

# 地基弹性和坝踵裂缝对重力坝 动力特性的影响\*

李宗坤 周鸿钧

(郑州工学院水环系)

**摘 要:** 本文采用特解边界元法, 分析了地基弹性和重力坝坝踵水平裂缝对坝体自振特性的影响, 并将特解边界元法推广应用到两个区域问题。所得结论为工程设计提供有价值的依据。

**关键词:** 特解边界元, 动力特性

**中图分类号:** TV642

有缝混凝土坝的动力研究对坝的安全运行有着十分重要的意义。近年来, 对有缝混凝土坝的地震反应进行了较多的实验研究及计算<sup>[1]</sup>, 但对有缝坝体的自振特性研究却不多, 坝踵产生水平裂缝后的坝体动力特性分析更是少见。本文不仅在这方面进行了探讨, 而且引进了动力特解边界元法<sup>[2]</sup>, 使其在应用上有了新的发展。

本文计算中采用了坝体材料均质等向线弹性假定, 平面问题假定。

## 1 动力特解边界元法理论及区域耦合处理

### 1.1 基本公式(详细推导见文献[7])

对于均质各项同性弹性体, 在简谐振动情况下, 其控制微分方程为

$$L(u_i) + \rho\omega^2 u_i = 0 \quad (1)$$

式中:  $L$ 是Laplace算子,  $u_i$ 为位移分量,  $\rho$ 为质量密度,  $\omega$ 是系统的固有频率。

假设已求得方程(1)的通解  $u_i^c$  和特解  $u_i^p$ , 并分别满足:

$$L(u_i^c) = 0 \quad (2)$$

$$L(u_i^p) + \rho\omega^2 u_i^p = 0 \quad (3)$$

$$\text{再引入域内未知位移向量 } u_i \text{ 的函数表达式为 } u_i(x) = \sum_{m=1}^{\infty} C_{ik}(x, \xi^m) \phi_k(\xi^m) \quad (4)$$

\* 收稿日期: 1993-08-24

应用一般边界元理论最后可得方程

$$[A]\{x\} = \omega^2 [\bar{M}]\{x\} \quad (5)$$

可以看出, 上式即为求解特征方程的特征根问题, 从而可以求得物体自振时的各阶频率和相应主振型。

$$\text{这里: } [A] = \begin{bmatrix} H_{11} & -G_{12} \\ H_{21} & -G_{22} \end{bmatrix}, [\bar{M}] = \begin{bmatrix} M_{11} & 0 \\ M_{21} & 0 \end{bmatrix} \quad \{x\} = \begin{Bmatrix} u_1 \\ t_2 \end{Bmatrix}$$

## 1.2 两个区域的耦合处理:

动力问题的双区域耦合, 其处理方法基本上与静力问题类似, 这里采用“交界面多余未知量消去法”。现以图1为例, 对其进行说明。

根据特解边界元法理论, 对于单个区域 I、II 应分别有

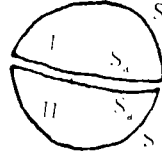


图 1

$$[H^1 \quad H_a^1] \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_a^1 \end{Bmatrix} - [G^1 \quad G_a^1] \begin{Bmatrix} t_1 \\ t_a^1 \end{Bmatrix} = \omega^2 [M^1 \quad M_a^1] \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_a^1 \end{Bmatrix} \quad (6)$$

$$[H^2 \quad H_a^2] \begin{Bmatrix} u_2 \\ u_a^2 \end{Bmatrix} - [G^2 \quad G_a^2] \begin{Bmatrix} t_2 \\ t_a^2 \end{Bmatrix} = \omega^2 [M^2 \quad M_a^2] \begin{Bmatrix} u_2 \\ u_a^2 \end{Bmatrix} \quad (7)$$

设定两个区域在交界面处无相对位移, 且满足下列条件

$$\begin{cases} \tilde{u}_a = u_a^1 = u_a^2 \\ \tilde{t}_a = t_a^2 = -t_a^1 \end{cases} \quad (8)$$

将连续条件(8)代入式(6)、(7)有

$$-[G^1 \quad G_a^1] \begin{Bmatrix} t_1 \\ -t_a^1 \end{Bmatrix} + [H^1 \quad H_a^1] \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_a^1 \end{Bmatrix} = \omega^2 [M^1 \quad M_a^1] \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_a^1 \end{Bmatrix} \quad (9)$$

$$[H^2 \quad H_a^2] \begin{Bmatrix} u_2 \\ u_a^2 \end{Bmatrix} - [G^2 \quad G_a^2] \begin{Bmatrix} t_2 \\ t_a^2 \end{Bmatrix} = \omega^2 [M^2 \quad M_a^2] \begin{Bmatrix} u_2 \\ u_a^2 \end{Bmatrix} \quad (10)$$

将上两式合并:

$$\begin{bmatrix} H^1 & 0 & H_a^1 \\ 0 & H^2 & H_a^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_a^2 \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} G^1 & 0 & -G_a^1 \\ 0 & G^2 & G_a^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_a^2 \end{Bmatrix} = \omega^2 \begin{bmatrix} M^1 & 0 & M_a^1 \\ 0 & M^2 & M_a^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_a^2 \end{Bmatrix} \quad (11)$$

再将(11)式中已知项和未知项分离:



表 2 重力坝特征尺寸

坝号	尺寸			
	H	h	B	b
A	30	1.6	37.5	2
B	76	6	61	16
C	284	18	220	22

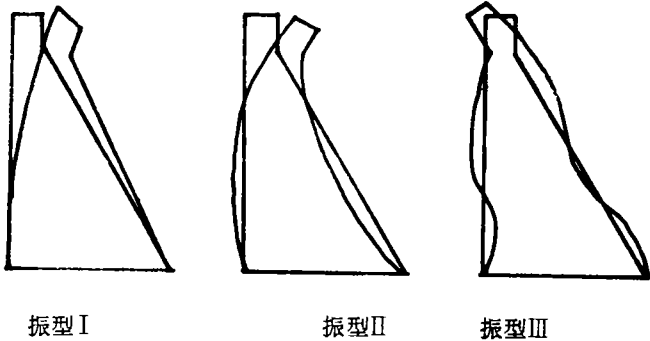


图 4

表 3 重力坝固有频率计算结果

坝号	算法	振型		
		1	2	3
A 坝	FEM	133.1	297.2	532.4
	BEM	125.4	289.3	510.8
B 坝	FEM	37.2	80.6	149.6
	BEM	36.6	78.0	140.3
C 坝	FEM	10.8	22.8	38.5
	BEM	10.7	24.2	36.0

算例 3:

弹性地基上重力坝的自振频率计算

在算例 2 的基础上进一步考虑弹性地基对坝体的作用，由于地基质量相对于坝体非常大，为计算坝体本身的自振特性，计算中我们不考虑地基的质量，即只考虑地基的刚性，而不考虑地基的惯性，这种无质量地基只不过工程计算中的假定，实际是不存在的。同时还分析了地基弹模相对于坝体改变时，坝体自振特性的变化规律。计算中采用的参数同算例 2，重力坝几何尺寸见图 5，其计算结果列于表 4。

表 4 弹性地基对重力坝自振频率的影响

振型	$E / E_R$					
	0.1	0.5	1.0	5	10	100
mode 1	26.68	23.37	20.41	11.78	8.69	2.87
mode 2	60.90	49.13	38.73	18.99	13.59	4.18
mode 3	70.41	52.77	36.35	32.66	26.40	9.97
mode 4	115.68	94.96	84.09	64.16	60.65	58.45

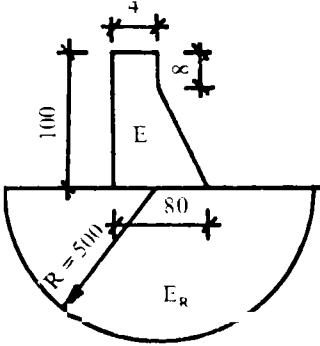


图 5

3 坝踵产生水平裂缝后坝体自振特性研究

坝体产生裂缝后自振频率的变化，将是工程上迫切需要了解的问题。近年来，对同弹模坝体裂缝已有研究[6]，然而，对坝踵处裂缝并考虑地基弹性作用的动特性研究却不多见，考虑坝体与地基异弹模情形的动特性分析更是少见，因此，对这一问题进行探讨是有价值的工作。

结构产生裂缝后，在地震荷载作用下缝隙的张合、碰撞、摩擦，使结构反应变得极其复杂，问题已超出了线弹性范围，因此，直接应用求解线弹性结构的方法求解裂缝问题存在着困难，即使作一粗糙的估计，也会使计算很繁琐。单从工程角度去考虑，缝隙全张开和全合闭为最重要状态，只分析张开和闭合两种状态的振型具有简便的特点，而将缝限制在一定范围之内进行研究，这种非线性的影响是很小的。为了使计算较接近实际而又较简便，作为初步研究，假定按弹性结构来处理是合适的。

在前面边界元程序的基础上，对坝与地基交界面上的耦合边单元进行了处理，并计算了随缝长改变及地基弹模同时改变的自振频率结果。模型的几何尺寸见图 6，计算结果列于表 5。材料参数同前。

表 5 自振频率结果

$E_C/E_R$	$\omega$	a(米)				
		1	2	3	4	5
0.1	$\omega_1$	26.66	26.55	26.40	26.22	26.01
	$\omega_2$	62.33	61.99	61.67	61.38	61.16
	$\omega_3$	70.67	70.32	69.76	69.08	68.29
	$\omega_4$	139.49	139.37	139.23	139.17	139.14
1.0	$\omega_1$	20.24	20.06	19.88	19.69	19.49
	$\omega_2$	39.34	39.30	39.28	39.23	39.17
	$\omega_3$	46.53	46.38	46.26	46.15	46.05
	$\omega_4$	89.34	89.30	89.26	89.24	89.14
5	$\omega_1$	11.65	11.57	11.44	11.34	11.23
	$\omega_2$	19.17	19.11	19.07	19.01	18.95
	$\omega_3$	32.64	32.47	32.33	32.19	32.06
	$\omega_4$	64.93	64.86	64.78	64.68	64.62
10	$\omega_1$	8.61	8.53	8.46	8.39	8.31
	$\omega_2$	13.72	13.68	13.64	13.59	13.55
	$\omega_3$	26.09	25.90	25.74	25.59	25.44
	$\omega_4$	59.65	59.51	59.37	59.22	59.07

我们还计算了裂缝长度为  $10^m$ 、 $20^m$  时振型结果, 计算可知当缝长超过 5 米以后, 再按弹性结构计算, 将出现缝面两岸位移交叉现象, 这时应按非线性结构考虑更为合适, 或用升阶摄动法加以修正。

#### 4 结束语

本文的理论分析及计算结果表明:

- 4.1 同一坝高, 相对于坝体地基愈软坝体自振频率愈低。
- 4.2 坝踵裂缝的产生以及随缝长的增加, 坝体自振频率呈降低趋势。但缝长小于 5 米时, 裂缝的存在对坝体频率的影响不超过 5%, 设计中可以不予考虑。
- 4.3 在裂缝长度一定的情况下, 地基弹模的相对降低, 使得裂缝对坝体频率的影响愈明显。
- 4.4 采用边界元法计算重力坝自振特性时, 地基范围取 5 倍坝高, 能满足精度要求。

#### 参 考 文 献

- 1 周品, 林皋, 倪汉根, 裂缝混凝土结构的抗震分析. 博士论文. 大连工学院.
- 2 沈家荫, 张杨. 边界单元法若干问题讨论. 华东水利学院学报. 1985 年第二期.
- 3 Shahid Ahmad, Free Vibration Analysis by BEM Using Particular Integrals, J. Eng. Mech. 1986, 10
- 4 D. Nardini and C. A. Brebbia, A New Approach to Free Vibration Analysis Using Boundary Elements, Boundary Element Method in Engineering Proc. Fourth 1982.
- 5 周鸿钧, 李庆斌. 坝体与库水耦振的边界元计算. 水利学报. 1988, 7.
- 6 周品, 林皋, 倪汉根. 切缝对大坝动力特性的影响. 土木工程学报. 1983, 9.
- 7 周鸿钧等. 结构动力分析的特解边界元法研究. 郑州工学院学报. Vol.12, No.1, 1991 年.

### Study about effect of foundation elasticity and crack on dynamic characteristics of gravity dam

Li Zongkun     Zhou Hongjun  
(Zhengzhou Institute of Technology)

**Abstract:** In this paper, the effect of foundation elasticity and horizontal cracks in heel of gravity dam on autooscillation characteristics of embankment is analyzed. And particular solution boundary element method is extended to solve two region problem.

**Keywords:** particular solution boundary element method, gravity dam, dynamic characteristic.

