

# 冻结黄土扭转试验研究

张健明 彭万巍 张长庆 俞祁浩

(中国科学院兰州冰川冻土研究所冻土工程国家重点实验室, 730000)

**摘要** 本文基于三组冻结兰州黄土的实心圆杆扭转试验资料, 对其剪切模量、扭剪强度以及流动性质随温度及转速的变化规律作了一些初步地分析和探讨。主要结果有: 1) 剪切模量在  $0\sim-3^{\circ}\text{C}$  范围内随温度的降低而明显增大; 在  $-3\sim-10^{\circ}\text{C}$  范围内随温度的降低略有增加, 但很不明显。2) 瞬时扭剪强度在  $0\sim-10^{\circ}\text{C}$  范围内与负温值呈正比关系。3) 扭剪强度对于不同的扭转速度表现出非常明显的松弛现象。4) 扭转变形过程具有非常明显的粘滞流动特性。

**关键词** 扭转试验 剪切模量 扭剪强度 粘滞流动

## 1 引言

扭转是材料变形的基本形式之一, 通过扭转试验可以研究材料在纯剪应力状态下的力学性质, 并为工程设计提供必要的力学参数。但在我们以前的研究工作中, 由于试验条件不足, 加上试样制备比较困难, 在这方面基本上还没有开展工作。本文主要通过一系列冻结黄土的扭转试验结果, 对冻土在扭转载荷作用下的力学性质作一初步探讨。

## 2 试验材料及设备

### 2.1 试验材料

试验采用兰州黄土(粉质粘土), 其主要物性指标为: 比重  $2.70\text{ g/cm}^3$ , 塑限含水量  $17.7\%$ , 液限含水量  $24.6\%$ 。试验选用的含水量为  $20\%$ , 干容重为  $1.58\text{ g/cm}^3$ 。试样制备的具体过程是: 先将土样风干, 再按试验要求配制含水量, 搅拌均匀后分  $4\sim 5$  层填入扭转试验专用模具内均匀夯实, 然后送入低温冷库中快速冻结。经  $24\text{ h}$  以上冻结成型后脱模、修整, 然后再放入低温恒温箱内待用。恒温持续时间均在  $36\text{ h}$  以上。试样的形状及尺寸如图 1 所示。

### 2.2 试验设备

所有试验均在青山试验机厂生产的 NJ-100B 型扭转试验机上进行。其扭矩测量分  $1000\text{ N}\cdot\text{m}$ ,  $500\text{ N}\cdot\text{m}$ ,  $200\text{ N}\cdot\text{m}$ ,  $100\text{ N}\cdot\text{m}$  四个量程。主动夹头转速分  $0\sim 36^{\circ}/\text{min}$ ,  $0\sim 360^{\circ}/\text{min}$  两档, 无级调速。

所有试验数据的采集均由计算机控制, 澳大利亚生产的 Datataker-100 型数据采集仪完成。

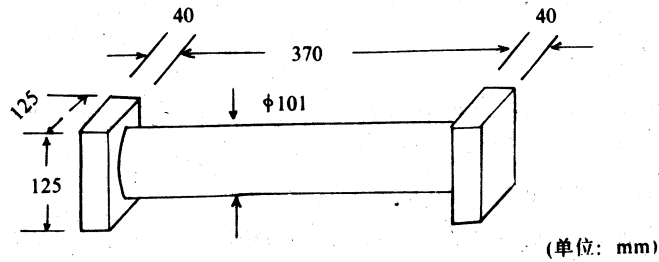


图1 试样几何尺寸示意图

Fig.1 Diagram of sample size

试验过程中温度由日本 SHIMADEN 公司生产的智能温控仪自动控制, 其精度为  $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 。

表1 扭转试验结果一览表

Table 1 Summary of torsion test results

试验温度 $\theta$ ( $^\circ\text{C}$ )	扭转速度 $\omega$ [ $^\circ / (\text{min} \cdot \text{m})$ ]	极限扭矩 $T_{\max}$ ( $\text{N} \cdot \text{m}$ )	抗剪强度 $\tau_{\max}$ ( $\text{MPa}$ )	剪切模量 $G_{50}$ ( $\text{MPa}$ )	破坏时间 $t_f$ ( $\text{min}$ )	破坏扭角 $\varphi_f$ ( $^\circ / \text{m}$ )
-0.3	324	158	0.78	37	0.4	119
-1.0	324	205	1.01	66	0.3	101
-2.0	324	250	1.24	144	0.3	81
-2.0	324	282	1.39	145	0.3	97
-3.0	324	345	1.71	176	0.3	86
-4.0	324	355	1.75	182	0.1	32
-4.0	324	396	1.96		0.2	57
-4.0	324	440	2.17	183	0.3	86
-5.0	324	431	2.13	194	0.2	54
-5.0	324	470	2.32	188	0.4	114
-7.0	324	608	3.01	195	0.1	38
-7.0	324	648	3.20	199	0.3	81
-10.0	324	822	4.06	203	0.4	101
-10.0	324	852	4.21	198	0.4	116
-2.0	2.26	171	0.85		26	59
-2.0	1.31	155	0.77		18	24
-2.0	0.40	130	0.64		95	38
-2.0	0.24	113	0.56		110	26
-2.0	0.04	105	0.52		400	20
-5.0	27.0	315	1.56		1.5	41
-5.0	2.55	281	1.39		12	31
-5.0	1.35	272	1.34		30	41
-5.0	0.21	250	1.24		85	18
-5.0	0.07	225	1.11		210	15
-5.0	0.04	191	0.94		620	25

### 3 试验结果及讨论

#### 3.1 试验过程描述

所有试验均采用扭转速度控制方式, 试验过程中保持扭转速度恒定, 观测扭矩及扭角随时间变化的情况。试验选用的扭转速度最大为  $324^{\circ} / (\text{min} \cdot \text{m})$ , 最小为  $0.04^{\circ} / (\text{min} \cdot \text{m})$ , 试验周期最长达 12 h(表 1)。

图 2 为一条比较典型的试验过程曲线。从图中可以看出, 其变形过程具有非常明显的三个阶段: 在第一阶段(OA)中, 扭矩随变形的增大而增大, 基本上呈正比关系; 在第二阶段(AB)中, 扭矩随时间变化基本保持常数, 而扭角则以某一恒定速度持续发展(粘滞流动)。此阶段的变形量在整个变形过程中占有相当大的比例。在第三阶段(BC)中, 扭矩随变形的增加开始持续下降, 同时可以观察到试样表面开始出现裂纹。试样在破坏过程中主要是形成与纵轴线约成  $45^{\circ}$  夹角的张性裂纹, 这种现象说明冻土在纯剪应力状态下发生的破坏主要是由于受侧向的拉应力而产生, 冻土的抗拉强度低于抗剪强度。

#### 3.2 剪切模量

扭转试验的主要目的之一就是测定材料的剪切模量。在图 2 中, 虽然我们可以认为 OA 段近似为一直线, 但实际计算结果表明, 在此变形阶段中剪切模量的数值仍有较大幅度的变化。为了统一标准, 同时也考虑到工程应用问题, 以下讨论的剪切模量均以扭矩达到极限破坏扭矩 50% 时的剪切模量  $G_{50}$  做为标准。图 3 为一组扭转速度均为  $324^{\circ} / (\text{min} \cdot \text{m})$  时剪切模量随温度变化的试验结果。从图中可以看出, 在  $0 \sim -3^{\circ}\text{C}$  范围内剪切模量随温度的降低而明显增大; 在  $-3 \sim -10^{\circ}\text{C}$  范围内剪切模量随温度降低略有增加, 但不明显。这种现象可以由冻土中未冻水和冰的动力平衡原理(崔托维奇, 1973)很

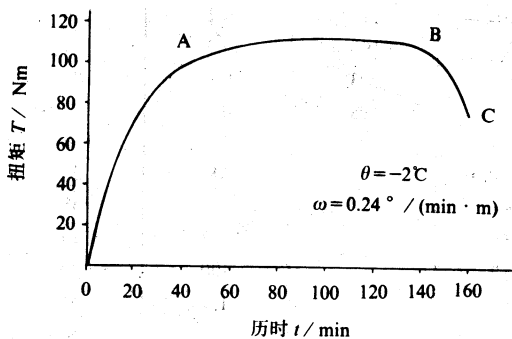


图 2 试验过程曲线

Fig.2 Curve of test process

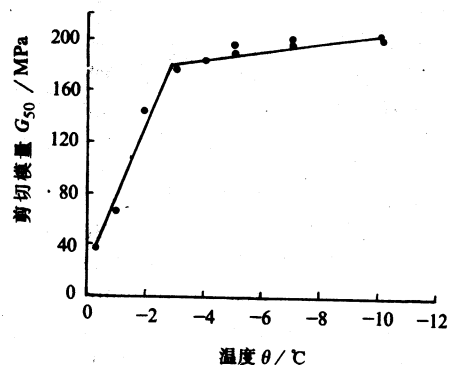


图 3 剪切模量随温度变化关系

Fig.3 Shearing modulus vs. temperature

好地加以解释。其相互关系可以表示为:

$$G_{50} = 55.71\theta + 21.12 \quad (0 < \theta \leq 3) \quad G_{50} = 3.22\theta + 169.51 \quad (3 < \theta \leq 10) \quad (1)$$

式中:  $G_{50}$  为剪切模量(MPa);  $\theta$  为负温的绝对值。

### 3.3 扭剪强度

#### (1) 瞬时强度

图 4 为一组扭转速度均为  $324^\circ / (\text{min} \cdot \text{m})$  时瞬时扭剪强度(破坏时间均小于 30 s)随温度变化的试验结果。由图中可见, 瞬时扭剪强度与负温值基本上呈正比关系, 可用以下方程表示:

$$\tau_{\max} = 0.35\theta + 0.61 \quad (2)$$

式中:  $\tau_{\max}$  为瞬时扭剪强度(MPa);  $\theta$  为负温的绝对值。

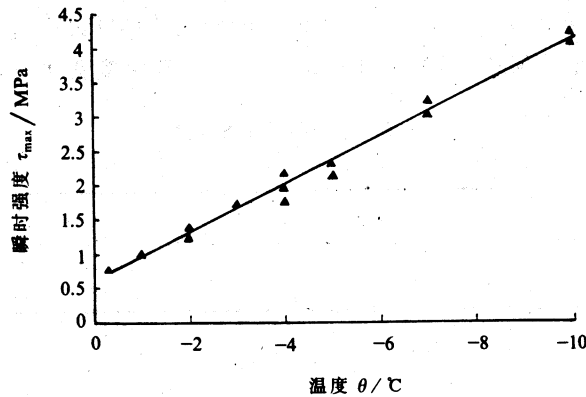


图 4 瞬时强度与温度变化关系

Fig.4 Instantaneous strength vs. temperature

#### (2) 强度松弛

冻土中由于冰和未冻水的存在而表现出非常强烈的流变性质。图 5 为二组试验温度分别为  $-2^\circ\text{C}$  及  $-5^\circ\text{C}$  时, 不同扭转速度条件下, 扭剪强度与破坏时间的关系曲线。与压缩及拉伸试验类似, 其强度也具有非常明显的松弛特性。这种关系可以用冻土的长期强度方程(维亚洛夫, 1978)很好地加以描述:

$$\tau = \frac{\beta}{\ln(t_f / \alpha)} \quad (3)$$

式中:  $\tau$  为扭剪强度(MPa);  $t_f$  为破坏时间(min);  $\alpha$ 、 $\beta$  为随温度变化的参数(表 2)。

表2 式(3)中参数 $\alpha$ 、 $\beta$ 值

Table 2 Value of parameters in equation (3)

试验温度(°C)	$\alpha$	$\beta$	相关系数
-2	$1.99 \times 10^{-3}$	6.84	0.90
-5	$3.67 \times 10^{-4}$	14.4	0.95

### 3.4 流动方程

前已述及, 冻土在扭转载荷下的变形过程具有非常明显的流动特性, 并且此阶段的变形量在整个变形过程中占有相当大的比例。因而, 在这种情况下研究流动速度及其影响因素就显得格外重要。试验结果表明, 在一定的温度条件下, 流动速度主要与剪应力有关(图6)。其相互关系可用流动方程(维亚洛夫, 1978)表示为:

$$\dot{\gamma} = \frac{1}{\eta} (\tau - \tau_{\infty})^n$$

式中:  $\dot{\gamma}$  为剪应变速率( $\text{rad}/(\text{s} \cdot \text{m})$ );  $\tau$  为相应的剪应力(MPa);  $\tau_{\infty}$  为相应温度条件下, 由式(3)算出的长期强度(MPa, 取  $t_f = 100 \text{ a}$ ),  $\eta$ 、 $n$  为随温度变化的参数(表3)。

表3 式(4)中有关参数值

Table 3 Value of parameters in equation (4)

试验温度(°C)	$\eta$	$n$	$\tau_{\infty}$	相关系数
-2	$3.92 \times 10^2$	5.79	0.285	0.94
-5	$7.19 \times 10^3$	6.78	0.561	0.95

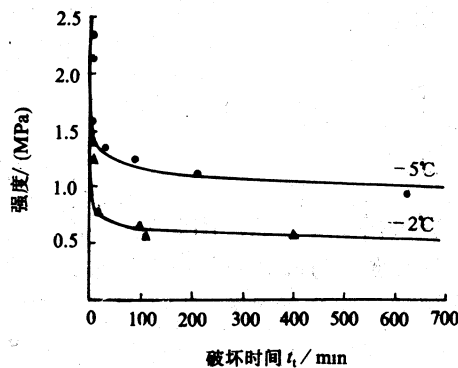


图5 强度松弛曲线

Fig.5 Curves of strength relaxation

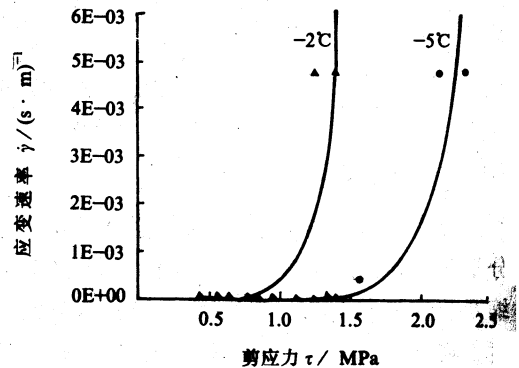


图6 流动速度与剪应力关系曲线

Fig.6 Speed of flow vs. shearing stress

## 4 存在问题

本试验是对冻土扭转试验的初步尝试, 虽然取得了一定的成果, 但也存在一些问题:

(1) 试验采用实心圆杆, 因而所测得的扭矩是圆杆截面上总的扭矩, 扭角也只是圆杆外表面的扭角, 无法确切地知道剪应力及扭角在横截面上沿半径的具体分布情况, 所以在分析计算中只好采取一些假定条件(本文中假定剪应力及扭角在横截面上沿半径均为线性分布)。为了解决这个问题, 建议在以后的试验中将试样改为空心薄壁圆杆, 以确切地查明冻土在纯剪应力状态下的本构关系。

(2) 为了进一步研究冻土在纯剪应力状态下的流变性质, 建议在以后的试验中改进试验方式, 采用标准的蠕变及松弛试验方法。

### 参 考 文 献

- 崔托维奇著, 张长庆, 朱元林译. 1985. 冻土力学. 北京: 科学出版社, 35~41.  
维亚洛夫著, 杜余培译. 1987. 土力学的流变原理. 北京: 科学出版社, 319~323, 163~172.

## Experimental Study on Torsion Test of Frozen Loess

Zhang Jianming, Peng Wanwei, Zhang Changqing and Yu Qihao

(State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, LIGG, CAS, 730000)

### Abstract

Based on a group of data obtained by torsion tests of frozen loess, this paper discusses the primary properties such as shear modulus, shear strength, and flowability which vary with temperature and rotating speed. The main results are as follows: 1) In the range of  $0\sim-3^{\circ}\text{C}$ , the shear modulus increase with the lowering of temperature, whereas, in the range of  $-3\sim-10^{\circ}\text{C}$ , the shear modulus increase slightly with the lowering of temperature. 2) In the range of  $0\sim-10^{\circ}\text{C}$ , the instantaneous shear strength increase linearly with the lowering of temperature. 3) For the various rotating speed, the shear strength shows a remarkable behaviour of relaxation. 4) The process of torsion has the property of viscous flow.

**Key words:** torsion test, shear modulus, shear strength, viscous flow