

# 动载荷条件下波长对岩石试件破坏模式影响的数值模拟

黄志平<sup>1,2</sup>, 唐春安<sup>2</sup>, 朱万成<sup>2</sup>, 逢铭璋<sup>2</sup>

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 东北大学岩石破裂与失稳研究中心, 辽宁 沈阳 110004)

**摘要:** 简单运用岩石破裂过程分析 RFPa 系统研究了均匀与非均匀岩石试样杆在不同波长冲击载荷作用下的剥落过程。数值模拟较好地再现了均匀岩石试样杆在不同应力波波长条件下的不同破坏模式, 且数值模拟结果与解析理论结果具有较好的一致性。并在此基础上, 进一步研究了非均匀性岩石试样杆在不同波长的冲击载荷作用下的剥落形式及其与均匀岩石试样杆破坏模式的差异。结论表明: RFPa 程序能够较好地模拟均匀与非均匀杆在不同应力波波长作用下发生剥落破裂的过程; 试件破坏模式不仅与断裂的强度有关, 还与作用在试件上的持续时间有关; 试件的破裂不仅与应力波的峰值以及波长有关, 而且还与岩石的非均匀性密切相关。

**关键词:** 试样杆; 应力波; 剥落破裂; 数值模拟

**中图分类号:** TU451 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2007)07-1048-06

**作者简介:** 黄志平(1975-), 男, 湖南邵阳人, 博士, 主要从事岩石与混凝土断裂与损伤数值模拟的科研与教学工作。

E-mail: hzp\_2003214@163.com。

## Numerical simulation on failure modes of rock bars under different wave lengths

HUANG Zhi-ping<sup>1,2</sup>, TANG Chun-an<sup>2</sup>, ZHU Wan-cheng<sup>2</sup>, PANG Ming-zhang<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China; 2. Center for Rock Instability and Seismicity

Research, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

**Abstract:** The principle of RFPa to simulate dynamic failure of rock was briefly summarized. RFPa was used to study the dynamic spalling process of homogenous and heterogeneous rock specimens under different wave lengths. The numerical simulation reproduced different failure modes of homogeneous rock under the compressive stress wave with different wave lengths. Numerical results agreed well with the theoretical ones, which proved that RFPa was effective in simulating the dynamic fracture of rock, then RFPa was used to simulate the spalling failure of heterogeneous rock bar subjected to stress waves with different wave lengths, and four failure patterns were numerically obtained. The different failure modes of the homogeneous and the heterogeneous rock specimens were also presented. These failure patterns were related with not only the strength of fragment but also the duration of load applied on the specimens. And the fractures of rock bars was not only connected with the magnitude and length of stress waves but also the heterogeneity.

**Key words:** rock bar; stress wave; spalling failure; numerical simulation

## 0 引言

地下工程和矿山采掘工程中存在许多岩石动力破坏现象和事件。譬如, 炸药爆炸瞬间生成 $10^5 \sim 10^6$ 大气压的高温高压爆炸气体, 在周围岩石介质中产生冲击波或应力波, 由此诱发岩爆、冲击地压、瓦斯突出、矿震等与岩石动态破坏有关的动力现象, 因此研究岩石动力学问题在矿山、人防、国防等工程领域都有广泛的应用前景。

目前, 不少文献对不同实验条件和实验方法下岩石动态特性做了很好的描述, 但主要集中在弹性模量和抗压强度两个方面<sup>[1-9]</sup>。他们发现弹性模量和抗压强度随应变率增加而增加, 且在应变率为 $10^3$ 左右时发

生突变。文献[10]指出抗压强度在一定程度上随应变率增加而增大, 冲击抗压强度比静态抗压强度一般大百分之几到几倍, 动态抗压强度为静态抗拉强度 $5 \sim 10$ 倍。Stave 等研究了冲击加载、快速加载、及静力加载的岩石速率效应等, 集中在对不同岩石在各种应变率下强度和变形特征的研究。文献[11]对岩石中剥落现象的理论和实验研究成果进行了较为全面总结。然而对于研究岩石在动荷载作用下产生破坏的微观机制和提出合理模型的基础及对这种破裂现象进行可视

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50374020, 50490274, 50504005)

收稿日期: 2005-07-26

化的数值模拟仍然是该领域一个难点且有重要意义的课题。

自 1995 年东北大学岩石破裂与失稳中心 (CRISR) 研究开发了岩石破裂过程分析 RFPA (rock failure process analysis) 以来, 该系统已经广泛地应用到岩石和混凝土破裂机制问题的研究。笔者用 RFPA 进行了不同波长对岩石试样破坏模式影响的数值模拟研究, 通过与理论结果进行对比, 以证实模拟岩石动态破裂问题的有效性。同时考虑试样材料非均匀性, 进行非均匀岩石试样动态剥落破裂过程的数值模拟并对与均匀试样的模拟结果进行比较。

### 1 RFPA 基本原理简介

岩石破裂过程分析 RFPA 是一个能够模拟岩石破坏过程的数值模拟程序。为了反映岩石材料性质的细观非均匀性, 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莫尔 - 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。

在准静态加载过程中, 外部载荷是分步骤施加的, 在某个加载步, 借助于有限元进行应力分析, 从而可以得到整个分析对象的应力和应变分布。然后, 用最大拉应力准则和莫尔 - 库仑准则来判断单元是否发生损伤, 对于发生损伤的单元, 其力学按照弹性损伤力学本构关系进行单元的破坏处理, 进入下一加载步的分析, 直到整个分析过程结束。

在 RFPA 静态版本基础上开发了岩石破裂过程分析 RFPA 的动态分析版本 DIFAR (dynamic incremental analysis of rock)。从 2003 年起进行了进一步开发和完善。在 RFPA 动态分析时, 可以以一个应力波或者初始速度作为输入, 在给定合理时间步长的条件下, 按照时间步长进行逐步分析。在每个时间步, 必须要考虑质量和加速度对于力学平衡的影响, 用弹性动力有限元程序进行应力分析, 用最大拉应力准则和莫尔 - 库仑准则判断单元是否损伤 (引入应变率对于单元强度的影响), 对于发生损伤的单元, 采用与静态分析时类似的本构关系进行单元的破坏处理, 有关 RFPA 动

态分析部分更为详细的描述, 在文献[12]中已经给出。

### 2 数值模型

本文研究模型分均匀与非均匀试样杆两组, 每组有 4 个试件。每个试样杆两侧和底端都是自由面, 试样杆高度为 200 mm, 宽度为 10 mm。整个数值模型由 200×10 个细观单元组成, 每个单元有 4 个节点。模型几何参数如图 1, 均匀杆试样参数如表 1, 弹性模量为 60 GPa, 单轴抗压强度为 200 MPa, 抗拉强度为 19 MPa, 密度为 2500 kg/m<sup>3</sup>。非均匀试样弹性模量为 58 GPa, 单轴抗压强度为 120 MPa, 抗拉强度为 15 MPa。表 2 非均匀试样 Weibull 分布参数与数值试样宏观参数之间对应关系在文献[13, 14]中都有介绍。

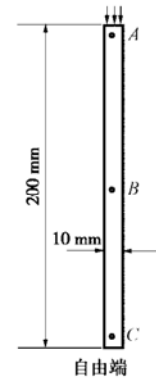


图 1 岩石试样的几何参数

Fig. 1 Geometrical parameters and loading conditions of rock bars

表 1 均匀试样的材料参数

Table 1 Parameters of mechanical properties of homogeneous specimen

弹性模量 /MPa	单轴抗压强度 /MPa	泊松比	密度 / (kg · m <sup>-3</sup> )	拉压比
60000	200	0.25	2500	10

试样上表面施加三角形压缩应力波  $\sigma$  (如图 2)。为了研究不同波长对试样破坏模式的影响, 分别对图中 I 至 IV 这 4 种输入应力波响应进行数值模拟, 计算中时间步长  $\Delta t = 0.1 \mu s$ , 每个试样计算终止动力反应时间是  $t = 180 \mu s$ 。这里把整个模型简化为平面应力问题进行研究。根据弹性模量和密度可以计算出一维纵波速度为 4899 m/s, 施加压缩应力波 I 至 IV 的波长分别为  $\lambda = 24.45, 48.99, 97.98, 195.96$  mm。分别对均匀

表 2 非均匀岩石试样力学性质的 Weibull 分布参数

Table 2 Weibull distribution parameters of mechanical properties of heterogeneous rock

弹性模量		单轴抗压强度		泊松比		密度 / (kg · m <sup>-3</sup> )	拉压比
均质度	平均值 /MPa	均质度	平均值 /MPa	均质度	平均值		
3	70000	3	500	100	0.25	2500	10

与非均匀试件进行模拟比较，研究不同波长应力波对于均匀与非均匀试样破坏的差异。

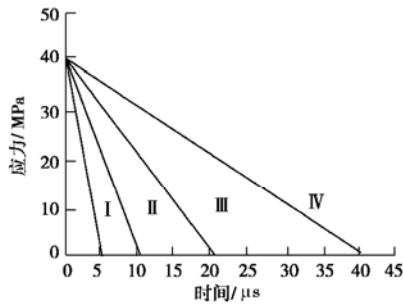


图2 施加的应力波

Fig. 2 Stress waves applied on the rock specimen

### 3 结果分析

#### 3.1 均匀试样破坏结果分析

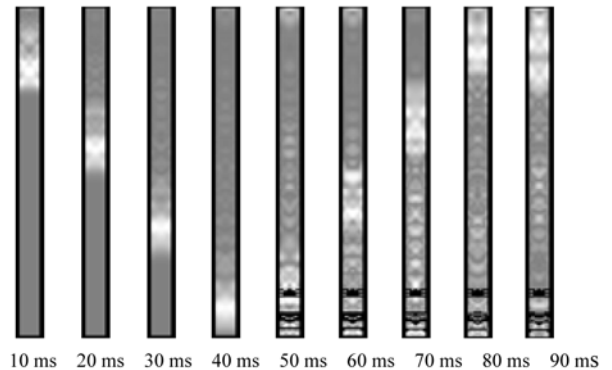
从 RFA 程序模拟图中可以看出应力波以一定速度从试样上端往下端传递过程，当时间  $t=40 \mu s$  时，压缩应力波到达了试样的底端，本文试件模拟结果与根据弹性波动理论计算结果一致。

鉴于篇幅所限，选取数值模拟结果部分应力图和声发射图。应力图中各单元应力大小用不同亮度表示，应力越大的单元亮度较高，声发射图中对破坏单元进行标识，黑白色之外某种颜色表示当前步发生拉伸破坏单元，白色表示当前步发生剪切破坏单元，黑色表示前面所有步发生破坏单元。每个加载步，圆圈半径表示产生声发射能量相对大小，半径越大表示破坏时所释放能量越多。

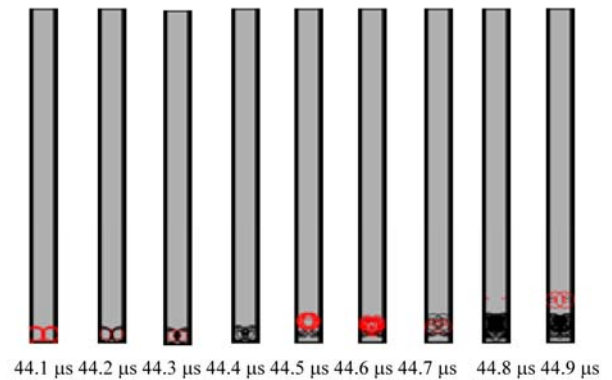
对试样施加应力波波长  $\lambda = 48.89 \text{ mm}$  时的破坏模式如图 3 (a)。由于入射到自由面的压缩波经反射后会形成拉伸波，反射回来的拉伸波将与入射压缩波的后续部分相互作用，其结果有可能在临近自由表面附近造成拉应力，当形成的拉应力满足某种动态的断裂准则，则将在该处引起材料破坏，裂口足够大时，整块裂片便会飞离<sup>[15]</sup>。根据 RFA 数值模拟声发射图可知在距离试样下端 12.5 mm 开始处发生首次拉伸破坏，发生首次破坏后，剩余应力波在新的自由面发生反射，在距离试样底部自由面 24.5 mm 处再度发生破坏，故最终形成如图 3 (a) 所示的破坏模式。数值模拟结果与文献[15]的理论分析结果基本一致。如图 3 (b) 所示声发射图中，岩石试件声发射在时间段  $t=43.6 \sim 44.2 \mu s$ ，比较集中，并从图中可知试件破坏主要是拉伸破坏。

综观图 3, 4, 可以看出随着压缩应力波波长增长，压应力在试件内覆盖范围响应增大，也就是试件受力区域响应增宽。当压缩波经过底端自由面时发生反射

时出现拉伸波，其拉应力在试件内覆盖范围响应越大。如果该拉应力在试样某处大于试件动态断裂强度，就出现痂片。波长增长，痂片数目响应增加，因为在层裂过程中，第一层层裂出现的同时，形成了新的自由面，应力波越长，继续入射的压力脉冲也越长，在此新的自由表面上反射，同样满足动态断裂准则时，会造成第二层层裂，以此类推，在一定条件下，会随着波长的增加，能形成多层层裂。



(a) 最大剪应力图



(b) 声发射图

图3 波长  $\lambda=48.89 \text{ mm}$  试样破坏过程图

Fig. 3 Failure process of rock bars under stress wave  $\lambda=48.89 \text{ mm}$

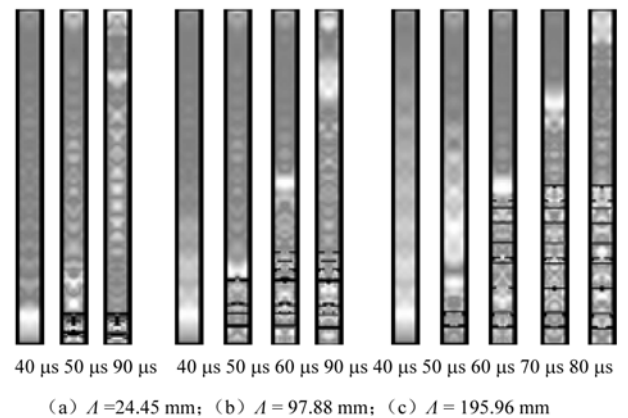


图4 不同波长对均匀试件破坏过程最大剪应力图

Fig. 4 Distribution of maximum shear stress during failure process of homogeneous rock bars with different stress waves

### 3.2 非均匀试样破坏结果分析

由于岩石组成及其内部结构构造十分复杂, 所以研究非均匀试样很具有现实意义。将构成岩石的每一个微元体可以认为是均匀、连续介质, 但这些微元体之间力学性质(弹性模量、强度、泊松比等)可能千差万别, 微元体间表现出很大离散性, 这样非连续问题就能够近似被描述。这种力学性质的离散性可以用物理统计方法来描述, 进而岩石材料的复杂构成特性就可以通过弹性力学来解决。RFPA 方法采用了 Weibull 分布来描述微元体力学属性的离散性,

$$\varphi(u) = \frac{m}{u_0} \left(\frac{u}{u_0}\right)^{m-1} e^{-\left(\frac{u}{u_0}\right)^m}, \quad (1)$$

式中,  $u$  代表某一力学属性值, 表示具有  $\varphi(u)$  单元这一属性的分布密度,  $u_0$  则表示单元力学属性的总体平均值,  $m$  表征单元整体的均匀程度,  $m$  值越大, 则力学性质越接近。本文取均质度  $m=3$  的非均匀试样。

图 5 所示是施加波长  $\Lambda=24.45$  mm 于非均匀试件不同点  $A(5,5)$ 、 $B(5,100)$ 、 $C(5,195)$  的最大主应力曲线图。试件上端受到瞬间外部载荷的冲击产生冲击波, 由于动态荷载突然跃迁, 出现一个远远高于其他不同位置的应力波峰值。离冲击端越远, 波的峰值会逐渐降低, 杆端附近点  $A(5,5)$  处应力值(如粗实线所示)高于杆中间点  $B(5,100)$  处的应力值(如虚线所示), 而中间点  $B(5,100)$  应力值又比底端附近点  $C(5,195)$  处应力值(如细实线所示)高。在底端自由面处由于发生波的多次反射与压缩波的相互作用, 产生较密波峰。由于试件的非均匀性, 试件不同 3 点处产生的波及其传播后的形状不同。图 6 表明了不同波长在非均匀试件中心点的最大主应力应力波波, 若波长越短, 对应的应力峰值越低, 且在非均匀性试件中显示锯齿状的波形。

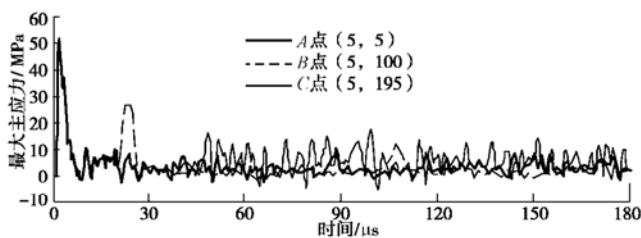


图 5 波长  $\Lambda=24.45$  mm 时非均匀试件不同点最大主应力波形图  
Fig. 5 Maximum principal stress on different points of heterogeneous rock bars with stress wave  $\Lambda=24.45$  mm

目前, 对动荷载作用下的岩石微观破坏过程的观察主要采用声发射方法。文献[16]认为岩石构造对声发射的时空分布有明显的控制作用, 岩石构造均匀, 声发射在时间和空间上分布较为均匀, 若岩石构造非均匀, 所含软弱面控制着变形破坏过程, 应力集中使

得微破裂很早便会产生, 声发射在空间上集中于软弱面附近, 时间上则集中于主破裂发生前较短的时间内。图 7 表明均匀试件和非均匀试件的声发射事件的数目比较和分布情况。在均匀试件中表现为发生集中的破裂(如图 7(a)所示), 而在非均匀试件中受力开始不久就产生微破裂, 数目较少, 相对均匀试件而言, 在非均匀试件主裂纹附近有一个声发射较宽区域, 即使主裂纹产生了, 随着应力波的传播, 仍有其他单元产生破裂而发生声发射事件(如图 7(b)所示)。

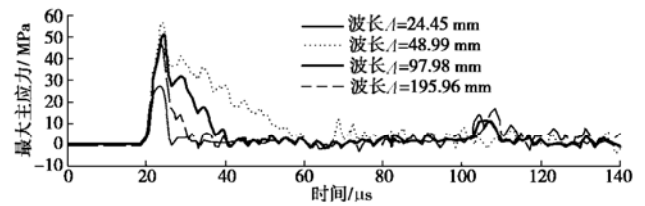


图 6 不同波长时非均匀试件中心点的最大主应力波形图  
Fig. 6 Maximum principal stress curves of central point for heterogeneous rock bars with different stress waves

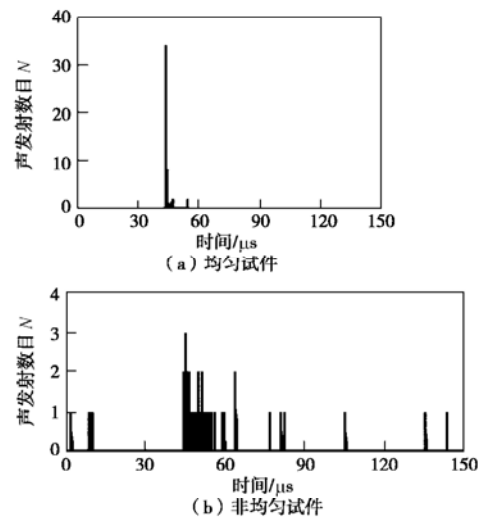


图 7 波长  $\Lambda=24.45$  mm 时均匀和非均匀试件声发射数分布图  
Fig. 7 AE-time curves for homogeneous rock bars and heterogeneous rock bars with stress wave  $\Lambda=24.45$  mm

对于非均匀试件, 其破坏模式与均匀试件的破坏模式有很大的不同, 取同样波长对非均匀试件的破坏研究, 可知随着压缩应力波从上向下传播过程中, 在试样中就有个别单元出现了损伤, 呈现出微破裂, 但是这些微破裂都没有相互贯通而发展成为贯穿试样宽度的裂纹。压缩波达到底端自由面发生反射后, 试件发生拉伸断裂, 产生主裂纹但其数目相对减少, 也即破坏的段数减少。尤其随波长增长, 开始破坏的主裂纹并不出现在自由端的附近, 而是离自由端越远。然而非均匀介质中用弹性波的有关理论来计算初始破裂位置比较困难。另外, 材料发生断裂与力的大小有

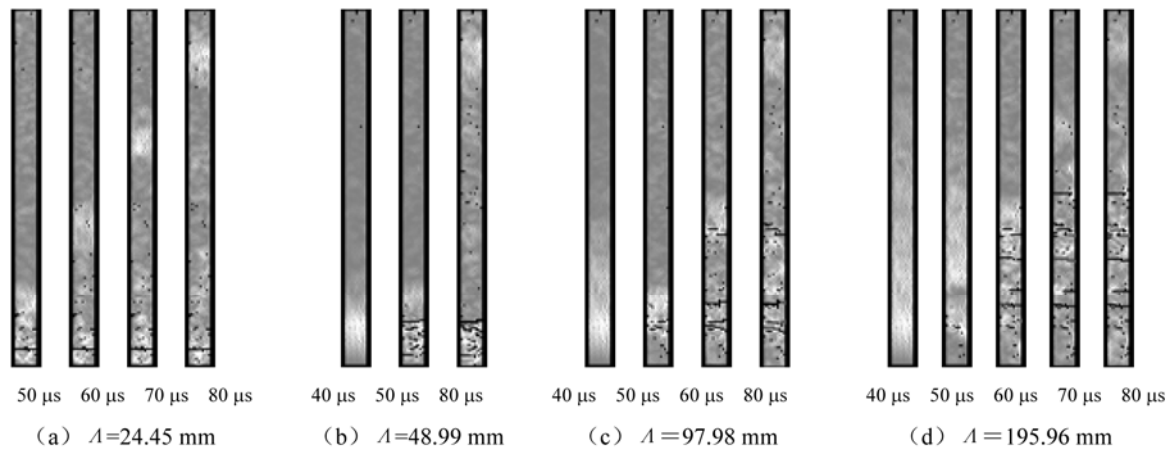


图8 不同波长对非均匀试样破坏过程的最大剪应力图

Fig. 8 Distribution of maximum shear stress during failure process of heterogeneous rock bars with different stress waves

关,同时与力作用的时间有关。在本文中,通过改变波长,保持施加的荷载大小不变。从图8所示,入射压缩波波长最长,即应力波在试件上作用的持续时间增长,响应的反射波也增长。图8(d)表明,反射波在试件的中间部分作用的时间相对其他情况波长作用的时间增长,故在中间部分产生主裂纹,并且裂纹增多。

## 4 结 论

本文运用RFPA程序进行了动态载荷作用下波长对岩石试样破裂过程影响的数值模拟研究。由于岩石的复杂性,选取均匀与非均匀岩石试样两组,每组有4个试件,对每组不同试件施加波长不同的应力波,以研究不同的应力波长对于岩石破裂过程的影响,并得到如下结论。

(1) RFPA程序能够较好地模拟均匀杆在不同应力波波长作用下发生剥落破裂的过程,数值模拟结果得到的剥落位置以及分段的数目与相关理论结果具有较好的一致性。

(2) 对试样施加不同波长的应力波,试样中裂纹萌生的位置以及裂纹的数目不同,波长越长,分段破裂的数目越多。在均匀试件中,生成的贯通裂纹数目比非均匀试件要多,但在非均匀性试样中总有更多的微裂纹萌生,贯通试样宽度的裂纹数目则相对较少,说明试件不仅与断裂的强度有关,还与作用在试件上的持续时间有关。

(3) 在冲击载荷作用下,非均匀性试件开始产生主破裂的位置相对均匀试件也有明显的不同,并且裂纹间的间距相对杂乱,这说明试件的破裂不仅于应力波的峰值以及波长有关,而且还与岩石的非均匀性密切相关。

## 参考文献:

- [1] ATTWELL P B. Respos of rocks to high velocity impact[J]. Trans Inst Min Metal, 1962, **71**(5): 705 - 724.
- [2] KUMAR A. Effect of stress rate and temperature on the strength of basalt and granite[J]. Geophysics, 1968, **33**(3): 501 - 510.
- [3] GOLDSMITH W, SACKMAN J L, EWERT C. Static and dynamic fracture strength of Barre granite[J]. Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr, 1976, **13**(2): 303 - 309.
- [4] BLANTON T L. Effect of strain rates from  $10^{-2}$  to  $10^3$ /s in triaxial compression tests on three rocks[J]. Int J Rock Mech Sci & Geomech Abstr, 1981, **18**(1): 47 - 62.
- [5] 章根德. 岩石对冲击载荷的动态响应[J]. 爆炸与冲击, 1982, **2**(2): 1 - 9. (ZHANG Gen-de. Dynamic response of rock to impulse loads[J]. Explosion and Shock Waves, 1982, **2**(2): 1 - 9. (in Chinese))
- [6] 于亚伦. 岩石动力学[M]. 北京: 北京科技大学铅印教材, 1990. (YU Ya-lun. Rock dynamics[R]. Beijing: Beijing university of science and technology printing teaching material, 1990. (in Chinese))
- [7] LINDHOLM U S, YEAKLEY L M, NAGY A. The dynamic strength and fracture properties of dresser basalt[J]. Int J Rock Mech Sci & Geomech Abstr, 1974, **11**(2): 181 - 191.
- [8] 信礼田, 等. 强冲击载荷下岩石的力学性质[J]. 岩土工程学报, 1996, **18**(6): 61 - 68. (XIN Li-tian, et al. The mechanical properties of rocks under strong impact loading[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 1996, **18**(6): 61 - 68. (in Chinese))
- [9] 尚嘉兰, 沈乐天, 赵 坚. 粗粒花岗岩中应力波的传播衰减规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, **20**(2): 212 - 215. (SHANG Jia-lan, SHEN Le-tian, ZHAO Jian. Attenuation

- law of stress wave in the bukit timah granite[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, **20**(2):212 - 215. (in Chinese)
- [10] KUMAR A. Effect of stress rate and temperature on the strength of basalt and granite[J]. Geophysics, 1968, **33**(3): 501 - 510.
- [11] RINEHART J S. Stress transients in solids, Hyper Dynamics, 1975, New Mexico, 203 - 211.
- [12] CHAU K T, ZHU W C, TANG C A, et al. Numerical simulations of failure of brittle solids under dynamic impact using a new computer program-DIFAR[J]. Key Engineering Materials, 2004, **265**(1): 1517 - 1522.
- [13] 朱万成, 唐春安, 杨天鸿, 梁正召. 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 Wan-cheng, TANG Chun-an, YANG Tian-hong. Constitutive relationship of mesoscopic elements used in RFPA~(2D) and its validations[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003,**22**(1):24 - 29. (in Chinese))
- [14] ZHU W C, TANG C A. Numerical simulation on shear fracture process of concrete using mesoscopic mechanical model[J]. Constructions and Building Materials, 2002, **16**(8): 453 - 463.
- [15] 戴俊. 岩石动力学特性与爆破理论[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002. (DAI Jun. Dynamic behaviors and blasting theory of rock[M]. Beijing: Metallurgical industry Press, 2002. (in Chinese))
- [16] 刘力强, 马胜利, 马瑾. 三轴压缩下不同构造花岗岩的微破裂时空分布特征及其地震学意义[J]. 科学通报, 1999, **44**(11): 1194 - 1198. (LIU Li-qiang, MA Sheng-li, MA Jin. Effect of rock structure on statistic characteristics of acoustic emission[J]. Seismology and Geology, 1999,**44**(4):1194 - 1198. (in Chinese))

### “浙江大学曾国熙讲座基金”成立

2007年5月22日上午, 我国著名岩土工程专家、浙江大学岩土工程创始人曾国熙教授90寿辰及从教62周年庆典暨“浙江大学曾国熙讲座基金”成立仪式在杭州浙江大学紫金港校区国际会议中心隆重举行。

曾国熙先生1953年院系调整来到浙江大学, 以先生为首的团队在浙江大学开创了岩土工程学科, 倡导基本理论、试验研究和工程实践相结合的治学方法, 在长达半个多世纪的高校教学和科研工作中, 为我国岩土工程学科发展做出了杰出贡献, 培养了我国岩土工程第一位博士, 造就了一大批岩土工程专业骨干力量和高级人才, 带出了一支有良好学风的教学、科研队伍, 取得许多优秀的科研成果, 耄耋之年仍笔耕不辍并继续指导学生。

为弘扬曾国熙先生的学术思想和治学精神, 传承先生优良品质和道德风范, 促进浙江大学岩土工程学科教育发展和学科建设, 值先生90寿辰之际, 浙江大学决定成立“浙江大学曾国

熙讲座基金”, 每年邀请国内外著名学者前来讲学, 促进学科发展, 加强国际科技交流与合作。

中国土木工程学会土力学及岩土工程分会、清华大学、同济大学、河海大学、中国矿业大学、中国水利水电科学研究院、南京水利科学研究院、铁道科学研究院、浙江省土木建筑学会等19家单位及业内人士纷纷发来贺电、贺信, 并赠送贺礼, 先生多年的老朋友卢肇钧院士、周镜院士也特地发来贺电, 庆祝曾国熙教授90大寿。

加拿大工程院院士D G Fredlund 教授和中国科学院院士陈祖煜教授做了2007浙江大学曾国熙基金讲座, 报告题目分别为Slope stability hazard management systems (滑坡灾害评估与防治) 和The limit equilibrium and limit analysis methods—Towards a mature discipline of Geomechanics (极限平衡与极限分析——走向成熟的一门岩土力学分支)。

(浙江大学岩土工程研究所 供稿)