

文章编号: 1000—7598—(2006) 08—1277—06

卸荷路径下棱柱状结构体试件破损过程试验研究

刘恩龙, 沈珠江

(清华大学 水利水电工程系, 北京 100084)

摘 要: 通过棱柱状结构体在不同排列方式下的平面应变压缩试验, 研究了侧向应力卸载状态下结构体的破损过程, 探讨了结构性岩土材料在卸侧向应力状态下的变形和破损机理。试验发现, 在侧向应力卸载的过程中, 棱柱状结构体会发生错动和结构体的破碎, 结构体的破损方式主要有劈裂破坏和剪切开裂两种。结构体试样逐渐破损, 宏观上出现应变硬化或应变软化现象, 最后形成宏观的破损带。试件的总体体积是收缩的, 侧向变形则由收缩逐渐转化为膨胀。

关 键 词: 卸荷状态; 棱柱状结构体; 平面应变压缩试验; 破损过程; 破损带

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Experimental study on breaking process of prism-like structural bodies under unloading conditions

LIU En-long, SHEN Zhu-jiang

(Department of Hydraulic and Hydropower Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In order to explain the failure and breakage mechanisms of structural geological materials, the plane strain compression tests of the samples of prism-like structural bodies assembled in three patterns are conducted under unloading conditions. In the process of reducing the lateral stress, it is found experimentally that the structural bodies will be broken after some relative movement and the main failure modes of structural bodies are splitting and shear failure; while the samples assembling of prism-like structural bodies are broken gradually, the strain hardening or strain softening can be observed and breakage bands are macroscopically formed in the end; the volume strain of the samples is always contractive but the lateral contractive strain turns to be the lateral extensive gradually.

Key words: unloading conditions; prism-like structural bodies; plane strain compression tests; breaking process; breakage bands

1 引 言

岩土材料是天然形成的, 具有不同于其他材料的性质: 结构性、天然性和各向异性^[1]。岩土体的变形破坏与其受荷状态和赋存环境有密切的关系。就受荷方式而言, 加荷与卸荷均可以引起岩土体的变形和破坏, 应力路径不同, 导致岩土体的变形和破坏过程也不同。基础工程^[2, 3]开挖时为卸荷, 建筑物建成后转为加荷; 边坡工程主要为卸荷; 地下工程中二次应力场中切向应力为加荷、径向应力为卸荷。鉴于岩土体卸荷变形破坏的重要性, 有必要对岩土体在卸荷应力路径下的变形破坏过程进行研究。

国内外学者^[4, 5]对岩土体在加荷条件下的变形

破坏特性做了大量的研究工作, 取得了一定的成果, 建立了相应的试验和理论分析方法。但是, 有关岩土体在卸荷状态下的变形和破坏机理的研究, 由于问题的复杂性, 目前尚处于初级阶段。陈颀等^[6]利用常规三轴仪进行了 3 种应力路径下岩石的破坏试验研究, 结果表明, 岩石强度与体积膨胀及应力路径有关。吴刚^[7]在岩体加、卸荷试验研究的基础上, 从应力-应变关系、强度特性、声发射及破坏特征等方面, 对岩体的破坏特性进行对比分析。刘国彬等^[8]进行了软土的室内应力路径试验, 研究表明: 软土的卸荷模量不仅取决于土的物理性质, 而且还和所经历的应力路径密切相关。张于龙^[9]进行了平面应变条件下膨胀土等主应力比卸荷试验研究, 结

收稿日期: 2004-10-30 修改稿收到日期: 2005-06-07

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 10272062)。

作者简介: 刘恩龙, 男, 1976 年生, 博士, 主要从事岩石和土材料的基本特性和数学模型方面的研究。E-mail: le102@mails.tsinghua.edu.cn

果表明:土体的应力-应变关系呈双曲线型,具有明显的非线性性状。潘林有等^[10]通过大量的室内抗剪强度卸荷试验,探讨了黏性土在卸荷状态下强度变化规律及估算卸荷影响区的范围和影响区内强度的衰减规律。

结构性岩土材料^[11, 12]可以抽象成由胶结强的结构体(胶结块)和无胶结的破碎体(碎化胞)组成的二元介质,变形过程中结构体逐步破损,并向破碎体转化,结构性岩土材料划分为碎裂结构、散块结构、包络结构和悬浮结构^[13]。已经对棒状结构体进行了卸载侧向应力状态的平面应变试验^[14],对结构性岩土材料在卸荷应力路径下的变形破损过程有了初步的认识。本文通过棱柱状结构体在平面内竖向应力保持不变而侧向应力逐渐减小的平面应变试验,进一步探讨了结构性岩土材料在卸荷应力路径下的变形破损过程,并进一步研究在卸荷过程中结构体是如何破损的和如何向破碎体转化的。

2 试验叙述

2.1 试验设备

试验设备如图 1 所示。该设备利用高压三轴的加荷系统进行竖向加荷,利用高压气体施加侧压,用刚性的透明玻璃板固定另一方向,可以进行平行于玻璃板方向的平面应变试验。试样室宽 10 cm,高 20 cm,厚 3 cm。在玻璃板法向用数码相机进行拍照,记录试样的破损过程。

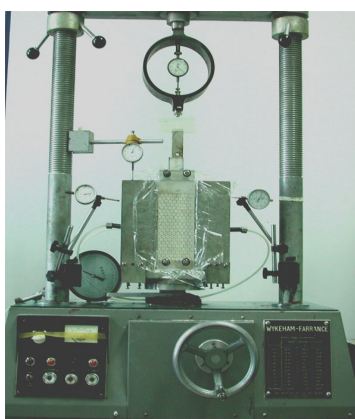


图 1 平面应变试验设备

Fig.1 The apparatus of plane strain test

2.2 试验方法

试验所用材料为棱柱状石膏试块,尺寸为 1 cm × 1 cm × 3 cm,石膏和水的质量比为 1: 1,试样制成后放在室内风干,密度为 0.92 g/cm³,单轴无侧

限抗压强度 σ_c 为 2.1 MPa,抗拉强度 σ_t 为 0.525 MPa。排列方式如图 2 中的 3 种方式,一次试验需用 200 根左右试样。竖向加荷系统为应变控制式,加荷速率为 1.25 mm/min,侧向用手工控制气压加荷。试验过程中,开始时按照一定的比值施加竖向压力和侧向压力;然后,侧向压力保持恒定,并增加竖向压力;最后,竖向压力维持不变而减小侧向压力,直到试样破坏。应力路径如图 3 中 $O \rightarrow A$, $A \rightarrow B$, $B \rightarrow C$ 所示。每种排列方式进行 3 组试验,总共进行 9 组试验,见表 1。在试验过程中量测竖向位移和侧向位移,并用数码相机对破损过程进行拍照跟踪。试样分别用 La1, La2, La3, Lb1, Lb2, Lb3, Lc1, Lc2, Lc3 表示,其中 a, b, c 代表排列方式。施加的恒定(最大)竖向应力和最大的侧向应力见表 1。下文 σ_1 , ε_1 分别为竖向应力和竖向应变; σ_3 , ε_3 分别为平面内的侧向应力和侧向应变。

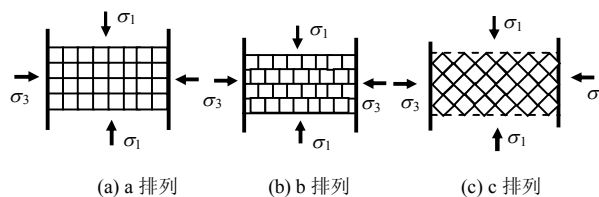


图 2 排列方式

Fig.2 The pattern of arrangement

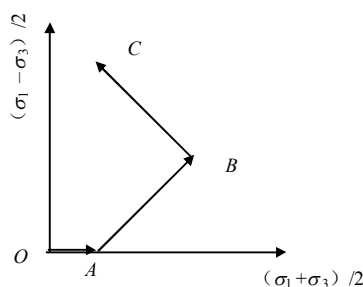


图 3 应力路径

Fig.3 Stress path

表 1 应力状态(B 点应力状态)

Table 1 Stress conditions (stress conditions of B point)

参数	La1	La2	La3	Lb1	Lb2	Lb3	Lc1	Lc2	Lc3
σ_1 / MPa	3.29	3.92	4.48	3.962	4.2	4.48	3.5	3.92	4.48
σ_3 / MPa	0.66	0.6	0.6	0.63	0.69	0.6	0.66	0.63	0.69

3 试验结果

3.1 卸荷破损过程

图 4~6 分别为棱柱状结构体试件在 a, b, c 排列方式下卸载侧向应力时的破损发展过程。

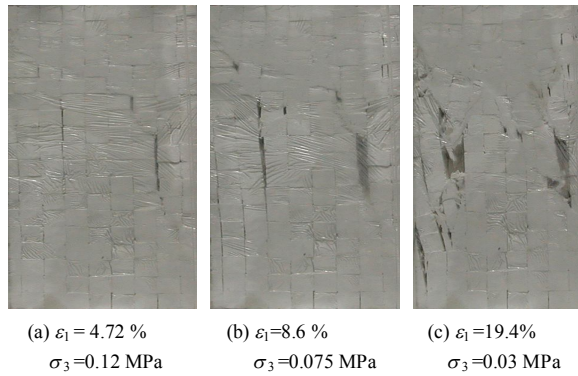


图 4 La1 卸荷破坏过程 $\sigma_1=3.29$ MPa
Fig.4 Breaking process of La1 ($\sigma_1=3.29$ MPa)

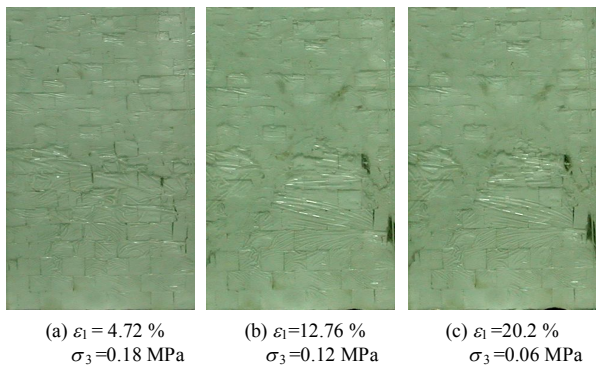


图 5 Lb2 卸荷破坏过程 $\sigma_1=4.20$ MPa
Fig.5 Breaking process of Lb2 ($\sigma_1=4.20$ MPa)

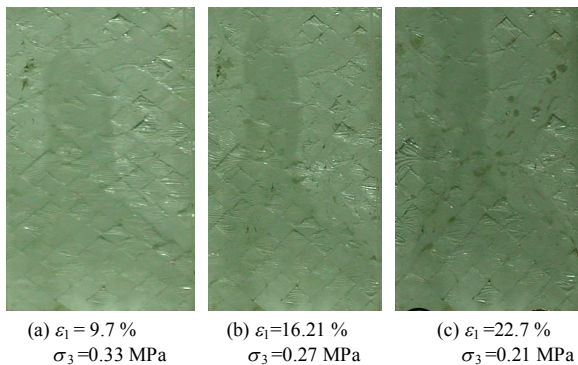


图 6 Lc2 卸荷破坏过程 $\sigma_1=3.92$ MPa
Fig.6 Breaking process of Lc2 ($\sigma_1=3.92$ MPa)

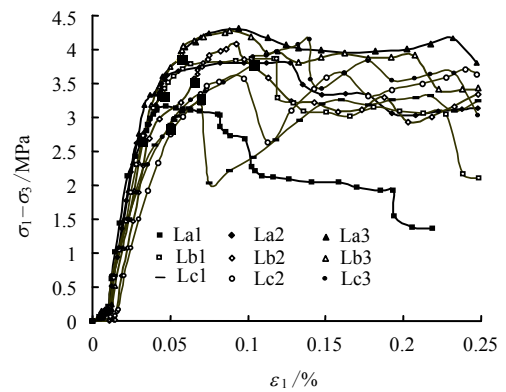
从图中可以观察到在侧向应力卸载较少时, 结构体间缝隙闭合、结构体互相靠拢, 个别结构体开裂, 随后侧向应力再减小时, 结构体错动并进一步开裂, 部分结构体间的孔隙增大发生剪胀现象, 最后侧向应力减小到最小 (有时到 0 MPa), 形成破损带。3 种排列方式 a, b, c 下的破坏过程稍有不同, a 排列方式下局部结构体会发生整体屈曲并形成大的孔隙, 而 b 排列方式下结构体剪切破坏的较多, c 排列方式下易发生沿着结构体缝隙的错动。不过 a, b, c 这 3 种排列方式下, 最终都形成了破损带, 主要为剪切型的, 其破坏面大体上符合 Mohr-Coulom

条件, 破坏面与 σ_1 作用面成 $45^\circ + \varphi/2$, c 排列方式最明显。

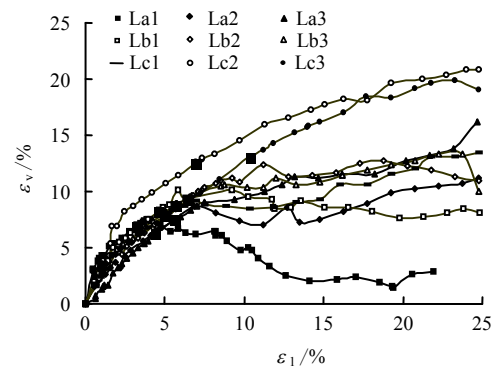
3.2 应力-应变关系及体变

由于卸侧向应力的过程中会出现应变局部化 (形成卸荷带) 现象, 所以此处的应力、应变指试件总体的平均应力和平均应变。图 7 分别为不同排列方式下的应力-应变关系和体变关系, 且图中■为卸荷开始点。从图中可以观察出以下几点规律:

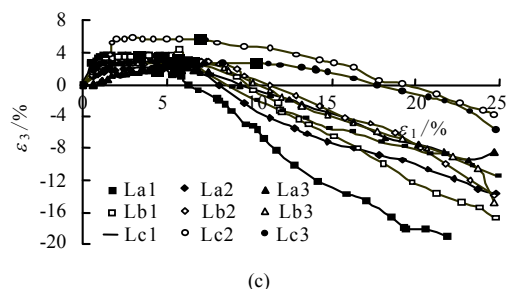
(1) 不同的排列方式在加荷后卸侧向应力的过程中, 结构体试样表现出了相似的 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 与 ε_1 关系曲线。卸侧向应力后, 软化现象和硬化现象都有发生; 在相同的最大侧向应力卸荷时, 卸荷过程中恒定的竖向应力越大, 硬化现象越明显; 相反, 恒定的竖向应力越小, 软化现象越明显。



(a)



(b)



(c)

图 7 应力-应变关系
Fig.7 Stress-strain curves

(2) 在相同的最大侧向应力卸荷过程中, a, b, c 三种排列方式的屈服强度相比, c 排列方式的屈服强度最低, a, b 排列方式的屈服强度相差不大。

(3) 卸载侧向应力的过程中, 试件的体积总体在收缩, 但是个别试样会有局部的剪胀出现。

(4) 卸侧向应力以前, 侧向一直在收缩, 卸侧向应力以后, 侧向则由收缩转化为膨胀, 一直持续到试样破坏 (图中以压缩为正)。

4 卸荷破损过程分析

4.1 卸荷过程变形机理

卸侧向应力的过程中, 对于棒状结构体^[14]试样, 试验过程中发现了结构体的滑移、转动 (或滚动) 及破碎; 而对于棱柱状结构体试样, 卸侧向应力的试验过程中发现: 结构体试件的破损变形以结构体的相互错动和结构体的破损为主, 结构体间的转动仅在破损带上发生, 且转动伴随着破碎发生。如图 8 为试样卸荷破坏后的状态图。轴向加荷阶段, 结构体间缝隙闭合、互相挤密, 结构体没有转动发生。由于侧向应力和竖向应力都比较大, 侧向收缩, 试件总体呈现体积收缩, 个别结构体开裂。卸侧向应力后, 起初侧向应力降低不大, 结构体间继续挤密、错动, 侧向继续收缩, 试件表现为剪缩、结构体开裂、局部剪坏或压碎。继续卸侧向应力时, 处于破损带上的部分结构体发生转动, 结构体间出现部分孔隙增大, 侧向开始膨胀, 结构体开裂增多、局部剪坏和压碎增多, 试样局部发生剪胀现象。随后侧向应力的继续减小, 结构体进一步破损, 宏观上出现应变硬化和应变软化现象, 最后试样形成宏观的破损带。排列方式对卸侧向应力的过程中结构体的破损有一定的影响, a 排列在卸载侧向应力的过程中结构体试样中易出现局部的整体屈曲; c 排列最易形成宏观的剪切带, 且强度最低; a, b 排列的结构体试样的强度相差不明显。

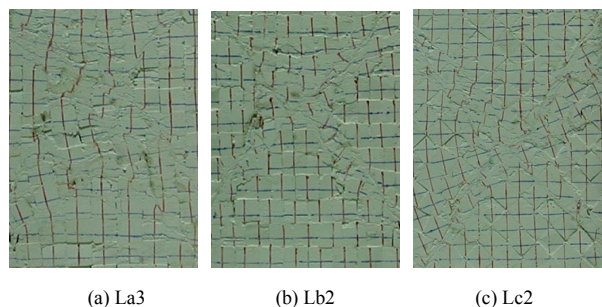


图 8 卸荷滑移、转动及破碎
Fig.8 Sliding, rotation and crushing under unloading conditions

4.2 卸荷破损带形成机理

(1) 卸荷结构体破损过程分析

图 9 为结构体的逐步破损形式; 图 10 为结构体的破损示意图, 图中细虚线为结构体受荷后的形状, 粗虚线为可能发生破坏的部位。其中图 9(a) 为开始卸侧向应力时的状态, 结构体的整体发生体积收缩, 相应的示意图为图 10(a); 图 9(b)、图 9(c) 为卸侧向应力过程中的中间破损状态, 结构体的体积进一步收缩, 同时又发生了劈裂 (拉伸) 破坏, 其相应的示意图为图 10(b)、图 10(c), 图 9(d)、图 9(e) 对应 c 排列方式。图 11 对结构体卸侧向应力时的破裂进行解释。结构体间的相互作用力是非常复杂的, 为了考虑问题的主要方面, 没有画出剪应力的影响。由于天然的岩土体是处于损伤状态的, 内部分布着微裂纹、微孔隙, 而所用的石膏材料内部同样分布着微空洞和裂纹, 所以可用损伤力学概念^[15]进行解释结构体的破损形式。由细观损伤力学的思想, 假设在结构体内部取出一个只包括一条裂纹的微单元, 如图 11(a) 所示, 该椭圆裂纹的变形相对于微单元本身来说是更高一阶小量, 故此微单元的损伤应力状态, 可以看成含有椭圆形裂纹的无限体在无穷远处受力的力学模型, 如图 11(b)、图 11(c) 所示。由于结构体的抗压强度比抗拉强度大得多, 可见应考虑 A 点沿短轴方向的应力、B 点沿长轴方向的应力。对于图 11(b), 可得到其最大应力分别为

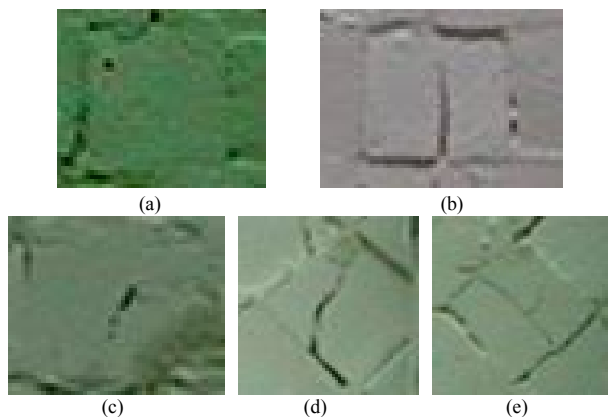


图 9 破裂方式
Fig.9 Cracking modes

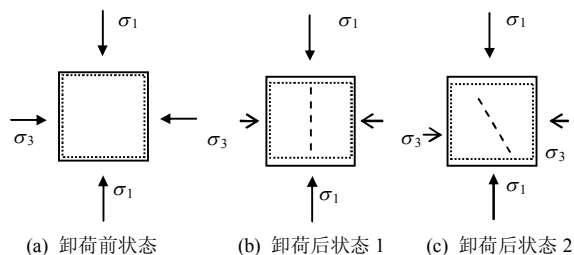


图 10 破损示意图
Fig.10 The schematic of breakage

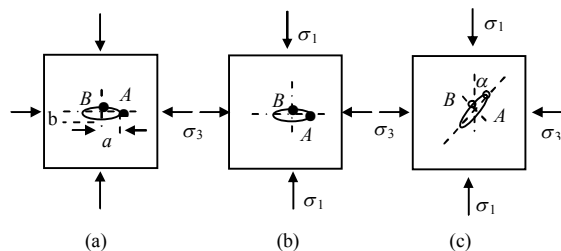


图 11 微单元体力学模型 (压为正)

Fig.11 The mechanical model of a micro-element body

$$\sigma_T^A = (1 + 2a/b)\sigma_1 - \sigma_3 \quad (1)$$

$$\sigma_T^B = -\sigma_1 + (1 + 2b/a)\sigma_3 \quad (2)$$

式中 下标 T 代表切向, 由于开始卸侧向应力时 σ_3 很大, 且只要满足 $\sigma_1 \leq (1 + 2b/a)\sigma_3$, A 点沿短轴方向受压, B 点沿长轴方向也受压, 则结构体不会开裂, 只会出现体积收缩。随着 σ_3 的减小, 当 $\sigma_1 \geq (1 + 2b/a)\sigma_3$ 时, B 点沿长轴方向变为受拉, 达到结构体的抗拉图 8(b)所示的劈裂破坏。对于图 11(c)所示的椭圆裂纹的轴线倾斜的情况, 设 α 为大主应力方向与椭圆裂纹长轴的夹角, 则 A, B 点的最大应力分别为^[16]

$$\sigma_T^A = \frac{a - (a+b)\cos 2\alpha}{b}\sigma_1 + \frac{a + (a+b)\cos 2\alpha}{b}\sigma_3 \quad (3)$$

$$\sigma_T^B = \frac{b + (a+b)\cos 2\alpha}{a}\sigma_1 + \frac{b - (a+b)\cos 2\alpha}{a}\sigma_3 \quad (4)$$

开始卸侧向应力时 σ_3 很大, 可见 A 点沿短轴方向受压, B 点沿长轴方向也受压, 结构体不会开裂, 只会体积收缩; 随着 σ_3 的减小, 比如 σ_3 减小到 0, 由于 b 远大于 a , 可见 $0 \leq \alpha \leq \pi/2$ 时, A 点沿短轴方向受压; 当 $0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2}\left(\arccos \frac{b}{a+b}\right)$ 时, B 点沿长轴方向受压; $\frac{\pi}{2} - \frac{1}{2}\left(\arccos \frac{b}{a+b}\right) \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}$ 时, B 点沿长轴方向受拉, 可知当 $\alpha = 45^\circ + \varphi/2$ 时, 便会发生图 9(c)所示的剪裂破坏。对于 c 排列方式的图 9(d)、图 9(e)的解释同上。

(2) 卸荷破损带的形成

试验过程中发现, 不同的排列方式下, 棱柱状结构体试件在卸侧向应力的过程中都表现出了结构体破损和破损带的形成。棱柱状结构体是依靠凝聚力胶结起来的, 当结构体从一定的应力状态卸侧向

荷载时, 结构体破裂并扩展, 逐渐转化为碎化胞, 碎化胞增多, 溶合形成另一种依靠摩擦力来抵抗外部作用的破损带。卸侧向应力初期, 结构体间挤密、体积收缩, 很少有结构体开裂, 试件的变形主要是结构体间的错动和结构体的收缩, 这时总体试件的承载能力主要由结构体本身和结构体间的摩擦力提供。随着侧向应力的逐步卸载, 结构体体积进一步收缩, 结构体劈裂破坏和剪切开裂增多, 逐步形成宏观的破损带, 这时总体试件的承载能力主要由破损带的摩擦力和部分结构体提供。

5 结 论

(1) 通过平面应变压缩试验, 再现了棱柱状结构体试件在卸载侧向应力过程中结构体逐步开裂破损, 并逐渐形成破损带的过程。

(2) 起初棱柱状结构体试件在卸载侧向应力的过程中, 结构体间挤密、结构体互相靠拢, 侧向收缩, 试件表现为剪缩, 结构体很少开裂; 随后, 部分结构体的体积进一步收缩, 侧向开始膨胀, 结构体开裂、局裂, 试样局部发生剪胀现象; 最后, 结构体逐渐破损, 宏观上出现应变硬化和应变软化现象, 试样形成宏观的破损带。

(3) 卸侧向应力的过程中, 试件的体积总体在收缩, 但是个别试样会有局部的剪胀出现; 卸侧向应力以前, 侧向一直在收缩, 卸侧向应力以后, 侧向则由收缩转化为膨胀, 一直持续到试样破坏。

(4) 排列方式对卸载侧向应力过程中结构体的破损有一定的影响, a 排列在卸侧向应力的过程中结构体试样中易出现局部的整体屈曲, c 排列最易形成宏观的剪切带, 且强度最低, a, b 排列的结构体试样的强度相差不明显。

参 考 文 献

- [1] 沈珠江. 从学步走向自立的岩土力学[J]. 岩土工程界, 2003, (12): 15-17.
SHEN Zhu-jiang. The geomechanics from infancy to mature[J]. *Geotechnical Engineering World*, 2003, 6(12): 15-17.
- [2] 哈秋龄. 岩石边坡工程与卸荷非线性岩石(体)力学[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(4): 386-391.
HA Qiu-ling. Rock slope engineering and unloading nonlinear rockmass mechanics[J]. *Chinese Journal of*

- Rock Mechanics and Engineering**, 1997, 16(4): 386—391.
- [3] 哈秋龄. 加载岩体力学与卸荷岩体力学[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(1): 114.
- HA Qiu-ling. Loading rock mechanics and unloading rock mechanics[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1998, 20(3): 114.
- [4] 沈珠江. 理论土力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000.
- [5] 周维垣. 高等岩石力学[M]. 北京: 水利水电出版社, 1990.
- [6] 陈颀, 姚孝新, 耿乃光. 应力途径、岩石的强度和体积膨胀[J]. 中国科学, 1979, (11): 1 093—1 100.
- CHEN Yu, YAO Xiao-xin, GENG Nai-guang. Strsee path, rock strength and volume dilatancy[J]. **Science in China**, 1979, (11): 1 093—1 100.
- [7] 吴刚. 岩体在加、卸荷条件下破坏效应的对比分析[J]. 岩土力学, 1997, 18(2): 13—16.
- WU Gang. Comparison of failure effect of rock mass under loading and unloading conditions[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1997, 18(2): 13—16.
- [8] 刘国彬, 侯学渊. 软土的卸荷模量[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(6): 18—23.
- LIU Guo-bin, HOU Xue-yuan. Unloding modulus of the shanghai soft clay[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1996, 18(6): 18—23.
- [9] 张于龙. 平面应变条件下等主应力比卸荷试验研究[J]. 工程勘察, 1997(2): 8—10.
- ZHANG Yu-long. Experimental research on expansive soil under unloading plane strain conditions with equivalent stress ratio[J]. **Geotechnical Inveatigation & Surveying**, 1997, (2): 8—10.
- [10] 潘林有, 程玉梅, 胡中雄. 卸荷状态下黏性土强度特性试验研究[J]. 岩土力学, 2001, 22(4): 490—493.
- PAN You-lin, CHENG Yu-mei, HU Zhong-xiong. Experimental study on the shear strength of clay under unloading conditions[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2001, 22(4): 490—493.
- [11] Z J Shen. Binary medium modeling of geological material[A]. **International Conference of Heterogeneous Materials Mechanics**[C]. Chongqing: [s.n.], 2004. 581—584.
- [12] 沈珠江. 岩土破损力学: 理想脆弹塑性模型[J]. 岩土工程学报, 2003, (3): 253—257.
- SHEN Zhu-jiang. Breakage mechanics for geological materials: and ideal brittle-elastic-plastic model[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2003, 25(3): 253—257.
- [13] 沈珠江, 陈铁林. 岩土破损力学: 结构类型与荷载分担[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 25(13): 2 137—2 142.
- SHEN Zhu-jiang, CHEN Tie-lin. Breakage mechanics of geological materials - structural type and load sharing[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 25(13): 2 137—2 142.
- [14] 刘恩龙, 沈珠江. 卸荷应力状态下棒状结构体试件破损过程的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(18): 3 386—3 392.
- LIU En-long, SHEN Zhu-jiang. Experimental study on breaking process of bar-like structural bodies under unloading conditions[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(18): 3 386—3 392.
- [15] 谢和平. 岩石材料损伤的局部拉破坏[J]. 岩石力学与工程学报, 1988, 7(2): 147—154.
- XIE He-ping. The local extension failure of damaged rock materials[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1988, 7(2): 147—154.
- [16] 范天佑. 断裂理论基础[M]. 北京: 科学出版社, 2003.