

文章编号: 1005-3026(2004)09-0899-04

圆环试样用于岩石间接 拉伸强度测试的数值试验

朱万成¹, 冯 丹², 周锦添³, 唐春安¹

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110004; 2. 沈阳理工大学 辽宁 沈阳 110168;

3. 香港理工大学 土木与结构工程系 香港)

摘 要: 用岩石破坏过程分析数值软件(RFPA)对圆环试样用于岩石间接抗拉强度的测试过程进行数值试验,探讨了圆环内孔直径对于试样破裂模式及其强度测试结果的影响,阐明了不同内孔直径时岩石试样的破裂机制,并对该方法在实际应用中存在的问题进行了解释。数值试验得到的破裂模式和峰值强度与试验结果表现出较好的一致性。基于以上数值试验结果,提出了用开裂载荷来计算岩石间接抗拉强度的新的试验方案。

关 键 词: 岩石力学;圆环试样;拉伸强度;数值试验;破坏过程;破裂机制

中图分类号: TD 313 **文献标识码:** A

巴西实验是广泛用于测试岩石间接抗拉强度的方法,已被国际岩石力学与工程学会建议为测定岩石抗拉强度的标准方法^[1,2]。但是,在巴西盘试样最开始使用的阶段,人们发现在试样与加载板附近会产生应力集中,导致试样在该部位首先发生破裂。在这种情况下,试样的破裂不再是由于试样中部的拉应力造成的,从而导致了该巴西实验的失效。一些学者^[3~7]提出在巴西盘试样中钻一个孔,以保证该试样的破裂由孔的周边开始,这种试样就是本文要研究的环形试样。基于弹性理论,文献^[2]给出了内孔周边最大拉应力与施加的外部载荷 P 之间的关系,并给出了根据外部载荷的峰值 P_{\max} 来计算抗拉强度的公式,即

$$\sigma_{tr} = \left\{ \left[6 + 38 \left(r/R \right)^2 \right] / \right\} \frac{R_{\max}}{Rt} \quad (1)$$

式中, P_{\max} 为施加在试样上的峰值载荷, R 和 r 分别为圆环的外半径和内半径, t 为圆环的厚度, σ_{tr} 为用该方法测得的间接抗拉强度。

但人们发现用该试验方法及式(1)得到的岩石抗拉强度往往与中心孔的尺寸有关,并且测试的结果总是大于用其他方法测得的数值^[3,4]。本文利用自主开发的岩石破坏过程分析数值软件 RFPA 对该圆环试样的破裂过程进行数值试验,对实验室试验中观察的现象进行解释,并为该方

法用于岩石抗拉强度的测试提出了合理可行的建议。

1 RFPA 简介

RFPA 是一个能够模拟岩石渐进破坏的数值模拟程序。为了反映岩石材料性质的细观非均匀性,在该程序中首先把岩石材料看作是由大小相同的四边形单元组成,假定其材料性质满足 Weibull 分布。同时,这些组成材料的单元也作为有限元分析的单元,当其应力状态满足最大拉应力准则和摩尔库仑准则时单元开始损伤,满足弹性损伤的本构关系。在考虑材料力学性质非均匀性的前提下,用细观上简单的本构模型研究材料在宏观层次上复杂的破坏过程。文献^[8]对材料性质的 Weibull 分布赋值以及单元的本构关系作了详细的介绍,文献^[9,10]已用 RFPA 进行了岩石断裂的数值试验。

2 圆环试样破裂过程的数值模拟

2.1 数值模型

如图 1 所示,圆环试样的外径 R 为 150 mm,内径为 r ,这里取 $r/R = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6$,以研究内孔尺寸对于试样破裂模式及其强度测试值的影响。

收稿日期: 2004-01-15

基金项目: 辽宁省自然科学基金资助项目(20031019); 国家自然科学基金资助项目(50174013)。

作者简介: 朱万成(1974-),男,新疆呼图壁人,东北大学副教授;唐春安(1958-),男,湖南黔阳人,东北大学教授,博士生导师。

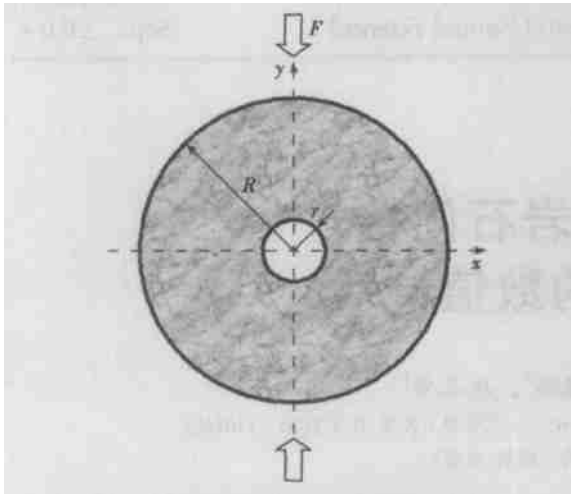


图 1 岩石试样的几何参数和加载条件
Fig. 1 Geometrical parameters and loading conditions for rock ring

在 RFPA 数值试验中,为了考虑岩石的非均匀性对于试样裂纹扩展及破裂过程的影响,组成岩石试样单元的物理力学参数(包括弹性模量、强度等)按照 Weibull 分布来赋值.这里岩石的材料参数按照文献[3]中的数值选取.当按照表 1 所列的参数由 RFPA 生成数值试样时,宏观上该试样所具有的弹性模量为 62.2 GPa,单轴抗压强度为 180 MPa,单轴抗拉强度为 15 MPa,泊松比为 0.28.外部载荷是分步施加的,采用以位移控制的加载方式,每步的加载量为 0.002 mm/步.

表 1 圆环试样的材料参数			
Table 1 The mechanical parameters of rock ring			
均质度	弹性模量	单轴抗压强度	压拉强度比
	平均值 MPa	平均值 MPa	
5	70 000	510	12

2.2 数值结果及分析

(1) 内孔直径对于试样破裂模式的影响

图 2 给出了当 $r/R = 0.1$ 时环形试样的载荷-位移曲线和不同载荷阶段的破裂模式.小孔的存在引起了明显的应力集中,当载荷达到试样峰值载荷的 40 % 时(图 2 中的 A 点),两条裂纹分别从孔的上端和下端的孔周边处萌生,同时向上和向下扩展到加载板的位置,并在此位置产生楔形裂纹,最终导致试样破裂成两半.在该过程中,裂纹存在明显的稳定扩展阶段(即图 2 中的 A 到 B 阶段).

当 $r/R = 0.4$ 时,一个裂纹首先在孔边上部萌生(图 3 中的 A 点),并不断向上扩展;同时,在孔边下沿也有裂纹萌生,在载荷-位移曲线上出现了明显的应力降低(图 3 中的 C 点),直到这两条

裂纹垂直扩展到加载板位置.随着外部位移的继续施加,裂纹停止扩展,并使试样所承受的载荷有所提高,达到了峰值(图 3 中的 D 点).当外部位移继续增加时,在 x 方向又萌生了一条拉裂纹,试样的承载能力降低(图 3 中的 E 点).此后,随着上部位移的增加,在试样左边也萌生一条裂纹

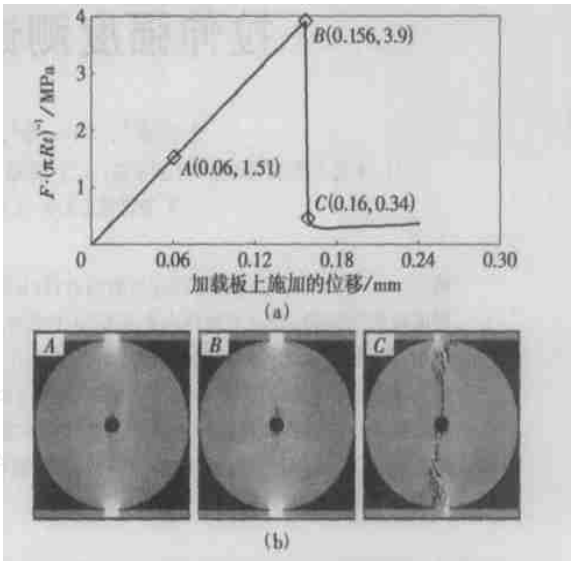


图 2 当 $r/R = 0.1$ 时环形试样的破裂过程(数值结果)
Fig. 2 Failure process of ring specimen with $r/R = 0.1$ (numerical result)
(a) —载荷-位移曲线;(b) —破裂模式.
A —40 % F_{max} ; B —100 % F_{max} ; C —10 % F_{max} .

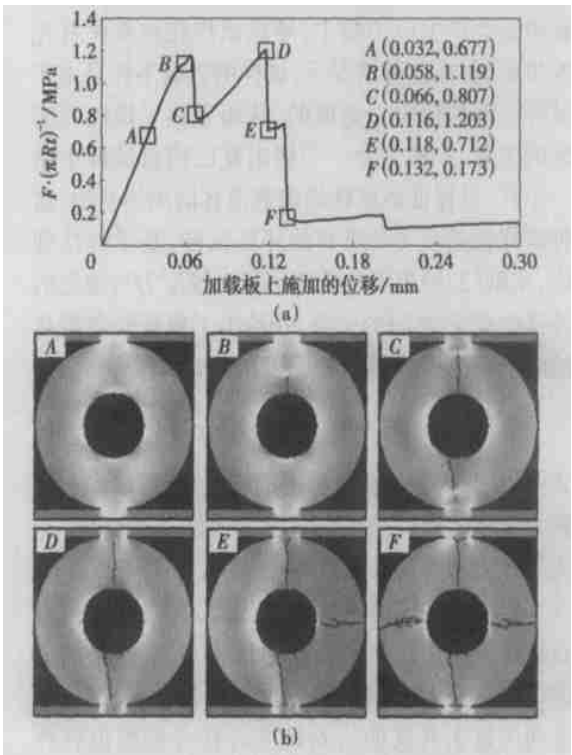


图 3 当 $r/R = 0.4$ 时环形试样的破裂过程(数值结果)
Fig. 3 Failure process of ring specimen with $r/R = 0.4$ (numerical result)
(a) —载荷-位移曲线;(b) —破裂模式.
A —56 % F_{max} ; B —93 % F_{max} ; C —67 % F_{max} ;
D —100 % F_{max} ; E —60 % F_{max} ; F —14 % F_{max} .

(图 3 中的 F 点) 最后,圆环试样沿着 x 和 y 方向劈裂成 4 块.数值试验得到的破裂模式与实验结果(图 4)^[3]具有较好的一致性.

对于小孔试样($r/R=0.1$)而言,在达到峰值之前载荷-位移曲线的非线性不明显,待达到峰值载荷后,试样即发生失稳破裂.对于大孔试样($r/R=0.4$)而言,对应于不同的裂纹扩展阶段,载荷-位移曲线上有明显的多个极值和多次失稳,试样的逐步破裂是由于多个裂纹依次扩展引起的.

(2) 内孔直径对于试样强度的影响

把以上数值试验中得到的峰值载荷用 Rt ($t=1\text{ mm}$)进行标准化,可得到图 5.为了便于比较,文献[3]的实验结果也在该图中给出.从图 5 可以看出,数值试验计算的峰值载荷在数值上与实验结果非常接近.

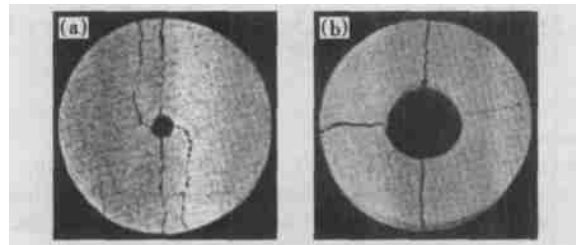


图 4 环形试样破裂模式的实验结果
Fig. 4 Experimental observations on failure pattern of ring specimens
(a) $r/R=0.1$; (b) $r/R=0.4$.

按照公式(1),可以计算出岩石的间接抗拉强度 σ_{tr} .表 2 给出了计算的强度与岩石单轴抗拉强度 ($\sigma_b=15.0\text{ MPa}$)的比值.从该表可以看出,用该方法获得的岩石间接抗拉强度大于单轴抗拉强度.

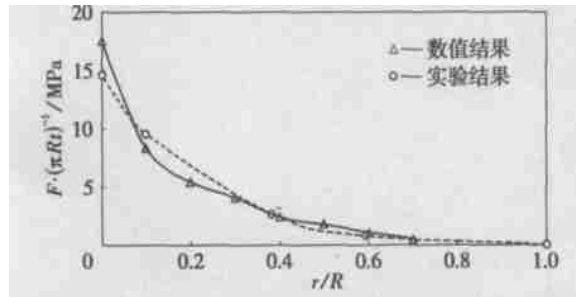


图 5 不同内孔直径环形试样破裂时的峰值载荷
Fig. 5 Peak loads of ring specimens with different diameters of inner hole

从理论上讲,公式(1)中之所以用试样的峰值载荷来计算岩石的抗拉强度是假设圆环试样的承载能力达到峰值时,内环周边的最大拉应力达到了岩石的抗拉强度.但是,当圆环内周边的应力达到岩石的抗拉强度后,立即有拉裂纹的萌生,而此时试样的承载力往往并没有达到峰值,而是随着裂纹的稳定扩展而继续升高.因此,圆环内周边裂

纹的萌生并不意味着试样承载能力的丧失,这就可以解释为什么通过公式(1)用峰值载荷计算的间接抗拉强度高于岩石的单轴抗拉强度.因此,可以认为用峰值载荷计算的间接抗拉强度是不合理的.

表 2 用峰值载荷计算的间接抗拉强度与单轴抗拉强度的比值 σ_{tr}/σ_b (数值试验结果)

Table 2 Ratio of indirect tensile strength determined from peak load (σ_{tr}) to direct tensile strength of rock (σ_b) (numerical results)						
r/R	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
σ_{tr}/σ_b	3.54	2.72	2.56	1.94	1.82	1.43

实际上,可以认为圆环试样内孔周边的裂纹萌生和扩展与该处所受的拉应力直接相关,因此,可以通过裂纹萌生时圆环试样所承受的载荷(称之为开裂载荷)来计算该岩石的间接抗拉强度(该强度用 σ_{trc} 来表示),计算结果见表 3.

表 3 用开裂载荷计算的间接抗拉强度与单轴抗拉强度的比值 σ_{trc}/σ_b (数值试验结果)

Table 3 Ratio of indirect tensile strength determined from cracking load (σ_{trc}) to direct tensile strength of rock (σ_b) (numerical results)						
r/R	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
σ_{trc}/σ_b	1.69	2.03	1.86	1.24	1.00	1.08

与表 2 列出的数值相比,可知用该方法计算的岩石间接抗拉强度较接近于岩石的单轴抗拉强度,尤其是圆环内径较大(例如 $r/R=0.4,0.5$ 和 0.6)时更是如此.从理论上讲,通过这种方法计算出的岩石间接抗拉强度更为合理.如果能通过有效的实验手段(例如通过声发射等)获得圆环试样的开裂载荷,圆环试样势必是测试岩石间接抗拉强度的一种有效方法.

3 结 论

(1) 圆环的内孔直径较小时,其载荷-位移曲线在峰值前的非线性不明显,达到峰值后发生脆性破裂,从破裂模式上看,试样最终破裂成两半;当内孔直径较大时,载荷-位移曲线上有多个极值点,试样最终破裂成为 4 部分.

(2) 在通过有效的实验手段获得圆环试样的开裂载荷的前提下,圆环试样也可以作为一种测试岩石间接抗拉强度的方法.

参考文献:

[1] Bieniawski Z T, Hawkes I. Suggested methods for determining tensile strength of rock materials [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanical Abstracts, 1978, 15 (3): 99 - 103.

- [2] Chen C S , Pan E , Amadei B . Determination of deformability and tensile strength of anisotropic rocks using Brazilian tests [J] . *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science* , 1998 , 35 (1) : 43 - 61 .
- [3] Mellor M , Hawkes I . Measurement of tensile strength by diametral compression of discs and annuli [J] . *Engineering Geology* , 1971 , 5 (3) : 173 - 225 .
- [4] Hudson J A , Brown E T , Rummel F . The controlled failure of rock discs and rings loaded in diametral compression [J] . *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science* , 1972 , 9 (2) : 241 - 248 .
- [5] Young R J , Veasey T J . Application of the ring-loaded strength (RLS) disc test to monitor the effects of thermal pretreatments on ore grindability [J] . *Minerals Engineering* , 2000 , 13 (7) : 783 - 787 .
- [6] Bearman R A . The use of the point load test for the rapid estimation of mode I fracture toughness [J] . *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science* , 1999 , 36 (2) : 257 - 263 .
- [7] Chen R , Stimpson B . Measurement of indirect tensile strength of anisotropic rocks by the ring test [J] . *Rock Mechanics and Rock Engineering* , 2001 , 34 (4) : 293 - 321 .
- [8] 朱万成 , 唐春安 , 杨天鸿 , 等 . 岩石破裂过程分析 (RFPA2D) 系统的细观单元本构关系及验证 [J] . 岩石力学与工程学报 , 2003 , 22 (1) : 24 - 29 .
(Zhu W C , Tang C A , Yang T H , et al . Constitutive relationship of mesoscopic elements used in RFPA and its validations [J] . *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* , 2003 , 22 (1) : 24 - 29 .)
- [9] 朱万成 , 唐春安 , 杨天鸿 . 偏三点弯曲岩石试件中裂纹扩展过程的数值模拟 [J] . 东北大学学报 (自然科学版) , 2002 , 23 (6) : 591 - 594 .
(Zhu W C , Tang C A , Yang T H . Numerical modeling of crack propagation in rocks under the conditions of three-point bending [J] . *Journal of Northeastern University (Natural Science)* , 2002 , 23 (6) : 591 - 594 .)
- [10] Zhu W C , Tang C A . Micromechanical model for simulating the fracture process of rock [J] . *Rock Mechanics and Rock Engineering* , 2004 , 37 (1) : 25 - 56 .

Numerical Test Using Ring Specimen as Medium to Determine Indirect Tensile Strength of Rock

ZHU Wan-cheng¹, FENG Dan², CHAU Kam-tim³, TANG Chun-an¹

(1. School of Resource and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China; 2. Shenyang Institute of Technology, Shenyang 110168, China; 3. Department of Civil and Structural Engineering, Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China. Correspondent: Zhu Wang-cheng, associate professor, E-mail: wancheng @oil-gas.uwa.edu.au)

Abstract: The RFPA(Rock Failure Process Analysis) code is used to carry out the numerical test using ring specimen as a medium to determine the indirect tensile strength of rock. The effect of diameter of internal hole on failure modes and determined strength of rock specimens is discussed, and the related rock failure mechanisms are clarified. The existing practical problem found in the lab test is also explained according to numerical results. Compared with the test results, both the failure modes and peak loads show in good conformity. Moreover, based on numerical result, a new test scheme is proposed using the cracking load to determine the indirect tensile strength of rock.

Key words: rock mechanics; ring specimen; tensile strength; numerical test; failure process; failure mechanism

(Received January 15, 2004)