

# 测定岩体变形特性的BJ-110钻孔弹模计

李光煜 周佰海

(中国科学院武汉岩土力学研究所)

## 提 要

本文简略介绍了测定岩体变形模量的重要性和各种测试方法, 古德曼千斤顶(Goodman Jack)及其主要缺点。笔者针对其缺点作了五项改进, 研制出新型的BJ-110钻孔弹模计。标定试验表明, 古德曼千斤顶的接触面匹配不良及承压板弯曲导致测量值过小的问题已被新设备克服, 压力和位移的分辨率提高了5倍, 测定的岩体变形模量不再需要修正。对于岩石, 当采用 $2\beta = 45^\circ$ 的承压块时, 测定值与真实值之偏差不大于10%; 对于钢、铁等高弹模材料, 当采用 $2\beta = 30^\circ$ 承压块时, 其偏差不大于5%。现场试验表明, 测定值 $E_{calc}$ 与岩石常规试验结果完全一致。

## 一、前 言

岩体的变形特性尤其是变形模量或弹性模量是岩体工程设计的重要参数。但是由于岩体结构的复杂性和岩块的矿物成分不一致, 使得由试验测得同一类岩体的模量值, 即便在同一区段采用同一方法也可以相差几倍, 更不用说采用不同方法了。为了获得尽可能接近工程岩体模量“真值”的近似测量结果, 长期以来世界各国发展了大量的研究方法和相应的测试技术。这些方法和技术可以归纳为动力法和静力法两大类。

动力法是通过研究地震波或声波在岩体中的传播规律来建立运动参数与岩体模量的关系。这种方法具有测量迅速、耗资较少, 便于大范围、大规模测量等优点, 但实测值高于静力法测值。由于设计需要静态值, 所以许多研究人员致力于研究动、静两种测量结果的相关关系, 但迄今为止尚无合理的计算公式或表示相关关系的图表为大家所公认。

测量手段较多的静力法, 大致可分为承压板法(包括压力枕法和切缝法)、水压试洞法及钻孔试验法三类。后者具有如下优点: 由于试点可以远离开挖面, 因而可减小开挖和试件制备时对岩体的破坏及暴露面的松弛影响, 试点处岩体基本上可保持原状; 同时因试验周期短、经济, 故可广泛地开展, 使结果更具有代表性。钻孔试验法使用的设备按加力方式又有膨胀计、贯入计、钻孔千斤顶之分。

钻孔千斤顶的原理是利用千斤顶内的活塞、楔形块或小型柔性压力枕等部件, 在给钻孔壁施加一对径向压力的同时测量出相应的孔径变化, 并据此计算出岩体的变形模量或弹性模量。目前世界上已有7种类型的钻孔千斤顶, 按加压板的刚度可将它们分为刚性的和柔性的两种。柔性类的典型代表是澳大利亚联邦科学与工业研究组织研制的压力计(CSIRO Pressiometer), 其直径为150mm, 压力为25MPa; 刚性类的典型代表为美国的古德曼千斤顶。

## 二、古德曼千斤顶

古德曼千斤顶是在1968年由Goodman等人发明的<sup>[1]</sup>。它的钻孔直径为76mm, 加压块角度为 $2\beta = 90^\circ$ , 其长度为200mm; 加压活塞为扁圆形, 共计12个, 行程12.5mm, 最高压力64MPa, 用压力表测量, 总出力703kN; 变形用两个线性差动变压器式传感器(LVDT)测量, 它们安装在两端相距200mm处, 灵敏度为0.01mm, 量程 $\pm 5$ mm; 另有两个回程活塞, 在试验结束后可收回到69.85mm。

古德曼千斤顶的变形模量计算公式为

$$E_{calc} = 0.86 \times 0.93 \frac{\Delta Q_h}{\Delta D} k(\nu)$$

$$\text{即} \quad E_{calc} = 2.4 \frac{\Delta Q_h}{\Delta D} k(\nu) \quad (1)$$

式中  $E_{calc}$  为实测变形模量;  $\Delta Q_h$  为管路压力增量;  $\Delta D$  为钻孔直径变化;  $k(\nu)$  为与泊松比及承压面角度有关的系数。

当  $\nu = 0.25, \beta = 45^\circ$  时  $k(\nu) = 1.254$

自从1968年Goodman等人发表论文并转让给美国边坡仪器公司(Slope Indicator Co.)生产后, 许多人对这一方法进行了研究。

Meyer和Mcvey<sup>[2]</sup>1974年用 $E = 68.95 \text{ GPa}$ ,  $\nu = 0.332$ 的铝块对古德曼千斤顶做了标定试验, 实测结果为 $E_{calc} = 23.79 \text{ GPa}$ , 两者相差三倍。1976年Heuze和Salem<sup>[3]</sup>通过三维分析计算证实这一差异是由承压板的弯曲引起的。同年, Hustrulid<sup>[4]</sup>重新计算发现古德曼在1968年的一篇论文中 $k(\nu)$ 的计算是错误的, 正确值应为 $T^*$ , 他同时还计算了 $T^*$ 与真实接触角的关系, 梅伊尔试验中的真实接触角 $\beta$ 可能是 $3.5^\circ - 8.5^\circ$  (当应力为6.9—62.1MPa时)。1981年Shuri<sup>[5]</sup>详细研究了接触问题。他提供的图表表明, 如果要求在28MPa的压力时达到全接触, 对于 $E = 13.79 \text{ GPa}$ 的岩石, 钻孔直径应为75.895—76.708mm, 而当 $E = 68.95 \text{ GPa}$ 时, 则钻孔直径应为75.895—76.327mm, 可见对钻孔的要求是相当高的。1982年Swolfs<sup>[6]</sup>用铝、镁、铜三种金属块做了标定试验, 进一步证实了上述问题的存在。

产生上述差异的原因主要有两个, 一是承压块的纵向弯曲, 二是钻孔和压块曲率半径的匹配。目前的解决办法是利用有限元计算曲线或在不同岩体中的标定结果对计算值进行修正, 例如Heuze和Salem提出的修正曲线(图5)。从图可以看出, 当实际弹模大于68.95GPa时, 曲线很陡, 修正误差很大。当计算弹模的误差为5%时, 修正后的真实弹模 $E_{true}$ 的误差将达35%。

Hustrulid建议用直接分析计算修正,  $E = \nu D \frac{\Delta Q}{\Delta D} T^*$ ,  $T^*$ 与压力大小和岩石的泊松比有关。

## 三、BJ—110钻孔弹模计

为了克服古德曼千斤顶的缺点, 要求实测值等于真实值, 以及为了尽可能地扩大试验影响区体积, 本文作者研制了BJ-110钻孔弹模计(图1)。与古德曼千斤顶相比, 它有如下五项改进。

1. 仪器外径增大至110mm。钻孔直径多为这一尺寸, 因而避免了试验时再打小孔, 同时也可综合利用应力解除孔。由于增大孔径, 因而增加了试验影响区的范围, 更能代表岩体的变形特性。

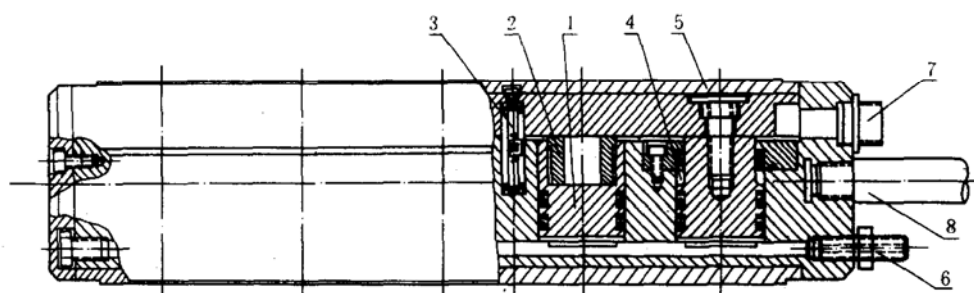


图1 BJ-110钻孔弹模仪构造图

1.活塞; 2.测力计; 3.位移传感器; 4.低压油腔;  
5.承压块; 6.高压油管; 7.电缆接头; 8.钻杆接头。

2.将12个扁圆形活塞改为5个圆形活塞, 它们全部位于承压块区段内, 从而避免了纵向弯曲影响。外边的两个活塞加低压回路兼作回程活塞, 缩短了仪器的总长, 但加压区长度 $L$ 与直径 $D$ 之比仍大于古德曼千斤顶的 $L/D$ 值。

3.两个双环式位移传感器的安装在中部, 接近于最大位移部位, 即使承压块有纵向弯曲也不会对测量结果产生影响。

4.承压块改为可装卸式的垫块, 因而承压块的曲率半径、接触角大小和材料弹模可根据具体情况选择, 使其尽可能与钻孔直径相匹配; 同时, 将承压块的接触角 $2\beta$ 改为 $30^\circ$ 和 $45^\circ$ 两种, 增大了接触压力, 其分布也更加均匀。

5.在活塞上增加两个荷重传感器, 可直接测量出力, 消除了压力换算及管路损失对测量结果的影响, 并且有利于自动记录及数据处理。

表1 古德曼千斤顶和BJ-110钻孔弹模计各项指标对比

| 项            | 目            | 古德曼千斤顶               | BJ-110钻孔弹模仪           |
|--------------|--------------|----------------------|-----------------------|
| 外形尺寸         | (mm)         | $\phi 76 \times 205$ | $\phi 110 \times 360$ |
| 活塞规格         | (mm)         | 12-16 $\times$ 60    | 5- $\phi 58.8$        |
| 最高压力         | (MPa)        | 69                   | 70                    |
| 最大出力         | (kN)         | 703                  | 69.5                  |
| 接触角 $2\beta$ | ( $^\circ$ ) | $90^\circ$           | $30^\circ, 45^\circ$  |
| 承压区平均压力      | (MPa)        | 64.2                 | 67.9                  |
| 活塞行程         | (mm)         | 12.5                 | 6                     |
| 回程活塞         | (个)          | 2                    | 2                     |
| 拉回力          | (kN)         | ?                    | 21.6                  |
| 位移计灵敏度       | (mm)         | 0.01                 | 0.0004                |
| 位移量程         | (mm)         | $\pm 5$              | $\pm 1.5$             |
| 压力计灵敏度       | (MPa)        | 1                    | 0.05                  |
| 压力计量程        | (MPa)        | 70                   | 100                   |

BJ-110钻孔弹模计和古德曼千斤顶这两种设备的主要技术指标对比情况列于表1。表中数据表明BJ-110的性能大部份超过古德曼千斤顶的性能, 古德曼千斤顶目前已作为国际岩石力学委员会建议方法。

## 四、BJ—110钻孔弹模仪的计算公式

由于采取了减小接触角 $\beta$ , 根据钻孔直径选取相同曲率半径的承压块以及将位移传感器放在中部等措施, 所以在低压时即可达到全接触。此外, 承压块的刚度很大, 其弹性模量 $E_s$ 大大高于岩石的弹性模量 $E_r$ 。简化计算表明, 承压块沿径向的变形与钻孔变形之比为 $0.068 \frac{E_r}{E_s}$ , 当 $E_r=20\text{GPa}$ 时, 这一比值小于1%, 因而可以忽略不计。计算得出的弹模值 $E_{calc}$ 不需经过任何修正即为实际弹模值 $E_{true}$ 。即 $E_{calc}=E_{true}=E_r$ , 其计算公式如下

$$E_{calc}=A \cdot H \cdot D \frac{\Delta Q}{\Delta D} \cdot T^*(\nu, \beta) \quad (2)$$

式中 $A$ 为用二维公式计算三维问题时的影响系数, 因 $\frac{L}{D}=3.27$ , 故 $A$ 取为0.915;  $H$ 为压力修正系数, 因直接用压力传感器测量压力 $Q$ , 无需进行修正, 故取 $H=1$ 。

于是上式可改写为

$$E_r=0.915D \frac{\Delta Q}{\Delta D} \cdot T^*(\nu, \beta) \quad (3)$$

在此式中令 $D=11.1\text{cm}$ , 又因为 $T^*(0.25, 15^\circ)=2.547$ ,  $T^*(0.25, 22.5^\circ)=2.141$ , 所以可推得如下两式

$$E_r=25.87 \frac{\Delta Q}{\Delta D} \quad (\beta=15^\circ) \quad (4)$$

$$E_r=21.75 \frac{\Delta Q}{\Delta D} \quad (\beta=22.5^\circ) \quad (5)$$

如将荷重和位移传感器的实测应变平均值代入式(4)和式(5), 则有

$$E_r=29.78 \frac{\varepsilon(\Delta Q)}{\varepsilon(\Delta D)} \quad (\beta=15^\circ, \nu=0.25) \quad (6)$$

$$E_r=17.28 \frac{\varepsilon(\Delta Q)}{\varepsilon(\Delta D)} \quad (\beta=22.5^\circ, \nu=0.25) \quad (7)$$

式中 $\varepsilon(\Delta Q)$ ,  $\varepsilon(\Delta D)$ 分别为荷重和位移传感器实测应变平均值(其标定结果见下节);  $E_r$ 为计算的弹模值, 即 $E_{calc}(\text{GPa})$ 。

当 $\nu=0.2$ 或 $0.3$ 时 $T^*$ 值不同(据Hustrulid)其系数略有变化, 相应的公式为

当 $\nu=0.2$ 时

$$E_r=30.53 \frac{\varepsilon(\Delta Q)}{\varepsilon(\Delta D)} \quad (\beta=15^\circ)$$

$$E_r=17.70 \frac{\varepsilon(\Delta Q)}{\varepsilon(\Delta D)} \quad (\beta=22.5^\circ)$$

当 $\nu=0.3$ 时

$$E_r=28.87 \frac{\varepsilon(\Delta Q)}{\varepsilon(\Delta D)} \quad (\beta=15^\circ)$$

$$E_r=16.76 \frac{\varepsilon(\Delta Q)}{\varepsilon(\Delta D)} \quad (\beta=22.5^\circ)$$

## 五、BJ—110钻孔弹模仪的标定

为了验证试验和计算结果的可靠性,该仪器必须在均质各向同性的弹性块体中标定,块体的模量可用同种材料的标准小试块测定;也可对块体施加单向压力,通过测定中心孔(直径110mm)孔径的变化,用弹性理论计算弹模值。

### (一)荷重传感器的标定

为了准确地测定活塞出力,在位于弹模仪中部的三个活塞上装有三个空心圆柱式荷重传感器。沿传感器的纵向和横向各贴三片电阻应变片,纵向的为工作片,横向的为补偿片,按半桥方式联接。加压在MTS刚性压力机上进行,应变值用日本KYOWA公司生产的520A数字应变仪测取。回归计算表明,标定值 $k=10.2\mu\epsilon/\text{kN}$ ,相关系数为0.9999。

若采用接触角 $\beta=15^\circ$ 的承压块,则每单位微应变( $1\mu\epsilon$ )相当于每 $\text{cm}^2$ 的承压面上承受4.6042N的压力,即 $\Delta Q=46.04\text{kPa}/\mu\epsilon$ 。若 $\beta=22.5^\circ$ ,则 $\Delta Q=31.79\text{kPa}/\mu\epsilon$ 。

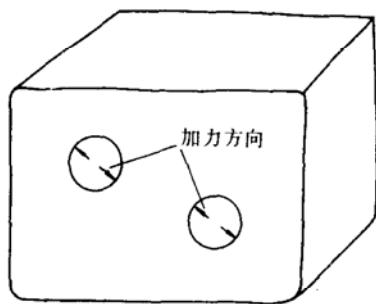
仪器分辨率为1个微应变( $1\mu\epsilon$ ),因此对上述两种承压块、压力测量灵敏度分别约为46kPa和32kPa。

### (二)位移传感器的标定

为了便于数据处理,位移测量也采用电阻片式传感器。传感器的弹性元件为两个相同尺寸的串联钢环,其优点是既可扩大量程又不增大钢环直径。只需在一个钢环上粘贴2-4片电阻片即可组成半桥或全桥。在位移标定台上对传感器进行标定,各项技术指标如下:量程为3mm;两个传感器的灵敏系数均为 $k=25.0\mu\epsilon/0.01\text{mm}$ ;仪器分辨率为1个 $\mu\epsilon$ ,因而位移分辨率为0.0004mm。线性回归计算表明,标定曲线的相关系数为0.9999。

### (三)BJ—110钻孔弹模计的标定

#### 1.在孤立岩块上标定



用于对弹模仪进行标定的大理岩岩块尺寸为 $650\times 500\times 600\text{mm}^3$ 。由于尺寸太大,无法加压,只得作为孤立岩块(即边界自由的试块)进行标定试验、(图2)。用KD-100钻机在试块上钻两个孔径112mm的钻孔,取出岩芯。在MTS刚性压力机上测得岩芯的弹性模量为 $E_{\text{true}}=60\text{GPa}$ 。然后将BJ-110弹模仪装入钻孔,对其进行标定。对孔壁的极限压力 $Q$ 可由下式确定

$$\sigma_\theta = 4\beta \frac{Q}{\pi}$$

式中 $\sigma_\theta$ 为垂直于钻孔加力方向的钻孔表面拉应力。

对于大理岩,其抗拉强度大约为8.0MPa,故当 $\beta=15^\circ$ 时(注意,代入公式时应化为弧度数),求得极限压力为 $Q=24.0\text{MPa}$ 。

按4MPa分级加压并测定钻孔变形,待压力加至20MPa时即行卸压。

根据公式(6),(7)算出10—20MPa曲线段的弹模 $E$ ,结果列于表2。从表中可以看出

$E_{true} > E_2 > E_1$  ( $E_1, E_2$ 分别为在1号孔和2号孔中测得的试块弹模值), 这是因为压力太低所致。此外, 钻孔的光洁度和直径对测量值的影响也很大。钻孔1中的实测值 $E_1$ 之所以大大低于 $E_{true}$ , 而且减小 $\beta$ 角也只提高到20.3GPa, 这是因为钻孔光洁度极差, 孔内各处直径大小不一, 压块与孔壁的实际接触面只达到全接触时的40%左右。钻孔2内的情况要好得多, 当采用 $\beta = 15^\circ$ 的压块时,  $E_2 \approx E_{true}$ ,  $R$ 的影响也不十分明显。

表2

承压块尺寸与实测弹性模量E的关系

| 钻孔号         |                          | 1    |      | 2    |      |      |      |
|-------------|--------------------------|------|------|------|------|------|------|
| 压块规格        | 接触角 $\beta$ ( $^\circ$ ) | 22.5 | 15   | 22.5 | 22.5 | 15   | 15   |
|             | 曲率半径R(mm)                | 56   | 56   | 55.2 | 56   | 55.2 | 56   |
| 弹性模量E (GPa) |                          | 12.2 | 20.3 | 27.8 | 33.0 | 51.2 | 57.7 |

## 2. 在加压试块上标定

前面已谈到孤立岩块不可能承受20MPa以上的压力, 而低压力时又达不到全接触(导致实测E值总是低于真实值), 因此必须提高压力。根据式(6)有

$$\sigma_\theta = Q/3 \quad (\beta = 15^\circ)$$

或  $\sigma_\theta = Q/2 \quad (\beta = 22.5^\circ)$

如果不允许钻孔壁上产生拉应力, 则根据孔周应力集中公式, 应在平行于压块的方向上施加 $\sigma_\theta/2$ 的单向压力 $P$ , 即

$$P = Q/6 \quad (\beta = 15^\circ)$$

或  $P = Q/4 \quad (\beta = 22.5^\circ)$

弹模计的设计指标为 $Q = 70\text{MPa}$ , 故

$$P = 11.7\text{MPa} \quad (\beta = 15^\circ)$$

或  $P = 17.5\text{MPa} \quad (\beta = 22.5^\circ)$

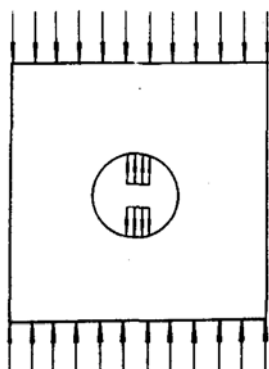
对于金属试块, 由于它具有较高的抗拉强度,  $P$ 值可适当降低。

试块尺寸以大于 $4d$ 为宜。但由于试件尺寸过大搬运不便, 故采用 $360 \times 400 \times 400\text{mm}$ 的长方体, 钻孔平行于短棱边。

图4为两组典型标定曲线。曲线表明: 加卸荷时变形滞后效应不明显, 回零很理想。当 $2\beta = 45^\circ$ 时, 由于承压面较宽, 全接触状态不容易达到, 特别对铸钢试块而言, 当压力超过16MPa时, 标定曲线尚未进入直线段, 实测 $E_{calc}$ 随压力增高继续增长, 对于 $E_{true}$ 较低的铸铁块和大理石块而言, 则比较容易进入全接触状态。当 $2\beta = 30^\circ$ (图4(b))时, 由于承压面较窄, 除钢块, 其余均已进入全接触状态, 压力为16MPa以上时, 压力与变形关系曲线已进入直线段。

为在三种试块中测定的 $E$ 值, 从表3中可看出承压块曲率

图3 加压试块上的标定试验示意图 半径对测定值的影响不大, 其标准偏差大约为 $\pm 10\%$ , 个别



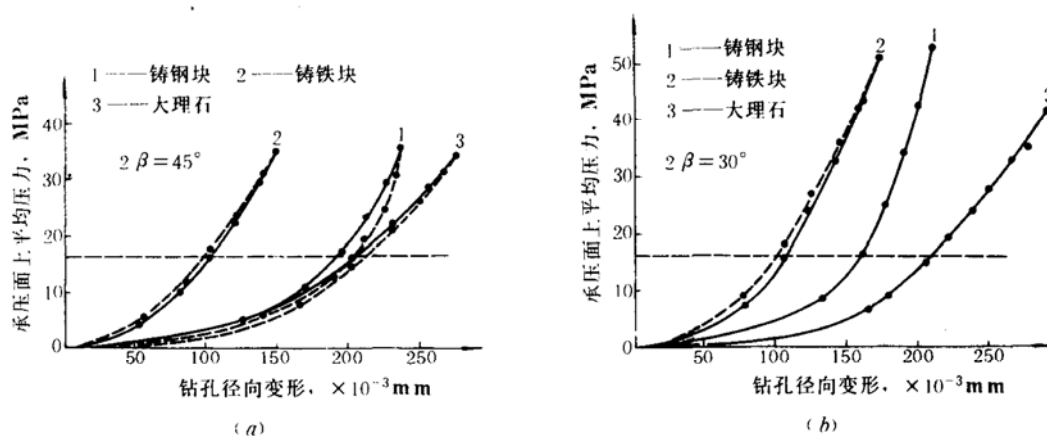


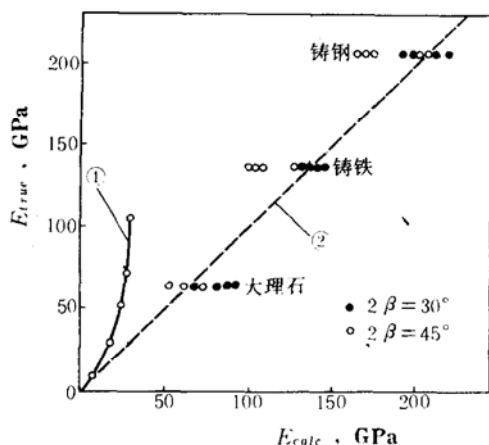
图4 BJ—110在三种试块中的标定曲线

表3

实测 $E_{calc}$ 值一览表(单位GPa)

| 材料      | $E_{true}$<br>(GPa) | 孔<br>径<br>(mm) | $2\beta$ | 压力段<br>(MPa) | 承压板R(mm)不同时的 $E_{calc}$ |      |      |      |      | 平均值及<br>标准偏差 | $\frac{E_{calc}}{E_{true}}$ |
|---------|---------------------|----------------|----------|--------------|-------------------------|------|------|------|------|--------------|-----------------------------|
|         |                     |                |          |              | 55.2                    | 55.4 | 55.6 | 55.8 | 56.0 |              |                             |
| 钢       | 206                 | 111.2          | 30°      | 16—52        | 186                     | 193  | 194  | 213  | 208  | 199±11       | 0.97                        |
|         |                     |                | 45°      | 18—36        | 136                     | 137  | 134  | 127  | 153  | 137±10       | 0.66                        |
|         |                     |                |          | 30—36        | 172                     | 163  | 169  | 201  | 207  | 182±20       | 0.88                        |
| 铁       | 137                 | 110            | 30°      | 16—52        | 126                     | 132  | 135  | 131  | 139  | 133±5        | 0.97                        |
|         |                     |                | 45°      | 18—36        | 84                      | 86   | 89   | 102  | 104  | 93±9         | 0.68                        |
|         |                     |                |          | 30—36        | 100                     | 102  | 107  | 101  | 125  | 107±10       | 0.78                        |
| 大理<br>石 | 65                  | 111.0          | 30°      | 16—43        | 88                      | 78   | 85   | 96   | 64   | 82±12        | 1.26                        |
|         |                     |                | 45°      | 16—36        | 52                      | 61   |      | 72   |      | 62±10        | 0.95                        |
|         |                     |                |          | 22—34        | 60                      | 70   |      | 80   |      | 70±10        | 1.08                        |

高达20%；理论分析表明，当承压块曲率半径与钻孔半径相等时，匹配最佳，弹模测定值应最大，实测数据表明，这一关系不明显。但 $\beta$ 角不同时，测值的差异却相当大，对于钢、铁块试块，当 $2\beta = 30^\circ$ 时，平均实测值接近真值，个别测值高约3%；而当 $2\beta = 45^\circ$ 时，却低约30%，即使较高压力段( $Q = 30-36$ MPa)，其测值也仍然低12%—22%。以上数据说明，对于高弹模材料( $E > 100$ GPa)应该采用小 $\beta$ 角( $2\beta = 30^\circ$ )承压块，这样易于达到全接触状

图5 二种千斤顶实测 $E_{calc}$ 与试块 $E_{true}$ 对比图

1. 古德曼千斤顶标定线 2. 理论关系线

比旁边的古德曼千斤顶标定曲线可以看出, 不管采用何种 $R$ 值和 $\beta$ 值的承压块, BJ-110的测定结果都比较接近真实值, 不再需要修正。

## 六、工程实例<sup>[7]</sup>

(一) 1989年12月, 在广东抽水蓄能电站首次应用BJ-110进行了现场试验。试验在距主厂房端部约13m, 垂直于出渣排风支洞的实验斜洞中进行, 试点高程相当于主厂房顶拱(见图6)。

为确定完整花岗岩及微弱蚀变花岗岩的 $E$ 值, 钻了两个约6m深的 $\Phi 110\text{mm}$ 钻孔, 分别处于两种岩体中, 试验结果如表4所示。

从表4中可以看到, 除A-4点外A孔中其余各点弹模均大于30GPa, 而A-4点估计是由于长石及黑云母含量的增大而引起弹模值的降低。因此, 当提供完整花岗岩弹模统计值时不计A-4点, 提供微弱蚀变花岗岩弹模统计值时不计B-1, B-2二点实测值。B-1, B-2二点测值偏小, 这是由于测点距试洞壁很近, 岩体受爆破振动而较松散之故, B-3, B-4, B-5三点测值较高较接近, 说明随钻孔深度的增加, 开挖试洞的爆破对测点影响趋小。

为研究岩体在不同方向的差异, 在B-1点处进行了垂直和水平二方向试验, 结果非常一致, 因此可认为该处岩体为各向同性体。

由测试结果可以得出如下几点结论:

1. 完整花岗岩及微弱蚀变花岗岩可分别当作各向同性体考虑。
2. 微弱蚀变岩体虽然其原结构已遭破坏, 但仍具有较高的原位弹模值。10—30MPa压力段为 $27.6 \pm 0.7\text{GPa}$ , 20—30MPa压力段为 $30.5 \pm 0.7\text{GPa}$ 。由于岩芯失水后即崩解, 无法用

态, 测值接近真实值。对于大理岩, 当 $2\beta = 45^\circ$ 时, 测值与真值基本一致, 误差仅 $-5\%$ , 即使取高压段( $Q = 24 - 34\text{MPa}$ ), 其误差也仅 $+8\%$ , 而当 $2\beta = 30^\circ$ 时, 其测值较真实值高出26%, 在高压段时更甚。对钢、铁试块也存在类似问题。

图5为表3的散点图。测量值基本处于理论关系线两侧, 当 $E_{true} > 100\text{GPa}$ 时, 黑点( $2\beta = 30^\circ$ )靠近理论线, 当 $E_{true} < 100\text{GPa}$ 时, 圆点( $2\beta = 45^\circ$ )靠近理论线, 大部份岩石的 $E$ 值小于100GPa, 故测试时最好采用 $2\beta = 45^\circ$ 的承压块。对

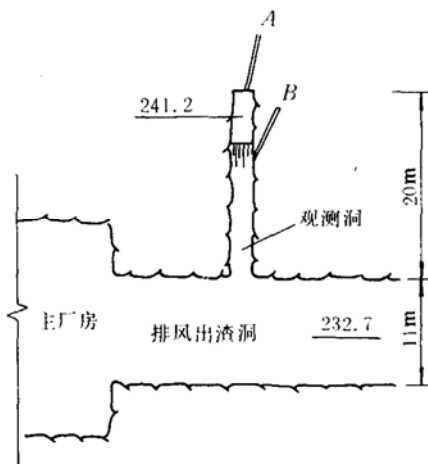


图6 试验位置示意图

室内常规试验测定该种岩体的弹模值。

3. 完整花岗岩弹模值较高, 其统计值为: 10—30MPa, 压力段为 $31.6 \pm 1.8$ GPa, 20—30MPa压力段为 $35.0 \pm 2.7$ GPa。该值与在MTS刚性机上进行的常规弹模试验结果几乎一致。

表4 各测点的弹模值

| 测点  | 深度<br>(m) | 岩 性        | 加载方向 | 弹性模量 (GPa)      |                 | 弹模统计值 (GPa)     |                 |
|-----|-----------|------------|------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|     |           |            |      | 压力段<br>10—30MPa | 压力段<br>20—30MPa | 压力段<br>10—30MPa | 压力段<br>20—30MPa |
| A-1 | 1.22      | 花岗闪长岩      | 垂直   | 30.7            | 34.7            | $31.6 \pm 1.8$  | $35.0 \pm 2.7$  |
| A-2 | 2.18      | 花岗岩        | 垂直   | 34.7            | 39.4            |                 |                 |
| A-3 | 2.92      | 黑云母花岗岩     | 垂直   | 30.6            | 35.4            |                 |                 |
| A-4 | 3.92      | 细粒黑云母花岗岩   | 垂直   | 23.4            | 24.5            |                 |                 |
| A-5 | 4.82      | 黑云母花岗岩     | 垂直   | 30.1            | 32.9            |                 |                 |
| A-6 | 5.72      | 细粒黑云母花岗岩   | 垂直   | 31.9            | 32.6            |                 |                 |
| B-1 | 0.62      | 弱蚀变的黑云母花岗岩 | 垂直   | 17.5            | 17.2            | $27.6 \pm 0.7$  | $30.5 \pm 0.7$  |
| B-1 | 0.62      | 弱蚀变的黑云母花岗岩 | 水平   | 17.3            | 17.5            |                 |                 |
| B-2 | 1.12      | 弱蚀变的黑云母花岗岩 | 垂直   | 22.8            | 24.2            |                 |                 |
|     |           |            |      | 23.5            | 25.3            |                 |                 |
|     |           |            |      | 23.5            | 24.8            |                 |                 |
| B-3 | 1.92      | 微弱蚀变的普通花岗岩 | 垂直   | 27.7            | 29.8            |                 |                 |
| B-4 | 3.32      | 微弱蚀变的普通花岗岩 | 垂直   | 28.2            | 30.2            |                 |                 |
| B-5 | 4.22      | 微弱蚀变的普通花岗岩 | 垂直   | 26.9            | 31.4            |                 |                 |

表5 三钻孔实测变形模量一览表

| 孔号 | 测点深<br>(m) | 标高<br>(m) | 岩 性       | 变形模量<br>(GPa) | 压力范围<br>(MPa) |
|----|------------|-----------|-----------|---------------|---------------|
|    | 4.5        | 8.3       | 粉砂质粘板岩    | 2.88          | 3.0—14.0      |
|    | 5.8        | 7.0       | 粉砂质粘板岩    | 2.62          | 3.0—23.0      |
|    | 7.3        | 5.5       | 细粒砂岩      | 13.96         | 6.0—28.0      |
|    | 8.8        | 3.9       | 细粒砂岩      | 5.28          | 6.0—23.0      |
| 2  | 4.0        | 21.0      | 风化砂岩      | 2.01          | 0—16.0        |
|    | 6.8        | 16.2      | 褐色砂岩裂隙不发育 | 8.00          | 4.0—20.0      |
|    | 7.8        | 15.2      | 褐色砂岩裂隙不发育 | 6.91          | 4.0—15.0      |
|    | 9.5(EW)    | 13.2      | 褐色砂岩裂隙发育  | 3.66          | 3.0—13.0      |
|    | 9.5(SN)    | 13.2      | 有风化物充填    | 3.50          | 3.0—12.0      |
| 3  | 5.5        | 13.7      | 砂岩裂隙发育    | 5.29          | 3.0—8.0       |
|    | 6.5        | 12.7      | 砂岩裂隙不发育   | 7.54          | 5.0—26.0      |
|    | 7.0        | 12.2      | 砂岩裂隙不发育   | 8.01          | 5.0—26.0      |
|    | 8.8        | 10.4      | 黑色粉砂岩     | 22.33         | 4.0—26.0      |
|    | 9.6        | 9.6       | 黑色粉砂岩     | 20.15         | 5.0—23.0      |

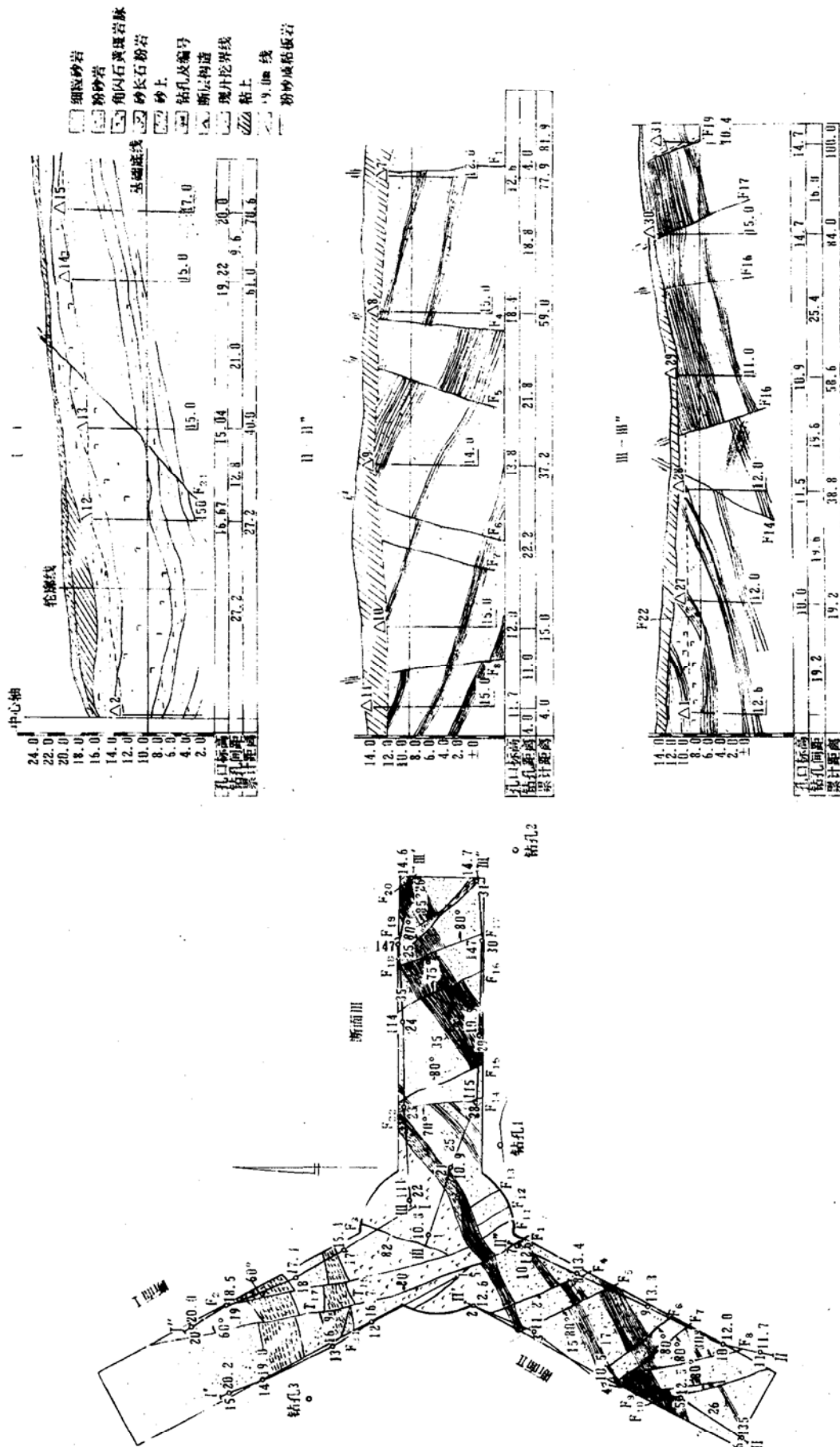


图7 柳京饭店基础地层及钻孔位置

(二) 1990年10月, 应朝鲜科学院邀请, 对已建成但尚未装修的平壤柳京饭店地基进行了变形模量现场测试。柳京饭店位于平壤市中心, 占地500000m<sup>2</sup>, 建筑面积320000m<sup>2</sup>, 高323.55m, 地下4层, 地上101层, 共105层, 为远东地区最高的钢筋混凝土摩天大厦<sup>[8]</sup>。

基岩主要由细粒砂岩、粉砂岩、粉砂质粘板岩组成, 构造单一, 岩层走向NEE, 倾向NWW, 倾角5°—35°, 节理裂隙较发育, 但无大断层。勘探阶段曾用地震法测定 $E$ 值介于1—40GPa之间。本次试验采用BJ-110钻孔弹模计, 共钻三个孔, 它们包含了地基的三种主要岩层, 具有足够的代表性, 图7表明基础地层情况及钻孔位置。表5为实测结果。

实测数据表明, 柳京饭店基岩变形特性具有下述几个特征:

1. 变形模量不仅和岩层种类有关, 即使同一岩层中由于裂隙发育程度不一, 也具有较大差别, 如1号孔标高5.5和3.9m处, 同为细粒砂岩, 相距不过1.6m, 但 $E$ 值相差2.6倍。第2号孔4m以下均为砂岩层, 6—8m处裂隙不发育,  $E$ 值介于6.91—8.00GPa, 而8.0—10.5m处裂隙发育并有风化物充填,  $E$ 值只有3.58GPa。

2. 岩体各向异性差别不大, 第2号孔9.5m试段处, 相互垂直的EW和NS二方向的 $E$ 只相差约5%。

3. 不同岩层变形模量差别较大, 粉砂质粘板岩只有2—3GPa, 而黑色粉砂岩则高达21GPa以上。

## 七、结 语

三种不同试块上的标定结果表明, BJ-110钻孔弹模计的各项指标已达到设计要求, 位移和压力测量精度大大高于古德曼千斤顶; 活塞行程及位移计量程低于古德曼千斤顶, 但如果钻孔大小一致, 试验中小心操作, 完全可以满足要求, 因试验过程中钻孔变形不会超过1mm。测定结果接近实测值, 不必经过任何修正, 对于 $E=100$ GPa以上的钢、铁或岩石, 当采用 $2\beta=30^\circ$ 的承压块时, 其测值与真实值之误差不大于5%。对于 $E$ 值较低各类岩石, 最好采用 $2\beta=45^\circ$ 承压块, 其误差不大于10%。

试验设备简便可靠、防水、坚固, 由于采用了回程活塞, 易于从钻孔中提取, 试验周期短, 是测定岩体弹性模量的有效新设备。

标定试验及标定块和传感器制作中得到刘继光、夏晓峰、姜渊浩、汪彬、闵弘等同志的协助及中心试验室提供设备, 现场试验中得到水电部14局科研所及朝鲜科学院大力支持, 特此致谢。

## 参 考 文 献

- [1] Goodman, R. E., Van, T. K., Heuze, F. W., The Measurement of Rock Deformability in Boreholes, Proc. 10th Symposium on Rock Mechanics, University of Texas, Austin, 1968.
- [2] Meyer, T. O., Mevey, J. R., NX Borehole Jack Modulus Determinations in Homogeneous, Isotropic, Elastic Materials, U. S. B. M. Report of Investigation 7855, 1974.
- [3] Heuze, F. E., Salem, A., Plate Bearing and Borehole Jack Tests in Rock—A Finite Element Analysis, Proc. 17th Symposium on Rock Mechanics, Snowbird, Utah, 1976.

- [4] Hustrulid, W. A. , An Analysis of the Goodman Jack, Proc. 17th Symposium on Rock Mechanics, Snowbird, Utah, 1976.
- [5] Shuri, F. S. , etc. , Borehole Diameter as a Factor in Borehole Jack Results, Proc. 22th Symposium on Rock Mechanics, 1981.
- [6] Swolfs, H. S. , etc. , A note on the Goodman Jack, Rock Mechanics, 15, 57—660, 1982.
- [7] 广东抽水蓄能电站钻孔弹模实验研究报告, 中国科学院武汉岩土力学研究所, 1990年。
- [8] 李光煜等, 平壤柳京饭店基岩变形特性现场测定, 岩土力学, 第12卷, 第2期, 1991年6月。

## A Modified Borehole Jack

*Li Guangyu Zhou Baihei*

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

### Abstract

Various method of determining the modulus of rockmass as well as Goodman Jack and its main disadvantages are briefly introduced in this paper. The mismatch between platen and borehole wall as well as the bending of the platen in Goodman Jack have been improved in the new jack. Furthermore the new jack has higher resolution and more accuracy. Calibration tests have shown that the measured modulus  $E_{calc}$  no longer needs correcting. For the rock block the error of  $E_{calc}$  compared with  $E_{true}$  is less than 10% when platen contact angle  $2\beta = 45^\circ$  is chosen. For the blocks of cast steel and iron with higher moduli they are about 5% when the jack is equipped with  $2\beta = 30^\circ$  platen. Field tests have shown that  $E_{calc}$  is about the same value as measured by laboratory tests.