

## 基于精细化有限元模型的混凝土框架结构 动力倒塌承载力

周云<sup>1,2</sup>, 胡锦涛<sup>1†</sup>, 朱正荣<sup>1,3</sup>, 罗先明<sup>1</sup>

- (1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南长沙 410082;  
2. 工程结构损伤诊断湖南省重点实验室(湖南大学), 湖南长沙 410082;  
3. 长沙市建设工程质量安全监督站, 湖南长沙 410016)

**摘要:**为评估混凝土框架结构在柱子突然失效时在动力荷载作用下的承载能力,以研究团队开展的现浇(RC)和全装配式(PC1 明牛腿插销节点)混凝土框架结构中柱移除多级重复倒塌动力试验为基础,通过初级垮塌荷载工况下位移响应曲线的拟合,校验了论文中用 ABAQUS 软件建立的框架结构精细有限元分析模型的准确性,并利用拆除构件法对框架结构的抗连续倒塌性能进行了损伤量化评估.由于研究团队试验是多次重复垮塌试验,无法获取 RC 和 PC1(明牛腿插销节点)试件的一次倒塌所承受荷载,对于全装配式(PC2 暗牛腿插销节点)未进行动载试验,根据准确校验模型利用试算法分别预测得到了 RC、PC1 和 PC2 框架结构的最终破坏荷载,并对三者的破坏模式和损伤情况进行了对比分析.破坏时,RC 梁柱损伤严重,梁端钢筋拉断,装配式梁端连接区混凝土被压溃,插销杆被剪断,且现浇试件的抗倒塌能力明显高于全装配式试件,此外还发现通过对装配式结构的角钢加强能提高其抗倒塌承载能力.

**关键词:**混凝土框架结构;连续性倒塌;有限元分析;破坏模式;动力响应

**中图分类号:**TU375.4 **文献标志码:**A

## Dynamic Collapse Load-carrying Capacity of Concrete Frame Structures Based on Refined Finite Element Model

ZHOU Yun<sup>1,2</sup>, HU Jinnan<sup>1†</sup>, ZHU Zhengrong<sup>1,3</sup>, LUO Xianming<sup>1</sup>

- (1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;  
2. Hunan Provincial Key Laboratory of Damage Diagnosis for Engineering Structures (Hunan University), Changsha 410082, China;  
3. Changsha Construction Project Quality and Safety Supervision Station, Changsha 410016, China)

**Abstract:** To evaluate the load-carrying capacity of concrete frame structures under dynamic loads in case of sudden column failure, this paper is based on the multi-stage repeated collapse dynamic tests of mid-column removal in reinforced concrete (RC) and fully assembled precast concrete (PC1 exposed corbel dowel nodes)

\* 收稿日期:2022-03-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51878264), National Natural Science Foundation of China(51878264);湖南省重点研发计划项目(2022SK2096), Key Research and Development Program of Hunan Province(2022SK2096);湖南省科技厅科技进步与创新项目(201912), Science and Technology Progress and Innovation Project of the Department of Transportation of Hunan Province(201912);河南省交通科技项目(2020G11), Transportation Science and Technology Project of Henan Province(2020G11)

作者简介:周云(1979—),男,湖南长沙人,湖南大学教授,博士

† 通信联系人, E-mail: hu1110@hnu.edu.cn

concrete frame substructures carried out by the research team, the accuracy of the sub-structural detailed finite element model established by the ABAQUS software was verified by fitting the displacement response curves under primary collapse load conditions, and the damage resistance of the frame structure to progressive collapse was quantified and evaluated using the column removal method. Since the research team tests were multiple repetitive collapse tests, it was not possible to obtain the load-carrying capacity in one collapse for the RC and PC1 (exposed corbel dowel rod nodes) specimens, and no dynamic load tests were conducted for the fully assembled precast concrete (PC2 hidden corbel dowel rod nodes). The final damage loads of the RC, PC1 and PC2 frame structures were predicted using the trial algorithm based on the accurate calibration model, and the failure modes and damage conditions of the three structures were compared and analyzed. During the failure, the RC beam-column was severely damaged, the reinforcement at the beam end was pulled off, the concrete at the connection area of the fully assembled precast concrete beam end was crushed, and the dowel rod was sheared off. The collapse resistance of the reinforced concrete specimen was significantly higher than that of the fully assembled precast concrete specimen, and it was also found that the collapse resistance load-carrying capacity of the fully assembled precast concrete structure can be improved by strengthening the steel angle cleat of the assembled structure.

**Key words:** concrete frame structure; progressive collapse; finite element analysis; failure mode; dynamic response

结构连续倒塌是指结构在发生局部破坏后,“由初始的局部破坏,从构件到构件扩展,最终导致一部分结构倒塌或整个结构倒塌”<sup>[1]</sup>.早期英国伦敦的Ronan Point公寓倒塌<sup>[2]</sup>等倒塌事故引起了工程界对结构抗连续性倒塌性能的关注,并将连续倒塌研究推向高潮.

目前,国内外规范<sup>[1,3-5]</sup>对结构连续倒塌的研究主要采用三种方法:拉结强度法、拆除构件法和关键构件法,并关注失效时剩余结构的荷载传递路径转换机制和抗连续倒塌机理.易伟建等<sup>[6]</sup>进行了缩尺比例为1/3的一榀4跨3层钢筋混凝土平面框架结构抗连续倒塌试验,通过模拟底层柱失效后的受力过程,对现浇框架结构在倒塌过程中受力过程和受力转换机制进行了探讨,形成了一种拆除构件法研究结构抗连续倒塌的试验范式.Qian等<sup>[7-8]</sup>研究了不同的板梁连接方式和梁柱节点形式对装配式混凝土结构抗连续倒塌性能的影响,并通过4个1/2比例预制梁-柱高性能连接组合件的Pushdown试验,研究了装配式框架在不同拆柱方案下的抗力机理.Feng等<sup>[9]</sup>研究了静、动力荷载对装配式梁柱子结构抗连续倒塌性能的影响.何庆锋等<sup>[10]</sup>对2榀单层两跨梁柱结构进行了移柱静力加载试验,研究了键槽连接节点梁柱结构的倒塌性能与受力特性.

由于连续倒塌试验模型制作速度慢、耗资大,动力试验研究一般局限于子结构,对于大型、复杂结构

的分析,国内外学者常采用数值分析方法.Magliulo等<sup>[11]</sup>建立了全装配式梁柱栓钉连接有限元模型,研究了不同变量对连接性能的影响.Elsanadedy等<sup>[12]</sup>利用LS-DYNA对工程中常用的预制装配式梁柱干式节点连接方式的框架子结构进行了移除中柱倒塌模拟.黄远等<sup>[13]</sup>采用有限元研究了考虑楼板作用后钢筋混凝土框架结构的压膜机制抗连续倒塌性能.Pham等<sup>[14]</sup>利用LS-DYNA分别通过拟静力和动力加载研究了爆炸作用下结构的抗连续倒塌性能.Pham等<sup>[15]</sup>对梁柱框架进行了一系列动力试验,模拟了突然拆除支撑柱的过程,对动态和静态试验损伤、破坏模式进行了比较.

目前,从动力试验方面对装配式混凝土框架结构抗连续倒塌的研究不够深入,因其预制梁、柱连接区的构造不同,故对于不同连接的承载能力、受力性能和破坏模式需深入研究.团队前期进行了RC(现浇)和全装配式PC1(明牛腿插销节点)框架子结构的动载试验<sup>[16]</sup>以及RC、PC1和全装配式PC2(暗牛腿插销节点)框架子结构的静载试验<sup>[17]</sup>.在静、动载试验中,RC均经历了压拱效应和悬链线效应阶段,破坏模式均为梁端钢筋被拉断;PC1均主要经历了压拱效应一个阶段,破坏模式均为插销杆被剪断.在静载试验中,PC2经历了压拱效应和短暂的悬链线效应发展,破坏模式为梁端连接区混凝土被压溃.本文根据团队完成的RC和PC1快速移除动力试验,利用ABAQUS建立了与试件相同尺寸和边界条件的有限

元模型,模拟现场试验的荷载加载和快速移除全过程.在成功校核的有限元模型基础上,对比分析了RC和PC1结构的受力机制和损伤模式;以PC1为基础建立了同类PC2模型,预估了RC、PC1和PC2结构的破坏荷载,并对三者的破坏模式、损伤情况进行了对比分析;研究了连接节点处关键部件角形钢板对全装配式混凝土试件抗连续倒塌性能的影响.

### 1 试验简介

本文研究的原型结构为1栋纵横向均为4跨的7层全装配式混凝土框架结构.该框架结构横、纵向柱距分别为6.0 m、7.5 m,层高为3.6 m,整体呈24 m×30 m×25.2 m的长方体空间规则形状结构.柱截面尺寸为700 mm×700 mm,梁截面尺寸为400 mm×600 mm<sup>[16]</sup>,所取框架子结构为整体结构底层中间两跨.

采用1/2比例缩尺的PC1、PC2和作为对照组的RC进行有限元分析,其中3个试件均进行过静载试验<sup>[17]</sup>,PC1和RC进行过动载试验<sup>[16]</sup>,PC2用于模型模拟.详细尺寸和配筋如图1所示,图中T20表示直径20 mm的插销杆和高强螺杆.PC1采用明牛腿-插销杆-角形钢板连接方式,在预制梁端上下部位与预制柱牛腿内部设置U形锚固钢筋,绕过孔洞将孔洞与插销部分拉结锚固.PC2采用暗牛腿-插销杆-角形钢板连接方式,预制梁端处为企口形式,梁下部与上部纵向受力钢筋分别在预制梁端与梁端企口处弯起,同样在预制梁端上下部位和牛腿内部设置U形锚固钢筋.试件的混凝土设计强度为C35,纵向钢筋均采用HRB400级钢筋,横向箍筋采用HPB300级钢筋,现场试验实测的钢筋和混凝土力学性能指标见表1.在中柱移除动载试验中,对RC和PC1试件进行不同荷载级别试验,试验荷载加载制度见表2,PC2试件按相同荷载加载制度进行模拟.

每级加载后,利用预留在中柱底下的液压千斤顶将中柱头竖向顶回水平平衡位置,并将脱钩器重新固定,如图2所示,随后将柱下的液压千斤顶移开,开始往重物篮中添加下一级试验荷重,并重新用脱钩器进行动力释放,如此往复直至结构发生预期破坏,两个试件采用相同加载装置和加载方案.

PC1试件完成了4级加载,在第4级中柱轴力释放过程中,南侧梁柱节点中的两根插销被剪坏,随即整体发生倒塌.RC试件完成了6级加载,持荷约20 min后,北侧边节点梁端上部两根纵向受力钢筋断裂.

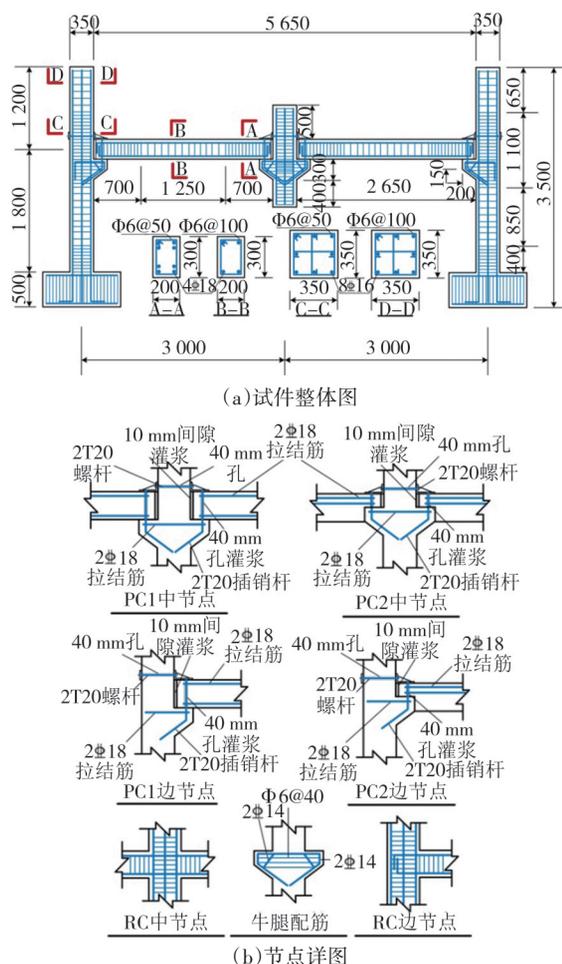


图1 试件尺寸详图和配筋方案(单位:mm)  
Fig.1 Specimen dimensions and reinforcement details(unit: mm)

表1 材料性能参数

Tab.1 Properties of materials

项目	钢筋类型	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	断后伸长率
钢筋	Φ6	385	460	δ <sub>5</sub> =26%, δ <sub>10</sub> =21%
	Φ14	465	616	δ <sub>5</sub> =25%, δ <sub>10</sub> =22%
	Φ16	505	630	δ <sub>5</sub> =28%, δ <sub>10</sub> =23%
	Φ18	485	622	δ <sub>5</sub> =24%, δ <sub>10</sub> =21%
	Φ20	493	629	δ <sub>5</sub> =27%, δ <sub>10</sub> =19%
混凝土立方体强度	PC1	35.3 MPa	灌浆料立方体强度	PC1:43.4 MPa
	RC	27.4 MPa	方体强度	

## 2 基于动载试验的有限元模型校验

### 2.1 混凝土本构

混凝土采用CDP(concrete damaged plasticity)材料模型,该模型可以模拟混凝土结构构件在低静水压力时,受到往复荷载或动载作用下的力学行为<sup>[18]</sup>,通过材料刚度的退化反映混凝土材料的损伤累计,还能考虑材料在不同应变率下的力学行为,但需提

表2 各级加载荷载和中柱轴力值  
Tab.2 Loads at all levels and axial force of mid-column

荷载级数	重物 1/kN	重物 2/kN	重物 3/kN	重物 4/kN	总荷载/kN	RC 中柱轴力/kN	PC1 中柱轴力/kN
自重	—	—	—	—	—	13.5	14.7
第一级	3.35	3.35	3.35	3.35	13.4	21.5	20.6
第二级	13.35	13.35	13.35	13.35	53.4	39.7	43.8
第三级	23.35	23.35	23.35	23.35	93.4	59.8	60.6
第四级	33.35	33.35	33.35	33.35	133.4	76.8	81.1
第五级	33.35	43.35	43.35	33.35	153.4	101.0	—
第六级	33.35	53.35	53.35	33.35	173.4	114.3	—

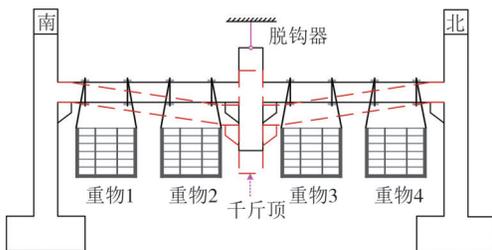


图2 加载前回顶示意图

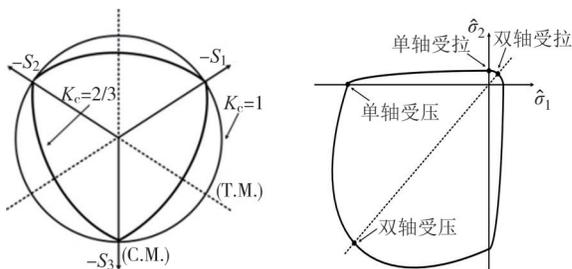
Fig.2 Back to the top before loading

供材料不同应变率下的屈服应力-非弹性应变曲线和损伤因子,然后在曲线中插值取用.

CDP模型使用了Lubliner等人<sup>[19]</sup>提出的屈服函数,它与Lee和Fenves<sup>[20]</sup>提出的修改相结合,以描述在拉伸和压缩下强度的不同演化.典型的偏平面上的屈服面和平面应力条件下的屈服面如图3所示.双轴极限抗压强度与单轴极限抗压强度之比 $\sigma_{b0}/\sigma_{c0}$ 取1.16.该模型利用形状参数( $K_c$ )对偏平面上的屈服面进行修正,以考虑不同的拉伸和压缩屈服应力,见图3(a). $K_c$ 的值取 $2/3$ <sup>[20]</sup>,进而得到 $\gamma$ 的值为3.0. CDP模型采用基于Drucker-Prager流动面的非关联流动法则:

$$G = \sqrt{(\epsilon \sigma_{10} \tan \varphi)^2 + \bar{q}^2} - \bar{p} \tan \varphi. \quad (1)$$

式中: $\varphi$ 为 $p-q$ 面内高围压时的膨胀角(取 $30^\circ$ ); $\sigma_{10}$ 为单轴抗拉强度; $\epsilon$ 为势函数偏心率,描述势函数向



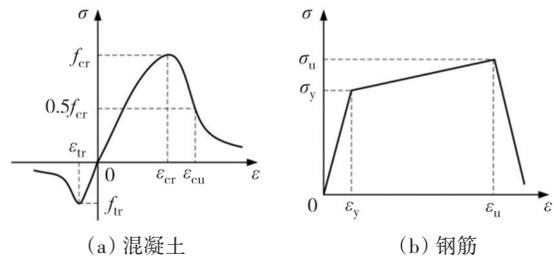
(a)偏平面上屈服面形状与 $K_c$ 的关系 (b)平面应力屈服面

图3 混凝土塑性损伤模型

Fig.3 Concrete damage plasticity model

其渐近线逼近的速度(取0.1).黏性系数 $\mu$ 用于混凝土本构方程的黏塑性正则化(取0.0005).

本文的混凝土应力-应变关系按照《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)<sup>[21]</sup>推荐的单轴拉压本构模型计算,如图4(a)所示,混凝土抗压强度选择试验实测值作为混凝土强度代表值.采用欧洲规范<sup>[22]</sup>中的回归公式计算混凝土材料应变率.由于CDP模型自身的局限性,暂不考虑应变率对损伤因子的影响.



(a) 混凝土 (b) 钢筋

图4 材料应力-应变曲线

Fig.4 Stress-strain curve of materials

## 2.2 钢筋本构

钢筋采用等向弹塑性线性模型,单轴应力-应变曲线选取考虑钢筋屈服之后的强化阶段和钢筋拉断后的下降段的三折线性强化本构模型,如图4(b)所示.用双线性各向同性线性强化模型,模拟螺杆、锚固钢板和角钢的应力-应变关系.钢筋的材料强度参数按照试验的实测值进行取值,见表1.本文采用应用较为广泛的Malvar提出的指数型回归公式<sup>[23]</sup>计算钢筋的应变率效应.

## 2.3 建模过程

本文采用ABAQUS/Explicit建立了3个与试件相同尺寸和边界条件的有限元模型对前期中柱快速移除试验进行全过程模拟,如图5所示(以二级加载RC、一级加载PC1、PC2为例).混凝土采用能较好地模拟混凝土三维受力的三维六面体减缩积分实体单元(C3D8R),钢筋采用桁架单元T3D2,网格尺寸均

为 50 mm,通过 Embedded 命令来模拟钢筋骨架和混凝土之间的锚固关系,不考虑二者之间的滑移.橡胶垫片采用壳单元 S4R,网格尺寸为 20 mm,边柱柱头的约束支座和梁身施加的重物采用 C3D8R 单元. PC1 连接梁柱的插销杆实为钢筋,但是为考察其在受力过程中的应力等变化,将其设置为实体单元.

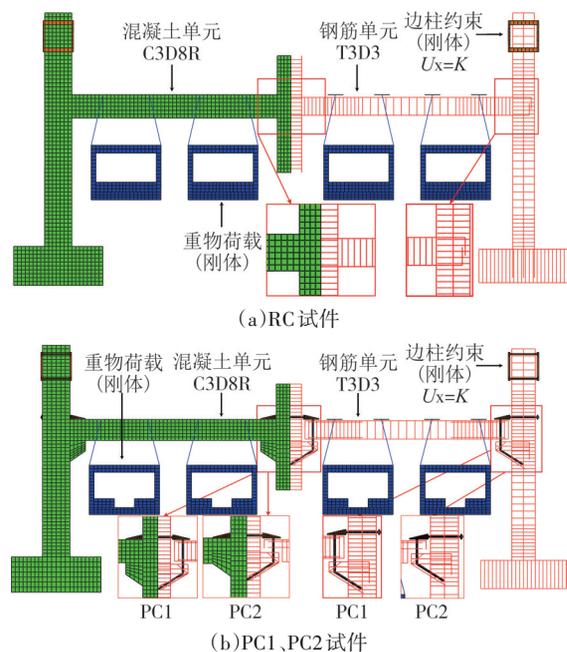


图5 有限元模型

Fig.5 Finite element model

将边柱约束支座和梁身加载重物设置成刚体以节约计算成本,同时将边柱约束支座水平方向设置接地的弹簧.边柱柱底设置了用于固定试件的地梁,地梁通过上面压梁的作用保持其竖向的约束,又通过水平钢梁和填充混凝土的作用保持其水平的约束,在有限元模型中 RC 地梁的水平 and 垂直方向设置接地弹簧,通过弹簧的刚度控制地梁垂直和水平方向约束的强度,其中地梁竖向弹簧刚度为 500 kN/mm,地梁内侧水平方向刚度为 20 kN/mm,地梁外侧水平方向刚度为 15.5 kN/mm. PC1 地梁采用完全固支约束.节点连接形式中,螺杆和角形钢板的连接、插销杆上端与角形钢板的连接均采用高强螺栓连接,不产生滑移和错动,因此在有限元模型中采用 Tie 绑定约束来模拟这种螺栓连接.

支座与梁身加载重物和混凝土的相互作用采用通用接触,法向采用硬接触保证双方不能发生嵌入和穿透现象,切向方向采用罚函数来模拟混凝土与部件之间的摩擦,摩擦因数取 0.4<sup>[24]</sup>.为建立更精细化的模型,梁身重物采用等效质量的钢部件模拟,并

将重物分为钢绞线、重物篮和砝码三部分建模,通过改变砝码的个数和密度控制重物加载,砝码的密度值为梁身重物去除钢绞线和重物篮后除以模型砝码的体积.

## 2.4 加载过程

根据现场试验,脱钩装置不能在某一瞬间将中柱内的轴力完全释放,而是在一个时间范围内,该范围约为 0.02 s.为准确地模拟该加载过程,模型加载过程按如下步骤进行:

1)在中柱下表面添加一个竖向约束,缓慢施加重力场,取光滑的加载幅值曲线,并尽可能地延长加载时间以减小荷载冲击的影响来模拟静力加载,并获取约束的竖向反力.

2)移除中柱底面的竖向约束,将得到的中柱约束反力反向施加到中柱底面,并同时施加第一步中的重力场,进而等效第一步中的静力加载过程.

3)待重力场施加完毕并保持不变,将施加在中柱底面的约束反力在试验记录的释放时长内迅速减小到零,模拟试验过程中的快速释放过程.

采用上述过程的原因在于 ABAQUS 软件中约束只能瞬时移除,无法模拟试验中在有限时长内释放内力的过程,但力荷载可按一定时间-幅值曲线释放,模拟内力释放过程.

## 2.5 模型校验

现场试验中对同一个试件进行了多级加载,每级加载均会对试件产生不可逆转的损伤效果,这种效果难以用有限元进行模拟实现.为得到试件各级一次加载的结构响应和损伤情况,本文采用如下思路:利用未产生损伤前的加载试验数据来校验有限元模型,利用校验好的模型模拟结构后续级一次加载.塑性损伤模型受拉损伤反映的是材料在受拉过程中刚度的衰退,虽无法直接代表结构裂缝的产生和发展,但其损伤云图可一定程度上反映混凝土开裂破坏的位置和程度.

能量平衡是评估数值分析结果是否合理可靠的重要参考<sup>[25]</sup>. ABAQUS/Explicit 有 2 个能量限制准则来保证数值结果的有效性:1)总能量在计算过程中幅值扰动不超过均值的 1%;2)伪应变能占总内能比例不超过 5%. RC、PC1、PC2 试件在整个模拟过程中总能量均维持在零点左右,最大的伪应变能占比为 4.6%,总能量和伪应变能占比均能满足限制准则要求,模型网格划分可以提供合理的数值分析结果.

由于 RC 试件在第一级加载过程中产生的竖向位移较小,采用第二级加载的试验数据对有限元模

型进行校验. RC 试件现场试验和模拟中柱位移响应曲线对比如图 6 所示,可以看出模拟曲线与试验曲线吻合良好,变化趋势相同,其中试验与模拟位移峰值分别为 6.649 mm、6.993 mm,误差为 5.2%,自振周期分别为 0.137 s、0.142 s,误差为 3.4%. RC 试件受拉损伤主要在边节点端梁上部和中节点端梁下部,以及边柱梁柱节点处外部.

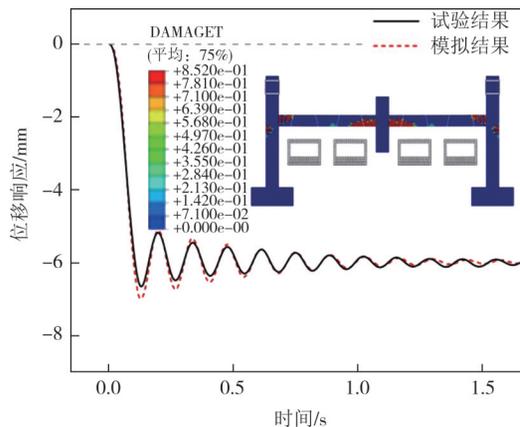


图 6 RC 试验与模拟中柱竖向位移对比

Fig.6 Comparison between test and simulation of vertical displacement of mid-column in RC

PC1 试件第一级损伤比 RC 试件大,采用第一级加载的试验数据对有限元模型进行校验,现场试验中柱位移响应曲线与模拟曲线对比图如图 7 所示.从图 7 中可知,模拟曲线与试验结果吻合较好,变化趋势相同,其中试验与模拟位移峰值分别为 11.076 mm、11.192 mm,误差为 1.0%,自振周期分别为 0.100 s、0.110 s,误差为 9.0%.从图 7 中可以看出,PC1 试件的受拉损伤主要在梁柱节点处梁端和牛腿的插销附近,以及边柱柱脚内侧.

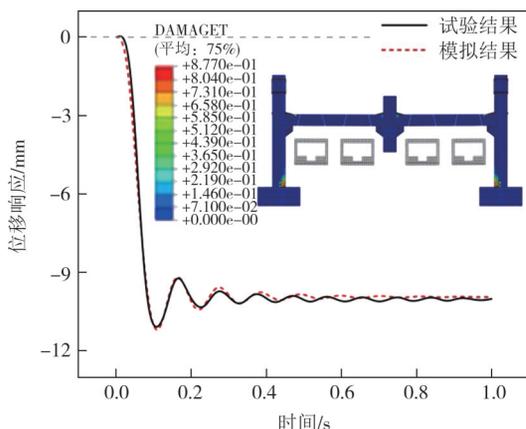


图 7 PC1 试验与模拟中柱竖向位移对比

Fig.7 Comparison between test and simulation of vertical displacement of mid-column in PC1

### 3 结构抗连续倒塌损伤分析

以二级加载时试验框架子结构(RC 试件和 PC1 试件)为例,通过校验好的模型,对比分析在相同加载工况下 RC 和 PC1 试件移除中柱后结构的受力情况和损伤分布.二级加载下 RC 和 PC1 的梁身裂缝和有限元模型受拉损伤,如图 8、图 9 所示.可以看出,RC 试件现场试验和模拟结果显示边节点端梁上部和中节点端梁下部均受到不同程度的受拉破坏,试验与模型吻合良好. PC1 试件现场试验和模拟结果显示节点处插销附近混凝土受到较大的受拉损伤,与试验结果吻合良好.

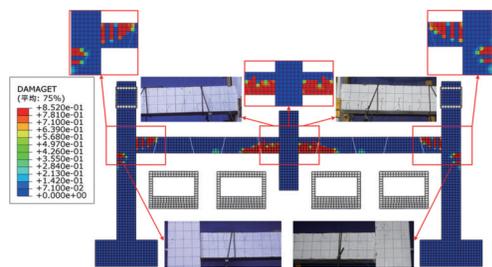


图 8 RC 试件梁身裂缝和有限元模型受拉损伤

Fig.8 Beam cracks in RC specimen and tensile damage in finite element model

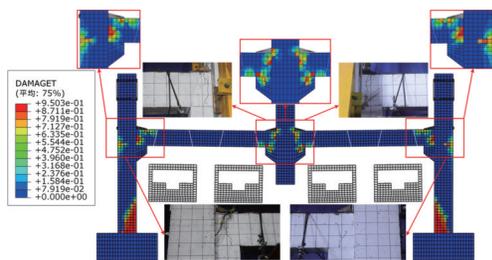


图 9 PC1 试件梁身裂缝和有限元模型受拉损伤

Fig.9 Beam cracks in PC1 specimen and tensile damage in finite element model

由图 8、图 9 可知,RC 试件混凝土部分的受拉损伤主要在边节点端梁上部和中节点端梁下部,以及边柱梁柱节点处外部,PC1 试件混凝土部分的受拉损伤主要在中柱梁柱节点区域插销杆和螺杆附近的梁端、牛腿外侧以及与角钢短肢面接触处中柱外侧,以及边柱梁柱节点区域插销杆和角钢附近的梁端、牛腿外侧以及边柱外侧.混凝土部分梁的损伤 RC 试件大于 PC1 试件,柱的损伤 RC 试件小于 PC1 试件,RC 试件的损伤主要在梁上,PC1 试件的损伤,主要在边柱上,且试件混凝土部分的整体损伤 RC 试件高于 PC1 试件.

图 10 为 PC1 在二级加载下中柱突然失效后节点

区域关键部件的应力变化云图.对于插销杆,受力集中在与梁柱接触处和与角钢长肢面连接处,主要为剪切受力且梁柱接触处中柱节点插销杆受力大于边柱节点,中柱节点角钢长肢面与插销杆连接处受力小于边柱节点,预埋在框架柱中部分受力较小.对于高强螺杆,中柱节点高强螺杆的受力主要集中在与角钢短肢面连接处,框架柱中部分受力较小;边柱节点高强螺杆的受力主要集中在边柱外侧与锚固钢板连接处以及框架柱中部分,边柱内侧与角钢短肢面连接处受力较小,且边柱节点螺杆的受力整体大于中柱节点区域.对于角形钢板,中柱节点角形钢板的受力集中在与插销杆连接处以及长肢面钢筋尖端;边柱节点区域角形钢板的受力集中在与高强螺杆和插销杆连接处,且边柱节点角形钢板的受力整体大于中柱节点.

综合图8~图10可以看出,在中柱突然失效后,RC结构的损伤主要集中在梁柱节点区域的混凝土部分,PC1结构的损伤除了混凝土梁柱部分,还主要体现在节点区域关键部件上,在中柱节点区域插销杆受力最大,而在边柱节点区域高强螺杆和角形钢板受力最大.整体上来看,装配式试件的破坏主要发生在连接区域的梁端,为了增强连接的可靠性,尤其是移除中柱后连接的延性,可以通过利用高强螺杆和增大钢筋直径提供更高强度的剪力保证插销杆在受力过程中发挥其高强度的受力性能.

### 4 框架承受破坏荷载预测

由于现场动力试验的高要求和局限性,且试验采用的荷载增量为10 kN,试验过程未考虑每级加载后试件的损伤累积,试件破坏较为突然,无法采集和估计到试件一次垮塌的精确最终破坏荷载.因此,预测工程中常用的梁柱牛腿-插销杆连接节点的全装配式混凝土框架子结构在中柱移除过程中的最终破坏荷载和破坏模式,参照明牛腿(PC1)和暗牛腿(PC2)两种连接以及装配式试件和现浇试件的最终破坏荷载、破坏模式.进而,揭示装配式结构抗连续倒塌的传力机制,评价装配式混凝土框架结构梁柱连接节点的可靠性与安全性.其中PC2模型如图1所示,除牛腿形式外其配筋、混凝土与边界条件等与PC1完全相同.在校核成功的RC和PC1模型基础上,预测得到RC、PC1和PC2模型的最终破坏荷载和中柱极限位移,见表3.

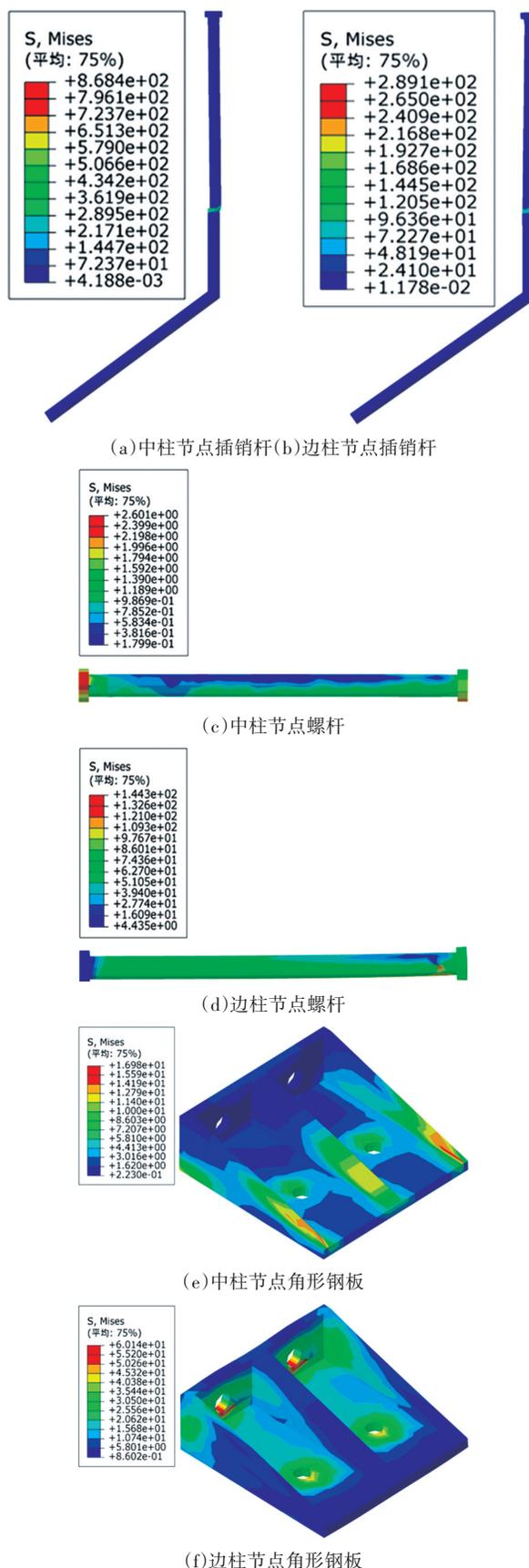


图10 PC1试件节点区域关键部件应力分布

Fig.10 Stress distribution of key components in node area of PC1 specimen

表3 RC、PC1和PC2试件破坏荷载及极限位移  
Tab.3 Failure loads and ultimate displacements of RC, PC1 and PC2 specimens

工况	最终破坏荷载/kN (单个重物重量)	极限位移/mm
RC框架	80.35	649.95
PC1框架	35.35	151.64
PC2框架	37.35	446.46

RC、PC1、PC2结构模型倒塌时位移响应曲线如图11所示,现浇试件最终破坏荷载和中柱极限位移高于装配式试件,现浇试件的抗倒塌能力明显高于装配式试件. PC1和PC2的最终破坏荷载分别为RC的44.00%和46.48%. 相比极限位移,PC1和PC2的极限位移仅为RC极限位移的23.33%和68.69%,装配式试件延性不足,且PC2延性高于PC1.

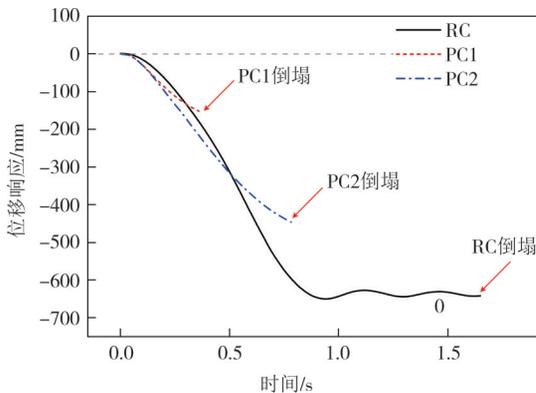


图11 RC、PC1、PC2结构倒塌时中柱位移响应曲线  
Fig.11 Displacement response curve of mid-column to collapse of RC, PC1 and PC2 structures

图12为在中柱移除情况下最终破坏时RC、PC1和PC2的损伤图以及试验节点破坏图.可以发现,RC最终破坏时混凝土梁柱损伤严重,边节点处梁柱均严重损伤,中节点处梁损伤严重,柱因梁底部纵筋在整跨内通长布置且严重受拉使得中柱与梁底纵筋相交处产生损伤,梁端呈现弯曲破坏,边节点处顶部纵向受力钢筋被拉断,由于变形和裂缝的进一步发展,压拱效应机制失效,进入悬链线效应阶段,当形成了有效的悬链线机制抵抗荷载后,结构竖向位移趋于稳定,混凝土和钢筋性能得到充分的发挥;PC1最终破坏是由于梁端节点连接区插销杆被剪断,中节点和边节点的梁端与牛腿上部混凝土损伤严重被压溃,节点处形成变形铰,结构变成了可变体系,无法形成有效的抗力机制,最终导致结构整体破坏;PC2则是由于中节点和边节点连接区的梁端和牛腿部分混凝土损伤严重被压溃,且梁端节点连接区插销杆

被剪断.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相对RC较少.分析结果与试验得到的倒塌破坏模式相似,两者的不同在于,上述分析为试件一次垮塌结果,而试验得到的是多次加载后的垮塌.

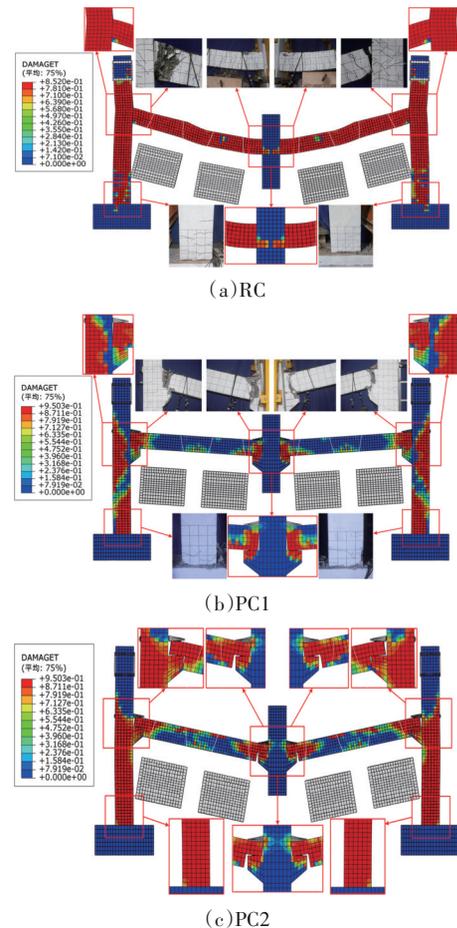


图12 RC、PC1和PC2试件破坏损伤及节点破坏图  
Fig.12 RC, PC1 and PC2 specimens failure damage and node failure diagram

RC、PC1、PC2倒塌时支座反力和中柱位移响应曲线如图13、图14所示.图13展示了RC中柱移除后到进入悬链线阶段前的支座反力-中柱位移关系(图13中左侧曲线)以及RC进入悬链线阶段后的支座反力响应(图13中右侧曲线). RC在中柱移除后,支座反力由正值(受拉)迅速转变为负值(受压)并达到受压最大值,随后支座反力受压值逐渐减小,传力路径不断改变,直至进入悬链线阶段,随时间增加支座反力的波动趋势越更平缓,动力效应随之减弱,间接说明RC形成了有效悬链线机制,阻碍了结构完全倒塌.

如图14所示,PC1、PC2在中柱移除后,随着中柱位移增大,支座反力均由正值(受拉)逐渐转变为负值(受压)并达到受压最大值,压拱效应峰值点之后

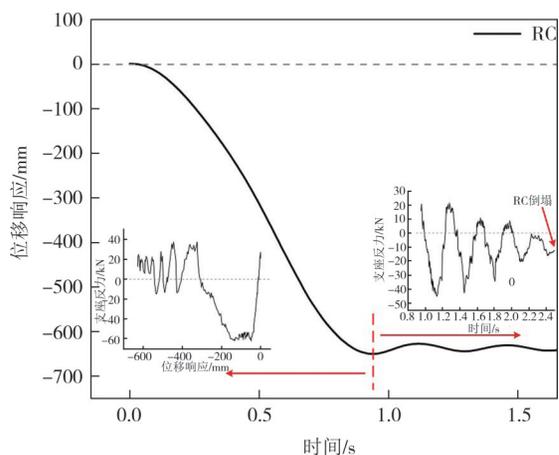


图 13 RC 结构倒塌时中柱位移响应

Fig.13 Displacement response curve of mid-column to collapse of RC structures

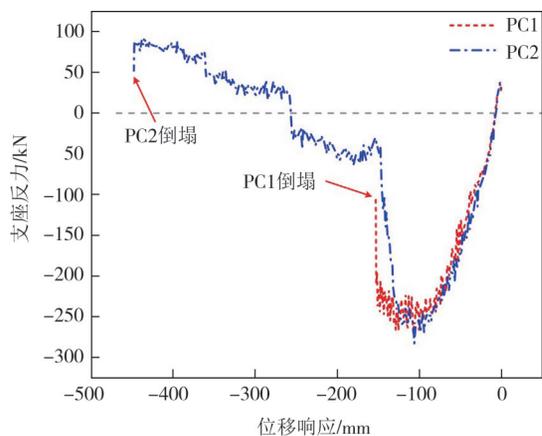


图 14 PC1、PC2 支座反力-位移响应

Fig.14 Bearing reaction-displacement responses of PC1 and PC2

荷载下降明显,不同之处在于,PC1 随后受压值迅速减小,未能形成有效的悬链线机制抵抗梁身荷载,最终导致结构完全倒塌;PC2 随后受压值先迅速减小后缓慢减小,倒塌后期支座反力由受压转变为受拉并逐渐增大,伴随着受拉值突然减小,结构发生破坏,相较于 PC1 结构延性有较大发挥。

### 5 角形钢板对抗连续倒塌性能的影响

为研究角形钢板对全装配式混凝土试件抗倒塌性能的影响,在 PC1 二级加载的基础上设置了如表 4 所示工况,分析不同角形钢板类型对试件抗连续倒塌性能的作用,钢板厚度均为 10 mm。

图 15 所示为不同类型角形钢板应力分布(边节点)。可以看出,没有焊接钢肋的角形钢板应力最大部位在短肢螺栓孔周围,焊接钢肋后短肢螺栓孔周

表 4 角形钢板分析工况表

Tab.4 Steel angle cleat analysis condition table

模型编号	分析工况	备注
PC-3	无钢肋的角形钢板	
PC-4	带有一根钢肋的角形钢板	不等肢角形钢板
PC-5	带有两根钢肋的角形钢板	
PC-6	无钢肋的角形钢板	等肢角形钢板
PC-7	带有一根钢肋的角形钢板	

围应力有所降低;对没有焊接钢肋的角形钢板应力最大部位应力降低的贡献,焊有带 1 根和 2 根钢肋的角形钢板相差不大,均降低了约 7.11%,焊有 2 根钢肋和 3 根钢肋的角形钢板应力分布较为相似,但 3 根钢肋使应力最大部位应力降低了 22.73%;与不等肢角形钢板应力云图不同,等肢角形钢板螺栓孔处应力较小,焊接 1 根钢肋后角形钢板的整体受力更大,有 1 根钢肋角形钢板的钢肋中部产生较大的应力。

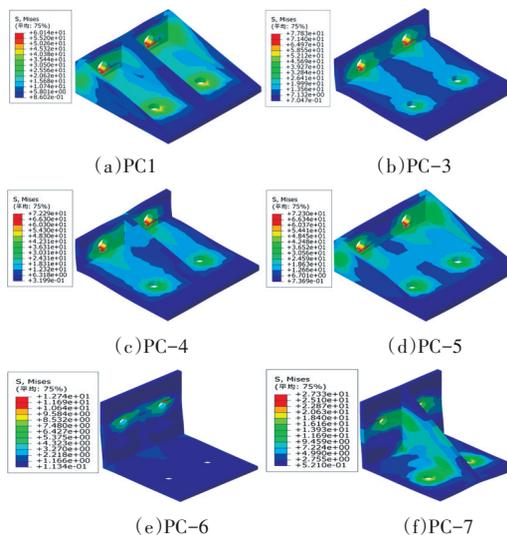


图 15 不同类型角形钢板应力分布

Fig.15 Stress distribution of different types of steel angle cleat

图 16 为不同类型角形钢板的 PC1 结构中柱突然失效过程中的位移时程曲线。从周期来看,使用等肢角形钢板模型的周期略大于使用不等肢角形钢板的结构模型,而不同钢肋数的等肢或不等肢角形钢板模型基本相同。等肢角形钢板的峰值位移大于不等肢角形钢板。对于不等肢角形钢板的峰值位移,PC-3 最大,相较于 PC1 增大了 12.59%,说明角形钢板的钢肋可以提高试件的抗倒塌能力;PC-4 和 PC-5 低于 PC-3 高于 PC1,但 PC-4 和 PC-5 相差不大,说明焊接有多个钢肋的角形钢板均相当于刚体,受力性能相当。PC-6 峰值位移相较于 PC-3 增大了 35.85%,PC-7 相较于 PC-4 增大了 30.81%,说明不等肢角形

钢板的模型抗倒塌性能更好。

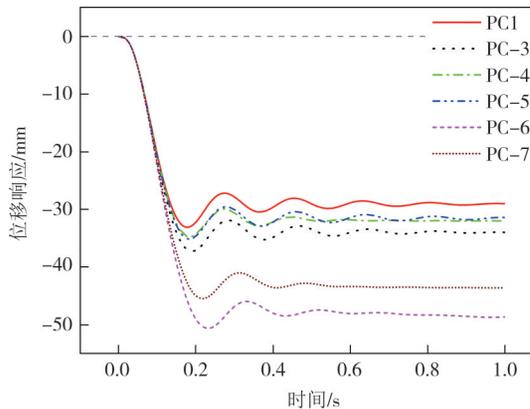


图 16 不同类型角形钢板 PC1 中柱移除位移响应

Fig.16 Displacement response curve of mid-column removal in PC1 structures with different types of steel angle cleat

## 6 结论

本文利用 ABAQUS 建立了与 RC、PC1 试件相同尺寸和边界条件的精细有限元模型,并根据试验数据对有限元模型进行了校验.在此基础上,对比分析了 RC 和 PC1 试件在相同加载作用下损伤与受力的不同;对比分析了破坏时 RC、PC1 和 PC2 的最终荷载和延性,以及损伤与破坏模式的不同;建立了不同角钢类型下的 PC1 框架子结构模型,分析了全装配结构连接节点角钢对结构抗倒塌性能的影响.本文主要结论如下:

1) 详细介绍了有限元模型的建立过程,以及采用的单元与网格划分方法、边界约束条件和加载方式等.位移时程曲线和损伤模式等与试验结果吻合良好,成功校验了能够正确模拟试验整个过程并反映试件在各个加载阶段受力性能的模式。

2) 对比分析了在相同加载情况下 RC 和 PC1 框架子结构在中柱突然失效时的损伤情况,以及 PC1 节点受力. RC 损伤主要集中在梁柱节点区域的混凝土部分,PC1 试件的损伤除了混凝土梁柱部分,主要体现在节点区域关键部件(插销杆、角钢和高强螺杆)上。

3) 预测了 RC、PC1 和 PC2 结构在底层中柱突然失效时的破坏荷载和极限位移,对比分析了三者的破坏模式和损伤情况.现浇试件破坏荷载和混凝土损伤高于装配式试件,装配式试件延性低于现浇试件,且 PC2 延性高于 PC1.破坏时,现浇试件梁柱混凝土严重损伤、梁端钢筋被拉断,装配式试件的受力和

变形主要集中在连接节点,梁跨中裂缝和变形相对 RC 较少。

4) 以 PC1 为例分析了角形钢板在预制梁、柱连接中的重要作用,角形钢板焊接钢肋数目对模型抗倒塌性能的影响.焊接有钢肋的角形钢板可以提高试件的抗倒塌能力,焊接两个和三个钢肋的角形钢板对试件抗倒塌能力的提升相近,安装有不等肢角形钢板模型的抗倒塌能力优于等肢角形钢板。

## 参考文献

- [1] 建筑结构抗倒塌设计规范:CECS 392—2014[S]. 北京:中国计划出版社,2015.  
Code for anti-collapse design of building structures:CECS 392—2014[S]. Beijing:China Planning Press,2015. (in Chinese)
- [2] 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 [R]. London: HMSO, 1968.
- [3] Eurocode 1: Action on structures. Part 1-7: General action accidental actions: EN 1991-1-7 [S]. Brussels: European Committee for Standardization. 1991: 1 - 28.
- [4] Progressive collapse analysis and design guidelines for new federal office buildings and major modernization projects: GSA2010[S]. Washington, DC: United States General Services Administration, 2010: 7 - 31.
- [5] Design of structures to resist progressive collapse: DoD2010[S]. Washington, DC: Department of Defense, 2010: 12-64.
- [6] 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 W J, HE Q F, XIAO Y. Collapse performance of RC frame structure[J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(5): 104-109. (in Chinese)
- [7] QIAN K, LI B, LIU Y. Integrity of precast concrete structures to resist progressive collapse [C]//Geotechnical and Structural Engineering Congress 2016. February 14-17, 2016, Phoenix, Arizona. Reston, VA, USA: American Society of Civil Engineers, 2016:1976-1986.
- [8] QIAN K, LIANG S L, FENG D C, et al. Experimental and numerical investigation on progressive collapse resistance of post-tensioned precast concrete beam-column subassemblages [J]. Journal of Structural Engineering, 2020, 146(9):04020170.
- [9] FENG F F, HWANG H J, YI W J. Static and dynamic loading tests for precast concrete moment frames under progressive collapse[J]. Engineering Structures, 2020, 213: 110612.
- [10] 何庆锋,张麟斌,易伟建. ECC/RC 键槽节点装配整体式梁柱结构倒塌性能试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2020, 47(1):10-18.  
HE Q F, ZHANG L B, YI W J. Experiment study on collapse performance of precast ECC/RC composite beam-column structure

- with key-way joints [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2020, 47(1): 10–18. (in Chinese)
- [11] MAGLIULO G, ERCOLINO M, CIMMINO M, et al. FEM analysis of the strength of RC beam-to-column dowel connections under monotonic actions [J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 69: 271–284.
- [12] ELSANADEY 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.
- [13] 黄远, 洪露露, 易伟建. 考虑楼板作用的RC框架压膜机制抗倒塌承载力分析[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2021, 48(5): 10–18.
- HUANG Y, HONG L L, YI W J. Analysis on compressive membrane mechanism based progressive collapse bearing capacity of RC frame considering floor slab action [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2021, 48(5): 10–18. (in Chinese)
- [14] PHAM A T, TAN K H, YU J. Numerical investigations on static and dynamic responses of reinforced concrete sub-assemblages under progressive collapse [J]. *Engineering Structures*, 2017, 149: 2–20.
- [15] PHAM A T, TAN K H. Experimental study on dynamic responses of reinforced concrete frames under sudden column removal applying concentrated loading [J]. *Engineering Structures*, 2017, 139: 31–45.
- [16] ZHOU Y, HU X, PEI Y L, et al. Dynamic load test on progressive collapse resistance of fully assembled precast concrete frame structures [J]. *Engineering Structures*, 2020, 214: 110675.
- [17] ZHOU Y, CHEN T P, PEI Y L, et al. Static load test on progressive collapse resistance of fully assembled precast concrete frame structure [J]. *Engineering Structures*, 2019, 200: 109719.
- [18] 聂建国, 王宇航. ABAQUS中混凝土本构模型用于模拟结构静力行为的比较研究[J]. *工程力学*, 2013, 30(4): 59–67.
- NIE J G, WANG Y H. Comparison study of constitutive model of concrete in Abaqus for static analysis of structures [J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(4): 59–67. (in Chinese)
- [19] LUBLINER J, OLIVER J, OLLER S, et al. A plastic-damage model for concrete [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 1989, 25(3): 299–326.
- [20] LEE J, FENVES G L. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1998, 124(8): 892–900.
- [21] 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- Code for design of concrete structures: GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (In Chinese)
- [22] CEB-Fip model code 2010—First complete draft: volume 1 [S]. Lausanne, Switzerland; FIB Bulletin, 2010: 763–777.
- [23] MALVAR L J. Review of static and dynamic properties of steel reinforcing bars [J]. *Materials Journal*, 1998, 95(5): 609–616.
- [24] OTHMAN H, MARZOUK H. Finite-element analysis of reinforced concrete plates subjected to repeated impact loads [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2017, 143(9): 04017120.
- [25] 庄茁, 由小川, 廖剑晖, 等. 基于ABAQUS的有限元分析和应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2009: 256–257.
- ZHUANG Z, YOU X C, LIAO J H, et al. Finite element analysis and application based on ABAQUS [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009: 256–257. (in Chinese)