

文章编号: 1000-7598-(2004) 01-0055-04

冻土冲击韧度与凿碎比能关系的试验研究

马芹永^{1,2}, 张志红¹, 蔡美峰²

(1. 安徽理工大学 土木工程系, 安徽 淮南 232001; 2. 北京科技大学 土木与环境工程学院, 北京 100083)

摘 要: 冻土的冲击韧度与试块破坏断口的平整度反映了冻土的冲击特性。冻土凿碎比能是表示凿碎单位体积冻土所消耗的功, 它反映了冲击破碎冻土的能力。以冻结粘土为试样, 利用摆锤式冲击试验仪进行不同温度、不同冲击能量的带缺口的冲击实验, 利用凿测器进行了冻土凿碎比能试验。实验结果表明, 冻结粘土的冲击韧度随温度降低而增大, 随冲击能量的增加而增大。随温度的降低, 试样的破坏断口的凹凸不平整度增大, 其范围在 $\pm 3\text{mm}$ 之间。随着温度的降低, 冲击凿入深度越来越浅, 冻土的硬度越来越大, 钻进程度越来越难。通过回归分析, 凿碎比能随着冲击韧度的增加而增大, 且在冲击韧度一定的情况下, 随着凿入次数的增加, 凿碎比能增加的值越来越小, 凿碎比能与冲击韧度的相关性较好, 表明用冻土的冲击韧度来反映凿碎比能是可行的。

关 键 词: 冻结粘土; 冲击韧度; 凿碎比能; 试验

中图分类号: P 642.14

文献标识码: A

Experimental research on relationship between impact toughness and impact penetrant specific energy of frozen soil

MA Qin-yong^{1,2}, ZHANG Zhi-hong¹, CAI Mei-feng²

(1. Department of Civil Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China;

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

Abstract: The impact toughness and the uneven extent of destroyed sample are the practical indexes of impact properties of frozen clay. The impact penetrant specific energy of frozen soil indicates the work of chiseling the frozen soil per unit volume, and reflects the ability to impact frozen soil. The frozen clay of the certain frozen shaft is regarded as the experimental soil sample. The impact experiments of frozen clay are made in order to measure these indexes in different temperatures and different impact energies. The impact penetrant specific energy experiment of frozen soil is conducted with the chiseling tool. Through analyzing the test results, it is shown that the impact toughness of frozen clay will increase with temperature decreasing and the impact energy increasing, and the uneven extent of sample may increase with the temperature decreasing, and the range of unevenness in the plane is $\pm 3\text{mm}$ or so. With the decrease of temperature the hardness of frozen soil is bigger and bigger, the chiseling depth is more and more shallow, the drilling extent is more and more difficult. The relation formula between impact toughness and impact penetrant specific energy of frozen clay has been regressed. The impact toughness of frozen clay has a good relation to impact penetrant specific energy. The impact penetrant specific energy of frozen soil could be estimated by measuring its impact toughness.

Key words: frozen clay; impact toughness; impact penetrant specific energy; experiment

1 引 言

我国的多年冻土面积占国土总面积的 22.3%, 居世界第三位, 其中高海拔多年冻土的面积为世界之最, 季节冻土遍布大部国土^[1]。根据国家政策,

我国建设重点正逐步向西部转移, 在甘、青、新、藏、宁等广大地区的季节冻土和多年冻土将逐步成为建设的重点。在多年冻土地区, 许多工程, 如房屋、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

收稿日期: 2002-12-27.

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和中国科学院冻土工程国家重点实验室开放基金。

作者简介: 马芹永, 男, 1964 年出生, 教授、硕士生导师、系副主任, 主要从事冻土力学与工程方面的教学和科研工作。

进行开挖。由于缺乏可以利用的有关冻土开挖方面的试验资料,工程施工者不能有效地在保护环境下进行冻土施工作业。另外,在富水的表土层中煤矿建设、城市地下工程及桥梁工程等采用冻结法施工也遇到冻土的开挖问题。各种机具在冻土中的开挖过程,实质上是冻土在各种动荷载作用下快速变形,致使冻土中的各种孔隙、裂纹不断快速发展、扩张,最终使冻土破坏,产生各种断裂过程,使得冻土对外力的抵抗力不同于受静载荷的情况,这就需要通过动载荷试验来获得冻土的有关指标。冲击韧度是评定材料冲击抗力的实用指标,它的大小不仅取决于材料的性能,而且,还随试样的形状、尺寸、缺口形式等不同而变化。另外,冲击韧度对材料的某些缺陷很敏感,能够反映出材料的宏观缺陷和显微组织方面的微小变化^[7]。冻土凿碎比能是表示凿碎单位体积冻土所消耗的功,反映了冲击破碎冻土的能力。因此,冻土冲击韧度和凿碎比能的研究是重要的关键的应用基础研究,对改进寒区工程和人工冻结工程的施工方法具有重要的意义。

2 国内外研究现状

在国内,中国科学院冻土工程国家重点实验室吴紫汪、朱元林、马巍等大量研究了冻土的动、静力学特性,得出了有重要价值成果。李洪升等研究了冻土断裂力学行为,研究了冻土在循环荷载作用下的动力学性质,朱元林进行了围压作用下的动蠕变试验,提出了冻土的动蠕变模型,何平进行了冻土在循环荷载作用下的蠕变试验研究,徐学祖等对青海高原风火山地区亚粘土进行了振动蠕变试验,提出了双曲线型动弹模表达式^[2]。沈忠言等对兰州冻结黄土进行了恒应变率等幅动应变振动试验,提出了动强度预测模型;张健明对在循环荷载作用下桩与冻结黄土之间的冻结强度进行了研究。俞祁浩等对冻土的冲击韧度进行了试验研究,表明试样尺寸及缺口深度对冲击韧度具有明显影响。王书文等进行了冻土冲击贯入试验,得出了冲击次数与冻土温度、含水量、干密度之间的经验公式,余群、张招祥等进行冻土切削力学特性的研究^[14, 15]。从 20 世纪 80 年代开始,冻土工程国家重点实验室、原煤炭部特殊凿井公司、中国矿业大学和安徽理工大学等单位,系统地进行了冻土壁基本物理力学性质、冻土壁温度场和应力场研究,近期又对立井冻结法凿井和深基坑开挖支护工程进行了热工计算。安徽理工大学还对冻结壁强度及其参数、冻土爆破性及人工冻土爆破方法等方面进行了大量的研究

工作。在国外,崔托维奇及维亚洛夫对冻土力学特性作了开创性的研究工作^[3],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。Charest 等专家进行了冻土动态贯入试验,得到了最大贯入深度的经验表达式。前苏联专家德罗果维依科研究了冻土的湿度、温度对可爆性的影响以及从单位炸药消耗量上对冻结岩石可爆性分类进行了初步研究。

3 冻土的凿碎比能试验

3.1 试验设备

测定冻土的凿碎比能,所用仪器应当与实际钻眼有着相同的破碎冻土本质,这样所测定的凿碎比能指标才不会因时、因地、因人而异,从而使之具有客观性、科学性。试验所用的凿测器为东北大学根据冲击式凿岩工具的原理研制的凿测器。

3.2 试验方法

试验选用安徽某矿井筒 219.93~224.82 m 段的冻结粘土,干容重为 1 710 kg/m³,含水率为 21.42%,其颗粒组成如表 1 所示。

表 1 粘土颗粒组成
Table 1 The size-composition of the frozen clay

粒 径 / mm	颗粒成分 / %	粒 径 / mm	颗粒成分 / %
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

制备试样的尺寸为 200 mm×200 mm×200 mm (长×宽×高),将其放入特制的冻土恒温装置中,控温精度为±0.1 °C,冻到所需的温度,并使试件内温度均匀,然后,在低温室对试样进行固定,制作刻度盘,中间预留直径为 60 mm 的圆孔,一周等分为 24 份,并固定于试件表面。最后进行凿碎比能试验。冲击后,用深度游标卡尺在左、中、右三点量取凿入深度读数到 0.1 mm,然后,取平均值作为凿入深度,并测量冻土试件的平整度,利用凿入深度计算凿碎比能:

$$a = \frac{40NA_0}{\pi d^2 H} \quad (1)$$

式中 a 为凿碎比能 (J / cm³); N 为冲击次数; A_0 为每次冲击功 (3.92 J); d 为凿孔的直径 (4.1 cm); H 为凿眼净深 (mm)。

温度为 7 个等级的凿碎比能的试验结果如表 2 所示。

表 2 凿碎比能的试验结果

Table 2 Experimental results of impact penetrant specific energy of frozen clay

温度 / °C	5 周	凿 碎 比 功 / J·cm ⁻³ 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

实验可知,随着温度的降低,凿入深度越来越浅,钻进程度越来越难,冻结粘土的硬度越来越大,相反,温度越高越容易钻进。这说明在较低的温度下,冻土具有较高的强度^[11, 16, 17]。

4 冻土的冲击韧度试验

4.1 冲击韧度实验的原理

摆锤式冲击试验机原理如图 1 所示,它是利用摆锤冲击试件前后的能量差来确定冲断试件所消耗的功 α_k 。试验时,将带有缺口的试件安放于试验机的支座上,并使缺口位于试件的受拉侧,摆锤从一定高度自由下落,将试件冲断。设摆锤重量为 Q ,从高度 H_0 处沿 AB 弧落下,冲断试件后所剩余的动能使摆锤沿 BC 弧上升到 H_1 ,因此冲断试件所消耗的功 W 的大小等于摆锤在 A 和 C 两点的位能之差,即:

$$W = Q(H_0 - H_1)$$

又因为 $H_0 = R(1 - \cos \alpha)$, $H_1 = R(1 - \cos \beta)$

$$有 \quad W = QR(\cos \beta - \cos \alpha) \quad (2)$$

一般在试验机的度盘上按上述关系式已经换算好刻度值,由指针可直接读出冲击时所消耗功的数值。

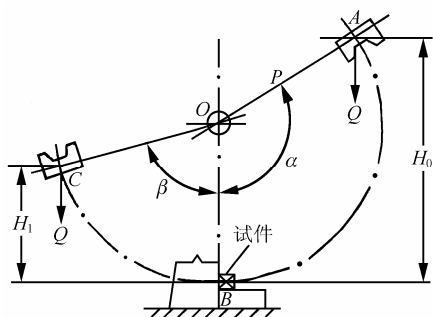


图 1 冲击原理图

Fig.1 Principle chart of impact

由于试件缺口处高度应力集中,冲击功 W 的绝大部分被缺口局部所吸收(空气阻力和轴承的摩擦要消耗一部分能量)。因此,把冻土的冲击韧度定义为试件在缺口处的最小截面面积 A 除以 W , 即:

$$\alpha_k = \frac{W}{A} \quad (3)$$

式中 α_k 为冻土的冲击韧度 (J/m^2); W 为冲击功 (J); A 为缺口处的最小截面积 (m^2)。

根据冲量的定义 $I = mv$ (其中, m 为冲击摆的质量, v 为冲击摆的速度),将同一冲击摆锤依次置于不同的高度使其自由下落,当冲击摆的质量恒定而速度不同时,摆锤便具有不同的冲量。试验分满量程为 150 J 及半量程为 97 J 进行。

在已知摆锤置于一定高度的势能 J 和质量 m 的条件下,由能量守恒定律知,

$$\begin{aligned} mgh &= \frac{1}{2}mv^2; & v &= \sqrt{2gh}; \\ mgh &= J; & h &= \frac{J}{mg}; & v &= \sqrt{\frac{2J}{m}} \end{aligned} \quad (4)$$

所以,在开始试验前,先将摆锤在选定的位置上,使其在没装试样的情况下自由下落,在完成一次摆动后即可由刻度盘读出摆锤预置高度的势能。已知摆锤质量为 11.26 kg 对应不同预选高度的冲量便可求出。本试验的预置高度分别为 0.90 m, 1.36 m, 对应的冲量为 47.3 Ns, 58.13 Ns。

4.2 冲击韧度实验

试验土质同凿碎比能试样。试样为长方体,尺寸为 $S \times B \times L = 225 \text{ mm} \times 70 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$, 其中 S 为冻土试样的长度, B 为宽度, L 为厚度。在制样压实冻结前,在模具中长度方向上放置楔块预制裂纹,深 10 mm。在完成后将其置于 -20°C 低温室,使其整体快速冻结 24 h 后脱模,再将试样放于工作间,分别在 -3°C , -5°C , -7°C , -10°C , -12°C , -15°C 和 -17°C 7 个不同温度中,恒温 24 小时后进行试验。

试验结果如表 3 所示,可以看出,冻土的冲击韧度随温度的降低有不同程度的增加。这是因为随着温度的降低,未冻水含量减小,含冰量增加,使得断裂吸收能增加,冻土的韧性减弱,脆性增强。

随着冲量的增加,瞬态作用于试样的荷载也随之增加。在试验过程中,冲击摆锤由预置点自由下落,经最低点(即试样放置点)打断试样后并继续前进上升到达所能达到的某一高度是一个连续的过程,随着摆锤冲量的增加,其瞬间作用于试样使其破坏所需时间便不断减少。冲击韧度反映的是裂纹

表3 冲击韧度随温度变化的试验结果
Table 3 Test result of impact toughness changing with temperature

温度 / °C	冲击韧度 / J·m ⁻² (预置高度 1.36 m)	冲击韧度 / J·m ⁻² (预置高度 0.9 m)
-3	8 482.1	5 813.4
-5	8 554.5	6 012.7
-7	8 631.9	6 054.1
-10	8 791.2	6 134.5
-12	8 919.9	6 264.1
-15	9 048.2	6 334.2
-17	9 152.0	6 748.3

扩展单位面积所需消耗的能量, 亦即反映作用于试样使其破坏应力的。从表 3 可知, 在试验条件下, 随着冲量的增加, 其冲击韧度增加较快。在不同温度下, 预置高度为 1.36 m 的全量程冲击时的冲击韧度较预置高度 0.9 m 的冲击时增加约 2 000 J/m² 左右。

试验后将试样的两半按断口对接恢复原样观察, 试样的外观在试验精度范围内没有发生变形, 由此说明, 冻土的破坏属于脆性断裂。对试样的断口观察还发现, 断裂面在预制缝和摆锤撞击线之间基本呈一平面, 但平面上各部分凹凸不平起伏在 ±3 mm 之间, 随着温度的降低, 试样凹凸不平量增大。另外, 通过试验发现, 随着温度的降低, 摆锤撞击冻土声响越来越响, 这说明冻土随温度降低脆性越来越明显。

5 冲击韧度与凿碎比能的回归分析

在上述 7 个温度水平下, 所测得的冲击韧度与凿碎比能的试验结果数据如表 2、表 3 所示。绘出冲击韧度和凿碎比能的关系图, 如图 2、图 3。回归计算出相应的回归方程如下:

(1) 预置高度为 1.36 m 的回归方程为 ($\alpha'_k = \alpha_k / 100$):

$$a_5 = -2.3391\alpha_k'^2 + 427.81\alpha_k' - 19413 \quad R = 0.985$$

$$a_{10} = -0.4735\alpha_k'^2 + 102.16\alpha_k' - 5178.3 \quad R = 0.991$$

$$a_{15} = 0.1233\alpha_k'^2 - 0.4393\alpha_k' - 760.15 \quad R = 0.992$$

$$a_{20} = 0.557\alpha_k'^2 - 76.704\alpha_k' - 2599.1 \quad R = 0.995$$

(2) 预置高度为 0.9 m 的回归方程为 ($\alpha_k' = \alpha_k / 100$):

$$a_5 = -2.0274\alpha_k'^2 + 267.44\alpha_k' - 8664.9 \quad R = 0.986$$

$$a_{10} = -2.8896\alpha_k'^2 + 383.76\alpha_k' - 12529 \quad R = 0.993$$

$$a_{15} = -2.9442\alpha_k'^2 + 393.46\alpha_k' - 12907 \quad R = 0.992$$

$$a_{20} = -2.9413\alpha_k'^2 + 393.56\alpha_k' - 12916 \quad R = 0.995$$

由图 2、3 可以看出, 凿碎比能随着冲击韧度的

增加而增大, 并且在冲击韧度一定的情况下, 随着凿入次数的增加凿碎比能增加的值越来越小, 在最后五周几乎为定值。这是因为冲击韧度反映了裂纹扩展单位面积所需要消耗的能量, 随着温度的降低有不同程度的增加, 所以, 破碎单位体积所需要的凿碎比能也就相应的增大, 由于冻土本身特性的原因, 对应相同的凿入次数, 只是增加的值略有不同。

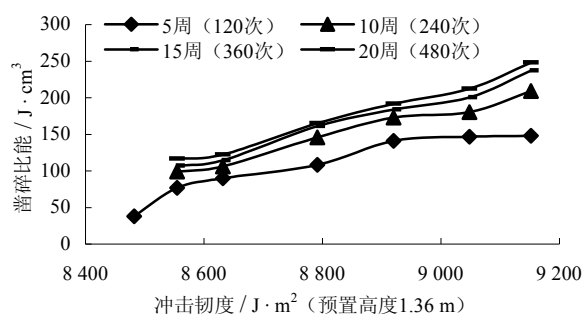


图2 冲击韧度(预置高度为 1.36 m)与凿碎比能的关系
Fig.2 Relationship between impact toughness and impact penetrant specific energy

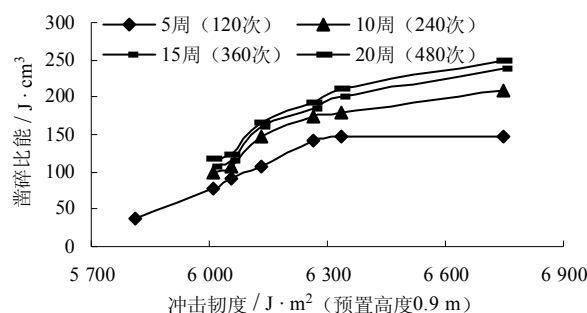


图3 冲击韧度(预置高度为 0.9 m)与凿碎比能的关系
Fig.3 Relationship between impact toughness and impact penetrant specific energy

6 结论

冻土的冲击韧度与试块破坏断口的平整度反映了冻土的冲击特性。实验结果表明, 冻结粘土的冲击韧度随温度降低而增大, 随冲击能量的增加而增大。对试样的断口观察发现, 断裂面在预制缝和摆锤撞击线之间基本呈一平面, 但面上各部分凹凸不平起伏在 ±3 mm 之间, 随着温度的降低, 试样凹凸不平量增大, 冲击钻进深度越来越浅, 冻土的硬度越来越大, 钻进程度越来越难。

通过回归分析, 凿碎比能随着冲击韧度的增加而增大, 且在冲击韧度一定的情况下, 随着凿入次数的增加凿碎比能增加的值越来越小, 凿碎比能与冲击韧度的相关性较好, 所以用冻土的冲击韧度来