

开放系统非线性动力反应分析的一种算法

廖维张, 杜修力, 赵 密, 李立云

(北京工业大学 教育部与北京市共建城市与工程安全减灾重点实验室, 北京 100022)

摘 要: 由于考虑非线性因素影响, 动力荷载作用下地下结构反应分析中需将静力反应作为其初始条件. 由于透射人工边界、黏性人工边界等局部人工边界条件存在零频限制问题, 不能将静力反应的初始条件直接用于这类人工边界条件模拟的动力系统分析中. 以往求解静力问题时采用固定边界, 再将由此产生的反力作为边界约束力用于动力分析, 造成了静、动力分析模型的边界条件不统一. 本文将无零频限制的黏弹性人工边界用于动力荷载作用下的地下结构非线性动力反应分析, 实现了此类问题在静、动力分析时边界条件的统一性, 并以爆炸荷载作用下地下结构的反应分析为例在大型通用显式有限元程序 LS-DYNA 中实现了这一算法.

关键词: 地下结构; 动力反应; 边界条件; 静动力统一人工边界算法

中图分类号: TU 352

文献标识码: A

文章编号: 0254-0037(2006)02-0115-05

在进行动力荷载作用下地下结构非线性反应分析时, 通常需要考虑地下结构所在场地由于自重引起的初始位移场和应力场, 由于介质非线性因素的影响, 静、动态反应线性叠加原理不再成立, 因此需将静力反应作为系统动力非线性分析的初始条件来进行动力阶段的计算. 由于半无限空间动力分析是一个开放系统中的波动问题, 存在能量辐射效应, 需在有限区域边界上引入反映无波动能量反射的人工边界条件来反映这种能量辐射效应. 透射、黏性等局部人工边界条件由于其局部解耦的特点, 可以避免求解大型耦联方程的困难, 因而受到了广泛重视. 同时, 由于没有沿人工边界提供对有界求解区域的弹性约束, 系统的动力反应将出现整体“飘移”而使计算失败, 这就是通常所讲的零频限制. 为克服这一问题, 杜修力等人提出先固定人工边界计算由于自重引起的应力、变形和边界约束反力, 再将其作为动力反应分析时的初始条件^[1], 这一方法的缺点是静、动力边界不统一.

黏弹性人工边界克服了透射人工边界、黏性人工边界在数值稳定性方面的困难, 逐渐引起了学术和工程界的重视, 杜修力、赵密关于二维、三维、内源与外源问题的一些典型实例的精度分析比较研究表明, 黏弹性人工边界的计算精度不低于 2 阶透射人工边界^[2]. 此外, 黏弹性人工边界条件的另一优势是由于沿人工边界施加的弹簧对有界的求解区域提供了弹性约束作用, 使得求解不存在零频限制.

1 显式积分运动方程

对于高度非线性问题的求解需采用高效的显式积分法来求解. 经单元计算并组集, LS-DYNA 程序^[3]的运动方程为

$$M \ddot{x}(t) = P(t) - F(t) \quad (1)$$

其时间积分采用显式中心差分法, 其算式如下

$$\ddot{x}(t) = M^{-1} [P(t_n) - F(t_n)] \quad (2)$$

$$\dot{x}(t_{n+1/2}) = \dot{x}(t_{n-1/2}) + [(\Delta t_{n-1} + \Delta t_n) \ddot{x}(t_n)] / 2 \quad (3)$$

$$x(t_{n+1}) = x(t_n) + \Delta t_n \dot{x}(t_{n+1/2}) \quad (4)$$

式中: $t_{n-1/2} = (t_n + t_{n-1}) / 2$; $t_{n+1/2} = (t_{n+1} + t_n) / 2$; $\Delta t_{n-1} = (t_n - t_{n-1})$; $\Delta t_n = (t_{n+1} - t_n)$.

收稿日期: 2005-04-13.

基金项目: 国家杰出青年基金资助项目(50325826).

作者简介: 廖维张(1978-), 男, 浙江苍南人, 博士生.

$\dot{x}(t_n)$, $\dot{x}(t_{n+1/2})$, $x(t_{n+1})$ 分别是 t_n 时刻的节点加速度矢量、 $t_{n+1/2}$ 时刻的节点速度矢量和 t_{n+1} 时的节点坐标矢量; M 为集中质量矩阵; P 为总体载荷矢量, 由节点载荷、面力、体力等形成; F 为单元应力场的等效节点力矢量组集而成。

2 黏弹性人工边界

黏弹性人工边界的引入可以使无限域的土-结构开放系统转化为有限尺寸的等效封闭系统模型。黏弹性边界一般可以等效为连续分布的并联弹簧-阻尼器系统。杜修力、赵密^[2]等针对刘晶波等^[4-5]所提出的黏弹性人工边界中刚度恢复过大问题提出一些改进, 经过大量的数值模拟计算, 得到了以下黏弹性人工边界参数。以三维黏弹性人工边界为例, 等效物理系统的弹性系数 K_{ii} 和阻尼系数 C_{ii} 分别为

法向

$$K_{ii} = (\lambda + 2G) / [(1 + A)r], \quad C_{ii} = B\rho c_p \quad (5)$$

切向

$$K_{ii} = G / (1 + A)r, \quad C_{ii} = B\rho c_s \quad (6)$$

式中: r 为波源至人工边界的距离; c_s 和 c_p 分别为剪切波和压缩波波速; G 为介质剪切模量; ρ 为介质质量密度。大量数值分析得到 A 、 B 的较优建议值 $A = 0.8$, $B = 1.0$ 。

3 算例分析

3.1 荷载确定

研究球形药包在土中的封闭爆炸所引起的地下箱形结构的动力响应问题。忽略爆腔的形成过程, 假设爆炸压力荷载直接作用在爆腔壁上。取球形 TNT 药包质量 $m = 53.6$ kg, 爆炸后形成爆腔的半径可由文献^[6]中的经验公式求得 $R = 1.5$ m。

爆炸荷载波形近似为三角形荷载, 直接径向作用在球形爆腔壁上。荷载峰值、上升时间 $t_r = 0.1t_d$ 及作用时间 $t_s = t_d = R/c_p$ ^[7]。

式中, t_d 为地冲击从爆炸点传播至某一给定点所需的时间(ms); c_p 为介质中的纵波波速(m/s)。

取 $R = 1.5$ m, $n = 2.8$, $c_p = 300$ m/s, 可求得爆腔壁上的压力荷载时程为

$$t_d = R/c_p = 5(\text{ms}), \quad t_r = 0.1t_d = 0.5 \text{ ms}, \quad P_{\max} = 30.6 \text{ MPa}$$

其中, n 为介质衰减系数。

爆炸荷载的波形和频谱特性如图 1 所示。

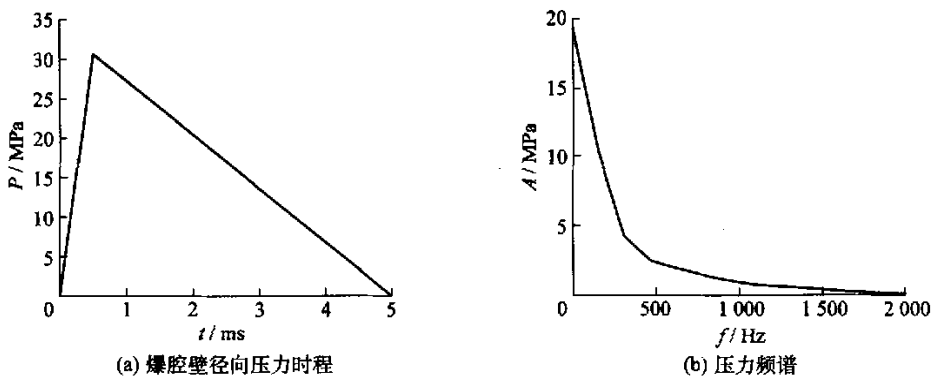


图 1 爆炸荷载

Fig. 1 Explosive loading

3.2 模型及参数确定

采用如图2所示的计算模型. 由于地下结构模型(35 m×21 m×20 m)具有对称性,且爆心位于对称面上,可利用对称性取原地下结构模型的一半建立计算模型. 爆心位于地表下6 m,离右侧边界10 m,爆炸后形成的爆腔半径为1.5 m. 箱形结构外边长为6 m×6 m×8 m,厚度为0.5 m,结构中心离地表面6 m,离左侧边界15 m,其迎爆面距离爆心6 m. 左、右、后、底4面边界采用黏-弹性边界,以减少4面边界反射波对结构反应的影响;前面设置为对称边界. 模型用LS-DYNA3D中的三维实体单元 SOLID164 进行剖分,共计节点数78 567,单元数72 180,其中箱形结构单元数为452. 土介质和结构之间相互作用通过共用节点来处理.

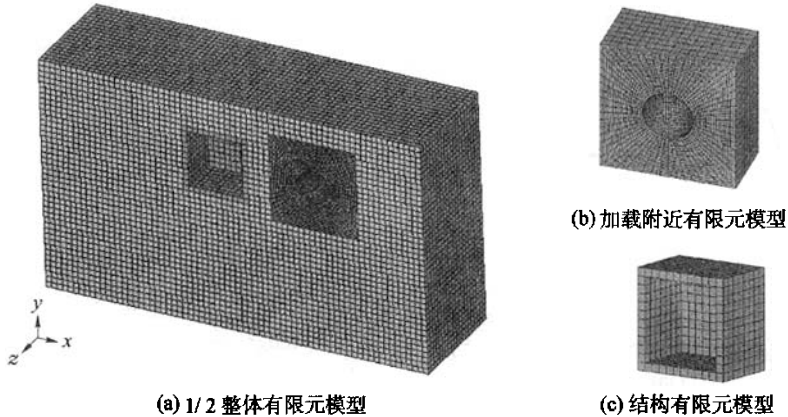


图2 三维有限元模型

Fig.2 Three dimension FE model

考虑介质的材料非线性,土介质与钢筋混凝土均采用弹黏塑性模型^[3]来进行模拟. 具体参数见表1.

表1 介质计算参数

Tab.1 Parameters of the medium

介质	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	E/MPa	μ	σ_0/MPa
钢筋混凝土	2 500	3.78×10^4	0.2	35
土介质	1 955	70	0.42	4.5

注: σ_0 为初始屈服应力

3.3 计算结果与分析

为了说明静动力统一人工边界算法的可行性,选取远置边界模型作为参考,远置边界设置的原则是考察点到人工边界的最近距离应大于求解时间与波速乘积的一半,从而避开人工边界设置对计算的影响,得到相对精确的求解. 本算例取模型各边界距离爆心60 m. 以下各图为黏弹性人工边界和远置边界2种条件下模型各点动力响应部分的位移时程比较图.

由图3可知,在自由面上、右侧边界上、离爆心较远的弹性区自由场中和离爆心较近的塑性区自由场中,结构内部迎爆面和底部中点等观测点处,采用黏弹性人工边界所计算的结果与远置边界的结果都吻合得较好,这说明文中所提的方法是可行的. 通过上述的对比图和分析可知,显式有限元加黏弹性人工边界处理方法能方便地实现系统静动力的统一计算,与远置边界所计算的结果吻合较好,证明此方法具有较好的精度.

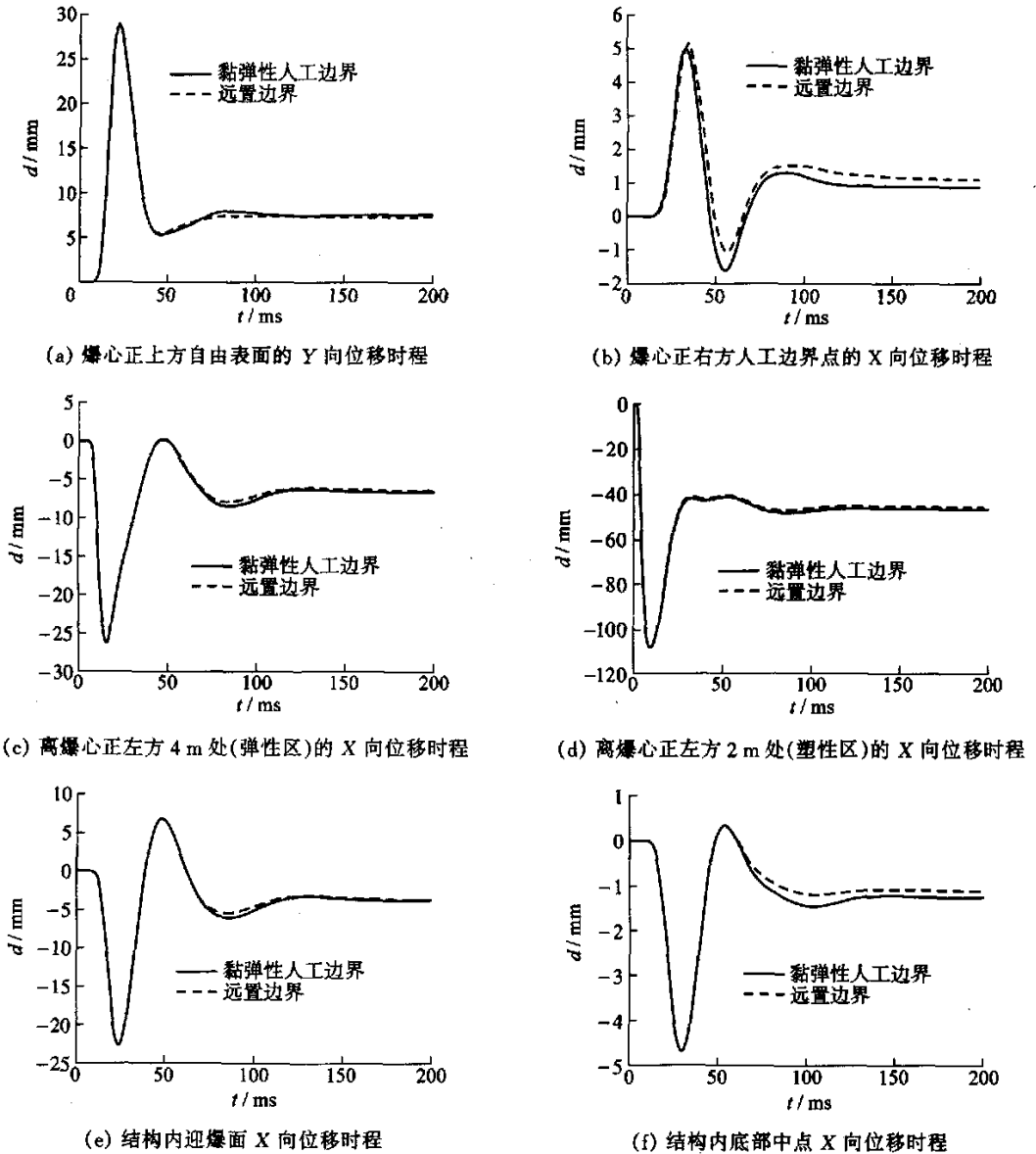


图3 各点位移时程比较

Fig.3 Comparison of the displacement time-history

4 结束语

由于黏弹性边界中的弹簧对动力开放系统的有限计算区域的边界提供约束,从而克服了透射人工边界、黏性边界在实现静动力统一人工边界分析上的困难.数值模拟结果表明,本文建议的静动力统一人工边界计算方法是可行的,而且计算步骤简单,精度较好.

参考文献:

- [1] 杜修力, 涂劲, 陈厚群. 有缝拱坝-地基系统非线性地震波动反应分析方法[J]. 地震工程与工程振动, 2000, 20(1): 11-20.

DU Xiu-li, TU Jin, CHEN Hou-qun. Nonlinear seismic response analysis of arch dam-foundation systems with cracked sur-

- faces[J]. *Earthquake engineering and Engineering Vibration*, 2000, 20(1): 11-20. (in Chinese)
- [2] 赵密. 黏弹性人工边界及其与透射人工边界的比较研究[D]. 北京: 北京工业大学建工学院, 2004.
ZHAO Mi. Study on the Viscous-spring boundary and the transmitting boundary [D]. Beijing: the College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, 2004. (in Chinese)
- [3] JOHN O Hallquist. LS-DYNA THEORETICAL MANUAL. California, Livermore Software Technology Corporation, 1998.
- [4] 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.
LIU Jing-bo, LÜ Yan-dong. A direct method for analysis of dynamic soil-structure interaction[J]. *China Civil Engineering Journal*, 1998, 31(3): 55-64. (in Chinese)
- [5] 王振宇. 大型结构-地基系统动力反应计算理论及其应用研究[D]. 北京: 清华大学土木水利学院, 2002.
WANG Zhen-yu. Computational theory of dynamic response of large structure-soil systems and its application[D]. Beijing: the College of Civil and Hydraulic Engineering, Tsinghua University, 2002. (in Chinese)
- [6] 亨利奇 J. 爆炸动力学及其应用[M]. 熊建国 译. 北京: 科学出版社, 1987.
- [7] 张亚栋, 张虹, 方秦, 等. 航弹冲击引起的遮弹层下自由场应力确定[J]. *解放军理工大学学报(自然科学版)*, 2004, 5(4): 53-56.
ZHANG Yadong, ZHANG Hong, FANG Qin, et al. Determination of ground shock in soil under blast layer due to bomb impact[J]. *Journal of PLA University of Science and Technology*, 2004, 5(4): 53-56. (in Chinese)

An Algorithm of the Non-linear Dynamic Analysis of Open System

LIAO Wei-zhang, DU Xiu-li, ZHAO Mi, LI Li-yun

(Beijing Key Lab of Urban Security and Disaster Engineering(Beijing University of Technology), Ministry of Education,
Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract: Considering the effect of non-linear factors, this article set static response as initial condition for the dynamic response analysis of the underground structures under dynamic loads. Since there is zero frequency restriction on some local artificial boundary conditions such as transmission boundary and viscous boundary etc., the initial condition of static response cannot be directly applied to the dynamic system simulated by those artificial boundary conditions. Fixed boundary used to be applied during the static analysis, and the reactive force on the boundary used to be regarded as the boundary constraint force in the stage of the dynamic analysis. As a result, the boundary conditions of static and dynamic analysis were not uniformed. In this article, the viscous-spring boundary without zero frequency restriction was applied to the non-linear dynamic response analysis of the underground structure under dynamic loads, by which the uniform boundary conditions between static and dynamic analysis were achieved. At last the algorithm was implemented in the explicit FEM program LS-DYNA by the example of dynamic response analysis of the underground structure under explosive loads.

Key words: underground structures; dynamic response; boundary conditions; static and dynamic uniform artificial boundary algorithm