

## 扭转荷载下冻土的强度特性<sup>①</sup>

彭万巍<sup>1</sup> 张建明<sup>1</sup> 张长庆<sup>1</sup> 康国瑾<sup>2</sup> 王正贵<sup>2</sup> 彭蕊<sup>2</sup>

(1 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; 2 兰州大学, 730000)

**提 要** 对冻结黄土的一系列扭转试验结果表明: 冻土受纯剪时的抗剪强度与其抗压、抗拉强度具有相同的规律。其抗剪强度随温度降低和破坏剪应变的减小而增大, 同时也随转速的加快而呈非线性递增。文中还给出了各影响因素的相关分析式。

**关键词** 冻土 扭转 强度特性

冻土的扭转特性是冻土力学研究的重要内容之一, 而且对冻土工程设计具有重要价值。目前, 对于冻土力学特性之研究已涉入许多领域, 如为此而进行的冻土单轴、三轴和振动三轴等复杂应力状态下的强度试验, 以及剪切、流变、冲击强度特性等试验研究, 都已取得很大进展。而对冻土的扭转性质的研究, 由于其试验方法难度较大, 至今还没有引起研究者的广泛重视。因此, 这方面资料甚少。本文分析了扭转强度随温度变化(-0.3, -1, -2, -3, -4, -5 和 -7℃), 和在相同温度, 不同扭转速度(0.5, 1, 10, 120 和 360°/min)条件下的强度特性。并对本试验结果进行了相关分析, 同时给出了相应的数学表达式。

### 1 实验及分析方法

试样用兰州黄土制成, 其几何尺寸为: 直径 101 mm, 工作段长度 370 mm。试验时控制温度和转速。试样用配好一定含水量的土, 按计划的干容重分层装模夯实, 经过低温冻结, 脱模等工序, 最后在给定恒温环境中恒温 24 小时, 使土中温度和试验温度一致。试验开始前, 先将试样安装在扭转试验机上, 然后设定好转速及数采仪, 即可开始试验。试验时同时观察试样受扭情况及扭矩的变化过程, 到试样表面明显出现裂纹, 扭矩也开始衰退时即告试验结束。

试验过程中, 试验温度均由日本智能温控仪控制, 其精度为 ±0.1℃。所有试验在吴忠生产的 NJ-100B 扭转试验机上完成。研究中, 为了方便起见, 我们采用了实心圆柱体冻土试样进行试验 (图 1), 其抗剪强度、剪切应变和剪切弹性模量的计算, 采用了经典材料力学 (铁摩辛柯等, 1978) 的分析原理和计算方法 (图 1, 2)。从图中可知剪应变的大小应等于:

$$\gamma = r\varphi / L = r\theta \quad (1)$$

①本文于1994年3月29日收到; 6月3日改回。

式中： $\theta$  代表单位长度上的扭转角； $L$  为试样的有效长度； $r$  为圆柱体半径； $\varphi$  为总的扭转角。按弹性材料计算，其剪应力值为：

$$\tau = G\gamma = Gr\theta \quad (2)$$

式中： $\tau$  为剪切强度 (MPa)； $G$  为剪切模量 (MPa)。

图 2 给出了试样的破坏应力图。试验时观察到的破坏形式一般都顺着与轴线  $45^\circ$  的方向产生螺旋状拉伸破坏。下面我们来分析扭矩和其引起的扭转角之间的关系，从图 1, 2 中所示剪应力的合力必须与总扭矩为静力等效。因此，总扭矩为：

$$T = \int G\theta\rho^2 dA = G\theta \int \rho^2 dA = G\theta J \quad (3)$$

式中： $T$  为扭矩 (Nm)； $J$  为圆杆横截面的极惯性矩  $J = \int \rho^2 dA$ 。对于半径为  $r$  的圆杆，其极惯性矩为：

$$J = \pi r^4 / 2 = 1.57r^4 \quad (4)$$

用方程(3)，我们得：

$$\theta = T / GJ \quad (5)$$

那么，总的扭转角  $\varphi$  为：

$$\varphi = TL / GJ \quad (6)$$

在上式中，如果试件上由于所给扭矩而产生的扭转角已经测得的话，那么冻土的剪切弹性模量的大小就可根据方程(6)容易地计算出来。将方程(5)中的  $\theta$  代入方程(2)，我们便得到用于计算实心圆杆试样受扭时的最大剪应力方程：

$$\tau_{\max} = Tr / J \quad (7)$$

此方程表明，最大剪应力与作用的扭矩成正比，而与其横截面的极惯性矩成反比。

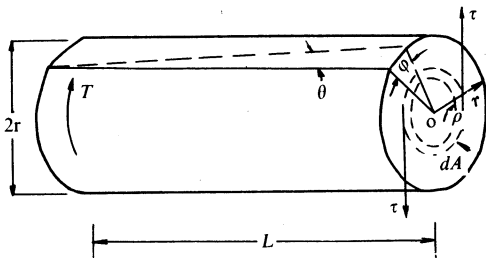


图 1 受纯扭之圆杆

Fig. 1 Torsion of a solid bar

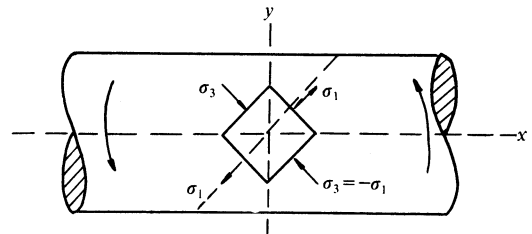


图 2 圆杆受扭时应力状态

Fig. 2 State of stress in torsion

## 2 试验结果及讨论

扭转荷载下冻土强度在不同温度及不同转速条件下的实验结果汇总在表 1 中。图 3, 4 给出了扭剪强度随温度和破坏剪应变变化的特性曲线。扭剪强度与扭转速率和破坏时间的变化曲线在图 5, 6 中给出，图中的点表示数据，线是计算值。从图 3, 5 和图 6 中我们不难看出：冻土的扭剪强度与许多因素有关（温度、扭速及荷载作用时间），是一个不少于三个变量的函数：

$$\tau = f(\theta, \omega, t_f) \quad (8)$$

式中:  $\theta$  为负温;  $\omega$  为转速;  $t_f$  为破坏时间。

表 1 冻结黄土的扭转试验结果

Table 1 Torsion test results of frozen loess

试样编号	温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )	转速 ( $^{\circ}/\text{min}$ )	扭矩 (Nm)	剪应力 (MPa)	扭角 ( $^{\circ}$ )	破坏时间 (s)	剪应变 (rad, $10^2$ )
HT-1	-0.3	120	158	0.78	43.5	22	10.36
HT-2	-1	120	205	1.01	38	19	9.05
HT-3	-2	120	282	1.39	36	19	8.57
HT-4	-3	120	345	1.71	32	16	7.62
HT-5	-4	120	419	2.07	26	11	6.19
HT-6	-5	120	470	2.32	23	21	5.48
HT-7	-7	120	605	2.99	14	7	3.33
HT-8	-5	0.5	259	1.28		3490	
HT-9	-5	1	266	1.32		570	
HT-10	-5	10	316	1.56	18	92	4.29
HT-11	-5	120	470	2.32	23	21	5.48
HT-12	-5	360	576	2.85	80	12	19.05

注:  $W=21.27\%$ ,  $\gamma_d=1.6\text{g}/\text{cm}^3$ 。

## 2.1 温度对扭剪强度的影响

在不同温度条件下冻土的扭剪强度的测定结果表明(图3), 冻土的扭剪强度服从其它冻土强度(如抗压、拉伸和剪切等)的响应规律, 即扭剪强度随负温的降低而增大。当然, 还决定于冻土的成分、含水量及其构造等。这种现象可解释为, 在作者所研究的温度范围内( $-0.3\text{--} -7^{\circ}\text{C}$ )正好是孔隙水的相变明显区。随着负温的降低土中大部分孔隙水很快冻结, 这时冰的胶结作用对冻土强度的提高贡献最大, 因而其强度的增大与负温呈直线关系。这个结果和其他研究者所得出的曲线是一致的。图3得到的关系

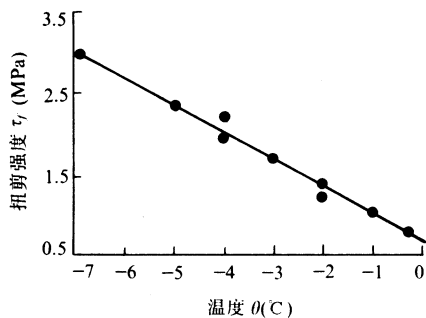


图 3 扭剪强度随温度的关系曲线

Fig. 3 Shear strength-temperature diagram

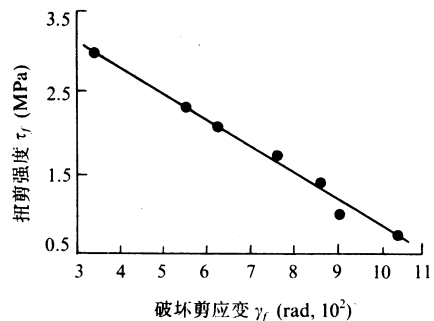


图 4 扭剪强度随破坏剪应变的关系曲线

Fig. 4 Shear strength-strain to fracture

可用线性方程表示如下:

$$\tau_{\max} = A(-\theta) + B \quad (9)$$

式中:  $\tau$  为最大扭剪强度(MPa);  $\theta$  为温度;  $A$ ,  $B$  为实验常数。本式中  $A$ ,  $B$  值分别为  $-66.54$  和  $142.88$ ,  $R=0.998$ 。

根据帕斯卡雅的研究(崔托维奇等, 1985), 对温度敏感性很大的冻土的抗剪强度, 在正温时只有  $\tau=0.1$  MPa, 而在  $\theta=-0.8^{\circ}\text{C}$  时,  $\tau=0.65$  MPa;  $-2^{\circ}\text{C}$  时,  $\tau=0.68$  MPa。

## 2.2 破坏剪应变对扭剪强度的影响

图 4 是一组不同温度条件之扭剪强度与破坏剪应变之间的变化关系。图中可见为转速  $120^{\circ}/\text{min}$  时, 扭剪强度随破坏剪应变的增大而直线下降, 这种现象说明了冻土的“高温”塑性特征。产生随温度升高, 强度变小, 扭角(应变)增大的现象。其线性关系描述为:

$$\tau_{\max} = A\gamma_f + B \quad (10)$$

式中:  $\gamma_f$  为破坏剪应变(rad)。本式中  $A$ ,  $B$  值分别为  $196.58$  和  $214.29$ ,  $R=0.999$ 。

## 2.3 扭转速率对扭剪强度的影响

在评价冻土在各种应力(拉、压、剪、扭)下的强度时, 冻土的瞬时(最大强度值)强度具有特别重要的意义。扭转试验的结果表明, 转速增加时, 扭矩增大, 两者呈非线性关系(图 5)。其关系曲线可用抛物方程表示如下:

$$T = A\omega^{1/3} + B \quad (11)$$

式中:  $\omega$  为试验机转速(rad/min)。本式中  $A$ ,  $B$  值分别为  $3.87 \times 10^{-3}$  和  $4.74 \times 10^{-2}$ ,  $R=0.9999$ 。

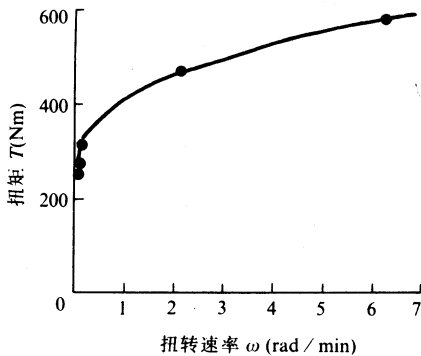


图 5 扭矩与扭转速率的关系曲线  
Fig. 5 Torque-twisting rates diagram

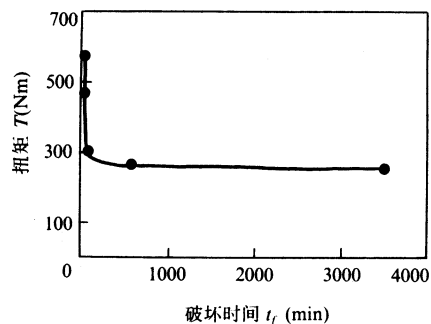


图 6 扭矩与破坏时间的关系曲线  
Fig. 6 Torque-time to fracture diagram

## 2.4 破坏时间对扭转强度的影响

从表 1 中知道, 转速一定时, 冻土的剪切破坏时间随温度的变化不明显。温度高于

-5℃时, 由于冻土的塑性特性明显, 因此破坏时间相对长一些。低于-5℃时, 其破坏时间只有几秒钟, 此时开始表现出冻土的低温脆性断裂特性。同时图 6 还表明, 破坏时间在 50 秒钟以内, 其强度随破坏时间的延长而剧烈减小。1—10min 之间时, 表现出其强度变化的非线性特征。以后随着破坏时间进一步延长, 其强度松弛到一个定值, 不再有明显的变化, 这个强度相当于冻土之长期强度值。其关系曲线可用下式来描述:

$$T = t_f / (At_f + B) \quad (12)$$

式中:  $t_f$  为破坏时间(min)。本式中  $A$ ,  $B$  值分别为-886.16 和 824.37,  $R=0.99$ 。

综上所述, 可得到以下结论:

(1)冻土的扭剪强度与其抗拉、抗剪和抗压强度的规律一样, 同样受温度、扭速(应变速率)和荷载作用时间的影响。

(2)在土质和含水量一定时, 冻土的扭剪强度具有随温度降低而增大的线性关系。温度高于-5℃时, 冻土的塑性特征明显, 低于-5℃时, 开始出现低温脆性破坏特征。

(3)采用传统的扭转试验方法, 可获得一批规律性很好的冻土扭剪强度特性资料。关于本项试验与其它试验结果的对比分析, 作者将另文讨论。

### 参 考 文 献

- 铁摩辛柯 S, 盖尔著 (胡人礼译), 1978. 材料力学. 北京: 科学出版社, 95, 100  
 崔托维奇 H.A. 著, (朱元林、张长庆译), 1985. 冻土力学. 北京: 科学出版社, 160—178

## Strength Characteristics of Frozen Soil under Torsional Loading

Peng Wanwei<sup>1</sup>, Zhang Jianming<sup>1</sup>, Zhang Changqing<sup>1</sup>, Kang Guojin<sup>2</sup>,  
 Wang Zhengui<sup>2</sup> and Peng Rui<sup>2</sup>

(1 State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, LIGG, CAS, 730000; 2 Lanzhou University, 730000)

### Abstract

A series of torsion test data of frozen loess have been analyzed in this paper. The results indicate that the torsional strength is the same as that of the compressive or tensile one. The strength increases with lowering of temperature and decreasing of failure strain. Also it increases nonlinearly with increasing of rotative speed. The regressive equations relating to influence factors are presented in this paper.

**Key words:** frozen loess, torsion test, strength characteristics