

冻土材料非线性断裂模型的试验研究

李洪升¹, 王悦东¹, 李亚民²

(1. 大连理工大学 工程力学系工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116023;

2. 大连交通大学 环境科学与工程学院, 辽宁 大连 116028)

摘要: 冻土是多相体复合材料, 土体冻结过程中在内部形成空穴、裂隙等多种缺陷。把这些缺陷简化为冻土中的初始裂纹, 应用断裂力学理论和试验方法, 研究冻土的非线性断裂过程和特征。结果表明: 冻土非线性断裂破坏过程由弹性阶段、微裂纹损伤区形成阶段和软化阶段组成, 其中微裂纹损伤区形成阶段是冻土非线性破坏的主要表征。把微裂纹损伤区简化为假想裂纹处理, 可称为虚拟裂纹, 并考虑冻土中冰晶体胶结力作用, 给出冻土非线性断裂破坏的胶结力裂纹模型; 讨论胶结力的性质与分布, 给出微裂纹损伤区长度确定的方法, 为理论分析与数值计算提供依据。同时, 还对胶结力裂纹模型涉及的非线性断裂韧性指标 δ_c 进行测试, 给出相应测试方法和结果。

关键词: 土力学; 冻土; 非线性断裂破坏; 微裂纹损伤区; 断裂韧性

中图分类号: TU 43

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2006)07 - 1391 - 05

EXPERIMENTAL STUDY ON NONLINEAR FRACTURE MODELS OF FROZEN SOIL

LI Hongsheng¹, WANG Yuedong¹, LI Yamin²

(1. State Key laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Department of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116023, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian, Liaoning 116028, China)

Abstract: Frozen soil is a kind of multi-phase compound material. There are many defects and micro-cracks in frozen soil. Supposing the defects as the initial crack, using the theory and testing method of fracture mechanics, the nonlinear fracture process and character of frozen soil are investigated. The result shows that the nonlinear fracture process of frozen soil is composed of elastic period, micro-crack damage zone(MDZ) forming period and softening period. MDZ forming period is the main feature of nonlinear failure of frozen soil. The micro-crack is regarded as the virtual crack, considering the cement ice in frozen soil, the cementation force crack model of nonlinear fracture failure is presented. The material in MDZ is partially damaged but still able to carry cementation stress $\sigma(x)$, which is nonlinearly distributed over the length of MDZ. Then the method to calculate the length of MDZ is proposed. This model can offer some references for theory analysis and numerical calculation. Finally, the test method of nonlinear fracture toughness index δ_c involved in cementation force crack model and the corresponding results are given.

Key words: soil mechanics; frozen soil; nonlinear fracture failure; micro-crack damage zone(MDZ); fracture toughness

收稿日期: 2005 - 01 - 12; **修回日期:** 2005 - 04 - 05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50278010, 10472020)

作者简介: 李洪升(1939 -), 男, 1964年毕业于大连工学院工程力学系, 现任教授、博士生导师, 主要从事岩土与环境力学方面的教学与研究工作。
E-mail: hslidlut.edu.cn

1 引言

近年来，部分学者用断裂力学理论与方法研究冻土的破坏行为，通过分析冻土受力过程中断裂的发生、发展来研究冻土破坏的机制，初步建立冻土破坏的准则，并在冻土工程中得到应用^[1-2]。冻土是多相体复合材料，其力学性质极不稳定。在特定条件下，其力学行为表现为脆性特征，破坏性质是脆性的；而在一般条件下，则表现为弹塑性特征，其破坏性质是塑性的，破坏特征是非线性的^[3]。本文通过试验研究，分析非线性断裂破坏的过程和特征，建立非线性破坏的物理模型，为进一步的理论分析及计算提供依据。

当把冻土工程的实际问题用断裂力学的理论和方法来评价时，首先要进行冻土的断裂韧度指标测定。近年来，对冻土线弹性断裂韧度的测试研究取得了长足的进展^[4-5]，但对冻土的非线性断裂韧度指标的测定，还未有开展研究。本文对冻土材料非线性断裂韧度指标 δ_c 进行了初步的测试研究。

2 冻土裂纹尖端微裂纹损伤区形貌测试分析

当对冻土进行非线性断裂分析时，需要了解冻土非线性断裂破坏的过程和特征，以便建立合适的断裂模型。由于冻土材料的特殊性，以及对测试环境条件的低温要求，采用一般的测试方法均有困难。20 世纪 70 年代发展起来的激光散斑干涉法，具有非接触和无损测量的优点，可用于实物测量，且灵敏度高，根据采用的分析技术可给出逐点和全场的信息。武建军和王廷栋^[6]研究了冻土位移的白光散斑照相测量，梁承姬等^[7]进行了激光散斑法对冻土微裂纹形貌和发展过程的研究，共对 3 组试样进行了试验，得出了基本相同的结果。本文就其中 1 组试样的结果进行分析，以期建立冻土非线性断裂破坏模型提供依据。针对试验获得的双曝光散斑图，用逐点分析法，从预制裂纹尖端处开始逐层往上扫描。当屏幕上出现杨氏条纹变化，在全息底片的无乳胶层面上标出该点的位置。扫描结束后，根据散斑图上的网格坐标，在坐标纸上给出各点的位置，从而可得到每一张散斑图的微裂纹图，即为对应于每一个荷载的微裂纹损伤区图。图 1 给出了 III - 1

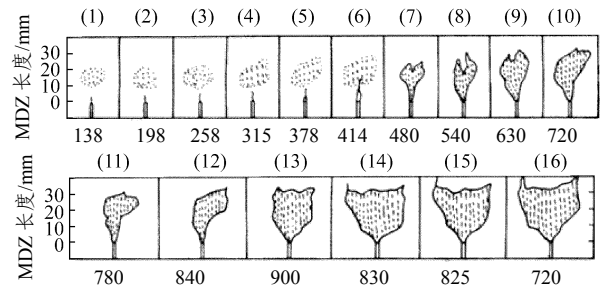


图 1 III - 1 试样对应于不同荷载的 MDZ 形貌(荷载单位: N)
Fig.1 Appearance of MDZ corresponding to different loads for sample III - 1(unit of load: N)

试样对应于不同荷载的微裂纹损伤区(micro-crack damage zone, MDZ)的形貌。除此之外，还获得了对应于不同荷载下的裂纹嘴张开位移 V ，如此也就得到了 $P-V$ 曲线。图 2 给出了试样断裂破坏过程的 $P-V$ 曲线及其各个阶段。

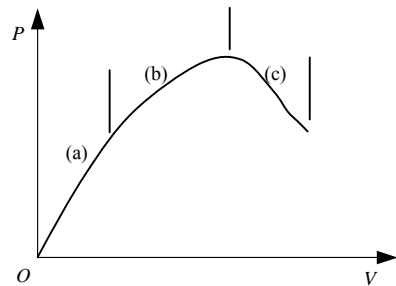


图 2 各个阶段的 $P-V$ 曲线
Fig.2 Each phase of $P-V$ curve

将图 1, 2 的测试结果结合起来分析 MDZ 形成的过程:

(1) 弹性阶段(a)(对应于图 1 中(1)~(6)): 试样在低水平加载, $P-V$ 曲线可用线性关系描述, 材料是弹性的, 裂纹尖端有部分新裂纹出现, 表现为裂纹密度增大, 但大都是孤立存在的。

(2) MDZ 形成阶段(b)(对应于图 1 中(7)~(12)): 试样在高应力水平作用下, $P-V$ 曲线明显呈非线性, 大量新裂纹产生, 且与原裂纹贯通和交叉, 裂纹密度达到临界值, MDZ 完全形成。

(3) 软化阶段(c)(对应于图 1 中(13)~(16)): 荷载缓慢增加并趋于最大值, $P-V$ 曲线开始下降(软化), 微裂纹扩展并出现宏观裂纹, 同时可听到有声音发出。

3 非线性断裂破坏的胶结力裂纹模型

3.1 冻土胶结力裂纹模型

B. N. Whittaker 等^[8]通过对 Dugdale 模型的修改, 建立了岩石材料非线性断裂模型, 称为黏性裂纹模型(cohesive crack model), 这个模型很好地描述了岩石断裂非线性过程。通过对冻土断裂过程的试验研究表明, 冻土非线性断裂过程与岩石材料断裂过程非常相似。冻土非线性断裂过程中存在与岩石断裂过程区类似的微裂纹损伤区。但是冻土有不同于岩石的特殊性质, 其最重要的特点是冻土含有冰晶体, 冰晶体的胶结力具有头等重要的作用。基于以上分析, 根据裂纹尖端 MDZ 的试验观测结果, 可以把 MDZ 作为假想裂纹处理, 并将 MDZ 长度作为虚拟裂纹长度, 同时考虑虚拟裂纹面上作用有胶结力, 可建立如图 3 所示的冻土非线性断裂破坏的胶结力裂纹模型。图中, $\sigma(x)$ 为分布的胶结力, δ_t 为 $x = a + \xi$ 处虚拟裂纹的张开位移, δ_c 为原裂纹尖端的张开位移临界值, σ_t 为材料的抗拉强度。当把 MDZ 处理为虚拟裂纹时, 总的有效裂纹长度为 $a + d$ 。

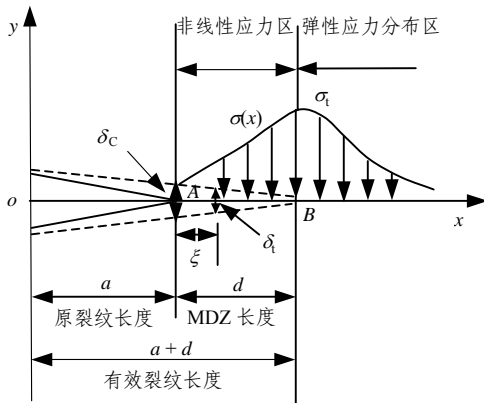


图 3 冻土胶结力裂纹模型

Fig.3 Cementation force crack model of frozen soil

3.2 对胶结力裂纹模型的分析

(1) 胶结应力及其分布

胶结应力是冻土类材料所具有的特殊内力, 是引起非线性断裂破坏的主要因素。在 MDZ 内存在若干矿物颗粒的连接作用或冰体的胶结作用, 其具有一定的传力能力, 可起到裂纹闭合的作用, 称为胶结应力。

胶结应力在虚拟裂纹面上是非线性分布的, 它既是沿 x 轴分布的力 $\sigma(x)$, 又是裂纹尖端张开位移 δ_t 的函数, 可表示为 $\sigma(\delta_t)$ (见图 3)。则有

$$\left. \begin{aligned} \sigma(\delta_t) &= \sigma_t (\delta_t = 0, \text{最大值}) \\ \sigma(\delta_t) &= 0 (\delta_t = \delta_c, \text{最小值}) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: δ_c 为原裂纹尖端的张开位移临界值, 为非线性断裂韧度的一个指标值, 可通过试验测定, 在下节将讨论其试验测定方法。由断裂力学理论可知, 裂纹扩展处的应力由开裂前的值降到开裂后的零值所做的功, 即为裂纹扩展单位面积释放出的能量, 定义为能量释放率(用 G_I 表示)^[9], 其表达式为

$$G_I = \int_0^{\delta_t} \sigma(\delta_t) d\delta_t \quad (2)$$

当裂纹尖端张开位移达到临界值 δ_c 时, 能量释放率 G_I 也达到临界值, 即为 G_{IC} , 其表达式为

$$G_{IC} = \int_0^{\delta_c} \sigma(\delta_t) d\delta_t \quad (3)$$

上式中的 G_{IC} 可由试验测定。据此可依式(3)确定胶结应力 $\sigma(\delta_t)$ 的分布。因此, 式(3)不仅为有限元计算提供依据, 而且还可进行断裂过程的非线性分析。

作为一种简化, 假定胶结应力 $\sigma(x)$ 是线性分布的, 且是 x 的函数(见图 3), 则有

$$\sigma(x) = \frac{x-a}{d} \sigma_t \quad (4)$$

(2) MDZ 长度的确定

根据虚拟裂纹的概念, 在裂纹尖端处应力具有有限值(应力奇异性不存在), 故虚拟裂纹尖端的应力强度因子为 0, 则有

$$K_{I(\sigma)} + K_{I\sigma(x)} = 0 \quad (5)$$

式中: $K_{I(\sigma)}$, $K_{I\sigma(x)}$ 分别为由外加应力 $\sigma(P)$ 和胶结应力 $\sigma(x)$ 引起的应力强度因子^[10], 且有

$$K_{I(\sigma)} = \sigma(P) \sqrt{\pi(a+d)} \quad (6)$$

$$K_{I\sigma(x)} = -2 \int_0^d \sqrt{\frac{a+d}{\pi(a+d)^2 - x^2}} \sigma(x) dx \quad (7)$$

将式(6), (7)代入式(5), 便可求出 MDZ 长度 d 的表达式。

(3) 胶结力裂纹模型的验证

从上面的分析可以看出, 式(3), (4)给出了胶结应力的分布, 式(5)~(7)给出了 MDZ 长度的计算公式, 这就是胶结力模型的定量表示。为了验证该模型的有效性, 本文取 $\sigma(x)$ 为一常数 σ_0 , 代入式(7)得

$$K_{I\sigma(x)} = -\sigma_0 \sqrt{\pi(a+d)} \frac{2}{\pi} \arccos \frac{a}{a+d} \quad (8)$$

将式(8)与(6)相加, 经整理后得 MDZ 长度为

$$d = a \left[\sec \frac{\pi \sigma(p)}{2\sigma_0} - 1 \right] \quad (9)$$

式(9)与 Dugdale 模型形式完全一样, 这说明胶结力模型中的胶结应力为常数时, 就退化为 Dugdale 模型, 从而证明本文模型是有效的。

4 胶结力裂纹模型参数临界张开位移 δ_c 的测定

从上面胶结力裂纹模型的讨论可知, 该模型涉及 3 个重要参数, 分别是应变能释放率临界值 G_{IC} , 裂纹尖端张开位移临界值 δ_c 和 MDZ 长度 d , 其中 G_{IC} , δ_c 反映材料的特性, 必须由试验方法测定。在这一节里将讨论 δ_c 的测定, 关于 G_{IC} 的测定将在以后研究。

4.1 裂纹尖端张开位移 δ 的确定

在节 2 中已经提到了如何获取 $P-V$ 曲线, 并给出了 $P-V$ 曲线不同阶段的特征。事实上, 还可采用其他方法获取 $P-V$ 曲线, 例如在加力点上放置一个力传感器, 在裂纹嘴放置一个位移传感器, 然后将 2 个传感器的信号分别送到绘图仪或电脑的 X, Y 轴, 在加载过程中就可获得 $P-V$ 曲线。有了 $P-V$ 曲线, 便可获得对应于不同荷载的裂纹嘴张开位移 V 。

根据试验测定的裂纹嘴张开位移 V , 并通过换算公式可求得裂纹尖端张开位移 δ 为

$$\delta = \frac{r_p(w-a)V}{a+r_p(w-a)+Z} \quad (10)$$

式中: r_p 为材料参数, a 为裂纹长, w 为试样宽度, Z 为固定位移刀口厚度。取 $r_p = 0.45, Z = 0$, 即可得到对应于不同荷载的裂纹尖端张开位移 δ , 从而也就能描绘出该试件的荷载与裂纹尖端张开位移曲线, 如图 4 所示。

4.2 裂纹尖端张开位移临界值 δ_c 的测定

要从 $P-\delta$ 曲线上确定裂纹尖端张开位移临界值 δ_c , 关键在于确定裂纹开裂的临界荷载 P_c 。对于冻土按常规方法难以解决, 而采用 $P-\bar{a}$ 曲线是一个有效方法。

从微裂纹损伤区发展过程图(见图 1)中可以得到每一过程对应的荷载 P 及相应的微裂纹区名义尺度 \bar{a} , 然后绘出荷载和名义尺度曲线, 即 $P-\bar{a}$ 曲线, 如图 5 所示。拐点①(对应于图 1 的(5)和(6))表示损伤从表面向材料内部发展, 拐点②(对应于图 1 的(8))

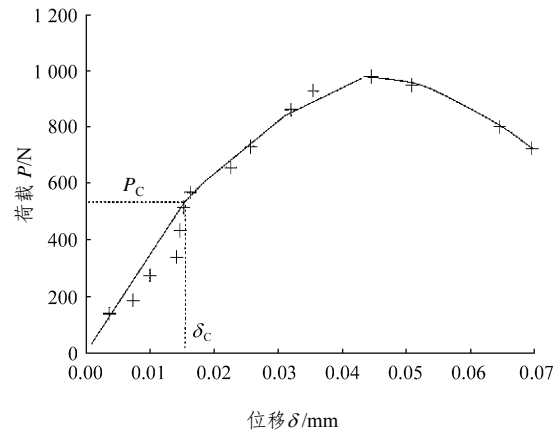


图 4 $P-\delta$ 曲线

Fig.4 $P-\delta$ curve

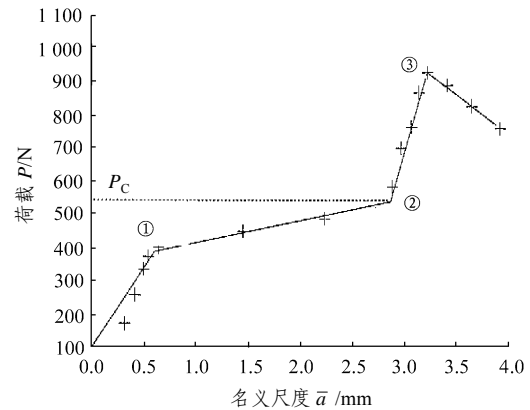


图 5 $P-\bar{a}$ 曲线

Fig.5 $P-\bar{a}$ curve

表示微裂纹区开始形成, 损伤区向内部纵深发展, 且出现转向, 表明裂纹开裂。所以拐点②对应的荷载即为开裂的临界荷载 P_c , 由此在图 4 中便可确定 P_c 对应的 δ 值便是临界值 δ_c 。对于 III-1 试件, 拐点②对应的荷载为 540 N, 即 $P_c = 540 \text{ N}, \delta_c = 0.015 \text{ mm}$ (见图 4)。

对 3 组试样测定 δ_c 的平均值列在表 1, 同时据 δ_c 值换算成的 \tilde{K}_{IC} 值及实测 K_{IC} 值均列于表 1。由表中可见, 换算得到的 \tilde{K}_{IC} 与实测值基本上是一致的, 说明测定的 δ_c 值是有效的。

表 1 由 δ_c 换算的 \tilde{K}_{IC} 值与实测值 K_{IC} 的比较

Table 1 Comparison of \tilde{K}_{IC} obtained from δ_c and measured

试件	K_{IC}		
	δ_c 平均值/mm	$\tilde{K}_{IC} / (\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1/2})$	$K_{IC} / (\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1/2})$
I	0.014	0.22	
II	0.017	0.27	0.23~0.25
III	0.015	0.24	

5 结 论

(1) 对冻土材料的测试结果发现, 裂纹尖端存在一个微裂纹损伤区, 通过对裂纹尖端一系列散斑图的逐点分析, 获得了微裂纹损伤区随荷载增加而发展的全过程和形貌特征。它是材料在裂纹尖端处胶结力和损伤的共同产物, 表征材料细微结构的信息。

(2) 参照岩石黏聚力裂纹的概念, 根据对微裂纹损伤区的分析, 建立了冻土非线性断裂破坏的胶结力裂纹模型, 讨论了胶结力分布规律及计算公式, 给出了 MDZ 长度的计算方法, 并验证了其有效性, 为理论分析和计算提供依据。

(3) 用胶结力裂纹模型分析冻土的非线性断裂破坏过程, 涉及了 3 个重要参数, 即临界能量释放率 G_{IC} 、临界张开位移 δ_c 、MDZ 长度 d 。应用本文的试验方法可以有效地测定 δ_c 。

参考文献(References):

- [1] 李洪升, 刘增利, 朱元林, 等. 冻土断裂韧度测试的理论与方法[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(1): 61 - 65.(Li Hongsheng, Liu Zengli, Zhu Yuanlin, et al. Theory and methods on tests of the fracture toughness K_{IC} of frozen soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(1): 61 - 65.(in Chinese))
- [2] 李洪升, 朱元林. 冻土断裂力学及其应用[M]. 北京: 海洋出版社, 2002.(Li Hongsheng, Zhu Yuanlin. Fracture Mechanics of Frozen Soil and Its Application[M]. Beijing: China Ocean Press, 2002.(in Chinese))
- [3] 吴紫汪, 马 巍. 冻土强度与蠕变[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 1994.(Wu Ziwan, Ma Wei. Strength and Creep of Frozen Soil[M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 1994.(in Chinese))
- [4] Li H S, Yang H T, Liu Z L. Experimental investigation on fracture toughness K_{IIC} of frozen soil[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2000, 37(1): 253 - 258.
- [5] Li H S, Yang H T. Experimental investigation on fracture toughness of frozen soils[J]. Journal of Cold Regions Engineering, 2000, 14(1): 43 - 49.
- [6] 武建军, 王廷栋. 冻土位移的白光散斑照相测量[J]. 中国科学院冻土工程国家重点实验室年报, 1995, 5: 352 - 357.(Wu Jianjun, Wang Tingdong. Measurement of frozen soil displacement with white light speckle photography[J]. Annual Report of State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Chinese Academy of Sciences, 1995, 5: 352 - 357.(in Chinese))
- [7] 梁承姬, 李洪升, 刘增利, 等. 激光散斑法对冻土微裂纹形貌和发展过程的研究[J]. 大连理工大学学报, 1998, 38(2): 152 - 156.(Liang Chengji, Li Hongsheng, Liu Zengli, et al. Study on appearance and development procedure of microcrack of frozen soil using laser speckle method[J]. Journal of Dalian University of Technology, 1998, 38(2): 152 - 156.(in Chinese))
- [8] Whittaker B N, Singh R N, Sun G. Rock Fracture Mechanics Principle, Design and Applications[M]. London: Elsevier, 1992.
- [9] 李洪升, 周承芳. 工程断裂力学[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1991. 42 - 44.(Li Hongsheng, Zhou Chengfang. Engineering Fracture Mechanics[M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 1991. 42 - 44.(in Chinese))
- [10] 王 铎. 断裂力学[M]. 南宁: 广西人民出版社, 1982. 74 - 76.(Wang Duo. Fracture Mechanics[M]. Nanning: Guangxi People's Publishing House, 1982. 74 - 76.(in Chinese))