

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.2965

考虑裂隙附加水压的岩体断裂强度分析

李东奇, 李宗利, 吕从聪

(西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 修建大坝、隧洞等工程活动必将对其周围岩体产生扰动, 导致赋存于岩体裂隙中的水产生附加水压, 从而使岩体在扰动荷载和裂隙水压作用下沿裂隙面失稳扩展。首先基于夹杂理论, 推导出扰动荷载所引起的裂隙附加水压的解析式, 并应用数值分析进行验证, 然后分析裂隙附加水压随岩石力学性质、裂隙形状以及裂隙倾角的变化规律。其次, 应用岩石压剪断裂准则, 推导出考虑裂隙附加水压的岩体断裂强度解析式。最后结合算例, 进一步探讨了裂隙附加水压对岩体断裂强度的影响规律。结果表明, 裂隙附加水压降低了岩体断裂强度, 增大了岩体发生断裂破坏的倾角范围, 使岩体更易于沿裂隙面发生水力劈裂失稳破坏; 另外, 岩石弹性模量、裂隙形状因子以及裂隙倾角对裂隙附加水压有显著影响, 岩体断裂强度随岩石弹性模量和裂隙形状因子的增大而增大, 且随裂隙倾角的增大, 其增大的趋势更加明显。

关键词: 裂隙岩体; 裂隙附加水压; 水力劈裂; 断裂强度

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018) 09-3174-08

Analysis of fracture strength of rock mass considering fissure additional water pressure

LI Dong-qi, LI Zong-li, LÜ Cong-cong

(College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Disturbance induced by the construction of dams, tunnels and other engineering activities occurs in the surrounding rock mass and causes additional water pressure in the water of rock mass fracture. Thus, the unstable rock fracture propagates along the fissured surface under the disturbance load and fissure additional water pressure. Firstly, an analytical expression of fissure additional water pressure caused by the disturbing load is derived based on the inclusion theory, which is verified by numerical analysing. Then variation regularity of fissure additional water pressure is analysed under different rock mechanical properties, fracture shapes and inclination angles. Secondly, considering the influence of fissure additional water pressure, an analytical formula of fracture strength of rock mass is deduced by using the compressive shear fracture criterion. Finally, the effect of fissure additional water pressure on fracture strength is further investigated with an example. The results show that fissure additional water pressure reduces the fracture strength and increases the inclination angle range of fracture failure, which makes the rock mass more prone to hydraulic fracturing along the fissured surface. In addition, rock elastic modulus, fracture shape coefficient and inclination angle can have a significant influence on the additional water pressure. The fracture strength of rock mass increases with the increase of rock elastic modulus and fracture shape coefficient, and its increasing trend is more significant with the increase of fracture inclination angle.

Keywords: fractured rock mass; fissure additional water pressure; hydraulic fracturing; fracture strength

1 引 言

自然界中的岩体存在着大量的断层、节理、裂隙等结构面, 使得岩体表现出复杂的力学特性。裂隙岩体是由岩块和结构面组成的地质体, 其强度与

岩石材料性质、结构面特征(数量、方向、间距、性质等)和赋存条件(地应力、水、温度等)有关^[1]。大坝修建、隧洞开挖及运行等工程活动会改变岩体的赋存条件, 使岩体失去原有的平衡状态, 易导致岩体中的裂隙扩展, 从而发生断裂破坏, 其

收稿日期: 2016-12-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.51379178)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51379178).

第一作者简介: 李东奇, 男, 1993 年生, 博士研究生, 主要从事水工结构设计理论与材料方面的研究。E-mail: 757879375@qq.com

通讯作者: 李宗利, 男, 1967 年生, 博士, 教授, 主要从事水工结构与岩土工程稳定分析理论方面的研究工作。E-mail: Zongli02@163.com

中水力劈裂作用对岩体的断裂强度有较大影响。尤其在处于高水头、大埋深等恶劣水文地质条件下的岩体工程中，水力劈裂是影响岩体及上部建筑物稳定性的重要因素之一^[2]。

许多学者引入断裂力学来研究岩体的断裂强度问题，并考虑了水力劈裂作用。朱珍德等^[3]运用断裂力学理论分析了裂隙中水压对岩体强度的影响。汤连生等^[4]把外界水对岩体断裂的作用分为水压的劈裂作用以及对裂纹面上的剪切强度（黏聚力与内摩擦角）的损伤作用。李宗利等^[5]把水力劈裂作用下的岩体裂纹扩展分为拉剪复合断裂和压剪复合断裂，推导出岩体破坏时临界水压计算公式。盛金昌等^[6]分析了水工压力隧洞围岩区的岩体在隧洞水压的作用下是否会发生水力劈裂。卞康等^[7]推导了水工隧洞围岩中拉剪型和压剪型裂纹扩展时的临界内水压力表达式。但以上研究均未考虑裂隙内水压与周围岩石之间的耦合作用。岩体水力劈裂是裂隙岩体渗流-应力耦合研究的一个子课题，岩体的力学反应（变形、破坏、稳定性等）与裂隙中的水之间存在应力耦合^[8]。隧洞岩体在内水压作用下，岩体受到挤压而使岩体裂隙中的水产生附加水压，这时岩体常常发生由附加水压所引起的水力劈裂破坏。邓华锋等^[9]分析了库区水位大幅变化引起岩体裂隙中水压力集中而造成岩体边坡失稳。但是文中只考虑了由于外界水位变化所引起的裂隙水压的变化，没有考虑岩体应力状态改变所引起的裂隙附加水压的劈裂作用。针对以上问题，本文在已有研究^[3-9]的基础上，运用压剪断裂准则，就扰动荷载引起的裂隙附加水压对岩体断裂强度的影响作进一步的研究。

2 扰动荷载作用下裂隙附加水压的解析式

2.1 弹性体应力与孔洞中的液体体积变化耦合关系

假设均质基体内均匀分布着椭球孔洞，孔洞中充满液体，在外荷载作用下孔洞体积减小，孔洞中的液体受到压缩从而产生附加压力。假定液体的压缩系数为一常数，由普通物理知识可得

$$\frac{\Delta\eta}{\eta_0} = -\frac{\Delta V_{\text{cav}}}{V_{\text{cav}}} = k_{\text{cav}} q_{\text{cav}} \quad (1)$$

式中： η_0 为液体的初始密度； $\Delta\eta$ 为液体的密度变化量； V_{cav} 、 ΔV_{cav} 分别为椭球孔洞体积以及孔洞体积变化量； k_{cav} 为液体的压缩系数，其倒数为体积模量； q_{cav} 为液体体积变化而产生的液体压力。

假定椭球孔洞外围介质不透水，则孔洞中的液

体处于封闭的微小区域内保持质量不变，如图 1 所示，把弹性体在外荷载作用下的应力状态图 1(a) 分解为图 1(b)、1(c)、1(d) 3 种状态的叠加，以弹性体为基体，液体作为夹杂体，可得^[10]

$$\frac{V}{V_{\text{cav}}} \text{tr}(\mathbf{H}_{\text{cav}} : \boldsymbol{\sigma}) + q_{\text{cav}} \left[\frac{V}{V_{\text{cav}}} \text{tr}(\mathbf{H}_{\text{cav}} : \mathbf{I}) - \frac{3(1-2\nu_0)}{E_0} \right] = -k_{\text{cav}} q_{\text{cav}} \quad (2)$$

式中： V 为弹性体总体积； \mathbf{H}_{cav} 为含椭球孔洞体的四阶柔度张量，与椭球孔洞的几何形状有关； $\boldsymbol{\sigma}$ 为外荷载应力张量； \mathbf{I} 为四阶单位张量； E_0 、 ν_0 为基体的弹性模量与泊松比。图 1 中 \mathbf{N} 为裂隙面的方向矢量，式 (2) 等号左边第 1 部分对应图 1(b)、1(c) 的叠加，等于无液体时外荷载作用下孔洞的体应变；等号左边第 2 部分对应图 1(d)，等于液体压力作用下孔洞的体应变；等号右边为液体在外荷载作用下的体应变，等于孔洞的体应变。弹性体在外荷载作用下孔洞体积减小，使孔洞中液体受到挤压从而产生压力，产生的液体压力又会作用于弹性体，该式体现了弹性体应力与孔洞中的液体体积变化之间的应力耦合。需要说明的是，当孔洞在外荷载作用下体积增大时，孔洞中的液体不会产生液体压力，此时可能发生负压现象，不属于本文的研究范畴。

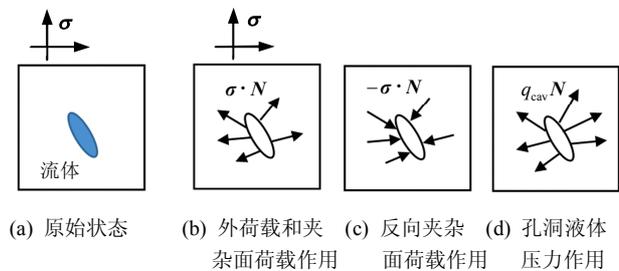


图 1 含饱和液体的弹性体应力分解

Fig.1 Stress decomposition of elastomer with a fluid-filled cavity

2.2 裂隙附加水压的解析式

对于含裂隙的饱和岩体，在扰动荷载作用下裂隙体积减小会引起裂隙中的水体产生附加水压。岩体内裂隙分布一般是随机的，为了便于研究，以图 2 所示的含平面穿透闭合单裂隙的表征单元体作为研究对象，假定裂隙受到的初始竖直和水平地应力分别为 p_1 、 p_3 ，初始裂隙水压力为 q_0 ，扰动后的竖直和水平地应力分别为 σ_1 、 σ_3 ，扰动后的裂隙总水压力为 q_s ，裂隙长轴与最大主应力 σ_1 间的夹角为 α 。

对于图 2 所示平面穿透闭合单裂隙，属于平面

应变问题，取单位长度进行分析可得

$$\frac{\Delta V_{cav}}{V_{cav}} = \frac{\Delta S_{cav}}{S_{cav}} \quad (3)$$

式中： S_{cav} 、 ΔS_{cav} 分别为岩体裂隙面积以及裂隙面积变化量。

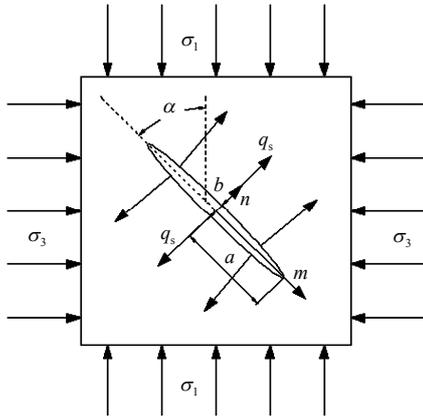


图 2 含单裂隙计算模型

Fig.2 Model containing a single fracture

于是，式 (1) 可写为

$$\frac{\Delta \eta}{\eta_0} = -\frac{\Delta S_{cav}}{S_{cav}} = kq \quad (4)$$

式中： q 为扰动荷载引起的裂隙附加水压； k 为岩体裂隙水的压缩系数，其倒数为水的体积模量。

裂隙附加水压以面力的形式作用于裂隙面，以岩体为基体，裂隙中的水为夹杂体，可得

$$\frac{S}{S_{cav}} \text{tr}(\mathbf{H} : \boldsymbol{\sigma}_t) + q \left[\frac{S}{S_{cav}} \text{tr}(\mathbf{H} : \mathbf{I}) - \frac{2(1+\nu)(1-2\nu)}{E} \right] = -kq \quad (5)$$

式中： S 为表征单元体的面积； $\boldsymbol{\sigma}_t$ 为扰动荷载张量； E 、 ν 为岩石的弹性模量与泊松比。 \mathbf{H} 为含椭圆裂隙的四阶柔度张量，平面应变状态下 \mathbf{H} 为^[11]

$$\mathbf{H} = \frac{2(1-\nu^2)}{E} \frac{1}{S} \pi [a(2a+b)nnnn + b(2b+a)mmmm + \frac{1}{2}(a+b)^2(mn+nm)(mn+nm) - ab(mmnn + nnmm)] \quad (6)$$

式中： a 、 b 分别为裂隙的半长与半宽； m 、 n 分别为 a 和 b 的方向向量。

对于岩体裂隙 $\zeta = \frac{b}{a} \ll 1$ ，将式 (6) 代入式 (5)

可得裂隙附加水压为

$$q = -\frac{1}{1+\delta} \sigma_d \quad (7)$$

$$\delta = \zeta \frac{kE - 2(1+\nu)(1-2\nu)}{2(1-\nu^2)} \quad (8)$$

式中： σ_d 为扰动荷载在垂直于裂隙面方向的应力分量； $\zeta = \frac{b}{a}$ ，为裂隙形状因子，反映椭圆形裂隙的几何形状； δ 为岩体与裂隙中的水之间的耦合参数。

由应力分析可得扰动荷载在垂直于裂隙面方向的应力分量为

$$\sigma_d = -\left(\frac{\sigma_1 - p_1 + \sigma_3 - p_3}{2} - \frac{\sigma_1 - p_1 - \sigma_3 + p_3}{2} \cos 2\alpha \right) \quad (9)$$

岩土力学中规定受压为正，而借助夹杂理论推导过程中以受拉为正，故在式 (9) 前应加一个负号。

在前面的推导中认为裂隙周围介质是非透水，这与实际不符。考虑岩体的弱透水实际情况，在裂隙附加水压前乘以折减系数 ϕ 来近似考虑由于岩石弱渗透性所引起的裂隙附加水压力减小，并将式 (9) 代入式 (7)，得

$$q = \frac{\phi}{1+\delta} \left(\frac{\sigma_1 - p_1 + \sigma_3 - p_3}{2} - \frac{\sigma_1 - p_1 - \sigma_3 + p_3}{2} \cos 2\alpha \right) \quad (10)$$

式中： ϕ 为裂隙附加水压的折减系数，其大小与岩石的渗透性有关。从工程安全角度出发， ϕ 可取 1，此时为最不利情况，裂隙附加水压力最大。

岩体裂隙总水压力等于初始裂隙水压力与附加水压力之和，可推得裂隙总水压力为

$$q_s = q_0 + \frac{\phi}{1+\delta} \left(\frac{\sigma_1 - p_1 + \sigma_3 - p_3}{2} - \frac{\sigma_1 - p_1 - \sigma_3 + p_3}{2} \cos 2\alpha \right) \quad (11)$$

3 裂隙岩体断裂强度

3.1 不考虑裂隙附加水压的岩体断裂强度

裂隙岩体在地应力和裂隙水压力的作用下破坏形式大多为压剪断裂破坏^[6]。当不考虑扰动荷载在岩体裂隙中引起的附加水压时，岩体发生压剪破坏应满足裂隙面正应力 $\sigma_n \geq 0$ ，即

$$q_0 \leq \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\alpha \quad (12)$$

岩体裂隙失稳扩展时对应的最大主应力定义为岩体断裂强度，则根据裂隙面应力状态，应用压剪断裂准则^[12-13]，可得岩体断裂强度^[3-4]：

$$\sigma_1 = \frac{\frac{\bar{k}_{\text{IIc}}}{\sqrt{\pi a}} + c - (\lambda + f)q_0 + \sigma_3 \left[\frac{1}{2} \sin 2\alpha + (\lambda + f) \cos^2 \alpha \right]}{\frac{1}{2} \sin 2\alpha - (\lambda + f) \sin^2 \alpha} \quad (13)$$

式中： c 、 f 分别为岩体裂隙面上凝聚力和摩擦系数； \bar{k}_{IIc} 为岩石压缩状态下 II 型断裂韧度； λ 为压剪参数，取决于岩石材料压剪特性，等于材料压缩状态下 II 型断裂韧度与 I 型断裂韧度的比值， $\lambda = \bar{k}_{\text{IIc}} / k_{\text{Ic}}$ 。

3.2 考虑裂隙附加水压的岩体断裂强度

当考虑裂隙附加水压时，裂隙水压以面力的形式作用于裂隙面，由应力状态分析可得裂隙面上的正应力 σ_n 和切应力 τ_n 分别为

$$\begin{aligned} \sigma_n = & \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\alpha - q_s = \\ & \left(1 - \frac{\phi}{1 + \delta} \right) \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\alpha \right) - \\ & q_0 + \frac{\phi}{1 + \delta} \left(\frac{p_1 + p_3}{2} - \frac{p_1 - p_3}{2} \cos 2\alpha \right) \quad (14) \end{aligned}$$

$$\sigma_1 = \frac{\frac{\bar{k}_{\text{IIc}}}{\sqrt{\pi a}} + c + (\lambda + f) \left[\frac{\phi}{1 + \delta} \left(\frac{p_1 + p_3}{2} - \frac{p_1 - p_3}{2} \cos 2\alpha \right) - q_0 \right]}{\frac{1}{2} \sin 2\alpha - (\lambda + f) \left(1 - \frac{\phi}{1 + \delta} \right) \sin^2 \alpha} + \frac{\sigma_3 \left[\frac{1}{2} \sin 2\alpha + (\lambda + f) \left(1 - \frac{\phi}{1 + \delta} \right) \cos^2 \alpha \right]}{\frac{1}{2} \sin 2\alpha - (\lambda + f) \left(1 - \frac{\phi}{1 + \delta} \right) \sin^2 \alpha} \quad (20)$$

当 ϕ 取 0 时，裂隙附加水压等于 0，则式 (20) 可化为式 (13)，即考虑裂隙附加水压的岩体断裂强度公式化为不考虑裂隙附加水压的岩体断裂强度公式。

裂隙岩体的强度由裂隙面和岩石（岩块）强度的最小值决定，岩体沿裂隙失稳扩展的前提是裂隙周围的岩石自身还没有破坏，否则岩体沿着岩石自身破坏。岩石破坏时对应的最大主应力定义为岩石强度，则在相同的最小主应力下，岩体沿裂隙失稳扩展时应满足岩体断裂强度小于等于岩石强度。

由最大主应力 σ_1 和最小主应力 σ_3 所表示的岩石强度库仑准则为^[14]

$$\sigma_1 = \frac{2c_0 \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} + \sigma_3 \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (21)$$

$$\tau_n = -\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\alpha \quad (15)$$

岩体发生压剪破坏应满足 $\sigma_n \geq 0$ ，故有

$$\begin{aligned} q_0 \leq & \left(1 - \frac{\phi}{1 + \delta} \right) \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\alpha \right) + \\ & \frac{\phi}{1 + \delta} \left(\frac{p_1 + p_3}{2} - \frac{p_1 - p_3}{2} \cos 2\alpha \right) \quad (16) \end{aligned}$$

考虑裂隙扩展要求剪应力克服裂隙面上摩擦阻力，可推得有效剪应力为

$$\begin{aligned} \tau_c = & \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\alpha - f \sigma_n - c = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\alpha - \\ & f \left[\left(1 - \frac{\phi}{1 + \delta} \right) \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\alpha \right) - \right. \\ & \left. q_0 + \frac{\phi}{1 + \delta} \left(\frac{p_1 + p_3}{2} - \frac{p_1 - p_3}{2} \cos 2\alpha \right) \right] - c \quad (17) \end{aligned}$$

根据断裂力学理论，可求得裂隙尖端应力强度因子为

$$k_{\text{I}} = -\sigma_n \sqrt{\pi a} \quad (18)$$

$$k_{\text{II}} = \tau_c \sqrt{\pi a} \quad (19)$$

运用压剪断裂准则^[12-13]： $\lambda k_{\text{I}} + |k_{\text{II}}| = \bar{k}_{\text{IIc}}$ ，可推得考虑裂隙附加水压的岩体断裂强度：

式中： φ 为岩石材料的内摩擦角； c_0 为岩石凝聚力。

4 算例分析

引用文献[15]中的大理岩参数，抗压强度为 120 MPa，弹性模量 $E = 30$ GPa，泊松比 $\nu = 0.25$ ，

I 型裂纹断裂韧度 $k_{\text{Ic}} = 15.2$ MN/m^{3/2}，II 型裂纹断裂韧度 $k_{\text{IIc}} = 11.2$ MN/m^{3/2}，裂隙面上凝聚力与摩擦系数分别为 0 MPa 和 0.577，裂隙半长 $a = 1$ m， $\zeta = 0.01$ ，不考虑岩石的渗透性，取 $\phi = 1$ ，水的体积模量取 2.18 GPa。根据文献[16]的研究： $\bar{k}_{\text{IIc}} = k_{\text{IIc}} + k_c$ 。本次为研究方便，取 $\bar{k}_{\text{IIc}} = 1.2k_{\text{IIc}}$ ，故 $\lambda = 0.884$ 。取裂隙岩体受到的初始地应力 $p_1 = p_3 = 5$ MPa，初始裂隙水压力 $q_0 = 2$ MPa，扰动后的地应力 $\sigma_3 = 10$ MPa。取大理岩的内摩擦角为 55° 时，由式 (21) 可求得岩石强度 $\sigma_1 = 220.6$ MPa。

4.1 裂隙附加水压解析式的数值验证

为了从另一角度论证扰动荷载所引起的裂隙附加水压的解析式(10)的正确性,以 $\alpha=90^\circ$ 为例,建立如图3所示的有限元分析模型。模型尺寸取 $10\text{ m}\times 10\text{ m}$,裂隙周围最小网格尺寸为 0.1 m ,裂隙中水体按弹性体近似计算,分析结果见表1。从表中可以看出,解析式计算结果与数值模拟结果基本一致,证明了本文提出的解析计算式的正确性。当裂隙倾角为 45° 时,解析式计算结果与数值模拟结果误差较大,分析原因在于水体不同于弹性体,本次为便于分析,取水体为弹性体来近似计算。

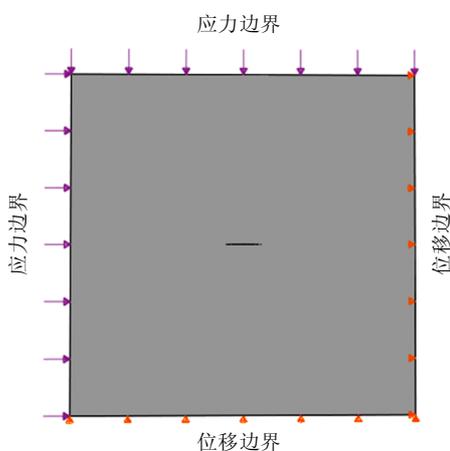


图3 裂隙岩体有限元模型

Fig.3 Finite element model of fractured rock mass

表1 解析解与有限元方法的裂隙附加水压结果比较

Table 1 Comparison of fissure additional water pressure between analytical method and FEM

| 裂隙倾角/ $^\circ$ | q/MPa | | 误差/% |
|----------------|----------------|--------|--------|
| | 解析解 | 有限元解 | |
| 0 | 4.687 | 4.717 | 0.640 |
| 30 | 14.062 | 14.128 | 0.469 |
| 45 | 23.436 | 25.337 | 8.111 |
| 60 | 32.811 | 31.772 | -3.167 |
| 90 | 42.185 | 42.011 | -0.412 |

4.2 裂隙附加水压的变化规律

由式(10)易得,裂隙附加水压随扰动荷载的增大而增大,随岩石的渗透性的增大而减小,为研究其他参数对裂隙附加水压的影响,取 $\sigma_1=50\text{ MPa}$, $\phi=1$ 。首先对岩石的力学特性进行分析,根据大理岩、花岗岩、石英岩等常见岩石的弹性模量的变化范围,对 E 取 $20\sim 200\text{ GPa}$,分析裂隙附加水压的变化规律。

图4为裂隙附加水压随岩石弹性模量的变化规律曲线。从图中可以看出,裂隙附加水压随岩石弹

性模量的增大而减小。随着岩石弹性模量的增加,岩体在扰动荷载作用下变形减小,即裂隙中的水变形减小,导致裂隙附加水压减小。

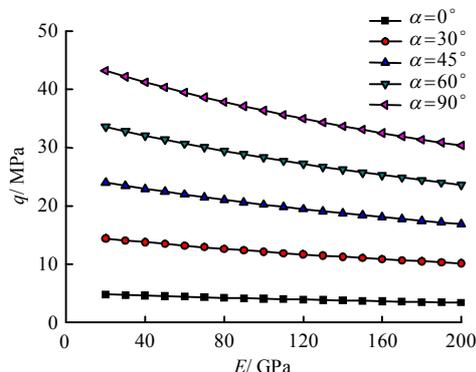


图4 岩石弹性模量对裂隙附加水压的影响

Fig.4 Influence of rock elastic modulus on fissure additional water pressure

其次,对裂隙形状进行分析,对裂隙形状因子 ζ 取 $0.001\sim 0.010$,分析裂隙附加水压的变化规律。

图5为裂隙附加水压随裂隙形状的变化规律曲线。从图中可以看出,裂隙附加水压随着裂隙形状因子的增大而减小。当裂隙长度不变,裂隙形状因子的增大,即裂隙宽度增大,使裂隙抵抗变形的能力增加,裂隙中的水变形减小,从而导致裂隙附加水压减小。

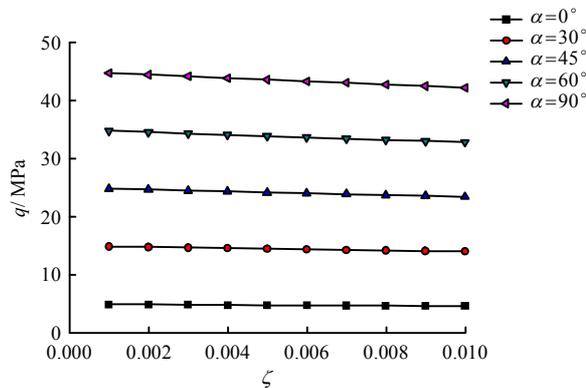


图5 裂隙形状对裂隙附加水压的影响

Fig.5 Influence of fracture shape on the fissure additional water pressure

另外,从图4、5中可知,裂隙倾角对附加水压的影响,在相同的岩石弹性模量和裂隙形状下,裂隙倾角越大,附加水压变化趋势越明显。

4.3 裂隙附加水压对岩体断裂强度的影响

分别对不考虑裂隙附加水压的岩体断裂强度与考虑裂隙附加水压的岩体断裂强度两种情况进行分析,来研究裂隙附加水压对岩体断裂强度的影响。

图6为岩体强度随裂隙倾角的变化曲线。从图

中可以看出，当不考虑裂隙附加水压时，岩体在裂隙倾角 α 为 $6.3^\circ \sim 28.1^\circ$ 范围内发生断裂破坏，在其他范围发生岩石自身破坏，且当 $\alpha = 17.2^\circ$ 时， $\sigma_1 = 134.5$ MPa，该点为岩体断裂强度最低点，也是岩体最易沿裂隙面失稳扩展的方向。而当考虑裂隙附加水压时，岩体在 α 为 $3.4^\circ \sim 81.4^\circ$ 范围内发生断裂破坏，在其他范围发生岩石自身破坏，且当 $\alpha = 42.4^\circ$ 时， $\sigma_1 = 37.2$ MPa，该点为裂隙附加水压作用下岩体断裂强度最低点，此时岩体破坏强度远小于岩石强度。

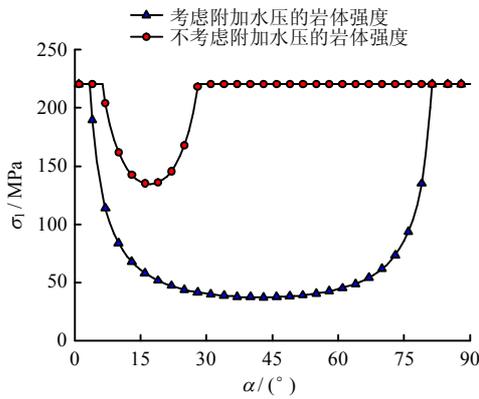


图 6 裂隙附加水压对岩体断裂强度影响
Fig.6 Influence of additional water pressure on fracture strength of rock mass

通过分析可知，岩体裂隙中的附加水压改变了岩体最易发生断裂破坏的倾角，当 α 在 $6.3^\circ \sim 28.1^\circ$ 范围内时，裂隙附加水压降低了岩体的断裂强度，当 α 在 $3.4^\circ \sim 6.3^\circ$ 和 $28.1^\circ \sim 81.4^\circ$ 范围内时，裂隙附加水压改变了岩体的破坏形式，由原来的岩石自身破坏变为沿裂隙的断裂破坏。裂隙附加水压降低了岩体断裂强度且增大了岩体发生断裂破坏的倾角范围，使岩体更容易沿裂隙面失稳扩展。

4.4 岩石弹性模量、裂隙形状和裂隙倾角对岩体断裂强度的影响

岩石弹性模量、裂隙形状以及裂隙倾角通过影响裂隙附加水压而影响岩体断裂强度。由图 6 可知，当 α 为 0° 、 90° 时，岩体不发生断裂破坏，因此对 α 取 10° 、 30° 、 45° 、 60° 、 80° ，对 E 取 $20 \sim 200$ GPa，对 ζ 取 $0.001 \sim 0.010$ ，分析岩石弹性模量、裂隙形状以及裂隙倾角对岩体断裂强度的影响。

从图 7、8 可以看出，岩体断裂强度随岩石弹性模量、裂隙形状的变化规律与裂隙附加水压的变化规律相反，岩体断裂强度随着岩石弹性模量和裂隙形状因子的增大而增大。这是因为随着岩石弹性模

量和裂隙形状因子的增大，裂隙附加水压减小，从而降低了裂隙附加水压对岩体的劈裂作用，导致岩体断裂强度的增大。

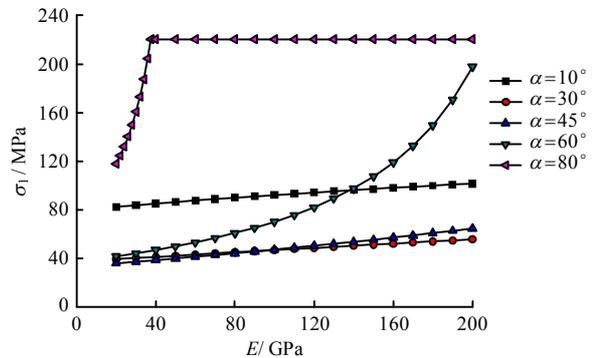


图 7 岩石弹性模量对岩体断裂强度影响
Fig.7 Influence of rock elastic modulus on fracture strength of rock mass

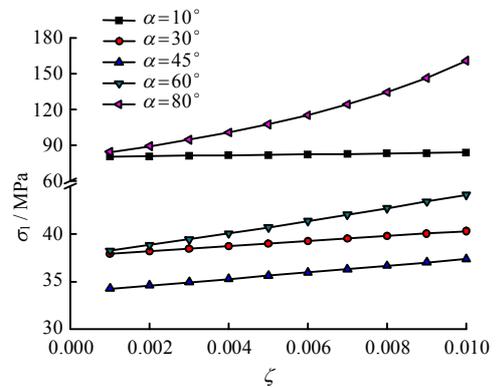


图 8 裂隙形状对岩体断裂强度影响
Fig.8 Influence of fracture shape on fracture strength of rock mass

另外，从图 7、8 中还可以看出，在相同的岩石弹性模量和裂隙形状下，随裂隙倾角的增大，岩体断裂强度增加趋势明显。如图 7 所示，随着岩石弹性模量的增大，不同裂隙倾角的岩体断裂强度变化曲线出现相交现象，如裂隙倾角等于 10° 和 60° 或裂隙倾角等于 30° 和 45° 的情况。分析原因在于，当岩石弹性模量等于 20 GPa 时，裂隙倾角等于 45° 和 60° 的岩体断裂强度值分别比裂隙倾角等于 30° 和 10° 的岩体断裂强度值低，但随岩石弹性模量的增大，裂隙倾角等于 45° 和 60° 的岩体断裂强度增大速率更快。当裂隙倾角等于 80° 时，随着岩石弹性模量的增大，岩体的断裂强度逐渐增大，但当增长到岩石强度时，岩体即使存在裂隙也发生岩石自身破坏。

5 结 论

(1) 基于夹杂理论推导出扰动荷载所引起的裂

隙附加水压的解析式, 并应用数值分析进行验证。裂隙附加水压的大小与岩石力学性质、岩石渗透性、裂隙形状、裂隙倾角以及扰动荷载有关。当不考虑岩石渗透性且荷载固定时, 裂隙附加水压随岩石弹性模量和裂隙形状因子的增大而减小, 且随裂隙倾角的增大, 附加水压减小趋势明显。

(2) 运用压剪断裂准则推导出考虑裂隙附加水压的岩体断裂强度解析式。裂隙附加水压降低了岩体断裂强度, 而且增大了岩体发生断裂破坏的范围, 使岩体更容易沿裂隙面失稳扩展。

(3) 岩体断裂强度随岩石弹性模量和裂隙形状因子的增大而增大, 且随裂隙倾角的增大, 岩体断裂强度增加趋势明显。本次分析中没有考虑岩石渗透性对裂隙附加水压以及岩体断裂强度的影响, 对折减系数 ϕ 的取值还需做进一步研究。由于篇幅有限, 本次只针对含单裂隙的局部岩体的强度进行了研究, 对于含多条裂隙的饱和岩体研究将会在后续工作中开展。

参 考 文 献

- [1] 蔡美峰, 何满潮, 刘东燕. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
CAI Mei-feng, HE Man-chao, LIU Dong-yan. Rock mechanics and engineering[M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [2] 石路杨, 李建, 许晓瑞, 等. 水力劈裂对岩体中自然裂纹的影响研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(10): 3003—3010.
SHI Lu-yang, LI Jian, XU Xiao-rui, et al. Influence of hydraulic fracturing on natural fracture in rock mass[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(10): 3003—3010.
- [3] 朱珍德, 胡定. 裂隙水压对岩体强度的影响[J]. 岩土力学, 2000, 21(1): 64—67.
ZHU Zhen-de, HU Ding. The effect of fissure water pressure on rock mass strength[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2000, 21(1): 64—67.
- [4] 汤连生, 张鹏程, 王洋. 水作用下岩体断裂强度探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(增刊 1): 2154—2158.
TANG Lian-sheng, ZHANG Peng-cheng, WANG Yang. On fracture strength of rocks with cracks under water pressure and chemical damage[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(Supp.1): 2154—2158.
- [5] 李宗利, 张宏朝, 任青文, 等. 岩石裂纹水力劈裂分析与临界水压计算[J]. 岩土力学, 2005, 26(8): 1216—1220.
- [6] 盛金昌, 赵坚, 速宝玉. 高水头作用下水工压力隧洞的水力劈裂分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(7): 1226—1230.
SHENG Jin-chang, ZHAO Jian, SU Bao-yu. Analysis of hydraulic fracturing in hydraulic tunnels under high water pressure[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(7): 1226—1230.
- [7] 卞康, 肖明, 胡田清. 水工隧洞围岩裂纹扩展的临界水压解析解[J]. 岩土力学, 2012, 33(8): 2429—2436.
BIAN Kang, XIAO Ming, HU Tian-qing. Analytical solutions of critical water pressure when cracks propagating in surrounding rock of hydraulic tunnel[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(8): 2429—2436.
- [8] 谢兴华, 速宝玉. 裂隙岩体水力劈裂研究综述[J]. 岩土力学, 2004, 25(2): 330—336.
XIE Xing-hua, SU Bao-yu. A review of fracture rock hydraulic fracturing research[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(2): 330—336.
- [9] 邓华锋, 李建林, 刘杰, 等. 考虑裂隙水压力的岩体压剪裂纹扩展规律研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊 1): 297—302.
DENG Hua-feng, LI Jian-lin, LIU Jie, et al. Research on propagation of compression shear fracture in rocks considering fissure water pressure[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(Supp.1): 297—302.
- [10] SHAFIRO B, KACHANOV M. Materials with fluid-filled pores of various shapes: effective elastic properties and fluid pressure polarization[J]. **International Journal of Solids and Structures**, 1997, 34(27): 3517—3540
- [11] KACHANOV M, TSUKROV I, SHAFIRO B. Effective moduli of solids with cavities of various shapes[J]. **Applied Mechanics Reviews**, 1994, 47(1): S151—S174
- [12] 周群力, 刘格非. 脆性材料的压剪断裂[J]. 水利学报, 1982, (7): 63—69.
ZHOU Qun-li, LIU Ge-fei. Compressive shear fracture of brittle material[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 1982, (7): 63—69.