# 土的卸载体缩的试验研究及其机理探讨

# Experimental research on volume-contraction of soil under unloading and examination of its mechanism

李广信, 武世锋
(清华大学 水利水电工程系, 北京　100084)

**摘　要**: 在土的三轴试验中卸载体缩现象普遍存在。卸载体缩随着围压的增加呈下降趋势。不同土和同样土在不同密度下卸载体缩的现象和原因不同。密砂的卸载体缩是剪胀可恢复的宏观体现。松砂的卸载体缩则分为两种, 一种是塑性体缩的组成部分, 在加载初期出现; 另一种则是剪胀可恢复部分, 随着剪应力的提高而出现。对于粘土, 卸载体缩完全是塑性体缩, 表明粘土的结构性随着加卸载过程而遭到破坏。

**关键词**: 三轴试验; 卸载体缩; 围压; 密度
**中图分类号**: TU 411.5　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000- 4548(2002)01- 0047- 04

**作者简介**: 李广信(1941- ), 男, 黑龙江人, 工学博士, 清华大学水利水电工程系, 教授, 博士生导师。

LI Guang-xin, WU Shi-feng
(Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract**: The phenomenon of volume-contraction in unloading is very common in the triaxial tests of soils. The magnitude of volume-contraction declines when the confining pressure increases. Different densities of sands result in different volume-contraction in unloading. To the dense sand, the reversibility of part of dilatation is the main reason of the volume contraction. To the loose sand, the volume-contraction can be classified into two kinds—one appears at the initial stage of tests as a part of the plastic contraction and the other appears with the increasing shearing stress as the reversible part of dilatation. To clay, the volume-contraction is totally resulted by plastic contraction, which indicates that the structure of soils destroyed with the loading-unloading process.

**Key words**: triaxial test; volume-contraction in unloading; confining pressure; density of sand

## 1　前　　言*

作为一种特殊的现象, 土在各种剪切试验中表现出来的卸载体缩已经引起了一些研究者的注意。许多试验者在试验中注意到了这种现象, 但用经典弹性和弹塑性理论都无法反映。可是作为一种普遍现象, 对其进行合理的解释是土力学需要解决的问题之一。另外, 这一问题也有实际意义, 比如饱和砂土在循环加载和振动荷载作用下的超静孔隙水压力问题是与此直接相关的。

截至目前, 对这一现象进行讨论的文章还不多。1980 年本文第一作者指出这种卸载体缩是"弹性剪缩"引起的[1]。1994 年矫德全和陈愈炯撰文解释其源于土的各向异性[2]。1997 年社本(Shamoto)和张建民[3], 2000 年张建民通过试验表明剪胀的可逆性[4]。2000 年本文第一作者与郭瑞平撰文对这一问题进行了讨论[5], 认为卸载体缩是源于剪胀变形的可恢复性, 它与应力路径和边界条件有关, 同时表现出各向异性。沈珠江在其《理论土力学》一书中也讨论了这种"反向剪缩"问题[6]。本文是基于上述文章, 根据现有试验资料, 对土的卸载体缩微观机理的进一步讨论。

## 2　常规三轴压缩试验及其结果

(1) 砂土的试验结果

用承德砂进行不同密度, 不同围压的三轴多次卸载试验。这种天然砂土的物理性质指标为: 平均粒径 $d_{50}$= 0.18 mm, 不均匀系数 $C_u$= 2.8, 颗粒比重 $G_S$= 2.63, 最大孔隙比 $e_{max}$= 0.79, 最小孔隙比 $e_{min}$= 0.4。

试验时砂的密度及其相对密度列于表 1。图 1 为松砂和密砂的试验体应变与轴应变关系曲线, 以体缩为正。左右两图分别为松砂和密砂的结果。

**表 1　承德砂三轴试验的围压和密度**

Table 1　The confining pressure and dry density of Chengde sand in triaxial tests

| 围压 /kPa | 较松砂 | | 密砂 | |
|---|---|---|---|---|
| | 干密度 /(g·cm$^{-3}$) | 相对密度 | 干密度 /(g·cm$^{-3}$) | 相对密度 |
| 100 | 1.619 | 0.41 | 1.873 | 0.96 |
| 300 | 1.607 | 0.38 | 1.871 | 0.96 |
| 500 | 1.612 | 0.40 | 1.881 | 0.98 |

* **基金项目**: 国家自然科学基金项目(59879008)
**收稿日期**: 2001- 04- 02

表 2 白河堡粉质粘土性质

Table 2 Properties of Baihebao silty clay

| 比重 | 最优含水率 /% | 最大干密度 /(g•cm$^{-3}$) | 液限 /% | 塑限 /% | 塑性指数 /% | 压缩系数 /MPa$^{-1}$ | 渗透系数 /(cm•s$^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2.71 | 17 | 1.7 | 32 | 17.1 | 14.9 | 0.17 | $2.6\times10^{-7}$ |

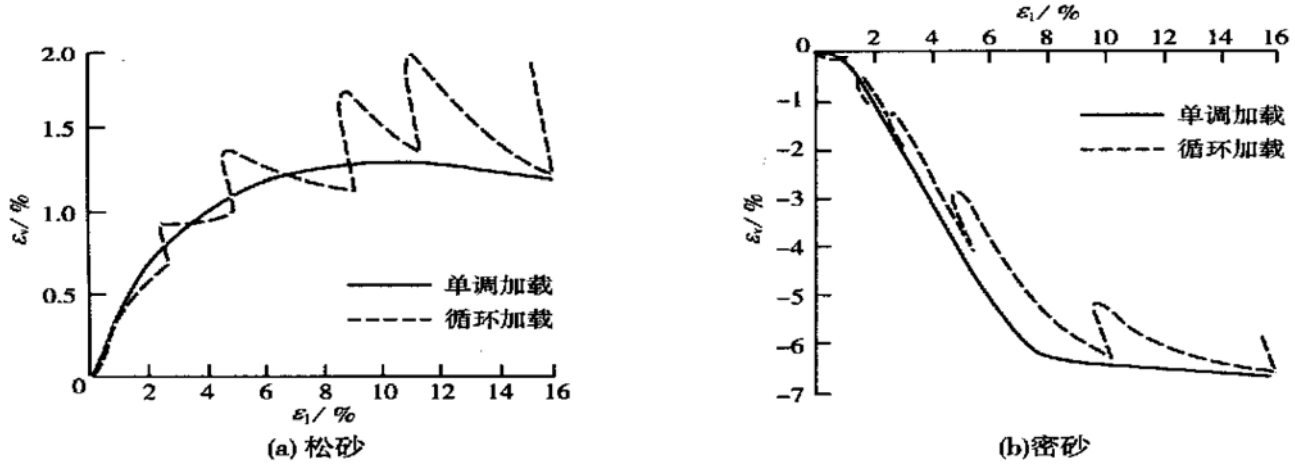


图 1 $\sigma_3$= 100 kPa 砂土的循环加载与单调加载体变比较

Fig. 1 Volumetric strain of Chengde sand under montonous and cyclic loading

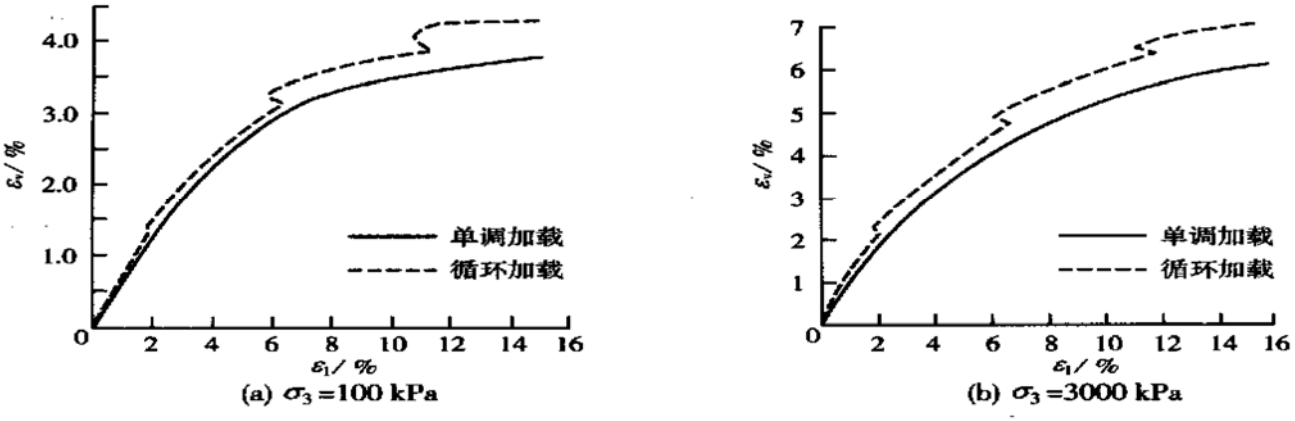


图 2 白河堡粘土循环加载与单调加载试验结果比较

Fig. 2 Volumetric strain of Baihebao clay under monotonous and cyclic loading

(2) 粉质粘土的试验结果

白河堡粉质粘土的性质见表 2。用它进行了不同围压下的三轴循环加载试验与单调加载试验。试验结果如图 2 所示。

## 3 试验结果分析

从试验结果中可以得出如下规律:

(1) 卸载体缩的现象是普遍存在的。密砂表现为加载剪胀和卸载体缩现象。对于松砂, 加载初期产生体缩, 卸载时仍表现为体缩, 再加载时又体缩; 当偏应力较大时, 表现与密砂相似。粘土则在加载– 卸载– 再加载过程中始终是体积收缩。

图 3 中, 横轴为表示过程的无量纲的时间变量 $t$, 虚线代表偏应力的变化, 实线代表体积变化。可见对于粘土, 加载– 卸载– 再加载过程体积总是收缩, 始终没有剪胀发生; 对于密砂, 则加载体胀和卸载体缩的现象十分明显。

2) 围压的影响: 围压对砂土卸载体缩的影响可以从图 4 看出。随着围压的增加, 最大的一次卸载体缩量呈下降趋势。但是这种下降的幅度并不大。总体上看, 在一定围压范围内, 围压对卸载体缩影响不是很明显。

(3) 对于密砂, 围压增加时, 加载剪胀量减少。但卸载体缩的减少量不大。这样, 卸载体缩部分占剪胀量的比例随着围压的提高而上升。亦即高围压下的剪胀中可恢复部分相对低围压要高一些。其原因是高围压固结以后土体内部的塑性变形部分大多数已经完成, 比如颗粒的破碎等等。

(4) 图 2 中对于粉质粘土的循环加载和单调加载曲线进行了对比。从图中可以看出, 卸载时的体积收

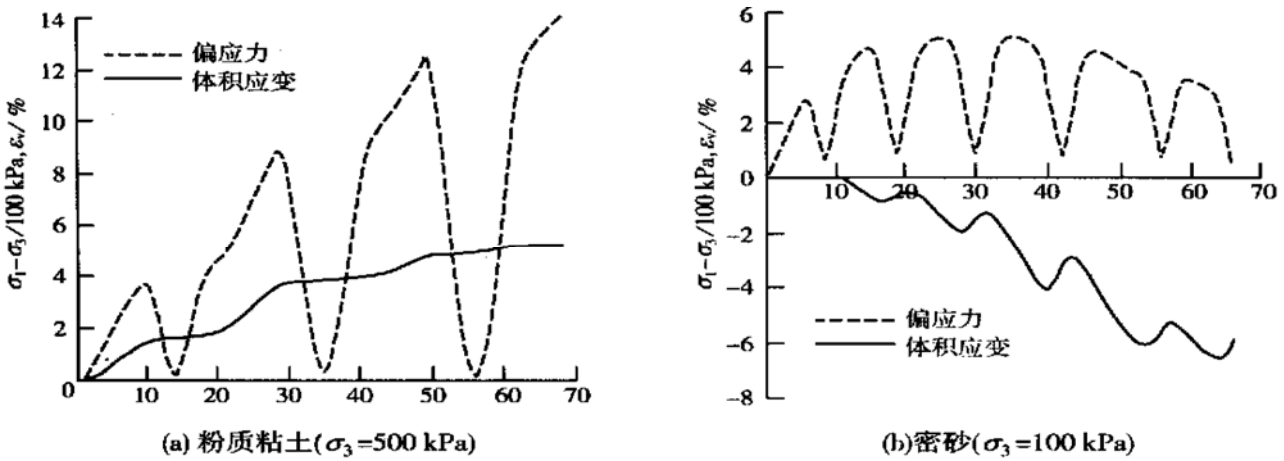


图 3　剪应力与体变变化对比

Fig. 3　Variation of deviator stress and volumetric strain

缩再加载时并没有恢复, 也就是说这种卸载体缩有累积的趋势 。另外, 循环加载的体变大于单调加载情况 。而从砂的循环加载曲线则可以看出卸载体缩大部分是可以恢复的, 二者的体变基本相等 。

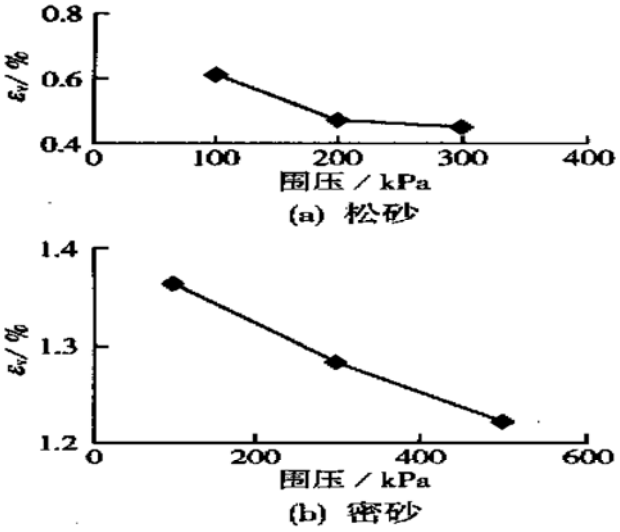


图 4　最大卸载体缩与围压的关系

Fig. 4　Relationship of the maximum volume contraction under unloading with confining pressure

## 4　讨　　论

从前面的结果分析中可以看出, 土的卸载体缩机理实际上可以分为两种, 一种卸载体缩的本质是可恢复剪胀, 图 5 中画出了一种剪胀的微观结构模型 。当受到剪力作用时, 土体产生剪胀, 同时土颗粒从低位能的稳定状态转变为高位能的不稳定状态 。卸载时土颗粒向低势能方向运动, 宏观上就表现为体积收缩 。这种卸载体缩在低围压下密砂的三轴试验中最明显 。低围压下松砂加卸载后期产生的卸载体缩也属于这种类型 。颗粒相对位置的重复变化使这种加载剪胀和卸载体缩成为“弹性”的 。

图 5　剪胀微观结构模型示意图

Fig. 5　Micro structure model of dilatation

另外一种卸载体缩的机理则与此不同 。一般说来, 松砂的颗粒分布并不像密砂那样规律而密实, 它在施加偏应力之前的颗粒更接近于图 6( a) 所示的状态 。这种结构虽然很松散, 但是如果受到等向围压, 其压缩量不大, 同时围压高低对这种结构的影响也不大 。当开始三轴加载时, 土体受到剪应力 。初始状态在加载过程中逐渐转化为图 6( b) 所示的柱体状态 。日本的 M. ODA 与 H. KAZAMA1998 年在其发表的文章[7] 中就认为砂在试验中承受荷载时微观状态主要就是这种柱状结构 。这时宏观上表现为加载体缩 。当卸载时, 随着轴向力的减小, 围压的作用开始表现出来, 柱体之间的孔隙开始减小, 土体体积在宏观上进一步缩小, 图 6 ( c) 表示了此时的结构 。这就是松砂在加卸载过程中体积均表现为缩小的原因 。图 7 表示的是松砂在轴向加载时形成的另一种柱状结构[8] 。形成的细长的孔隙平行于轴向主应力 $\sigma_1$ , 在横向应力 $\sigma_3$ 增加, 或者轴向应力 $\sigma_1$ 减少时, 其结构可能塌落破坏, 孔隙减少, 发生体缩 。

粘土的卸载体缩存在着类似的机理 。图 8 中从 ( a) 到( c) 为何开胜用大变形有限元模拟的粘土颗粒组成的微结构在竖向应力作用下的颗粒断裂和结构塌落过程[9] 。他在颗粒的点面界面单元中考虑了颗粒间的胶结, 考虑了粘土颗粒间由于范德华力( van der Waals forces) 和双电层力 。竖向应力使其发生结构破坏, 产

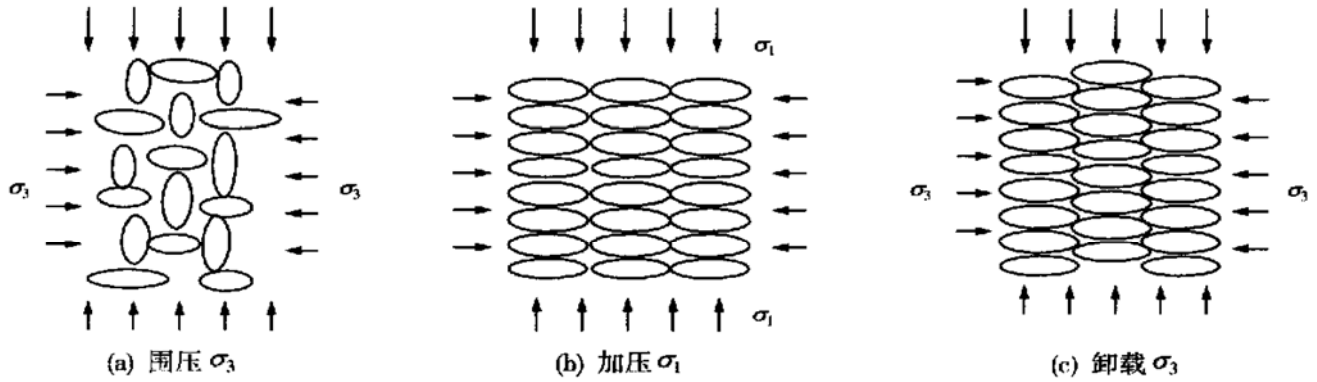


图 6 松砂微观结构图

Fig. 6 Micro-structure model of loose sand

生了损伤变形。颗粒由点面接触变成面面接触。当侧向应力增加或者竖向应力减小时, 会发生体积收缩。这类卸载体缩是应力引起的各向异性的一种表现。

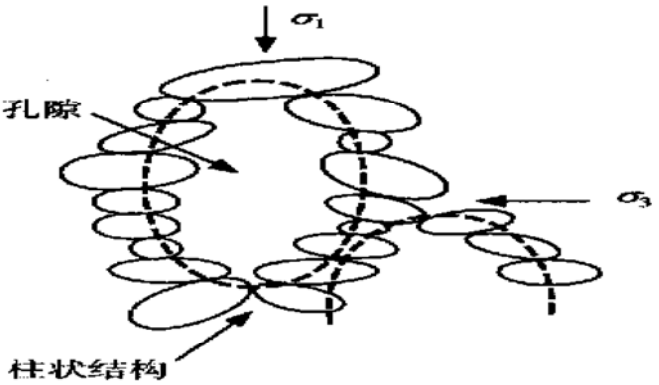


图 7 轴向压缩下形成的长轴平行于 $\sigma_1$ 的孔隙

Fig. 7 Void elongation parallel to the direction of axial compression

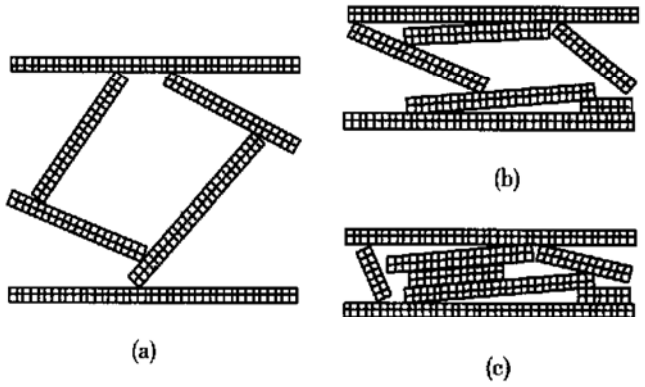


图 8 粘土在竖向应力下微观结构的破坏

Fig. 8 Structure failure of clay due to vertical stress

## 5 结 论

(1) 卸载体缩在砂土的三轴剪切试验中普遍存在, 无论是有剪胀现象的密砂还是有剪缩现象的松砂和粘土都在卸载时出现体缩。

(2) 对于密砂, 卸载体缩实际上体现了密砂剪胀变形的可恢复性。

(3) 对于松砂, 卸载体缩实质上是砂土压密的一个过程。加载时在主应力方向对砂的压密使其出现柱状结构, 卸载时则围压发生作用, 使其进一步压密。

(4) 粘土的卸载体缩也可以解释为结构性破坏压密过程。这种体缩体现了粘土对微观结构的依赖性。

(5) 围压对于卸载体缩的大小影响较小, 随着围压的增加, 卸载体缩量呈下降趋势。

(6) 卸载体缩的更进一步的微观机理可能比较复杂, 值得进一步研究。

## 参考文献:

[1] 李广信. 应力路线对土的应力应变关系的影响[D]. 北京: 清华大学, 1980.

[2] 矫德全, 陈愈炯. 土的各向异性和卸载体缩[J]. 岩土工程学报, 1994, **16**(4): 9- 15.

[3] Shamoto Y, Zhang J-M, Goto S. Mechanism of large post-liquefaction deformation in saturated sand[J]. Soils and Foundations, 1997, **37**(2): 71- 80.

[4] 张建民. 砂土的可逆性和不可逆性剪胀规律[J]. 岩土工程学报, 2000, **22**(1): 12- 17.

[5] 李广信, 郭瑞平. 土的卸载体缩与可恢复剪胀[J]. 岩土工程学报, 2000, **22**(2): 158- 161.

[6] 沈珠江. 理论土力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000.

[7] Oda M, Kazama H. Microstructure of shear bands and its relation to the mechanisms of dilatancy and failure of dense granular soils [J]. Geotechnique, 1998, **48**(4): 465- 481.

[8] Oda M, Nemat-Nasser S, Konishi J. Stress-induced anisotropy in graular masses[J]. Soils and Foundations, 1985, **25**(3): 85- 97.

[9] 何开胜. 结构性粘土的微观变形机理和粘弹塑损伤模型研究[D]. 南京: 南京水利科学研究院, 2001.