

混凝土准脆性界面裂纹本构模型比较

沈新普 沈国晓 周琳

(沈阳工业大学建筑工程学院 辽宁 沈阳 110023)

摘要 :以混凝土界面断裂分析为目的 ,选取若干典型的层间界面准脆性断裂的本构模型进行分析和数值模拟对比研究。在局部本构水平上 ,采用这些界面裂纹本构模型 ,对各种载荷工况下材料的准脆性断裂行为进行数值模拟。在对选择的典型黏性界面裂纹进行定性分析比较时着重考虑以下两点 :①采用选择的模型对 I 型裂纹和 II 型裂纹的断裂行为进行数值计算 ;②对混合型断裂载荷作用下模型的扩容行为特性进行数值分析。通过对数值结果的分析比较得出结论 :库仑型裂纹模型比较适合模拟复杂载荷下的界面断裂行为 ,但是其扩容特性仍有待改善。

关键词 :混合型断裂 ;塑性 ;本构模型 ;黏性界面裂纹 ;准脆性断裂

中图分类号 :TU311 文献标识码 :A 文章编号 :1006-7647(2007)02-0012-06

Comparison of constitutive models of interface cracks for quasi-brittle materials//SHEN Xin-pu , SHEN Guo-xiao , ZHOU Lin(College of Architectural Engineering , Shenyang University of Technology , Shenyang 110023 , China)

Abstract: Concerning on the modeling of the quasi-brittle fracture process at interface cracks of quasi-brittle materials , a comparative analysis was performed based on some typical constitutive models of interface cracks. Numerical simulation of the quasi-brittle fracture behaviors with the selected models was carried out at local constitutive level. Aiming at the simulation of quasi-brittle fracture of concrete-like materials , the qualitative comparison of the selected models was focused on the follow aspects , i. e. the simulation of the fracture behaviors of crack mode I and crack mode II by use of the selected models and the simulation of dilatancy properties of the selected models under mixed-mode fracture loading conditions. It is concluded that the Coulomb-type crack model is suitable for simulation of the interfacial fracture under mixed-mode fracture loads , however further work is still needed for improvement of its dilatancy properties.

Key words : mixed-mode crack ; plasticity ; constitutive model ; cohesive interface crack ; quasi-brittle fracture

混凝土类材料的准脆性断裂是近十几年来固体力学研究的热点之一 ,目前的文献中层间界面在单向拉伸或混合载荷作用下准脆性断裂的本构模型有若干种^[1-4] ,这些模型可用于模拟两种不同材料界面上的断裂过程 ,也可用于砌体界面或胶结界面的断裂模拟。用于混凝土类材料断裂过程分析的黏性界面裂缝模型必须具备以下两个基本特征 :①除了潜在的间断面之外 ,结构各处均假设处于线弹性状态 ;②潜在的间断面轨迹上允许位移间断 ,位移间断值与间断面上的面力值之间具有某种合适的数学关系。本文以混凝土界面断裂分析为目的 ,选取若干典型的层间界面准脆性断裂裂纹的本构模型进行局部本构水平上的数值模拟 ,并对它们各自的优点和缺点进行分析和对比。

1 混合型界面断裂的黏性裂纹模型

混合型黏性断裂的界面变量定义如下 : p 代表界面上的面力矢量 ,且 $p = -p^+ = p^-$, u^+ 和 u^- 分别表示界面两边的位移矢量 ,而 w 表示裂纹张开矢量 ,即跨起界面两侧的位移间断 ,并且

$$p = \{p_n \ p_t\}^T, w = u^+ - u^- = \{w_n \ w_t\}^T \quad (1)$$

式中 : p_n 为法向面力分量 ; p_t 为切向面力矢量(对于二维问题该切向分量为标量) ; w_n 为裂纹张开的法向分量 ; w_t 为裂纹张开的切向分量矢量。在本文模型中采用了小变形假设 ,即变形不影响平衡关系 ,同时还假设了过程为纯机械的、等温的。

1.1 用于混合模型断裂分析的 Xu-Needleman 模型

由于简单易用的特点 ,具有解析的面力-张开位移(p - w)关系的界面裂纹得到了若干研究者的关

基金项目 :国家自然科学基金资助项目(10472072) 辽宁省教育厅重大基础攻关计划资助项目(2005C035)
作者简介 :沈新普(1963—) ,男 ,河北清河人 ,教授 ,博士 ,从事固体损伤塑性本构研究。E-mail :xinpushen@vip.sina.com

注^[5-6],并被用于不考虑卸载行为材料与结构断裂分析。其中 Xu-Needleman 模型是很有代表性的一个模型。基于一般热力学定理,文献[6]提出了一个用于混合型的界面裂纹模型,其一般形式的 p - w 律为

$$p = \left\{ \begin{matrix} p_n \\ p_t \end{matrix} \right\} = \frac{\partial \varphi}{\partial w} \quad (2)$$

文献[6]提出的界面裂纹面上的自由能函数为

$$\varphi(w) = W_1 \left\{ 1 + \exp \left(- \frac{w_n}{w_{nc}} \right) \left[\left(1 - r + \frac{w_n}{w_{nc}} \right) \frac{1-q}{r-1} - \left(q + \frac{r-q}{r-1} \frac{w_n}{w_{nc}} \right) \exp \left(- \frac{w_t^2}{w_{tc}^2} \right) \right] \right\} \quad (3)$$

其中

$$W_1 = ep_n^u w_{nc} \quad q = \sqrt{\frac{1}{2e}} \frac{p_t^u}{p_n^u} \frac{w_{tc}}{w_{nc}} \quad r = \frac{w_n^*}{w_{nc}}$$

式中: w_n, w_t 分别为 I 型和 II 型裂纹的张开位移; w_{nc}, w_{tc} 分别为 I 型和 II 型裂纹张开位移的临界值,为常数; W_1, r, q 为中间变量; w_n^* 为对应 $p_n = 0$ 完全剪切分离时的裂纹法向张开位移(即扩容)。

由自由能函数运算得到的界面变量的软化律的分量形式为

$$p_n = - \frac{W_1}{w_{nc}} \exp \left(- \frac{w_n}{w_{nc}} \right) \left\{ \frac{w_n}{w_{nc}} \exp \left(- \frac{w_t^2}{w_{tc}^2} \right) + \frac{1-q}{r-1} \left[1 - \exp \left(- \frac{w_t^2}{w_{tc}^2} \right) \right] \left(r - \frac{w_n}{w_{nc}} \right) \right\} \quad (4)$$

$$p_t = - \frac{2W_1}{w_{nc}} \frac{w_t w_{nc}}{w_{tc}^2} \left(q + \frac{r-q}{r-1} \frac{w_n}{w_{nc}} \right) \exp \left(- \frac{w_n}{w_{nc}} \right) \exp \left(- \frac{w_t^2}{w_{tc}^2} \right) \quad (5)$$

由于不考虑卸载,以上自由能函数运算得到的软化律是增量意义上的。这个模型中采用的材料参数是 $p_n^u, w_{nc}, p_t^u, w_{tc}, w_{nc}^*$, 这种模型是基于热力学理论的,其参数可以通过一系列实验得出。该模型能够很好地模拟混合型断裂的实验现象。模型中既考虑了脱层,又考虑了相对扩容行为。该模型的缺点在于,定义这样一个模型需要的参数太多,而且其中的一部分参数只能通过参数辨识间接确定。这个模型适用于模拟金属的界面断裂,而对于混凝土类材料的静态或准静态断裂分析则不适用。

1.2 弹塑性软化的界面裂纹模型-库仑型的黏性裂纹模型

实验表明,在混合型断裂载荷下,试件断裂时的形态与加载路径有关。与此同时,剪力产生的摩擦滑动则导致扩容。扩容量不仅与材料参数有关,而且与裂纹面上的法向面力有关。因此,在这种情况下剪应力和摩擦滑动之间的关系就不能被当作材料

特性。在很多情况下,磨损、扩容和脱黏都是准脆性材料断裂的重要机制。使用在面力和相对位移坐标中定义的本构律无法深入研究磨损与扩容问题。近年来,为了模拟在正应力和剪应力共同作用下裂纹的萌生和扩展,已经涌现了若干在塑性力学框架内建立的不同版本的库仑类界面裂纹本构模型。这种模型的一个基本假设就是当应力达到诸如“Mohr-Coulomb”条件等给定的屈服面上时裂纹开始萌生。在裂纹扩展的过程中应力点始终处于屈服面上,而屈服面则逐渐收缩(即软化),一直达到最终状态。模型中的软化律是由破坏准则的演化定义的,而不是采用面力-张开位移来定义。

黏性裂纹的库仑类型塑性模型是通过描述摩擦滑动和扩容等界面裂纹力学行为的本构关系来表达的^[7-9]。不同的库仑类型塑性界面裂纹的分析步骤都类似,本文不予讨论。下面仅讨论并比较各种模型的本构特点。

1.2.1 Carol-Prat-Lopez 模型

定义 s 为拉伸强度, c 为黏聚力, μ 为内摩擦系数, Carol-Prat-Lopez 界面裂纹模型^[8]采用了如下初始破坏条件:

$$F(p, q) = p_t^2 - (c - \mu p_n)^2 + (c - s\mu)^2 = 0 \quad (6)$$

模型中有 3 个参数,其中 2 个是变量。用这 3 个参数可以描述式(6)中的库仑型屈服条件的演化过程。这 3 个参数组成的矢量为

$$q = \{s, c, \mu\} \quad (7)$$

模型中给定界面裂纹材料强度劣化到最后时间 q 的残余值为

$$q_r = \{0, 0, \mu_r\} \quad (8)$$

在软化过程中涉及到 2 个变量 s 和 c , 给定这 2 个变量的软化律的数学表达式为

$$\begin{cases} s = s_0 \left[1 - S \left(\alpha_s, \frac{k_{\perp}}{G_{\perp f}} \right) \right] \\ c = c_0 \left[1 - S \left(\alpha_c, \frac{k_{\perp}}{G_{\parallel f}} \right) \right] \end{cases} \quad (9)$$

式中 α_s 和 α_c 是材料参数,决定着幂软化律的形状,函数 S 的表达式为

$$S(\alpha, \xi) = \frac{e^{-\alpha \xi}}{1 - (1 - e^{-\alpha}) \xi} \quad (10)$$

Carol-Prat-Lopez 模型中采用了一个中间变量 $k_{\perp}$,它是塑性张开位移的率 $\dot{w}_p$ 的函数。其率形式表达式为

$$k_{\perp} = p_n \dot{w}_{np} H(p_n) + p_t \dot{w}_{tp} \left\{ 1 - \left| \frac{p_n \mu}{p_t} \right| \left[1 - H(p_n) \right] \right\} \quad (11)$$

式中 $H(\cdot)$ 表示阶跃函数。

塑性张开的计算采用了非关联准则,且给定了塑性势函数的导数如下:

$$\dot{w}_p = \dot{\lambda} \frac{\partial Q}{\partial p}$$

其中

$$\frac{\partial Q}{\partial p} = \begin{cases} 2\mu c - \mu p_n & f_p^{\text{dil}} f_c^{\text{dil}} \\ 2p_t & \end{cases} \quad (12)$$

式中 f_p^{dil} 和 f_c^{dil} 是为了模拟扩容现象而引入的 2 个函数。这 2 个函数定义如下:

$$\begin{cases} f_p^{\text{dil}} = 1 - S\left(\alpha_p^{\text{dil}}, \frac{|p_n|}{p_n^{\text{dil}}}\right) \left[1 - H(p_n)\right] \\ f_c^{\text{dil}} = 1 - S\left(\alpha_c^{\text{dil}}, \frac{c}{c_0}\right) \left[1 - H(p_n)\right] \end{cases} \quad (13)$$

式中 p_n^{dil} 是能使扩容现象消失的法向压应力的临界值,在这个模型中被设为材料参数。

Carol-Prat-Lopez 模型能够很好地模拟 I 型裂纹的试验现象。但是它在模拟 Hassanzadeh 试验^[3]中的剪应力和裂纹张开位移时略带一些不确定性因素。除了界面弹性刚度参数之外这个模型需要 r_0 , s_0 , μ_0 , p_n^{dil} , α_s , α_c , G_{If} , G_{IIIf} , α_c^{dil} , α_p^{dil} 等 10 个模型参数来描述扩容和软化行为。

这个模型可以计入脱黏和磨损对界面裂纹的影响,但是它要求多达 10 个模型参数,而且其中的一些参数只能通过实验来确定,从而使得参数值可能对加载条件有依赖性。一方面,这个模型的扩容行为主要是由式(13)来表述;另一方面,模型还通过给定的临界正向压力值 p_n^{dil} 来限制扩容量,当正向压力达到 p_n^{dil} 时将不再发生扩容增长。

Carol-Prat-Lopez 模型是建立在经典弹塑性增量理论框架内的。在增量塑性理论中,塑性应变变量是一个恒增的内变量矢量。从而,上述模型不能正确模拟界面裂纹面上的卸载现象即裂纹闭合。后面将通过数值例子说明这种模型当裂纹闭合时会得出不合理的很高的压应力。

1.2.2 用于混合型黏性界面裂纹的线性互补问题描述的分段线性模型

在文献[9-11]等工作基础上,文献[12]提出了一个用于混合型界面裂纹分析的分段线性模型。这个模型能够用于混凝土类准脆性断裂的线性互补问题的数值求解,文献[12]给出了该模型的全量形式和增量形式的分段线性界面裂纹的表述。

这里给出一个最简单的五屈服面的分段线性界面裂纹模型,如图 1 所示。分段线性界面裂纹的优点是其适用范围广,既可用于增量型的本构模型描述,又可用于全量本构描述。比较而言,具有解析的黏性律的裂纹模型(如 Xu-Needleman 模型等)则只能用于路径无关的全量描述形式,从而也就不能考虑

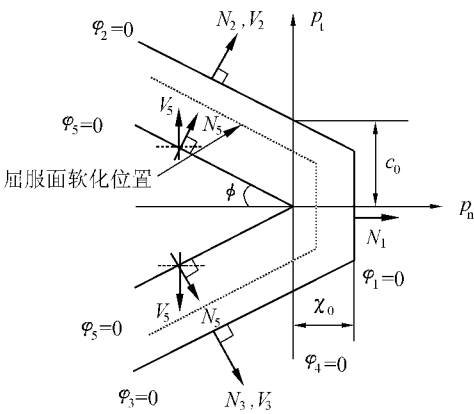


图 1 五屈服面模型分段线性塑性屈服面示意图

卸载因素。另一方面, Lotfi-Shing 模型和 Carol-Prat-Lopez 模型又仅限于增量形式的计算,因此不能用于结构的直接分析如塑性安定分析等。下面分别给出五屈服面分段线性界面裂纹模型的全量描述和增量描述。

a. 全量形式。对应一个给定的面力矢量 p , 分段线性塑性屈服准则的矩阵形式为

$$\phi = N^T p - H\lambda - Y \leq 0 \quad (14)$$

5 个屈服面对应的屈服函数组成的矢量为

$$\phi = \{\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4, \phi_5\}^T \quad (15)$$

5 个屈服面线段的外法线方向组成的矩阵为

$$N = \begin{bmatrix} 1 & \mu & \mu & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (16)$$

这里 N 是屈服面的外法线矢量矩阵,但不是单位矩阵。塑性乘子矢量为

$$\lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5\}^T \quad (17)$$

塑性张开位移矢量 w_p 的计算式如下:

$$w_p = V\lambda \quad (18)$$

式中矩阵 V 是所有 5 个屈服面外法线的集合,其表达式为

$$V = \begin{bmatrix} 1 & \mu_2 & \mu_2 & 0 & -\mu_2 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

式中 μ_2 是一个与扩容特性相关的系数。

在材料强度软化律的构造中,模型限定软化形式为“有限软化”,从而得到塑性软化模量的矩阵形式,即

$$H = \begin{bmatrix} H_n & \frac{\chi_0}{c_0} H_t & \frac{\chi_0}{c_0} H_t & -H_n & -\frac{\chi_0}{c_0} H_t \\ \alpha H_n & H_t & H_t & -\alpha H_n & -H_t \\ \alpha H_n & H_t & H_t & -\alpha H_n & -H_t \\ H_n & \frac{\chi_0}{c_0} H_t & \frac{\chi_0}{c_0} H_t & -H_n & -\frac{\chi_0}{c_0} H_t \\ \alpha H_n & H_t & H_t & -\alpha H_n & -H_t \end{bmatrix} \quad (20)$$

式中: χ_0 为初始抗拉强度; c_0 为初始抗剪强度; H_n 和 H_t 分别为界面法向与切向的软化模量; α 为法向裂纹张开位移对切向材料强度特性的影响系数。

由初始抗拉强度和初始抗剪强度组成的材料参数矢量为

$$Y = \{\chi_0, c_0, c_0, \chi_0, c_0\}^T \quad (21)$$

在本模型中涉及到的材料常数有 $\mu, \mu_2, \alpha, c_0, \chi_0, G_{If}, G_{If}, H_n, H_t$ 。

当给定载荷为位移间断矢量 w 时, 由矢量 φ 和 λ 组成的线性互补问题的数学表达式为

$$\begin{aligned} \varphi &= N^Tkw - (N^TkV + H)\lambda - Y \leq 0 \\ (\varphi \leq 0, \lambda \geq 0, \varphi^T\lambda &= 0) \end{aligned} \quad (22)$$

这个线性互补问题可以用数学规划法求解(参见文献[12])。

b. 增量形式。对于复杂的载荷路径, 全量塑性理论的结果有时不能满足对问题精度的要求, 从而有必要采用增量描述。对于增量型描述, 由式(19)~(21)给出的分段线性黏性律及耦合关系等基本数学关系仍成立。当给定载荷为位移间断矢量增量 Δw 时, 矢量 φ 和 $\Delta\lambda$ 之间的线性互补问题的描述为

$$\begin{aligned} \varphi &= N^T(p_0 + k\Delta w) - (N^TkV + H)\Delta\lambda - \\ & (H\lambda_0 + Y_0) \leq 0 \\ (\varphi \leq 0, \Delta\lambda \geq 0, \varphi^T\Delta\lambda &= 0) \end{aligned} \quad (23)$$

式中 p_0, λ_0, Y_0 表示施加荷载前对应的状态时各变量的初始值。上述线性互补问题也可以采用文献[10]给出的数字规划法来求解。式(23)表示软化屈服面是“加载路径依赖”的。

五屈服面的分段线性塑性界面裂纹模型的扩容特性是由式(19)的矩阵 V 给定的。下面给出的数值例子将显示出这个模型的扩容特性是由剪切强度的软化过程来限制的, 从而扩容量是一个有限值。

2 界面裂纹典型本构模型的数值试验

从已有模型中选择一些模型进行局部本构水平上的数值试验, 进行2维算例计算, 以验证比较上述界面裂纹本构模型。本研究编制的 FORTRAN 程序中采用了 Newton-Raphson 迭代格式, 可以进行荷载-面力全过程弹塑性数值模拟。

下面给出模型在典型加载路径上材料的力学行为的数值计算结果: 首先给出 I 型载荷下模型的断裂行为模拟, 之后给出 II 型断裂模拟结果。这些结果主要用 p - w 曲线的形式给出。对较复杂的载荷情况, 则 p 的响应还要结合面力空间中应力点的迁移状况作进一步的描述。

2.1 Xu-Needleman 界面裂纹模型的数值试验

首先对 Xu-Needleman 模型进行数值校验, 计算

了 I 型断裂和 II 型断裂的本构行为。模型中采用的参数值如下:

$$\begin{aligned} p_n^u &= 2.8 \text{ MPa}, p_t^u = 7.0 \text{ MPa} \\ w_{nc} &= 0.014 \text{ mm}, w_{lc} = 0.035 \text{ mm} \\ w_{nc}^* &= 0.01 \text{ mm} \end{aligned}$$

图 2(a) 给出的由 Xu-Needleman 模型计算得到的 I 型断裂行为是合理的, 但图 2(b) 给出的由该模型得到的纯 II 型位移加载的响应则显得不尽合理: 剪切位移引起的法向压力的增加过大, 这表明 Xu-Needleman 模型的扩容特性不合理。图 3 给出了 Xu-Needleman 模型在混合型断裂位移载荷下的行为响应。尽管其 II 型断裂行为不合理, 但在混合型载荷作用下该模型的扩容特性还是比较合理的, 这说明 Xu-Needleman 模型可以用于 I 型断裂占主导地位的混合型断裂模拟。

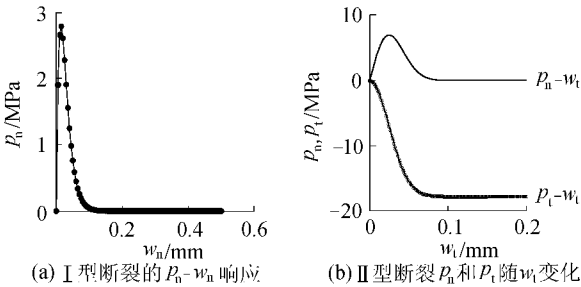


图 2 Xu-Needleman 界面裂纹模型的 I 型及 II 型断裂行为数值结果

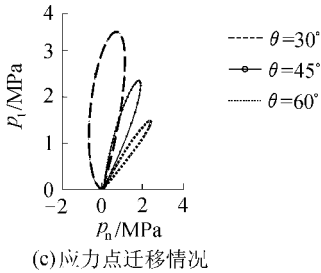
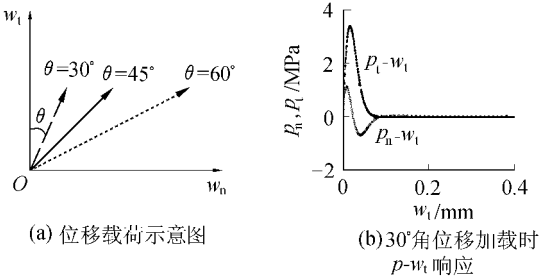


图 3 Xu-Needleman 界面裂纹模型的混合型断裂行为数值结果

2.2 Carol-Prat-Lopez 模型的数值试验

采用的参数值如下: $K_n = K_t = 200 \text{ MPa/mm}$, $\phi = \arctan 0.9$, $\mu = 0.9$, $s_0 = 2.8 \text{ MPa}$, $c_0 = 7.0 \text{ MPa}$, $G_{If} = 0.1 \text{ N/mm}$, $G_{If} = 1.0 \text{ N/mm}$, $\alpha_s = 0$, $\alpha_c = 1.5$, $\alpha_p^{\text{dil}} = 2.7$, $\alpha_c^{\text{dil}} = 3$, $p_n^{\text{dil}} = 56 \text{ MPa}$ 。图 4(a) 给出了用 Carol-Prat-Lopez 模型得到的 I 型断裂的位移-面力曲线,

结果基本合理,图 4(b)给出了该模型得到的 II 型断裂的位移-面力曲线。结果表明,随剪切位移的增加,法向压力不断增大,这与实验现象相符。此外,随剪切位移的不断增加,法向正应力的增加不断减缓,逐渐趋近于一个饱和极限值。图 5 中给出了由 Carol-Prat-Lopez 模型得到的加载及卸载时应力点的迁移轨迹曲线,由于塑性位移张开是不可逆的,裂纹不允许闭合,在法向的裂纹闭合位移导致极高的压应力。这是该模型的一个重要缺陷,其致使该模型不能用于循环载荷下的界面断裂分析。

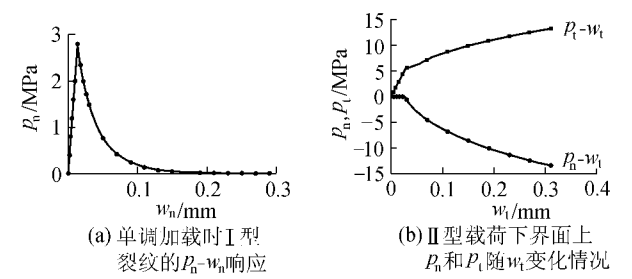


图 4 Carol-Prat-Lopez 界面裂纹模型的 I 型及 II 型断裂行为数值模拟

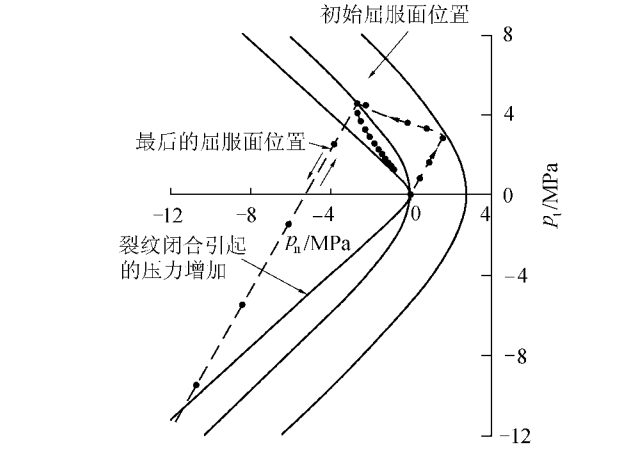


图 5 混合断裂载荷下 Carol-Prat-Lopez 裂纹模型的应力点在面力空间中的迁移情况

2.3 分段线性黏性裂纹的数值试验

本节给出分段线性黏性裂纹的全量和增量两种形式的表述的数值算例,使用了数学规划法的求解器 PATH-Solver^[11,13]求解分段线性界面裂纹的线性互补问题。模型参数取值为 $K_n = K_t = 200 \text{ MPa/mm}$, $\phi = \arctan 0.9$, $\mu = \mu_2 = 0.9$, $\chi_0 = 2.8 \text{ MPa}$, $c_0 = 7.0 \text{ MPa}$, $G_{\text{I}} = 0.1 \text{ N/mm}$, $G_{\text{II}} = 1.0 \text{ N/mm}$, $\alpha = 0.8$ 。图 6 给出了用分段线性界面裂纹模型得到的 II 型位移载荷下的面力-位移响应。可以看出,当剪切断裂过程完成时,模型的扩容达到了它的极限,而且之后法向的压应力就不再增加,面力水平保持在摩尔-库仑定律规定的关系上。对于单调加载载荷作用下的断裂力学本构行为,由全量描述得到的面力-位移数值响应结果与由增量形式本构模型得到的结果相

同。图 7 给出了分段线性模型在 II 型循环位移载荷下的面力-位移响应。从图中可以看出,当剪切位移载荷水平达到图 7(a)中 a 点时,在图 7(b)中也有相应的 a 点出现。当图 7(a)中的位移反向加载至 b 点时,图 7(a)和(b)中的响应曲线都已经完成了黏性断裂,达到了摩尔-库仑摩擦滑移状态,随后的剪切位移将不再产生扩容效应。

由于增量型分段线性裂纹模型是建立在增量塑性理论框架中的,塑性位移是恒正的,本构模型不允许裂纹闭和。在这一点上,增量型分段线性模型和 Carol-Prat-Lopez 模型是相似的。

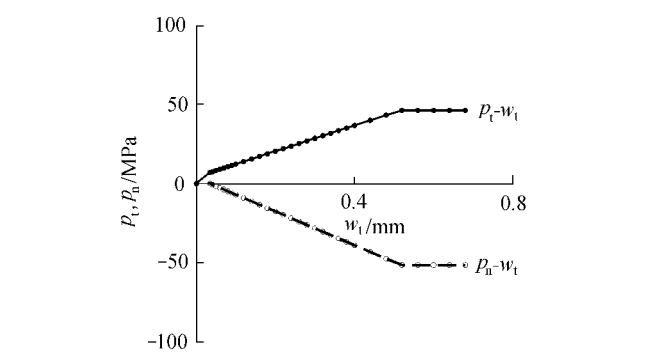


图 6 分段线性界面裂纹模型的 II 型剪切位移载荷加载下的面力分量 p_n 和 p_t 随载荷 w_t 的变化情况

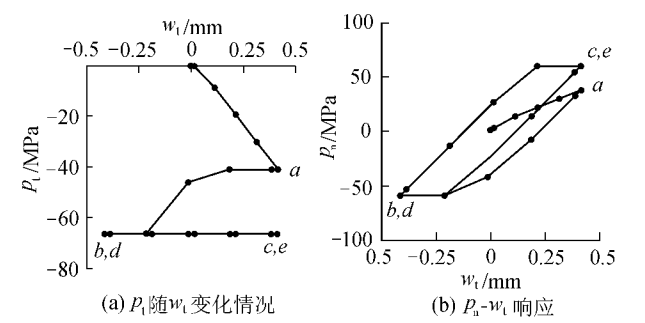


图 7 II 型循环位移载荷下分段线性界面裂纹模型数值结果

3 结 语

本研究采用自编的局部本构模拟程序对典型的黏性界面裂纹进行数值模拟。根据界面裂纹本构模型的数值模拟结果可以得出以下结论:

- a. Xu-Needleman 模型不宜用于混凝土类材料的断裂分析。
- b. Carol-Prat-Lopez 模型是一个用于混凝土类材料断裂分析的较好的模型,但其存在若干不足之处:
 - ①它的“有限扩容”特性是通过引入“法向压应力极限值”来人为设定的。
 - ②从试验现象看,有时候这个假设是成立的,但并不总能成立。
 - ③扩容现象停止时对应的压应力值不是一个材料常数,而是取决于加载路径条件的一个变量。
- c. 分段线性界面裂纹模型可以较好地模拟界

面上发生的断裂与摩擦滑动现象。在这个模型中,采用了非关联流动准则来计算扩容,扩容的最大值设定与剪切方向的软化过程同步结束。为了便于采用数学规划法求解这个模型,本文还给出了模型的线性互补问题的描述。这个模型的全量描述是完全线性的,因此可以用于诸如塑性极限分析、安定分析等混凝土结构分析的直接解法。模型的增量形式则可以用于复杂载荷情况下界面断裂问题的求解。数值算例表明这个模型能够很好地模拟混凝土材料的断裂过程,且能恰当地反映扩容行为。

参考文献：

[1] BAZANT Z P, CEDOLIN L. Stability of structures : elastic , inelastic , fracture and damage theories[M]. Oxford : Oxford University Press ,1991 :1-36.

[2] KARIHALOO B L. Fracture mechanics and structural concrete [M]. Harlow ,Great Britain :Longman Scientific & Technical , 1995 :19-68.

[3] HASSANZADEH M. Determination of fracture zone properties in mixed mode I and II[J]. Engrg Fracture Mech ,1990 ,35(4/ 5) 845-853.

[4] VUTUKURI V S , LAMA R D ,SALUJA S S. Handbook on mechanical properties of rocks :Vol 1[M]. Berlin :Trans Tech Publisher ,1974 :15-49.

[5] CAMACHO G T ,ORTIZ M. Computational modeling of impact damage in brittle materials[J]. Inter J Solids Struct , 1996 ,33 (20/21/22) 2899-2938.

[6] XU X , NEEDLEMAN A. Numerical simulation of fast crack

growth in brittle solid[J]. J Mech Phys Solids ,1994 ,42(7) : 1397-1434.

[7] LOTFI H ,SHING P. Interface model applied to fracture of masonry structures[J]. ASCE J Engng Mech ,1994 ,120(1) 63-80.

[8] CAROL I ,PRAT P C ,LOPEZ C M. Normal/shear cracking model : application to discrete crack analysis[J]. ASCE J Engng Mech ,1997 ,123(1) :1-9.

[9] MAIER G. A matrix structural theory of piecewise-linear plasticity with interacting yield planes[J]. Meccanica ,1970 ,5 (1) 55-66.

[10] BOLZON G , MAIER G , NOVATI G. Some aspects of quasi - brittle fracture analysis as a linear complementarity problem [C]/BAZANT Z P , BITTNER Z , JIRASEK M , et al. Fracture and Damage in Quasibrittle Structures. London :E & FN Spon ,1994 :159-174.

[11] BOLZON G , MAIER G , TIN-LOI F. Holonomic and non-holonomic simulation of quasi-brittle fracture :a comparative study of mathematical programming approaches [C]// WITTMAN F H. Fracture Mechanics of Concrete Structures. Freiburg :Aedificatio Publishers ,1995 :885-898.

[12] COCCHETTI G , MAIER G ,SHEN X P. On piecewise linear models of interfaces and mixed mode cohesive cracks[J]. Computer Modeling in Engineering and Sciences ,2002 ,3(3) : 279-298.

[13] DIRKSE S P ,FERRIS M C. The PATH solver : a non-monotone stabilization scheme for mixed complementarity problems[J]. Optimization Methods & Software ,1995 ,10(1) : 123-156.

(收稿日期 2006-03-13 编辑 高建群)

(上接第 11 页)

f. 由于条件限制,暂时无法提供小区的地下水资料,在水量平衡计算中也未考虑,这对计算结果会产生一些影响。

3 结 语

区域供水计量,特别是以行政区划(市、县)为单位进行供水计量,将成为水资源优化管理、合理配置的重要工作内容之一。本文选择里下河腹部区陶舍小区作试点,运用水量平衡原理对圩区 2002~2003 年度和 2003~2004 年度的实测资料分析验证,从验证结果可以看出,利用水量平衡原理计算出的 2 个年度的水量平衡误差均在允许的范围内,试验区域水量处于平衡状态,水量平衡模型能够用于区域供水计量分析中。由于水量平衡计算中有些参数是查阅资料得出的,另外观测的数据本身也有误差,因此平衡计算的结果还有一定偏差,所以需要不断收集实测资料、积累经验,对误差产生原因进一步分析并

加以消除,对水量平衡计算相关要素进行率定,然后用实测资料来验证和修正,以便为平原河网区提供更加完善的水量平衡计算模型,为区域供水计量提供更加科学、合理的计算依据。

参考文献：

[1] 刘超,汤方平,周济人,等.盐城市市级供水计量工程可行性研究报告[R].扬州:扬州大学工程设计院,2002.

[2] 侯晓峰.西安市城市供水水源合理配置研究[D].西安:西安理工大学,2002.

[3] 詹道江,叶守泽,吴明远.工程水文学[M].北京:水利电力出版社,1985 :19-21.

[4] 江苏省水文水资源勘测局盐城分局.盐城市市级供水计量陶舍小区 02~03 年度试验报告[R].盐城:江苏省水文水资源勘测局盐城分局,2003.

[5] 江苏省水文水资源勘测局盐城分局.盐城市市级供水计量陶舍小区 03~04 年度试验报告[R].盐城:江苏省水文水资源勘测局盐城分局,2004.

(收稿日期 2005-12-30 编辑 高建群)