

断续节理扩展算法在隧道围岩稳定分析中的应用

王华牢^{1, 2}, 许崇帮^{1, 3}, 夏才初³

(1. 交通运输部公路科学研究院, 北京 100088; 2. 西安理工大学水利水电学院, 陕西 西安 700048;

3. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要: 利用虚节理力学性质参数弱化函数, 在 Jennings 强度准则基础上提出了应用于非连续变形分析计算的断续节理强度形式; 然后, 将虚节理力学性质参数弱化规律和断续节理强度表达式运用于非连续变形分析计算程序中, 实现了对断续节理扩展过程的模拟算法; 并通过剪切试验计算结果与室内试验结果的比较, 验证了该算法的正确性。利用该算法对节理岩体中金鸡山隧道进行了围岩稳定性分析, 分析结果客观反映了节理展布特征对隧道围岩的变形影响和节理岩体隧道围岩位移分布特征, 表明了断续节理扩展算法在隧道围岩稳定性分析方面具有良好的应用前景。

关键词: 断续节理; 隧道工程; 扩展算法; 稳定分析

中图分类号: TU457 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2012)02-0349-06

作者简介: 王华牢(1961-), 男, 陕西蒲城人, 教授级高级工程师, 主要从事隧道工程设计。E-mail: hl.wang@rioh.cn。

Application of fracturing algorithm of intermittent joints in stability of surrounding rock

WANG Hua-lao^{1, 2}, XU Chong-bang^{1, 3}, XIA Cai-chu³

(1. Research Institute of Highway of Ministry of Transport, Beijing 100088, China; 2. School of Water Resources and Hydraulic Power,

Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 3. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: According to the phenomenon of attenuation of mechanical parameters in rock failure, the strength criterion for intermittence jointed rock mass is proposed by use of the attenuation formula of virtual joint mechanical parameters based on the Jennings Criterion. The strength criterion for intermittent jointed rock mass and the attenuation formula are applied into the DDA code to complete the computation program of analyzing the initiation, extending and connecting of rock fractures, and then the validity of algorithm is verified by making comparison between the computed results and the shear test ones. At last, this algorithm is employed to analyze the stability of surrounding rock of Jingjishan Tunnel, which is a multiple-arch tunnel with eight traffic lanes. The simulated results show the influences of joint distribution features on the surrounding deformation and give the characters of surrounding displacement. It is shown that the fracturing algorithm of intermittent jointed rock mass is capable of analyzing the stability of tunnels.

Key words: intermittent joint; tunnel engineering; fracturing algorithm; stability analysis

0 引言

岩体作为一种天然的地质体, 在其形成和演化的过程中经受各种地质作用和构造力的影响, 岩体内充满大小不一、形态各异的非连续地质界面, 如节理、裂隙、断层、褶皱及破碎带等。因此, 工程岩体一般是由块体(或岩桥)和节理面的力学性质共同决定的断续节理岩体。故在隧道围岩稳定性研究分析中, 需要着重分析岩桥的稳定、破坏状态对隧道稳定的影响。

在断续节理岩体稳定性研究中, 刘远明^[1]利用室内人工节理试验研究建立了含起裂角的节理岩体贯通破坏准则; 夏才初等^[2]利用非贯通节理直剪试验结果,

通过岩桥力学性质弱化的方式, 修正了 Jennings 强度准则; 朱维申等^[3]、梁作元等^[4]对断续节理破坏过程中节理端部力学特征进行了研究, 利用断裂力学模型得出了新的断续节理岩体强度准则; 周小平等^[5]研究了多条断续节理的贯通机理, 提出考虑应力强度因子、节理损伤和变形局部化区扩展长度的节理扩展准则。这些断续节理岩体强度准则的研究成果为断续节理岩体稳定性分析提供了依据, 但是, 这些准则还难以反

基金项目: 国家自然科学基金项目(50579088); 交通运输部公路科学研究所基金项目(2011)

收稿日期: 2010-10-26

映断续节理岩体扩展模拟过程中岩体强度逐步衰减的现象。

本文在现有非连续变形分析数值计算方法^[6-7]的基础上, 通过对虚节理强度力学性质参数在破坏过程中弱化函数的分析, 提出了适用于非连续变形分析的动态断续节理强度公式, 实现了非连续变形分析模拟断续节理变形、破坏的算法; 在此基础上, 利用非连续变形分析的强度折减法^[8]对金鸡山隧道围岩稳定性进行了研究。

1 非连续变形分析 (DDA) 基本理论

DDA中每个块体有6个自由度, 包括3个刚体运动项和3个应变项, 即 $(u_0, v_0, r_0, \varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy})^T$, 其中 u_0, v_0 分别为块体沿 x, y 方向的刚体平动位移, r_0 为绕块体形心 (x_0, y_0) 的刚体转动角, $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}$ 为点 (x_0, y_0) 处的应变状态。整个系统根据最小势能原理进行求解, 块体系统的总体方程组:

$$\bar{K}D = \bar{F} \quad . \quad (1)$$

如果该块体系统由 n 个块体组成, 则有

$$\begin{aligned} \bar{K} &= \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \cdots & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & \cdots & K_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{n1} & K_{n2} & \cdots & K_{nn} \end{bmatrix}, \\ D &= [D_1 \ D_2 \ \cdots \ D_n]^T, \\ \bar{F} &= [F_1 \ F_2 \ \cdots \ F_n]^T, \end{aligned} \quad (2)$$

式中, K_{ij} ($i, j = 1, 2, \dots, n$) 为 6×6 的子矩阵, K_{ij} 与块体*i*的材料属性有关, K_{ij} ($i \neq j$) 与块体*i*和*j*之间的相互作用情况有关, D_i 为块体*i*的位移矢量, F_i 为作用于块体*i*上的荷载矢量。

2 断续节理扩展算法

2.1 断续节理动态强度准则

断续节理由岩桥和节理两部分共同组成, 其强度亦由两者决定, 受节理连通率大小的制约。在断续节理的变形、破坏过程中, 连通率随着节理的扩展不断变化, 岩桥逐步演化为节理, 因此整个过程可看作为岩桥弱化、衰减的过程。针对断续节理扩展的这一特性, 在 Jennings 强度准则^[9]的基础上通过引入能够反映其强度变化的虚节理^[10] (即岩桥) 力学性质参数弱化函数, 建立适用于断续节理扩展计算的动态强度准则。

(1) 虚节理力学性质参数弱化公式

虚节理力学性质参数 (c_b, φ_b) 弱化函数一般表达式为

$$c_B = f(c_b, k_B, c_b, c_j), \quad (3)$$

$$\tan \varphi_B = f(\varphi_b, k_B, \varphi_j), \quad (4)$$

式中, c_B 为虚节理扩展至状态B时的黏聚力, φ_B 为虚节理扩展至状态B时的内摩擦角, k_B 为状态B时虚节理连通率, c_j 为节理面的黏聚力, φ_j 为节理面的摩擦角, c_b 为岩桥的黏聚力, φ_b 为岩桥的内摩擦角。

当虚节理力学性质参数弱化函数关系为线性关系 (见图 1) 时, 式 (3)、(4) 可变为

$$c_B = c_b - k_B(c_b - c_j), \quad (5)$$

$$\tan \varphi_B = \tan \varphi_b - k_B(\tan \varphi_b - \tan \varphi_j). \quad (6)$$

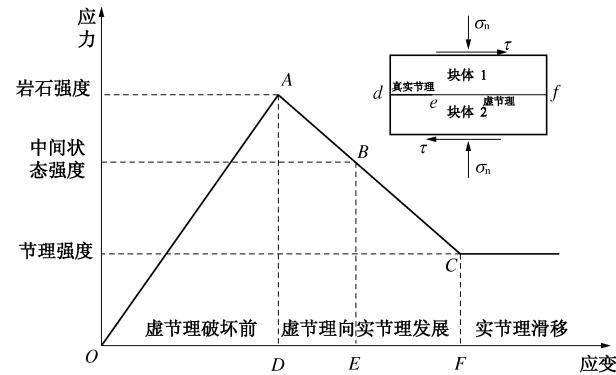


图 1 虚节理剪切曲线

Fig. 1 Shear failure model of composite joint

由式(5)、(6)可知: 虚节理尚未开裂前 ($k_B = 0$), 其力学性质参数仍为岩石强度参数 (c_b, φ_b); 而在虚节理在全部贯通后 ($k_B = 1$), 虚节理全部转化为实节理, 力学性质参数弱化为实节理强度参数 (c_j, φ_j); 在中间状态时, 虚节理力学性质参数由岩石强度参数 (c_b, φ_b)、实节理强度参数 (c_j, φ_j) 和虚节理连通率 k_B 共同决定。

(2) 断续节理扩展时的动态强度公式

a) 将式 (5)、(6) 以节理强度参数的形式代入到 Jennings 强度准则, 便得到初始节理连通率 $k_0 = 0$ 时虚节理扩展过程中状态B下虚节理的加权平均黏聚力 c 和加权平均摩擦角 φ :

$$c = c_b - k_B^2(c_b - c_j), \quad (7)$$

$$\tan \varphi = \tan \varphi_b - k_B^2(\tan \varphi_b - \tan \varphi_j). \quad (8)$$

b) 将虚节理力学性质参数弱化公式 (7)、(8) 以虚节理强度参数形式带入 Jennings 公式, 得 $k_0 \neq 0$ 时断续节理扩展过程中的加权平均抗剪强度参数:

$$c = k_0 c_j + (1 - k_0)[c_b - k_B^2(c_b - c_j)], \quad (9)$$

$$\tan \varphi = k_0 \tan \varphi_j + (1 - k_0)[\tan \varphi_b - k_B^2(\tan \varphi_b - \tan \varphi_j)]. \quad (10)$$

其中, 虚节理连通率 k_B 和断续节理初始连通率 k_0 , 断续节理即时连通率 k 三者的关系为

$$k_B = \frac{k - k_0}{1 - k_0}. \quad (11)$$

将式 (11) 代入式 (9)、(10) 得到以断续节理初始连通率、即时连通率表示的加权平均抗剪强度参

数:

$$c = k_0 c_j + (1 - k_0) \left[c_b - \left(\frac{k - k_0}{1 - k_0} \right)^2 (c_b - c_j) \right], \quad (12)$$

$$\tan \varphi = k_0 \tan \varphi_j + (1 - k_0) \left[\tan \varphi_b - \left(\frac{k - k_0}{1 - k_0} \right)^2 (\tan \varphi_b - \tan \varphi_j) \right]. \quad (13)$$

将式(12)、(13)代入 $\tau = c + \sigma_n \tan \varphi$ 便得到断续节理扩展时的动态强度。

2.2 断续节理岩体开裂算法及验证

(1) 断续节理岩体开裂算法实现

将虚节理力学性质参数的弱化函数和断续节理扩展动态强度公式编制成相应代码加入到现有的二维 DDA 源计算程序中, 形成了断续节理岩体扩展算法, 算法计算时只需给出计算所需的岩石与节理抗剪强度参数及起始连通率即可。该算法计算流程如图2所示。

(2) 断续节理剪切试验模拟

为验证断续节理扩展中动态强度公式的有效性, 对文献[1]中的断续节理剪切室内试验进行了数值模拟, 模型尺寸与节理几何参数如图3所示, 计算中岩石力学性质参数: 密度=2.1 kg/m³, 抗压强度=18.0 MPa, 抗拉强度=1.71 MPa, 弹性模量=3700 MPa, 泊松比=0.16, 黏聚力=3.63 MPa, 摩擦角=41.6°。节理面黏聚力=0.56 MPa, 摩擦角=32.3°, 抗拉强度=0.0 MPa。

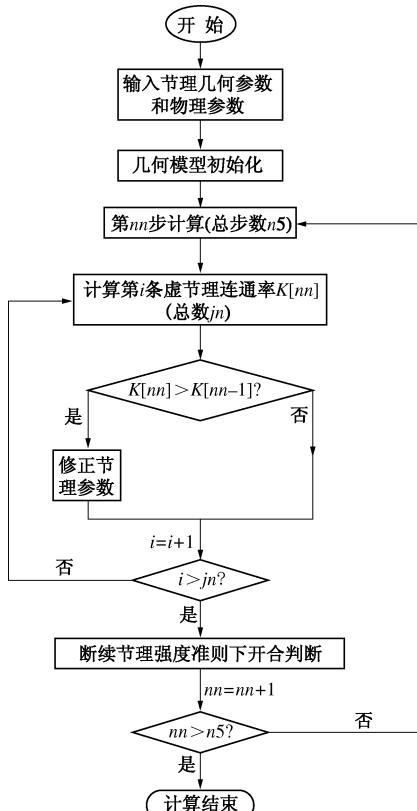


图2 计算程序流程图

Fig. 2 Flow chart of computation program

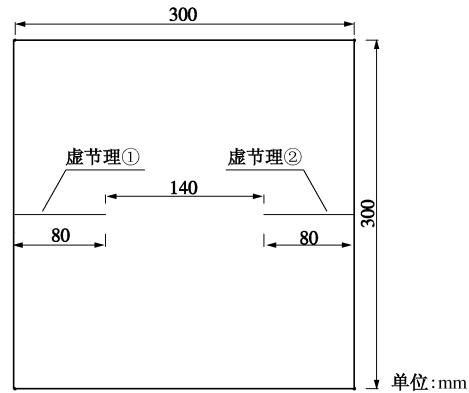


图3 断续节理试样尺寸

Fig. 3 Specimen sizes of intermittent joints

断续节理剪切试验模拟过程中先施加法向荷载至预定值后再施加切向荷载, 计算直至节理贯通、滑移破坏为止; 模拟计算法向应力分别为 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0 MPa 时的 4 种剪切试验。

断续节理剪切试验模拟计算结果与室内试验结果比较如图4所示。

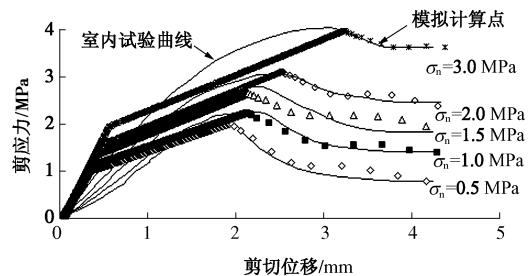


图4 数值计算结果与试验结果比较

Fig. 4 Comparison between simulated and test results

由图4可知, 虽然室内试验中节理面先闭合再扩展的现象利用断续节理扩展算法还无法模拟实现, 但是, 断续节理岩体扩展计算程序对剪切应力峰值后变形、破坏的模拟曲线与实际试验曲线十分接近, 由此可以表明考虑虚节理力学参数弱化的断续节理扩展算法能够较好地反映断续节理岩体在达到峰值强度后节理岩体的变形、破坏发展趋势, 断续节理动态强度准则基本反映了岩体在变形、破坏过程中的客观强度特征。

3 工程应用

3.1 金鸡山隧道工程简介

福州机场二期高速公路工程中金鸡山隧道位于里程 K22+235—K22+630, 全长 295 m, 隧道设计为双向八车道特大断面连拱隧道。隧道单洞静跨度为 18.2 m, 单洞标准断面内轮廓面积(含仰拱) 171.06 m², 隧道中墙采用三层复合式曲中墙, 整体开挖跨度 41.9 m, 高度 14.2 m。

隧道场址区属低山丘陵地貌，地形起伏大，隧道洞身有弱风化花岗岩、花岗斑岩及闪长玢岩脉体分布，围岩强度较高，但整体完整性较差。隧道洞身围岩以 IV 级围岩为主，洞口段为残坡积层及强风化岩分布，呈松散碎裂状，围岩级别为 V 级，其中 IV 级围岩最大埋深 46.7 m，V 级围岩最大埋深 36.0 m。

3.2 计算模型

计算模型选取金鸡山隧道埋深 30.0 m 的 K22+560 断面，掌子面节理信息如图 5。该断面围岩中主要有 $62^\circ \angle 75^\circ$ 、 $63^\circ \angle 169^\circ$ 两组节理，两组节理的平均间距分别为 1.6, 1.8 m，根据现场量测岩桥长度平均为 0.8, 0.6 m；计算模型尺寸为 120.0 m × 80.0 m（图 6），主要监测部位见图 7。隧道围岩中节理面力学参数：内摩擦角=34.0°，节理面黏聚力=160.0 kPa，节理面抗拉强度=80.0 kPa；块体围岩参数：重度=20.0 kN/m³，弹性模量=1.5 GPa，泊松比=28，内摩擦角=39.0°，黏聚力=1600.0，抗拉强度=1000.0 kPa。

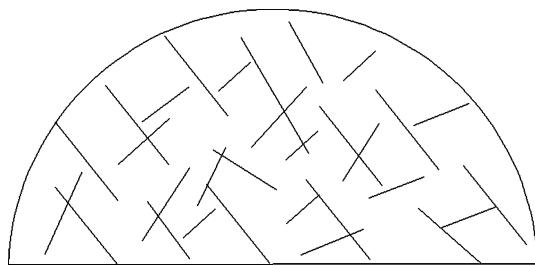


图 5 金鸡山隧道 K22+560 断面掌子面节理素描图

Fig. 5 Joints of tunnel face in K22+560

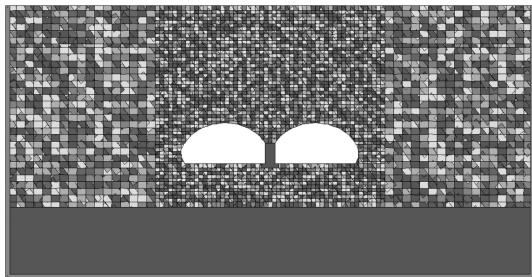


图 6 金鸡山隧道（K22+560 断面）计算模型
Fig. 6 DDA numerical simulation model (K22+560 of Jinjishan Tunnel)

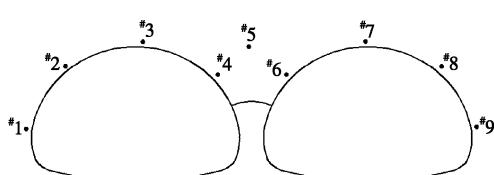


图 7 特征部位监测示意图

Fig. 7 Layout of critical points

在金鸡山隧道断续节理岩体分析模型中，隧道围

岩稳定性受节理与岩桥（或岩石）力学性质共同控制。其中岩石的力学性质为关键因素，即若节理间岩桥断裂则节理会相互贯通造成隧道围岩宏观失稳，因此，对隧道围岩稳定性的研究分析的重点是节理间岩桥（即虚节理）的稳定性。因此，在隧道稳定性分析中，采用了非连续变形分析方法的强度折减分析方法^[8]，计算折减对像为岩桥力学参数，折减系数 F 为 1.0~1.05，时间隔 0.01；折减系数 F 为 1.05~2.0，时间隔 0.05。

3.3 位移分析

断续节理岩体中金鸡山隧道各特征点在不同折减系数 F 下的水平位移和竖向位移及总位移如图 8~10 所示。

在 $62^\circ \angle 75^\circ$ 、 $63^\circ \angle 169^\circ$ ，间距 1.6, 1.8 m，岩桥长度为 0.8, 0.6 m 两组节理作用下，隧道围岩的位移有如下规律：

(1) 水平位移：左洞中监测点#1 和监测点#2 的水平位移最大，但随着折减系数 F 的增大，监测点#1 逐步大于监测点#2；右洞中监测点#8 和监测点 9 的水平位移明显大于其它右洞监测点，且监测点 8 始终稍大于监测点#9。

由此可见，对于金鸡山隧道而言，隧道围岩最大水平位移除易发生在拱腰部位外，还受节理面切割状态控制，其中节理切割的影响更为重要。

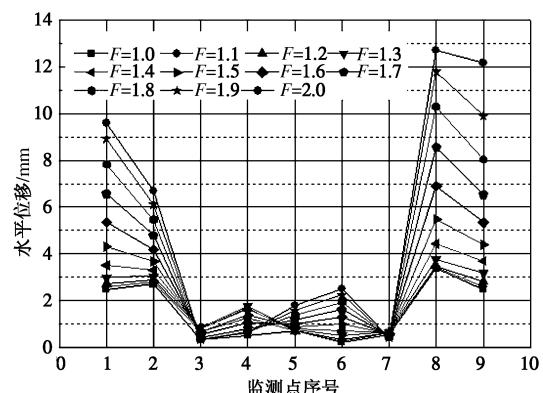


图 8 监测点水平位移

Fig. 8 Horizontal displacement of critical points

(2) 坚向位移：左、右洞坚向位移最大值均发生在隧道外侧拱肩部位，其次是拱顶部位（图 9）。与水平位移相比，坚向位移数值仍然远远大于水平位移，因此，各监测点总位移大小分布关系与坚向位移分布一致（图 10）。

因此，对于断续节理岩体中特大断面连拱隧道而言，其隧道顶部的坚向位移是隧道位移控制的主要对象，但由于断续节理分布影响与制约，坚向最大位移并不一定完全发生在隧道的正拱顶部位。

(3) 根据各监测点总位移(图 10)大小分布关系, 监测点#2, #3, #7, #8 为 4 个最大的位移监测点。4 个监测点的总位移与折减系数 F 的变化规律整体趋于一致, 变化幅度较为均匀(图 11); 但对各测点的水平位移的变化有着显著的不同, 如拱顶监测点水平位移在减系数 F 达到某一值后计算开始结果减小(图 12)。

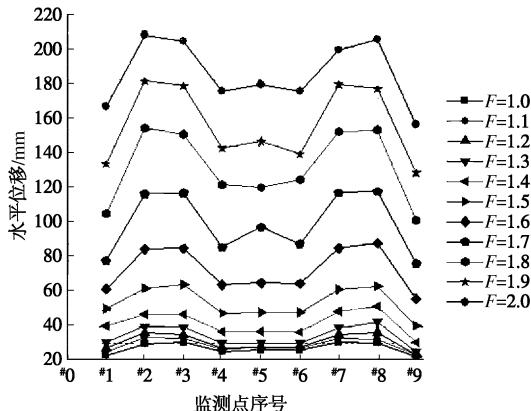


图 9 监测点竖向位移

Fig. 9 Vertical displacement of critical points

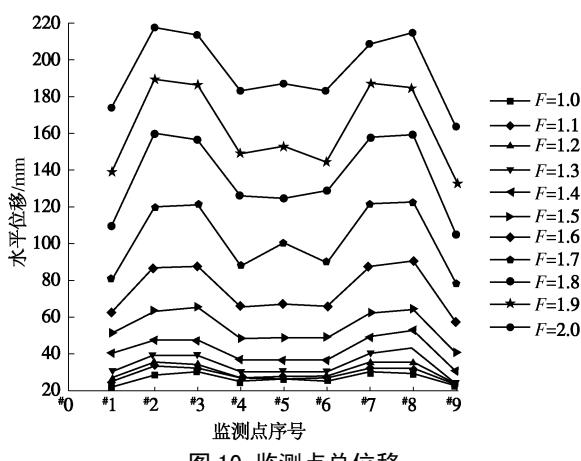


图 10 监测点总位移

Fig. 10 Total displacement of critical points

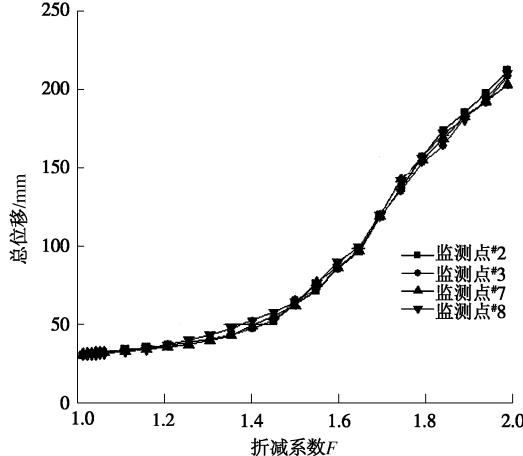


图 11 测点 2, 3 和 7, 8 总位移与折减系数关系

Fig. 11 Relation between total displacement and F of critical points No. 2, 3, 7 and 8

由此可表明: 断续节理围岩体系统在变形过程中相互间的影响关系与其自身的力学参数密切相关, 且这种关系对水平位移的影响更为显著。

3.4 隧道围岩稳定性分析

根据以上对隧道围岩位移规律的分析, 金鸡山隧道 K22+560 断面围岩稳定性判断按照总位移显著变化观测点的稳定性进行判断。图 12 是隧道围岩位移与强度折减系数 F 变化最为敏感的监测点的位移变化曲线, 按照监测点#2, #3, #7, #8 总位移计算得到的安全系数均为 1.25, 建议施工过程中加强隧道拱顶及外侧拱肩部位围岩体的支护。

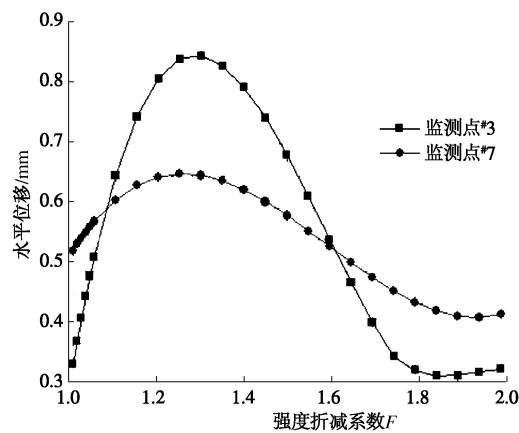


图 12 测点#3 和#7 水平位移与折减系数关系

Fig. 12 Relation between horizontal displacement and F of critical points No. 3 and 7

4 结 论

(1) 利用虚节理力学性质参数弱化函数给出了可以反映断续节理扩展过程中强度衰减的节理岩体强度准则; 并将这一强度准则及虚节理弱化规律编成代码嵌入现有的 DDA 源程序中, 实现了对断续节理扩展过程的模拟计算, 并通过剪切试验模拟结果的对比验证了该算法能够较好地反映了断续节理峰值后变形、破坏特征。

(2) 利用断续节理岩体扩展算法研究隧道围岩稳定性可以更好地反映节理分布状态对隧道围岩变形的影响、岩桥和节理的力学特性对隧道围岩破坏特征的影响, 从而更为客观为隧道稳定分析提供强有力依据。

参考文献:

- [1] 刘远明. 基于直剪试验的非贯通节理岩体扩展贯通研究[D]. 上海: 同济大学, 2007. (LIU Yuan-ming. Study on failure models and strength of rockmass containing discontinuous joints in direct shear[D]. Shanghai: Tongji University, 2007. (in Chinese))

- [2] 夏才初, 肖维民, 丁增志. 非贯通节理 Jennings 强度准则的岩桥弱化和节理面起伏角修正[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(3): 485 - 492. (XIA Cai-chu, XIAO Wei-min, DING Zeng-zhi. Modification of Jennings strength criterion for intermittent joints considering rock bridge weakening and joint surface undulating angle[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(3): 485 - 492. (in Chinese))
- [3] 朱维申, 梁作元, 冯光北, 等. 节理岩体强度特性的物理模拟及其强度预测分析[C]// 计算机方法在岩石力学及工程中的应用国际学术讨论文集. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1994: 486 - 493. (ZHU Wei-shen, LIANG Zuo-yuan, FENG Guang-bei, et al. Physical simulation and prediction analysis of the strength characteristics of jointed rockmass[C]// Proceedings of International Symposium On Computational Methods Applied In Rock Mechanics And Egineerings. Wuhan: Wuhan Surveying University Press, 1994: 486 - 893. (in Chinese))
- [4] 梁作元, 朱维申. 压剪应力作用下含共面闭合节理岩石材料的剪切破坏准则探讨[C]// 中国青年学者岩土工程力学及其应用讨论会议论文集. 北京: 科学出版社, 1994: 470 - 474. (LIANG Zuo-yuan, ZHU Wei-shen. Study on the failure criterion of rock materials containing coplanar close intermittent joints under compress ion-shear stress[C]// Proceedings of Symposium For Chinese Young Scholars On Geotechnical Mechanics And Its Applications. Beijing: Science Press, 1994: 470 - 474. (in Chinese))
- [5] 周小平, 王建华, 哈秋龄. 压剪应力作用下断续节理岩体的破坏分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(9): 1437 - 1440. (ZHOU Xiao-ping, WANG Jian-hua, HA Qiu-ling. Failure analysis of intermittent jointed rocks under compression-shear stress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(9): 1437 - 1440. (in Chinese))
- [6] SHI G-H. Discontinuous deformation analysis – a newmodel for the statics and dynamics of block systems[D]. Berkley: University of California, 1988.
- [7] 石根华. 数值流行方法与非连续变形分析[M]. 裴觉民, 译. 北京: 清华大学出版社, 1997. (SHI Gen-hua. Numerical manifold method (NMM) and discontinuous deformation analysis(DDA)[M]. PEI Jue-min, trans. Beijing: Tsinghua University Press, 1997. (in Chinese))
- [8] XIA Cai-chu, XU Chong-bang, ZHAO Xu. Application of strength reduction DDA method in stability analysis of mountain tunnel[C]// Proceeding of the 9th International Conference on Analysis of Discontinuous Deformation. Singapore: Nanyang Technological University, 2009: 189 - 203.
- [9] STIMPSON B. Failure of slope containing discontinuous planar joints[C]// Proc 19th U S Symp on Rock Mechanics. 1978: 296 - 300.
- [10] KE T C. Simulated testing of two dimensional heterogeneous and discontinuous rock masses using discontinuous deformation analysis[D]. Berkeley: University of California, 1993.