

文章编号: 1007-2861(2009)03-0316-04

非线性剪力墙单元模型的改进及其应用

朱杰江^{1,2}, 郑琼¹, 田堃¹

(1. 上海大学 土木工程系, 上海 200072; 2. 同济大学 结构工程与防灾研究所, 上海 200092)

摘要: 现有的钢筋混凝土剪力墙模型虽然求解精度高, 但计算量大, 各参数取值困难, 不适合大型结构的弹塑性计算. 在已有钢筋混凝土剪力墙模型基础上, 基于非线性梁单元模型, 建立了一种便于非线性分析应用的剪力墙模型, 即由承受轴力及弯矩的竖直杆单元与承受剪切变形的剪切子单元组合而成的墙单元模型, 推导了该模型的单元刚度矩阵. 最后给出一个算例, 并与试验结果比较, 表明加入剪切弹簧的非线性墙单元模型具有较好的计算精度.

关键词: 剪力墙; 钢筋混凝土; 非线性

中图分类号: TU 375

文献标志码: A

Improved Element Model for Nonlinear Reinforced Concrete Walls and Its Application

ZHU Jie-jiang^{1,2}, ZHENG Qiong¹, TIAN Kun¹

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China;

2. Research Institution of Structural Engineering and Disaster Reduction, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Although the existing shear-wall model has high numerical precision, computation complexity and difficulties in the sampling process of each parameter have limited its application. In this paper, a simple wall element model based on the nonlinear element model for beams by comparing the existing models is proposed. The proposed model is composed of beam element representing axial deformation and flexural deformation only, and shear element representing shearing only. The stiffness matrix of the proposed element is also established. An example is calculated and compared with the tested results, showing that the model test has relatively good accuracy.

Key words: shear wall; reinforced concrete; nonlinearity

钢筋混凝土框架-剪力墙结构是一种在高层建筑中应用极为广泛的抗震结构体系. 钢筋混凝土剪力墙是目前高层与超高层建筑中最主要的抗侧力构件, 其非线性计算模型的研究越来越受到许多研究人员的重视^[1-7].

目前, 在国内外的钢筋混凝土结构非线性计算

中, 剪力墙的非线性分析模型主要有等效梁模型、等效支撑模型、二维墙板单元模型、三垂直杆元模型、多垂直杆元模型、空间薄壁杆件模型和三维壳元模型, 其中空间薄壁杆件模型和三维壳元模型目前仅限于弹性分析. 这些模型有些作了较大的简化, 设计分析中会带来较大误差. 有些又过于精细, 虽求解精

度高,但计算工作量大,不适合大型结构的弹塑性分析.为了便于工程应用且又能满足一定的精度要求,本工作在考虑材料非线性的梁单元模型基础上,加入剪切弹簧考虑剪力墙的剪切变形.

1 剪力墙单元非线性分析模型

图1所示为层间剪力墙,由竖直杆单元*i-j*与剪切子单元*k*叠加而成.具体方法是:将剪力墙竖直杆单元根据钢筋与混凝土的非线性应力-应变关系,考虑剪力墙的轴向、弯曲变形.剪切子单元位于墙体的 $c_h=0.5$ 高度处,剪力墙单元的4节点1,2,3和4集中于带水平弹簧的杆件*i-j*之上,由刚臂联接.为了使剪力墙模型的协调性得到进一步加强,将一相对刚度较大的梁单元1'-3',2'-4'重合于杆件1-3,2-4之上,这样不仅能使剪力墙模型更趋于协调,而且同时也将所加的梁单元模拟成上下平面刚度无穷大的楼板的一部分,更符合实际.杆件*i-k*和*k-j*采用已推导得出的考虑材料非线性梁单元刚度矩阵^[8],具体流程如图2所示.

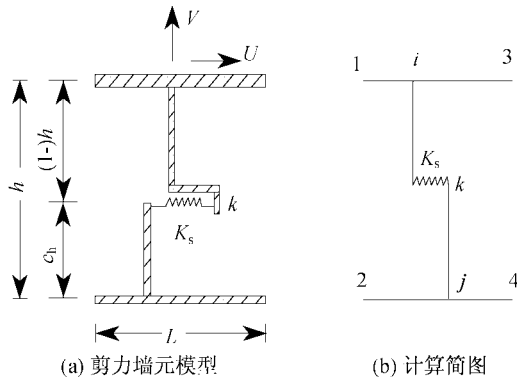


图1 剪力墙元模型及计算简图

Fig.1 Model of shear wall element and its simplified figure

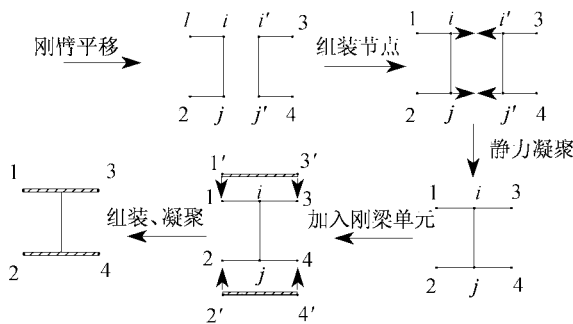


图2 加入协调梁元流程图

Fig.2 Flowcharting added cooperative element

2 刚度矩阵推导

剪切子单元可将墙体单元分为完全相同的两部分,先取上半部*i-k*段进行分析.假设墙体单元在*i*端完全固定,设单元在*k*端的位移为

$$\begin{aligned} \{d_k\}^T &= \{u_k \quad v_k \quad \theta_k\}, \\ \{F_k\}^T &= \{X_k \quad Y_k \quad M_k\}, \end{aligned}$$

式中, u_k, v_k, θ_k 分别表示*k*端的水平位移、形心轴心处的竖向位移和转角, X_k, Y_k, M_k 为节点*k*处对应施加的力.

设*k*端由于剪切变形引起的水平位移为 u'_k ,转角为 θ'_k ,假设杆件由*m*根纤维组成,第*m*纤维单元*k*端的轴向位移为 v'_k ,*i*端各对应位移均为0,

$$\delta u = u'_k - 0 = u'_k, \tag{1}$$

$$\delta v = v'_k - 0 = -l_m \cdot \sin \theta'_k, \tag{2}$$

式中, l_m 为第*m*纤维单元距横截面形心轴的水平距离.

基于小变形假设, $\sin \theta'_k \approx \theta'_k$,则式(2)可写为

$$\delta v = -l_m \cdot \theta'_k. \tag{3}$$

给单元一虚位移 $\{\tilde{d}_k\}^T = \{\tilde{u}_k \quad \tilde{v}_k \quad \tilde{\theta}_k\}$,则外力在虚位移上所做的功为 $W = \{\tilde{d}_k\}^T \{F_k\}$.

内力在虚变形上所做的功为

$$U = K_s \delta u \delta \tilde{u} + \sum_{m=1}^n K_v \delta v \delta \tilde{v}, \tag{4}$$

式中, K_s 为水平抗剪弹簧刚度即剪切子单元刚度, K_v 为第*m*纤维单元的轴向刚度.

由虚功原理得

$$\{\tilde{d}_k\}^T \{F_k\} = K_s \delta u \delta \tilde{u} + \sum_{m=1}^n K_v \delta v \delta \tilde{v}, \tag{5}$$

把式(1)和式(3)代入式(5),整理后得

$$\{\tilde{d}_k\}^T \{F_k\} = \{\tilde{d}_k\}^T \{K_{kk}\} \{d_k\}, \tag{6}$$

即可得

$$\{F_k\} = \{K_{kk}\} \{d_k\}, \tag{7}$$

$$[K_{kk}] = \begin{bmatrix} K_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sum_{m=1}^n K_v l_m^2 \end{bmatrix}, \tag{8}$$

式中, $[K_{kk}]$ 即为上半部*i-k*段记入剪切弹簧影响的梁单元*k*端刚度.

建立*i-k*段平面梁单元刚度矩阵,即建立如下

关系式:

$$\begin{Bmatrix} F_i \\ F_k \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{ii} & K_{ik} \\ K_{ki} & K_{kk} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_i \\ d_k \end{Bmatrix} \quad (9)$$

根据静力平衡条件及单元刚度矩阵的对称性和任意性,可得*i-k*段的单元刚度矩阵为

$$\mathbf{K}^a = \begin{bmatrix} K_s & 0 & lK_s & -K_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ l^2K_s + \sum_{m=1}^n K_v l_m^2 & -lK_s & 0 & -\sum_{m=1}^n K_v l_m^2 & & \\ \text{对} & & K_s & 0 & 0 & \\ \text{称} & & 0 & 0 & & \\ & & & & & \sum_{m=1}^n K_v l_m^2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

由于采用了梁元的主轴作为单元的局部坐标系,可以采用叠加原理,将上述推导出的只考虑剪切弹簧作用的单元刚度矩阵,按照已有的非线性单梁刚度矩阵规定的顺序,组集成主轴坐标系内完整的一端加入剪切弹簧的单梁刚度矩阵,公式如下:

$$\mathbf{K}^{wa} = \mathbf{K}^1 + \mathbf{K}^a, \quad (11)$$

式中, \mathbf{K}^{wa} 为*i-k*段单元刚度矩阵(6×6), \mathbf{K}^1 为已知平面单梁刚度矩阵(6×6).

同理可得到*k-j*段的单元刚度矩阵为

$$\mathbf{K}^{wa} = \begin{bmatrix} K_{ii}^{wa} & K_{ik}^{wa} \\ K_{ki}^{wa} & K_{kk}^{wa} \end{bmatrix}_{(6 \times 6)}, \quad \mathbf{K}^{wb} = \begin{bmatrix} K_{kk}^{wb} & K_{kj}^{wb} \\ K_{jk}^{wb} & K_{jj}^{wb} \end{bmatrix}_{(6 \times 6)}, \quad (12)$$

式中, \mathbf{K}_*^{wa} , \mathbf{K}_*^{wb} 分别为各节点(3×3)子矩阵.

运用叠加原理,将*i-k*,*k-j*段叠加为3节点(9×9)的加入剪切弹簧单梁刚度矩阵,即

$$\mathbf{K}^{w1} = \begin{bmatrix} K_{ii}^{wa} & K_{ik}^{wa} & 0 \\ K_{ki}^{wa} & K_{kk}^{wa} + K_{kk}^{wb} & K_{kj}^{wb} \\ 0 & K_{jk}^{wb} & K_{jj}^{wb} \end{bmatrix}_{(9 \times 9)}, \quad (13)$$

式中,[0]为(3×3)子矩阵.

3 算例分析及结论

英国学者 L. D. Lefas 等^[9]做了 13 片大型普通钢筋混凝土剪力墙模型试验.在试验中,试件受恒定的轴力和单调增加的水平推力的共同作用,直至失效破

坏.本工作取其中 3 片轴压比分别为 0,0.1,0.2 的试件受力情况,试件编号分别为 LW1, LW2, LW3.

剪力墙的高宽比为 2,墙高 1.30 m,墙宽 0.65 m,构件的详细尺寸和配筋图如图 3 所示,其中混凝土抗压强度 $f_c = 47$ MPa,钢筋各强度取值如表 1 所示.

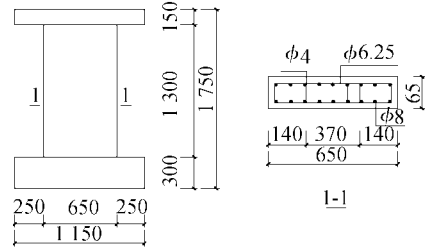


图 3 LW 剪力墙模型配筋图

Fig. 3 Distributed steel for LW shear wall model

表 1 LW 墙钢筋材料力学性能

Table 1 Mechanical property of steel for LW walls

种类	屈服强度/MPa	极限强度/MPa
纵向钢筋	470	585
箍筋	420	520
横向分布筋	520	610

图 4 ~ 图 6 分别为试件 LW1, LW2, LW3 的荷载-位移曲线,图中的分析结果包括考虑剪切变形和不考虑剪切变形两种情况与试验结果的对比.从图中可以看出,不考虑剪切变形时的分析结果在剪力墙屈服之前刚度明显高于考虑剪切变形时的分析值和试验值.在相同的水平荷载作用下,考虑剪切变形时的位移值较大,且考虑剪切变形后的位移值与试验值吻合较好.由于剪力墙的破坏形式为弯曲破坏,所以达到目标位移时,考虑剪切作用和未考虑剪切作用的两种情况与试验值较为接近.

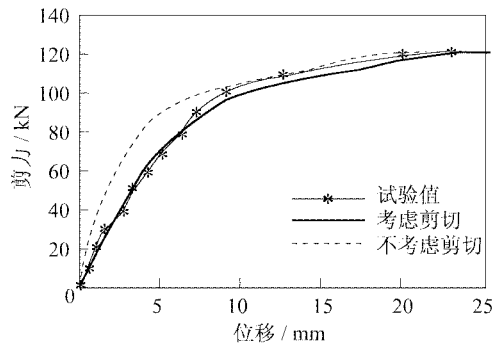


图 4 试件 LW1 荷载-位移曲线

Fig. 4 Load-displacement relationships of test LW1

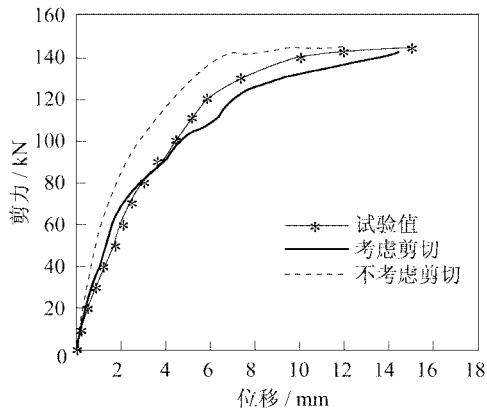


图5 试件 LW2 荷载-位移曲线

Fig. 5 Load-displacement relationships of test LW2

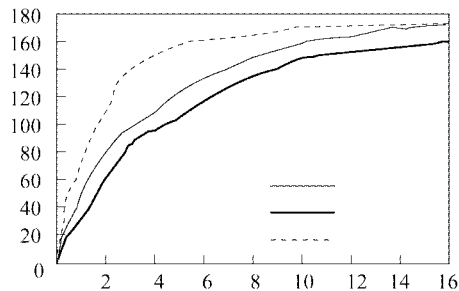


图6 试件 LW3 荷载-位移曲线

Fig. 6 Load-displacement relationships of test LW3

在线弹性阶段一直到结构开裂之前,考虑剪切作用的墙单元分析值与试验结果基本吻合.随着轴压比的增加,两曲线逐渐分离,但两曲线趋势是一致的.图4~图6中3条曲线在各阶段的特征也比较明显,即结构在开裂之前处于线弹性范围,荷载-位移曲线基本为一直线;在试件开裂和屈服之后,弹塑性的性质越来越明显,荷载-位移曲线的斜率随之显著减小,位移的增长越来越快;随着试件塑性性质的进一步加强,试件位移大幅度增加,而荷载增长却越来越慢.

总之,加入剪切作用的剪力墙单元分析结果与试验结果吻合得较好,程序中的剪力墙模型具有较高的准确性.

参考文献:

- [1] FAJFAR P, FISCHINGER M. Mathematical modeling of reinforced concrete structural walls for nonlinear seismic analysis [J]. *Structural Dynamic*, 1990(1):471-478.
- [2] HIRAIISHI H. Evaluation of shear and flexural deformations of flexural type shear walls [J]. *Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering*, 1984, 17(2):135-144.
- [3] KABEYASAWA T, SHIOHARA H, OTANI S. U. S. -Japan cooperative research on R/C full-scale building test, part 5: discussion of dynamic response system [C] // *Proceeding of 8th World Conference on Earthquake Engineering*, San Francisco. 1984:627-634.
- [4] VULCANO A, BERTERO V V, COLOTTI V. Analytical model of R/C structural walls [C] // *Proc of 9th World Conference on Earthquake Engineering*, Tokyo. 1988:41-46.
- [5] 蒋欢军,吕西林.一种宏观剪力墙单元模型应用研究[J]. *地震工程与工程振动*, 2003, 23(1):38-43.
- [6] 张令心,杨桦,江近仁.剪力墙的剪切滞变模型[J]. *世界地震工程*, 1999, 15(2):9-16.
- [7] 吕西林,卢文生.纤维剪力墙模型在剪力墙结构非线性分析中的应用[J]. *力学季刊*, 2005, 26(1):72-80.
- [8] 朱杰江.高层钢筋混凝土结构三维推覆分析及非线性时程分析研究[D].上海:同济大学, 2001.
- [9] LEFAS L D, KOTSOVOS M D, AMBRASEYS N N. Behavior of reinforced concrete structure walls, deformation characteristic and failure mechanism [J]. *Aci Structural Journal*, 1990, 87(1):23-31.

(编辑:刘志强)