

人工边界法在土石坝动力分析中的应用

奚兴旺¹ 夏颂佑² 许百立³

(1. 中国水利电力对外公司海外三部 ,北京 100011 ; 2. 河海大学水利水电工程学院 ,江苏 南京 210098 ;
3. 水利部水利水电规划设计总院 ,北京 100011)

摘要 :在研究各种动力人工边界的基础上根据地震波的不同传播特性 ,针对土石坝-地基系统 ,提出 :对地基的底边界和侧边界分别施加粘性边界和叠加边界 ,以消除或减小常规刚性边界上波的反射对动力分析成果的影响 ,使土石坝动力分析成果更为可靠合理 .在应用叠加边界时 ,通过引入常速度初值的更新而将波的传播限制在较小的边界区域内 ,使得结构系统的主区域仍能应用非线性有限元方法 .这样的处理使得叠加边界方法能够应用于非线性问题的边界区域 ,又大大减小了计算工作量 .

关键词 :土石坝 ;动力分析 ;人工边界 ;粘性边界 ;叠加边界

中图分类号 :TV641 文献标识码 :A 文章编号 :1000-1980(2000)05-0072-04

研究地震波在介质中的传播问题 ,现行的方法有两类 :连续方法和离散方法 .连续方法适用于均匀弹性介质中波的传播 ,这种方法通常只能用来分析简单的波动问题 ,离散方法原则上可用于处理任何复杂的近场波传播问题 .如何抑制有限离散模型边界上的波的反射问题 ,是目前研究和讨论较多的难题之一 .通常在边界上施加特殊的边界条件 ,即引入人工边界条件 ,用于在有限离散模型的边界上模拟无限远边界条件 ,以便消除或减少人工边界反射的影响 .

第一个局部透射边界条件是 Lysmer 和 Kuhlemeyer^[1]在研究结构-地基系统以及 Zienkiewicz 和 Newton^[2]在研究流体中的压力波时提出的粘性边界 .1977 年 ,Enquist 和 Claytor^[3]提出了旁轴近似的概念 .后来廖振鹏等^[4]提出了透射边界的概念 .基于虚映像原理 ,Smith^[5]提出了通过对 Dirichlet 和 Newmann 问题解的平均而建立的非反射边界 ,本文称之为叠加边界 .其最大优点是公式与入射角无关 ,但同时存在两点不足 : (a)基于叠加原理 ,只能应用于线性问题 ; (b)不适用于高阶反射波的情况 .

1 粘性边界和叠加边界

Smith^[5]通过对 Dirichlet 和 Newmann 问题解的平均而建立的非反射边界如图 1 所示 .对于一维情况 , Dirichlet 和 Newmann 问题分别对应于固定边界条件和自由边界条件 .现研究两类边值问题 .

边值问题 1 假定径向零位移和切向零应力 ,则

$$u = 0 \tag{1}$$
$$\tau_{xy} = G(\partial u / \partial y + \partial v / \partial x) = 0 \tag{2}$$

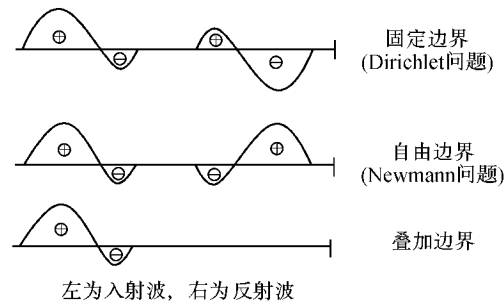


图 1 叠加边界示意图

Fig.1 Diagram of superposition boundary method

由方程 (1) (2) 可得

$$\partial v / \partial x = 0 \tag{2'}$$

实际上 ,方程 (1) (2') 分别对应于 u 的 Dirichlet 问题和 v 的 Newmann 问题 .

边值问题 2 假定径向零应力和切向零位移 ,则

收稿日期 :1999-06-29
基金项目 :教育部博士点基金资助项目(9529401)
作者简介 :奚兴旺 (1971 —) 男 ,江苏姜堰人 ,博士 ,主要从事水工结构研究及国际工程项目管理 .

$$v = 0 \tag{3}$$

$$\sigma_x = (\lambda + 2G)(\partial u/\partial x) + \lambda(\partial v/\partial y) = 0 \tag{4}$$

由方程(3)(4)可得

$$\partial u/\partial x = 0 \tag{4'}$$

实际上,方程(3)(4')分别对应于 v 的 Dirichlet 问题和 u 的 Newmann 问题.

将边值问题 1 和边值问题 2 的解进行平均,则可消除波在图 1 所示边界处的反射.

将上述两组边值问题的初始边值的设定加以改进,假定 $z=0$ 平面为人工边界面,相应的两组边值问题为:

边值问题 1 区别于原叠加边界,假定径向常速度和切向常应力,则

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} &= 0 && (z \text{ 向常速度}) \\ \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial t} &= \alpha \left(\frac{\partial^2 w}{\partial t \partial x} + \frac{\partial^2 u}{\partial t \partial z} \right) = 0 && (x \text{ 向常应力}) \\ \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial t} &= \alpha \left(\frac{\partial^2 w}{\partial t \partial y} + \frac{\partial^2 v}{\partial t \partial z} \right) = 0 && (y \text{ 向常应力}) \end{aligned} \right\} \tag{5}$$

边值问题 2 假定径向常应力和切向常速度,则

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_z}{\partial t} &= \lambda \left(\frac{\partial^2 u}{\partial t \partial x} + \frac{\partial^2 v}{\partial t \partial y} + \frac{\partial^2 w}{\partial t \partial z} \right) + 2G \frac{\partial^2 w}{\partial t \partial z} = 0 && (z \text{ 向常应力}) \\ \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= 0 && (x \text{ 向常速度}) \\ \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} &= 0 && (y \text{ 向常速度}) \end{aligned} \right\} \tag{6}$$

将边值问题 1 和边值问题 2 的解进行平均,则可消除波在 $z=0$ 处的反射(具体理论论证见文献[7]).

由以上边界问题 1、2 的初始边值假定可看出,经改进后的叠加边界的优点是:可设置非零初值条件,计算过程中可对边界条件进行调整.这样,一方面可将波的反射控制在一定的范围之内,避免多次反射,另一方面可将叠加原理仅应用于系统的边界区域,使得主区域可进行非线性计算.

对于一维情况,假定边值问题 1 的解为 $\bar{u}$ 、边值问题 2 的解为 $\bar{v}$,则实际问题的解为 $u=(\bar{u}+\bar{v})/2$.对于二维情况,则须消除波在两个面上的反射.从而可知,欲消除波在 n 个面上的反射,则须对 2^n 个解进行平均.

2 人工边界在土石坝-地基系统中的应用

笔者对地基的底边界和侧边界分别施加粘性边界和叠加边界,在对大坝-地基系统进行动力数值分析时,将系统划分为三个部分,其计算模型如图 2 所示.其中(a)部分为主区域,(b)部分为自由场,(c)部分为边界区域.

很明显,修建了大坝以后的地基的运动有别于自由场的运动.这种差别在离开大坝一定距离处的点即为应该透射出侧边界的波的影响.其数学表达式为

$$u_0 = u_r - u_{fr} \tag{7}$$

对于主区域,其有限元控制方程为

$$M_f \ddot{u}_r + (C_m \dot{u}_r) + C_{mv}(\dot{u}_r^{bb} - \dot{u}_{i0}^b) + K_m u_r = -M_m \ddot{u}_{i0}^b \tag{8}$$

将式(7)移项得

$$u_r = u_0 + u_{fr} \tag{9}$$

对于自由场,其有限元控制方程为

$$M_f \ddot{u}_{fr} + C_{fr}(\ddot{u}_{fr}^{bb} - \dot{u}_{i0}^b + K_f u_{fr} = -M_f \ddot{u}_{i0}^b \tag{10}$$

对于边界区域,其有限元控制方程为

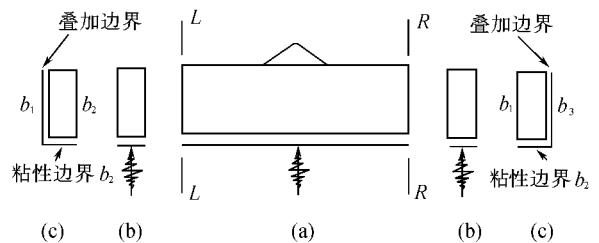


图 2 人工边界方法的计算模型

Fig.2 Computational model of artificial boundary method

$$M\ddot{u}_0 + C_u\dot{u}_0^{bb} + K_u u_0 = 0$$

(11)

如图 3 c) 部分所示, 边界层共有三类边界, 边界一(b_1)适用于

$$u_0 = u_r - u_{fr} \quad \dot{u}_0 = \dot{u}_r - \dot{u}_{fr} \quad \ddot{u}_0 = \ddot{u}_r - \ddot{u}_{fr}$$

(12)

边界二(b_2)为粘性边界, 已反映在式 (11) 第 2 项中. 边界三(b_3)为叠加边界, 适于 (a) 在边界 b_3 上施加 x 向常速度, y 向常应力 (b) 在边界 b_3 上施加 x 向常应力, y 向常速度.

3 算 例

图 3 所示土石坝-地基相互作用数学模型中, 坝高 125 m, 坝底宽 360 m, 左右侧地基宽度和深度均为 500 m.

为简单起见, 本算例假设坝体和地基为均匀各向同性体. 静力计算采用邓肯 $E-\mu$ 模型, 各参数取值见表 1; 动力计算采用 Hardin-Drnevich 模型, 各参数取值见表 2.

表 1 $E-\mu$ 模型材料静力参数

Table 1 Static parameters of materials by $E-\mu$ model

材料	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	$\phi/(\circ)$	$C/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	R_f	K	n	G	F	V_{if}	K_{ur}
坝体	22.3	43	0.0	0.72	1000	0.50	0.32	0.060	0.5	2000
地基	24.2	40	0.7	0.65	1950	0.63	0.25	-0.023	0.5	1950

输入地震波选用 Taft 波, 地震持续时间取为 8 s, 地震烈度相当于 8°, 其水平和垂直向加速度峰值分别为: 顺河向 $u_{\max} = 1.759 \text{ m/s}^2$, 铅直向 $w_{\max} = 1.029 \text{ m/s}^2$ (顺河向时程曲线见图 4).

人工边界须满足如下假定: (a) 人工边界处 (边界区域处) 材料均质弹性; (b) 波垂直于人工边界入射.

本算例采用 3 种工况: (a) 施加人工边界 (底边界为粘性边界, 侧边界为叠加边界); (b) 施加人工边界, 并扩大边界范围 (即在图 3 所示的左右边界的基础上再分别向两边各延伸 500 m); (c) 如 (a) 的范围, 但不施加人工边界, 即刚性边界.

本文只给出 3 种工况下图 3 所示 A 点的顺河向加速度响应时程 (图 5~7).

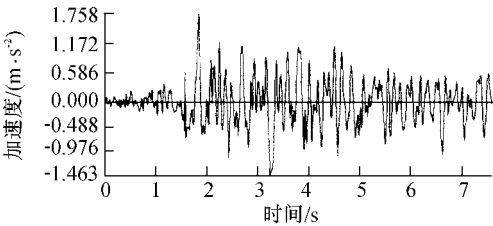


图 4 输入 Taft 波历时过程线
Fig.4 Timehistory of input Taft waves

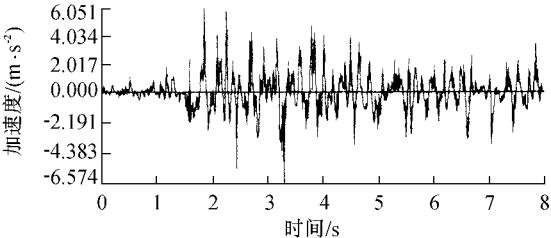


图 5 工况 1 的 A 点的加速度响应时程
Fig.5 Acceleration timehistory for point A under working condition 1

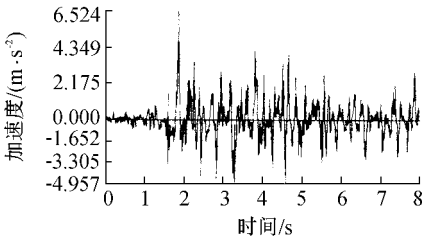


图 6 工况 2 的 A 点的加速度响应时程
Fig.6 Acceleration timehistory for point A under working condition 2

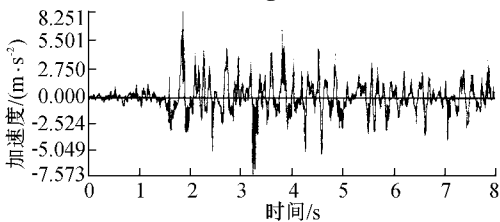


图 7 工况 3 的 A 点的加速度响应时程
Fig.7 Acceleration timehistory for point A under working condition 3

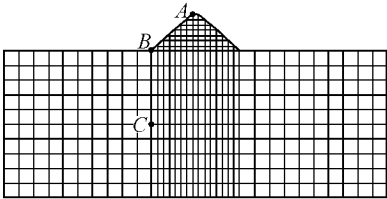


图 3 土石坝-地基相互作用数学模型及有限元网格剖分
Fig.3 Model of embankment dam-foundation system and FEMgrid

比较图 5 和 6 可以看出,整条时程曲线相差不大.这表明,引入的人工边界是有效的,它不因所截取边界的不同而产生差别较大的成果.需指出的是,尽管因引入人工边界而可取较小范围的边界,但边界范围亦不宜取得过小,因人工边界处的材料需满足均质弹性的假定.

比较图 5 和 7 可以看出,刚性边界的加速度响应要比施加人工边界的大.这大概是因为系统的动能因刚性边界的反复反射而得不到有效释放所致.

4 结 语

本文深入研究了各种动力人工边界,并针对地震波的不同传播特性,首次提出对地基的底边界和侧边界分别施粘性边界和叠加边界,以消除或减小常规刚性边界上波的反射对结构动力分析成果的影响,使土石坝动力分析成果更为可靠合理.

参考文献:

- [1] Lysmer J, Kuhlemeyer R L. Finite dynamic model for infinite media[J]. J Eng Mech Div ASCE, 1969, 95: 859 ~ 877
- [2] Zienkiewicz O C, Newton R E. Coupled vibrations of a structure immersed in a compressible fluid[A]. Proc of the Symposium on Finite Element Techniques[C]. Stuttgart, 1969.
- [3] Clayton R, Engquist B. Absorbing boundary conditions for acoustic and elastic wave equation[J]. Bull Seism Soc Am, 1977, 67: 1529 ~ 1541.
- [4] 廖振鹏. 工程波动理论导引[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [5] Smith W. A non-reflecting plane boundary for wave propagation problems[J]. J Comp Phys, 1973, 15: 492 ~ 503.
- [6] Shen F Q. Transmitting boundary in dynamic computation[D]. Ph. D. Dissertation of Univ. of Wales, 1988.
- [7] 窦兴旺. 深覆盖层上高土石坝坝与地基静态相互作用研究[D][学位论文]. 南京: 河海大学, 1999.

Application of Artificial Boundary Method to Dynamic Analysis of Embankment Dams

DOU Xing-wang¹, XIA Song-you², XU Bai-li²

(1. China International Water and Electric Corporation, Beijing 100011, China;

2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China;

3. General Institute of Planning and Design of Water Resources and Hydro Power Engineering,
Ministry of Water Resources, Beijing 100011, China)

Abstract: Various kinds of artificial boundaries are investigated in the paper. For the bottom and lateral boundaries of the foundation, the viscous and superpositional boundaries are imposed respectively so that the effects of wave reflection on the conventional rigid boundaries can be eliminated. The results thus developed in dynamic analysis of embankment dams are more reliable.

Key words: embankment dam; dynamic analysis; artificial boundary; viscous boundary; superpositional boundary