

岩桥渐进弱化的 Jennings 抗剪强度准则

唐志成^{1, 2}, 夏才初^{1, 2}, 刘远明³

(1. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092;

3. 贵州大学土木建筑工程学院, 贵州 贵阳 550003)

摘要: Jennings 抗剪强度准则以节理和岩桥抗剪强度参数按连通率加权平均的方式求取非贯通节理岩体的峰值抗剪强度, 未考虑直剪试验过程中岩桥力学参数逐步弱化的影响, 计算所得的抗剪强度与直剪试验结果存在较大偏差。基于人工齿状共面非贯通节理岩体的直剪试验, 采用以剪切位移为变量的岩桥弱化度模型考虑岩桥力学参数弱化对抗剪强度的影响, 提出改进的 Jennings 抗剪强度准则。考虑岩桥力学参数弱化的 Jennings 抗剪强度准则的计算结果更为接近试验值, 表明考虑岩桥力学性质弱化是合理的。

关键词: 岩石力学; 非贯通节理; 抗剪强度; Jennings 抗剪强度准则

中图分类号: TU 45 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2012)11-2093-07

作者简介: 唐志成(1983-), 男, 湖南省武冈人, 博士研究生, 主要从事岩体力学、地下工程等方面的研究工作。E-mail: tangzhichengok@126.com。

Modified Jennings shear strength criterion based on mechanical weakening model of rock bridges

TANG Zhi-cheng^{1, 2}, XIA Cai-chu^{1, 2}, LIU Yuan-ming³

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2.

Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. School of Civil Engineering and Architecture, Guizhou University, Guiyang 550003, China)

Abstract: Many theoretical criterions have been proposed to predict the shear strength of intermittent joints, of which the Jennings criterion is widely used. In Jennings criterion, the mechanical parameters of joint and rock bridge are simply averaged by a weight coefficient called connectivity rate to calculate the peak shear strength. The main limitation of Jennings shear strength criterion is that it cannot consider the mechanical weakening of rock bridges during the shear tests. The theoretical results by Jennings criterion are usually not consistent with the measured ones. A modified criterion is put forward. The modified criterion can overcome the limitations because it takes the mechanical weakening model of rock bridges. The results show that the predicted values by the modified Jennings criterion is closer to the measured data, compared to the original Jennings criterion, which indicates that the new criterion is better. Finally, the limitations of this new strength criterion are also analyzed.

Key words: rock mechanics; interrock mechanics; intermittent joint; shear strength; Jennings peak strength criterion

0 引言

工程岩体通常由节理与岩桥组成, 其破坏处取决于节理与岩桥两部分。对非贯通节理而言, 由于岩桥的存在, 其受力与破坏特征与贯通节理不同, 表现为由原生节理和自节理端部扩展的岩桥断面所组成的复合破坏面^[1]。在非贯通节理岩体中, 岩桥的贯通破坏模式及其变形和强度特性在很大程度上受非贯通节理面的规模、密度和空间分布特征的控制^[2]。因此, 非贯通节理岩体的强度特性研究在理论上和工程上都具有十分重要的意义。基于直剪试验的非贯通节理岩体

破坏模式的理论研究, 既有基于弹塑性理论的模型, 也基于断裂力学的模型, 还有将两者结合建立的理论模型。Gehle等^[3]对石膏节理试样进行直剪试验, 综合考虑了不同的节理长度、排列方式、倾角等因素的影响, 研究结果表明法向应力和节理倾角对节理的抗剪强度影响最大。Wong等^[4-5]对含有3组平行节理的类岩石节理进行直剪试验, 探讨了节理裂隙的扩展规律及其峰值抗剪强度。

基金项目: 国家自然科学基金项目(40972178, 51278378)

收稿日期: 2011-11-14

Jennings^[6]假设非贯通节理岩体沿节理面破坏, 节理和岩桥的破坏均遵循Mohr-Coulomb破坏准则, 提出将节理和岩桥抗剪强度参数按连通率进行加权平均得到非贯通节理岩体的抗剪强度, 即Jennings抗剪强度准则。Jennings方法只适用于节理连通率较大或法向正应力较大时的情况。Lajtai^[7]提出3种岩桥破坏模式, 由于将3种模式截然分开, 没有考虑拉-剪复合破坏的情况, 因而计算所得的强度比实际偏低。其他学者提出的破坏模型主要包括断裂力学模型、拉剪复合模型、压剪断裂核模型、复合模型等^[8]。

考虑到岩桥破坏是一个渐进过程, 常常先在节理端部出现张拉节理(裂纹), 然后张拉节理(裂纹)不断向岩桥内部扩展导致岩桥贯通, 岩桥力学性质的渐进弱化是影响非贯通节理强度特性的一个因素。

岩桥力学性质的弱化机理, 本质上是岩桥内部微元在剪切荷载作用下形成微裂隙, 微裂隙逐步连通直至破坏的力学过程。目前多是从定性的角度分析岩桥弱化, 而定量描述岩桥弱化力学机制的研究成果鲜见。岩桥的抗剪强度是非贯通节理岩体抗剪强度的重要组成部分, 定量分析岩桥在剪切条件下力学性质的弱化是准确估算其抗剪强度的关键。因此, 建立基于岩桥力学弱化机制的非贯通节理岩体的抗剪强度准则是非常有必要的。

曹文贵等^[9-11]引入描述岩石微元强度分布的参数, 阐述了岩石损伤机制并建立起岩石损伤软化的本构模型。夏才初等^[12]通过不同类型的非贯通节理岩体的直剪试验, 在详细分析裂纹扩展、贯通的基础上, 仿照统计损伤理论建立以剪切位移为参量的岩桥力学弱化模型。

非贯通节理在直剪试验过程中岩桥端部处首先产生裂纹并向岩桥内部扩展^[13-14], 导致岩桥力学参数的降低; 粗糙度对节理面的抗剪强度也有显著的影响, 而Jennings抗剪强度准则未考虑这些因素的影响。

基于上述分析, 在直剪试验的基础上并结合文[12]提出的岩桥弱化力学模型, 对Jennings准则进行改进以考虑剪切过程中岩桥渐进弱化对非贯通节理岩体峰值抗剪强度的影响。

1 试验分析

1.1 直剪试验简介

直剪试验中的人工非贯通节理材料采用配合比为水泥:砂:水=2:3:1(质量比)的水泥砂浆类岩石材料, 非贯通节理岩体模拟材料的力学参数见表1, 模型材料配合比的选取详见参考文献[8]。

表1 节理力学参数

Table 1 Mechanical parameters of model material

单轴 抗压 强度 σ_c/MPa	连通 率 k	岩块 黏聚力 c_b/MPa	岩块 内摩 擦角 $\phi_b/(^\circ)$	平直模 拟节理 c_0/MPa	平直模 拟节理 $\phi_0/(^\circ)$
18.0	0.53	3.93	39.5	0.56	32.1

共面非贯通人工节理试件的尺寸为300 mm×150 mm×300 mm(长×宽×高), 节理面位于试件的中部, 且沿宽度方向是完全贯通的。试验中采用3种不同起伏角 i 的模拟材料节理(中间岩桥, 两边节理, 如图1所示), 分别在0.5, 1.0, 1.5, 2.0和3.0 MPa五级法向应力下进行直剪试验。

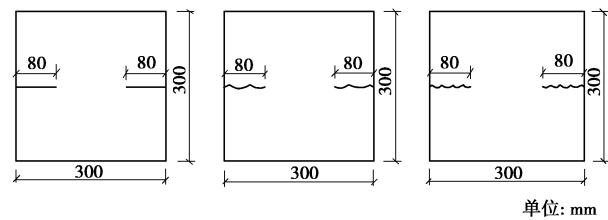


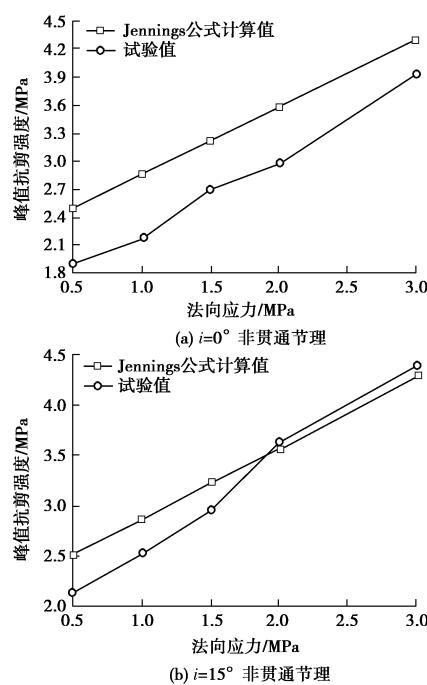
图1 非贯通节理

Fig. 1 Discontinuous joints

直剪试验在常法向荷载条件下进行, 先以5.0 kN/min施加法向荷载直至预定法向荷载值; 然后以0.3 mm/min的剪切速率施加切向荷载, 当剪切应力-剪切位移曲线超过峰值并且切向位移达到5 mm时停止试验。试验过程中自动采集剪切应力-剪切变形曲线。

1.2 数据分析

采用Jennings抗剪强度准则计算非贯通节理岩体峰值抗剪强度, 见图2。



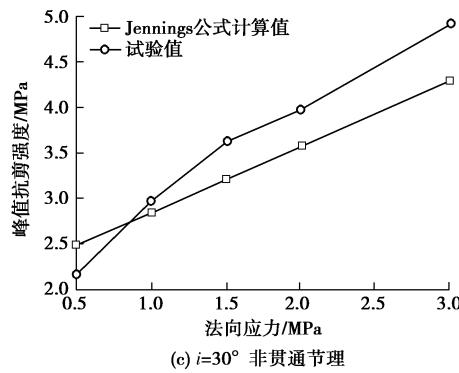


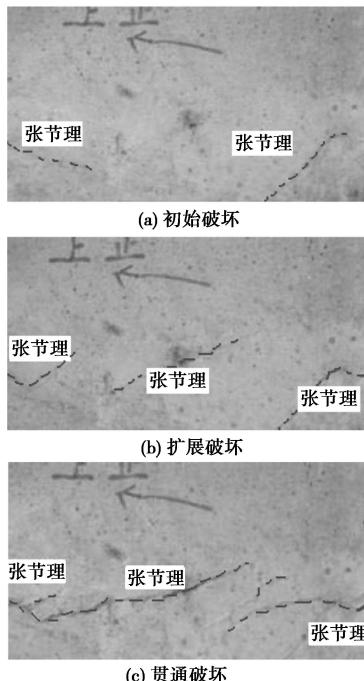
图 2 试验值与 Jennings 准则计算值

Fig. 2 Test results and Jennings criterion prediction

从图 2 可以看出: ①就平直节理面而言, Jennings 准则计算值大于实测值; ②随起伏角的增大, Jennings 准则计算值逐步靠近实测值, 但是当起伏角进一步增大时, Jennings 准则计算值小于实测值。

1.3 试验现象分析

图 3 给出了非贯通节理岩桥裂纹扩展过程($\sigma_n = 0.5$ MPa)。施加剪切应力后, 在原节理的端部先出现张拉节理, 张拉节理沿最大主应力方向呈弧形不断扩展(见图 3 (a)); 当剪应力增加时, 张拉节理继续扩展到一定程度, 与此同时在岩桥中部出现倾斜节理, 其与剪切面的夹角小于 90° (见图 3 (b)); 随着剪切应力的进一步增加, 倾斜节理扩展并与两端的节理连通, 导致非贯通节理的破坏(见图 3 (c))。

图 3 非贯通节理岩桥裂纹扩展过程 ($\sigma_n = 0.5$ MPa)Fig. 3 Crack propagation process of rock bridge in discontinuous joints ($\sigma_n = 0.5$ MPa)

2 岩桥力学性质弱化模型

非贯通节理直剪试验表明: ①破坏具有局部性, 即破坏不是均匀的, 而是集中在非贯通节理岩体的某些部位; ②破坏过程具有渐进性, 在形成宏观的贯通破坏面之前, 岩桥上已发生许多微观的张拉破坏。在直剪试验条件下, 微元一般发生张拉破坏。岩桥微元发生张拉破坏, 岩桥的力学性质出现弱化; 并随剪应力的增加, 破坏微元越来越多, 岩桥的力学性质弱化程度逐步累积增加。岩桥渐进弱化如图 4 所示。

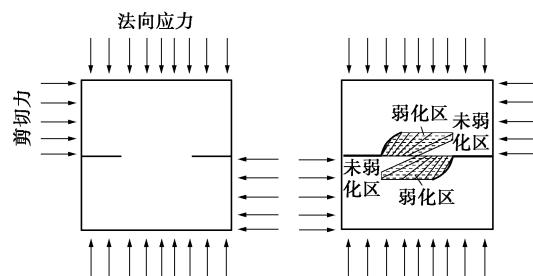


图 4 直剪试验弱化演化示意图

Fig. 4 Mechanical weakening zones of rock bridge

若弱化度 δ 定义为已破坏岩桥微元数目 N_t 与岩桥总微元数目 N 的比值, 而破坏的岩桥微元数目与其最小主应力相关, 因此以岩桥微元最小主应力为变量的弱化度公式可表示为^[6]

$$\delta = \frac{N_t(\sigma_3)}{N} = 1 - \exp \left[-\left(\frac{\sigma_3}{\sigma_0} \right)^m \right] \quad (1)$$

由式(1)可知: 在非贯通节理岩体岩桥内部, 弱化度 δ 随最小主应力的增大、力学性质不断弱化。夏才初等^[12]从岩桥微元应力状态与剪切位移关系出发, 提出以剪切位移为变量的岩桥弱化度公式:

$$\delta = 1 - \exp \left[-\left(\frac{u - u_0}{u_f} \right)^m \right] \quad (2)$$

式中 u 为切向位移; u_0 为节理面切向滑移位移; u_f 为非贯通节理岩体达到峰值抗剪强度时对应的切向位移; m 为反映岩桥材料性质对弱化度影响的参数。 u_0 反映了节理面对弱化度的影响, 即在节理的初始剪切滑移阶段, 剪切荷载只是使得节理部分上、下 2 个面进行咬合调整, 并不会对岩桥力学性质产生弱化影响; m , u_f 反映了岩桥材料性质对弱化度的影响。

根据式(2)得到的岩桥力学性质弱化度 δ 的变化规律如图 5 所示。 m 反映了弱化曲线的形状, 在其他条件相同的情况下, m 的数值越大, 岩桥力学性质弱化越快, 表现为弱化曲线越陡, 并且岩桥弱化度趋近于 1 时对应的剪切位移随着 m 值的增大而减小; u_0 对弱化

度 δ 的影响表现为达到峰值剪切位移时岩桥的弱化度随着 u_0 值的增大而减小, 这主要是由于节理面的初始切向滑移位移主要是节理面间的咬合调整过程, 不会对岩桥产生弱化影响, 当峰值剪切位移相同时, 岩桥的弱化程度相应地就会减小, 但是岩桥弱化度趋于 1 时对应的剪切位移基本相同。

利用式(2)确定岩桥的弱化度时, 最为关键的是确定 m 。当 m 确定之后, 就可以根据直剪试验得到的剪切曲线得到每一剪切位移量下的岩桥弱化度。目前确定参数 m 的方法主要是根据试验结果进行回归分析来确定, 具体确定过程可以参考曹文贵等^[9]的研究, 在此不再赘述。

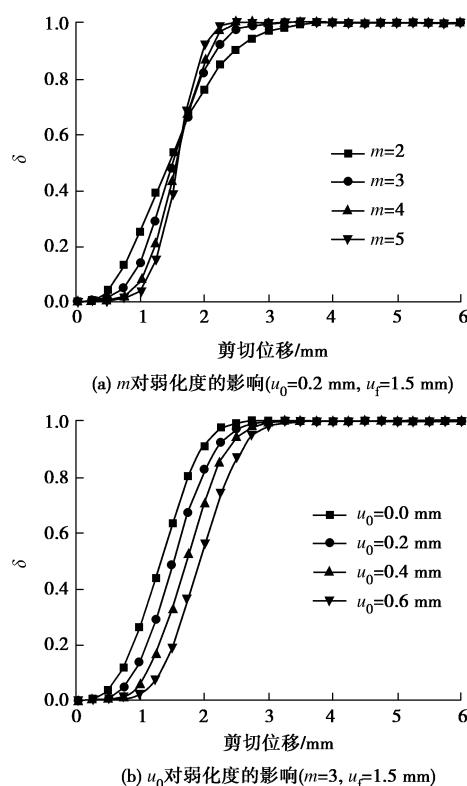


图 5 弱化度 δ 的变化规律

Fig. 5 Changing laws of weakening degree δ

3 改进的 Jennings 抗剪强度准则

3.1 Jennings 准则

Jennings 抗剪强度准则是目前估算非贯通节理岩体峰值抗剪强度最常用的公式。Jennings 认为岩桥与节理破坏均遵循 Mohr-Coulomb 准则, 以加权平均的方法计算非贯通节理岩体的峰值抗剪强度。Jennings 公式为

$$\begin{aligned} \tau &= c + \sigma_n \tan \varphi = kc_j + (1-k)c_i + \\ &\quad \sigma_n [k \tan \varphi_j + (1-k) \tan \varphi_i] \end{aligned} \quad (3)$$

其中,

$$\begin{cases} c = kc_j + (1-k)c_i, \\ \tan \varphi = [k \tan \varphi_j + (1-k) \tan \varphi_i] \end{cases} \quad (4)$$

式中 τ 为峰值抗剪强度; k 为联通率; c , c_j , c_i 分别为加权平均黏聚力、节理面的黏聚力、岩桥的黏聚力; φ , φ_j , φ_i 分别为加权平均摩擦角、节理面的摩擦角、岩桥的摩擦角。

Jennings 准则不能反映岩桥弱化对非贯通节理岩体峰值抗剪强度的影响, 也没有考虑节理面起伏情况的影响。

3.2 改进的 Jennings 准则

考虑到非贯通节理岩体的岩桥与节理具有不同破坏特点, 在分析非贯通节理岩体剪切力学特性的基础上做出如下假定: ①在剪切初始阶段, 岩桥承担的剪切应力随剪切位移的增大而增加; 当切向位移到达岩桥的峰值位移后, 岩桥的强度参数逐步降为残余强度参数。此后, 非贯通节理岩体的抗剪强度与弱化的抗剪强度参数有关。②考虑到节理面与岩桥的区别, 根据节理的接触状态, 节理面所受到的法向应力应等于总的法向应力乘以传压系数。为方便分析, 假定传压系数为 1.0, 即节理面上承担的法向应力与岩桥部分承担的法向应力一致。③在直剪试验中, 节理端部由于不断有新裂纹产生, 实际的节理元是逐步增大的, 但增加的节理元与既有的节理元相比比重较小, 为方便分析, 不予考虑新增节理元对节理比重增加的影响, 而是通过岩桥的力学参数弱化来反映新增节理元。④非贯通节理岩体的力学性质是岩桥、节理力学性质的综合; 直剪试验中节理元端部是应力集中部位, 该处是岩桥弱化严重区域, 向岩体内部弱化逐渐减弱, 即岩桥弱化是不均匀的。采用以剪切位移为变量的岩桥弱化模型对此进行平均化处理, 即认为弱化区域内岩桥力学弱化是均等的。⑤岩桥部分由未弱化岩桥与弱化后的岩桥组成, 其相应的力学参数取值分别取岩桥的基本强度参数与弱化后的强度参数。

非贯通节理岩体岩桥部分的抗剪强度由未弱化岩桥部分与弱化后的岩桥部分构成, 考虑岩桥力学性质弱化的 Jennings 抗剪强度准则由 3 部分构成: ①未弱化岩桥部分的抗剪强度; ②岩桥弱化部分弱化后的抗剪强度; ③节理面的抗剪强度。本文提出的改进的 Jennings 抗剪强度准则为

$$\begin{aligned} \tau &= (1-k)(1-\delta)(c_i + \sigma_n \tan \varphi_i) + (1-k)\delta \left(1 - \frac{\delta}{m}\right) \cdot \\ &\quad (c_i + \sigma_n \tan \varphi_i) + k\tau_p \end{aligned} \quad (5a)$$

$$\tau = (1-k)(1-\delta)(c_i + \sigma_n \tan \varphi_i) + (1-k)\delta \left(1 - \frac{\delta}{m}\right) \cdot$$

$$(c_i + \sigma_n \tan \varphi_i) + k\tau_r . \quad (5b)$$

式中 k 为联通率; δ 为弱化度; c_i , φ_i 分别为岩桥的黏聚力、摩擦角; τ_p , τ_r 分别为节理的峰值抗剪强度、残余抗剪强度; 其余参数含义同前。

根据 Barton^[15]的研究, 一般节理面的峰值剪切位移为节理面长度的 1%, 因此, 对式(5)做出如下规定: 若节理岩体峰值剪切位移 $u_f \leq 0.01L$ (L 为节理面长度), 则取式(5a); 若节理岩体的峰值剪切位移 $u_f > 0.01L$, 则取式(5b)。

基于岩桥力学性质弱化的改进 Jennings 抗剪强度准则从本质上而言也是基于加权平均的思想求取抗剪强度, 但是相比 Jennings 准则而言考虑了岩桥力学性质弱化的影响。

3.3 参数确定

((1) 岩桥、节理面的抗剪强度参数 c_i , φ_i 与 c_j , φ_j 由直剪试验获得。

(2) 节理峰值抗剪强度 τ_p 由夏才初等^[16]提出的经验公式求取, 即

$$\tau_p = \sigma_n \cdot \tan \left\{ i \left[f(\sigma_c / \sigma_n) \right] + \varphi_b \right\} . \quad (6)$$

式中 σ_c 为节理面壁抗压强度; $f(\sigma_c / \sigma_n)$ 为与节理岩壁力学性质和形貌测试采样间隔有关的量; φ_b , i 分别为节理面基本摩擦角、节理面起伏角。

(3) 节理的残余抗剪强度 τ_r 由 Mohr-Coulomb 准则确定, 即

$$\tau_r = \sigma_n \cdot \tan \varphi_r , \quad (7)$$

式中, φ_r 为节理面残余摩擦角。

(4) 弱化度 δ 及其相关的参量均可由直剪试验确定, 详见文献[12]。

在本次试验试验中, 由于所得的节理岩体峰值位移均大于 0.01L, 因此节理面的强度均以残余强度考虑; 在直剪试验中获得的不同起伏角的非贯通节理岩体的弱化度参数见表 2^[8]; 抗剪强度实测值与理论预测值见表 3、图 6。

对试验结果采用式(3)、(5)进行比优分析, 结果见表 4, 对理想结果而言应有 $\tau_{pre} / \tau_{mea} = 1.0$ 。从表 4 可以看出: ①采用式(5)计算所得的 3 个比较参数均比采用式(3)计算所得结果接近 1.0, 说明式(5)具有更好的预测效果, 更能真实地反映非贯通节理岩体的峰值强度; ②相对误差平方和越小, 理论预测越合理、可靠: 采用式(5)计算所得的相对误差的平方和 $\sum \left(1 - \frac{\tau_{pre}}{\tau_{mea}} \right)^2$ 比采用式(3)计算所得结果更小; ③若标准偏差与预测平均值的比值定义为关联系数, 即 $\left(\frac{\tau_{pre}}{\tau_{mea}} \right)_{\sigma} / \left(\frac{\tau_{pre}}{\tau_{mea}} \right)_{ave}$, 则式(5)计算所得结果 (0.01)

比式(3)计算所得结果 (0.19) 更小。关联系数越小, 说明理论预测结果离散性越小、越符合实际情况。

表 2 剪切应力 - 变形参数

Table 2 Parameters of shear stress-deformation

$i/(^{\circ})$	u_0/mm	u_f/mm	m	峰值剪切位移/mm
0	0.1	1.95	1.8	1.89
	0.1	2.20	1.9	2.18
	0.1	2.45	2.1	2.70
	0.1	2.50	2.3	2.98
	0.1	2.90	3.5	3.93
15	0.2	1.89	1.8	2.13
	0.2	2.05	1.9	2.53
	0.2	2.12	2.1	2.95
	0.2	2.39	2.3	3.62
	0.2	2.57	3.5	4.38
30	0.3	1.84	1.8	2.19
	0.3	1.99	1.9	2.98
	0.3	2.01	2.1	3.63
	0.3	2.32	2.3	3.99
	0.3	2.48	3.5	4.93

表 3 峰值抗剪强度计算值与试验结果的比较分析

Table 3 Comparison of shear strength between theoretical predictions and experimental results

起伏角 $i/(^{\circ})$	法向应 力/MPa	峰值抗剪强度/MPa		相对误差/%	
		式(3)	式(5)	式(3)	式(5)
0	0.5	2.50	1.90	32.46	0.53
	1.0	2.86	2.23	31.34	2.29
	1.5	3.22	2.61	19.36	-3.33
	2.0	3.58	2.98	20.22	0.00
	3.0	4.30	3.80	9.46	-3.31
15	0.5	2.50	2.01	17.37	5.63
	1.0	2.86	2.45	13.04	3.16
	1.5	3.22	2.90	9.15	1.69
	2.0	3.58	3.34	-1.10	-7.73
	3.0	4.30	4.32	-1.83	1.37
30	0.5	2.50	2.22	14.16	1.37
	1.0	2.86	2.86	-4.03	-4.03
	1.5	3.22	3.42	-11.29	-5.79
	2.0	3.58	3.91	-10.28	-2.01
	3.0	4.30	4.94	-12.78	0.20

表 4 两种抗剪强度准则比优分析

Table 4 Priority analysis on two shear strength criterions

比较参数	式(3)	式(5)
$\left(\frac{\tau_{pre}}{\tau_{mea}} \right)_{ave} \pm \sigma$	1.08 ± 0.20	0.98 ± 0.01
$\left(\frac{\tau_{pre}}{\tau_{mea}} \right)_{max}$	1.32	1.02
$\left(\frac{\tau_{pre}}{\tau_{mea}} \right)_{min}$	0.87	0.94
$\sum \left(1 - \frac{\tau_{pre}}{\tau_{mea}} \right)^2$	0.41	0.02

注: τ_{pre} 为强度预测值、 τ_{mea} 为强度实测值、 σ 为试验标准偏差; ave 表示求均值; max, min 分别表示强度预测值与实测值比值的最大值、最小值。

综上分析, 可以看出考虑岩桥力学性质弱化并同时考虑节理面起伏情况的改进 Jennings 抗剪强度准则的计算值更接近实测值, 这表明岩桥在直剪试验中产生的弱化会对非贯通节理岩体的峰值抗剪强度产生影响, 若不加以修正则会产生偏差。

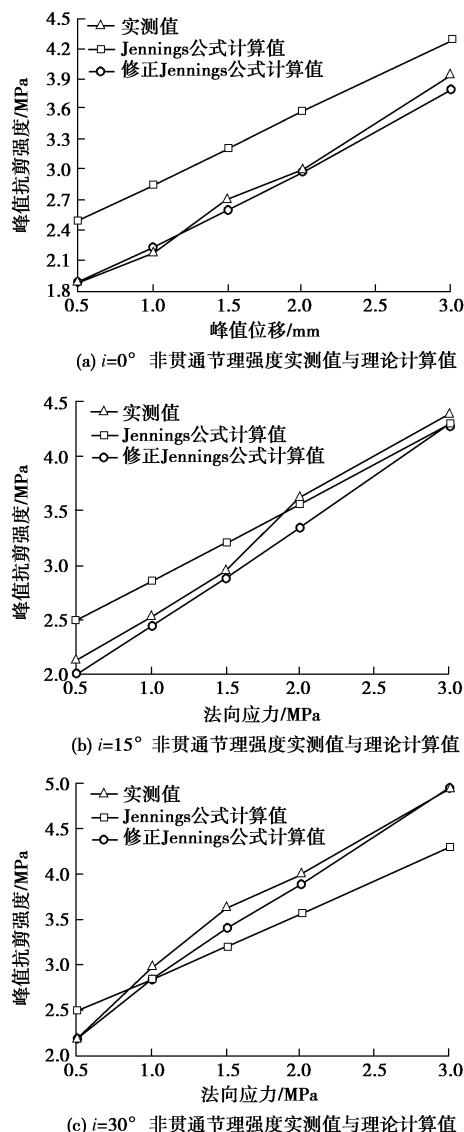


图 6 试验值与理论计算值

Fig. 6 Test results and theoretical predictions

4 讨 论

虽然考虑了岩桥在直剪试验中力学性质弱化及节理面起伏情况对非贯通节理岩体峰值抗剪强度的影响, 提出的改进准则与实测值更接近, 在以下 3 方面仍然需要继续探讨。

(1) 提出的改进准则是基于一种平均化的思想将岩桥分为未弱化区与弱化区并分别采用的相应的力学参数计算, 而岩桥在剪切过程中力学性质弱化是一个渐进的过程, 节理端部是弱化严重区域, 向岩体内部

弱化逐渐减弱, 因此计算值与实测值仍然具有一定的偏差, 如何更准确地定量描述岩桥弱化, 是一个值得研究的问题。

(2) 节理面的峰值剪切位移取值是基于 Barton 经验公式 ($0.01L$) 计算的, 与节理面实际的峰值剪切位移存在一定量的偏差。因此, 在利用该公式判断节理面的峰值抗剪强度取值时必然存在一定的误差。

(3) 岩桥弱化后的力学参数是关于弱化度的函数, 在直剪试验中很难准确确定弱化区域的力学参数, 一般根据试验结果回归分析确定; 黏聚力弱化过程与内摩擦角弱化过程是否具有相同的机制或者具有相同的弱化比例, 没有进行深入的探讨, 而是采取相同的弱化系数 ($1 - \delta/m$)。

5 结 论

Jennings 抗剪强度准没有考虑岩桥力学性质弱化的影响, 计算值与试验值有较大出入。在综合考虑岩桥力学性质弱化的影响以及节理面的起伏情况后, 在岩桥弱化力学模型的基础上提出改进的 Jennings 准则。新准则是在若干假设的基础上提出的, 部分参数的获取也是基于经验数据, 计算值虽然更接近实测值, 仍然有许多值得完善的地方。得出以下 2 点结论。

(1) 直剪试验表明岩桥会逐步产生弱化, 非贯通节理岩体的抗剪强度应由未弱化区岩桥的抗剪强度、弱化区岩桥的抗剪强度与节理面的抗剪强度组成; 说明, 采用定量的岩桥弱化力学模型考虑岩桥弱化对非贯通节理岩体的峰值抗剪强度的影响。

(2) 根据试验结果从多个角度对两个抗剪强度准则进行比优分析, 结果表明新准则因考虑了岩桥弱化及节理面粗糙特性的影响, 与改进前的 Jennings 准则相比, 计算结果更接近实测值, 表明了新准则的合理性。

参 考 文 献:

- [1] 朱维申, 李术才, 陈卫忠. 节理岩体破坏机制和锚固效应及工程应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2002. (ZHU Wei-shen, LI Shu-cai, CHEN Wei-zhong. Failure mechanism and anchorage effect of joints rock mass and its application to engineering [M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese))
- [2] REYES O, EINSTEIN H H. Failure mechanics of fractured rock—a fracture coalescence model [C]// Proceedings of 7th International Congress of Rock Mechanics. USA: Balkema Publishes, 1991: 333 – 340.
- [3] GEHLE C, KUTTER H K. Breakage and shear behavior of intermittent rock joints [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1996, 33(2): 131 – 140.

- Mechanics and Mining Sciences, 2003, **40**(5): 687 - 700.
- [4] WONG R H C, CHAU K T. Crack coalescence in a rock-like material containing two cracks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1998, **35**(2): 147 - 164.
- [5] WONG R H C, CHAU K T, TANG C A, et al. Analysis of crack coalescence in rock-like materials containing three flaws—part I: experimental approach[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, **38**(7): 909 - 924.
- [6] STIMPSON B. Failure of slope containing discontinuous planar joints[C]// Proceedings of the 19th U.S Symposium on Rock Mechanics. [S.1]:[s.n.], 1978: 296 - 300.
- [7] LAJTAI E Z. Shear strength of weakness planes in rock[J]. Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr, 1969, **6**(7): 499 - 515.
- [8] 刘远明. 基于直剪试验的非贯通节理岩体扩展贯通研究[D]. 上海: 同济大学, 2007. (LIU Yuan-ming. Study of failure models and strength of rock mass containing discontinuous joints in direct shear test[D]. Shanghai: Tongji University, 2007. (in Chinese))
- [9] 曹文贵, 方祖烈, 唐学军. 岩石损伤软化统计本构模型之研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, **17**(6): 628 - 633. (CAO Wen-gui, FANG Zu-lie, TANG Xue-jun. A study of statistical constitutive model for soft and damage rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, **17**(6): 628 - 633. (in Chinese))
- [10] 曹文贵, 张升. 基于 Mohr-Coulomb 准则的岩石损伤统计分析方法研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2005, **32**(1): 43 - 47. (CAO Wen-gui, ZHANG Sheng. Study of the statistical analysis of rock damage based on Mohr-Coulomb criterion[J]. Journal of Hunan University (Natural Science), 2005, **32**(1): 43 - 47. (in Chinese))
- [11] 曹文贵, 赵明华, 刘成学. 基于统计损伤理论的莫尔 - 库仑岩石强度判据修正方法之研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(14): 2403 - 2408. (CAO Wen-gui, ZHAO Ming-hua, LIU Cheng-xue. Study of rectified method of Mohr-Coulomb strength criterion for rock based on statistical damage theory[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(14): 2403 - 2408. (in Chinese))
- [12] 夏才初, 肖维民, 刘远明. 非贯通节理的岩桥弱化力学模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(8): 1538 - 1546. (XIA Cai-chu, XIAO Wei-min, LIU Yuan-ming. Study of mechanical model for weakening process of discontinuous joint rock bridge[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(8): 1538 - 1546. (in Chinese))
- [13] 刘远明, 夏才初. 非贯通节理岩体直剪贯通模型和强度研究[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(10): 1242 - 1247. (LIU Yuan-ming, XIA Cai-chu. Study of models and strength behavior of rock mass containing discontinuous joints in direct shear[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(10): 1242 - 1247. (in Chinese))
- [14] 刘远明, 夏才初. 非贯通节理岩体直剪试验研究进展[J]. 岩土力学, 2007, **28**(8): 1719 - 1724. (LIU Yuan-ming, XIA Cai-chu. Advances in research of rock masses containing discontinuous joints in direct shear test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(8): 1719 - 1724. (in Chinese))
- [15] BARTON N. Estimation of in situ shear strength from back analysis of failed rock slopes[M]. Nancy Int Symp Rock Mech Rock Fracture, 1971.
- [16] 夏才初, 孙宗顾. 工程岩体节理力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 2002. (XIA Cai-chu, SUN Zong-qi. Engineering rock mass joints mechanics[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2002. (in Chinese))