

# 质疑岩石巴西圆盘拉伸强度试验

喻 勇

(西南交通大学 应用力学与工程系, 四川 成都 610031)

**摘要:** 指出人们使用了 40 多年的巴西圆盘试验拉伸强度公式是来自二维问题的弹性力学解答, 而实际情况并不满足该公式所要求的平面应力或平面应力条件。分析指出, 在三维条件下影响试样应力分布的因素有试样高径比和材料的泊松比。通过 40 次三维有限元分析, 得到了高径比和泊松比对试样拉应力分布影响的规律。发现了试样中最大拉应力出现在试样端面的中心, 并拟合出了最大拉应力的计算公式。根据 Griffith 强度理论和 Mohr 强度理论, 计算了试样中的最大等效应力, 发现试样的破坏不可能满足中心起裂条件。由于加载点应力集中的影响, 试样必然从端面加载点处起裂破坏。因此认为巴西试验方法已不适合用于测试岩石类脆性材料的抗拉强度。

**关键词:** 岩石力学; 巴西试验; 抗拉强度; 高径比; 泊松比; 三维有限元法; 强度理论; 岩石

**中图分类号:** TU 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2005)07-1150-08

## QUESTIONING THE VALIDITY OF THE BRAZILIAN TEST FOR DETERMINING TENSILE STRENGTH OF ROCKS

YU Yong

(Department of Applied Mechanics and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** The extensively used formula for estimating the tensile strength of rocks under the Brazilian test is based on the 2D elastic theory and only suitable for very long or very short cylinders. However, the size of specimen in practice does not meet these preconditions. Under 3D conditions, it is found out that height-to-diameter ratio and Poisson's ratio are two factors influencing the stress distributions in rock cylinders. Through 40 3D FEM simulations, the influences of the height-to-diameter ratio and Poisson's ratio upon the stress distribution within the specimen were studied. It is found that the largest tensile stress within the specimen is always at the center of end surface. A fitting formula of largest tensile stress is presented. Lastly, the largest equivalent stresses bases on Griffith strength theory and Mohr strength theory were calculated. And it is found the largest equivalent stress is not at the center of the end surface of cylinder but always at the loading point of the end surface. Therefore, the Brazilian test is not suitable to measure the tensile strength of rock-like materials.

**Key words:** rock mechanics; Brazilian test; tensile strength; height-to-diameter ratio; Poisson's ratio; 3D FEM; strength theory; rock

### 1 引言

由于岩石材料的脆性特征, 使得直接测量其抗

拉强度变得十分困难, 因此, 人们普遍采用间接方法测量其抗拉强度。最常用的方法就是巴西圆盘试验方法。

如图 1 所示, 巴西圆盘试验是对圆盘试样进行

**收稿日期:** 2003-07-24; **修回日期:** 2003-10-02

**项目基金:** 西南交通大学基础科学研究基金资助项目(2004B13)

**作者简介:** 喻 勇(1969-), 男, 博士, 1990年毕业于西安建筑科技大学采矿工程专业, 现任副教授, 主要从事工程岩石力学方面的教学与研究工作。

E-mail: yuyong2000@126.com

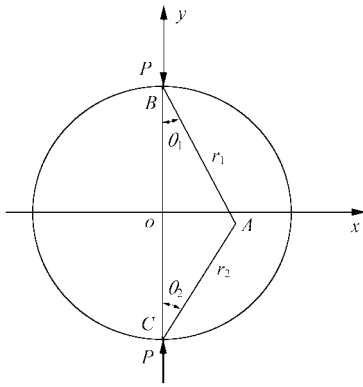


图 1 二维圆盘试样受力示意图  
Fig.1 Sketch of 2D Brazilian disk test

径向加载，试验机的荷载通过紧贴试样上下端的 2 根钢丝垫条作用于圆盘，使其承受线荷载，荷载作用线方向通过圆盘的轴线，并依据下式计算岩石试样的抗拉强度<sup>[1-4]</sup>：

$$\sigma_T = -\frac{2P}{\pi dt} \quad (1)$$

式中： $P$  为作用于试样的最大荷载， $d$  为圆盘直径， $t$  为圆盘厚度。

式(1)来自圆盘受力的弹性力学解答，即当圆盘受径向作用力时，圆盘内任一点 A 的各应力分量<sup>[5,6]</sup>为

$$\sigma_x = \frac{2P}{\pi t} \left( \frac{\sin^2 \theta_1 \cos \theta_1}{r_1} + \frac{\sin^2 \theta_2 \cos \theta_2}{r_2} \right) - \frac{2P}{\pi dt} \quad (2)$$

$$\sigma_y = \frac{2P}{\pi t} \left( \frac{\cos^3 \theta_1}{r_1} + \frac{\cos^3 \theta_2}{r_2} \right) - \frac{2P}{\pi dt} \quad (3)$$

$$\tau_x = \frac{2P}{\pi t} \left( \frac{\cos^2 \theta_1 \sin \theta_1}{r_1} + \frac{\cos^2 \theta_2 \sin \theta_2}{r_2} \right) \quad (4)$$

式中： $\sigma_x$  为均匀分布的拉应力，以拉应力为负；式中其他各个变量的含义见图 1。

设试样的破坏遵从 Griffith 强度准则，即

$$-\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)^2}{8(\sigma_1 + \sigma_3)} = \sigma_T \quad (5)$$

式中： $\sigma_1$  和  $\sigma_3$  分别为最大和最小主应力(以拉应力为正)， $\sigma_T$  为岩石单轴抗拉强度。

在圆心处，满足  $\sigma_1 + 3\sigma_3 = 0$ ，可知此处的水平拉应力就是式(5)的左边部分，即 Griffith 等效应力  $\sigma_G$ 。由此得到抗拉强度公式，即式(1)。该式的使用条件是试样的破坏由中心点最先起裂。这就是拉

伸强度公式的来历。

巴西试验用于测试岩石类脆性材料的抗拉强度已经有 40 多年的历史<sup>[7,8]</sup>，并在国内外诸多工程领域中得到广泛的应用。1978 年国际岩石力学学会将其作为测试岩石抗拉强度的推荐方法之一<sup>[1]</sup>，它已被列入美国 ASTM<sup>[9]</sup>、英国 BS、国际 ISO 标准中，1999 年和 2001 年我国将这种方法正式列入国家标准和行业标准中<sup>[3,4]</sup>。

然而作者注意到，人们在使用式(1)时忽略了一个重要前提条件，即圆盘应力分布公式是在平面应力或平面应变条件下推导出来的<sup>[5,10]</sup>，而实际试验中试样是一个三维实体。平面应力条件要求试样的高径比非常小，平面应变条件要求试样的高径比非常大。而文[1~4]规定的高径比为 0.5~1.0(太大或太小的径比都不便于试验测试)，显然这一范围内的高径比取值是不满足式(1)所遵从的前提条件的。因此由式(1)计算出的岩石抗拉强度是不够准确的。

事实上，从提出巴西试验方法开始就有了巴西试验与直接拉伸结果的对比。很多试验结果表明，由巴西试验得到的抗拉强度与直接拉伸法得到的结果有较大的出入，多数情况下巴西试验结果小于直接拉伸结果<sup>[11-13]</sup>。

本文是从三维角度来研究巴西试验中试样的应力分布规律，对巴西试验用于测试岩石抗拉强度的可行性提出了质疑。

## 2 影响巴西试验试样应力分布的因素

巴西试样何时发生破坏取决于试样中的应力分布特点，因此还需要找出影响试样应力分布的因素。

从三维角度来看，荷载及试样直径相同时，不同高度试样中的应力值是不同的。因此，高径比是影响试样应力分布的一个因素。

由弹性力学理论可知，对于一般空间问题，若不计体力，只须找到 3 个恰当的重调和函数，称其为伽辽金位移函数，使其满足位移及应力边界条件，即可得到该问题中各应力分量和位移分量的正确解<sup>[14]</sup>。

用伽辽金位移函数表示的各应力分量为

$$\sigma_x = 2(1 - \mu) \frac{\partial}{\partial x} \nabla^2 \xi + \left( \mu \nabla^2 - \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) \left( \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\partial \zeta}{\partial z} \right) \quad (6)$$

$$\sigma_y = 2(1-\mu) \frac{\partial}{\partial y} \nabla^2 \eta + \left( \mu \nabla^2 - \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \left( \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\partial \zeta}{\partial z} \right) \tag{7}$$

$$\sigma_z = 2(1-\mu) \frac{\partial}{\partial z} \nabla^2 \zeta + \left( \mu \nabla^2 - \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \left( \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\partial \zeta}{\partial z} \right) \tag{8}$$

$$\tau_{yz} = (1-\mu) \left( \frac{\partial}{\partial y} \nabla^2 \zeta + \frac{\partial}{\partial z} \nabla^2 \eta \right) - \frac{\partial^2}{\partial y \partial z} \left( \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\partial \zeta}{\partial z} \right) \tag{9}$$

$$\tau_{zx} = (1-\mu) \left( \frac{\partial}{\partial z} \nabla^2 \xi + \frac{\partial}{\partial x} \nabla^2 \zeta \right) - \frac{\partial^2}{\partial z \partial x} \left( \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\partial \zeta}{\partial z} \right) \tag{10}$$

$$\tau_{xy} = (1-\mu) \left( \frac{\partial}{\partial x} \nabla^2 \eta + \frac{\partial}{\partial y} \nabla^2 \xi \right) - \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \left( \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\partial \zeta}{\partial z} \right) \tag{11}$$

式中： $\xi$ ， $\eta$ ， $\zeta$ 均为位移函数，与试样的边界条件即试样尺寸有关； $\mu$ 为泊松比。

从以上各式可知，试样的应力分布与泊松比是有关系的。同时还可看出，在不计体力的条件下，应力分布与另2个材料参数即弹性模量和密度是没有关系的。这一点已为笔者的三维有限元分析所验证。

因此影响巴西试验试样的应力分布因素有2个，即高径比和泊松比，其中，高径比为试样的形状因素，泊松比为试样的材料参数。而巴西试验拉伸强度公式没有包含这2个参数。

### 3 不同高径比的巴西试验

为了研究高径比对文[1~4]所定义的抗拉强度的影响，采用三峡细粒闪长岩进行不同高度的劈裂拉伸试验。试样取自同一岩块，以保证其均质性。试样共分5组，试样直径统一，高度有5个尺寸。在普通试验机上进行试验，试样通过上下2根钢丝垫条的作用承受径向压缩直到破坏。用式(1)计算其抗拉强度，所得结果见表1。

根据表1中5组试验的平均高径比与平均抗拉强度试验数据，得出二者的关系曲线如图2所示。

表1 不同高径比的岩石劈裂拉伸强度

Table 1 Brazilian tensile strength of rock specimen with different of height-to-diameter ratio

组号	高度/mm	平均高径比	荷载/kN	抗拉强度/MPa	抗拉强度各组平均/MPa
1	22.3		19.2	11.19	
	22.3	0.46	15.3	8.90	9.35
	23.8		14.6	7.97	
2	30.4		24.2	10.32	
	30.6	0.62	23.7	10.08	9.27
	30.4		17.3	7.39	
3	39.2		23.2	7.67	
	39.2	0.79	30.3	10.02	8.88
	37.7		26.1	8.96	
4	49.7		28.0	7.29	
	49.7	1.01	34.7	9.07	7.57
	49.5		24.4	6.35	
5	60.2	1.23	28.5	6.13	7.49
	60.6		41.5	8.86	

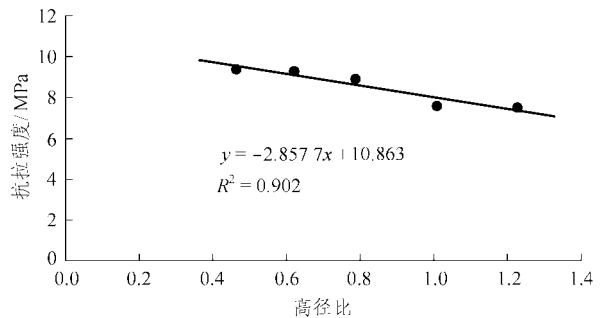


图2 岩石劈裂拉伸强度与试样高径比的关系

Fig.2 Rock Brazilian tensile strength versus height-to-diameter ratio

图2表明，按式(1)计算的试样抗拉强度随着试样高径比的增加而呈线性递减的趋势，最小二乘回归结果表明二者具有十分显著的线性关系，图2中相关系数R的平方值 $R^2 = 0.902$ 。

同一种岩石材料在不同高径时具有不同的抗拉强度，试验结果表明式(1)存在明显的局限性。

### 4 三维有限元分析

#### 4.1 计算方案

试图从理论上推导巴西试验的应力分布解答是极为困难的，而三维弹性有限元技术提供了从数值

计算角度研究这一问题的可行方法，因为三维弹性有限元技术包含了全部弹性力学理论，是完善的、数字化的弹性力学。用数值计算方法来进行理论研究，可以称其为数值试验。相对于传统的实物试验方法，采用数值试验方法，可以享受到很多自由探索的乐趣。例如，可以固定某些参数值不变，只改变单个参数的数值，以此来研究该参数对结果的影响。用数值计算方法求解巴西圆盘试样应力分布的问题，至少可以得到各种具体条件下该问题的一些实用公式。当然，指望从这些公式中归纳出巴西圆盘试样应力分布的通解这一愿望能否实现还不得而知。不过可以肯定的是，从三维有限元分析得出的这些公式是符合弹性力学理论的，是巴西圆盘试样受力问题的特解。而且，通过三维有限元分析可以穷尽巴西试验所有不同的具体形式，全部特解之和就组成了巴西试验的拉伸强度的完整解答。

基于上述认识，本文通过三维有限元弹性分析研究高径比和泊松比对巴西试样应力分布的影响。

岩土工程的岩石拉伸强度试验中，常采用直径约为 50 mm 的试样进行巴西试验<sup>[1-4]</sup>。本文所用有限元试验模型也采用直径为 50 mm 的试样进行研究，即所有模型的直径均为 50 mm，试验中只需通过改变试样高度就可变化高径比  $k$ 。选取了 5 种试样高度，即 10, 20, 25, 40, 50 mm，相应的高径比  $k$  分别为 0.2, 0.4, 0.5, 0.8, 1.0。泊松比  $\mu$  有 8 个取值，分别为 0, 0.1, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30, 0.35, 0.40。 $k$  与  $\mu$  的组合共有 40 种情况，因此需进行 40 次有限元计算。

采用美国 MSC 公司的三维有限元分析软件 Marc 得到的模型如图 3 所示(图中模型的高径比为 1)，试样的几何中心为坐标原点，加载方向为  $y$  轴负方向， $z$  轴为试样中心线， $x$  轴为水平方向。

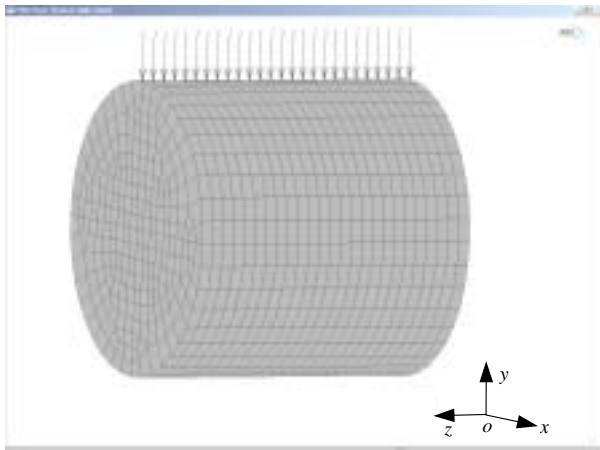


图 3 巴西试验三维有限元分析模型  
Fig.3 3D FEM model for Brazilian test

为直观起见，没有利用试样的对称性。模型直径为 50 mm，高度为 50 mm。采用 8 节点单元，共 6 100 个单元，6 890 个节点。在 40 次有限元计算中，所有高径比试样所承受的线荷载大小相等，均为 1 000 N/mm。由弹性理论并经有限元计算验证可知，在不计体力的条件下，材料的弹性模量和密度对模型的应力分布没有影响。本文选取材料的弹性模量为  $E = 40 \text{ GPa}$ ，密度为  $\rho = 2.7 \times 10^{-3} \text{ kg/mm}^3$ 。

模型的位移约束条件为：模型的底部与加载线对称的底边，在  $x, y$  方向没有位移，该底边的中点在  $z$  方向也没有位移，线荷载所通过平面的所有节点在  $x$  方向均无位移。

#### 4.2 有限元分析结果

为了解二维条件下巴西圆盘试样中水平正应力的分布规律，采用 MATLAB 软件，绘出由式(2)表示的水平正应力等值线图，如图 4 所示。

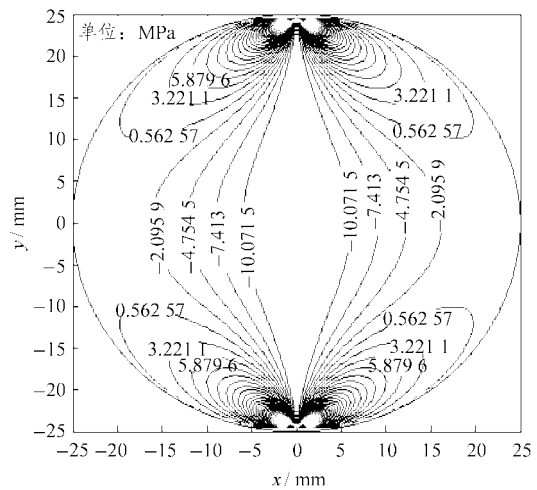


图 4 二维圆盘中的水平正应力分布等值线图  
Fig.4 Contours of stress  $\sigma_x$  in the 2D disc

图 5 为三维有限元模型中的任一横截面上的水平应力分布情况，对比图 4 可以发现，二者的应力分布规律是相似的。在任一横截面上，水平方向的正应力以拉应力为主(有限元分析中以拉应力为正)，竖直方向正应力以压应力为主，并且在绝大多数情况下(两端的应力集中点除外)，水平方向的拉应力就是最大主应力，竖直方向的压应力就是最小主应力。 $z$  方向上的应力值比水平方向拉应力值小 1~2 个数量级。且发现最大拉应力出现在横截面的中心处。

于是，对于 40 次三维有限元计算结果，可以重点关注试样横截面圆心处即试样轴线上的水平拉应

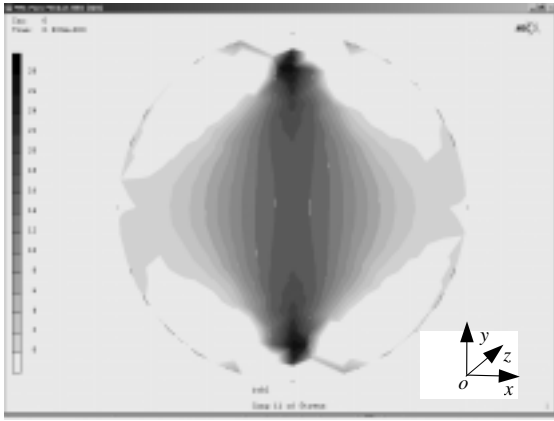


图5 三维模型中的水平正应力分布等值云图(单位:MPa)  
Fig.5 Contour bands of stress  $\sigma_x$  in the 3D FEM model (unit:MPa)

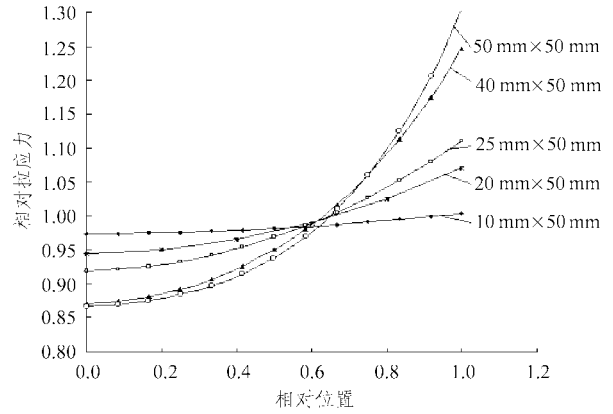


图7 高径比对试样轴线上拉应力的影响( $\mu = 0.25$ )  
Fig.7 Tensile stress along the cylinder axis versus height-to-diameter ratio ( $\mu = 0.25$ )

力变化情况。

图6为高径比  $k = 1$  的试样,在8种泊松比条件下拉应力沿试样轴线变化的曲线。由于对称性,只画出了一半高度的试样所对应的曲线。图6采用无量纲变量,图中横轴代表轴线上的相对位置,即坐标原点代表圆柱试样轴线的中点,横坐标为1的点对应试样轴线的1个端点。纵轴上的坐标值为相对拉应力,是  $\sigma_x$  与 12.55 MPa 的比值。12.55 MPa 是由二维有限元计算得出的圆盘圆心处的拉应力。而根据式(1)算出的结果为 12.73 MPa,二者十分接近。

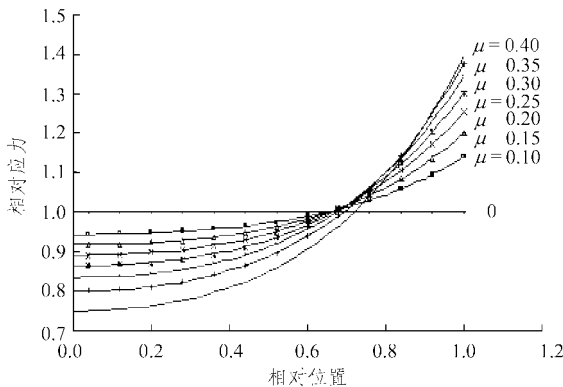


图6 泊松比对试样轴线上水平拉应力的影响( $k = 1$ )  
Fig.6 Tensile stress along the cylinder axis versus Poisson's ratio (height-to-diameter ratio  $k = 1$ )

图7为泊松比  $\mu = 0.25$ ,高径比取不同值时,试样轴线上(一半长度)相对拉应力的变化情况。

从图6,7可以看出泊松比、高径比对试样应力分布均有着明显的影响。随着泊松比和高径比的增大,试样横截面上中点处的拉应力值沿着试样厚度方向也增大。

有限元分析结果表明,除应力集中区外,试样中的最大拉应力出现在两端面的中心处。显然试样的破坏将从端面开始,而端面上的应力分布规律与平面问题相似。从40次有限元分析结果知,端面中心处压应力与拉应力的比值范围为 2.4~3.3,高径比越大,端面处中心点的压应力与拉应力比值越大。泊松比对端面中心处压应力与拉应力之比也有影响,但不如高径比明显。

将端面中心点处的拉压应力值关系代入式(5)可知,若试样为中心起裂,则拉伸强度是端面中心点拉应力 1.005~1.032 倍,在工程许可的精度范围内,完全可将此系数近似取为 1。在满足中心起裂的前提条件下,可用试样破裂时端面中心处的拉应力作为岩石的拉伸强度。

### 4.3 试样端面圆心处的拉应力表达式

为了得到试样端面中心点处的拉应力表达式,在式(2)中增设一个修正系数  $y$ ,可得

$$\sigma_T = y \frac{2P}{\pi dt} \tag{12}$$

显然,  $y$  是三维条件下的试样端面圆心处拉应力与二维条件下圆盘中心拉应力的比值。

根据修正系数的定义,试样端面圆心处的相对拉应力就是式(2)中的修正系数  $y$ 。从40次有限元分析结果,可以得到对应于40种  $k, \mu$  组合的拉伸强度修正系数  $y$ 。现将它们列于表2中。

对表中数据进行拟合,可将修正系数  $y$  表达成泊松比与高径比的函数式。具体做法如下所述。

首先,对某一高径比(如  $k = 1$ )条件下的8组泊松比  $\mu$  与修正系数  $y$  进行拟合,得到如下形式的拟合方程:  $y = a_1\mu^2 + b_1\mu + 1$ 。在第2个高径比条件下,

又可得到另一个形式相同的拟合方程： $y = a_2\mu^2 + b_2\mu + 1$ 。以此类推，总共可以得到 5 个形式相同的拟合方程。

然后，对 5 个拟合方程中的系数进行拟合，使方程中的系数  $a$  和  $b$  都可表示成高径比  $k$  的函数。这样，第 1 步中的 5 个方程就可用 1 个方程来表示，即

$$y = (-13.58k^3 + 32.01k^2 - 24.92k + 5.13)\mu^2 + (-1.57k^2 + 4.05k - 0.94)\mu + 1 \quad (13)$$

为检验式(13)的误差，将式中的  $k, \mu$  取成表 1 中的相应的  $k, \mu$  值，比较由式(13)得出的  $y$  值与表 2 中的  $y$  值的差别，修正系数  $y$  的相对误差列于表 3 中。从表 2 可以看出，高径比为 0.2 时，式(13)与表 1 的相对误差较大，其最大值为 18.43%。而高径比为 0.4~1.0 时，式(13)的误差是很小的，它与表 2 的最大相对误差仅为 0.5%。因此式(13)的适用范围是， $k \in [0.4, 1], \mu \in [0.1, 0.4]$ 。

表 2 式(12)中的修正系数  $y$

Table 1 Correcting coefficient  $y$  in Eq.(12) from 3D FEM

高径比	泊松比							
	0	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40
0.2	1	0.96	1.01	1.00	1.00	1.00	0.98	0.96
0.4	1	1.03	1.05	1.06	1.07	1.08	1.08	1.07
0.5	1	1.05	1.08	1.09	1.11	1.12	1.12	1.11
0.8	1	1.11	1.16	1.21	1.25	1.28	1.30	1.31
1.0	1	1.14	1.20	1.25	1.30	1.34	1.38	1.40

表 3 式(13)与表 2 的相对误差

Table 2 Relative error between Eq.(13) and Table 2 %

高径比	泊松比						
	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40
0.2	3.82	-0.45	0.95	3.22	6.49	11.16	18.43
0.4	0.20	0.19	0.11	-0.03	-0.15	-0.14	0.44
0.5	0.50	0.50	0.35	0.09	-0.19	-0.23	0.72
0.8	0.16	0.15	0.05	-0.12	-0.30	-0.33	0.30
1.0	0.07	0.04	-0.06	-0.23	-0.40	-0.45	0.05

以上过程用多项式对  $y$  进行拟合，是为了使用方便，且精度较高。也可用其他函数形式进行拟合，

但误差较大。

## 5 试样破坏的强度理论

巴西圆盘试样测拉伸强度的公式基于 Griffith 强度理论。在中心起裂的前提下，可由式(12)结合表 2 或式(13)测量出试样的抗拉强度。至此，三维条件下的巴西试验拉伸强度公式似乎得以圆满解决。

然而，事实并非如此。因为试样破坏的中心起裂条件不可能得到满足。

从试验观察可知，试样总是沿着受压面分成相等的两部分，这表明起裂点必然在受压面上(受压面过试样轴线)。

任取高径比为 0.6(即直径 50 mm，高度 30 mm)、泊松比为 0.2 的三维模型进行分析，在受压面上任选一平行于试样轴线的直线(直线方程为  $x = 0 \text{ mm}, y = 15 \text{ mm}$ )，根据三维有限元计算结果，可得到 Griffith 等效应力随试样厚度  $z$  轴方向的变化情况，如图 8 所示，图中曲线的左端点对应该直线的中点，右端点对应试样的端面(即  $z = 15 \text{ mm}$ )。

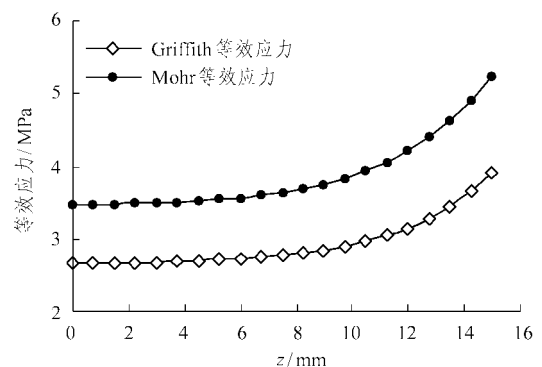


图 8 等效应力沿  $z$  轴方向的变化( $k = 0.6, \mu = 0.2, x = 0 \text{ mm}, y = 15 \text{ mm}$ )

Fig.8 Equivalent stress varies along  $z$  direction( $k = 0.6, \mu = 0.2, x = 0 \text{ mm}, y = 15 \text{ mm}$ )

由图 8 可知，试样端面上的等效应力最大，说明试样必然先从端面受压直径上起裂。

再用同样方法绘出该模型端面受压直径上的 Griffith 等效应力，如图 9 所示。水平坐标轴的 0 点对应端面的圆心， $y = 25 \text{ mm}$  的点对应端面上的加载点。由图 9 可知，端面圆心处的等效应力并非最大，而是受压直径上的最小值。越靠近试样的加载点，等效应力越大。因加载点处存在应力集中现象，

故该处的等效应力最大，因此，试样必然先从加载点处起裂破坏。这一结论与人们试验观察到的现象是一致的。而关于中心点起裂的假设并没得到试验验证。

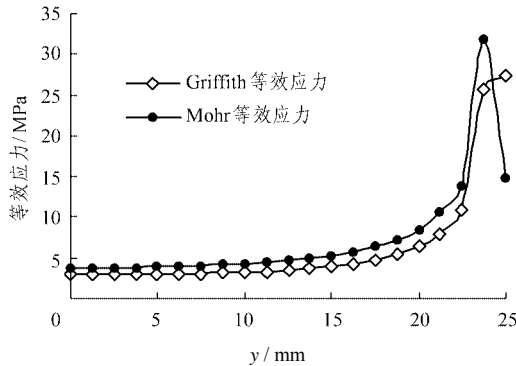


图9 试样端面受压直径上的等效应力( $k=0.6, \mu=0.2$ )  
Fig.9 Equivalent stress along the compressed diameter of the end surface of specimen ( $k=0.6, \mu=0.2$ )

上述结果具有非常重要的意义，因为它将彻底推翻目前使用的巴西试验拉伸强度公式。为慎重起见，作者用平面问题巴西试验验证了上述结果。在受压直径上，由式(4)知， $\tau=0$ ，因此，式(2)，(3)中 $\sigma_x = -\sigma_1, \sigma_y = -\sigma_3$ ，取水平方向拉应力为1，由此可以计算出受压直径上的 Griffith 等效应力，见图 10。可知二维条件下受压直径上的等效应力与三维条件下等效应力的变化趋势是一致的。

若用 Mohr 强度理论来考察试样破坏的起裂点，则 $\sigma_1$ 和 $\sigma_3$ 满足下式时，试样起裂破坏。该式为

$$\sigma_1 - \alpha\sigma_3 = \sigma_t \tag{14}$$

式中： $\alpha$ 为材料抗拉强度与抗压强度之比， $\sigma_t$ 为材料的抗拉强度。

取试样的抗压强度与抗拉强度之比为10，将试样内 Mohr 等效应力的变化曲线也绘于图8~10中。可知莫尔等效应力的变化规律与 Griffith 等效应的变化规律是相似，因此可以得出相同的结论，即试样端面受压直径上中心点处的等效应力最小，而加载点处的等效应力最大，试样不会从端面中心点起裂，而是从端面的加载点起裂。

若试样抗压强度与抗拉强度之比不为10，也可得出相同的结论。

通过上述分析可知，巴西圆盘试验不能保证试样的中心起裂，也不能避免加载点处的应力集中现象，因此该试样已不适合用于测量岩石类脆性材料

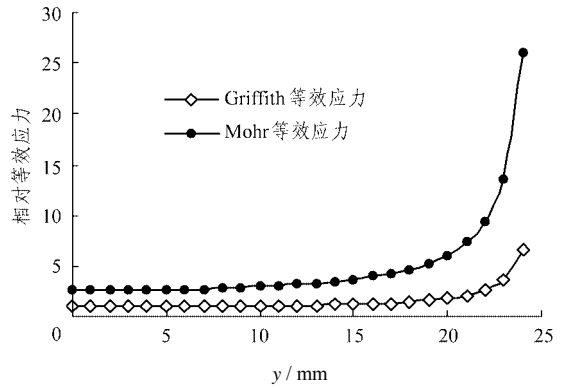


图10 二维巴西圆盘中受压直径上的等效应力  
Fig.10 Equivalent stress along the compressed diameter of 2D disc

的抗拉强度。

## 6 结 语

岩石巴西试验测抗拉强度问题是一个三维弹性力学问题，影响试样应力分布的因素除外力本身外，还有试样的高径比和材料的泊松比。通过三维有限元分析可知，试样端面中心处拉应力最大。但由于应力集中的存在，巴西圆盘试样不可能满足从端面中心点起裂的条件，而必然从端面上的加载点处起裂。由于应力集中现象的不可避免，作者认为圆盘巴西试样已不能用于测量岩石类材料的抗拉强度。

致谢 长江科学院钟作武、胡建敏高级工程师对本文试验方面所给予的帮助。

### 参考文献(References)：

- [1] ISRM. Suggested methods for determining tensile strength of rock materials[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr., 1978, 15(1): 99-103.
- [2] 中华人民共和国行业标准编写组. 水利水电工程岩石试验规程(DLJ204-81, SLJ2-81)[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1982.(The Professional Standard Compilation Group of People's Republic of China. Specifications for Rock Tests in Water Conservancy and Hydroelectric Engineering (DLJ204-81, SLJ2-81)[S]. Beijing: China Water Power Press, 1982.(in Chinese))
- [3] 中华人民共和国国家标准编写组. 工程岩体试验方法标准(GB/T50266-99)[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. Standard for Tests Method of Engineering Rock Masses(GB/T50266-99)[S].

- Beijing : China Planning Press , 1999.(in Chinese)
- [4] 中华人民共和国行业标准编写组. 水利水电工程岩石试验规程 (SL264-2001)[S]. 北京 : 中国水利水电出版社, 2001.(The Professional Standard Compilation Group of People's Republic of China. Specifications for Rock Tests in Water Conservancy and Hydroelectric Engineering(SL264-2001)[S]. Beijing : China Water Power Press , 2001.(in Chinese))
- [5] . 数学弹性力学的几个基本问题[M]. 赵惠元译. 北京 : 科学出版社, 1958. 249-251.(  
. Some Basic Problems in Mathematic Elastic Mechanics[M]. Translated by Zhao Huiyuan. Beijing : Science Press , 1958. 249-251.(in Chinese))
- [6] 高 磊. 矿山岩石力学[M]. 北京 : 机械工业出版社, 1987. 12-13.(Gao Lei. Rock Mechanics for Mine[M]. Beijing : China Mechanical Industry Press , 1987. 12-13.(in Chinese))
- [7] Hondros G. The evaluation of Poisson's ratio and the modulus of materials of a low tensile resistance by the Brazilian (indirect tensile)[J]. Test with Particular Reference to Concrete. Aust. J. Appl. Sci. , 1959 , 10(3) : 243-268.
- [8] Mellor M , Hawkes I. Measurement of tensile strength by diameter compression[J]. Engineering Geology , 1971 , 5(2) : 173-225.
- [9] ASTM. Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens(ASTM C496-86)[S]. [s. l.] :[s. n.] , 1986.
- [10] 铁摩辛柯, 古地尔. 弹性理论[M]. 徐芝纶译. 北京 : 高等教育出版社, 1990. 330.(Timshenco , Goodier. Elastic Theory[M]. Translated by Xu Zhilun. Beijing : Higher Education Press , 1990. 330.(in Chinese))
- [11] 张少华, 缪协兴, 赵海云. 试验方法对岩石抗拉强度测定的影响[J]. 中国矿业大学学报, 1999 , 28(3) : 243-246.(Zhang Shaohua , Miao Xiexing , Zhao Haiyun. Influence of test methods on measured results of rock tensile strength[J]. Journal of China University of Mining and Technology , 1999 , 28(3) : 243-246.(in Chinese))
- [12] 叶明亮, 续建科, 牟 宏等. 岩石抗拉强度试验方法的探讨[J]. 贵州工业大学学报(自然科学版) , 2001 , 30(6) : 19-25.(Ye Mingliang , Xu Jianke , Mou Hong , et al. Approach to test method of rock strength in uniaxial tension[J]. Journal of Guizhou University of technology (Natural Science) , 2001 , 30(6). 19-25.(in Chinese))
- [13] 窦庆峰, 岳 顺, 代高飞. 岩石直接拉伸试验与劈裂试验的对比研究[J]. 地下空间, 2004 , 24(2) : 178-181.(Dou Qingfeng , Yue Shun , Dai Gaofei. Experimental study on direct and indirect tension of rock[J]. Underground Space , 2004 , 24(2) : 178-181.(in Chinese))
- [14] 徐芝纶. 弹性力学(第二版 上册)[M]. 北京 : 高等教育出版社, 1982.(Xu Zhilun. Elastic Mechanics (Second Edition , Part I)[M]. Beijing : Higher Education Press , 1982.(in Chinese))
- [15] 李庆华. 材料力学[M]. 成都 : 西南交通大学出版社, 1994.(Li Qinghua. Material Mechanics[M]. Chengdu : Southwest Jiaotong University Press , 1994.(in Chinese))