

文章编号: 1000-4750(2014)07-0137-09

# 剪力墙非线性分析单元 MFBFE 的理论及开发

杜 轲, 孙景江, 刘 琛, 刘仲伟

(中国地震局工程力学研究所, 中国地震局地震工程与工程振动重点实验室, 哈尔滨 150080)

**摘 要:** 纤维单元以其单元自身的优点被广泛用于梁柱构件的非线性分析中, 对于剪力墙构件, 由于纤维单元采用平截面假定, 忽略单元的截面剪切变形, 会造成很大的误差。该文对基于力插值的纤维单元进行修正, 将其引入到剪力墙构件的分析中, 介绍了考虑截面剪切变形的修正基于力插值纤维单元(MFBFE)和材料单轴本构的形成, 给出单元在 OpenSees 平台上的开发过程, 特别是迭代过程中的非线性分析算法和 OpenSees 框架下单元和材料本构的实现方式。通过实例分析对 MFBFE 的应用效果进行检验, 得到了两组 6 片剪力墙的水平低周往复模拟数据, 与试验结果对比, 可以认为试件模拟结果中各项抗震性能指标均与试验值相接近, 单元分析精度较高。

**关键词:** 剪力墙单元; 截面剪切变形; 单元开发; MFBFE; 非线性算法

中图分类号: TU973+.2; TU311.4 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2013.01.0074

## THEORY AND PROGRAM IMPLEMENTATION OF MFBFE ELEMENT FOR NONLINEAR ANALYSIS OF R/C SHEAR WALL

DU Ke, SUN Jing-jiang, LIU Chen, LIU Zhong-wei

(Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, CEA, Harbin 150080, China)

**Abstract:** A modified force-based fibre element (MFBFE) is popular for the nonlinear analysis of beams and columns in a reinforced concrete structure. However, for a shear wall, a fibre element can take inaccuracy for the reason that one of its basic plane-section assumption. In order to use a fibre element to analyze a shear wall, a force-based fibre element is modified. The key technique of the implement process is discussed, especially the formulation of a modified force-based fibre element and the uniaxial constitution of the material. The whole implement process in OpenSees contains nonlinear solution algorithm in the interactive process and the realizing way of elements and material constitution relations is presented. The numerical analysis for a low-cyclic loading test of two groups of six shear wall specimens based on an MFBFE element is done to test the new process. The analysis results show that the MFBFE element can perform well with kinds of aseismic behavior indexes, including the initial stiffness, yield strength, ultimate strength, unloading stiffness, residual displacement, ductility and energy dissipation. It is concluded that the analysis precision of MFBFE can be accurate enough for shear wall analysis.

**Key words:** element for shear wall; shear deformation; element implement; modified force-based fibre element; nonlinear solution algorithm

纤维单元(Fiber Element)通常被采用模拟梁柱的非线性分析, 它的优点是可以采用材料单轴本构

关系, 并且能够考虑轴力和弯矩的耦合作用。纤维单元有基于力插值和基于位移插值的纤维单元之

收稿日期: 2013-01-22; 修改日期: 2013-09-21

基金项目: 中国地震局工程力学研究所中央级公益性研究所基本科研业务费专项项目(2013B05); 国家科技支撑计划项目(2012BAK15B02)

通讯作者: 杜 轲(1985-), 男, 河南南阳人, 助理研究员, 博士, 主要从事结构抗震方面的研究(E-mail: duke.iem@gmail.com).

作者简介: 孙景江(1953-), 男, 山东黄县人, 研究员, 博士, 博导, 从事结构线性和非线性地震反应分析(E-mail: jingjiangsun@sina.com);

刘 琛(1989-), 男, 河南周口人, 硕士生, 主要从事结构抗震方面的研究(E-mail: liu\_chen\_seu@163.com);

刘仲伟(1989-), 男, 山东荣成人, 硕士生, 主要从事结构抗震方面的研究(E-mail: fe1999w@gmail.com).

分<sup>[1]</sup>。在基于位移插值的单元形函数中, 横向位移采用三阶 Hermite 插值, 轴向位移采用线性插值, 因此曲率假定为线性分布, 对于弹性阶段可以得到精确解, 而当构件进入非线性阶段后曲率不再是线性分布, 所以一般需将单元进行细分, 以减小曲率近似线性分布造成的误差。文献[2]的研究结果表明, 一个构件至少要划分为五个单元才能达到较高的精度。基于力插值的纤维模型(Force-based Fiber Element)采用精确的力插值函数, 能同时满足力平衡方程和变形协调条件, 优点在于不受线性曲率分布的限制, 所以不需要再细分单元。基于力插值纤维单元的优势是使用一个单元就可模拟一个构件, 通过选取合理数量的积分点就能达到足够的精度, 并且计算效率也大幅提高。因此基于力插值纤维单元是目前钢筋混凝土结构非线性分析最常用的单元。

对于高层建筑结构的主要受力构件为梁、柱和剪力墙, 应用基于力插值纤维单元已经能够较好地模拟梁、柱的非线性特性, 而基于力插值纤维单元忽略单元的截面剪切变形, 采用平截面假定, 这对于截面高度远小于其长度的梁、柱构件来说影响不大, 但对于受力比较复杂的剪力墙, 其截面高度比较大, 仍采用平截面假定忽略截面剪切变形将会造成较大的误差。近年来, 针对剪力墙提出的计算模型主要分为两大类: 微观有限元模型和宏观有限元模型。

微观有限元模型多用于分析独立的构件, 如一根梁或一个节点, 能够很好地模拟出构件局部破坏的微观机理。剪力墙的微观有限元模型目前主要是应用平面应力单元或者壳单元。清华大学陆新征<sup>[3-4]</sup>应用 MSC.MARC 中的基于复合材料力学原理的分层壳单元对三维剪力墙进行了模拟。美国休斯顿大学的 Hsu T T C 和 Mo Y L<sup>[5-6]</sup>采用 OpenSees 中的平面应力单元对二维剪力墙进行模拟, 并二次开发混凝土的平面应力本构。微观有限元模型的难点在于多轴本构难以确定, 同时单元划分过多, 计算量庞大。

与微观方法相比, 宏观模型简单, 力学概念直观, 计算量较小, 在较为准确本构关系的前提下, 能较好反应剪力墙构件的非线性性能。1984 年, 在美日合作的 7 层足尺框剪结构的振动台试验基础上, Kabeyasawa 等<sup>[7]</sup>提出了三垂直杆元模型。为了解决三垂直杆元中弯曲弹簧和其他弹簧变形协调

困难的问题, Vulcano 和 Bertero<sup>[8]</sup>于 1988 年提出了一个修正的模型, 即多垂直杆元模型。多垂直杆元模型中决定相对转动中心高度的参数  $c$  的取值问题难以确定, 孙景江等<sup>[9]</sup>证明参数  $c$  应取 0.5, 多垂直杆元模型实质上是一种修正的铁木辛柯分层梁单元。美国加州大学 Massone L M 和 Orakcal K 于 2006 年<sup>[10-11]</sup>提出一个改进的多垂直杆元宏观单元用来模拟剪力墙的弯剪耦合作用, 并在有限元软件 OpenSees 中二次开发实现。宏观有限元模型的难点是在于模型中有些参数取值难以确定, 并且不能采用材料本构关系。

由于剪力墙非线性分析单元目前并不成熟, 本文试图对纤维单元进行修正, 将其引入剪力墙的计算单元中, 提出考虑截面剪切变形的修正基于力插值纤维单元(Modified Force-based Fiber Element), 其截面不再是平截面, 而是曲面, 并采用 OpenSees<sup>[12]</sup>二次开发, 对一组剪力墙实例进行模拟。实例分析表明, 本文提出的修正基于力插值单元有较高的精度。

## 1 MFBFE 单元的形成

### 1.1 基于力插值的纤维单元(Force-based Fiber Element)的形成

基于力插值纤维单元最初由 Kaba 和 Mahin<sup>[13]</sup>提出, 并给出二维单元的形成。Zeris 和 Mahin<sup>[14-15]</sup>进一步扩展到三维单元。对于不包含刚体模式的三维单元的坐标系如图 1 所示。

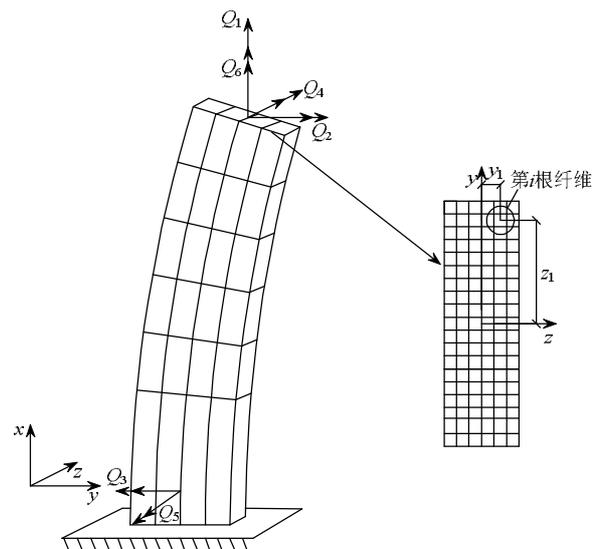


图 1 基于力插值纤维单元坐标系

Fig.1 Basic system for three-dimensional force-based fiber elements

单元位移包括一个轴向位移、四个转角位移和一个扭转位移，位移向量表示为：

$$\mathbf{q} = \{d_1 \ d_2 \ d_3 \ d_4 \ d_5 \ d_6\}^T \quad (1)$$

对应单元力向量表示为：

$$\mathbf{Q} = \{Q_1 \ Q_2 \ Q_3 \ Q_4 \ Q_5 \ Q_6\}^T \quad (2)$$

截面内力向量可以表示为：

$$\mathbf{D}(x) = \begin{Bmatrix} N(x) \\ M_y(x) \\ M_z(x) \\ M_x(x) \end{Bmatrix} \quad (3)$$

式中： $N$  代表截面的轴力； $M_y$ 、 $M_z$  为绕截面  $y$  轴、 $z$  轴的弯矩； $M_x$  为扭矩。

单元构造的是力插值函数，其轴力采用常量插值，弯矩采用线性插值，扭矩采用常量插值：

$$\mathbf{D}(x) = b(x)\mathbf{Q} \quad (4)$$

$$b(x) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{x}{L}-1 & \frac{x}{L} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{x}{L}-1 & \frac{x}{L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中， $b(x)$  为力插值函数。

截面变形与内力之间的关系用增量表示为：

$$\Delta d(x) = \mathbf{f}(x)\Delta \mathbf{D}(x) \quad (6)$$

其中， $\mathbf{f}(x)$  代表截面的柔度矩阵，可以由截面刚度矩阵  $\mathbf{k}(x)$  求逆得到。

由虚力原理得到：

$$d\mathbf{Q}^T \Delta \mathbf{q} = \int_0^L d\mathbf{D}^T(x)\Delta d(x)dx \quad (7)$$

把式(4)、式(6)代入式(7)可以得到：

$$d\mathbf{Q}^T(\Delta \mathbf{q} - \mathbf{F}\Delta \mathbf{Q}) = 0 \quad (8)$$

由  $d\mathbf{Q}$  的任意性可得：

$$\Delta \mathbf{q} = \mathbf{F}\Delta \mathbf{Q} \quad (9)$$

$$\mathbf{F} = \int_0^L \mathbf{b}^T(x)\mathbf{f}(x)\mathbf{b}(x)dx \quad (10)$$

$$\mathbf{K} = \mathbf{F}^{-1} \quad (11)$$

式中： $\mathbf{F}$  为单元的柔度矩阵； $\mathbf{K}$  为单元的刚度矩阵。

为了得到截面刚度矩阵  $\mathbf{k}$ ，构件截面沿其纵向分割为有限根纤维，纤维有钢筋纤维和混凝土纤维两种，每种材料有各自的单轴本构关系。关键在于

确定每根纤维的轴向应变，这样由本构关系确定其应力，积分得到轴力及弯矩。

截面参考轴的变形矩阵表示为：

$$\mathbf{d} = \{\mathbf{e}_x \ \mathbf{j}_y \ \mathbf{j}_z \ \mathbf{j}_x\}^T \quad (12)$$

式中： $\mathbf{e}_x$  为轴向应变； $\mathbf{j}_z$  为曲率； $\mathbf{j}_x$  为扭转角。

由平截面假定，如图 1，得到任意一根纤维的轴向应变：

$$\mathbf{e}_i = \mathbf{e}_x - y\mathbf{j}_z + z\mathbf{j}_y \quad (13)$$

那么得到：

$$N = \sum_{i=1}^n [(E_t)_i(\mathbf{e}_x + \mathbf{j}_y z_i - \mathbf{j}_z y_i)A_i] = \sum_{i_c=1}^{n_c} [(E_t)_{i_c}(\mathbf{e}_x + \mathbf{j}_y z_{i_c} - \mathbf{j}_z y_{i_c})A_{i_c}] + \sum_{i_s=1}^{n_s} [(E_t)_{i_s}(\mathbf{e}_x + \mathbf{j}_y z_{i_s} - \mathbf{j}_z y_{i_s})A_{i_s}] \quad (14)$$

$$M_y = \sum_{i=1}^n [(E_t)_i(\mathbf{e}_x + \mathbf{j}_y z_i - \mathbf{j}_z y_i)A_i z_i] = \sum_{i_c=1}^{n_c} [(E_t)_{i_c}(\mathbf{e}_x + \mathbf{j}_y z_{i_c} - \mathbf{j}_z y_{i_c})A_{i_c} z_{i_c}] + \sum_{i_s=1}^{n_s} [(E_t)_{i_s}(\mathbf{e}_x + \mathbf{j}_y z_{i_s} - \mathbf{j}_z y_{i_s})A_{i_s} z_{i_s}] \quad (15)$$

$$M_z = \sum_{i=1}^n [(E_t)_i(\mathbf{e}_x + \mathbf{j}_y z_i - \mathbf{j}_z y_i)A_i(-y_i)] = \sum_{i_c=1}^{n_c} [(E_t)_{i_c}(\mathbf{e}_x + \mathbf{j}_y z_{i_c} - \mathbf{j}_z y_{i_c})A_{i_c}(-y_{i_c})] + \sum_{i_s=1}^{n_s} [(E_t)_{i_s}(\mathbf{e}_x + \mathbf{j}_y z_{i_s} - \mathbf{j}_z y_{i_s})A_{i_s}(-y_{i_s})] \quad (16)$$

式中的符号意义见表 1。

表 1 符号意义

Table 1 Meaning of symbols

纤维类型	纤维总数	纤维编号	坐标	面积	切线模量	截面参考轴变形
混凝土	$n_c$	$i_c$	$(y_{i_c}, z_{i_c})$	$A_{i_c}$	$(E_t)_{i_c}$	$\mathbf{e}_x, \mathbf{j}_y, \mathbf{j}_z$
钢筋	$n_s$	$i_s$	$(y_{i_s}, z_{i_s})$	$A_{i_s}$	$(E_t)_{i_s}$	$\mathbf{e}_x, \mathbf{j}_y, \mathbf{j}_z$

把式(14)~式(16)综合起来得到：

$$\begin{Bmatrix} N \\ M_y \\ M_z \\ M_x \end{Bmatrix} = \mathbf{k} \begin{Bmatrix} \mathbf{e}_x \\ \mathbf{j}_y \\ \mathbf{j}_z \\ \mathbf{j}_x \end{Bmatrix} \quad (17)$$

$$k = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n (E_t)_i A_i & \sum_{i=1}^n (E_t)_i A_i z_i & -\sum_{i=1}^n (E_t)_i A_i y_i & 0 \\ \sum_{i=1}^n (E_t)_i A_i z_i & \sum_{i=1}^n (E_t)_i A_i z_i^2 & -\sum_{i=1}^n (E_t)_i A_i y_i z_i & 0 \\ -\sum_{i=1}^n (E_t)_i A_i y_i & -\sum_{i=1}^n (E_t)_i A_i y_i z_i & \sum_{i=1}^n (E_t)_i A_i y_i^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & GJ \end{bmatrix} \quad (18)$$

1.2 修正的基于力插值纤维单元(Modified Force-based Fiber Element)的形成

基于力插值纤维单元在模拟细长构件时能够给出满意的结果,其基本假定是小变形和截面变形后仍然保持平面。由 1.1 节的截面刚度矩阵公式可以看出,纤维单元的一个优点是自动考虑轴力和弯矩之间的耦合作用,另外纤维单元的本构是基于材料的滞回模型,因此可以考虑复杂的材料行为。但对于剪力墙构件,其截面高度比较大,仍采用平截面假定忽略截面剪切变形将会造成较大的误差。基于这一背景,本文提出考虑截面剪切变形的修正基于力插值纤维单元,在原来的插值函数中加入剪力插值函数。由于剪力的影响,单元变形后,横截面发生翘曲,不再保持平面。对于不包含刚体模式的三维单元的坐标系如图 2(a)所示。

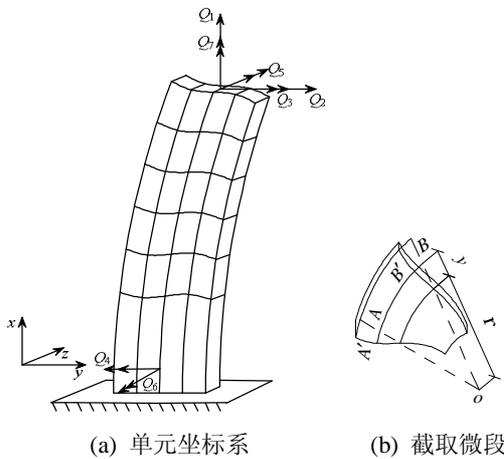


图 2 修正的基于力插值纤维单元坐标系

Fig.2 Basic system for three-dimensional modified force-based fiber elements

单元位移包括一个轴向位移、一个剪切位移、四个转角位移和一个扭转位移,位移向量表示为:

$$q = \{d_1 \ d_2 \ d_3 \ d_4 \ d_5 \ d_6 \ d_7\}^T \quad (19)$$

对应单元力向量表示为:

$$Q = \{Q_1 \ Q_2 \ Q_3 \ Q_4 \ Q_5 \ Q_6 \ Q_7\}^T \quad (20)$$

截面内力向量可以表示为:

$$D(x) = \begin{Bmatrix} N(x) \\ V(x) \\ M_y(x) \\ M_z(x) \\ M_x(x) \end{Bmatrix} \quad (21)$$

式中:  $V$  代表截面的剪力,其他符号意义同 1.1 节。

单元构造的是力插值函数,其轴力采用常量插值,剪力采用常量插值,弯矩采用线性插值,扭矩采用常量插值:

$$D(x) = b(x)Q \quad (22)$$

$$b(x) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{x}{L}-1 & \frac{x}{L} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{x}{L}-1 & \frac{x}{L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (23)$$

其中,  $b(x)$  为力插值函数。

同样像 1.1 节一样由虚力原理得到单元的刚度矩阵。

截面上的内力,除弯矩外还有剪力。由于剪力的影响,横截面发生翘曲,不再保持平面。但由于单元构造的剪力为常量,各横截面的翘曲情况完全相同,因此纵向纤维的伸长与缩短与平截面假定时没有差异。图 2(b)表示从变形后的单元中截取的微段,由图可见,任一层纵向纤维的弧长  $A'B' = AB$ 。因此,仍然可以像 1.1 节一样,构件截面沿其纵向分割为有限根纤维,积分得到轴力及弯矩。

截面参考轴的变形矩阵为:

$$d = \{e_x \ g \ j_y \ j_z \ j_x\}^T \quad (24)$$

式中:  $g$  为剪切应变,其他符号意义同 1.1 节。

截面刚度矩阵  $k$  可表示为:

$$\begin{Bmatrix} N \\ V \\ M_y \\ M_z \\ M_x \end{Bmatrix} = k \begin{Bmatrix} e_x \\ g \\ j_y \\ j_z \\ j_x \end{Bmatrix} \quad (25)$$

$$k = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n (E_t)_i A_i & 0 & \sum_{i=1}^n (E_t)_i A_i z_i & -\sum_{i=1}^n (E_t)_i A_i y_i & 0 \\ 0 & GA_w / c & 0 & 0 & 0 \\ \sum_{i=1}^n (E_t)_i A_i z_i & 0 & \sum_{i=1}^n (E_t)_i A_i z_i^2 & -\sum_{i=1}^n (E_t)_i A_i y_i z_i & 0 \\ -\sum_{i=1}^n (E_t)_i A_i y_i & 0 & -\sum_{i=1}^n (E_t)_i A_i y_i z_i & \sum_{i=1}^n (E_t)_i A_i y_i^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & GJ \end{bmatrix} \quad (26)$$

## 2 单轴本构的形成

### 2.1 混凝土单轴本构

混凝土的本构模型采用经 Scott 修正的 Kent-Park 模型<sup>[16]</sup>, 如图 3 所示, 它只考虑混凝土受压, 不考虑混凝土的抗拉作用。该模型混凝土受压骨架曲线采用抛物线形的上升段和双折线形的下降段组成。

$$s_c = \begin{cases} Kf'_c [2(e_c / e_0) - (e_c / e_0)^2], & e_c \leq e_0 \\ Kf'_c [1 - Z(e_c - e_0)], & e_0 \leq e_c \leq e_u \\ 0.2Kf'_c, & e_u \leq e_c \end{cases} \quad (27)$$

其中:

$$K = 1 + \frac{r_{sv} f_{yv}}{f'_c} \quad (28)$$

$$Z = \frac{0.5}{\frac{3 + 0.29f'_c}{145f'_c - 1000} + 0.75r_{sv} \sqrt{\frac{h'}{s}} - e_0} \quad (29)$$

式中:  $s_c$ 、 $e_c$  分别为混凝土的压应力和压应变;  $f'_c$ 、 $e_0$  分别是混凝土棱柱体的峰值应力和峰值应变;  $K$  表示约束区混凝土强度增加系数;  $Z$  表示应变软化斜率;  $r_{sv}$  表示体积配箍率;  $f_{yv}$  表示箍筋屈服强度;  $h'$  表示从箍筋外边缘算起的核心混凝土宽度;  $s$  为箍筋间距。

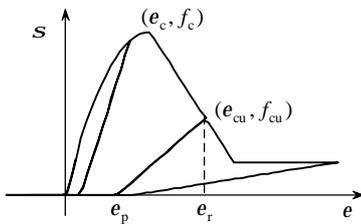


图 3 混凝土的滞回应力-应变关系

Fig.3 Hysteresis stress-strain relationship of concrete

受压混凝土卸载段为直线, 由式(30)确定, 再加载路径与卸载路径重合。

$$\begin{cases} e_p / e_0 = 0.145(e_r / e_0)^2 + 0.13(e_r / e_0), & (e_r / e_0) < 2 \\ e_p / e_0 = 0.707(e_r / e_0 - 2)^2 + 0.834, & (e_r / e_0) \geq 2 \end{cases} \quad (30)$$

式中:  $e_p$  为应力等于 0 时的应变;  $e_r$  为卸载点对应的应变。

### 2.2 钢筋单轴本构

钢筋的本构模型采用可考虑等向应变硬化和包辛格效应的修正的 Menegotto-Pinto 模型<sup>[17]</sup>, 如图 4 所示。其应力-应变关系曲线方程见下式:

$$s_s = a e_s + \frac{(1-a)e_s}{[1+(e_s)^R]^{1/R}} \quad (31)$$

式中:  $a$  为应变硬化率;  $e_s$  和  $s_s$  为标准化的应变与应力, 当初次加载时:

$$\begin{cases} e_s = e_s / e_{sa} \\ s_s = s_s / s_{sa} \end{cases} \quad (32)$$

再加载之后:

$$\begin{cases} e_s = \frac{e_s - e_{sa}}{2e_{sa}} \\ s_s = \frac{s_s - s_{sa}}{2s_{sa}} \end{cases} \quad (33)$$

$R$  为从弹性段到塑性段的形状控制参数,

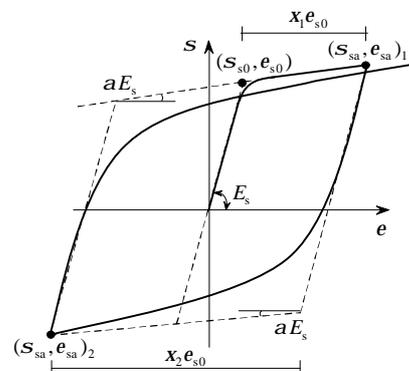


图 4 钢筋的滞回应力-应变关系

Fig.4 Hysteresis loop and stress-strain relationship of steel bar

$$R = R_0 - \frac{a_1 X}{a_2 + X} \quad (34)$$

式中,  $x$  为循环应变差, 每次循环加载要进行更新。

### 2.3 截面剪切本构

由于钢筋混凝土构件在受剪过程中一般要经历开裂、屈服、破坏三个关键阶段, 因此本文采用由开裂点、屈服点、破坏点为折线的三折线模型作为混凝土的剪切本构, 如图 5 所示。

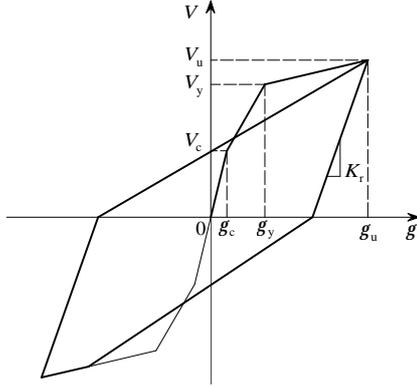


图 5 钢筋的滞回应力-应变关系

Fig.5 Hysteresis loop and stress-strain relationship of steel bar

截面剪切开裂时的剪力和剪切变形可由下式得到:

$$V_c = 0.438 f_c^{1/2} A_w, \quad g_c = V_c / K_0 \quad (35)$$

其中:

$$K_0 = G A_w / c,$$

$$c = 3(1+u)[1-u^2(1-v)] / 4[1-u^3(1-v)].$$

式中:  $f_c$  表示混凝土的抗压强度;  $A_w$  表示截面面积;  $K_0$  表示截面初始剪切刚度;  $G$  表示剪切模量;  $c$  表示形状系数;  $u$ 、 $v$  表示截面几何参数。

截面剪切屈服时的剪力和剪切变形可由 Hirosewa<sup>[18]</sup>提出的公式得到:

$$g_y = g_c + a K_0 (V_y - V_c) \quad (36)$$

$$V_y = [0.0679 r_t^{0.23} (f_c + 17.6) / (M / VL + 0.12)]^{1/2} + 0.845 (f_{wh} r_{wh})^{1/2} + 0.1 s_0] b_c \quad (37)$$

式中:  $r_t$  表示有效纵向受拉钢筋配筋率;  $M / VL$  表示剪跨比;  $f_{wh}$  表示水平配筋的屈服强度;  $r_{wh}$  表示有效水平配筋率;  $s_0$  表示截面上的平均正应力;  $b_c$  表示剪力墙的厚度;  $a$  表示剪切开裂后的刚度比。

截面剪切破坏时的剪力和剪切变形可由下式得到:

$$V_u = f_c^{1/2} A_w, \quad g_u = 2g_y \quad (38)$$

截面剪切本构卸载段为直线, 由式(39)确定, 再加载路径与卸载路径重合。

$$K_r = \frac{V_c + V_y}{g_c + g_y} \left| \frac{g_u}{g_y} \right|^{-a_k} \quad (39)$$

式中:  $K_r$  为卸载刚度;  $a_k$  为卸载刚度降低系数。

## 3 MFBFE 的开发

### 3.1 非线性分析算法

MFBFE 的非线性分析算法流程图见图 6。分析中, 首先要计算出材料的切线刚度矩阵  $E_t$ , 进而得到截面的刚度矩阵  $k$ 、单元刚度矩阵  $K$ , 最终得到结构的刚度矩阵  $K_{str}$ 。某一荷载增量下, 结构的完整非线性分析需要两次迭代过程。一次是构件的残余变形  $s$  检验, 它是单元内部的迭代, 另一次是结构的不平衡力  $P_u$  检验, 它是单元外部、结构分析中的迭代。

### 3.2 OpenSees 程序开发

OpenSees 的全称是 Open System for Earthquake Engineering Simulation(地震工程模拟的开放体系)。OpenSees 是应用于地震工程研究的有限元程序, 由美国国家自然科学基金资助, 太平洋地震工程研究中心研发, 其主要特点是采用面向对象的语言开发, 代码开放, 用户可以根据需要加入相应的模块, 因此有助于协同开发<sup>[19-20]</sup>。

为了在 OpenSees 中实现 MFBFE 的开发, 前述 Modified Force-based Fiber Element 在 Element 类内开发, 截面剪切单轴本构 SectionShear 在 Uniaxial Material 类内开发, 并采用了 OpenSees 中的钢筋本构 Steel02 和混凝土本构 Concrete01。把这三个单轴本构赋予 Section Force Deformation 类, 供 Modified Force-based Fiber Element 调用, 它们的继承图见图 7 所示。

## 4 实例验证

### 4.1 试验介绍

为了验证 MFBFE 单元的合理性, 本文选取同济大学为了研究钢筋混凝土剪力墙变参数抗震性能研究而进行的两组六个钢筋混凝土剪力墙拟静力往复加载试验<sup>[21-22]</sup>进行数值模拟。模型材料的力学性能参数如表 2 和表 3 所示。试件分为两组, SW1-1、SW1-2 和 SW1-3 为变换轴压比组, 试件高宽比为 2.0, 混凝土强度为 C30, 轴压比分别为 0.1、0.2、0.3; SW2-1、SW2-2、SW2-3 为变换高宽比组,

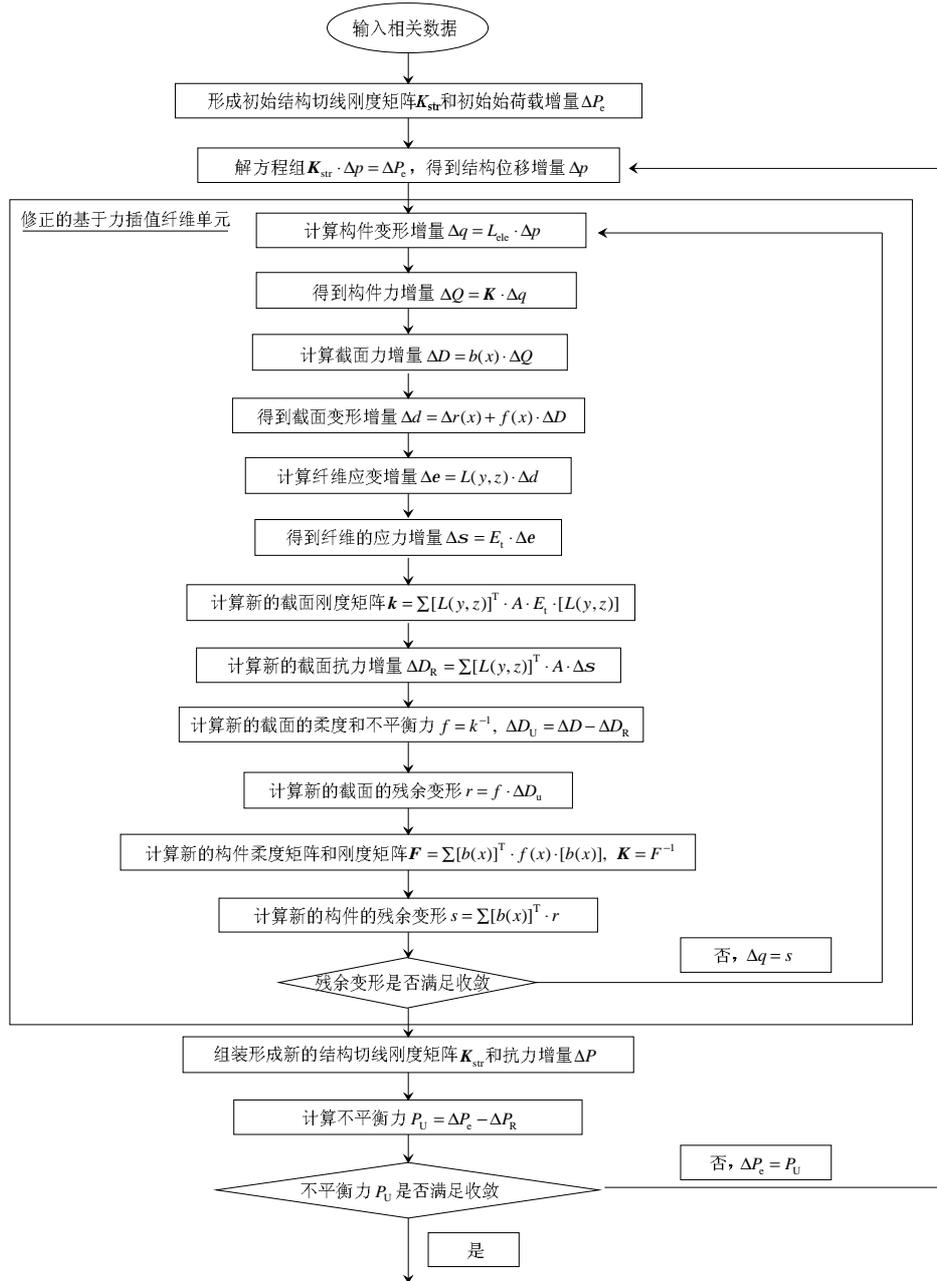


图 6 非线性分析算法流程图  
Fig.6 Nonlinear analysis algorithm

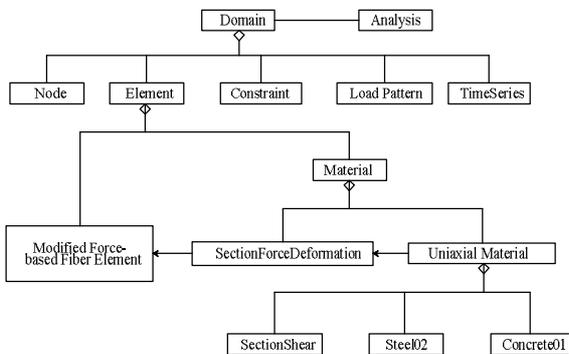


图 7 MFBFE 在 OpenSees 中的继承图  
Fig.7 Implementation of MFBFE into OpenSees

表 2 混凝土的力学性能参数

Table 2 Properties of concrete

混凝土类型	$f_{cu,150mm}/\text{MPa}$	$f_c,150mm/\text{MPa}$
C30	20.7	19.7
C40	37.7	30.8

表 3 钢筋的力学性能参数

Table 3 Properties of reinforcing bars

钢筋型号	Φ4	Φ6	Φ8	Φ10	Φ10	Φ12
实际直径/mm	3.91	6.54	8.05	9.41	9.74	12.55
屈服强度/MPa	348	392	343	352	379	325
极限强度/MPa	409	479	447	493	554	195
弹性模量/MPa	198800	200600	206800	202700	181200	169000

试件混凝土强度为 C40, 轴压比为 0.3, 高宽比分别为 1.0、1.5 和 2.0; 试件边缘约束长度和配筋详细信息参见文献。两组试件具有广泛的代表性, 可以用来检验单元的应用效果。

4.2 分析模型

采用本文的 MFBFE 单元对 6 个试件进行有限元分析。分析中钢筋本构采用 Steel02, 混凝土本构采用 Concrete01, 截面剪切本构采用 SectionShear。每个构件都采用一个单元, 四个截面进行模拟, 截面上的纤维划分如下: 未约束混凝土纤维个数采用  $4 \times 4 + 4 \times 4$ , 约束混凝土纤维个数采用  $8 \times 8 + 6 \times 8$ , 钢筋纤维个数按每个构件的竖向钢筋而定, 详细信息见表 4。分析中, 首先施加竖向荷载进行重力分析, 然后保持竖向轴力恒定, 施加往复的水平荷载, 采用位移控制, 记录下每一步的节点位移和力。

表 4 试件划分

Table 4 Discretization of specimens

	SW1-1	SW1-2	SW1-3	SW2-1	SW2-2	SW2-3
单元个数	1	1	1	1	1	1
截面个数	4	4	4	4	4	4
未约束混凝土纤维个数	32	32	32	32	32	32
约束混凝土纤维个数	112	112	112	112	112	112
钢筋纤维个数	20	20	20	20	20	20

4.3 分析结果和试验结果比较

6 个构件的顶点力-位移的滞回曲线的分析结果和试验结果见图 8 所示。从图中骨架曲线可以看出, 分析结果与试验结果吻合较好, 成功预测了构件的初始刚度、屈服力、极限力。从滞回曲线可以看出, 分析的卸载刚度、残余位移、延性和能量耗散都预测较为准确。

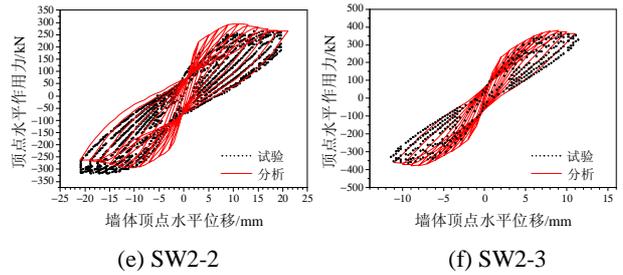
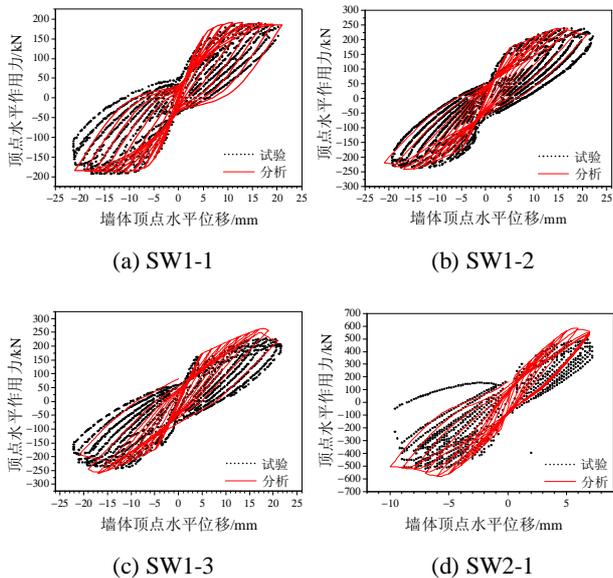


图 8 构件顶点力-位移滞回曲线

Fig.8 Top force vs. displacement hysteretic curves of specimens

5 结论

本文提出针对纤维模型的一个基本假设中, 对其进行修正, 提出了一种新的剪力墙计算模型 MFBFE, 使其能够应用于剪切变形较大的剪力墙构件的地震反应分析。修正后的基于力插值纤维模型抛弃平截面假定的基本假设, 考虑截面剪切的影响, 在普通的基于力插值纤维单元的插值函数中加入剪力插值函数, 使截面变形将发生翘曲; 同时保留了基于力插值纤维单元的优点, 即将截面划分纤维, 进而积分得到截面内力和变形, 较为方便的考虑轴力和弯矩之间的耦合作用。

本文详述了 MFBFE 单元在 OpenSees 中的开发过程以及非线性分析算法。为了验证本文剪力墙计算模型 MFBFE 的准确性, 对一组 6 个钢筋混凝土剪力墙拟静力往复加载试验进行数值模拟。预测了构件的初始刚度、屈服力、极限力、卸载刚度、残余位移、延性和能量耗散, 这些构件的抗震性能指标与试验值都比较接近, 验证了新的模型有较好的应用效果。

参考文献:

[1] Scott M H, Fennes G L. Plastic hinge integration methods for force-based beam-column elements [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2006, 132(2): 244-252.

[2] 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(10): 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(10): 39-46. (in Chinese)

[3] 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): 51-56.

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): 51—56. (in Chinese)
- [4] 陆新征, 叶列平, 缪志伟, 等. 建筑抗震弹塑性分析--原理、模型与在 ABAQUS, MSC.MARC 和 SAP2000 上的实践[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.  
Lu Xinzheng, Ye Lieping, Miao Zhiwei, et al. Elastoplastic analysis of buildings against earthquake -- Theory, model, implementation on ABAQUS, MSC.MARC and SAP2000 [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009. (in Chinese)
- [5] Hsu T T C, Mo Y L. Unified theory of concrete structures [M]. New York: John Wiley & Sons, 2010.
- [6] Mo Y L, Zhong J, Hsu T T C. Seismic simulation of RC wall-type structures [J]. *Engineering Structures*, 2008, 30(11): 3167—3175.
- [7] Kabeyasawa T, Shiohara T, Otani S, Aoyama H. Analysis of the full-scale seven story reinforced concrete test structure: Test PSD3, Proc. 3rd JTCC, US-Japan Cooperative Earthquake Research Program [M]. Tsukuba, Japan: BRI, 1982.
- [8] Vulcano A, Bertero V V, Colotti V. Analytical. Modeling of RC Structural Walls. Procs [C]. 9th WCEE, Tokyo-Kyoto, 1988, 3(6): 41—46.
- [9] 孙景江, 江近仁. 高层建筑抗震墙非线性分析的扩展铁木辛哥分层梁单元[J]. *地震工程与工程振动*, 2001, 22(2): 78—83.  
Sun Jingjiang, Jiang Jinren. Extended timoshenko layered beam element for nonlinear analysis of RC high-rise buildings with structural walls [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2001, 22(2): 78—83. (in Chinese)
- [10] Massone L M. RC wall shear – flexure interaction: Analytical and experimental responses [D]. Los Angeles: University of California, 2006.
- [11] Massone L M, Orakcal K, Wallace J W. Shear - flexure interaction for structural walls [J] AIC SP-236, 2006: 127—150.
- [12] Silvia Mazzoni, Frank McKenna, Michael H Scott, Gregory L Fenves. OpenSees users manual [Z]. PEER, Berkeley, University of California, 2004.
- [13] Kaba S, Mahin S A. Refined modeling of reinforced concrete columns for seismic analysis [R]. Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1984.
- [14] Zeris C A, Mahin S A. Analysis of reinforced concrete beam-columns under uniaxial excitation [J]. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 1988, 4(114): 804—820.
- [15] Zeris C A, Mahin S A. Behavior of reinforced concrete structures subjected to biaxial excitation [J]. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 1991, 9(117): 2657—2673.
- [16] Scott B D, Park R, Priestley M J N. Stress-strain behavior of concrete confined by overlapping hoops at low and high strain rates [J]. *ACI Journal Proceedings*, 1982, 79(1): 13—27.
- [17] Menegotto M, Pinto P E. Method of analysis for cyclically loaded R.C. plane frames including changes in geometry and non-elastic behavior of elements under combined normal force and bending [C]. Lisbon: International Association for Bridge and Structural Engineering, 1973.
- [18] Hirose M. Past experimental results on reinforced concrete shear walls and analysis on them [R]. Japan: Building Research Institute, Ministry of Construction, 1975: 277.
- [19] Frank McKenna, Gregory L Fenves. Introducing a new element into OpenSees [R]. PEER, University of California, Berkeley, 2000.
- [20] Frank McKenna, Gregory L Fenves. Introducing a new material into OpenSees [R]. PEER, University of California, Berkeley, 2000.
- [21] 章红梅, 吕西林, 鲁亮, 曹文清. 边缘约束构件对钢筋混凝土剪力墙抗震性能的影响[J]. *地震工程与工程振动*, 2007, 27(1): 92—98.  
Zhang Hongmei, Lü Xilin, Lu Liang, Cao Wenqing. Influence of boundary element on seismic behavior of reinforced concrete shear walls [J]. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2007, 27(1): 92—98. (in Chinese)
- [22] 章红梅, 吕西林, 杨雪平, 张松. 边缘构件配箍对钢筋混凝土剪力墙抗震性能的影响[J]. *结构工程师*, 2008, 24(5): 100—104.  
Zhang Hongmei, Lü Xilin, Yang Xueping, Zhang Song. Influence of boundary stirrup on seismic behavior of reinforced concrete shear walls [J]. *Structural Engineers*, 2008, 24(5): 100—104. (in Chinese)