

# 三峡永久船闸边坡岩体 在复杂应力路径下的变形特性

熊诗湖, 周火明

(长江科学院, 湖北 武汉 430019)

**摘要:** 三峡永久船闸边坡开挖后, 岩体应力调整, 且其变化路径复杂。为研究三峡永久船闸边坡岩体在此状态下的变形特性, 在边坡勘探平洞进行复杂应力路径下的原位岩体真三轴试验, 试验荷载模拟边坡初始地应力场及其在边坡开挖过程中的变化情况, 按 3 种路径施加:  $\sigma_1$  卸载时,  $\sigma_2$  和  $\sigma_3$  保持不变;  $\sigma_1$  加载时,  $\sigma_2$  保持不变, 而  $\sigma_3$  同步卸载;  $\sigma_1$  卸载时,  $\sigma_2$  保持不变, 而  $\sigma_3$  同步加载。根据试验结果, 建立此 3 种应力路径下岩体切线弹性模量  $E_t$  与主应力差间的经验关系式, 分析边坡岩体的变形特性。研究表明: 在一个主应力减小(卸荷)、另一主应力增加(加载)的应力路径下, 岩体变形具有非线性和各向异性; 在卸荷方向, 切线弹性模量随有效主应力差(负值)的减小而加速减小; 在加载方向, 切线弹性模量基本保持稳定。

**关键词:** 岩石力学; 真三轴试验; 应力路径; 卸荷; 非线性变形; 切线弹性模量

**中图分类号:** TU 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2006)增 2 - 3636 - 06

## DEFORMATION PROPERTIES OF ROCK MASS OF TGP PERMANENT SHIPLOCK SLOPES UNDER COMPLEX STRESS PATHS

XIONG Shihu, ZHOU Huoming

(Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan, Hubei 430019, China)

**Abstract:** In the course of excavating permanent shiplock slopes of the Three Gorges Project(TGP), the rock mass stress in the slopes area adjusted along complex paths. Aiming at the deformation properties of the rock mass in that state, in-situ real triaxial tests are carried out on rock mass with complex loading paths. Simulating the initial stress field and its variation patterns, the experimental load is applied under the following three loading paths: (1)  $\sigma_1$  decreases,  $\sigma_2$  and  $\sigma_3$  maintain constant in the same course; (2)  $\sigma_1$  increases,  $\sigma_2$  maintains constant and  $\sigma_3$  decreases in the same course; (3)  $\sigma_1$  decreases,  $\sigma_2$  maintains constant and  $\sigma_3$  increases in the same course. Based on the testing data, the relationships between the elastic modulus and the principal stress difference under such loading paths are acquired, and the deformation properties of the slope rock mass are analyzed. The result indicates that, when a principal stress decreases and another one increases in the same process, the deformation is nonlinear and anisotropic. The elastic modulus keeps approximately invariable in the loading direction and speed-up decreasing in the unloading direction in accordance with the decreasing of the effective principal stresses.

**Key words:** rock mechanics; real triaxial test; stress path; unloading; nonlinear deformation; elastic modulus

**收稿日期:** 2005 - 12 - 05; **修回日期:** 2006 - 01 - 26

**作者简介:** 熊诗湖(1967 -), 男, 1986 年毕业于长江水利水电学校水工专业, 现为硕士研究生、工程师, 主要从事岩石力学试验方面的研究工作。  
E-mail: xsh-xiong@163.com

# 1 引言

三峡永久船闸边坡开挖后, 边坡岩体应力调整, 部分处于卸荷状态, 部分处于一个方向卸荷而另一方向加载的状态。由于岩体在卸载条件下的力学特性与加载条件下有着本质的区别, 主要表现为更显著的非线性和各向异性, 采用卸载条件下的力学参数验算边坡变形及稳定性更为合理。

目前对岩体在卸载条件或复杂应力路径下力学特性的研究方法主要有岩石三轴试验<sup>[1~5]</sup>、物理模拟三轴试验<sup>[6~8]</sup>以及数值仿真分析<sup>[9, 10]</sup>, 有关原位岩体试验成果尚未见报道。显然, 由于岩体结构复杂, 原位岩体试验能比上述试验方法更客观地反映工程岩体的力学特性。

本文根据不同应力路径下的原位岩体真三轴试验成果<sup>[11]</sup>, 分析三峡永久船闸边坡岩体在不同应力路径下的变形特性, 得到了岩体切线弹性模量与应力路径有关的变化规律。

# 2 试验方案

## 2.1 试验条件

试验现场位于三峡永久船闸南坡 PD3008 勘探平洞, 试件尺寸为 30 cm×30 cm×60 cm, 底部与母岩相连, 试件岩性为微风化闪云斜长花岗岩, 具块状结构。共在 4 个点进行试验, 其中试点 A 可见 2 条短小裂隙, 试点 B 可见 5 条陡倾角短小裂隙, 其余 2 个试点含有贯穿性裂隙。图 1 给出了试点 B 地质素描(侧边展开)图<sup>[11]</sup>。

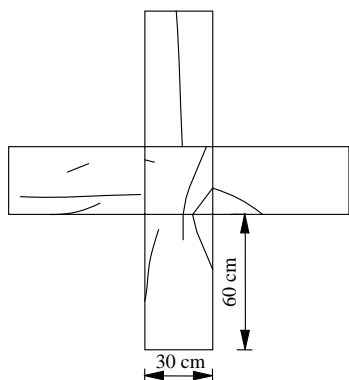


图 1 试点 B 地质素描(侧边展开)图<sup>[11]</sup>

Fig.1 Geology sketch of test point B(lateral surfaces expanded)<sup>[11]</sup>

在试件 4 个侧边中线的上、中、下部位安装标

点, 采用千分表测量变形; 轴向荷载用并联千斤顶施加, 侧向荷载用液压钢枕施加。

## 2.2 荷载施加方案

研究岩体在不同应力路径下的变形特性, 理想的方法是制备多个性状均匀的试件, 针对不同试件分别进行不同应力路径的试验。显然, 对于原位岩体试验, 这是很难实现的。实际采取的是对同一试件反复加、卸载的方法。

首先按比例、逐级、同步施加 3 个方向的荷载至初始应力状态。试验的初始应力状态根据船闸区初始应力场测试及区域应力场分析成果确定, 首先按试验的先后顺序, 初始应力  $\sigma_{01}$ ,  $\sigma_{02}$ ,  $\sigma_{03}$  的 6 种状态分别为: 4, 2, 1 MPa; 4, 4, 4 MPa; 6, 5, 2 MPa; 6, 6, 6 MPa; 8, 6, 3 MPa; 8, 8, 8 MPa。然后按下列 3 种应力路径模式加、卸载:

- (1) L1 型:  $\sigma_1$  卸载至 0,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$  保持不变。
- (2) L2 型:  $\sigma_1$  加载至  $\sigma_{01} + \sigma_{03}$ ,  $\sigma_2$  保持不变,  $\sigma_3$  同步卸载至 0。
- (3) L3 型:  $\sigma_1$  卸载至 0,  $\sigma_2$  保持不变,  $\sigma_3$  同步加载至  $\sigma_{01} + \sigma_{03}$ 。

图 2 给出了应力路径示意图。

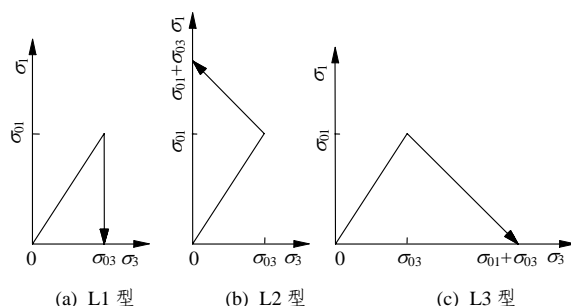


图 2 应力路径示意图

Fig.2 Sketch map of stress paths

每个试点在某种初始应力状态按以上顺序进行 3 种应力路径的试验, 然后改变初始应力状态, 重复 3 种应力路径的试验(实际完成量略有变化)。每次试验完成后, 均卸载至 0, 重新施加初始荷载。加、卸荷均逐级进行, 每级荷载稳定 5 min。

需要说明, 试点 A, B 在完成应力路径试验后, 均曾进行过单轴抗压强度试验, 因加压设备出力限制, 最大单轴应力加至 60 MPa, 而试件并未破坏, 即岩体的单轴抗压强度  $\sigma_f > 60$  MPa。三轴应力路径试验的最大等效应力为

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} =$$

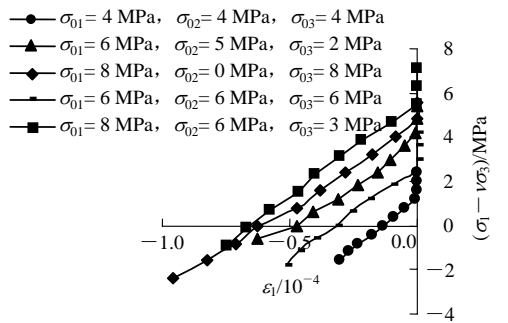
$$\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(16-8)^2 + (8-0)^2 + (0-16)^2} = 13.8 \text{ MPa}$$

则试验的最大应力水平  $s = \frac{\sigma_i}{\sigma_f} < 0.23$ ，试验荷载远低于

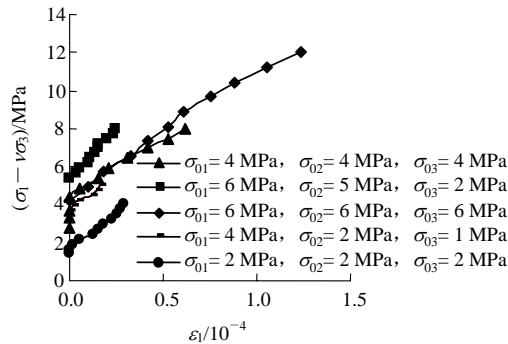
于岩体屈服极限。以下分析岩体变形时，忽略反复加、卸载引起的残余变形对岩体弹性模量的影响。

### 3 $\varepsilon_1 - (\sigma_1 - \nu\sigma_3)$ 关系曲线

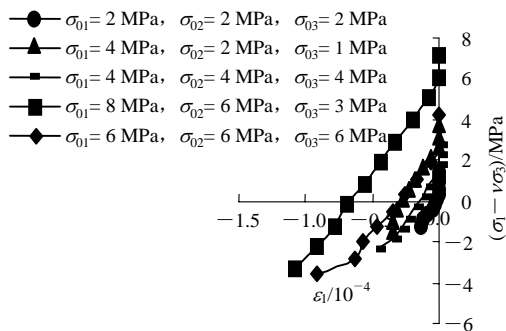
由于  $\sigma_1$  和  $\sigma_3$  均动态变化，切线弹性模量  $E_t$  与  $d(\sigma_1 - \nu\sigma_3)$  相关，故以  $\varepsilon_1 - (\sigma_1 - \nu\sigma_3)$  关系表达岩体力学响应，而不是常规三轴试验的  $\varepsilon - (\sigma_1 - \sigma_3)$  关系。绘制试点 A, B 的三轴应力路径试验的  $\varepsilon_1 - (\sigma_1 - \nu\sigma_3)$  关系曲线分别见图 3, 4。可见：



(a) L1 型

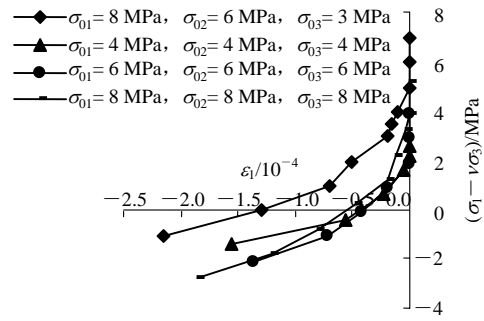


(b) L2 型

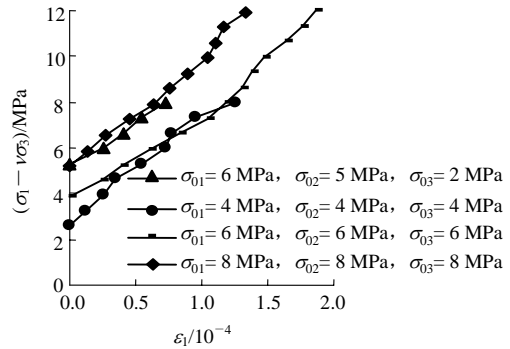


(c) L3 型

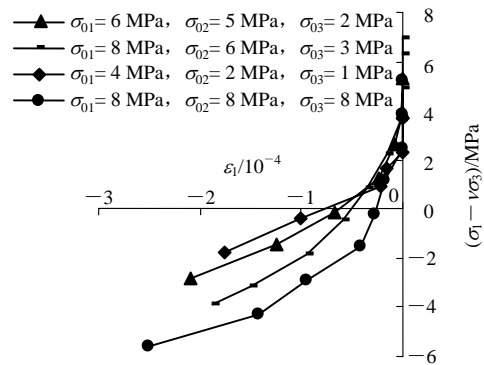
图3 试点A三轴应力路径试验的  $\varepsilon_1 - (\sigma_1 - \nu\sigma_3)$  关系曲线  
Fig.3 Relation curves of  $\varepsilon_1 - (\sigma_1 - \nu\sigma_3)$  of test point A under triaxial stress paths



(a) L1 型



(b) L2 型



(c) L3 型

图4 试点B三轴应力路径试验的  $\varepsilon_1 - (\sigma_1 - \nu\sigma_3)$  关系曲线  
Fig.4 Relation curves of  $\varepsilon_1 - (\sigma_1 - \nu\sigma_3)$  of test point B under triaxial stress paths

(1) 卸荷方向的应变在起始段很小。尤明庆和华安增<sup>[3]</sup>在分析岩石试验中的同类现象时认为：当外力开始卸去时，只有当应力降大于岩石闭合孔隙的反向摩擦力时，才会使岩石的应变开始恢复。岩体中的裂隙更发育，此现象也更明显。以下分析变形特性时，均取应变产生后的变形曲线为有效曲线。

(2) 试点B的加载变形大致呈直线(见图4(b))，而卸载变形呈曲线(见图4(a)，(c))，表现出明显的非线性；试点A完整，加、卸载状态的  $\varepsilon_1 - (\sigma_1 - \nu\sigma_3)$  关系皆大致呈直线(见图3)，变形的非线性不明显。以下分析试点B的变形特性，其余试点具有相

似的规律，不一赘述。

## 4 变形参数分析

### 4.1 泊松比 $\nu$

将岩体卸荷变形视为均质体的非线性弹性变形，满足如下本构方程<sup>[12]</sup>：

$$d\varepsilon_{ij} = \frac{1+\nu_t}{E_t} d\sigma_{ij} - \frac{\nu_t}{E_t} d\sigma_{kk} \delta_{ij} \quad (1)$$

式中： $d\sigma_{ij}$ ， $d\varepsilon_{ij}$ 分别为应力和应变张量的增量； $E_t$ ， $\nu_t$ 分别为岩体的切线弹性模量和切线泊松比，是应力不变量或应变不变量的状态函数。

将式(1)在 $\sigma_1$ 方向展开，可得增量型的广义虎克定律为

$$d\varepsilon_1 = \frac{1}{E_t} [d\sigma_1 - \nu_t (d\sigma_2 + d\sigma_3)] \quad (2)$$

图5，6分别为L1，L3型应力路径 $\varepsilon_1$ - $\varepsilon_3$ 关系曲线。

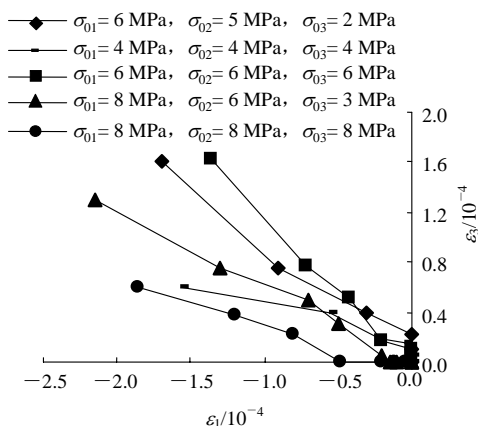


图5 L1型应力路径 $\varepsilon_1$ - $\varepsilon_3$ 关系曲线

Fig.5 Relation curves between  $\varepsilon_1$  and  $\varepsilon_3$  in path L1

由图5，6可见，荷载沿某一应力路径变化时， $\varepsilon_1$ - $\varepsilon_3$ 关系曲线大体呈直线，可对问题进行简化：假定 $\nu_t$ 在一次试验的应力变化过程中不发生变化，即 $\nu_t$ 与 $d\sigma_{ij}$ 无关， $\nu_t$ 相当于割线泊松比 $\nu_s$ ，以下简记为 $\nu$ 。又因试验过程中 $\sigma_2$ 恒定， $d\sigma_2=0$ ，则式(2)可化为

$$E_t = \frac{d(\sigma_1 - \nu\sigma_3)}{d\varepsilon_1} \quad (3)$$

同理，有

$$E_t = \frac{d(\sigma_3 - \nu\sigma_1)}{d\varepsilon_3} \quad (4)$$

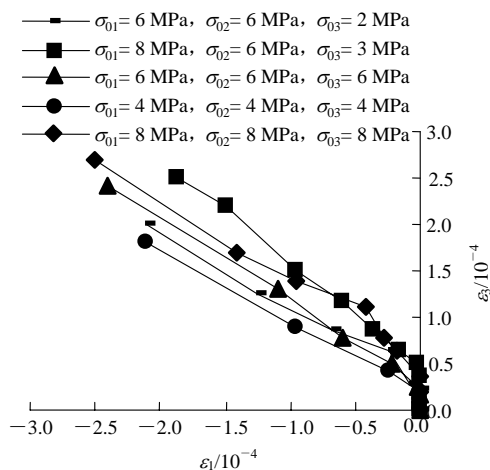


图6 L3型应力路径 $\varepsilon_1$ - $\varepsilon_3$ 关系曲线

Fig.6 Relation curves between  $\varepsilon_1$  and  $\varepsilon_3$  in path L3

由式(3)，(4)可得

$$\nu = \left( \frac{d\sigma_3}{d\sigma_1} - \frac{d\varepsilon_3}{d\varepsilon_1} \right) / \left( 1 - \frac{d\sigma_3}{d\sigma_1} \frac{d\varepsilon_3}{d\varepsilon_1} \right) \quad (5)$$

以下分析不同应力路径的泊松比 $\nu$ 。

在L1型应力路径下， $\sigma_3$ 不变， $d\sigma_3=0$ ，式(5)变为常规三轴试验求 $\nu$ 的公式：

$$\nu = - \frac{d\varepsilon_3}{d\varepsilon_1} \quad (6)$$

以最小二乘法按直线拟合图5中各次试验的 $(\varepsilon_1, \varepsilon_3)$ 点，各直线斜率的负值即为 $\nu$ ，其值为0.32~0.43。

在L2，L3型应力路径下， $\sigma_1$ 与 $\sigma_3$ 按 $\frac{d\sigma_3}{d\sigma_1} = -1$ 的规律变化，由式(3)，(4)可得

$$\frac{d\varepsilon_3}{d\varepsilon_1} = \left( \frac{d\sigma_3}{d\sigma_1} - \nu \right) / \left( 1 - \nu \frac{d\sigma_3}{d\sigma_1} \right) = -1$$

以最小二乘法按直线拟合图6中各次试验的 $(\varepsilon_1, \varepsilon_3)$ 点，各直线的斜率范围值为-0.91~-1.21，近似于理论值。

可见， $\frac{d\varepsilon_3}{d\varepsilon_1}$ 与 $\nu$ 无关，在L2，L3型应力路径下不能得到 $\nu$ 的试验值。

### 4.2 切线弹性模量 $E_t$

按式(3)求得 $E_t$ ，因式(3)中含有 $\nu$ 项，而L2，L3型应力路径下的 $\nu$ 值不能确定，试将 $\nu$ 设为常数，取L1型应力路径 $\nu$ 的平均值0.35为其值，分析 $\nu$ 的取值误差对 $E_t$ 的影响：

在 L1 型应力路径下,  $d\sigma_3 = 0$ , 于是式(3)可化为  $E_t = \frac{d\sigma_1}{d\varepsilon_1}$ ,  $E_t$  与  $\nu$  无关。

在 L2, L3 型应力路径下, 将  $E_t$  视为  $\nu$  的函数, 则  $E_t$  与  $\nu$  的相对误差比值即条件数<sup>[13]</sup>为

$$c_p = \left| \frac{\Delta E_t}{\Delta \nu} \right| = \left| \frac{\nu dE_t / d\nu}{E_t} \right| = \frac{\nu}{1-\nu} \quad (7)$$

将  $\nu = 0.35$  代入式(7), 可得  $c_p = 0.54$ , 误差可以接受, 以下分析  $E_t$  的变化规律时取  $\nu = 0.35$ 。

在 L2 型应力路径下,  $\varepsilon_1 - (\sigma_1 - \nu\sigma_3)$  关系大致呈直线(见图 4(b)),  $E_t$  在应力变化过程中基本不变, 相当于变形模量  $E_s$ 。按直线拟合, 所得直线的斜率即为  $E_t$ , 其范围值为 35.10~44.57 GPa, 平均值为 40.60 GPa。

L1, L3 型应力路径的  $\varepsilon_1 - (\sigma_1 - \nu\sigma_3)$  关系呈曲线(见图 4(a), 4(c)), 采用 2 次多项式拟合, 可得多个  $\varepsilon_1 - (\sigma_1 - \nu\sigma_3)$  关系式, 求其导函数, 可得相应的  $\varepsilon_1 - E_t$  关系式, 继而可得  $(\sigma_1 - \nu\sigma_3) - E_t$  映射关系。

由于  $(\sigma_1 - \nu\sigma_3)$  的初始值与  $E_t$  值无关, 为消除其影响, 设有效应力差为

$$\Delta\sigma' = (\sigma_1 - \nu\sigma_3) - \Delta\sigma_0 \quad (8)$$

式中:  $\Delta\sigma_0$  为图 4 中  $\varepsilon_1$  开始产生 ( $d\varepsilon_1 \neq 0$ ) 点的  $\sigma_1 - \nu\sigma_3$  值, 在 L2 型应力路径中,  $\Delta\sigma_0 = (\sigma_{01} - \nu\sigma_{03})$ , 在 L1, L3 型应力路径中, 还应包括克服裂隙内摩擦力所需应力差。

由  $(\sigma_1 - \nu\sigma_3) - E_t$  关系可得  $\Delta\sigma' - E_t$  映射关系(见图 7), 据此取 L1, L3 型应力路径的  $(\Delta\sigma', E_t)$  点。

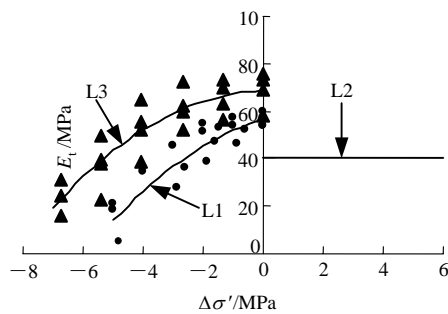


图 7 各应力路径  $\Delta\sigma'$  与  $E_t$  关系

Fig.7 Relationships between  $\Delta\sigma'$  and  $E_t$  under different stress paths

初始应力状态的  $(\Delta\sigma', E_t)$  点群集中, 说明初始应力状态的差异对  $E_t$  值的影响不明显。

分别对 L1, L3 型应力路径的  $(\Delta\sigma', E_t)$  点进行最小二乘法拟合, 可得  $\Delta\sigma' - E_t$  关系式分别为

$$E_t = (56.5 + 3.8\Delta\sigma' - 1.0\Delta\sigma'^2) \times 10^3$$

$$(-5 \text{ MPa} < \Delta\sigma' < 0 \text{ MPa}, \text{ L1 型} = \quad (9)$$

$$E_t = (68.5 + 0.2\Delta\sigma' - 0.1\Delta\sigma'^2) \times 10^3$$

$$(-7 \text{ MPa} < \Delta\sigma' < 0 \text{ MPa}, \text{ L3 型}) \quad (10)$$

在 L2 型应力路径中,  $E_t$  取平均值, 即  $E_t = 40.60$  GPa,  $0 \text{ MPa} < \Delta\sigma' < 6 \text{ MPa}$ 。

可见,  $E_t$  具有以下变化规律:

(1) 在 L1, L3 型应力路径下,  $E_t$  随  $\Delta\sigma'$  (负值) 的减小而加速减小; 在 L2 型应力路径下,  $E_t$  值稳定, 不随  $\Delta\sigma'$  而变化。

(2)  $\Delta\sigma'$  相同时, L3 型应力路径下的  $E_t$  值比 L1 型应力路径下的大。

(3) 卸荷起始段的  $E_t$  值比加载时的大, 但在 L1 型应力路径下, 当  $\Delta\sigma' < -2.6 \text{ MPa}$  时, 卸载  $E_t$  值小于加载  $E_t$  值; 在 L3 应力路径下, 当  $\Delta\sigma' < -5.2 \text{ MPa}$  时, 卸载  $E_t$  值小于加载  $E_t$  值。

(4) L2, L3 型应力路径皆为一个主应力增加、另一个主应力同时减小。在 L2 型应力路径下,  $\sigma_1$  方向为加载方向; 在 L3 型应力路径下,  $\sigma_1$  方向为卸载方向;  $\sigma_1$  方向的  $E_t$  在此两种应力路径下表现出不同的变化规律。此现象也可理解为岩体在一个主应力增加、另一个主应力同时减小的应力路径下, 其  $E_t$  在加、卸载方向具有不同的变化规律, 即具有各向异性。此种各向异性的原因为应力变化的各向异性, 而非岩体本身结构的各向异性, 如结构面的定向分布<sup>[6, 8]</sup>。

## 5 结 论

因原位岩体试验条件的限制, 本试验的试点数量较少, 试件性状不均, 具各向异性, 对试验成果进行分析、处理时, 只能作某些简化: 忽略反复加、卸载引起的残余变形对岩体弹性模量的影响、假定泊松比  $\nu$  为常数、通过同一方向的弹性模量在不同路径下的变化规律反映岩体在复杂应力路径下的方向性。尽管如此, 试验成果仍反映了岩体在复杂应力路径下的基本变形特性, 由此可得出:

(1) 在一个主应力减小(卸荷)、另一个主应力增加(加载)的应力路径下, 岩体变形具有各向异性和非线性, 即加载方向的弹性模量基本保持稳定, 卸荷方向的弹性模量随有效主应力差(负值)的减小而加速减小。

(2) 有效主应力差相同时, 在卸荷方向, 一个主应力减小、另一个主应力增加路径下的弹性模量比一个主应力减小、另二个主应力不变的应力路径下的弹性模量大。

### 参考文献(References):

- [1] 沈明荣, 石振明, 张雷. 不同加载路径对岩石变形特性的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(8): 1 234 - 1 238.(Shen Mingrong, Shi Zhenming, Zhang Lei. Deformation properties of samples under different loading paths[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(8): 1 234 - 1 238.(in Chinese))
- [2] 高春玉, 徐进, 何鹏, 等. 大理岩加卸载力学特性的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(3): 456 - 460.(Gao Chunyu, Xu Jin, He Peng, et al. Study on mechanical properties of marble under loading and unloading conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(3): 456 - 460.(in Chinese))
- [3] 尤明庆, 华安增. 应力路径对岩样强度和变形特性的影响[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(5): 101 - 104.(You Mingqing, Hua Anzeng. Effect of stress path on strength and deformation of specimen[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(5): 101 - 104.(in Chinese))
- [4] 尤明庆, 苏承东, 徐涛. 岩石试样的加卸载过程及弹性模量[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(5): 588 - 592.(You Mingqing, Su Chengdong, Xu Tao. Loading-unloading process in axial direction and Young's modulus of rock specimen[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(5): 588 - 592.(in Chinese))
- [5] 谢红强, 何江达, 徐进. 岩石加卸载变形特性及力学参数试验研究[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(3): 336 - 338.(Xie Hongqiang, He Jiangda, Xu Jin. Deformation characteristics of rock under loading and unloading conditions and experimental study of mechanical parameters[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(3): 336 - 338.(in Chinese))
- [6] 吴刚, 孙钧. 卸荷应力状态下裂隙岩体的变形和强度特性[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(6): 615 - 621.(Wu Gang, Sun Jun. Deformation and strength characteristics of rock mass under unloading conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(6): 615 - 621.(in Chinese))
- [7] 李建林, 王乐华. 卸荷岩体的尺寸效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(12): 2 032 - 2 036.(Li Jianlin, Wang Lehua. Study on size effect of unloaded rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(12): 2 032 - 2 036.(in Chinese))
- [8] 李建林, 孟庆义. 卸荷岩体的各向异性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(3): 338 - 341.(Li Jianlin, Meng Qingyi. Anisotropic study of unloaded rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(3): 338 - 341.(in Chinese))
- [9] 杨学堂, 哈秋龄, 高希章, 等. 厚层软岩与硬岩互层岩体高边坡卸荷变形与支护研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(16): 2 681 - 2 686.(Yang Xuetao, Ha Qiuling, Gao Xizhang, et al. Research on unloading deformation and support of high slope of thick soft rock interlaced with hard rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(16): 2 681 - 2 686.(in Chinese))
- [10] 李建林. 卸荷岩体力学理论与应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.(Li Jianlin. Theory and Application of Rock Mass Mechanics under Unloading Conditions[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1999.(in Chinese))
- [11] 周火明, 熊诗湖, 杨祖华, 等. 三峡永久船闸边坡卸荷岩体力学性质现场试验报告[R]. 武汉: 长江科学院, 1997.(Zhou Huoming, Xiong Shihu, Yang Zuhua, et al. In-situ mechanical test on unloaded rock mass of permanent ship lock slopes of TGP[R]. Wuhan: Yangtze River Scientific Research Institute, 1997.(in Chinese))
- [12] 周维垣. 高等岩石力学[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990.(Zhou Weiyuan. Advanced Rock Mechanics[M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1990.(in Chinese))
- [13] 李庆扬, 王能超, 易大义. 数值分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.(Li Qingyang, Wang Nengchao, Yi Dayi. Numerical Analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001.(in Chinese))