

基于 Pushdown 方法的全装配式混凝土框架结构 抗连续倒塌研究及灵敏度分析

周云^{1,2,3} 彭涵钰² 裴熠麟² 张琴² 陈太平² 易伟建^{1,2}

(1. 工程结构损伤诊断湖南省重点实验室, 湖南长沙 410082; 2. 湖南大学土木工程学院, 湖南长沙 410082;
3. 绿色先进土木工程材料及应用技术湖南省重点实验室, 湖南长沙 410082)

摘要: 通过非线性静力 Pushdown 分析及灵敏度计算方法, 对影响多层装配式混凝土框架结构抗连续倒塌性能的不确定性参数进行评估。首先以某牛腿-插销杆-角钢连接形式的全装配式混凝土框架结构静载试验研究为基础, 利用 OpenSees 有限元软件对该试验过程进行数值模拟, 计算所得的结构荷载-位移曲线及失效模式均与试验结果较好吻合。在此基础上, 对试验过程中的插销杆失效模式进行了参数优化分析, 结果表明可通过增大螺杆直径或采用高强螺杆等方式增强插销杆的抗剪强度, 从而有效提高结构二次防倒塌能力; 其次, 设计了一榀四跨七层的全装配式混凝土框架结构及相应的现浇结构, 分别对拆除首层中柱和边柱两种不同失效工况下剩余结构的抗连续倒塌性能进行了非线性静力 Pushdown 计算; 并通过选取包含荷载、材料以及结构几何尺寸等在内的 15 个不确定性参数, 利用 Tornado 图形法对各不确定性参数的灵敏度进行了分析。结果表明, 在中柱和边柱失效工况下, 该多层全装配式框架结构在压拱阶段的极限承载能力分别较现浇结构低约 18.5% 和 22.8% 左右; 同时纵筋屈服强度、混凝土抗压强度、楼面恒荷载、活荷载及梁纵筋截面积等不确定性参数对采用该连接形式的整体结构抗连续倒塌性能影响较大, 而混凝土弹性模量、柱纵筋截面积、纵筋弹性模量、箍筋截面积以及梁宽尺寸等参数不确定性对结构性能影响相对较小, 在结构设计阶段可忽略其变异性造成的影响。

关键词: 全装配式混凝土结构; 现浇混凝土结构; 抗连续性倒塌; Pushdown 分析; 灵敏度分析

中图分类号: TU375.4; TU391

文献标志码: A

Study on progressive collapse resistance sensitivity of fully assembled precast concrete frame structures based on Pushdown analysis

ZHOU Yun^{1,2,3}, PENG Hanyu², PEI Yilin², ZHANG Qin², CHEN Taiping², YI Weijian^{1,2}

(1. Hunan Provincial Key Laboratory of Damage Detection, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

3. Hunan Provincial Key Laboratory of Green Advanced Civil Engineering Materials and Application Technology, Changsha 410082, China)

Abstract: In this paper, the nonlinear static Pushdown method and the sensitivity analysis method were utilized in the process of progressive collapse evaluation of the multi-story precast concrete (PC) structures influenced by the uncertain parameters. Firstly, the numerical analysis was conducted in OpenSees program based on the static test

收稿日期: 2018-12-02; 修订日期: 2019-02-20

基金项目: 国家重点研发计划专项项目(2016YFC0701400, 2016YFC0701308); 湖南省重点研发计划项目(2017SK2220); 国家自然科学基金项目(51878264)

Supported by: National Key Research and Development Program of China (2016YFC0701400, 2016YFC0701308); Key Research and Development Program of Hunan Province (2017SK2220); National Natural Science Foundation of China (51878264)

作者简介: 周云(1979-), 男, 教授, 博士, 主要从事装配式建筑及结构健康监测方面研究. E-mail: zhouyun05@hnu.edu.cn

通讯作者: 裴熠麟(1995-), 男, 硕士研究生, 主要从事装配式结构方面研究. E-mail: yilin_pei@hnu.edu.cn

results of a fully assembled PC structure with the dowel rod joint connections. The analysis results revealed that both of the calculated load-displacement relationship and failure patterns were well agreed with the test results. Meanwhile, the parametric study was conducted according to the test failure mode of dowel rod, and it was revealed that the secondary progressive collapse performance of PC structure was effectively improved via employing the dowel rod with larger diameter or shear strength. Secondly, a 4-span 7-story fully assembled PC structure and reinforced concrete (RC) were built in OpenSees based on the calibrated model, and the Pushdown analysis was conducted for the residual structure with middle/exterior column loss scenario, respectively. Meanwhile, totally 15 uncertain parameters (i. e., load conditions, material properties, specimen dimensions, etc.) were selected to conduct the sensitivity analysis based on the Tornado method. The calculation results have revealed that the ultimate loading capacity of PC structure at compressive arch action was approximately 18.5% and 22.8% times lower than the corresponding RC structure under the two scenarios, respectively. Meanwhile, the uncertain parameters of rebar yielding strength, concrete compressive strength, dead loads, live loads and cross-section of beam rebar has placed an important role in the progressive collapse resistance mechanism of PC structures. However, the discreteness influence of concrete elasticity modulus, cross-section of column rebar, rebar elasticity modulus, cross-section of stirrup and beam width was relative lower of the structural performance, which can be ignored during the structure design progress.

Key words: fully assembled precast concrete frame structure; reinforced concrete frame structure; progressive collapse; Pushdown analysis; sensitivity analysis

引言

自从英国 Ronan Point 公寓连续性倒塌事故^[1]发生以来,多层结构的抗连续性倒塌性能引起了工程界的广泛关注。所谓连续性倒塌,即建筑结构由初始的局部构件破坏,最终扩展至部分或整体结构发生倒塌。通常情况下,结构的最终破坏状态与初始破坏状态不成比例。引起结构连续倒塌的因素主要为煤气爆炸、炸弹袭击、车辆撞击以及火灾等意外事件^[2]。

为研究建筑结构体系在偶然荷载作用下发生连续倒塌破坏的可能性,以及在倒塌过程中的荷载转换机制和结构受力特性等机理,国内外学术界和工程界对此进行了大量分析研究。2007年,易伟建等^[3]通过对一榀1/3缩尺的四跨三层钢筋混凝土框架结构进行抗连续倒塌试验,分析了框架结构在倒塌过程中的受力机制。2009年,Mohamed等^[4]利用替代路径法(alternative load path, ALP)研究了多层混凝土框架结构在移除角柱后剩余结构的荷载有效传递路径。2010年,吕大刚等^[5]利用OpenSees对一榀三跨五层的钢筋混凝土框架结构进行了非线性Pushdown分析,并认为采用备用荷载法和冗余度指标可以定量评价结构在主要承重构件失效下的抗连续倒塌性能。2011年,Khandelwala等^[6]提出了基于Pushdown理论的结构静力非线性分析方法,并在LS-DYNA中将一栋十层钢筋混凝土框架结构不同位置处的竖向构件进行拆除后,对剩余结构的极限承载能力及鲁棒性进行了研究。2011年,Iribarren等^[7]研究了不同材料性能参数及损伤工况对多层混凝土框架结构抗连续倒塌性能的影响。2011年,Qian等^[8]以框架梁纵向钢筋配筋率和横向箍筋间距为试验变量,研究了4个足尺框架子结构在中柱移除后剩余结构的抗连续倒塌性能。2012年,陆新征等^[9]对一榀1/2比例缩尺的四跨三层混凝土框架结构进行了抗倒塌拟静力试验,并基于纤维模型提出了考虑节点宏观模型的建模方法。2013年,Yu等^[10]研究了6个混凝土框架结构在中柱失效后的抗连续倒塌性能,并对梁柱节点处不同钢筋构造下的结构性能进行了讨论。综合上述研究成果表明,钢筋混凝土框架结构的抗连续倒塌机制主要由压拱效应阶段和悬链线效应阶段组成。其中压拱效应是由于水平边界提供的位移约束作用,有效提高了结构承载能力;而悬链线效应则指结构在大变形下充分利用了钢筋的抗拉强度,被认为是抵抗连续性倒塌的最后一道防线。

现有的抗连续倒塌研究主要集中在现浇结构,对大比例缩尺的装配式结构研究开展地相对较少。2015年,Nisme等^[11]研究了四种节点连接形式的装配式结构的抗连续倒塌性能,并对其失效模式、变形性能和承载力机制进行了分析。2016年,Qian等^[12]通过对混凝土框架结构进行抗倒塌试验,研究了焊接和后浇整体

式连接方式下结构的承载力机制与倒塌失效模式。2017年,潘毅等^[13]在OpenSees中通过拆除构件法对某六层无粘结预应力的装配式框架结构进行了抗连续倒塌分析,模拟了该装配式结构在关键构件失效后发生连续性倒塌的全过程。2017年,Kang等^[14,15]通过开展后浇整体式预制混凝土框架结构抗连续倒塌试验,分别对梁底部纵筋采用搭接和90°弯钩锚固方式下结构的受力性能进行研究。2017年,Elsanadedy等^[16]对3个1/2缩尺的牛腿连接装配式结构进行了抗连续倒塌试验研究,并利用LS-DYNA对结构进行了参数优化设计。2018年,Feng等^[17]利用OpenSees对某预制装配式混凝土框架结构抗连续倒塌性能进行研究,并对后浇混凝土强度、钢筋直径、强度及锚固端长度等影响因素进行了参数分析。

由于建筑结构的抗连续倒塌性能受到荷载、材料、构件几何尺寸等众多不确定性因素影响,因此有必要对这些不确定性因素的影响程度进行评估。本文以一牛腿-插销杆-角型钢板连接的全装配式混凝土框架结构抗连续倒塌试验为基础,利用OpenSees有限元软件建立相应连接节点的宏观模型,对试验过程进行数值模拟。针对试验过程中的结构失效模式,开展了相应参数优化设计;同时基于模拟校验结果,通过建立该节点连接方式下的多层混凝土框架结构有限元模型,利用非线性静力Pushdown方法对不同损伤工况下剩余结构的整体抗连续倒塌能力进行分析;并挑选出影响结构抗连续倒塌性能的15个设计不确定性参数,采用Tornado图形法对其灵敏度进行了分析讨论,将其影响程度高低进行依次排序,为该类型结构设计提供经验建议。

1 结构抗连续倒塌性能研究

1.1 非线性静力 Pushdown 分析

为建立可靠的建筑结构抗连续倒塌设计方法,需对整体结构倒塌过程中的性能水平及抗力机制进行研究。拆除构件法作为一种评估结构抗连续倒塌能力的重要方法,已被国内外众多学者应用至建筑结构的抗连续倒塌问题研究当中^[18]。即通过按照一定规律拆除结构构件,考察荷载作用下剩余结构的抗连续倒塌能力^[19]。传统的拆除构件分析方法包括线性静力分析、非线性静力分析、线性动力分析及非线性动力分析。相关研究表明^[20],建筑结构的连续性倒塌本质上属于复杂的非线性过程;而非线性动力分析方法操作过程较为复杂,且计算量十分庞大,使得其在整体结构的抗连续倒塌问题研究中应用较为有限。

非线性静力 Pushdown 分析通过对拆除构件后的剩余结构施加逐级递增的竖向荷载,直至结构达到倒塌极限状态,以此研究结构在竖向荷载作用下的倒塌破坏机制^[6]。该方法综合考虑了材料及构件的非线性,能够较好地评估建筑结构的剩余承载力与延性性能,且计算效率高,已被广泛用来分析多层框架结构的抗连续倒塌性能,尤其是对整体结构的极限抗力及相应分布规律的研究当中^[21]。在计算过程中,通过记录被移除柱上方节点处的竖向位移和荷载放大系数 α ,统计形成 Pushdown 曲线。当结构竖向荷载达到峰值后,即 Pushdown 曲线开始出现下降段时,表示结构开始逐渐丧失承载能力,则结构的抗连续倒塌能力可定义为 Pushdown 曲线上峰值点所对应的最大荷载放大系数 α_{\max} 。

1.2 不确定参数灵敏度分析

结构设计过程中的一些关键参数(如荷载参数、材料参数、结构几何参数等)对其抗连续倒塌性能具有一定影响。灵敏度分析是指依据输入参数不确定性对结构响应的影响程度,将各输入参数的重要性进行高低排序。可通过该方法评估装配式结构的抗连续倒塌性能,从而为该类型结构的设计及参数优化提供参考依据。

Tornado 图形法作为一种灵敏度分析重要方法,是指将不确定性参数对结构响应造成的反应差进行排序,来直观定量地描述各参数变异对于结构响应影响程度的大小^[22,23]。通过为每个不确定参数设定上限值(upper-bound)、基准值(base-line)和下限值(lower-bound),在进行灵敏度分析时每次只变换一个参数,分别取为上限及下限值,而其他参数均取其基准值。通过计算结构响应差值,来定量描述该参数变异对结构响应的灵敏度大小。

基于 Tornado 图形法的结构灵敏度计算方法如下:

- (1) 根据计算工况下结构响应输出特征,确定结构抗连续倒塌过程中极限承载能力 α_{\max} ;
- (2) 根据各不确定性参数的概率分布信息与变异系数,计算出相应上限值与下限值。在结构模型中进行 Pushdown 分析计算,得到相应的 Pushdown 曲线,并提取 α_{\max} 值;
- (3) 根据所提取各不确定性参数影响下结构响应的 α_{\max} 值,计算相应的响应差值 Δ_{α} 。在此基础上绘制 Tornado 图,对影响结构性能的各不确定性参数灵敏度进行评估。

2 有限元计算

2.1 结构试验

根据《混凝土结构设计规范》(GB50010-2010)^[24]等规范要求,湖南大学结构健康监测团队(www.hnut-est.com)设计了一栋纵横向均为四跨七层的钢筋混凝土框架结构^[25],如图 1 所示。结构横向柱距为 6.0 m,纵向柱距为 7.5 m,层高三.6 m;屋面恒荷载为 7.5 kN/m²,屋面活荷载为 0.5 kN/m²,楼面恒载为 5.0 kN/m²,楼面活荷载为 2.0 kN/m²;抗震设防烈度为 7 度,设计基本地震加速度为 0.1 g,设计地震分组为第一组,场地类别为二类。

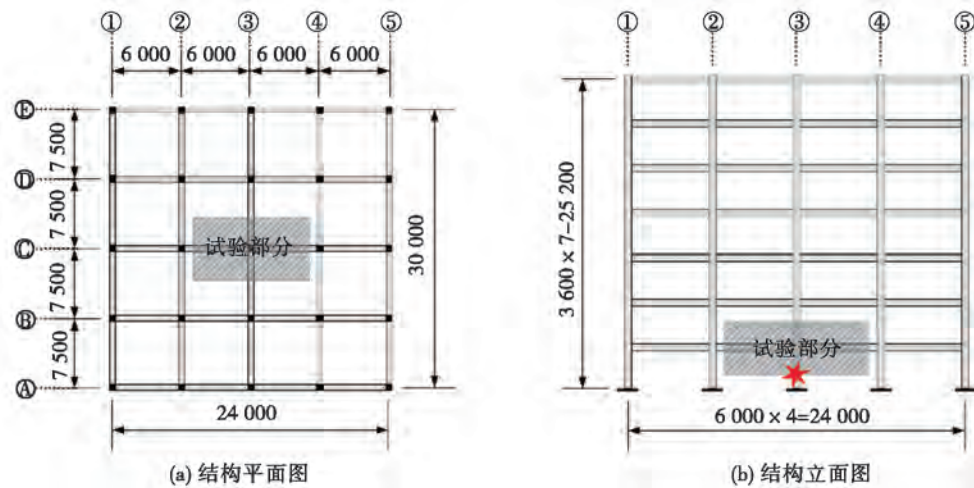


图 1 原型结构 (单位: mm)

Fig. 1 View of prototype structure (unit: mm)

通过选取图 1 阴影所示部分的框架子结构,按照 1/2 缩尺比例设计完成了一组现浇(RC)和全装配式(PC)混凝土构件。其中全装配式构件在梁柱节点处采用明牛腿-插梢杆-角型钢板的连接方式,利用牛腿承担节点处的剪力;并对传统插梢杆连接方式进行改进,通过在梁端上表面安装角型钢板,其分别通过插梢杆和高强螺杆与预制梁和预制柱相连,使整个节点利用插梢杆的抗剪能力传递弯矩。同时在牛腿内部设置了环形箍筋将插梢杆水平拉结,并在预制框架梁中设置了用以拉结插梢杆的水平锚固筋。

结构尺寸及配筋情况如图 2 所示。其中框架子结构试件梁截面尺寸为 200 mm × 300 mm,柱截面尺寸为 350 mm × 350 mm;为固定边柱柱底,设置了截面为 500 mm × 500 mm 的锚固地梁。框架梁净跨为 2 650 mm,中柱高度取为 1500 mm,边柱高度取底层柱至二层柱反弯点处。试验中所有纵向钢筋均采用 HRB400 级钢筋,横向箍筋均为 HPB300 级钢筋,混凝土强度等级为 C35。详细信息如表 1 所示。

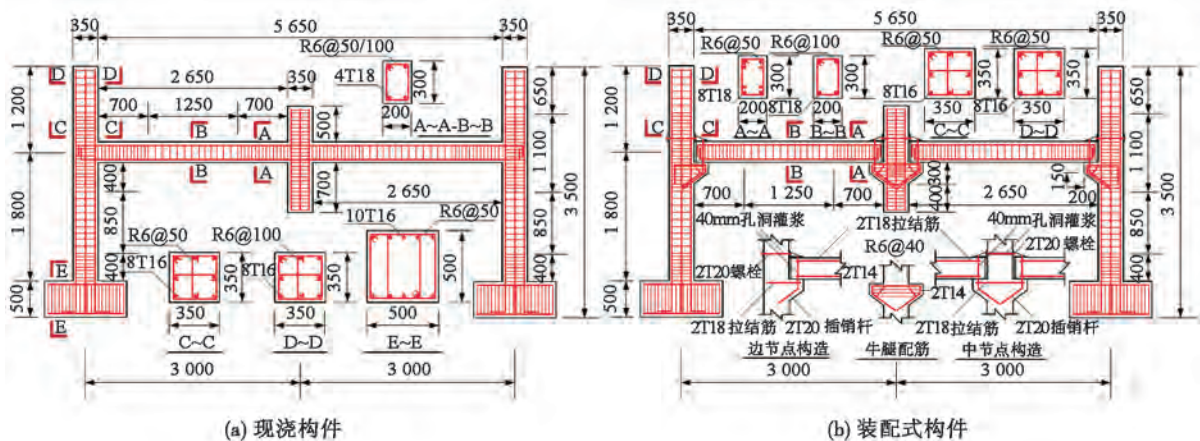


图 2 测试框架子结构尺寸及配筋详图 (单位: mm)

Fig. 2 Dimensions and reinforcement information of tested moment frame sub-structures (unit: mm)

表1 构件配筋情况

Table 1 Reinforcement details of tested specimens

构件	纵向钢筋			横向箍筋		
	柱端纵筋	梁端纵筋	牛腿纵筋	柱箍筋	梁箍筋	牛腿
RC	8T16	4T18	—	R6@50/100	R6@50/100	—
PC	8T16	4T18	4T14	R6@50/100	R6@50/100	R6@40

注:表中T表示变形钢筋,R表示光圆钢筋。

试验加载过程分为3个阶段,其中第1阶段为试验预加载阶段,第2阶段为中柱底部卸载阶段,第3阶段为中柱顶部加载阶段。试验开始前期采用力控制加载机制,卸载阶段每级卸载3 kN,加载阶段每级加载5 kN。在荷载达到峰值或开始有所降低时,由力控制加载机制改为位移控制加载机制。每级荷载施加完毕及持荷5 min后,再进行荷载、位移及应变的采集工作,并对裂缝发展情况进行观察。试验结果表明,现浇构件的抗连续倒塌性能较好,在整个受力过程中依次出现了压拱效应阶段和悬链线效应阶段,梁端钢筋最终被拉断,周围混凝土也被压溃;而装配式构件则只经历了压拱效应阶段,且插销杆最终被剪断。

2.2 有限元模型

依据试验数据,在OpenSees中针对现浇和装配式构件分别建立了尺寸完全相同的有限元模型。其中混凝土模型采用Concrete02本构关系,与通常使用的Concrete01本构相比其额外考虑了混凝土材料的线性受拉影响,并通过定义峰值抗压强度 f_c 、峰值压应变 ε_c 、极限抗压强度 f_u 及极限压应变 ε_u 等参数对材料行为进行模拟;其中混凝土抗拉强度取值为0.1倍的抗压强度,受拉软化段刚度则取为0.125倍的抗压弹性模量。同时,通过设置强度增大系数 K 计算Concrete02材料模型的受压段控制点,以考虑箍筋对约束区混凝土的强化作用。钢筋采用Steel02本构模型,该材料通过采用Menegotto等提出的显式模型对Bauschinger效应进行考虑,并通过设置弹性模量 E_s 、屈服强度 f_y 、硬化率 b 及由弹性段过渡到硬化阶段等相关参数来表达材料的力学性能,如图3所示。其中,钢筋的弹性模量 E_s 和屈服强度 f_y 均取实测值,材料硬化率 b 取为1%,过渡阶段的相关参数 R_0 、 cR_1 及 cR_2 分别取为10、0.925和0.15。约束设置方面,边柱底部采用固支约束,边柱顶部反弯点处通过设置水平弹簧单元约束结构的平动自由度,并根据试验测试结果设置弹簧刚度系数。

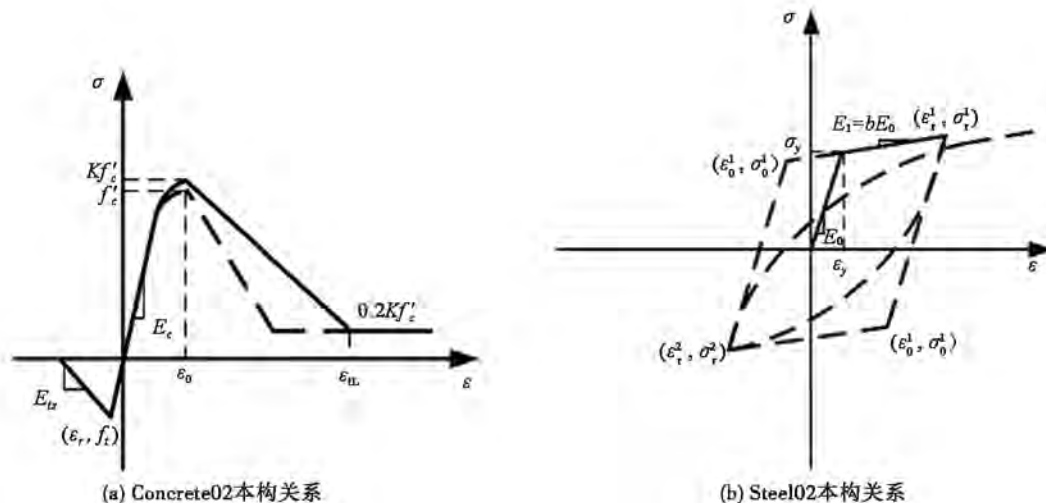


图3 有限元模型材料本构关系

Fig. 3 Constitutive relationship of finite element materials

基于试验结果测得的结构荷载-变形曲线以及节点失效模式,在OpenSees中建立相应有限元模型。其中利用Altoontash等^[26-27]提出的Joint2D模型,从节点域和交界面两个方面对现浇结构节点单元进行简化处理,如图4所示。该模型由一个内部剪切块以及四个外部转动弹簧组成,分别用来模拟节点模型中剪切变形与交界面转角变形。转动弹簧的本构关系采用广义一维荷载-位移滞回模型的Pinching4本构关系来表示,并通过修正压力场理论确定相关参数,其本构模型如图5所示。针对装配式构件节点连接形式及受力特征,

分别从梁端上部螺栓-角型钢板连接处、梁端下部与牛腿插梢杆连接处及梁-柱结合面处进行简化处理,如图 4 所示。其中,采用 Zero-length 单元对角钢、插梢杆等相关连接件进行模拟,并赋予相应材料模型特性以模拟实际构件的力学行为。螺栓-角型钢板连接方面,在 OpenSees 中利用单轴 Hysteretic 本构关系来模拟螺栓连接角钢的简化分析模型,并利用单轴 Elastic-multilinear 关系构造双线性本构模型来模拟螺栓剪切分析模型,如图 5 所示。综合考虑螺栓与角钢的受力特性,利用 Series material 命令将 Hysteretic 和 Elastic-multilinear 两种材料本构模型进行组合^[28]。梁端-牛腿连接方面,将单轴 Hysteretic 材料本构赋予至 Zero-length 单元以模拟实际结构中插梢杆的剪力传递作用。在梁-柱结合面处,利用 Zero-length-section 单元来模拟梁端与柱之间的单向受压状态,并将该单元范围内的混凝土和钢筋纤维的抗拉强度和刚度均设置为 0^[29]。考虑到实际试验中的牛腿构件历经了弹性至弹塑性的发展过程,利用 Elastic beam-column 单元对牛腿进行模拟,牛腿与柱之间则采用刚性连接。针对结构模型,通过 Rigid link beam 命令将梁单元的端部节点与相应的从属节点进行自由度耦合,柱单元主节点与相应从属节点的自由度则通过 equal DOF 命令进行耦合。

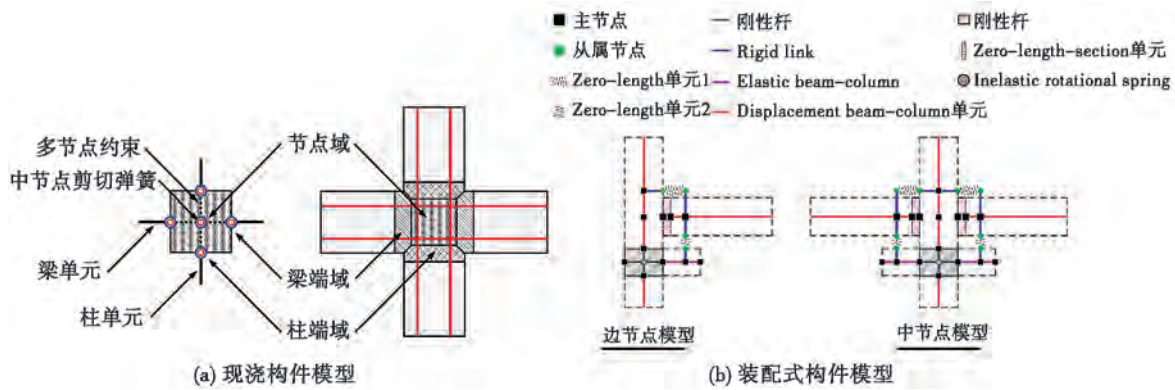


图 4 有限元模型节点宏观模型

Fig. 4 Macro-joint of the finite element model

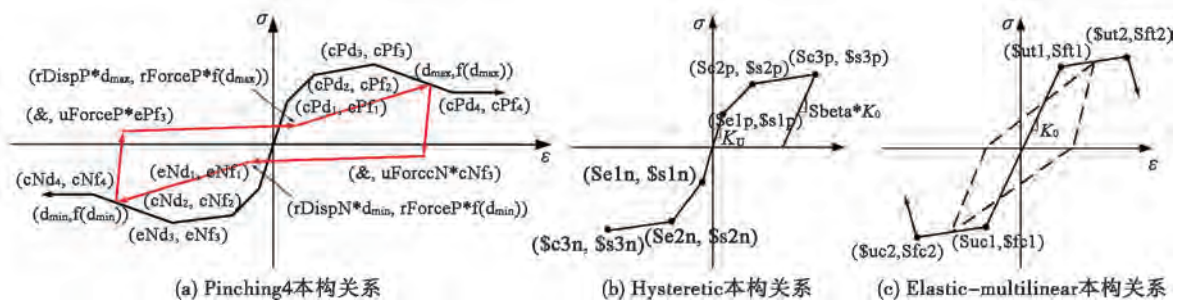


图 5 模型本构关系

Fig. 5 Constitutive relationship of macro-joint zone

2.3 数值模拟结果分析

为验证所建有限元模型的正确性,将 OpenSees 计算结果与试验测试结果进行对比分析。中柱移除下的结构荷载-位移曲线如图 6 所示,可知现浇模型的峰值荷载及位移均能与试验结果较好吻合,但悬链线阶段的发展却略有偏差。这主要是由于试验过程中随着竖向位移的不断增大,梁内钢筋最终被拉断,从而导致荷载急剧下降。而在模拟计算时,为综合考虑精度与收敛性等问题,所建有限元模型中未考虑钢筋断裂等影响。对于装配式构件,其吻合程度也较为良好。其中,由于在计算时未考虑实际结构中填充砂浆的抗拉强度,导致计算所得荷载-位移曲线在上升阶段发展水平略低;同时由于未考虑实际插梢杆断裂产生的影响,导致计算曲线在构件破坏时的性能与实际情况略有差异。

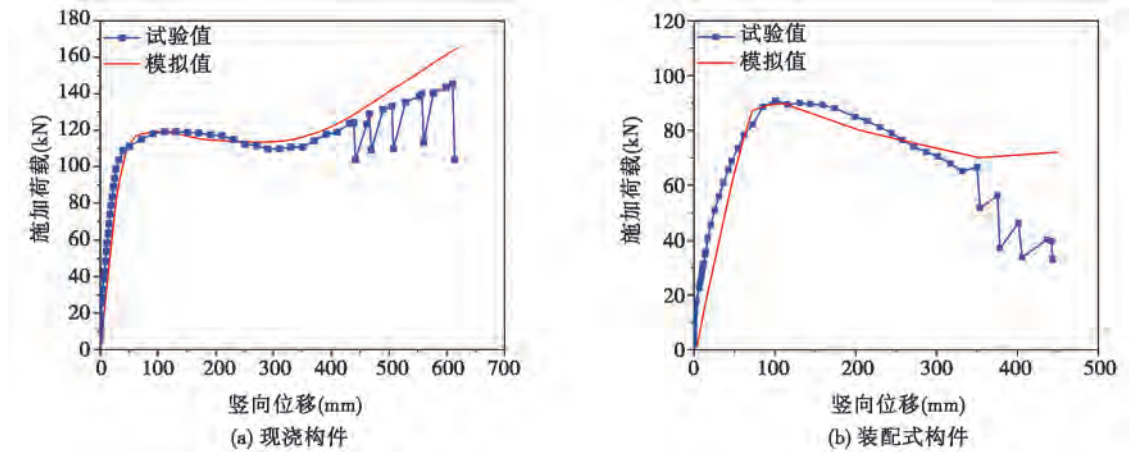


图6 中柱荷载-位移曲线校验结果

Fig. 6 Calculated load-displacement relationship of mid-column

计算所得的边节点侧移-位移曲线如图7所示,可知模拟结果与试验结果变化趋势基本一致;在试验后期两者产生一定差异,主要是由于有限元中理想固定边界条件与实际情况相比存在一定差异。根据分析结果可知,本文建立的有限元分析模型较好地表达框架子结构在竖向荷载作用下的力学性能,从而验证了所建模型的准确性。

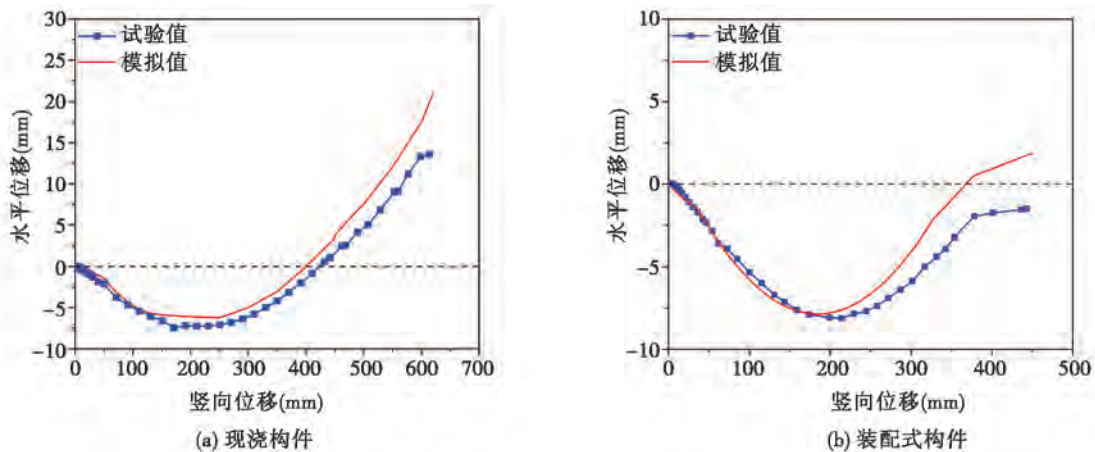


图7 边节点侧移曲线校验结果

Fig. 7 Calculated lateral displacement of exterior joint

2.4 参数优化设计

由于试验过程中该连接形式的装配式框架子结构只经历了压拱阶段,未产生悬链线效应以形成有效抗力机制。为增强结构的二次抗倒塌能力,针对节点失效模式对该装配式结构进行了优化设计。考虑到试验过程中结构的最终破坏状是由梁柱节点处插梢杆被剪断所导致的,因此可通过提高插梢杆抗剪强度来增强节点性能。试验中所采用的插梢杆由20 mm普通钢筋加工而成,故对其设计了两种优化工况,其中PC1采用25 mm普通钢筋,PC2采用20 mm高强螺栓(10.9级)。分别计算两种优化工况下装配式框架子结构的荷载-位移曲线及边节点侧移曲线,如图8所示。

根据计算结果可知,经优化后的装配式结构,由于插梢杆抗剪强度的增大,导致受力纵筋在结构大变形阶段能够形成一定的拉结作用,从而有效提高结构的承载能力,特别是二次抗倒塌能力;同时优化后的模型产生了向内的位移,表明结构产生了悬链线效应,相应抗连续倒塌性能得以显著提高。其中,PC1在压拱阶段的极限承载能力为102.6 kN,较初始PC模型提高约12.9%;PC2的压拱阶段极限承载能力为120.8 kN,较初始PC模型提高约33.7%。同时在悬链线阶段,PC1的极限承载力为113.3 kN,比现浇模型低约22.1%;PC2的极限承载能力为135.9 kN,比现浇模型低约6.5%。因此,对于采用该牛腿-插梢杆-角型钢板连接形

式的装配式框架结构, 可通过增强插梢杆抗剪强度提高结构的抗连续倒塌性能。其中, 采用高强螺栓的结构性能优化效果更为显著。

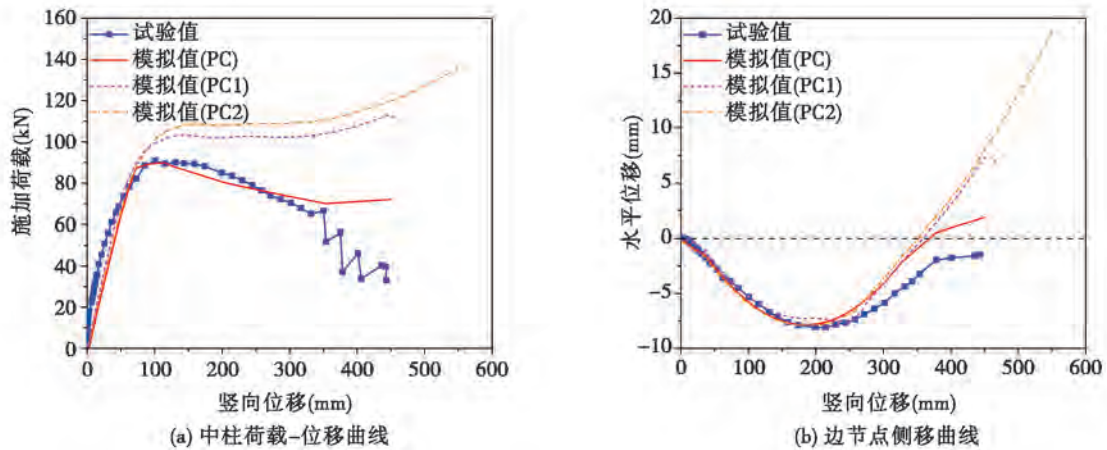


图 8 装配式子结构优化设计结果

Fig. 8 Calculation results of optimized PC sub-structure

3 多层框架结构 Pushdown 分析

3.1 结构设计

为探讨结构在主要构件失效后剩余结构的整体抗连续倒塌能力, 在 OpenSees 中分别建立了一榀四跨七层的现浇及装配式框架结构, 其几何尺寸与图 1(b) 中所示模型完全一致。框架混凝土强度等级为 C35, 采用 Concrete02 本构关系。梁柱内纵向受力钢筋强度等级为 HRB400, 箍筋为 HPB300, 角钢为 Q390, 采用 Steel02 本构关系。采用纤维单元模拟钢筋混凝土协同作用, 并通过强度增大系数 K 考虑箍筋对约束区混凝土的增强作用。将上一节的现浇 RC 及装配式 PC 节点宏观模型分别应用到该多层框架模型中。为简化分析, 模型 1~7 层配筋情况完全相同, 且现浇结构梁柱构件配筋情况与装配式结构完全相同, 如图 9 所示。其中, 梁柱构件中混凝土模型的材料参数如表 2 所示。为保证模型在大变形下的反应特征及计算收敛性, 对于梁柱构件采用基于位移的非线性梁柱单元。为保证有限元模型能够较好地反映结构在大变形阶段的特征, 将梁柱构件划分为多个基于位移的单元进行计算。同时, 通过几何变换考虑结构在悬链线阶段产生的 2 阶挠曲大变形效应。

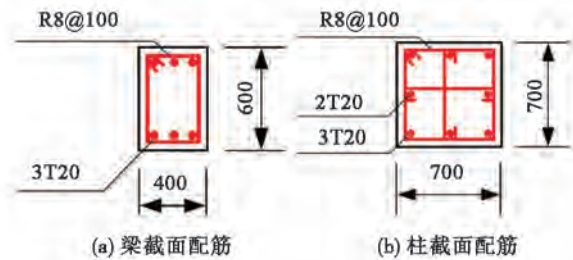


图 9 多层框架结构有限元模型配筋情况

Fig. 9 Reinforcement information of the finite element multi-story structure model

表 2 混凝土模型参数

Table 2 Parameters of concrete model

构件	非约束区混凝土				约束区混凝土			
	f_c (N/mm ²)	f_u (N/mm ²)	ϵ_0	ϵ_u	f_c (N/mm ²)	f_u (N/mm ²)	ϵ_0	ϵ_u
梁	29.76	0	0.002	0.004	35.15	7.03	0.002	0.017
柱	29.76	0	0.002	0.004	31.69	6.34	0.002	0.009

3.2 Pushdown 计算分析

本文采用 DoD 规范建议的荷载组合方式 $(1.2D + 0.5L)$ [30] 进行计算, 其中 D 为恒荷载 L 为活荷载。通过引入荷载放大系数 α 来考虑 Pushdown 分析中逐级增大的施加荷载。失效工况方面, 采用两种经典失效模型, 分别对结构中柱及边柱进行拆除, 并利用非线性静力 Pushdown 方法对剩余结构的抗连续倒塌性能进行

研究。其中美国 DOD^[30] 和 GSA^[31] 规范中在利用拆除构件法进行结构抗连续倒塌设计时,在失效柱节点两侧的受损梁跨施加考虑动力作用的放大荷载,而在其他区域则施加一倍的设计荷载。因此这里采用不平衡加载法进行模型计算分析,即在失效柱相邻跨施加逐级增大的竖向荷载 $\alpha \times (1.2D + 0.5L)$,而在其他部位则施加一倍的基本荷载设计值 $(1.2D + 0.5L)$,如图 10 所示。同时根据 Khandelwal 等的建议^[6] 将移除柱构件后剩余结构竖向位移达到相邻跨度的 1/3 以及大变形下有限元计算结果不收敛时作为结构发生连续性倒塌的准则。

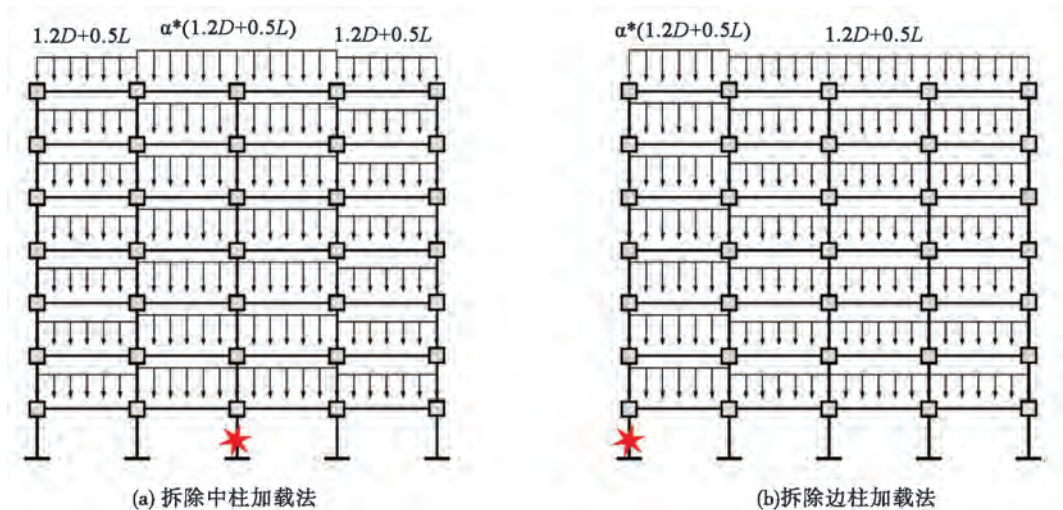


图 10 两种失效模式下的加载方法

Fig. 10 Loading mechanism under two failure conditions

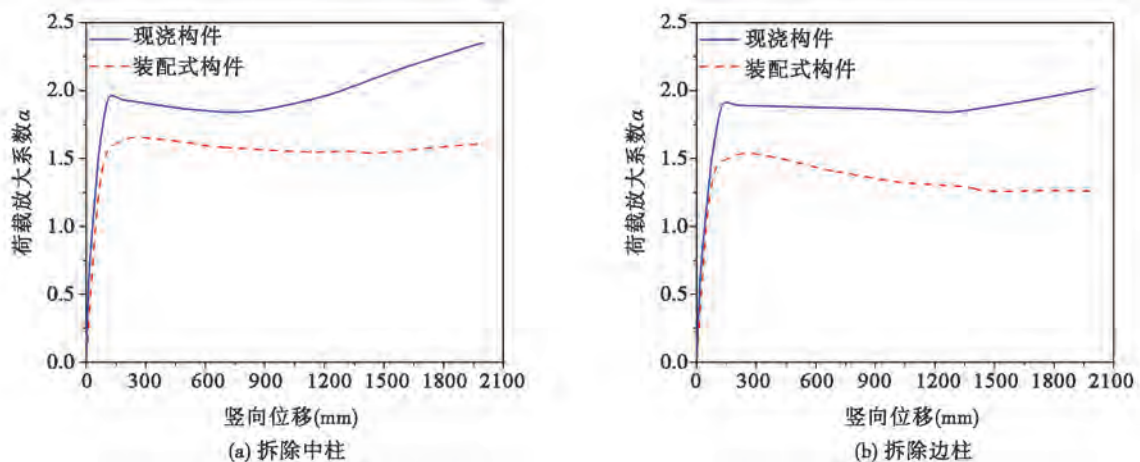


图 11 现浇与装配式结构失效模式下 Pushdown 分析结果

Fig. 11 Pushdown analysis results of RC and PC structures

分别计算现浇与装配式框架结构在中柱失效工况下的 Pushdown 曲线,如图 11 所示。对于中柱失效工况,在压拱效应阶段下,当现浇结构的极限荷载放大系数 α_{\max} 达到 1.962 时,其竖向位移为 132.2 mm;而装配式结构在 α_{\max} 为 1.656 时,对应的竖向位移为 260.7 mm。在此阶段,装配式结构的整体抗连续性倒塌能力较现浇结构低约 18.5% 左右。当现浇结构竖向位移达到 800 mm 左右时,结构进入悬链线阶段,荷载放大系数逐渐增大。当 α_{\max} 增大至 2.352 时,结构达到极限竖向位移。而装配式结构则没有产生明显的悬链线效应,当 α_{\max} 达到 1.609 时,其结构发生破坏。这主要是由于装配式节点刚度不足,尤其是当插梢杆失效后,梁内受力纵筋无法与周边约束形成有效拉结作用,其性能得不到充分利用,使得剩余结构仅能依靠压拱效应抵抗竖向荷载。在边柱失效工况下,现浇结构并没有发展形成有效的悬链线机制,这主要是由于受损梁跨在一侧底部支撑柱失效后形成了悬臂梁体系,使得受损梁跨端部的水平约束不能与梁内钢筋形成有效拉结作用来

抵抗竖向荷载。而装配式结构的倒塌机制在于受损梁跨周边无法形成有效水平约束,并且随着失效柱结点位移的增加,梁端发生较大转动,结构的竖向刚度发生明显下降,结构由压拱效应提供竖向抗力直至结构最终发生倒塌,其极限承载能力比现浇结构低约22.8%左右。表3为两种失效工况下结构极限状态的荷载放大系数及相应竖向位移。

表3 极限状态下荷载放大系数及竖向位移
Table 3 Load coefficient and vertical displacement of limit state

失效模式	框架模型	压拱阶段		倒塌阶段	
		α	竖向位移 (mm)	α	竖向位移 (mm)
中柱失效	RC	1.962	132.2	2.352	2000
	PC	1.656	260.7	1.609	2000
边柱失效	RC	1.912	152.1	2.014	2000
	PC	1.557	260.7	1.256	2000

4 多层框架结构不确定性参数灵敏度分析

4.1 不确定性参数选取

本文基于Pushdown分析结果,利用Tornado图形法对影响建筑结构抗连续倒塌性能的不确定性参数进行灵敏度分析。根据文献[32-36]建议的设计参数基本概率分布信息,从荷载参数、材料参数及结构几何参数等三个方面选取出15个不确定性参数,如表4所示。根据Tornado法基本原理,所需进行的Pushdown分析次数为 $2 \times 15 + 1 = 31$ 次。其中,补充的一次Pushdown分析为所有不确定性参数均取平均值时的结构响应。

表4 不确定性参数概率统计分布
Table 4 Probability distribution statistics of uncertain parameters

不确定性参数		基准值	变异系数	统计方式
荷载参数	楼面恒荷载(kN/m)	7.50	0.100	Normal
	屋面恒荷载(kN/m)	5.00	0.100	Normal
	活荷载(kN/m)	2.00/0.5	0.470	Lognormal
	砼抗压强度(MPa)	23.4	0.130	Normal
	砼弹性模量(GPa)	31.3	0.077	Normal
	砼保护层厚度(mm)	20	3.000	Lognormal
材料参数	纵筋屈服强度(MPa)	452.1	0.093	Beta
	纵筋弹性模量(GPa)	200.0	0.033	Normal
	箍筋屈服强度(MPa)	339.0	0.070	Beta
	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	Normal
	箍筋截面积(mm ²)	50.2	0.040	Normal
几何参数	楼层跨度(mm)	6 000	0.003	Normal
	梁宽(mm)	300	0.012	Normal
	梁高(mm)	500	0.013	Normal

4.2 现浇结构灵敏度分析

通过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

结果,如图 12 所示。可知随着失效柱处节点竖向位移的增加,荷载放大系数逐渐增大,最终达到了结构在压拱阶段的峰值点。同时在悬链线发展阶段,随着结构竖向位移的增加,各不确定性参数变异产生的影响随之进一步发散。其中对比中柱与边柱失效工况下的 Pushdown 曲线,可知在边柱失效的情况下不确定性参数变异性对结构的抗连续倒塌影响更大。

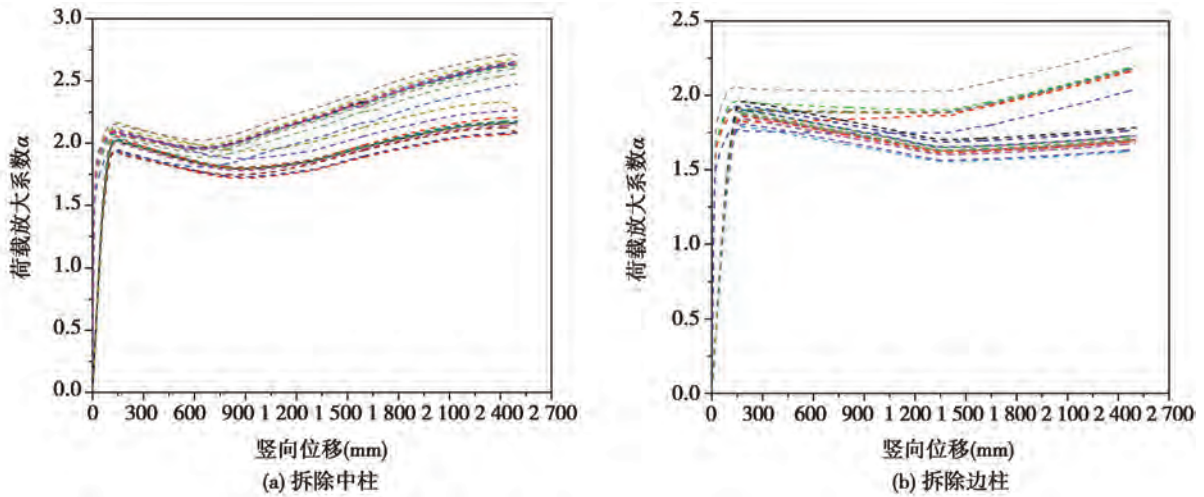


图 12 现浇结构失效工况下 Pushdown 分析结果
Fig. 12 Pushdown analysis results of RC structure

选取结构在压拱阶段峰值荷载对应下的 α_{max} 作为参考点,对结构不确定性参数进行灵敏度分析。将各参数变化引起的结构响应差值按照从大到小的顺序进行排列,如图 13 所示。根据计算结果可知,对于现浇结构整体抗连续倒塌影响较大的不确定性参数主要为纵筋屈服强度、楼面恒荷载、梁纵筋截面积、混凝土抗压强度、梁高尺寸以及活荷载等。其中材料不确定性产生的影响较大。这是由于结构在压拱阶段作用下,梁端开始出现塑性铰,底部纵筋发生屈服,导致该参数变异性对结构性能影响起控制作用;同时在对结构进行竖向抗连续倒塌分析时,荷载方面造成的影响,尤其是楼面恒荷载,也是不容忽视的。

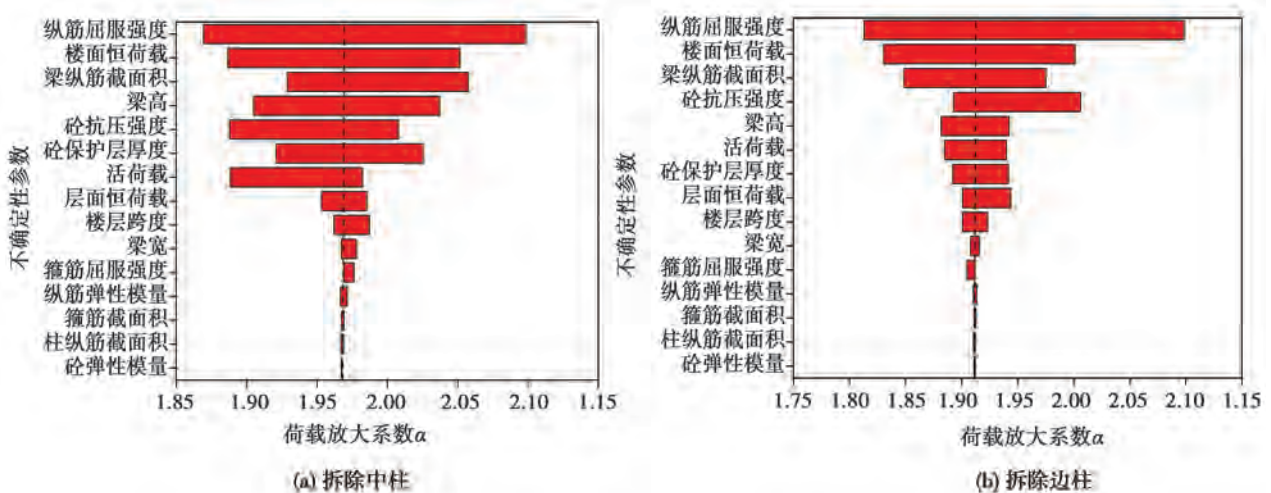


图 13 现浇结构失效工况下 Tornado 分析结果
Fig. 13 Tornado analysis results of RC structure

4.3 装配式结构灵敏度分析

分别计算中柱与边柱失效工况下装配式结构的 Pushdown 曲线,如图 14 所示。可知随着失效柱端竖向位移的增加,荷载放大系数逐渐增大至峰值点,即整体结构达到压拱阶段下抗连续倒塌的极限承载能力;之后随着结构竖向位移的持续增大,荷载放大系数随之降低。与现浇结构相比,各不确定性参数对装配式结构

的影响在达到峰值点后并没有进一步发散,主要是由于装配式结构在大变形阶段没有充分发展产生悬链线效应。

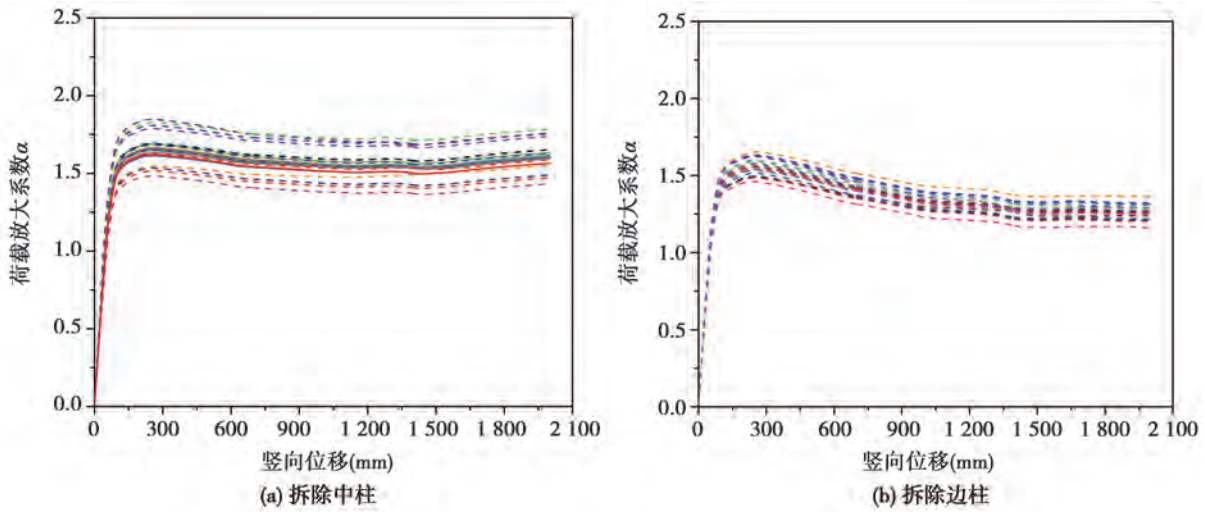


图 14 装配式结构失效工况下 Pushdown 分析结果

Fig. 14 Pushdown analysis results of PC structure

对各不确定性参数进行灵敏度分析,结果如图 15 所示。可知对装配式结构抗连续倒塌性能影响较大的不确定性参数主要为纵筋屈服强度、混凝土抗压强度、楼面恒荷载、梁纵筋截面积、活荷载以及梁高尺寸等。其中最重要的影响参数与现浇结构相差不大,但装配式结构对于钢筋材料的性能参数更为敏感。同时在对装配式结构进行抗连续倒塌分析时,荷载方面的影响,尤其是楼面恒荷载,也是不容忽视的。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该结构抗连续性倒塌影响相对较小,在设计计算过程中可对其进行忽略。

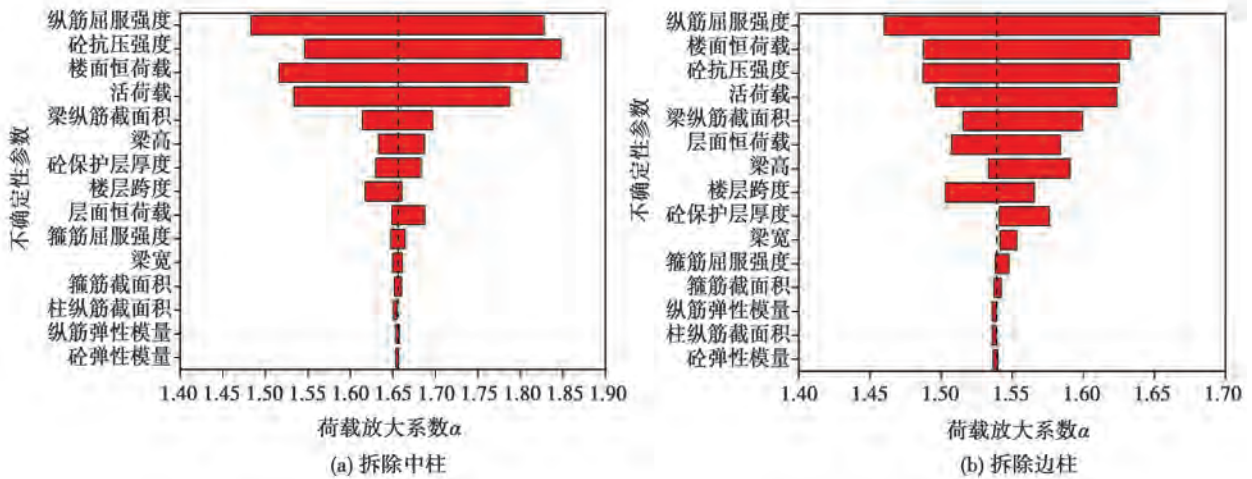


图 15 装配式结构失效工况下 Tornado 分析结果

Fig. 15 Tornado analysis results of PC structure

基于上述分析,综合选取中柱与边柱失效工况下对装配式结构影响最大(小)的 5 个不确定性参数,如表 5 所示。根据统计结果可知,在对采用该牛腿-插梢杆-角型钢板连接方式的装配式混凝土框架结构进行抗连续性倒塌风险性评估时,可选取影响较大的纵筋屈服强度、混凝土抗压强度、楼面恒荷载、活荷载以及梁纵筋截面积等不确定性参数进行分析;而对于影响较小的参数,如混凝土弹性模量、柱纵筋截面积、纵筋弹性模量、箍筋截面积以及梁宽等,可忽略其对结构性能的不确定性影响。

表5 失效工况下装配式结构性能影响结果

Table 5 Results of parametric study under middle (exterior) column loss scenarios

影响程度	中柱失效工况			边柱失效工况		
	不确定性参数	Δ_α	比例(%)	不确定性参数	Δ_α	比例(%)
影响最大	纵筋屈服强度(MPa)	0.344 68	20.83	纵筋屈服强度(MPa)	0.193 56	12.63
	砼抗压强度(MPa)	0.301 81	18.25	砼抗压强度(MPa)	0.145 34	9.54
	楼面恒荷载(kN/m)	0.292 13	17.64	楼面恒荷载(kN/m)	0.138 08	8.91
	活荷载(kN/m)	0.253 82	15.32	活荷载(kN/m)	0.127 29	8.34
	梁纵筋截面积(mm ²)	0.069 89	5.13	梁纵筋截面积(mm ²)	0.084 01	5.48
	梁宽(mm)	0.011 35	0.69	梁宽(mm)	0.009 63	0.63
影响最小	箍筋截面积(mm ²)	0.008 39	0.51	箍筋截面积(mm ²)	0.005 13	0.33
	柱纵筋截面积(mm ²)	0.003 67	0.22	柱纵筋截面积(mm ²)	0.003 60	0.23
	纵筋弹性模量(GPa)	0.003 48	0.21	纵筋弹性模量(GPa)	0.002 72	0.18
	砼弹性模量(GPa)	0.003 41	0.21	砼弹性模量(GPa)	0.002 12	0.14

5 结论

本文利用 OpenSees 有限元软件,针对某牛腿-插销杆-角型钢板连接的全装配式混凝土框架结构抗连续倒塌试验,通过建立连接节点宏观模型,对试验结果进行了有限元模拟,并针对试验过程中的结构失效模式,开展了相应的参数优化设计。同时基于模型校验结果,利用拆除构件法对该连接方式下多层平面框架结构的抗连续倒塌性能进行了非线性静力 Pushdown 分析;并采用 Tornado 图形法,对影响结构抗连续倒塌性能的不确定性参数影响程度进行了灵敏度分析。相关结论如下:

(1) 在 OpenSees 中建立了试验构件的有限元模型。其中针对现浇和装配式结构的不同连接形式,分别建立了相应的节点宏观模型,并对框架结构抗连续倒塌静载试验进行了数值模拟。计算所得的节点荷载-位移曲线及结构失效模式均与试验结果较好吻合,表明本文提出的建模方法可有效应用于建筑结构的抗连续倒塌问题研究当中。

(2) 针对试验过程中装配式构件插销杆被剪断的结构失效模式,开展了相应的优化设计。通过增大插销杆直径、使用高强螺杆两种方式提高插销杆抗剪强度,并分别对节点改进后装配式框架子结构的抗连续倒塌性能进行分析。计算结果表明,两种优化方式下结构在压拱阶段的极限承载力分别提高约 12.9% 和 33.7% 左右,且均产生了悬链线效应,二次抗连续倒塌性能得到了有效提高;同时,使用高强螺杆作为插销杆的优化效果更为显著。

(3) 利用拆除构件法,分别设计了中柱破坏和边柱破坏两种失效模式,并采用不平衡加载法,对 PC 节点宏观模型连接方式下的多层装配式框架结构进行了竖向抗连续倒塌 Pushdown 分析。计算结果表明,该全装配式框架结构的整体抗连续倒塌性能比相应现浇结构差,其两种失效工况下压拱效应阶段的极限承载能力分别比现浇结构低约 18.5% 和 22.8% 左右;且该装配式结构没有形成明显的悬链线效应,其二次抗连续倒塌性能相对较差。

(4) 通过选取包含荷载参数、材料参数及结构几何参数在内的 15 个关键不确定性参数,对结构抗连续倒塌性能进行了灵敏度分析。计算结果表明,对该全装配式框架结构抗连续倒塌极限承载能力影响较大的不确定性参数主要为纵筋屈服强度、混凝土抗压强度、楼面恒荷载、活荷载以及梁纵筋截面积等;而混凝土弹性模量、柱纵筋截面积、纵筋弹性模量、箍筋截面积以及梁宽尺寸等参数不确定性对结构性能影响相对较小,在结构设计阶段可忽略其变异性产生的影响。

参考文献:

- [1] Pearson C, Delatte N. Ronan point apartment tower collapse and its effect on building codes [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2005, 19(2): 172-177.
- [2] 李易. RC 框架结构抗连续倒塌设计方法研究 [D]. 北京:清华大学, 2011.
LI Yi. Research on progressive collapse design method of RC frame structure [D]. Beijing: Tsinghua University, 2011. (in Chinese)

- [3] 易伟建,何庆锋,肖岩. 钢筋混凝土框架结构抗倒塌性能的试验研究[J]. 建筑结构学报,2007,28(5):104-109.
YI Weijian, HE Qingfeng, XIAO Yan. Experimental study on collapse resistance of reinforced concrete frame structures [J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(5): 104-109. (in Chinese)
- [4] Mohamed O A. Assessment of progressive collapse potential in corner floor panels of reinforced concrete buildings [J]. Engineering Structures, 2009, 31(3): 749-757.
- [5] 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[J]. 建筑结构学报,2010(增刊2):112-118.
LV Dagang, CUI Shuangshuang, LI Yanjun. Robustness analysis for progressive collapse of structures using ALP-based pushover analysis approach [J]. Journal of Building Structures, 2010(S2): 112-118. (in Chinese)
- [6] Khandelwal K, El-Tawil S. Pushdown resistance as a measure of robustness in progressive collapse analysis [J]. Engineering Structures, 2011, 33(9): 2653-2661.
- [7] Iribarren B S, Berke P, Bouillard P. Investigation of the influence of design and material parameters in the progressive collapse analysis of RC structures [J]. Engineering Structures, 2011, 33(10): 2805-2820.
- [8] Qian K, Li B. Experimental and analytical assessment on RC interior beam-column subassemblages for progressive collapse [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2011, 26(5): 576-589.
- [9] 中国建筑学会建筑结构防倒塌专业委员会. 钢筋混凝土框架结构拟静力倒塌试验研究及数值模拟竞赛 III: 模拟结果分析[J]. 建筑结构, 2012, 42(11): 27-30.
Member of Building Structural Collapse Prevention Committee of Chinese Architectural Society. Pseudo static collapse test and numerical simulation competition of reinforced concrete frame structure III: analysis of simulation results [J]. Building Structure, 2012, 42(11): 27-30. (in Chinese)
- [10] Yu J, Tan K H. Structural behavior of RC beam-column subassemblages under a middle column removal scenario [J]. Journal of Structural Engineering, 2013, 139(2): 233-250.
- [11] 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 [C]//Structures Congress, VA: ASCE, 2015: 1108-1111.
- [12] Qian K, Li B, Liu Y. Integrity of precast concrete structures to resist progressive collapse [C]//Geotechnical and Structural Engineering Congress, 2016: 1976-1986.
- [13] 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[J]. 工程力学, 2017, 34(12): 162-170.
PAN Yi, CHEN Xiahui, YAO Yunyi. Progressive collapse analysis of unbonded post-tensioned precast RC frame structures using column removal method [J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(12): 162-170. (in Chinese)
- [14] Kang S B, Tan K H. Behaviour of precast concrete beam-column sub-assemblages subject to column removal [J]. Engineering Structures, 2015, 93: 85-96.
- [15] Kang S B, Tan K H. Progressive collapse resistance of precast concrete frames with discontinuous reinforcement in the joint [J]. Journal of Structural Engineering, 2017, 143(9): 04017090-1-13.
- [16] Elsanadedy H M, Almusallam T H, Al-Salloum Y A, et al. Investigation of precast RC beam-column assemblies under column-loss scenario [J]. Construction and Building Materials, 2017, 142: 552-571.
- [17] Feng D C, Wu G, Lu Y. Numerical investigation on the progressive collapse behaviour of precast reinforced concrete frame subassemblages [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2018, 32(3): 04018027-1-14.
- [18] Khandelwal K, El-Tawil S. Assessment of progressive collapse residual capacity using Pushdown analysis [J]. Structures Congress, 2008: 1-8.
- [19] 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 [J]. 建筑结构学报, 2011, 32(11): 1-8.
LI Yi, YE Lieping, LU Xinzhen. Progressive collapse resistance demand of RC frame structures based on energy method I: beam mechanism [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(11): 1-8. (in Chinese)
- [20] 钱凯,罗达,贺盛,等. 钢筋混凝土框架结构底部相邻两柱失效的抗连续倒塌性能研究 [J]. 建筑结构学报, 2018, 39(1): 61-68.
QIAN Kai, LUO Da, HE Sheng, et al. Progressive collapse performance of reinforced concrete frame structures subjected to ground two-column removal scenario [J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(1): 61-68. (in Chinese)
- [21] 于晓辉,钱凯,吕大刚. 基于随机 Pushdown 方法的钢筋混凝土框架结构抗连续倒塌能力概率评估 [J]. 建筑结构学报, 2017, 38(2): 83-89.
YU Xiaohui, QIAN Kai, LV Dagang. Probabilistic assessment of structural resistance of RC frame structures against progressive collapse using random Pushdown analysis [J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(2): 83-89. (in Chinese)
- [22] 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 [M]. Washington D C: US Department of Commerce, National Bureau of Standards, 1980.
- [23] 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 [J]. 建筑结构学报, 2013, 34(4): 15-22.
SONG Pengyan, LV Dagang, CUI Shuangshuang. Reliability analysis of progressive collapse limit state of reinforced concrete frame structure under earthquakes [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(4): 15-22. (in Chinese)
- [24] GB50010-2010 混凝土结构设计规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
GB50010-2010 Code for Design of Concrete Structures [S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2010. (in Chinese)
- [25] 陈太平. 全装配式混凝土框架结构防连续倒塌试验研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2018.

- CHEN Taiping. Static load test study on progressive collapse resistance of fully prefabricated concrete frame structures [D]. Changsha: Hunan University, 2018. (in Chinese)
- [26] Alath S, Kunnath S K. Modeling inelastic shear deformation in RC beam-column joints [C]//Proceeding of 10th Conference on Engineering Mechanics, VA: ASCE, 1995: 822 - 825.
- [27] Ercolino M, Bellotti D, Magliulo G, et al. Vulnerability analysis of industrial RC precast buildings designed according to modern seismic codes [J]. Engineering Structures, 2018, 158: 67 - 78.
- [28] 杜轲, 孙景江, 许卫晓. 纤维模型中单元、截面及纤维划分问题研究[J]. 地震工程与工程振动, 2012, 32(5): 039 - 46.
DU Ke, SUN Jingjiang, XU Weixiao. The division of element, section and fiber in fiber model [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2012, 32(5): 039 - 46. (in Chinese)
- [29] Zhao J, Sritharan S. Modeling of strain penetration effects in fiber-based analysis of reinforced concrete structures [J]. ACI Structural Journal, 2007, 104(2): 133 - 141.
- [30] United States Department of Defense (DoD). UFC 4-023-03, Unified Facilities Criteria: Design of Structures to Resist Progressive Collapse[S]. Washington D C: 2005.
- [31] General Service Administration (GSA). Progressive Collapse Analysis and Design Guidelines for New Federal Office Buildings and Major Modernization Project[S]. Washington D C: 2003.
- [32] Park J, Kim J. Fragility analysis of steel moment frames with various seismic connections subjected to sudden loss of a column [J]. Engineering Structures, 2010, 32(6): 1547 - 1555.
- [33] Mander J B, Priestley M J N, Park R. Theoretical stress - strain model for confined concrete [J]. Journal of Structural Engineering, 1988, 114(8): 1804 - 1826.
- [34] Mirza S A, Hatzinikolas M, Macgregor J G. Statistical descriptions of strength of concrete [J]. Journal of Structural Division, 1979, 105(ST6): 1021 - 1037.
- [35] Mirza S A, Macgregor J G. Variability of mechanical properties of reinforcing bars [J]. Journal of the Structural Division, 1979, 105(5): 921 - 937.
- [36] 吴文朋, 李立峰, 徐卓君, 等. 不确定性对钢筋混凝土桥梁系统地震易损性的影响[J]. 地震工程与工程振动, 2018, 38(6): 160 - 170.
WU Wenpeng, LI Lifeng, XU Zhuojun, et al. Influences of uncertainties on system seismic fragility for the reinforced concrete bridges [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2018, 38(6): 160 - 170. (in Chinese)