

文章编号: 1671-2021(2011)01-0010-09

# 基于 Pushdown 分析的 RC 框架抗连续倒塌承载力研究

李 易<sup>1</sup>, 陆新征<sup>1</sup>, 叶列平<sup>1</sup>, 陈适才<sup>2</sup>

(1. 清华大学土木工程系, 清华大学土木工程安全与耐久教育部重点实验室, 北京 100084

2. 北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100022)

**摘要:** 目的 分析了典型钢筋混凝土框架的抗连续倒塌承载力规律, 为抗连续倒塌设计和研究提供参考. 方法 采用非线性静力 Pushdown 方法, 对不同抗震设防烈度的非整体现浇板框架和整体现浇板框架的抗连续倒塌承载力进行了分析和对比. 结果 层间不均匀内力是导致多层框架梁共同作用时相对承载力偏低的原因. 梁机制和悬链线机制作用下框架结构的抗倒塌承载力分别由框架梁的抗弯承载力和抗拉承载力决定. 结论 抗震设计增强了框架在梁机制作用下的抗连续倒塌承载力, 而对悬链线机制作用下的抗连续倒塌承载力提高有限. 楼板显著增强了框架在梁机制作用下的抗连续倒塌承载力, 而对悬链线机制作用下的抗连续倒塌承载力的增强效果则取决于参与工作的楼板宽度.

**关键词:** 混凝土框架; 抗连续倒塌承载力; 非线性静力 Pushdown 分析; 抗震设计; 楼板

中图分类号: TU 375 文献标志码: A

## Study on Progressive - Collapse Resistance Capacity of RC Frame Structures Based on Pushdown Analysis

LI Yi<sup>1</sup>, LU Xinzheng<sup>1</sup>, YE Lieping<sup>1</sup>, CHEN Shicai<sup>2</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Key Laboratory of Safety and Durability for Civil Engineering of China Education Ministry, Tsinghua University, Beijing, China 100084; 2. The Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing, China 100124)

**Abstract** The law of the progressive-collapse (PC) resistance capacity of the typical reinforced concrete (RC) frames is studied to provide a reference for PC design and research. The PC resistance capacities of the typical non-integrated slab and the integrated cast-in-situ slab RC frames with different seismic fortification levels are compared based on the nonlinear static Pushdown method. It is found that the uncoordinated development of internal forces of beams on different stories leads to the lower PC resistance capacity for the frame when multi-storey frame beams commonly resist PC. The PC resistance capacity of the frame under the beam action and catenary action is dominated by the flexural capacity and tensile capacity of frame beams respectively. After anti-seismic design, the PC resistance capacity of the frame under the beam action is significantly enhanced, but the capacity under the catenary action is improved slightly. The PC resistance capacity of the frame under the beam action is significantly enhanced by integrated slab; however, for the car-

收稿日期: 2010-09-01

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2006BAJ03A02-01, 2006BAJ06B06); 长江学者和创新团队发展计划资助项目(RT00736); 城市与工程安全减灾教育部重点实验室开放基金项目; 北京市重点实验室开放基金项目(EESR2010-03)

作者简介: 李易(1981-), 男, 博士研究生, 主要从事钢筋混凝土结构连续倒塌方面的研究.

capacity under the catenary action, the enhancement extent relates to the width of slabs

**Key words** concrete frame; progressive-collapse resistance capacity; nonlinear Pushdown analysis; anti-seismic design; slab

连续倒塌是指由意外事件或灾害所造成的结构初始局部破坏所引起的整体结构不成比例的倒塌破坏<sup>[1]</sup>. 为建立有效的抗连续倒塌设计方法, 需要对整体结构的连续倒塌规律和抗连续倒塌性能进行研究.

现有的规范<sup>[2-3]</sup>和研究<sup>[4-5]</sup>主要采用拆除构件法评价结构抗连续倒塌性能. 当采用非线性动力拆除构件法时<sup>[4-5]</sup>, 能够对剩余结构的倒塌过程进行了较好的模拟, 但是由于非线性动力过程比较复杂, 在连续倒塌过程分析时易受动力因素的干扰而不能获得清晰的传力机制变化. 此外, 采用非线性动力分析研究结构的抗连续倒塌承载力时, 需要逐步增加荷载并进行动力全过程分析, 所花费的大量计算时间使得该方法在实际应用中受限.

Pushdown 分析通过在结构上施加逐步增大的竖向荷载, 直至结构发生倒塌破坏, 得到结构变形和竖向荷载之间的关系曲线, 以此研究结构的极限竖向承载力和竖向荷载下倒塌破坏的机制. 国内外采用 Pushdown 方法对下列问题展开了研究, 包括: 框架连续倒塌机理<sup>[6]</sup>、防屈曲支撑的抗连续倒塌贡献<sup>[7-8]</sup>、结构抗连续倒塌承载力与性能评价<sup>[9-10]</sup>. 但是目前的研究还未从结构系统角度, 对钢筋混凝土框架结构抗连续倒塌的极限承载力、倒塌破坏规律和空间传力机制开展研究.

笔者采用非线性有限元方法, 对一栋典型钢筋混凝土 (RC) 框架结构进行模拟, 采用基于多点位移控制的非线性静力 Pushdown 分析方法, 研究了 RC 框架结构的抗连续倒塌承载力分布和传力机制的变化, 分析了不同抗震设防等级、不同楼板构造对框架结构抗连续倒塌承载力的影响, 其结果可供相关工程设计参考.

## 1 RC 框架模型

### 1.1 设计模型

笔者研究的典型 8 层 RC 框架结构模型如图 1 所示, 其结构平面布置如图 2 所示. 构件尺寸、材料和设计参数等信息见文献 [5]. 笔者为了比较抗震设计对抗连续倒塌性能的贡献程度, 在文献 [5] 的基础上, 抗震设防烈度分别按照 8 度、7

度和 6 度进行设计. 高设防烈度设计下的框架梁柱钢筋用量增加, 其中框架梁增加的钢筋主要集中在梁端, 梁跨中钢筋增加较少. 和 6 度抗震设计的框架相比, 7 度和 8 度抗震设计的框架的梁柱配筋量分别约增加了 20% 和 100%.

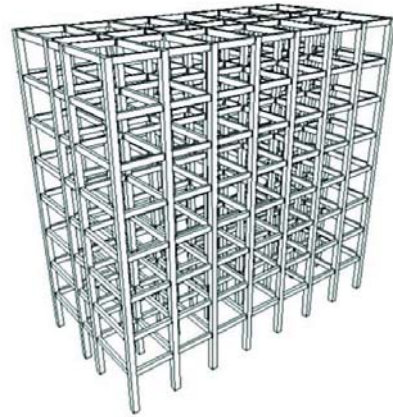


图 1 典型 RC 框架透视图

Fig 1 Perspective view of RC frame

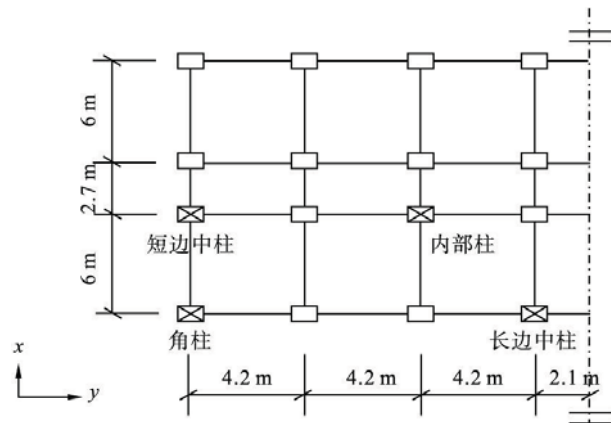


图 2 标准层平面图及所拆除柱的位置

Fig 2 Plan view of RC frame and location of removed columns

### 1.2 数值分析模型

#### (1) 单元和材料模型

笔者采用清华大学开发的基于 MSC/MARC 的钢筋混凝土纤维梁分析模型 THUFIBER 来完成连续倒塌过程的非线性动力计算. 大量算例验证表明该平台可以满足连续倒塌分析的需要<sup>[5]</sup>.

#### (2) 构件失效准则

为了考虑结构连续倒塌过程中构件的断裂破坏, 笔者在 THUFIBER 模型中加入了构件失效准则, 利用 MSC/MARC 的“单元生死”技术<sup>[11]</sup>删除

达到失效准则的单元,释放失效单元的内力.笔者所采用构件的失效准则如下:①对于柱构件,当钢筋的拉应变超过钢材的极限拉应变时认为该钢筋已经发生拉断失效,当钢筋的压应变超过混凝土压碎应变时认为受压钢筋失去支撑发生屈曲,如果一个柱截面上所有钢筋纤维都已经拉断或者压曲,则判定该柱构件发生破坏;②对于梁构件,在倒塌过程中先后经历小变形下的梁机制(端部受弯)和大变形下的悬链线机制(全截面受拉)两种工作状态<sup>[6]</sup>,梁机制时端部破坏的受压钢筋可以在悬链线阶段提供抗拉承载力,因此在纤维梁模型中仅当其截面上所有钢筋纤维都已经拉断时判断梁构件发生破坏.

### (3) 非线性求解算法

相对于文献[4-5]中的非线性动力拆除构件分析,非线性静力 Pushdown 分析中存在着“梁机制”向“悬链线机制”转化的过程,即使采用弧长法,很多时候也难以跟踪不同受力机制变化过程中的“失稳”和“跳跃”问题.为解决该问题,清华大学和加州伯克利大学联合提出了基于多点位移控制的推覆分析算法<sup>[12]</sup>,能够将基于力的加载模式转换为基于位移的加载模式,将该方法引入 Pushdown 分析中可以稳定的获得 Pushdown 全过程的结构响应,包括不同受力机制间的转化和突变.

### 1.3 楼板的模拟

整体现浇楼板对于结构的整体性有着重要影响.现行抗连续倒塌设计方法大多未考虑楼板的贡献.因此,笔者对楼板的影响进行了专门讨论.如果楼板和框架梁柱无可靠连接,如预制板楼板,则楼板对结构的抗连续倒塌性能基本没有贡献,结构的抗连续倒塌性能由梁柱骨架决定,计算模型中仅考虑框架梁柱构件,将楼板的荷载传递到相应的梁上.而对于整体现浇楼板框架,楼板对结构抗连续倒塌性能的影响不能忽略. Sasan i 对 San Diego 酒店(六层现浇板混凝土框架)进行了倒塌试验研究和分析<sup>[13]</sup>,通过将框架梁用 T 形或 L 形截面的梁单元模拟以考虑有效翼缘宽度范围内的楼板对梁的增强,其结果和试验结果吻合较好.故笔者也采用该方法,在用 THUFIBER 模型模拟框架梁时,建立 T 形或 L 形的截面并设置相应的板内钢筋,以考虑有效翼缘宽度范围内的楼板贡献,有效翼缘宽度按照我国《GB50010-2002 混凝土

结构设计规范》<sup>[14]</sup>的要求选取.

## 2 非线性静力 Pushdown 分析方法

采用 Khandelwal 和 E Ftaw il<sup>[15]</sup> 建议的 Pushdown 方法进行分析:在初始失稳区域施加不断增加的竖向荷载  $q$  而在其他区域施加 1 倍设计竖向荷载  $g$  (见图 3),分析采用非线性静力法.

通过非线性静力 Pushdown 分析方法对框架结构的四个典型部位的抗连续倒塌承载力规律进行了研究,四个典型部位处发生初始破坏的框架柱位置分别为长边中柱、短边中柱、内部柱和角柱,如图 2 所示.在计算结果中,变形参数选择被拆除柱上端梁柱结点的位移  $\Delta$ ,承载力参数选择相对承载力(施加竖向荷载  $q$  / 设计竖向荷载  $g$ ),第  $X$  层表示拆除第  $X$  层框架柱后进行非线性静力 Pushdown 分析的结果.

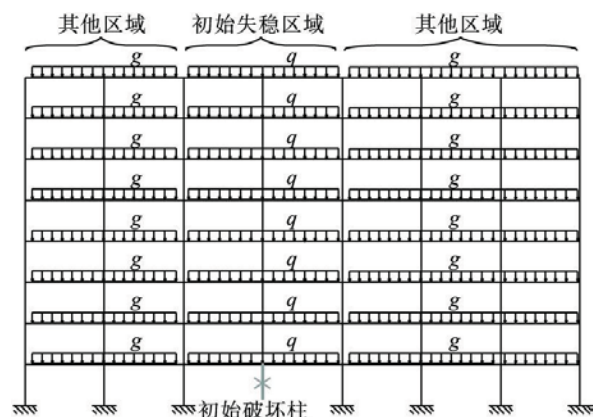


图 3 RC 框架的 Pushdown 分析方法

Fig. 3 Pushdown analysis of RC frame

## 3 基本算例的承载力分析

### 3.1 承载力机制分析

图 4 列出了 6 度抗震设计的非整体现浇楼板框架在各种拆除工况下的非线性静力 Pushdown 分析结果.可以看到,框架的长边、短边和内部区域随着结点位移的增加,相对承载力首先显著增强,达到第一个峰值以后开始显著下降,在竖向位移达到 500~850 mm 时,相对承载力降到最低,然后随着结点位移的进一步增加,相对承载力又开始恢复直至第二个峰值.第一个相对承载力峰值由梁端弯矩提供,可以称之为“梁机制”;第二个相对承载力峰值由梁内轴拉力提供,可以称之为“悬链线机制”.角柱拆除工况的 Pushdown 分析表明,框架角部区域仅有第一个相对承载力峰值,即仅存在梁机制作用.

上述两种承载力机制的作用范围和框架梁变形程度有关. 由于结点上框架梁的跨度不同, 相同结点位移下, 跨度较小的梁发生的转动变形相对较大. 在梁机制下, 该梁的端部会首先产生塑性铰

并进入破坏. 在悬链线机制下, 该梁的钢筋会先于其他梁达到极限拉应变, 使得该梁发生破坏, 其轴拉承载力丧失.

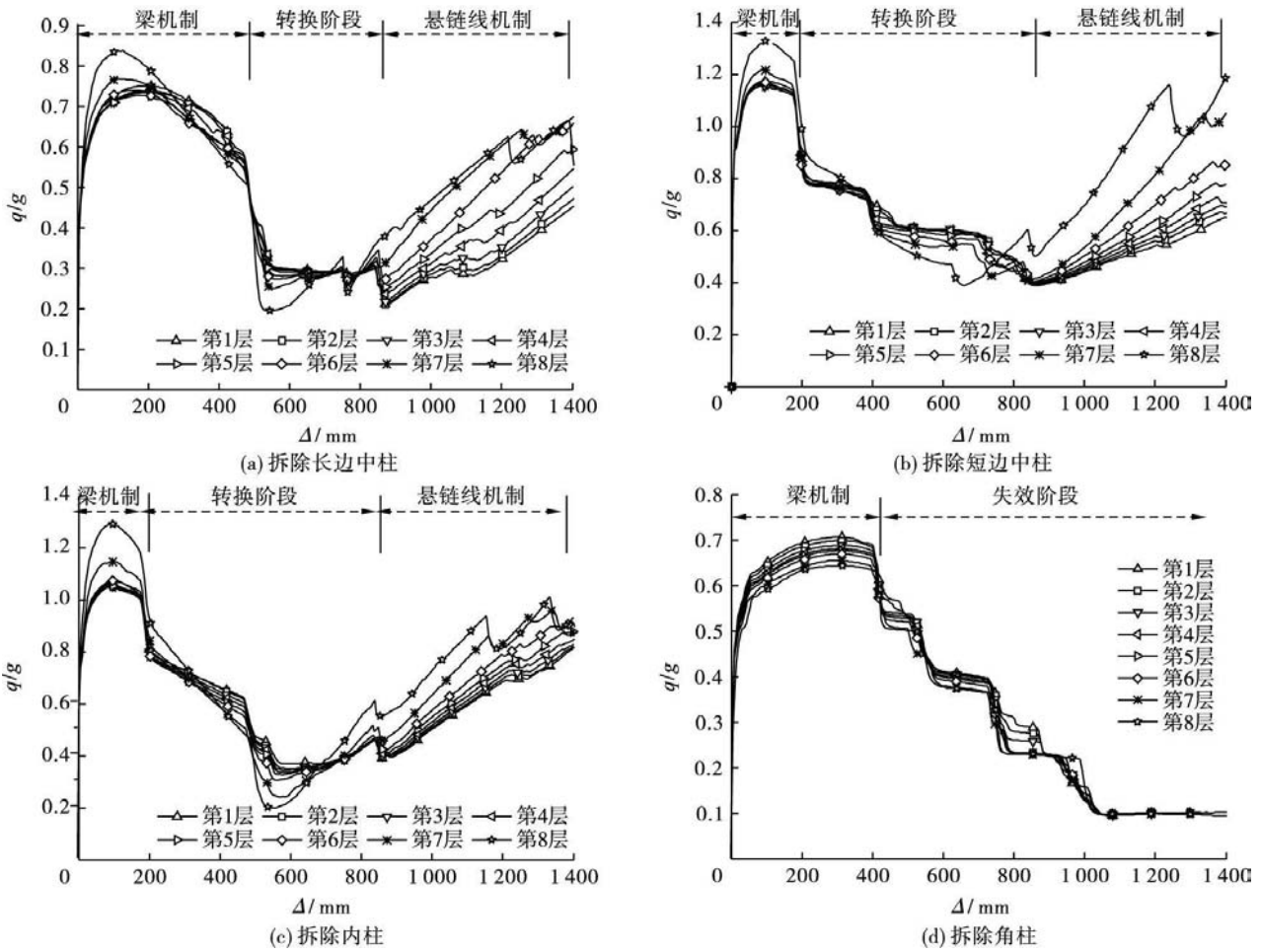


图 4 基本算例 Pushdown 分析 (6 度抗震设计 / 非整体现浇楼板框架)

Fig 4 Pushdown analysis for basic example (6 degree seismic design / non-integrated slab frame)

对于梁机制, 梁端塑性铰的失效使得相应梁退出工作. 由图 4(a) ~ (c) 可知, 结构的短边区域和内部区域在梁机制作用下的第一个承载力大幅降低的台阶都发生在结点位移达到 200 mm 时, 这是因为这两个部位的最短梁都是 Y 向的中跨梁, 该梁是框架中的最短梁, 跨度为 2.7 m, 在相同结点位移下该梁的塑性铰最先破坏, 导致该区域承载力大幅下降. 而长边区域最短梁跨度为 4.2 m, 在结点位移达到约 500 mm 时, 该梁的端部塑性铰才发生破坏, 承载力出现大幅下降. 角部区域的最短梁和长边区域相同, 但由于梁内无轴压力约束, 该梁的塑性铰在 400 mm 时就发生了破坏. 当部分框架梁塑性铰的失效后, 尽管其他梁的抗弯承载力还未丧失, 但是该结构区域的梁机制抗连续倒塌承载力已经大幅下降, 可以认为结构退出梁机制.

对于悬链线机制, 当结点位移足够大时, 构件轴拉力的竖向分力才能提供较大的承载力, 使得结构的抗连续倒塌承载力上升, 此外, 悬链线阶段构件发生较大变形, 部分钢筋纤维被拉断, 导致承载力发生突降, 导致部分顶层计算结果中出现若干次大幅波动, 见图 4(a) ~ (c). 相对而言, 底部拆除工况的初始失稳区域结构层数较多, 总设计荷载较大, 相对承载力 (施加荷载 / 设计竖向荷载) 的变化不是非常明显.

对于梁机制和悬链线机制两个阶段之间的区域, 可以视之为转换阶段, 对于角部区域仅有梁机制贡献, 因此不存在转换阶段. 此外, 两种机制的承载力大小取决于构件截面尺寸和配筋情况, 笔者算例构件高度较大, 常规设计和抗震设计下, 梁机制承载力一般比悬链线机制承载力高. 而当截面高度较小、梁内通长钢筋较多时, 悬链线机制的

承载力会大于梁机制,比如文献 [6] 中试验的平面框架。

### 3.2 梁机制承载力分析

达到第一个相对承载力峰值时,结构顶部两层的长边、短边和内部三个区域的相对承载力比底部几层的相同位置处的相对承载力高,其中顶层的相对承载力最高,而 6 层以下差别不大,图 4 (a) ~ (c)。与此同时,角部区域的相对承载力并未发生顶层较高的现象,见图 4 (d)。

提取第 6 层和第 8 层长边中柱拆除工况下 Pushdown 分析过程中的上部 X 向边缘贯通框架梁的内力进行分析,如图 5 所示。其中图 5 (a) 和图 5 (b) 分别为第 8 层和第 6 层的受力分析简图,图 5 (c) 和图 5 (d) 分别为梁端的轴力和弯矩变化情况。可以发现,在结点位移到达 500 mm 以前,单层框架梁机制工作时端部内力为压弯组合。这是因为,框架梁在弯曲时,其轴线长度有一个伸长的趋势。而周边构件约束了它的伸长变形,引起梁内压力。而这个压力由会提高梁的抗弯承载力。多层框架的作用机制有所不同,各层框架梁间的内力并不均匀,其第 6 层的框架梁轴力  $F_6^6$ 、剪力  $Q_6^6$ 、

弯矩  $M_6^6$  分别和第 8 层拆除工况中的相应的梁轴力  $F_8^8$ 、剪力  $Q_8^8$ 、弯矩  $M_8^8$  相接近,而上部两层的内力则小很多,这是由于多层框架梁形成了空腹桁架作用 (Vierendeel Action),多层端部轴压力形成了新的弯矩  $M_F$  来抵抗外荷载,如图 5 (b) 所示,因此上层中的内力特别是轴力下降较多。文献 [6] 在三层框架梁抗连续倒塌试验中也发现层间不均匀内力发展现象的存在,其中底部梁的钢筋应变要大于上部梁中的钢筋,和上述讨论一致。

对于单个梁来说,轴压力的存在能够显著提高框架梁的承载力。多层框架在共同承担外荷载时只有靠近底部的、轴压力较大的几层框架梁能够获得承载力提高,所以随着楼层数的增多,这部分额外的冗余承载力贡献不断被分配或“稀释”,相对承载力 (施加荷载 / 设计竖向荷载) 趋向“收敛”,因此出现图 4 中顶层相对承载力较高的现象。对于框架的角部,由于双向悬臂梁缺少端部水平约束,不能提供较大的轴压力,框架梁抵抗竖向荷载时不存在上述受力机制,因此顶层相对承载力并不比底层高。

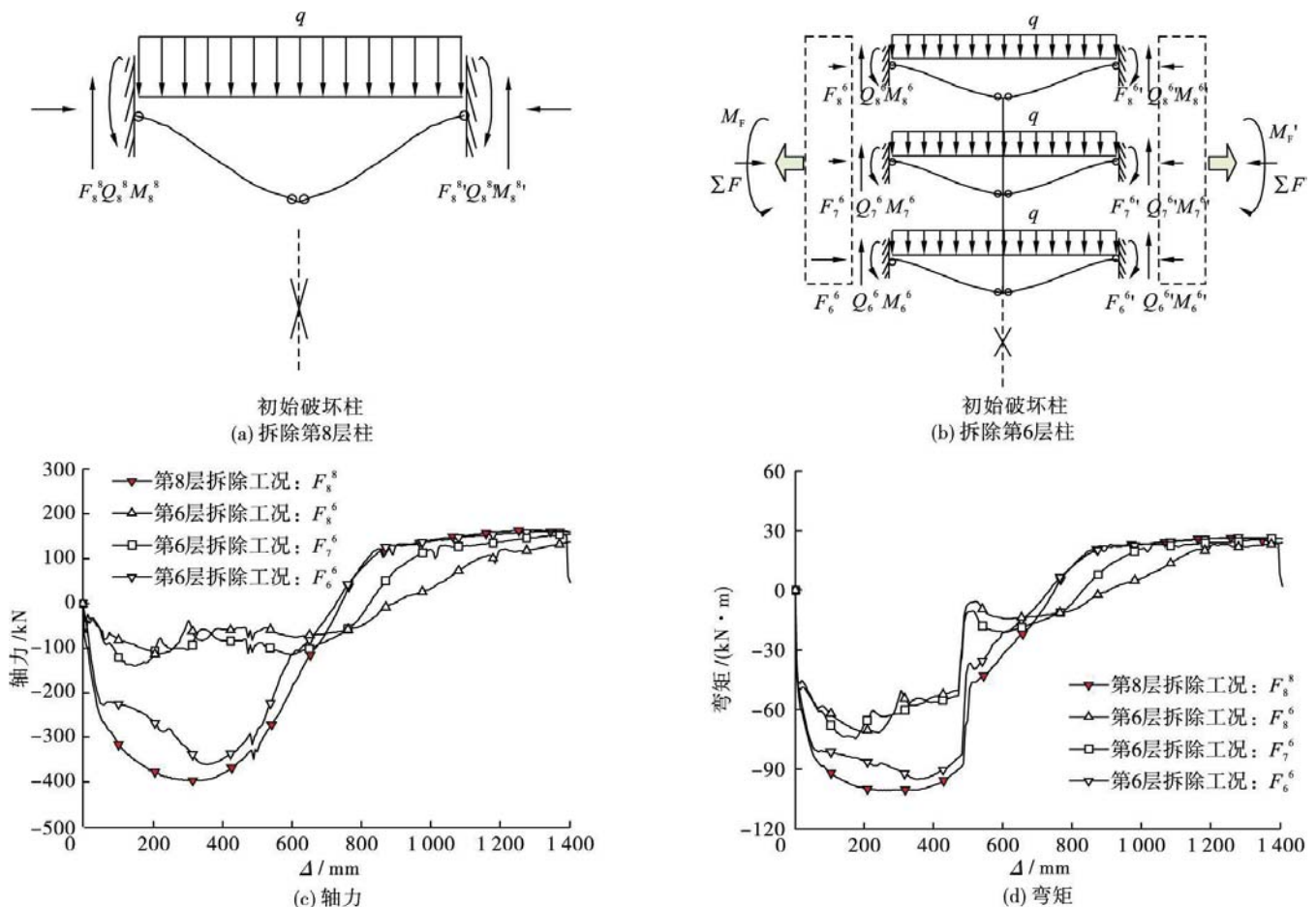
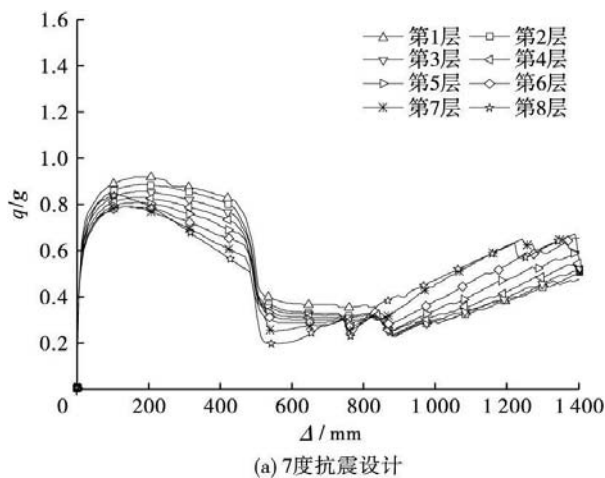


图 5 空腹桁架作用分析

Fig 5 Analysis of vierendeel truss action

### 3.3 悬链线机制承载力分析

在悬链线作用阶段(见图 4), 结构靠近上部的长边、短边和内部 3 个区域的相对承载力比结构底部相同位置处的相对承载力高, 结论和梁机制相似. 由图 5 可知, 多层框架共同作用时, 悬链线机制下各层梁的内力仍然有所差异, 其中破坏柱以上第 1 层的框架梁的内力迅速由压转为受拉 (700~900 mm), 破坏柱以上第 2 层框架梁的内力转换有一定的延迟 (800~1 000 mm), 而破坏柱以上第 3 层框架梁的内力转换显著的延迟了 (800~1 200 mm). 因此拆除柱所在的层数越低,



上部参与作用的框架梁越多, 内力转换发生的延迟就越明显, 悬链线机制的承载力上升就越慢.

## 4 抗震设计的影响

图 6 给出了 7 度和 8 度抗震设计的非整体现浇板框架所有楼层长边中柱拆除后的非线性静力 Pushdown 分析结果, 其他部位的结果的变化趋势与之类似, 未列出. 图 7 列出了三个抗震设防烈度的非整体现浇板框架在第 1 层和第 8 层的四个典型部位处的非线性静力 Pushdown 分析结果.

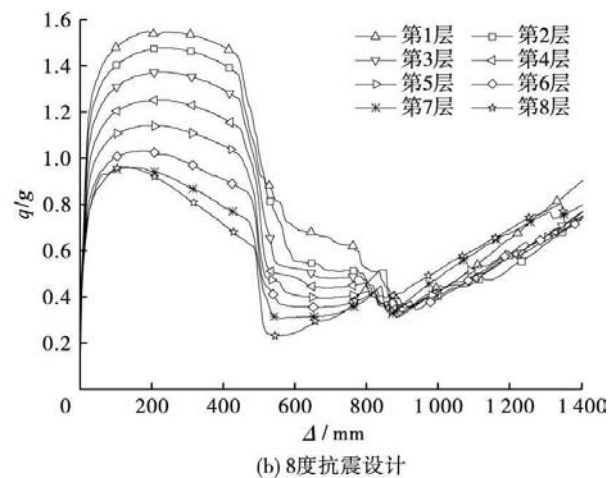


图 6 高设防烈度框架 Pushdown 分析 (拆除长边中柱 / 非整体现浇楼板框架)

Fig 6 Pushdown analysis for frames with high seismic fortification levels (Long edge column removed / non-integrated slab frame)

### 4.1 梁机制承载力分析

从图 6 可以看到, 高抗震设防烈度设计下框架的梁机制的相对承载力从结构的顶部到底部逐渐增加, 这是由于底层框架梁的抗震配筋增加所致. 其中 8 度抗震设计的框架其底部楼层的框架梁配筋增加非常显著, 因此相对承载力增幅远大于 7 度抗震设计的框架. 而 6 度抗震设计的框架其不同高度框架梁的配筋变化不显著, 因此除顶部两层的相对承载力较高以外, 其他层之间变化并不大, 如图 4 所示. 受抗震设计因素的影响, 底部框架梁在梁机制作用的相对承载力提高, 其中 7 度抗震设计框架的第 1 层和第 2 层拆除工况的相对承载力超过了顶部框架梁, 而 8 度抗震设计框架的所有楼层的相对承载力均超过了顶部框架梁.

同时由于梁机制仅由框架梁的抗弯承载力保证, 不需要支座提供较强的水平约束, 因此抗震设计对框架结构不同部位的梁机制承载力增强效果

一样, 如图 7 所示.

### 4.2 悬链线机制承载力分析

从图 6 可以看到, 高抗震设防烈度设计的框架其各层拆除工况下的悬链线机制相对承载力之间的差别不大, 这是因为抗震设计主要增加了框架梁端的抗弯钢筋, 而对于梁跨中反弯点处的钢筋增加不多, 悬链线机制需要沿梁轴向上的各个截面都要提供足够的抗拉承载力, 梁跨中钢筋的增幅较少导致框架各层悬链线机制作用下的相对承载力差别不大.

图 7 中框架第 8 层各拆除工况下的 Pushdown 分析结果表明, 顶部框架梁的悬链线机制的承载力没有明显提高, 这是因为抗震设计对顶部框架梁跨中的配筋增加有限所致. 在框架第 1 层各拆除工况下, 框架悬链线机制的承载力提高较多, 但是增幅仍然小于梁机制的承载力, 这是由于抗震配筋对悬链线机制的承载力增强有限所致.

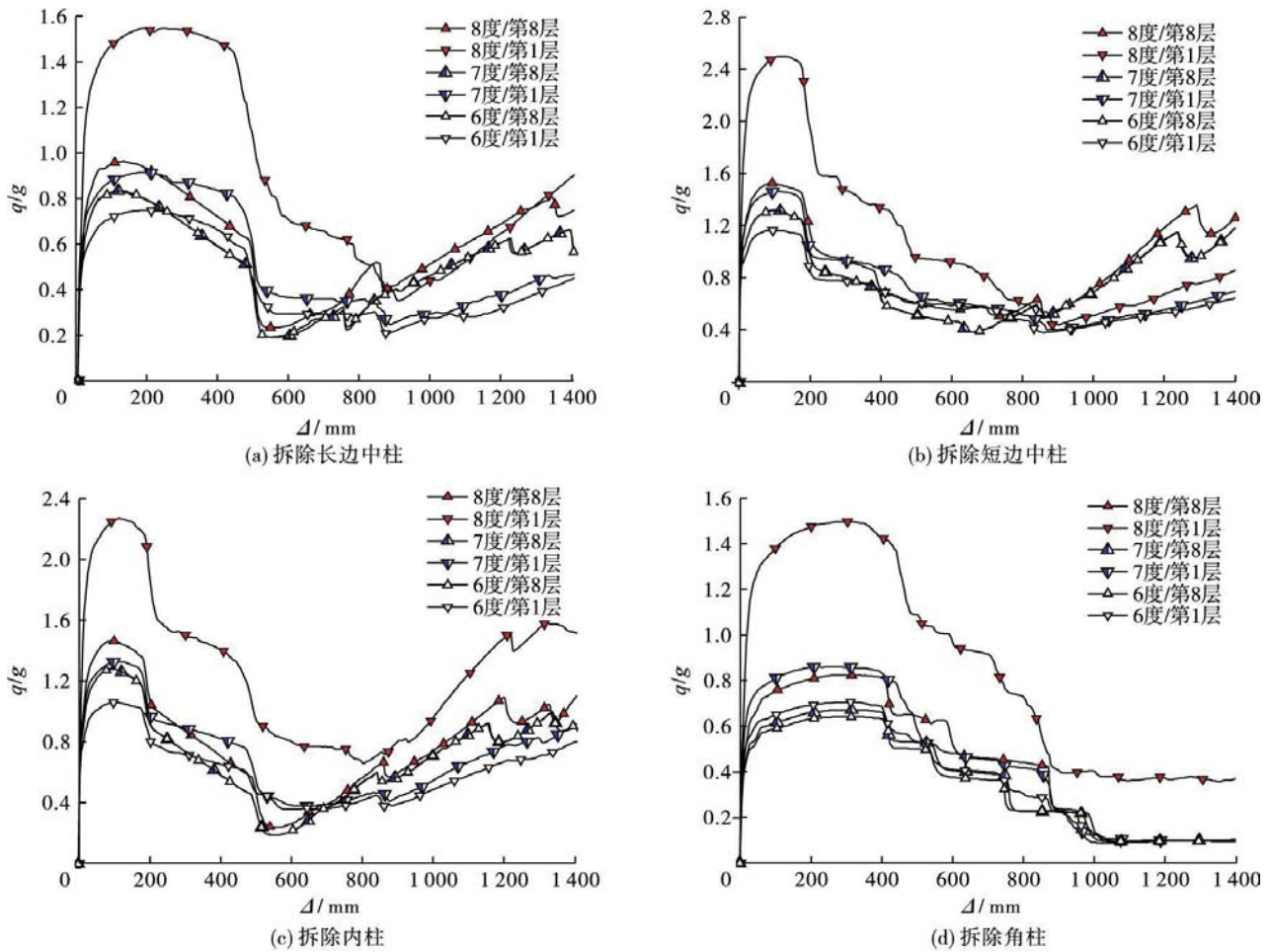


图 7 不同抗震设防烈度框架的 Pushdown 分析结果比较

Fig 7 Comparison of Pushdown analysis for frames with different seismic fortification levels

### 5 楼板的影响

图 8 给出了第 8 层各拆除工况下整体现浇楼板框架和非整体现浇楼板框架的 Pushdown 分析结果, 三个抗震设防烈度的框架均进行了比较. 其他部位的结果与之类似, 限于篇幅未列出.

#### 5.1 楼板影响下的梁机制承载力分析

由于楼板钢筋提高了框架梁端部的抗弯承载力, 3 个抗震设防烈度下的整体现浇楼板框架其顶部梁机制的承载力都比非整体现浇楼板框架高明显增高, 如图 8 所示. 同时楼板的存在使得部分工况的梁机制破坏提前, 如长边和内部部位有效翼缘范围较大, 框架梁的端部负弯矩钢筋增加较多, 因此出现了超筋弯曲破坏, 塑性铰的失效要早于非整体现浇楼板框架, 如图 8(a) 和图 8(c) 所示.

#### 5.2 楼板影响下的悬链线机制承载力分析

悬链线机制的承载力由两个因素决定:

(1) 梁机制端部塑性铰的失效. 塑性铰的提前失效使得悬链线机制发挥作用的变形也提前,

以内部区域为例, Y 向内梁的跨度只有 2.7 m, 该梁的塑性铰最先破坏, 这导致整体现浇楼板框架的 Y 向框架梁在结点位移达到 250 mm 后开始进入悬链线作用阶段, 结构该区域的抗连续倒塌相对承载力开始上升, 直至 X 向框架梁的塑性铰也发生破坏. 相比之下, 框架短边部位的跨中梁有效翼缘较窄, 楼板钢筋贡献有限, 没有发生超筋弯曲破坏, 整体现浇楼板框架在梁机制作用下的塑性铰破坏与非整体现浇楼板基本同步.

(2) 楼板钢筋的轴向拉力贡献. 这是因为参与工作的楼板宽度越大, 板内钢筋提供的拉结力就越高, 该结构区域在悬链线机制作用下的抗连续倒塌相对承载力就越高. 其中, 内部区域框架梁两侧楼板的有效翼缘宽度最大, 因此结构内部区域的抗连续倒塌相对承载力在楼板的影响下提高最大, 如图 8(c) 所示. 而框架短边部位的跨中梁有效翼缘较窄, 楼板钢筋贡献有限, 因此悬链线机制作用下的相对承载力变化不大, 如图 8(b) 所示. 楼板对结构长边处 X 向边缘框架梁的增强效果介于上述两者之间, 结果如图 8(a) 所示.

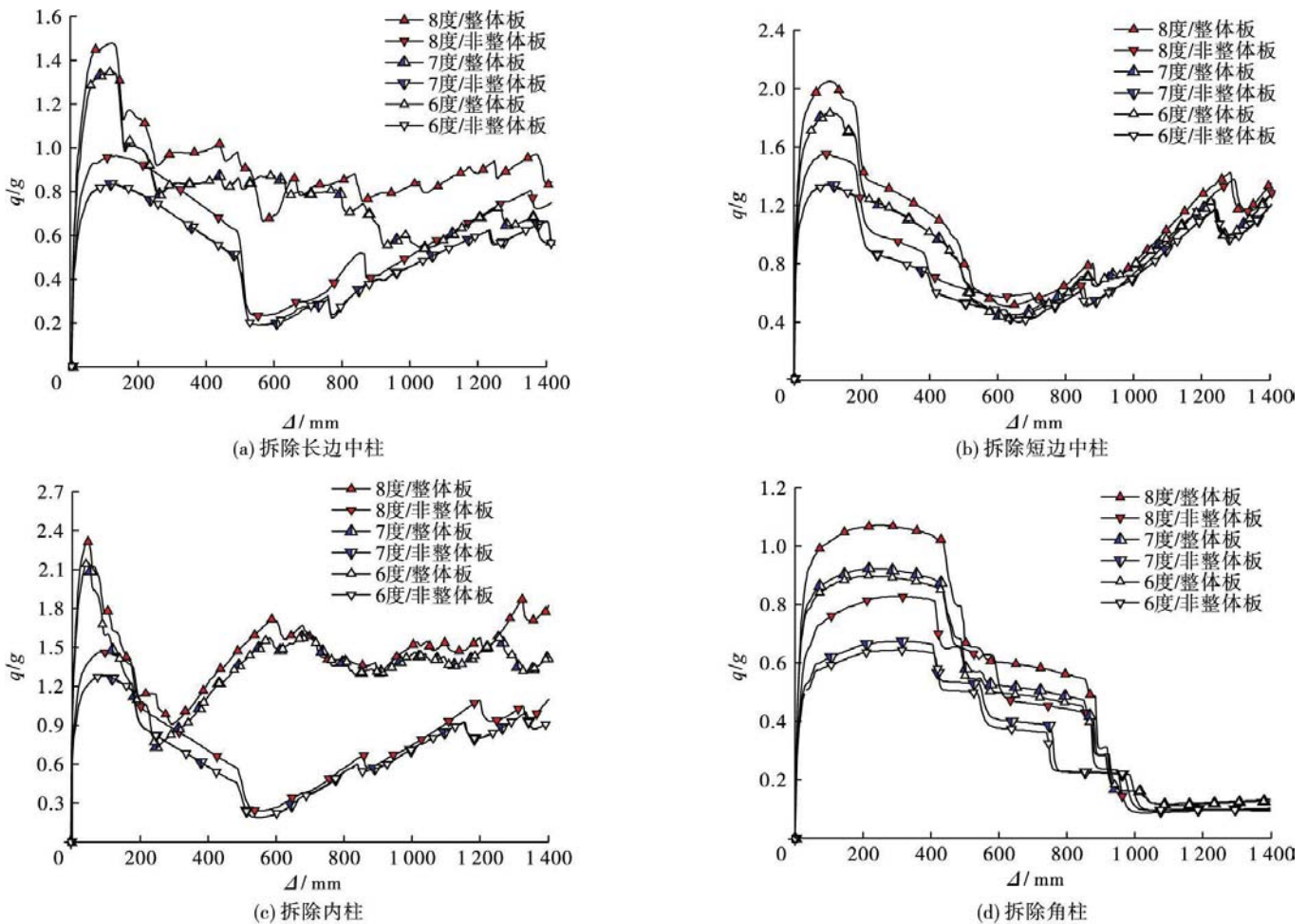


图 8 非整体现浇楼板框架和整体现浇楼板框架的 Pushdown 分析结果比较 (第 8 层拆除工况)

Fig 8 Comparisons of Pushdown analysis for non-integrated slab frame and integrated cast in situ slab frame (removed columns on 8th floor)

框架角部框架梁缺乏水平约束,不能发挥悬链线机制作用,如图 8(d)所示,因此不加以讨论。

综上所述,考虑楼板贡献后,结构内部的悬链线机制的相对承载力被显著增强,而角部和边缘部位的增强不显著。

## 6 结 论

(1)对低抗震设防烈度设计的框架结构,其顶部单层框架的抗连续倒塌相对承载力较高,而多层框架共同作用时的不均匀内力发展,导致结构下部的抗连续倒塌相对承载力下降。

(2)抗震设计显著增强了结构梁机制的相对承载力,而对悬链线机制的相对承载力的增强效果不明显。并且由于结构底部的抗震配筋增幅较大,底部相应的抗连续倒塌相对承载力增幅大于顶层。

(3)楼板对于框架结构梁机制的相对承载力提高较为明显,而对于悬链线机制的相对承载力的贡献取决于楼板参与共同作用的有效翼缘宽

度,其中楼板对结构内部的悬链线机制的相对承载力增强较为明显,而对角部和边缘部位的增强不显著。

## 参考文献:

- [ 1 ] Ellingwood B R. Mitigating risk from abnormal loads and progressive collapse[ J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2006, 20( 4): 315– 323
- [ 2 ] United States General Services Administration (GSA). GSA 2003 progressive collapse analysis and design guidelines for new federal office buildings and major modernization projects[ S]. Washington, D. C: United States General Services Administration, 2003.
- [ 3 ] Department of Defense (DoD). DoD 2010. Design of structures to resist progressive collapse[ S]. Washington, D. C: Department of Defense, 2010
- [ 4 ] 周健, 陈素文, 苏骏, 等. 虹桥综合交通枢纽结构连续倒塌分析研究[ J]. 建筑结构学报, 2010, 31( 5): 174– 180  
(Zhou Jian, Chen Suwen, Su Jun, et al. Progressive collapse analysis of a building in Hongqiao communication junction[ J]. Journal of Building Structures, 2010, 31( 5): 174– 180.)

- [ 5 ] 梁益, 陆新征, 李易, 等. 国外 RC 框架抗连续性倒塌设计方法的检验与分析 [ J ]. 建筑结构, 2010, 40 ( 2 ): 8- 12  
( Liang Yi Lu X inzheng, Li Yi et al Verification and analysis on foreign progressive collapse prevention design methods of RC frame structures [ J ]. Building Structures, 2010, 40(2): 8- 12 )
- [ 6 ] 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 [ J ]. 建筑结构学报, 2007, 28 ( 5 ): 104- 109.  
( Yi W eijian He Q ingfeng X iao Yan Collapse performance of RC frame structure [ J ]. Journal of Building Structures, 2007, 28(5): 104- 109. )
- [ 7 ] Khandelwal K. Multi-scale computational simulation of progressive collapse of steel frames [ D ]. Michigan Department of Civil Engineering in University of Michigan, 2008
- [ 8 ] Kim J A n D. Evaluation of progressive collapse potential of steel moment frames considering catenary action [ J ]. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2009, 18(4): 455- 465
- [ 9 ] Kim T, Kim J Pak J Investigation of progressive collapse-resisting capability of steel moment frames using push-down analysis [ J ]. Journal of Performance of Constructed Facilities, ASCE, 2009, 23(5): 327- 335
- [ 10 ] Lu D G, Cui S S, Song P Y, Chen Z H. Robustness assessment for progressive collapse of framed structures using pushdown analysis method [ C ]. Singapore Research Publishing Services 4th International Workshop on Reliable Engineering Computing, 2010
- [ 11 ] M S C. Software Corporation User Documentation Volume A: Theory and User Information [ CP ], Los Angeles M S C. Software Corporation, 2007.
- [ 12 ] Huang Y. Simulating the inelastic seismic behavior of steel braced frames including the effects of low-cycle fatigue [ D ]. California Department of Civil Engineering in University of California at Berkeley, 2009.
- [ 13 ] Sasanian M. Response of a reinforced concrete infilled-frame structure to removal of two adjacent columns [ J ]. Engineering Structures, 2008, 30(9): 2478 - 2491.
- [ 14 ] 中华人民共和国建设部. GB50010- 2002 混凝土结构设计规范 [ S ]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.  
( Ministry of Construction of the People's Republic of China GB 50010- 2002 Code for design of concrete structures [ S ]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002. )
- [ 15 ] Khandelwal K, ElTawil S. Assessment of progressive collapse residual capacity using pushdown analysis [ C ]. Vancouver Anderson D, Ventura C, Harvey D, Hoot M, Proceedings of the 2008 Structures Congress ASCE, 2008.