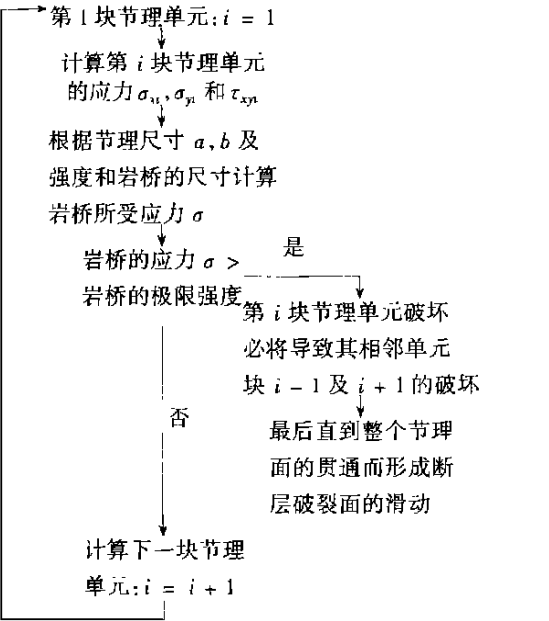


力全部转移给岩桥; ② 若 σ_y 为压应力, 且有 $\tau_{xy} < \tau_s$ (节理面的抗剪强度, 可由 $\tau_s = C_s - \sigma_y \cdot \tan \Phi_s$ 求得, C_s, Φ_s 分别为节理面的凝聚力和摩擦角), 此时节理闭合, 将传递剪应力; ③ 若 σ_y 为压应力, 且有 $\tau_{xy} > \tau_s$, 节理面闭合, 但发生了上下盘错动, 于是节理面上的剪应力是 τ_s , 其方向与 τ_{xy} 相同, 而转移的应力值为 $\tau_{xy} - \tau_s$ 。

根据上述的力学分析, 对图 1 中的节理单元进行编号, 编号依次为 1, 2...i...n。下面给出计算流程:



为了简化计算过程, 在 a/b 值较大的情况下, 可假定节理沿长轴 a 两端方向扩展。实际上, 野外的节理在应力作用下的延伸、扩展并非如此, 而是沿与节理两端成一定角度的方向扩展。但依据力学理论: 材料中椭圆形裂隙的应力集中位于裂隙的尖端, 且裂隙一般都在其尖端的附近开始扩展。Sih 模型^[3]认为, 对于一承受最大主应力 σ_1 和最小主应力 σ_3 的单元块, 其中有一长轴为 a , 短轴为 b 的裂隙, 则裂隙的临界角方向为:

$$\cos 2\beta = -\frac{1}{2} \left[\left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3} \right) \cdot \left(\frac{a+b}{a-b} \right) - \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \right) \cdot \frac{4ab}{a^2 - b^2} \right]$$

当 $b \ll a$ 时, 拉应力和剪应力的集中点出现在靠近 a 轴的端部, 而非其顶端的尖部。此时拉应力的集中位置由 α 来确定:

$$\cos 2\alpha = \frac{a^2 + b^2}{a^2 - b^2} - \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \right)^2 \cdot \frac{8a^2b^2}{(a^2 - b^2)(a + b)^2}$$

表 1 给出了 σ_1/σ_3 和 a/b 在不同比值条件下, 拉应力的集中位置 α 。比较 α 和 β , 显然 $\alpha \neq \beta$ 。而由表 1 可知, 在拉应力状态下, 裂纹的扩张不是从裂纹尖端开始的, 而是偏离尖端一定的角度 α 。且 α 的大小与 σ_1/σ_3 、 a/b 比值有关。当 σ_1/σ_3 比值恒定时, α 随 a/b 的增大而减小; 而当 a/b 比值恒定时, α 随 σ_1/σ_3 的增大而减小。由此, 我们从中可以得到这样的启示: 超大规模的脆性断层起源于地壳岩体中的微裂隙。微裂隙在应力作用下, 生成次一级裂隙, 而次一级裂隙相对于微裂隙, 其 a/b 值变大, 即相应地次一级裂隙与主应力轴的夹角变小。依次类推, 随着地壳断层规模的不断扩大, 其与主应力轴的方向夹角也随之减小, 最后甚至平行于主应力轴方位。这一现象可以从世界应力场分布图中得到证实^[4]: 在大规模断层发育的地区, 断层的发育方向也基本上接近该区域的主应力方向。

表 1 α 与比值 σ_1/σ_3 及 a/b 的关系

Tah 1 The relationship between α and σ_1/σ_3 and a/b

σ_1/σ_3	a/b			
	2	10	100	1000
2	83	32	3.5	0.35
4	54	16.5	1.8	0.18
10	18.5	10	1.1	0.11

1.2 两组雁行节理发育的情况

野外的节理常以两组发育为多, 如常见的雁行节理、共轭节理等。这里以雁行节理为例, 分析两组雁行节理相互贯通的机制。室内实验表明, 雁行节理的扩展都起始于节理尖端的拉应变区, 其中有 3 种典型的情况, 如图 2 所示。

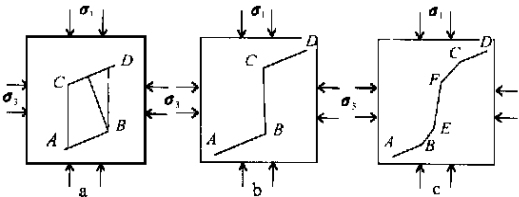


图 2 雁行节理发育的岩体

Fig 2 Rock mass including plumose joints

图 2 (a) 表示雁行节理之间的岩桥破坏属

于张拉型. 设两节理 AB 、 CD 间距为 h_0 , 岩桥贯通的分支裂纹与 AB 夹角为 α , 则分支裂纹长度为: $L = h_0 / \cos \alpha$, 根据分支裂纹尖端处的应力强度因子可计算出岩桥的贯通强度.

图 2 (b) 表示岩桥破坏属剪切破坏型, 即岩桥的最终破坏为剪切破坏型, 剪切破坏过程满足摩尔—库仑准则:

$$\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\alpha +$$

$$f_r(\sigma_1 \sin^2 \alpha + \sigma_3 \cos^2 \alpha) + C_r = 0$$

则岩桥的贯通强度为

$$\sigma_1 = -\frac{\sin 2\alpha + 2f_r \cdot \cos^2 \alpha}{2f_r(\sin^2 \alpha - \sin 2\alpha)} \sigma_3 - \frac{2C_r}{2f_r(\sin^2 \alpha - \sin 2\alpha)}$$

式中, α 为岩桥倾角, f_r 为岩石摩擦系数, C_r 为岩石凝聚力.

图 2 (c) 表示拉剪复合破坏型: 由岩桥中部首先产生的张裂纹 EF 和原生裂纹 AB 、 CD 扩展出来的剪切裂纹相连通而引起的.

综合图 2, 无论何种情况, 岩桥扩展破坏形成的次生裂纹均接近主应力轴的方向.

1.3 共轭节理发育的情况

图 3 中, m 和 n 、 m' 和 n' 为共轭节理, 在应力 σ_1 和 σ_3 作用下, 假定共轭节理均穿越同一种岩性, 那么它们的临界应力强度因子 K_{IC} 相同. 在给定的 σ_1 和 σ_3 及 m 、 n 节理的尺寸后, 可分别计算出 m 和 n 的应力强度因子 K_m 和 K_n . 比较 K_m 、 K_n 和 K_{IC} , 若其中有一条达到临界应力状态, 则首先扩展、破坏. 如果 $K_m = K_{IC}$, 而 $K_n < K_{IC}$, 那么 m 扩展, 将与 m' 贯通, 此后可按雁行节理情况进行岩桥贯通强度的计算, 从而可描绘出节理扩展破坏的路径曲线. 在多期构造应力作用下, 根据 Sih^[3] 计算模型, 随着节理的贯通, 最终破裂面的方位也将接近主应力轴.

2 实例分析

地壳中大多数的浅源地震, 本质上是岩石大规模的变形开裂及岩体的扩展破坏过程. 此过程服从弹性断裂力学方程. 因此, 借助弹性断裂力学理论和观点来研究地震的孕育发展, 将为地震学中地震预测这一研究领域提供新的思路.

断裂力学中的 3 种典型裂纹: I 型 (张开型)、II 型 (滑开型) 和 III 型 (撕开型), 分别对

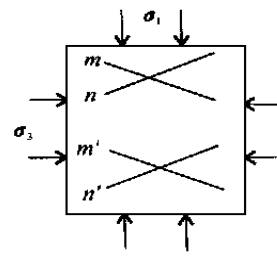


图 3 共轭节理发育的岩体

Fig 3 Rock mass including conjugated joints

应于地震学中的张裂断层、平推断层或走向滑动断层, 倾向滑动断层. 一般观点认为, 地震发生前, 主要是应变能的积蓄并逐渐趋于一极限值, 超出岩石的屈服强度后, 积蓄的能量急剧释放, 发生大规模的地震, 然而, 这仅仅是从能量的角度来研究地震的孕育、发生过程. 此外, 从 3 种类型裂纹的应力强度因子计算公式 (例如 II 型裂纹的 $K_{II} = \tau(\pi a)^{1/2}$)^[5] 可以看出, 还可从地震区域内的应力状态和岩石中的节理、裂纹的长度研究地震的孕育发生过程. 例如在裂隙稳态扩展过程中, 随着区域应力场的逐渐增加, 导致 K_{II} 接近临界应力强度因子 K_{IIc} , 从而发生地震, 而且随着周围环境产生的应力腐蚀开裂 (如水岩化学作用等), 导致裂纹半长 a 的不断增大, 同样会使应力强度因子增大, 从而产生失稳扩展^[6].

地震预报应结合定性分析和定量分析. 定性分析是根据野外地震地质调查, 分析该体系和裂面是否具有活动性; 定量分析则要根据测定构造应力的 大小、裂面产状和应力强度因子 K , 计算发生地震的可能性. 由上述对含一组节理、雁行节理和共轭节理的岩体在应力作用下的扩展破坏过程的分析, 可以预测, 在条件相同的情况下, 共轭节理发育的岩体的破坏趋势应大于雁行节理, 而雁行节理发育的岩体的扩展趋势应大于一组节理不连续发育情况. 将此预测推广到地震预报中, 对两组断层构造的相交处往往是潜在的发震地带这一普遍的地质现象, 作出合理的解释. 例如, 新丰江水库地震的主震面就发生在北东向和北西向交叉处. 沈崇刚等^[7] 根据 1962 年 3 月的新丰江水库地震, 求解出一组交叉裂面的主震断层解和应力主轴方位, 如表 2.

由表 2 数据, 可证实上述的预测. 此外, 黄新辉等^[8] 根据断裂安全度 G 的概念, 采用有限元法和正交设计法, 对广东地区的断裂安全度进行了

分析, 计算结果也表明, 珠江三角洲南侧的北东东向断裂与北西向断裂的交汇处具有潜在的地震危险, 广州附近的北东东向断裂与珠江口断裂的交汇处, 西江断裂与广州附近的北东东向断裂交汇处的三水—四会一带都是未来潜在的发震地带。

表 2 一组交叉裂面的主震断层解和应力主轴方位

Tab 2 The direction of main earthquake and principal stress axial of one group crossing faces					
产状	断层解		应力主轴		
	第 1 组	第 2 组	主压	主张	中间
走向	北 62° 东	北 28° 西	北 73° 西	北 17° 东	南 51° 东
倾向	北西 80°	南西 88°	南东 8°	南西 6°	北西 80°

3 结 语

本文结合含节理裂隙岩体的发育扩展过程, 分别分析了一组、二组节理发育情况下的断层形成过程, 得出如下结论:

- (1) 地壳浅层中某些大规模脆性断层的形成过程与室内含节理或裂纹的岩体在应力作用下的扩展破坏过程基本相似, 即在多次构造应力作用下, 裂隙面的扩展方向将逐渐接近主应力轴方位。
- (2) 条件相同时, 含共轭节理的岩体在应力的作用下的扩展破坏趋势大于含雁行节理岩体的, 而含雁行节理岩体的大于含一组不连续节理岩体的。
- (3) 地震孕育过程的分析应综合能量、所受应力和断层面上裂纹的长度三个方面。
- (4) 地壳中两组或多组断层面的交汇处, 往往是潜在的发震地带。

The Process of Formation from Joints Rock Mass to Brittle Faults

ZHANG Peng cheng, TANG Lian sheng, ZOU He ping, WANG Yang
(Department of Geoscience, Zhongshan University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Based on the rock mass which included joints and fractures and the data obtained from laboratory tests of fracture mechanics, the deformations and failures of rock mass are analyzed under different conditions; one group of joints, plumose joints and conjugated joints. The results show that rock discontinuities with the aspects of external load will extend, expand and fail in the direction of principal stress axial. According to the analyses of the information of some earthquakes in Guangdong Province, it could be reasoned that the large brittle faults in lower crust is basically in consistent with the procedures of the deformations and failures of rocks discontinuities.

Keywords: joint; brittle fault; fracture; stress

本文未考虑赋水环境中的节理裂隙在应力作用下的岩桥贯通模型, 对于节理裂隙中的水, 有物理作用力如静水压力或浮托力等, 也有水化学作用^[9] (即水—岩相互作用, 它是动态演化的), 囿于篇幅, 复杂边界条件下非均质、各向异性的节理裂隙岩体扩展贯通规律及其与脆性断层形成的关系问题, 将另文论述; 此外, 本文的研究也只限于地壳浅层中的某些因节理裂隙扩展贯通而形成的脆性断层, 对于深层, 因温度、压力的增加, 岩体的性质变为韧性、塑性, 而对于韧、塑性岩体的变形破坏, 弹塑性、塑性岩石断裂力学理论的研究目前尚不成熟, 有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 潘别桐, 井兰如. 岩体结构概率模型模拟及应用. 岩石力学新进展[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 1987. 5—9.
- [2] 张清. 岩石力学基础[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1986. 10—18.
- [3] 李货, 尹光志, 许光. 岩石断裂力学[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1998. 97—100.
- [4] 黄玉昆, 邹和平, 张珂. 新构造学[M]. 广州: 广东省地图出版社, 1996. 70—77.
- [5] 库贵华, 张少雄. 断裂力学教程[J]. 西安: 西北工业大学出版社, 1994. 20—24.
- [6] 汤连生, 张鹏程, 王思敬. 岩石水化学损伤及其定量方法的探讨[A]. 见: 第六届全国岩石力学与工程学术论文集[C]. 武汉, 2000(10). 304—309.
- [7] 沈崇刚. 新丰江水库地震及其对大坝的影响[J]. 中国科学, 1974(2): 23—28
- [8] 黄新辉, 丁原章, 孙苟英. 广东地区断裂安全度的计算[J]. 华南地震, 1995, 15(4): 18—26.