

# 断续节理岩石中开挖附近扰动区失稳行为的实验

林 鹏<sup>1</sup>, 黄凯珠<sup>2</sup>, 唐春安<sup>3</sup>, 周维垣<sup>1</sup>

(1. 清华大学 水利水电工程系, 北京 100084; 2. 香港理工大学 土木与结构工程系, 红磡, 香港;  
3. 东北大学 岩石破裂与失稳研究中心, 沈阳 110006)

**摘要:** 目的是用实验方法研究在一定加载条件下, 断续节理岩体中裂纹萌生、扩展、贯通机制及开挖扰动区的破坏行为。实验试样用作者配制的模拟材料制成。利用作者设计的小型开挖系统, 在双轴加压下, 当轴向压力达到峰值力的75%时, 保持径向加载和轴向加载的比值 $\lambda$ 恒定, 模拟开挖过程, 并用数码摄像机全程跟踪开挖过程。实验结果显示开挖附近断续节理滑移、贯通以及扰动区的变形决定了巷道的失稳行为和最终的破坏模式; 开挖过程明显影响着内部扰动区和外部压缩区的变形。开挖后, 内部扰动区的变形大于外部压缩区; 开挖后, 继续保持 $\lambda$ 恒定时, 应力和变形作为时间的函数逐渐释放, 并且造成一些节理的滑动和微破裂的相互作用;  $\lambda$ 越大, 则巷道破坏的时间越短。

**关键词:** 结构实验; 断续节理岩体; 裂纹扩展; 失稳行为; 裂纹贯通

中图分类号: TV 32

文献标识码: A

文章编号: 1000-0054(2003)08-1108-04

## Experimental study of failure behavior of disturbed zone around an opening in non-persistent jointed rock masses

LIN Peng<sup>1</sup>, WONG Robina Hoichu<sup>2</sup>,  
TANG Chun an<sup>3</sup>, ZHOU Weiyuan<sup>1</sup>

(1. Department of Hydraulic and Hydropower Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Department of Civil & Structural Engineering, The HongKong Polytechnic University, HongKong, China;

3. Center for Rockbursts & Induced Seismicity Research, Northeastern University, Shenyang 110006, China)

**Abstract** A small excavating system was used to experimentally investigate crack initiation, propagation and coalescence mechanisms and failure behavior around an opening in non-persistent jointed rock masses with biaxial loading. The specimens were made of modelling material with holes drilled to various stress levels to simulate underground excavation. The opening process was then monitored by a digital video camera. When the applied axial loading reached about 75% of the peak axial loading, the ratio,  $\lambda$ , of the lateral loading to the axial loading remained constant. The experimental results showed that the final failure behavior and modes around the

opening were dominated by sliding along the joints, by coalescence between the joints and the opening, and by the strain in the disturbed zone around the opening. The deformation of the inner disturbed zone was greater than that of the outer compressed zone during the post-excavation process. Release of the stresses during post-excavation increases the interaction between micro-fractures and causes pre-existing joints to slip when  $\lambda$  is constant. The specimen failure stress decreased with increasing values of  $\lambda$ .

**Key words** structural experiment; non-persistent jointed rock masses; crack propagation; failure behavior; crack coalescence

由于人口和经济的不断增长, 陆地空间的发展越来越受到限制, 为了解决发展问题, 人们开始充分利用地下空间建造地下仓库、电站、铁路和公路隧道。由此产生了人们对地下开挖工程的稳定性的极大关注, 特别是环绕开挖巷道附近的扰动区域, 通常它的初始状态(如应力、应变、稳定性、渗流等)被开挖、远场加载力或者其它因素扰动。在节理岩体中, 这些扰动区通常认为是由节理岩体中岩块的运动而造成, 因为在节理岩体中, 由于存在大量被节理割裂的封闭多边形岩块, 这些岩块的运动是扰动区的主要特点, 也是巷道失稳的主要因素。如, 土耳其的 Bo lu 山隧道由于节理、断层的原因在开挖过程中造成巨大巷道破坏<sup>[1]</sup>, 因此, 充分理解开挖附近的扰动区特性, 以及它对巷道最终破坏行为的影响, 对更好地开发利用地下空间有着非常重要的工程和社会意义。

以往这方面的研究主要集中在对连续节理中扰

收稿日期: 2002-11-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (59939190);

香港理工大学研究基金 (PolyU 5050/99E);

中国博士后科学基金资助

作者简介: 林鹏 (1972-), 男 (汉), 湖北, 博士后。

E-mail: celiinp@mails.tsinghua.edu.cn

通讯联系人: 周维垣, 教授, E-mail: zhouwy@tsinghua.edu.cn

动区的研究<sup>[2~4]</sup>,但是,许多水利或地下工程是在断续的节理中进行巷道开挖,此时扰动区主要表现为岩体中裂纹的扩展、贯通以及增长的裂纹同开挖的相互作用。本文利用作者设计的小型开挖系统,并用数码摄像机全程跟踪开挖过程,研究断续节理岩体中开挖附近扰动区的失稳破坏行为;分析在开挖过程中,当保持径向加载和轴向加载的比值 $\lambda$ 为一定值时,不同的比值 $\lambda$ 对破坏时间、破坏程度、破坏模式,及扰动区的裂纹扩展、贯通同开挖的相互作用,从而对工程中类似问题预测预防提供一定的理论依据。

## 1 实验研究

### 1.1 试样准备

实验试样由类砂岩的模拟材料<sup>[5]</sup>制成,此模拟材料主要由硫酸钡、沙、石膏和水按 2:4:1:1.15 质量比例配制。试样的长、宽、厚分别为 10、10、2.5 cm,由可以自由拆卸的模具(见图 1)浇注而成,整个过程在振动台上进行,以使试样密实。退模后试样放在 105℃ 恒温的烤箱中 5 d,以保证试样的干燥,减少水分对实验的影响。通过插入预制好的钢片制成预置几何分布的断续节理试样(见图 2),预置节理 B1、B2、B3 的长度相等,为 12 mm。断续节理的角度固定在 135°,岩桥的角度固定在 75°,3 个节理的岩桥距离分别为  $2c$ 、 $2b$ ,且相等为 12 mm。参考前人的研究结果<sup>[2]</sup>,为避免开挖时边界应力对开挖破坏的影响,开挖孔的直径选为 20 mm。8 个应变片按两组均匀分布在预设开挖孔的周围(见图 2)。根据对试样在围压下峰值强度变化和断续节理裂纹开始萌生特性的研究可知:在不同侧压作用下,当轴压加载达到 3 kN,即峰值的 70%~80% 时裂纹

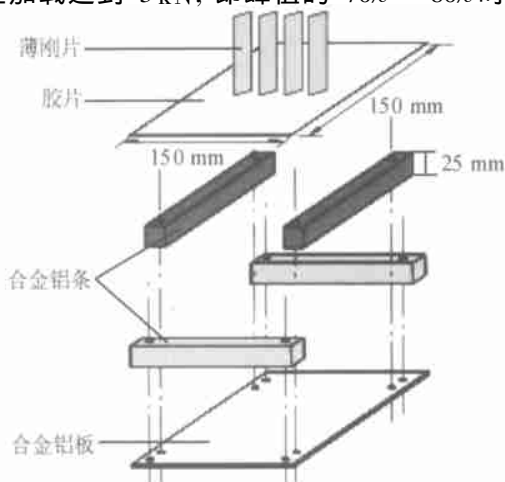


图 1 模具示意图

开始扩展,因此,在本实验中以峰值的 75% 作为最大轴向加载力。

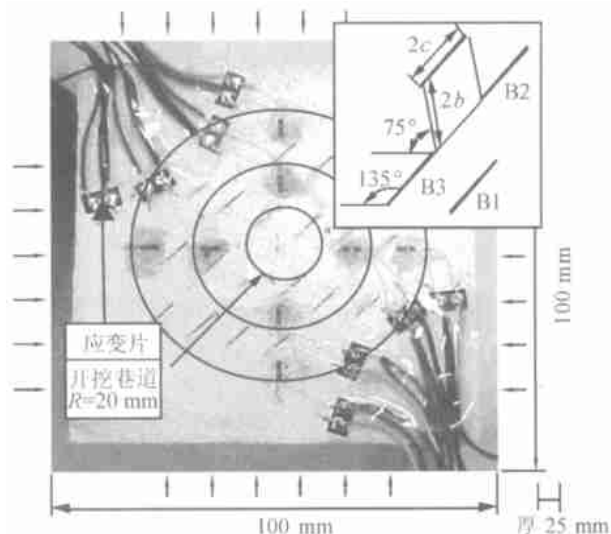


图 2 实际物理试样

### 1.2 实验装置和测试过程

实验装置包括 Wykeham Farrance Wf55623 双轴加载机、钻孔系统、监视和数据采集系统(见图 3)。双轴加载机提供轴向和侧向加载力,并分别由 10 kN 和 5 kN 的传感器测定轴向和侧向加载力,实验前在放试样的钢架内侧涂上一些婴儿爽身粉以减少在加载过程中的摩擦力的影响。钻孔系统由 MAKITA DP4700 电钻和工作平台组成,工作平台可使电钻在垂直、水平两个方向自由移动,并且保证电钻稳定工作。在监视和数据采集系统中,DCR-TRV900E 数码摄录机主要用于实时放大监视整个开挖过程中节理扩展、贯通情况。应力应变数据经传感器和应变片传到 UCAM-10B 数据采集仪,并实时在计算机上画出应力和应变的关系曲线。



图 3 实验系统示意图

在本实验中,当轴向加载力达到 3 kN 时保持固定,径向加载力则在 0.5~3 kN 之间,按 0.5 kN 增加,以保证有不同的  $\lambda$  值,加载速度为 0.002 kN/s。

当轴向力继续增加,试样径向会膨胀导致围压增加,实验中将实时调整径向加载力以保证轴向加载力固定在 3kN 大约在 $\lambda$ 达到预定值 2min后,电钻开始钻孔,整个钻孔过程大约持续 10min 尽管在钻孔过程中会出现扰动,但通过调整轴向和侧向加载力,保持 $\lambda$ 的恒定直到整个试样失稳

## 2 实验结果分析

### 2.1 扰动区的裂纹扩展和贯通

图 4显示了 $\lambda=1/2$ 时,扰动区附近裂纹扩展贯通的变化 试样基于开挖中心点分成内部扰动区和外部压缩区(见图 2),从图 4可以清楚看到裂纹萌

生、扩展、贯通对试样失稳破坏造成比较明显的影响 当轴向加载达到峰值强度 75%,即开始开挖时,裂纹在拉应力作用下,从外部压缩区萌生、扩展,且主要发生在节理之间的岩桥区(图 4a, 4b) 随着开挖的进行,一些拉裂纹开始从压缩区扩展到内部扰动区,此时应力集中在对角线方向(图 4c, 4d),在靠近开挖的扰动区,容易在岩桥区发生以混合模式(剪+拉)的裂纹贯通(图 4e, 4f) 在巷道周边扰动区的岩块由于节理的贯通而不断松动、脱落,此时由于圆形巷道开始变成椭圆型巷道,最后导致巷道失稳 图 5显示了内部节理的贯通和外部岩块脱落的情况

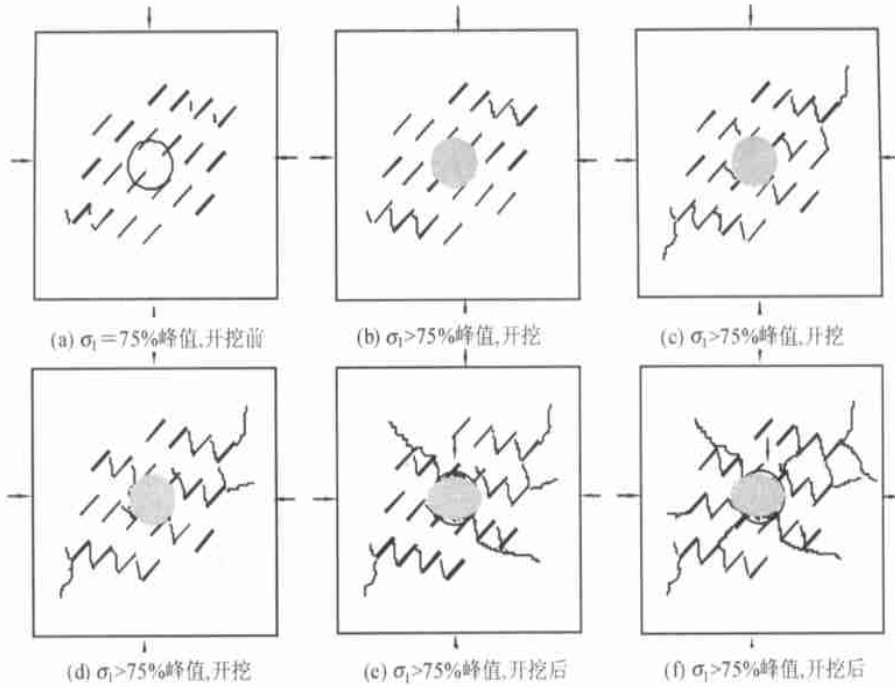


图 4  $\lambda=1/2$ 时连续节理贯通及巷道破坏过程(分图题序号为开挖演化过程顺序)

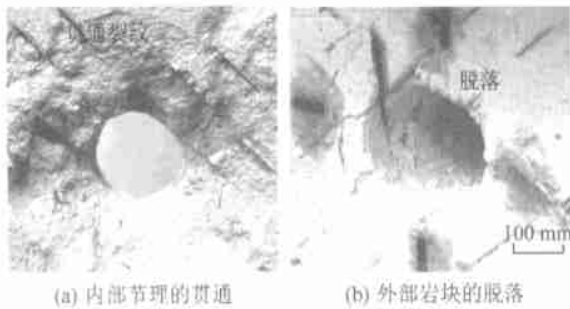


图 5 开挖区的内外部破坏情况

### 2.2 扰动区的变形和破坏的演化

由于地下开挖造成的变形是设计和支护巷道的关键,因此,现代巷道工程中特别强调在工程中或之后的位移变形监测<sup>[6]</sup>。该文对开挖前后,巷道周围扰动区和压缩区的位移变形进行了测定。图 6显示在

不同的加载率 $\lambda$ (1/3, 1/2, 2/3)情况下,内部扰动区和外部压缩区的应变随时间的变化关系,从图 6可知, $\lambda$ 越大,内部扰动区和外部压缩区变形相应增大,如, $\lambda$ 从 1/3增加到 2/3时,应变从 $\times 10^{-4}$ 增加到 $\times 10^{-3}$ 。在开挖过程中由于开挖造成的应力释放,扰动区的变形随着开挖的进行快速下降,而外部压缩区的变化则不大(图 6中 B区),在开挖后,内部扰动区的变形均大于外部压缩区。当 $\lambda=1/3$ (图 6a中 C区)时,内部扰动区和外部压缩区变形变化不大,但是随着时间的推移,内部扰动区变形出现梯状增加,直到失稳破坏,每一次跳跃表示节理顶部或岩桥区的局部区域发生微破裂集中,整个破坏过程大约花 2h 当 $\lambda=1/2$ 时(图 6b中 C区),在开挖后扰动区的变形显示有轻微的震荡,但是外部压缩区

的变形相对较小,仅仅在试样临近失稳时,两区域的变形才有较大的变化。整个失稳过程大约花 20min 当  $\lambda = 2/3$  时(图 6c 中 C 区),在开挖后,两者的变形都稳定,且变形主要发生在开挖阶段,整个失稳过程大约花 17 min

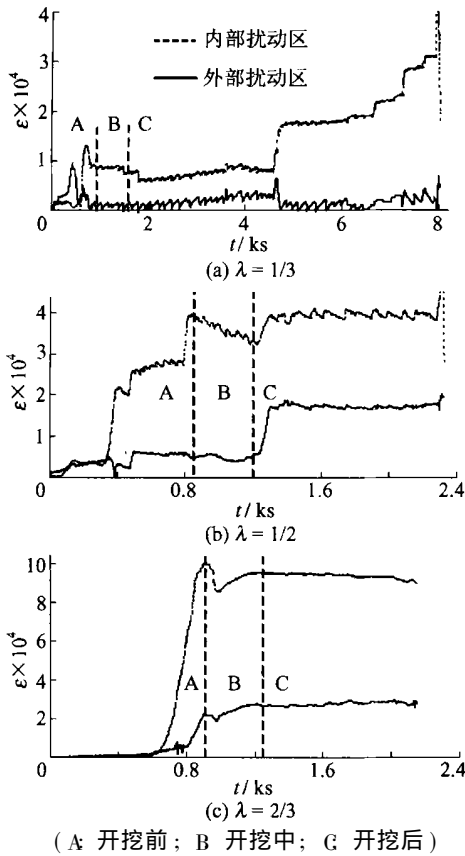


图 6 不同  $\lambda$  下扰动和压缩区的应变与时间的关系

### 3 结 论

从实验结果看出岩石中断续节理与开挖扰动力的相互作用,内部扰动区的变形和围压,对巷道失稳

的演化以及最后的破坏模式起了重要作用。

当保持径向和轴向加载的比例  $\lambda$  为某个恒定值时,裂纹容易在外部压缩区开始萌生扩展,但最后断续节理的贯通主要转移到巷道附近的扰动区。

开挖过程明显影响着内部扰动区和外部压缩区的变形。开挖后,内部扰动区的变形大于外部压缩区。开挖后,继续保持  $\lambda$  恒定时,应力和变形作为时间的函数逐渐释放,并且造成一些节理的滑动和微破裂的相互作用。 $\lambda$  越大,则巷道破坏的时间越短。

### 参考文献 (References)

- [1] Brox D, Hagedorn H. Extreme deformation and damage during the construction of large tunnels [J]. *Tunneling and Underground Space Technology*, 1999, **14**(1): 23- 28.
- [2] Hoek E, Brown E T. *Underground Excavations in Rock* [M]. London: the Institution of Mining and Metallurgy, 1980.
- [3] Gran J K, Senseny P E, Groethe M A, et al. Dynamic response of an opening jointed rock [J]. *Int J Rock Mech Min Sci*, 1998, **35**(8): 1021- 1035.
- [4] Shen B, Barton N. The disturbed zone around tunnels in jointed rock masses [J]. *Int J Rock Mech Min Sci*, 1997, **34**(1): 17- 125.
- [5] Wong R H C, Chau K T. Crack coalescence in a rock-like material containing two cracks [J]. *Int J Rock Mech Min Sci*, 1998, **35**(2): 147- 164.
- [6] Rabcewicz L V. The new Austrian tunnelling method [J]. *Water Power*, 1964, **16**, 453- 456; 1964, **16**, 511- 515; 1965, **17**, 19- 24.
- [7] Lin P, Wong R H C. Multi-crack coalescence in rock-like material under uniaxial and biaxial loading [J]. *Key Engineering Materials*, 2000, **183- 187**: 809- 814.