

文章编号 :1671-683X(2002)03-0101-03

# 重力坝坝踵界面裂缝的地震断裂分析

胡良明, 李宗坤, 周鸿钧

( 郑州大学环境与水利学院, 河南 郑州 450002 )

摘 要: 针对有限元方法计算异弹模界面裂缝程序繁琐的问题, 利用特解边界元法, 对重力坝坝踵区界面裂缝在地震作用下的应力强度因子变化规律进行了探讨, 得出了应力强度因子  $K_{\perp}$ ,  $K_{\parallel}$ ,  $K_0$  随弹模比的增加而减少, 随裂缝长度的增加而增加. 地震动水压力对重力坝裂缝影响较大. 算例表明, 特解边界元法是计算非均质裂缝动态断裂的有效方法.

关键词: 粘弹性; 非均质裂缝; 断裂分析; 应力强度因子

中图分类号: TV 301 文献标识码: A

在实际工程中, 由于自然条件及使用环境的不同, 经常会遇到异弹模界面裂缝的分析问题. 例如, 在水利枢纽中, 重力坝坝踵区界面裂缝的计算问题. 在这种情况下, 由于缝面两边的材料不同(一个是筑坝材料, 另一个是地基), 使得在缝端附近产生较复杂的应力状态. 另外, 工程中, 不论是建筑物或是地基, 在地震或动荷载作用下, 由于介质的内摩擦作用, 使其在变形过程中要引起能量的耗散, 呈现出较强的粘弹性特征. 而实际工程中裂缝的出现往往是在不同介质的接触面, 显然, 对粘弹性非均质裂缝的动态断裂分析具有实际工程意义.

## 1 求解粘弹性非均质裂缝的动态应力强度因子

### 1.1 用边界元法建立粘弹性动力反应方程

对于粘弹性动力反应问题, 在每个区域上建立形如

$[M]\ddot{u}\} + (1 + i\eta)[H]\dot{u}\} = [G]\{t\}$  (1)  
的边界元方程, 并将其按照耦合边与非耦合边, 写成分块矩阵的形式.

对区域  $\Omega_1$ ,

$$\begin{bmatrix} M^1 & M_c^1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_c^1 \\ \ddot{u}_c^1 \end{Bmatrix} + (1 + i\eta) \begin{bmatrix} H^1 & H_c^1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_c^1 \\ \dot{u}_c^1 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} G^1 & G_c^1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} t^1 \\ t_c^1 \end{Bmatrix}, \quad (2)$$

对区域  $\Omega_2$ ,

$$\begin{bmatrix} M^2 & M_c^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_c^2 \\ \ddot{u}_c^2 \end{Bmatrix} + (1 + i\eta) \begin{bmatrix} H^2 & H_c^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_c^2 \\ \dot{u}_c^2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} G^2 & G_c^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} t^2 \\ t_c^2 \end{Bmatrix}. \quad (3)$$

根据耦合节点在粘弹性动力分析中的连续条件, 按照矩阵运算法则, 可将方程(2)(3)装配在一起, 并将特征向量统一后, 得到耦合方程为

$$\begin{bmatrix} M^1 & M_c^1 & 0 & 0 \\ 0 & M_c^2 & 0 & M^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_c \\ \ddot{u}_c \\ \ddot{t} \\ \ddot{u}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} H^1 & H_c^1 & -G_c^1 & 0 \\ 0 & H_c^2 & G_c^2 & H^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_c \\ \dot{u}_c \\ \dot{t} \\ \dot{u}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \eta_1 H^1 & \eta_1 H_c^1 & 0 & 0 \\ 0 & \eta_2 H_c^2 & 0 & \eta_2 H^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_c \\ t_c \\ u_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} G^1 & 0 \\ 0 & G^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} t^1 \\ t^2 \end{Bmatrix}. \quad (4)$$

对于实际问题, 与单域情形相同地引入边界条件, 便可得到振动仿真方程, 形如

$$[\overline{M}]\ddot{x}\} + ([\overline{K}_R] + i[\overline{K}_I])\dot{x}\} = [G]\{P\}. \quad (5)$$

其中, 矩阵  $[\overline{M}]$ ,  $[\overline{K}_R]$ ,  $[\overline{K}_I]$ ,  $[G]$  是由方程(4)中的相应矩阵引入边界条件得到的,  $\{x\}$  是未知量,

收稿日期: 2002-02-28, 修订日期: 2002-05-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(18972061)

作者简介: 胡良明(1963-), 男, 河南省光山县人, 郑州大学讲师, 硕士, 主要从事水工结构及抗震分析方面的研究.

{P}是已知量,这些已知量或未知量,有一部分是位移和一部分面力组成.而对于具体耦合过程及其它符号可参阅文献[1,2].

求解复系数方程(5)便可得到粘弹性非均质裂缝问题的动力反应值.

### 1.2 计算动态应力强度因子

求出粘弹性非均质裂缝的动力反应后,就可以求得相应的动态应力强度因子.即

$$K_I(\tau)=\frac{(\sum f_I^j \sum r_j^2 - \sum r_j f_I^j \sum r_j)}{(4 \sum r_j^2 - \sum r_j \sum r_j)};$$
$$K_{II}(\tau)=\frac{(\sum f_{II}^j \sum r_j^2 - \sum r_j f_{II}^j \sum r_j)}{(4 \sum r_j^2 - \sum r_j \sum r_j)};$$

式中:  $f_I^j = \frac{\Delta u_x h_1 + \Delta u_y h_2}{D(h_1^2 + h_2^2)};$

$$f_{II}^j = \frac{\Delta u_x h_2 - \Delta u_y h_1}{D(h_2^2 + h_1^2)};$$

$\sum$ 表示j从1到4求和.

上述公式的推导过程参见文献[3].  
在实际中,用到的复应力强度因子模为

$$K_d(\tau)=\sqrt{K_I^2(\tau)+K_{II}^2(\tau)}.\tag{6}$$

## 2 计算实例

### 2.1 基本资料

某重力坝坝踵处裂缝长度为a米时其剖面图如图1所示.坝体弹性模量 $E_d=3\times 10^4$  MPa, $\nu_d=0.16$ ,地基弹性模量 $E_f$ 由 $E_f/E_d$ 的值反推得到,为了考查地基弹模的变化对应力强度因子的影响,分别取 $E_f/E_d=1.0,1.5,2.0,5.0,10.0$ ,为保证地震在坝基面上输入,取地基为半无限无质量地基,其泊松比 $\nu_f=0.16$ ,库水为不可压缩的理想流体,其容重 $\gamma_w=10$  kN/m<sup>3</sup>.本文取地震烈度为8度,只考虑水平地震的影响,加速度幅值取为0.25g,并假定按正弦方式变化,其变化频率为2.5 Hz.为了考查缝长对应力强度因子的影响,分别计算了缝长 $a=1.0,2.0,5.0$  m等情况;为更好地考查粘滞系数、库水对动态应力强度因子的影响,本文共计算以下三种工况:工况Ⅰ: $\eta_d=0.0,\eta_f=0.0$ ,库内无水;工况Ⅱ: $\eta_d=0.10,\eta_f=0.10$ ,库内无水;工况Ⅲ: $\eta_d=\eta_f=0.10$ ,大坝工作状态为满库.

### 2.2 计算成果与分析

#### 2.2.1 弹模比及裂缝长度对应力强度因子的影响

当坝体与坝基的粘滞系数为零时,即为工况Ⅰ情况,其计算结果见表1.

由表1可以看出,当缝长一定时, $K_I,K_{II},K_0$ 的最大值均随弹模比的增加而减少,这与实际情况相符,从而证明加固地基可以有效防止裂纹的扩展.当弹模比一定时, $K_I,K_{II},K_0$ 的最大值都随裂缝长度的增加而增加.

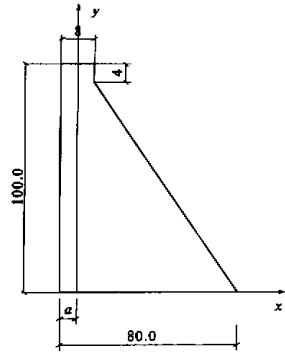


图1 重力坝横剖面图

Fig.1 Illustration of gravity dam cross-section

表1 弹模比变化时应力强度因子最大值

$E_f/E_d$	Maximum Value of Stress intensity factors about varying ratio of elastic module $10^4\text{N}\cdot\text{m}^{-3/2}$					
	$a=1$			$a=2$		
	$K_{I\max}$	$K_{II\max}$	$K_{0\max}$	$K_{I\max}$	$K_{II\max}$	$K_{0\max}$
1.0	23.43	18.51	29.86	24.69	19.03	31.18
1.5	15.43	7.82	17.26	16.23	8.17	18.03
2.0	11.07	10.58	11.63	11.63	4.75	12.28
5.0	3.80	0.84	3.80	3.98	0.95	3.98
10.0	1.74	0.45	1.75	1.82	0.47	1.82

#### 2.2.2 粘滞阻尼系数对应力强度因子的影响

为便于比较,以更好地考查粘滞阻尼系数 $\eta$ 对其应力强度因子的影响,当缝长 $a=5$  m时,工况Ⅰ及工况Ⅱ的动态应力强度因子最大值附与表2.

表2  $a=5$  m时动态应力强度因子最大值

$E_f/E_d$	Maximum Value of dynamic stress intensity factors at $a=5$ m $10^4\text{N}\cdot\text{m}^{-3/2}$					
	$K_{I\max}$		$K_{II\max}$		$K_{0\max}$	
	工况Ⅰ	工况Ⅱ	工况Ⅰ	工况Ⅱ	工况Ⅰ	工况Ⅱ
1.0	26.34	27.06	19.52	16.34	32.78	31.61
1.5	17.24	17.43	8.74	7.38	19.00	18.31
2.0	12.36	12.49	5.03	3.12	12.98	12.49
5.0	4.23	4.05	1.00	0.93	4.23	4.07
10.0	1.83	1.94	0.50	0.43	1.96	1.88

由表 2 可以看出,当裂缝长度一定时,无论坝基是否考虑其粘性性质, $K_{\perp}$ 、 $K_{\parallel}$ 、 $K_0$  的最大值均随其弹模比的增大而减小.在水平地震作用下,考虑坝体与坝基的粘性比不考虑其粘性时  $K_{\parallel}$ 、 $K_0$  的最大值要小,而对  $K_{\perp}$  影响不大,这说明粘滞阻尼在波的传播过程中要消耗一部分能量,对应力强度因子有影响,而这种影响是随着弹模比的增大而减小.

2.2.3 库水对动态应力强度因子的影响

在地震作用下,为了考虑库水对其动态应力强度因子的影响,本文对工况Ⅲ进行了计算,其结果列于表 3.

表 3  $a = 5\text{ m}$  时动态应力强度因子最大值

Tab.3 Maximum Value of dynamic stress intensity factors at  $a = 5\text{ m}$   $10^4\text{ N}\cdot\text{m}^{-3/2}$

$E_f/E_d$	$K_{\perp\text{max}}$		$K_{\parallel\text{max}}$		$K_{0\text{max}}$	
	工况Ⅱ	工况Ⅲ	工况Ⅱ	工况Ⅲ	工况Ⅱ	工况Ⅲ
1.0	27.06	33.03	16.34	36.81	31.61	43.15
1.5	17.43	24.54	7.38	27.35	18.31	35.56
2.0	12.49	18.45	3.12	24.62	12.49	24.66
5.0	4.05	11.78	0.93	6.14	4.07	12.66
10.0	1.94	5.32	0.43	4.64	1.88	5.36

由表 3 可以看出,无论是否考虑库水的影响,应力强度因子  $K_{\perp}$ 、 $K_{\parallel}$ 、 $K_0$  的最大值均随其弹模比的增加而减少;在地震荷载作用下,考虑其库水的影响(工况Ⅲ)的应力强度因子  $K_{\perp}$ 、 $K_{\parallel}$ 、 $K_0$  的最大值比不考虑库水的影响(工况Ⅱ)的最大值要大,这说明在水利工程中,库水的动水压力是其主要荷载之一,对重力坝裂缝影响极大.

3 结论

通过对某重力坝坝踵界面裂缝的动态应力强度因子的计算与分析,我们得出如下规律:

(1) 应力强度因子  $K_{\perp}$ 、 $K_{\parallel}$ 、 $K_0$  随弹模比的变化有显著的变化,当裂缝长度一定时,应力强度因子  $K_{\perp}$ 、 $K_{\parallel}$  及  $K_0$  的幅值均随弹模比的增加而减小.

(2) 应力强度因子  $K_{\perp}$ 、 $K_{\parallel}$ 、 $K_0$  随缝长的变化而变化,当弹模比一定时, $K_{\perp}$ 、 $K_{\parallel}$  及  $K_0$  均随其缝长的增加而增加.

(3) 粘滞阻尼系数对应力强度因子有明显的影响,在地震荷载作用下,考虑其坝体和地基的粘性性质,其应力强度因子  $K_{\parallel}$ 、 $K_0$  比不考虑其粘性时的值要小一些,而对  $K_{\perp}$  影响不大.

(4) 上游库水的作用不改变无水时重力坝坝踵界面裂缝的动态应力强度因子的变化规律,但库水的作用使得  $K_{\perp}$ 、 $K_{\parallel}$  和  $K_0$  幅值增加,从而说明库水动水压力对重力坝裂缝影响极大.

参考文献:

[1] 李庆斌,周鸿钧,林 皋,等.特解边界元法及其工程应用[M].北京:科技文献出版社,1992.

[2] 张五岳,周蔚晴,周鸿钧.边界元法计算异弹模界面裂缝应力强度因子[J].郑州工业大学学报,2001,22(2):50-53.

[3] 梁岗,周鸿钧,李庆斌.粘弹性非均质裂缝端动态应力强度因子计算[J].工程力学,1995(增刊):379-383.

The Dynamic Fracture Analysis of Interfacial Crack in the Vicinity of Gravity Dam Heel

HU Liang-ming, LI Zong-kun, ZHOU Hong-jun

(College of Environmental & Hydraulic Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** It is more complicated to use Finite Element Method to calculate bimaterial interfacial crack. Under earthquake act, the changing law of dynamic stress intensity factors for interfacial crack in the vicinity of gravity dam heel is discussed by Particular Solution Boundary Element Method (PSBEM). Stress intensity factors  $K_{\perp}$ 、 $K_{\parallel}$  and  $K_0$  decrease as the ratio of elastic module increases, whereas they increase as the crack increases. Earthquake hydrodynamic pressure has great influence on the heel-crack of gravity dam. Example indicates that PSBEM is a valid method, which is worth recommending for engineering use.

**Key words:** viscoelastic; non-homogeneous crack; fracture analysis; stress intensity factor