

文章编号: 1000-4750(2017)12-0162-09

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

潘 毅¹, 陈侠辉¹, 姚蕴艺^{1,2}, 邓开来^{1,3}

(1. 西南交通大学土木工程学院, 成都 610031; 2. 成都惟尚建筑设计有限公司, 成都 610094; 3. 清华大学土木工程系, 北京 100084)

摘 要: 为研究无粘结预应力装配式框架结构的防连续倒塌性能, 首先采用有限元软件 OpenSees 中的梁柱节点单元模拟无粘结预应力梁柱节点, 并与试验结果进行对比, 然后采用抽柱法对一栋 6 层无粘结预应力装配式框架结构和现浇框架结构进行连续倒塌分析, 得到了抽柱后关键构件的内力时程曲线和失效点的竖向位移时程曲线, 最后模拟了无粘结预应力装配式框架结构和现浇框架结构的连续倒塌过程。研究结果表明: 在抽除中柱后, 无粘结预应力装配式框架结构的倒塌荷载极限值比现浇框架结构高 24.2%; 在抽除边柱后, 无粘结预应力装配式框架结构的倒塌荷载极限值比现浇框架结构则高 35.7%。在柱截面尺寸和配筋相同、梁截面尺寸和受弯承载力相同的情况下, 无粘结预应力装配式框架结构防连续倒塌性能优于现浇框架结构。

关键词: 连续倒塌; 抽柱法; 无粘结预应力装配式框架; 现浇框架; 时程曲线

中图分类号: TU378.4 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2016.08.0645

PROGRESSIVE COLLAPSE ANALYSIS OF UNBONDED POST-TENSIONED PRECAST RC FRAME STRUCTURES USING COLUMN REMOVAL METHOD

PAN Yi¹, CHEN Xia-hui¹, YAO Yun-yi^{1,2}, DENG Kai-lai^{1,3}

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. Chendu Sunway International Architectural Design Co. Ltd, Chengdu 610094, China;

3. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: To study the behavior of beam-column joints and the progressive collapse performance of unbonded post-tensioned precast concrete frame structures, finite element models were established in OpenSEES and compared with experimental results. With the established beam-column joint models, a six-story unbonded post-tensioned precast concrete frame and a cast-in-place concrete frame with similar structural configurations were simulated. Progressive collapse analysis was performed for these two kinds of frames using column removal method. Results of the numerical analysis show that, with the interior column removed, the ultimate load at failure of the post-tensioned precast frame is 24.2% higher than that of the cast-in-place frame; the percentage increased to 35.7% if an exterior column is removed. Removal of an exterior column is more likely to cause a progressive collapse than removal of an interior column. The results also show that with the same reinforcement layout of the column and the same flexural capacity of the beam, the post-tensioned precast RC frame exhibit better collapse-resisting performance than the cast-in-place RC frame.

收稿日期: 2016-08-25; 修改日期: 2017-02-21

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0802205); 国家自然科学基金项目(51608073); 四川省科技支撑计划项目(2014SZ0110)

通讯作者: 邓开来(1989—), 男, 四川绵竹人, 讲师, 博士, 主要从事工程结构抗震的研究(E-mail: kailai_deng@163.com).

作者简介: 潘 毅(1977—), 男, 重庆万州人, 副教授, 博士, 博导, 主要从事工程结构抗震鉴定与加固研究(E-mail: panyi@swjtu.edu.cn);

陈侠辉(1992—), 男, 四川资阳人, 硕士生, 主要从事装配式结构抗震研究(E-mail: 137122868@qq.com);

姚蕴艺(1991—), 男, 陕西镇安人, 工程师, 硕士, 主要从事装配式结构抗震研究(E-mail: 564008420@qq.com).

Key words: progressive collapse; removing column method; unbonded prestressed precast RC frame; cast-in-place RC frame; time-history curve

装配式混凝土结构具有产品质量好、生产效率高、可工厂化生产、对环境影响小等优点,被广泛用于建筑工程、桥梁工程和地下工程,特别是住宅建筑。然而,英国伦敦东部的 Ronan Point 公寓由于其 18 层角部发生煤气爆炸引发了装配式结构的连续倒塌,让人们认识到防止结构连续倒塌的重要性^[1]。近十年来,国内外学者对结构防连续倒塌性能进行了大量研究,取得了一些成果^[2-8],但现有研究主要集中在现浇混凝土框架结构,而对装配式混凝土结构的研究则较少。同时,我国各地现已出台了一系列措施推行建筑工业化,特别是装配式混凝土结构^[9],故应对其防连续倒塌性能进行研究。国内外学者对装配式结构也开展了相关的试验研究。其中, Abrams 等^[10]对一栋六层 1/10 缩尺无粘结预应力装配式框架进行了振动台试验,初步分析了不同振动情况下无粘结预应力装配式框架的工作状态。李振宝等^[11]对混合连接装配式节点进行了低周反复加载试验,结果表明混合连接装配式节点的延性和耗能能力与现浇节点相当。柳炳康等^[12]对两榀预应力装配式框架进行了低周反复加载试验,研究表明预应力装配式框架结构具有良好的耗能能力。王冬雁^[13]对无粘结预应力装配式节点进行了低周反复加载试验,对比了现浇节点、只配置预应力筋和同时配置预应力与耗能钢筋三种类型节点的滞回性能。吕西林等^[14]对装配式预制混凝土框架结构 1/2 缩尺模型进行拟动力试验,模拟了该结构在地震作用下的破坏模式、变形、耗能、强度等性能。蔡小宁等^[15-16]设计了一种基于顶底角钢耗能的自复位预应力预制装配(Post-Tensioned Energy Dissipating, 简称 PTED)混凝土框架节点形式,对 PTED 节点的受力性能进行了低周反复加载试验,并对 PTED 框架结构进行抗倒塌分析。Kang 等^[17]对装配式框架结构进行了抽柱试验,分析了框架结构在抽柱后的压拱效应和悬链线效应。

需要注意的是,上述研究多是对预应力装配式结构节点和框架整体受力性能的研究,较少对无粘结预应力装配式框架结构的防连续倒塌性能进行研究。同时,我国《预制预应力混凝土装配整体式框架结构技术规程》(JGJ 224-2010)对预应力装配式结构的防连续倒塌设计也未做出明确规定。

因此,针对预应力装配式框架结构防连续倒塌性能研究的不足,本文从无粘结预应力装配式节点入手,基于抽柱法对一栋六层无粘结预应力装配式框架结构(下文简称:装配式结构)进行连续倒塌分析,就轴力时程、弯矩时程、失效点竖向位移和结构变形等进行分析,并与现浇框架结构(下文简称:现浇结构)进行对比,以期预应力装配式框架结构防连续倒塌设计提供参考。

1 基于抽柱法的结构连续倒塌分析

对框架结构进行连续倒塌分析时,通常采用“抽柱法”,亦称替换荷载路径法、拆除构件法。抽柱法是在规定时间内使结构的某一根或几根框架柱失效来计算剩余结构的反应,从而对结构防连续倒塌性能进行评估的一种分析方法^[18]。在连续倒塌分析方法中,抽柱法是较为准确可靠且普遍适用的方法,因为该方法不依赖于具体的荷载形式,适合于任何偶然荷载作用下结构的倒塌分析。本文将抽柱处的梁柱结合点定义为“失效点”。

抽柱法实现步骤如下:首先,对抽柱前的结构进行静力分析,求得柱的内力,如图 1(a)所示。然

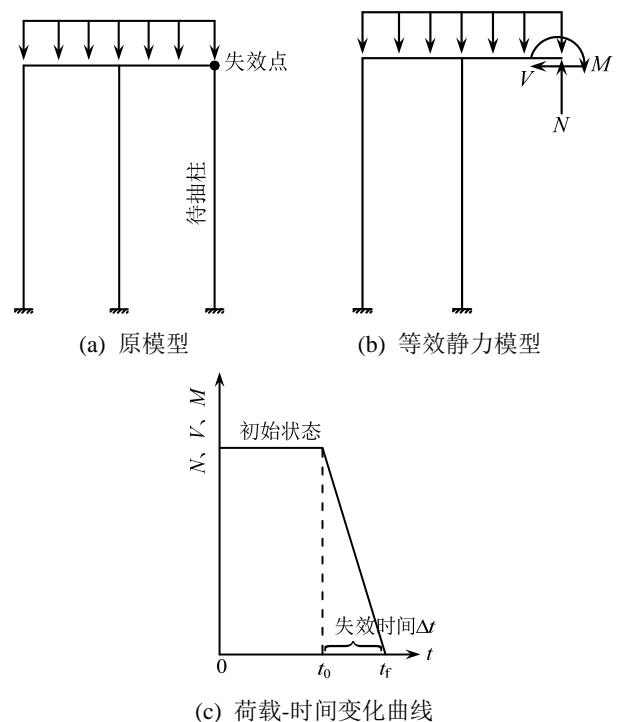


图 1 抽柱法示意

Fig.1 Schematic diagram of removing column method

后, 进行抽柱, 并将柱内力反向作用于失效点, 时间持续至 t_0 , 使剩余结构与原结构静力等效, 如图 1(b)所示。最后, 将反向作用的内力值在较短时间内(失效时间)减小到 0, 对应图 1(c)中 $t_0 \sim t_f$ 时间段, 求抽柱后剩余结构的动力响应。本文取柱的失效时间为剩余结构竖向振动周期的 $1/10^{[19-20]}$ 。

2 梁柱节点与框架模型

2.1 梁柱节点模型的建立

在 OpenSees(Open System for Earthquake Engineering Simulation)中建立装配式梁柱节点模型如图 2 所示。其中, 结点 1、3 之间为柱单元, 结点 4、6 之间为梁单元, 结点 2、4 之间为零长度单元。

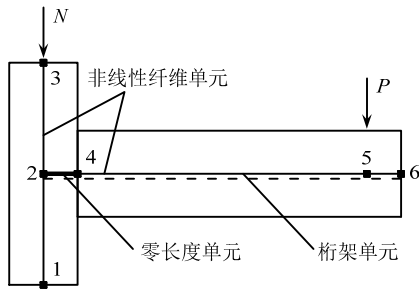
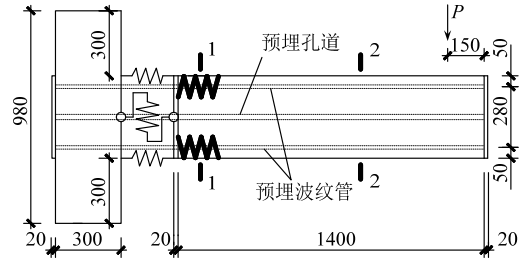


图 2 装配式梁、柱节点模型

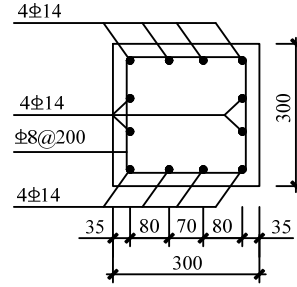
Fig.2 Finite element analysis model of the precast beam-column joint

零长度单元使用 equalDOF 连接, 对于节点周边交界面处抗剪承载力的退化采用零长度交界面剪切弹簧元件来模拟, 模型约束结点 2 和结点 4 的平动自由度, 释放转动自由度^[21]。对于保护层混凝土和受约束核心区混凝土采用修正后的 Kent-Park 本构模型, 普通钢筋和预应力筋采用 Pinto 本构模型^[22]。

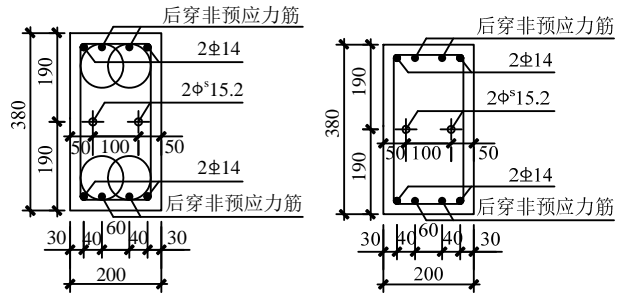
文献[13]对 3 个无粘结预应力装配式的节点试件(HCB1、HCB2 和 HCB3。其中, H 代表混合装配, C 代表混凝土, B 代表梁, 数字代表试件编号)进行了试验研究, HCB1 构造如图 3 所示, HCB2、HCB3 构造与 HCB1 相同, 只是在 HCB1 的基础上改变了预应力筋的面积。本文采用 OpenSees 建立了 3 个节点试件进行了数值模拟, 滞回曲线的模拟结果和试验结果比较如图 4 所示。可见该数值模型可较好地模拟装配式梁柱节点的性能, 说明本文采用的建模方法有效, 可用于装配式结构的连续倒塌分析。



(a) 节点示意图



(b) 柱配筋

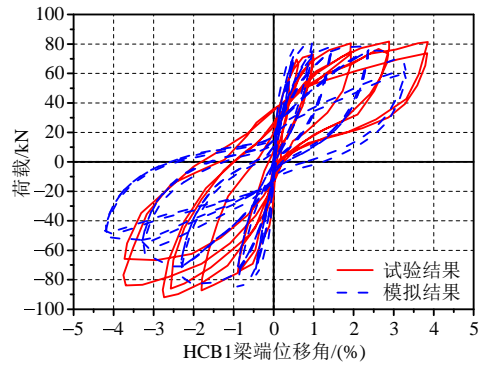


(c) 1-1 剖面

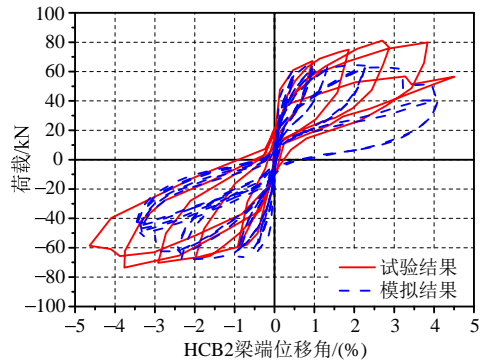
(d) 2-2 剖面

图 3 HCB1 节点详图

Fig.3 Joint details of HCB1



(a) HCB1



(b) HCB2

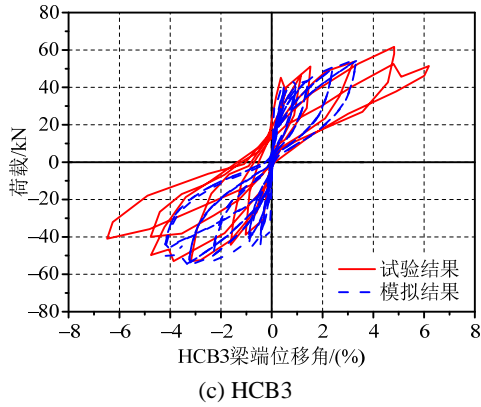


图4 节点滞回曲线对比

Fig.4 Comparison of hysteresis curves of joints

2.2 框架模型的建立

本文按照《混凝土结构设计规范》(GB 50010-2010)和《预制预应力混凝土装配整体式框架结构技术规程》(JGJ 224-2010)设计了一栋六层装配式结构,其平面图、1-1剖面图分别如图5、图6所示。地震分组为第三组,二类场地,设防烈度7度,设计基本地震加速度0.1g,结构重要性系数1.0。屋面恒载为5.0 kN/m²,活载为0.5 kN/m²;楼面恒载为4.0 kN/m²,活载为2.0 kN/m²;梁间线荷载为9.6 kN/m,基本风压为0.35 kN/m²,基本雪压为0.15 kN/m²。

现浇结构按照《混凝土结构设计规范》(GB 50010-2010)进行设计,结构平面尺寸与装配式结构相同。为便于对比,现浇结构的梁柱截面尺寸、混凝土强度等级以及柱截面配筋与装配式结构相同,梁截面配筋考虑等效弯矩承载力与装配式结构梁截面相同,梁、柱配筋如图7所示。装配式结构和现浇结构均选取1-1剖面作为分析对象。装配式结构和现浇结构的梁、柱均采用非线性梁柱单元,梁、柱节点均采用零长度单元,预应力筋采用桁架单元。

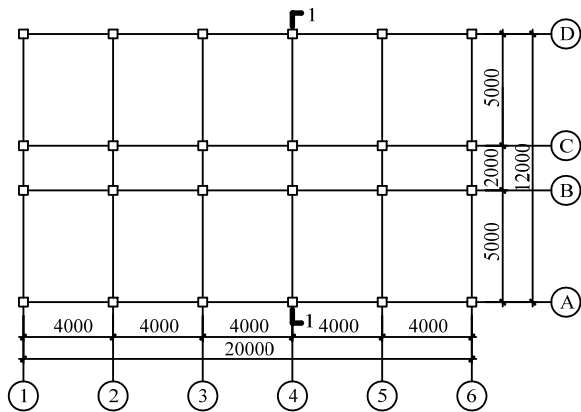


图5 装配式结构平面图

Fig.5 Planer view of precast frame structure

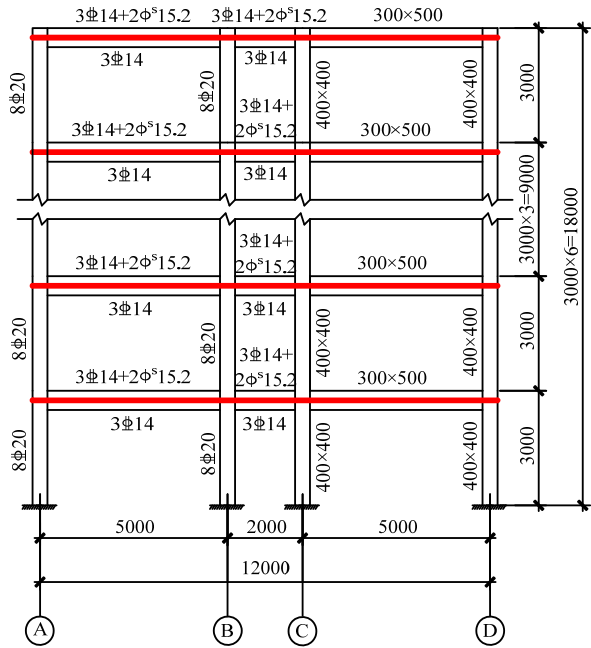
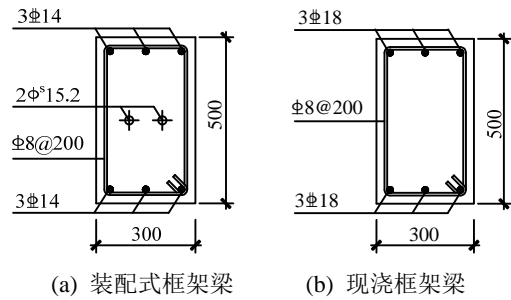


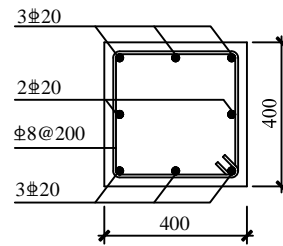
图6 装配式结构1-1剖面图

Fig.6 1-1 profile view of precast frame structure



(a) 装配式框架梁

(b) 现浇框架梁



(c) 柱截面

图7 梁、柱配筋

Fig.7 Reinforcements of beams and columns

梁、柱混凝土强度等级均为C40,采用修正后的Kent-Park本构模型,轴心抗压峰值应力为26.8 MPa,峰值应变为 1.589×10^{-3} ;轴心受拉峰值应力为2.39 MPa,峰值应变为 1.044×10^{-4} ;弹性模量为 3.25×10^4 MPa。普通钢筋和预应力筋均采用Pinto本构模型,无粘结预应力筋为1x7的 $\Phi^S 15.2$ 钢绞线,预应力度为0.55,初始应力为1023 kN,沿梁截面中性轴对称布置。钢筋的力学性能参数如表1所示。

表 1 钢筋的力学性能参数

Table 1 Parameters of reinforcement mechanics performance

直径/mm	等级	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	弹性模量/($\times 10^5$ MPa)
8	HRB335	335	455	2.00
14	HRB400	400	540	2.00
18	HRB400	400	540	2.00
20	HRB400	400	540	2.00
15.2	钢绞线	1320	1860	1.95

3 结构连续倒塌分析

3.1 失效准则

在倒塌分析的每一时间步内，综合采用应变失效和转角失效两种方法作为本文的判别准则。当核心区混凝土极限压应变大于 0.012 时满足应变失效准则，当梁端塑性转角大于 2° 时满足转角失效准则^[23]。构件满足失效准则时，则判定该构件失效，移除该失效构件，并将此处定义为“断裂点”。

3.2 设计荷载下抽柱后结构响应

通过对比装配式结构和现浇结构在抽柱后关键构件的内力时程曲线和失效点竖向位移时程曲线，分析装配式结构的防连续倒塌能力。

本文假定梁上均布荷载设计值为 13 kN/m，分析时长设为 18 s。首先，仅移除一层 B 柱，装配式结构和现浇结构均未发生连续倒塌。对 A 柱而言，装配式结构和现浇结构柱端轴力接近，前期波动较大，后期逐渐趋于稳定，见图 8。装配式结构和现浇结构柱端弯矩前期波动较大，后期逐渐趋于稳定，装配式结构波动幅值稍大，最终柱端弯矩值较小，见图 9。对 C 柱而言，柱端轴力、弯矩情况与 A 柱类似，但没有 A 柱明显。装配式结构失效点最终竖向位移小于现浇结构，见图 10。

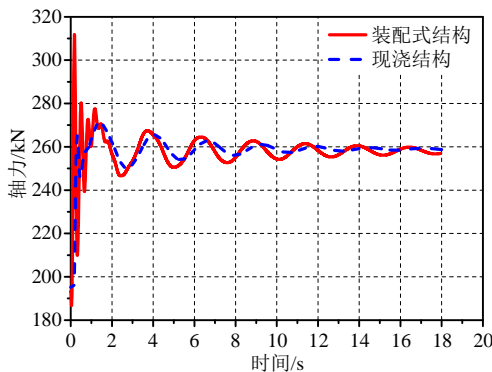


图 8 抽 B 柱后 A 柱一层底端轴力时程曲线

Fig.8 Time history curve of axial force in the bottom at first floor of column A after removing column B

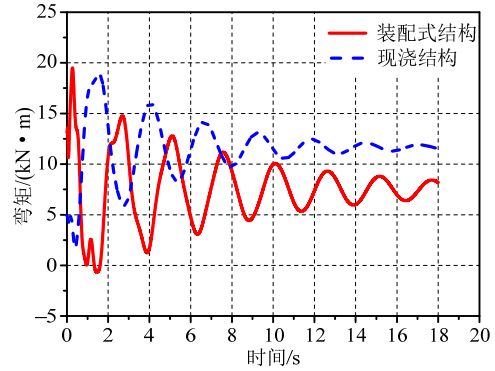


图 9 抽 B 柱后 A 柱一层底端弯矩时程曲线

Fig.9 Time history curve of bending moment in the bottom at first floor of column A after removing column B

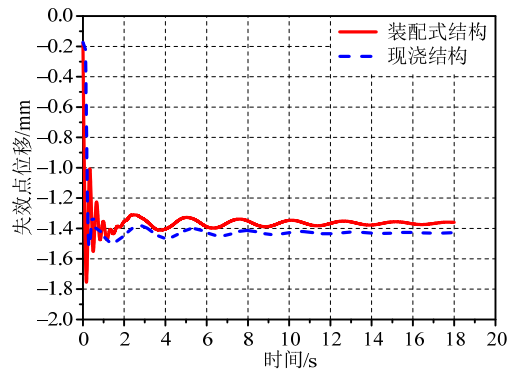


图 10 抽 B 柱后失效点竖向位移时程曲线

Fig.10 Time history curve of vertical displacement of failure point after removing column B

然后，仅移除一层 A 柱，装配式结构和现浇结构均未发生倒塌。对 B 柱而言，装配式结构和现浇结构柱端轴力接近，柱端最终弯矩值装配式结构稍大，分别见图 11、图 12。装配式结构失效点最终竖向位移小于现浇结构，见图 13。

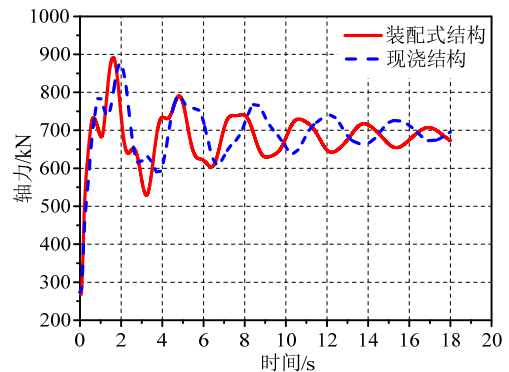


图 11 抽 A 柱后 B 柱一层底端轴力时程曲线

Fig.11 Time history curve of axial force in the bottom at first floor of column B after removing column A

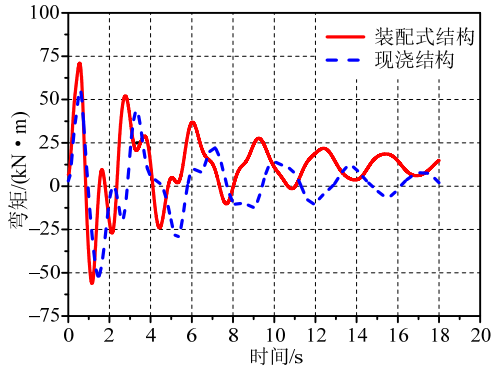


图 12 抽 A 柱后 B 柱一层底端弯矩时程曲线

Fig.12 Time history curve of bending moment in the bottom at first floor of column B after removing column A

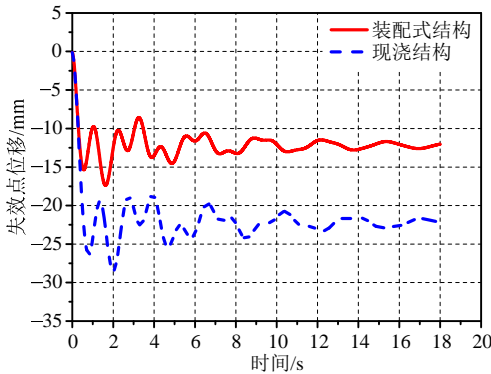


图 13 抽 A 柱后失效点竖向位移时程曲线

Fig.13 Time history curve of vertical displacement of failure point after removing column A

3.3 结构连续倒塌过程模拟

3.3.1 抽 B 柱的结果

本文定义倒塌荷载极限值 P 为：结构在即将发生连续倒塌破坏的临界状态时，可承受的最大竖向均布荷载。抽除 B 柱后，当框架梁上均布荷载从 13 kN/m 增加至 33 kN/m 时，现浇结构才出现连续倒塌；而对于装配式结构，当框架梁上均布荷载从 13 kN/m 增加至 41 kN/m 时，结构才出现连续倒塌。倒塌荷载极限值的差值百分比见下式：

$$K = \frac{P_{pc} - P_{cc}}{P_{cc}} \times 100\% \quad (1)$$

其中： K 为装配式结构与现浇结构倒塌荷载极限值差值的百分比； P_{pc} 为装配式结构的倒塌荷载极限值，为 41 kN/m； P_{cc} 为现浇结构的倒塌荷载极限值，为 33 kN/m。由式(1)可得，抽出 B 柱后，装配式结构的倒塌荷载极限值比现浇结构高 24.2%。

相比于现浇结构而言，装配式结构倒塌荷载极限值更高。这是由于预应力钢绞线在小挠度下为梁柱提供约束作用；在大挠度下形成悬链线机制，可提高装配式结构的倒塌荷载极限值，故有利于防止

结构发生连续倒塌。而现浇框架在混凝土开裂，钢筋屈服后，刚度显著下降。结构的变容易集中在抽柱处两侧梁端(图 15)。当梁端混凝土完全破坏以后，梁内纵向钢筋才会形成悬链线工作机制，而此时梁端截面的钢筋已经有较大的塑性变形，有可能发生颈缩甚至断裂，故现浇结构更容易发生连续倒塌。

装配式结构和现浇结构的连续倒塌过程分别见图 14 和图 15。图中空心点表示“失效点”位置，实心点表示“断裂点”位置。

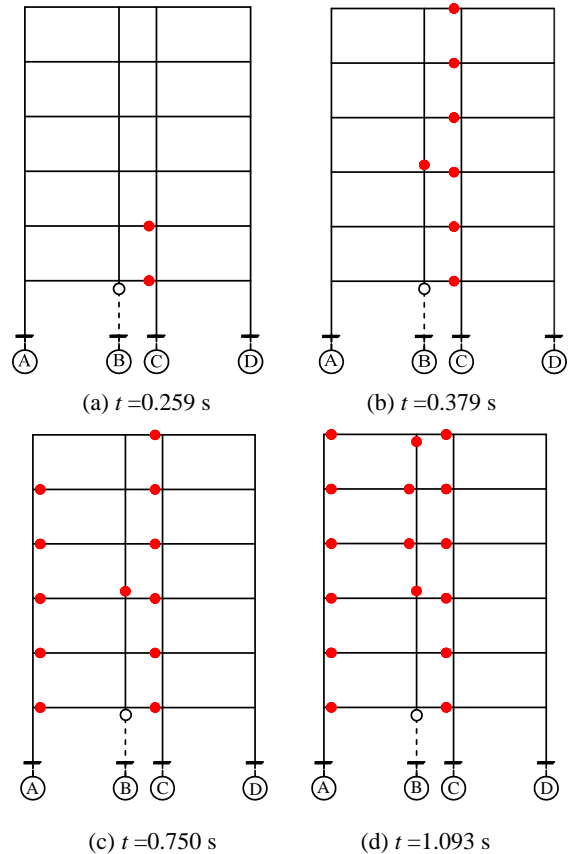
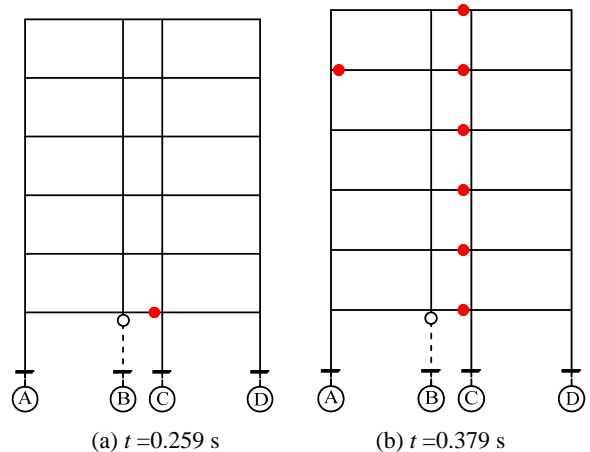


图 14 装配式结构抽 B 柱后的连续倒塌过程

Fig.14 Collapse process of precast frame structure after removing column B



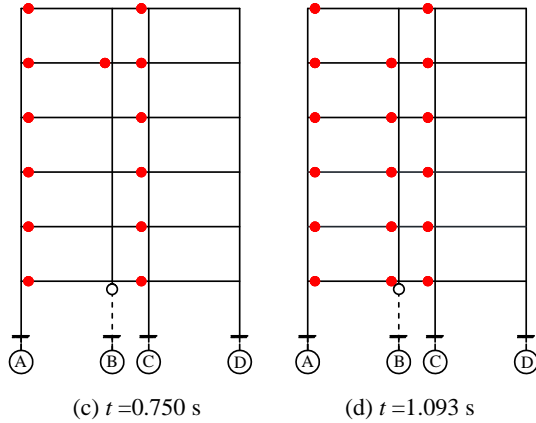


图 15 现浇结构抽 B 柱后的连续倒塌过程

Fig.15 Collapse process of cast-in-place frame structure after removing column B

抽除 B 柱后,两种框架结构的破坏均以 B 柱相邻两跨框架梁为主,先从 B-C 跨梁右端一层从下往上发生破坏,然后 A-B 跨梁左端从上往下发生破坏,最后 A-B 跨梁右端从上往下发生破坏。发生这个倒塌过程的主要原因是:抽除 B 柱瞬间,失效点和周围构件形成一个整体,结构产生内力重分布,C 柱离 B 柱最近,故其不平衡荷载分担得较多,故先从 B-C 跨梁右端一层从下往上发生破坏,如图 14(a)和图 15(a)所示。当 B-C 跨梁右端完全破坏后,此时 A 柱分担的不平衡荷载较多,因此 A-B 跨梁左端从上往下发生破坏,如图 15(b)所示。当 B-C 跨梁右端和 A-B 跨梁左端依次满足失效准则后被移除后,由于 A-B 跨梁比 B-C 跨梁长,故 A-B 跨梁右端比 B-C 跨梁左端承受更大弯矩。故抽 B 柱后, A-B 跨梁右端从上往下发生破坏,如图 14(d)所示。

抽除 B 柱后,两种框架结构的构件失效准则均为应变失效,通过移除失效构件使其与整体结构脱离。与设计荷载下抽柱后结构的响应不同,此时失效点的竖向位移时程曲线未出现振荡。随着时间的增长,移除杆件逐渐增多,失效点的竖向位移下降也越快。在 0~1 s 内,装配式结构的无粘结预应力筋拉结作用不明显,故与现浇结构失效点的位移下降速率相当;在 1 s 后,装配式结构失效点的位移下降的速率要稍快于现浇结构,如图 16 所示。

3.3.2 抽 A 柱的结果

抽除 A 柱后,当框架梁上均布荷载从 13 kN/m 增加至 14 kN/m 时,现浇结构才出现连续倒塌;而对于装配式结构,当梁上均布荷载从 13 kN/m 增加至 19 kN/m 时,结构才出现连续倒塌。故由式(1)可

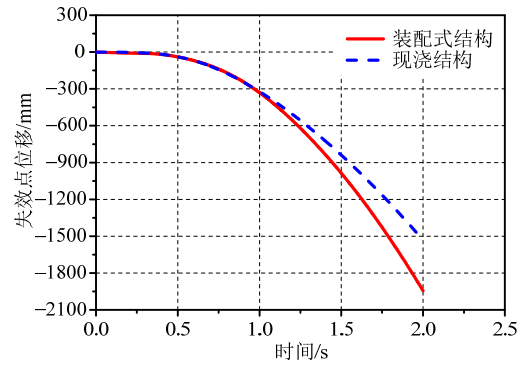


图 16 抽 B 柱后失效点竖向位移时程曲线

Fig.16 Time history curve of vertical displacement of failure point after removing column B

得,抽出 A 柱后,装配式结构倒塌荷载极限值比现浇结构高 35.7%。同抽除 B 柱类似,两种框架结构的破坏均以 A-B 跨梁为主,并未向 B-C 跨梁发展,分别从 A-B 跨梁右端一层从下往上发生破坏,然后逐层 A-B 跨梁左端发生破坏。限于篇幅,二者的具体倒塌过程不再赘述。

两种框架结构抽除 A 柱后的构件失效准则均为应变失效,通过移除失效构件使其与整体结构脱离。与抽除 B 柱类似,此时失效点的竖向位移时程曲线未出现振荡。随着时间的增长,移除杆件逐渐增多,失效点竖向位移下降也越快。同现浇结构相比,在 0~1.5 s 内,装配式结构的无粘结预应力筋额外拉结作用明显,使得失效点的位移下降较慢,开始时间较晚。在 1.5 s 后,装配式结构失效点的位移下降的速率要稍快于现浇结构,如图 17 所示。

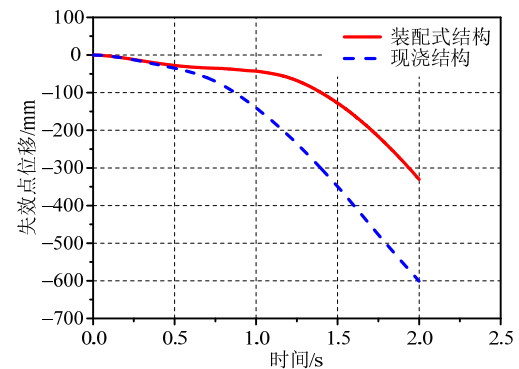


图 17 抽 A 柱后失效点竖向位移时程曲线

Fig.17 Time history curve of vertical displacement of failure point after removing column A

4 结论

在对无粘结预应力装配式节点进行数值模拟和试验验证的基础上,本文采用 OpenSees 建立了一栋 6 层无粘结预应力装配式框架结构和现浇框架

结构,并基于抽柱法对两种类型的框架结构进行了连续倒塌分析,得到以下结论:

(1) 在抽中柱后,无粘结预应力装配式框架结构的倒塌荷载极限值比现浇框架结构高 24.2%;在抽边柱后,无粘结预应力装配式框架结构的倒塌荷载极限值比现浇框架结构高 35.7%。故无粘结预应力筋的拉结作用在抽边柱时发挥更充分。

(2) 在结构连续倒塌过程模拟中,两种框架结构在抽边柱时的倒塌荷载极限值都小于抽中柱的倒塌荷载极限值。故在防连续倒塌设计中,应适当增加框架结构的边柱截面尺寸或配筋。

(3) 在柱截面尺寸和配筋相同、梁截面尺寸和受弯承载力相同的情况下,无粘结预应力装配式框架结构防连续倒塌性能优于现浇框架结构。

参考文献:

- [1] Griffiths H, Pugsley A, Saugders O. Report of the inquiry into the collapse of flats at Ronan Point [R]. Canning Town, London: Her Majesty's Stationery Office, 1968.
- [2] Ellingwood B R. Building design for abnormal loads and progressive collapse [J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2005, 20(3): 194—205.
- [3] Izzuddin B A, Vlassisa A G, Elghazoulia A Y, et al. Progressive collapse of multi-storey buildings due to sudden column loss: part I: simplified assessment framework [J]. Engineering Structures, 2008, 30(5): 1308—1318.
- [4] 陆新征,李易,叶列平,等.钢筋混凝土框架结构防连续倒塌设计方法的研究[J].工程力学,2008,25(增刊 II): 150—157.
Lu Xinzheng, Li Yi, Ye Lieping, et al. Study on design method to resist progressive collapse for reinforced concrete frames [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(Suppl II): 150—157. (in Chinese)
- [5] Sasani M, Werner A, Kazemi A. Bar fracture modeling in progressive collapse analysis of reinforced concrete structures [J]. Engineering Structures, 2011, 33(2): 401—409.
- [6] 潘毅,刘宜丰,秦楠,等.成都市规划展览馆辅楼抗连续倒塌评估(I)——基于概念设计的线性静力分析 [J]. 土木工程学报,2012,45(增刊 I): 177—181.
Pan Yi, Liu Yifeng, Qin Nan, et al. Progressive collapse resistance analysis on annex building of Chengdu urban planning exhibition hall Part I: Linear static analysis based on conceptual design [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(Suppl I): 177—181. (in Chinese)
- [7] 潘毅,王初翀,卢立恒,等.建筑结构防连续倒塌分析与设计方法研究进展[J].工程抗震与加固改造,2014,36(1): 52—56.
Pan Yi, Wang Chuchong, Lu Liheng, et al. Advance research on analysis and design methods to resist progressive collapse for building structures [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2014, 36(1): 52—56. (in Chinese)
- [8] 周育洸,李易,陆新征,等.钢筋混凝土框架抗连续倒塌的压拱机制分析模型[J].工程力学,2016,33(4): 34—42.
Zhou Yulong, Li Yi, Lu Xinzheng, et al. An analytical model of compressive arch action of reinforced concrete frames to resist progressive collapse [J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(4): 34—42. (in Chinese)
- [9] 王俊,赵基达,胡宗羽.我国建筑工业化发展现状与思考[J].土木工程学报,2016,49(5): 1—8.
Wang Jun, Zhao Jida, Hu Zongyu. Review and thinking on development of building industrialization in China [J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(5): 1—8. (in Chinese)
- [10] Abrams D P, Bell B, Hyatt N, et al. Dynamic response of precast concrete frames [R]. Illinois of USA: University of Illinois at Urbana-Champaign, 1997: 47—62.
- [11] 李振宝,董挺峰,闫维明,等.混合连接装配式框架内节点抗震性能研究[J].北京工业大学学报,2006,32(10): 895—900.
Li Zhenbao, Dong Tingfeng, Yan Weiming, et al. Node seismic performance research of mixed connection of the precast framework [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2006, 32(10): 895—900. (in Chinese)
- [12] 柳炳康,田井锋,张瑜中,等.低周反复荷载下预压装配式PC框架延性性能和耗能能力[J].建筑结构学报,2007,28(3): 74—81.
Liu Bing kang, Tian Jingfeng, Zhang Yuzhong, et al. Behavior of ductility and energy dissipation of prestressed precast concrete frame under low-cyclic reversed loading [J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(3): 74—81. (in Chinese)
- [13] 王冬雁.无粘结预应力装配混凝土节点抗震及震后加固性能研究[D].北京:北京工业大学建筑工程学院,2008: 13—45.
Wang Dongyan. Research of seismic performance and reinforcement performance of Precast prestressed concrete connections with unbonded post-tensioned tendons [D]. Beijing: College of Architecture and Civil Engineering of Beijing University of Technology, 2008: 13—45. (in Chinese)
- [14] 吕西林,范力,赵斌.装配式预制混凝土框架结构缩尺模型拟动力试验研究[J].建筑结构学报,2008,29(4): 58—65.
Lü Xilin, Fan Li, Zhao Bin. Pseudo dynamic test on a reduced scale jointed precast concrete frame structure [J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(4): 58—65. (in Chinese)
- [15] 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[D]. 南京: 东南大学土木工程学院, 2012: 1—17.
- Cai Xiaoning. Study on seismic capacity and design method of prestressed precast concrete frame [D]. Nanjing: School of Civil Engineering Southeast University, 2012: 1—17. (in Chinese)
- [16] 孙巍巍, 张百涛, 蔡小宁. 基于 IDA 方法的后张预应力装配耗能框架地震易损性分析[J]. 工程抗震与加固改造, 2016, 38(4): 126—132.
- Sun Weiwei, Zhang Baitao, Cai Xiaoning. Seismic fragility analysis of post-tensioned energy dissipating frame based on IDA method [D]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2016, 38(4): 126—132. (in Chinese)
- [17] Kang S B, Tan K H. Behaviour of precast concrete beam-column sub-assemblages subject to column removal [J]. Engineering Structures, 2015, 93(6): 85—96.
- [18] 谢甫哲, 舒赣平, 凤俊敏. 基于抽柱法的钢框架连续倒塌分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2010, 40(1): 154—159.
- Xie Fuzhe, Shu Ganping, Feng Junmin. Progressive collapse analysis of steel frame structure using removing column method [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2010, 40(1): 154—159. (in Chinese)
- [19] GSA2013, Alternate path analysis and design guidelines for progressive collapse resistance [S]. Washington D C: the U.S. General Service Administration, 2013.
- [20] DoD2010, Design of structures to resist progressive collapse [S]. Washington D C: Department of Defense, 2010.
- [21] 陈学伟, 林哲. 结构弹塑性分析程序 OpenSees 原理与实例[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014: 166—171.
- Chen Xuewei, Lin Zhe. Structural nonlinear analysis program OpenSees theory and tutorial [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2014: 166—171. (in Chinese)
- [22] Kent D C, Park R. Flexural members with confined concrete [J]. Journal of the Structural Division, 1971, 97(7): 1969—1990.
- [23] GSA2003, Progressive collapse analysis and design guidelines for new federal office buildings and major modernization projects [S]. Washington D C: The U.S. General Services Administration, 2003.

(上接第 149 页)

- [14] 谢壮宁. 珠江新城 J1-1 项目风洞试验和风振分析报告 [R]. 汕头: 汕头大学风洞实验室, 2007.
- Xie Zhuangning. Report of wind tunnel test and wind-induced vibration analysis on project J1-1 in Pearl River New City of Guangzhou [R]. Shantou: Wind Tunnel Laboratory of Shantou University, 2007. (in Chinese)
- [15] 谢壮宁. 广州利通广场高频底座天平风洞试验报告 [R]. 汕头: 汕头大学风洞实验室, 2007.
- Xie Zhuangning. Report on high-frequency base balance test of the project of Leatop Plaza in Guangzhou [R]. Shantou: Wind Tunnel Laboratory, Shantou University, 2007. (in Chinese)
- [16] Bailey P A, Kwok K C S. Interference excitation of twin tall buildings [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1985, 21(3): 323—338.
- [17] 谢壮宁, 方小丹, 倪振华. 超高层建筑的等效静风荷载-扩展荷载相关方法[J]. 振动工程学报, 2008, 21(4): 398—403.
- Xie Zhuangning, Fang Xiaodan, Ni Zhenhua. Equivalent static loads on tall building – the extended load – response – correlation (ELRC) approach [J]. Journal of Vibration Engineering, 2008, 21(4): 398—403. (in Chinese)
- [18] 余先锋, 谢壮宁, 于怀懿. 高层建筑间风致扭转干扰效应的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(11): 78—83.
- Yu Xianfeng, Xie Zhuangning, Yu Huaiyi. Experimental study on interference effects of wind-induced torsional responses between two high-rise buildings [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(11): 78—83. (in Chinese)
- [19] 谢壮宁, 顾明, 倪振华. 不同断面宽度群体高层建筑的 动力干扰效应(第 1 部分 顺风向响应)[J]. 建筑结构学报, 2003, 24(4): 8—16.
- Xie Zhuangning, Gu Ming, Ni Zhenhua. Wind-induced dynamics interference effects on different size tall buildings (Part I: Along-wind response) [J]. Journal of Building Structures, 2003, 24(4): 8—16. (in Chinese)