

文章编号: 1000-4750(2014)01-0064-08

基于 OpenSees 的 RC 框架-核心筒超高层建筑 抗震弹塑性分析

解琳琳¹, 黄羽立², 陆新征¹, 林楷奇¹, 叶列平¹

(1. 清华大学土木工程系, 北京 100084; 2. Arup, San Francisco, CA 94105, United States)

摘 要: 近年来我国高层建筑结构抗震弹塑性分析得到广泛应用。但现有的分析多基于商用软件, 限制了相关研究的深入发展。该文在通用开源有限元程序 OpenSees 的基础上, 通过开发合理的剪力墙构件模型和混凝土本构模型, 实现了 RC 框架-核心筒超高层结构的抗震弹塑性分析, 并以一系列剪力墙和一栋 141.8m 高框架-核心筒超高层为例, 通过与试验结果和通用有限元程序 MSC.Marc 计算结果的对比, 验证了该文提出的单元和计算方法的合理性和可靠性, 可为进一步开展基于开源有限元程序 OpenSees 的超高层建筑结构地震灾变行为研究提供参考。

关键词: 框架核心筒; 弹塑性分析; OpenSees; 分层壳单元; 超高层结构

中图分类号: TU352.1

文献标志码: A

doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2013.07.0591

ELASTO-PLASTIC ANALYSIS FOR SUPER TALL RC FRAME-CORE TUBE STRUCTURES BASED ON OPENSEES

XIE Lin-lin¹, HUANG Yu-li², LU Xin-zheng¹, LIN Kai-qi¹, YE Lie-ping¹

(1. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Arup, San Francisco, CA 94105, United States)

Abstract: Elasto-plastic analysis has been widely applied in the design of tall buildings. However, most analyses are conducted by using commercial software, which limits the further in-depth research on relevant topics. In this work, a new shear wall model and a concrete constitutive model are developed based on the open source finite element code, OpenSees, by which the elasto-plastic seismic analyses of super tall RC frame-core tube structures can be performed. A series of shear walls and a 141.8m frame-core tube building are simulated. By comparison with the experimental results and the analytical results by using MSC.Marc, the rationality and reliability of the proposed element and analysis method are validated, which will provide an effective tool for further research of the seismic behavior of tall buildings based on OpenSees.

Key words: frame-core tube; elasto-plastic analysis; OpenSees; multi-layer element; super tall structure

近年来世界范围内地震频发, 使得高层和超高层建筑结构的抗震性能研究成为一个热点问题。大量研究表明, 数值模拟已经成为研究高层和超高层结构抗震性能的一个有效手段^[1-2], 其中 OpenSees

(Open System for Earthquake Engineering Simulation)作为一款开源的有限元软件已经逐渐得到广大研究人员的关注, 依靠其强大的非线性数值模拟功能、丰富的材料库与单元库、多种高效的算

收稿日期: 2013-07-08; 修改日期: 2013-07-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(51222804, 51261120377); 霍英东教育基金项目(131071)

通讯作者: 陆新征(1978-), 男, 安徽芜湖人, 教授, 博士, 主要从事结构非线性仿真研究(E-mail: luxz@tsinghua.edu.cn).

作者简介: 解琳琳(1986-), 男, 江苏南通人, 博士生, 主要从事高层结构抗震研究(E-mail: anbloody@sina.com);

黄羽立(1980-), 男, 广东广州人, 博士, 主要从事结构工程研究(E-mail: yuli.huang@arup.com);

林楷奇(1990-), 男, 福建福州人, 博士生, 主要从事高层结构抗震研究(E-mail: lkq00@aliyun.com);

叶列平(1960-), 男, 江苏扬州人, 教授, 博士, 主要从事混凝土结构、地震工程研究(E-mail: ylp@tsinghua.edu.cn).

法、开放的程序构架及持续集成最新研究成果的先进理念, 逐渐发展成为地震工程领域最具影响力的开放科研平台之一。但是目前 OpenSees 主要用于构件和较小规模的框架结构抗震性能的研究^[3-4], 基于 OpenSees 的复杂结构的抗震性能研究尚未见报道。OpenSees 程序中的单元以纤维梁柱模型为主, 该模型能较好的考虑双向弯矩和轴力的耦合作用, 但不能方便准确的考虑剪力墙的受剪特性。特别是对于开洞剪力墙、带翼缘剪力墙和筒体结构, 纤维模型建模存在较大的局限性, 且不能很好的考虑其面内面外的双向受力行为, 从而阻碍了基于 OpenSees 的超高层地震灾变研究的开展。本文基于分层壳理论, 在 OpenSees 中开发了二维混凝土本构模型和剪力墙分层壳模型, 通过一系列的算例验证了该模型的合理性, 并通过一个框架-核心筒超高层建筑的算例分析和与商用程序 MSC.Marc 计算结果的对比, 验证了本文提出的基于 OpenSees 超高层建筑结构弹塑性分析的可行性和可靠性, 为发展基于 OpenSees 的超高层建筑结构抗震性能分

析, 进一步促进国际间超高层建筑结构抗震性能的研究提供开源共享弹塑性分析平台。

1 分层壳单元的开发

1.1 分层壳理论

分层壳单元基于复合材料力学原理^[5], 将一个壳单元沿厚度方向划分成若干层, 各层可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, 如图 1(a)所示。计算时首先获得壳单元中心层的应变和曲率, 根据平截面假定计算得到其他各层的应变, 进而由各层的材料本构模型得到各层积分点上的应力, 最终通过数值积分得到壳单元的内力。分层壳单元考虑了面内弯曲、面内剪切和面外弯曲之间的耦合, 能较全面地反映钢筋混凝土壳体构件的空间力学性能。对于剪力墙内的分布钢筋, 分层壳单元将纵向和横向钢筋网离散为正交的钢筋层分布在墙体相应的物理位置, 如图 1(b)所示。

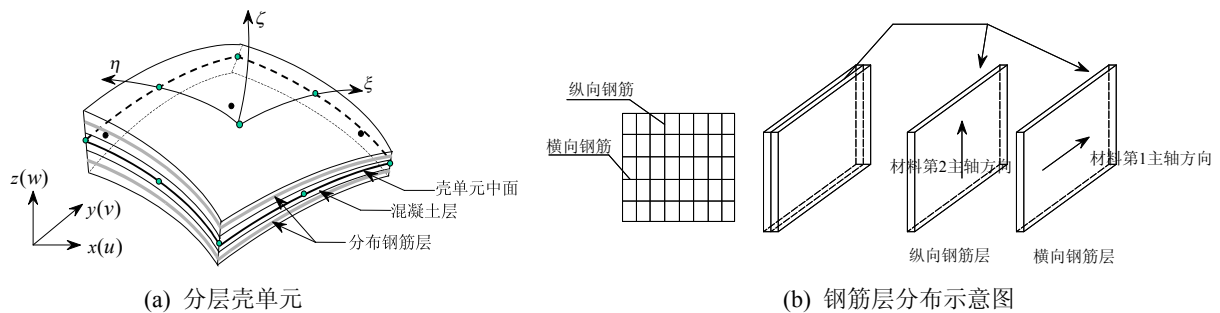


图 1 分层壳单元示意图
Fig.1 Multi-layer shell element

1.2 多维材料本构模型

在分层壳单元中, 混凝土处于二维受力状态, 需要开发合适的混凝土二维本构模型。由于高层建筑地震灾变分析中混凝土受力非常复杂, 合适的二维混凝土本构模型仍然是当前土木工程领域研究的热点问题。本研究提出采用基于损伤力学和弥散裂缝模型来模拟分层壳单元中混凝土的二维受力行为。该模型具有形式简单、计算稳定性好等优点, 适合作为基本模型集成在开源程序中供研究人员进一步发展和完善。

混凝土的二维本构模型的基本方程可以表示为:

$$\sigma'_c = \begin{bmatrix} 1-D_1 & \\ & 1-D_2 \end{bmatrix} D_e \varepsilon'_c \quad (1)$$

式中: σ'_c 、 ε'_c 分别为主应力坐标系下混凝土的应力和应变; D_1 、 D_2 为混凝土在主应力坐标系下的损伤标量, 受拉与受压损伤分开考虑。其中受压损伤参考 Løland 建议的受压损伤演化曲线^[6], 受拉损伤参考 Mazars 建议的受拉损伤演化曲线^[7]。对于剪力墙内的分布钢筋, 本研究基于 OpenSees 中现有的单轴钢筋模型开发了相应的正交异性钢筋模型。

结合各层厚度和各层所使用的多维钢筋、混凝土材料可生成 RC 剪力墙分层壳截面, 进而将该截面赋予 4 节点壳单元完成分层壳剪力墙的定义, 其流程如图 2 所示, 限于篇幅, 各参数含义可参阅软件使用手册。

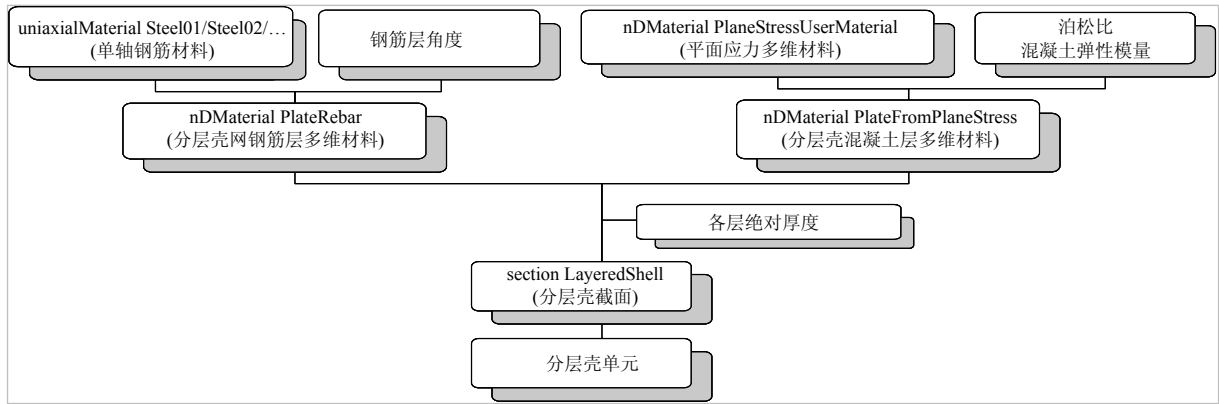


图 2 分层壳模型构架

Fig.2 Framework of multi-layer shell element

2 剪力墙算例

为验证所建立的分层壳单元的合理性，作者对文献中大量剪力墙结构算例^[8-11]分别采用纤维梁模型和分层壳模型进行了分析，其中纤维梁模型沿剪力墙全长划分为 5 个单元，每个单元沿着长度方向设置 5 个积分点^[12]，约束混凝土本构采用 Mander 模型^[13]。分层壳模型中部墙体内配置的分布纵筋和箍筋采用弥散钢筋层模拟，边缘约束构件内纵筋采用离散钢筋桁架单元模拟，通过与壳单元共节点实现两者的变形协调共同工作；剪力墙构件单元划分如图 3 所示，边缘约束构件区域的壳单元水平方向不划分，中部墙板水平方向划分为 2 段，构件竖向划分时基本保证壳单元的高宽比为 1，壳单元沿厚度方向均划分为 10 层，为了进一步验证分层壳在

计算剪力墙平面外受弯性能的可靠性，工字形和 T 形剪力墙的翼缘部分和腹板部分均采用分层壳单元模拟，分层壳模型计算所得的承载力与试验结果的对比如表 1 所示^[14]，可见承载力的计算结果与试验结果吻合很好。

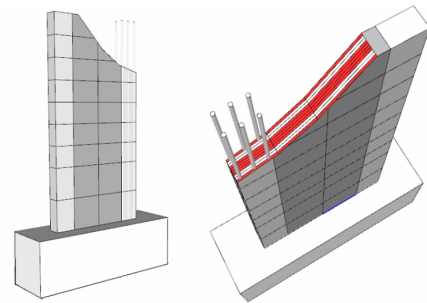


图 3 分层壳模拟剪力墙单元划分示意图

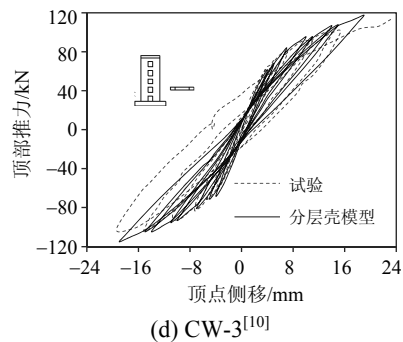
Fig.3 Discretization of the shear wall elements

表 1 剪力墙算例试验与模拟结果对比

Table 1 Comparison between experimental results and simulated results of shear walls

	试件编号	高宽比	设计轴压比	屈服承载力误差/(%)	屈服位移误差/(%)	承载力峰值误差/(%)
一字型剪力墙 ^[8]	SW1-1	2.0	0.1	2.3	6.4	-3.1
	SW1-2	2.0	0.2	0.8	0	1.5
	SW1-3	2.0	0.3	25.3	9.6	-4.5
	SW1-4	2.0	0.4	27	11.2	10.2
	SW2-1	1.0	0.3	3.6	1.2	9.6
	SW2-2	1.5	0.3	19.3	5.6	1.2
	SW4-1	2.0	0.3	7.9	2.4	2.9
	SW4-2	2.0	0.3	4.6	2.9	8.4
	SW5-1	2.0	0.3	2.6	1.5	2.1
	SW5-3	2.0	0.3	-2.2	2.3	2.2
	SW6-1	2.0	0.3	20.1	3.2	5.5
SW6-3	2.0	0.3	9.6	2.8	-1.4	
带翼缘剪力墙 ^[9]	SW-3	1.9	0.26	1.3	4.5	10.2
	SW-4	1.9	0.26	8.6	5.7	4.3
联肢剪力墙 ^[10]	CW-3	—	—	-1.6	0.6	7.4
对称双肢短肢剪力墙 ^[11]	SW1-1	—	—	9.6	0	12.9
	SW1-2	—	—	11.2	0	-5.8
	SW1-3	—	—	10.5	0	9.4
误差均值	—	—	—	8.9	3.3	4.1

限于篇幅, 本文选取 4 个试件, 将按分层壳计算得到的滞回曲线与试验曲线进行对比, 如图 4 所示。其中, 图 4(a)算例为一字形剪力墙, 跨高比 2.0, 对于此类剪力墙, 由于基本受弯曲破坏控制, 所以本文提出的分层壳模型和纤维模型的计算结果与试验结果均吻合较好。图 4(b)算例为带翼缘剪力墙, 可见分层壳计算结果和试验结果同样吻合良好, 说明分层壳单元可以适用于不同截面形式的剪力墙。图 4(c)为一跨高比为 1.0 的一字型剪力墙, 此时剪切破坏成为控制性因素, 纤维模型计算此类剪力墙难度较大, 而图 4(c)可以看出, 分层壳模型仍然可以很好地模拟这类矮墙的受力行为。图 4(d)算例为联肢剪力墙, 对于这类剪力墙, 由于采用纤维模型建模比较繁琐、通用性不高, 且不能很好地考虑剪跨比较小的墙肢和跨高比较小连梁的剪切破坏, 因此纤维模型不再适用, 而分层壳模型仍然可以对其面内受剪性能进行很好的模拟。可见分层壳模型不但具有较好的计算精度, 且适用性很强, 可用于分析各类复杂剪力墙构件。



(d) CW-3^[10]

图 4 试件顶点力-位移滞回曲线

Fig.4 Top force vs. displacement hysteretic curves of specimens

3 框架核心筒超高层结构算例

3.1 模型概况

本文选取的研究对象为美国 TBI 研究计划建议的一栋典型 42 层框架核心筒超高层建筑^[15], 结构总高 141.8m, 其三维立面和结构平面如图 5 和图 6 所示。按照中国混凝土规范^[16]及抗震规范^[17]对该建筑进行设计, 设防烈度为 8.5 度, 场地类型为 II 类。

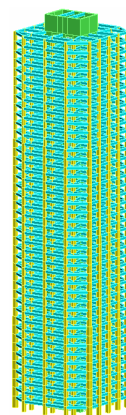
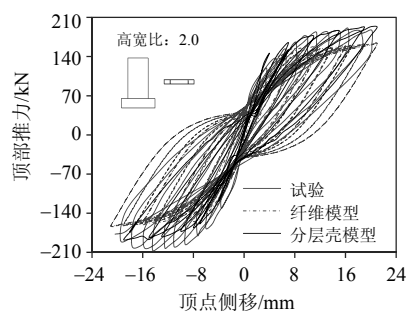
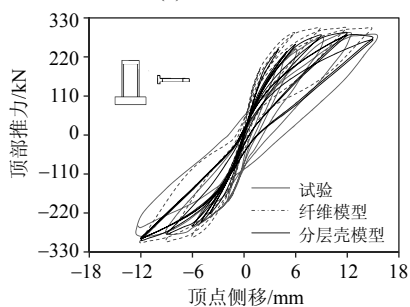


图 5 结构三维立面图

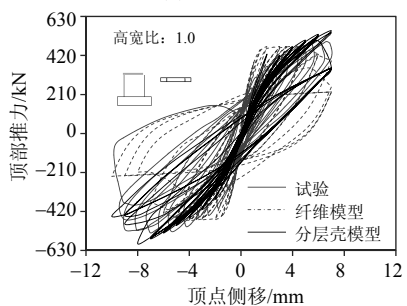
Fig.5 Layout of the building



(a) SW1-1^[8]



(b) SW-4^[9]



(c) SW2-1^[8]

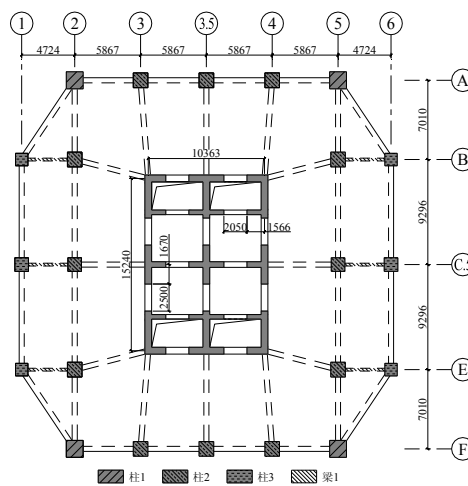


图 6 结构平面图

Fig.6 Elevation of the building

由于 OpenSees 缺乏良好的前处理界面,为简化建模操作,同时便于进行校核对比,本文首先利用 MSC.Marc 的前处理功能建立模型,然后通过作者开发的转换程序将 MSC.Marc 模型直接转换为 OpenSees 模型。这样可以保证两个程序的模型几何信息和截面信息定义完全一致,从而使对比结果具有代表性。

钢筋混凝土梁柱采用 OpenSees 中基于位移的梁柱单元模拟^[18],其纤维截面离散为 36 根混凝土纤维和 9 根钢筋纤维,其中混凝土采用 Concrete01 材料模拟,约束区混凝土骨架曲线特征参数采用 Mander 模型计算,钢筋采用 Steel02 材料模拟;剪力墙端部暗柱内的纵筋采用纤维梁柱单元模拟,并与相应剪力墙壳单元共节点;为了能够准确模拟大震下剪力墙的非线性反应,分层壳截面沿厚度方向划分 23 层^[5]。

整个模型包括 8469 个节点,8244 个纤维截面和 177 个分层壳截面,一共 9744 个纤维梁柱单元和 4704 个分层壳单元,整体结构模型如图 7 所示。OpenSees 中提供了多种收敛准则、边界条件处理方法、矩阵求解算法和自振振型求解算法。但是,以往采用 OpenSees 分析的多为小型结构,本文研究的结构规模较大,通过试算发现,很多 OpenSees 的求解器和数值算法对大型结构问题不太理想。通过大量试算,本研究建议对于大型结构计算,可按照表 2 选用 OpenSees 中的求解器和算法:

1) 边界条件处理方式罚函数法 (Penalty Method)和拉格朗日乘子法(Lagrange Multipliers)不宜选取,推荐选取约束变化法(Transformation Method);

2) 静力分析和动力分析时方程组求解不宜选取带状矩阵或变带宽矩阵算法,推荐选取一般对称

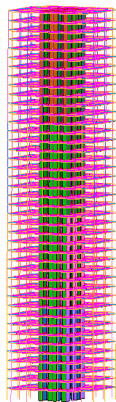


图 7 OpenSees 结构模型图
Fig.7 Model of OpenSees

稀疏矩阵算法(SparseSYM);

3) 对结构进行模态分析时,自振振型求解算法宜选为对称正定变带宽矩阵算法(ProfileSPD)。

表 2 分析模块选项

收敛准则 (Test)	边界处理方法 (Constraints)	矩阵求解算法 (System)	模态分析算法 (Eigen)
NormDispIncr	Transformation	SparseSYM	ProfileSPD

3.2 基本动力特性分析

对于 Marc 及 OpenSees 的模型分别进行重力分析和模态分析,结构一阶模态均为 x 方向的平动,二阶模态为 y 方向的平动,三阶模态为平面扭转振动,分析结果对比如表 3 所示,结果表明 OpenSees 和 Marc 计算结果吻合良好,初步验证了模型的正确性,为结构的静力推覆分析和动力时程分析奠定了基础。

表 3 OpenSees 及 Marc 重力荷载和模态分析计算结果对比
Table 3 Comparison of the self-weight and periods calculated by OpenSees and Marc

	Marc	OpenSees	相对误差/(%)
T_1 (x 方向平动)	1.791	1.815	1.3
T_2 (y 方向平动)	1.580	1.579	0.06
T_3 (扭转)	0.900	0.890	1.1
重力荷载代表值/t	5.4964×10^4	5.4964×10^4	0

3.3 弹塑性静力推覆分析

本文采用倒三角形分布侧力模式,分别采用 Marc 软件和 OpenSees 软件,对该超高层结构进行静力推覆分析,得到顶点侧移-基底剪力曲线如图 8 所示,层间位移角分布对比如图 9 所示。分析结果表明 Marc 与 OpenSees 整体吻合良好,局部略有差异,这是因为 OpenSees 中剪力墙采用的是基于损伤力学和弥散裂缝模型的本构模型,而 Marc 中剪力墙采用的是基于弹塑性力学和弥散裂缝模型的本构模型,即两个模型细节的差异而导致的。总体说来计算结果吻合很好,可以满足相关研究的需要。

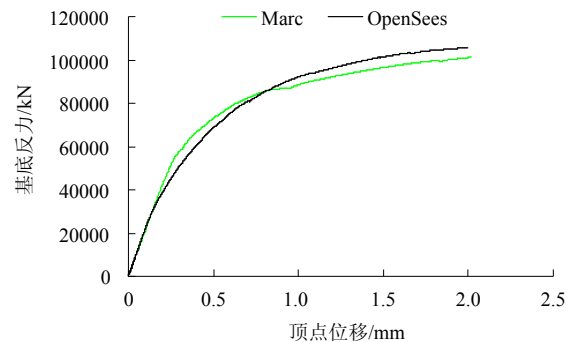


图 8 静力推覆顶点位移-基底剪力曲线
Fig.8 Top displacement vs. base shear force curves

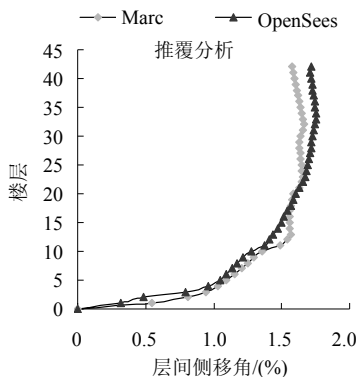
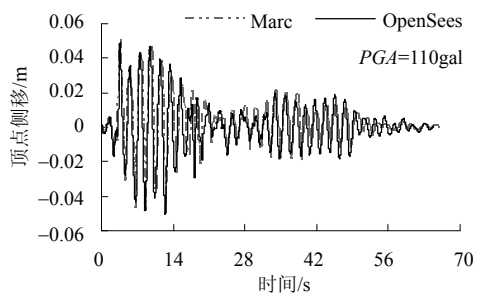


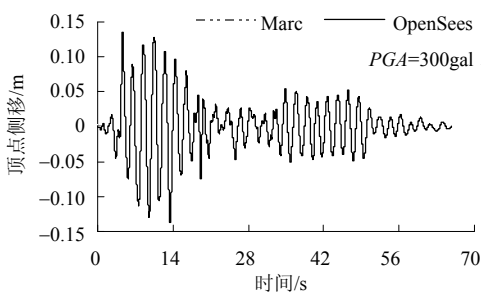
图 9 静力推覆层间位移角分布图
Fig.9 Distribution of drift angle

3.4 动力时程分析

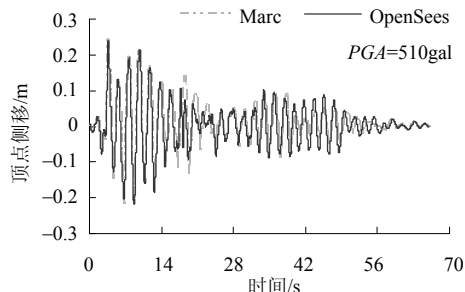
首先对结构施加重力进行静力分析,然后在结构 x 方向输入地震动加速度记录,进行整体结构的动力弹塑性时程分析。分析选取了三条常用的地震动记录(ChiChi 1999、El-Centro 1940 和 Northridge-SCS052 1994)。根据建筑的设防水准选取相应的 PGA 分别为 110gal(小震)、300gal(中震)和 510gal(大震),此外还进行了 1000gal 下的动力时程分析,以研究结构在强非线性情况下的计算效果。分别对比了 Marc 模型和 OpenSees 模型在四个不同地震动强度下的顶点位移时程及结构各层最大层间位移角包络,限于篇幅,本文仅给出了 ChiChi 波所有 PGA 下的顶点位移时程和层间侧移角包络图,El-Centro 波和 Northridge 波仅给出非线性程度最强的 1000gal 下的计算结果,结果比对如图 10 和图 11 所示。



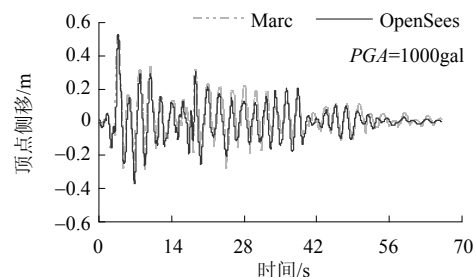
(a) ChiChi 波 110gal 动力时程分析结果



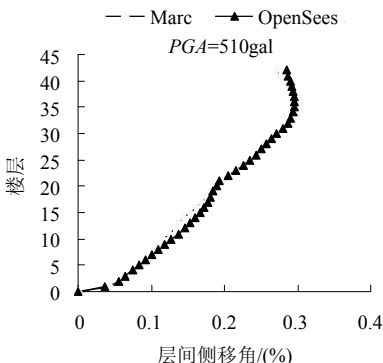
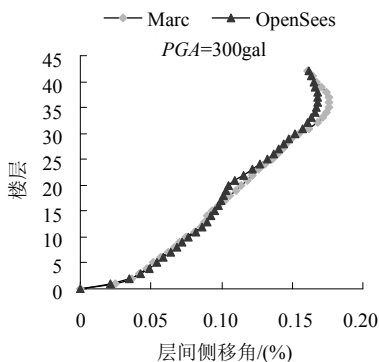
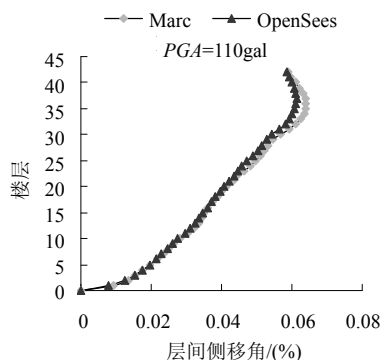
(b) ChiChi 波 300gal 动力时程分析结果

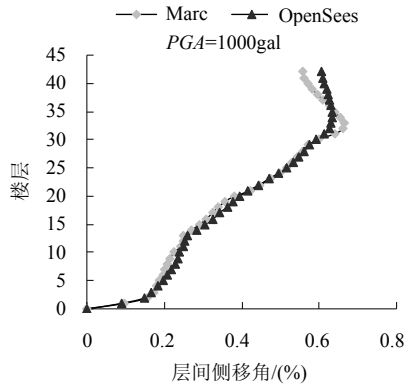


(c) ChiChi 波 510gal 动力时程分析结果



(d) ChiChi 波 1000gal 动力时程分析结果

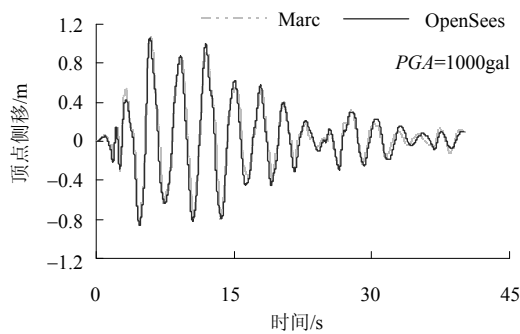




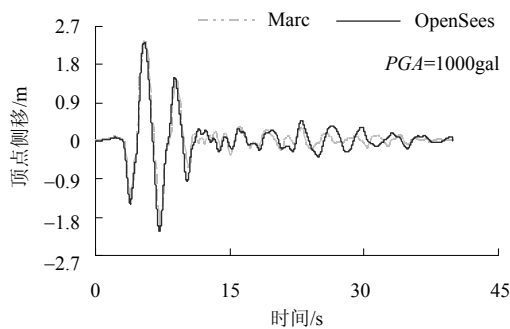
(e) ChiChi 波结构层间位移角包络图对比

图 10 ChiChi 时程分析结果对比

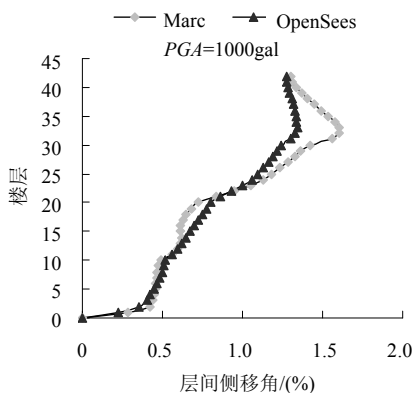
Fig.10 Comparison of the time history analysis results



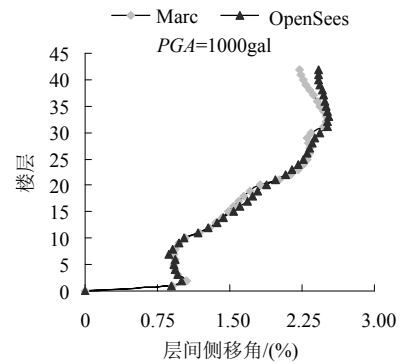
(a) El-Centro 波 1000gal 动力时程分析结果



(b) Northridge 波 1000gal 动力时程分析结果



(c) El-Centro 波结构层间位移角包络图对比



(d) Northridge 波结构层间位移角包络图对比

图 11 El-Centro 和 Northridge 时程分析结果对比

Fig.11 Comparison of the time history analysis results

结果对比表明,小震、中震、大震和 1000gal 下 OpenSees 结构模型和 Marc 结构模型的顶点位移时程曲线基本一致,各层的层间侧移角包络曲线也基本吻合,说明两个模型的动力弹塑性分析结果基本一致,两者剪力墙混凝土本构模型的不同导致了结果存在一定的差异。

4 结论

本文在 OpenSees 中开发了分层壳剪力墙模型,并应用该模型对一系列剪力墙试验和一栋 RC 框架核心筒超高层结构进行重力分析、模态分析、弹塑性静力推覆分析和弹塑性动力时程分析,主要结果如下:

(1) 在模拟弯曲破坏控制的一字形剪力墙和带翼缘剪力墙时,OpenSees 中已有的纤维模型和本研究开发的分层壳模型两者精度相当;模拟剪切变形影响较大的剪力墙和受力复杂的开洞剪力墙时,分层壳模型仍能较好的模拟剪力墙的受力特性,验证了本文提出的分层壳模型的合理性和可靠性;

(2) 本文建立了基于 OpenSees 的 RC 框架核心筒超高层结构弹塑性分析的体系,将分析结果与 MSC.Marc 的计算结果进行了对比分析,结果吻合良好,验证了本文提出的单元和计算方法的合理性和可靠性,为进一步基于 OpenSees 开展超高层建筑结构的地震灾变行为研究提供参考。

参考文献:

[1] 陆新征,林旭川,叶列平,等.地震下高层建筑连续倒塌的数值模型研究[J].工程力学,2010,27(11):64-70.

Lu Xinzhen, Lin Xuchuan, Ye Lieping, et al. Numerical models for the progressive collapse of high-rise buildings due to earthquake [J]. Engineering Mechanics, 2010,

- 27(11): 64—70. (in Chinese)
- [2] 沈飞, 楼梦麟. 超高层建筑地震反应中高阶振型影响分析[J]. 工程力学, 2012, 29(增刊 I): 23—28.
Shen Fei, Lou Menglin. Influence of high modes of super high-rise building on its seismic responses [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(Suppl I): 23—28. (in Chinese)
- [3] Martinelli P, Filippou F C. Simulation of the shaking table test of a seven-story shear wall building [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2009, 38(5): 587—607.
- [4] 韩小雷, 陈学伟, 郑宜, 等. 足尺钢框架振动台试验及动力弹塑性数值模拟[J]. 地震工程与工程振动, 2008, 28(6): 134—141.
Han Xiaolei, Chen Xuewei, Zhen Yi, et al. Dynamic experiment and numerical simulation of a full scale steel frame [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2008, 28(6): 134—141. (in Chinese)
- [5] 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 Xinzheng, 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. (in Chinese)
- [6] Løland K E. Continuous damage model for load-response estimation of concrete [J]. Cement and Concrete Research, 1980, 10(3): 395—402.
- [7] Mazars J. A description of micro-and macro-scale damage of concrete structures [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1986, 25(5): 729—737.
- [8] 章红梅. 剪力墙结构基于性态的抗震设计方法研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.
Zhang Hongmei. Study on the performance-based seismic design method for shear wall structures [D]. Shanghai: Tongji University, 2007. (in Chinese)
- [9] 陈勤, 钱稼茹. 钢筋混凝土双肢剪力墙静力弹塑性分析[J]. 计算力学学报, 2005, 22(1): 13—19.
Chen Qin, Qian Jiaru. Static elasto-plastic analysis of RC shear walls with one row opening [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2005, 22(1): 13—19. (in Chinese)
- [10] 陈云涛, 吕西林. 联肢剪力墙抗震性能研究——试验和理论分析[J]. 建筑结构学报, 2003, 24(4): 25—34.
Chen Yuntao, Lü Xilin. Seismic behavior of coupled shear walls—experiment and theoretical analysis [J]. Journal of Building Structures, 2003, 24(4): 25—34. (in Chinese)
- [11] 黄东升, 程文灏, 彭飞. 短肢剪力墙的弹塑性性能研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2003, 33(2): 164—167.
Huang Dongsheng, Cheng Wenrang, Peng Fei. Study on elasto-plastic performances of shear walls with short piers [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2003, 33(2): 164—167. (in Chinese)
- [12] 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]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2012, 32(5): 39—46. (in Chinese)
- [13] 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.
- [14] 解琳琳, 黄羽立, 林楷奇, 等. 基于 OpenSEES 分层壳单元分析 RC 剪力墙[C]. 第二届全国防灾减灾工程学术会议, 哈尔滨, 2013.
Xie Linlin, Huang Yuli, Lin Kaiqi, et al. Analysis of RC shear walls based on the multi-layer shell elements in OpenSees [C]. The 2nd National Conference on Disaster Prevention and Mitigation Engineering, Harbin, 2013. (in Chinese)
- [15] Moehle J, Bozorgnia Y, Jayaram N, et al. Case studies of the seismic performance of tall buildings designed by alternative means [R]. Berkeley, California: Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, 2011.
- [16] JGJ3-2010, 高层建筑混凝土结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
JGJ3-2010, Technical specification for concrete structures of tall building [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2010. (in Chinese)
- [17] GB50011-2010, 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
GB50011-2010, Code for seismic design of buildings [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2010. (in Chinese)
- [18] Lu X, Lu X Z, Zhang W K, et al. Collapse simulation of a super high-rise building subjected to extremely strong earthquakes[J]. Science China Technological Sciences, 2011, 54(10): 2549—2560.