

DOI: 10.16285/j.rsm.2015.08.032

基于统计岩体力学的岩体强度特征分析

包 含^{1,2}, 常金源³, 伍法权¹, 梁 宁^{1,2}, 许江波⁴

(1.中国科学院地质与地球物理研究所 页岩气与地质工程重点实验室, 北京 100029; 2.中国科学院大学, 北京 100049;
3.绍兴文理学院 土木工程学院, 浙江 绍兴 312000; 4.长安大学 公路学院 岩土与隧道工程研究所, 陕西 西安 710064)

摘 要: 结构面的存在改变了岩体力学性质, 影响了岩体强度特征。基于统计岩体力学强度判据, 结合摩尔-库仑准则, 得到了含单组结构面岩体破坏的 4 种不同方式和相应的结构面倾角范围, 推导了岩体强度由结构面控制转化为应力控制的临界围压表达式。在此基础上, 根据岩石和结构面参数之间的关系, 将含单组结构面岩体分为 4 类, 并探讨了可能破坏方式和发生破坏的条件。最后, 举例分析了含单组结构面闪长岩的强度特征, 结果表明, 该岩体属于第 I 类岩体, 在垂向受压时先沿结构面后沿岩块破坏, 临界围压为 9.12 MPa; 从全空间分析, 该岩体强度各向异性显著, 围压增大可使岩体在一些方向上受力时强度由结构控制转化为应力控制。

关 键 词: 统计岩体力学; 裂隙岩体; 强度准则; 破坏方式; 各向异性

中图分类号: TU 453

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2015) 08-2361-09

Analysis of strength characteristics of rock mass based on statistical mechanics of rock mass

BAO Han^{1,2}, CHANG Jin-yuan³, WU Fa-quan¹, LIANG Ning^{1,2}, XU Jiang-bo⁴

(1. Key Laboratory of Shale Gas and Geoenvironment, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. College of Civil Engineering, Shaoxing University, Shaoxing, Zhejiang 312000, China;

4. Institute of Geotechnical and Tunnel Engineering, School of Highway, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710064, China)

Abstract: The existing of joints has great effect on the mechanical properties and strength characteristics of rock mass. In this study, four different failure modes of rock mass with one group of joints and the corresponding ranges of joint dip angles are obtained according to the strength criterion of statistical mechanics of rock mass and the Mohr-Coulomb failure criterion. An expression of the critical confining pressure is deduced for representing the transformation of rock mass strength from structure control to stress control. Moreover, rock masses with a group of joints are divided into four classes by the relationship between rock and joint parameters. Then the potential failure modes and the corresponding failure conditions are discussed. Finally, the strength characteristics of diorite with a group of joints are analyzed. The results show that the diorite belongs to class I rock mass. The diorite fails firstly along with the direction of joints and then fractures in the rock blocks at a critical confining pressure of 9.12 MPa under the axial pressure condition. It is found that the diorite has significant anisotropy from the spatial analysis, and the increase of confining pressure would result in the transfer of rock mass strength from structure control to stress control under the particular loading directions.

Keywords: statistical mechanics of rock mass; jointed rock mass; strength criterion; failure mode; anisotropy

1 引 言

岩体强度是岩体工程所涉及的重要参数, 因此, 长期以来备受学者们关注。对岩体强度的研究, 现已取得了许多重要成果, 包括摩尔-库仑准则、格里菲斯强度理论、Hoek-Brown 经验强度准则、

Drucker-Prager 强度准则在内的许多理论已被广泛使用和继续发展^[1-5]。

但大部分强度准则将岩体作为各向同性介质研究, 并不能真实反应岩体的力学性质。事实上, 由于岩体中存在断层、节理、层理、板理等结构面, 不仅使岩体具有非均质性, 也使岩体的力学性质表

收稿日期: 2015-01-05

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (No. 41030749); 十二五国家科研支撑计划 (No. 2012BAK10B06-02)。

第一作者简介: 包含, 男, 1988 年生, 博士, 主要从事岩体工程地质问题方面的研究工作。E-mail: baohangeo@163.com

通讯作者: 伍法权, 男, 1955 年生, 博士, 研究员, 主要从事岩体工程地质力学和岩体工程地质问题方面的研究工作。E-mail: wufaquan@mail.iggcas.ac.cn

现出强烈的各向异性^[6]。基于岩体结构的强度研究,前人已有大量试验可作参考^[7-10]。试验表明,岩体强度与岩石力学参数及结构面几何参数等有关,图1所示岩体强度U型包络线即表现了结构面对岩体强度的影响。

结构面作为影响岩体力学性质的重要因素,也影响了岩体的破坏形式,Nasseri^[11]、Niandou^[12]和冒海军^[13]等的试验表明,裂隙岩体的破坏主要有沿结构面滑移、剪切破坏及复合破坏3种形式。结构面对岩体强度的影响可随应力条件而发生改变;孙广忠^[14]在岩体结构控制论中指出,岩体结构控制着岩体的力学性质,但研究表明,随着围压的增大,岩体强度逐渐由结构控制转化为应力控制;Ramamurthy等^[15]从试验上得到了围压升高会减弱、甚至消除裂隙岩体各向异性特征的现象;郭松峰等^[16]则结合Hoek-Brown强度准则从理论上推导出了转化发生时临界应力的表达式。

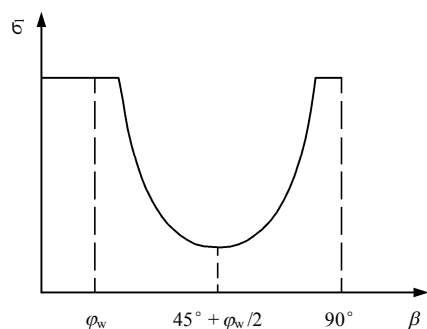


图1 含单条节理岩体强度包络线

Fig.1 Strength envelope of rock mass with a single joint

总体来讲,岩体的强度是岩块和结构面强度的综合反映,韩建新等^[17]在摩尔-库仑判据的基础上,结合结构面和岩块强度分析了含一条贯通裂隙岩体的力学性质,得到了其破坏的4种方式。事实上,在大型岩体工程中,结构面常以埋藏的状态存在于岩体中,岩体的破坏往往是由埋藏结构面的贯通所导致。所以在研究岩体强度特征时,兼顾埋藏型结构面具有重要的现实意义,因此,也需要具有适用贯通和埋藏型结构面的强度准则作为研究裂隙岩体强度的工具。

2 基于统计岩体力学的岩体强度准则

2.1 统计岩体力学强度理论简介

岩体的结构面参数如迹长、隙宽、间距等符合一定的数学分布特征,国内外许多学者如Priest^[18]、Hudson^[19]、贾洪彪^[20]、徐黎明^[21]等都对结构面参数

的统计学特征进行了研究。研究表明,结构面参数服从负指数分布是常见形式,以结构面迹长 l 为例,其负指数分布表达为

$$f(l) = \mu e^{-\mu l} \quad (1)$$

式中: $\mu = \frac{1}{\bar{l}}$, $\bar{l}$ 为结构面平均迹长 (m)。

20 世纪 90 年代,伍法权等^[22-23]在研究结构面迹长、隙宽参数服从负指数分布的基础上,建立了比较完善的统计岩体力学理论体系,并且根据断裂力学能量方程,推导出了在受压条件下一组结构面的扩展破坏判据,如下式所示:

$$\frac{8\bar{a}\tau^2}{(2-\nu)\pi} \ln(\lambda_v V) = K_{lc}^2 \quad (2)$$

式中: $\bar{a}$ 为结构面平均半径, $\bar{a} = \frac{2\bar{l}}{\pi}$ (m); λ_v 为结构面的体积密度 (m^{-3}); V 为岩体体积 (m^3); ν 为岩石泊松比; K_{lc} 为岩石的 I 型断裂韧度 ($MPa \cdot \sqrt{m}$); τ 为结构面上的剩余剪切应力 (MPa), τ 的表达式为

$$\tau = \begin{cases} t-s, & t \geq s \\ 0, & t < s \end{cases} \quad (3)$$

式中: t 为结构面上的剪应力 (MPa); s 为结构面抗剪强度 (MPa)。

2.2 裂隙岩体模型及其强度判据

在三维空间里,假设 X 轴负方向为正北 0° , Y 轴正方向为正东 90° , σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别沿 Z 、 X 、 Y 轴,应力符号按照岩石力学表示习惯,以压应力为正。一组结构面的倾向为 α , 倾角为 β , 平均半径为 $\bar{a}$, 内摩擦角为 φ_w , 黏聚力为 c_w , 岩块内摩擦角为 φ_0 , 黏聚力为 c_0 , 裂隙岩体模型如图 2 所示。

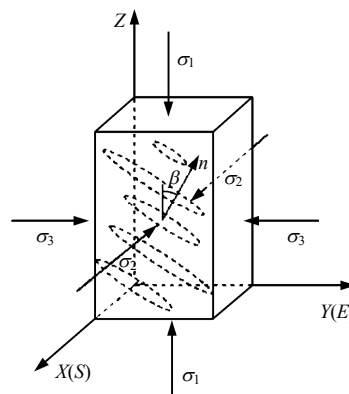


图2 含一组结构面岩体模型

Fig.2 Rock mass model with a group of joints

根据结构面产状, 可将结构面法向矢量 n 的方向余弦表示为

$$\left. \begin{aligned} n_1 &= -\cos \alpha \sin \beta \\ n_2 &= \sin \alpha \sin \beta \\ n_3 &= \cos \beta \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

定义剩余剪应力比为 h , 使 $h = \frac{\tau}{t} = \frac{t-s}{t}$, 可得

$$\tau^2 = h^2 t^2 = h^2 [\sigma_{11}^2 n_3^2 + \sigma_{22}^2 n_1^2 + \sigma_{33}^2 n_2^2 - (\sigma_{11} n_3^2 + \sigma_{22} n_1^2 + \sigma_{33} n_2^2)^2] \quad (5)$$

式(2)左端可展开为

$$\begin{aligned} \frac{2}{2-\nu} \tau^2 &= \sigma_{11}^2 \left[\frac{2h^2}{2-\nu} (1-n_3^2) n_3^2 \right] - \sigma_{11} (\sigma_{22} n_1^2 + \sigma_{33} n_2^2) \cdot \\ &\quad \frac{4h^2}{2-\nu} n_3^2 + \sigma_{22}^2 \left[\frac{2h^2}{2-\nu} (1-n_1^2) n_1^2 \right] + \\ &\quad \sigma_{33}^2 \left[\frac{2h^2}{2-\nu} (1-n_2^2) n_2^2 \right] - \sigma_{22} \sigma_{33} \frac{4h^2}{2-\nu} n_1^2 n_2^2 = \\ &\quad A \sigma_{11}^2 + B \sigma_{11} + C \end{aligned} \quad (6)$$

根据式(6), 可将式(2)表示为

$$A \sigma_{11}^2 + B \sigma_{11} + C = D \quad (7)$$

其中

$$\left. \begin{aligned} D &= \frac{\pi K_{lc}^2}{4\bar{a} \ln(\lambda_v V)} \\ A &= \frac{2h^2}{2-\nu} (1-n_3^2) n_3^2 \\ B &= -\frac{4h^2}{2-\nu} n_3^2 (\sigma_2 n_1^2 + \sigma_3 n_2^2) \\ C &= \left[\frac{2h^2}{2-\nu} (1-n_1^2) n_1^2 \right] \sigma_2^2 + \left[\frac{2h^2}{2-\nu} (1-n_2^2) n_2^2 \right] \sigma_3^2 - \\ &\quad \frac{4h^2}{2-\nu} n_1^2 n_2^2 \sigma_2 \sigma_3 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

在等围压条件下 $\sigma_2 = \sigma_3$, 此时

$$\left. \begin{aligned} D &= \frac{\pi K_{lc}^2}{4\bar{a} \ln(\lambda_v V)} \\ A &= \frac{2h^2}{2-\nu} (1-n_3^2) n_3^2 \\ B &= -\frac{4h^2}{2-\nu} n_3^2 \sigma_3 (1-n_3^2) \\ C &= \frac{2h^2}{2-\nu} \sigma_3^2 [(1-n_3^2) - (1-n_3^2)^2] \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

当 $\sigma_2 = \sigma_3$ 时, 假定含一组结构面岩体在受压时沿结构面发生破坏, 并且将结构面扩展强度作为岩体强度, 根据式(7)可得

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{1}{2A} [-B + \sqrt{B^2 - 4A(C-D)}] = -\frac{B}{2A} + \sqrt{\frac{D}{A}} = \\ &2\sigma_3 + \frac{K_{lc}}{n_3} \left(\frac{t}{t-s} \right) \sqrt{\frac{\pi(2-\nu)}{8\bar{a} \ln(\lambda_v V)(1-n_3^2)}} = \\ &\frac{\sin(2\beta - \varphi_w) + \sin \varphi_w}{\sin(2\beta - \varphi_w) - \sin \varphi_w} \sigma_3 + \frac{2(c_w + \xi) \cos \varphi_w}{\sin(2\beta - \varphi_w) - \sin \varphi_w} \end{aligned} \quad (10)$$

由于 $\sigma_1 > 0$, β 的取值应满足 $\varphi_w < \beta < \pi$, 下文中以式(10)为基础的讨论都建立在 $\varphi_w < \beta < \pi$ 基础上;

式(10)中 $\xi = K_{lc} \sqrt{\frac{\pi(2-\nu)}{8\bar{a} \ln(\lambda_v V)}}$, K_{lc} 反映了岩石抵抗拉张性破坏的能力, 是与抗拉强度 σ_t 相关的参数, Zhang^[24]的经验公式 $K_{lc} = \frac{\sigma_t}{6.88}$ 也同样说明了这一问题。

因此, ξ 可表示一组结构面抵抗拉张破坏的能力, 将其命名为结构面组抗拉系数。由格里菲斯理论知, 剪应力满足 $t^2 = 4\sigma_t(\sigma + \sigma_t)$, 当主应力 $\sigma = 0$ 时, 剪应力 $t = c_0$, 因此, $c_0 = 2\sigma_t$,

$K_{lc} = \frac{c_0}{6.88 \times 2}$, $\xi = \frac{c_0}{38.91} \sqrt{\frac{\pi(2-\nu)}{\bar{a} \ln(\lambda_v V)}}$, 可见, ξ 的大小与 c_0 和结构面几何参数相关。

式(10)代表了岩体沿一组结构面扩展破坏的判据, 该判据考虑了岩块和结构面的力学参数以及结构面的几何参数, 并能够真实反映岩体强度各向异性的特点。当含有单条结构面时, 使式中 $\ln(\lambda_v V) = 1$; 当节理为贯通节理时, 节理的破坏无断裂力学效应, K_{lc} 值为 0, 上式即转化为沿结构面破坏的库仑-纳维尔判据。因此, 该判据对埋藏型和贯通型结构面具有普遍适用性。

3 裂隙岩体强度特征

3.1 含单组结构面岩体破坏方式分析

一般来说, 考虑岩体强度时应包括连续体和不连续面的共同作用效果。根据摩尔-库仑准则, 在三维应力条件下, 岩块的强度可表示为

$$\sigma_1 = \frac{1 + \sin \varphi_0}{1 - \sin \varphi_0} \sigma_3 + \frac{2c_0 \cos \varphi_0}{1 - \sin \varphi_0} \quad (11)$$

由式(10)和式(11)所决定的结构面破坏强度曲线和岩块破坏强度曲线, 可得岩块强度曲线和结构面强度曲线的斜率分别为

$$k_0 = \frac{1 + \sin \varphi_0}{1 - \sin \varphi_0} \quad (12)$$

$$k_w = \frac{\sin(2\beta - \varphi_w) + \sin \varphi_w}{\sin(2\beta - \varphi_w) - \sin \varphi_w} \quad (13)$$

岩块强度和结构面强度曲线的截距分别为

$$\sigma_c = \frac{2c_0 \cos \varphi_0}{1 - \sin \varphi_0} \quad (14)$$

$$\sigma_{cw} = \frac{2(c_w + \xi) \cos \varphi_w}{\sin(2\beta - \varphi_w) - \sin \varphi_w} \quad (15)$$

对于岩块和结构面破坏曲线, 当斜率 $k_0 = k_w$ 相等时, 可解出

$$\beta = \frac{\arcsin\left(\frac{\sin \varphi_w}{\sin \varphi_0}\right)}{2} + \frac{\varphi_w}{2}, \quad \varphi_0 > \varphi_w \quad (16)$$

当截距 $\sigma_c = \sigma_{cw}$ 相等时, 可解出

$$\beta = \frac{\arcsin\left[\sin \varphi_w + \frac{(c_w + \xi) \cos \varphi_w (1 - \sin \varphi_0)}{c_0 \cos \varphi_0}\right]}{2} + \frac{\varphi_w}{2} \quad (17)$$

当 $k_0 = k_w$, $\sigma_c = \sigma_{cw}$ 两曲线重合时, 可得

$$\frac{\tan \varphi_0}{c_0} = \frac{\tan \varphi_w}{c_w + \xi} \quad (18)$$

因为 ξ 与 c_0 相关, 所以 $\frac{\tan \varphi_0}{c_0}$ 和 $\frac{\tan \varphi_w}{c_w + \xi}$ 均反应了强度曲线的斜率截距比。对于裂隙岩体, 由于 ξ 和 c_w 的值通常比较小, 因此, 一般满足 $\frac{\tan \varphi_0}{c_0} < \frac{\tan \varphi_w}{c_w + \xi}$ 。

岩体强度受结构面和岩块强度的综合影响, 通过斜率和截距的比较分析可知, 岩体可发生 4 种破坏方式, 如图 3 所示。需要说明的是, 当 $\beta \leq \varphi_w$ 时, 式 (10) 中 σ_1 为负值或 ∞ , 此时岩体强度满足式 (11), 岩体强度即为岩块强度。

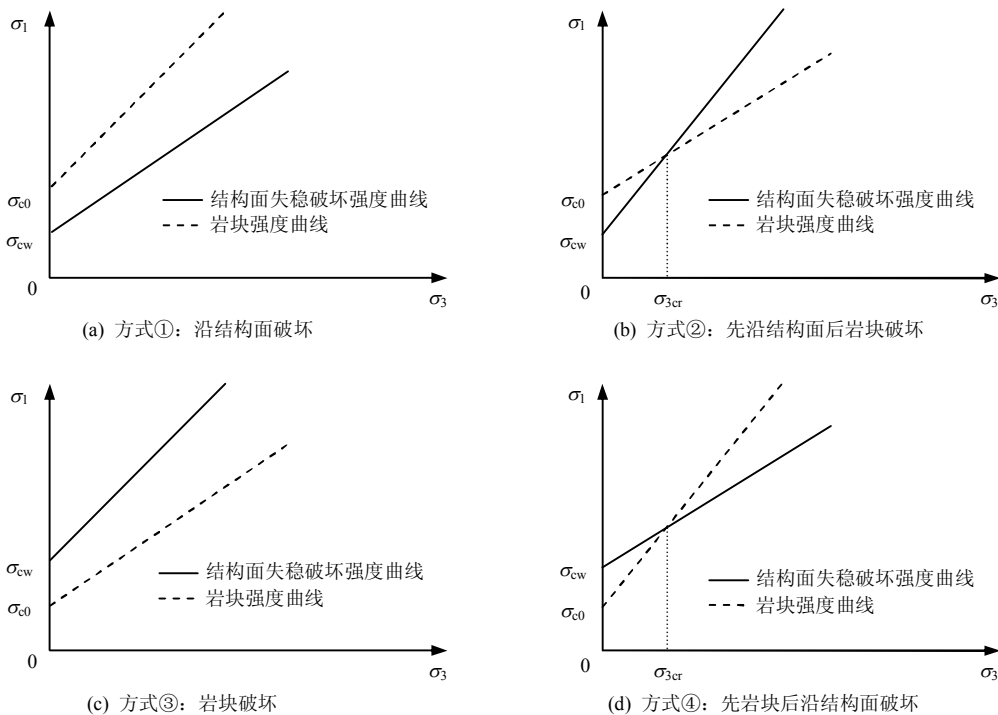


图 3 含单组结构面岩体受压条件下强度及破坏方式分析

Fig.3 Analysis of strength and failure modes of rock mass with a group of joints under compression

图 3 反映了含一组结构面岩体在围压逐渐增大条件下的 4 种破坏方式, 下面将以结构面倾角为变量, 讨论不同破坏方式下结构面倾角的允许变化范围。

图 3(a)中, $k_0 > k_w$, $\sigma_{c0} > \sigma_{cw}$, 表现为随着围压的增大, 岩块的强度始终大于结构面破坏强度, 说明在受压过程中, 岩体始终沿结构面破坏。通常情况下, 结构面的强度低于岩块强度, 因此, 该方

式是岩体最常见的破坏方式。当岩体满足 $\frac{\tan \varphi_0}{c_0} < \frac{\tan \varphi_w}{c_w + \xi}$ 时, β 应满足:

$$\frac{\arcsin\left(\frac{\sin \varphi_w}{\sin \varphi_0}\right)}{2} + \frac{\varphi_w}{2} < \beta < \frac{\pi}{2} - \frac{\arcsin\left(\frac{\sin \varphi_w}{\sin \varphi_0}\right)}{2} + \frac{\varphi_w}{2}, \quad \varphi_0 > \varphi_w \quad (19)$$

当岩体满足 $\frac{\tan \varphi_0}{c_0} > \frac{\tan \varphi_w}{c_w + \xi}$ 时, β 应满足:

$$\frac{\arcsin \left[\sin \varphi_w + \frac{(c_w + \xi) \cos \varphi_w (1 - \sin \varphi_0)}{c_0 \cos \varphi_0} \right]}{2} + \frac{\varphi_w}{2} < \beta < \frac{\pi}{2} - \frac{\arcsin \left[\sin \varphi_w + \frac{(c_w + \xi) \cos \varphi_w (1 - \sin \varphi_0)}{c_0 \cos \varphi_0} \right]}{2} + \frac{\varphi_w}{2} \quad (20)$$

图 3(b)中, $k_0 < k_w$, $\sigma_{c0} > \sigma_{cw}$, 表现为当围压 $\sigma_3 < \sigma_{3cr}$ 时, 岩块强度大于结构面破坏强度, 岩体强度即为结构面强度, 当围压 $\sigma_3 > \sigma_{3cr}$ 时, 岩块强度小于结构面破坏强度, 岩体强度即为岩块强度。该破坏方式与围压密切相关, 常见于实际工程中, 是岩石重要的力学行为现象, 对该破坏方式的研究在岩体工程特别是深部岩体工程的设计、支护方面有重要的现实意义。图 3(b)表明, 随着围压的增大, 结构面对岩体强度的控制作用逐渐失效, 岩体强度由结构控制逐渐转化为应力控制, σ_{3cr} 即为由结构控制转化为应力控制的临界围压。结合式 (10)、(11), 可得 σ_{3cr} 的表达式为

$$\sigma_{3cr} = \{ (c_w + \xi) \cos \varphi_w (1 - \sin \varphi_0) - c_0 \cos \varphi_0 \cdot [\sin(2\beta - \varphi_w) - \sin \varphi_w] \} / [\sin \varphi_0 \cdot \sin(2\beta - \varphi_w) - \sin \varphi_w] \quad (21)$$

由式 (21) 可见, 临界围压的大小与岩体的力学性质和结构面产状有关, 因此, 临界围压值也具有各向异性特点。

图 3(b)中破坏方式的发生需要满足一定的条件, 推导表明, $\frac{\tan \varphi_0}{c_0} < \frac{\tan \varphi_w}{c_w + \xi}$ 是该方式发生的前提条件。在此条件下, 当 $\varphi_0 > \varphi_w$ 时, β 应满足

$$\left. \begin{aligned} & \frac{\arcsin \left[\sin \varphi_w + \frac{(c_w + \xi) \cos \varphi_w (1 - \sin \varphi_0)}{c_0 \cos \varphi_0} \right]}{2} + \frac{\varphi_w}{2} < \beta < \frac{\pi}{2} - \frac{\arcsin \left[\sin \varphi_w + \frac{(c_w + \xi) \cos \varphi_w (1 - \sin \varphi_0)}{c_0 \cos \varphi_0} \right]}{2} + \frac{\varphi_w}{2} \\ & \text{或} \quad \frac{\pi}{2} - \frac{\arcsin \left(\frac{\sin \varphi_w}{\sin \varphi_0} \right)}{2} + \frac{\varphi_w}{2} < \beta < \frac{\pi}{2} - \frac{\arcsin \left(\frac{\sin \varphi_w}{\sin \varphi_0} \right)}{2} + \frac{\varphi_w}{2} \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

当 $\varphi_0 < \varphi_w$ 时, β 应满足

$$\frac{\arcsin \left[\sin \varphi_w + \frac{(c_w + \xi) \cos \varphi_w (1 - \sin \varphi_0)}{c_0 \cos \varphi_0} \right]}{2} + \frac{\varphi_w}{2} < \beta < \frac{\pi}{2} - \frac{\arcsin \left[\sin \varphi_w + \frac{(c_w + \xi) \cos \varphi_w (1 - \sin \varphi_0)}{c_0 \cos \varphi_0} \right]}{2} + \frac{\varphi_w}{2} \quad (23)$$

图 3(c)中 $k_0 < k_w$, $\sigma_{c0} < \sigma_{cw}$, 表示随着围压的增大, 岩块的强度始终小于结构面破坏的强度, 说明在此条件下, 岩体强度表现为岩块强度。当岩体满足 $\frac{\tan \varphi_0}{c_0} < \frac{\tan \varphi_w}{c_w + \xi}$ 时, β 应满足

$$\left. \begin{aligned} & \varphi_w < \beta < \frac{\arcsin \left[\sin \varphi_w + \frac{(c_w + \xi) \cos \varphi_w (1 - \sin \varphi_0)}{c_0 \cos \varphi_0} \right]}{2} + \frac{\varphi_w}{2} \\ & \text{或} \quad \frac{\pi}{2} - \frac{\arcsin \left[\sin \varphi_w + \frac{(c_w + \xi) \cos \varphi_w (1 - \sin \varphi_0)}{c_0 \cos \varphi_0} \right]}{2} + \frac{\varphi_w}{2} < \beta < \frac{\pi}{2} - \frac{\arcsin \left(\frac{\sin \varphi_w}{\sin \varphi_0} \right)}{2} + \frac{\varphi_w}{2} \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

当岩体满足 $\frac{\tan \varphi_0}{c_0} > \frac{\tan \varphi_w}{c_w + \xi}$ 且 $\varphi_0 > \varphi_w$ 时, β 应满足

$$\left. \begin{aligned} & \varphi_w < \beta < \frac{\arcsin \left(\frac{\sin \varphi_w}{\sin \varphi_0} \right)}{2} + \frac{\varphi_w}{2} \\ & \text{或} \quad \frac{\pi}{2} - \frac{\arcsin \left(\frac{\sin \varphi_w}{\sin \varphi_0} \right)}{2} + \frac{\varphi_w}{2} < \beta < \frac{\pi}{2} - \frac{\arcsin \left(\frac{\sin \varphi_w}{\sin \varphi_0} \right)}{2} + \frac{\varphi_w}{2} \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

当岩体满足 $\frac{\tan \varphi_0}{c_0} > \frac{\tan \varphi_w}{c_w + \xi}$ 且 $\varphi_0 < \varphi_w$ 时, β 应满足

$$\varphi_w < \beta < \frac{\pi}{2} \quad (26)$$

图 3(d)中, $k_0 > k_w$, $\sigma_{c0} < \sigma_{cw}$, 表现为当围压 $\sigma_3 < \sigma_{3cr}$ 时, 岩块强度小于结构面破坏强度, 当围压 $\sigma_3 > \sigma_{3cr}$ 时, 岩块强度大于结构面破坏强度,

结构面强度即为岩体强度。经推导表明, $\frac{\tan \varphi_0}{c_0} >$

$\frac{\tan \varphi_w}{c_w + \xi}$, 且 $\varphi_0 > \varphi_w$, 是图 3(d)破坏方式发生的前提条件, 此时 β 应满足

$$\left. \begin{aligned} & \frac{\arcsin\left(\frac{\sin \varphi_w}{\sin \varphi_0}\right)}{2} + \frac{\varphi_w}{2} < \beta < \\ & \frac{\arcsin\left[\sin \varphi_w + \frac{(c_w + \xi) \cos \varphi_w (1 - \sin \varphi_0)}{c_0 \cos \varphi_0}\right]}{2} + \frac{\varphi_w}{2} \\ \text{或} \\ & \frac{\pi}{2} - \frac{\arcsin\left[\sin \varphi_w + \frac{(c_w + \xi) \cos \varphi_w (1 - \sin \varphi_0)}{c_0 \cos \varphi_0}\right]}{2} + \\ & \frac{\varphi_w}{2} < \beta < \frac{\pi}{2} - \frac{\arcsin\left(\frac{\sin \varphi_w}{\sin \varphi_0}\right)}{2} + \frac{\varphi_w}{2} \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

对于受结构面影响的裂隙岩体, 其抗压强度表现出明显的各向异性特征, 结构面倾角的变化不仅影响了岩体的强度, 也影响了岩体破坏的方式。裂隙岩体有 4 种破坏方式, 分别为, ①沿结构面破坏, ②先沿结构面破坏后岩块破坏, ③岩块破坏, ④先岩块后沿结构面破坏。事实上, 岩体力学参数具有一定的值域范围, 根据参数的取值范围推测, 破坏方式①是最易发生的方式, 而破坏方式④很难出现。图 3(b)和图 3(d)曲线表明, 当岩体参数满足一定条件时, 随着围压的变化, 岩体的破坏路径可能发生转变。方式②是常见的破坏方式, 因此, 在实际工程中应着重考虑应力环境对岩体力学性质的影响, 并根据岩体力学参数和临界围压值确定岩体的可能破坏部位。

3.2 含单组结构面裂隙岩体强度分析

由以上分析可知, 裂隙岩体的破坏方式由结构面发育程度、结构面倾角、结构面摩擦角、岩块凝

聚力和内摩擦角等共同控制, 根据岩块、结构面强度曲线斜截比和结构面内摩擦角、岩块内摩擦角的相对大小, 将含单组结构面岩体分为以下 4 类:

表 1 含单组结构面岩体分类及可能破坏方式
Table 1 Classification and possible failure modes of rock mass with a group of joints

分类	斜截比相对关系	摩擦角 相对关系	破坏方式及结构面倾角范围			
			方式①	方式②	方式③	方式④
I	$\frac{\tan \varphi_0}{c_0} < \frac{\tan \varphi_w}{c_w + \xi}$	$\varphi_0 > \varphi_w$	式 (19)	式 (22)	式 (24)	
II	$\frac{\tan \varphi_0}{c_0} < \frac{\tan \varphi_w}{c_w + \xi}$	$\varphi_0 < \varphi_w$		式 (23)	式 (24)	
III	$\frac{\tan \varphi_0}{c_0} > \frac{\tan \varphi_w}{c_w + \xi}$	$\varphi_0 > \varphi_w$	式 (20)		式 (25)	式 (27)
IV	$\frac{\tan \varphi_0}{c_0} > \frac{\tan \varphi_w}{c_w + \xi}$	$\varphi_0 < \varphi_w$			式 (26)	

对于裂隙岩体, 一般满足 $\frac{\tan \varphi_0}{c_0} < \frac{\tan \varphi_w}{c_w + \xi}$, 并

且在较多情况下 $\varphi_0 > \varphi_w$, 因此, 第 I 类的岩体最为常见, 而第 IV 类的岩体最少。根据上文分析, 在岩块和结构面力学参数一定的情况下, 结构面倾角的变化会改变岩体的破坏方式, 图 4 给出了当 $\beta > \varphi_w$ 时, 4 种裂隙岩体随围压增大过程中不同破坏方式下的结构面倾角分区情况。

图 4 表明, 岩块的斜率和截距随内摩擦角增大呈逐渐增大趋势, 而结构面的斜率和截距随结构面倾角增大则先减小后增大, 呈 U 型。4 种类型岩体可发生的破坏方式和发生破坏的条件不同, 图 4 显示, 在 $\beta > \varphi_w$ 的条件下, 第 I 类岩体中可发生①、②、③三种破坏方式, β 的取值范围分别为式 (19)、(22)、(24) 所确定范围; 第 II 类岩体中可发生②、③两种破坏方式, β 的取值范围分别为式 (23)、(24) 所确定范围; 第 III 类岩体中可发生①、③、④三种破坏方式, β 的取值范围分别为式 (20)、(25)、(27) 所确定范围; 第 IV 类岩体只能发生③一种破坏方式, β 的取值范围为式 (26) 所确定范围。

4 实例分析

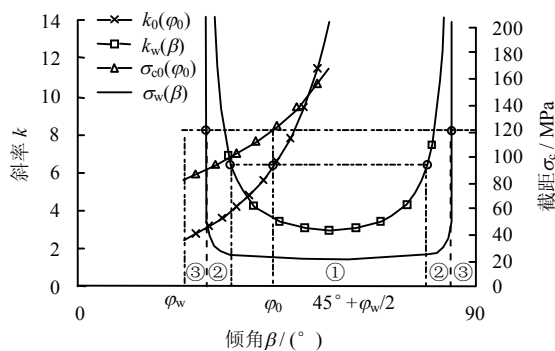
某铁路隧道最大埋深超过 800 m, 围岩岩性为闪长岩, 弹脆性良好。岩体相关力学参数如表 2 所示。

岩体中发育一组结构面, 结构面相关统计参数如表 3 所示。

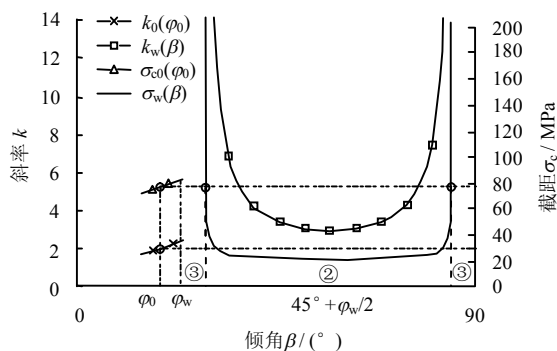
根据表 2、3 数据计算, 该闪长岩体满足 $\frac{\tan \varphi_0}{c_0} =$

$0.047 < \frac{\tan \varphi_w}{c_w + \xi} = 0.31$, 且 $\varphi_0 > \varphi_w$, 因此, 应属于第

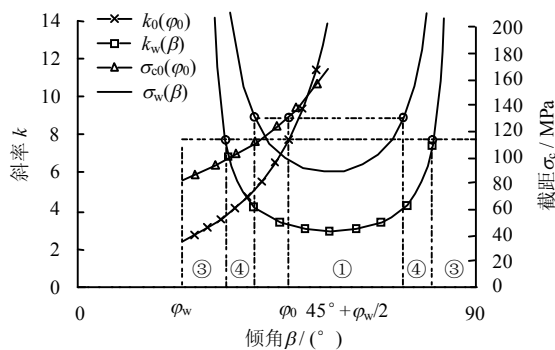
I 类岩体, 可能发生①、②、③三种破坏方式。根据式 (19)、(22) 和式 (24) 分别确定了发生 3 种破坏方式的结构面倾角范围。其中 $33.5^\circ < \beta < 82.5^\circ$ 时发生方式①破坏, $27.2^\circ < \beta < 33.5^\circ$ 或 $82.5^\circ < \beta < 88.8^\circ$ 时发生方式②破坏, $26^\circ < \beta < 27.2^\circ$ 或 $88.8^\circ < \beta < 90^\circ$ 发生方式③破坏。对于此岩



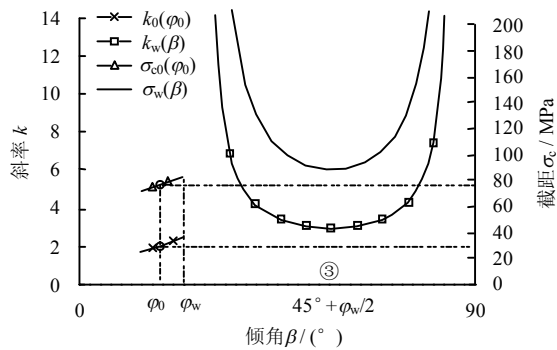
(a) I 类岩体



(b) II 类岩体



(c) III 类岩体



(d) IV 类岩体

图 4 各类型裂隙岩体破坏方式及结构面倾角变化范围示意图

Fig.4 Schematic diagram of failure modes and joints dip angle ranges of each jointed rock mass class

表 2 闪长岩力学参数

Table 2 Mechanical parameters of diorite

单轴抗压强度 σ_{c0} /MPa	凝聚力 c_0 /MPa	内摩擦角 φ_0 /(°)	泊松比 ν	I 型断裂韧度 K_{Ic} /(MPa·√m)
86	19.1	42	0.21	1.59

表 3 结构面相关参数

Table 3 Physical and mechanical parameters of joints

倾向 α /(°)	倾角 β /(°)	半径 $\bar{a}$ /m	黏聚力 c_w /MPa	内摩擦角 φ_w /(°)	法向密度 λ /m ⁻¹
239	29	0.24	0.1	26	4.7

计算的强度进行比较, 其中, $\sigma_c = \sigma_{c0} = 86$ MPa, $m_b = 14.631$, $s = 0.1889$, $a = 0.5$ 。结果如图 5 所

体 $\beta = 29^\circ$, 当垂向受压 σ_1 时, 在围压 σ_3 增大过程中, 该闪长岩应按方式②先沿结构面后沿岩块破坏, 依据式 (21) 得到破坏转化的临界围压值 σ_{3cr} 为 9.12 MPa。将依据统计岩体力学所计算的强度与

Hoek-Brown 经验公式 $\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^a$ [25] 所

示, 显然两种方法的计算结果具有很高的吻合度, 说明统计岩体力学方法的计算结果是可靠的。相对于 Hoek-Brown 经验公式, 统计岩体力学算法能够反映岩体结构控制和应力控制的不同过程, 可以更真实地体现裂隙岩体的力学性质。

根据岩石力学和结构面参数, 结合式 (10) 和式 (11), 计算在围压 σ_3 等于 0 和 20 MPa 条件下岩体各方向的抗压强度, 并将所得抗压强度值作下半球赤平投影图, 结果如图 6 所示。

由图可看出, 岩体抗压强度具有强烈的各向异性, 其抗压强度最大值即为岩块强度, 出现在垂直结构面方向和平行结构面方向上。围压的增大, 对岩体强度的各向异性有影响, 表现为强度最大值区

域的扩大,说明围压的增加改变了结构面的控制作用,使岩体在一些方向上受力时,强度由结构控制转化为应力控制。

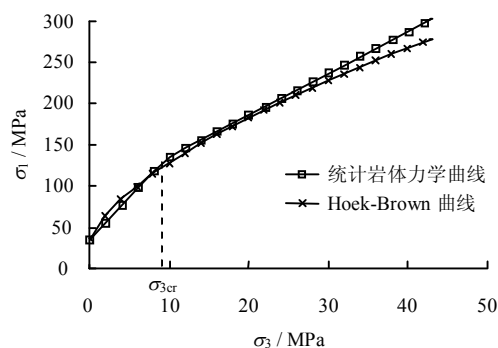


图 5 不同算法下的强度曲线

Fig.5 Strength curves of different calculation methods

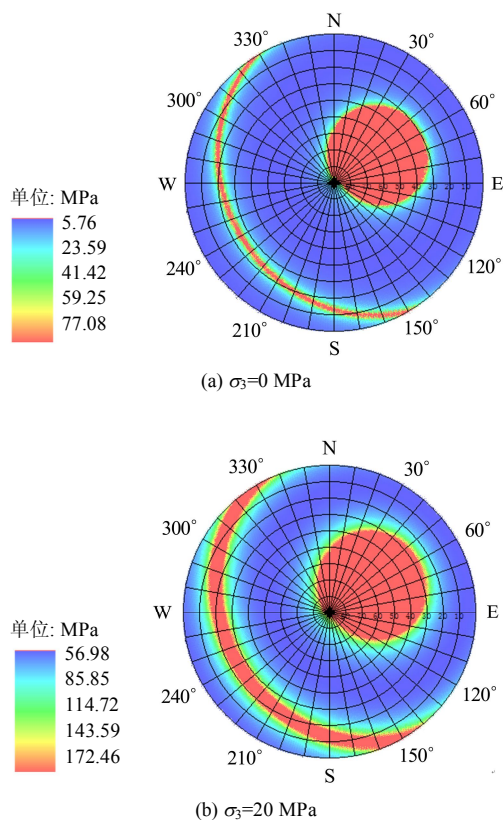


图 6 抗压强度赤平投影图

Fig.6 Stereographic projection of compressive strength

5 结 论

(1)裂隙岩体强度受结构面和岩块的综合影响,在等围压条件下,随着围压的增大,将岩体的破坏方式分为沿结构面破坏、先沿结构面破坏后岩块破坏、岩块破坏、先岩块后沿结构面破坏 4 种,并确定了每一种破坏方式下的结构面倾角变化范围。围压的增大可能造成岩体强度结构面控制失效,依据

结构面和岩块强度公式,推导出岩体强度由结构控制向应力控制转化的临界围压表达式 (21)。

(2)裂隙岩体的破坏方式由结构面发育程度、结构面倾角、结构面内摩擦角、岩块凝聚力和内摩擦角等共同控制,根据 $\frac{\tan \varphi_0}{c_0}$ 与 $\frac{\tan \varphi_w}{c_w + \xi}$ 以及 φ_0 与 φ_w 的大小关系,将含单组结构面裂隙岩体分为 4 类,其中第 I 类的岩体最为常见,而第 IV 类的岩体最少,同时分析了 4 类岩体可发生的破坏方式以及发生破坏的结构面倾角条件。

(3)结合实例分析了含单组结构面闪长岩的强度特征。结果表明,该岩体属于第 I 类岩体,在垂向受压时先沿结构面后沿岩块破坏,并且临界围压为 9.12 MPa;从全方向角度分析,该岩体强度各向异性明显,围压的增加可改变结构面的控制作用,使岩体在一些方向上受力时,强度由结构控制转化为应力控制。

参 考 文 献

- [1] HOEK E, BROWN E T. Empirical strength criterion for rock masses[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE**, 1980, 106(9): 1013—1035.
- [2] MAIN I G, SAMMONDS P R, MEREDITH P G. Application of a modified Griffith criterion to the evolution of fractal damage during compressional rock failure[J]. **Geophysical Journal International**, 1993, 115(2): 367—380.
- [3] HOEK E, CARRANZA T C, CORKUM B. Hoek-Brown failure criterion-2002 edition[C]//Proceedings of the Fifth North American Rock Mechanics Symposium. [S. l.]: [s. n.], 2002: 267—273.
- [4] BAI Y, WIERZBICKI T. Application of extended Mohr-Coulomb criterion to ductile fracture[J]. **International Journal of Fracture**, 2010, 161(1): 1—20.
- [5] ALEJANO L R, BOBET A. Drucker-Prager criterion[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2012, 45(6): 995—999.
- [6] SAEIDI O, RASOULI V, VANEGHI R G, et al. A modified failure criterion for transversely isotropic rocks[J]. **Geoscience Frontiers**, 2014, 5(2): 215—225.
- [7] XU T, RANJITH P G, WASANTHA P L P, et al. Influence of the geometry of partially-spanning joints on

- mechanical properties of rock in uniaxial compression[J]. **Engineering Geology**, 2013, 167: 134—147.
- [8] GEHLE C, KUTTER H K. Breakage and shear behaviour of intermittent rock joints[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2003, 40(5): 687—700.
- [9] CHONG W L, HAQUE A, GAMAGE R P, et al. Modelling of intact and jointed mudstone samples under uniaxial and triaxial compression[J]. **Arabian Journal of Geosciences**, 2013, 6(5): 1639—1646.
- [10] 钟世英, 徐卫亚. 基于微结构张量理论的柱状节理岩体各向异性强度分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(10): 3081—3084.
- ZHONG Shi-ying, XU Wei-ya. Anisotropic failure criterion incorporating microstructure tensor for rock mass with columnar joints[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(10): 3081—3084.
- [11] NASSERI M H, RAO K S, RAMAMURTHY T. Failure mechanism in schistose rocks[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1997, 34(3): 219—233.
- [12] NIANDOU H, SHAO J F, HENRY J P, et al. Laboratory investigation of the mechanical behaviour of Tournemire shale[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1997, 34(1): 3—16.
- [13] 冒海军, 杨春和. 结构面对板岩力学特性影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(20): 3651—3656.
- MAO Hai-jun, YANG Chun-he. Study on effects of discontinuities on mechanical characters of slate[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(20): 3651—3656.
- [14] 孙广忠. 论“岩体结构控制论”[J]. 工程地质学报, 1993, 1(1): 14—18.
- SUN Guang-zhong. On the theory of structure-controlling rock mass[J]. **Journal of Engineering Geology**, 1993, 1(1): 14—18.
- [15] RAMAMURTHY T, ARORA V K. Strength predictions for jointed rocks in confined and unconfined states[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts**, 1994, 31(1): 9—22.
- [16] 郭松峰, 祁生文, 黄晓林. 岩体强度各向异性及其转化的应力条件[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增刊 2): 3222—3227.
- GUO Song-feng, QI Sheng-wen, HUANG Xiao-lin. Anisotropy of rock mass strength and its transformation critical confining stress[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(Supp.2): 3222—3227.
- [17] 韩建新, 李术才, 李树忱, 等. 贯穿裂隙岩体强度和破坏方式的模型研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊 2): 178—184.
- HAN Jian-xin, LI Shu-cai, LI Shu-chen, et al. Model study of strength and failure modes of rock mass with persistent cracks[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(Supp.2): 178—184.
- [18] PRIEST S D, HUDSON J A. Discontinuity spacings in rock[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts**, 1976, 13(5): 135—148.
- [19] HUDSON J A, PRIEST S D. Discontinuity frequency in rock masses[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts**, 1983, 20(2): 73—89.
- [20] 贾洪彪, 唐辉明, 刘佑荣, 等. 岩体结构面三维网络模拟理论与工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [21] 徐黎明, 陈剑平, 王清. 多参数岩体结构面优势分组方法研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(1): 190—195.
- XU Li-ming, CHEN Jian-ping, WANG Qing. Study of method for multivariate parameter dominant partitioning of discontinuities of rock mass[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(1): 190—195.
- [22] WU F Q, WANG S J, SONG S W, et al. Statistical principles in mechanics of rock masses[J]. **Chinese Science Bulletin**, 1994, 39(6): 493—503.
- [23] 伍法权. 统计岩体力学原理[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1993.
- [24] ZHANG Z X. An empirical relation between mode I fracture toughness and the tensile strength of rock[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2002, 39(3): 401—406.
- [25] HOEK E, WOOD D, SHAH S. A modified Hoek-Brown criterion for jointed rock masses[C]//Proceedings of the ISRM Symposium on Rock Characterization. London:

British Geotechnical Society, 1992, 209—214.