张蓝方,种迅,刘谦敏,等.基于 OpenSees 的巨型 SRC 柱低周反复试验数值分析[J].地震工程学报,2017,39(6):1134-1141. doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2017.06.1134

ZHANG Lanfang, CHONG Xun, LIU Qianmin, et al. Numerical Analysis of Low Cyclic Loading Tests of Mega SRC Columns Based on OpenSees[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(6):1134-1141.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2017.06.1134

# 基于 OpenSees 的巨型 SRC 柱低周 反复试验数值分析。

张蓝方1,种 迅1,刘谦敏2,蒋 庆1,3,叶献国1

(1. 合肥工业大学土木与水利工程学院,安徽 合肥 230009; 2. 北京市建筑设计研究院有限公司,北京 100045;3. 华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室,广东 广州 510640)

摘要:为研究巨型 SRC 柱抗震性能的数值模拟方法,本文基于有限元分析软件 OpenSees,采用纤 维单元模拟 5 根具有不同复杂截面型钢形式的巨型 SRC 柱试件的低周反复加载试验,并与试验滞 回曲线以及骨架曲线进行对比分析。结果表明,该基于纤维单元的有限元模型能够较好模拟巨型 SRC 柱试件的滞回反应,具有一定的合理性和可靠性。同时采用一种新型高性能分层壳单元对其 中一根巨型 SRC 柱试件进行精细有限元建模分析,分析结果与试验结果对比表明分层壳能够较好 地模拟试件的初始刚度和峰值承载力;与纤维单元模拟结果对比表明纤维单元能够更好地模拟试 件承载力的下降,结果更加精确,且计算效率更高;新型高性能壳单元 DKGQ 能够弥补原有壳单元 的不足,更好地模拟构件因混凝土大量开裂剥落导致的承载力下降。

关键词: 巨型 SRC 柱; 纤维单元; OpenSees; 低周反复荷载; 分层壳单元
 中图分类号: TU398
 文献标志码: A 文章编号: 1000-0844(2017)06-1134-08
 DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2017.06.1134

# Numerical Analysis of Low Cyclic Loading Tests of Mega SRC Columns Based on OpenSees

ZHANG Lanfang<sup>1</sup>, CHONG Xun<sup>1</sup>, LIU Qianmin<sup>2</sup>, JIANG Qing<sup>1,3</sup>, YE Xianguo<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China;

2. Beijing Institute of Architectural Design, Beijing 100045, China;

3. State key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, Guangdong, China)

**Abstract:** A steel reinforced concrete (SRC) column is a combined specimen constructed by allocating steel in the reinforced concrete in order to bear the external force. Because the SRC column gains the advantages of high strength and stiffness, good ductility, and fine refractoriness, it is widely used in high-rise structures nowadays. From the mixture of steel and reinforced concrete,

① 收稿日期:2016-11-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51278519,51408179);华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室开放研究项目 (2015ZA04);北京市自然科学基金(8142024)

作者简介:张蓝方(1991-),女,辽宁人,硕士研究生,主要从事防震减灾研究。E-mail:zlfhfut@163.com。

通信作者: 蒋 庆(1984-), 男, 安徽蚌埠人, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事工程结构抗震、预制与预应力混凝土结构方面的 研究。E-mail: ahhfjq@163.com。

the force performance and failure mode of the SRC column become more complex than ordinary columns. In this paper, in order to study the numerical simulation methods of the seismic performance of mega SRC columns, based on the finite element software OpenSees, tests on five mega SRC column specimens with different and complex steel sections were carried out under low cyclic reversed load by using the fiber element. Then, the numerical simulation results were compared to hysteretic and skeleton curves. The results indicate that the finite element model based on the fiber element can efficiently simulate the hysteresis response of mega SRC columns, which verifies the rationality and reliability of the numerical model. Meanwhile, a new high-performance multi-layer shell element was used in order to accurately analyze one of the mega SRC column specimens. By comparison to experimental results, the multi-layer shell can adequately simulate the initial stiffness and peak bearing capacity of the specimen. By comparison to the simulation results of the fiber element model, it was found that using fiber element could better simulate the descent of the specimen's bearing capacity, and the results were rather more accurate and efficient.

Key words: mega SRC columns; fiber element; OpenSees; low cyclic reversed loading; multi-layer shell element

# 0 引言

型钢混凝土(Steel Reinforced Concrete,简称 SRC)柱是一种在混凝土中主要配置型钢,并配有一 定的横向箍筋及纵向受力钢筋的钢与混凝土组合构 件<sup>[1]</sup>。与普通钢筋混凝土柱相比<sup>[2]</sup>,SRC 柱具有更 高的承载力和刚度,但也因柱中加入了型钢而使 SRC 柱的受力性能以及破坏形态变得更加复杂,因 此有必要对 SRC 的工作机理和抗震性能进行深入 的研究。

针对 SRC 柱的抗震性能,国内外学者进行了大量的试验研究<sup>[3]</sup>。但对于采用 SRC 柱的整体结构的抗震性能研究,由于试验费用过高而受到限制,人 们更多地是采用数值模拟方法。而该方法首先要对 SRC 柱的建模方法加以研究。利用实体单元对 SRC 柱模拟的研究<sup>[4]</sup>表明,使用实体单元可以较好 地反映结构的微观破坏过程。但直接采用实体单元 进行整体结构抗震分析的计算量太大,现有的计算 机硬件条件很难满足要求。

为了获得更高的计算效率,部分学者对基于纤 维单元的 SRC 柱数值模拟展开了研究<sup>[5]</sup>,但研究对 象的截面型钢形式较为简单,试件整体尺寸较小,含 钢率较低,不能充分说明其材料本构、单元选择同样 适用于巨型 SRC 柱。因为利用纤维单元进行模拟 的准确性有待验证,卢啸<sup>[6]</sup>采用 MSC.Marc 2007 中 的分层壳单元和杆单元建立了 SRC 巨柱简化有限 元模型,结果表明该模型能较好地把握巨柱的压弯 受力特性。但与之类似的基于分层壳单元的 SRC 柱数值模拟研究较少,不能充分说明采用分层壳单 元进行 SRC 柱模拟的可靠性和普适性。且与纤维 单元模型相比,分层壳单元模型的模拟精度以及计 算效率等问题还有待探讨。

因此,本文针对巨型 SRC 柱数值模拟研究的不 足,以 5 根具有不同复杂截面型钢形式的巨型 SRC 柱拟静力试验为基础,采用 OpenSees 有限元软件 建立基于纤维模型的巨型 SRC 柱有限元分析模型, 并将模拟结果与试验进行对比,以验证模型的可靠 性。对其中一根巨柱试件采用一种新型高性能分层 壳单元进行建模,模拟结果与试验以及纤维单元模 型结果进行比对,以比较两种单元在模拟精度以及 计算效率等方面的差异,以期为巨型 SRC 柱有限元 模型的建立提供思路和参考,也为进一步准确、高效 地应用巨型 SRC 柱建立超高层整体结构模型提供 依据。

# 1 巨型 SRC 柱数值模型的建立

#### 1.1 试验简介

文献[7]进行了5根巨型SRC柱试件的拟静力 试验,以研究截面型钢形式与含钢率对巨型SRC柱 抗震性能的影响。试件的主要设计参数如表1所 列。试件截面形式如图1所示,截面型钢形式如图 2所示。混凝土、钢板、钢筋的实测强度,以及试验 的加载装置等详细内容见文献[7]。 地震工程学报

表1 试件设计参数

Table 1         Design parameters of specimens									
试件	截面	型钢含钢率	高度	纵筋	纵筋配筋率	箍筋	箍筋配筋率	设计轴压力	
编号	类型	/ %	/mm		/ %		/ %	系数	
JZ1	А	3.9	3 000	42 <b>Φ</b> 12	1.35	<b>\$</b> 6@60	0.85	0.60	
JZ2	А	7.8	3 000	42 <b>Φ</b> 12	1.35	<b>\$</b> 6@60	0.85	0.60	
JZ3	А	11.2	3 000	42 <b>Φ</b> 12	1.35	<b>\$</b> 6@60	0.85	0.60	
JZ4	В	7.8	3 000	$8 \pm 16 + 42 \pm 10$	1.38	<b>\$</b> 6@60	0.92	0.60	
JZ5	С	7.8	3 000	44 <b>Φ</b> 12	1.40	<b>\$</b> 6@60	0.80	0.60	





Section form (Unit:mm)





Fig.1

# 1.2 纤维单元模型的建立

(1) 纤维模型

纤维模型是指将纤维截面赋予梁柱构件,且该 截面满足平截面假定。基于该假定可以根据截面的 弯曲应变和轴向应变求出组成截面的每根纤维的应 变,进而可以得到每根纤维的应力,最终计算出截面 的刚度<sup>[8]</sup>。

(2) 材料本构

OpenSees 中可用的材料包括单轴材料(Uniaxial Material)、多轴受力材料(ND Material)以及用 户开发材料(Contributed Material)等。纤维单元中 的各个纤维可以采用单轴材料本构关系将复杂的非 线性材料本构关系简化,避免了其他模型中难以给 定多维材料本构关系的问题。

无约束混凝土的立方体抗压强度标准值为 34.2 MPa。混凝土本构模型采用 OpenSees 中不考 虑混凝土受拉性能的 Concrete01 模型。由于巨型 SRC 柱截面尺寸巨大,该柱中复杂的内置型钢及配 筋对混凝土的约束作用并不明显<sup>[6]</sup>,因此可以将截 面中受约束混凝土的复杂应力状态进行简化。混凝 土区简化示意图如图 3 所示。混凝土应力-应变关 系均采用 Mander<sup>[9]</sup>混凝土本构关系,它适用于循环 荷载的约束和无约束混凝土应力-应变关系,通过考 虑核心区混凝土受箍筋约束的加强作用,从而简化 了钢筋混凝土构件的建模。





Mander 模型中,混凝土纵向应力-应变关系为:

$$f_{\rm c} = \frac{f_{\rm cc} xr}{r - 1 + x^r} \tag{1}$$

其中:

$$x = \frac{\varepsilon_{\rm c}}{\varepsilon_{\rm cc}} \tag{2}$$

$$r = \frac{E_{\rm c}}{E_{\rm c} - E_{\rm sec}} \tag{3}$$

式中: $f'_{ee}$ 为约束混凝土的强度; $\epsilon_{e}$ 为混凝土的纵向 压应变; $E_{e}$ 为混凝土的切线模量; $E_{see}$ 为混凝土的割 线模量:

$$E_{\rm sec} = \frac{f'_{\rm cc}}{\varepsilon_{\rm cc}} \tag{4}$$

ε ε 是约束混凝土峰值应力对应的应变:

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{cc} = \boldsymbol{\varepsilon}_{co} \left[ 1 + 5 \left( \frac{f_{cc}}{f_{co}} - 1 \right) \right]$$
(5)

式中: $f'_{co}$ 和  $\epsilon_{co}$ 为对应的无约束混凝土的抗压强度 和峰值应变,一般取  $\epsilon_{co} = 0.002$ 。

以约束混凝土Ⅲ和无约束混凝土为例,采用 Mander 模型计算得到的混凝土应力-应变关系如图 4 所示。



Fig.4 Stress-strain curves of confined and unconfined concretes

钢筋和型钢均采用基于 Giuffré-Menegotto-Pinto<sup>[10]</sup>的 Steel02 单轴本构模型。Steel02 模型是 能够考虑各向同性应变硬化影响的本构模型,同时 也能够较好地反映包兴格效应。钢材的应力-应变 关系示意图如图 5 所示。





#### (3) 单元选择与划分

使用纤维单元须将巨型 SRC 柱截面离散成许 多小纤维,包括保护层混凝土纤维、约束混凝土纤 维、钢筋纤维以及型钢纤维。在一定程度上划分较 多的纤维数目可以提高数值模拟的精度,但其数目 过多则会导致计算效率较低,因此本文在截面上采 用 10×10 的纤维积分点数<sup>[11]</sup>。

OpenSees 提供了两种常用的基于纤维模型的 非线性单元,分别是基于位移的梁柱单元(Displacement-Based Beam-Column Element)和基于力的梁 柱单元(Force-Based Beam-Column Element)<sup>[12]</sup>。 基于位移的梁柱单元横向位移采用 Hermite 插值 (三次插值函数),曲率为线性分布。若将构件仅划 分为一个单元进行非线性分析,则模拟结果会造成 较大误差。所以须增加构件所划分的单元个数,以 使曲率在一定范围内满足近似线性分布。基于力的 梁柱单元采用力插值函数,能同时满足力平衡方程 和变形协调条件。因其具有不受线性曲率分布限制 的优点,所以构件只需划分为一个单元,从而大幅提 高了计算效率。本文在此选用基于力的梁柱单元来 模拟低周反复荷载作用下巨型 SRC 柱的非线性反 应。每个试件均划分为6个单元,每个单元设置5 个截面积分点[13]。

#### 1.3 分层壳单元模型的建立

分层壳单元是一种基于复合材料力学原理<sup>[14]</sup>、 考虑了面内弯曲-面内剪切-面外弯曲之间的耦合作 用,能较全面反映壳体构件空间力学性能的单元。本 文所采用的分层壳单元是由王丽莎等<sup>[15]</sup>提出的一种 集成于开源有限元程序 OpenSees 中的新型高性能四 边形平板壳单元 DKGQ(图 6)。该壳元由平面膜单 元和板弯曲元耦合而成,平面膜元采用了基于广义协 调理论的高性能四边形膜元 GQ12;板弯曲元则采用 四边形薄板单元 DKQ,该单元能够有效弥补 Open-Sees中原有壳单元的不足。



Fig.6 Sketch for flat shell element DKGQ

分层壳模型中的混凝土采用基于损伤力学和弥 散裂缝模型的多维混凝土材料(nD Material Plane Stress User Material),钢筋采用多维钢筋材料(nD Material Plate Rebar),混凝土、钢筋应力-应变关系曲 线与上节中的纤维模型相同。将壳单元的截面 (LayeredShell Section)沿厚度方向划分成若干层,各 层根据构件的实际尺寸和配筋情况赋予相应的材料 (钢筋和混凝土)和厚度<sup>[14]</sup>。型钢仍采用 Steel02 模 型,材料应力-应变关系与纤维模型中的型钢相同。

以一根巨柱试件 JZ2 为研究对象,采用基于分 层壳单元和纤维单元的组合式模型来实现。利用分 层壳单元模拟巨柱沿厚度方向的混凝土层和钢筋 层,利用纤维单元模拟型钢,用共节点的方法保证两 者的变形协调。分层壳单元的网格划分方案为 20 (高度)×4(宽度),纤维单元划分为 10 段,每段上有 5 个截面积分点。模型示意图如图 7 所示。





# 2 纤维模型数值模拟与试验结果对比

加载时,首先对试件施加轴向荷载。然后保持 轴向荷载不变,再在柱顶施加水平方向荷载。在试 件屈服之前,水平荷载采用力控制的加载模式;在试 件屈服后,采用位移控制的加载模式。

将对 5 个试件进行数值模拟分析得到的滞回曲 线与试验曲线进行对比(图 8)。从图 8 中可以看 出,模拟得到的滞回曲线与试验曲线整体吻合情况 良好,滞回曲线形状、滞回环面积以及加卸载曲线趋 势均与试验结果吻合较好;但模拟得到的滞回曲线 的初始刚度与试验曲线的初始刚度之间存在一定误 差,这主要是由于该模型不能有效地考虑混凝土开 裂后截面刚度和强度的退化,对于试件这一特性的 模拟还有待进一步研究。

根据滞回曲线绘制构件反应的骨架曲线(图 9)。从图 9 中可以看出,在承载力上升段,该数值模 型不能很好地模拟试件混凝土开裂后截面刚度和强 度的退化,且对于承载力最大值,各试件的模拟值均 大于试验值;在承载力达到最大值后的下降段,模拟 得到的骨架曲线的刚度退化趋势以及承载力下降趋 势均与试验曲线吻合较好,且对于极限荷载,各试件 的模拟值与试验值误差较小。

5 根巨型 SRC 柱低周反复试验结果与数值模拟 结果的对比表明,采用 Mander 混凝土模型、Steel02 钢筋模型所建立的基于力的非线性纤维梁柱单元的 巨型 SRC 柱数值模型能够较好地模拟其在低周反复 荷载作用下的滞回性能,达到较高的模拟精度。

### 3 分层壳模型模拟结果分析

将分层壳模型的模拟结果与试验以及纤维模型 模拟结果进行比对(图 10)。从图中可以看出,与纤 维模型相比,分层壳模型模拟结果和试验结果吻合 的不是很好。与纤维模型相似,分层壳模型也不能 很好地模拟试件混凝土开裂后截面刚度的退化,所 以导致初始刚度存在一定误差。在承载力下降段, 虽然分层壳模型曲线具有明显的承载力退化趋势, 但纤维模型的模拟结果与试验结果更加吻合,且极 限承载力也与试验结果更接近。



图 8 试验与模拟滞回曲线比对

Fig.8 Comparison between experimental and simulated hysteretic curves





Fig.9 Comparison between experimental and simulated skeleton curves

为验证这种新型高性能分层壳单元比原有壳单 元能更好地模拟构件的受力性能,将原有分层壳单 元 MITC4<sup>[16]</sup>的模拟结果与试验以及 DKGQ 单元 模拟结果进行比对(图 11)。从图 11 中可以看出, 与 DKGQ 单元相比,MITC4 单元不能很好地模拟 试验中由混凝土大量开裂剥落导致的承载力下降。 分层壳单元模型模拟结果分析表明,与 DKGQ 单元模型相比,采用纤维单元模型能够更好地模拟 巨型 SRC 柱在低周反复荷载作用下的滞回性能。 但 DKGQ 单元比原有壳单元 MITC4 能够更好地模 拟构件的非线性反应。除此之外,在分层壳模型建 立的过程中发现,在试件进入非线性后,纤维模型比 分层壳模型更容易收敛,计算更加稳定,且具有更高的计算效率。











Fig.11 Comparison between simulated results of different multi-layer shell elements

## 4 结论

本文以 5 根具有复杂截面型钢形式的巨型 SRC 柱低周反复加载试验为基础,采用 OpenSees 有限元软件建立基于纤维单元的巨型 SRC 柱非线 性数值模型,将模拟结果与试验进行对比。并对其 中一根巨柱试件采用一种新型高性能分层壳单元进 行建模,比较两种单元在模拟精度以及计算效率等 方面的差异,得到如下结论:

(1)采用纤维单元建立的巨型 SRC 柱非线性 有限元分析模型能够较好地模拟其在低周反复荷载 作用下的滞回性能,验证了该数值模型所选用的材 料本构以及单元的合理性。

(2)与DKGQ单元模型相比,纤维模型能够得 到更好的模拟效果;且在试件进入非线性后纤维模 型更容易收敛,计算更加稳定,计算效率也更高。

(3) 新型高性能壳单元 DKGQ 弥补了原有壳 单元的不足,能够更好地模拟构件因混凝土大量开 裂剥落导致的承载力下降。

本研究可为应用巨型 SRC 柱的超高层整体结构建模的计算精度及计算效率的提高提供依据。

#### 参考文献(References)

[1] 杨勇.型钢混凝土粘结滑移基本理论及应用研究[D].西安:西 安建筑科技大学,2003.

YANG Yong, Study on the Basic Theory and Its Application of Bond-slip between Steel Shape and Concrete in SRC Structures[D]. Xi'an:Xi'an University of Architecture & Technology, 2003.

[2] 柴少峰,王平,王峻,等.钢筋混凝土构件修复加固与抗震性能 比较[J].地震工程学报,2013,35(4):872-877.

CHAI Shaofeng, WANG Ping, WANG Jun, et al. Repair and Strengthening of Reinforced Concrete Members and Study of Its Seismic Performance [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(4):872-877.

- [3] CHEN C C, LI J M, WENG C C. Experimental Behaviour and Strength of Concrete-encased Composite Beam-columns with T-shaped Steel Section under Cyclic Loading [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2005, 61(7): 863-881.
- [4] 殷小溦,吕西林,蒋欢军.高含钢率型钢混凝土压弯构件受力性 能影响因素分析[J].建筑结构学报,2013,34(5):105-113. YIN Xiaowei,LÜ Xilin,JIANG Huanjun.Analysis of Parameters Influencing on Mechanical Behavior of SRC Column with High Ratio of Encased Steel[J].Journal of Building Structures, 2013,34(5):105-113.
- [5] 朱雁茹,郭子雄.基于 OpenSEES 的 SRC 柱低周往复加载数值 模拟[J].广西大学学报(自然科学版),2010,35(4):555-559. ZHOU Yanru,GUO Zixiong.Numerical Simulation of SRC Column under Low-cyclic Loading Based on OpenSEES [J]. Journal of Guangxi University(Nat Sci Ed),2010,35(4):555-559.
- [6] 卢啸.超高巨柱-核心筒-伸臂结构地震灾变及抗震性能研究 [D].北京:清华大学,2013.

LU Xiao.Study on the Collapse Simulation and Seismic Performance of Super Tall Mega Column-core Tube-outrigger Buildings[D].Beijing:Tsinghua University,2013.

- [7] JIANG Huanjun, LI Yinghui, ZHU Jianmei. Experimental Study on Seismic Performance of Mega Steel-reinforced Concrete Columns Subjected to Cyclic Loads[J].Structural Design of Tall & Special Buildings,2015,24(16):962-972.
- [8] 齐虎,孙景江,林淋.OPENSEES 中纤维模型的研究[J].世界地 震工程,2007,23(4):48-54.

QI Hu, SUN Jingjiang, LIN Lin. Research on Fiber Model of OPENSEES[J]. World Earthquake Engineering, 2007, 23(4): 48-54.

- [9] 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.
- [10] MENEGOTTO M, PINTO P E. Method of Analysis for Cyclically Loaded Reinforced Concrete Frames Including Changes in Geometry and Non-elastic Behavior of Elements under Combined Normal Forces and Bending Moment [J]. IASBE Proceedings, 1973.
- [11] 周亮.基于 OpenSEES 的 RC 框架结构非线性分析[D].长沙: 湖南大学,2013.
   ZHOU Liang. Nonlinear Finite Element Analysis of RC Frame Structure Based on OpenSEES[D].Changsha: Hunan

University, 2013.

- [12] MAZZONI S, MCKENNA F, SCOTT M H, et al. OpenSees Users Manual[R].Berkeley: University of California, 2004.
- [13] 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):39-46.
  DU Ke, SUN Jingjiang, XU Weixiao. The Division of Element, Section and Fiber in Fiber Model[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2012, 32(5): 39-46.
- [14] LU X, XIE L, GUAN H, et al. A Shear Wall Element for Nonlinear Seismic Analysis of Super-tall Buildings Using OpenSees[J].Finite Elements in Analysis and Design, 2015, 98:14-25.
- [15] 王丽莎,岑松,解琳琳,等.基于新型大变形平板壳单元的剪力 墙模型及其在 OpenSees 中的应用[J].工程力学,2016,33 (3):47-54.

WANG Lisha, CEN Song, XIE Linlin, et al. Development of a Shear Wall Model Based on a New Flat Shell Element for Large Deformation Simulation and Application in OpenSees [J].Engineering Mechanics, 2016, 33(3):47-54.

[16] DVORKIN E N.PANTUSO D.REPETTO E A.A Formulation of the MITC4 Shell Element for Finite Strain Elastoplastic Analysis[J].Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1995, 125(1):17-40.