

# 加载速率对岩石抗压和 抗拉强度的影响

吴 绵 拔

(中国科学院武汉岩体土力学研究所)

## 提 要

采用气-液式压缩联动系统的快速加载机,在加载速率为  $1 \times 10^{-1} \sim 1 \times 10^5 (\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2}) \cdot \text{s}^{-1}$  范围内对两种花岗岩进行单轴抗压和抗拉试验研究。试验结果表明:花岗岩的破坏强度随加载速率的提高而明显增加,同时抗压与抗拉强度之比值,并非一个恒定值,它随加载速率的提高略有增大。

## 一、前 言

矿山、水电、交通、土建和国防等部门所涉及的岩土工程问题往往与静荷载、应力波有关。要研究应力波在场地中运动规律及其对各种岩石工程的影响,不仅要考虑岩石在压缩波作用下的抗压强度,而且也要考虑岩石在反射波作用下的抗拉强度。应力波从震源向岩体四周传播,使岩石承受不同速率的荷载过程,其变化幅度是很宽广的。探讨在不同加载速率下岩石的抗压和抗拉强度,对研究岩体的爆破效应和确定其安全距离以及评价岩石工程的稳定性,都具有十分重要的实际意义。

近十年,加载速率对岩石力学特性的影响,已经引起人们的关注<sup>[1-4]</sup>,研究结果表明,岩石的抗压和抗拉强度,总的来说,都是随着加载速率的提高而提高。然而,由于岩石性质复杂,它不可能存在所谓的“标准试件”,所以,各自的试验结果都具有一定的局限性。本文结合实际工程,研究两种花岗岩在不同的加载速率下岩石的抗压和抗拉强度,以便查明:①加载速率对岩石的抗压和抗拉强度的影响;②岩石在动力和静力条件下的抗压和抗拉强度的关系;③加载速率对岩石抗压和抗拉强度比值的影响。

## 二、试 验 技 术

### (一)试件制备

从工地取来的花岗岩岩芯分A、B两类。A类,在地表深处,岩芯较为完整,呈灰白色,直径为 $\phi 110\text{mm}$ ;B类,在地表浅处,岩芯风化较为严重,呈暗灰色,直径为 $\phi 85\text{mm}$ 。

两类岩石的直接拉伸试件均加工成如图1所示的“犬骨型”,表面光滑,两端平行。

双冲压和抗压试验的试件加工为:A类是 $\phi 90 \times 105\text{mm}$ 和 $\phi 90 \times 190\text{mm}$ 的圆柱体;B类是 $\phi 70 \times 140\text{mm}$ 的圆柱体。圆柱体试件的两端面,经仔细研磨,不平行度和不垂直度均

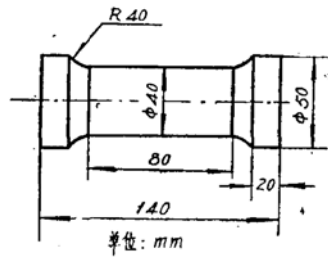


图1 犬骨型试件

小于0.02mm，圆柱表面光滑，没有可见缺陷。试件的平均容重分别为：A类2.60 g/cm<sup>3</sup>，B类2.58 g/cm<sup>3</sup>；平均孔隙度分别为：A类1.88%，B类3.16%。

### (二) 加载设备

本文试验使用10t万能材料试验机和400t岩石快速加载机对上述试件进行了试验研究。400t岩石快速加载机的原理如图2所示，它是采用气-液式压缩联动系统来实现快速加载。在未开始试验时，储能器的中缸和后缸充满压力气体，处于平衡状态。前缸的油没有受压，加载活塞刚好接触岩石试件。开始试验时，储能器的活塞向前运动，压缩前缸的液体。受压液体又迅速推动加载活塞去对试件施加荷载P。前缸受压液体的流量受调节阀的控制。所以，整个加载过程受到调节阀、储能器的预压、放气快速阀、传压液体的性质以及有关的几何尺寸的控制。由于液体是可压缩的，所以在加载过程中，其加载特性为<sup>[3]</sup>

$$P = At + B(1 - e^{-\beta t}) \tag{1}$$

其中A, B, β为与加载速率和各类岩石有关的常数，均为正值；t为加载时间。从公式(1)可以看出，除初始加载时间外，整个加载过程中，荷载与上升时间基本上呈线性关系。

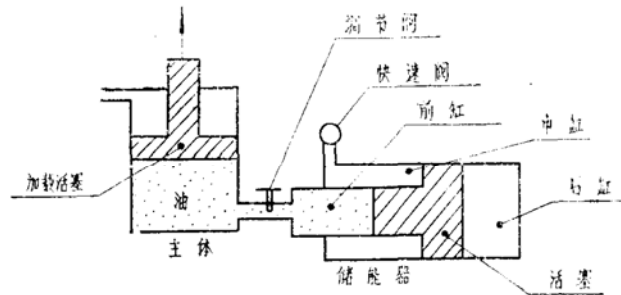


图2 快速加载机原理图

若直接用油泵来驱动加载活塞，则快速加载机便成为普通的材料试验机。机器的性能可容许进行近六个数量级的加载速率的试验研究。在每组试验中，为了进行相同的加载速率，可以保持机器的有关参数不变。

### (三) 方法

1. 在10 t 万能材料试验机上进行岩石的直接拉伸试验。试验原理如图3所示。“犬骨型”

试件的两端是用914胶粘在拉伸夹具的底座上,待胶全干后再装配,而后进行拉伸试验。利用拉伸夹具的球头和球座及试验机本身的对中装置可以防止产生偏心,由于试件的形状是“犬骨型”,所以在试件的中部 $\phi 40 \times 80\text{mm}$ 部份承受的应力是均匀的。如此可获得较理想的结果。

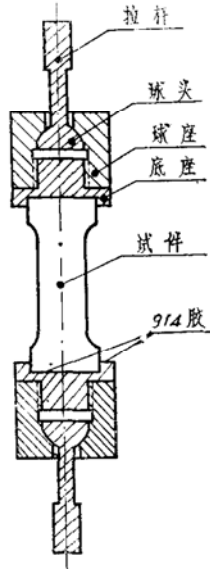


图3 直接拉伸试验装配图

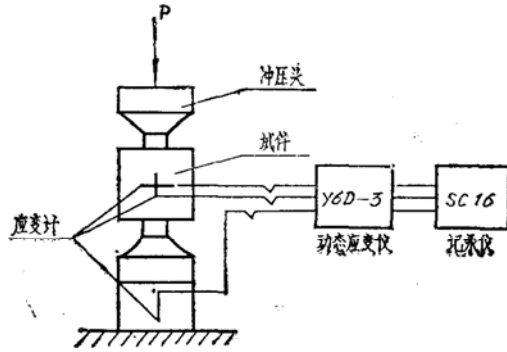


图4 双冲压试验原理图

2.在400 t 岩石快速加载机上进行双冲压间接拉伸试验。双冲压试验原理如图4所示。采用两个铬锰弹簧钢精制而成的冲压头加载。冲压头的两端面的不平行度和不垂直度均小于0.02mm、洛氏硬度 $H_{RC} 52 \sim 54$ ,大端的直径与试件直径相同,小端的直径是试件直径的0.28%。在冲压头与试件的接触面处,涂上一层薄薄的黄油以消除径向张力。为了使试件在受力过程中不产生偏心,采用两个内直径与试件直径相同的可卸卡环,作为安装校正之用,即将冲压头置于试件端面的中心处,然后卸去卡环进行试验。

3.在400 t 岩石快速加载机上按常规进行抗压试验<sup>[3]</sup>。

### 三、数据处理方法

#### (一)抗压和直接拉伸试验

在单轴抗压和直接拉伸试验中,假定在整个试验过程中,试件的横断面的变化可以忽略不计,则

$$\sigma = \frac{P}{\pi r^2} \quad (2)$$

式中 $P$ 为试件承受的荷载,当 $P$ 为峰值时,相应的 $\sigma$ 便是破坏强度,今取压缩为正,拉伸为负(笔者注:为方便起见,在以下的讨论中,拉伸强度取绝对值)。 $r$ 为试件的半径。

#### (二)双冲压试验

岩石的抗拉试验和抗压试验原理原则上基本相同,然而,由于岩石的直接拉伸试验存在

着许多技术上的困难，如对中、粘结等，且缺乏合适的快速拉伸机。常用的巴西劈裂法间接拉伸试验是线荷载，也存在某些缺陷。因此，这里采用一种新的间接拉伸试验法——双冲压法。

方晓阳教授等<sup>[5,6]</sup>提出将压缩转换为拉伸的双冲压方法，用以确定土、混凝土和岩石的静态抗拉强度，并给出了该方法的极限分析结果。笔者也用此原理来确定岩石的动力抗拉强度。

双冲压间接拉伸试验如文献[5, 6]所指出：①假定岩石在拉伸和压缩过程中存在着局部足够的变形，并视岩石为理想的弹塑性体，则可应用推广的极限分析定理；②假定岩石的破坏模型如图5所示，即压缩时以修正的莫尔-库伦破坏准则作为屈服面，并存在一个很小而又不为零的拉伸屈服截止 (Tension Cutoff of Yield)。图5中 $\sigma_c, \sigma_t$ 和 $\phi$ 分别是岩石的单轴压缩强度、简单拉伸强度和内摩擦角。作一个连接拉伸截止和压缩的莫尔-库伦包络线的圆，其半径为 $R$ 。在包络线范围内的应力状态下，岩石处于弹性状态；若超过或落在包络线上，则岩石将发生破坏。

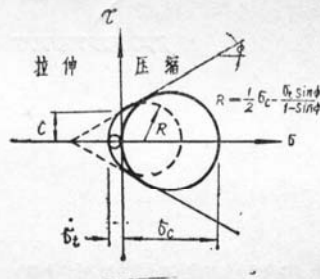


图5 修正的莫尔-库伦准则

双冲压试验表明，岩石试件在不同的加载速率下，都破坏成两个锥形楔子，并沿中轴裂成2~4块(见图6照片)。因此，用图7来表征圆柱体试件的双冲压试验的破坏机制。其破

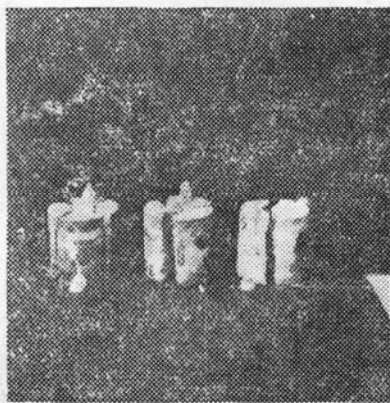


图6 双冲压试验破坏模式照片

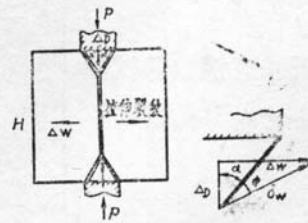


图7 双冲压试验破坏机制

裂面是由沿着径向的许多简单拉伸裂纹和直接接触冲压头的两个锥形面所组成。两个锥形楔子则可视作刚体并做相对运动，将试件劈开。协调速度的关系式如图7所示，图中 $\delta_w$ 为锥形楔子穿过简单“剪切”破裂面的速度， $\Delta w$ 为简单拉伸裂纹面的分离速度。能量的消耗率可用 $\delta_w \cdot (1 - \sin\phi) \cdot \sigma_c / 2$ 和 $\sigma_t \cdot 2 \Delta w$ 来表征。当外部功率和内部消耗功率平衡时，试件即发生破坏，于是给出破坏时的表达式为

$$\frac{P}{\pi a^2} = \frac{1 - \sin\phi}{\sin\alpha \cos(\alpha + \phi)} \cdot \frac{\sigma_c}{2} + \operatorname{tg}(\alpha + \phi) \left[ \frac{rH}{a^2} - \operatorname{ctg}\alpha \right] \sigma_t \quad (3)$$

式中  $\alpha$  为锥形楔子的锥角,  $a$  为冲压头半径,  $H$  为试件的高度。

引进  $\frac{\sigma_c}{\sigma_t}$  为常数,  $\phi$  为常数的假定。当  $\alpha$  满足条件  $\frac{\partial P}{\partial \alpha} = 0$  时, 则可以推导出在双冲压试验中, 用施加的最大荷载  $P$  来计算岩石抗拉强度的公式<sup>[7]</sup>

$$\sigma_t = \frac{P}{\pi(KrH - a^2)} \quad (4)$$

这里  $K$  值是取决于试件的尺寸、冲压头的尺寸以及岩石性质的待定常数。从公式(4)可以看出, 为了精确确定岩石的抗拉强度, 首先应确定  $K$  值。为了确定  $K$  值, 必须进行直接拉伸和双冲压试验的对比试验。

## 四、结果及讨论

### (一) 对比试验结果

为了确定公式(4)中的  $K$  值, 我们在加载速率相同的静态试验条件下, 进行了直接拉伸试验和双冲压间接拉伸试验。为方便起见, 可以先假定  $K$  值为 1。经过试验求得“双冲压的抗拉强度值”以后, 再以直接拉伸试验求得的抗拉强度值为标准, 代入公式(4), 反求真正的  $K$  值。据此得  $A$  类岩石的  $K_A = 0.99$ ;  $B$  类岩石的  $K_B = 1.05$  (详见表 1)。

表 1 对比试验结果

方 法	岩 类		A 类	B 类
	项 目			
直接 拉 伸 法	试 件 数 量 (个)		9	8
	平均抗拉强度 (kg/cm <sup>2</sup> )		53.0	28.4
	偏 差 系 数 $C_v$		6.3%	29.6%
双 冲 压 法	试 件 数 量 (个)		6	4
	平均抗拉强度 (kg/cm <sup>2</sup> )		52.3	29.8
	偏 差 系 数 $C_v$		30.5%	17.1%
由公式(4)反求所得的 $K$ 值			0.99	1.05

表中  $C_v = \frac{S}{\bar{x}} \cdot 100\%$ , 其中  $\bar{x} = \frac{\sum x_i}{N}$ ;  $S = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{N - 1}}$ , 而式中  $N$  为试件数量,  $x_i$  为第  $i$  个试

件的抗拉强度值。

## (二)破坏模式

1. 在直接拉伸试验中, 全部试件都是在  $\phi 40 \times 80 \text{mm}$  部位拉断。
2. 在双冲压试验中, 破坏模式如前所述, 即有两个明显的锥形楔子并沿中轴裂成 2 ~ 4 块。

在各个加载速率下的破坏情况列于表 2。从表中可见, 在 A 类岩石的试验中, 裂成两块的试件占 28.1%, 三块的占 56.3%, 四块的占 15.6%; 在 B 类岩石中, 裂成两块的占 75%, 三块的占 25%。因此试件的破坏情况与试件的尺寸有关, 与加载速率关系不大。这就可以认为, 试件尺寸相同时, 不同加载速率下, 双冲压试验的公式(4)中的 K 值不变。

表2 双 冲 压 试 验 结 果

岩 类	试件数	加载速率 $\dot{\sigma}$ [(kg·cm <sup>-2</sup> )·s <sup>-1</sup> ]	抗拉强度 $\sigma_t$ (kg/cm <sup>2</sup> )	破 坏 情 况
A 类	6	$2.50 \times 10^{-1}$	53.0	裂成两块的试件 1 个; 三块的 4 个; 四块的 1 个。
	6	$2.65 \times 10^0$	55.3	裂成两块的试件 2 个; 三块的 4 个。
	6	$1.55 \times 10^2$	62.7	裂成两块的试件 1 个; 三块的 3 个; 四块的 2 个。
	7	$1.04 \times 10^3$	64.5	裂成两块的试件 1 个; 三块的 5 个; 四块的 1 个。
	7	$1.17 \times 10^4$	73.4	裂成两块的试件 3 个; 三块的 3 个; 四块的 1 个。
B 类	4	$1.25 \times 10^0$	28.4	全部试件裂成两块。
	4	$9.78 \times 10^3$	60.5	裂成两块的试件 2 个; 裂成三块的 2 个。

注: 试件尺寸, A 类为  $\phi 90 \times 105 \text{mm}$ , B 类为  $\phi 70 \times 140 \text{mm}$ 。

## (三)加载速率对岩石破坏强度的影响

把岩石材料的破坏强度表为

$$f(\sigma_{ij}, \dot{\sigma}_{ij}) = 0 \quad (5)$$

式中  $\sigma_{ij} (i, j = 1, 2, 3)$  为应力张量,  $\dot{\sigma}_{ij} = \frac{d\sigma_{ij}}{dt}$ 。笔者认为, 就破坏强度而言, 它既与应力状态有关, 同时也与加载速率有关(即为时间的函数)。对于单轴应力状态(包括拉、压), 根据试验资料, 公式(5)可取如下形式

$$\begin{aligned} \sigma &= \sum_{n=0}^{\infty} A_n M^n \\ &= A_0 M^0 + A_1 M^1 + A_2 M^2 + A_3 M^3 + \dots \end{aligned} \quad (6)$$

式中  $M = \lg \frac{\dot{\sigma}}{\sigma_0}$

当  $\dot{\sigma} = \dot{\sigma}_0$  时, 则  $\sigma = \sigma_0 = A_0$ , 因而有

$$\begin{aligned} \sigma &= \sigma_0 \left[ 1 + \frac{A_1}{A_0} M + \frac{A_2}{A_0} M^2 + \frac{A_3}{A_0} M^3 + \dots \right] \\ &= \sigma_0 \left[ 1 + C_1 M + C_2 M^2 + C_3 M^3 + \dots \right] \end{aligned} \quad (7)$$

这里  $\sigma_0$  为相应于静态时的强度值;  $C_1, C_2, C_3, \dots$  是由试验确定的待定常数。这为我们用岩石的静态强度和加载速率来估计岩石的动态特性提供了途径。即从实验室确定岩石的“静态”强度和相应的加载速率 ( $\sigma_0, \dot{\sigma}_0$ ), 根据现场的应力波的传播规律给出岩石所受的加载速率  $\dot{\sigma}$ , 由此可以估算现场岩石的动力强度。

1. 单轴抗压强度

不同加载速率下, 花岗岩的抗压强度列于表 3。

表3 单轴抗压试验结果

岩类	试件数	加载速率 $\dot{\sigma}$ [(kg·cm <sup>-2</sup> )·s <sup>-1</sup> ]	轴向应变速率 $\dot{\epsilon}$ (1/s)	抗压强度 $\sigma_c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	变形模量 $E$ (×10 <sup>4</sup> kg/cm <sup>2</sup> )
A类	6	3.78 × 10 <sup>0</sup>	1.13 × 10 <sup>-5</sup>	747	38.1
	6	4.80 × 10 <sup>1</sup>	1.18 × 10 <sup>-4</sup>	848	40.8
	5	1.72 × 10 <sup>3</sup>	4.42 × 10 <sup>-3</sup>	1074	42.3
	6	1.20 × 10 <sup>4</sup>	3.11 × 10 <sup>-2</sup>	1250	44.8
	7	1.67 × 10 <sup>5</sup>	3.30 × 10 <sup>-1</sup>	1681	51.9
B类	4	2.75 × 10 <sup>1</sup>	1.03 × 10 <sup>-4</sup>	540	27.5
	4	1.02 × 10 <sup>5</sup>	2.69 × 10 <sup>-1</sup>	1062	49.6

单轴抗压强度  $\sigma_c$  和加载速率  $\dot{\sigma}$  的关系见图 8。

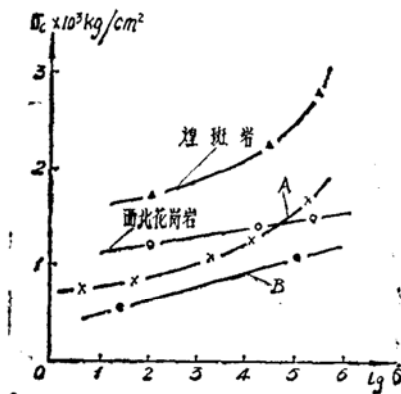


图 8 岩石的抗压破坏强度与加载速率的关系

图 8 中引用文献 [3] 的结果 (煌斑岩和西北花岗岩) 作对比。图中各点均为试验数据。据此对 A 类岩石, 当公式 (7) 取三项时, 将试验数据代入该式, 求出  $C_1, C_2$  值, 于是公式 (7)

可写成

$$\sigma_{cA} = \sigma_{c0A} [1 + 0.075M + 0.030M^2] \quad (8)$$

其中  $\sigma_{c0A}$  为  $1 \times 10^9 (\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2}) \cdot \text{s}^{-1}$  数量级; 下标  $A$  表示  $A$  类岩石,  $o$  表示静态,  $B$  表示  $B$  类岩石。  $B$  类岩石仅两点, 公式(7)取直线, 求出  $C_{1B} = 0.282, C_{2B} = 0$ 。

### 2. 单轴抗拉强度

试验结果见表1和表2。单轴抗拉强度  $\sigma_t$  与加载速率  $\dot{\sigma}$  的关系如图9所示, 其数据处理方法与单轴抗压方法相同。对  $A$  类岩石有

$$\sigma_{tA} = \sigma_{t0A} [1 + 0.050M + 0.007M^2] \quad (9)$$

其中  $\sigma_{t0A}$  为  $1 \times 10^{-1} (\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2}) \cdot \text{s}^{-1}$  数量级。  $B$  类岩石仅两点, 公式(7)取直线, 求出  $C'_{1B} = 0.285, C'_{2B} = 0$ 。

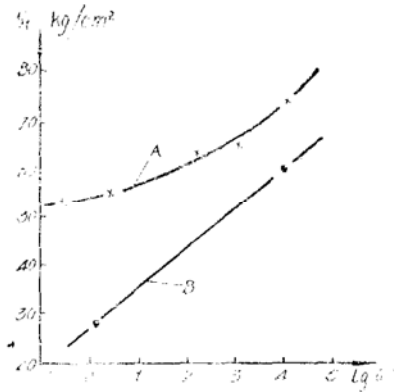


图9 花岗岩的抗拉破坏强度与加载速率的关系

### 3. 抗压强度与抗拉强度的比值(σc/σt)

岩石的抗压强度是抗拉强度的若干倍, 笔者的试验资料已表明了这点;  $\sigma_c/\sigma_t$  不仅受岩石本身特性的影响, 同时也受加载速率的影响。由图7, 8或公式(8), (9)得到的花岗岩的抗压强度和抗拉强度的比值随加载速率的变化而改变的结果见表4。试验资料表明,  $\sigma_c/\sigma_t$  随加载速率的提高略有增大, 并非保持恒值。由于  $A$ 、 $B$  两类岩石取自相同地区和相同方向, 由此可见, 在相同地区, 相同方向的岩石, 其静态抗压强度与抗拉强度的比值基本上是相同的。

表4 加载速率与  $\sigma_c/\sigma_t$  的关系

表4		加载速率与 $\sigma_c/\sigma_t$ 的关系					
$\lg \dot{\sigma}$		0	1	2	3	4	5
$\sigma_c/\sigma_t$	A 类	13.0	13.6	14.5	15.5	17.0	20.5
	B 类	—	13.4	13.8	14.6	14.9	—

### (四) 工程应用

本项研究系直接为工程提供数据。现场研究表明<sup>[8]</sup>, 加载速率在  $1 \times 10^2 \sim 1 \times 10^4$



( $\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$ ) $\cdot\text{s}^{-1}$ 范围内,动力抗拉强度比静力抗拉强度提高24~48%;抗压强度提高16~43%。岩石的快速加载试验的加载速率、上升时间和强度的变化规律与现场的研究结果相吻合。本试验为研究岩体中爆破效应,应力波传播规律,确定破坏分区等提供了有价值的。

## 五、结 论

通过对两类花岗岩在不同的加载速率下的试验研究,我们可以得出如下结论:

1.采用“犬骨型”试件和附加夹具进行岩石直接拉伸试验,是一种比较理想的抗拉试验方法,缺点是此法成本高、周期长、试验程序复杂。

2.双冲压间接抗拉试验方法,适用于不同加载速率条件下的大批试验,是确定岩石抗拉强度的一种有效而又简便的方法。当冲压头和试件的尺寸为 $a/r = 0.28$ ,  $2r/H = 0.5\sim 1$ 时,可用公式(4)表示,对花岗岩,其 $K$ 值为0.99~1.05。

3.岩石的抗压和抗拉强度随加载速率的提高而明显地增加,其变化规律可用公式(7)表示(可取其三项)。当加载速率提高五个数量级时, $A$ 类岩石的抗压和抗拉强度分别提高127%和38.4%;当加载速率提高四个数量级时, $B$ 类岩石的抗压和抗拉强度分别提高97%和111%。 $B$ 类岩石的岩质比 $A$ 类岩石差, $B$ 类岩石的抗压和抗拉强度比 $A$ 类的相应强度低。试验结果表明: $B$ 类岩石的抗拉强度随加载速率的提高而相应提高的幅度比 $A$ 类岩石大。这与文献[4]的结果一致。关于不同岩质的岩石强度受加载速率的影响问题还有待进一步研究。

4.岩石的抗压和抗拉强度的比值,在不同的加载速率下,并非定值,该比值随加载速率的提高略有增大。

5.在双冲压试验中,加载速率对圆柱体岩石试件的破坏模式没有影响。

在本项试验研究中,承袁建新研究员给予热情的指导,朱瑞庚副研究员给予有益的帮助和支持,于南燕、徐兆有、李惠荣、赵法乾、贾恒昶等同志参加部份工作,在此一并致谢。

## 参 考 文 献

- [1] Houpert, R., The Uniaxial Compressive Strength of Rocks, Proc. 2nd Cong. Int. Soc. Rock Mech., Belgrade, Vol.2, 1970, pp.49~55.
- [2] Perkins, R.D., Green, S.J. and Friedman, M., Uniaxial Stress Behavior of porphyritic Tonalite at Strain to  $10^3/\text{s}$ , Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 7, No. 5, Sept. 1970, pp. 527~535.
- [3] 吴绵拔、刘远惠,中等应变速率对岩石力学特性的影响,岩土力学, No. 1, 1980, pp.51~58.
- [4] Vutukuri, V.S., Lama, R. D. and Saluja, S. S., Handbook on Mechanical Properties of Rock, Vol.1, 1974, pp.93~95.
- [5] Fang, H. Y. and Chen, W.F., New Method for Determination of Tensile Strength of Soils, Highway Research Record 354, 1971, pp. 62~68.
- [6] Chen, W. F., Extensibility of Concrete and Theorems of Limit Analysis, J. Engin. Mech. Div., Proc. ASCE, Vol. 96, No. EM3, June 1970, pp.341~352.
- [7] Fang, H.Y. and Joseph Fernandez, Determination of Tensile Strength of Soils by Unconfined Penetration Test, Fritz Engineering Laboratory Report No. 384, 14 April, 1980, Lehigh University.

- [8] Zhu Rui-geng(朱瑞庚), Li Zhen (李铮), In-situ Measurements of Blast Seismic Wave and Their Safety Distance, International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, Vol.1, 1981, pp.43~46.

## The Effect of Loading Rate on the Compressive and Tensile Strength of Rocks

*Wu Mian-ba*

(Institute of Rock and Soil Mechanics, Academia Sinica Wuhan,)

### Abstract

This paper presents the results of uniaxial compressive and tensile test for two different kind of granites. The test were conducted by the complex liquid-gas pressure system under the loading rate from  $1 \times 10^{-1} \text{ (kg} \cdot \text{cm}^{-2}) \cdot \text{s}^{-1}$  to  $1 \times 10^5 \text{ (kg} \cdot \text{cm}^{-2}) \cdot \text{s}^{-1}$ . The results of test show that compressive and tensile failure strength of rocks notably increase with the rate of loading of specimens. Also, the strength ratio of compression-tension of rocks is not a constant. It increase slightly with the loading rate.