

重力坝地震波动的时域数值分析

贺向丽 李同春

(河海大学水利水电工程学院 ,江苏 南京 210098)

摘要 :传统的重力坝地震响应分析模型未考虑地基辐射阻尼的作用以及波动的不均匀输入 .为此 ,将黏 -弹性人工边界条件应用于重力坝地震响应分析中 ,并基于波场分离技术推导了地震波从底面垂直入射时的重力坝波动输入公式 ,同时探讨了地基弹性模量对地基辐射阻尼的影响 .计算结果表明 ,黏 -弹性边界下的动应力值比固定边界无质量地基下的动应力值小 20% ~ 40% ,并且地基弹性模量越小 ,峰值动应力降幅就越大 .

关键词 :重力坝 ;黏 -弹性人工边界 ;波动输入 ;波场分离

中图分类号 :TV642.3 文献标识码 :A 文章编号 :1000-198X(2007)01-0005-05

重力坝是水利工程中最常见的坝型 .利用传统的分析方法分析重力坝动力响应时 ,通常采用固定边界和无质量地基 ,并且地震波输入是通过在坝基面上均匀输入地表自由场加速度来实现的^[1] .传统分析方法未考虑地基辐射阻尼的作用以及波动的不均匀输入 .为此 ,一些学者^[2-4]利用人工边界来解决有限离散模型边界上波的反射问题 .文献 [5] 将其中人工透射边界^[6]与显式有限元相结合 ,形成了新的重力坝地震反应分析的计算体系 .但是 ,由于采用了显式有限元法 ,对时间步长的要求比较严格 ,耗时较多 .本文将黏 -弹性人工边界与隐式有限元相结合 ,对一典型重力坝进行地震反应分析 ,并基于波场分离技术推导了地震波从底面垂直入射时的重力坝波动输入公式 ,同时探讨了地基弹性模量对地基辐射阻尼的影响 .

1 黏 -弹性人工边界

黏 -弹性边界是 Deeks 等^[7-8]在黏性边界的基础上提出的 .这一方法采用由物理元件构成的人工边界 ,具有良好的低频稳定性 .

极坐标中出平面柱面波运动方程为

$$\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = c_s^2 \left(\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} \right)$$
$$c_s = \sqrt{G/\rho}$$

(1)

式中 : w ——介质的出平面位移 ; c_s ——剪切波速 ; G ——剪切模量 ; ρ ——质量密度 ; t ——时间变量 ; r ——至散射波源的距离变量 .

对于从坐标原点射出的柱面波 ,可以采用如下形式的解 :

$$w = (r , t) = \frac{1}{\sqrt{r}} f \left(t - \frac{r}{c_s} \right)$$

(2)

由式 (2) 和剪应力计算公式 $\tau(r , t) = G \partial w / \partial r$ 可推导出任意半径 r_b 处以矢径 r_b 为外法线的微元面上应力与该处速度和位移的关系为

$$\tau(r_b , t) = - \frac{G}{2r_b} u(r_b , t) - \rho c_s \frac{\partial u(r_b , t)}{\partial t}$$

(3)

可以看出 ,如果在半径 r_b 处截断介质 ,同时在截断的边界上施加相应分布的物理元件——黏性阻尼器 $C_b = \rho c_s$ 和线性弹簧 $K_b = G/2r_b$ 之后 ,就可以完全消除散射波在人工边界的反射 ,即可以精确地模拟波由有限域

向无限域的传播.

公式(3)是针对出平面剪切波情况导出的.对于其他情况,弹簧元件的弹性系数 K_b 和黏性阻尼器的阻尼系数 C_b 的计算公式为^[5]

$$K_b = \alpha \frac{G}{R} \qquad C_b = \rho c$$

(4)

式中: R ——散射波源至人工边界的距离; c ——介质中的波速,法向人工边界取P波波速 c_p ,切向人工边界取S波波速 c_s ; α ——参数,根据人工边界类型及设置方向参照表1取值^[9].

2 有限元运动方程

将黏-弹性边界条件引入重力坝动力计算中,则整个体系的有限元运动方程可表示为

$$M\ddot{u} + [C + C_r]\dot{u} + [K + K_r]u = F + F_r \qquad (5)$$

式中: $\ddot{u}$, $\dot{u}$, u ——体系的加速度、速度以及位移向量; M , C , K ——体系的质量矩阵、材料阻尼矩阵、刚度矩阵; F ——外力向量; K_r , C_r ——人工边界上弹簧系数和黏性阻尼器的阻尼系数; F_r ——输入的地震波在人工边界上引起的等效力.

动力方程求解采用Newmark方法,即采用如下积分格式:

$$u^{p+1} = u^p + \dot{u}^p \Delta t + \frac{\Delta t^2}{2} [(1 - 2\beta)\ddot{u}^p + 2\beta\ddot{u}^{p+1}]$$

(6)

$$\dot{u}^{p+1} = \dot{u}^p + \Delta t [(1 - \gamma)\ddot{u}^p + \gamma\ddot{u}^{p+1}]$$

(7)

其中: $\gamma = \frac{1}{2}$; $\beta = \frac{1}{4}$.

3 波动输入

如图1所示重力坝,假设地震波从底面垂直向上入射,在地基的底面和2个侧面的法向和切向分别设置了黏性阻尼器 C 和弹簧 K .正确实现波动输入的方法就是使边界上施加荷载后的应力和位移状态与实际状态相符.

3.1 波场分离技术

根据边界特点和波的传播方向,将侧边界区总波场分为自由波场和散射波场,底边界区总波场分为入射波场和散射波场.这里的自由波场为均匀弹性半空间问题的解,包括了入射波和均匀弹性半空间自由面反射波两者的贡献;入射波场是指在均匀弹性半空间传播的入射波,即为不考虑覆盖层和下卧半空间界面影响时的波场;散射波场是指在总波场中扣除已知的入射波场或自由波场后的部分.

3.2 人工边界上的波动输入

3.2.1 侧边界上的波动输入

对于侧边界上任一点 P 而言,总的应力和位移应为自由波场在 P 点引起的应力和位移与散射波场在 P 点引起的应力和位移之和,即

$$\sigma_m = \sigma_f + \sigma_s \qquad (8)$$

$$u_m = u_f + u_s \qquad (9)$$

式中: u_m , σ_m ——总的位移和应力; u_f , σ_f ——自由场的位移和应力; u_s , σ_s ——散射场的位移和应力.设在 P 点施加的应力为 F_p ,考虑到散射波的应力应满足黏-弹性人工边界条件,并将式(8)(9)代入,则这时 P 点的应力边界条件为

$$\sigma_m = -\alpha \frac{G}{R} u_m - \rho c \dot{u}_m + F_p = \sigma_f + \sigma_s = \sigma_f - \alpha \frac{G}{R} u_s - \rho c \dot{u}_s$$

(10)

整理后得

$$F_p = \alpha \frac{G}{R} u_f + \rho c \dot{u}_f + \sigma_f$$

(11)

设侧边界法线方向为 x 轴,则在侧边界上 P 点沿3个方向应施加的应力为

表1 黏-弹性人工边界中参数 α 的取值
Table 1 Value of parameter α for visco-spring artificial boundary

边界类型	方向	α
二维人工边界	平面内法向	2.0
	平面内切向	1.5
	出平面切向	0.5
三维人工边界	法向	4.0
	切向	2.0

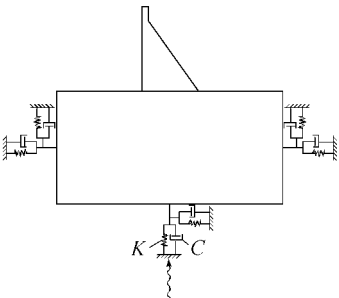


图1 重力坝示意图
Fig.1 Sketch of gravity dam

$$\begin{cases} F_x = \alpha \frac{G}{R} u_x^f + \rho c \dot{u}_x^f + \sigma_{xx}^f \\ F_y = \alpha \frac{G}{R} u_y^f + \rho c \dot{u}_y^f + \sigma_{xy}^f \\ F_z = \alpha \frac{G}{R} u_z^f + \rho c \dot{u}_z^f + \sigma_{zx}^f \end{cases} \tag{12}$$

式中 u_x^f, u_y^f, u_z^f —— P 点 3 个方向上的自由场位移; $\sigma_{xx}^f, \sigma_{xy}^f, \sigma_{zx}^f$ —— P 点在侧边界上沿 3 个方向的自由场应力。

3.2.2 底边界上的波动输入

同理,在底边界上 Q 点沿 3 个方向应施加的应力为

$$\begin{cases} F_x = \alpha \frac{G}{R} u_x^i + 2\rho c \dot{u}_x^i \\ F_y = \alpha \frac{G}{R} u_y^i + 2\rho c \dot{u}_y^i \\ F_z = \alpha \frac{G}{R} u_z^i + 2\rho c \dot{u}_z^i \end{cases} \tag{13}$$

式中 u_x^i, u_y^i, u_z^i 为 Q 点在 3 个方向上的入射波场位移。

4 程序验证

如图 2 所示二维弹性半空间模型,从底部垂直入射一 SV 波,入射位移波如图 3 所示,求二维弹性半空间内各点的位移反应。

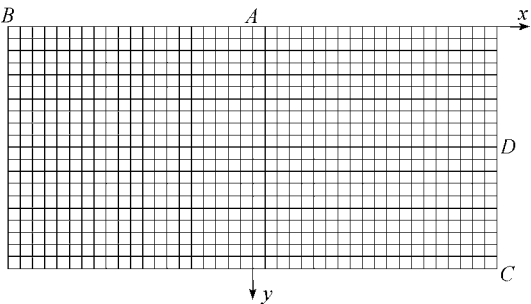


图 2 二维弹性半空间模型

Fig.2 Two-dimensional elastic semi-space model

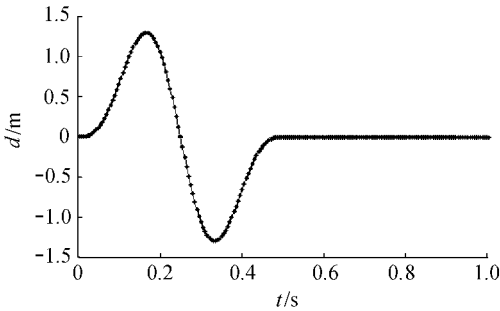


图 3 入射位移波

Fig.3 Incident displacement wave

介质剪切模量 $G = 5.292 \text{ MPa}$,泊松比 $\nu = 0.25$,质量密度 $\rho = 2.7 \text{ kg/m}^3$.计算区的范围为宽 762 m、深 381 m,用四边形单元剖分,单元的尺寸为 $\Delta x = \Delta y = 19.05 \text{ m}$,单元数为 800,节点数为 861,时间步长 $\Delta t = 0.005 \text{ s}$.

经过计算得到 $A(0,0)$ 、 $B(-381,0)$ 、 $C(381,381)$ 和 $D(381,190.5)$ 4 个点的 x 向位移时程,如图 4 所示.地表反应最大值接近入射波幅值的 2 倍,且 A, B 两点的位移值相同,说明是入射波与自由面上的反射波共同作用的结果,而且波是均匀传播上去的; C 点的位移曲线前半段代表了入射波引起的位移时程,后半段代表了反射波引起的位移时程.这些都与理论解相吻合.由此可以证明这一方法与程序在二维计算中的可靠性,并且从结果可以看出黏-弹性边界具有良好的稳定性。

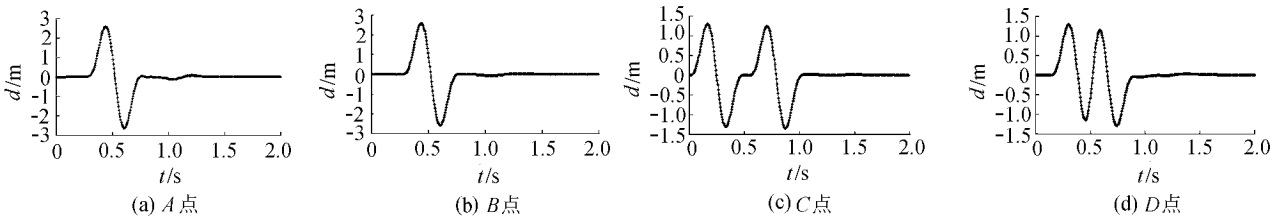


图 4 各点的 x 向位移时程

Fig.4 Time history of displacement in x -direction at different points

5 典型重力坝动力响应计算

5.1 计算资料

图 5 为某混凝土重力坝空库时的动力计算网格模型.坝体混凝土弹性模量为 20.0 GPa,泊松比为 0.163,密度为 2.4 g/cm³;基岩的弹性模量为 16.0 GPa,泊松比为 0.25,密度为 2.5 g/cm³.动弹模考虑在静弹模基础上提高 30%,即将静弹模乘以 1.3 的系数,坝体阻尼比为 7%.

考虑从底面垂直入射一 SV 波,输入地震波的自由面位移时程、速度时程以及加速度时程如图 6 所示.考虑到半无限弹性地基本身对弹性波 2 倍的放大作用,将输入波折减一半.

本文采用二维四节点单元对整个计算结构进行离散,网格节点数为 2553,单元数为 2432,时间步距为 0.01 s.

5.2 计算结果分析

5.2.1 辐射阻尼对重力坝动力响应的影响

将几个主要部位的动应力结果以及位移结果与传统的固定边界无质量地基下的结果进行了比较,如图 7 和表 2 所示.从图 7 可以看出,A、B 两点的位移值均比固定边界条件下的位移值有所降低.从表 2 可以看出,所考察部位的应力也都比传统方法下的应力有所减小,降幅为 20%~40%.这说明辐射阻尼的作用是很明显的,是不可忽略的.

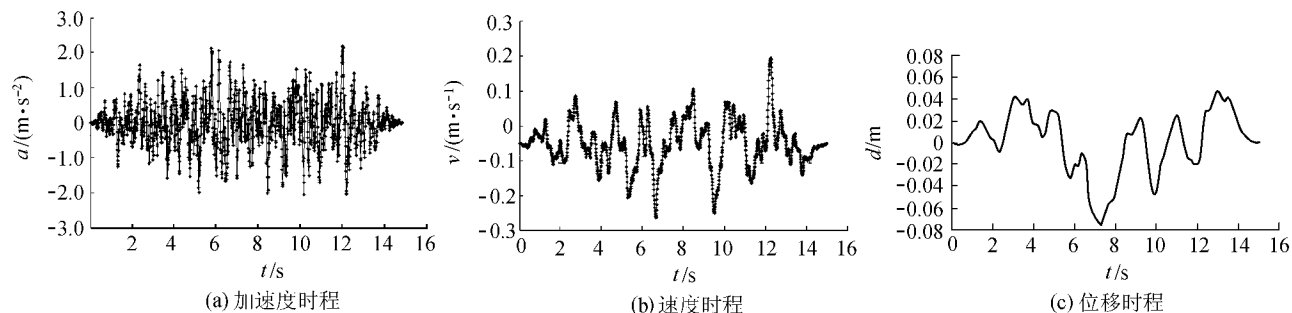


图 6 输入地震波的加速度、速度和位移时程

Fig.6 Time history of acceleration, velocity and displacement of input seismic wave

— 黏-弹性边界 ···· 固定边界

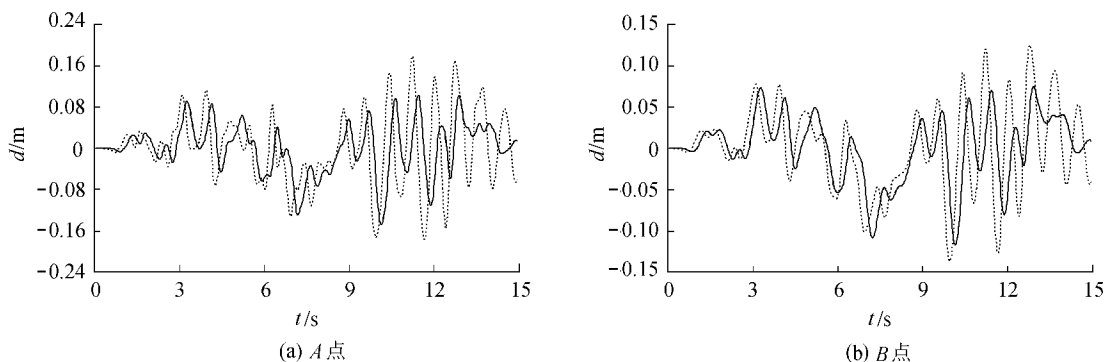


图 7 2 种边界下的位移时程比较

Fig.7 Comparison of time histories of displacements under two boundaries

5.2.2 弹性模量对辐射阻尼的影响

为了比较地基弹性模量对辐射阻尼的影响,采用了 4 种地基弹性模量(动弹模),分别计算了这几种弹性模量下重力坝的动力响应,包括采用黏-弹性边界条件和传统无质量地基 2 种方法.表 3 比较了这几种情况下峰值动应力的降幅.从表 3 可以看出,地基弹性模量越小,地基的柔度越大,重力坝峰值动应力的降幅就越

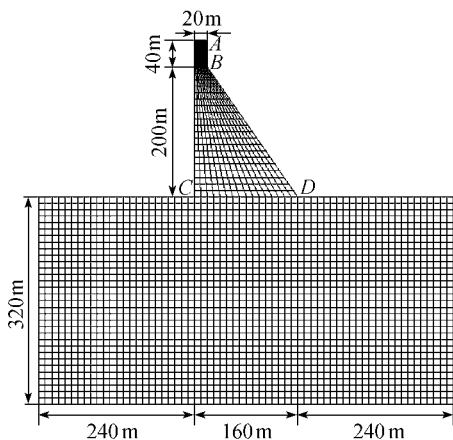


图 5 重力坝网格模型

Fig.5 Grid model of gravity dam

大. 这说明软弱地基的辐射阻尼影响是不可忽视的.

表 2 2 种边界下重力坝几个主要位置的峰值动应力比较

Table 2 Comparison of peak dynamic stress at several main positions in gravity dam under two boundaries MPa

位 置	固定边界 峰值动应力	黏-弹性边界 峰值动应力
A 点	0.22	0.14
B 点	6.36	3.81
C 点	4.19	2.55
D 点	3.28	2.20

表 3 不同地基弹性模量下重力坝坝体峰值动应力比较

Table 3 Comparison of peak dynamic stress of gravity dam on the foundation with different elastic moduli MPa

E/GPa	固定边界峰值 动应力/MPa	黏-弹性边界峰值 动应力/MPa	降幅/%
10.0	4.95	2.34	52.73
20.0	6.15	3.67	40.35
25.0	6.09	4.19	31.15
30.0	5.64	4.26	24.47

6 结 论

与传统的固定边界无质量地基的方法相比 ,采用黏-弹性边界条件能使重力坝峰值动应力降低 20% ~ 40% ,并且地基弹性模量越小 ,地基柔度越大 ,峰值动应力的降幅就越大. 这说明 ,对重力坝而言 ,地基辐射阻尼的影响是不可忽略的.

参考文献 :

[1] CLOUGH R W ,PENZIEN J. Dynamics of structures[M]. New York : McGraw-Hill ,Inc ,1975.

[2] KAUSEL E. Local transmitting boundaries[J]. J Engng Mech ,1988 ,114(6) :1011-1027.

[3] 廖振鹏. 工程波动理论导引[M]. 北京 : 科学出版社 ,2002 :141-186 ,236-240.

[4] 沈聚敏 ,周锡元 ,高小旺 ,等. 抗震工程学[M]. 北京 : 中国建筑工业出版社 ,2000 :227-262.

[5] 涂劲 ,侯顺载 ,陈厚群. 纵缝对重力坝地震反应影响的研究[J]. 水利学报 ,2000(12) :53-58.

[6] 廖振鹏. 法向透射边界[J]. 中国科学 :E 辑 ,1996 ,26(2) :185-192.

[7] DEEKS A J ,RANDOLPH M F. Axisymmetric time-domain transmitting boundaries[J]. Journal of Engineering Mechanics ,1994 ,120(1) :25-42.

[8] 刘晶波 ,吕彦东. 结构-地基动力相互作用问题分析的一种直接方法[J]. 土木工程学报 ,1998 ,31(3) :55-64.

[9] 刘晶波 ,李彬. 三维黏弹性静-动力统一人工边界[J]. 中国科学 :E 辑 ,2005 ,35(9) :966-980.

Numerical analysis of seismic wave-motion of gravity dam in time domain

HE Xiang-li , LI Tong-chun

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China)

Abstract :In conventional model for dynamic response analysis of gravity dams , the effect of foundation radiation damping and inhomogeneous input of wave motion have not been taken into account. In this paper , the visco-spring artificial boundary condition was introduced into the dynamic response analysis of gravity dams. A wave-motion input expression for seismic waves vertically incident from the bottom of gravity dams was deduced based on the technique of wave field separation , and the effect of elastic modulus of dam foundation on its radiation damping was studied. Calculation result shows that the dynamic stress of dam on the foundation with the visco-spring artificial boundary is 20% – 40% less than that on the massless foundation with fixed boundary , and that the peak value of dynamic stresses decreases evidently with the decrease of the elastic modulus of dam foundation.

Key words :gravity dam ; visco-spring artificial boundary ; wave-motion input ; wave field separation