

# 弹性地基上重力坝坝踵界面

## 裂缝断裂可靠度分析 \* \* \*

董耀星 周鸿钧 王 博

(郑州工学院水环系)

**摘 要:** 本文用特解边界元法及蒙特卡罗边界法计算了弹性地基上重力坝坝踵界面裂缝的断裂可靠度,找出了断裂韧度的均值是影响坝踵界面裂缝可靠度的主要因素,同时指出:区分裂缝的类型对断裂可靠度计算来说是十分重要的。文中还定量分析了地基刚度对裂缝断裂可靠度的影响。计算结果表明:地基刚度对裂缝断裂可靠度的影响甚大,不可忽视。计算还表明:扬压力对断裂可靠性来说仍是一种极为不利的因素。

**关键词:** 可靠度分析,重力坝,界面裂缝,断裂,地基

**中国图书分类号:** TV313

近年来,国内对重力坝的可靠度分析做了很多工作<sup>(1)(2)</sup>,取得了可喜的成绩。这些工作集中在对重力坝应力、稳定的可靠度计算以及基于应力、稳定可靠度的体系可靠度计算方面。

由于重力坝在实际运行中常常出现裂缝,特别是坝踵区的界面裂缝更为常见。重力坝出现裂缝以后其可靠性如何?裂缝进一步扩展的可能性有多大?为回答这些问题,有必要开展重力坝的断裂可靠度研究。

为此,本文采用双区域耦合的特解边界元法<sup>(3)</sup>以及蒙特卡罗边界法<sup>(4)</sup>,对具有坝踵界面裂缝的重力坝的断裂可靠度进行了计算分析,取得了一些有益的成果,为重力坝断裂可靠度的进一步研究打下了基础。

### 1 用特解边界元法求应力强度因子

边界单元法计算应力强度因子有许多方法,如奇异单元法,位移外推法及应力外推法

---

\* 本文工作得到了郑州工学院青年科研基金的资助。

\* \* 收稿日期: 1992-01-05

等, 其中奇异单元法具有较高的精度。该法利用均质材料缝端的  $1/2$  阶奇异性, 构造出具有同阶奇异性的奇异单元, 从而求解。但对于异弹模界面裂缝来说, 由于其缝端应力场的奇异性与界面的两种材料的性质密切相关, 只有当材料确定后问题的奇异性才能确定, 故直接利用等参元的奇异格式只能求解具体问题, 给使用带来不便。

求应力强度因子的应力外推法可避免上述缺点, 而且该法的精度完全可以满足工程需要<sup>[5]</sup>。

由于本文在对重力坝坝踵界面裂缝的稳定性进行可靠性分析时, 需考虑不同地基材料的影响, 坝体与地基的弹模比变化范围较大, 故选用应力外推法求界面裂缝的应力强度因子。

由文献[5], 异弹模界面裂缝的应力强度因子与应力的关系可表示为:

$$K_I = \lim_{r \rightarrow 0} f_I(r) \quad (1)$$

$$K_{II} = \lim_{r \rightarrow 0} f_{II}(r) \quad (2)$$

其中应力强度因子项为:

$$f_I(r) = 2\pi r(\sigma_y \cos\theta - \tau_{xy} \cdot \sin\theta) \quad (3)$$

$$f_{II}(r) = 2\pi r(\sigma_y \sin\theta - \tau_{xy} \cdot \cos\theta) \quad (4)$$

利用边界元的双区域耦合技术<sup>[6]</sup>, 可求出区域边界上(包括耦合边界上)的位移与面力, 由面力与应力的关系, 可求出边界结点上的应力为:

$$\sigma_y = -t_1 \quad (5)$$

$$\tau_{xy} = -t_2 \quad (6)$$

进而可以求得缝端第一个单元内高斯点上相应的应力, 将之代入(3)、(4)二式中, 即可求得第  $j$  个高斯点上的应力强度因子项  $f_I^j$ 、 $f_{II}^j$ , 进行线性拟合后, 由  $r=0$  外推求出缝端的应力强度因子为:

$$K_I = \frac{(\sum f_I^j \cdot \sum r_j^2 - \sum r_j^2 f_I^j \cdot \sum r_j)}{(\sum \sum r_j^2 - \sum r_j \cdot \sum r_j)} \quad (7)$$

$$K_{II} = \frac{(\sum f_{II}^j \cdot \sum r_j - \sum r_j f_{II}^j \cdot \sum r_j)}{(\sum \sum r_j^2 - \sum r_j \cdot \sum r_j)} \quad (8)$$

式中:

$f_I^j$ 、 $f_{II}^j$  为第  $j$  个高斯点的应力强度因子项;  $r_j$  为第  $j$  个高斯点到缝端的距离。

## 2、坝踵界面裂缝的断裂可靠度计算

本文计算了 100 米高重力坝的坝踵界面裂缝不失稳扩展的概率。重力坝剖面见图 1。其中 C 点为坝踵 1 米长的界面裂缝的缝端。

由于坝体与坝基是两种不同的材料, 其弹模比有较大的变化范围, 断裂力学在同弹模条件下得出的裂缝失稳扩展理论在这种条件下的正确性尚未得到证实, 现有文献中由混凝土试件的试验结果所得到的断裂判据的经验公式对异弹模界面裂缝的适用性也有待研究, 因此目前对异弹模界面裂缝的失稳扩展尚未有公认的判据。

鉴于以上情况, 本文在计算异弹模界面裂缝的失稳扩展破坏概率时, 仅考虑了裂缝沿界面扩展的情况, 并采用较为简单的判据对拉剪型裂缝, 取极限状态方程为:

$$K_{IC} - K_I = 0 \quad (9)$$

裂缝失稳扩展的概率为:

$$P_f = P(K_{IC} < K_I) \quad (10)$$

对压剪型裂缝, 取极限状态方程为:

$$K_{IIC} - K_{II} = 0 \quad (11)$$

裂缝失稳扩展的概率为:

$$P_f = P(K_{IIC} < K_{II}) \quad (12)$$

其中:

$K_{IC}$ 、 $K_{IIC}$ : 材料的断裂韧度;

$K_I$ 、 $K_{II}$ : 计算出的缝端应力强度因子

在计算材料断裂韧度对断裂可靠度的影响时, 选弹模比:

$$\alpha_E = E_1 / E_2 = 2 \quad (13)$$

式中  $E_1$  为坝体弹模而  $E_2$  为基岩弹模。此时, 在表 1 所示三种随机荷载作用下, 裂缝处于拉剪状态, 极限状态方程由式(9)所示

图 2 示出了  $K_{IC}$  的均值变化对裂缝稳定可靠指标的影响。由图中可见, 当  $K_{IC}$  的均值由  $10T/M^{3/2}$  增至  $200T/M^{3/2}$  时, 可靠指标分别由 2.04 增至 10.0(不计扬压力)和 -0.5 增至 4.09(计入扬压力), 这是相当大的变化范围。由于图中曲线斜率较大, 反映了  $K_{IC}$  的均值变化对裂缝扩展与否有很大的影响。相比之下,  $K_{IC}$  的方差变化对可靠指标的影响则小得多。由图 3 可见, 当  $K_{IC}$  的变异系数由 0.2 变至 0.8 时, 曲线十分平缓, 可靠指标的最大差值为 1.11(不计扬压力)和 0.70(计入扬压力)。  $K_{IC}$  的分布对可靠指标的影响也较小, 这由图 4(a)和 4(b)可以看出, 图中三条曲线相距较近, 由表 4(a)和表 4(b)知最大差值小于 1.0。对于变异系数大于 0.2 的情况, 假设  $K_{IC}$  为正态分布时所得可靠指标最小, 使得计算结果偏于安全。

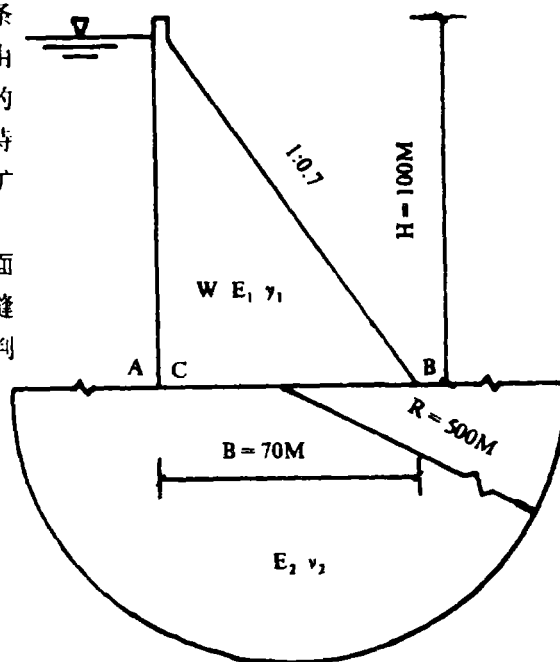
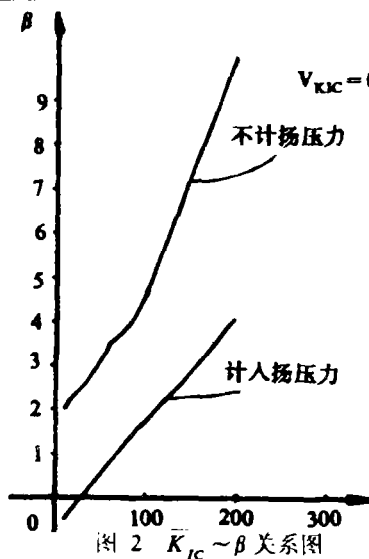
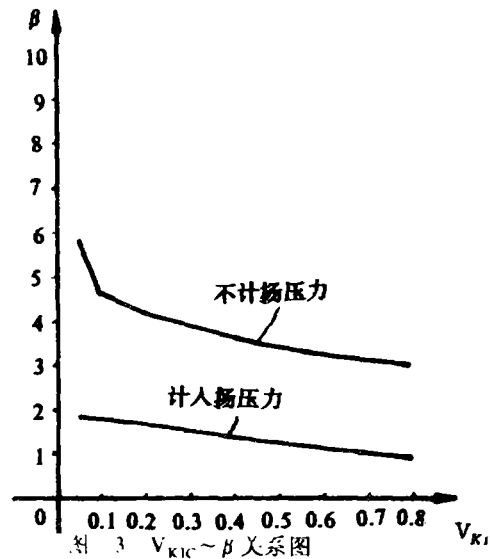
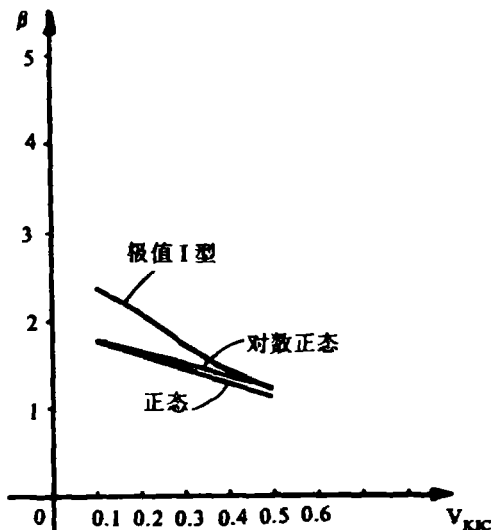
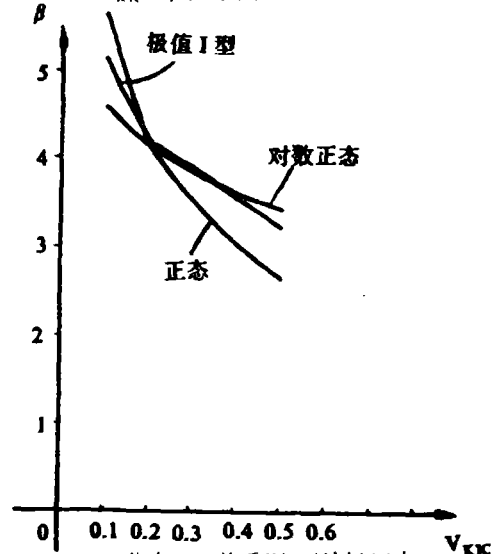


图 1 计算坝例

图 2  $K_{IC} \sim \beta$  关系图图 3  $V_{KIC} \sim \beta$  关系图图 4(a)  $K_{IC}$  分布  $\sim \beta$  关系图(计入扬压力)图 4(b)  $K_{IC}$  分布  $\sim \beta$  关系图(不计扬压力)

以上分析表明: $K_{IC}$  的均值大小是影响坝踵界面裂缝稳定的主要因素, 而  $K_{IC}$  的方差及分布变化的影响则相对次要。

由图 2 至图 4 可以明显看出: 对坝踵界面裂缝的稳定可靠性来说, 扬压力是一种不利因素, 它无论在何种  $K_{IC}$  的均值、方差及分布情况下都大幅度地降低了可靠指标的数值, 因此有效地控制扬压力也将有助于坝踵界面裂缝的稳定。

对 9 组弹模比  $\alpha_E$  的计算表明: 地基刚度对坝踵界面裂缝的稳定可靠性有很大影响, 且其影响较为复杂。

由图 5 可以看出: 当  $\lg \alpha_E$  由 -2 变到 +2 时, 地基刚度由大变小, 地基逐渐变软,  $K_I$  值由正值降为零又变为负值, 裂缝由拉剪型过渡到压剪型。断裂力学的研究表明: 拉剪复合型和压剪复合型裂缝具有不同的缝端应力分布情况, 在进行断裂分析时应采用不同的判据<sup>[7]</sup>。

图5表示了不同弹模比时, 缝端应力强度因子  $K_I$ 、 $K_{II}$  及裂缝稳定可靠指标的变化情况。图中  $K_I=0$  左边的区域内,  $K_I>0$ ,  $K_{II}\neq 0$ , 裂缝处于拉剪状态, 采用判据式(9)。此时,  $K_I$  增大时, 可靠指标减小, 而当  $K_I$  减小时, 可靠指标增大。在  $K_I=0$  右边的区域内,  $K_I<0$ ,  $K_{II}\neq 0$ , 裂缝处于压剪状态, 采用判据式(11), 此时可靠指标随  $K_{II}$  的下降而上升。在  $K_I=0$  处, 可靠指标曲线是不连续的, 拉剪状态与压剪状态求出的可靠指标值在  $K_I=0$  附近有较大差值。因此在进行裂缝稳定可靠指标计算时, 区分裂缝处于拉剪状态或是压剪状态是十分重要的。计算表明<sup>[8]</sup>: 仅采用一种判据将得出错误的计算结果。

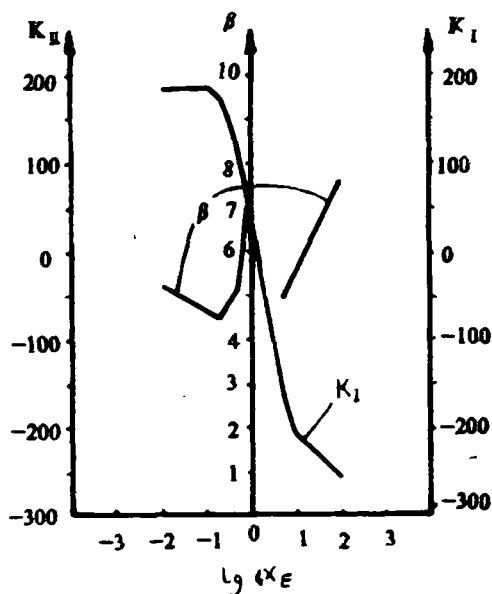


图5  $\alpha_E \sim \beta$  关系图

### 3 结论

本文通过对重力坝坝踵界面裂缝的断裂可靠度计算, 对重力坝的断裂可靠度作了初步分析, 主要结论有:

- 3.1 材料的断裂韧度的均值是影响裂缝稳定可靠性的主要因素, 而断裂韧度的变异系数及断裂韧度的分布规律的影响则相对次要。
- 3.2 扬压力对坝踵界面裂缝的稳定可靠性来说是极不利的因素, 降低扬压力将减小裂缝失稳扩展的概率。
- 3.3 地基刚度的变化影响缝端的应力场从而影响缝端的应力强度因子及裂缝的状态, 对裂缝的稳定可靠性有较大的影响。
- 3.4 区分裂缝是拉剪复合型抑或是压剪复合型, 对断裂可靠度计算来说是必要且重要的, 应根据裂缝的状态选用相应的判据。

由以上结论可见: 断裂可靠度分析的内容较为复杂, 这方面的工作今后尚应进一步深入开展。

表1 随机变量统计参数

随机变量名	单位	均值	变异系数	分布规律
混凝土容重	T/M <sup>3</sup>	2.4	0.02	正态
上游水深	M	91.665	0.06	正态
扬压力系数	无因次	0.35	0.15	极值I型
混凝土断裂韧度	T/M <sup>3/2</sup>	$K_{IC}$	$V_{KIC}$	正态

表 2  $K_{IC}$  均值变化对裂缝稳定可靠指标的影响

$K_{IC}(T/M^{3/2})$	不计扬压力		计入扬压力	
	$P_f$	$\beta$	$P_f$	$\beta$
200	0.0	10.0	$2.19 \times 10^{-5}$	4.086
150	$7.05 \times 10^{-14}$	7.394	$1.96 \times 10^{-3}$	2.885
100	$2.33 \times 10^{-6}$	4.579	$3.81 \times 10^{-2}$	1.774
80	$6.01 \times 10^{-5}$	3.846	0.101	1.276
60	$2.17 \times 10^{-4}$	3.518	0.215	0.789
40	$2.51 \times 10^{-3}$	2.805	0.385	0.292
20	$1.02 \times 10^{-2}$	2.318	0.593	-0.235
10	$2.09 \times 10^{-2}$	2.035	0.690	-0.495

注: 计算中  $V_{KIC} = 0.1$ 表 3  $K_{IC}$  变异系数变化对裂缝稳定可靠指标的影响

$K_{IC}$ 变异系数 $V_{KIC}$	不计扬压力		计入扬压力	
	$P_f$	$\beta$	$P_f$	$\beta$
0.05	$2.68 \times 10^9$	5.841	$3.44 \times 10^{-2}$	1.820
0.10	$2.33 \times 10^{-6}$	4.579	$3.81 \times 10^{-2}$	1.774
0.20	$1.90 \times 10^{-5}$	4.120	$5.06 \times 10^{-2}$	1.639
0.30	$5.69 \times 10^{-5}$	3.859	$6.80 \times 10^{-2}$	1.491
0.35	$9.77 \times 10^{-5}$	3.725	$7.79 \times 10^{-2}$	1.419
0.40	$1.57 \times 10^{-4}$	3.603	$8.83 \times 10^{-2}$	1.351
0.50	$3.34 \times 10^{-4}$	3.403	0.110	1.227
0.60	$5.86 \times 10^{-4}$	3.246	0.132	1.117
0.70	$9.11 \times 10^{-4}$	3.118	0.153	1.024
0.80	$1.29 \times 10^{-3}$	3.013	0.174	0.938

注: 计算中取  $K_{IC} = 100T/M^{3/2}$ ,  $\alpha_B = 2$ .

表 4(a)  $K_{IC}$  分布变化对裂缝稳定可靠指标的影响(不计扬压力)

变异系数 $V_{KIC}$	正态分布		对数正态分布		极值 I 型分布	
	$P_f$	$\beta$	$P_f$	$\beta$	$P_f$	$\beta$
0.1	$1.76 \times 10^{-8}$	5.513	$2.33 \times 10^{-6}$	4.579	$2.60 \times 10^{-7}$	5.109
0.2	$1.75 \times 10^{-4}$	4.138	$1.90 \times 10^{-5}$	4.120	$1.62 \times 10^{-5}$	4.156
0.3	$2.31 \times 10^{-3}$	3.502	$5.69 \times 10^{-5}$	3.859	$4.75 \times 10^{-5}$	3.903
0.4	$1.24 \times 10^{-2}$	3.025	$1.57 \times 10^{-4}$	3.603	$1.96 \times 10^{-4}$	3.545
0.5	$4.09 \times 10^{-2}$	2.644	$3.34 \times 10^{-4}$	3.403	$6.57 \times 10^{-4}$	3.213

注: 计算中取  $K_{IC} = 100T / M^{3/2}$ ,  $\alpha^E = 2$ 。表 4(b)  $K_{IC}$  分布变化对裂缝稳定可靠指标的影响(计入扬压力)

变异系数 $V_{KIC}$	正态分布		对数正态分布		极值 I 型分布	
	$P_f$	$\beta$	$P_f$	$\beta$	$P_f$	$\beta$
0.1	$4.01 \times 10^{-2}$	1.748	$3.81 \times 10^{-2}$	1.774	$9.41 \times 10^{-3}$	2.349
0.2	$5.33 \times 10^{-2}$	1.614	$5.06 \times 10^{-2}$	1.639	$1.94 \times 10^{-2}$	2.067
0.3	$7.41 \times 10^{-2}$	1.442	$6.80 \times 10^{-2}$	1.491	$4.45 \times 10^{-2}$	1.700
0.4	0.102	1.271	$8.83 \times 10^{-2}$	1.351	$7.93 \times 10^{-2}$	1.410
0.5	0.132	1.118	0.110	1.227	0.116	1.198

注: 计算中取  $K_{IC} = 100T / M^{3/2}$ ,  $\alpha^E = 2$ 。

表 5 地基刚度对裂缝稳定可靠指标的影响

弹模比 $lg \alpha_E$	不计扬压力			计入扬压力		
	$K_I$	$P_f$	$\beta$	$K_I$	$P_f$	$\beta$
-2	184	$9.95 \times 10^{-8}$	5.200	181	$6.15 \times 10^{-8}$	5.289
-1	186	$2.29 \times 10^{-6}$	4.583	196	$6.65 \times 10^{-6}$	4.355
-0.699	174	$4.15 \times 10^{-6}$	4.457	200	$4.65 \times 10^{-5}$	3.906
-0.3	118	$1.56 \times 10^{-7}$	5.116	180	$6.04 \times 10^{-5}$	3.844
0	44	$1.47 \times 10^{-14}$	7.599	132	$2.34 \times 10^{-7}$	5.039
0.3	-62	$1.08 \times 10^{-12}$	7.023	30	$8.85 \times 10^{-14}$	7.364
0.699	-165	$3.95 \times 10^{-7}$	4.938	-100	$7.53 \times 10^{-3}$	2.431
1	-210	$1.52 \times 10^{-8}$	5.539	-168	$5.40 \times 10^{-3}$	2.549
2	-257	$1.54 \times 10^{-14}$	7.594	-248	$1.10 \times 10^{-3}$	3.062

注: 计算中取  $K_{IC} = 400T / M^{3/2}$ 

## 参 考 文 献

- (1) 吴世伟等编著. 结构安全度与可靠度分析论文集. 河海大学出版社.
- (2) 吴媚玲、姚耀武著. 重力坝的应力、稳定与可靠性. 中国科学技术出版社.
- (3) 李庆斌、特解边界元法及其在重力坝坝踵区界面裂缝动静态断裂分析中的应用. 大连理工大学博士论文, 1989.

- (4) 董耀星.结构可靠度分析的蒙特卡罗边界法. 郑州工学院学报, 1989.2.
- (5) 李庆斌等.用边界元法计算异弹模界面裂缝的应力强度因子. 第二届工程中的边界元法会议论文集, 1988.11.
- (6) (英)C.A.布莱比亚.工程师用的边界单元法. 科学出版社.
- (7) 徐道远.压剪复合应力强度因子及混凝土压剪断裂判据. 河海大学学报, 1988.1.
- (8) 董耀星.蒙特卡罗边界法及重力坝可靠度分析. 郑州工学院硕士论文. 1989.

## Reliability Analysis of Interfacial Crack at the Heel of Gravity Dam Based on Elestic Foun Dation

Dong Yaoxing      Zhou hongjun      Wang bo

(Zhengzhou Institute of Technology)

**Abstract:** Particular solusion Boundary Element Method and Monte Carlo Boundary Method are combined in this paper to calculate the fracture reliabilities of a gravity dam with an interfacial crack at the heel of the dam. Through the calculation, it is found that the mean value of fracture toughness is the main factor that affects the fracture reliability. It is also pointed out that the type of the heel-crack (press-shear or tension-shear) is of necessity and importance for the determination of fracture reliability.

The influence of the stiffness of the foundation rock on fracture reliability is also analyzed. Results show that this influence is complex and obvious, which should not be neglected in the fracture reliability analysis of gravity dams on rock foundation.

Results also show that, for the frature reliability of gravity dam, uplift remains a very unfavorable factor.

**Key words:** Reliability Analysis, Gravity Dam, Interfacial crack, Fracture, Foundation.