

岩桥破坏的简化模型及在节理岩体 模拟网络中的应用

A simplified discontinuity propagation model and its application in mechanics of rock mass

杜景灿¹, 陈祖煜^{1,2}

(1. 清华大学 水利水电工程系, 北京 100084; 2. 中国水利水电科学研究院 岩土研究所, 北京 100044)

摘要: 提出一个简化的岩桥破坏/结构面扩展模型, 该模型符合现有试验观测成果, 在力学机理上基于 Lajtai 对岩桥剪切破坏的研究, 能方便地计算实际问题中各种结构面组合情况下的抗剪力。利用先进的优化方法, 该模型用于在结构面模拟网络中搜索抗剪力最小的结构面—岩桥组合, 从而研究裂隙岩体的结构面连通特性和综合抗剪强度。算例和分析表明, 在不同的法向应力作用下, 岩体沿某一组结构面受剪时, 破坏路径上的连通率为常数, 这时可以使用连通率求取岩体的综合抗剪强度指标。在剪切方向与某一组结构面的平均延展方向不相同, 破坏路径上的连通率随法向应力的改变而改变, 这种情况下岩体的综合抗剪强度只能通过模拟试验直接求得。

关键词: 岩体; 结构面; 模型; 结构面连通率; 综合抗剪强度; 结构面网络

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2002)04-0421-06

作者简介: 杜景灿(1968-), 男, 山东金乡人, 清华大学水利系岩土工程专业博士研究生, 研究方向为岩体力学与岩体工程。

DU Jing-can¹, CHEN Zu-yu^{1,2}

(1. Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China)

Abstract: This paper introduces a simplified rock-bridge failure model based on the Lajtai's theory. The model can explain what has been observed in the tests. The shear strength of a rock bridge under various joint combinations can be readily determined using this model. In a simulated joint map, modern optimization methods are used to determine the comprehensive shear strength contributed by the rock-bridge and joint combination that offers the least resistance along a specified direction of enforced shear. Shear strength parameters are subsequently summarized using this numerical modeling test by applying a number of normal force. It has been found that this approach is better than the conventional one that employs a single criterion of the joint persistence ratio to find the strength parameters.

Key words: rock mass; discontinuity; model; discontinuity persistence; comprehensive shear strength; joint map

1 前言*

因为岩体的滑动破坏总是沿着结构面与岩桥组合形成的抗剪力最小的曲面进行, 所以研究岩体破坏面上结构面的连通特性和沿该方向岩体的综合抗剪强度, 首先要解决两个问题: 一是结构面之间的相对几何位置, 二是结构面之间岩桥的破坏机理。结构面的空间相对位置可以通过地质测量和结构面网络模拟解决^[1], 而结构面之间岩桥的破坏实际上是现有结构面的扩展与汇合。自 Griffith 创建断裂力学以来, 断裂力学成为研究裂缝扩展的主要手段。目前应用断裂力学的破坏准则并结合相应的数值方法来模拟室内试验小尺寸试样内为数不多(例如 1 个、2 个等)的结构面的扩展与汇合, 已经取得了令人满意的成果^[1~4]。但就断裂力学现在的发展水平来看, 还远不能解决含有大量结构面的实际岩体的强度问题。因此, 有必要根据试验结果和现有的理论成果, 提出能解决实际工程问题的简化的岩桥破坏(即结构面扩展)模型。

2 Lajtai 的岩桥受剪破坏理论和 Einstein 的结构面扩展模型

2.1 Lajtai 的岩桥受剪破坏理论

对于岩桥的破坏机理, Lajtai^[5]经过详细的试验研究和理论分析后认为, 岩体受剪时, 在大多数边坡稳定分析涉及的正应力范围内, 小主应力首先达到岩石的抗拉强度而发生拉伸破坏(如图 1(a), (b)所示)^[5,6], 可用下式计算岩桥的抗剪强度:

$$\tau_b = [\sigma_t(\sigma_1 + \sigma_n)]^{1/2} \quad (1)$$

式中 σ_t 为完整岩石的抗拉强度, σ_n 为正应力, τ_b 为岩桥沿剪切方向的抗剪强度。发生拉伸破坏的平面与产生强迫剪切的平面之间的夹角 θ_t 为

$$\theta_t = \frac{1}{2} \arctan(2\tau/\sigma_n) \quad (2)$$

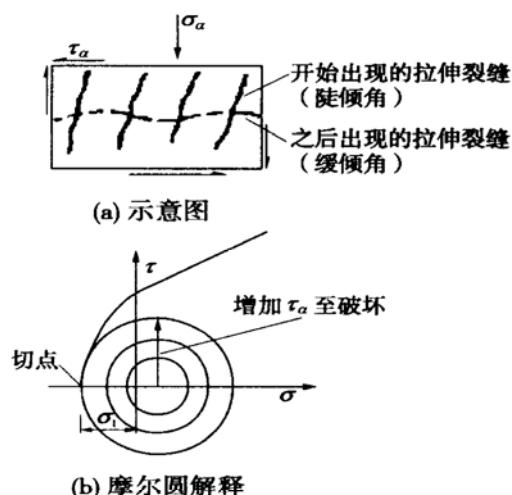
图1 直剪试验中岩桥的拉剪破坏^[5,6]

Fig. 1 Tensile-shear failure of rock bridge in direct shear: (a) sketch map; (b) Mohr's circle (after Lajtai^[5] and Einstein^[6])

2.2 Einstein 的岩桥破坏模型

根据 Lajtai 的岩桥受剪破坏理论, Einstein^[6] 提出现有的两结构面在其间岩桥内的扩展和汇合(如图 2, 3)^[5,6], 与这两个结构面相邻端点的连线与剪切方向的夹角 $\omega = \beta - \alpha$ 有关。

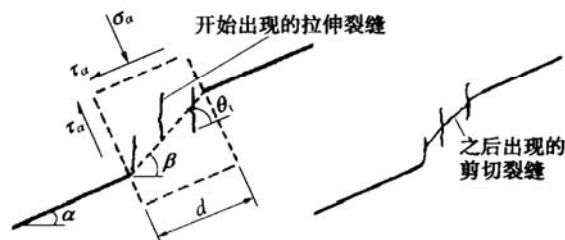
图2 缓倾角的拉剪破坏^[5,6]

Fig. 2 Tensile-shear failure of rock bridge—low angle (after Lajtai^[5] and Einstein^[6])

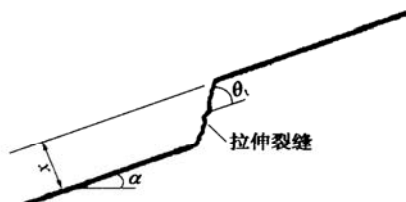
图3 陡倾角的直接拉伸破坏^[5,6]

Fig. 3 Direct tensile failure of rock bridge—high angle (after Lajtai^[5] and Einstein^[6])

3 现有结构面扩展与汇合的试验成果

自 1983 年 Einstein 提出上述结构面的扩展与汇合模型后, 许多学者做了大量岩体结构面扩展与汇合的试验^[2, 7~12]。其中 Wong^[9] 根据试验结果, 较为系统地整理出单轴压缩情况下结构面扩展与汇合的模式(见

图 4), Bobet^[10] 的单轴压缩试验和二轴压缩试验研究亦得出类似的结论。Wong^[11] 和 Savilahti^[12] 在结构面扩展的直剪试验中发现如图 5 所示的所谓“鱼眼”现象, Savilahti^[2] 发现如图 6 所示两结构面在剪切试验中不能汇合的现象。图 7 为 Chen^[8] 观测到的包含多个结构面的大理石试样受压破坏时结构面的扩展与汇合模式。

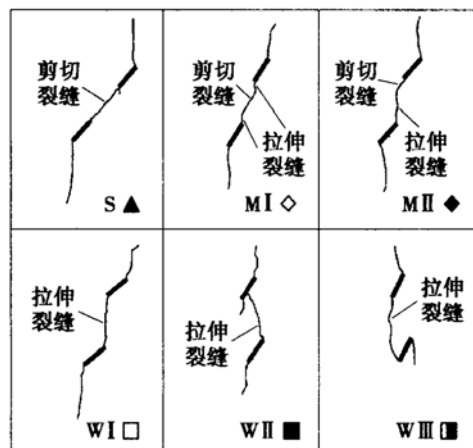
图4 结构面扩展与汇合的模式——单轴压缩试验^[9]

Fig. 4 Different patterns of crack coalescence (after Wong^[9])

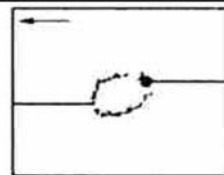
图5 结构面受剪闭合时形成的“鱼眼”现象^[11]

Fig. 5 The “fish eye” mode of coalescence (after Wong^[11])

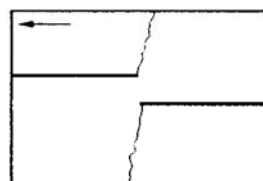
图6 两个结构面受剪时不能闭合的现象^[2]

Fig. 6 The uncoalescence phenomena (after Savilahti^[2])



(a) 试样照片



(b) 素描图

图7 多个结构面受剪闭合时形成的破坏路径^[8]

Fig. 7 Coalescence pattern of more than two discontinuities (after Chen^[8]): (a) photograph; (b) sketch

4 一个简化的岩桥破坏模型

将图2、图3与图4~7对比不难发现, Einstein 的结构面扩展与汇合模型与试验结果之间有很大差距, 该模型更不能解释如图5所示的“鱼眼”现象和图6所示相邻结构面不能汇合的现象。为此, 笔者提出如图8所示的结构面扩展的简化模型。在该模型中, 结构面在正应力和剪应力作用下, 拉伸裂缝沿大主应力的方向^[12], 自结构面的两端开始, 向相反的方向发展; 剪切裂缝沿最大剪应力的方向^[7], 自结构面的两端开始, 向相反的方向发展。

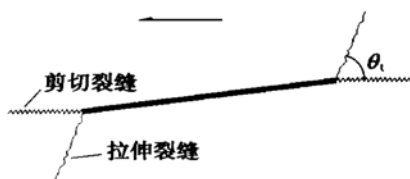


图8 结构面扩展的简化模型

Fig. 8 A simplified discontinuity propagation model

由图9可见, 图4中两结构面汇合的各种模式都可由该简化模型得到描述。由图10可见, 该模型可以粗略地解释“鱼眼”现象和两相邻结构面不能汇合的现象。

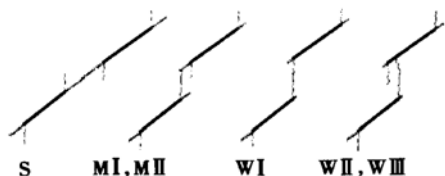


图9 用结构面扩展简化模型解释图4所示的结构面汇合模式

Fig. 9 Simulation of coalescence patterns shown in Fig. 4

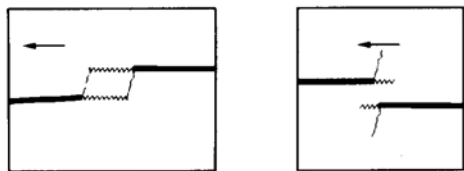


图10 用结构面扩展简化模型解释图5所示的“鱼眼”现象和图6所示的结构面受剪不能闭合的现象

Fig. 10 Simulation of “fish eye” mode shown in Fig. 5 and the non-coalescence phenomena shown in Fig. 6

虽然 Wong^[9] 和 Bobet^[10] 在试验中观察到拉伸裂缝自原有结构面端点扩展的起始角随原有结构面的摩擦角而有一定的变化, 但拉伸裂缝的延伸方向变化很快, 最终沿最大主应力的方向扩展^[12]。由此而造成的误差很小, 在现有的岩石力学发展阶段可以忽略。其它的试验和分析^[17]证实, 在试样中存在多个结构面的情

况下, 现有结构面造成的应力重分布对拉伸裂缝的扩展影响不大。

由弹性理论不难验证, 式(2)中拉伸裂缝与剪切方向的夹角 θ_0 就是剪切试验中大主应力的方向。可见, 该简化模型中拉伸裂缝的扩展方向与 Lajtai 的岩桥受剪破坏理论中拉伸裂缝的扩展方向相同。

Bobet^[10] 和 Wong^[11] 的试验观测和分析表明, 虽然从宏观上看剪切裂缝的表面上具有明显的剪切力作用的迹象(如粗糙、粉末和擦痕等), 但剪切裂缝上的锯齿、台阶, 并由数值分析证实^[13], 剪切裂缝是在拉伸应力和压缩应力都很高的区域形成的, 是由许多微小的拉伸裂缝组成的。这与 Lajtai 的岩桥破坏理论中的拉剪破坏是一致的。相应于剪切裂缝的岩桥的抗剪力可由式(1)的抗剪强度 τ_0 乘以剪切裂缝的长度求得。

综合以上分析可以认为, 本文提出的结构面扩展模型依然建立在 Lajtai 的岩桥剪切破坏理论之上。但与 Einstein 的结构面扩展模型相比, 本文提出的模型能较好地描述各种现有的试验结果, 而且由下一节的论述可知, 用该模型处理含有众多结构面的实际工程岩体中结构面的扩展与汇合问题, 将变得非常简单。

5 岩桥破坏的简化模型在研究结构面连通特性和岩体综合抗剪强度中的应用

因为在实际工程中不可能逐个查明每一个结构面的空间位置, 所以通常使用统计分析和网络模拟技术, 结合结构面的扩展模型, 来研究岩体的连通特性和综合抗剪强度。由结构面网络模拟产生的结构面网络中, 结构面之间的相对位置是随机的, 用 Einstein 的结构面扩展模型处理时会出现大量奇异的情况, 而如果使用本文提出的简化模型处理则会变得非常简单。

根据该简化模型扩展时, 从结构面的一个端点出发只有两条射线, 如果这两条射线与另一条结构面或者与另一条结构面的扩展射线相交(见图9), 则该两条结构面可以汇合(见图9、图11), 用式(3)计算结构面和其间岩桥的抗剪力; 如果不相交, 则该两个结构面不能汇合(见图10), 岩体破坏时不能同时通过这两条结构面, 这种组合的抗剪力取为无穷大。在前一种情况, 即结构面可以汇合时, 通常会有多个汇合路径, 如果形成这些汇合路径的抗剪力相同(如图11的汇合路径1和汇合路径2), 则任取其一, 否则, 则取抗剪力最小的。

在结构面网络中搜寻结构面与其间岩桥组合形成的抗剪力最小的破坏路径及求取结构面二维连通率的

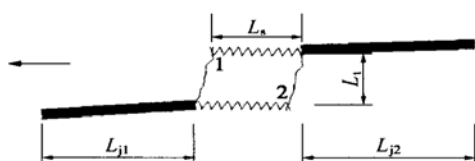


图 11 结构面受剪闭合示意图

Fig. 11 Sketch map of discontinuity coalescence

优化方法, 请参见文献[14~16], 但在计算结构面和岩桥的抗剪力 R 时, 使用下式:

$$R = L_{j1}f_{j1} + L_{j2}f_{j2} + L_s\tau_b + L_t\sigma_t \quad (3)$$

如图 11 所示, 上式中 L_{j1} , L_{j2} 分别为左右两结构面在剪切方向上投影的长度; f_{j1} , f_{j2} 分别为考虑起伏效应后两结构面的摩擦系数; L_s 为剪切裂缝的长度, L_t 为拉伸裂缝的长度; τ_b 由式(1)确定, σ_t 为完整岩石的抗拉强度。文献[17]提供了考虑结构面倾角变化时计算结构面抗剪力的方法。

5.1 岩体结构面连通率的定义

岩体的连通特性通常使用连通率的概念表达。在研究裂隙岩体的强度时, Jennings 首先将共面的结构面的连通率定义为^[14]

$$K = \frac{\sum JL}{\sum JL + \sum RBR} \quad (4)$$

式中 $\sum JL$ 和 $\sum RBR$ 分别表示岩体沿某一组共面的结构面破坏时, 破坏路径上结构面迹线的总长度和岩桥的总长度。

式(4)定义的连通率将破坏面限定为同一平面。为了反映岩体更为普遍的阶梯形破坏以及结构面和岩桥的破坏机理, Einstein^[6]将结构面的连通特性定义为岩体抗剪力的形式

$$K_a = \frac{R_r - R}{R_r - R_j} \quad (5)$$

式中 R 表示沿破坏路径的抗剪力; R_r 表示相同的破坏路径上, 假定岩体为完整岩石时的抗剪力; R_j 表示相同的破坏路径上, 假定结构面完全连通时的抗剪力。Einstein 将上式中的 K 称为“名义连通率”。

汪小刚、陈祖煜综合考虑了结构面组合的几何特征和岩桥的破坏机理, 将二维岩体破坏面上的结构面连通率定义为^[15]:

$$K_p = \frac{\sum JL}{\sum JL + \sum RBR} \quad (6)$$

式中 $\sum JL$ 和 $\sum RBR$ 分别代表结构面和岩桥在剪切路径上的总长度。式(6)定义的连通率称为“路径连通率”。

5.2 用简化的岩桥破坏模型分析岩体的连通特性

式(4)定义的连通率因为存在问题较多^[6], 故很少使用。下面通过一实例, 用基于本文提出的简化模型编制的计算机程序——2D-PERC, 来计算并分析裂隙岩体的“路径连通率”和“名义连通率”。

图 12 所示为根据新疆恰普其海水利枢纽工程左岸岩体结构面的实际统计资料生成的结构面网络图(倾向 170° 、倾角 90°)。图 13 将不同剪切方向上由 2D-PERC 计算得到的路径连通率和名义连通率进行了对比。

由图 13 可见, 虽然路径连通率和名义连通率在反映岩体连通特性的各向异性上大体一致, 但其结果仍有很大的差别。分析图 14 所示岩体的连通率可知, 图 14(a), (b) 试样的路径连通率都为 100%, 但由于爬坡效应, 用式(5)计算得到的图 14(a) 试样的名义连通率将大于 100%, 而图 14(b) 试样的名义连通率小于 100%。由于搜索结构面的最小抗剪力组合使用的是抗剪力最小的标准, 而式(5)所定义的名义连通率也使用抗剪力为标准, 所以更能准确地描述岩体连通特性与岩体抗剪力之间的关系。

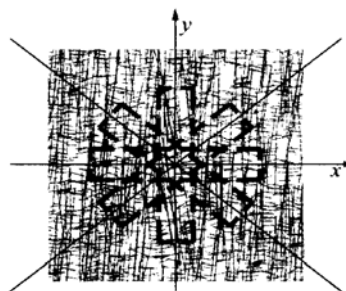


图 12 新疆恰普其海水利枢纽工程左岸岩体结构面网络图

Fig. 12 Joint network of rock mass in the left side of the Qiapuqihai Hydro Junction in Xinjiang

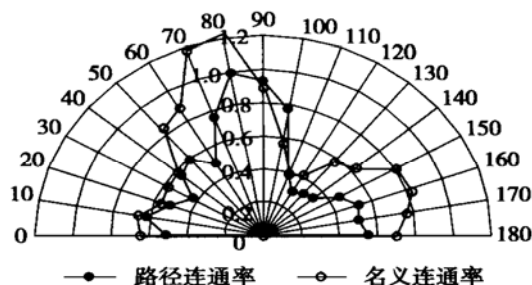
图 13 同一岩体剪切方向 $0^\circ \sim 180^\circ$ 上的路径连通率和名义连通率的对比

Fig. 13 Comparison of “apparent persistence” and “path persistence” in shearing direction from 0° to 180° of a rock mass

下面再来分析不同正应力作用下, 路径连通率和名义连通率的稳定性。图 15、图 16 是在图 12 所示的结构面网络上, 分别在剪切方向为 90° 和 120° 时取得的剪切带。剪切带上标有在不同正应力作用下, 由 2D-

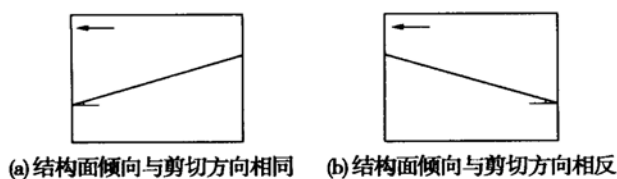


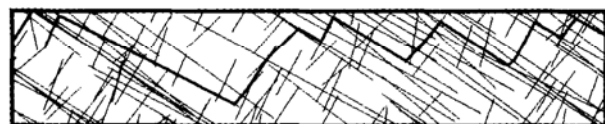
图 14 内含一个结构面的岩体受剪

Fig. 14 Shearing failure of rock mass with a single discontinuity:

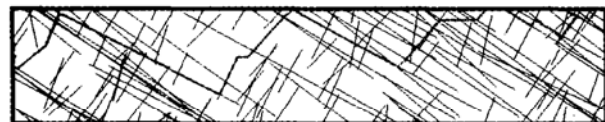
(a) shearing direction is same with the dip of discontinuity;

(b) shearing direction is reverse with the dip of discontinuity

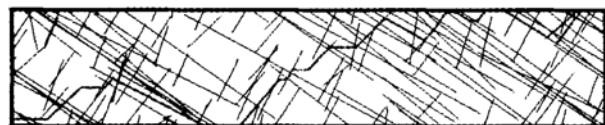
PERC 程序计算得到的结构面与其间岩桥组合形成的抗剪力最小的抗剪路径。图 17 所示为相应于不同剪切方向的剪切带, 不同的正应力作用下, 计算得到的路径连通率和名义连通率。

图中黑粗线为剪切路径, 连通率 $K = 100\%$ 图 15 剪切方向为 90° 时的最小抗剪力剪切路径Fig. 15 A shear path with minimum shearing force in shearing direction of 90° 

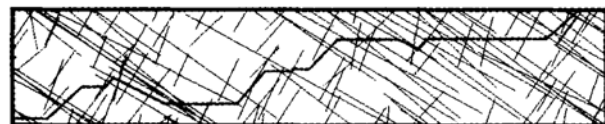
(a) 正应力为 0.25 MPa



(b) 正应力为 0.50 MPa



(c) 正应力为 1.00 MPa



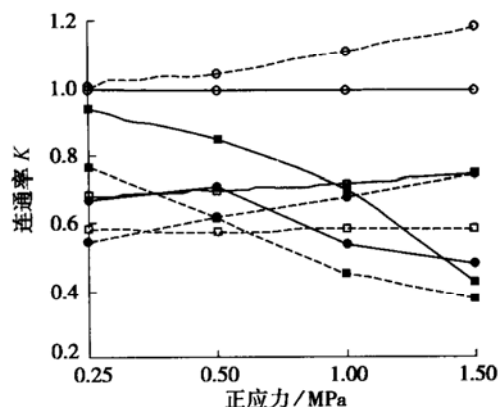
(d) 正应力为 1.50 MPa

图中黑粗线为剪切路径

图 16 剪切方向为 120° 时的最小抗剪力剪切路径Fig. 16 Different shear paths with minimum shearing force in shearing direction of 120° under different value of normal stress

由图 12~ 17 可以看出, 当剪切方向与某一组结构面的延伸方向大致相同时, 不同正应力作用下, 计算搜索到的最小抗剪力路径变化很小, 路径连通率和名义

连通率随正应力的变化也很小, 变化范围在 15% 之内; 但是在剪切方向与各组结构面的延伸方向都不相同时, 不同正应力作用下, 计算搜索到的最小抗剪力路径变化很大, 路径连通率和名义连通率随正应力的变化也很大, 这时不能认为路径连通率或名义连通率为常数。由此可见, 由式 (6) 定义的路径连通率和由式 (5) 定义的名义连通率都是针对某一组结构面而言的, 否则这两个概念都只能用来定性描述裂隙岩体在不同方向上连通特性的各向异性。笔者进行的其它大量实例计算证实了这一结论。



—●— K_p —剪切方向为 0° - - - K_a —剪切方向为 0°
 —○— K_p —剪切方向为 90° - - - K_a —剪切方向为 90°
 —■— K_p —剪切方向为 120° - - - K_a —剪切方向为 120°
 —□— K_p —剪切方向为 160° - - - K_a —剪切方向为 160°

图 17 不同剪切方向上正应力不同时路径连通率和名义连通率的变化曲线

Fig. 17 Variation of "path persistence" and "apparent persistence" with different normal stress in different shearing direction

5.3 裂隙岩体综合抗剪强度的确定

5.2 的分析指出, 只有在剪切方向与某组结构面的延伸方向一致时, 在不同的正应力作用下, 路径连通率才为常数。因此只有在剪切方向与某组结构面的延伸方向一致时, 才能使用下式^[5]根据路径连通率计算岩体沿该组结构面的综合抗剪强度:

$$\tau = (1 - k) [\sigma_1 (\sigma_1 + \sigma_n)]^{\frac{1}{2}} + C_k \tan [\varphi_b + JRC \log(\frac{\sigma_c}{\sigma_n})] \quad (7)$$

式中 k 为预定剪切方向上的连通率, C_k 为节理面抗剪强度的发挥系数。

岩体在任意剪切方向上的综合抗剪强度则只能通过岩体剪切试验的计算机模拟^[15, 16]获得。也就是首先计算多个不同正应力作用下, 同一剪切方向上结构面的最小抗剪力组合所对应的抗剪力, 然后按 Mohr-Coulomb 理论拟合该剪切方向上岩体的综合抗剪强度。

6 结 论

(1) 本文提出的结构面扩展简化模型(即岩桥破坏模型)在拉伸裂缝和剪切裂缝扩展的模式上依据结构面扩展与汇合的试验成果,在力学机理上基于 Lajtai 的岩桥破坏理论。

(2) 结构面扩展的简化模型可方便地用于分析实际岩体的连通特性或用于确定岩体的综合抗剪强度。

(3) 路径连通率和名义连通率只是相对于某一组结构面而言的。只有在剪切方向与岩体内某组结构面的平均延伸方向一致时,路径连通率或名义连通率才能被视为常数。

(4) 只有在剪切方向与岩体内某组结构面的平均延伸方向一致时,才能按路径连通率计算沿该组结构面的岩体综合抗剪强度,否则只能使用文献[15, 16]的方法进行岩体剪切试验的计算机模拟,然后直接拟合岩体在任一剪切方向上的综合抗剪强度包线。

参考文献:

- [1] Einstein H H, Stephansson O. Fracture systems, fracture propagation and coalescence[A]. Geoeng2000—An International Conference on Geotechnical & Geological Engineering[C]. Melbourne, Australia, 2000. 1—41.
- [2] Savilahti T, Nordlund E, Stephansson O. Shear box testing and modeling of joint bridges[A]. Barton, Stephansson. Rock Joints [C]. Rotterdam Balkema, 1990. 295—300.
- [3] Bobet A, Einstein H H. Numerical modeling of fracture coalescence in a model rock material[J]. International Journal of Fracture, 1998, **92**: 221—252.
- [4] Vasarhelyi B, Bobet A. Modeling of crack initiation, propagation and coalescence in uniaxial compression[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2000, **33**: 119—139.
- [5] Lajtai E Z. Strength of discontinuous rocks in shear[J]. Geotechnique, 1969, **19**(2): 218—233.
- [6] Einstein H H, et al. The effect of discontinuity persistence on rock slope stability[J]. Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr, 1983, **20**(5): 227—236.
- [7] Shen B, et al. Coalescence of fractures under shear stresses in experiments[J]. Journal of Geophysical Research, 1995, **100**(B4): 5975—5990.
- [8] Chen G, et al. Fracture propagation and coalescence in marble plates with pre-cut notches under compression[A]. Myer, Cook, Goodman, Tsang. Fractured and Jointed Rock Masses[C]. Rotterdam: Balkema, 1995.
- [9] Wong R H C, Chau K T. Crack coalescence in a rock-like material containing two cracks[J]. Int J Rock Mech Min Sci, 1998, **35**(2): 147—164.
- [10] Bobet A, Einstein H H. Fracture coalescence in rock-type materials under uniaxial and biaxial compression[J]. Int J Rock Mech Min Sci, 1998, **35**(7): 836—888.
- [11] Wong R H C, et al. Pattern of coalescence of rock bridge between two joints under shear testing[A]. Proceedings 9th International Congress on Rock Mechanics: Vol 2[C]. Paris, 1999. 735—738.
- [12] Li C, Prikryl R, Nordlund E. The stress—strain behaviour of rock material related to fracture under compression[J]. Engineering Geology, 1998, **49**: 293—302.
- [13] Reyes O, Einstein H H. Failure mechanisms of fractured rock—A fracture coalescence model[A]. Proceedings of 7th International Congress on Rock Mechanics[C]. Aachen, Germany, 1991. 333—340.
- [14] 汪小刚, 陈祖煜, 孙文松. 应用蒙特卡罗法确定节理岩体的连通率和综合抗剪强度指标[J]. 岩石力学与工程学报, 1992, **11**(4): 345—355.
- [15] 杜景灿, 汪小刚, 陈祖煜. 结构面倾角对节理岩体的连通特性和综合抗剪强度的影响[J]. 水利学报, 2002, (5): 41—46.
- [16] 杜景灿, 陈祖煜, 汪小刚. 寻优方法在岩体结构面连通特性和综合抗剪强度研究中的应用[J]. 岩石力学与工程学报(待刊).
- [17] Jennings J E. A mathematical theory for the calculation of the stability of open cut mines[A]. Proc Symposium on the Theoretical Background to the Planning of Open Pit Mines[C]. Johannesburg, 1970. 87—102.