

断续节理对岩体力学性能的影响

金爱兵¹⁾✉ 李兵²⁾ 邓富根¹⁾

1) 北京科技大学土木与环境工程学院,北京 100083 2) 中核第四研究设计工程有限公司,石家庄 050000

✉ 通信作者, E-mail: jinaibing@ustb.edu.cn

摘要 采用颗粒流数值模拟程序,建立不同节理状态的岩石试样模型,对其进行双轴试验模拟,从岩桥长度、节理长度和倾角三个方面对断续节理影响下的岩体破裂形式和力学性质进行了数值模拟分析. 岩桥的破裂方式为翼裂纹扩展下的拉剪复合破坏,模型破裂大致经历了翼裂纹的扩展、次生裂纹的延伸以及岩桥的贯通三个过程,而且表现出明显的蠕变特性以及延性破坏. 岩桥长度的变化对峰值强度和弹性模量影响较小;相比岩桥长度,节理岩样的力学特性对节理长度更加敏感. 对于不同的节理倾角,岩石试件表现出不同的初始破裂形式,0°倾角岩样的破裂方式为翼裂纹的扩展和次生裂纹的延伸,中间岩桥没有被贯通,15°倾角岩样的初裂强度和峰值强度最大.

关键词 岩石; 节理; 力学性质; 数值分析; 计算机模拟

分类号 TU452

Effect of intermittent joints on the mechanical properties of rock mass

JIN Ai-bing¹⁾✉, LI Bing²⁾, DENG Fu-gen¹⁾

1) School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2) The Fourth Research and Design Engineering Corporation of China, Shijiazhuang 050000, China

✉ Corresponding author, E-mail: jinaibing@ustb.edu.cn

ABSTRACT The models of rock mass with different joint states were established by using particle flow code (PFC) numerical simulation procedures, and then their biaxial test was simulated. The effects of intermittent joints on the rupture forms and mechanical properties of rock mass were numerically analyzed from three aspects of rock bridge length, joint length, and dip angle. The failure mode of rock bridges is mainly tensile-shear failure because of the extension of wing cracks, but the failure mode of the models can be concluded to be the extension of wing cracks and secondary cracks and the failure of rock bridges, exhibiting obvious creep properties and ductile failure. The peak strength and elastic modulus are less influenced by the change in length of rock bridges; however, compared to the length of rock bridges, the mechanical properties of the jointed rock samples are more sensitive to the length of intermittent joints. As far as models with the different dip angles of intermittent joints are concerned, the initial rupture forms of the models are different, the failure mode of the model with the dip angle of 0° is the extension of wing cracks and secondary cracks, but the middle rock bridge has not been run through, and the initial crack strength and peak strength of the model with the dip angle of 15° is maximum.

KEY WORDS rock; joints; mechanical properties; numerical analysis; computer simulation

岩体是被各种结构面切割成的不连续地质体,其破坏特征极其复杂,力学性质具有高度的非线性和各向异性. 其中,节理的空间分布、组数及强度等都会对岩体的力学性能产生重大影响^[1]. 地质调查分析表明,岩体内节理面并非全部是贯通的,而可能处于一种非贯通状态,断续节理岩体的强度特性受

节理和岩桥力学性质的综合影响.

国内外学者主要从阻力面积比、岩桥破坏、断裂力学和拉剪复合破坏等理论方面,以及直剪、单轴、伪三轴室内和数值模拟试验等方面对断续节理岩体做了较多研究. Harrison等^[2]将裂隙岩体力学性质归纳为不连续、非均匀、各向异性与非弹性. Gehle

收稿日期: 2011-12-05

基金项目: 中央直属高校基本科研业务费资助项目(FRF-SD-12-002A); 霍英东青年教师基金资助项目(122024)

等^[3]通过对非贯通岩石节理的直剪试验研究,将剪切破裂分为实际破裂、摩擦和剪胀、大剪切位移三个过程.何江达和范景伟等^[4-5]从断裂力学的角度对特定断续节理岩体的强度进行了估算.周小平等^[6]利用裂纹孤立原理对多节理贯通机理进行了研究.朱维申等^[7]提出岩桥的破坏模式有剪切破坏、拉剪复合破坏和翼裂纹扩展三种.刘远明等^[8]基于岩桥力学性质弱化机制对非贯通节理岩体进行了试验研究.夏才初等^[9]对岩桥在剪切过程中的力学性质弱化特性进行了研究,建立了岩桥弱化力学模型,提出岩桥力学性质弱化参数,并对参数的合理性进行了验证.陈新等^[10]通过对裂隙石膏试件进行压缩试验研究,得出断续节理岩体的宏观力学特性与节理面的闭合摩擦、岩桥内拉伸和剪切裂纹产生等细观损伤力学机制密切相关.

岩体内裂隙的分布形态,几何形状、尺度、角度、表面力学特性以及岩体的应力大小和方向等对岩体力学性质的影响具有很大的不确定性.本文采用数值模拟的手段,建立不同节理状态的岩石试样模型,对其进行双轴试验模拟,从岩桥长度、节理长度及倾角三个方面,采用对比分析的方法来研究断续节理面对岩体宏观力学性质的影响,并从颗粒微破裂的角度对岩样破坏的整体过程进行分析.

1 模型建立

采用颗粒流数值模拟程序(PFC2D)以及平行黏结模型进行模拟.模型试样尺寸为4.2 cm × 10 cm,颗粒最小半径为0.275 mm,粒径比为1.66,单位厚度,将墙体的切向刚度和摩擦因数均设为0,以实现光滑墙体的边界条件.模型细观力学参数的确定对反映岩石的宏观力学性质非常关键,需要经过反复地调整试算才可以得到.细观参数为:密度为2.63 g · cm⁻³,接触模量为37.8 GPa,刚度比为2.45,法向与切向强度均值为68.5 MPa,标准差为

10 MPa,摩擦因数为0.5,半径乘子为1.

为了研究节理面对岩石力学性质的影响,在原有模型试件中,采用JSET命令建立不同岩桥长度、节理长度及倾角的节理岩石试件模型.由于试件的尺寸小,所以岩桥和节理长度的选择对试验也有一定的影响,最终确定模型试样中岩桥长度分别为0.50、0.75、1.00、1.25和1.50 cm,节理长度分别为0.7、0.8、0.9、1.0和1.1 cm,倾角(与轴向上的夹角)分别为0°、15°、30°、45°、60°、75°和90°.

2 模拟结果分析

2.1 岩桥长度的影响

固定节理长度1 cm,倾角45°,围压30 MPa,分析岩桥长度对试件力学性质的影响.图1为不同岩桥长度岩样最终微破裂图(图中所示均为峰后强度为峰值强度70%时岩样的微破裂状态,下同).红色代表拉破裂,黑色代表剪破裂,蓝色表示节理面.图2为不同岩桥长度岩样应力-应变曲线.按岩桥长度从小到大的顺序,岩样最终微破裂个数分别为2640、2487、2417、2304和3188.

从岩样的最终破裂(图1)可以看出,岩样的破坏的原因可归结为三个方面:翼裂纹的扩展、次生裂纹的延伸以及岩桥的贯通.岩桥的破裂方式为翼裂纹扩展下的拉剪复合破坏,拉破裂为主.

对不同岩桥长度试件破裂的整个过程进行分析,由于节理面端部应力集中严重,节理面的端部被拉裂,翼裂纹开始出现,并与轴呈较小的角度向外扩展.当岩桥长度较小(0.50~1.25 cm)时,两节理面相邻端部翼裂纹以一定的夹角相连接并将中间岩桥贯通.随着岩桥的贯通和翼裂纹的明显扩展,小的次生裂纹也开始增多,最终形成岩样的宏观破裂面;当岩桥达到一定长度(1.50 cm)模型破裂初期翼裂纹的扩展明显,当翼裂纹扩展达到一定程度时,岩桥才开始出现拉剪破裂,岩样逐渐失稳破坏.

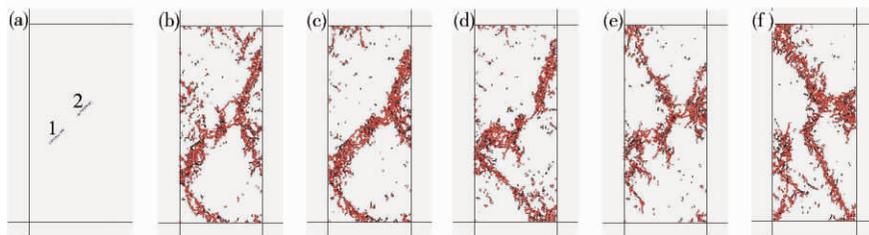


图 1 不同岩桥长度岩样最终微破裂图. (a) 节理图; (b) 0.50 cm; (c) 0.75 cm; (d) 1.00 cm; (e) 1.25 cm; (f) 1.50 cm

Fig. 1 Final micro-fracture of rock samples containing different lengths of rock bridges: (a) joints; (b) 0.50 cm; (c) 0.75 cm; (d) 1.00 cm; (e) 1.25 cm; (f) 1.50 cm

从图 2 可以看出,由于岩样中断续节理的存在

导致岩样表现出蠕变特性以及延性破坏.峰值强度

随岩桥长度的增加分别为 129.8、125.8、126.0、129.6 和 130.8 MPa, 岩样的弹性模量变化也不大, 可见断续节理的存在使得岩样的峰值强度降低, 但是岩桥长度的变化却不会对峰值强度和弹性模量产生较大影响。

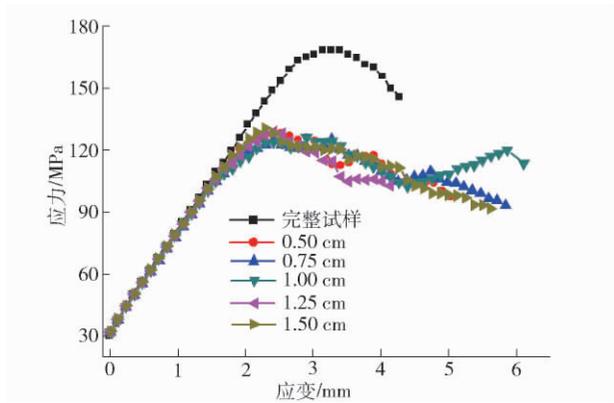


图 2 不同岩桥长度岩样应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves of rock samples containing different lengths of rock bridges

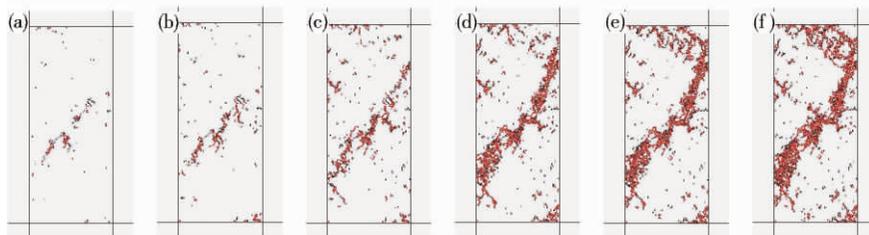


图 3 0.8 cm 节理长度岩样微破裂变化。(a) 36 000 步; (b) 40 000 步; (c) 45 000 步; (d) 54 000 步; (e) 63 000 步; (f) 78 000 步

Fig. 3 Micro-fracture change in a rock sample with the joint length of 0.8 cm: (a) 36 000 steps; (b) 40 000 steps; (c) 45 000 steps; (d) 54 000 steps; (e) 63 000 steps; (f) 78 000 steps

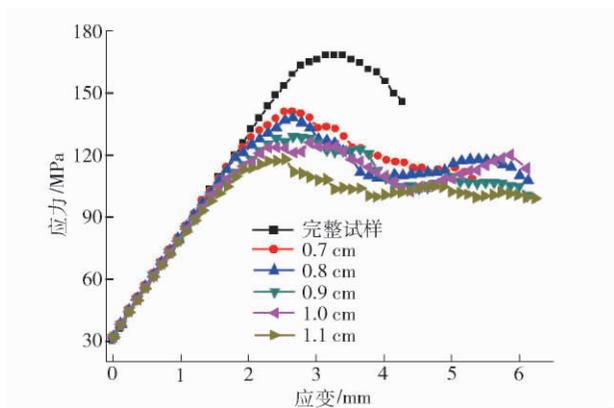


图 4 不同节理长度岩样应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of rock samples containing different joint lengths

从图 4 中可以看出, 随节理长度的增加, 岩样表现出明显的蠕变特性和延性破坏。应力-应变曲线在峰后表现出上下波动的趋势, 模拟结果与文献 [10] 室内试验得出的结论一致。峰值强度随节理

2.2 节理长度的影响

固定岩桥长度为 1.0 cm, 倾角 45°, 围压 30 MPa, 分析节理长度对试件力学性质的影响。图 3 为节理长度为 0.8 cm 岩样微破裂变化图, 图 4 为不同节理长度岩样应力-应变曲线。按节理长度从小到大的顺序, 岩样最终微破裂个数分别为 2 879、2 970、2 574、2 417 和 3 642。

不同节理长度岩样的最终破裂情况同前节所述基本一致, 也是以拉破裂为主。由于篇幅限制, 仅以 0.8 cm 节理长度岩样的破裂过程来进行分析。从岩样的整个破裂过程来看, 节理面端部首先出现拉破裂, 翼裂纹不断扩展, 并且节理面相邻端部翼裂纹以一定夹角相交, 岩桥被贯通, 同时次生裂纹也不断增多, 最终导致岩样出现一条与节理面方向基本一致的宏观裂纹, 如图 3 所示。但是, 节理长度大的岩样比节理长度小的岩样更早出现微破裂, 这一点也可以在图 4 中得到验证, 即同应力水平, 节理长度大的岩样应变较大。

长度的增加逐渐降低, 将图 4 与图 2 对比可知, 相对于岩桥来讲, 断续节理岩样的力学特性对节理长度更加敏感。

2.3 倾角的影响

固定岩桥长度 1 cm, 节理长度 1 cm, 围压 30 MPa, 分析倾角对试件力学性质的影响。图 5 为不同倾角岩样初始微破裂图, 图 6 为 0° 倾角岩样的破裂过程, 图 7 为不同倾角岩样应力-应变曲线图, 图 8 为初裂强度和峰值强度随倾角的变化。

从岩样的初始破裂情况来看, 当倾角大于等于 45° 时, 岩样的破裂形式为节理面端部首先出现拉破裂, 翼裂纹不断延伸, 节理面相邻端部翼裂纹以一定夹角相交, 岩桥被贯通, 如图 5 所示; 当角度小于 45° 时, 随着倾角的降低, 岩样的初破裂模式明显转变。0° 和 30° 岩样的初始破裂是从 2 号节理面端部开始的, 而 15° 岩样中 1 号节理面附近的微破裂较严重。

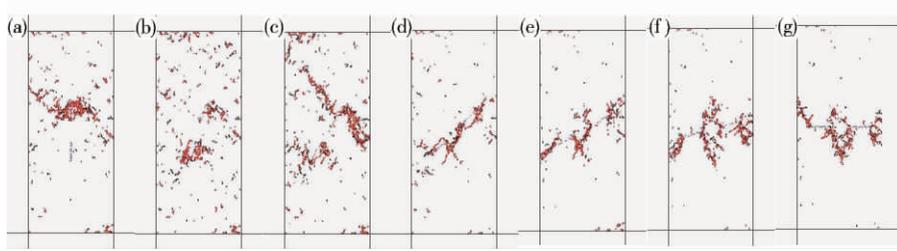


图 5 不同倾角岩样初始微破裂图. (a) 0°; (b) 15°; (c) 30°; (d) 45°; (e) 60°; (f) 75°; (g) 90°

Fig. 5 Initial micro-fracture of rock samples containing different dip angles: (a) 0°; (b) 15°; (c) 30°; (d) 45°; (e) 60°; (f) 75°; (g) 90°

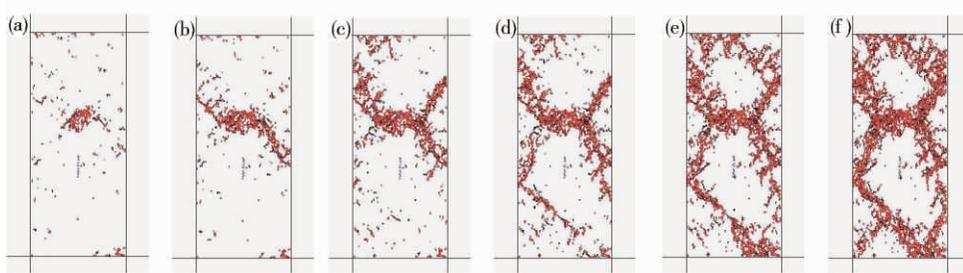


图 6 0°倾角岩样的破裂过程. (a) 40000 步; (b) 44000 步; (c) 52000 步; (d) 60000 步; (e) 73000 步; (f) 85000 步

Fig. 6 Failure process of a rock sample with the 0° angle: (a) 40000 steps; (b) 44000 steps; (c) 52000 steps; (d) 60000 steps; (e) 73000 steps; (f) 85000 steps

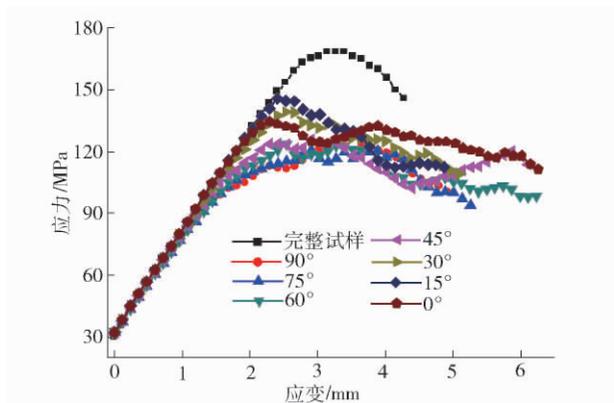


图 7 不同倾角岩样应力-应变曲线

Fig. 7 Stress-strain curves of rock samples containing different dip angles

按节理角度从小到大的顺序,不同倾角岩样的最终微破裂个数分别为 4 786、3 154、3 044、2 417、3 609、2 687 和 2 882。不同倾角岩样的破裂过程大致也是经历了翼裂纹的扩展、次生裂纹的延伸以及岩桥的贯通三个主要过程。但是,0°倾角岩样的破裂方式表现与众不同,如图 6 所示,其翼裂纹是从 2 号节理面开始,然后以不同程度呈 X 状向周围扩展,并与岩样边界相交,随轴压的增大,裂纹又继续向下部扩展,最终形成一个类似葫芦状的宏观破裂面。从图中可以看出,0°倾角岩样的破裂方式仅表现出翼裂纹的扩展和次生裂纹的延伸,1 号节理面附近没有出现明显的微破裂,中间岩桥也没有被剪断。

从图 7 中可以看出,岩样也表现出蠕变特性,而

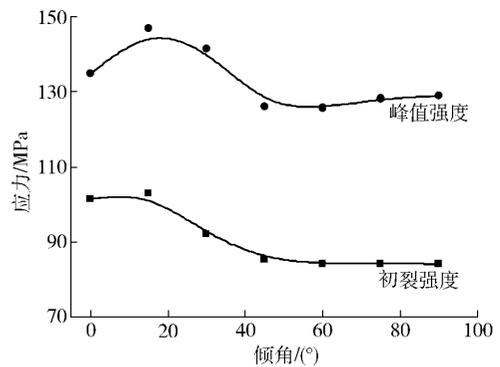


图 8 初裂强度和峰值强度随倾角的变化

Fig. 8 Variation of initial crack strength and peak strength with dip angle

且应力-应变曲线出现了上下波动的情况,与前节分析类似。从图 8 中可以看出,初裂强度和峰值强度随倾角的变化表现出一定的规律性,15°岩样的初裂强度和峰值强度最大,然后随着倾角的增大初裂强度和峰值强度都出现了降低的趋势,但是当倾角达到 45°时,初裂强度和峰值强度基本保持稳定。0°岩样的初裂强度和峰值强度较 15°岩样稍小。

模拟结果表明,破坏形式实质上是裂纹尖端区域局部张拉破坏开始的,裂纹的起裂、扩展和贯通具有明显的阶段性,裂纹之间的扩展贯通取决于它们之间应力场相互作用的强弱程度以及几何分布状态,不同贯通模式的岩桥具有各不相同的强度特征,翼裂纹和次生裂纹产生的方位、性质和原生裂纹的

空间位置密切相关,不同倾角试件的破裂方式也不相同。另外,由于试样尺寸小,岩桥长度和节理长度过大使得节理对试件力学性质的影响必然受到试样侧面的限制,可能会导致宏观参数失真。

3 模拟结果与试验结果对比分析

前人通过相似性模拟试验以及室内压缩试验研究了断续节理对岩体力学性质的影响。相似性模型试验表明:岩桥的贯通方式是在翼裂纹产生发展后,岩桥内部产生张性破坏的次生裂纹,随着裂纹的连接贯通,岩桥被剪断^[7],节理面间距对贯通的形式也有较大的影响^[11]。压缩试验研究表明:节理面长度的增加,导致岩样应力-应变曲线表现出明显的延性破坏,曲线由单峰曲线变为多峰曲线,岩体的峰值强度和弹性模量也呈现逐渐降低的趋势;当节理面长度相同时,岩体的峰值强度随节理面倾角减小而逐渐增大^[10]。这与数值模拟结果基本一致。数值模拟结果显示:不同节理角度岩样的初始破裂方式不同。倾角为 0° 的节理岩体的破裂方式与其他角度岩样的破裂方式不同,表现为翼裂纹的扩展和次生裂纹的延伸,中间岩桥没有被贯通。室内试验得出 0° 倾角岩样强度最大,而模拟结果得出 15° 节理岩样的强度最大,这一点与室内试验的结果不同。

4 结论

(1) 岩桥的破裂方式为翼裂纹扩展下的拉剪复合破坏,模型破裂大致经历了翼裂纹的扩展、次生裂纹的延伸以及岩桥的贯通三个过程,而且表现出明显的蠕变特性以及延性破坏。

(2) 岩桥长度的变化对峰值强度和弹性模量影响较小,相比岩桥长度,节理岩样的力学特性对节理长度更加敏感。

(3) 对于不同的节理倾角,岩石试件表现出不同的初始破裂形式, 0° 倾角岩样的破裂方式为翼裂纹的扩展和次生裂纹的延伸,中间岩桥没有被贯通, 15° 倾角岩样的初裂强度和峰值强度最大。

参 考 文 献

[1] Zhu W S, Li S C, Chen W Z. *Failure Mechanism and Anchoring Effects of Jointed Rock and Engineering Applications*. Beijing: Science Press, 2001
(朱维申,李术才,陈卫忠. 节理岩体破坏机理和锚固效应及

工程应用. 北京: 科学出版社, 2001)

[2] Harrison J P, Hudson J A. *Engineering Rock Mechanics*. Oxford: Pergamon, 2000

[3] Gehle C, Kutter H K. Breakage and shear behavior of intermittent rock joints. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2003, 40(5): 687

[4] He J D, Fan J W. The strength behavior of rock mass with a group of open intermittent joints. *J Chengdu Univ Sci Technol*, 1990(6): 57
(何江达, 范景伟. 含一组未闭合断续节理脆性岩体强度特性. 成都科技大学学报, 1990(6): 57)

[5] Fan J W, He J D. The strength behavior of rock mass containing oriented and closed intermittent joints. *Chin J Rock Mech Eng*, 1992, 11(2): 190
(范景伟, 何江达. 含定向闭合断续节理岩体的强度特性. 岩石力学与工程学报, 1992, 11(2): 190)

[6] Zhou X P, Zhang Y X, Wang J H, et al. Study on coalescence mechanism of splitting failure of rock masses with intermittent joints under compression. *Chin J Rock Mech Eng*, 2005, 24(1): 8)
(周小平, 张永兴, 王建华, 等. 断续节理岩体劈裂破坏的贯通机理研究. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(1): 8)

[7] Zhu W S, Chen W Z, Shen J. Simulation experiment and fracture mechanism study on propagation of echelon pattern cracks. *Acta Mech Solida Sin*, 1998, 19(4): 355
(朱维申, 陈卫忠, 申晋. 雁形裂纹扩展的模型试验及断裂力学机制研究. 固体力学学报, 1998, 19(4): 355)

[8] Liu M Y, Xia C C. Research on rock mass containing discontinuous joints by direct shear test based on weakening mechanism of rock bridge mechanical properties. *Chin J Rock Mech Eng*, 2010, 29(7): 1467
(刘远明, 夏才初. 基于岩桥力学性质弱化机制的非贯通节理岩体直剪试验研究. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(7): 1467)

[9] Xia C C, Xiao W M, Liu Y M. Study of mechanical model for weakening process of discontinuous joint rock bridge. *Chin J Rock Mech Eng*, 2010, 29(8): 1538
(夏才初, 肖维民, 刘远明. 非贯通节理的岩桥弱化学模型研究. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(8): 1538)

[10] Chen X, Liao Z H, Li D J. Experimental study of effects of joint inclination angle and connectivity rate on strength and deformation properties of rock masses under uniaxial compression. *Chin J Rock Mech Eng*, 2011, 30(4): 781
(陈新, 廖志红, 李德建. 节理倾角及连通率对岩体强度、变形影响的单轴压缩试验研究. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(4): 781)

[11] Liu D Y, Ye X M, Zhu F. The ultimate strength evaluation of rock mass containing intermittent joints. *J Chongqing Jianzhu Univ*, 1997, 19(2): 21
(刘东燕, 叶晓明, 朱凡. 断续节理岩体强度评价及承载力预测. 重庆建筑大学学报, 1997, 19(2): 21)