

# 两淮地区深厚粘土人工冻土力学特性研究

杨 平\*

(建筑工程系)

**摘 要** 本文根据两淮地区近十个井筒的人工冻土力学试验,归纳总结出该地区深部冻粘土的强度和变形一般特性,为今后在该地区进行冻结法施工井筒,提供了重要依据。

**主题词** 人造冻土 强度 蠕变 温度

**分类号** TD262.11

## 1 引言

随着两淮煤田的开发,井筒所穿表土层越来越厚,冻结法凿井深度也越来越深,深厚表土冻结法凿井的技术关键是合理进行冻结设计,防止冻结管断裂,而冻结粘土的力学特性如何,直接关系到冻结设计。根据近年来对两淮几对矿井深部冻粘土的力学特性研究,总结归纳出其强度和变形的一般特性,对两淮煤田的进一步开发具有十分重要的意义。

## 2 深部粘土常规土工特性

常规土工特性内容包括:天然含水量、天然容重、土颗粒比重、干容重、液限、塑限、塑性指数和膨胀性等。两淮几个矿井深部粘土常规土工特性见表1。

由表知:各矿深部粘土层容重除个别情况外,一般随含水量的增大而减少;一般其含水量 $\omega < \omega_p$ ,绝大多数干容重 $\gamma_d > 15 \text{ kN/m}^3$ 属固结性粘土;液限多大于40%塑性指数大于17,且平均膨胀量为17.43%,说明深部粘土属膨胀性粘土。

## 3 强度特性

这里所述冻土强度均为瞬时抗压强度所得,其加载方式为应力增加速率控制式,荷载增加速率的确定,由加载 $30 \pm 5$ 秒时试样达极限抗压强度来定(煤科院建议方法),即先用一试样初测一下其强度,再按 $30 \pm 5$ 秒加载获得其强度来确定应力增加速率,确保所有试件在加载30秒左右破坏。

\* 杨平,男,31岁,硕士,讲师,曾发表“冻结壁三蠕流变试验研究”等论文十几篇

### 3.1 应力—应变关系

应力应变关系是在进行单轴瞬时抗压强度试验的同时,采集一系列应力所对应的试件轴向变形值,并通过变换所得。

表1 两淮地区深部粘土常规土工特性

矿名	取土深度 (m)	湿容重 $\gamma$ (KN/m <sup>3</sup> )	含水量 $W$ (%)	干容重 $\gamma_d$ (KN/m <sup>3</sup> )	土粒比重 $G_s$	液限 $W_L$ (%)	塑限 $I_p$ (%)	塑性指数 $I_p$ (%)	膨胀量 $V_H$ (%)
谢桥矿	212	20.00	20.8	16.56	2.70	54.6	29.8	24.8	27.5
	216	20.50	20.9	16.96	2.68	37.0	22.6	15.2	18.0
	226	20.07	21.2	16.56	2.79	65.9	36.2	29.7	19.9
	260	19.94	23.3	16.17	2.76	51.6	32.6	19.0	41
潘三矿	154	22.90	32.4	17.3		50.6	31.1	19.5	
	253	19.2	32.2	14.5		70.3	38.5	31.8	9.2~25
	277	20.4	10.4	17.5		44.3	22.9	21.4	$\gamma_d$ 大取
	388.7	20.6	23.4	16.7		67.4	37.16	30.3	上限,反之取下限
	317	21.0	18.4	17.8		35.8	15.6	20.2	
	327.7	20.5	21.0	16.9		44.3	25.9	18.4	
祁南矿	169.3	19.40	30.16	14.9	2.74	74.78	37.65	37.13	32.22
	228.8	21.80	15.04	18.9	2.72	46.93	23.26	23.67	17.06
	253.3	21.2	17.55	18.0	2.74	56.6	31.95	24.65	8.36
	269.7	19.80	26.68	15.6	2.74	77.53	44.30	33.23	21.44
潘二矿	301.5	19.10	29.95	14.7	2.69	82.37	42.04	40.33	17.69
	175	19.98	24.62	16.03		45.5	25.8	19.7	
	210	20.24	21.35	16.68		46.5	28.5	18.0	
陈四楼矿	157.0	22.2	27.12	17.46	2.75	40.76	29.74	19.05	12
	219.0	20.0	28.73	15.54	2.75	53.50	26.80	26.70	2.7
	270.0	20.7	22.5	16.90	2.74	54.51	30.98	23.53	27.8
	294	20.5	27.06	16.13	2.71	34.04	15.11	18.93	1.4
	309	21.0	22.03	17.21	2.74	58.96	30.66	28.30	3.8
名指标范围	315	20.6	17.48	17.53	2.76	38.26	17.19	21.07	10.7
		19.1~22.9	10.4~32.4	14.5~18.9	2.68~2.79	34.04~82.37	15.11~44.30	15.2~40.33	1.4~41
	平均值	20.51	23.23	16.63	2.73	53.57	29.41	24.55	17.43

在 $-5\sim-25^{\circ}\text{C}$ 下,冻粘土单轴抗压强度的应力应变关系属非线性的,这种非线性随温度变化而异,可用下述方程描述:

$$\varepsilon = f(T) \cdot \sigma^{m(T)} \quad (1)$$

式中 $f(T)$ ——与温度有关的参数,一般

$$f(T) = \frac{K_1}{(T+1)K_2};$$

$m(T)$ ——与温度有关的应力参数,  $m(T) = K_3 + K_4 + K_4 \cdot |T|$

谢桥粘土  $K_1 = 0.1658, K_2 = 1.338,$   
 $K_3 = 2.11, K_4 = -0.03175$

潘二粘土  $K_1 = 0.314, K_2 = 1.401,$   
 $K_3 = 2.10, K_4 = -0.0353$

祁南粘土  $K_1 = 0.103, K_2 = 1.51,$   
 $K_3 = 1.98, K_4 = -0.0413$

可见,随着温度降低, $m(T)$ 值接近于1,说明冻结粘土应力—应变关系随温度降低而趋于线性。

### 3.2 单轴瞬时抗压强度

两淮地区深部冻粘土的单轴抗压强度温度基本成线性关系(图1),即

$$\sigma_c = a + b \cdot |T| \quad (2)$$

式中 $a, b$ ——回归系数,见表2:

由图表知,祁南、陈四楼淮北地区冻粘土强度高于谢桥、潘二、潘三淮南地区的,两淮地区冻粘土单轴抗压强度受温度的影响系数为 $0.208\sim 0.479$ ,平均为 $0.363$ ,即降温 $10^{\circ}\text{C}$ 冻土抗压强度提高 $3.63\text{MPa}$

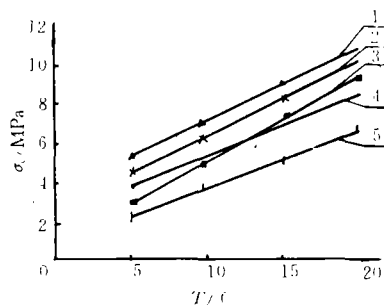
### 3.3 弹性模量

由于其应力—应变关系为非线性的,因此,不可能获得“严格”含义的弹模,利用工程常用方法,取抗压强度 $\sigma_c$ 之半与之相应 $\varepsilon_{1/2}$ 之比求得所谓弹模 $E$ ,即 $E = \frac{\sigma_c/2}{\varepsilon_{1/2}}$ ,发现冻土弹量也随温度降低而基本成线性增大(图2),即

$$E = a' + b' |T| \quad (3)$$

式中 $a', b'$ ——回归系数,其值见表3

图表表明,谢桥冻粘土弹模受温度影响最大,其它矿的温度影响系数基本一致,且在



1—陈四楼 2—祁南  
3—潘三 4—谢桥 5—潘二  
图1 单轴抗压强度与温度关系

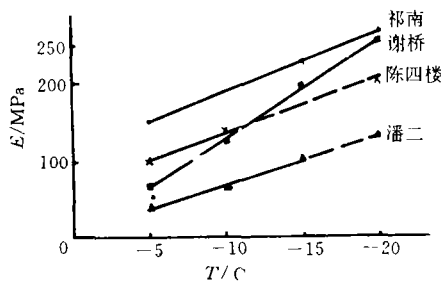


图2 冻土弹模与负温关系

冻结平均温度( $-10^{\circ}\text{C}$ )附近,淮北冻粘土弹模高于淮南冻粘土弹模。

表 2  $a, b$  参数值

矿名	祁南	谢 桥		潘 三		潘 二		陈四楼	
		范围	平均	范围	平均	范围	平均	范围	平均
$a$	2.5	0.51~3.14	2.125	0.3~1.5	0.8	-0.18~1.19	0.505	1.96~4.52	3.47
$b$	0.385	0.406~0.269	0.321	0.34~0.46	0.43	0.41~0.208	0.309	0.299~0.479	0.372

### 3.4 瞬时抗剪强度

由三轴瞬时抗压强度试验获悉;不同负温条件下剪应力和正应力服从摩尔——库仑准则:

$$\tau = C(T) + \sigma \cdot \operatorname{tg} \varnothing(T) \quad (4)$$

式中 $\tau$ ——剪应力,MPa

$C(T)$ ——与温度有关的内聚力,MPa

$\varnothing(T)$ ——与温度有关的内摩擦角,度

表 3  $a', b'$  回归系数

矿 名	祁 南	陈 四 楼	谢 桥	潘 二
$a'$	118	65	3	2.12
$b'$	7.35	7.105	12.8	6.566
适用条件	$-20 \leq T \leq -6.5^{\circ}\text{C}$	$-20 \leq T \leq -5^{\circ}\text{C}$	$-20 \leq T \leq -5^{\circ}\text{C}$	$-20 \leq T \leq -5^{\circ}\text{C}$

试验发现内聚力 $C$ 与温度亦有较好的线性关系 $C(T) = C_1 + C_2|T|$ ,而 $\varnothing$ 值一般在 $T < -6.5^{\circ}\text{C}$ 后受温度影响很小或基本不受温度影响。 $C_1, C_2, \varnothing$ 具体值见表 4

表 4  $C_1, C_2, \varnothing$ 值一览表

矿名	谢桥	祁南	潘二
$C_1$	0.0633~0.187	0.0797	0~0.083~0.257
$C_2$	0.0953~0.0773	0.117	0.112~0.121
$\varnothing$	8~10 度	8~10 度	16~20 度
试验条件	$-25 \leq T \leq -5^{\circ}\text{C}$	$-20 \leq T \leq -6.5^{\circ}\text{C}$	$-15 \leq T \leq -5^{\circ}\text{C}$

可见冻结粘土的抗剪强度随温度降低而呈线性增长,故可通过低温冻结增加冻土抗剪强度。

## 4 变形特性

两淮地区冻结粘土在单轴和三轴试验下具有典型的蠕变特征,当荷载较小时( $P < 0.1\sigma_c$ )为稳定型蠕变,荷载较大时( $P < 0.3\sigma_c$ )为不稳定型蠕变,工程中最关心的是不稳定蠕变特征,国内、外大量的研究表明,不稳定型蠕变曲线可用下列函数描述<sup>[1][2][3]</sup>

$$f(\epsilon) = A(T) \cdot H(\tau) \cdot \varnothing \cdot (t) \quad (5)$$

式中:  $f(\epsilon)$ ——应变函数

$A(T)$ ——与土质温度有关的系数,  $A(T) = \frac{A_0}{(T+1)^a}$

$H(\tau)$ ——剪应力强度函数

$\varnothing(t)$ ——时间函数

$A_0, \alpha$ ——土质系数

$T$ ——冻土温度,取绝对值,℃

对于单轴蠕变试验  $f(\epsilon) = \epsilon_c, H(\tau) = \sigma^B, \varnothing(t) = t^c$ ,

$$\text{即} \quad \epsilon_c = \frac{A_0}{(T+1)^a} \cdot \sigma^B \cdot t^c \quad (6)$$

对于三轴蠕变试验  $f(\epsilon) = \gamma_c, H(\tau) = \tau^B, \varnothing(t) = t^c$

$$\text{即} \quad \gamma_c = \frac{A'_0}{(T+1)^a} \cdot \tau^B \cdot t^c \quad (7)$$

式中:  $\epsilon_c$ ——单轴蠕变轴向应变

$\sigma$ ——单轴蠕变所受应力,MPa

$\gamma_c$ ——三轴蠕变剪应变强度

$\tau$ ——三轴蠕变剪应力强度,MPa

$t$ ——加载时间,小时

$A_0, \alpha, B, c$ ——试验系数

两淮地区冻结粘土不稳定型蠕变特征经回归分析,也可很好地用以上(6)、(7)式描述,其回归相关系数均大于 0.98,回归误差小于 5%。其具体参数如表 5 所示,淮南地区冻粘土  $A_0 = 8 \sim 40.62, B = 1.47 \sim 1.88, c = 0.24 \sim 0.44, \alpha = 2.0 \sim 2.8$ ; 淮北地区冻粘土  $A_0 = 1.85 \sim 19.09, B = 1.56 \sim 1.58, C = 0.24 \sim 0.307, \alpha = 1.84 \sim 2.64$ 。

各矿 -10℃ 冻粘土受纵向应力  $P = 1.5\text{MPa}$  时的蠕变曲线见图 3,图中表明:淮南地区冻粘土变形高于淮北地区冻粘土的变形,潘二、潘三冻粘土蠕变变形量分别是陈四楼

的 4 倍和 3 倍,因此,潘谢矿区冻结凿井断管事例多于淮北地区是可以理解的。另外淮南地区冻粘土  $\alpha$  系数大于淮北冻粘土,说明降低温度,对减小淮南地区冻粘土变形更明显。

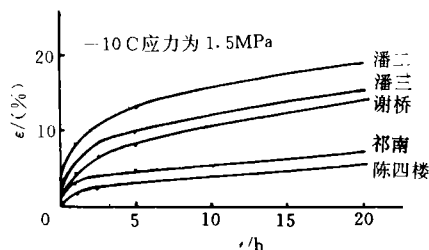


图 3 各矿 -10℃ 冻粘土蠕变曲线比较

## 5 结语

- ① 两淮地区深部粘土多属固结性、膨胀性粘土,一般含水量  $\omega < \omega_p$ 。
- ② 深部冻结粘土的应力—应变关系为非线性的,随温度降低其非线性渐趋线性。
- ③ 深部冻粘土的抗压强度、弹性模量和抗剪强度均随温度降低近似呈线性增长,而且淮北地区冻粘土强度、弹模均高于淮南地区的。
- ④ 深部冻粘土的蠕变,在荷载截较大时( $p > 0.3\sigma_c$ )呈不稳定型蠕变,且淮北地区冻粘土蠕变形比淮南地区小 2~4 倍。
- ⑤ 两淮地区冻粘土强度和变形参数值可参见表 1~表 5 选取。
- ⑥ 由于淮南地区冻粘土与淮北地区相比,强度小,变形大,因此在淮南地区进行深井冻结凿井应更加重视冻土力学特性的研究。以防冻结管断裂。

表 5 两淮地区冻粘土蠕变参数一览表

参 数	谢 桥	潘 二	潘 三	祁 南	陈 四 楼	
$A_0$	单轴	40.62	26.31	8	19.09	1.85
	三轴	27.23				
$B$	单轴	1.47	1.49~1.88	1.5	1.561	1.58
	三轴	1.47				
$c$	单轴	0.29~0.44	0.24~0.29	0.3	0.24~0.26	0.307
	三轴	0.29~0.44				
$a$	单轴	2.80	2.39	2.00	2.64	1.84
	三轴	2.80				
试验 温度(℃)	$-15\leq T\leq-5$	$-15\leq T\leq-5$	不样	$-15\leq T\leq-6.5$	$-15\leq T\leq-5$	

来稿日期:94—10—11

## 参 考 文 献

- 1 Ladanye B. 冻土蠕变的一个工程理论. 世界冰川冻土, 1982(1):61
- 2 陈湘生. 我国人工冻土基本力学特征. 矿山建设理论与实践. 中国矿大出版社, 1994:181
- 3 杨平. 深井冻结壁变形计算的理论分析. 淮南矿业学院学报, 1994(2):26~31
- 4 兰州冰川冻土所. 淮南潘三东风井人工冻结壁的物理. 热学、力学性质及其温度力学场研究, 1983: 23~124

## Study on mechanical property of artificial deeply frozen soil in the area of Huainan-Huaibei

Yang Ping

(Dept. of Construction Engineering)

### Abstract

The property of strength and creep of deeply frozen clay is deduced according to mechanical tests on frozen clay of several shafts in the area of Huainan-Huaibei, which offers an important foundation for the work of building shafts by freezing.

**Subject terms:** artificial frozen soil; strength; creep; temperature

(上接第 8 页)

## Study on permeability of aquifer in shallow-loose-layer under Huainan City

Gui Herong Chen Zhaoyan Sui Chengli Qian Moshi

(Dept. of Resources and Environment Engineering)

(Environment office of Huainan City)

### Abstract

Based on the analysis of its geological and hydrogeological conditions, the paper, by using the results of the single well pumping tests and various methods to calculate the permeability coefficient  $K$  at different spot in the aquifer, obtains the permeability feature of the aquifer in shallow-loose-layer under Huainan City and provides the requisite parameter for the evaluation of the resource of the groundwater in the aquifer.

**Subject terms:** aquifers; pumping test; drawdown; water-level recovery; permeability