

文章编号: 1000-4750(2016)03-0047-08

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

王丽莎^{1,2}, 岑 松¹, 解琳琳³, 陆新征³

(1. 清华大学航天航空学院, 北京 100084; 2. 中航工业第一飞机设计研究院, 陕西, 西安 710089; 3. 清华大学土木工程系, 北京 100084)

摘 要: 数值模拟是研究超高层建筑地震灾变行为的重要手段。地震作用下, 剪力墙作为超高层结构的重要抗侧力构件往往呈现出复杂的受力状态, 甚至因结构倒塌而产生大变形破坏, 因此有必要开发一个能准确考虑大变形的剪力墙单元。该文基于广义协调元理论和更新 Lagrangian 列式, 提出了一种高性能四边形平板壳单元及其几何非线性列式, 并将该模型集成于开源有限元程序 OpenSees 中, 以经典算例验证了该单元的性能和应用于大变形计算的可靠性。通过将该单元与分层壳截面结合, 该文对多种类型的剪力墙构件进行了模拟, 并将模拟结果与试验结果进行对比, 验证了该单元能较好的模拟剪力墙的复杂受力特性, 且能有效模拟钢筋混凝土构件倒塌的关键特性, 为进一步开展基于 OpenSees 的超高层结构地震灾变行为研究提供参考。

关键词: 平板壳元; OpenSees; 剪力墙; 分层壳单元; 大变形

中图分类号: TU352.1 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2015.03.0173

DEVELOPMENT OF A SHEAR WALL MODEL BASED ON A NEW FLAT SHELL ELEMENT FOR LARGE DEFORMATION SIMULATION AND APPLICATION IN OPENSEES

WANG Li-sha^{1,2}, CEN Song¹, XIE Lin-lin³, LU Xin-zheng³

(1. School of Aerospace Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. The First Aircraft Institute of AVIC, Xi'an, Shaanxi 710089, China; 3. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Numerical simulation is an effective method for investigating the earthquake-induced collapse mechanism of super-tall buildings. As one of the most important lateral-force resistant components, the shear walls usually exhibit complex mechanical behaviors and even fail with large deformation induced by structural collapse. Hence, a reliable numerical model which can consider large deformation is critical for the earthquake-induced collapse simulation. A high-performance quadrilateral shell element based on the theory of generalized conforming element, accounting for the geometric nonlinearity of large deformation using the updated Lagrangian formula, is herein proposed and implemented in an open-source software (i.e. OpenSees). The reliability of the element and associated algorithm for large deformation is initially validated through classic examples. Subsequently, simulation of various shear walls is conducted using the multi-layer section and the proposed shell element. Through a comparison with the experimental data, the reliability of the element is further validated in representing the complex mechanical behavior of shear walls, and the element is capable of capturing the key collapse characteristics of reinforced concrete components. The research outcome will assist in providing

收稿日期: 2015-03-09; 修改日期: 2015-06-05

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2015BAK14B02); 北京市自然科学基金项目(8142024); 国家自然科学基金项目(51378299, 51261120377)

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: 王丽莎(1990), 女, 河南漯河人, 硕士生, 主要从事有限元计算及结构分析研究(E-mail: wlsfai@sina.com);

岑 松(1972), 男, 福建福州人, 教授, 博士, 主要从事科学与工程中的计算力学研究(E-mail: censong@tsinghua.edu.cn);

解琳琳(1986), 男, 江苏南通人, 博士生, 主要从事高层建筑抗震研究(E-mail: anbloody@sina.com).

an effective tool for further investigation on the collapse mechanism of super-tall buildings using OpenSees.

Key words: flat shell element; OpenSees; shear wall; multi-layer shell element; large deformation

近年来,我国超高层建筑发展迅速,其抗震性能成为学术界和工程界关注的热点。数值模拟是研究高层和超高层结构抗震性能的有效手段^[1-4],其中 OpenSees (Open System for Earthquake Engineering Simulation)^[5]作为一款开源有限元软件已逐渐得到广大研究人员的关注,这主要是由于 OpenSees 允许研究人员开发、集成和共享最新的研究成果。目前 OpenSees 已被广泛应用于高层和超高层结构的抗震性能研究^[6-7]和框架结构的倒塌性能研究^[8-11],然而基于 OpenSees 的高层和超高层结构的倒塌性能研究尚未见报道。

剪力墙作为高层和超高层结构的重要抗侧力构件,在地震作用下往往呈现出比较复杂的受力状态,甚至在结构的倒塌过程中会产生较大的变形,因此对于该类结构的倒塌机理研究有赖于一个能准确考虑大变形的剪力墙单元。大量研究^[1-4,12]表明,分层壳模型能够较好地模拟剪力墙构件的复杂受力特性,Lu 等^[7]基于 OpenSees 中已有的四节点 MITC4 单元^[13]开发了分层壳单元,验证了该模型能够较好地模拟剪力墙的复杂受力特性,并将该模型成功应用于 RC 框架-核心筒超高层建筑的抗震弹塑性分析。然而 OpenSees 中集成的 MITC4 单元存在两个缺陷:1) 几何大变形模拟能力较差,不能有效模拟结构倒塌引起的剪力墙破坏;2) 每个节点只具有 5 个自由度(不包含面外旋转自由度),因而该壳单元不能与梁柱单元直接相连,需要额外增加过渡梁柱单元,一方面加大了建模难度,另一方面也加大了模型规模从而影响计算效率。因而需要在 OpenSees 中集成一款高性能壳单元来解决上述问题。

壳体的离散,通常采用 3 种类型的壳单元^[14]:平板型壳元、三维实体退化型壳元和曲壳单元。相比于后两种壳单元,平板型壳元具有以下优点:列式简单;便于处理复杂的载荷和边界条件;可以有效的避免闭锁现象。该类型壳元由平面膜单元和板弯曲元耦合而成,能够模拟壳体的复杂受力状态^[15]。因此,本文根据平板壳单元理论^[15]和广义协调元^[16-20]方面的优秀成果,首先提出了一种高性能四边形平板壳单元 DKGQ。其中,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^[20],

与常规的平面膜元相比,其每个节点增加了面外旋转自由度,因而保证了由其组成的平板壳单元每个节点均具有 6 个自由度,可直接与梁柱单元连接;该壳单元的板弯曲元则采用四边形薄板单元 DKQ^[21],其在分析模拟薄板弯曲状态时具有相当高的精度,且计算效率较高。依据 DKGQ 壳单元基础列式,本文采用更新的 Lagrangian 方法^[22],进一步开发了用于几何非线性分析的高性能四边形平板壳单元 NLDKGQ,并将该单元集成于开源有限元程序 OpenSees 中,通过经典算例验证了该类单元的性能和几何大变形能力。在 OpenSees 中,通过将 NLDKGQ 单元与分层壳截面模型结合,本文对多种类型的剪力墙构件进行了模拟,并将模拟结果与试验结果进行对比,验证了该单元能较好地模拟剪力墙的复杂受力特性,且能准确地模拟该类构件的大变形特性,为进一步开展基于 OpenSees 的超高层结构地震灾变行为研究提供了参考。

1 壳单元列式

1.1 小变形壳单元基本列式

图 1 所示为局部坐标系下高性能四边形平板壳单元(DKGQ),其节点位移向量定义如下:

$$\mathbf{q} = [\mathbf{q}_1 \quad \mathbf{q}_2 \quad \mathbf{q}_3 \quad \mathbf{q}_4]^T \quad (1)$$

$$\mathbf{q}_i = [u_i \quad v_i \quad w_i \quad \theta_{xi} \quad \theta_{yi} \quad \theta_{zi}]^T \quad i=1, 2, 3, 4 \quad (2)$$

其中,与平面膜元相关的节点位移 q_i^m 和与板弯曲元相关的节点位移 q_i^b 分别为:

$$\mathbf{q}_i^m = [u_i \quad v_i \quad \theta_{zi}]^T \quad (3)$$

$$\mathbf{q}_i^b = [w_i \quad \theta_{xi} \quad \theta_{yi}]^T \quad (4)$$

平面膜元 GQ12 单元位移场可通过插值函数 N_i^0 、 $N_i^{u\theta}$ 和 $N_i^{v\theta}$ ^[20]获得,对位移场求导可得到其应变场:

$$\boldsymbol{\varepsilon}^m = \begin{Bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}_x^m \\ \boldsymbol{\varepsilon}_y^m \\ 2\boldsymbol{\varepsilon}_{xy}^m \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \end{Bmatrix} \quad (5)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}^m = \mathbf{B}_m \mathbf{q}^m = \sum_{i=1}^4 \mathbf{B}_i^m \mathbf{q}_i^m \quad (6)$$

$$\mathbf{B}_i^m = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i^0}{\partial x} & 0 & \frac{\partial N_i^{u\theta}}{\partial x} \\ 0 & \frac{\partial N_i^0}{\partial y} & \frac{\partial N_i^{v\theta}}{\partial y} \\ \frac{\partial N_i^0}{\partial y} & \frac{\partial N_i^0}{\partial x} & \frac{\partial N_i^{u\theta}}{\partial y} + \frac{\partial N_i^{v\theta}}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (7)$$

则平面膜元的单元刚度矩阵为：

$$\mathbf{K}_m = \iint_{A^e} \mathbf{B}_m^T \mathbf{D}_{mm} \mathbf{B}_m dA \quad (8)$$

其中： \mathbf{D}_{mm} 为平面膜元材料矩阵，对于线弹性材料， \mathbf{D}_{mm} 如式(9)所示(h 为单元厚度； E 和 ν 分别为材料的弹性模量和泊松比)：

$$\mathbf{D}_{mm} = \frac{Eh}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (9)$$

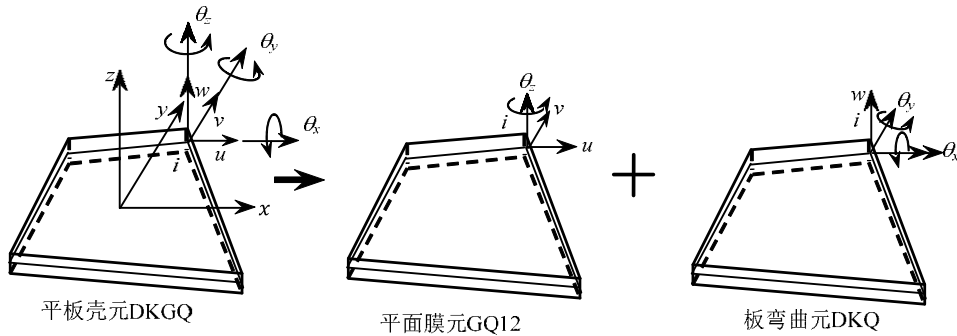


图1 局部坐标系下四边形平板壳元组合示意图

Fig.1 Components of quadrilateral flat shell element in local coordinates

板弯曲元 DKQ 的转角自由度定义^[21]如式(4)所示，其转角应变场与单元节点位移的关系为：

$$\chi_b = \begin{Bmatrix} -\partial^2 w / \partial x^2 \\ -\partial^2 w / \partial y^2 \\ -2\partial^2 w / \partial x \partial y \end{Bmatrix} = \mathbf{B}_b \mathbf{q}^b \quad (10)$$

式中， \mathbf{B}_b 详细公式参见文献[21]，其单元刚度矩阵为：

$$\mathbf{K}_b = \iint_{A^e} \mathbf{B}_b^T \mathbf{D}_{bb} \mathbf{B}_b dA \quad (11)$$

其中， \mathbf{D}_{bb} 为板弯曲元材料矩阵，对于线弹性材料，其形式为：

$$\mathbf{D}_{bb} = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (12)$$

小变形状态下，将膜元刚度矩阵 \mathbf{K}_m 和板弯曲元刚度矩阵 \mathbf{K}_b 按照式(1)的自由度顺序进行组合，即可获得局部坐标系下的 DKGQ 壳单元刚度；再转换到整体坐标系下，即可获得整体坐标系的刚度阵用于壳体结构计算。

1.2 几何非线性单元列式

本文采用更新的 Lagrangian 方法，以当前时刻

位形为参考位形，应变和应力以增量形式进行更新。根据 Kirchhoff 假设^[23]和 von Karman 大变形假设^[24]，壳单元应变增量($\Delta\epsilon$)可分为线性增量($\Delta\epsilon^L$)和非线性增量($\Delta\epsilon^{NL}$)两部分，其中线性增量可由膜元应变增量($\Delta\epsilon_m$)和板弯曲元应变增量($\Delta\chi_b$)组合获得，如式(13)~式(15)所示：

$$\Delta\epsilon = \Delta\epsilon^L + \Delta\epsilon^{NL} \quad (13)$$

$$\Delta\epsilon^L = \Delta\epsilon_m + z\Delta\chi_b \quad (14)$$

$$\Delta\epsilon^{NL} = \begin{Bmatrix} \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \\ \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y} \end{Bmatrix} \quad (15)$$

从当前时刻 t 到下一时刻 $t+dt$ ，壳单元应力更新方式为：

$$\begin{cases} {}^{t+dt}\boldsymbol{\sigma} = {}^t\boldsymbol{\sigma} + \Delta\boldsymbol{\sigma} \\ \Delta\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D}_{tan} \Delta\epsilon \end{cases} \quad (16)$$

其中， \mathbf{D}_{tan} 为材料在 t 时刻的切线本构矩阵。

在更新的 Lagrangian 列式下，局部坐标系中壳单元的有限元求解方程为：

$$(K_l + K_{nl}) \begin{Bmatrix} \Delta q^m \\ \Delta q^b \end{Bmatrix} = {}_{t+dt}F - {}_tR \quad (17)$$

右端两项依次为 $t+dt$ 时刻单元所受外力和 t 时刻的单元内力, 单元切线刚度矩阵分为线性项 K_l 和几何非线性项 K_{nl} , 依次为:

$$K_l = \iint_{A^e} \begin{bmatrix} B_m^T D_{mm} B_m & B_m^T D_{mb} B_b \\ B_b^T D_{bm} B_m & B_b^T D_{bb} B_b \end{bmatrix} dA \quad (18)$$

$$K_{nl} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & K_\sigma \end{bmatrix}, K_\sigma = \iint_{A^e} G^T \bar{N} G dA \quad (19)$$

其中, D_{mm} 、 D_{mb} 、 D_{bm} 、 D_{bb} 均可由材料切线本构矩阵 D_{tan} 在单元厚度方向积分得到:

$$\begin{cases} D_{mm} = \int_{-h/2}^{h/2} D_{tan} dz \\ D_{mb} = D_{bm} = \int_{-h/2}^{h/2} z D_{tan} dz \\ D_{bb} = \int_{-h/2}^{h/2} z^2 D_{tan} dz \end{cases} \quad (20)$$

矩阵 G 可根据定义由板弯曲元的插值函数^[21]求得:

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial \Delta w}{\partial x} \\ \frac{\partial \Delta w}{\partial y} \end{Bmatrix} = G \Delta q^b \quad (21)$$

矩阵 ${}^t\bar{N}$ 由当前时刻对应于膜元内力的变量组成:

$${}^t\bar{N} = \begin{bmatrix} {}^tN_x & {}^tN_{xy} \\ {}^tN_{yx} & {}^tN_y \end{bmatrix} \quad (22)$$

其中:

$$\begin{cases} N_x = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_x dz, N_y = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_y dz \\ N_{xy} = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{xy} dz, M_x = \int_{-h/2}^{h/2} z \sigma_x dz \\ M_y = \int_{-h/2}^{h/2} z \sigma_y dz, M_{xy} = \int_{-h/2}^{h/2} z \sigma_{xy} dz \end{cases} \quad (23)$$

$${}^tN = \begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix}; {}^tM = \begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} \quad (24)$$

对于式(17)中的单元内力矢量 ${}_tR$, 其计算公式为:

$${}_tR = \iint_{A^e} \begin{bmatrix} B_m^T \cdot {}^tN \\ B_b^T \cdot {}^tM \end{bmatrix} dA \quad (25)$$

将有限元求解方程式(15)按照式(1)的自由度顺

序进行组合, 再转换到整体坐标系下即可进行几何非线性分析。

2 经典弹性算例

为了验证本文提出的壳单元 DKGQ 及几何非线性壳单元 NLDKGQ 的性能, 本节对三个经典算例进行了计算分析。

2.1 两端刚性隔板约束的圆筒壳问题

两端为刚性隔板约束的圆筒壳, 中心受到一对等值反向的集中力作用, 其几何尺寸和材料参数如图 2 所示, 荷载作用点位移的理论解^[25]为: $w=1.8541 \times 10^{-5}$ 。由于对称性, 取该圆柱壳的 1/8 部分划分网格进行计算, 得到荷载作用点沿荷载方向的位移, 其数值精度列于表 1 中。本算例中用于比较的单元分别为: ABAQUS 中的四边形四节点通用壳单元 S4、OpenSees 中已有壳单元 MITC4 和本文提出的小变形平板壳单元 DKGQ。表 1 的结果表明, 本文的壳单元 DKGQ 能够有效模拟壳体结构的面内-面外耦合受力状态, 且在网格数目较少的情况下即可达到较高的计算精度, 从而有效提高计算效率。

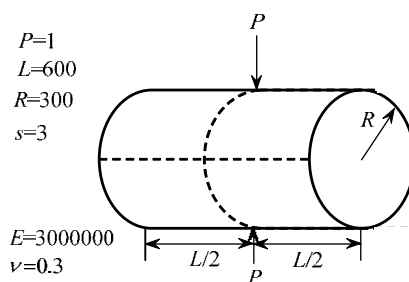


图 2 两端刚性约束的圆柱壳: 几何尺寸和材料参数

Fig.2 Pinched cylinder: Geometry and material data

表 1 两端刚性约束的圆柱壳: 荷载作用点位移数值精度

Table 1 Pinched cylinder: displacement accuracy at load points

壳单元类型	不同网格(1/8 壳)荷载点位移/理论解		
	4×4	8×8	16×16
S4	0.382	0.742	0.918
MITC4	0.364	0.728	0.915
DKGQ	0.629	0.789	0.930

2.2 MacNeal 梁问题

MacNeal 细长梁问题^[26]是用于考查单元闭锁问题的经典算例, 其几何形状如图 3 所示, 采用 3 种形状的网格划分方式: 矩形、平行四边形和梯形。梁所用材料的弹性模量 $E=10^7$, 泊松比 $\nu=0.3$, 梁厚度 $s=0.1$; 分别施加面内剪切和弯曲两种载荷,

计算得到梁自由端竖向位移, 其结果如表 2 所示。用于计算的平面单元分别是: 四边形平面等参元 Q4 单元, Allman^[27]提出的含转角自由度的平面膜元和本文的平板壳元所采用的高性能平面膜元 GQ12 单元。计算结果表明, Q4 膜元出现了薄膜闭锁现象, Allman 膜元和 GQ12 膜元抗闭锁能力较强, 相同网格下 GQ12 单元具有更高的计算精度。为了考察壳单元的抗闭锁能力, 将该算例拓展到三维, 分别用 S4、MITC4 和 DKGQ 这 3 种壳单元进行计算, 结果表明 MITC4 单元出现了闭锁现象, DKGQ 单元没有闭锁现象, 与 ABAQUS 中的 S4 单元计算精度相当。

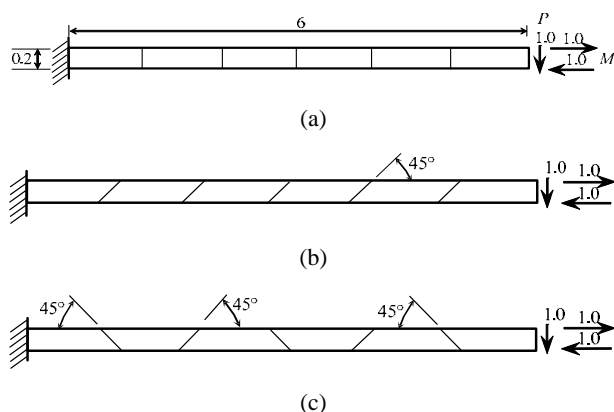


图 3 MacNeal 梁问题: 几何参数和网格划分

Fig.3 MacNeal's beam problem: Geometry and mesh

表 2 MacNeal 梁自由端挠度计算精度

Table 2 Displacement accuracy of the free end of MacNeal beam

壳单元类型	剪切			弯曲		
	网格(a)	网格(b)	网格(c)	网格(a)	网格(b)	网格(c)
Q4	0.093	0.035	0.003	0.093	0.031	0.022
Allman	0.904	0.873	0.805	0.910	—	—
GQ12	0.993	0.993	0.988	0.996	0.995	0.989
S4	0.907	0.876	0.874	0.915	0.890	0.889
MITC4	0.076	—	—	0.076	—	—
DKGQ	0.904	0.873	0.873	0.911	0.881	0.881
标准解精度	1.000 ^a			1.000 ^b		

注: a 标准解为 -0.1081; b 标准解为 -0.0054。

2.3 悬臂梁大变形问题

图 4 是一端固支, 一端受到集中弯矩作用的悬臂梁, 其几何尺寸和材料参数如图 4 所示。这类悬臂梁问题通常采用 1×10 的网格划分^[28-29], 自由端施加的弯矩(通过弯矩系数 $\kappa = M/M_{\max}$ 表示)与自由端节点的轴向和竖向位移关系曲线如图 5(a)所示, 图 5(b)显示了不同弯矩下悬臂梁变形后的形状; 计算结果表明, 本文开发的 NLDKGQ 壳单元能够较

好的模拟大变形大转动情况, 且精度与 ABAQUS 中的通用壳单元 S4 相当, 均具有较高的计算精度。

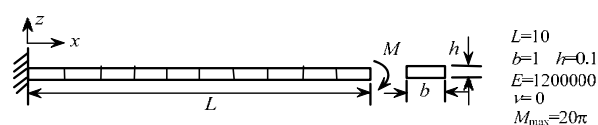
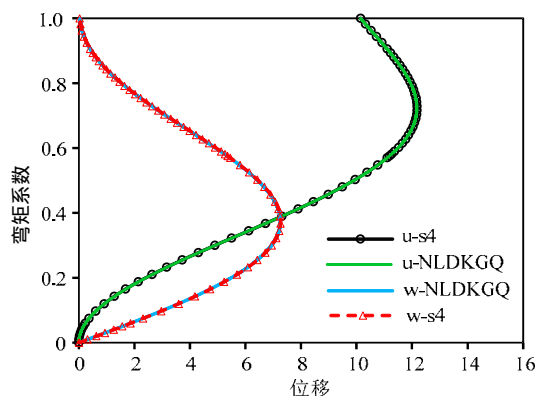
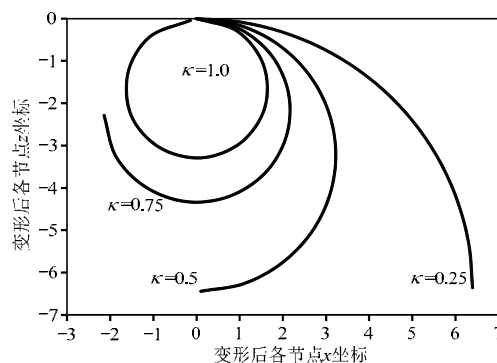


图 4 悬臂梁受集中弯矩作用: 几何和材料参数

Fig.4 Cantilever subjected to end bending moment: Geometry and material data



(a) 自由端节点位移曲线



(b) 悬臂梁中性轴变形后的形状

图 5 悬臂梁自由端受集中弯矩作用的变形

Fig.5 Cantilever subjected to end bending moment: deformation

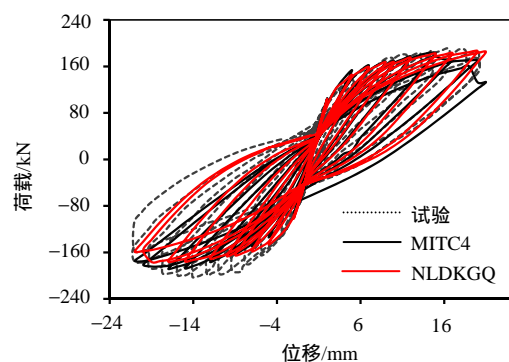
3 剪力墙算例

为了验证 NLDKGQ 单元模拟钢筋混凝土构件的可行性, 本文采用文献[6-7]提出的多维材料和分层壳截面定义该单元, 并对多种剪力墙构件和混凝土框架柱倒塌试验进行模拟, 通过与试验结果进行对比分析验证该模型的合理性和可靠性。

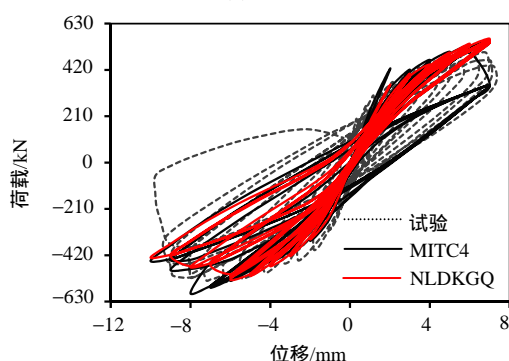
3.1 剪力墙构件模拟

为了验证 NLDKGQ 单元模拟钢筋混凝土剪力墙构件的可靠性, 本节选取了 4 个剪力墙试件, 包括两片一字型剪力墙^[30](高宽比分别为 2.0 和 1.0), 一片带翼缘剪力墙^[30]和一片联肢剪力墙^[31]。单元离

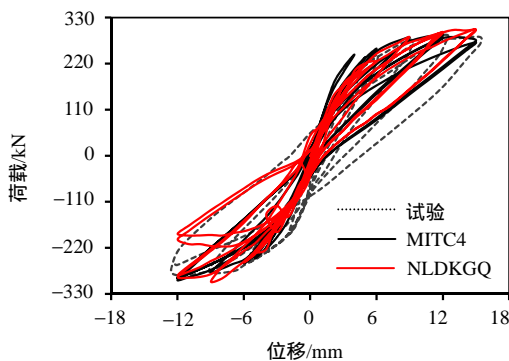
散方案和参数取值与文献[6]相同,采用 NLDKGQ 单元计算得到的滞回曲线、MITC4 单元计算得到的滞回曲线和试验曲线对比如图 6 所示。可以看出,



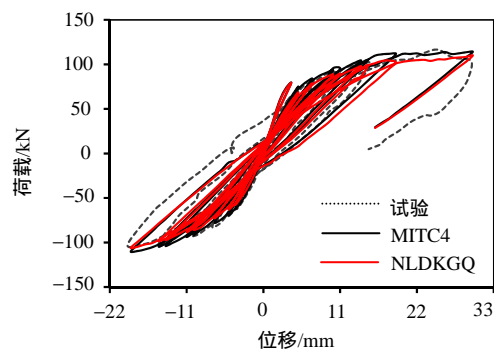
(a) SW1-1



(b) SW2-1



(c) SW-4



(d) CW-3

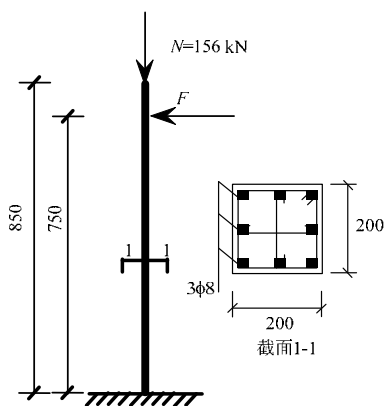
图 6 剪力墙构件顶点力-位移曲线

Fig.6 Top force vs. displacement hysteretic curves of shear walls

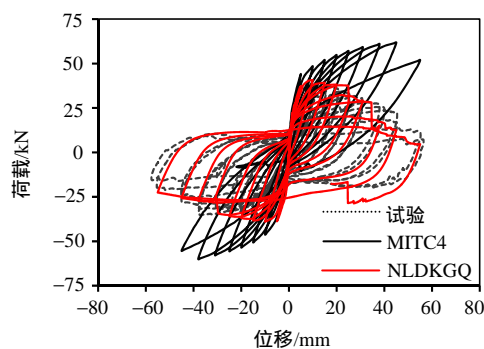
两个单元的计算结果与试验结构整体均吻合良好,相比于 MITC4 单元,本文提出的 NLDKGQ 单元一定程度上可以更好的模拟构件的初始刚度,并且能较好的反映承载力的退化现象。

3.2 混凝土框架柱倒塌试验

本节对文献[32]中 RC 框架结构倒塌试验的边柱 B 进行了数值模拟,其构件截面尺寸和配筋信息如图 7(a)所示。模型采用 15(高度)×4(宽度)的网格划分方案,通过分层壳截面分别定义 NLDKGQ 壳元和 MITC4 壳元模拟柱构件,两者模拟结果与试验结果对比如图 7(b)所示。从图中可以明显看出, NLDKGQ 单元能够很好的模拟试验中出现的退化现象,其骨架曲线和滞回特性与试验吻合良好,能够准确反映柱构件的倒塌特性;而 MITC4 单元则不能反映倒塌柱构件的关键特性。这是由于采用上述网格划分方案后,单元厚度与构件尺寸之比远小于 1, MITC4 单元在模拟该类薄板构件时发生了一定的闭锁现象,导致底部边缘壳单元不能模拟试验中因为混凝土压溃退出工作引起的退化现象;而本文提出的 NLDKGQ 单元则能有效避免闭锁现象,从而较好的模拟倒塌柱构件的受力过程。



(a) 方柱构件尺寸



(b) 方柱构件顶点力-位移曲线

图 7 方柱构件模拟情况

Fig.7 Numerical simulation of the cubic column

4 结论

基于平板壳元理论,本文首先提出了一种高性能四边形平板壳元 DKGQ。采用更新的 Lagrangian 列式方法,本文基于 DKGQ 单元进一步提出了可用于几何非线性分析的壳单元 NLDKGQ,并将上述单元集成到开源有限元程序 OpenSees 中。从经典弹性算例和典型钢筋混凝土模拟两个层次对单元性能进行了研究,主要得到以下结论:

(1) 相比于 OpenSees 中现有的 MITC4 壳单元,本文提出的壳单元 DKGQ 具有更好的计算精度,且能有效避免闭锁问题。而 NLDKGQ 单元则可用于几何非线性分析,其计算结果与通用商业有限元 ABAQUS 中的 S4 单元计算精度相当。

(2) 本文提出的 NLDKGQ 单元能够较好地模拟剪力墙构件的滞回特性。相比于 MITC4 单元,该单元能够把握钢筋混凝土构件倒塌过程中的关键特性,验证了本文提出的壳单元模拟剪力墙构件的合理性和可靠性,且可用于结构的动力灾变模拟,为进一步开展基于 OpenSees 的超高层结构地震灾变行为研究提供了参考。

参考文献:

- [1] Lu X, Lu X Z, Guan H, et al. Collapse simulation of reinforced concrete high-rise building induced by extreme earthquakes [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2013, 42(5): 705–723.
- [2] 陆新征, 林旭川, 叶列平, 等. 地震下高层建筑结构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)
- [3] Lu X, Lu X Z, Zhang W K, Ye L P. Collapse simulation of a super high-rise building subjected to extremely strong earthquakes [J]. Science China Technological Sciences, 2011, 54(10): 2549–2560.
- [4] Lu X Z, Lu X, Guan H, Zhang W K, Ye L P. Earthquake-induced collapse simulation of a super-tall mega-braced frame-core tub building [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2013, 82: 59–71.
- [5] McKenna F. OpenSees: A framework for earthquake engineering simulation [J]. Computing in Science & Engineering, 2011, 13(4): 58–66.
- [6] 解琳琳, 黄羽立, 陆新征, 等. 基于 OpenSees 的 RC 框架-核心筒超高层建筑抗震弹塑性分析[J]. 工程力学, 2014, 31(1): 64–71.
Xie Linlin, Huang Yuli, Lu Xinzhen, et al. Elasto-plastic analysis for super tall RC frame-core tube structures based on OpenSees [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(1): 64–71. (in Chinese)
- [7] 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.
- [8] 蒋碧聪. 基于 OpenSees 的钢筋混凝土框架结构连续倒塌分析[D]. 大连: 大连理工大学土木工程学院, 2012.
Jiang Bicong. Progressive Collapse analysis of reinforced concrete frames using opensees [D]. Dalian: Department of Civil Engineering Dalian University of Technology, 2012. (in Chinese)
- [9] Haselton C B. Beam-column element model calibrated for predicting flexural response leading to global collapse of RC frame buildings [R]. Berkeley: Pacific Earthquake Engineering Research Center, CA, 2008.
- [10] Ibarra L F, Krawinkler H. Global collapse of frame structures under seismic excitations [R]. Stanford: No. TB 152, The John A. Blume Earthquake Engineering Center, Stanford University, CA, 2005.
- [11] Ghannoum W M, Moehle J P. Dynamic collapse analysis of a concrete frame sustaining column axial failures [J]. ACI Structural Journal, 2012, 109(3): 403–412.
- [12] 叶列平, 陆新征, 马千里, 等. 混凝土结构抗震非线性分析模型, 方法及算例[J]. 工程力学, 2006, 23(2): 131–140.
Ye Lieping, Lu Xinzhen, Ma Qianli, et al. Nonlinear analytical models, methods and examples for concrete structures subjected to earthquake loading [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(2): 131–140. (in Chinese)
- [13] Eduardo N, Dvorkin, Klaus-Jurgen Bathe. A continuum mechanics based four-node shell element for general non-linear analysis [J]. Engineering Computations, 1984, 1(1): 77–88.
- [14] Gallagher, Richard H. Problems and progress in thin shell finite element analysis [C]. Finite elements for thin shells and curved(A 77-18093 06-39), London and New York, John Wiley and Sons, 1976: 1–14.
- [15] Long Y Q, Cen S, Long Z F. Advanced finite element method in structural engineering [M]. Beijing, Springer-Verlag GmbH Berlin Heidelberg & Tsinghua University Press, 2009.
- [16] Long Y Q, B X M, Long Z F, et al. Generalized conforming plate bending elements using point and line compatibility conditions [J]. Computers & Structures, 1995, 54(4): 717–723.
- [17] 李聚轩, 龙驭球. 广义协调元方法的收敛性[J]. 工程力学, 1996, 13(1): 75–80.
Li Juxuan, Long Yuqiu. The convergence of the generalized conforming element method [J]. Engineering

- Mechanics, 1996, 13(1): 75–80. (in Chinese)
- [18] 龙驭球, 傅向荣. 基于解析试函数的广义协调四边形厚板元[J]. 工程力学, 2002, 19(3): 10–15.
Long Yuqiu, Fu Xiangrong. Two generalized conforming quadrilateral thick plate elements based on analytical trial functions [J]. Engineering Mechanics, 2002, 19(3): 10–15. (in Chinese)
- [19] 岑松, 龙志飞, 龙驭球. 对转角场和剪应变场进行合理插值的厚薄板通用四边形单元[J]. 工程力学, 1999, 16(4): 1–15.
Cen Song, Long Zhifeng, Long Yuqiu. A Mindlin quadrilateral plate element with improved interpolation for the rotation and shear strain fields [J]. Engineering Mechanics, 1999, 16(4): 1–15. (in Chinese)
- [20] 须寅, 龙驭球. 采用广义协调条件构造具有旋转自由度的四边形膜元[J]. 工程力学, 1993, 10(3): 27–36.
Xu Yin, Long Yuqiu. Quadrilateral membrane element with vertex rotational freedom from generalized compatible condition [J]. Engineering Mechanics, 1993, 10(3): 27–36. (in Chinese)
- [21] Batoz J L, Tahar M B. Evaluation of a new quadrilateral thin plate bending element [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1982, 18(11): 1655–1677.
- [22] Belytschko T, Liu W K, Moran B, et al. Nonlinear finite elements for continua and structures [M]. London, UK: John Wiley & Sons, 2013.
- [23] Podio-Guidugli P. An exact derivation of the thin plate equation [J]. Journal of Elasticity, 1989, 22(2/3): 121–133.
- [24] Von Karman T, Duwez P. The propagation of plastic deformation in solids [J]. Journal of Applied Physics, 1950, 21(10): 987–994.
- [25] Belytschko T, Leviathan I. Physical stabilization of the 4-node shell element with one point quadrature [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1994, 113(3): 321–350.
- [26] MacNeal R H, Harder R L. A proposed standard set of problems to test finite element accuracy [J]. Finite Element in Analysis and Design, 1985, 1(1): 3–20.
- [27] Allman D J. A compatible triangular element including vertex rotations for plane elasticity analysis [J]. Computers & Structures, 1984, 19(1): 1–8.
- [28] Horrigmoe G, Bergan P G. Nonlinear analysis of free-form shells by flat finite elements [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1978, 16(1): 11–35.
- [29] Park H C, Cho C, Lee S W. An efficient assumed strain element model with six DOF per node for geometrically non-linear shells [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1995, 38(24): 4101–4122.
- [30] 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)
- [31] 陈云涛, 吕西林. 联肢剪力墙抗震性能分析-试验和理论分析[J]. 建筑结构学报, 2003, 23(4): 25–34.
Chen Yuntao, Lü Xilin. Seismic behavior of coupled shear walls-experiment and theoretical analysis [J]. Journal of Building Structures, 2003, 23(4): 25–34. (in Chinese)
- [32] 陆新征, 叶列平, 潘鹏, 唐代远, 钱稼茹. 钢筋混凝土框架结构拟静力倒塌试验研究及数值模拟竞赛: 关键构件试验[J]. 建筑结构, 2012, 42(11): 23–26.
Lu Xinzheng, Ye Lieping, Pan Peng, Tang Daiyuan, Qian Jiaru. Pseudo-static collapse experiments and numerical prediction competition of RC frame structure II: Key elements experiment [J]. Building Structure, 2012, 42(11): 23–26. (in Chinese)