%以内。在验证模型正确性的基础上，分析了平面 RC 框架子结构在受到两侧不同的边跨约束时的承载能力。两侧均有边跨约束子结构承载力最高，两侧均无边跨约束的子结构悬链线阶段承载力略高于一侧有边跨约束的子结构。分析了考虑楼板作用的单层空间框架结构除框架柱过程中结构防连续倒塌性能，考虑楼板作用的模型框架柱移除过程承载力均高于不考虑楼板作用的模型，且随着结构受力阶段的发展，楼板作用对屈服、压拱和悬链线各阶段的的承载力提高幅度逐渐变大。分析了 1-3 层空间框架结构移除底层框架柱过程中结构防连续倒塌性能。RC 框架结构随着楼层的增多，不同位置处框架柱除过程中承载能力都成倍的增长。

本文在研究过程中，由于时间及硬件设备原因，缺少对全装配式混凝土框架结构梁柱连接节点受力性能进行理论分析和深层次的数值分析，要彻底研究全装配式混凝土框架结构抗连续倒塌的受力机理，还有很多工作要做。

(1) 对梁柱连接节点受力性能进行理论分析，推导精确的理论计算公式，指导工程设计。

(2) 建立多层平面框架或空间框架结构，分析整体模型在框架柱移除过程中结构抗连续倒塌承载能力，对比不同位置处框架柱移除过程结构受力性能的差异。

参考文献

- [1] 卢家森. 装配整体式混凝土框架实用设计方法. 长沙: 湖南大学出版社, 2016
- [2] 徐铭. 全装配式混凝土剪力墙结构性能非线性有限元分析:[湖南大学硕士学位论文]. 长沙:湖南大学, 2013
- [3] 国务办. 绿色建筑行动方案. 北京: 国务院办公厅, 2013
- [4] 国务办. 关于大力发展装配式建筑的指导意见. 北京: 国务院办公厅, 2016
- [5] 中华人民共和国国家标准. 装配式混凝土结构建筑技术标准(GB/T51231-2016). 北京: 中国建筑工业出版社, 2016
- [6] 缪俊. 预制装配式部分钢骨混凝土框架梁柱节点有限元分析:[大连理工大学硕士学位论文]. 哈尔滨: 大连理工大学, 2014
- [7] Ellingwood B R. Mitigating risk from abnormal loads and progressive collapse. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2006, 20(4): 315-323
- [8] 中国工程建设协会标准. 建筑结构抗倒塌设计规范 CECS392: 2014. 中国计划出版社. 2015
- [9] Department of Defense. Design of Building to Resist Progressive Collapse UFC 4-023-03. Washington DC: Department of Defense, 2005
- [10] 贾金刚, 徐迎. 关于“连续倒塌”定义的讨论. *爆破*, 2008, 25(01): 22-24
- [11] Starossek U. Typology of progressive collapse. *Engineering Structures*, 2007, 29(9):2302-2307
- [12] Restrepo J I. Design of connections of earthquake resisting precast reinforced concrete perimeter frames. *Pci Journal*, 1995, 40(4):44-61
- [13] Joshi M K, Murty C V R, Jaisingh M P. Cyclic behaviour of precast RC connections. *Indian Concrete Journal*, 2005, 79(11):43-50
- [14] Ozturan T, Ozden S, Ertas O. Ductile Connections in Precast Concrete Moment Resisting Frames. *Pci Journal Prestressed Concrete Institute Journal*, 2006, 51: 66-76
- [15] 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:[东南大学硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2006
- [16] 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(2):61-66
- [17] 陈适才, 闫维明, 王文明, 等. 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(6):60-67
- [18] Choi H K, Choi Y C, Choi C S. Development and testing of precast concrete beam-to-column connections. *Engineering Structures*, 2013, 56(6):1820-1835
- [19] Maya L F, Zanuy C, Albajar L, et al. Experimental assessment of connections for

- precast concrete frames using ultra high performance fibre reinforced concrete. *Constr Build Mat. Construction & Building Materials*, 2013, 48(19):173-186
- [20] 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
- [21] Breccolotti M, Gentile S, Tommasini M, et al. Beam-column joints in continuous RC frames: Comparison between cast-in-situ and precast solutions. *Engineering Structures*, 2016, 127:129-144
- [22] Ersoy U, Tankut T. Precast Concrete Members With Welded Plate Connections Under Reversed Cyclic Loading. *Pci Journal*, 1993, 38(4):94-100
- [23] 赵斌, 吕西林, 刘丽珍. 全装配式预制混凝土结构梁柱组合件抗震性能试验研究. *地震工程与工程振动*, 2005, 25(1):81-87
- [24] Korkmaz H H, Tankut T. Performance of a precast concrete beam-to-beam connection subject to reversed cyclic loading. *Engineering Structures*, 2005, 27(9):1392-1407
- [25] Vidjeapriya R, Jaya K P. Behaviour of Precast Beam-column Mechanical Connections under Cyclic Loading. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2012, 13(2):233-245
- [26] Vidjeapriya R, Jaya K P. Experimental Study on Two Simple Mechanical Precast Beam-Column Connections under Reverse Cyclic Loading. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2013, 27(4):402-414
- [27] Stone W C, Cheok G S, Stanton J F. Performance of Hybrid Moment-Resisting Precast Beam-Column Concrete Connections Subjected to Cyclic Loading. *Aci Structural Journal*, 1995, 92(2):229-249
- [28] 冯健, 于长海. 预应力及钢筋混凝土企口接头受剪性能试验研究. *东南大学学报(自然科学版)*, 2000, 30(4):27-32
- [29] Alcocer S M, Carranza R, Perez-Navarrete D, et al. Seismic Tests of Beam-to-Column Connections in a Precast Concrete Frame. *Pci Journal*, 2002, 47(3):70-89
- [30] 柳炳康, 施法科, 刘海涛, 等. 反复荷载下预压装配式框架接合部受力性能. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2005, 28(1):71-74
- [31] 杨晓波. 预压装配式预应力混凝土框架节点的抗震性能研究:[合肥工业大学硕士学位论文]. 哈尔滨: 合肥工业大学, 2010
- [32] 种迅, 孟少平, 潘其健. 后张预应力预制混凝土框架梁柱节点抗震性能试验研究. *土木工程学报*, 2012(12):38-44
- [33] Wang H, Marino E M, Pan P, et al. Experimental study of a novel precast prestressed reinforced concrete beam-to-column joint. *Engineering Structures*, 2018, 156:68-81

- [34] Sucuoglu H. Effect of Connection Rigidity on Seismic Response of Precast Concrete Frames. *Pci Journal*, 1995, 40(1):94-103
- [35] Englekirk R E. Development and Testing of a Ductile Connector for Assembling Precast Concrete Beams and Columns. *Pci Journal*, 1995, 40(2):36-51
- [36] Kulkarni S A, Li B, Yip W K. Finite element analysis of precast hybrid-steel concrete connections under cyclic loading. *Journal of Constructional Steel Research*, 2008, 64(2):190-201
- [37] Magliulo G, Ercolino M, Cimmino M, et al. FEM analysis of the strength of RC beam-to-column dowel connections under monotonic actions. *Construction & Building Materials*, 2014, 69:271-284
- [38] Griffiths H, Pugsley A, Saunders O. Report of the inquiry into the collapse of flats at Ronan Point, canning town: presented to the Minister of Housing and Local Government. London:HMSO, 1968
- [39] Corley W G, Smith R G, Colarusso L J. Structural Integrity and the Oklahoma City bombing. *Concrete Construction*, A Hanley-Wood Publication, Addition, Illinois, 2001,46 (12):29-30
- [40] National Institute of Standards and Technology NIST. 2005. Final rep. on the Collapse of the World Trade Center Towers. Siva Shyam Sunder, Lead Investigator, NIST,Gaithersbury, Md, <http://wtc.nist.gov>, 2007.5
- [41] EN 1991-1-7. Eurocode 1: Action on structures. Part 1-7: General Action Accidental actions. Brussels: European Committee for Standardization
- [42] GSA2010. Progressive collapse analysis and design guidelines for new federal office buildings and major modernization projects. Washington, D.C: United States General Services Administration
- [43] DoD2010. Design of structures to resist progressive collapse. Washington, D.C: Department of Defense
- [44] 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
- [45] 何庆锋. 钢筋混凝土框架结构抗倒塌性能试验研究:[湖南大学博士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2009
- [46] Su Y, Tian Y, Song X. Progressive Collapse Resistance of Axially-Restrained Frame Beams. *Aci Structural Journal*, 2009, 106(5):600-607
- [47] Hai S L, Bao Y, Sadek F, et al. An Experimental and Computational Study of Reinforced Concrete Assemblies under a Column Removal Scenario. NIST TN - 1720, 2011
- [48] Qian K, Li B. Experimental and Analytical Assessment on RC Interior Beam-

- Column Subassemblages for Progressive Collapse. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2011, 26(5):576-589
- [49] Yu J, Tan K H. Structural Behavior of RC Beam-Column Subassemblages under a Middle Column Removal Scenario. *Journal of Structural Engineering*, 2013, 139(2):233-250
- [50] Qian K, Li B. 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
- [51] Yu J, Tan K H. Experimental and numerical investigation on progressive collapse resistance of reinforced concrete beam column sub-assemblages. *Engineering Structures*, 2013, 55(4):90-106
- [52] Yu J, Tan K H. Special Detailing Techniques to Improve Structural Resistance against Progressive Collapse. *Journal of Structural Engineering*, 2014, 140(3):04013077:1-15
- [53] Dat P X, Kang H T. Experimental study of beam-slab substructures subjected to a penultimate-internal column loss. *Engineering Structures*, 2013, 55:2-15
- [54] Qian K, Li B. Slab Effects on Response of Reinforced Concrete Substructures after Loss of Corner Column. *Aci Structural Journal*, 2013, 109(6):845-869
- [55] Qian K, Li B, Ma J X. Load-Carrying Mechanism to Resist Progressive Collapse of RC Buildings. *Journal of Structural Engineering*, 2015, 141(2):4014107-1-14
- [56] 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. *Engineering Structures*, 2016, 118:28-40
- [57] 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*, 2016
- [58] Khandelwal K, El-Tawil S. Assessment of Progressive Collapse Residual Capacity Using Pushdown Analysis. *Structures Congress*. 2008:1-8
- [59] Bao Y, Kunnath S K, El-Tawil S, et al. Macromodel-Based Simulation of Progressive Collapse: RC Frame Structures. *Journal of Structural Engineering*, 2008, 134(7):1070-1078
- [60] 陈超. 钢筋混凝土框架结构抗连续性倒塌分析:[华南理工大学硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2010
- [61] 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
- [62] Sasani M, Kazemi-Moghaddam A. Experimental and Analytical Evaluation of

- Progressive Collapse Resistance of a Full-Scale Structure Following Sever Loss of Load Bearing Elements. *Applied Mechanics & Materials*, 2011, 82:326-331
- [63] 李易. RC 框架结构抗连续倒塌设计方法研究:[清华大学博士学位论文]. 北京:清华大学, 2011
- [64] 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*, 2016, 149:2-20
- [65] Yu X H, Lu D G, Qian K, et al. Uncertainty and Sensitivity Analysis of Reinforced Concrete Frame Structures Subjected to Column Loss. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2016, 31(1):04016069-1-14
- [66] 蔡小宁. 新型预应力预制混凝土框架结构抗震能力及设计方法研究: 东南大学博士学位论文. 南京: 东南大学, 2012
- [67] 陈佳佳. 新型预应力预制装配式混凝土框架节点试验研究. 东南大学硕士学位论文. 南京: 东南大学, 2011
- [68] 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
- [69] Nimse R B, Joshi D D, Patel P V. Experimental Study on Precast Beam Column Connections Constructed Using RC Corbel and Steel Billet under Progressive Collapse Scenario. 2015
- [70] Kang S B, Tan K H. Behaviour of precast concrete beam-column sub-assemblages subject to column removal. *Engineering Structures*, 2015, 93:85-96
- [71] 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
- [72] Kang S B, Tan K H. Progressive Collapse Resistance of Precast Concrete Frames with Discontinuous Reinforcement in the Joint. *Journal of Structural Engineering*, 2017, 143(9)
- [73] Feng D, 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):04018027-1-14
- [74] Main J A, Bao Y, Lew H S, et al. An Experimental and Computational Study of Precast Concrete Moment Frames under a Column Removal Scenario. NIST TN - 1886, 2015
- [75] Klasila E. Managing the progressive collapse of a corner of an office building built from precast concrete elements. 2016
- [76] Tohidi M, Yang J, Baniotopoulos C. Numerical evaluations of codified design

- methods for progressive collapse resistance of precast concrete cross wall structures. *Engineering Structures*, 2014, 76:177-186
- [77] Elsanadedy H M, Almusallam T H, Al-Salloum Y A, et al. Investigation of precast RC beam-column assemblies under column-loss scenario. *Construction & Building Materials*, 2017, 142:552-571
- [78] Qian K, Li B. Performance of Precast Concrete Substructures with Dry Connections to Resist Progressive Collapse. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2018, 32(2):04018005-1-14
- [79] 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
- [80] 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
- [81] 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
- [82] 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, 中国工业出版社, 2010
- [83] 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, 中国工业出版社, 2010
- [84] 刘巍, 徐明, 陈忠范. ABAQUS 混凝土损伤塑性模型参数标定及验证. *工业建筑*, 2014,44(增): 167-171
- [85] Othman H, Marzouk H. Finite-Element Analysis of Reinforced Concrete Plates Subjected to Repeated Impact Loads. *Journal of Structural Engineering*, 2017, 143(9):04017120-1:16

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。回忆过去,从来时的大学新生到毕业时的研究生,在湖大度过了最为重要的七年青春时光。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。首先要感谢导师周云副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。感谢课题组易伟建教授对试验的悉心指导,愿老师身体健康。感谢黄远副教授对我研究提供的硬件支持。

感谢师兄张军凯、陈松柏、贾凡丁、吴峥,师姐方亮、周祎,同门胡翔、奚树杭、刘蒙,以及师弟师妹王振生、李紫玮、彭涵钰、曾雅丽思、张琴、裴熠麟、周赛、程依婷在三年之中对我的帮助与关心。感谢室友陈宝、赵灵杰、吴博对我生活的关心与支持。

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,感谢廖慧娟同学三年的陪伴、理解与支持。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!

陈太平

2018年5月20日于长沙

附录 A 攻读学位期间发表的学术论文目录

- [1] 周云, 陈太平, 胡翔, 易伟建. 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(已录用)