

土的各向异性和卸荷体缩*

矫德全** 陈愈炯

(水利水电科学研究院岩土所, 北京, 100044)

文 摘 当三轴排水试验中的轴向荷重增加继而减退时, 某些土的体积是收缩的, 而不是膨胀的。这一看来是反常的现象是土的各向异性所引起的。土的各向异性既源于原生又源于次生, 而后者只有在各向不均等应力作用下才能反映出来。如果土样承受过的大小主应力比 σ_1/σ_3 较大, 则土的次生各向异性更明显。试验结果表明, 当 σ_1/σ_3 值约大于2.6后就会发生卸荷体缩。

关键词 原生各向异性, 次生各向异性, 卸荷体缩。

1 引 言

在常规三轴排水压缩试验中经常会发现, 有些土的体积在轴向加荷时是缩小的, 但在继后的卸荷中体积仍缩小, 尽管试验进行得非常缓慢, 足以消除时间滞后的影响。这种令人迷惑的现象至今还没有被系统地研究过。其原因可能是以前较少进行这类试验, 而且要求掌握很精确的体积量测技术才能察觉这一现象。由于这是土的一种基本性质, 因此, 还是有少数细心的学者^[1,2]注意到这一现象, 并认为它会在土的本构模型的建立中引起麻烦。然而, 只要弄清具有卸荷体缩特性的土类和产生条件, 就有可能建立可靠的土的本构关系。这就是本文的目的。

2 先期的试验成果

为了确定土的弹-塑性本构模型参数^[3]和卸荷弹性模量^[4], 曾做过压实黄土的加卸荷三轴排水试验。试样高8 cm, 直径3.8 cm, 用静压法压实到接近最大压实干容重。试样经抽气饱和后, 侧面贴上排水滤纸条。轴向剪切应变速率为 $2 \times 10^{-4}/\text{min}$, 剪切阶段历时约16 h。图1的试验结果表示, 当轴向荷重减退时, 寺院坡黄土的体积发生膨胀; 而西河清黄土的体积在轴向荷重减退时是收缩的, 见图2, 尽管这两种土在轴向加荷时都是体积收缩的。

从表1可见, 西河清黄土的渗透系数比寺院坡黄土大得多, 因此, 卸荷体缩并不是由于时间滞后引起的, 特别是人们已发现, 在透水性很大的砂土和堆石中也具有卸荷体缩特性^[5,6],

*国家自然科学基金资助项目。

**现工作单位: 中国港湾建设总公司, 北京, 100027。

到稿日期: 1993-02-15。

更证明卸荷体缩与时间无关。

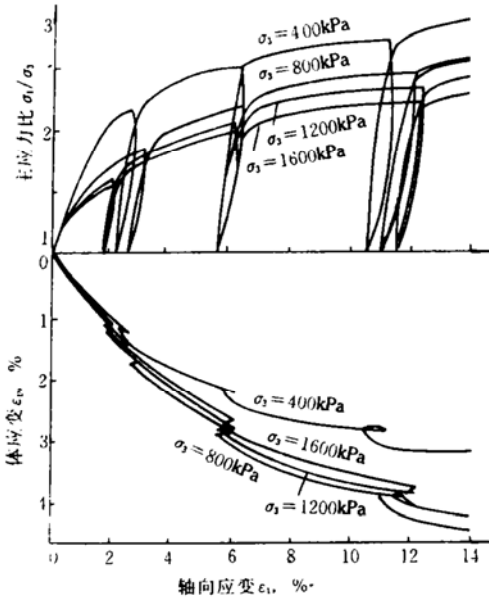


图1 寺院坡黄土的应力-应变曲线

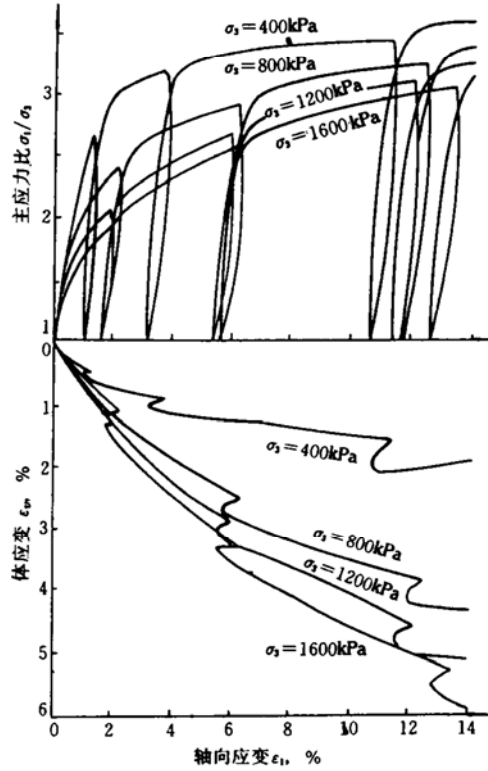


图2 西河清黄土的应力-应变曲线

图3表示了西河清黄土的卸荷体缩量 ϵ_{uv} 与围压 σ_3 和轴向应变 ϵ_1 的关系。从图中可见， ϵ_{uv} 随着 σ_3 的减小和 ϵ_1 的增大而增加，但在小的 ϵ_1 (约小于2%)和大的 σ_3 (约大于1.2MPa)下， ϵ_{uv} 变成负值，意味着体积膨胀。然而，同样的试样在各向均等的应力条件下，卸荷却总是体积膨胀的，如图4所示。不仅西河清黄土具有卸荷体缩特性，压实的砂土和堆石也具有卸荷体缩特性^[5,6]。如果将上述具有或不具有卸荷体缩特性的土的性质指标列于表1中，则可以看到，不具有卸荷体缩特性的土的塑性指数最高。

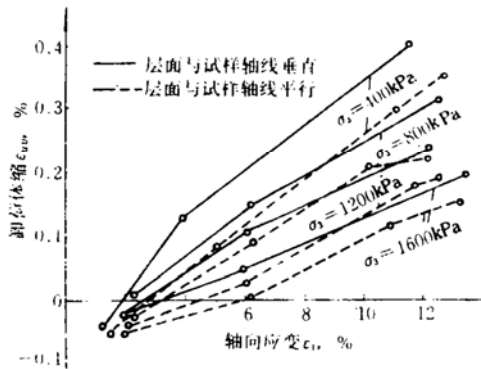


图3 西河清黄土的卸荷体缩

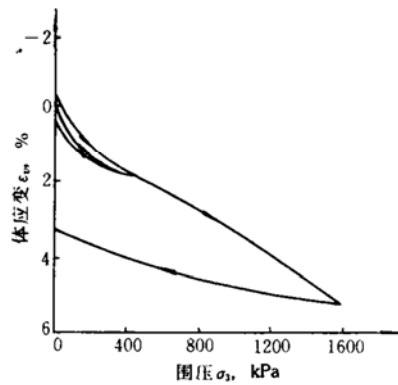


图4 西河清黄土的压缩、膨胀曲线

表1 土的性质指标

土料名称		寺院坡黄土	西河清黄土	承德砂	小浪底堆石	粉质粘土 I	粉质粘土 II
卸荷体缩现象		无	有	有	有	有	有
颗粒级配 (%)	2~10 (mm)				56		
	0.25~2 (mm)			45	27		
	0.05~0.25 (mm)	11	19	55	17	22	10
	0.005~0.05 (mm)	61	60			57	59
	< 5 μ	28	21			21	31
液限 w_L (%)		45	31			27	36
塑性指数 I_p (%)		24	13			12	17
击实试验	最大干容重 (kN/m ³)	16.7	17.4			17.4	16.2
	最优含水量 (%)	20.0	15.5			14.5	20.1
相对密度	最小孔隙比			0.40	0.20		
	最大孔隙比			0.80	0.48		
试样状态	干容重 (kN/m ³)	16.4	17.2	16.7	19.6	17.3	16.1
	含水量 (%)	20.0	16.0			14.5	20.1
渗透系数 (cm/s)		4.8×10^{-8}	3.8×10^{-7}			1.7×10^{-6}	1.6×10^{-7}
有效强度	凝聚力 c (kPa)	29	40	0		60	0
	内摩擦角 ϕ (°)	25.5	32.0	35.3	39.9~46.5	31.5	29.6
文献		[3]	[4]	[5]	[6]	本文	本文

3 原因分析

为了搞清塑性指数是不是影响卸荷体缩的一个主要因素, 选用两种粉质粘土进行了试验, 它们的土性质指标见表1, 其塑性指数为12和17, 后者介于寺院坡的塑性指数24和西河清的塑性指数13之间。粉质粘土 I 的制备含水量有两种, 分别压制成两种干容重。一种接近最大干容重, 而另一种接近等于粉质粘土 II 的最大干容重, 如图5所示。图6表示了粉质粘土 I 在两种不同干容重下的试验成果。图7为干容重相同但塑性指数不同的粉质粘土 I 和 II 的试验成果。这两图表明, 卸荷体缩随密度增大而增大, 而且随塑性指数的减小而增大。密度和塑性指数两者都有不可忽视的影响。基于这一发现, 可初步假定高的有效强度指标可能是导致卸荷体缩的真正原因, 因为在三轴排水试验中抗剪强度与密度成正比, 而与塑性指数成反比。

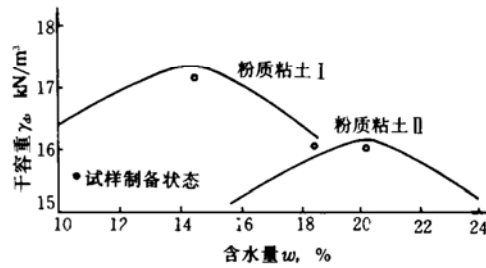


图5 粉质粘土 I 和 II 的击实曲线

在分析了先前的和本次的试验成果后, 可以得到卸荷体缩的4个特征: ①卸荷体缩与卸荷时轴向应变的大小成正比; ②卸荷体缩随围压的减小而增加; ③卸荷体缩随有效强度指标

的增大而增加; ④卸荷体缩随 σ_1/σ_3 的增大而增加, 若 σ_1/σ_3 等于1, 则卸荷体胀。

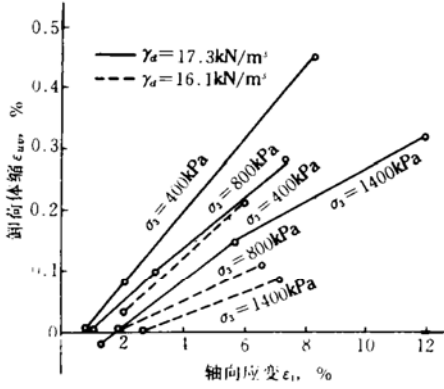


图6 干容重不同的粉质粘土 I 的卸荷体缩

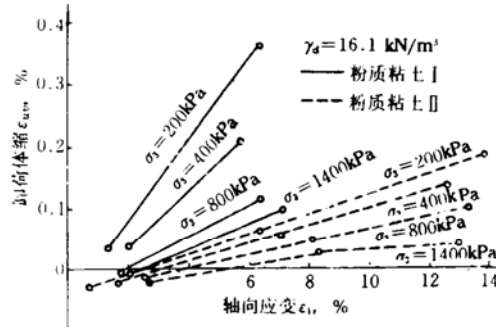


图7 干容重相同的粉质粘土 I 和 II 的卸荷体缩

根据这4个特征, 可以推测卸荷体缩的两个可能的原因。首先考虑试样端部受试样帽的约束效应, 因为端部约束和卸荷体缩两者的特征颇有相似之处。例如, 轴向应变愈大或土的抗剪强度指标愈大, 则端部约束效应也愈强, 此外, 若试样受到的是各向均等的应力, 则端部约束效应也消失。但是, 端部约束并不一定随围压的减小而增大, 这一点与卸荷体缩的特征不一样。为了验证端部约束是不是导致卸荷体缩的一个因素, 采用粉质粘土 I, II 进行试验。试样高度采用8 cm和6.1 cm, 目的是显示出短试样比长试样有更大的端部约束效应。试验结果示于图8, 图9。总的来看短试样并没有象预料的那样产生更大的卸荷体缩。此外, 对试样端部的应力和位移进行的有限元分析也否定了端部约束是导致卸荷体缩原因的结论。

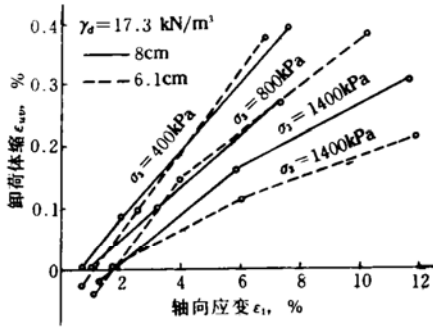


图8 试样高度不同的粉质粘土 I 的卸荷体缩

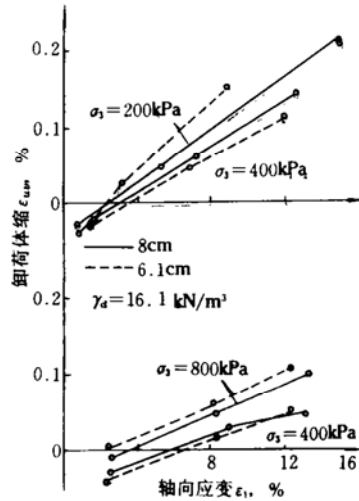


图9 试样高度不同的粉质粘土 II 的卸荷体缩

土的各向异性可能是产生卸荷体缩的另一个原因, 它包含原生和次生各向异性^[7,8]。原生各向异性是在土的沉积过程中或压实过程中形成的, 而次生各向异性是通过在试验室或在

现场所施加的各向不均等应力所反映出来的。在常规的渗透试验中，土样除了承受渗流力外，并不承受表面荷载，因此，只显示出原生的渗透各向异性。然而，在测定变形模量的压缩试验中，既有原生又有次生各向异性，因为在测定变形模量的过程中需要施加各向不均等应力 σ_1/σ_3 。它在试验中是逐级施加的，因此，次生各向异性是在试验过程中逐步显示的，不易被人们察觉到。然而，在卸荷前具有的次生各向异性，在卸荷过程中就会明显地暴露出来。下面用各向异性来说明卸荷体缩的 4 个特征。

首先，众所周知，在标准普氏压实功能下压实的填土，其应力-应变曲线大都具有应变硬化特性，如图 1 和图 2 所示。因此，卸荷前的轴向应变愈大，则 σ_1/σ_3 值愈大；次生各向异性也愈明显，因而卸荷体缩也就愈大。第二，图 1 和图 2 清楚地表明，围压 σ_3 愈小，则在相同应变下的 σ_1/σ_3 值愈大，因此，卸荷体缩也愈大。第三，具有较高有效强度指标的土，有能力承受较大的 σ_1/σ_3 而不致破坏，因此，卸荷体缩也愈大。最后一特征也是最易理解的，因为在各向均等的应力状态下，次生各向异性的特性不会显示出来，因此，无卸荷体缩现象。这一现象还说明，仅有不很严重的原生各向异性，并不致于导致卸荷体缩。只有当土的各向异性超过一定程度后才会产生卸荷体缩。例如，图 1 所示的寺院坡黄土，由于强度低，它所能承受的最大 σ_1/σ_3 较低，因此，这种情况下的次生各向异性不足以产生卸荷体缩现象。

4 试验验证

如果以上分析是正确的，那么，只要用同样的土制备成各向异性不同的土样，其中各向异性严重者，其卸荷体缩量必然较大。验证试验采用西河清黄土，一种试样的压实层面与轴线垂直，另一种试样的压实层面与轴线平行。人为地使这两种试样的原生各向异性有所差别。为制备层面与轴线平行的试样，先在长方形模具中将土料压实，然后切成圆柱形试样。试验成果示于图 3，其中的虚线表示层面与轴线平行的试样。在比较这两种试样的卸荷体缩量后发现，层面与轴线垂直的要比平行的试样的卸荷体缩量大得多。这是合理的，因为层面与轴线垂直的试样的原生各向异性比层面与轴线平行的试样大得多，文献[9]也从另一侧面证实了这一结论。

如果某一土样在三轴排水压缩试验中发生体积收缩，则意味着在不排水压缩试验中出现孔隙压力增大。为了证实是否各向异性也与轴向卸荷时的孔隙压力增长有关，采用粉质粘土 I 做了固结不排水试验。图 10 的试验结果表明轴向卸荷后孔隙压力的确继续增大，而且比在排水试验中显示出来的卸荷体缩更加明显。

其原因可能是不排水试验中出现的最大有效主应力比值 σ'_1/σ'_3 总体上要比排水试验中对应的 σ_1/σ_3

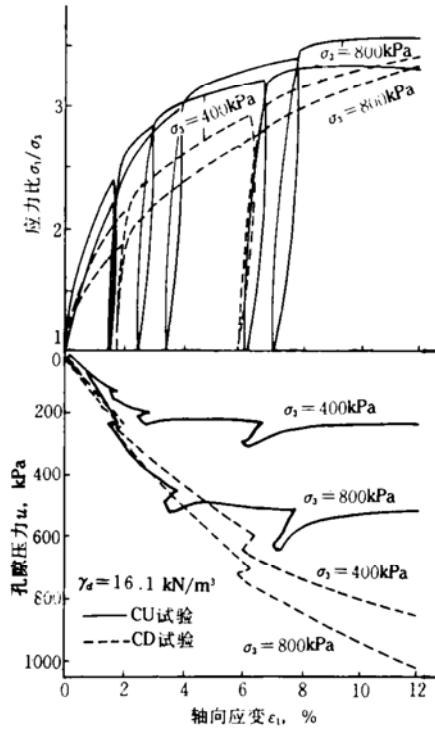


图 10 粉质粘土 I 的固结不排水试验成果

大得多。这一试验不仅证实了卸荷前土骨架在各向不均等应力下显示的次生各向异性确实是卸荷体缩的一个主要原因，而且这一发现有助于解释土在周期动力荷重下孔隙压力的增长机理。

在证实了卸荷体缩与各向异性的密切关系后，人们自然想知道，土的总体各向异性为多大时才会产生卸荷体缩。文献[9]曾用层面与轴线垂直和平行的寺院坡和西河清黄土做过变形模量各向异性的直接测定，但本次试验没有直接测定粉质粘土的变形各向异性。下面的理论分析说明，可以采用卸荷前土样所受到的 σ_1/σ_3 值来间接表示各向异性的大小。

根据广义虎克定律

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_1 &= \frac{\sigma_1}{E_1} - \nu_2 \frac{\sigma_2}{E_2} - \nu_3 \frac{\sigma_3}{E_3} \\ \epsilon_2 &= \frac{\sigma_2}{E_2} - \nu_1 \frac{\sigma_1}{E_1} - \nu_3 \frac{\sigma_3}{E_3} \\ \epsilon_3 &= \frac{\sigma_3}{E_3} - \nu_1 \frac{\sigma_1}{E_1} - \nu_2 \frac{\sigma_2}{E_2} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

在三轴试验的轴对称情况下，式(1)变成

$$\begin{aligned} \epsilon_1 &= \frac{\sigma_1}{E_1} - 2\nu_3 \frac{\sigma_3}{E_3} \\ \epsilon_3 &= \frac{\sigma_3}{E_3} - \nu_1 \frac{\sigma_1}{E_1} - \nu_3 \frac{\sigma_3}{E_3} \end{aligned}$$

两式相除，得出

$$\frac{\epsilon_3}{\epsilon_1} = \frac{\frac{\sigma_3}{E_3} - \nu_1 \frac{\sigma_1}{E_1} - \nu_3 \frac{\sigma_3}{E_3}}{\frac{\sigma_1}{E_1} - 2\nu_3 \frac{\sigma_3}{E_3}}$$

根据泊松比的定义，可令 $\epsilon_3/\epsilon_1 = \nu$ ，上式变为

$$\nu \frac{\sigma_1}{E_1} - 2\nu\nu_3 \frac{\sigma_3}{E_3} = \frac{\sigma_3}{E_3} - \nu_1 \frac{\sigma_1}{E_1} - \nu_3 \frac{\sigma_3}{E_3}$$

此等式两边同乘 E_1/σ_3 ，可得

$$\nu \frac{\sigma_1}{\sigma_3} - 2\nu\nu_3 \frac{E_1}{E_3} = \frac{E_1}{E_3} - \nu_1 \frac{\sigma_1}{\sigma_3} - \nu_3 \frac{E_1}{E_3}$$

即

$$\frac{E_1}{E_3} = \frac{\nu_1 + \nu}{1 + 2\nu\nu_3 - \nu_3} \cdot \frac{\sigma_1}{\sigma_3} \quad (2)$$

E_1/E_3 代表了材料的各向异性程度，式(2)至少表明了各向异性的大小与不均等应力 σ_1/σ_3 成正比，这与本文的试验结果相符合。基于这一

分析，就可从图3，6，7和图8中找到这些土发生卸荷体缩的最小 σ_1/σ_3 值，并示于图11中。从图中可见，如果 σ_1/σ_3 值约大于2.6，则土的各向异性就会严重到产生卸荷体缩。

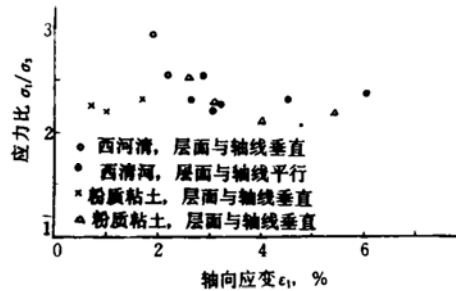


图11 σ_1/σ_3 门槛值

5 结 论

在分析了粘性和无粘性土卸荷体缩的原因后, 初步取得了如下结论:

(1)卸荷体缩是某些土的固有特性, 并不是由于时间滞后造成的试验假象, 也不取决于试样端部的约束力。

(2)卸荷体缩现象发生在各向异性较显著的土中。

(3)各向异性包括原生和次生各向异性, 次生各向异性是通过各向不均等应力的施加反映出来的。如果土所受到的主应力比 σ_1/σ_3 很大, 而且其强度高得足以承受如此高的 σ_1/σ_3 , 则土的次生各向异性愈显著。

(4)压实土的原生各向异性通常不足以导致卸荷体缩, 因此, 各向均等压固结试验中没有发现卸荷体缩。

(5)如果压实土承受过的各向不均等应力比 σ_1/σ_3 超过2.6, 一般就会产生卸荷体缩。

(6)如果试样在卸荷(不排水条件下卸荷)之前, 已具有显著的各向异性, 则卸荷后的孔隙压力同样也会提高。这为深入研究周期荷重下孔隙压力的增长机理提供了一条新的途径。

参 考 文 献

- 1 Lade P V, Duncun J M. Stress-path Dependent Behaviour of Cohesionless Soil. ASCE, Journal of Geotechnical Engineering, 1976, 101(1): 51~68.
- 2 谢定义. 土动力学. 西安: 西安交通大学出版社, 1988. 63.
- 3 Huang W X, Pu J L, Chen Y J. Hardening Rule and Yielding Functions for Soils. Proceedings of 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Stockholm, 1981, 1: 631~634.
- 4 陈愈炯. 土的卸荷弹性模量. 工程勘察, 1988, (5): 6~9.
- 5 Pu J L, Li G X, Sun Y S. A Three Dimensional Elasto-plastic Model for Sands. Proceedings of 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. San Francisco, 1985, 1: 621~624.
- 6 李广信. 干、湿状态下小浪底土坝堆石料的三轴试验研究. 北京, 清华大学水利工程系, 报告编号88033, 1988.
- 7 Casagrande A, Carillo N. Shear Failure of Anisotropic Materials. Contributions to Soil Mechanics (1941~1953), Published by the Boston Society of Civil Engineers, 1954: 122~135.
- 8 Chen Y C, Ishibashi I, Jenkins J T. Dynamic Shear Modulus and Fabric: Part I, Depositional and Induced Anisotropy. Geotechnique, 1988, 38(1): 25~32.
- 9 陈愈炯, 孔凡玲. 压实粘性土在平面应变条件下的强度和应力-应变关系. 见: 水利水电科学研究院科学研究论文集: 第20集(岩土工程). 北京: 水利电力出版社, 1983. 75~85.

Anisotropy and Volume-contraction of Soil due to Axial Unloading in CD Test

Jiao De-quan Chen Yu-jiong

(Water Conservancy and Hydro-Electric Power Research Institute, Beijing)

Abstract When axial load increases and then decreases in CD test, volume of some kinds of soil is not expanding but contracting. This unusual phenomenon, is caused by the soil anisotropy. Soil anisotropy originates from both depositional and induced anisotropy, and the latter can only come into being under anisotropic consolidation stress. The induced anisotropy of the soil sample is more obvious when the principal stress ratio (σ_1/σ_3) is higher. Experiments showed there exists soil volume-contraction due to axial unloading in CD test as σ_1/σ_3 exceeds about 2.6.

Key words original anisotropy, induced anisotropy, volume-contraction due to axial unloading.