

三轴压缩试验冻结试样横截面积变化研究

张淑娟, 赖远明, 孙志忠, 高志华

(中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 根据砂土和粉质粘土试样在 -4°C 和 -6°C 的轴对称三轴压缩原始试验资料, 在数据整理过程中采取考虑和不考虑试样横截面积变化 2 种方式, 讨论了剪切过程中试样横截面积变化与轴向应变和围压的关系; 分析了横截面积变化对土的应力-应变曲线形式及抗压强度的影响。研究表明: 考虑试样横切面积变化是很重要的。

关键词: 土力学; 横截面积; 应力-应变曲线; 抗压强度

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2005)24-4509-05

STUDY ON CROSS-SECTION AREA CHANGE OF FROZEN SPECIMENS FOR TRIAXIAL COMPRESSION TEST

ZHANG Shu-juan, LAI Yuan-ming, SUN Zhi-zhong, GAO Zhi-hua

(State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Based on initial data of axial-symmetrically triaxial compression test of silty and sandy clays with temperatures of -4°C and -6°C , respectively, two methods are adopted with/without considering the cross-section area change of specimens. The relationships among the cross-section area change of specimens, axial strain and confining pressure are discussed. According to the results, it is found that the specimens increase nonlinearly with the axial strain increase. However, it is also seen that the cross-section area increases when the confining pressure increases to about 3.0 MPa below which the area change basically keeps constant; and it was not varied with the soil type and temperature. Moreover, the patterns of stress-strain curves and compressive strength values, when the revised area is considered, are obviously different from the corresponding ones without considering the revised area.

Key words: soil mechanics; cross-section area; stress-strain curve; compressive strength

1 引言

冻土蠕变和强度性能是冻土力学最重要的内容之一, 也是寒区工程建设中地基和基础设计的基本依据。由于寒区工程建设的需要, 我国在 20 世纪 60 年代就开始了冻土强度的研究, 近年来该领域的发展更快。但大多数研究基于试验资料, 如文[1]根

据冻土的蠕变试验资料提出了冻土的热应力-应变关系, 后又以大量的单轴压缩结果为基础将冻土的应力-应变性状分为 9 种类型, 并给出了相应的应力-应变方程^[2]; 文[3]提出了冻土的粘弹塑性本构模型; 文[4]研究了冻土在扭转状态下的应力-应变关系。尽管这些研究结果一直被后人所利用, 但均未考虑冻土的体积变形, 作为强流变性的冻土, 其体变是一个不可忽略的因素^[5], 于是文[6]又提出了

收稿日期: 2004-07-12; **修回日期:** 2004-09-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40171019); 国家杰出青年基金资助项目(40225001); 中国科学院知识创新工程资助项目(KZCX1-SW-04)

作者简介: 张淑娟(1975-), 女, 2000年毕业于长安大学水文地质与工程地质专业, 现为博士研究生, 主要从事寒区岩土工程与冻土力学方面的研究工作。E-mail: sjzhang@ns.lzb.ac.cn.

考虑体变的冻土应力-应变关系。然而，在试验过程中试样不仅发生着体积变化，横截面积也不例外，可这一直没有被重视。所以本文在处理数据过程中一方面自始至终没有考虑试样横切面积变化，另一方面将横切面积变化予以考虑，目的是讨论试样横切面积的变化特性以及其对试验结果的影响。

2 试验条件

表 1 给出了 2 种土质的颗粒组成。试验中，所用重塑土样为直径 ϕ 61.8 mm，高度 125.0 mm 的圆柱标准样。粉质粘土样的初始含水量为 17.54% ~ 17.58% (饱和含水量约为 22.00%)，干密度为 1.80 g/cm³；砂土样的初始含水量和干密度分别为 12.91% ~ 13.23% (真空抽气饱水) 和 1.97 g/cm³。试样制备过程中，先将适量碾碎的土按初始含水量的要求配制，均匀搅拌后，在密闭容器中静置 12 ~ 24 h，然后通过专用制样机制备，并将其装模放入低温冷库中快速冻结，经 48 h 以上的冻结后脱模、装膜送入恒温箱内，按要求设定温度，恒温 48 h 后进行试验。本文试验温度分别为 -4 和 -6，围压(σ_3)

表 1 试样的基本物理参数

Table 1 Basic physico-parameters of soil specimens %

土名	颗粒百分含量			
	>0.10	0.10~0.05	0.05~0.005	<0.005
砂土	64.96	16.02	14.32	4.70
粉质粘土	0.54	1.17	44.67	53.62

为 0.0 ~ 18.0 MPa。

所有试验是在 MTS-810 试验机上进行的，围压和轴压可实行同步控制。在进行试验的过程中，先将恒温好的试样装入压力箱，然后在要求温度下再恒温 3 ~ 4 h，之后以 1.0 MP/s 的速率同时加轴压和围压至要求值，保持 2 h 后进行恒围压下的剪切试验。试验过程是通过计算机全自动控制，轴向变形通过轴位移变化由轴压系统自动测量，体积应变通过压力室油量变化由油压系统直接测量。轴向应变率为 1.25 mm/min。

3 试验结果讨论

在试验过程中，本文注意到当围压逐渐递增时，试样的破坏形态也发生着变化，由 0 围压或小围压时的直接剪破到发生剪胀，即试样不发生破坏，呈现腰鼓形，砂土较粘土更为明显。图 1(a), (b) 是围压分别为 0.0, 6.0 MPa，相应温度分别为 -4，-6 时粉质粘土的破坏形态；图 1(c) 是围压为 8.0 MPa，温度为 -4 砂土变形情况。从试样在不同围压下的变形来看，试样形态的变化比较明显，显然这个变化在一定程度上影响着试样的横切面积，进而影响着其他参数值。故在处理数据过程中一方面没有考虑试样横切面积的变化，即就是认为试样只发生轴向变形，而忽略了径向变化；另一方面考虑了横截面积的变化，此时在处理数据中对剪切过程中试样的横截面积通过体积值进行了校正^[7, 8]：



(a) 粉质粘土($\sigma_3=0.0$ MPa, $T=-4$) (b) 粉质粘土($\sigma_3=6.0$ MPa, $T=-6$) (c) 砂土($\sigma_3=8.0$ MPa, $T=-4$)

图 1 试验过程中试样的变形情况

Fig.1 Deformation of soil specimens during testing

加围压并保持 2 h 后, 有

$$A_c = A_0 \frac{1 - \Delta V_c / V_0}{1 - \Delta V_c / 3V_0} \quad (1)$$

剪切过程中, 有

$$A_t = A_c \frac{1 - \Delta V_t / V_c}{1 - \Delta H_t / H_c} \quad (2)$$

式中: $H_c = H_0 - (l_c - l_0)$, $\Delta H_t = l_t - l_c$; A_0 , H_0 和 V_0 分别为试样初始的横截面积、高度和体积; A_c , V_c , H_c 和 ΔV_c 分别为试样加设定围压并保持 2 h 后的平均横截面积、体积、高度及该过程中的体积变化; A_t , ΔV_t , ΔH_t 分别为剪切过程中 t 时刻试样的平均横截面积、体积和高度变化量, 是从剪切开始时测量的(当试样径向压缩时 ΔV 为负, 轴向压缩时 ΔH 为负)。在加围压和剪切期间的体积变化是根据文[7]中的式(1)来计算的。在加围压(本文试验范围内)过程中油温度随围压的增大而有轻微的升高, 升高值大致在 0 ~ 1.0 范围内变化, 保持 2 h 后又恢复到了初始状态, 故从加围压至保持 2 h 时间段内油的温度变化对试样体积变化的影响可以忽略不计, 该时段内试样的体积变化可表示为

$$\Delta V_c = K_1(D_c - D_0) - K_2(l_c - l_0) + K_3(P_c - P_0) \quad (3)$$

在剪切过程中围压保持恒定, 温度波动小于 0.1, 因此没有考虑液压油的压缩性及温度波动对体变的影响, 故有

$$\Delta V_t = K_1(D_t - D_c) - K_2(l_t - l_c) \quad (4)$$

式(3), (4)中: D_0 和 D_c , l_0 和 l_c , P_0 和 P_c 分别为从开始加围压至保持 2 h 前后体变计位置、三轴室活塞位置及围压; D_t , l_t 分别为剪切过程中 t 时刻体变计和三轴室活塞所在位置; $K_1 = 24.63 \text{ cm}^2$, $K_2 = 30 \text{ cm}^2$ 分别为体变计面积和加载活塞面积; K_3 为液压油的压缩性及三轴室闭合系统刚性的综合修正系数, 即

$$K_3 = \begin{cases} 12.5 \text{ cm}^3/\text{MPa} & (0 \leq \sigma_3 \leq 1.0 \text{ MPa}) \\ 4.0 \text{ cm}^3/\text{MPa} & (\sigma_3 > 1.0 \text{ MPa}) \end{cases} \quad (5)$$

通过采取对试样面积校正和不校正 2 种数据处理方式, 从如下几个方面进行了讨论。

3.1 试样横截面积变化

从图 1 可见, 在试验过程中试样的变形形态各异, 那么试样的平均横截面积随轴向应变的发展如何。于是, 就对 2 种土质分别在 2 种温度, 不同围压下的平均横截面积变化进行了计算, 结果发现无论试样温度为 -4 或 -6, 围压为 0.0 ~ 18.0 MPa 范围内的任一值, 其平均横截面积变化(ΔS)与轴向应变(ε)之间总是满足抛物线关系, 即

$$\Delta S = a\varepsilon^2 + b\varepsilon + c \quad (6)$$

式中: a , b , c 均为与围压、温度、土质有关的参数(见表 2), 且 $0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{\max}$, ε_{\max} 为某一围压下最大偏应力值所对应的轴向应变; $\Delta S > 0$ 为平均横截面积增大, 反之减小。

在试验期间对任一温度下的每一种土质都进行了 16 个围压下的剪切试验, 分别是 0.0, 0.3, 0.6,

表 2 不同条件下的 a, b, c 之值
Table 2 Values of a, b and c under different conditions

土名	温度/	参数	围压/MPa								
			0.0	0.6	1.0	3.0	5.0	6.0	8.0	12.0	18.0
砂土	- 6	a	0.022	0.013	0.011	0.005	0.005	0.004	0.004	0.004	0.004
		b	0.250	0.252	0.263	0.283	0.291	0.294	0.290	0.289	0.295
		c	- 0.035	0.025	0.034	0.035	0.018	0.025	0.027	0.024	0.027
	- 4	a	0.025	0.015	0.009	0.005	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004
		b	0.233	0.263	0.277	0.291	0.298	0.291	0.292	0.295	0.297
		c	0.190	0.014	0.025	0.019	0.017	0.020	0.022	0.027	0.027
粉质粘土	- 6	a	0.006	0.005	0.005	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004
		b	0.277	0.276	0.272	0.282	0.306	0.284	0.301	0.295	0.290
		c	- 0.030	- 0.016	- 0.006	- 0.030	- 0.033	- 0.034	0.007	0.024	0.021
	- 4	a	0.007	0.004	0.005	0.004	0.004	0.004	0.005	0.004	0.004
		b	0.257	0.291	0.277	0.295	0.293	0.294	0.283	0.302	0.298
		c	- 0.057	- 0.010	0.004	0.013	0.013	- 0.050	0.038	0.016	0.021

0.8, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 8.0, 10.0, 12.0, 14.0, 16.0 和 18.0 MPa, 考虑到数据的冗长, 故在不影响 a, b, c 值分布规律的前提下, 表 2 中只列出了部分值。该表表明: 对砂土试样来说, a, b 值起初都随围压的增大而增大, 但 -4 时 a, b 值基本上都大于 -6 的相应值; 当围压超过 3.0 MPa 之后, a, b 值就基本上为一常量, 且此阶段 2 种温度下的 a 或 b 值都差不多, 此时与粉质粘土试样有关的 a, b 值在 2 种温度下没有明显的不同, 但遵循砂土试样与围压间的规律。总的来说, 所有 c 值都比较离散, 没有一致性规律, 这可能与试验过程中初始条件的控制有关。

图 2 表明了试样平均横截面积变化与围压间的关系, 其中每一围压下的横截面积取值为峰值应力或 20% 应变处的应力。从图 2 可以发现, 当围压超过 3.0 MPa 后, ΔS 不受温度、围压和土质的影响, 但该围压之前砂土样的 ΔS 要比相应的粉质粘土的小, 其中 “-4S” 表示 -4 的砂土, “-6F” 表示 -6 的粉质粘土, 其他依此类推。由此表明试样在剪切过程中无论温度为 -6 或 -4, ΔS 最大值可达 8.0 cm^2 , 即使围压为 0.0, ΔS 也不小于 2.0 cm^2 , 所以无论是在单轴还是三轴试验中, 只要有轴向变形, ΔS 就不为 0。

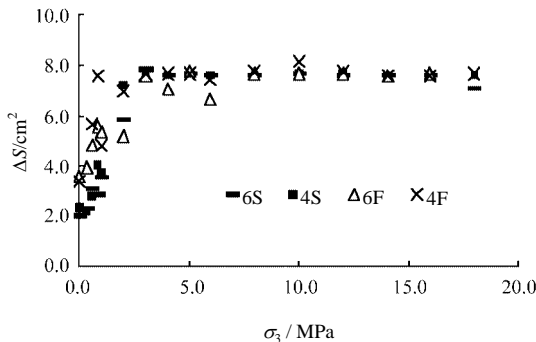


图 2 试样横截面积变化与围压关系
Fig.2 Relationship between ΔS and σ_3

3.2 应力-应变曲线形态

土的应力-应变曲线是研究土的变形特性及本构模型的基础。通常情况下, 土的应力-应变曲线包括 5 种形式^[9](如图 3 所示), 分别是强硬化型、弱硬化型、强软化型、弱软化型及理想塑性。其数学模式基本上是根据试验资料以某一形式的函数进行逼近, 然后再从理论上进行分析论证, 或二者互相验证。所以任何一方出现偏差, 都会给结论的得出带来困难或造成错误。本文在处理数据时的确发

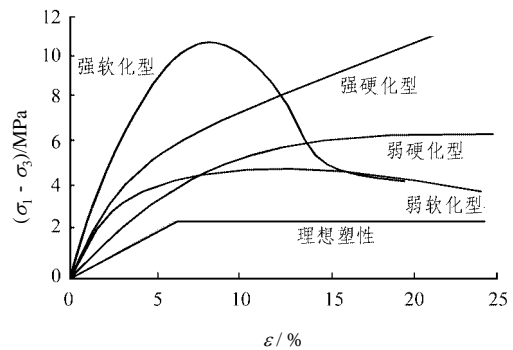


图 3 土的应力-应变曲线类型示意图
Fig.3 Schematic diagram of stress-strain curve type of soils

现, 在剪切过程中 2 种情况下的应力-应变曲线有明显的差别, 主要表现如下:

(1) 对砂土来说, 不考虑横截面积变化, 则应力-应变曲线在围压 $\sigma_3 = 0.6 \text{ MPa}$ 时呈强软化型; 而为 $0.6 \text{ MPa} < \sigma_3 < 3.0 \text{ MPa}$ 时由弱软化型向弱硬化型过渡; 之后随围压的进一步增大, 即使轴向应变达到 30%, 偏应力也没有达到最大值, 即呈强硬化型; 如果考虑了横切面积变化, 当围压 $\sigma_3 = 1.0 \text{ MPa}$ 时应力-应变曲线也呈强软化型, 而当围压为 $1.0 \text{ MPa} < \sigma_3 < 3.0 \text{ MPa}$ 时则呈弱软化型。之后, 随围压的增大偏应力在应变大于 20% 后基本上为一常量, 也就是应力-应变曲线呈弱硬化型。

(2) 对粉质粘土来说, 若不考虑横截面积变化, 则应力-应变曲线由小围压 ($\sigma_3 < 0.3 \text{ MPa}$) 时即强软化型逐渐转化为弱软化型, 直至围压 $\sigma_3 > 1.0 \text{ MPa}$ 时的弱硬化型; 当考虑横截面积变化时, 结果就截然不同了。在本文研究的围压范围内, 应力-应变曲线都表现出屈服, 只是随围压的增大, 最大偏应力值所对应的应变也跟着增大——由小围压时的强软化型最终变为较大围压下的弱软化型。

从上可知, 试样横截面积变化跟应力应变曲线类型有着密切的联系, 所以在试验数据的处理过程中必须考虑。

3.3 强度大小

冻土的抗压强度对评价冻土在短期荷载下的强度, 特别是对选择多年冻土上建筑物地基的设计及计算人工冻结法挖掘的竖井和基坑的冻土墙强度等具有重要的意义^[10]。在以前大量的研究成果中, 一般对静抗压强度(最大偏应力差)的取值为峰值或 20% 应变处的应力, 所以这儿仍旧按此标准取值。由于 -4 和 -6 时强度的变化趋势类似, 故只详细地讨论了后一温度作用下的情况, 结果见图 4。

从图 4 看出, 对两种土质来说, 分别用 2 种方

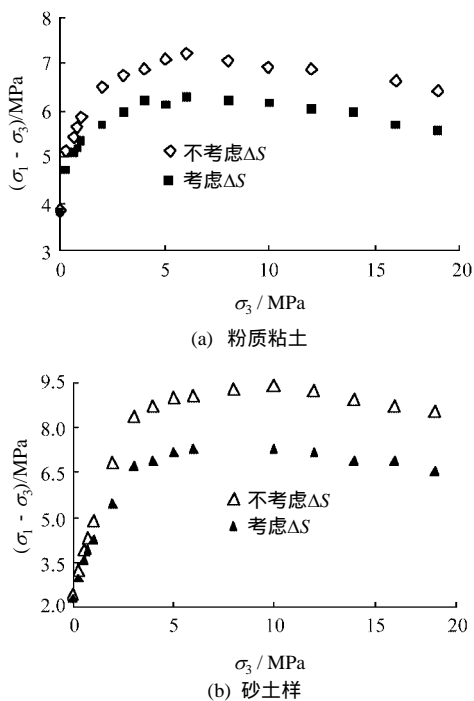


图 4 粉质粘土和砂土样的 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \sigma_3$ 曲线

Fig.4 Curves of $(\sigma_1 - \sigma_3) - \sigma_3$ for silty and sandy clays

法处理数据所得的强度值随围压的增大在分布规律上是一致的，但大小有很大的差别，不考虑横截面积时的强度值明显大于考虑时的强度。图 4(a)表明，当围压小于 1.0 MPa 时，2 种条件下的强度值比较接近，之后随围压的增大，强度差也增大，最大达到了 1.0 MPa。在图 4(b)中，当围压小于 1.0 MPa 时，两者强度值几乎相等，但当围压增大时，两者强度差也越来越大，最大可达到 2.5 MPa。所以，从本试验出发，对于围压不超过 1.0 MPa 的强度试验来说，数据处理中试样横切面积的变化可以忽略，但对更大围压情况而言，是不能忽略的。

4 结 论

基于本文研究成果，可得出如下结论：

- (1) 无论是三轴或单轴压缩试验，剪切过程中试样平均横截面积变化随轴向应变的增大而呈非线性增大。随围压的增大，当增大至 3.0 MPa 后基本上为一常量，此时不受土质、温度和围压的影响。
- (2) 试样平均横截面积变化直接影响着土的应力 - 应变曲线形式。
- (3) 整理数据过程中，在考虑和不考虑剪切过程中试样横截面积变化的 2 种情况下所得的静抗压强度值在围压小于 1.0 MPa 时，没有明显的差别。但当围压超过该值时仍旧存在较大的差值，且对砂

土来说，这个值更大。

鉴于此，冻土试样在变形过程中不仅发生着体积应变，而且横截面积变化也直接影响着其他参数，必须予以重视。

参考文献(References)：

- [1] Zhu Y L, Crbee D L. Creep and strength behaviour of frozen silt in uniaxial compression[R]. USA : CRREL Report , 1987. 87 - 10.
- [2] Zhu Y L ,Zhang J Y ,Peng W W ,et al. Constitutive relations of frozen soil in uniaxial compression[A]. In : Proceedings of 6th International Symposium on Ground Freezing[C]. Netherlands : A. A. Balkema , 1991. 211 - 216.
- [3] 蔡中民. 冻土的弹塑性本构模型以及材料参数的确定[J]. 冰川冻土, 1990, 12(1) : 31 - 40.(Cai Zhongmin. Elastoplastic constitutive model of frozen soil and determination of material parameters[J]. Journal of Glaciology and Geocryology , 1990, 12(1) : 31 - 40.(in Chinese))
- [4] 何 平, 朱元林, 王文斌. 饱和冻结粉土扭转状态下应力应变分析[J]. 兰州铁道学院学报, 1998, 17(3) : 29 - 33.(He Ping , Zhu Yuanlin, Wang Wenbin. Constitutive relation of saturated frozen silt in torsion[J]. Journal of Lanzhou Railway Institute , 1998, 17(3) : 29 - 33.(in Chinese))
- [5] 吴紫汪, 马 巍, 常小晓. 冻土蠕变变形特征的细观分析[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(3) : 1 - 6.(Wu Ziwang ,Ma Wei ,Chang Xiaoxiao. Meso-analysis of characteristic of frozen soil creep[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering ,1997 ,19(3) :1 - 6.(in Chinese))
- [6] 马 巍, 朱元林, 马文婷, 等. 冻结粘土土的变形分析[J]. 冰川冻土, 2000, 22(1) : 43 - 47.(Ma Wei , Zhu Yuanlin, Ma Wenting , et al. Analysis of deformation in frozen clayey soils[J] Journal of Glaciology and Geocryology , 2000, 22(1) : 43 - 47.(in Chinese))
- [7] Jean-Pierre B. Experimental Soil Mechanics[M]. Los Angeles : University of Southern California Press , 1997.
- [8] 朱国才, 常小晓, 朱元林, 等. 冻土三轴试验体变测定的一种方法[A]. 见：第五届全国冰川冻土学大会论文集[C]. 兰州：甘肃文化出版社, 1996. 799 - 803.(Zhu Guocai , Chang Xiaoxiao , Zhu Yuanlin , et al. A method for determining cubical change in triaxial test[A]. In : Proceedings of the Fifth Chinese Conference on Glaciology and Geocryology[C]. Lanzhou : Gansu Culture Press , 1996. 799 - 803.(in Chinese))
- [9] 刘祖典, 党发宁. 土的弹塑性理论基础[M]. 西安：世界图书出版, 2002.(Liu Zudian , Dang Faning. Theoretical Basis of Elastoplasticity for Soil[M]. Xi'an : World Book Press , 2002.(in Chinese))
- [10] 吴紫汪, 马 巍. 冻土强度与蠕变[M]. 兰州：兰州大学出版社, 1994.(Wu Ziwang , Ma Wei. Strength and Creep of Frozen Soil[M]. Lanzhou : Lanzhou University Press , 1994.(in Chinese))