

表 3.7 边柱失效工况下各极值状态点荷载放大系数 α 与竖向位移

框架类型	状态点	荷载系数 α	竖向位移(mm)
现浇框架	屈服点	0.566	16.4
	极值点	1.912	152.1
	倒塌点	2.014	2000
优化前装配式框架	屈服点	0.719	29.0
	极值点	1.557	248.0
	倒塌点	1.256	2000
优化后装配式框架	屈服点	0.548	18.7
	极值点	1.639	152.4
	倒塌点	1.750	2000

图 3.23 a) 和 b) 分别为现浇框架结构和装配式框架结构在边柱失效工况下失效柱节点竖向位移与各层梁构件轴力关系曲线。由各层轴力曲线随失效节点的位移变换关系可知, 各层轴力均处于轴向受拉或受压状态, 轴向受力状态没有发生明显的转换, 这也进一步说明了在边柱失效工况下, 底层受损梁跨不能从受压转换为受拉状态形成有效拉结作用, 从而使得结构不能形成悬链线作用。其中优化后的装配式框架结构底层与顶层梁构件分别承轴向压力与轴向拉力作用, 随着失效节点竖向位移的增大, 顶层梁构件的轴拉力变小, 底层梁构件的轴向压力变大, 中间各层的轴向力, 在达到结构梁机制作用下的峰值之后, 也几乎不变化, 轴向作用力相对较少。现浇多层框架结构的各层轴向作用力在倒塌全过程中, 也表现为单一的受拉或受压状态。其中底层与二层梁构件表现为较明显的受压状态, 顶层与六层表现为较为明显的受拉状态, 其他各层轴力随失效节点的竖向位移增大变化不明显, 几乎表现为轴向受力为 0。

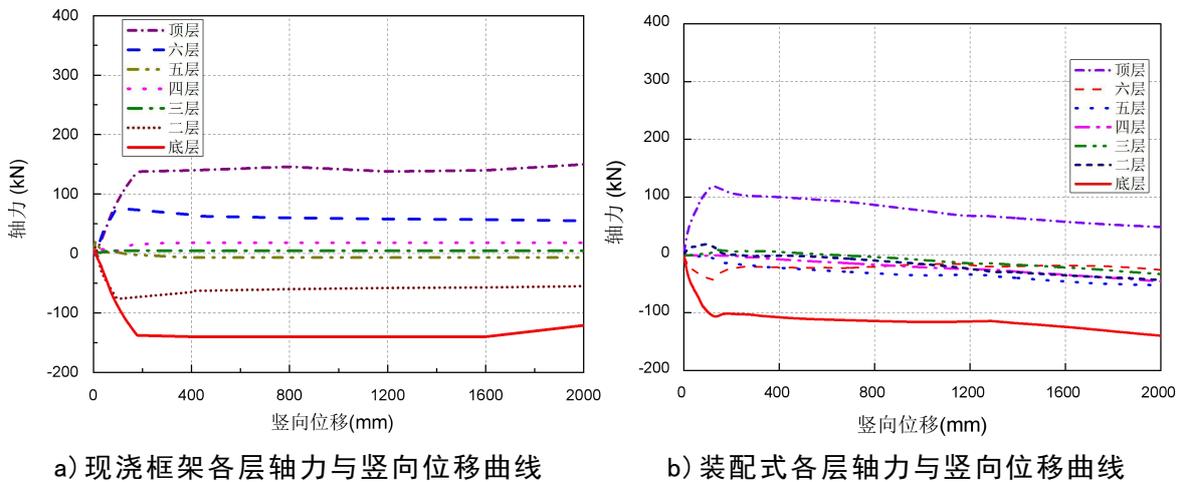


图 3.23 边柱失效工况下轴力-位移曲线

3.6 本章小结

本章基于第二章中的装配式PC1试件的原模型，设计了带有混凝土牛腿-角形钢板-插梢连接节点的多层全装配式框架结构，和与之对比的现浇框架结构。通过基于拆除构件法的非线性静力Pushdown分析，研究了全装配式框架结构的整体抗连续倒塌性能，并对优化后的多层装配式框架结构的抗连续倒塌进行了计算分析。

(1) 依据我国现行规范，设计了一栋7层4跨的带有混凝土牛腿-角形钢板-插梢连接节点的全装配式框架结构，和与之对比的现浇框架结构。基于上一章对于装配式与现浇节点的节点有限元建模方法，分别建立了该装配式与现浇节点的有限元模型，分别在两种失效工况下和两种加载方式下，进行Pushdown计算分析。

(2) 根据Pushdown分析结果，得到两种加载方式对装配式结构抗连续倒塌分析的影响并不明显，说明失效柱对于结构的影响范围相对有限。在中柱与边柱失效工况下，装配式结构抗连续倒塌能力较现浇结构分别低，且在中柱失效工况下装配式框架结构没有发展明显的悬链线效应。其中装配式框架结构在梁机制作用下的抗连续倒塌极限承载能力比现浇框架结构低18.5%与22.8%左右。

(3) 根据分析结果，对多层装配式框架结构进行优化分析，将节点的普通螺杆连接替换成高强螺杆，分别在底层中柱与底层边柱拆除的情况下进行Pushdown分析，得到优化后的全装配式框架结构的抗连续倒塌性能得到显著的改善，并对其连续倒塌受力机制进行了分析。

第 4 章全装配式框架结构不确定性与灵敏度分析

引发结构连续性倒塌的因素有很多，且多是由一些极端的偶然事件导致的。由于在设计中考虑到经济与实用性，现行的诸多规范里面并没有完全考虑以这些概率极小的偶然事件作为结构设防目标。以此，针对结构设计中一些不确定性参数，来评估结构抵抗连续性倒塌的风险，进而对结构设计提出一些有用的建议，是极为重要的。尤其是在装配式结构中，通过对一些设计参数的不确定性分析，能够很好地量化结构响应的偏差，提高对结构设计中参数取值的准确性。而解决这一难题的重要方法便是灵敏度分析方法，灵敏度分析的本质是探究结构模型输出响应不确定性的来源，通过对这些来源的分析最终量化不确定性来源对结构响应的影响度。

在对装配式结构抗连续倒塌进行不确定性与灵敏度分析，实质上是探究装配式结构设计中一些关键参数对结构发生连续性倒塌的影响。这些参数包括构件的形式，荷载的作用，材料的参数等，在一定程度上具有不确定性，基于概率方法来描述这些不确定性，通过灵敏度分析来评估这些设计参数对于装配式结构抗连续倒塌的影响，可以为该类型的装配式结构设计提供参考依据，优化结构设计参数。在本章中基于上一章的对于装配式结构抗连续倒塌 Pushdown 分析，基于概率方法，建立对该全装配式结构设计中的关键参数的不确定性分析，并与现浇结构进行对比分析。

4.1 结构不确定性与灵敏度分析的相关原理

4.1.1 结构分析的不确定性

随着当前结构工程越来越复杂，以及新的结构形式越来越多样化，而当前我们对于结构设计都依赖于对计算模型的建立。然而在计算模型建立过程中，许多设计参数与输入参数并不能完全根据实际工程来确认。譬如，对于实际工程结构体系认知不够，或是结构本身存在一些可变性，这都将导致在结构设计中对于输入的边界条件，结构的几何物理参数等的不确定性，从而导致结构响应与实际预测相比具有不确定性。

对于结构不确定性的表征方式主要有两种方法，一种是基于概率方法，另一种是基于非概率方法。其中对于通过概率方法来表征结构的不确定性主要是通过概率密度函数与各阶统计矩。这种方法基于数学理论，已经得到了较为广泛地应用，可以用来描述随机的不确定性分析。对于用非概率方法来表征结构分析的不

确定性，主要是基于以下理论，模糊理论^[86]，证据理论^[87]和凸集模型理论^[88]等。其中，模糊理论通过隶属度函数来表征参数输入的不确定性，得到的是基于专家意见得到的相关不确定性参数，往往在一些复杂的实际工程中能得到只有上下边界。在本文的分析中，主要是基于概率方法来表征参数的不确定性对于结构抗连续倒塌性能的影响。在结构抗连续倒塌研究领域，利用概率方法来评估不确定性的影响已经成为一个重要的研究方向^[89]。其中 Ellinwood 等^[90]对于结构抗连续倒塌已经建立了相应的框架来进行风险概率评估。与现有的确定性结构分析相比较，对于基于概率方法来评估不确定性参数对于结构抗连续倒塌影响相对较少，尤其是对于节点形式变化多样的装配式结构而言，更尤为重要。为了更全面地评估装配式结构设计中一些关键参数的不确定性对于结构抗连续倒塌的影响，本文主要从三个关键的来源选择不确定性参数进行分析。

1. 材料参数的不确定性

在对结构分析中，混凝土、钢筋等主要结构材料在实际工程中，由于加工方式，制作工艺。养护等诸多因素，使得其物理性质材料力学性能跟设计所取的相关参数存在一定的变异性，在一定程度上对实际结构会产生或多或少的影响。对于材料这类参数的变异性在一定程度上可以通过人为的控制，如通过室内试验取样检测。因此通过定性评估这些参数变异对于结构分析的影响度，可以排除干扰度小的参数，对于结构影响较大的参数则可以通过实现预测并采用相关手段来提高结构安全性。

2. 几何模型的不确定性

在对结构进行设计与分析时，选取的计算模型相较于实际复杂模型是简化后的近似合理的模型。这个理想化与简化的过程，在充分反映原型结构主要特征的同时，会忽略掉结构的很多非重要性特征，因此，势必造成与实际力学模型相比较，存在不确定性。在构造结构计算模型时，通常存在许多假设，如对于材料性质的假设，通常有弹性假设、弹塑性假设、粘弹性假设理论等，这些会导致力学介质模型的不确定性。对于结构构件的设计尺寸选取，如结构跨度，梁、柱构件的截面尺寸等的选取，往往与实际中结构中或多或少的存在变异，这些对于结构计算与结构分析会产生不确定性。再者，在构建结构模型边界条件时，通常抽象为固支约束、铰接约束等，但实际结构实际边界条件往往是复杂，这种简单抽象的处理方式也会导致结构分析中的不确定性。在对结构计算的方法上，往往是基于某些基本假设，比如平截面假定等，虽在一定程度上可以较合理准确地反映结构实际受力，但由此产生的不确定性，往往也会影响这结构计算的可靠性问题。

3. 外界荷载的不确定性

在对结构分析计算过程中，通常使用的是“结构-荷载-结果”的模式，因此结构受力变形与最终的稳定性取决于施加的荷载、结构承载力以及外部其它作用

力。结构在实际环境中，既有既定荷载，也有随机荷载，如地震、风荷载降水和雪荷载等。这些随机荷载在作用时间、实际量值以及实际作用位置，或多或少地存在不确定性。再者，在结构设计过程中，对于各类荷载的组合同样存在变异性问题。

基于这三类主要的不确定性来源，考虑对装配式结构设计的优化，主要选择了共计 15 个不确定性参数，如表 4.1。

表 4.1 不确定性参数

不确定性来源	参数选择		
荷载参数	楼面恒载	屋面恒载	活荷载
材料参数	砼抗压强度	砼弹性模量	砼保护层厚度
	纵筋屈服强度	纵筋弹性模量	箍筋屈服强度
几何参数	梁纵筋截面积	柱纵筋截面积	箍筋截面积
	楼层跨度	梁宽	梁高

4.1.2 结构灵敏度分析方法

灵敏度分析是根据输入参数对结构分析模型输出响应不确定性的贡献大小，对输入的参数进行影响度高低排序，进而通过减小重要输入参数的不确定性，来减少模型输出响应的不确定性，从而提高结构模型分析与预测的稳健性。通过对结构的不确定性分析可以量化结构模型响应输出的不确定性，进而能够得到预测结构响应的置信度。通过对不确定性参数的分析，能够得到影响结构分析的主要参数，通过对这些参数的控制，就能有效地降低相应的风险，提高模型分析的可靠度。而实现这一目标的方法便是灵敏度分析。灵敏度的计算方法多种多样，其中主要可分为两类，局部灵敏度分析方法与全局灵敏度分析方法。其中局部灵敏度分析方法是得到相关参数定义域内的某一点的灵敏度大小，它虽计算简单、快速，但是不能体现对整体结构响应的影响。局部灵敏度的计算方法通常有直接微分法与有限差分法等。全局灵敏度是针对参数定义内的全范围，且各参数同时变化，它能够很好地衡量参数的不确定性在所有分布区域内的影响。全局灵敏度计算方法相对较多，主要有方差灵敏度算法，矩独立灵敏度算法，基于失效概率的灵敏度分析，导数法和基本效应法等。

对于应用最为广泛的全局灵敏度分析，根据结构分析模型输出响应的个数可分为单输出灵敏度分析方法与多输出灵敏度分析方法。其中单输出全局灵敏度分析中，结构模型的响应 Y 由式 (4.1) 表示，其中 X 为 n 维不确定性参数，如下式 (4.2)， g 为结构模型响应与输入参数间函数关系（在本分析模型中即为结构的有限元模型）， $f_X(x)$ 为不确定性参数的 X 的联合概率密度函数， $f_{X_i}(x_i)$ 为 X_i 的

边缘概率密度函数：

$$Y = g(X) \quad (4.1)$$

$$X = (X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (4.2)$$

$$f_X(x) = \prod_{i=1}^n f_{X_i}(x_i) \quad (4.3)$$

实际结构工程中，有时也需要同时输出多个响应，如多目标优化设计中，因此就单个响应的灵敏度分析不够充分准确，而需要对多个结构响应进行整体灵敏度分析。此时在上述模型响应 Y 可由下式 (4.4) 表示，其中 Y 为 m 维结构输出响应。其它参数的相应表达与单输出全局灵敏度分析一致。

$$Y = (Y_1, Y_2, \dots, Y_m) \quad (4.4)$$

(1) 方差灵敏度计算原理

方差灵敏度计算方法是目前工程上应用最为广泛的一种方法，它是由 Sobol 等^[91]提出,利用方差来描述参数与结构模型响应之间的不确定性。结构模型响应方程 $Y=g(X)$ 通过高维模型展开表示如下式 4.5 所示。经过全方差公式以及标准化后，可以得到相应的结构响应的主效应指标 S_i 与总效应指标 S_n ，如下式 (4.6) ~ (4.7)，对于这两个指标的具体计算则需要与蒙特卡洛方法相结合。

$$Y = g(X) = g_0 + \sum_{i=1}^n g_i(X_i) + \sum_{1 \leq i < j \leq n} g_{ij}(X_i, X_j) + \dots + g_{12\dots d}(X_1, X_2, \dots, X_d) \quad (4.5)$$

$$S_i = \frac{V(E(Y/X_i))}{V(Y)} \quad (4.6)$$

$$S_i = \frac{V(Y) - V(E(Y/X_{-i}))}{V(Y)} = \frac{E(V(Y/X_{-i}))}{V(Y)} \quad (4.7)$$

(2) 矩独立灵敏度计算原理

矩独立灵敏度分析是在方差灵敏度分析的基础上，引入概率密度函数来度量输入参数的不确定性对结构输出响应的影响。它是通过结构输出响应的概率密度函数 $f_Y(y)$ 与条件概率密度函数 $f_{Y/X_i}(y)$ 之间的差异来衡量灵敏度大小。它能够反映输参数在相应的分布域内的随机性对于结构输出响应的平均影响。

$$S(X_i) = \int |f_Y(y) - f_{Y/X_i}(y)| dy \quad (4.8)$$

4.2 基于 Tornado 图形法的不确定性参数灵敏度分析

本文基于 Pushdown 分析方法，利用 Tornado 图形法，初步评估上一节中所选的 15 个不确定性参数对于第三章中建立的装配式框架结构与现浇框架结构的

抗连续倒塌性能的影响，进行灵敏度分析。得到中柱与边柱失效工况下，对全装配式框架结构与现浇框架结构抗连续倒塌响应影响较大的不确定性参数。

4.2.1 Tornado 图形法概述

在对不确定参数进行灵敏度分析时，Tornado 图形法是一种较简单且有效的分析方法^[92,93]。Tornado 图形法是将不确定性参数对结构响应引起的反应差进行排序，来直观定量的描述参数变异对于结构模型响应的灵敏度。在本文中，为了更好地对装配式结构与现浇结构进行对比，选取结构 Pushdown 分析结果中梁机制下的荷载放大系数 α_{\max} 作为灵敏度分析的输出响应。具体计算过程如下：

(1) 选取不确定性参数，并确定参数的概率分布信息。

(2) 根据不确定性参数的概率分布信息，计算不确定性参数的三个代表值，即基准值 (base-line), 上限值 (upper-bound) 以及下限值 (lower-bound)。

(3) 确定结构分析模型，每次变换一个参数，其他参数保持基准值，对结构进行 Pushdown 分析，得到相应的 Pushdown 曲线，提取相应的 α_{\max} 值。在本文模型中，选取了 15 个参数，在中柱失效情况与边柱失效情况下，个损伤工况需进行 $15 \times 2 + 1 = 31$ 次 Pushdown 分析。

(4) 将每个参数通过变换上限值与下限值得到的 α_{\max} 差值作为 Tornado 图形法的影响摆幅，与基准值进行对比，进而将不确定性参数按照从大到小排序，得到对结构抗连续倒塌影响较大的参数。

4.2.2 不确定性参数的概率分布

为了全面地评估不确定性参数对于装配式框架结构抗连续倒塌性能的影响，以第三章建立的装配式框架结构原模型与现浇结构模型为基础，从三个不确定性来源中选择了 4.2.1 节中 15 个不确定性参数，进行结构抗连续倒塌的灵敏度分析。根据文献^[94-99]这些参数的基本概率分布信息归纳如下表 4.2。

表 4.2 不确定性参数概率分布统计

不确定性来源		基准值	变异系数	分布统计
荷载参数	楼面恒载 (kN/m)	7.50	0.100	Normal
	屋面恒载 (kN/m)	5.00	0.100	
	活荷载 (kN/m)	2.00/0.5	0.470	Lognormal
砼材料参数	砼抗压强度 (N/mm ²)	23.40	0.130	Normal
	砼弹性模量 (N/mm ²)	31300.00	0.077	
	砼保护层厚度 (mm)	20	3	Lognormal
材料参数	纵筋屈服强度 (N/mm ²)	452.05	0.093	Beta
	箍筋屈服强度 (N/mm ²)	339.04	0.070	
材料几何参数	纵筋弹性模量 (N/mm ²)	2.00×10^5	0.033	Normal
	梁纵筋截面积 (mm ²)	314.0	0.040	Modified

	柱纵筋截面积 (mm ²)	314.0	0.040	
	箍筋截面积 (mm ²)	50.2	0.040	
	楼层跨度 (mm)	6000.0	0.003	
结构几何参数	梁宽 (mm)	300.0	0.012	Normal
	梁高 (mm)	500.0	0.013	

4.2.3 灵敏度的计算

(1) 利用本文第三章建立的装配式原结构与现浇结构有限元模型，基于 Pushdown 分析方法，评估上述 15 个不确定性参数对结构抗连续倒塌性能的影响。采用不平衡加载法，在中柱失效与边柱失效的工况下分析，得到荷载-位移曲线。根据每个变换参数的 Pushdown 曲线确定抗连续倒塌分析中梁机制作用下的 α_{\max} 作为结构响应的输出。之所以选该点，是因为在梁机制作用下，该点能体现在两种失效工况下结构整体抗连续倒塌的极限能力。

(2) 根据各个不确定性参数的概率分部信息与变异系数计算出相应的上限值与下限值。并在建立好的装配式与现浇框架结构有限元分析模型中，分别代入各个参数的上下限值进行 Pushdown 分析计算，得到相应的 Pushdown 曲线，提取 α_{\max} 值。

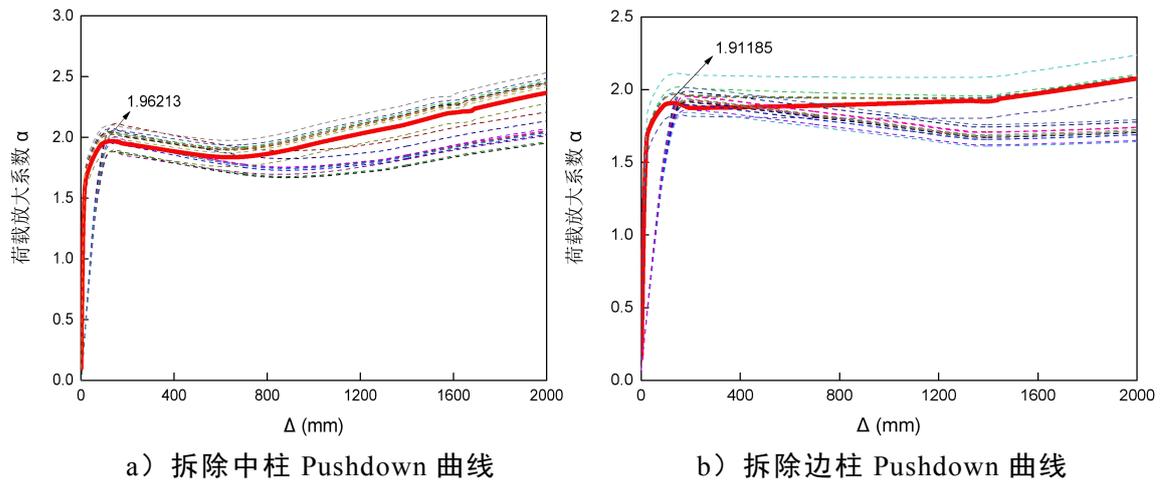
(3) 根据提取的各不确定性参数参数的 α_{\max} 值，计算相应影响摆幅。表 4.3~4.4 分别给出了现浇框架结构各不确定性参数上下限值的 α_{\max} 值与对应的摆幅，4.5~4.6 分别给出了装配式框架结构各不确定性参数上下限值的 α_{\max} 值与对应的摆幅。

(4) 根据计算的摆幅值，得到各个失效工况下结构的 Tornado 图，进而对不确定性参数的灵敏度进行评估。

4.3 现浇结构不确定性参数灵敏度分析结果

4.3.1 现浇结构灵敏度分析的计算结果

根据变化各不确定性参数的上、下限值，得到现浇框架结构在中柱与边柱失效情况下的 Pushdown 计算曲线如图 4.1 所示。由 Pushdown 曲线可得，随着失效柱竖向位移的增大，荷载放大系数逐渐增大，达到了结构在梁机制之下的峰值点，该点主要由梁端弯矩承载力控制，它能够体现结构整体的抗连续倒塌能力。故在对不确定性参数进行灵敏度分析时，选用梁机制下的 α_{\max} 为参考点，来反映每个参数对结构整体抗连续倒塌性能的影响。根据这些不确定性参数的 Pushdown 曲线可看出，在悬链线发展阶段，随着失效柱竖向位移的增大，这些不确定性参数变异的影响将进一步发散，其中对比边柱失效与中柱失效的下的 Pushdown 曲线，不确定性参数对结构的抗连续倒塌影响在边柱失效的情况下将更大一些。



a) 拆除中柱 Pushdown 曲线

b) 拆除边柱 Pushdown 曲线

图 4.1 现浇结构中柱失效工况下不确定性参数 Pushdown 曲线

表 4.4 和表 4.5 分别给出了在现浇框架结构在中柱失效与边柱失效工况下各个不确定性参数上下限值对应的 α_{\max} 与计算摆幅。根据表 4.4 和表 4.5 计算得到两种失效工况下现浇框架结构的 Tornado 图，如图 4.2 所示。对比分析可知，对于现浇结构整体抗连续倒塌影响较大的不确定性参数有纵筋的屈服强度、楼面恒荷载、梁纵筋截面积、混凝土抗压强度、梁高、活荷载、混凝土保护层厚度以及屋面恒荷载。其中荷载方面的不确定性来与材料方面的不确定性来源影响较大。由于结构在梁机制下，梁端开始出现塑性铰，底部纵筋开始屈服，因此纵筋的屈服强度与梁纵筋截面积，以及混凝土抗压强度的变异性对结构的抗连续倒塌承载能力影响相对较大。在对结构进行竖向抗连续倒塌分析时，荷载方面的影响，尤其是楼面恒荷载，是不容忽视的。

表 4.3 现浇框架结构拆除中柱 Pushdown 分析的 α_{\max} 值

不确定性来源		上限值	下限值	摆幅
荷载参数	楼面恒载	2.06054	1.89572	0.16482
	屋面恒载	1.98472	1.95235	0.03237
	活荷载	1.97917	1.88534	0.09383
砼材料参数	砼抗压强度	1.8837	2.00675	0.12305
	砼弹性模量	1.96858	1.9682	0.00378
	砼保护层厚度	1.91789	2.02234	0.10445
材料参数	纵筋屈服强度	1.88255	2.11178	0.22932
	箍筋屈服强度	1.97564	1.96853	0.00711
	纵筋弹性模量	1.96551	1.97017	0.00466
材料几何参数	梁纵筋截面积	1.93559	2.06807	0.13248
	柱纵筋截面积	1.96754	1.969285	0.00175
	箍筋截面积	1.96752	1.9693	0.00178
结构几何参数	楼层跨度	1.98669	1.96137	0.02532
	梁宽	1.96981	1.98038	0.01057
	梁高	1.89931	2.03752	0.13821

表 4.4 现浇框架结构拆除边柱 Pushdown 分析的 α_{max} 值

不确定性来源		上限值	下限值	摆幅
荷载参数	楼面恒载	2.00113	1.83034	0.17079
	屋面恒载	1.94343	1.90073	0.04270
	活荷载	1.93993	1.88457	0.05536
砼材料参数	砼抗压强度	1.89272	2.0062	0.11348
	砼弹性模量	1.911995	1.91101	0.00094
	砼保护层厚度	1.89213	1.9418	0.04967
	纵筋屈服强度	1.81295	2.09845	0.28550
材料参数	箍筋屈服强度	1.91187	1.9047	0.00717
	纵筋弹性模量	1.91038	1.91316	0.00278
	梁纵筋截面积	1.84849	1.97497	0.12648
材料几何参数	柱纵筋截面积	1.9107	1.91197	0.00127
	箍筋截面积	1.91099	1.91271	0.00172
	楼层跨度	1.92309	1.9007	0.02239
结构几何参数	梁宽	1.90796	1.9157	0.00774
	梁高	1.88153	1.94224	0.06071

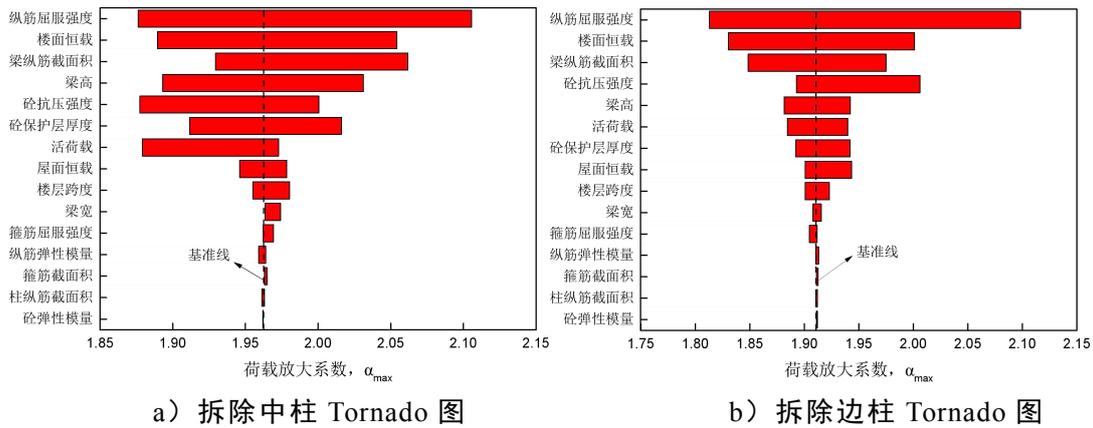


图 4.2 现浇结构中柱失效工况下不确定性参数 Tornado 图

4.3.2 装配式结构灵敏度分析的计算结果

图 4.3 为装配式框架结构在中柱与边柱失效工况下，各个不确定性参数变换上、下限值得到的 Pushdown 曲线。由 Pushdown 曲线可知，随着失效柱竖向位移的增大，荷载放大系数逐渐增大，并达到了第一个峰值点，即达到梁机制下结构的整体抗连续性倒塌极限承载能力，之后随着失效柱竖向位移的增大，荷载放大系数缓慢降低。与现浇结构对比，这些不确定性参数对装配式框架结构抗连续倒塌变的影响，在达到第一个峰值点后并没有进一步发散，这是由于装配式结构在大变形阶段没有充分发展成悬链线效应。

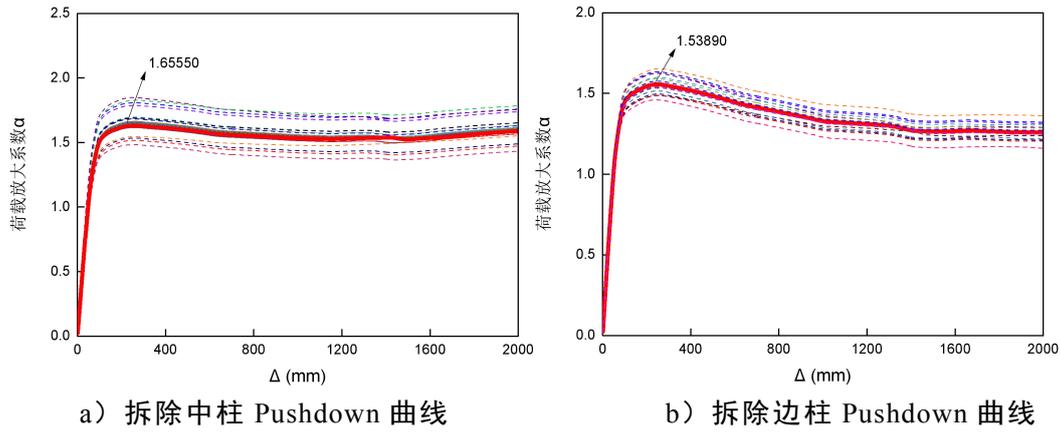


图 4.3 装配式结构中柱失效工况下不确定性参数 Pushdown

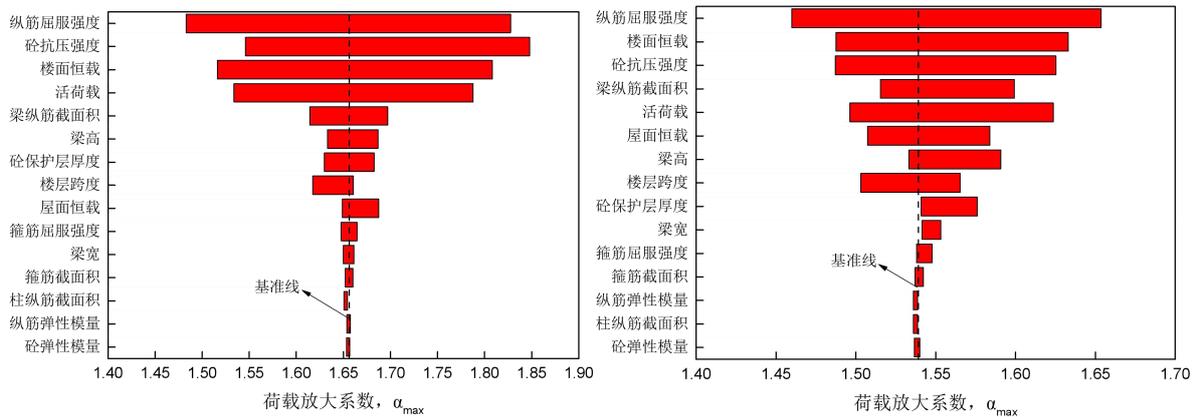
同样提取装配式结构不确定性参数上下限值的 α_{\max} ，计算相应摆幅如表 4.6 和表 4.7 所示。根据表 4.4 和表 4.5 计算得到两种失效工况下装配式框架结构的 Tornado 图（图 4.4 所示）。对比分析可知，对装配式框架结构抗连续倒塌影响较大的不确定性参数有纵筋的屈服强度、混凝土抗压强度、楼面恒荷载、梁与柱纵筋截面积等。装配式框架结构钢最主要的影响参数与现浇结构相差不大，影响最大的不确定性来源也主要在材料方面。但与现浇框架结构相比较，装配式框架结构对于钢筋的材料参数更敏感，这是由于装配式节点中插筋以及梁中纵向钢筋对于结构受力的影响。对于装配式结构在对结构进行竖向抗连续倒塌分析时，荷载方面的影响，尤其是楼面恒荷载，是不容忽视的。而混凝土弹性模量、柱纵筋截面积、纵筋弹性模量、箍筋截面积的变异性对结构抗连续性倒塌影响相对较少，可忽略其影响。

表 4.5 装配式框架结构拆除中柱 Pushdown 分析的 α_{\max} 值

不确定性来源		上限值	下限值	摆幅
荷载参数	楼面恒载	1.51615	1.80828	0.29213
	屋面恒载	1.64875	1.68755	0.03875
	活荷载	1.53882	1.78764	0.25382
砼材料参数	砼抗压强度	1.54610	1.84791	0.30181
	砼弹性模量	1.65670	1.65329	0.00341
	砼保护层厚度	1.68275	1.65320	0.05295
材料参数	纵筋屈服强度	1.82795	1.48291	0.34468
	箍筋屈服强度	1.66448	1.64759	0.01689
	纵筋弹性模量	1.65737	1.65370	0.00367
材料几何参数	梁纵筋截面积	1.69696	1.62060	0.06989
	柱纵筋截面积	1.69049	1.68701	0.00348
	箍筋截面积	1.66025	1.65186	0.00839
结构几何参数	楼层跨度	1.61739	1.66056	0.04317
	梁宽	1.66120	1.64985	0.01135
	梁高	1.68675	1.63300	0.05375

表 4.6 装配式框架结构拆除边柱 Pushdown 分析的 α_{max} 值

不确定性来源		上限值	下限值	摆幅
荷载参数	楼面恒载	1.48761	1.63295	0.14534
	屋面恒载	1.50734	1.58393	0.07659
	活荷载	1.49629	1.62358	0.12729
砼材料参数	砼抗压强度	1.62524	1.48716	0.13808
	砼弹性模量	1.54001	1.53667	0.00221
	砼保护层厚度	1.57605	1.54087	0.03518
	纵筋屈服强度	1.65348	1.45992	0.19356
材料参数	箍筋屈服强度	1.54771	1.53808	0.00963
	纵筋弹性模量	1.53865	1.5393	0.00272
材料几何参数	梁纵筋截面积	1.59933	1.51532	0.08401
	柱纵筋截面积	1.53862	1.53502	0.00360
	箍筋截面积	1.54223	1.53710	0.00513
	楼层跨度	1.56536	1.50298	0.06238
结构几何参数	梁宽	1.55322	1.54141	0.01183
	梁高	1.59072	1.53322	0.0575



a) 拆除中柱 Tornado 图

b) 拆除边柱 Tornado 图

图 4.4 装配式结构边柱失效工况下不确定性参数的 Tornado 图

因此，根据以上分析，综合选取在中柱与边柱失效工况下对装配式结构影响最大与最少的五个不确定性参数，如表 4.8~表 4.9 所示，表中占比为影响摆幅与基准值下的 α_{max} 的比值，能够进一步量化影响大小。基于以上分析，在对混凝土明牛腿-角型钢板-插梢杆连接的装配式框架结构进行抗连续性倒塌风险性评估时，可选取装配式框架结构抗连续倒塌响应影响较大的不确定性参数，如纵筋的屈服强度、混凝土抗压强度、楼面恒荷载、梁纵筋截面积、活荷载等主要参数进行评估；对于影响较少的参数，如混凝土弹性模量、纵筋弹性模量、柱纵筋截面积、箍筋截面积、以及梁宽等，可忽略它们的不确定性影响。

表 4.8 中柱失效工况下对装配式结构影响最大与最小的不确定性参数

影响最大的参数			影响最小的参数		
不确定性参数	影响摆幅	占比	不确定性参数	影响摆幅	占比
纵筋的屈服强度	0.34468	20.8%	砼弹性模量	0.00341	0.21%
混凝土抗压强度	0.30181	18.2%	纵筋弹性模量	0.00348	0.21%
楼面恒荷载	0.29213	17.6%	柱纵筋截面积	0.00367	0.22%
活荷载	0.25382	15.3%	箍筋截面积	0.00839	0.51%
梁纵筋截面积	0.06989	5.1%	梁宽	0.01135	0.69%

表 4.9 边柱失效工况下对装配式结构影响最大与最小的不确定性参数

影响最大			影响最小		
不确定性参数	影响摆幅	占比	不确定性参数	影响摆幅	占比
纵筋的屈服强度	0.19356	12.6%	砼弹性模量	0.00212	0.14%
楼面恒荷载	0.14534	9.5%	柱纵筋截面积	0.00272	0.18%
混凝土抗压强度	0.13808	8.9%	纵筋弹性模量	0.00360	0.23%
活荷载	0.12729	8.3%	箍筋截面积	0.00513	0.33%
梁纵筋截面积	0.08401	5.4%	箍筋屈服强度	0.00963	0.63%

4.4 本章小结

本章主要从材料参数不确定性、荷载参数不确定性以及结构几何参数不确定性三种不确定性来源考察这些参数变异对于全装配式框架结构整体抗连续倒塌性能的影响。基于第三章建立的有限元模型，根据每个参数的变异性，取变换参数的上、下限值，进行Pushdown分析，得到各个工况下的荷载-位移曲线。选取梁机制下的峰值 α_{\max} 作为Tornado图的输出响应，进而得到结构抗连续倒塌主要的影响参数。

(1) 根据各不确定性参数变异后得到的Pushdown曲线，全装配式框架结构在达到梁机制下的抗连续倒塌峰值点之后，参数变异性的影响并没有像现浇结构进一步扩散，这主要是因为该装配式节点的悬链线效应不能得到充分发挥。

(2) 根据Tornado图形法对各参数的灵敏度分析结果，对全装配式框架结构整体抗连续倒塌性能影响最大的不确定性参数主要有纵筋的屈服强度、混凝土抗压强度、楼面恒荷载、梁纵筋截面积、活荷载等；影响最小的不确定性参数主要有混凝土弹性模量、柱纵筋截面积、纵筋弹性模量、箍筋截面积以及梁宽等。

(3) 全装配式框架结构与现浇框架结构相比较，对结构抗连续倒塌影响最主要的不确定性参数总体上是相同的。其中全装配式框架结构对材料参数尤其是钢筋的相关参数会更加敏感一些。

结论与展望

一、结论

本文对带混凝土牛腿-插梢杆-角型钢板连接的全装配式框架进行了抗连续倒塌性能研究，并与同等情况下的现浇结构做对比分析。利用OpenSees有限元软件建立全装配式混凝土框架结构与现浇混凝土框架结构的节点宏模型模型，并通过对应的框架梁柱子结构抗连续倒塌静载实验进行数值模拟，校验了有限元模型建立的正确性。基于拆除构件法，从一栋纵横均为四跨的7层全装配式框架结构与现浇框架结构选取一榀平面框架进行非线性静力Pushdown分析，并对比了两榀框架抗连续倒塌极限承载能力差异。根据有限元分析结果，对全装配式结构进行节点优化，并验证了优化后的模型在结构抗连续倒塌性能上得到显著改善。最后，选取不确定性参数，利用Tornado图形法，对结构抗连续性倒塌的影响进行灵敏度分析。基于以上研究，本文得到的相关结论如下：

(1) 利用OpenSees有限元软件，选择合适的材料本构模型与合适的非线性梁柱单元，建立梁、柱截面恢复力模型，再根据装配式节点的构造特征与受力特性建立的装配式节点宏模型与现浇节点宏模型能有效的模拟框架子结构连续倒塌全过程。根据试验中装配式子结构节点的破坏特征，对装配式节点进行优化，发现通过改善插梢螺杆能显著提高装配式子结构的抗连续倒塌性能，其中将普通螺杆替换成10.9级的高强螺杆优化效果最好。

(2) 利用拆除构件法，对设计的多层全装配式框架结构和相应的现浇结构进行竖向抗连续倒塌Pushdown分析，得到满跨加载方式与不平衡加载方式对装配式结构抗连续倒塌的影响不明显，说明失效柱对结构的影响范围有限。同时对比荷载-位移曲线，得到全装配式框架结构的整体抗连续倒塌性能比同等条件下的现浇框架结构差。在中柱失效工况下，全装配式框架结构在梁机制下的极限承载能力比现浇框架结构低18.5%；在边柱失效工况下，全装配式框架结构在梁机制下的极限承载能力比现浇框架结构低22.8%。且在抗连续倒塌的第二防御阶段表现较差，没有出现明显的悬链线作用。

(3) 根据全装配式框架子结构节点的优化验证，通过加强插梢杆来优化多层全装配式框架结构，并对优化后的结构进行Pushdown分析。与优化前的装配式框架结构相比，得到优化后的模型在结构抗连续倒塌性能方面得到显著改善。其中在梁机制下的抗连续倒塌极限承载能力较优化前的全装配式框架结构提高相对较少，但在抗连续倒塌的第二防御阶段产生了明显的悬链线效应。

(4) 通过选取15个关键的不确定性参数对结构进行抗连续倒塌灵敏度分析,得到了对全装配式框架结构抗连续倒塌极限承载能力影响最主要的不确定性参数,纵筋的屈服强度、混凝土抗压强度、楼面恒荷载、梁纵筋截面积、活荷载等;可以忽略影响的不确定性参数有混凝土弹性模量、柱纵筋截面积、纵筋弹性模量、箍筋截面积以及梁宽等。并通过与现浇框架结构对比分析可知,这些主要不确定性参数与现浇结构相类似。根据各不确定性参数变换上、下限值得到的Pushdown曲线,得到全装配式框架结构在达到梁机制下的抗连续倒塌峰值点之后,参数变异性的影响并没有像现浇结构进一步扩散,这主要是因为该装配式节点的悬链线效应不能得到充分发挥。

二、展望

尽管本文对于装配式结构整体抗连续倒塌性能进行了相关的研究,但由于时间及条件的限制,本研究工作还不够深入和全面,仍存在一些问题和不足需要完善与改进,主要表现在以下三个方面:

(1) 利用OpenSees有限元软件,对该装配式建立节点进行宏模型建立时,由于试验限制,没有对节点的主要构造进行精细化的力学性能模拟,如插梢的抗剪以及角钢的拉伸性能模拟等,因而不能全面精细地模拟节点的力学性能。

(2) 在进行整体抗连续性倒塌分析时选取的是单榀框架,没有考虑结构的实际空间特性,同时对于结构的空间布置、楼板作用等需进一步探究。此外,对于不同结构设计模型的整体抗连续倒塌研究工作仍值得展开,从而有利于对结构抗连续倒塌设计的发展。

(3) 在得到对全装配式框架结构抗连续性倒塌影响较大的不确定性参数之后,可以进一步探究这些主要的不确定性参数对于结构抗连续倒塌的风险性与可靠度方面的问题。同时,进一步考虑这些参数的随机性,可与相应的抽样方法如蒙特卡洛抽样或拉丁超立方体抽样相结合,对结构抗连续倒塌进行概率分析以及易损性分析等。

参考文献

- [1] 严薇, 曹永红, 李国荣. 装配式结构体系的发展与建筑工业化. 土木建筑与环境工程, 2004, 26(5):131-136
- [2] 国务院办公厅. 国务院办公厅关于大力发展装配式建筑的指导意见. 住宅产业, 2016(10):24-26
- [3] 陈子康, 周云, 张季超. 装配式混凝土框架结构的研究与应用. 工程抗震与加固改造, 2012, 34(4):1-11
- [4] Pearson C, Delatte N. Ronan point apartment tower collapse and its effect on building codes. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2005, 19(2):172-177
- [5] Corley W G, Sr P F M, Sozen M A, et al. The Oklahoma City Bombing: Summary and Recommendations for Multihazard Mitigation. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 1998, 12(3):100-112
- [6] Seffen K A. Progressive collapse of the world trade center: simple analysis. *Journal of Engineering Mechanics*, 2008, 134(2):125-132
- [7] 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
- [8] DCLG. Approved Document A: Structure (2004 edition) incorporating 2013 amendments. 2013
- [9] 周健, 崔家春. 结构抗连续倒塌设计规范和比较. 建筑结构, 2015(23):98-105
- [10] 梁益, 陆新征, 缪志伟. 结构的连续倒塌:规范介绍和比较. 全国工程结构安全防护学术会议, 2007
- [11] Murta A, Varum H, Pinto J, et al. European Committee for Standardization. Franco Jordanian Forum on Water Sustainability, 2004:486-486
- [12] 陆新征, 李易, 叶列平. 混凝土结构防连续倒塌理论与设计方法研究. 中国建筑工业出版社, 2011
- [13] General Service Administration (GSA). Progressive collapse analysis and design guidelines for new federal office buildings and major modernization project. Washington D. C:2003
- [14] General Service Administration (GSA). Alternative path analysis & design design guidelines for progressive collapse resistance. Washington D. C:2013

- [15] United States Department of Defense (DoD). UFC 4-023-03, Unified Facilities Criteria: Design of Structures to Resist Progressive Collapse. Washington D. C: 2005
- [16] United States Department of Defense (DoD). UFC 4-023-03, Unified Facilities Criteria: Design of Buildings to Resist Progressive Collapse. Washington D. C: 2009
- [17] United States Department of Defense (DoD). UFC 4-023-03, Unified Facilities Criteria: Design of Buildings to Resist Progressive Collapse. Washington D. C: 2010
- [18] United States Department of Defense (DoD). UFC 4-023-03, Unified Facilities Criteria: Design of Buildings to Resist Progressive Collapse[S]. Washington D. C:2013
- [19] 中华人民共和国国家标准. 建筑结构抗倒塌设计规范(CECS 392:2014). 北京: 中国计划出版社, 2014
- [20] 中华人民共和国国家标准. 建筑结构可靠度设计统一标准(GB50068-2001). 北京: 中国建筑工业出版社, 2002
- [21] 中华人民共和国国家标准. 建筑抗震设计规范(GB50011-2001). 北京: 建筑工业出版社, 2006
- [22] 中华人民共和国国家标准. 混凝土结构设计规范(GB50010-2010). 北京: 中国建筑工业出版社, 2011
- [23] 中华人民共和国国家标准. 建筑结构荷载规范(GB50010-2010). 北京: 中国建筑工业出版社, 2011
- [24] Kaewkulchai G, Williamson E B. Beam element formulation and solution procedure for dynamic progressive collapse analysis. *Computers and Structures*, 2004, 82(7):639–651
- [25] Izzuddin B A, Vlassis A G, Elghazouli A Y, Nethercot D A. Progressive collapse of multi-storey building due to column loss-Part I : Simplified assessment framework. *Engineering Structure*, 2008(30):1308–1318
- [26] Mohamed O A. Assessment of progressive collapse potential in corner floor panels of reinforced concrete buildings. *Engineering Structures*, 2009, 31(3): 749–757
- [27] Kim H S, Kim J, An D W. Developed of integrated system for collapsed analysis of building structures considering dynamic effects. *Engineering Software*, 2009(40): 1–8
- [28] Khandelwal K, El-Tawil S. Pushdown resistance as a measure of robustness in

- progressive collapse analysis. *Engineering Structures*, 2011, 33(9):2653-2661
- [29] Iribarren B S, Berke P, Bouillard P. Investigation of the influence of design and material parameters in the progressive collapse analysis of RC structures. *Engineering Structures*, 2011, 33(10):2805–2820
- [30] Ellingwood B R. Mitigating Risk from Abnormal Loads and Progressive Collapse. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2006, 20(4):315–323
- [31] Ellingwood B, Leyendecker E V. Approaches for design against progressive collapse. *Journal of the Structural Division*, 1978, 104(11):413–423
- [32] Sasanil M, Kropelnicki J. Progressive collapse analysis of an RC structure. *Structural Design of Tall & Special Buildings*, 2010, 17(4):757–771
- [33] 易伟建, 何庆峰, 肖岩. 钢筋混凝土框架结构抗倒塌性能的试验研究. *建筑结构学报*, 2007, 28(5):104–109
- [34] 何庆峰. 钢筋混凝土框架结构抗连续倒塌性能试验研究[湖南大学博士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2010
- [35] 陆新征, 卢啸, 李易. 结构连续倒塌及其工程对策. *防护工程*, 2009, 31(4):51–57
- [36] Lu X, Lin K, Li Y. Experimental investigation of RC beam-slab substructures against progressive collapse subject to an edge-column-removal scenario. *Engineering Structures*, 2016
- [37] 李易, 叶列平, 陆新征. 基于能量方法的 RC 框架结构连续倒塌抗力需求分析 I: 梁机制. *建筑结构学报* 2011, 32(11):1–8
- [38] 李易, 陆新征, 叶列平. 基于能量方法的 RC 框架结构连续倒塌抗力需求分析 II: 悬链线机制. *建筑结构学报*, 2011, 32(11):9–16
- [39] Li Y, Lu X, Hong G, et al. Numerical investigation of progressive collapse resistance of RC frames subject to column removals from different stories. *Advances in Structural Engineering*, 2016, 19(2):314–326
- [40] 陈俊岭, 马人乐, 何敏娟. 偶然事件下框架结构抗连续倒塌分析. *四川建筑科学研究*, 2007, 33(1):65–68
- [41] 胡晓斌, 钱稼茹. 结构连续倒塌分析改变路径法研究. *四川建筑科学研究*, 2008, 34(4):8–13
- [42] 宋子龙, 王文达, 王景玄. 基于 Pushdown 方法的圆钢管混凝土柱-钢梁框架抗连续倒塌机制分析. *自然灾害学报*, 2015(1):123–132
- [43] 吕大刚, 崔双双, 李雁军. 基于备用荷载路径 Pushover 方法的结构连续倒塌鲁棒性分析. *建筑结构学报*, 2010(s2):112–118
- [44] 马高, 李惠, 欧进萍. 基于构件拆除法的 RC 框架结构动力反应和抗倒塌能

- 力分析. 震灾防御技术, 2010, 5(1):62-72
- [45] Acker A V, Cholewicki A, Crisp B. Design of precast concrete structures against accidental action. Fib Bulletin, 2012
- [46] Kang S B, Tan K H. Behaviour of precast concrete beam-column sub-assemblages subject to column removal. Engineering Structures, 2015, 93:85-96
- [47] 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)
- [48] 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
- [49] Qian K, Li B, Liu Y. Integrity of Precast Concrete Structures to Resist Progressive Collapse. Geotechnical and Structural Engineering Congress. 2016:1976-1986
- [50] 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
- [51] 潘毅, 陈侠辉, 姚蕴艺. 基于抽柱法的无粘结预应力装配式框架结构连续倒塌分析. 工程力学, 2017, 34(12):162-170
- [52] 吴健秋. 基于 OpenSees 的梁-柱节点单元的适用性和定参方法研究[重庆大学硕士学位论文]. 重庆:重庆大学, 2007
- [53] Mazzoni S, McKenna F, Fenves G L. OpenSees Command Language Manual. 2001
- [54] Scott B D. Stress-Strain Behavior of Concrete by Overlapping Hoops at Low and High Strain Rates. Journal Proceedings, 1982, 79(1):13-27
- [55] Menegotto M, Pinto P E. Method of Analysis for cyclically loaded RC plane frames including changes in geometry and nonelastic behavior of elements under combined normal force and bending, Proceeding, Symposium on the Resistance and Ultimate Deformability of Structures Acted on by Well Defined Repeated loads. International Association for Bridge and Structural Engineering, 1973: 15-22
- [56] Taucer F F, Spacone E, Filippou F C. A fiber beam-column element for seismic response analysis of reinforced concrete structures, 1991
- [57] Fenves G L, Filippou F C, Scott M H, et al. Response sensitivity for nonlinear

- beam-column elements. *Journal of Structural Engineering*, 2004, 130(9):1281–1288
- [58] Giberson M F. Two nonlinear beams with definitions of ductility. *Journal of the Structural Division Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 1974, 95(2):137–157
- [59] 于晓辉, 钱凯, 吕大刚. 考虑悬链线效应的钢筋混凝土框架结构抗连续倒塌能力分析. *建筑结构学报*, 2017, 38(4):28-34
- [60] 陈太平. 全装配式混凝土框架结构防连续倒塌试验研究[湖南大学硕士学位论文]. 长沙:湖南大学, 2018
- [61] Sims J. Flange Angle Behavior in Semi Rigid Connections for Steel PR Frames. M.S. Thesis, Department of Civil Engineering and Geological Sciences, University of Notre Dame, 2000:187
- [62] Yang B, Tan K H. Robustness of bolted-angle connections against progressive collapse: Mechanical modelling of bolted-angle connections under tension. *Journal of Engineering Structures*, 2013, 57(4):153–168
- [63] Shen J, Astanteh-Asl A. Hysteresis model of bolted-angle connections. *Journal of Constructional Steel Research*, 2000, 54 (3):317–343
- [64] 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, 2011
- [65] 张晨. 后张无粘结后张无黏结混合装配式预应力混凝土框架抗震性能研究:[东南大学博士学位论文]. 南京: 东南大学, 2017
- [66] Sadek F, El-Tawil S, Lew H S. Robustness of Composite Floor Systems with Shear Connections: Modeling, Simulation, and Evaluation. *Journal of Structural Engineering*, 2008, 134(11):1717–1725
- [67] Jong Wan Hu, Roberto T Leon, Taehyo Park. Mechanical models for the analysis of bolted T-stub connections under cyclic loads. *Journal of Constructional Steel Research*, 2012, 78(11):45–57
- [68] Main J A, Sadek F. Robustness of Steel Gravity Frame Systems with Single-Plate Shear Connections. NIST TN–1749, 2012
- [69] Stalin V A. Reduced Component Model for Double-Angle Shear Connections Considering the Contribution of the Concrete Slab for Cyclic Analysis of Steel Structures. M.S. Thesis. University of Texas at Austin, 2015: 59–87
- [70] Zoubek B, Isakovic T, Fahjan Y. Cyclic failure analysis of the beam-to-column dowel connections in precast industrial buildings. *Journal of Engineering Structures*, 2013, 52(9):179–191

- [71] Zoubek B, Fischinger M, Isakovic T. Estimation of the cyclic capacity of beam-to-column dowel connections in precast industrial buildings. *Journal of Earthquake Engineering*, 2014
- [72] Fischinger M, Zoubek B, Kramar M, et al. *Cyclic Response of Dowel Connections in Precast Structures*, 2012
- [73] Tanaka Y, Murakoshi J. Reexamination of dowel behavior of steel bars embedded in concrete. *Aci Structural Journal*, 2011, 108(6):659–668
- [74] Psycharis I N, Mouzakis P. Shear resistance of pinned connections of precast members to monotonic and cyclic loading. *Journal of Engineering Structures*, 2012, 41:413–427
- [75] Vintzeleou E N, Tassios T P. Mathematical model for dowel action under monotonic and cyclic conditions. *Magazine of Concrete Research*, 1986, 38:13–22
- [76] Zhao J, Sritharan S. Modeling of Strain Penetration Effects in Fiber-Based Analysis of Reinforced Concrete Structures. *Aci Structural Journal*, 2007, 104(2):133–141
- [77] Lu X, Cui Y, Liu J, et al. Shaking table test and numerical simulation of a 1/2-scale self-centering reinforced concrete frame. *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2015,44(2):1899–1917
- [78] Ercolino M, Bellotti D, Magliulo G, et al. Vulnerability analysis of industrial RC precast buildings designed according to modern seismic codes. *Engineering Structures*, 2018, 158:67–78
- [79] Alath S, Kunnath S K. Modeling inelastic shear deformation in RC beam-column joints. *Engineering Mechanics*, 1995
- [80] Altoontash A. Simulation and damage models for performance assessment of reinforced concrete beam-column joints[dissertation]. California: Stanford University, 2004
- [81] Khandelwal K, El-Tawil S. Pushdown resistance as a measure of robustness in progressive collapse analysis. *Engineering Structures*, 2011, 33(9):2653–2661
- [82] Khandelwal K, El-Tawil S. Assessment of progressive collapse residual capacity using Pushdown analysis. *Structures Congress*. 2008:1–8
- [83] 胡晓斌, 钱稼茹. 结构连续倒塌分析与设计方法综述. *建筑结构*, 2006(s1):573–577
- [84] 李易, 陆新征, 叶列平. 钢筋混凝土框架抗连续倒塌机制研究. *建筑科学*, 2011, 27(5):15-21

- [85] 沈蒲生. 混凝土结构设计(第3版)(新世纪土木工程系列教材). 北京: 高等教育出版社, 2007
- [86] Wang C, Qiu Z P. Fuzzy finite difference method for heat conduction analysis with uncertain parameters. *Acta Mechanica Sinica*, 2014, 30(3):383–390
- [87] Ben-Haim, Yakov. Convex models of uncertainty in applied mechanics. *Convex Models of Uncertainty in Applied Mechanics*, 1990
- [88] Yager R R, Kacprzyk J, Fedrizzi M. Advances in the Dempster-Shafer theory of evidence. *Journal of Process Control*, 1994, 8(5-6):517–517
- [89] El-Tawil S, Li H, Kunnath S. Computational simulation of gravity-induced progressive collapse of steel-frame buildings: current trends and future research needs. *Journal of Structural Engineering*, 2013, 140(8): A2513001
- [90] Ellingwood B R, Dusenberry D O. Building Design for Abnormal Loads and Progressive Collapse. *Computer-aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2010, 20(3):194–205
- [91] Sobol I M. Sensitivity analysis for non-linear mathematical models. *Math Model Comp Exp*, 1993, 1:407–414
- [92] 宋鹏彦, 吕大刚, 崔双双. 地震作用下钢筋混凝土框架结构连续倒塌极限状态可靠度分析. *建筑结构学报*, 2013, 34(4):15–22
- [93] Macgregor J G. Development of a probability based load criterion for American national standard A58-building code requirements for minimum design loads in buildings and other structures. Washington DC: US Department of Commerce, National Bureau of Standards, 1980
- [94] Park J, Kim J. Fragility analysis of steel moment frames with various seismic connections subjected to sudden loss of a column. *Engineering Structures*, 2010, 32(6):1547–1555
- [95] Mander J B, Priestley M J N, Park R. Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete. *Journal of Structural Engineering*, 1988, 114(8):1804-1826
- [96] Mirza S A, Hatzinikolas M, Macgregor J G. Statistical descriptions of strength of concrete. *Journal of Structural Division*, 1979, 105(ST6):1021–1037
- [97] Mirza S A, Macgregor J G. Variability of mechanical properties of reinforcing bars. *Journal of the Structural Division*, 1979, 105(5):921–937
- [98] Mirza S A, Macgregor J G. Variability in dimensions of reinforced concrete members. *Journal of the Structural Division*, 1979, 105(4):751–766
- [99] Lee T H, Mosalam K M. Probabilistic fiber element modeling of reinforced concrete structures. *Computers and Structures*, 2004, 82(27):2285–2299

致 谢

麓山巍巍，湘水泱泱。转眼间，我将离开湖南大学，回忆起这里的点点滴滴，母校给予了我最难忘与最美好的时光。回顾往昔，既经历过坎坷与辛苦，但也收获过知识与喜悦。内心充满感恩，感恩这里遇到的人，经历过的事。

感谢我的导师周云老师，他治学严谨的态度，精益求精的工作作风，以及开拓进取的创新精神深深地感染并激励着我。在研究生的学习生涯中，从课题选择到论文撰写，周老师始终给予我细心的指导和不懈的支持。生活中，老师幽默风趣，谦逊待人的处世之道一直是我学习的榜样。在此，致以周老师最诚挚的感恩。

感谢在湖大遇到的每一位老师与小伙伴，让我的大学生活充满色彩。感谢同门小伙伴刘蒙、陈太平、胡翔、奚树杭、李紫玮、王振生、张琴、曾雅丽思、裴熠麟、周赛与程依婷在生活与学习上的帮助，祝大家一切顺利，前程似锦。

感谢我的父母、亲人和男友。感谢你们多年以来对我默默的付出与关怀，感恩一路有你们的相伴，你们的鞭策与鼓励是我一直奋斗的动力。

最后，感谢评阅本文的各位专家教授以及答辩委员会老师给予的指导。

彭涵钰

2018年6月于湖南大学