

人工冻结黏土可钻性试验与分析

Experiment and analysis on drillability of artificially frozen clay

马芹永, 蔡美峰

(北京科技大学 土木与环境工程学院, 北京 100083)

摘要: 以冻结黏土为试样土质, 进行了 -3 、 -5 、 -7 、 -10 、 -12 、 -15 、 -17 、 -19 $^{\circ}\text{C}$ 等温度的可钻性试验, 测定了冻土的凿碎比功, 对试验结果进行回归分析, 较好地建立了冻土可钻性、凿入深度与温度的关系。试验表明, 凿入深度随着温度的降低而减小, 凿碎比功随着温度的降低而逐渐增大, 在同一温度下凿碎比功在开始钻进 10 周增加较大, 后 10 周增加不大, 说明随着温度的降低, 冻结黏土的硬度越来越大, 钻进深度越来越浅, 钻进难度越来越大, 抵抗钻具的能力越来越强。

关键词: 冻结黏土; 可钻性; 凿碎比功; 凿入深度; 试验; 温度

中图分类号: P 642.14; TU 445

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2003)05-0634-04

作者简介: 马芹永(1964-), 男, 安徽宿州人, 安徽理工大学土木工程系教授、副主任, 硕士生导师, 现为北京科技大学土木与环境工程学院博士生, 主要从事冻土力学与工程方面的研究。

MA Qir-yong, CAI Mei-feng

(School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Specific chiseling work of the frozen clay are conducted at different temperature of -3 、 -5 、 -7 、 -10 、 -12 、 -15 、 -17 and -19 $^{\circ}\text{C}$. The relations between specific chiseling work, chiseling depth and temperature have been regressively formulated. The experiment indicates that the drilling depth will gradually increase with the decrease of temperature. At the same temperature the specific chiseling work quickly increases at the first ten cycles, and the increase becomes slow at the last ten cycles. With the decrease of temperature the frozen soil becomes harder, and the chiseling depth is shallower, i. e. the drilling is more difficult, and the drillability is stronger.

Key words: frozen clay; drillability; specific chiseling work; chiseling depth; experiment; temperature

0 概 述*

在多年冻土地区, 许多工程如房屋和道路铁路建设、金矿煤矿的开发、油田油管的铺设、水利水电建设以及军事工程等都需要对冻土进行开挖。由于缺乏可以利用的有关冻土可钻性方面的试验资料和理论指导, 工程设计者不能有效地在保护环境条件下进行冻土施工作业。另外, 在富水的深表土层中煤矿建设、城市地下工程及桥梁工程等采用冻结法施工也存在同样问题^[1,2]。冻结法是一种安全、快速的施工方法, 冻土可钻性研究的应用前景非常广阔。冻土的可钻性是表示在钻进过程中冻土对钻具的抵抗能力, 反映了冻土钻进的难易程度。寒区工程、人工冻结工程都存在着冻土的钻眼问题, 研究冻土可钻性的主要目的在于寻求合理的钻眼指标, 以便为钻头选型提供可靠的依据, 达到使用最小的能量消耗, 获得最佳的破碎效果。

中国科学院冻土工程国家重点实验室吴紫汪、朱元林、马巍、何平等进行了冻土的动、静力学特性的研究, 得出有重要价值的成果^[3,4]; 俞祁浩等对冻土的冲击韧度进行了试验研究^[5], 得出试样尺寸及缺口深度对冲击韧度具有明显影响; 张招祥、余群等进行了冻土切削力学特性的研究^[6]。在国外, H. A. 崔托维奇和

C. C. 维亚洛夫对冻土力学特性作了开创性的研究^[7], 对冻土蠕变特性、松弛特性以及在低应变率下冻土变形和强度特性进行了研究; 其他国家对于冻土可钻性研究尚未见到有关资料。

寒区工程及人工冻结工程施工中, 冻土的含水率、密度一般是一定的, 温度则是变化的, 为使试验结果对施工有指导意义, 进行同一密度、同一含水率在不同温度下的可钻性试验, 观察凿碎比功、凿入深度随温度的变化, 从而得到不同温度下冻土可钻性的难易程度。

1 试验土质

在冻结砂砾或卵石层、冻结风化带及冻结基岩中钻眼与在基岩段普通法钻眼基本类似, 但对在冻结黏土层钻眼问题尚未解决。冻土强度与颗粒组成、含水率和温度有关, 并且随温度的降低而增高, 所以在低温条件下破碎冻土比较困难, 由于工程施工中遇到黏土最难钻眼, 所以选择安徽某矿井筒 219.93~224.82 m 段的冻结黏土为试验土质, 其干容重为 1710 kg/m^3 , 含水率为 21.42%, 黏土的颗粒组成见表 1 所示。

* 基金项目: 安徽省优秀青年科技基金(2001-28)、安徽省教育厅自然科学基金(99j0198)联合资助项目
收稿日期: 2002-10-10

表1 黏土颗粒分析

Table 1 The composition of the frozen clay

粒径/mm	颗粒含量/%	粒径/mm	颗粒含量/%
0.0~0.002	75.7	0.01~0.05	11.7
0.002~0.005	5.2	0.05~0.1	2.2
0.005~0.01	4.4	>0.1	0.8

2 试验冻结温度

冻结温度是判别土是否处于冻结状态的指标,纯水的结冰温度为 0°C ,土中水分由于受到土颗粒表面能的束缚且含有化学物质,其冻结温度低于 0°C 。土的冻结温度主要取决于颗粒的分散度、土中水的化学成分和外加载荷^[1~3]。施工现场人工冻结土的温度一般为 $-10^{\circ}\text{C} \sim -12^{\circ}\text{C}$,为使实验结果对实际工程施工有指导意义,选择一系列温度水平,即 -3°C 、 -5°C 、 -7°C 、 -10°C 、 -12°C 、 -15°C 和 -19°C 进行冻土可钻性实验。

3 可钻性试验

3.1 试样制作

土样制作是试验成败的关键,所以必须严格按照规范进行操作^[8]:首先对土样的颜色、气味、夹杂物和土类及均匀程度进行描述,然后用碎土器将土样碾散,拌和均匀,取代表性土样测定含水率,配制成与原状土密度和含水率相同的冻土试样。将配制好的土样,按照模具不同高度分层装样,模具尺寸 $200\text{ mm} \times 200\text{ mm} \times 200\text{ mm}$,分5次装入,层与层之间必须进行刮毛处理。将制作好的冻土试样放入低温箱快速冻结,冻结时间不低于24 h,然后在规定温度下恒温24 h,使冻土内温度均匀,恒温设备的控制精度为 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 。

3.2 试验设备

测定冻土的可钻性,所用仪器应和实际钻眼有着相同的破碎冻土本质,这样测定的可钻性指标才不会因时、因地、因人而异,才可以提供一个客观的、较为科学的指标。利用凿碎比功来反映冻土可钻性,除了其破碎实质和冲击式凿碎冻土十分接近以外,这种测定还容易利用轻便的工具得到很大的荷载,可以钻进各种硬度的冻土,而其冲击功的大小,非常容易控制。参照岩石可钻性的研究^[9~12],试验设备选为东北大学根据冲击式凿岩工具原理而研制出的凿测器。凿测器是由钎头、承击台、导向杆、落锤、手把等部分构成,落锤质量4 kg,落高1 m,单次冲击功39.2 J,每冲击一次手把转动角度 15° 。钎头为一字形,直径40 mm,嵌有YG-11C的KO13型硬质合金,刃角 110° 。另外,准备钢尺、游标卡尺及温度计等测量工具。

3.3 试验方法

试验在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的低温室进行,首先对试样进行固定,制作刻度盘,中间预留直径60 mm的圆孔,一周等分为24份,并固定于试件表面,见图1。

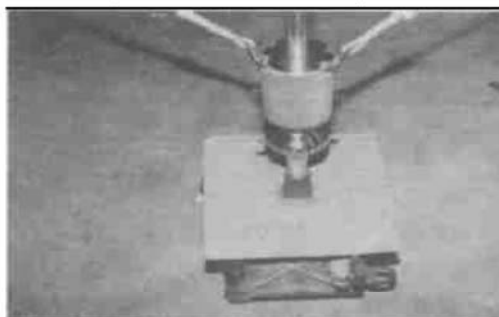


图1 冻土试样及刻度盘

Fig. 1 Frozen clay sample and graduated disk

开始试验时,要换上新钎头或修磨好的钎头,将凿测器直立在眼窝上,每冲击一次,手把约转 15° ,保持每转5周后,清除眼底的冻土碎块及碎屑。冲击120次(5周)240次(10周)360次(15周)480次(20周)后,分别量取眼深,用深度游标卡尺在左、中、右3点量取眼深,读数到0.01 mm,并测量冻土试件的平整度,然后取平均值作为眼深,如图2所示。

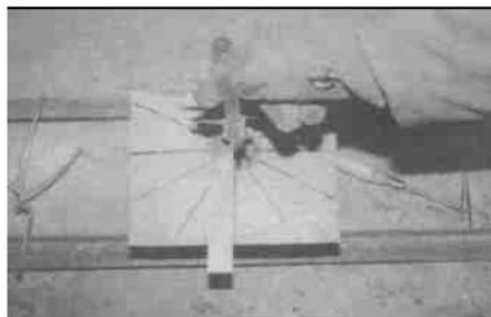


图2 钻进深度的量取

Fig. 2 Measuring of the drilling depth

利用凿入深度计算凿碎比功^[9]:

$$a = \frac{A}{V} = \frac{NA_0}{\frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot \frac{H}{10}} \quad (1)$$

式中 a 为凿碎比功, J/cm^3 ; N 为冲击次数,分别为120, 240, 360, 480次; A_0 为每次冲击功, 39.2 J; d 为凿孔直径, 4.1 cm; H 为凿眼净深, mm。

最后,量取凿过480次之后钎头刃的磨钝宽度。用读数显微镜量得离钎头刃外侧4 mm处刃的宽度,两端各量一次,取平均值。

试验过程中的技术要求为:落锤沿导向杆的行程为1 m,正负偏差不超过0.2%;凿测时导向杆应尽量保持垂直,偏斜不应超过 5° ;导向杆发生纵向弯曲时要及时校直,应始终保持落锤能顺利滑行。

4 试验结果分析

试验测试结果数据如表 2 和表 3 所示。根据测得的试验数据, 绘出温度与凿入深度和凿碎比功的关系曲线, 如图 3 所示。

表 2 凿入深度

Table 2 Chiseling depth

温度 / °C	凿入深度 / mm			
	5 周	10 周	15 周	20 周
-3	94.07			
-5	46.40	71.73	99.73	122.2
-7	39.53	67.17	93.57	116.57
-10	32.93	48.80	66.37	86.27
-12	25.30	41.23	58.20	74.27
-15	24.30	39.50	53.30	67.17
-17	24.10	34.07	45.07	57.50
-19	17.67	29.07	43.47	56.77

表 3 凿碎比功

Table 3 Specific chiseling work

温度 / °C	凿碎比功 / (J·cm ⁻³)			
	5 周	10 周	15 周	20 周
-3	37.88			
-5	76.79	99.34	107.18	116.63
-7	90.13	106.09	114.24	122.26
-10	108.20	146.02	161.05	165.20
-12	140.83	172.84	183.66	191.89
-15	146.63	180.41	200.54	212.18
-17	147.84	209.16	237.16	247.86
-19	201.64	245.13	245.89	251.05

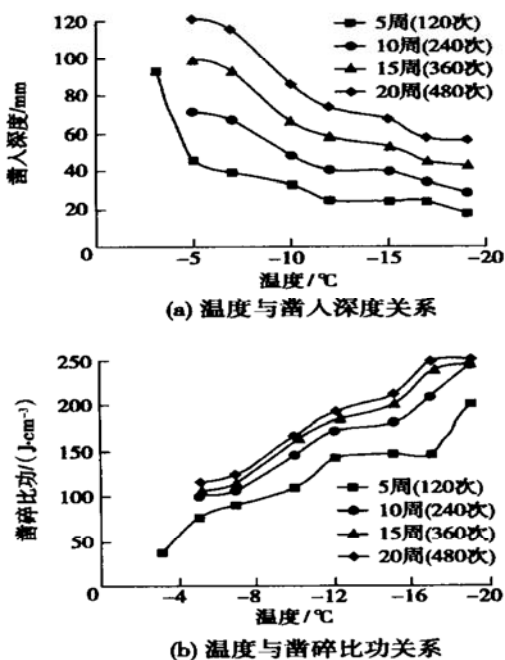


图 3 温度与凿入深度和凿碎比功关系

Fig. 3 Relationship between temperature and chiseling depth and specific chiseling work

从以上关系图可以看出, 凿入深度随着温度的降低而减小, 凿碎比功随着温度的降低而逐渐增大。同一温度下的凿入深度几乎是均匀增加, 而同一温度下的凿碎比功却是在开始的 10 周增加较大, 而在后 10 周增加值不大。5 周、10 周、15 周及 20 周的凿碎比功与温度的回归方程分别为

$$\begin{aligned} a &= -0.074t^2 - 12.269|t| + 50.347, R = 0.990 \\ a &= -0.068t^2 - 12.123|t| + 42.968, R = 0.991 \\ a &= 0.144t^2 - 6.622|t| + 60.664, R = 0.986 \\ a &= -0.075t^2 - 10.169|t| + 18.108, R = 0.967 \end{aligned} \quad (2)$$

4.1 试验后的冻土试样

试验后的冻土试样见图 4。可以看出, 试验钻进效果非常好, 在冻土试样内形成了一个圆柱空洞即钻孔, 并且孔的底部很平滑, 其余部位没有发生明显变形, 这是由于冻土中有了孔隙的存在, 使冻土在局部遭受钻具的侵入时, 常常只在局部地方被挤压而钻进。就整体而言, 并不产生多大的变形或破坏, 由此可以得知用冲击钻进的方法来研究冻土可钻性是可行的。

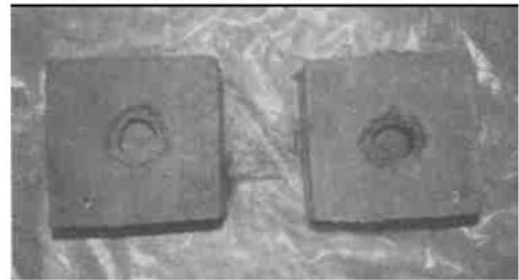


图 4 试验结果

Fig. 4 Experimental results

4.2 影响试验的主要因素

在试验数据处理过程中, 考虑了冻胀影响。在冻结过程中, 水分不断从未冻区向冻结前缘迁移聚集并冻结而出现冻胀, 它是伴随土中孔隙水相变和冰分凝而产生的。黏性土冻结时, 因水分向冻结锋面迁移的聚冰, 会发生强烈冻胀。所以在测量凿入深度时, 为保证测量数据的精确度, 使测量值接近真实值, 要酌情考虑冻胀影响, 适当地使所测得的数值减去被测冻土试样相对应的冻胀量。

温度是影响冻土力学性能的主要因素。冻土是非均质的, 冻土的温度越低其抵抗外力的强度越大, 而其变形越小, 这是由于冰和矿物颗粒胶结后具有较大的黏结力和内摩擦力, 从而使冻土的强度较未冻状态大大提高。可是, 温度影响冻土力学性质的程度是不同的, 且取决于它是哪一个水相变区变化而定。在水的剧烈(明显的)相变区, 决定冻土强度的因素是冰和未冻水的含量, 及其与负温变化的关系。在非剧烈相变

区, 冻土极限强度亦随温度的降低而增大, 但强度的增加不能只用含水率的增加(或未冻水含量的减少)来解释。在这里, 同时起决定性作用的第二个因素是冰的质变(冰的强度随负温降低而增大)。在土已冻结状态下, 冻土的强度性质主要取决于将土胶结起来的冰的强度, 且其强度随着温度的降低而提高。冰的特征是氢原子的联结作用非常微弱, 而氢原子的活动性随着温度的降低而急剧减弱, 这也决定着冰结构的强化。然而, 冰的强化作用随温度的降低只能达到某一定的限度。由以上分析可以解释为什么随着温度的降低凿入深度越来越浅而凿碎比功逐渐增大, 主要是由于冻土强度增大的缘故, 使得钻进比较困难, 凿进深度较浅, 才致使钻进单位体积冻土所需要的功增大。

冲击功也是影响钻进效果的主要因素, 由于随着冲击次数的增加, 冻结黏土被压越来越密实, 同一温度下其强度也就越来越大, 所以钻进所需的功也就相应增大。又因为随着冲击次数的增加, 落锤势能转换成热能也随之增多, 则冻结黏土中的未冻水含量增多, 胶结冰的含量减少, 土颗粒与冰之间的胶结作用减弱, 因此破坏其胶结作用所需的功也就越来越小, 这无疑抵消了一部分由于土的压密而引起的功的增大, 这就是凿碎比功在开始 10 周增加较大却在后 10 周没有明显增大的原因。

4.3 与岩石可钻性的比较

岩石的可钻性分级如表 4 所示。冻土凿碎比功的数值只相当于岩石凿碎比功数值的 I、II 级。这是由于两种材料的特性有差异, 且低温冻土的强度较高, 不易钻进的原因。磨钝宽度也不如岩石的明显^[9], 几乎没有变化。

表 4 岩石凿碎比功分级

Table 4 Classification of rock according to specific chiseling work

级别	凿碎比功/(J·cm ⁻³)	可钻性
I	≤186	极易
II	187~ 284	易
III	285~ 382	中等

5 结 论

(1) 试验结果表明, 随着温度的降低, 冻结黏土的硬度越来越大, 钻进深度越来越浅, 钻进程度越来越难, 可钻性越来越强, 相反温度越高越容易钻进。说明在较低的负温下, 冻土具有较高的强度。从试验数据可以看出同一温度下的凿入深度几乎是均匀增加, 所需的凿碎比功只有不同程度略有增加, 这是因为凿入

越深, 土被压越密实, 则钻头钻进所需的功也就相应增大。由试验后的冻土试样可以看出, 随着温度的下降, 冻土的脆性越来越明显, 几乎没有塑性变形。对试验后钎头宽度的测量表明, 磨钝宽度几乎没有变化。

(2) 利用凿测器测定了冻土的凿碎比功, 随深度降低而增大, 在同一温度下凿碎比功在开始 10 周增加较大, 后 10 周增加不大, 说明随着温度的降低, 冻结黏土的硬度越来越大。

(3) 本文试验采用的凿测器, 在操作过程中, 提升落锤全靠人工完成, 在低温的环境下, 要进行大面积现场测试, 对操作人员来说是一项十分艰辛的工作, 所以为了进一步提高钻眼速度, 必须研究新型的钻眼机具。从材料和工艺上完善冻土钻眼机具, 并提高使用寿命和保证质量稳定性, 是今后继续研究的重要课题。

试验参加者还有张志红, 杨曙光等, 在此表示感谢。

参考文献:

- [1] 周幼吾, 郭东信, 邱国庆, 等. 中国冻土[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [2] 徐学祖, 王家澄, 张立新. 冻土物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [3] 吴紫汪, 马 巍. 冻土强度与蠕变[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 1994.
- [4] 何 平, 朱元林, 张家懿, 等. 饱和冻结粉土的动弹模与动强度[J]. 冰川冻土, 1993, 15(1): 170- 174.
- [5] 俞祁浩, 朱元林. 兰州黄土冲击试验研究[A]. 第一届全国寒区环境与工程青年学术会议论文集[C]. 兰州: 兰州大学出版社, 1994. 56- 60.
- [6] 张招祥, 余 群. 冻土切削力学特性的试验和理论分析[J]. 冰川冻土. 1994, 16(2): 104- 112.
- [7] 崔托维奇 H A. 冻土力学[M]. 张长庆, 朱元林译. 北京: 科学出版社, 1985.
- [8] GB/T 50123—1999, 土工试验方法标准[S].
- [9] 刘宗平. 冲击凿岩工具及其理论基础[M]. 北京: 地质出版社, 1987.
- [10] Sing B, Goel R K. Rock drillability[A]. Rock Mass Classification[C]. 1999. 213- 217.
- [11] Jung S J, Prisdrey K, Wu G. Prediction of rock hardness and drillability using acoustic emission signatures during indentation [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1994, 31(5): 561- 567.
- [12] Li X, Rupert G, Summers D A, et al. Analysis of impact hammer rebound to estimate rock drillability[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2000, 33(1): 1- 13.