

大理岩卸载力学特性的研究

吴玉山 李纪鼎

Unloading Properties of Marble

Wu Yushan Li Jiding

Abstract

A triaxial unloading experimental method fitting the process of stress changes in engineering practice such as underground openings or mine slope stability is proposed. The surplus strength with clear physical concept is employed as a parameter substituted for stress differences for interpretation of data. It is found that through such a test there are unique features of deformation during simultaneous unloading of longitudinal and transverse stresses, which indicates that it would be necessary for mechanical properties of rock mass by using loading process coincident with the stress changes in geotechnical engineering.

提 要

本文针对洞室、矿山边坡等一些工程的岩体应力变化状况, 研究三轴卸载试验的应力路径, 并提出以储备强度的概念进行资料整理, 从而得出了轴、侧应力同时卸载下的岩石变形特性的特殊性。结果表明, 用符合于岩体工程应力变化的加载路径来求取岩体的力学特性是十分必要的。

一、前 言

岩体一般处于三向应力状态, 由于工程活动而受到扰动, 其应力状态的改变与加载或卸载有关, 例如, 地下洞室的开挖, 露天矿山的开采, 都是卸载的情况, 而卸载的条件不同, 其应力状态也不一样。因此, 研究岩体在各种卸载条件下的力学特性, 具有很重要的现实意义。

本文将按莫尔-库伦理论对以下两种卸载条件的应力状态进行研究, 即(1)保持主应力差不变的情况下, 轴向与侧向压力同时卸载; (2)在轴向压力增加的同时, 减小侧压。为了比较, 还进行了常规的恒侧压加轴压的试验。

本文着重对岩石在三向压缩下卸载的变形及强度特性的变化规律进行探讨, 而不是求取岩石某种参数的定量指标。

二、试验方法

为了消除岩石本身的力学性质的差异对各种加载方法的影响, 试样采用了比较均质的大理岩。试样尺寸为高18厘米, 直径8厘米的圆柱体。试样加工后上下两端面的不平行度小于0.05毫米, 侧面垂直度偏差不大于0.001弧度。为了实测试样的纵横向变形, 在其中部的相对面分别贴上一对纵、横电阻应变片, 组成半桥。将试样在长江500型三轴压力试验机上进行试验(图1), 由应变仪测量其变形。

目前, 普通三轴试验的加载方法, 可以归纳为六种, 即(a)通常的恒侧压, 加轴压; (b)恒轴压, 卸侧压; (c)加轴压, 卸侧压; (d)轴压与侧压同时增加; (e)轴压与侧压不等量减小, 但侧压降低量大于轴压; (f)轴压与侧压等量减小。不同的加载路径所处的应力状态迥然不同, 图2是利用莫尔圆描述。上述六种不同加载路径的应力状态, 编号以I、II、III、IV、V、VI区别之。若将I—V型加载方法用 σ_1 - σ_3 直角坐标表示, 则如图3所示。从该图可知, 这五种加载方法都有一个共同点, 就是在增加压差($\sigma_1 - \sigma_3 = \Delta\sigma$)的情况下, 促使试样的破坏。VI型则不同, 它是在压差为常数($\sigma_1 - \sigma_3 = \text{常数}$), 轴压与侧压等量卸载的情况下, 促使试样破坏的。这类应力状态的变化反映在莫尔圆上, 则是大小相等的应力圆在 σ 轴上平移(图2—f)。

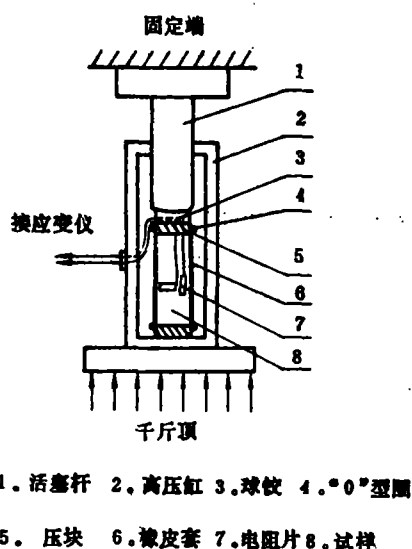


图1 试验安装

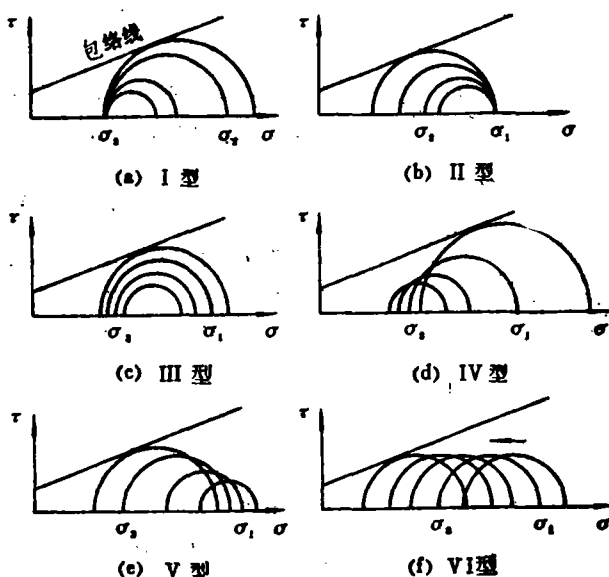


图2 莫尔圆表示加载方式

在这六种加载方法中, II、III、V及VI型是属于卸载路径。而与洞室和边坡开挖工程的岩体应力状态变化路径较为接近的是III和VI型, 故选择这两种作为此次试验研究的重点。同

时, 为了比较, 对 I 型也做了一定的探讨。具体加载的方法是:

■ 型: 开始同时增加轴压与侧压, 使侧压 $\sigma_2 = \sigma_3$ 分别为 600, 700, 800, 900, 1000, 1100, 1200 公斤/厘米² 时处于静水压力状态, 尔后按 $\Delta\sigma_1/\Delta\sigma_3 = 2.5$ 的比例在增加轴压的同时 卸减侧压。

Ⅵ 型: 开始同时增加轴压与侧压, 使侧压 σ_3 分别为 700, 800, 900, 1000, 1100 公斤/厘米² 时处于静水压力状态, 即 $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$, 尔后在保持 σ_3 不变的情况下, 继续增加 σ_1 , 直到 $\sigma_1 - \sigma_3$ 的压差 $\Delta\sigma = 1100, 1200, 1300, 1400, 1500, 1600$ 公斤/厘米² 以后, 再按轴压与侧压同时等量卸载。

I 型: 在侧压 ($\sigma_2 = \sigma_3$) 分别为 200, 300, 400, 500, 600, 800, 1000, 1200 公斤/厘米² 保持常数时, 增加轴压 σ_1 。

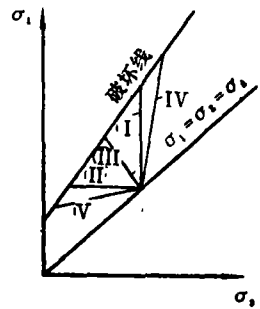


图3 加载途径

三、试验结果及其分析

普通三轴试验成果的整理, 一般是按实测的应力差 ($\sigma_1 - \sigma_3$) 与应变点绘应力差-应变关系曲线。此种方法对 I ~ V 型是适用的; 但对于Ⅵ型, 由于应力差为常数, 而不可能点绘应力差-应变关系曲线。为了使Ⅵ型与 I、■型测得的结果能在同一基础上进行比较, 本文不采用上述一般的点绘应力差-应变关系曲线的方法, 而引用储备强度-应变 ($d - \epsilon$) 的关系进行整理。

岩体处于一定的应力状态, 当其未达到极限破坏强度以前, 在岩体中仍然储备有相当的强度可资利用, 这部分强度, 我们称之为储备强度。储备强度若用图解来表示, 则十分清楚。图4是岩体某点应力状态的莫尔圆, 若已知该岩体破坏包络线为AB, 则自应力圆心C引至AB的垂线交于E点, 交圆周于D, 于是 $DE = CE - CD$, DE 即为储备强度, 用 d 表示。显然, d 为应力圆至包络线的最短距离, d 越大, 说明岩体所处的压力状态距极限破坏强度愈远; 换言之, 岩体中储备的强度愈大。当 d 为最大时, 即 ($d_{\max}$), 则 $\sigma_1 = \sigma_3$ 处于静水应力状态,

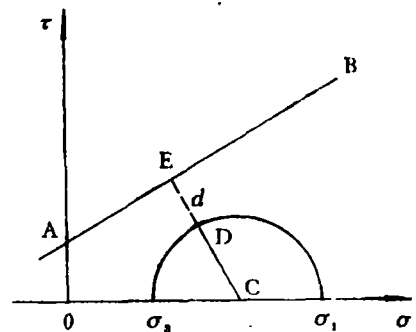


图4 储备强度 d

此时储备强度也最大; 当 $d = 0$ 时, 应力圆将与包络线相切, 也就是说, 岩体中没有储备强度。 d 的量纲是公斤/厘米², 因而, $d - \epsilon_1, \epsilon_3$ 的关系, 实际上也是应力-应变的关系。若由试验已求得 C, ϕ 值, 则在某一应力状态 σ_1, σ_3 下的 d 值, 可由下式求得

$$d = \left(C \operatorname{tg} \phi + \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \right) \sin \phi - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

式中, C 为凝聚力 (公斤/厘米²); ϕ 为内摩擦角; σ_1, σ_3 分别轴向应力和侧向压力 (公斤/厘米²)。

为了便于比较分析, 今以处于静水压力状态 ($d = \text{最大}$) 时的变形, 作为 ϵ 轴的起始点 (即 $\epsilon = 0$), 然后按 d 变化并根据对应于 d (即 $\sigma_1 - \sigma_3$) 测得的变形, 点绘 $d - \epsilon_1, d - \epsilon_3, d - \epsilon_v$ 关系曲线, I、■、Ⅵ型试验的部分结果如图5, 6, 7。

(一) 变形特征分析

1. 由图5, 6可见, I型与Ⅲ型两种不同加载路径对变形规律并没有明显的差别, 而且一般在低侧压(小于900公斤/厘米²)情况下, 体积膨胀约在75~85%的 d_{max} 处开始发生。在

Ⅲ型试验中也看不出卸载对变形有多大的影响, 这主要是此次采用的增减压比太大($\frac{\Delta\sigma_1}{\Delta\sigma_3} =$

2.5)的原因。

2. 图7是Ⅵ型加载路径测得的结果。其中在虚横线以上的曲线是从静水压力状态继续增加到所要求达到的压差值时的 $d-\epsilon$; 以下的曲线则是按轴压与侧压同时等量卸载测得的变化。就表面上来看, Ⅵ型与上述I、Ⅲ型(图5, 6)的曲线变化的规律和形状大体相似, 不同加载路径对变形性质似无影响, 但仔细研究即可发现Ⅵ型由于加载路径与前两者不同, 致使岩石变形性质有所改变。

由图7中的 $d-\epsilon$ 和 $d-\frac{\Delta V}{V}$ 曲线, 在虚线的上部因是按压差加载, 故与图5, 6的相应曲

线一致; 自虚线以下, 由于加载路径改变, 轴向应变立即减小, 横向应变增长加速, 因此, 体积变形也从开始压缩转为膨胀, 这些变化在虚线上下十分明显。

此外, 就岩石破坏时的储备强度 d 值而言, 按照I、Ⅲ型分析, 体积膨胀约在75~85%的 d_{max} 处开始发生, 而图7则在约55%的 d_{max} 处就已发生, 也不符合一般规律, 即岩石

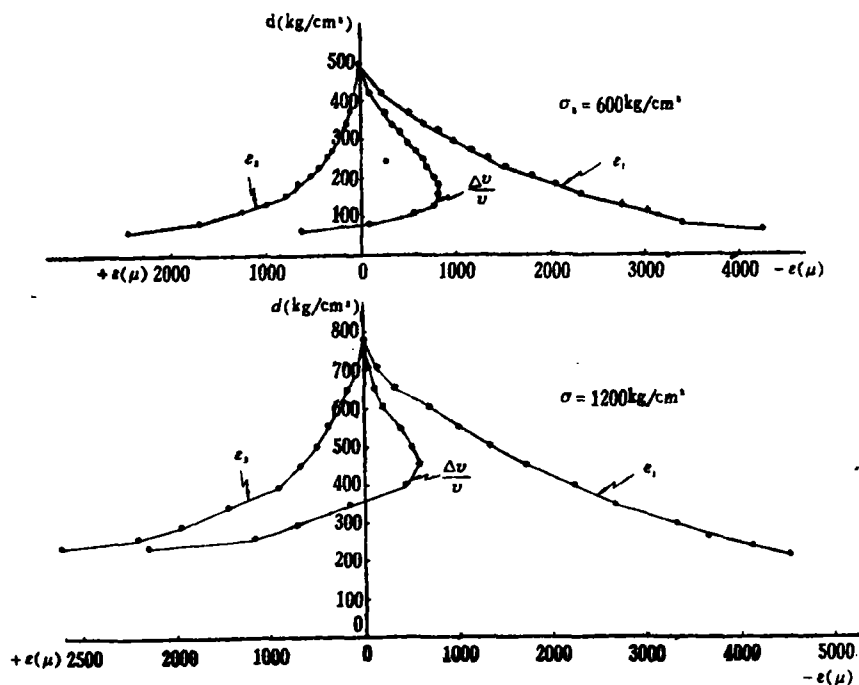
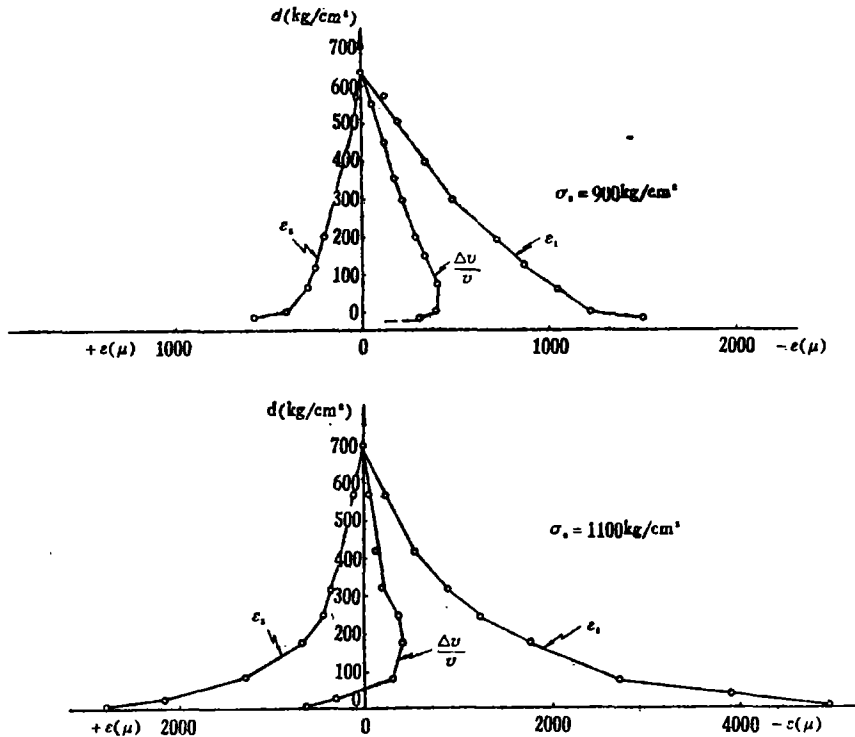
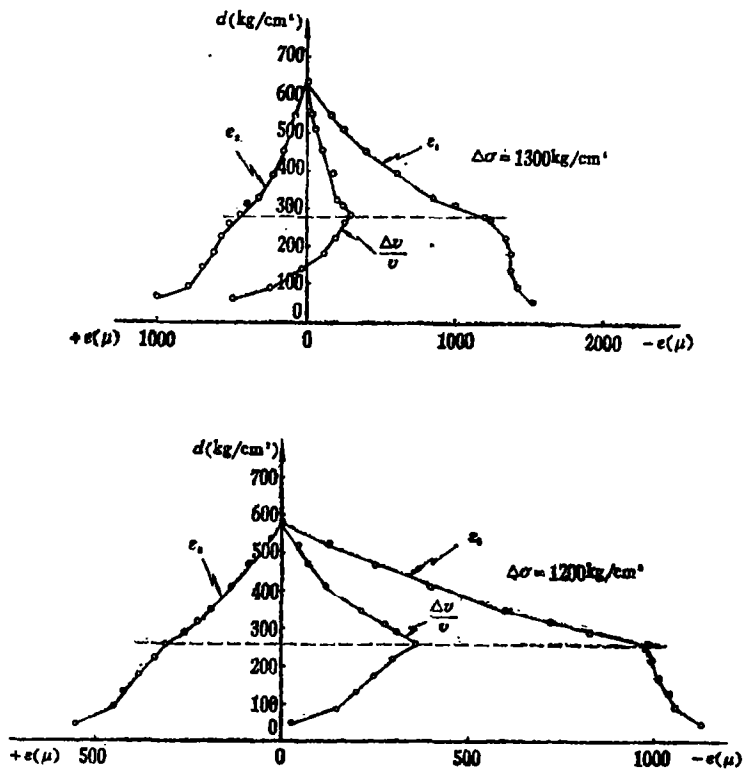


图5 I型加载 $d-\epsilon$ 曲线

图6 III型加载 d - ε 曲线图7 IV型加载 d - ε 曲线

体积膨胀在虚线附近并不发生。综上所述,可见 $d-\frac{\Delta V}{V}$ 曲线所反映的并非岩石变形的客观属性,其所以造成图7体积膨胀的假象,完全是加载路径突然改变所致。

3. 岩体在实际情况下,压差是客观存在的,而且在长期的压差作用下,其加载部分变形已经完成,因此,今将图7虚线以上由于加载产生的变形曲线不计,只研究虚线以下卸载引起的变形,并假定这部分变形从零开始,则得图8。将图8与I, II型比较,其主要区别在于:(a)卸载的整个过程中,侧向变形略等于轴向变形($\epsilon_2 = \epsilon_1$);(b)体积应变的变化规律取决于侧向变形的变化趋势,在破坏前的体积应变没有明显的突变。

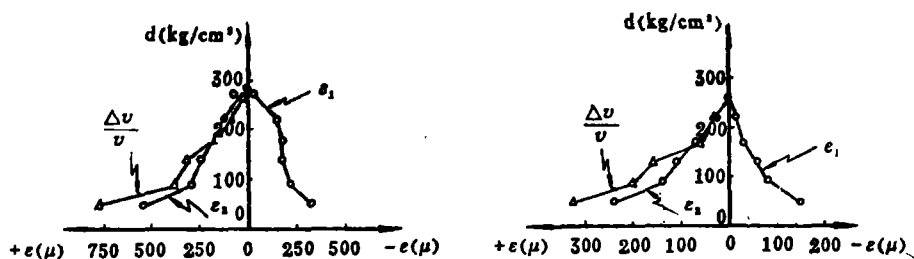


图8 II型加载卸载部分 $d-\epsilon$ 曲线

卸载阶段侧向变形增大,轴向变形减少,可用弹性理论公式简单说明:

$$\text{在加载阶段: 当 } \Delta\sigma_2 = 0, \quad \Delta\epsilon_1 = \frac{\Delta\sigma_1}{E} \quad (1)$$

$$\Delta\epsilon_2 = \Delta\epsilon_3 = \frac{\Delta\sigma_1}{E} \mu \quad (2)$$

(岩石一般 $\mu < 0.3$)

$$\therefore \Delta\epsilon_1 > \Delta\epsilon_2 = \Delta\epsilon_3$$

在卸载阶段: $\Delta\sigma_1 = \Delta\sigma_2 = \Delta\sigma_3 = \Delta\sigma$

$$\Delta\epsilon_1' = \Delta\epsilon_2' = \Delta\epsilon_3' = \frac{\Delta\sigma}{E} (1 - 2\mu) \quad (3)$$

比较式(1),(2),(3)可知, $\frac{\Delta\sigma_1}{E} > \frac{\Delta\sigma}{E} (1 - 2\mu) > \frac{\Delta\sigma_1}{E} \mu$.

因此,从量值来看,侧向变形在卸载阶段要比加载阶段大,而轴向变形则正好相反。

4. II型和VI型都是采取卸载路径,但前者只是侧压卸载——部分卸载,后者则是轴压与侧压同时卸载——全部卸载;前者的主应力差为变量,后者则为常数。由于这两个原因引起两者变形特性的差异是易于理解的。

(二) 强度特性

1. 由于此次试验的试样是脆性较大的大理岩,且试验均在较低的侧压力下进行。因此,在计算强度时仅根据荷载来考虑。今求得各级破坏荷载的 σ_1 及 σ_3 点绘得图9。从图9可知,

无论哪种加载路径所得的强度都符合一般规律,即侧压越大,强度越高。同时,也看不出加载路径对强度的影响,这可能是由于岩体强度本身存在的分散性及试验设备精度的误差,掩盖了强度上的差异。

2. 破坏形式的比较 照片1、2分别为Ⅲ型及Ⅵ型两种卸载情况下试样的破坏形式。照片1为Ⅲ型部分卸载,由照片可知,随着初始应力(σ_0)增加,破坏面的倾角逐渐变缓,破坏面也从明显逐渐转变为不明显,并呈鼓状。这说明随着初始应力(σ_0)的增加,试样由脆性破坏逐渐向塑性破坏发展。照片2为Ⅵ型全部卸载,也有类似的规律。由此可见,不论哪种加载型式,对破坏面都没有多大的改变,而很大的程度上是取决于破坏时的侧压大小。

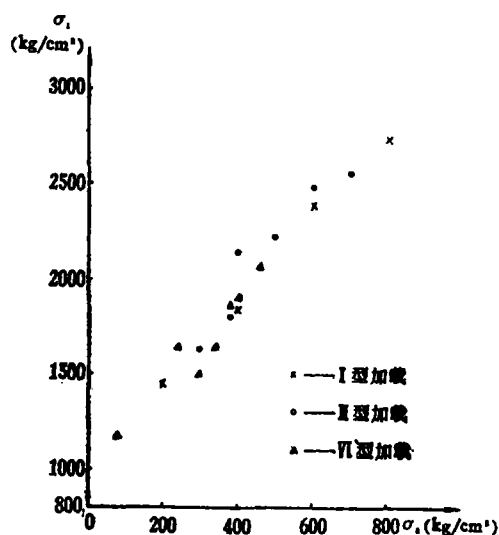


图9 各种加载强度比较

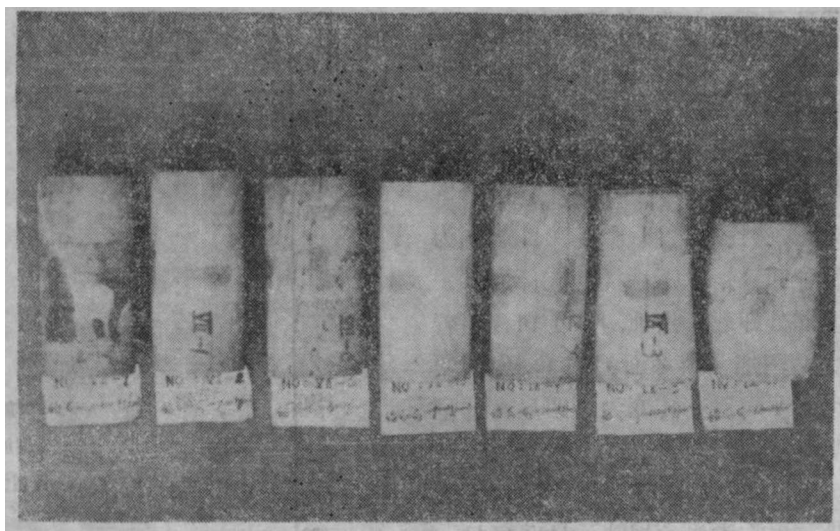
四、岩石卸载力学特性对工程的意义

坝基的开挖、地下洞室的掘进、露天矿区边坡掘成等工程活动,都引起岩体中初始应力的重分布,而在应力重分布的过程中,某些主应力成分的减小,即所谓卸载。这是通常出现的现象,特别是在高地应力区更为显著。由于卸载促使岩体中积存的能量释放,产生拉伸向的变形,引起岩体中裂隙的张开,结构松散,从而造成对岩体工程稳定的不利影响。因此,阐明岩石卸载的力学特性对了解岩体工程破坏的力学机制和加固处理有着重要的指导意义。

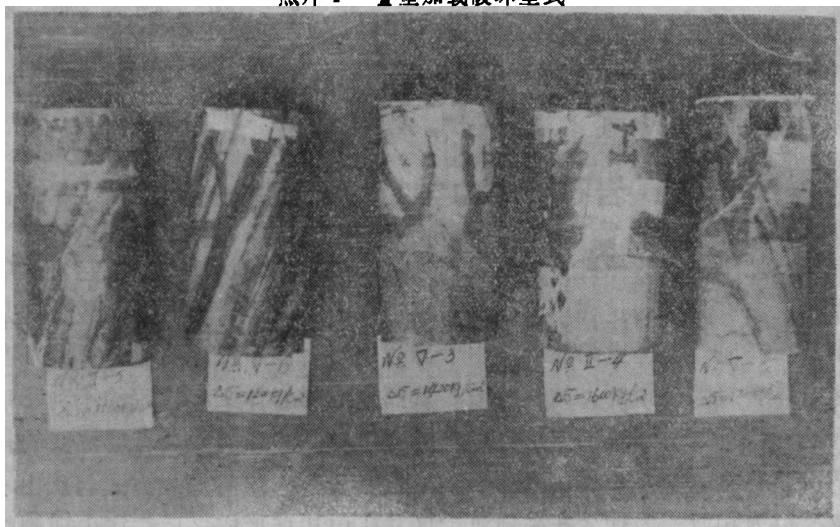
从上节的分析可知,Ⅵ型试验的变形,有它的特殊性。这种卸载方式与矿山边坡开挖引起的卸载情况极为相似。为什么在高地应力区,矿山边坡形成之后往往出现侧向变形大于轴向变形,由Ⅵ型试验得到很好的说明。Ⅲ型加载与地下隧洞周边的应力变化路径极为接近,它了解地下隧洞的变形、破坏机理也是有意义的,但是此次的试验中,采用了过大的增减压的比值($\Delta\sigma_1/\Delta\sigma_3=2.5$),突出了加载的作用,而掩盖了卸载成分的影响。若 $\Delta\sigma_1/\Delta\sigma_3 \leq 1.0$,则将与Ⅰ型所得的结果有很大的差别。关于这方面的工作有待进一步的研究。

五、结 论

1. 加载路径不同对岩石变形特征影响较大,但对强度影响则不明显。
2. Ⅰ、Ⅲ型试验,在低侧压(小于900公斤/厘米²)情况下,试样在75~85% d_{max} 处开始出现体积膨胀,但在Ⅵ型试验中,在55% d_{max} 处已经出现体积膨胀现象,这并非岩体的本质,而是加载路径突然改变所致。
3. 根据岩体工程引起应力变化的路径,采用相应的加载方式,确定岩体的力学参数是十分必要的。



照片1 I型加载破坏型式



照片2 II型加载破坏型式

4. 本文提出储备强度 d 的概念, 并以它代替主应力差($\sigma_1 - \sigma_3$)做为参数点绘图表, 不仅力学概念清楚, 而且直观, 易于理解, 是可行的。

参加本试验的还有金川公司研究所的王松茂、孙菊香、马宝玲、桂林地质学院梁浩, 四川灌县水利学校马大师及本所陈允雯等同志。在此一并致谢。

参 考 文 献

- 〔1〕 获野正二等, 真三轴压缩应力下大理岩的非弹性特性 (日文), 日本矿业学会报告要旨集, 1980 年。
- 〔2〕 Hoshino kazuo, Mechanical properties of Japanese tertiary sedimentary rocks under high confining pressures, Geological survey of Japan, 1972.
- 〔3〕 吴玉山, 应力途径对凝灰岩力学特性的影响, 岩土工程学报, 第 5 卷第 1 期, 1983 年。
- 〔4〕 陈旦嘉、载冠一, 在三轴应力下大理岩变形特性的试验研究, 岩土力学, 第 3 卷第 1 期, 1982 年。
- 〔5〕 西井理等, 横向变形控制的岩石三轴压缩试验 (日文), 日本矿业学会报告要旨集, 1981 年。
- 〔6〕 櫻井春輔, 隧道与岩体开掘 (日文), 论文报告, 1982 年。