

虚拟多维内联结键模型(VMIB)在岩石类材料 单轴破坏中的应用

张振南^{1,2}, 葛修润^{3,4}, 李永和¹

(1. 上海大学土木系, 上海 200072; 2. 上海市应用数学和力学研究所, 上海 200072; 3. 上海交通大学岩土力学与工程研究所, 上海 200030; 4. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071)

摘 要: 应用虚拟多维内联结键模型对岩石类材料的单轴压缩破坏机理进行了分析, 并推导出了包含损伤演化信息的非线性本构方程。VMIB 模型认为: 固体材料在微观尺度上是由离散的随机分布的质点(带有质量的微粒)组成。质点与质点之间由一组虚拟的切向键和法向键连结。岩石类材料在受压破坏过程中, 宏观上局部刚度的降低是在微观尺度上虚拟键分布密度衰减的结果。根据虚拟键的密度衰减机制, 唯象地提出了虚拟键密度演化方程, 并将该演化方程直接嵌入到了 VMIB 模型本构方程中。微观上法向键和切向键的密度衰减分别决定着材料不同的宏观全过程破坏特征。最后通过数值模拟和试验验证, 说明 VMIB 模型能够有效地再现岩石类材料的单轴压缩破坏过程。由于 VMIB 模型兼顾了连续介质力学和分子动力学的特点, 这使得材料破坏的数值模拟变得更为简单和高效。

关键词: 岩石类材料; 单轴破坏; 虚拟多维内联结键模型(VMIB); VIB 模型

中图分类号: TU457 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2006)04-0504-06

作者简介: 张振南(1974-), 男, 博士, 主要从事脆性材料计算模型研究。

Application of Virtual Multi-dimensional Internal Bond (VMIB) in uniaxial failure of rocklike materials

ZHANG Zhen-nan^{1,2}, GE Xiu-run^{3,4}, LI Yong-he¹

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China; 2. Shanghai Institute of Applied Mathematics and Mechanics, Shanghai 200072, China; 3. Institute of Geotechnical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China; 4. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: The uniaxial failure mechanism of rocklike materials was analyzed using VMIB (Virtual Multi-dimensional Internal Bond) and the corresponding nonlinear constitutive relationship including failure evolution information of material was derived. From the view of VMIB, the solid materials was consisted of discrete and random mass particles. These mass particles were connected with virtual normal bonds and tangent bonds. During the processes of uniaxial compressive failure of rocklike materials, the weakness of local material stiffness was considered to result from the distribution density decrease of bond, which was induced by the local deformation in the micro scale. According to this mechanism of density decrease, a phenomenological evolution function of bond density was proposed. This evolution function was directly embedded into the VMIB constitutive relationship. The density evolutions of normal bond and tangent bond in micro scale determined different characters of material failure in macro scale respectively. The numerical simulation results and the corresponding experimental results showed that the VMIB could represent the complete process of uniaxial compressive failure of rocklike materials. Due to the fact that VMIB inherited the advantages of traditional mechanics and the molecular dynamics, it made the numerical simulation of material failure more efficient and easier.

Key words: rocklike materials; uniaxial failure; VMIB; VIB model

0 引 言

如何建立一个合理的力学模型并能有效地再现岩石类材料的破坏过程将是非常有意义的。由于传统连

续介质力学是建立在场连续假设基础上的, 一旦材料

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(973 项目)
(2002CB412704) 资助

收稿日期: 2005-04-04

发生破坏, 材料将由原来的连续介质变为非连续介质, 这时原有的材料本构关系将不再成立。因此, 那些建立在传统连续介质力学基础上的计算方法很难再现材料的整个破坏过程。为了解决这一问题, 很多学者从离散的观点出发去建立材料破坏的计算模型。Hrennikoff (1941)^[1]首先采用等效框架结构的思想去解弹性问题, 后来又有一些学者在这方面做了一些研究^[2-6]。Kawai, et al (1978)^[7]提出了刚体弹簧模型, Morikawa and Sawamoto (1993)提出了另一种弹簧模型^[8], 即材料被离散成刚体圆微粒, 粒子之间用线性的法向和切向弹簧连结, 并将其应用到裂纹的动力分析。Griffiths and Mustoe (2001)^[9]对这个模型做了进一步研究, 他们试图用特定的弹簧排列结构在力学上等效相应的连续介质材料, 并导出了二维情况下, 弹簧的刚度系数与材料常数之间的关系。这些离散模型在模拟材料的破坏过程中有着很大的优越性, 但同时也有自身的一些不足之处, 例如: 当离散的结构尺寸越来越小时, 计算量会大大地增加。

实际上, 连续介质力学存在不足之处的同时, 也有它不可替代的优越性, 例如: 它通过场连续假设, 可以大大的缩减了材料的内部自由度。如何能基于离散化思想并结合连续介质力学的特点提出一种新的模型将会更有意义。1998 年, Gao 和 Klein 提出了 VIB 模型^[10-11]。该模型继承了分子动力学和连续介质力学的特点, 它在模拟裂纹的生成及扩展过程中有着很大的优越性。2004 年, Ganesh 和 Misra 又将 VIB 模型推广到了各向异性材料^[12], Ganesh, et al (2004)又对该模型的有限元数值模拟进行了研究^[13]。后来, 张振南和葛修润又在 VIB 模型的基础上, 提出了虚拟多维内连结键模型 (VMIB)^[14-15]。它在 VIB 模型中的单一法向键连结的基础上又增加了切向键, 并推导出了法向键与切向键刚度系数和宏观材料常数之间的对应关系, VMIB 将微观尺度上的离散结构特征与宏观尺度下的材料力学属性建立了一个桥梁。与 VIB 相比, VMIB 模型能够再现材料泊松比的多样性, 能够应用于更广泛的工程材料。文献[16]所提出的拟连续介质方法实际上是 VMIB 的雏形。在文献[16]中, 没有加入切向键, 只是赋予了原法向键一个切向刚度。由于在文献[14~16]中, 都是用 VMIB 去分析材料的受拉破坏行为, 本文将应用 VMIB 模型去分析岩石类材料单轴压载荷作用下的破坏行为, 并得出了岩石单轴受压破坏的本构方程。最后通过试验与数值模拟, 得出 VMIB 模型能够再现岩石类材料的单轴受压破坏全过

程。

1 模型简介

VMIB 模型的基本思想已在文献[14,16]中有详细的介绍, 文献[15]又对 VMIB 做了系统的总结和完美, 这里仅作一简介。VMIB 模型的微观组构如图 1 所示。

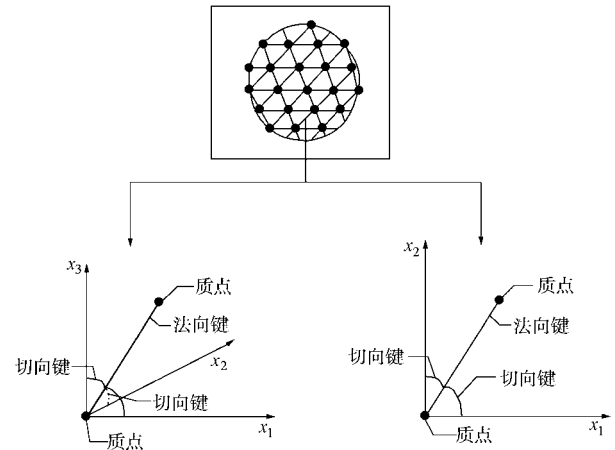


图 1 VMIB 模型的微观组构

Fig. 1 Microstructure constitution of VMIB

根据 VMIB, 连续介质可看作是由离散的质点(带有质量的微粒)组成, 质点之间由切向键(L-bond)和法向键(R-bond)连结。根据 Cauchy-Born 规则^[17-20], 每个质点在变形后的参考构形中的位置由变形梯度场决定。假设法向键的长度为单位长度^[13], 在单位体积中, 储存在键中的应变能为

$$\Phi = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi k l^2 D_L(\theta, \phi) \sin(\theta) d\theta d\phi + \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi r \beta_1^2 D_{R1}(\theta, \phi) \sin(\theta) d\theta d\phi + \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi r \beta_2^2 D_{R2}(\theta, \phi) \sin(\theta) d\theta d\phi + \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi r \beta_3^2 D_{R3}(\theta, \phi) \sin(\theta) d\theta d\phi \quad (1)$$

式中 $D_L(\theta, \phi)$ 为法向键的分布密度函数; $D_L(\theta, \phi) \sin(\theta) d\theta d\phi$ 为球坐标系中角度 $(\theta, \theta + d\theta)$ 与 $(\phi, \phi + d\phi)$ 之间每单位体积中的法向键的个数; k 为法向键的刚度系数; λ 为法向键的伸长量, $\lambda = \xi_i \varepsilon_{ij} \xi_j$, ξ 为球坐标系中法向键的单位方向向量 $\xi = (\sin\theta \cos\phi, \sin\theta \sin\phi, \cos\theta)$, ε 为应变张量; $D_{Ri}(\theta, \phi)$ ($i=1, 2, 3$) 为连结坐标轴 x_i 与法向键的切向键的分布密度函数; r 为切向键的刚度系数; β_i ($i=1, 2, 3$) 为法向键向 x_i 轴的转角, $\beta_1 = \xi_i \varepsilon_{ij} \eta'_j, \beta_2 = \xi_i \varepsilon_{ij} \eta''_j, \beta_3 = \xi_i \varepsilon_{ij} \eta'''_j$, $\eta' = \xi \times (x_1 \times \xi), \eta'' = \xi \times (x_2 \times \xi), \eta''' = \xi \times (x_3 \times \xi)$, x_i 为坐标轴 x_i 的单位方向向量。

根据超弹理论^[21-22], 得应力张量与四阶弹性张量分别为

$$\sigma_{ij} = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi k(\xi_m \varepsilon_{mn} \xi_n) \xi_i \xi_j D_L(\theta, \phi) \sin(\theta) d\theta d\phi + \int_0^{2\pi} \int_0^\pi r \beta_1 \xi_i \eta_j' D_{R1}(\theta, \phi) \sin(\theta) d\theta d\phi + \int_0^{2\pi} \int_0^\pi r \beta_2 \xi_i \eta_j'' D_{R2}(\theta, \phi) \sin(\theta) d\theta d\phi + \int_0^{2\pi} \int_0^\pi r \beta_3 \xi_i \eta_j''' D_{R3}(\theta, \phi) \sin(\theta) d\theta d\phi, \quad (2)$$

$$C_{ijmn} = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi k \xi_i \xi_j \xi_m \xi_n D_L(\theta, \phi) \sin(\theta) d\theta d\phi + \int_0^{2\pi} \int_0^\pi r \xi_i \eta_j' \xi_m \eta_n' D_{R1}(\theta, \phi) \sin(\theta) d\theta d\phi + \int_0^{2\pi} \int_0^\pi r \xi_i \eta_j'' \xi_m \eta_n'' D_{R2}(\theta, \phi) \sin(\theta) d\theta d\phi + \int_0^{2\pi} \int_0^\pi r \xi_i \eta_j''' \xi_m \eta_n''' D_{R3}(\theta, \phi) \sin(\theta) d\theta d\phi. \quad (3)$$

当 $D_L(\theta, \phi) = D_{Ri}(\theta, \phi) = 1$ 时, 由式(3)可进一步推得连结键刚度系数与材料常数的关系^[14-15]:

$$\begin{cases} k = \frac{3E}{4\pi(1-2\nu)} \\ r = \frac{3E(1-4\nu)}{4\pi(1+\nu)(1-2\nu)} \end{cases}, \quad (4)$$

式中, E 为材料杨氏模量, ν 为材料泊松比。

VMIB 模型与颗粒流模型(PFC)^[23-24]具有本质上的区别。PFC 模型将每个颗粒当作一个计算单元来处理, 而 VMIB 模型并不将每个质点当作一个单元来处理。VMIB 模型是通过 Cauchy-Born 规则^[17-20]将每个质点的在变形构形中的位置与变形梯度建立了联系。在实际计算过程中, VMIB 模型并不考虑每一个质点的运动情况。

2 键密度演化方程

文献[14, 16]分别从键的刚度和密度演化的角度分析了拉伸裂纹的生成及扩展机理。与受拉破坏相比, 材料的受压破坏机制要复杂的多。脆性材料的受压破坏主要表现为剪切破坏。如图 2 所示, 当材料受单轴压时, 沿着剪应力最大的方向, 将出现剪切带, 随着压力的进一步增加, 将出现剪切裂纹, 剪切裂纹随着压力的增加将进一步演化, 最后直至材料宣告破坏。

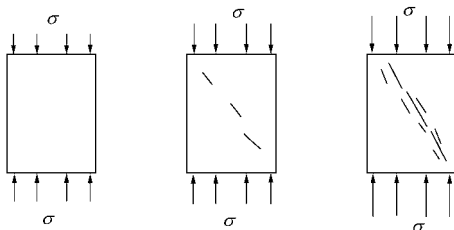


图 2 脆性材料受压破坏示意图

Fig. 2 Compressive failure of brittle material

在材料压缩破坏过程中, 局部剪切破坏将导致局部刚度的降低。这种由剪切破坏所导致的宏观上局部

刚度降低可以看作是由剪切变形导致的微观上连结键密度减少的结果。从 VMIB 模型的观点来看, 法向键的转角 $\beta = \xi_i \varepsilon_{ij} \eta_j$ 是方向 ξ 上剪切变形大小的衡量标准, 在该方向上连结键的分布密度与法向键的转角有关。如图 3 所示, 由于在垂直于 ξ 方向上一些微裂纹的形成, 在这个方向上的法向键密度将要降低, 键密度的降低将导致该方向上的刚度降低。法向键的转角越大, 键的密度衰减程度就越大, 方向 ξ 上的键的密度将由该方向上的法向键的转角控制。

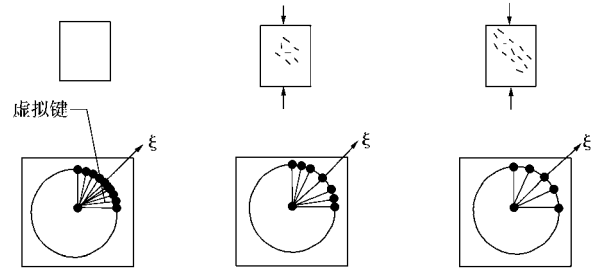


图 3 局部剪切破坏与键密度降低示意图

Fig. 3 Local shear failure and bond density reduction

然而, 受压破坏包含剪切破坏的同时还包含有屈服破坏。当某一方向 ξ 上压缩变形超过某一值时, 亦即当 $\lambda = \xi_i \varepsilon_{ij} \xi_j$ 大于某一值时, 局部材料将会受压屈服。完全受压屈服材料的承载力将急剧下降。从 VMIB 模型的观点来看, 宏观上材料抗力的急剧下降是微观上连结键密度急剧衰减的结果, 但是这个连结键密度的衰减是法向键压缩变形引起的。

根据以上的分析, 为了定量地描述连结键密度随着压缩变形而衰减的规律, 本文提出了如下的连结键密度演化方程:

$$\begin{cases} D_L(\theta, \phi) = \exp\left[-c_1 \left(\frac{2\beta}{(1+\nu)\varepsilon_c}\right)^{n_{c1}}\right] \exp\left[-c_2 \left(\frac{-1}{\varepsilon_c}\right)^{n_{c2}}\right] \\ D_R(\theta, \phi) = \exp\left[-c_1 \left(\frac{2\beta}{(1+\nu)\varepsilon_c}\right)^{n_{c1}}\right] \end{cases}. \quad (5)$$

式中 $\beta = \max\{\beta_1, \beta_2, \beta_3\}$, $\beta_i = |\xi_m \varepsilon_{mn} \eta_n^i|$; ε_c 为相应于单轴压缩应变强度; $\lambda = \xi_i \varepsilon_{ij} \xi_j$; ν 为材料的泊松比; c_1, c_2, n_{c1}, n_{c2} 为模型参数, 它们是调节全过程曲线特征参数, 材料不同, 相应的参数也不同, 具体由试验确定。

注意到式(5)中的法向键密度是由两部分乘积组成。前一部分是与法向键的转角有关, 这一部分主要体现的是剪切破坏对材料刚度衰减的影响; 后一部分是与法向键的压缩量有关, 这一部分主要体现材料受压屈服效应。对于切向键的密度演化主要由相应的法向键转角控制。由式(2)(3)(5)可得出完整的

脆性材料单轴抗压失效本构模型。

3 模型参数对全过程曲线特征的影响

在连结键密度演化方程式 (5) 中, 一共有 4 个参数需要确定, 即: c_1 , c_2 , n_{c1} , n_{c2} 。这 4 个参数决定着材料全过程压缩曲线的特征, 它们所起到的作用不同, 如图 4 所示。

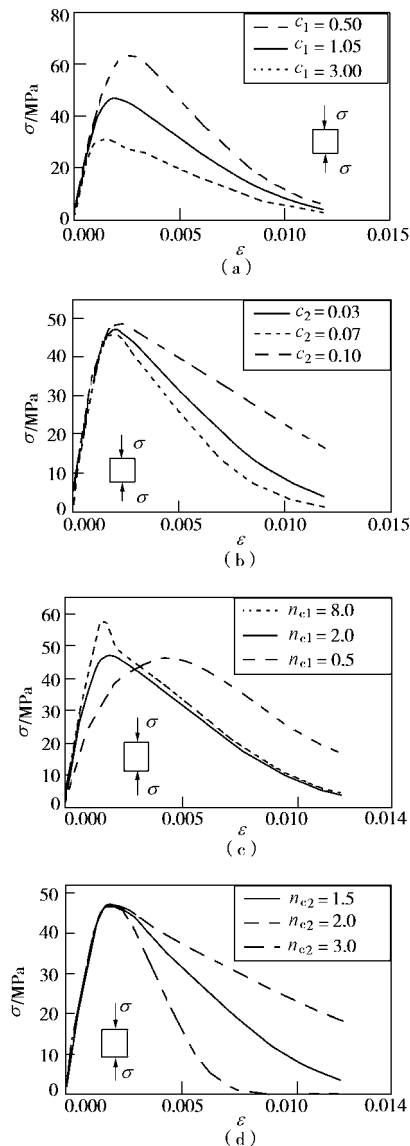


图 4 模型参数对全过程压缩曲线的影响

Fig. 4 Effect of model parameters on the complete curve of uniaxial compression test

从图 4 (a) 可看出, c_1 决定着材料的单轴抗压强度。 c_1 越大, 相应的材料抗压强度越低。这是因为根据式 (5), c_1 越大, 键密度衰减的越快, 相应地材料破坏的就越快, 所以强度就越低。

c_2 决定着材料的峰后力学特征。如图 4 (b) 所示, 在 c_2 从 0.03 变化到 0.10 过程中, 相应的应力峰值几乎没有变化, 相反, 材料的峰后强度却是衰减的

越来越快。 c_2 越大, 曲线在峰后变得越陡。

n_{c1} 对全过程曲线的影响如图 4 (c) 所示。从图中可看出, n_{c1} 越大, 曲线的外形就越“瘦”。这是因为 n_{c1} 越大, 根据式 (5), 在变形达到临界值之前, 键密度衰减的越慢, 而在超过临界值之后, 键密度衰减的越快。因此, 全过程曲线随着 n_{c1} 的增大, 而变得愈来愈“瘦”。

n_{c2} 对全过程曲线的影响如图 4 (d) 所示。从该图中可看出, n_{c2} 越大, 峰后强度衰减的越快, 而对峰前的力学特征影响甚微。这是因为根据式 (5), n_{c2} 越大, 当法向键应变值超过临界值之后, 键密度衰减的就越快, 因此, 峰后强度衰减的越快。

在实际工程中, 对于脆性较强材料, 当应变达到临界值之前, 没有明显的刚度衰减的现象, 而当应变超过一临界值后, 强度则突然下降, 直至破坏, 所对应的全过程曲线在峰后的阶段就变得越陡。对于这种材料, 在用本模型进行模拟时, n_{c1} 、 n_{c2} 的取值都应该大一些。而对于延性较强的材料, 在应变达到一临界值之前, 具有明显的刚度衰减现象, 而当应变超过该临界值之后, 峰后强度的衰减也不具有突然性, 相应的全过程曲线在峰后的阶段就变得越缓。对于这种材料, 应用本模型时, n_{c1} 、 n_{c2} 的取值都应该小一些。

从以上分析, 可看出不同的参数影响着全过程曲线的不同方面的特征。在实际应用本模型时, 可根据具体的试验全过程曲线来确定模型参数。

4 试验验证

为了验证 VMIB 模型对脆性材料的适用性, 将本模型用于模拟岩石的单轴试验。岩质为大理岩。试验是在 RMT-150B 试验机上进行的, 试验数据来自文献 [25]。数值模拟参数如表 1 所示, 模拟结果如图 5 所示。从图 5 可看出, 较其它两组试验, Mar-2 组试件的破坏更具有突然性, 如图 5 (b) 所示, 所以 n_{c2} 的取值比其它两组试件的取值要大一些, 如表 1 所示。从总体上来看, 数值模拟的结果与试验的结果基本一致, 这说明本文所提出模型是有效的。

表 1 岩石单轴试验模拟的参数

Table 1 Parameters for uniaxial test of rock

试样编号	E /GPa	ν	ϵ_c /($\times 10^{-3}$)	c_1	c_2	n_{c1}	n_{c2}
Mar-1	30.0	0.16	3.7	0.3	0.067	8.0	10.0
Mar-2	30.0	0.16	3.7	0.3	0.09	6.0	18.0
Mar-3	28.0	0.16	3.7	0.3	0.14	6.0	12.0

注: E 为杨氏模量; ν 为泊松比; ϵ_c 为应变强度。

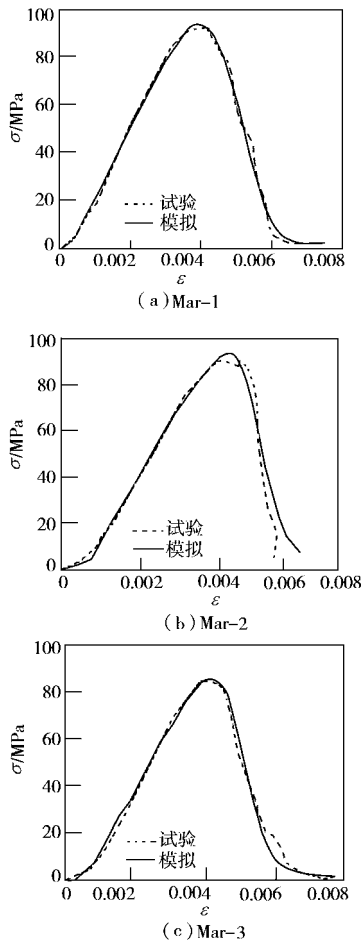


图5 大理岩单轴试验^[25]与数值模拟结果的对比

Fig. 5 Comparison between the experimental^[25] and the predicted results

5 结 语

本文将 VMIB 模型用于岩石类材料的单轴受压破坏分析,认为岩石类材料宏观上受压破坏是微观上连结键密度随着局部变形演化的结果。通过对连结键密度演化过程的分析,唯象地提出了连结键密度演化方程,并导出了材料的破坏本构方程。通过调节连结键密度演化方程中的参数,使得 VMIB 模型能够再现不同岩石类材料的单轴压缩破坏的整个过程。最后通过模拟岩石单轴抗压试验,得出本文所提出的模型是有效的。

参考文献:

[1] HRENNIKOFF A. Solution of problems of elasticity by the framework method[J]. Journal of Applied Mechanics, 1941, 169–175.
 [2] SRIDHAR N, YANG W, SROLOVITZ D J. Microstructure mechanics-model of nisotropic-thermal-expansion-induced microcracking[J]. Journal of the American Ceramic Society,

1994, 5: 1123–1138.

- [3] VAN MIER J G M, VERVUURT A, SCHLANGEN E. Boundary and size effects in uniaxial tensile tests: a numerical and experimental study[M]// Fracture and Damage in Quasibrittle Structures. 1994: 289.
 [4] 邢纪波, 俞良群, 王泳嘉. 三维梁-颗粒模型与岩石材料细观力学行为模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(6): 627–630. (XING J B, YU L Q, WANG Y J. 3-D beam-particle model for simulating meso-mechaical behavior of rock material[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(6): 627–630.)
 [5] CHANG C S, WANG T K, SLUYS L J, VAN MIER J G M. Fracture modelling using a micro-structural mechanics approach: I Theory and Formulation. [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2002, 69(17): 1941–1958.
 [6] CHANG C S, WANG T K, SLUYS L J, Van Mier J G M. Fracture modelling using a micro-structural mechanics approach-II. Finite element analysis[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2002, 69(17): 1959–1976.
 [7] KAWAI T, KAWABATA K Y, KONDOU I, KUMAGAI K. A new discrete model for analysis of solid mechanics problems[C]// Proceedings of the 1st Conference on Numerical Methods and Fracture Mechanics, Swansea, 1978.
 [8] MORIKAWA H, SAWAMOTO Y. Local fracture analysis of a reinforced concrete slab by the discrete element method[C]// Proceedings of the 2nd International Conference on the Discrete Element Method, MIT, 1993.
 [9] GRIFFITHS D V, MUSTOE G G W. Modeling of elastic continua using a grillage of structural elements based on discrete element concepts[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2001, 50(7): 1759–1775.
 [10] GAO H J, KLEIN P. Numerical simulation of crack growth in an isotropic solid with randomized internal cohesive bond[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1998, 46(2): 187–218.
 [11] KLEIN P, GAO H. Crack nucleation and growth as strain localization in a virtual-bond continuum[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1998, 61(1): 21–48.
 [12] GANESH T, MISRA A. Fracture simulation for anisotropic materials using a virtual internal bond model[J]. International Journal of Solids and Structures, 2004, 41(11-12): 2919–2938.
 [13] GANESH T, HSIA K J, HUANG Y G. Finite element implementation of virtual internal spring model for

- simulating crack behavior[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2004, **71**(3): 401 – 423.
- [14] ZHANG Z N, GE X R. Micromechanical consideration of tensile crack behavior based on virtual internal bond in contrast to cohesive stress[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2005, **43**(3): 342 – 359.
- [15] 张振南. 虚拟多维内连结键模型 (VMIB) 及其在脆性材料和纤维复合材料破坏中的应用[D]. 上海: 上海交通大学, 2005. (ZHANG Z N. Virtual Multi-dimensional Internal Bond Model (VMIB) and its application to the failure of brittle material and fibre-reinforced composite[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2005.)
- [16] ZHANG Z N, GE X R. A new quasi-continuum constitutive model for crack growth in an isotropic solid[J]. European Journal of Mechanics - A/Solids, 2005, **24**(2): 243 – 252.
- [17] MILSTEIN F. Review: Theoretical elastic behavior at large strains[J]. J Mat Sci, 1980, **15**: 1071 – 1084.
- [18] MILSTEIN F. Crystal elasticity[M]. Oxford: Pergamon Press, 1982.
- [19] ERICKSEN J L. Phase transformations and material instabilities in solids[M]. New York: Academic Press, 1984.
- [20] TADMOR E B, ORTIZ M, PHILLIPS R. Quasicontinuum analysis of defects in solids[J]. Phil Mag A, 1996, **73**(6): 1529 – 1593.
- [21] MARSDEN J E, HUGHES T J R. Mathematical foundations of elasticity[C]// Prentice-Hall, Englewood Cliffs. New Jersey, 1983.
- [22] OGDEN R W. Non-linear elastic deformations[M]. New York: John Wiley and Sons, 1984.
- [23] 周健, 池永, 池毓蔚, 徐建平. 颗粒流方法及 PFC2D 程序[J]. 岩土力学, 2000, **21**(3): 271 – 274. (ZHOU J, CHI Y, CHI Y W, XU J P. The method of particle flow and PFC2D code[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, **21**(3): 271 – 274.)
- [24] CUNDALL, P A, STRACK O D L. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. Geotechnique, 1979, **29**(1): 47 – 65.
- [25] 蒋宇. 周期荷载作用下岩石疲劳破坏及变形发展规律[D]. 上海: 上海交通大学, 2003. (JIANG Y. Fatigue failure and deformation properties of rock under cycle load[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2003.)

首届国际地下工程服务寿命专题讨论会 (第一号通知)

本会议由同济大学和代尔福特理工大学发起, 将邀请国内外知名学者和专家就相关议题作专题报告, 介绍和讨论地下工程全寿命过程相关的设计理论和最新技术, 分享卓有成效的工程经验。

主要议题:

- 地下工程的全寿命预测模型;
- 地下结构的耐久性能研究;
- 地下结构的检测技术与监控方法;
- 地下结构的维护理论及方法;
- 地下结构的安全性、适用性和耐久性设计;
- 全寿命设计和成本控制;

高性能材料及其工程应用。

主办单位为同济大学和代尔福特理工大学。

秘书处及联系方式:

联系人: 柳献, 刘涛

地址: 同济大学地下建筑与工程系, 上海市四平路 1239 号 123 信箱

邮编: 200092, 电话: +86-21-65980234, 传真: +86-21-65984573

Email: xian.liu@tongji.edu.cn, liutao.tongji@gmail.com

Website: <http://geo-structure.tongji.edu.cn>

(同济大学地下建筑与工程系 供稿)