

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2009.04.008

地基辐射阻尼对结构地震响应的影响

李志全^{1,2} 杜成斌^{1,2} 艾亿谋²

(1. 中国水利水电科学研究院,北京 100044 ;2.河海大学土木工程学院,江苏 南京 210098)

摘要: ABAQUS 作为一种功能强大的工程分析模拟软件,在动力响应分析中具有很大优势.为此,将黏弹性边界单元与大型商业软件 ABAQUS 相耦合,利用 ABAQUS 实现对黏弹性边界的模拟.通过算例比较了结构在黏弹性边界、黏性边界和固定边界条件下的动力响应,并在考虑黏弹性边界影响的情况下,对一实际水闸-地基系统进行了地震响应分析.分析结果表明,黏弹性边界精度明显高于其他 2 种边界,可用于结构-土动力相互作用分析;辐射阻尼能够显著减小结构地震响应 30% ~ 40%.

关键词: 结构;地基;地震响应;黏弹性边界;黏弹性边界单元;固定边界;ABAQUS

中图分类号: TV312 文献标识码: A 文章编号: 1000-1980(2009)04-0400-05

结构振动过程中的能量沿地基向远处逸散,形成辐射阻尼效应,影响结构的动力特性,而且结构振动的反馈也会影响地震动输入^[1].有限元数值计算通常从无限地基介质中取出有限区域作为计算区域,通过在计算区域引入人工边界的方法实现对辐射阻尼作用的模拟.人工边界可分为全局和局部人工边界 2 类^[2].全局人工边界对于无限地基的模拟是精确的,但其全局耦联,计算量大且十分复杂;局部人工边界(如黏弹性边界^[3-5]和透射边界^[6-8])具有时空解耦特性,方法简单且计算耗时少.由于透射边界实现过程复杂且存在自身稳定性问题,本文重点研究黏弹性边界.

ABAQUS 作为一种功能强大的工程分析模拟软件,在动力响应分析中具有很大优势.用户可以方便地通过 ABAQUS/Standard(隐式求解器) ABAQUS/Explicit(显式求解器) 2 种方法之间的转化或联合进行求解,并能自动选择合适的荷载增量和收敛精度.本文利用 ABAQUS 实现对黏弹性边界的模拟,通过算例比较了结构在黏弹性边界、黏性边界和固定边界条件下的动力响应,验证了黏弹性边界的精度,并在考虑黏弹性边界影响的情况下,对一实际水闸-地基系统进行了地震响应分析.

1 黏弹性边界及其在 ABAQUS 中的实现方法

黏弹性边界的研究最早始于 Lysmer 等^[3]的黏性边界.黏性边界^[3]只考虑了边界的阻尼耗能,未考虑介质的弹性恢复作用,存在精度不高和低频漂移失稳等缺点.为了克服这些缺点,Deeks 等^[4,9]在柱面波的基础上提出了黏弹性边界的概念.赵忠^[2]对三维黏弹性边界相关参数进行了改进,使精度得到进一步提高.

假设介质为均匀线弹性,由介质本构方程和几何方程得到应力-位移关系表达式

$$\sigma_{ij} = \lambda u_{k,k} \delta_{ij} + G (u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (i, j, k = 1, 2, 3) \quad (1)$$

式中: λ, G ——介质拉梅常数及剪切模量; σ_{ij} ——介质应力; $u_{k,k}$ —— k 方向位移分量沿 k 方向的偏导数; $u_{i,j}$ —— i 方向位移分量沿 j 方向的偏导数; $u_{j,i}$ —— j 方向位移分量沿 i 方向的偏导数.

对于法向边界,纵波垂直人工边界向无限域传播时,由式(1)可得边界正应力为

$$\sigma_R = - \frac{\lambda + 2G}{r} u_R - \rho c_P \frac{\partial u_R}{\partial t} \quad (2)$$

同理,切向边界应力表达式为

收稿日期: 2008-09-16

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2007CB714104);中国水利水电科学研究院开放研究基金(2008538613)

作者简介: 李志全(1983—)男,天津宝坻人,硕士,主要从事工程结构抗震研究.

$$\tau_T = -\frac{G}{r}u_T - \rho c_S \frac{\partial u_T}{\partial t} \tag{3}$$

式中： r ——波源至人工边界的距离； c_P, c_S ——纵波和横波波速； ρ ——介质密度； u_R, u_T ——波传播方向的法向位移和切向位移。

对于人工边界结点 m ，黏弹性边界条件式(2)(3)相当于在边界结点 m 每个方向 i 施加了一个弹簧与黏滞阻尼器并联的元件，元件弹簧刚度系数 K_{mi} 和黏滞阻尼系数 C_{mi} 分别为

$$K_{mi} = \frac{\lambda + 2G}{r} C_{mi} = \rho c_P \tag{4}$$

$$K_{mi} = \frac{G}{r} C_{mi} = \rho c_S \tag{5}$$

假设平面波由相同波形的平面对称波和平面衰减波构成，在边界法向，多子波混合入射，且各子波有相同的波动形式，则弹簧-阻尼元件的物理参数可进一步修正为

$$K_{mi} = \frac{\lambda + 2G}{r} \frac{1}{A + 1} C_{mi} = B\rho c_P \tag{6}$$

$$K_{mi} = \frac{G}{r} \frac{1}{A + 1} C_{mi} = B\rho c_S \tag{7}$$

式中： A ——刚度调节系数， $A = \frac{alr}{b}$ ； B ——阻尼调节系数，其中： a, b 为无衰波、衰减波含量； l 为使二者量纲一致引入的 $\frac{1}{r}$ 量纲因子。

黏弹性边界概念清楚，易于在有限元程序中实现，但是解决三维问题时依然需要消耗较多的前处理时间。为此，刘晶波等^[10-11]推导出与黏弹性边界等效的黏弹性边界单元。该黏弹性边界单元能够更方便、实用地与有限元商业软件结合应用。将文献[2]改进后的黏弹性边界与黏弹性边界单元相结合，利用虚功原理导出的黏弹性边界单元的等效剪切模量和等效弹性模量分别为

$$\tilde{G} = hK_T = \frac{h}{A + 1} \frac{G}{r} \tag{8}$$

$$\tilde{E} = \frac{(1 + \tilde{\nu})(1 - 2\tilde{\nu})}{1 - \tilde{\nu}} hK_N = \frac{(1 + \tilde{\nu})(1 - 2\tilde{\nu})}{1 - \tilde{\nu}} \frac{h}{A + 1} \frac{\lambda + 2G}{r} \tag{9}$$

因各向同性材料常数之间需满足关系 $\tilde{E} = \frac{2}{3}(1 + \tilde{\nu})\tilde{G}$ ，则等效泊松比为

$$\tilde{\nu} = \frac{\lambda}{2(\lambda + G)} \tag{10}$$

设阻尼矩阵与刚度矩阵成正比，且材料的阻尼系数各向同性，得出等效阻尼系数为

$$\tilde{\eta} = \frac{1}{3} \left[\frac{2B\rho c_P r(A + 1)}{\lambda + 2G} + \frac{B\rho c_S r(A + 1)}{G} \right] \tag{11}$$

式中： $\tilde{G}, \tilde{E}, \tilde{\nu}$ ——黏弹性边界单元的等效剪切模量、等效弹性模量和等效泊松比； h ——黏弹性边界单元厚度； $\tilde{\eta}$ ——等效阻尼系数； K_T, K_N ——弹簧切向刚度和法向刚度。

在已建立的三维有限元模型的边界上沿界面法向延伸一层厚度相等的实体单元，并将该层单元外层边界固定，使用等效实体单元替换空间分布的弹簧-阻尼器元件。通过为该层单元输入相应的等效剪切模量、等效弹性模量、等效阻尼系数和等效泊松比等材料参数的方法，在 ABAQUS 中实现对黏弹性边界条件的模拟。黏弹性边界单元的引入，使黏弹性边界在有限元软件中更加容易实现，大大提高了计算前处理效率。

2 Lamb 表面源问题

考察 Lamb 表面源问题：均匀、各向同性半空间，取 $-1 \leq x \leq 1, -1 \leq y \leq 1, -1 \leq z \leq 0$ 作为计算区域，介质拉梅常数、剪切模量和密度分别为 $\lambda = G = 16.0 \text{ Pa}, \rho = 1 \text{ kg/cm}^3$ ，泊松比 $\nu = 0.25$ 。在自由表面(0, 0, 0)受集中垂直荷载 $F(\tau)$ 作用，采用正六面体单元进行有限元网格划分，单元尺寸为 0.1 m，时间步长 $\Delta t = 0.01 \text{ s}$ ，观测点距力源 0.2 m。

$F(\tau)$ 加载的表达式为

$$F(\tau) = 16\left[\alpha(\tau) - 4G\left(\tau - \frac{1}{4}\right) + 6G\left(\tau - \frac{1}{2}\right) - 4G\left(\tau - \frac{3}{4}\right) + \alpha(\tau - 1)\right] \tag{12}$$

其中 $\alpha(\tau) = \tau^3 H(\tau)$ $\tau = t/T$
式中 : T ——荷载作用时间 ; $H(\tau)$ ——Heaviside 阶跃函数.

算例中 $F(\tau)$ 加载函数的解析解由 Lamb 问题基本解求得^[12]. 模型如图 1 所示 ,荷载如图 2 所示 ,作为集中荷载作用于半空间表面. 图 3 为模型分别在黏弹性边界、黏性边界和固定边界条件下观测点 z 向位移时程曲线与解析解的比较. 从图 3 可以看出 ,黏弹性边界的位移时程曲线与解析解最为接近 ,位移随时间逐步收敛到 0 ,精度较高 ,黏性边界情况下出现了明显的位移漂移失稳 ,不利于工程应用 ;固定边界由于能量在边界的聚积和波的反射 ,造成结构位移响应强烈 ,稳定性较差.

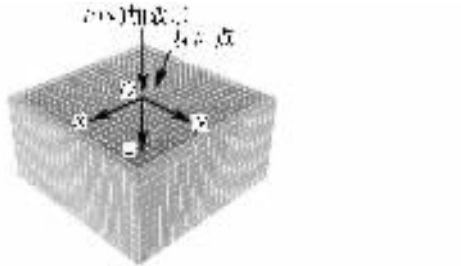


图 1 有限元模型(最外层单元为等效黏弹性边界单元)

Fig. 1 Finite element model (outer elements are equivalent visco-elastic boundary elements)

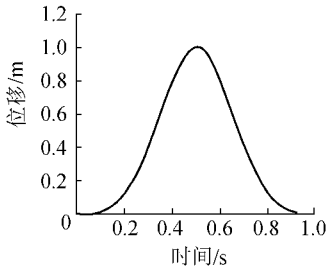


图 2 集中力作用时程曲线

Fig. 2 Curve of concentrated force

3 边界应用实例

以实际工程中的水闸-地基结构系统为例进行三维有限元分析 ,结构模型如图 4 所示 ,地基尺寸为 $64\text{ m} \times 48\text{ m} \times 9.5\text{ m}$. 边界采用黏弹性人工边界单元 ,最外层固定 ,整个模型共有结点 17 491 个 ,单元 13 858 个. 地基介质密度 $\rho = 1\,800\text{ kg/m}^3$,弹性模量 $E = 22\text{ MPa}$,介质拉梅常数及剪切模量 $\lambda = G = 8.8\text{ MPa}$,泊松比 $\nu = 0.25$. 地震波输入分 3 个方向进行 , x 向及 y 向地震波大小如图 5 所示 ,加速度峰值为 $0.1g$, z 向地震波为水平向的 $2/3$ 倍 ,输入方法参见文献[9].

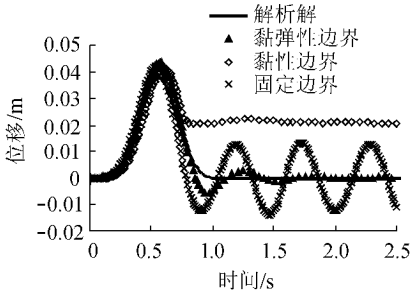


图 3 观测点(0 0 0)位移时程比较

Fig. 3 Comparison of displacement curves at point (0 0 0)

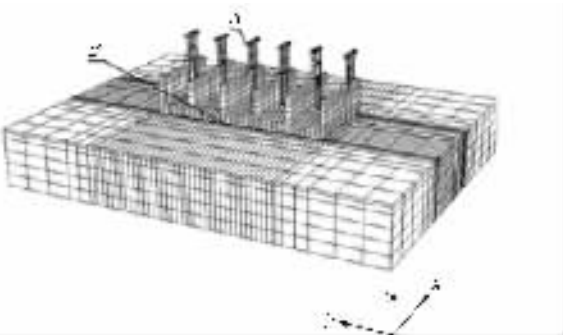


图 4 水闸结构三维有限元离散模型

Fig. 4 3D finite element model of sluice

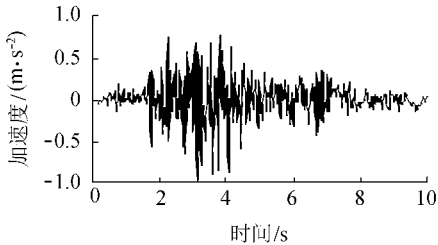


图 5 水平向加速度时程曲线

Fig. 5 Curve of horizontal acceleration

对图 4 所示模型进行地震响应分析 ,在黏弹性边界和固定边界条件下 ,比较关键部位 A , B 2 点的响应情况.

从图 6 可以看出 ,固定边界条件下位移最大值约为 0.033 m ,而黏弹性边界条件下位移最大值约为 0.013 m ,位移幅值减小明显 ,说明无限地基的辐射阻尼效应能够明显减小结构的地震响应. 图 7 为 2 种边界条件下 A 点速度时程曲线 ,固定边界情况下最大速度幅值约为 0.287 m/s ,而黏弹性边界情况下的最大幅值

约为 0.178 m/s ,减小 38% 左右.图 8 为 B 点 z 向应力比较 ,黏弹性地基时应力最大值约为 - 0.299 MPa ,而固定边界应力最大值约为 - 0.303 MPa ,减小约 35% .黏弹性边界可等效为弹簧与阻尼器并联的系统 ,该系统可以在结构地震响应过程中消耗一部分能量 ,减弱结构的动力响应 ,因此黏弹性边界条件下结构动能(不包括地基)要小于固定边界条件下结构动能 ,动能最大值减小约 32.3% ,如图 9 所示.

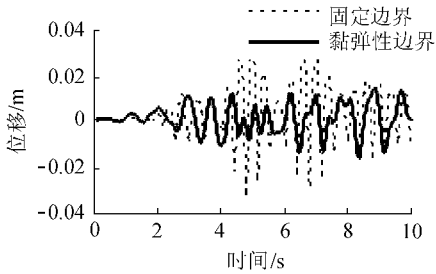


图 6 A 点 x 向位移

Fig. 6 Displacement at point A along x direction

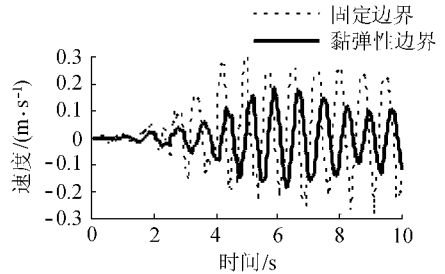


图 7 A 点 y 向速度

Fig. 7 Velocity at point A along y direction

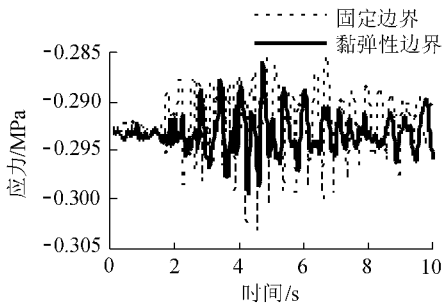


图 8 B 点 z 向应力

Fig. 8 Stress at point B along z direction

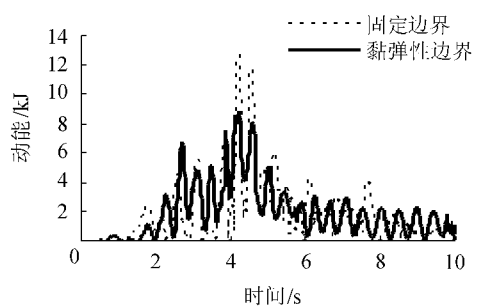


图 9 闸体结构动能

Fig. 9 Kinetic energy of sluice

4 结 论

本文将黏弹性人工边界与大型商业软件相结合 ,研究边界辐射阻尼对结构地震响应的影响.实例表明 ,ABAQUS 软件可以更加方便地与黏弹性边界条件相结合.结合 Lamb 表面源问题对结构在黏弹性边界、固定边界和黏性边界条件下的响应比较表明 ,结构在黏弹性边界下的动力响应与解析解最为接近 ,精度较高.本文还分析了水闸-地基结构系统在固定边界条件和黏弹性边界条件下的地震响应 ,从位移、应力和动能等角度对 2 种边界的响应进行了比较.比较结果表明 ,无限地基辐射阻尼可以有效削减结构的动力响应 ,削减程度可达 30% ~ 40% .

参考文献 :

[1] 邱流潮,刘桦,金峰.混凝土重力坝地震响应数值分析方法[J].河海大学学报:自然科学版,2006,34(1):65-68.
[2] 赵密.黏弹性人工边界及其透射人工边界的比较研究[D].北京:北京工业大学,2004.
[3] LYSMER J,KULEMEYER R L.Finite dynamic model for infinite media[J].Journal of Engineering Mechanics Division,ASCE,1969,95(4):759-777.
[4] DEEKS A J,RANDOLPH M F.Axisymmetric time-domain transmitting boundaries[J].Journal of Engineering Mechanics,ASCE,1994,120(1):25-42.
[5] 吴艺,房莹光.弹塑性地基中黏性与黏弹性人工边界条件有效性的验证[J].岩石力学与工程学报,2006,25(2):3468-3473.
[6] 廖振鹏,黄孔亮,杨柏坡,等.暂态波透射边界[J].中国科学:A 辑,1984,27(6):556-564.
[7] 廖振鹏,杨柏坡,袁一凡.暂态弹性波分析中人工边界的研究[J].地震工程与工程振动,1982,2(1):1-11.
[8] CHEN Shao-lin, LIAO Zhen-peng. Multi-transmitting formula for attenuating waves[J]. Acta Seismologica Sinica, 2003, 16(3):283-291.
[9] 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.
[10] 刘晶波,谷音,杜义欣.一致黏弹性人工边界及等效黏弹性边界单元[J].岩土工程学报,2006,28(9):1070-1075.
[11] 雷文军,魏德敏.无限域地基有限元分析的简化黏弹性边界[J].地震工程与工程振动,2005,25(3):110-114.

[12] 艾龙根, 舒胡毕. 弹性动力学: 第2卷 线性理论[M]. 北京: 石油工业出版社, 1984.

Effect of radiation damping on seismic response of structures

LI Zhi-quan^{1,2}, DU Cheng-bin^{1,2}, AI Yi-mou²

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China;

2. College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: ABAQUS, a commercial analysis and simulation software with strong functions for projects, is a superior way to analyze dynamic response. ABAQUS was coupled with visco-elastic boundary elements to simulate visco-elastic boundaries. Through an example, the dynamic responses of structures with a visco-elastic boundary, a viscous boundary and a fixed boundary were compared. The seismic response of a sluice-foundation system was analyzed with consideration of the effect of visco-elastic boundaries. The results show that the precision of the visco-elastic boundary is significantly higher than that of the other two boundaries, and it can be used to analyze the interaction between foundations and structures. Radiation damping can reduce the response of the structures by 30% - 40%.

Key words: structure; foundation; seismic responses; visco-elastic boundary; visco-elastic boundary element; fixed boundary; ABAQUS

·简讯·

中国力学学会“研究生力学教学的创新与实践” 专题研讨会将于2009年8月召开

在理工类学科研究生培养中,力学课程教学占有重要的位置.随着研究生培养规模的扩大以及力学学科的发展,不仅学习研究生力学课程的人数大量增加,而且课程建设与改革也取得较大成绩与进步.为了交流研究生力学教学的经验,研讨进一步提高研究生力学教学质量的途径,经中国力学学会批准,中国力学学会教育工作委员会将于2009年8月24~26日在郑州召开“研究生力学教学的创新与实践”专题研讨会.研讨的主要内容为:(a)研究生力学教学中的现代教学理念;(b)研究生力学教学在有关学科创新人才培养中的作用;(c)有关学科研究生力学课程体系建设与课程建设;(d)研究生力学教材建设的成果及经验;(e)研究生力学课程教学方法的革新;(f)研究生力学教学的师资队伍建设.

会议联系方式:

联系人:赵引

电话:13951697118

E-mail: Zhaoyin01@hhu.edu.cn

(本刊编辑部供稿)