

基于断裂力学的水库冰板挤压破坏冰压力计算方法

邢怀念,刘增利,李洪升

(大连理工大学工程力学系,辽宁 大连 116023)

摘要:为了给寒区水库护坡抗冰冻设计提供依据,以冰板为研究对象,考虑冰板的破坏特征、性质及冰板形成过程中存在的大量缺陷,应用断裂力学理论研究冰板的挤压破坏极限应力,据此确立冰压力的计算方法。算例计算结果表明:冰板挤压破坏具有脆性特征,冰压力随着冰厚的增加而增大;在冰厚相同条件下,冰压力计算值与标准值和实测值基本吻合;冰压力计算公式能够反映冰压力形成过程的物理本质,符合实际情况。

关键词:冰压力;水库冰板;挤压破坏;断裂力学

中图分类号:TV313

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2013)03-0010-04

Calculation method of ice pressure of extruded ice plate in reservoirs based on the fracture mechanics//XING Huainian, LIU Zengli, LI Hongsheng (Department of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

Abstract: In order to provide a basis for anti-freezing design of reservoir revetments in cold regions, ice limit pressure of extruded ice plates was studied using the fracture mechanics theories with the consideration of failure characteristics and inner defects of the ice plates. Then, a calculation method of the ice pressure was developed. The calculated results show that the ice plate extrusion failure demonstrates brittle characteristics, and ice pressures increase with the increase of the ice plate thickness. With the same ice thickness, calculated values of the ice pressure are in good agreement with its standard values and measured values. The calculation method of the ice pressure can reflect the physical nature of ice pressure forming process, and is accord with the facts.

Key words: ice pressure; reservoir ice plate; extrusion failure; fracture mechanics

在冰压力作用下水库护坡产生的挤压破坏是护坡破坏的基本形式之一,确定冰压力的大小是护坡结构设计的重要前提。到目前为止,虽然提出了一些冰压力计算方法^[1-2],但由于问题的复杂性,以此作为护坡设计依据还存在一定的局限性。现行的冰压力计算方法有两种:一是现场观测冰压力值^[3],但因现场环境条件等因素的影响,对测试方法和仪器设备要求很严格,此方法受到一定限制;二是试验方法,可从试验中直接得到冰板的挤压破坏应力值,然后再经过一定换算,同时考虑一定的尺寸效应,便可确定作用在护坡上的冰压力值。由于试验测出的只是冰板的挤压破坏应力值,并不等于水库护坡受到的冰压力值,在换算时需考虑初始温度、温升率、冰的形态、冰的厚度及护坡结构等诸多因素,不同的研究者从不同的角度提出了不同的冰压力计算方法^[4-6]。另外,黄炎等^[7]从产生冰压力的温度场出

发,建立温度传导方程,采用有限元分析方法进行冰压力的数值计算。从冰板和护坡的相互作用出发,以冰板为对象研究冰压力的计算方法是合理可行的。由于冰材料对环境极为敏感,故在冰层形成过程中产生很多空穴、气泡、裂缝及冰晶间的缝隙连接等缺陷^[8],因此运用断裂力学理论研究冰板挤压破坏的问题更为合适^[9]。综上所述,本文以冰板为研究对象,研究冰板挤压破坏的机理与特征,建立冰板挤压破坏的断裂力学模型,以冰板挤压破坏的极限应力值作为冰压力计算依据,以达到确定冰压力的目的。

1 冰板挤压破坏的形式与特征

1.1 冰板挤压破坏与冰板厚度和冻结状态的关系

a. 当冰板与护坡冻结在一起时,可分为两种破坏状况:①在冻结初期,冰层较薄,冰厚 $h < 0.4$ m,在

冰压力 P_i 作用下, 冰板在薄弱部位凸起失稳, 产生屈曲破坏, 如图 1(a) 所示。②随着气温降低, 冰板厚度增加, 当冰厚 $h > 0.4 \text{ m}$ 时, 在冰压力作用下, 冰板发生压缩破坏, 但由于冰压力沿冰板厚度方向是非均匀分布的, 因此严格说是偏心作用, 如图 1(b) 所示。

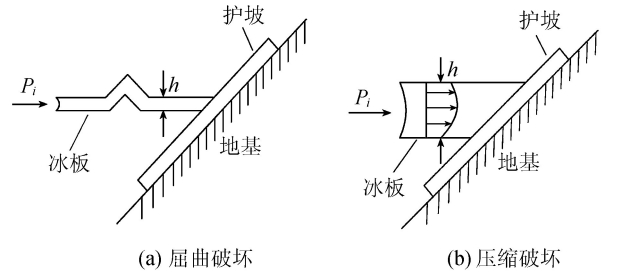


图 1 冰板与护坡冻结在一起的屈服破坏和压缩破坏

b. 当冰板与护坡未冻结在一起时(这种情况的发生条件是冰压力沿护坡面的水平分力 P_H 大于冰与护坡之间的冻结强度 P_0), P_H 克服摩擦力后, 使冰板沿护坡面向上滑动, 冰板在冰压力的垂直反力 P_V (垂直于冰板平面)作用下将弯曲并产生弯曲破坏, 如图 2 所示。

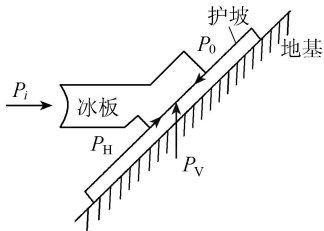


图 2 冰板与护坡未冻结在一起的弯曲破坏

1.2 冰板破坏与应变速率的关系

大量试验表明, 冰材料对应变速率十分敏感, 并且会发生韧脆转变^[10], 如图 3 所示。图中 A 点对应的速率 ϵ_{R1} 为韧脆转变区起始速率, B 点对应的速率 ϵ_{R2} 为终点速率, 韧脆转变的范围为 $\epsilon_{R1} \sim \epsilon_{R2}$ 。冰板在受到冰压力作用时, 随着温度变化梯度的不同, 在冰板内产生不同的速率: 当 $\epsilon > 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 时冰板为脆性破坏; 当 $10^{-4} \text{ s}^{-1} \leq \epsilon \leq 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 时冰板为准脆性破坏; 当 $\epsilon < 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 时冰板为塑性破坏。

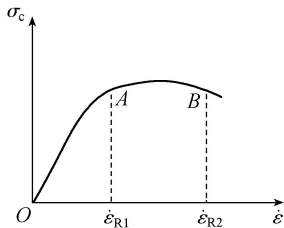


图 3 冰体韧脆转变示意图

1.3 冰板挤压破坏与冰板中的缺陷和裂纹的关系

冰体作为一种特殊的材料, 不仅存在对环境条

件的敏感性, 而且在其生成过程和冰晶体原子结构中 存在杂质和缺陷, 冰的诸多力学性质及破坏特征受缺陷数量和分布的控制。水库冰板在形成过程中, 无论在其初始冰层, 还是在过渡层及柱状冰层, 均存在杂质和各种裂缝等缺陷^[8]。冰板的挤压破坏应力不仅取决于冰板形状的大小, 同时取决于冰板内裂缝与缺陷的数量及分布状态, 在计算中这些裂缝或缺陷均可简化为冰体中的裂纹。

针对冰板挤压破坏特征的研究得出如下结论^[9]: ①挤压破坏过程是裂纹稳态扩展的过程; ②通过大量裂纹的连锁反应而发生最终破坏, 不是简单的一条裂纹的扩展而发生最终破坏; ③裂纹的长度 $2a$ 与冰晶尺寸 d 成正比, 且遵循近似关系 $2a = 0.65d$; ④裂纹分布的取向在冰形成过程是随机的, 但在挤压破坏应力作用时裂纹发生集结和扩展。在受压情况下, 裂纹与挤压破坏主应力之间的夹角为 45° ; 在受纯弯曲作用下, 裂纹沿与挤压破坏主应力垂直方向发展。

2 冰板挤压破坏的断裂力学模型及应力计算

从以上的冰板挤压破坏特征的分析可以看出: 冰板挤压破坏的基本形式是压缩和弯曲; 冰板在发生挤压破坏的韧脆转变阶段或者说冰板发生准脆性破坏时, 其强度达到极限值; 冰板挤压破坏的机制是微裂纹的集结与扩展的过程。基于以上分析, 对冰板的挤压破坏应力建立断裂力学分析模型。冰板与护坡冻结在一起时, 若冰板的挤压破坏应力为 σ_{11} , 冰板中的初裂纹长度为 $2a$, 裂纹的走向是任意的, 且与 σ_{11} 之间的夹角为 φ 。随着 σ_{11} 的增加, 侧翼裂纹形成并稳定增长到长度 l , 它的扩展方向大致平行于 σ_{11} 方向^[11], 如图 4 所示。

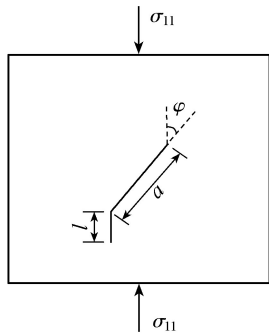


图 4 挤压破坏应力的断裂力学模型

根据简化模型, Ashby 等^[12] 给出了应力强度因子 K_I 表达式:

$$K_I = \frac{\sigma_{11} \sqrt{\pi a}}{\sqrt{(1 + \lambda)^3}} (1 - \mu) \left[\frac{\beta \lambda}{\sqrt{3}} + \frac{1}{\sqrt{3(1 + \lambda)}} \right] \quad (1)$$

式中: a 为初始裂纹的半长; λ 为扩展翼裂纹与初裂

纹之比; μ 为裂纹间摩擦因数; β 为裂纹形状因子。

如不考虑裂纹间的摩擦影响,式(1)简化为

$$K_I = \frac{\sigma_{11} \sqrt{\pi a}}{\sqrt{3}} \left[\frac{\beta \lambda \sqrt{1 + \lambda} + 1}{(1 + \lambda)^2} \right] = \sigma_{11} \sqrt{\pi a} f(\lambda) \tag{2}$$

其中
$$f(\lambda) = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[\frac{\beta \lambda \sqrt{1 + \lambda} + 1}{(1 + \lambda)^2} \right] \tag{3}$$

当应力强度因子 K_I 达到冰材料临界值 K_{IC} (断裂韧度),冰板的挤压破坏应力也达到临界值 σ_c ,即冰板的挤压破坏极限应力。于是,由式(4)可计算冰板的挤压破坏极限应力:

$$\sigma_c = \frac{K_{IC}}{\sqrt{\pi a} f(\lambda)} \tag{4}$$

3 基于冰板挤压破坏极限应力的冰压力计算

3.1 冰压力计算方法

在冰压力对水库护坡作用的同时,冰板也受到同样大小的反作用力,若以冰板为研究对象,用冰板的挤压破坏极限应力来确定冰压力是合理可行的。基于此,在前面冰板挤压破坏极限应力计算的基础上,可进行冰压力计算。参照海冰对结构物挤压冰力计算公式^[13],冰压力 P_i 计算公式可表达为

$$P_i = m I f_c \sigma_c h \tag{5}$$

式中: m 为形状系数,冰斜向作用时 $m=0.7$; I 为嵌入系数; f_c 为接触系数,对于结构尺寸为 $10 \sim 100$ m 的冰板, f_c 为 $0.40 \sim 0.25$ 。

3.2 计算参数的选取和确认

冰压力的主要计算参数是冰板的挤压破坏极限应力 σ_c ,它涉及冰板材料的断裂韧度 K_{IC} 、冰板内的初始裂纹长度 a (由冰体内的缺陷简化而来)、裂纹扩展长度 l (由此可确定参数 λ) 和形状因子,下面分别讨论参数选取和确认方法。

a. 断裂韧度 K_{IC} 是反映冰材料性能的参数,与冰体的晶体结构、温度、加载速率及含盐量有关。在有条件的情况下,应取当地库区的冰板制作标准试样,在室内进行试验测试,获取值。如无试验条件,可根据现有试验数据适当选取^[11]:在 $-2 \sim 5^\circ\text{C}$ 范围,冰晶尺寸 d 为 $3 \sim 40$ mm,低含盐量的淡水冰,在较低的应变速率下,断裂韧度的平均值为 $50 \sim 100 \text{ kPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。

b. 初裂纹半长 a 是在冰体冻结过程中形成的,反映冰材料的自然性质,但却影响冰的物理力学性能。大量的试验观测表明,裂纹半长与冰晶尺寸 d 有下列关系:

$$2a = 0.65d \tag{6}$$

冰晶尺寸的形成与环境条件有关。在一般情况下,冰板越厚,冰晶尺寸越大,通过观测结果的统计分

析,冰板厚度 h 与冰晶尺寸 d 之间有如下关系:

$$h = 29.16d - 12.83 \text{ cm} \tag{7}$$

式中冰板厚度 h 及冰晶尺寸 d 的单位均为 cm,当冰板厚度已知时,可依冰厚度确认冰晶尺寸 d ,然后再依冰晶尺寸 d 确定初始裂纹半长。

c. 随着载荷的增加(即冰板中挤压破坏应力的增加),冰板中初始裂纹扩展成翼裂纹,当翼裂纹扩展到长度 l 时冰板便产生挤压破坏,此时扩展长度 l 经观察分析约为 d 的 $1/4 \sim 1/2$,形状因子 β 与 λ 值有关,文献^[14]给出了参数取值依据。

3.3 算例分析

DL/T 5082—1998《水工建筑物抗冰冻设计规范》^[15]给出了静冰压力的取值方法。为了与规范方法相比较,现以同样的冰厚参数为依据,用本文方法计算某试验冰板的冰压力。

a. 首先根据式(4)计算挤压破坏极限应力 σ_c 。其中冰晶尺寸依据冰厚度计算,然后确定初始裂纹半长,其计算结果列在表 1 中。冰材料断裂韧度依相关文献^[11]的试验结果,冰晶尺寸在 $3 \sim 40$ mm 范围, K_{IC} 值在 $50 \sim 100 \text{ kPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 之间,取其平均值为 $75 \text{ kPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。形状因子参照相关文献^[14]取 $\beta=1.6$ 。

b. 按照式(5)计算冰压力。其中 $m=0.7$, $f_c=0.3$ 。从表 1 计算结果可以看出,冰压力计算值的平均值为 214 kN/m ,标准值的平均值是 201 kN/m ,黑龙江 7 个水库连续 10 年实测值的平均值是 206 kN/m ^[16],本文的计算结果与标准值和实测值基本吻合。

表 1 冰压力计算结果

冰厚 h/m	冰晶 尺寸 d/mm	初始裂 纹半长 a/mm	断裂韧度 $K_{IC}/$ ($\text{kPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)	挤压破坏 极限应力 $\sigma_c/$ GPa	冰压力 $P_i/$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)	
					计算值	标准值
0.4	18	5.9	75	1302	145	85
0.6	27	8.4	75	1091	183	180
0.8	32	10.3	75	985	220	215
1.0	39	12.6	75	891	249	245
1.2	45	14.8	75	822	276	288

4 结 论

a. 以冰板作为研究对象,考虑到冰板破坏的特征与性质,同时考虑到冰板形成过程中存在大量缺陷(可以简化为裂纹),应用断裂力学理论研究冰板破坏的极限应力,据此确定冰压力的方法是可行的。

b. 在冰压力计算公式推导中考虑冰与护坡相互作用的特点和护坡结构,并依据冰的形态、冰晶结构、温度、温升率等因素,确定冰的断裂韧度 K_{IC} 和初始裂纹半长 a 。因此,冰压力计算公式能够反映冰压力形成过程的物理本质,是符合实际的。

c. 冰压力随着冰厚的增加而增大,将冰压力的计算值与规范标准值相比较,除冰厚为 0.4 m 时冰压力误差较大以外,其余的冰压力误差均在 10% 以内。从对比分析可以看出,冰压力计算值与标准值及实测值是基本相吻合的。

参考文献:

[1] 徐伯孟. 水库冰层的膨胀压力及其计算[J]. 水利水电技术,1985,3(11):16-21. (XU Bomeng. Reservoir ice inflation pressure and calculation [J]. Water Resources and Hydropower Engineering,1985,3(11):16-21. (in Chinese))

[2] SHAO Xianzhi. Study on ice static pressure on ice cover in reservoir [J]. IAHR Ice Symposium, 1988, 1 (2) : 483-492.

[3] 吕长安. 闪电河水库冰压力观测研究[J]. 河北水利,1996,3(2):16-19. (LÜ Chang' an. The observation research on Shandian river reservoir ice pressure [J]. Hebei Water Resources,1996,3(2):16-19. (in Chinese))

[4] 李洪升,曹富新. 平原水库静水压力推坡计算[J]. 力学与实践,1992,14(4):29-32. (LI Hongsheng, CAO Fuxin. Plain reservoir hydrostatic pressure push slope calculation [J]. Mechanics in Engineering,1992,14(4):29-32. (in Chinese))

[5] 张丹. 水库静冰压力计算[J]. 冰川冻土,1987,12(9):83-91. (ZHANG Dan. Reservoir static ice pressure calculation [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1987,12(9):83-91. (in Chinese))

[6] 李峰,高泰,陈凯. 关于护坡极值冰压力分析的几个基本问题[J]. 黑龙江水专学报,2009,36(3):110-113. (LI Feng, GAO Tai, CHEN Kai. Some basic problems about limit ice pressure analysis on slope lining [J]. Journal of Heilongjiang Hydraulic Engineering, 2009, 36

(3):110-113. (in Chinese))

[7] 黄炎,史庆增,宋安. 冰温度膨胀力的有限元分析[J]. 水利学报,2005,4(3):16-18. (HUANG Yan, SHI Qing Zeng, SONG An. Analysis of ice thermal expansive pressure by using FEM [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2005,4(3):16-18. (in Chinese))

[8] JORMA K. Studies in ice mechanics [J]. Research Reports,1993(15):22-23.

[9] 李峰,马红艳. 断裂力学在冰工程中的应用[J]. 冰川冻土,2010,32(1):139-150. (LI Feng, MA Hongyan. Application of fracture mechanics to ice engineering [J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2010,32(1):139-150. (in Chinese))

[10] 李洪升,杜小振. 冰体材料损伤与断裂破坏的本构理论[J]. 冰川冻土,2003,25(2):304-307. (LI Hongsheng, DU Xiaozhen. Constitutive model of damage and fracture of ice [J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2003,25(2):304-307. (in Chinese))

[11] SANDERSON T J O. Ice mechanics, risks to offshore structures[M]. London: Graham and Trotman,1988:231-235.

[12] ASHBY M F, HALLAM S D. The failure of brittle solids containing small cracks compressive stress states[J]. Acta Metall,1986,34(3):497-510.

[13] 吴辉斌,杨国金,张方俭,等. 渤海海冰设计作业条件[M]. 北京:海洋出版社,2001:23-27.

[14] 李洪升,朱之林. 冻土断裂力学及其应用[M]. 北京:海洋出版社,2002:107-113.

[15] DL/T 5082—1998 水工建筑物抗冰冻设计规范[S].

[16] 平原水库静冰压力推坡计算研究报告[R]. 黑龙江:黑龙江省水利科学研究所,1991.

(收稿日期:2012-06-27 编辑:周红梅)

+++++

· 简讯 ·

第 4 届全国水工抗震防灾学术交流会将在西安召开

在汶川特大地震五周年之际,由中国水力发电工程学会抗震防灾专业委员会主办,西安理工大学、中国水电顾问集团西北勘测设计研究院、陕西省水利水电勘测设计研究院、陕西省水力发电工程学会承办的第 4 届全国水工抗震防灾学术会议将于 2013 年 9 月 21—23 日在西安召开。

我国是一个多地震国家,目前全国已建或在建的高于百米的大坝有 100 多座,一批在建和拟建的 200~300 m 级战略性水电工程,规模巨大,所在地区地震烈度高,抗震防灾将成为工程建设考虑的关键因素。因此会议主题包括:①水工建筑物抗震分析理论;②水工建筑物抗震设计规范修订的关键技术;③地震震后水工建筑物震损调查、震害分析、灾害评估及修复加固;④水工结构现场检测与监测、健康诊断与鉴定;⑤水库引发地震、地震预测和预警;⑥水电工程抗震措施、抗震安全评价体系;⑦水工结构工程振动、爆炸与冲击;⑧水工建筑物现代抗震设计理念、施工水平。

会议电子文件请浏览网站:www.meeting.edu.cn(中国学术会议在线)。

(本刊编辑部供稿)