

混凝土重力坝地震响应数值分析方法

邱流潮¹, 刘 桦¹, 金 峰²

(1. 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200030; 2. 清华大学水利水电工程系, 北京 100084)

摘要 给出了混凝土重力坝动力响应分析的时域有限元法. 其中, 地震波的输入方法以及无限地基辐射阻尼的模拟方法都是在柱面波动方程的基础上建立起来的. 这种方法先通过对无限地基的人工截断获得有限计算域, 然后沿人工边界布置一系列弹簧和阻尼器来模拟无限地基, 在有入射波的边界上用与入射波速成正比的等效力来实现地震动的输入. 数值算例表明, 该方法简单有效, 易于实现, 并能够保证一定的精度.

关键词 混凝土重力坝 地震响应 时域分析 地震输入 辐射阻尼 有限元法

中图分类号 TV642; TU311.3

文献标识码 A

文章编号 1000-1980(2006)01-0065-04

在我国已建和正在建设的混凝土大坝中, 有许多大坝处在强震高发区^[1], 对这些混凝土坝进行地震响应分析具有极其重要的现实意义. 影响混凝土坝地震反应的因素很多且十分复杂, 其中坝-库水相互作用以及坝-基岩相互作用是两个比较重要的影响因素. 因此, 在混凝土坝地震响应分析中应当将坝体-库水-基岩作为一个系统来分析, 以考虑它们之间相互作用的影响. 由于此问题十分复杂, 一般用数值方法进行分析. 其中, 有限元法由于具有处理任意体形和任意边界条件的能力而被广泛采用. 而地震波输入的实现方法以及无限地基辐射阻尼的模拟是实现有限元数值分析的关键. 对于刚硬岩基上的轻型柔性建筑结构, 在进行地震响应分析时, 一般可直接在结构底部输入地表自由场地加速度. 但当建筑结构非常庞大且刚度较大而地基又相对较软时, 如混凝土坝, 上述地震动输入方法不再适用. 在这种情况下, 传统的方法则采用 Clough^①提出的无质量地基模型. 但无质量地基模型只考虑地基的柔性, 而忽略了地基的惯性和阻尼效应. 研究表明, 地基惯性和阻尼效应的影响比较显著^[1], 分析中必须加以考虑. 另外, 为了进行有限元分析, 首先要对无限地基进行人工截断以获得有限计算模型, 而且在人工截断边界上需要通过施加适当的吸收边界条件来模拟无限地基的辐射阻尼效应. 这样的吸收边界条件有很多, 但在实际的时域有限元分析中, 由于 Lysmer 等^[2]黏性边界物理意义明确、处理简单且易于在程序中实现, 因而得到广泛的应用. 但这种黏性边界通常只适合于透射平面波, 因而当人工边界与初始扰动源之间的距离足够远时才能获得满意的精度^[3]. 本文从柱面波动方程出发导出了吸收边界条件, 同时还在该人工截断边界上实现了地震动的输入.

1 吸收边界条件与地震波的输入方法

对于二维平面应变问题, 体波是沿着圆柱波阵面径向传播的^[4]. 极坐标下的圆柱波动方程为

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \quad (1)$$

式中: u ——总场位移; r ——人工边界节点到散射源的距离; c ——波速(对于柱面 P 波, c 对应压缩波速 c_p ; 对于柱面 S 波, c 对应剪切波速 c_s). 对于沿 r 方向传播的柱面 P 波或柱面 S 波, 方程(1)的通解可近似地表示为^[5]

$$u^P = u_o^P + u_i^P \quad u^S = u_o^S + u_i^S \quad (2)$$

收稿日期 2005-05-30

基金项目 国家自然科学基金重点资助项目(2002CB412709)

作者简介 邱流潮(1971—), 男, 云南彝良人, 博士后, 主要从事水工结构抗震研究.

① CLOUGH R W. Nonlinear mechanisms in the seismic response of arch dams//Proc of the Int Res Conf on Earthquake Engineering. Skopje 1980: 25-31.

式中: u 的上标 P, S 分别对应 P 波和 S 波; u 的下标 i, o 分别表示入射波和外行波. 其中,

$$u_o^P = f(r - c_P t) / \sqrt{r} \quad u_i^P = g(r + c_P t) / \sqrt{r} \quad u_o^S = f(r - c_S t) / \sqrt{r} \quad u_i^S = g(r + c_S t) / \sqrt{r}$$

式中 f 和 g 为任意函数.

根据弹性理论,沿 r 方向传播的 P 波在人工边界上产生的正应力 σ 和 S 波产生的剪应力 τ 可分别表示为

$$\sigma(r, t) = E\varepsilon = \rho c_P^2 \frac{\partial u^P}{\partial r} = \rho c_P^2 \left(\frac{f'}{\sqrt{r}} - \frac{f}{2r\sqrt{r}} + \frac{g'}{\sqrt{r}} - \frac{g}{2r\sqrt{r}} \right) = -\rho c_P \dot{u}^P - \frac{\rho c_P^2}{2r} u^P + 2\rho c_P \dot{u}_i^P \quad (3)$$

$$\tau(r, t) = G\gamma = \rho c_S^2 \frac{\partial u^S}{\partial r} = \rho c_S^2 \left(\frac{f'}{\sqrt{r}} - \frac{f}{2r\sqrt{r}} + \frac{g'}{\sqrt{r}} - \frac{g}{2r\sqrt{r}} \right) = -\rho c_S \dot{u}^S - \frac{\rho c_S^2}{2r} u^S + 2\rho c_S \dot{u}_i^S \quad (4)$$

式中: G ——剪切模量; γ ——剪应变; ρ ——密度; E ——杨氏模量; ε ——法向应变; u^P (或 u^S), $\dot{u}^P$ (或 $\dot{u}^S$)——地基 P 波(或 S 波)的总场位移和总场速度; $\dot{u}_i^P$ (或 $\dot{u}_i^S$)——地基 P 波(或 S 波)的入射波速度.

式(3), (4)最后等式中的第 1 项、第 2 项分别等价于由阻尼器产生的阻尼力以及弹簧产生的弹性力,而第 3 项为与入射波速成正比的等效力. 所以,在混凝土坝地震动力有限元分析中,可通过对无限地基的人工截断获得有限计算域. 被截去的远场地基可用一系列沿人工边界布置的弹簧和阻尼器来代替,在有入射波的边界上可用与入射波速成正比的等效力来实现地震动输入. 另外,对于圆形边界, r 为常数; 对于其他形状的边界,为散射源中点到相应边界节点的距离.

2 运动方程有限元公式

混凝土坝-库水-基岩系统地震动力响应分析是一个典型的耦合振动问题. 当不考虑库水的可压缩性时,一种有效的简化方法就是利用 Westergaard^[6]附加质量模型来考虑库水动水压力的影响. 基于上述简化库水模型,混凝土坝-库水-基岩系统的有限元运动方程可表示为

$$[M + M_a] \ddot{u} + P(u, \dot{u}) + C_\Gamma \dot{u} + K_\Gamma u = F + F_\Gamma \quad (5)$$

式中: $\ddot{u}, \dot{u}, u$ ——坝体-基岩系统的加速度、速度以及位移向量; M ——坝体-基岩系统的质量矩阵; M_a ——附加质量矩阵; $P(u, \dot{u})$ ——与位移和速度相关的非线性力向量; F ——外力向量; $K_\Gamma, C_\Gamma, F_\Gamma$ ——来自人工边界上的弹簧力、阻尼力以及输入地震波的等效力的贡献. $M, M_a, P(u, \dot{u}), F$ 的具体表达式及其详细推导过程参见文献[7].

根据上面的推导,在有限元分析中,人工边界条件的引入以及边界上的地震波输入对整个系统的贡献可通过边界单元来实现,即

$$K_\Gamma = \sum_{e=1}^n K_\Gamma^e \quad C_\Gamma = \sum_{e=1}^n C_\Gamma^e \quad F_\Gamma = \sum_{e=1}^n F_\Gamma^e \quad (6)$$

式中 n 表示边界单元个数,单元矩阵及向量为

$$K_\Gamma^e = \int_{\Gamma_\infty} N^T D_K N d\Gamma \quad C_\Gamma^e = \int_{\Gamma_\infty} N^T D_C N d\Gamma \quad F_\Gamma^e = \int_{\Gamma_\infty} N^T D_I N \dot{u}_i^e d\Gamma$$

$$D_C = -\rho c_P \cos \alpha T - \rho c_S \cos \alpha (I - T)$$

$$D_K = -\frac{\rho c_P^2}{2r} \cos \alpha T - \frac{\rho c_S^2}{2r} \cos \alpha (I - T)$$

$$D_I = 2\rho c_P \cos \alpha T + 2\rho c_S \cos \alpha (I - T)$$

$$T = \begin{bmatrix} n_x^2 & n_x n_y \\ n_y n_x & n_y^2 \end{bmatrix}$$

式中: N ——边界单元型函数矩阵; I ——单位矩阵; n_x, n_y ——边界外法线方向余弦; α ——波传播方向与边界外法向的夹角.

3 算例

为了验证本文方法的有效性,分析了坝体-地基系统(图 1)的线性动力反应. 其中,地基沿水平方向无限延伸,地基深度为 121.9 m,地基下卧层为刚性基岩. 计算中水平地面加速度运动选用了如图 2 所示的较为简

单的 Ricker 小波,并沿基底均匀输入.为了进行比较,选取与文献[8]相同的参数,即:混凝土重力坝密度为 2482 kg/m^3 ,泊松比为 0.2,剪切模量为 11.49 GPa ;地基密度为 $2\,642\text{ kg/m}^3$,泊松比为 $1/3$,剪切模量为 11.49 GPa .计算中不考虑材料阻尼.

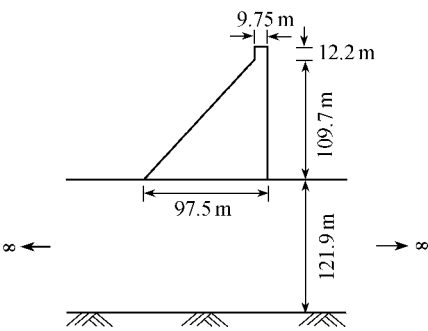


图 1 坝与地基相互作用问题

Fig.1 Dam-foundation interaction problem

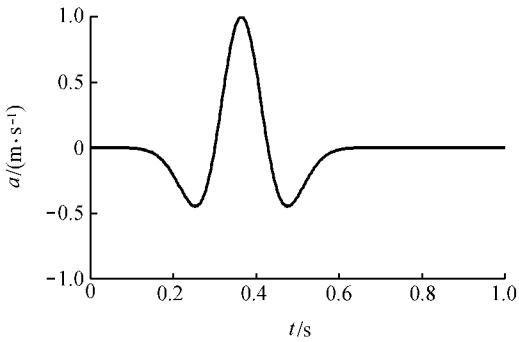


图 2 Ricker 小波

Fig.2 Ricker wavelet

数值计算中,首先在地基水平方向距离坝底上下游 1 倍坝高处通过人工截断获得有限计算域,然后对整个系统采用四边形有限单元进行离散.数值求解中采用 Newmark 时间积分方法,时间步长取为 0.002 s .图 3 给出了坝体-地基系统线性动力反应分析比较结果.从比较结果可以看出,本文方法所得结果与文献[8]的结果非常接近,说明本文的吸收边界条件以及地震动的输入方法是有效的.

○ 文献[8]计算结果 — 本文计算结果

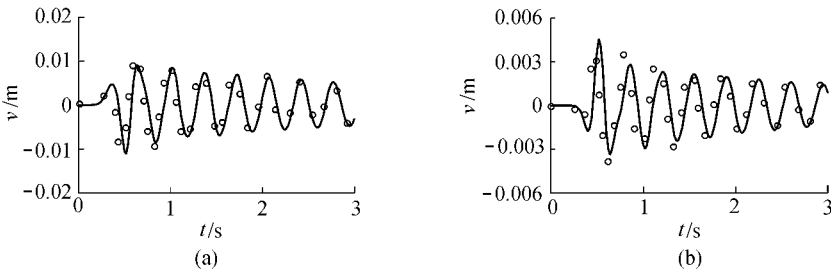


图 3 上游面坝顶相对位移时程

Fig.3 Time histories of relative displacements at upstream crest of the dam

4 结 论

在重力坝地震响应分析中,应将坝体-库水-基岩作为一个系统并考虑它们之间相互作用的影响.由于此问题十分复杂,一般用数值方法进行分析.其中,有限元法由于具有处理任意体形和任意边界条件的能力而被广泛采用.本文给出了分析混凝土重力坝动力响应的时域有限元法.该分析方法能考虑坝与库水动力相互作用以及坝与基岩动力相互作用的影响.其中,地震波的输入以及无限地基辐射阻尼的模拟方法是在柱面波动方程的基础上建立起来的.数值算例验证了该方法的精度和有效性.

参考文献:

[1] 徐艳杰,张楚汉,金峰. 非线性拱坝-地基动力相互作用的 FE-BE-IBE 模型[J]. 清华大学学报:自然科学版,1998,38(11): 99-103.

[2] LYSMER J, KUHLEMEYER R L. Finite dynamic model for infinite media[J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, 1969, 95: 859-877.

[3] 邱流潮,金峰. 无限介质中波动分析的显式时域辐射边界[J]. 清华大学学报:自然科学版,2003,43(11): 1530-1533.

[4] KELLEZI L. Local transmitting boundaries for transient elastic analysis[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2000, 19: 533-547.

[5] WHITHAM G B. Linear and nonlinear waves[M]. New York :Wiley,1974 :138-145.
[6] WESTERGAARD H M. Water pressures on dams during earthquakes[J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers,1933, 98 :418-433.
[7] ZIENKIEWICS O C,TAYLOR R L. The finite element method[M]. 5th ed. London :Butterworth-Heinemann,2000 :410-418.
[8] PARK Si-Hwan,ANTIN N. A discontinuous Galerkin method for seismic soil-structure interaction analysis in the time domain[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics,2004,33 :285-293.

Numerical method for analysis of seismic response of concrete gravity dams

QIU Liu-chao¹, LIU Hua¹, JIN Feng²

(1. Department of Engineering Mechanics, Shanghai Jiao Tong Univeristy, Shanghai 200030, China ;
2. Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract :A time-domain finite element method for seismic response analysis of concrete gravity dams was presented. The methods for treatment of earthquake input and modeling of radiation damping in infinite foundation were established based on cylindrical wave equation. In this method, a finite domain was obtained by truncation of the infinite foundation, and the truncated foundation was simulated by a series of dashpots and springs along the boundaries. Then, the earthquake inputs on the boundary with incident waves were simulated with an equivalent force directly proportional to the velocity of incident waves. Case studies show the validity and accuracy of the present method.

Key words :concrete gravity dam ; seismic response ; time-domain analysis ; earthquake input ; radiation damping ; FEM

全国中文核心期刊 中国科技核心期刊
全国水利系统优秀期刊 华东地区优秀期刊 江苏省优秀期刊
《水利水电科技进展》征订启事

(邮发代号 28-244,CN32-1439/TV,ISSN1006-7647,双月刊)

《水利水电科技进展》主要刊登与水科学、水工程、水资源、水环境等学科有关的科技论文,设有水问题论坛、研究探讨、工程技术、专题综述、国外动态、科技简讯等栏目,适合与水科学、水工程、水资源、水环境等有关的科学研究人员、工程技术人员、科技管理人员以及大专院校师生阅读.

《水利水电科技进展》由邮局发行,邮发代号 28-244,2006 年每期定价 8 元,全年 6 期共计 48 元.读者亦可直接向编辑部订阅.欢迎个人和单位直接汇款订阅或函索订单.编辑部地址 210098 南京市西康路 1 号河海大学《水利水电科技进展》编辑部.联系电话 :025-83786335, E-mail :jz@hhu.edu.cn,http ://kkb.hhu.edu.cn.汇款时务请注明“订水利水电科技进展”.