

应用改进离散单元法分析变形钢筋与混凝土间的锚固问题

陆新征 江见鲸

清华大学土木工程系, 北京, 100084

摘要: 变形钢筋与混凝土之间的锚固是钢筋混凝土有限元分析中的一个难点。作者通过引入离散单元的方法, 充分发挥离散单元法在分析碎散材料及非连续问题上的优势, 真实的模拟了在单向和反复荷载作用下变形钢筋与混凝土之间的相互作用关系及混凝土的破坏过程。文中首先介绍了引入离散单元法的假定及对离散单元法的简化处理, 然后通过计算实例说明了本方法的有效性。

关键词: 离散单元; 锚固; 弹塑性分析

一、引言

传统有限元分析中, 材料被假设为是均匀连续的。但是, 当构件材料本身很不均匀或构件开裂的时候, 有限元处理就面临着许多困难。离散单元法可以有效的描述结构的不连续性。但其接触判断往往过于复杂, 并且易造成计算的不稳定。然而, 在实际钢筋混凝土结构中, 结构裂缝的几何尺寸相对结构而言是很小的。这启发我们对离散单元方法进行改造, 以简化其接触判断, 并保持其特点。

2 基本假设

- 1、混凝土材料被离散为由离散混凝土单元和界面单元组成。
- 2、结构的变形主要发生在离散混凝土单元内, 结构的破坏发生在界面单元内
- 3、结构的开裂变形相对而言是微小的, 因此, 离散单元角点的“点对点”接触判断就可以反映出单元间的相对状态。

3 具体单元形态

如图 1 所示, 多边形 1, 2 为混凝土离散化后的离散单元。线段 AC, BD 是两个单元之间的公共边界。现在在边界上插入界面单元 3, 界面单元角点 A', B', C', D' 与离散单元角点 A, B, C, D 位移完全一致。

界面单元的详细情况如图 2 所示, 它由两组连接单元将角点 A', C' 和 B', D' 分别相连。每组连接单元有一个“点对点”接触单元和两个弹簧单元, 记作 C_p , C_t , 和 C_s 。它们分别承担角点间相对位移引起的压力, 拉力和剪力。令 u , v 代表角点在局部坐标系中的位移, 则连接单元刚度矩阵如下列所示:

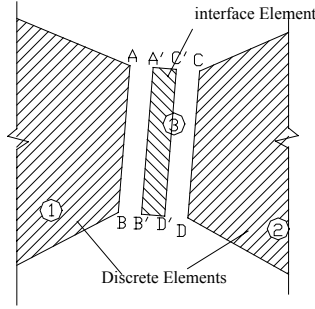


图 1. 离散单元与界面单元

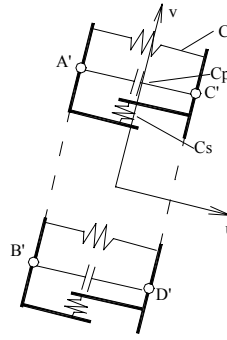


图 2. 界面单元详细情况

3.1 接触单元 C_p

如果 $u_{A'} > u_{C'}$, 则单元刚度矩阵为

$$K_{C_p}^e = \begin{bmatrix} k_n & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_n & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

如果 $u_{A'} < u_{C'}$, 则

$$K_{C_p}^e = 0 \quad (2)$$

如果 $F_{C_p} > \frac{tlf_c}{2}$, 即混凝土已经被压碎, 则

$$k_n = 0 \quad (3)$$

这里 t 为混凝土厚度, l 是公共边长, f_c 为混凝土抗压强度。

3.2 弹簧单元 C_t

当界面单元中存在拉力, 如

$$F_{C_t} \leq \frac{tlf_t}{2}, \text{ 则}$$

$$K_{Ct}^e = \begin{bmatrix} k_n & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_n & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

这里 f_t 为混凝土抗拉强度

如果 $F_{Ct} > \frac{tf_t}{2}$, 即混凝土已经开裂, 则

$$K_{Ct}^e = 0 \quad (5)$$

3.3 弹簧单元 C_s

如果 $F_{Cs} \leq \frac{tf_v}{2}$, 则

$$K_{Cs}^e = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_v & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_v \end{bmatrix} \quad (6)$$

这里 f_v 为混凝土抗剪强度

如果 $F_{Cs} > \frac{tf_v}{2}$, 则

$$k_v = 0 \quad (7)$$

因为假设混凝土变形主要在离散单元内部, 所以, 以上讨论中的刚度系数 k_n , k_v 被设定为一个很大的值, 使得界面单元在失效以前只有很小的变形。

由以上分析可知, 在本方法中, 混凝土的力学性能通过调整界面单元的特征得到反映, 在实际计算中, 当连接单元失效以后, 仍然给它一个很小的残余刚度。这样避免了由于过多单元失效造成的计算中断, 提可以用位移法求解, 提高了计算的稳定性。

因为大部分混凝土的力学性能已经在界面单元中的到反映, 并且破坏被假设在界面单元内, 所以, 我们只要让混凝土离散单元为普通的非线性弹性材料即可。

4 离散元与有限元的耦合

当事先知道结构中某些部件不会发生开裂, 比如结构中的钢材, 或者受力很小的混凝土的时候, 可以将这些部件离散为普通的有限元。在有限元部分和离散单元部分之间, 仍然可以利用界面单元将它们连接起来。这样可以充分发挥两种数值方法的长处, 使效率和精度都得到保证。

5 尺寸效应

为了解决尺寸效应可能造成的结果不稳定, 我们采用如下方法来缓解尺寸效应造成的应力集中:

- 1、求出所有界面单元的平均边长 \bar{l}
- 2、在进行界面单元破断分析时, 将求得的内力乘以系数 l/\bar{l} , l 为该界面单元的边长
用这种方法可以比较有效地减小单元尺寸效应对结果的影响。

6 试验验证

6.1、立方体试块实验

混凝土立方体试块被广泛用做混凝土标准试块。用上文所述方法, 分别分析了混凝土立方体试块在单轴压、拉和劈裂荷载作用下的变形与开裂情况。计算结果参见图 3, 4, 5。其中深色部分表示骨料, 浅色表示水泥浆体。可见计算得到的裂缝与实验结果有着很高的相似性。

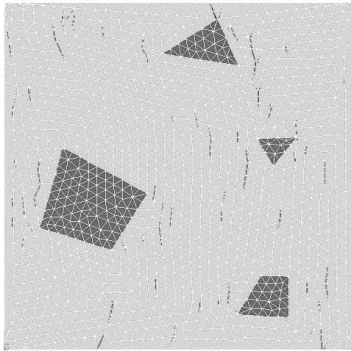


图 3、单轴受压裂缝
(加载面: 上下表面)

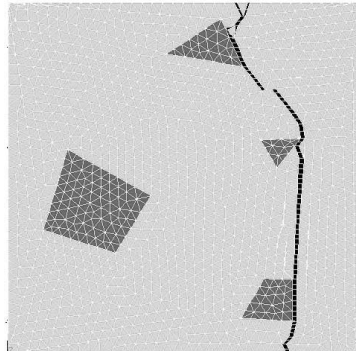


图 4、单轴受拉裂缝
(加载面: 左右表面)

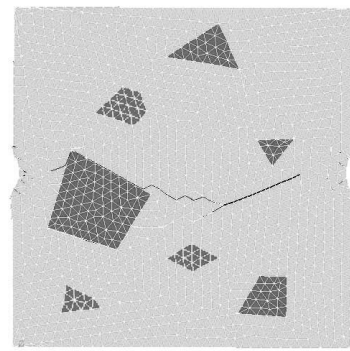


图 5、劈裂裂缝
(加载点: 左右表面中点)

6.2、钢筋锚固实验

钢筋的锚固是钢筋混凝土结构中的重要性能指标。但是钢筋的锚固, 尤其是变形钢筋的锚固, 由于其局部应力情况和开裂情况十分复杂, 在有限元分析中一直是一个难点。用上文提出方法, 将混凝土离散为离散单元, 钢筋离散为有限元, 二者之间布置界面单元。计算得到的裂缝和变形情况如图 6, 7 所示, 其中深色单元表示钢筋, 浅色表示混凝土。可以清楚的看出钢筋和混凝土之间的拉脱裂缝, 纵向滑移裂缝, 肋前劈裂裂缝, 肋前压碎区等特征信息。

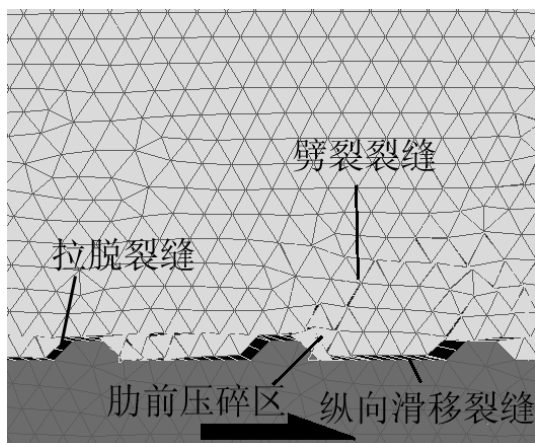


图 6、钢筋与混凝土界面的裂缝

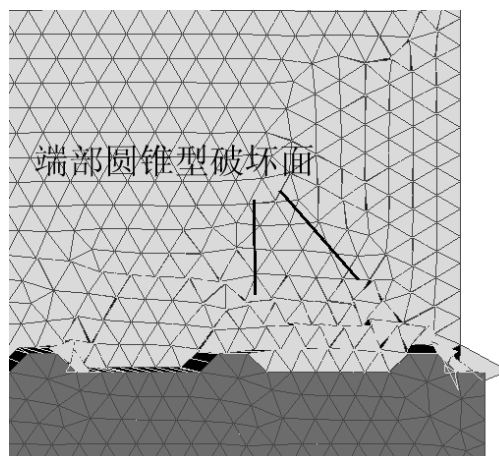


图 7、试件端部的开裂与变形情况

7 结论

本文提出了一种用改进的离散单元分析混凝土结构的方法。并用此方法分析了混凝土立方体试块及钢筋锚固模型。数值分析结果清晰显示了混凝土的变形、开裂等情况。其中尤其是可以模拟在复杂荷载条件下混凝土裂缝产生、开展情况极其对结构的影响。通过改进离散单元提高了计算的稳定性,而在引入有限元和离散元耦合的方法后,可以有效减少计算的时间和工作量。本方法在分析复杂应力条件下局部混凝土的变形开裂情况有着一定的实用意义。

参 考 文 献

- 1 Lu Xinzhen, Jiang Jianjing, Elastic-Plastic Analysis Of RC Shear Wall Using Discrete Element Method, *EPMESEC VIII*, Shanghai, 2001. 7.
- 2 魏群, 散体单元法的基本原理, 数值方法和程序, 科学出版社, 1991
- 3 江见鲸, 混凝土结构工程学, 中国建筑工业出版社, 1998
- 4 江见鲸, 钢筋混凝土结构非线性有限元分析, 陕西科学技术出版社, 1994

Analysis of Concrete Structure Using Improved Discrete Element Method

Lu Xinzheng

Jiang Jianjing

Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing, 100084

Abstract An improved discrete element method is presented to simulate the mechanical behavior of concrete. The discrete elements of concrete are connected with interface elements, which are made up of “point to point” contact elements and spring elements. It is assumed that the damage of concrete only happens in the interfaces of different discrete elements and the size of cracks is very small comparing to the size of structure. Hence, the contact estimation of discrete elements can be simplified with “point to point” contact estimation in the interfaces, while the influence of crack surfaces also can be obtained in this method, which is difficult for normal finite element method. A standard concrete cube specimen and a concrete-rebar bond test specimen model are analyzed using this method. The results show this method is rational and effective.

Keywords discrete element method; nonlinear analysis; concrete structure