

基于断裂力学理论的重力坝使用寿命估算

祁顺彬,王向东

(河海大学土木工程学院,江苏 南京 210098)

摘要 针对重力坝坝踵裂缝处于 I-II 复合型状态的特点,引入相当应力强度因子概念并结合 Paris 公式,用断裂力学理论和方法对重力坝寿命估算进行了初步探讨,给出了重力坝寿命估算的计算公式.该公式在理论上有一定的合理性,有助于改进坝工技术,提高坝工建筑物安全等级评估的准确性.

关键词 重力坝;裂缝;扩展速率;寿命估算

中图分类号 TV313

文献标识码 A

文章编号 1000-1980(2004)04-0402-03

安全性是工程结构的最基本要求,而材料内部存在的初始缺陷及其发展引起的结构断裂是工程结构发生安全事故最常见的原因之一,因此有必要对带有裂缝的工程结构进行断裂分析和寿命估算.重力坝在浇注过程中,施工、混凝土收缩、温度应力等原因在坝与基岩胶结面上往往会形成裂缝,裂缝在坝蓄水后,蓄放水引起的交变荷载会使坝与基岩胶结面即坝踵区产生疲劳裂缝,交变荷载也将使这些疲劳裂缝继续扩展.这不仅会影响大坝使用寿命,而且可能会威胁大坝安全,因此对在役结构物进行安全评估很有意义.断裂力学中 Paris 公式应用于金属材料剩余寿命的估算已比较成熟,而在混凝土材料中的应用则刚刚开始,即只用于仅受单一荷载下的结构或构件的断裂估算.如欧阳实等^[1]对混凝土简支型渡槽进行了断裂分析,吕书清等^[2]对混凝土压力管进行了寿命估算,但用 Paris 公式对混凝土大坝这种大体积结构所进行的断裂分析尚未见到.为此,本文用断裂力学理论和方法对重力坝寿命进行了分析,给出了大坝寿命估算的计算公式.

1 重力坝寿命估算的断裂力学方法

1.1 方法原理

大坝与基岩胶结面间裂缝引起的断裂为脆性断裂.根据断裂力学理论,对于混凝土等脆性材料,当裂缝的应力强度因子 K 达到该种材料的断裂韧度 K_c 时,裂缝会出现失稳扩展,其判据为

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

式中 K_c 由混凝土材料断裂实验测得.

当坝前水位周期性变化时,坝体在交变应力作用下会导致裂缝扩展(即疲劳裂缝扩展).在低应力脆性破坏状况下,疲劳裂缝扩展规律可用 Paris 公式^[3]来描述:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (2)$$

式中: $\frac{da}{dN}$ ——疲劳裂缝扩展速率; a ——裂缝长度; N ——循环周数; ΔK ——应力强度因子变幅, $\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$; C, m ——通过试验确定的材料常数.

1.2 应力强度因子计算及判据

重力坝受力分析如图 1 所示.由于坝踵裂缝多处于混凝土与基岩胶结面上,属两相介质的界面裂缝,一般来说,当胶结强度低于基岩和混凝土本身的强度时,裂缝多沿胶结面扩展.在水工结构力学分析中,重力坝通常按平面问题计算,从而坝踵区产生的裂缝,在水压力 $\sum Q$ 即剪力、自重 $\sum P$ 即重力和缝水压力 σ_H 的共同作用下,裂缝处于 I-II 复合型状态.另外, $\sum Q$ 与坝基裂缝面有一定距离 H' ,故对坝基面产生的弯矩 $M =$

$\Sigma QH'$ 重力 ΣP 对坝基面中心有一偏心距,由此产生的附加弯矩为 M' . 因此,胶结面上的平面裂缝处于复杂受力状态. 对于复杂荷载疲劳裂缝扩展,可先计算各荷载单独作用下的应力强度因子 K ,叠加后按复合型断裂判据^[4]求得临界开裂条件,然后用 Paris 公式计算使用寿命.

对于上述各荷载单独作用下的应力强度因子 K 根据文献[5]得:

a. 中心压力 ΣP 作用下

$$K_{\text{I}} = -\sigma \sqrt{\pi a} Y_{\sigma} \left(\frac{a}{W} \right) \quad (3)$$

$$\sigma = \frac{\Sigma P}{A} \quad Y_{\sigma} \left(\frac{a}{W} \right) = 1.12 - 0.231 \left(\frac{a}{W} \right) + 10.55 \left(\frac{a}{W} \right)^2 - 21.72 \left(\frac{a}{W} \right)^3 + 30.39 \left(\frac{a}{W} \right)^4$$

式中: A ——坝基面面积; W ——坝底宽度; Y ——几何形状因子.

b. 偏心压缩产生的附加弯矩 M' 作用下

$$K_{\text{I}} = -\sigma_{M'} \sqrt{\pi a} Y_M \left(\frac{a}{W} \right) \quad (4)$$

$$\sigma_{M'} = \frac{6M'}{W^2} \quad Y_M \left(\frac{a}{W} \right) = 1.122 - 1.40 \left(\frac{a}{W} \right) + 7.33 \left(\frac{a}{W} \right)^2 - 13.08 \left(\frac{a}{W} \right)^3 + 14.00 \left(\frac{a}{W} \right)^4$$

c. 水压力 ΣQ 作用下

$$K_{\text{II}} = \frac{2}{\sqrt{\pi a}} \Sigma Q Y_Q \left(\frac{a}{W} \right) \quad (5)$$

$$Y_Q \left(\frac{a}{W} \right) = \frac{1}{\left(1 - \frac{a}{W} \right)^{\frac{1}{2}}} \left[1.30 - 0.65 \left(\frac{a}{W} \right) + 0.37 \left(\frac{a}{W} \right)^2 + 0.28 \left(\frac{a}{W} \right)^3 \right]$$

d. 水压力产生的弯矩 M 的作用下

$$K_{\text{I}} = \sigma_M \sqrt{\pi a} Y_M \left(\frac{a}{W} \right) \quad (6)$$

$$\sigma_M = \frac{6M}{W^2}$$

e. 缝水压力 σ_H 作用下

$$K_{\text{I}} = \sigma_H \sqrt{\pi a} Y_{\sigma} \left(\frac{a}{W} \right) \quad (7)$$

$$\sigma_H = R \rho g H$$

式中: R ——缝水压力系数; ρ ——水密度; g ——重力加速度.

综合式(3)~(7)得

$$K_{\text{I}} = \sqrt{\pi a} [(-\sigma + \sigma_H) Y_{\sigma} + (\sigma_M - \sigma_{M'}) Y_M]$$

$$K_{\text{II}} = \frac{2}{\sqrt{\pi a}} \Sigma Q Y_Q \quad (8)$$

可见缝端处于 I-II 复合型状态,据文献[4]得临界开裂条件

$$\alpha K_{\text{II}}^2 + K_{\text{I}} K_{\text{II}} = K_{\text{I}c}^2$$

式中 α 为通过试验确定的材料常数. 这里引入 I-II 复合型相当应力强度因子 K^* , 则断裂判据为

$$K^* = \sqrt{\alpha K_{\text{II}}^2 + K_{\text{I}} K_{\text{II}}} \leq K_{\text{I}c} \quad (9)$$

1.3 寿命估算公式

坝踵裂缝的初始长度 a_0 一般是已知的,则将式(8)代入式(9)得

$$\frac{B_1}{a_c} + B_2 \sqrt{a_c} + B_3 = 0 \quad (10)$$

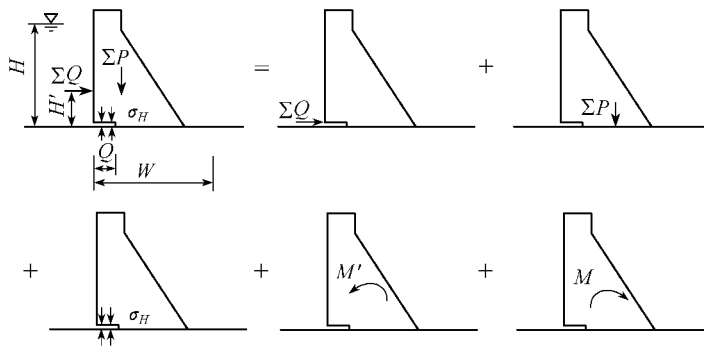


图 1 重力坝受力分析

Fig.1 Analysis of gravity dam under loads

式中: $B_1 = \frac{4\alpha(\sum QY_Q)^2}{\pi}$; $B_2 = \sqrt{\pi}[(-\sigma + \sigma_H)Y_\sigma + (\sigma_M - \sigma_{M'})Y_M]K_{Ic}$; $B_3 = -K_{Ic}^2$.

于是由式(10)可解出临界裂缝长度 a_c .

坝前水位变化引起的相当应力强度因子变幅为

$$\Delta K^* = K_{\max}^* - K_{\min}^* = \left(\frac{D_2^2}{a} + D_1 K_{Ic} \sqrt{a} \right)^{\frac{1}{2}} - \left(\frac{E_2^2}{a} + E_1 K_{Ic} \sqrt{a} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

式中: $D_1 = \sqrt{\pi}[(-\sigma + \sigma_H)Y_\sigma + (\sigma_{M\max} - \sigma_{M'})Y_M]$; $D_2 = \frac{2\sum Q_{\max}Y_Q\sqrt{a}}{\sqrt{\pi}}$; $E_1 = \sqrt{\pi}[(-\sigma + \sigma_H)Y_\sigma + (\sigma_{M\min} - \sigma_{M'})Y_M]$; $E_2 = \frac{2\sum Q_{\min}Y_Q\sqrt{a}}{\sqrt{\pi}}$.

将式(11)代入式(2),对 a 从 a_0 到 a_c 积分,则得剩余寿命的循环周数为

$$N_c = \int_0^{N_c} dN = \int_{a_0}^{a_c} \frac{da}{\alpha(\Delta K^*)^m} = C \int_{a_0}^{a_c} \left[\left(\frac{D_2^2}{a} + D_1 K_{Ic} \sqrt{a} \right)^{\frac{1}{2}} - \left(\frac{E_2^2}{a} + E_1 K_{Ic} \sqrt{a} \right)^{\frac{1}{2}} \right]^{-m} da$$

从而可估算出坝的使用年限,进一步可评估出坝的安全度.

2 结 论

本文引入相当应力强度因子概念,并结合 Paris 公式运用断裂力学方法对重力坝寿命估算进行了初步探讨和简化分析,提出了一种估算重力坝寿命的方法,理论上有一定的合理性,有助于改进坝工技术,提高坝工建筑物安全等级评估的准确性.

参考文献:

- [1] 欧阳实,倪保璐,欧健.钢筋混凝土筒支型矩形渡槽断裂强度及寿命的断裂力学分析初探[J].水利水电科技进展,1999,19(6):47—50.
- [2] 吕书清,魏庆葆,王云松.用断裂力学观点对钢筋混凝土压力管进行使用寿命估算[J].哈尔滨商业大学学报(自然科学版),2002,18(4):479—480.
- [3] 高庆.工程断裂力学[M].重庆:重庆大学出版社,1986.141—142.
- [4] 徐道远,张林兵,朱为玄.混凝土断裂临界值测试研究[J].福州大学学报(自然科学版),1994,22(4):222—227.
- [5] 于晓中,焦常忻,周群力.岩石和混凝土断裂力学[M].长沙:中南工业大学出版社,1991.551—553.

Fracture mechanics-based estimation of service life of gravity dams

QI Shun-bin, WANG Xiang-dong

(College of Civil Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

Abstract: In consideration of the fact that the cracks on the heel of gravity dams were in the I-II complicated state, a preliminary study was made on the service life estimation of gravity dams with the theory and method of fracture mechanics by introduction of the concept of the equivalent stress intensity factor and combination with the Paris formula, and a formula for estimating the service life of gravity dams was given. The formula presented is reasonable in theory and is helpful to the improvement of the techniques of dam construction and the accuracy of safety grade evaluation of dam buildings.

Key words: gravity dam; crack; ratio of propagation; life estimation