

文章编号: 1000-7598(2009)11-3523-05

节理岩体冲击破坏的数值流形方法模拟

刘红岩, 王贵和

(中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083)

摘要: 节理的存在是岩体明显区别于岩石的一个重要特征,也是导致岩体具有非均质性及各向异性的一个重要因素。节理岩体在爆炸冲击荷载作用下的破坏特征不仅是岩体力学研究的一个热点问题,也是岩石爆破领域经常遇到的一个工程问题。目前,常用的有限元和离散元等数值方法都不能很客观地反映岩体中节理分布的实际规律,而最新出现的数值流形方法则完全能够按照岩体中节理的实际分布规律进行建模,并能够很好地模拟岩体在外力作用下新裂纹的产生及已有节理的开裂。对3种不同节理岩体,即无节理岩体、均布水平节理岩体、均布垂直节理岩体等在均布垂直于圆周方向上的冲击荷载作用下的破坏过程进行了模拟。由模拟结果可以明显看出,节理的存在对岩体的破坏型式起到了关键性的控制作用。对于完整岩体,其破坏型式呈现出了很好的对称性;而对于水平及垂直节理岩体,其破坏型式在很大程度上受到节理分布的控制。研究结果对岩石爆破工程设计具有一定的指导意义。

关键词: 非均质节理岩体; 冲击破坏; 水平节理; 垂直节理; 数值流形方法

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Simulation of impact failure of jointed rock mass by numerical manifold method

LIU Hong-yan, WANG Gui-he

(School of Engineering & Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: The existence of the joints is an important characteristic of rock mass distinctly different from rock, and it is also an important factor leading to the heterogeneity and anisotropy of rock mass. The failure characteristic of jointed rock mass under blast impact load is not only a hot subject in study of rock mass mechanics, but also an engineering problem in rock blasting, while such models as those created by finite element method and discrete element method cannot objectively reflect the actual distribution law of joints in rock mass. However, the new kind of numerical method—numerical manifold method can create the calculation model completely according to the actual distribution law of the joints in rock mass, and can perfectly simulate the occurrence of the new cracks and opening of the existed joints in the rock mass under the action of external load. By corresponding program of numerical manifold method, the failure process of the rock mass with such three kinds of joints as horizontal joints, vertical joints and no joints under the impact load perpendicular to the circumference is simulated. From the simulation result, it can be evidently seen that the existence of the joints plays a vital role on failure form of rock mass. The failure form of the intact rock mass has good symmetry, while to horizontal jointed and vertical jointed rock mass, their failure forms are controlled by the distribution of the joints to large extent. The study result is of certain meaning in rock blasting engineering design.

Key words: heterogeneous jointed rock mass; impact failure; horizontal joint; vertical joint; numerical manifold method

1 引言

目前,岩土工程中常用的数值方法从大的方面来说主要分为两类,即连续型数值方法和离散型数值方法。前者主要包括有限元和边界元等,它们所分析的介质为连续介质;而后者主要包括离散元和

非连续变形分析,它们所分析的介质均为离散介质。而实际工程中的岩体,既不是完全连续的介质,也不是完全的非连续介质,且岩体在荷载作用下既可能发生连续性变形,也可能发生非连续性破坏,因此,这两类数值方法都不能很好地模拟实际岩体的真实破坏过程。基于这一现状,美籍华人石根华博

收稿日期: 2007-11-27

基金项目: 中国博士后科学基金资助 (No. 20060400498)。

第一作者简介: 刘红岩,男,1975年生,博士,副教授,主要岩土工程、地质工程方面研究与教学工作。E-mail: lhyan1204@126.com

士于 20 世纪 90 年代初继提出不连续变形分析方法 (DDA) 之后, 又提出了一种新的数值分析方法——数值流形方法 (NMM) [1]。虽然该方法提出的时间较晚, 但由于其具有的特殊优越性, 所以一开始就吸引了很多人的注意力。到目前为止, 该方法已在岩土工程分析中得到了较为广泛的应用 [2-8]。然而, 由于该数值方法提出的时间比较短, 其应用范围相对来说还比较狭窄, 不像有限元在解决实际问题中应用的那么普遍。但由于其在计算的过程中采用的是两套网格——物理网格和数学网格, 因此, 很容易考虑结构中已有的裂纹及材料变形过程中新产生的裂纹, 因而也在这类问题中得到了广泛的应用 [4-6]。同时, 该方法也是吸收了有限元和 DDA 的优点而发展起来的一种数值分析方法, 尤其是对材料破坏后块体运动的模拟方面, 完全吸收了 DDA 中关于块体运动的理论, 能够很好地模拟块体破坏后的飞散过程, 这一重大进展对以连续介质为基础的有限元法来说是一个重大的突破, 克服了在利用有限元法计算时仅能给出待分析域内应力分布, 而不能模拟其破碎及破碎后块体运动等现象的不足。目前, 已有不少学者采用该方法对完整岩体在荷载作用下的破坏行为进行了模拟研究, 但还很少看到有文献通过数值方法讨论岩体中的节理、裂隙对岩体破坏模式的影响。本文拟采用数值流形方法, 深入探讨节理对岩体破坏模式的影响规律。

2 裂纹的产生、扩展判据及对接触问题的处理

2.1 裂纹产生及扩展判据

在外力作用下, 材料的破坏过程一方面是由于材料内部已存在的裂纹被激活扩展, 而另一方面就是在外载作用下材料内部的应力超过了材料的抗拉或抗剪强度而导致材料被拉断或剪坏而产生新的裂纹。由于岩石的抗压强度远远大于其抗拉和抗剪强度, 因此其破坏的主要型式为拉伸破坏和剪切破坏。

对于新裂纹的起裂, 一般考虑采用以应力为判据, 采用摩尔-库仑准则作为裂纹起裂的判据, 其判断方法为 [2]: ①当第 1 主应力大于材料的抗拉强度时, 材料被拉伸破坏, 产生新裂纹; ②当某点的最大剪应力大于材料的抗剪强度时, 材料被剪切破坏, 产生新裂纹。若用 σ_1 、 σ_3 分别表示第 1 和第 3 主应力, 则以上判断标准可以表示如下:

拉伸破坏时, σ_1 为

$$\sigma_1 = T_0 \quad (1)$$

当出现以下两种情况时材料出现剪切破坏, 则有:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} &= c, \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} > 0, 0 < \sigma_1 < T_0 \\ \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} &= c \cos \varphi - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \sin \varphi, \\ \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} &< 0, 0 < \sigma_1 < T_0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: T_0 为材料抗拉强度; c 凝聚力; φ 为摩擦角。

而对于已有裂纹的扩展, 则应遵循断裂力学应力强度因子准则, 即当应力强度因子达到断裂韧性时, 裂纹开始扩展。判断裂纹是否扩展的第 1 步是计算裂纹尖端的应力强度因子。首先, 根据二阶流形元求出位移场, 进一步用带有裂纹尖端奇异解的奇异边界元法求解应力强度因子 [2]; 然后, 根据最大周向应力准则判断裂纹是否扩展及扩展方向。裂纹的扩展方向及扩展判据分别满足方程以下两式:

$$K_I \sin \theta + K_{II} (3 \cos \theta - 1) = 0 \quad (3)$$

$$\cos \frac{\theta}{2} \left(K_I \cos^2 \frac{\theta}{2} - \frac{3}{2} K_{II} \sin \theta \right) = K_{IC} \quad (4)$$

2.2 大变形及接触问题的处理

在外力作用下, 岩体内的已有裂纹和新生裂纹将最终把岩体切割成相应的块体, 这些块体在自重或其他外力作用下产生运动。在块体运动过程中, 不同块体之间将会产生接触, 如何更好地模拟块体之间的接触是数值模拟研究的一个重点, 更是一个难点。利用数值方法来对块体的运动模拟中, 一定要保证任意两个块体之间无嵌入、无拉伸。数值流形方法在这方面完全借鉴了 DDA 中块体运动学的理论, 即在块体运动过程中, 保证任意两个块体之间无嵌入、无拉伸。而这一过程是通过反复地开一合迭代, 即在可能的接触边界之间通过施加和移去弹簧来实现。在边界处块体之间有张开、锁定和滑动 3 种状态。当边界从张开展发展到锁定时加切向和法向弹簧, 当边界从滑动到锁定时加切向弹簧, 当边界之间滑动时在边界两侧加摩擦力, 从而对刚度矩阵作出修正, 并计算接触力叠加于本次计算的平衡力列阵中, 参加下次迭代计算。

3 节理岩石冲击破坏模拟分析

3.1 冲击荷载简化

为了能够和实际情况进行对比分析, 在本算例中, 取爆炸载荷作为施加的冲击载荷。相应的实际

问题是对应于二维平面问题的圆形装药在有限域内爆炸后形成爆破漏斗的过程进行模拟。

由于实际的爆破过程十分复杂, 因此, 在满足工程要求的条件下可以对岩石爆破破坏的过程进行简化处理, 通过在炮孔内壁上施加均布的冲击三角波载荷来模拟爆炸荷载, 冲击载荷的升压时间为 80 ms, 降压时间为 220 ms, 整个荷载作用时间为 300 ms, 载荷的最大峰值压力为 5 GPa。

3.2 计算模型及计算结果分析

本文中所建立的计算模型是二维分析域内的圆形装药在有限域岩体内爆炸后形成爆破漏斗的过程。取计算模型长×宽为 4 m×1.5 m, 圆形直径为 0.5 m。假定岩石为各向同性均质, 考虑 3 种节理分布形式: 水平等间距节理、垂直等间距节理和无节理, 节理间距均为 0.2 m。其中模型的上边界为自由边界, 其余 3 个边界均为固定边界, 示意图如图 1 所示。

在本算例中所分析问题的类型为动态分析, 因此, 所采用的材料计算参数均应为动态参数, 取大

理岩的参数作为本算例中的岩石参数: 动弹性模量为 80 GPa, 动泊松比为 0.20, 密度为 2.4 g/cm^3 , 动态断裂韧性为 $0.5 \text{ MN/m}^{3/2}$, 岩石内摩擦角、凝聚力与动抗拉强度分别为 45° 、10 MPa 和 30 MPa, 取节理面的摩擦角、凝聚力和动抗拉强度值与岩石的相同。

根据以上参数, 对于初始状态完整的岩体在冲击载荷作用下进行破坏过程进行模拟, 取计算过程中的 4 个瞬时状态如图 2 所示。

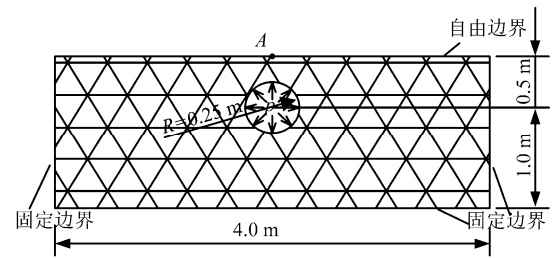


图 1 冲击荷载作用下节理岩体示意图

Fig.1 The schematic diagram of jointed rock mass under impact load

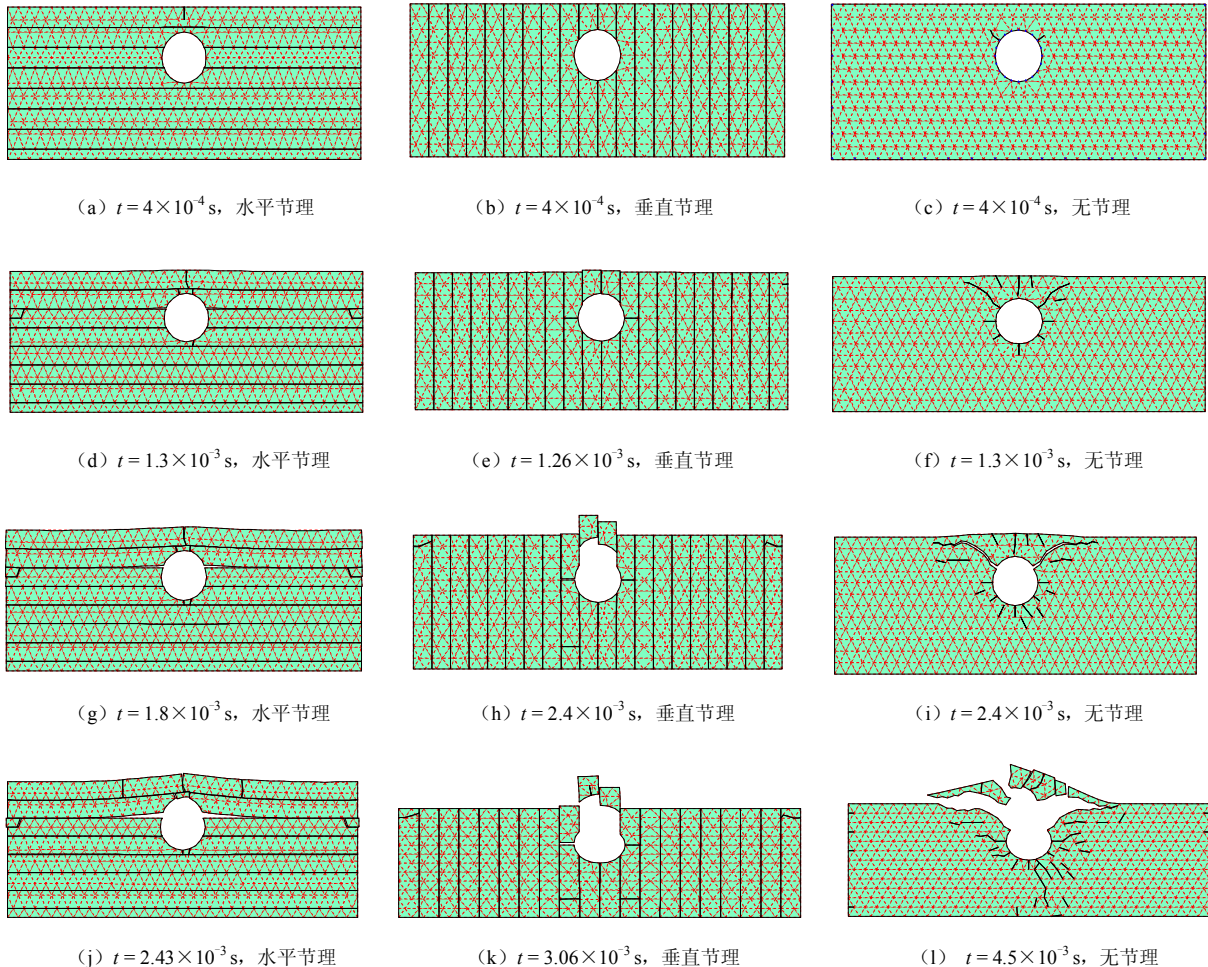


图 2 3 种不同节理岩体在冲击荷载作用下的破坏型式

Fig.2 Failure style of three kinds of jointed rock masses under impact load

从上面的模拟结果可以明显看出,节理的存在对岩体破坏模式的影响:

(1) 从初始新裂纹的产生上来看,对于无节理岩体,裂纹首先由炮孔中心向外扩展;而对于水平节理岩体,岩体首先在上部的自由表面处出现垂直裂纹;对于垂直节理岩体,则在同一时刻没有新裂纹出现。这主要是由于新裂纹的出现是材料发生剪切或拉伸破坏的结果。在无节理的岩体中,岩体首先在炮孔中心发生剪切破坏;而在有节理的岩体中,应力波能量将很容易沿着已有节理弱面传播而消耗掉。由于岩体的抗拉强度很低,应力波在遇到自由面后产生的反射拉伸波很容易造成岩体中新裂纹的出现,因此,在水平节理岩体中自由面处会出现垂直节理。而由于垂直节理岩体本身已存在垂直节理,所以也就不会有垂直节理岩体产生,而只能是原有节理被拉开。

(2) 从岩体边界处的破坏情况来看,在 $t = 1.3 \times 10^{-3} \text{ s}$ 时,水平节理岩体已经在岩体的边界处产生了新的裂纹,出现了新的破坏;而在同一时刻,垂直节理岩体和无节理岩体在边界处均有新的破坏产生。这个现象很好地说明了节理的存在对应力波传播的影响。如果应力波的传播方向与节理的方向一致,则应力波很容易沿着已有的节理传播;而如果二者的方向垂直,则节理将起到阻碍应力波传播的作用。

(3) 从爆破口的形状和大小上来看,对于水平节理岩体,由于应力波在向自由面传播过程中,其传播方向与节理面方向相垂直,因而很容易形成沿节理面的层状破坏。对于本算例而言,在自由面处仅能看到表面隆起,而未能形成爆破漏斗;而对于垂直节理岩体,由于炮孔的存在,它和节理已经把炮孔上方的岩体切割成了很小的岩石块体了,其破坏基本上就是沿着已有的节理,产生的岩石块体也基本上是被已有节理切割而成的块体,因而其爆破口的形状呈“U”形,而其在平面内的面积(本文考虑为平面问题),则与垂直节理的密度及炮孔直接有密切关系。经计算,在本算例中约为 0.12 m^2 。但对于完整岩体,其块体的形成则是完全随机的,符合材料的相应破坏准则,而且其破坏后的形状也很符合岩石爆破漏斗的形状,即呈“V”形。经计算,其爆破口的面积约为 0.3 m^2 ,远大于其他两种情况,这充分说明节理的不同分布形式对爆破口的大小是有很大影响的。

(4) 为了研究在不同节理分布情况下,爆破后块体的飞散速度,取炮孔正上方一点 A (如图 1 所

示)进行分析,由于速度是单位时间内的位移,而算例中 3 种不同情况下的计算时间不同,为更直观地反映情况,这里就取 3 种情况下的位移进行比较。同时又由于 A 点在运动过程中既有水平位移,又有垂直位移,在此仅讨论垂直位移的变化,因为在该算例中垂直位移是主要的。3 种情况下的垂直位移随时间的变化规律如图 3 所示(位移以向上为正)。由图可以看出:在初始阶段,3 种情况下 A 点的垂直位移基本相等且都很小。而随着时间的推移,在相等的时间内,3 种情况下的位移也逐渐有所不同,其中垂直节理条件下最大,水平节理次之,无节理最小。这主要是由于冲击荷载也是随时间变化的,在初始阶段其值较小,还不能引起岩体的破坏,因而岩体的变形也主要是弹性变形,3 种情况下的变形基本相等。而随着时间的推移,当冲击荷载达到一定强度时,岩体将发生破坏,由于水平节理和垂直节理岩体含有初始缺陷,所以更容易发生破坏,因而 A 点的位移比相应的完整岩体要大,且垂直节理岩体中节理的方向与 A 点所在块体受到的冲击荷载作用方向相同,更容易产生较大的位移。

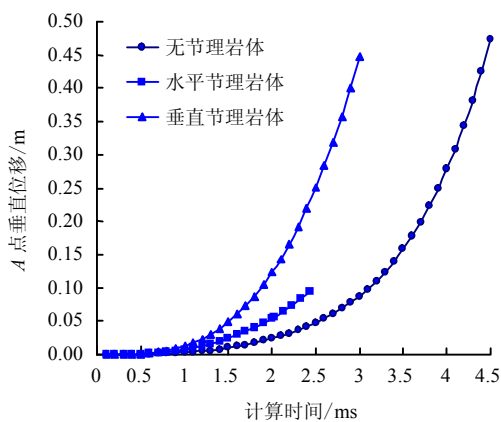


图 3 3 种节理岩体中 A 点的垂直位移
Fig.3 Vertical displacements of point A in three kinds of jointed rock masses

(5) 从裂纹的发展情况来看,裂纹的发展存在着明显的分岔现象,即裂纹并不是沿着最初出现的裂纹一直向前发展,而是在发展过程中会偏离原来的路径而分为两条或多条分支裂纹,甚至在原裂纹没有到达的地方出现了新的小裂纹,这是裂纹动态扩展中一个最常见的现象之一,这一现象在 3 种节理岩体中均有出现。在岩石爆破过程中,应该充分利用裂纹的分岔现象使岩石得以很好地破碎。

(6) 从破碎后块体的运动来看,数值流形方法对该问题的处理完全采用了 DDA 在模拟块体运动和接触中的优点,即块体在运动过程中保证任意两

个块体之间不能出现嵌入和拉伸现象。

最后应说明的是, 从边界上的破坏来看, 3 种节理岩体在固定边界处均产生了一定数量的裂纹, 这是由于应力波是在自由面处反射后产生破坏的。从理论上来说, 对于这种情况的模拟应该在 3 个固定边界处采用无反射边界以模拟无限岩体, 但由于该程序在边界的处理上还不像有限元那么完善, 所以出现了上述的模拟结果, 这也是该软件以后需要改进的一个重要方面。

4 结 语

采用不仅能够充分考虑岩体中原有节理, 而且还能够考虑新裂纹的产生及扩展的数值方法——数值流形方法, 对岩体爆破破坏模式进行了研究, 讨论了不同节理分布对岩体破坏模式的影响规律, 从模拟结果中可以明显地看出: 岩体很容易沿着已有节理面产生破坏, 节理的存在及其分布规律对岩体中冲击荷载的传播途径、岩体的破坏模式及破坏后形成的块体形状等都有着十分重要的影响。在进行岩石爆破等工程活动时, 必须考虑炸药等荷载源的布置与岩体中节理位置的相互关系, 这样才能取得更好的破碎效果。

参 考 文 献

- [1] SHI GENHUA. Manifold method of material analysis[C]//Transactions of the Ninth Army Conference on Applied Mathematics and Computing. Minneapolis: Minncsoda, 1992: 51—76.
- [2] GUOXIN ZHANG, YASUHIITO SUGIURA, HIROO HASEGAWA, et al. The second order manifold method with six-node triangle mesh[J]. **Structural Engineering /Earthquake Engineering, JSCE**, 2002, 19(1): 1—9.
- [3] LIU HONGYAN, QIN SIQING, LI HOUEN, et al. Simulation of rock impact failure by numerical manifold method[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 29(4): 587—593.
- [4] YAWJENG CHIOU, YUMIN LEE, RENJOW TSAY. Mixed mode fracture propagation by manifold Method[J]. **International Journal of Fracture**, 2002, 114: 327—347.
- [5] KENJIRO TERADA, MITSUTERU ASAI, MICHIIHIRO YAMAGISHI. Finite cover method for linear and nonlinear analyses of heterogeneous solids[J]. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, 2003, 58(9): 1321—1346.
- [6] ADDABEDIA M. Brittle fracture dynamics with arbitrary paths II: dynamics crack branching under general antiplane loading[J]. **Journal of the Mechanics and Physics of Solids**, 2004; (52): 1407—1420.
- [7] JEENSHANG LIN, CHENGYU KU. Two-scale modeling of jointed rock masses[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2006, 43: 426—436.
- [8] 朱爱军, 邓安福, 曾祥勇. 数值流形方法对岩土工程开挖卸荷问题的模拟[J]. **岩土力学**, 2006, 27(2): 179—183.
- ZHU Ai-jun, DENG An-fu, ZENG Xiang-yong. Numerical manifold method for simulation of excavation unloading in geotechnical engineering[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(2): 179—183.
- [2] 杨林德, 丁文其. 渗水高压引水隧道衬砌的设计研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 1997, 16(2): 112—117.
- YANG Lin-de, DING Wen-qi. A study on the design of permeable R. C. lining in high pressure water carriage tunnel[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1997, 16(2): 112—117.
- [3] 张玉卓, 张金才. 裂隙岩体渗流与应力耦合的试验研究[J]. **岩土力学**, 1997, 18(4): 59—62.
- [4] 陈晓平, 茜平一, 梁志松, 等. 非均质土坝稳定性的渗流场和应力场耦合分析[J]. **岩土力学**, 2004, 25(6): 860—864.
- CHEN Xiao-ping, QIAN Ping-yi, LIANG Zhi, et al. Coupling analysis of heterogeneous earth dam stability of seepage field and stress field[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(6): 860—864.
- [5] 王媛, 速宝玉, 徐志英. 等效连续裂隙岩体渗流与应力全耦合分析[J]. **河海大学学报(自然科学版)**, 1998, 26(2): 26—30.
- WANG Yuan, SU Bao-yu, XU Zhi-ying. Coupling analysis of seepage and stress in multi-fractured rock masses[J]. **Journal of Hohai University(Natural Science)**, 1998, 26(2): 26—30.
- [6] 张有天. 岩石水力学与工程[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
- [7] 朱以文, 蔡元奇, 徐晗. ABAQUS 与岩土工程分析[M]. 香港: 中国图书出版社, 2005.
- [8] 柴军瑞, 作彦卿. 考虑动水压力裂隙网络岩体渗流应力耦合分析[J]. **岩土力学**, 2001, 22(4): 459—462.
- CHAI Jun-rui, WU Yan-qing. Mathematical model for coupled seepage and stress fields in rock mass of fracture network by considering hydrodynamic pressure[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2001, 22(4): 459—462.

上接第 3522 页