

冻土断裂力学在挡墙基础稳定性分析中的应用

Application of fracture mechanics of frozen soil to retaining wall stability analysis

李洪升¹, 刘增利¹, 朱元林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. 中科院兰州寒区旱区环境与工程研究所
冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 讨论了冻土断裂力学在挡墙基础强度及稳定性分析中的应用, 讨论了实际工程问题的简化方法, 给出了冻土断裂力学判据; 给出了应用实例, 并与传统的强度设计及稳定性问题进行了计算比较; 指出冻土断裂力学是对传统设计和计算方法的完善和补充; 讨论了冻土断裂力学在未来工程设计计算中的应用前景及其作用。

关键词: 冻土断裂力学; 挡墙基础; 强度与稳定性分析

中图分类号: P 642. 14

文献标识码: A

文章编号: 1000- 4548(2002) 01- 0069- 03

作者简介: 李洪升(1939-), 男, 辽宁葫芦岛市人, 大连理工大学工程力学系教授, 博士生导师。主要从事冰与冻土力学行为及本构理论研究, 寒区工程结构与环境耦合分析及数值模拟。

LI Hong-sheng¹, LIU Zeng-li¹, ZHU Yuan-lin²

(1. State Key Laboratory of Structure and Equipment Analysis, Department of Engineering Mechanics, DUT, Dalian 116023, China; 2. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, LIGG, CAS, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Application of fracture mechanics of frozen soil to strength and stability analysis of retaining wall is discussed, fracture criteria are presented, and a simplified of practical method is given. An actual example is calculated using conventional and fracture mechanics methods respectively, and results are compared with each other. It is shown that the method of fracture mechanics of frozen soil is a development of conventional method.

Key words: fracture mechanics of frozen soil; retaining wall; strength and stability analysis

1 前 言^{*}

寒冷地区(包括季节性冻土区和永久性冻土区)占全球陆地面积的60%以上, 这些地区有着丰富的矿藏、森林和土地资源。随着现代社会的进步, 人们在寒冷地区的各种活动和开发也越来越频繁。各种建筑结构和道路、桥梁、铁路、机场、桥涵和各种地上及地下管道越来越多, 而由于土体的冻结导致的破坏问题也越来越多, 其中如桥涵的冻胀破坏, 道路的基础及路面破碎和翻浆, 管道的破坏以及行水渠等寒区结构物的破坏等。但是, 土体的冻结带来的也并不全是害处, 它对人类的社会发展和经济建设也有着重要的作用。如现今在隧道挖掘、建筑物地基基础开挖、矿井及煤矿深井开挖和地铁工程中常用的人工冻结技术, 则大大提高了施工质量和施工进度, 为人类经济建设提供了强有力的支持^[1]。人们对冻土的认识也已有了长足的进步。前苏联、美国、加拿大等国家从本世纪30年代起即对冻土进行研究, 我国从50年代也开始了冻土的研究。在此期间, 人们的研究着重于以下两个方面: ①冻土的力学特性参数的测试; ②冻土的形成过程以及由此引起的土的冻胀和冻胀力及其对结构的作用^[2, 3]。除此之外, 近年来人们开始对冻土本身的破坏机理进行研究,

如吴紫汪等对冻土蠕变细观力学的研究^[4], 苗天德、张长庆等对冻土蠕变的损伤力学研究^[5, 6], 说明人们认识到不深入了解冻土的破坏机理对冻土的认识则是远远不够的。李洪升等从90年代开始进行了冻土宏观破坏特性—冻土断裂力学的研究, 取得了一些成果^[7, 8], 并已经初步得到应用, 例如对桩基冻拔问题进行了断裂力学分析^[9]。本文讨论冻土断裂力学在挡墙基础的强度及稳定性分析中的应用, 并与传统的、现行设计和计算方法进行对比, 指明冻土断裂力学在工程应用中的前景。

2 工程中的冻土断裂力学问题

冻土破坏的性质是冻土重要的力学特征之一。在工程中如堤坝、桥涵、渠道和挡墙冻结后的破坏, 路基由于土体冻结而产生的冻胀裂纹的发生与发展等均可视为冻土的断裂力学问题。在应用人工冻结技术中, 如矿山、隧道开挖过程中的破坏与安全性问题, 矿井和煤井在人工冻结状态下的施工过程的破坏问题, 在人工冻结下建筑结构基础开挖过程中基坑边坡的稳定性问题等也都属于冻土的断裂力学问题。桩基冻拔问题则是需要考虑在土体冻结后发生周围土体的断裂破坏

还是桩基的整体上拔亦或是桩体的破坏问题等。以上讨论的各种问题均可以采用冻土的断裂力学方法进行讨论。还有一类是需要考虑而又很常见的问题,即冻土与基础之间界面的破坏问题。此种问题的具体表现形式如挡墙基础强度及稳定性的分析,板基础抗冻胀稳定性分析及冻胀破坏分析以及行水渠闸板 U 形槽底板的冻胀破坏形式等。此类问题过去一直是以讨论该基础为重点,很少考虑其与冻土界面的联系等方面,从下面的分析中可以看出,采用冻土断裂力学的方法对基础的稳定性破坏形式的讨论与分析可大大丰富和完善原有的设计计算方法,使该问题的分析更接近实际。

3 冻土断裂力学判据

当应用冻土断裂力学理论来解决实际工程问题时,必须首先要建立相应的断裂力学判据,或称为断裂准则。所谓的断裂判据,就是指当冻土或界面发生断裂破坏时的条件及其数学表达式。根据断裂力学理论,断裂判据可这样定义:对于含有初始裂纹的材料或结构物,在一定的应力条件下,当其应力强度因子 K 达到某一临界值 K_c 时,断裂就会发生,其数学表达式为

$$K \leq K_c \quad (1)$$

对于 I 型裂纹、II 型裂纹和 I - II 型复合断裂,可分别改写为

$$K_I \leq K_{Ic}, K_{II} \leq K_{IIc}, K_f \leq K_{fc} \quad (2)$$

当所考虑问题为界面断裂问题时,则上述各式中的临界值应采用界面断裂时的临界值,公式还仍然为上述的形式。

其中 K_c 称为断裂韧度,它是材料的常数。在一定条件下,该常数为一定值。如当冻土的土质、温度、含水率、加载速率等固定时, K_c 值就是代表冻土在该状态下材料抵抗断裂的特征值。而 $K(K_I, K_{II}, K_f)$ 等则是表征结构裂纹尖端附近应力场强弱的唯一参数,由于裂纹尖端的应力场具有奇异性,故不能采用应力作为强度判定条件,而用应力强度因子 K 来建立断裂判据是恰当的。 K 值的大小可在结构简化的基础上从应力强度因子手册查找,也可通过理论或数值计算方法计算得到。

4 挡墙基础强度和稳定性分析

本文以工程中常见的挡墙基础强度与稳定性的分析为例,具体讨论冻土断裂力学在工程中的应用以及与传统的设计计算方法的比较。而这种问题在传统的设计和计算中只是考虑结构本身的强度以及在土体冻结后由于土体冻胀造成的附加荷载问题,而很少考虑冻土与结构的界面及相互作用问题。

设有一挡墙基础,基础材料为素混凝土,挡墙填土为中等冻胀性的粉砂土,当地冻结深度为 2.0~2.2 m,基底土温为 -3°C ,挡墙尺寸如图 1(a) 所示,挡墙的受力分析如图 1(b) 所示。其中 σ_h 为水平冻胀力, σ_n 为法向冻胀力, σ_w 为土重压力,不计挡墙的自重,要求对挡墙进行强度和稳定性分析。

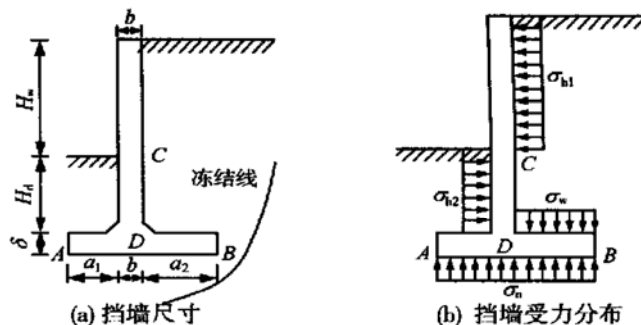


图 1 挡墙尺寸与受力分布

Fig. 1 Dimension and force distribution of retaining wall

(1) 挡墙的强度校核

已知 $H_w = 2.5 \text{ m}$, $H_d = 1.2 \text{ m}$, $b = 0.3 \text{ m}$, $a_1 = 0.5 \text{ m}$, $a_2 = 1.5 \text{ m}$, $\delta = 0.2 \text{ m}$ 。对中等冻胀土,由“渠系工程抗冻胀设计规范”^[10]可知,其冻胀力可取为 $\sigma_h = 100 \text{ kPa}$, $\sigma_n = 40 \text{ kPa}$ 。假设冻土冻胀力为均匀分布,土的容重为 $\gamma = 15 \text{ kN/m}^3$ 。

强度分析首先要进行模型简化,将图 1 所示挡墙的受力分析简化为如图 2 所示的断裂力学模型。

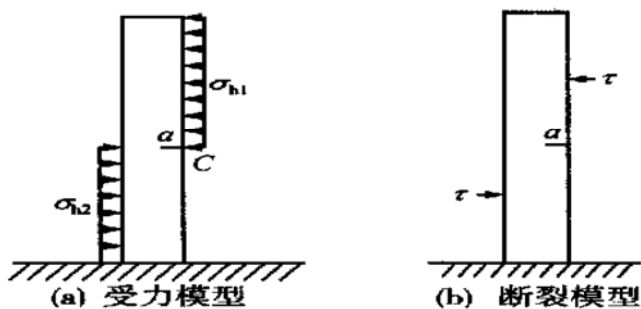


图 2 挡墙断裂力学模型

Fig. 2 Fracture model of retaining wall

从以往的现场破坏观测可知,容易发生强度破坏的位置一般是在外露墙体根部的内侧,即图 2 中的 C 点位置。这样我们可将墙体简化为 II 型裂纹的断裂模型。其中剪应力由水平冻胀力求算,且 $\tau = (\sigma_{h1} \times H_w) / b = 833 \text{ kPa}$,裂纹长度为 a 。一般来说,可取初始裂纹为素混凝土的骨料的直径(5~20 mm),现取为 $a = 0.01 \text{ m}$ 。对于图 2 所示的断裂模型,可采用 II 型裂纹的断裂判据,即 $K_{II} \leq K_{IIc}$ 。当满足此判据时,挡墙满足强度要求,其中素混凝土在低温下的 K_{IIc} 根据文献[11]的测试结果,可选取 $K_{IIc} = 0.6 \sim 1.2 (\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2})$,计算得

$K_{II} = 1.1215 \sqrt{\pi a} = 0.02 \text{ (MPa} \cdot \text{m}^{1/2})$ 。由此可知, $K_{II} < K_{IIc}$ 成立, 故挡墙强度满足设计要求。

(2) 现行方法进行稳定性分析

现行抗倾覆计算方法公式:

$$M_p > M_h \quad (3)$$

式中 M_p 为抗倾覆力矩, M_h 为冻胀倾覆力矩。根据图 1(b) 中的受力分析则有 (计算点为 A 点): $M_p = M_{p1} + M_{p2}$, $M_{p1} = \sigma_{h2} \times H_d \times |H_d/2 + 0.2| = 96 \text{ kN} \cdot \text{m}$, $M_{p2} = \sigma_w \times a_2 \times |a_2/2 + b + a_1| = 129 \text{ kN} \cdot \text{m}$, $M_h = M_{h1} + M_{h2}$, $M_{h1} = \sigma_{h1} \times H_w \times |H_w/2 + H_d + \delta| = 662.5 \text{ kN} \cdot \text{m}$, $M_{h2} = \sigma_n \times (a_1 + a_2 + b)^2/2 = 105.8 \text{ kN} \cdot \text{m}$, $M_p = 225 \text{ kN} \cdot \text{m}$, $M_h = 768 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。因为 $M_p < M_h$, 所以必然导致挡墙倾覆, 即不稳定。

(3) 按冻土断裂力学方法进行挡墙稳定性计算

在对挡墙进行稳定性校核时, 可以使用冻土断裂力学的计算方法。而且此问题可以归结为冻土与混凝土界面的断裂力学问题。当挡墙发生倾覆时, 必然在挡墙基础的后趾点 B 处产生裂纹, 并发展直到冻土与混凝土的接触面断裂。我们可以将挡墙的稳定性分析简化为如图 3(a) 所示的力学模型。对这样的受力模型可以进一步简化, 把基础底板与其冻结在一起的冻土层看成一具有界面的板, 在弯矩 M 的作用下, 在界面处具有边裂纹 a , 如图 3(b) 所示。对该断裂力学模型, 其应力强度因子公式为^[12]

$$K_I = \frac{4\pi - 8}{\pi^2 - 8} \sqrt{\pi} \frac{M}{c\sqrt{c}} \quad (4)$$

式中 M 为导致挡墙倾覆的弯矩, $M = M_h - M_p = 543 \text{ (kN} \cdot \text{m)}$, c 为基础底板长度, $c = a_1 + a_2 + b = 2.3 \text{ m}$, 于是可计算得 $K_I \approx 0.70 \text{ (MPa} \cdot \text{m}^{1/2})$ 。由实验测试可知^[13], 素混凝土与冻土界面的 $K_{Ic} = 0.3 \sim 0.6 \text{ (MPa} \cdot \text{m}^{1/2})$ ($\theta = -3^\circ\text{C}$), 因此有 $K_I > K_{Ic}$, 说明在该倾覆弯矩 M 的作用下, 在挡墙基脚与冻土界面处必然要发生断裂, 因此, 挡墙将倾覆。这个结果与现行的计算方法所得的结果是一致的, 说明了在此问题上断裂力学方法与传统方法的等效性。

5 讨论与展望

断裂力学引入冻土领域已经有一定的时间了, 并且在冻土断裂韧度的测试方法上积累了相当的经验。在此基础上, 冻土的断裂韧度值与各种控制参数的关系已获得了很多的成果。冻土断裂力学在实际工程中很有应用前景, 但是, 目前冻土断裂力学在工程中的应用还刚刚开始, 而且有许多问题需要深入研究与分析。以本

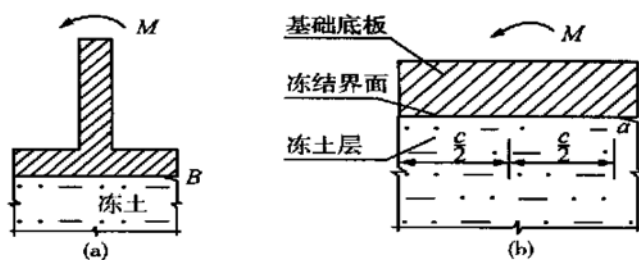


图3 稳定性分析力学模型和断裂力学模型

Fig. 3 Mechanical model for stability analysis and model of retaining wall for fracture mechanics

文讨论的问题为例, 冻土断裂力学理论和方法能否应用的关键, 在于挡墙的受力分析和断裂力学模型的建立, 建立正确的模型是应用的基础。除模型之外, 还要选择正确的参数, 如冻胀力的确定, 裂纹尺寸及位置的确定等。采用冻土断裂力学, 是对传统设计方法和计算方法的补充和完善, 而不是对传统方法的否定。通过冻土断裂力学在实际工程的应用, 使人们可考虑更多的因素, 使设计和计算更加合理。可以预测, 随着冻土断裂力学研究的进一步发展和人们对寒区结构工程的进一步认识, 冻土断裂力学在工程中会得到越来越多的应用。

参考文献:

- [1] 陈瑞杰, 程国栋, 李述训, 等. 人工地层冻结应用研究进展及展望[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(1): 40-44.
- [2] 崔托维奇. 冻土力学[M]. 张长庆, 等译. 北京: 科学出版社, 1985.
- [3] 安维东, 等. 冻土温度、水分及应力及其相互作用[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 1990.
- [4] 吴紫汪. 冻土蠕变变形特征的细观分析[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(3): 1-6.
- [5] 苗天德, 魏雪霞, 张长庆. 冻土蠕变过程微结构损伤理论[J]. 中国科学(B), 1995, 25(3): 57-62.
- [6] 张长庆, 魏雪霞, 苗天德. 冻土蠕变过程的微结构损伤行为与变化特征[J]. 冰川冻土, 1995, 17(增刊): 60-65.
- [7] 刘增利, 李洪升, 朱元林, 等. 冻土 I-II 型复合断裂准则的试验研究[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(2): 148-152.
- [8] Li Hongsheng, Yang Haitian, Liu Zengli. Experimental study of fracture toughness K_{IIc} for frozen soil[J]. Canadian Geotechnical J, 2000, 38(3): 253-257.
- [9] 李洪升, 刘增利, 朱元林. 冻土断裂力学在桩基冻拔稳定计算中的应用[J]. 冰川冻土, 1998, 20(2): 112-115.
- [10] SL23-91, 中华人民共和国水利水电行业标准: 渠系工程抗冻胀设计规范[S]. 北京: 水利电力出版社, 1991.
- [11] 徐世琅, 赵国藩. 混凝土断裂力学研究[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1991.
- [12] 王 铎. 断裂力学[M]. 南宁: 广西人民出版社, 1982.
- [13] 李洪升, 杨海天, 刘增利, 等. 冻土与界面断裂韧度 K_{IIc} 的实验研究[J]. 大连理工大学学报, 1997, 37(1): 20-23.