

文章编号: 2095-1922(2011)03-0409-09

# 超级巨柱的弹塑性受力特性及其简化模型

陆新征<sup>1,2</sup>, 张万开<sup>2</sup>, 卢 啸<sup>2</sup>, 柳国环<sup>2</sup>

(1. 上海建筑科学研究院上海市工程结构新技术重点实验室, 上海 200032)

2. 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)

**摘要:**目的 研究了巨型柱弹塑性受力特点及其简化计算模型,以解决某超高层建筑中最大截面面积达 20m<sup>2</sup>的超级巨柱难以甚至无法较好地通过现有试验设备进行试验研究的现实问题.方法 采用 MSC.MARC 有限元软件建立巨型柱的精细化模型,给出分析其受力性能的具体实施方案;考察巨型柱对 von Mises 准则和 Ducker-Prager 准则差别的敏感性,分析其弹塑性受力特性和相应变化规律;提出简化巨型柱模型的建模途径,并与精细化模型计算结果相对比.结果 巨型柱受力性能对不同屈服准则敏感性弱,约束对变形能力有一定影响,工程意义上可以忽略;简化模型与精细模型的计算结果吻合情况较好,合理、易行.结论 巨型柱简化分析模型可供整体结构的地震倒塌模拟参考.

**关键词:**有限元方法;巨型柱;弹塑性;地震;倒塌

中图分类号: P315.9; U442 文献标志码: A

## Elasto-Plastic Mechanical Behavior of Detailed Finite Element Model and Simplified Model of Mega-Columns

LU Xinzheng<sup>1,2</sup>, ZHANG Wankai<sup>2</sup>, LU Xiao<sup>2</sup>, LIU Guohuan<sup>2</sup>

(1. Shanghai Key Laboratory of New Technology Research on Engineering Structure, SRIBS, Shanghai, China 200032)

2. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Key Laboratory of Civil Engineering Safety and Durability of China Education Ministry, Beijing, China 100084)

**Abstract** Mega-columns with a solid section area of nearly 20m<sup>2</sup> are used in super high-rise buildings. However, their fundamental mechanical behaviors are very difficult to be studied with current experiment equipments and technology. In order to solve this problem, this paper discusses the elasto-plastic behavior of the mega-columns and establishes the corresponding simplified models. Firstly, detailed finite element models of the mega-columns are built up with solid elements based on the general purpose finite element program - MSC.MARC. Typical bad cases are applied on the detailed FE model. Then, the influences of two widely used yield criteria (von Mises criterion and Ducker-Prager criterion) of concrete are discussed. The comparisons indicate that the mechanical characters of the mega-columns are not sensitive to the yield criteria, and the confinement will have some influence on the deformation capacity. However, such differences can be ignored in practical use. The methodology to build up the simplified models of the mega-columns is presented and the results of the simplified model agree well with the results of the detailed FE model. The workload of the simplified model is much smaller than the detailed FE model. So it can be used in global structural elasto-plastic analysis and collapse simulation.

**Key words** finite element method; mega-column; elasto-plasticity; earthquake; collapse

收稿日期: 2011-01-10

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(90815025); 上海市工程结构新技术重点实验室开放课题(2010-KF04)

作者简介: 陆新征(1978-), 男, 副教授, 博士, 主要从事结构非线性仿真及防灾减灾研究.

近年来,随着超高层建筑的大量新建,巨型结构体系得到了广泛应用.国内外建设的 500m 以上超高层建筑,大多采用了巨柱-核心筒-伸臂桁架结构体系.超级巨柱的特点:截面尺寸特别巨大,单柱截面尺寸超过  $20\text{m}^2$ ,甚至达到  $40\text{m}^2$ ;内置巨型钢骨,组成钢骨混凝土或钢骨-钢管-钢筋混凝土叠合柱.由于这些超级巨柱体积特别巨大,无法完全依赖试验研究其受力特性.同时,由于这些超高层建筑结构体系非常复杂,构件数量特别众多,所以工程中也提出了对简单而准确的巨柱计算模型的需求.因此,笔者以一个典型巨柱为例,研究其弹塑性受力特点及其可用于整体结构分析的简化计算模型.简化模型合理、易行,可供整体结构地震倒塌模拟参考.

### 1 超级巨柱截面

超级巨柱的典型截面如图 1 所示.长边长度达到 5 300mm,短边长度为 3 700mm.截面总含钢率 7.38%.混凝土强度等级为 C70 受力纵筋强度等级为 HRB40Q 核心型钢强度等级为 Q345 箍筋强度等级为 HRB335 为了便于讨论,定义沿截面长边方向为强轴方向 (Y 轴),沿截面

短边方向为弱轴方向 (X 轴).

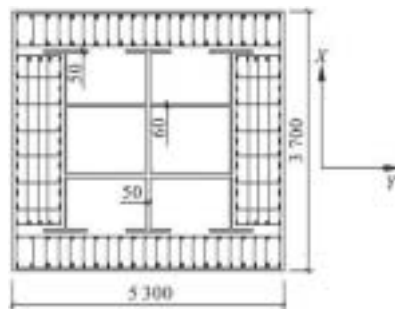


图 1 超级巨型柱截面示意图

Fig 1 The cross section of typical Megacolumn

## 2 精细化模型及其受力性能

### 2.1 有限元模型

为研究超级巨柱的受力特点,采用通用有限元软件 MSC. Marc 建立精细化有限元模型 (见图 2),具体包括:混凝土部分、钢筋笼和核心型钢三部分 (见图 3).混凝土和核心型钢采用实体单元,钢筋笼采用桁架单元.核心型钢和钢筋笼通过有限元软件 Marc 提供的内嵌钢筋 Insert 命令插入混凝土单元中,使混凝土和钢筋变形协调<sup>[1]</sup>.

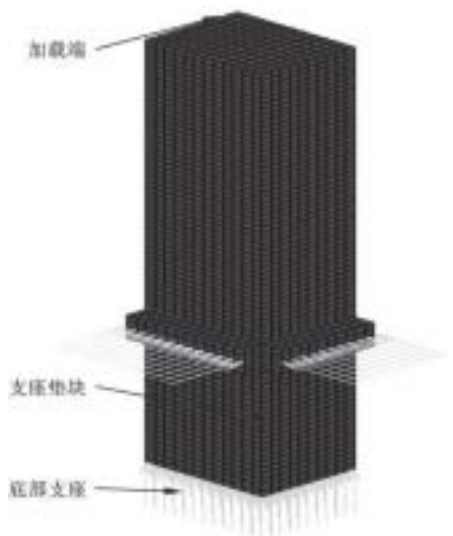


图 2 超级巨柱的精细有限元模型

Fig 2 Detailed finite element model of the Megacolumn

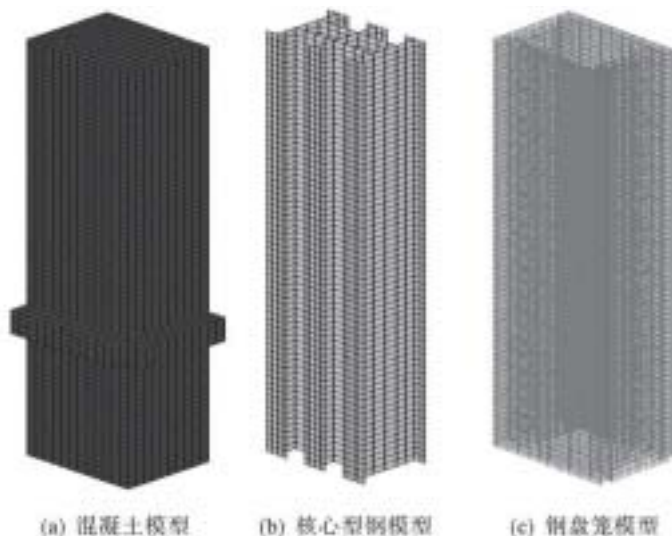


图 3 超级巨柱主要组分的有限元模型

Fig 3 Finite element models of main components of the Megacolumn

### 2.2 材料模型

在超级巨柱中,比较难以确定的是巨柱中钢筋、钢骨和混凝土的相互作用.因为钢筋、钢筋对混凝土都有一定的约束作用,进而可能影响混凝土

的峰值强度和变形能力<sup>[2-6]</sup>.为了考察钢筋、钢骨对混凝土的约束影响,分别采用两种不同的弹塑性模型 (von Mises 屈服准则, VM 准则) 和 Ducker-Prager 屈服准则, DP 准则) 来进行计算,

以考察计算结果对混凝土本构模型的敏感程度. VM 准则不考虑静水压力对屈服强度的影响, 而 DP 准则可以更好的考虑摩擦型材料 (混凝土、岩土) 屈服承载力随约束增加而增大的特性. DP 准则摩擦角取值根据 K ufer 的实验, 取混凝土双轴强度  $f_{bc} = 1.2f_c$  ( $f_c$  为混凝土单轴强度)<sup>[7]</sup>. 为了考察采用 DP 准则和 VM 准则计算得到的结果的差异性, 分别用两个准则计算了巨柱在轴压、无轴压推覆以及不同轴压下单轴推覆等工况, 并比较结果.

混凝土单轴受压应力应变关系曲线在美国学者 H ongne stad 提出的 H ongne stad 曲线基础上改造而来. H ongne stad 曲线的数学表达式为

上升段:

$$\sigma = \sigma_0 \left[ 2 \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right) - \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^2 \right], \quad \varepsilon \leq \varepsilon_0, \quad (1)$$

下降段:

$$\sigma = \sigma_0 \left[ 1 - 0.15 \left( \frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{\varepsilon_n - \varepsilon_0} \right) \right], \quad \varepsilon_0 < \varepsilon \leq \varepsilon_n. \quad (2)$$

式中:  $\sigma_0$  为混凝土峰值压应力,  $\varepsilon_0$  为相应于峰值压应力的压应变,  $\varepsilon_n$  为混凝土极限压应变<sup>[7]</sup>. 在计算中采用的混凝土单轴受压  $\sigma - \varepsilon_{ep}^p$  关系曲线如图 4 所示,  $\varepsilon_{ep}^p$  为等效塑性应变.

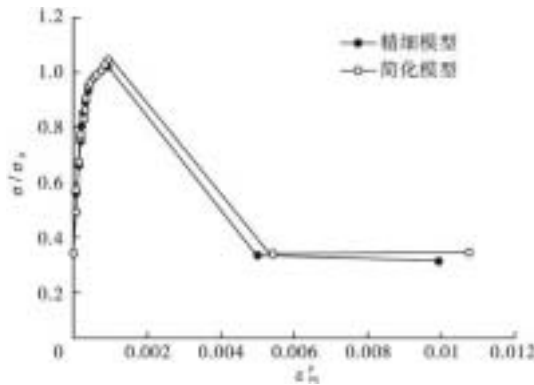


图 4 混凝土单轴受压  $\sigma - \varepsilon_{ep}^p$  关系曲线

Fig 4 Uniaxial Compress  $\sigma$  and  $\varepsilon_{ep}^p$  relation of concrete

模型中的钢材采用基于 von Mises 准则的弹塑性本构模型, 骨架线采用汪训流模型, 如图 5 所示.

### 2.3 具体加载方案

采用图 6 所示加载方式进行加载, H 为截面高度. 先在柱顶施加轴压力, 然后在柱顶施加逐步增大的水平位移, 可以得到不同轴压下的荷载 - 位移关系.

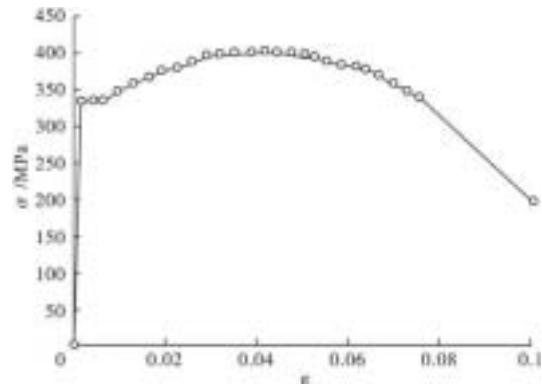


图 5 钢材骨架线模型

Fig 5 Stress and strain relation of steel

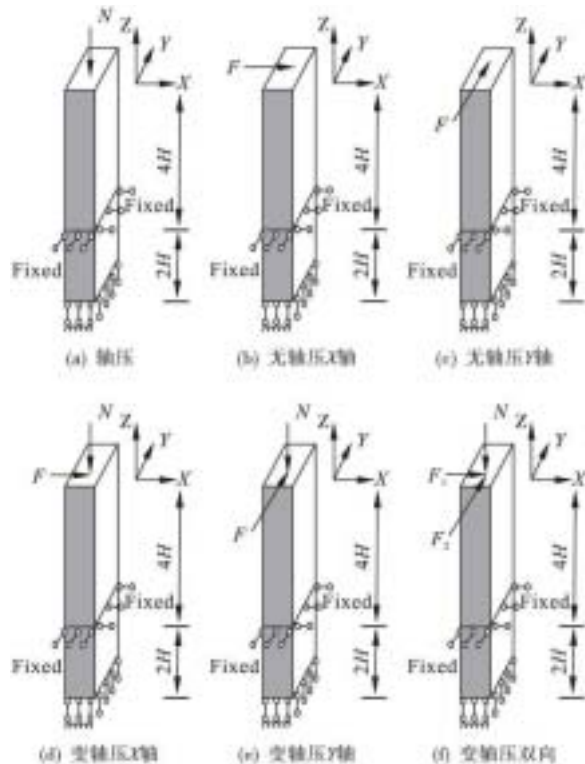


图 6 加载方式示意图

Fig 6 Sketch of loading pattern

### 2.4 DP 和 VM 准则计算结果比较

图 7~10 为不同荷载工况下 VM 准则和 DP 准则计算结果的对比. 虽然 DP 准则对约束更为敏感, 但是从计算结果可以看出, 二者差异并不是很大, 表明对于超级巨柱这样的巨型截面, 约束对承载力和受力曲线上段影响较小, 对延性有一定影响, 但是也不是很大. 所以在简化模型中, 可以采用基于 von Mises 准则的简单材料本构模型来模拟混凝土.

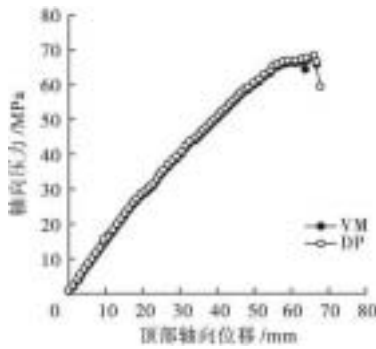


图 7 纯轴压下采用不同准则的轴向力-位移曲线

Fig 7 Axial load-displacement curves under axial force between yield different criteria

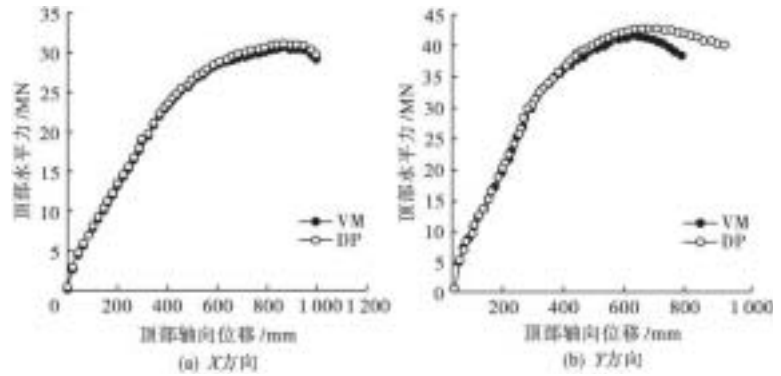


图 8 无轴压下采用不同准则的水平力位移曲线

Fig 8 Horizontal load-displacement curves without axial force between different yield criteria

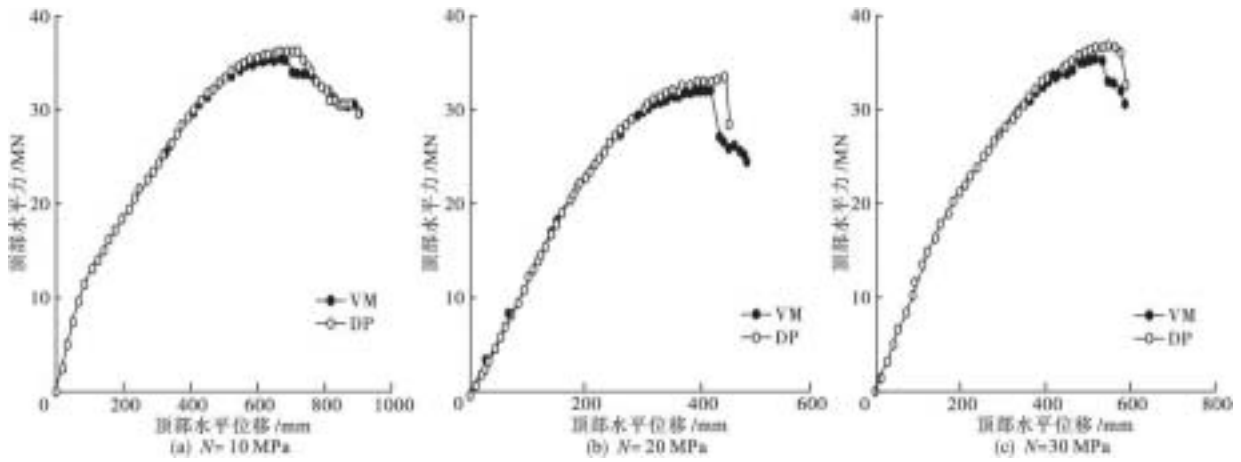


图 9 不同轴压下采用不同准则的 X 轴单向推覆的水平力-位移关系

Fig 9 Horizontal load-displacement curves in X direction under different axial forces with different yield criteria

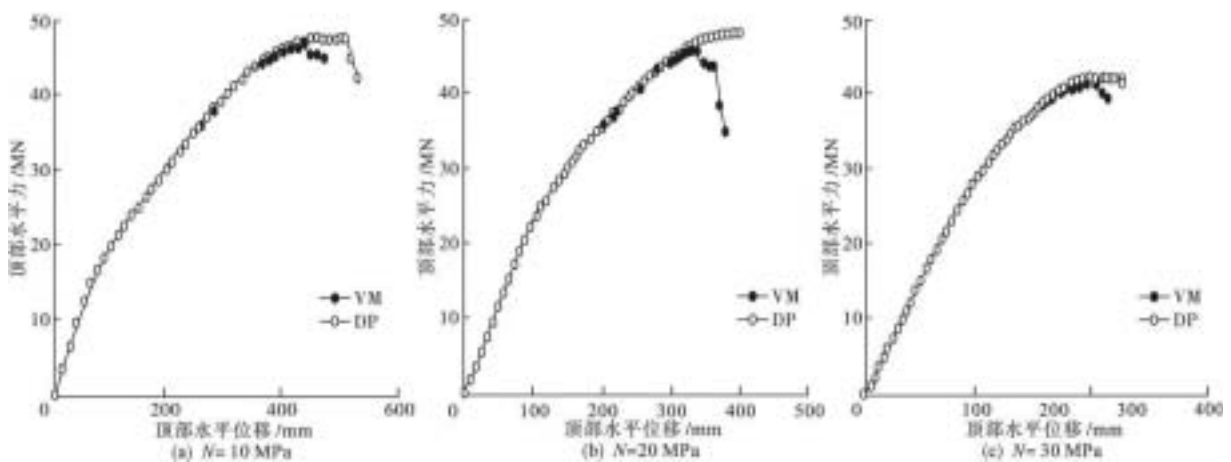


图 10 不同轴压下采用不同准则的 Y 轴单向推覆的水平力-位移关系曲线

Fig 10 Horizontal load-displacement curves in Y direction under different axial forces with different yield criteria

### 3 简化模型

#### 3.1 模型简化的意义

结构的弹塑性分析计算量大、耗时长, 尤其是大型复杂结构的弹塑性分析<sup>[8-10]</sup>. 上节的超级巨柱精细化模型单元数目高达 8 万, 由此可见按照这种单元划分密度进行整体结构建模, 单元数目将非常巨大, 会导致弹塑性分析时对计算机能力的要求非常高, 同时也将耗费超长的计算时间. 同时, 又由于超级巨柱截面尺寸远大于常规柱子, 常规的梁单元已经无法满足计算精度要求<sup>[11-13]</sup>. 鉴于此, 笔者在满足计算精度的前提下, 对模型进行合理简化, 以减小整体结构分析的工作量, 提高整体结构弹塑性分析的效率.

#### 3.2 简化模型的选用与建模方法

针对巨型柱“截面面积大”这一几何特性, 同时考虑计算精度, 将常用于模拟剪力墙的分层壳单元应用于模拟巨型柱(层面平行于巨型柱的长边方向)<sup>[14-15]</sup>. 如图 11 所示, 沿截面弱轴方向分层, 根据柱截面各部分材料的相对位置进行设置: 最外层为混凝土层, 沿截面强轴(Y 轴)方向的每列受力纵筋合并成一个钢筋层, 每两列受力纵筋之间的混凝土设为一层, 受力纵筋与核心型钢之间的混凝土为一层, 型钢截面中间部分的大块混凝土平均划分成若干层, 共分为 21 层(见图 11b); 垂直分层方向的核心型钢和受力纵筋采用独立的桁架单元模拟, 并与分层壳模型结点耦合. 钢筋保护层厚度取 50 mm, 各部分材料定位取形心位置. 精细模型与简化模型单元数和节点数如表 1 所示. 简化模型计算的工况设置与加载方式与精细模型计算对应一致.

#### 3.3 箍筋约束效应的处理方法

简化模型不能直接模拟钢骨和箍筋的约束作用. 虽然 2.4 节计算已经表明对于超级巨柱约束的影响并不明显, 但为了更准确考虑约束作用, 适当提高了混凝土应力-应变曲线的峰值和软化段, 提高的幅度通过不断对比简化模型和精细模型的计算结果确定, 最终确定简化模型采用的混凝土应力-应变曲线如图 4 所示. 峰值应力提高 4%, 软化段也提高 4%.

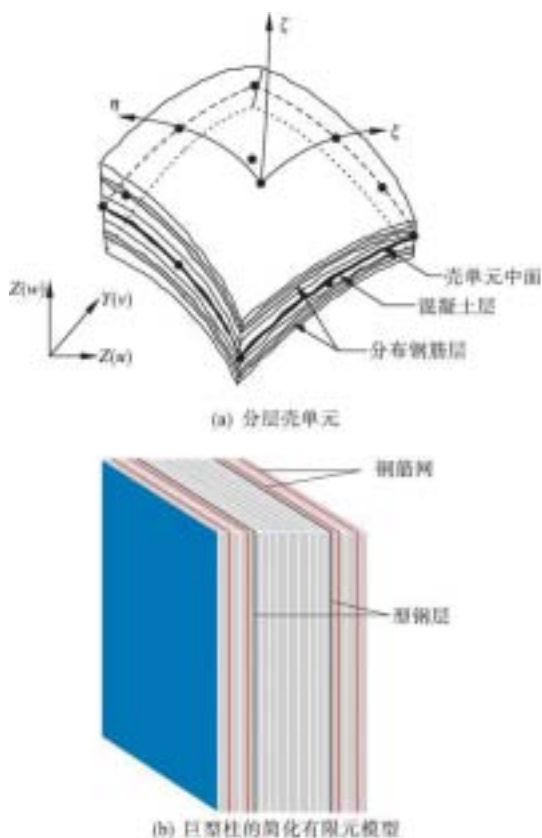


图 11 分层壳和巨型柱的有限元模型

Fig 11 Finite element model of multi layer shell and the Megacolumn

表 1 精细模型与简化模型单元数和节点数

Table 1 The numbers of nodes and elements of the detailed and simplified model of the Megacolumn

数目	精细模型	简化模型
单元	86 563	706
节点	54 542	400

### 4 简化与精细化模型计算结果对比

图 12~图 19 为简化模型与精细化模型计算结果的对比, 从对比可知, 两种模型计算得到的水平力位移曲线上段基本相近, 而个别算例曲线的下降段有一定差异, 简化模型计算得到的曲线发生陡降或者是阶梯形变化. 其原因是因为简化模型的单元数目少, 单个单元混凝土出现压碎时对整体受力性能的影响较大, 引起受力曲线整体的阶梯形剧烈变化. 而精细化模型因为单元数量较多, 单个单元压碎引起的突变较小, 整体曲线较为平缓光滑.

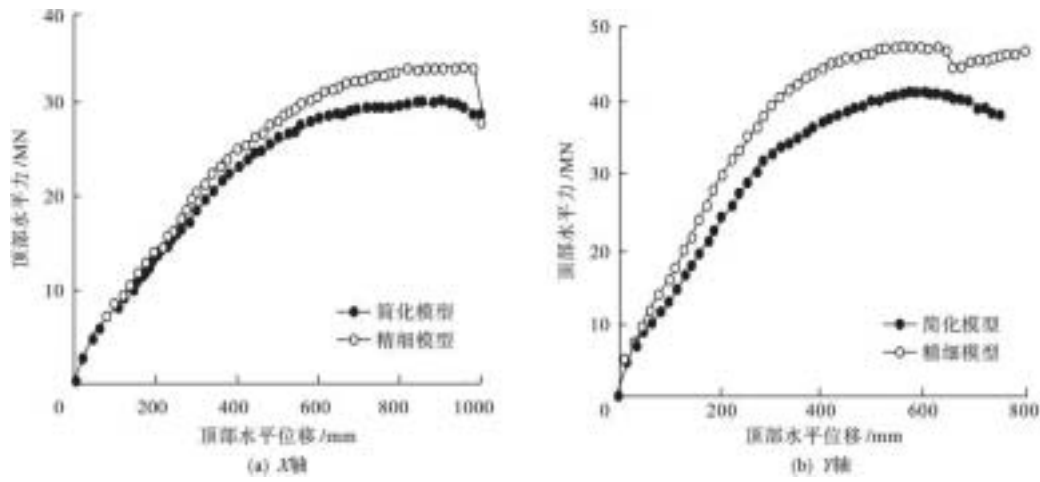


图 12 无轴压下单向推覆水平力位移曲线

Fig. 12 Horizontal load-displacement curves in single direction without axial force

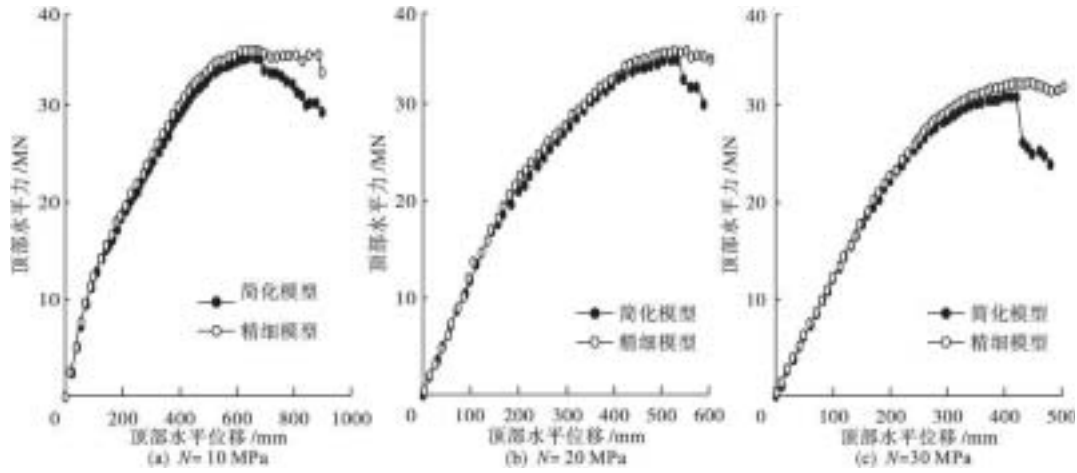


图 13 不同轴压下 X 轴(弱轴)水平力位移曲线

Fig. 13 Horizontal load-displacement curves in X direction under different axial forces

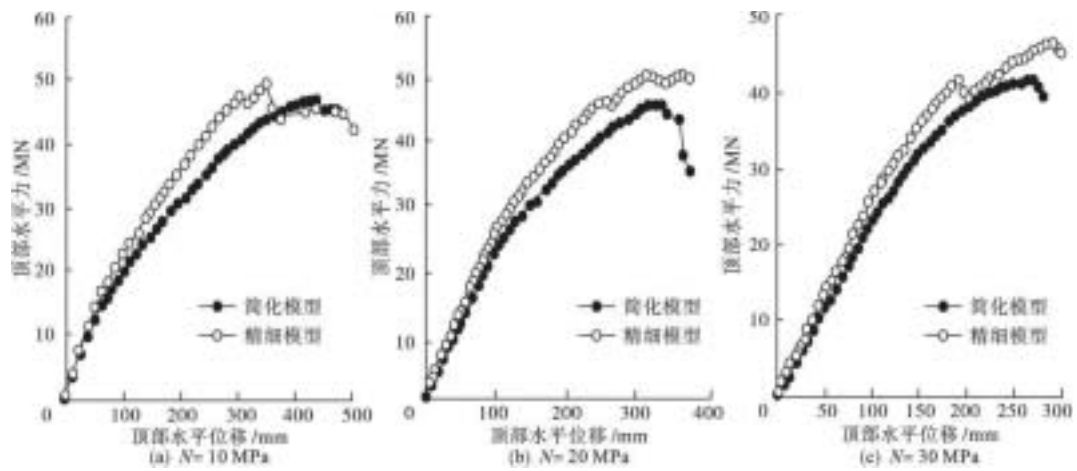


图 14 不同轴压下 Y 轴(强轴)水平力位移曲线

Fig. 14 Horizontal load-displacement curves in Y direction under different axial forces

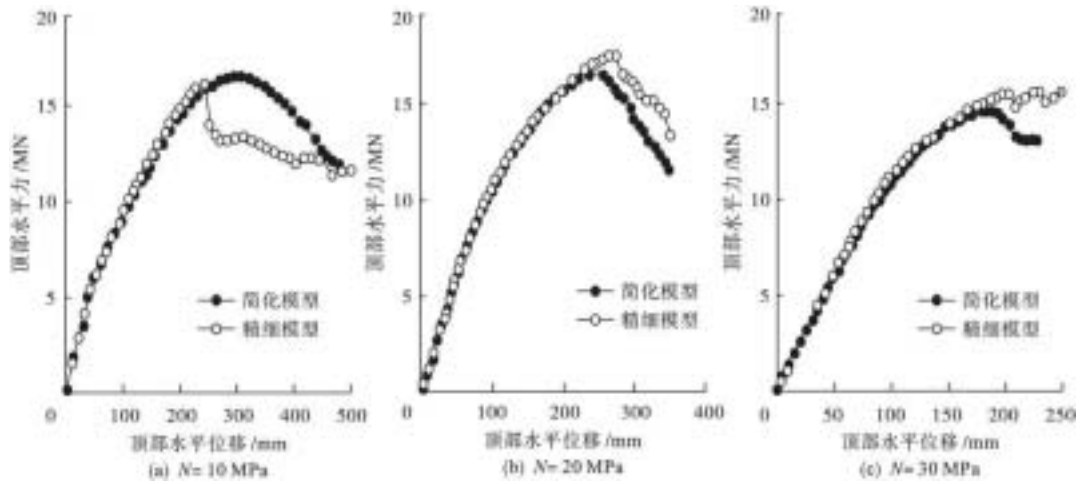


图 15 不同轴压下双向 I-1 推覆 X 轴(弱轴)水平力位移曲线

Fig 15 Horizontal load-displacement curves in X direction under different axial forces in biaxial directions I-1

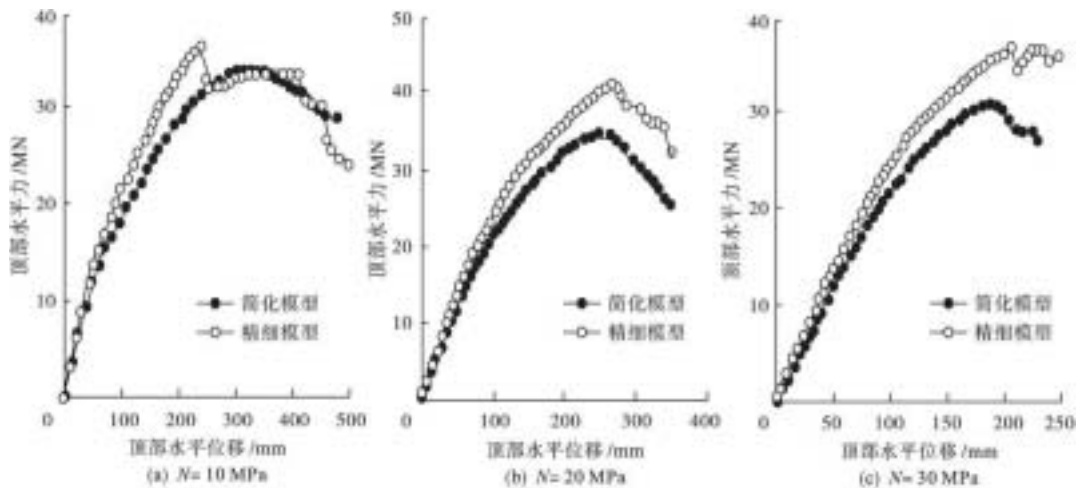


图 16 不同轴压下双向 I-1 推覆 Y 轴(强轴)水平力位移曲线

Fig 16 Horizontal load-displacement curves in Y direction under different axial forces in biaxial directions I-1

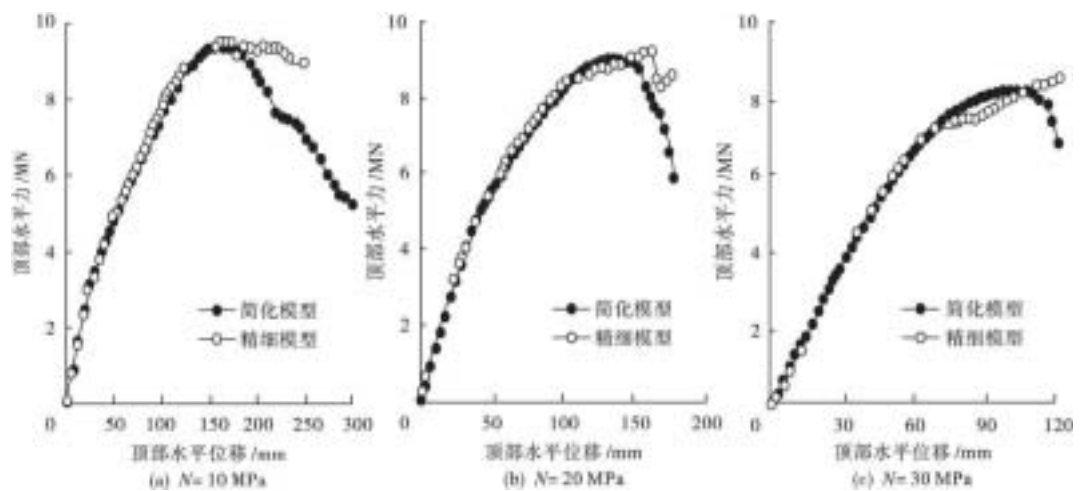


图 17 不同轴压下双向 I-2 推覆 X 轴(弱轴)水平力位移曲线

Fig 17 Horizontal load-displacement curves in X direction under different axial forces in biaxial directions I-2

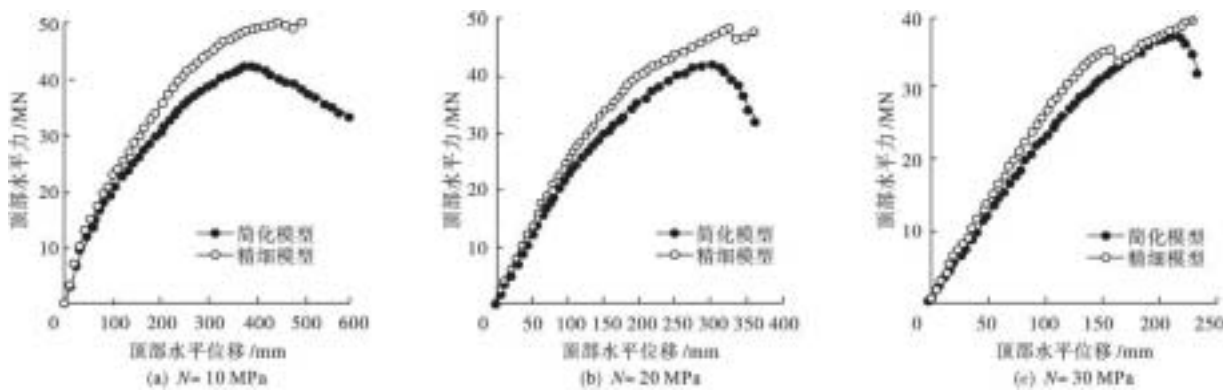


图 18 不同轴压下双向 1:2 推覆 Y 轴(强轴)水平力位移曲线

Fig 18 Horizontal load displacement curves in Y direction under different axial forces in biaxial directions 1:2

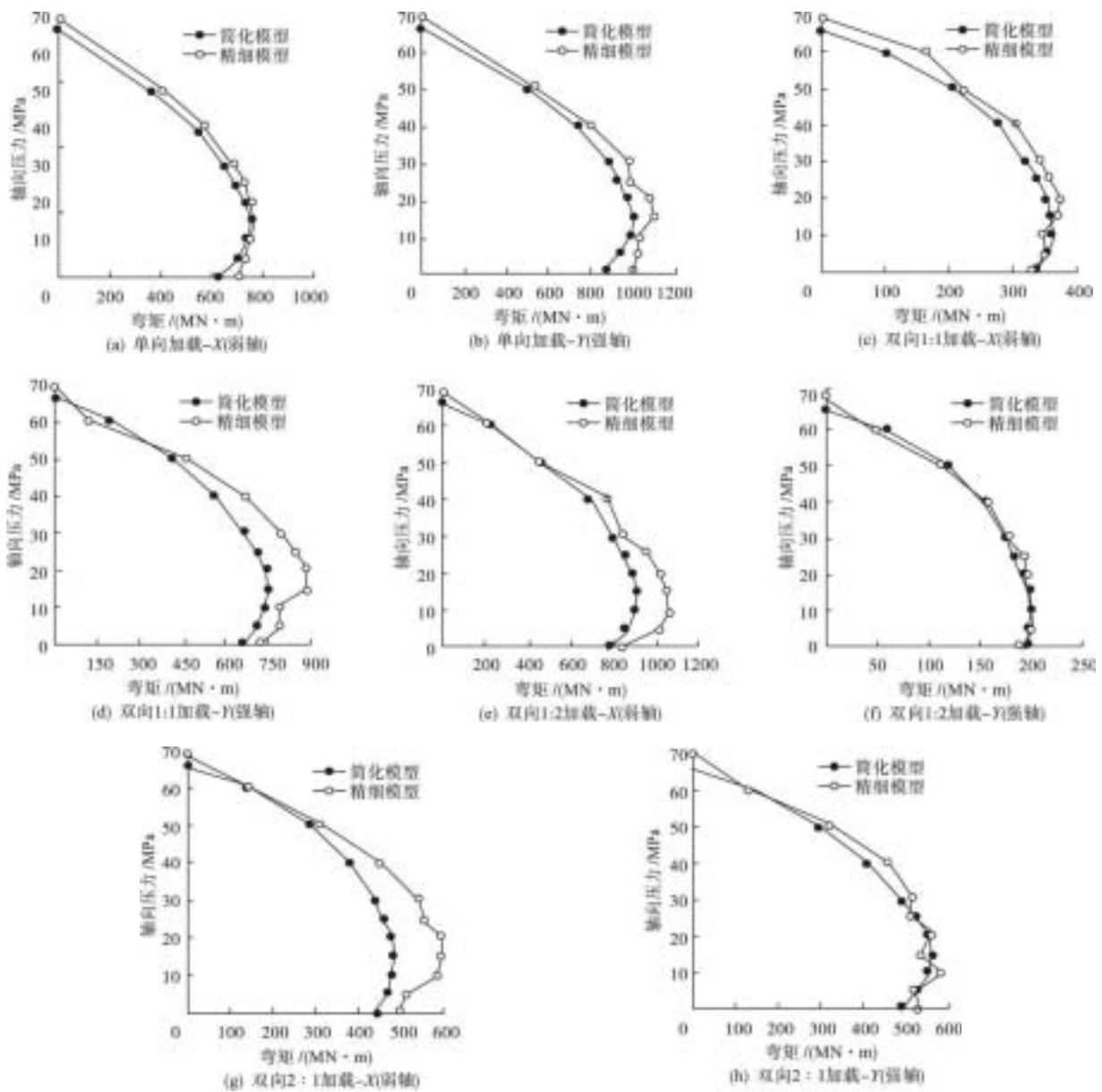


图 19 典型工况下轴力 - 弯矩相关关系曲线

Fig 19 The interaction curves between axial force and bending moment under typical load cases



从简化模型与精细模型计算得到的典型工况下轴力弯矩相关关系曲线对比结果可知, 轴力弯矩相关关系曲线总体相近; 二者在高轴压段吻合情况优于低轴压段; 个别轴压下, 简化模型与精细模型差异较大。

## 5 结 语

(1) 针对超高层建筑中近年来得到大量应用的超级巨柱, 通过精细化有限元模型研究了其弹塑性受力特点, 比较了不同弹塑性模型计算结果的差别。对于超级巨柱其承载力和刚度对约束不敏感, 约束对变形能力有一定影响, 但在工程意义上可以忽略。

(2) 运用分层壳模型对巨型柱精细模型进行简化, 并与精细化模型进行了比较。在大部分工况下, 简化模型与精细模型的计算结果吻合情况较好; 在个别轴压情况下, 简化模型与精细模型的计算结果差异较大, 需要进一步深入研究。

### 参考文献:

- [ 1 ] 陆新征, 叶列平, 缪志伟. 建筑抗震弹塑性分析 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.  
(Lu Xinzhen, Ye Lieping, Miao Zhiwei. Elastic-plastic analysis of buildings against earthquake[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.)
- [ 2 ] 韩林海, 冯九斌. 混凝土的本构关系模型及其在钢管混凝土数值分析中的应用 [J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1995, 28(5): 26-31.  
(Han Linhai, Feng Jiubin. Constitutive relations of concrete and its applications in the integral analysis of concrete filled steel tube[J]. Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture, 1995, 28(5): 26-31.)
- [ 3 ] Légeron F, Paulin P. Uniaxial confinement model for normal and high-strength concrete columns [J]. Journal of Structural Engineering ASCE, 2003, 129(2): 241-252.
- [ 4 ] Esmaily A, Xiao Y. Behavior of reinforced concrete columns under variable axial loads analysis [J]. ACI Structural Journal, 2005, 102(5): 736-744.
- [ 5 ] Mander J B, Priestley M J N, Park R. Theoretical stress-strain model for confined concrete [J]. Journal of Structural Engineering ASCE, 1988, 114(8): 1804-1825.
- [ 6 ] 江见鲸. 关于钢筋混凝土数值分析中的本构关系 [J]. 力学进展, 1994, 24(1): 117-123.  
(Jiang Jianjing. Constitutive relations for numerical analysis of reinforced concrete [J]. Advances in Mechanics, 1994, 24(1): 117-123.)
- [ 7 ] 江见鲸, 陆新征, 叶列平. 混凝土结构有限元分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.  
(Jiang Jianjing, Lu Xinzhen, Ye Lieping. Finite elements analysis of concrete structures [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.)
- [ 8 ] Meguro K, Hakuno M. Fracture analyses of concrete structures by the modified distinct element method [J]. Structural Engineering/Earthquake Engineering, 1989, 6(2): 283-294.
- [ 9 ] Meguro Kin-iro, Hakuno Motohiko. Application of the extended distinct element method for collapse simulation of a double-deck bridge [J]. Structural Engineering/Earthquake Engineering, 1994, 10(4): 175-185.
- [ 10 ] Légeron F, Paulin P, Mazar J. Damage mechanics modeling of nonlinear seismic behavior of concrete structures [J]. Journal of Structural Engineering ASCE, 2005, 131(6): 946-954.
- [ 11 ] 宣纲, 顾祥林, 吕西林. 强震作用下混凝土框架结构倒塌过程的数值分析 [J]. 地震工程与工程振动, 2003, 23(6): 24-30.  
(Xuan Gang, Gu Xianglin, Lu Xiling. Numerical analysis of collapse process for RC frame structures subjected to strong earthquakes [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2003, 23(6): 24-30.)
- [ 12 ] 秦东, 范立础. 钢筋混凝土结构倒塌全过程数值模拟 [J]. 同济大学学报, 2001, 29(1): 80-84.  
(Qin Dong, Fan Lichu. Numerical simulation on collapse process of reinforced concrete structures [J]. Journal of Tongji University, 2001, 29(1): 80-84.)
- [ 13 ] Hakuno Motohiko, Meguro Kin-iro. Simulation of concrete frame collapse due to dynamic loading [J]. Journal of Engineering Mechanics ASCE, 1993, 119(9): 1709-1723.
- [ 14 ] 林旭川, 陆新征, 缪志伟, 等. 基于分层壳单元的 RC 核心筒结构有限元分析和工程应用 [J]. 土木工程学报, 2009, 42(3): 49-54.  
(Lin Xuchuan, Lu Xinzhen, Miao Zhiwei, et al. Finite element analysis and engineering application of RC core tube structures based on the multi-layer shell elements [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(3): 49-54.)
- [ 15 ] Miao Zhiwei, Lu Xinzhen, Jiang Jianjing, et al. Nonlinear FE model for RC shear walls based on multi-layer shell element and microp plane constitutive model [C] // Proc Computational Methods in Engineering And Science Sanya Hainan, China Tsinghua University Press & Springer-Verlag, 2006.