

基于离散单元法的杆段纤维模型研究

王强¹,路炯¹,侯康康¹,郝露露²

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168;2. 上海中森建筑与工程设计顾问有限公司,上海 200333)

摘要 目的 为使离散单元法能够适用于钢筋混凝土梁柱构件在往复荷载作用下的非线性分析.方法 在离散单元法中杆段多弹簧模型的基础上,提出了杆段纤维模型.该模型将梁柱构件划分为若干刚体单元,相邻单元间由多个混凝土与钢筋轴向纤维组成的纤维束连接.并建立单元位移与纤维变形、纤维内力与单元约束力之间的变换矩阵,以形成单元与纤维束的力-位移关系.混凝土与钢筋轴向纤维,分别采用相应材料的单轴应力-应变本构模型.并开发了基于杆段纤维模型的钢筋混凝土结构非线性分析程序 DEM-COLLAPSE.对钢筋混凝土柱进行算例分析,并与有限元分析结果进行对比.结果 实现了将杆段纤维模型用于低周往复荷载作用下钢筋混凝土柱的非线性性能模拟.杆段纤维模型的计算结果与有限元模拟结果及试验结果均较为吻合.杆段纤维模型中纤维数量对计算结果影响较小,截面纤维束划分方式取 5×5 或 7×7 较为合理.结论 笔者提出的杆段纤维模型使得离散单元法能够模拟钢筋混凝土梁柱构件在断裂破坏前的非线性性能,并具有与有限单元法相近的计算精度,拓展了离散单元法的应用范围与计算能力.

关键词 离散单元法;杆段纤维模型;钢筋混凝土柱;非线性分析

中图分类号 TU375.3 文献标志码 A

Research of Segment-Fiber Model Based on Discrete Element Method

WANG Qiang¹, LU Jiong¹, HOU Kangkang¹, HAO Lulu²

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Shanghai Zhongsen Architectural and Engineering Design Consultants Limited Company, Shanghai, China, 200333)

Abstract: In order to analyze the nonlinear performance of RC beam-column member under cyclic loading, the segment-fiber model (SFM) is proposed based on the segment-multi-spring model in Discrete Element Method (DEM). Beam-column member are divided in to several rigid elements, and the adjacent elements are connected by the fiber assembly. The fiber assembly is composed of concrete fibers and steel fibers. The transformation matrix between element displacement and fiber deformation, as well as fiber force and element binding force, is established to form the force-

收稿日期:2019-05-07

基金项目:国家自然科学基金项目(51178279);沈阳市科技计划项目(F16-175-9-00)

作者简介:王强(1971—),男,教授,博士,主要从事结构抗震理论及工程结构数值模拟方面研究.

displacement relationship between element and fiber assembly. The uniaxial constitutive models of concrete and steel are respectively used on concrete fibers and steel fibers. Accordingly, a nonlinear analysis program named as DEM-COLLAPSE has been developed. Two RC columns under low cyclic loading have been simulated by DEM-COLLAPSE. The calculated results agree well with the results of the FEM and the test results. The number of fibers in SFM has little influence on the calculation results, and it is reasonable to choose 5×5 or 7×7 as the fiber division mode. The SFM can be applied to simulate the nonlinear performance of RC beam-column members, and the application range of DEM is greatly expanded.

Key words: DEM; segment-fiber model; RC column; nonlinear analysis

应用数值模拟方法进行建筑结构在强震作用下的非线性响应与倒塌破坏全过程研究是工程抗震研究领域的前沿课题之一。由于以连续介质力学为基础的有限单元法在描述结构倒塌破坏过程中的不连续位移场存在局限性,一些学者尝试将基于非连续介质力学的离散单元法引入结构工程领域,进行结构非线性响应以及倒塌过程的模拟分析。

构建合理的单元模型是离散单元法用于混凝土等连续介质时需解决的核心问题。K. Meguro^[1]等提出扩展离散单元模型,对框架结构倒塌破坏过程进行模拟;赵永志^[2]提出了绑定式离散单元模型对砌体结构倒塌进行仿真分析;周健等^[3]应用颗粒流模型实现了混凝土框架结构的倒塌全过程模拟;贾永胜等^[4]提出网格实体模型,用于模拟拆除爆破结构的倒塌过程;颜敬等^[5]采用颗粒流模型模拟了结构在突遭水平强击作用下的倒塌破坏过程。G. Grunwald等^[6]采用应用单元法(AEM)对钢筋混凝土结构在地震与爆炸作用下的倒塌破坏过程进行了模拟分析。但上述离散单元模型主要是基于材料的组分层次构建的,单元构型及所用本构关系与结构构件的物理力学特性无关、计算参数确定困难、计算工作量巨大。且上述离散单元模型目前均不具备进行往复荷载作用下结构构件滞回性能模拟的能力,导致采用离散单元法难以用于地震作用下的结构倒塌过程模拟。N. Utagawa等^[7]根据钢筋混凝土梁柱构件的受力特性,提出了杆段离散单元模型,

用于模拟平面框架结构遇到冲击荷载时的倒塌问题,但不能进行结构构件在反复荷载作用下的力学性能模拟。王强^[8]进一步提出了杆段多弹簧模型(SMSM),顾祥林等^[9]也对此模型进行了分析研究。采用该模型虽能够较合理地计算模拟钢筋混凝土梁柱构件以及简单框架结构的非线性性能,但模型构型并不完善,计算参数的确定仍较为困难^[10]。

笔者在杆段多弹簧模型的基础上提出了杆段纤维模型(Segment-Fiber Model, SFM),以期合理地模拟钢筋混凝土梁柱构件的非线性滞回性能,使得离散单元法可以进一步用于地震作用下的结构非线性响应及倒塌全过程模拟。

1 杆段多弹簧模型

杆段多弹簧模型是依据钢筋混凝土梁柱等杆状构件的几何特征及其材料力学特性构建的。在模型中,梁柱构件沿长度划分为多个刚体单元。在构件受力变形、运动过程中,各单元只需满足自身的运动平衡方程,单元之间无相互变形协调的约束关系。相邻刚体间由弹簧组连接,该弹簧组代表了在构件连续状态下相邻两个单元在质心横截面长度范围内构件的力学性能^[11](见图1)。若弹簧组断裂,则两单元分离,代表构件断裂。因此杆段多弹簧模型可以完整地描述由连续、开裂发展至断裂以及断裂后的钢筋混凝土梁柱构件受力与运动状态。

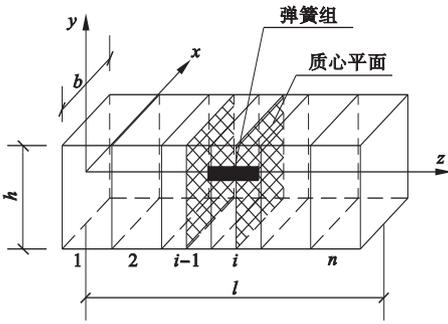


图1 杆段多弹簧模型示意图

Fig. 1 Diagram of segment-multi-spring model

杆段多弹簧模型中,连接两刚体单元的弹簧组由轴向弹簧组、剪切弹簧组与扭转弹簧组成(见图2)。其中,轴向弹簧组内包括多个钢筋弹簧和混凝土弹簧,分别代表在横截面局部区域内钢筋和混凝土材料的轴向力学性能,轴向弹簧的受力组合则形成构件的轴向-弯曲力学性能。

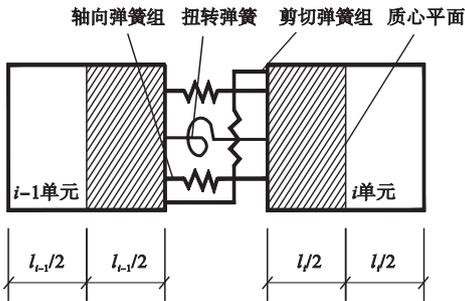


图2 弹簧组构型

Fig. 2 Configuration of spring assembly

剪切弹簧组由沿横截面宽度和长度方向的两个剪切弹簧组成,分别代表各自截面方向上的构件剪切性能^[8]。对于钢筋混凝土受弯或受压梁柱构件,剪切弹簧的屈服强度由式(1)或(2)确定。扭转弹簧代表着构件的扭转性能。

$$V_y = 0.7f_t b h_0 + 1.25f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 \quad (1)$$

$$V_y = \frac{1.75}{\lambda + 1} f_t b h_0 + f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 + \gamma_0 N \quad (2)$$

式中: f_c 为混凝土轴心抗压强度; b 为截面宽度; h_0 为截面有效高度; f_{yv} 为箍筋抗拉强度; A_{sv} 为配置在同一截面内箍筋各肢的全部截面面积; s 为箍筋间距; λ 为构件剪跨比; N 为

与剪力设计值 V 相应的轴向压力设计值; γ_0 取0.07。在实际计算分析时,若考虑轴力的作用,须按构件轴力 N 的预估值来确定剪切性能参数,导致剪切弹簧参数难以合理取值。

2 杆段纤维模型

在杆段多弹簧模型中,轴向钢筋与混凝土弹簧采用基于材料应力-应变关系的本构模型,而剪切与扭转弹簧分别采用基于构件截面剪力-剪切变形、扭矩-扭转角关系的本构模型,使得本构模型层次不协调,且剪切本构模型选用及其参数确定困难,这极大地限制了杆段多弹簧模型的应用范围。

笔者在杆段多弹簧模型基础上并参照有限单元法的纤维梁模型,提出了适用于钢筋混凝土梁柱构件的杆段纤维模型。与杆段多弹簧模型类似,杆段纤维模型同样将梁柱构件沿长度划为若干杆段,每段均视为刚体单元。但各杆段单元之间改进为由纤维束连接,这与纤维梁模型类似。每个纤维束由若干混凝土纤维和钢筋纤维构成,分别代表着各自所在区域的混凝土小柱体或钢筋的力学性能(见图3)。混凝土纤维面积与位置由构件横截面形状与截面网格划分数决定,钢筋纤维由钢筋实际布置情况决定。梁柱构件的横截面形状为矩形时,混凝土与钢筋纤维的分布如图4所示。对于混凝土纤维,考虑其轴向及双向剪切受力能力;对于钢筋纤维,仅考虑其轴向受力能力,忽略其剪切受力能力。

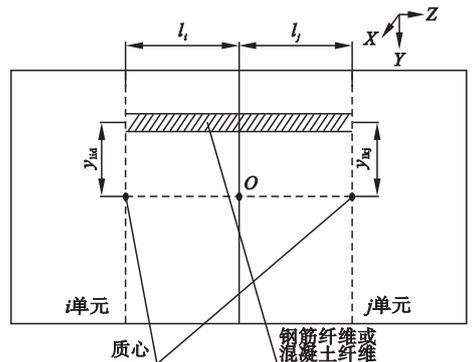


图3 杆段纤维模型的构型

Fig. 3 Configuration of segment-fiber model

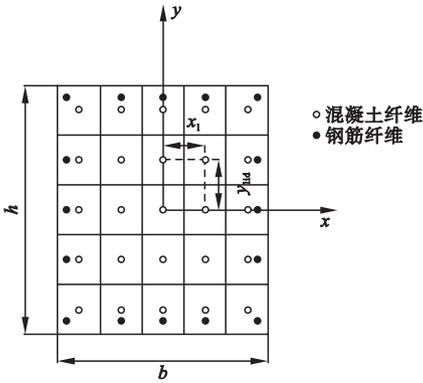


图 4 矩形截面构件的纤维分布示意图

Fig. 4 Fiber distribution in rectangular section of elements

将各纤维的轴向应力、剪切应力按其面积与位置关系集成,则形成纤维束的合力,此合力即为纤维束对其相连单元的约束力.对于结构中的任一单元而言,将所有连接该单元的纤维约束力求和,并叠加主动力(如荷载、地震惯性力),则可得作用于该单元质心的合力.

对于结构分析中的任一时刻,依据牛顿第二运动定律,可分别建立结构中各单元在其单元合力作用下的运动平衡方程.采用中心差分法同步求解各单元的运动平衡方程,则可递推得到下一时刻各单元的加速度、速度、位移等运动状态.而在下一时刻,相邻单元的位移差则进一步导致单元间纤维束产生变形与受力状态变化.因此,单元的受力、运动状态与纤维束的变形、受力状态形成相互依赖、相互影响的关系.

3 单元与纤维束的力 - 位移关系

在杆段纤维模型中,设纤维束 l 连接 i, j 两个相邻单元,如图 3 所示.可建立纤维束 l 的局部坐标系: z 轴正向为由 i 单元质心指向 j 单元质心, x 轴为沿截面宽度方向, y 轴则通过右手法则确定.纤维束 l 的初始长度为

$$l_{sl} = l_i + l_j \quad (3)$$

式中: l_{sl} 为纤维束的初始长度; l_i 为纤维束在 i 端单元范围内的长度,即单元横截面边界

至单元质心横截面距离(可取为 i 单元长度的一半); l_j 代表纤维束在 j 端单元内的长度(可取为 j 单元长度的一半).

当刚体单元 i, j 发生运动并形成位移差时,纤维束 l 将产生变形,即纤维束变形等于单元位移差.则纤维束中第 k 个混凝土纤维变形为 $\delta_{ck} = (\delta_{nk} \ \delta_{v1k} \ \delta_{v2k})^T$, 其中 δ_{nk} 为该混凝土纤维的轴向变形, δ_{v1k} 、 δ_{v2k} 分别为其在局部坐标系 x 、 y 方向的剪切变形;第 k 个钢筋纤维的轴向变形向量为 δ_{sk} . 则 δ_{ck} 和 δ_{sk} 可由式(4)计算求得:

$$\begin{cases} \delta_{ck} = T_{ck} D, \\ \delta_{sk} = T_{sk} D. \end{cases} \quad (4)$$

式中: $D = (D_i D_j)^T$. 其中, D_i 、 D_j 分别为 i 、 j 单元在纤维束 l 局部坐标系下的位移, $D_i = (d_{i1} \ d_{i2} \ d_{i3} \ d_{i4} \ d_{i5} \ d_{i6})$, $D_j = (d_{j1} \ d_{j2} \ d_{j3} \ d_{j4} \ d_{j5} \ d_{j6})$. T_{ck} 、 T_{sk} 则由单元位移确定第 k 个混凝土或钢筋纤维变形的变换矩阵. T_{ck} 计算如下:

$$T_{ck} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & y_1 & -x_1 & 0 & 0 & 0 & -1 & -y_2 & x_2 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & l_i & -y_1 & -1 & 0 & 0 & 0 & l_j & y_2 \\ 0 & 1 & 0 & -l_i & x_1 & 0 & 0 & -1 & 0 & l_j & -x_2 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中:变换矩阵 T_{ck} 中各元素分别代表 i, j 单元发生单位平动或转动位移时,混凝土纤维 k 相应产生的轴向或剪切变形.

由于钢筋纤维仅考虑轴向受力性能,所以只需确定钢筋纤维的轴向变形,因此 T_{sk} 矩阵只取 T_{ck} 矩阵的第一行,即

$$T_{sk} = (0 \ 0 \ 1 \ y_1 \ -x_1 \ 0 \ 0 \ 0 \ -1 \ -y_2 \ x_2 \ 0) \quad (6)$$

在式(5)和(6)中, x_1 、 y_1 与 x_2 、 y_2 分别为纤维 k 在 i, j 单元截面上的位置坐标(见图 4).

混凝土纤维 k 的应变 ϵ_{ck} 由式(7)确定. $\epsilon_{ck} = (\epsilon_k \ \gamma_{xk} \ \gamma_{yk})^T$; ϵ_k 、 γ_{xk} 、 γ_{yk} 分别为混凝土纤维的轴向应变及 x 、 y 轴方向剪切应变.

$$\epsilon_{ck} = \delta_{ck} / l_{sl} \quad (7)$$

根据纤维应变和材料单轴本构关系,可得其应力 $\sigma_{ck} = (\sigma_k \ \tau_{xk} \ \tau_{yk})^T$. 将纤维应力按

纤维截面面积求积,则可得纤维 k 的轴向力与剪切力, $F_{ck} = (N_{ck} V_{xck} V_{yck})^T = (\sigma_k A_{ck} \tau_{xk} A_{ck} \tau_{yk} A_{ck})^T$, A_{ck} 为该纤维的截面面积。

纤维束 l 中的混凝土纤维合力 $F_c^l = (F_c^{li} F_c^{lj})$ 则可由式(8)求得,其中 $F_c^{li} = (N_c^{li} V_{xc}^{li} V_{yc}^{li} M_{xc}^{li} M_{yc}^{li} M_{zc}^{li})$, 为全部混凝土纤维作用在 i 单元的约束合力; $F_c^{lj} = (N_c^{lj} V_{xc}^{lj} V_{yc}^{lj} M_{xc}^{lj} M_{yc}^{lj} M_{zc}^{lj})$, 为全部混凝土纤维作用在 j 单元的约束合力。

$$F_c^l = \sum_{k=1}^{m_c} T_{ck}^T F_{ck} \quad (8)$$

式中: m_c 为混凝土纤维数量。

同理可得纤维束 l 中钢筋纤维 k 的轴向应变 ε_{sk} 、轴力 $F_{sk} = N_{sk}$, 以及全部钢筋纤维作用在单元上的合力 $F_s^l = (F_s^{li} F_s^{lj})$ 。

将混凝土纤维与钢筋纤维的合力叠加, 即得到纤维束 l 的合力 $F^l = (F^li F^lj) = F_c^l + F_s^l$ 。 F^li 和 F^lj 分别为纤维束 l 对 i 、 j 两刚体单元的约束力。

4 材料本构关系

有限元中纤维梁模型以纤维的轴向受力集成来描述梁柱构件轴向-弯曲耦合的受力性能, 而各纤维的受力性能由其单轴材料本构模型确定。借鉴其思路, 在杆段纤维模型中, 纤维束中的混凝土与钢筋纤维分别采用相应材料应力-应变层次上的单轴本构关系。

4.1 混凝土轴向本构关系

对于轴向混凝土纤维, 采用文献[13]中提出的单轴混凝土本构模型(见图5)。该本构模型采用 Kent 和 Park 提出的混凝土受压骨架曲线^[14], 并考虑箍筋约束作用的影响。鉴于往复荷载作用下混凝土一旦受拉开裂, 之后抗拉能力丧失, 在本构模型中忽略混凝土的抗拉性能。

4.2 钢筋本构关系

对于轴向钢筋纤维的本构模型, 采用 A. Esmaily 等^[15] 提出的钢材拉压骨架曲线模型与 F. Légeron 等^[16] 提出往复荷载下的

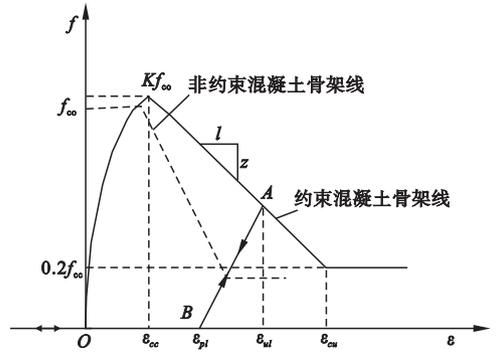


图5 混凝土单轴本构模型

Fig. 5 Uniaxial constitutive models of concrete 加卸载滞回规则。为保证加卸载过程中曲线的连续性, 王强等^[12] 对加卸载滞回规则进行了修正。本构曲线如图6所示。

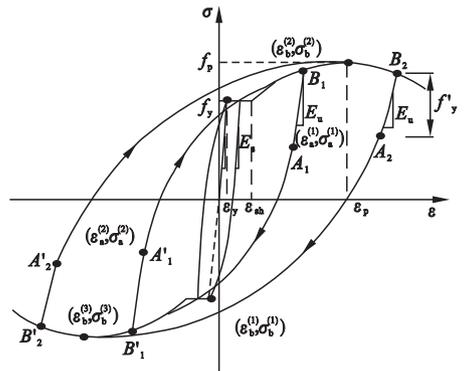


图6 钢筋单轴本构模型

Fig. 6 Uniaxial constitutive models of steel

4.3 混凝土纤维剪切本构关系

文中模型目前忽略混凝土材料的剪切非线性性能, 因此可根据混凝土材料的弹性剪切模量来确定混凝土纤维的剪应变-剪应力关系, 如式(9)所示:

$$\tau = G\gamma \quad (9)$$

式中: G 为剪切模量, $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$, 其中 E 为混凝土受压骨架曲线的原点切线模量, ν 为混凝土泊松比。

5 实例分析

基于上述模型, 笔者采用 FORTRAN 语言编制了钢筋混凝土结构非线性分析程序

DEM - COLLAPSE. 并对两个钢筋混凝土柱的轴压 - 水平低周往复加载试验进行模拟计算. 同时采用有限元软件 ABAQUS (材料本构模型相同) 的纤维梁单元对该试验进行模拟计算, 以进行离散单元法与有限元法对于梁柱构件非线性分析能力的对比研究.

5.1 试验概况

笔者选用日本学者 K. Kawashima 等^[17]所做的钢筋混凝土柱抗震性能试验研究中的单轴加载试件 TP74 与双轴加载试件 TP77. 试件 TP74 与 TP77 的配筋构造一致, 如图 7 所示. 其中, 试件 TP74 采用水平单轴位移逐级往复加载模式, 试件 TP77 为水平双轴位移逐级往复加载. 试件的加载模式及加载规则如图 8、图 9 所示; 材料强度与竖向轴力值见表 1.

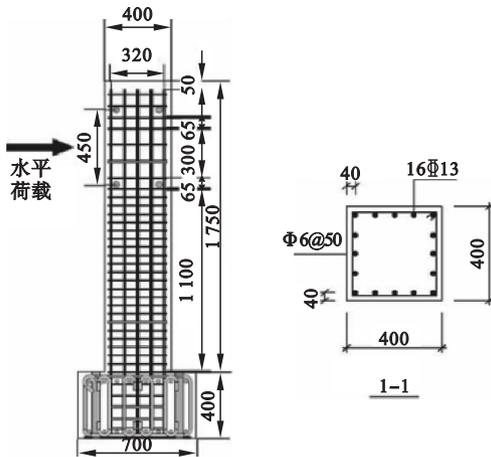


图 7 试件配筋构造

Fig. 7 Detail drawing of specimens

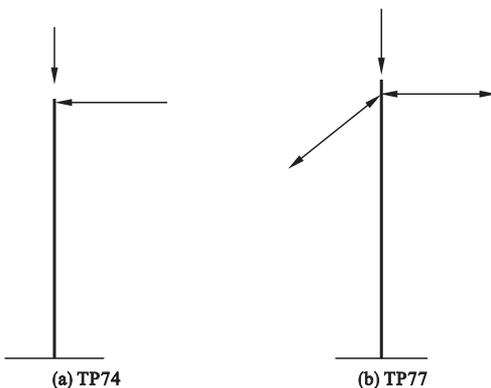


图 8 试件加载模式示意图

Fig. 8 Loading pattern of specimens

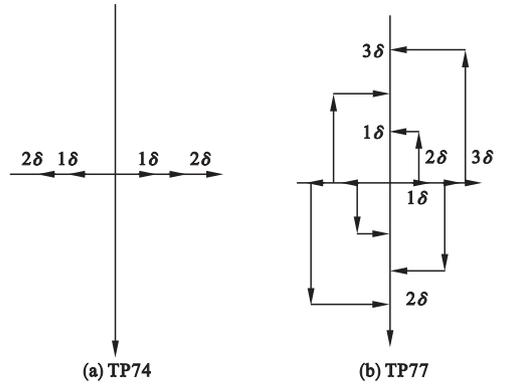


图 9 试件水平位移加载规则

Fig. 9 Horizontal displacement loading rule of specimen

表 1 混凝土及钢筋参数

Table 1 Reinforcement and concrete parameters

试件编号	混凝土强度/MPa	纵筋强度/MPa	箍筋强度/MPa	轴力/kN
TP74	29.66	357	321	160
TP77	31.31	357	321	160

在程序 DEM - COLLAPSE 与 ABAQUS 软件中均将该试验柱划分为 5 个单元. 单元的截面网格按 5 × 5 划分, 即每个纤维束内的混凝土纤维 25 个, 钢筋纤维 16 个. 试验中试件采用每级加载循环三遍的加载制度, 模拟分析时为降低计算耗时, 采用每级加载只循环一遍的简化加载制度^[18].

5.2 单轴加载试验

图 10(a) 为单轴加载试件 TP74 试验所得滞回曲线, 图 10(b) 为采用杆段纤维模型进行模拟计算所得滞回曲线, 图 10(c) 为采用有限元 ABAQUS 软件模拟所得滞回曲线. 对比可知, 两计算结果的极限承载力误差均小于 5%. 加载前期, 两计算滞回曲线丰满程度基本一致, 且均与试验曲线较吻合; 而在加载后期, 采用杆段纤维模型计算所得曲线存在明显的下降且滞回环较瘦, 与试验曲线更为接近. 由此可认为, 文中方法能够较好地应用于钢筋混凝土柱在单轴加载下的非线性反应分析, 且具有较好的计算精度.

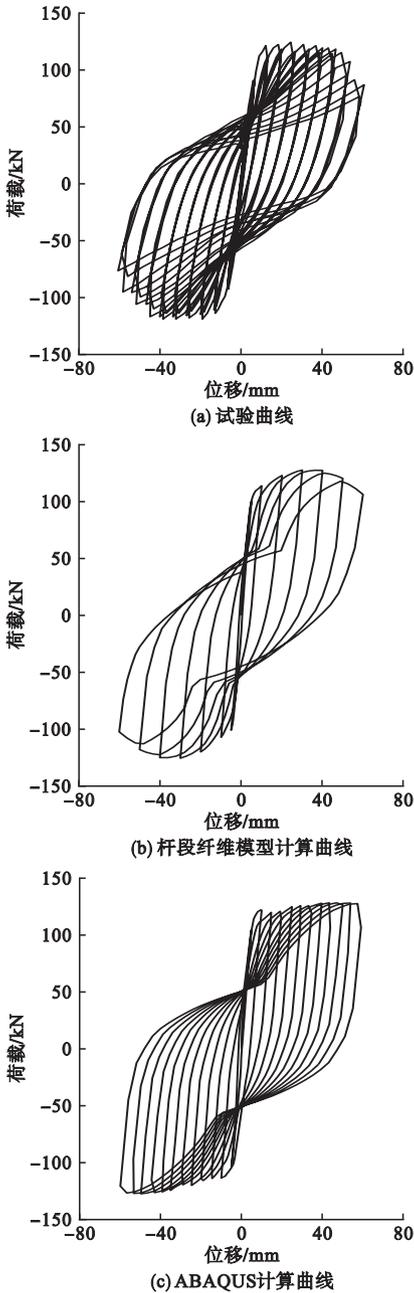


图 10 TP74 计算结果与试验结果对比

Fig. 10 Comparison between simulation and test results of specimen TP74

图 11、图 12 分别为文中程序计算所得构件底部纤维束中角部钢筋与混凝土轴向纤维的应力 - 应变曲线. 可以看出, 在往复加载过程中, 角部钢筋受拉应变较大, 已进入软化段, 混凝土受压但未达到抗压强度. 同时两应力 - 应变曲线结果符合文中所用钢筋和混凝土本构模型.

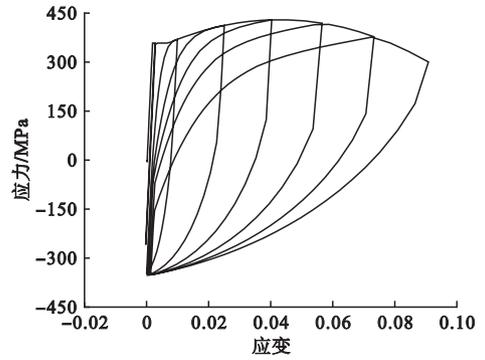


图 11 柱底部角部钢筋纤维的应力 - 应变曲线

Fig. 11 Stress-strain curve of steel fiber at corner of column bottom

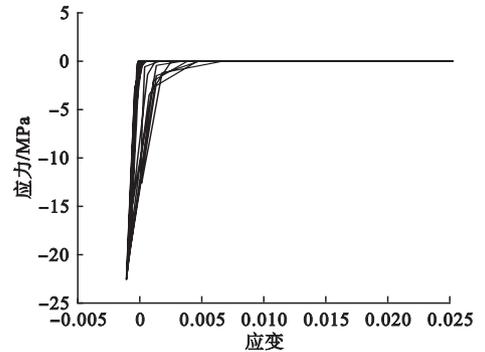


图 12 柱底部角部混凝土纤维的应力 - 应变曲线

Fig. 12 Stress-strain curves of concrete fiber at corner of column bottom

5.3 双轴加载试验

图 13、图 14 分别为双轴加载试件 TP77 在水平 X、水平 Y 加载方向的试验、杆段纤维模型与 ABAQUS 软件计算所得滞回曲线结果对比. 可以看出, 杆段纤维模型、ABAQUS 软件计算所得两个加载方向的构件承载力与试验结果误差均小于 5%. 在 X、Y 两个加载方向, 加载幅值较小时两计算所得滞回曲线丰满程度均基本一致, 且与试验曲线较吻合; 而在加载幅值较大时, 采用文中模型计算所得曲线存在明显的强度退化现象, 与试验结果更为接近. 且杆段纤维模型所得滞回曲线的丰满程度与试验结果较为吻合, 优于 ABAQUS 计算结果. 同时, 试验结果中存在明显的双轴耦合效应, 即当一个方向的加载位移保持不变, 在另一方向加载会使得之前方向的水平荷载显著跌落. 杆段纤维模型与

ABAQUS 计算结果均能够较好地体现双轴耦合效应. 此外,杆段纤维模型的计算结果有轻微的振荡现象,这可能与计算时步设置取值较大有关.

可以认为,采用杆段纤维模型能够较好地模拟钢筋混凝土柱在双轴加载下的非线性性能,且具有较好的计算精度.

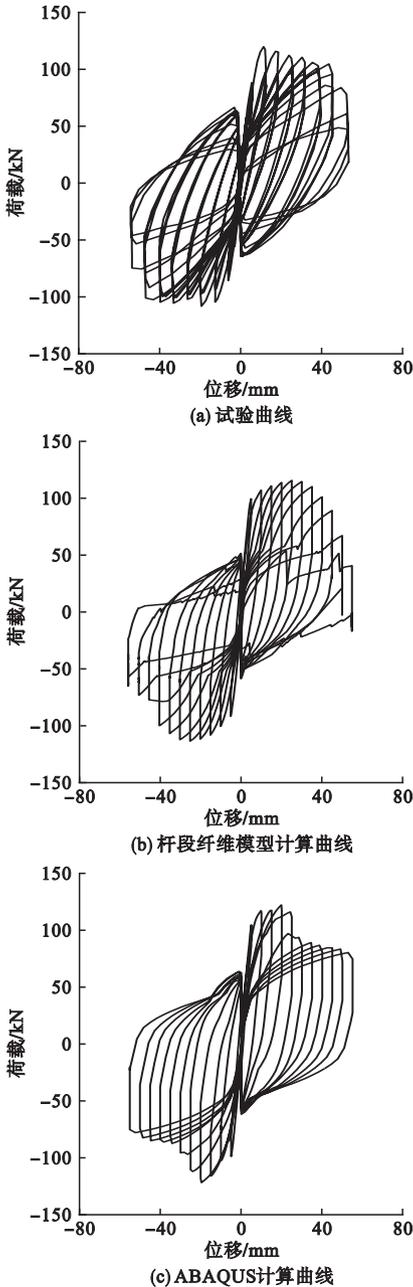


图 13 TP77 的 X 方向计算结果与试验结果对比
Fig. 13 Comparison between simulation and experiment results in X direction of specimen TP77

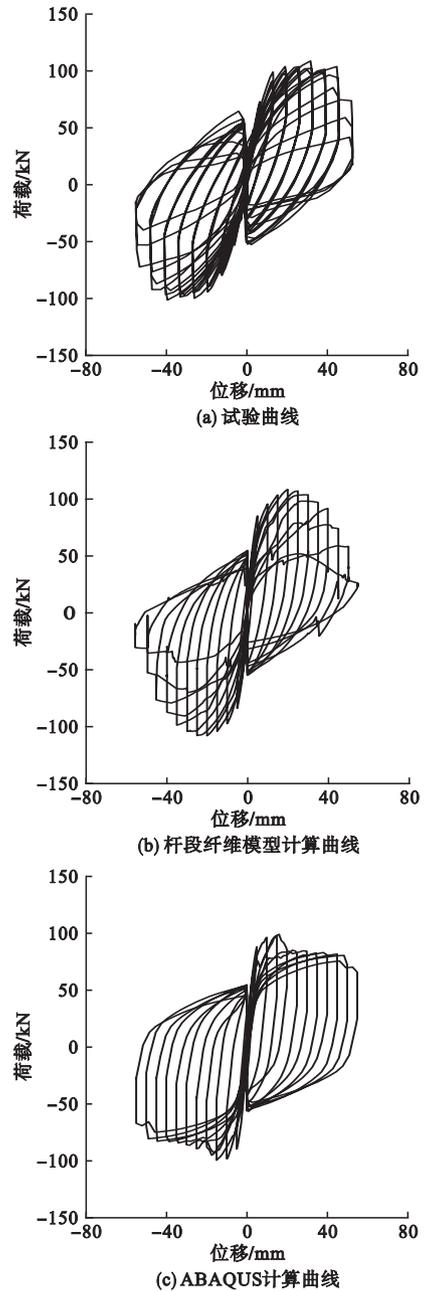


图 14 TP77 的 Y 方向计算结果与试验结果对比
Fig. 14 Comparison between simulation and test results in Y direction of specimen TP77

5.4 纤维束内纤维数量对模拟分析的影响

采用杆段纤维模型进行梁柱构件的非线性性能模拟,纤维束中所含纤维数量必然会影 响计算精度和计算效率. 纤维数量增加,计算精度提高,但会使得计算耗时与占用内存增加,计算效率下降. 为确定合理的纤维数取值,笔者对 TP74 的纤维束分别按 5×5 、

7×7、9×9、11×11 截面纤维划分时的模拟结果进行比较分析. 不同截面纤维划分方式下的各纤维束所含混凝土纤维与钢筋纤维数量及计算耗时见表2. 由表2可知, 计算耗时随着纤维数增多而呈正比例增加趋势, 按5×5进行截面纤维束划分的计算耗时最少.

表2 不同截面纤维束划分的计算耗时

Table 2 Calculation time with different number of section fibers

截面纤维束划分	混凝土纤维数	钢筋纤维数	计算所需时间/h
5×5	25	16	1.66
7×7	49	24	2.25
9×9	81	32	2.96
11×11	121	40	4.16

图15为不同截面纤维束划分方式所得计算结果的对比情况. 可以看出, 不同截面纤维束划分方式的计算滞回曲线较为接近, 各曲线的峰值承载力相差小于2%. 可以认为, 按5×5、7×7进行截面纤维束划分时, 尽管纤维数量较少, 仍可获得较高的计算精度.

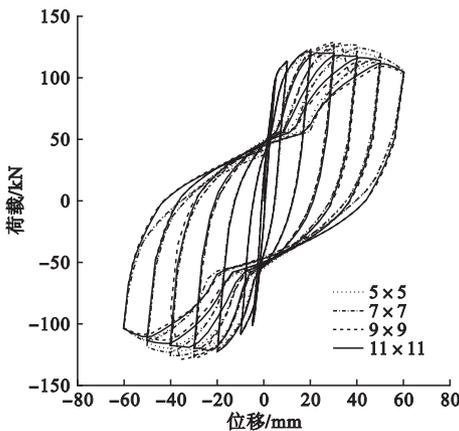


图15 不同截面纤维束划分方式下的计算精度对比

Fig. 15 Comparison between simulation results with different number of section fibers

因此, 杆段纤维模型中按5×5或7×7进行截面纤维束划分能够在计算效率与计算精度间取得较好的平衡性. 在进行梁柱构件乃至整体结构的非线性性能模拟时, 杆段纤维模型中的截面纤维束划分方式建议取5×5

或7×7.

6 结论

(1) 笔者在杆段多弹簧模型的基础上提出了杆段纤维模型, 连接两相邻单元的纤维束由混凝土纤维及钢筋纤维构成, 且其各方向的应力-应变关系可由基于材料层次的本构关系确定, 计算参数确定较为明确简便.

(2) 杆段纤维模型能够较为准确地模拟钢筋混凝土柱在压-弯荷载共同作用下的非线性发展过程. 且能够较好地模拟钢筋混凝土柱的轴力-双向弯曲耦合性能, 可用于梁柱构件在多维受力状态下的非线性性能分析.

(3) 杆段纤维模型中纤维数量增加对计算结果影响较小. 在进行梁柱构件的非线性性能模拟时, 杆段纤维模型中的截面纤维束划分方式取5×5或7×7较为合理.

(4) 笔者所提出的杆段纤维模型使得离散单元法能够模拟钢筋混凝土梁柱构件在断裂破坏前的非线性性能, 并具有与有限单元法相近的计算精度, 拓展了离散单元法的应用范围, 为进一步模拟分析框架结构等实际工程在地震作用下的非线性性能及倒塌破坏过程奠定了良好的基础.

参考文献

- [1] MEGURO K, HAKUNO M. Application of the extended distinct element method for collapse simulation of a double-deck bridge [J]. Structural engineering and earthquake engineering, 1994, 10(4): 175-185.
- [2] 赵永志, 陈友川, 郑津洋. 砌体结构破坏倒塌过程的离散单元模拟[J]. 计算力学学报, 2011, 28(4): 523-529.
(ZHAO Yongzhi, CHEN Youchuan, ZHENG Jinyang, et al. Time-history analysis of non-viscously damped systems based on the differential quadrature method. [J]. Chinese journal of computational mechanics, 2011, 28(4): 523-529.)
- [3] 周健, 屈俊童, 贾敏才. 混凝土框架倒塌全过程的颗粒流数值模拟[J]. 地震研究, 2005, 28(3): 288-292.
(ZHOU Jian, QU Juntong, JIA Mincai. Numerical

- simulation of concrete frame collapsing process with PFC2D program [J]. Journal of seismological research, 2005, 28(3): 288 - 292.)
- [4] 贾永胜, 梁开水, 刘军. 网格实体模型在拆除爆破结构倒塌模拟中应用[J]. 武汉理工大学学报, 2009, 31(10): 80 - 82.
(JIA Yongsheng, LIANG Kaishui, LIU Jun. Applications of solid lattice model (SLM) in structural collapse simulation of demolishing blasting [J]. Journal of Wuhan university of technology, 2009, 31(10): 80 - 82.)
- [5] 颜敬, 曾亚武, 罗荣, 等. 建筑结构倒塌破坏的数值模拟方法综述[J]. 爆炸与冲击, 2013, 33(4): 408 - 414.
(YAN Jing, ZENG Yawu, LUO Rong, et al. Review of numerical simulations on building structure collapse [J]. Explosion and shock waves, 2013, 33(4): 408 - 414.)
- [6] GRUNWALD G, KHALIL A, SCHAUFELBERGER B, et al. Reliability of collapse simulation-comparing finite and applied element method at different levels [J]. Engineering structures, 2018, 176(1): 279 - 292.
- [7] UTAGAWA N. Simulation of demolition of reinforced concrete buildings by controlled explosion [J]. Microcomputers in civil engineering, 1992, 7(2): 151 - 159.
- [8] 王强, 吕西林, 雷淑忠. 离散单元法在钢筋混凝土构件非线性分析的应用[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2005, 21(2): 91 - 95.
(WANG Qiang, Lü Xilin, LEI Shuzhong. Application of the DEM on the nonlinear analysis of reinforced concrete members [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2005, 21(2): 91 - 95.)
- [9] 顾祥林, 黄庆华, 汪小林, 等. 地震中钢筋混凝土框架结构倒塌反应的试验研究与数值仿真[J]. 土木工程学报, 2012, 45(9): 36 - 45.
(GU Xianglin, HUANG Qinghua, WANG Xiaolin, et al. Spatial collapse responses of reinforced concrete frame structures under earthquakes—test study and numerical simulation [J]. China civil engineering journal, 2012, 45(9): 36 - 45.)
- [10] 王强, 吕西林. 离散单元法中杆段多弹簧模型的改进[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2007, 23(2): 191 - 194.
(WANG Qiang, Lü Xilin. The improvement of segment-multi-spring model of DEM [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2007, 23(2): 191 - 194.)
- [11] 王强, 尹镇平, 高翔, 等. 基于离散单元法的钢筋混凝土框架非线性分析[J]. 沈阳工业大学学报, 2015, 37(3): 347 - 354.
(WANG Qiang, YIN Zhenping, GAO Xiang, et al. Nonlinear analysis for RC frame structures based on discrete element method [J]. Journal of Shenyang university of technology, 2015, 37(3): 347 - 354.)
- [12] 郝露露. 基于离散单元法的钢筋混凝土框架剪力墙结构非线性与倒塌分析[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2016.
(HAO Lulu. Nonlinear response and collapse analysis of reinforced concrete shear wall structures based on discrete element method [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2016.)
- [13] 王强, 朱丽丽, 李哲, 等. ABAQUS 显式分析梁单元的混凝土、钢筋本构模型研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2013, 29(1): 56 - 64.
(WANG Qiang, ZHU Lili, LI Zhe, et al. Study on the constitutive model of concrete and steel for explicit dynamic beam elements of ABAQUS [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2013, 29(1): 56 - 64.)
- [14] SCOTT B D, PARK R, PRIESTLEY M J N. Stress-strain behavior of concrete confined overlapping hoops at low and high strain rates [J]. ACI journal, 1982, 78(2): 225 - 231.
- [15] ESMAEILI A, XIAO Y. Behavior of reinforced concrete columns under variable axial loads: analysis [J]. ACI structural journal, 2005, 102(5): 736 - 744.
- [16] LEGERON F, PAULTRE P, MAZAR J. Damage mechanics modeling of nonlinear seismic behavior of concrete structures [J]. Journal of structural engineering, 2005, 131(6): 946 - 954.
- [17] KAWASHIMA K, WATANABE G, HAYAKAWA R. Seismic performance of RC bridge columns subjected to bilateral excitation [J]. Journal of earthquake engineering, 2004, 8(4): 107 - 132.
- [18] 王强, 宋雪迪, 郝中华, 等. 基于 ABAQUS 纤维梁单元的钢筋混凝土柱受力破坏全过程数值模拟[J]. 土木工程学报, 2004, 47(12): 16 - 26.
(WANG Qiang, SONG Xuedi, HAO Zhanghua, et al. Numerical simulation of failure process of RC columns based on fiber beam element in ABAQUS [J]. China civil engineering journal, 2014, 47(12): 16 - 26.)

(责任编辑:杨永生 英文审校:刘永军)