文章编号:1000-8608(2012)02-0246-07

DSEM 时域数值模型求解关键影响因素分析

尹训强*,李建波,林 皋

(大连理工大学工程抗震研究所,辽宁大连 116024)

摘要:人工材料阻尼系数与有限区域尺寸对以阻尼溶剂抽取法(DSEM)为基础的动力结构-地基相互作用分析的效率与精度影响显著.为研究这种影响,以弹性地基上半无限杆的波动 理论为基础,在频域中推导了人工高阻尼条件下谐波幅值衰减的解析表达,进而结合对杆端 交界面力的时域数值分析,给出了适于工程应用的关键因素参考取值.提出了基于加速度求 解的 DSEM 隐式积分算法,克服了原位移求解模式中存在的结构-地基交界面显隐式积分步 长协调性的问题,可方便地与结构侧的动力响应分析相结合.数值算例表明该算法具有良好 的稳定性和计算效率,亦验证了关键因素参考取值的有效性.

关键词: 阻尼溶剂抽取法;关键因素;时域数值算法 中图分类号: TU3; TU43 **文献标志码**: A

0 引 言

强震作用下,坝体的非线性力学特征明显,因 而坝-库水-地基动力相互作用的全时域数值分析 及其研究日益受到工程学术界的重视,而建立无 限地基时域数值模型的合理性和数值计算的高效 与精度也日渐成为追求的终极目标^[1~4].

当前广泛应用的众多无限地基时域数值模型 中,阻尼溶剂抽取法(DSEM)^[5]从人工材料阻尼 与辐射阻尼在耗能方面的相似性出发,在与结构 毗邻的有限地基区域中虚加人工材料阻尼再移频 抽取来获得等价的交界面力与变位的动力关系, 而其完全基于有限元法的实现形式,更有利于坝 体静动力分析和建立统一的多场耦合分析系统, 适于工程采用,具有相对旺盛的发展潜力.然而, 在建立基于 DSEM 地基时域计算模型的过程中, 人工材料阻尼与有限区域等关键因素取值具有不 确定性,一方面为削弱反射波的影响,材料阻尼和 有限区域的尺寸要尽量选得大一些,另一方面为 减少计算中的自由度及尽可能满足求解无限域动 刚度阵时的泰勒级数展开条件^[6],有限区域的尺 寸与人工材料阻尼又要求尽量小些,因此关键因 素的选取是优化计算模型的关键.

DSEM 引入高阻尼地基有限计算区域求解 结构-地基交界面处的力与变位的关系,而有限区 域边界条件刚度差异较大,体现在力施加边界、区 域黏弹外边界以及场地表面自由边界,因此数值 稳定性一定程度上受到求解算法和时间步长等因 素的影响.当前国内外 DSEM 数值分析为满足精 度和数值稳定性的要求往往推荐采用高精度的隐 式求解方法,如精细积分方法[7]等;或是较小步长 的显式求解方法,如预报-校正显式数值积分法等. 这些算法与常在结构动力响应分析中采用的较大 时间步长的 Newmark 法存在一定的协调性差异, 据此,相继又提出了分区异步长显-隐式求解算 法^[2] 或设立过渡单元的方法^[3]. 为从根本上探讨上 述问题的合理解决办法,本文依据处于弹性地基上 半无限杆的波动理论,推导频域内人工高阻尼条件 下谐波幅值衰减的解析表达,进而结合纵向动荷载 作用下杆端交界面力的时域数值分析,给出适于工 程应用的关键因素参考取值,并从输入的地震加 速度与地震位移时程关系出发,提出基于加速度 求解的 DSEM 隐式算法,并验证其工程适用性.

收稿日期: 2010-08-04; 修回日期: 2012-01-04.

基金项目:"十一五"国家科技支撑计划资助项目(2009BAG12A01-K01-3);国家自然科学基金重大研究计划培育项目(90915009); 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室开放基金资助项目(sklhse-2010-C-03);中央高校基本科研业务费专 项资金资助项目(DUT10ED101).

作者简介: 尹训强*(1986-),男,博士生,E-mail:lc-tm2008@163.com;林 皋(1929-),男,教授,博士生导师,中国科学院院士.

1 DSEM 时域模型基本动力方程

基于 DSEM,无限地基与结构交界面力的求 解采用人工高阻尼有限区域的二次组合分析求解 模式.图1为 DSEM 实现的有限元模型示意图, 其中为进一步消除外行波波动能量在外边界处施 加了黏弹边界.



图 1 八工间阻尼有限区域两限保空 Fig. 1 Finite-element discretization model of bounded medium in DSEM

为构造二次方形式的无限地基交界面处的动 刚度表达,设虚加节点人工材料阻尼为2ζM,相应 节点刚度为ζ²M,并令

 $\widehat{\mathbf{M}} = \mathbf{M}; \widehat{\mathbf{C}} = 2\zeta \mathbf{M}; \widehat{\mathbf{K}} = \mathbf{K} + \zeta^2 \mathbf{M}$ (1) 式中: **M**、**K**分别为无人工阻尼地基有限区域的质 量阵和刚度阵.

则人工高阻尼有限区域的运动方程为

 $\hat{\mathbf{M}} \, \mathbf{i} + \hat{\mathbf{C}} \, \mathbf{i} + \hat{\mathbf{K}} \mathbf{u} = \mathbf{R}$ (2) 经简单推导,由地基有限区域计算得到相应无限 区域交界面作用力的非耦合时域表达式:

$$\mathbf{R}_{b}^{\infty}(t) = \widehat{\mathbf{M}}_{bb} \ \mathbf{\ddot{u}}_{b} + (\widehat{\mathbf{K}}_{bb} - \zeta \widehat{\mathbf{C}}_{bb}) \mathbf{u}_{b} + \\ \widehat{\mathbf{K}}_{bm} \mathbf{u}_{m} + \zeta \widehat{\mathbf{K}}_{bb} \mathbf{v}_{m}$$
(3)

式中:下标 b 表示结构 - 地基交界面节点;下标 m 表示有限区域内部节点; ü_b、ü_b 与 u_b 表示交界面 处的输入加速度、速度及位移. u_m 和 v_m 为地基内 部运动量,具体求解如下:

$$\widehat{\mathbf{M}}_{ ext{mm}} \ \ddot{\mathbf{u}}_{ ext{m}} + \widehat{\mathbf{C}}_{ ext{mm}} \ \dot{\mathbf{u}}_{ ext{m}} + \widehat{\mathbf{K}}_{ ext{mm}} \ \mathbf{u}_{ ext{m}} = - \ \widehat{\mathbf{K}}_{ ext{mb}} \ \mathbf{u}_{ ext{b}} - \widehat{\mathbf{C}}_{ ext{mb}} \ \dot{\mathbf{u}}_{ ext{b}}$$

 $\widehat{\mathbf{M}}_{mm} \ \mathbf{\dot{v}}_{m} + \widehat{\mathbf{C}}_{mm} \ \mathbf{\dot{v}}_{m} + \widehat{\mathbf{K}}_{mm} \ \mathbf{v}_{m} = 2 \ \widehat{\mathbf{M}}_{mm} \ \mathbf{\dot{u}}_{m} + \widehat{\mathbf{C}}_{mm} \ \mathbf{u}_{m} - \widehat{\mathbf{C}}_{mh} \ \mathbf{u}_{m}$ (5)

式(3)~(5)构成了 DSEM 时域模型基本动 力方程,进而,可数值求解获得结构-地基交界面 力.

2 人工阻尼系数等关键因素影响分析

以弹性地基上半无限杆杆端交界面力求解为 例,研究有限区域与人工材料阻尼等关键因素对 杆内波动场的影响,给出了此条件下谐波幅值衰 减的解析表达.

2.1 模型描述

如图 2 所示,弹性地基上的无阻尼半无限杆的截面积为 A,弹性模量为 E,质量密度为 ρ . 在沿杆长分布着纵向弹性支承,弹性支承的刚度为 K_g ,特征长度 $b = \sqrt{EA/K_g}$,弹性波波速 $q = \sqrt{E/\rho}$,取有阻尼有限杆的长度为 l, ζ 为附加节点人工材料阻尼系数,并定义量纲一长度 l/b表征有限区域的大小,量纲一人工阻尼系数 $\zeta = \zeta b/q$ 表征人工材料阻尼. 交界面处采用沿杆纵向谐波激励,谐波位移幅值为 u_0 ,以函数形式可表达为

$$u_{b}(t) = \begin{cases} \frac{u_{0}}{2} \left[1 - \cos\left(\pi \frac{t}{t_{0}}\right) \right]; & 0 \leq t \leq t_{0} = 2 \frac{r_{0}}{c_{1}} \\ 0; & t > t_{0} \end{cases}$$
(6)

则对应输入速度、加速度时程可由式(6)求导获得.



(a) 弹性地基上的半无限杆



(b) 弹性地基上的有限杆

图 2 一维杆波动问题分析模型

Fig. 2 Analytical model for the one-dimensional wave propagation problem in a rod

2.2 关键因素影响分析

取如图 3 所示的有阻尼杆微分元进行分析, 并由图中受力情况可得

 $N_{,x} dx - K_g u dx - \zeta^2 \rho A dx u -$

$$2\zeta\rho \mathrm{Ad}\,x\,\dot{u} - \rho \mathrm{Ad}\,x\,\ddot{u} = 0 \tag{7}$$

利用关系式 N = EAu_x 将式(7) 转换到频 域,引入 $a_0^* = (\omega - i\zeta) b/c_1$,得

φ

$$b^{2} u_{,xx}(\omega) - (a_{0}^{*2} - 1) u(\omega) = 0 \qquad (8)$$



Fig. 3 Equilibrium of infinitesimal element of a rod

则式(8)的解为

$$u(\omega) = c_1 e^{+i \sqrt{a_0^{*2} - 1 \frac{x}{b}}} + c_2 e^{-i \sqrt{a_0^{*2} - 1 \frac{x}{b}}}$$
(9)

式(9)中的 c₁和 c₂分别表示输入波和输出波的幅 值.在外边界上,输出波对应的是入射波,输入波 对应的是反射波.无阻尼介质在外边界单位面积 上设置阻尼器的阻尼系数为 iwpc,加入人工材料 阻尼后,对应的外边界阻尼系数中的 w代之以 iwpc+ζoc,第二项表示单位面积上设置弹簧系数. 有阻尼有限杆的边界条件满足

$$N(\omega, x = l) = -i\omega\rho c_1 A u(\omega, x = l) - \zeta \rho c_1 A u(\omega, x = l)$$
(10)

将边界条件式(10)代入力和位移的关系式

$$u_{x}(\omega, x = l) + \frac{\mathrm{i}\omega + \zeta}{c_{1}}u(\omega, x = l) = 0 \ (11)$$

将式(9)代入式(11),得到有限区域边界采 用黏弹边界时入射波与反射波的幅值比,化简得

$$c_{1}/c_{2} = \frac{\sqrt{a_{0}^{*2} - 1} - a_{0}^{*}}{\sqrt{a_{0}^{*2} - 1} + a_{0}^{*}} e^{-2i \sqrt{a_{0}^{*2} - 1} \frac{1}{b}} \quad (12)$$

为检验式(12)所得到的反射波与入射波幅 值比 c_1/c_2 ,作为例子,取有阻尼有限杆的量纲一 长度 l/b = 3,量纲一人工阻尼系数 $\overline{\zeta} = 0.2$.为方 便比较,取相同长度并采用黏弹边界的无阻尼有 限杆进行计算分析,所得结果如图 4 所示.可以发 现,在有限杆中施加人工阻尼后对反射波的幅值 c_1 有很大的削减.

由谐波振动的频域表达 $u = u_0 e^{i\alpha}$ 推导可知, 不考虑阻尼条件下,对于辐射半径为 l 的无阻尼 有限区域,弹性波由近场交界面震源无衰减地传 播到计算区域外边界处导致的相位差为 $e^{-i\alpha/q}$.当 施加人工材料阻尼后,原频率代之以 $\omega - i\zeta$,相应 无阻尼条件下的相位差变为 $e^{-\zeta/q} e^{-i\alpha/q}$,其中 $e^{-\zeta/q}$ 代表了附加节点阻尼导致沿传播方向上节 点振动幅值的衰减. 综上所述,交界面处单位位移激励在有阻尼 有限区域内传播且经黏弹边界反射后再次到达交 界面,整个衰减过程后的波动振幅变为

(b) 虚数部分

3

图 4 反射波与入射波的幅值比 c₁/c₂ 变化曲线 Fig. 4 Variation curves of amplitude ratio c₁/c₂ of reflected wave to incident wave

一般情况下, ϕ 的取值越小,则得到的结果精 度越高.要使 ϕ 值减小,主要有两个途径,增大人 工阻尼系数 $\overline{\zeta}$ 或有限区域尺寸l/b,如图 5 所示, (a)中体现了随着有限区域的增大,交界面处所 受到的影响也相应降低,但影响程度随着区域的 增大而减小,(b)中说明人工阻尼系数 $\overline{\zeta}$ 的增大会 使波动幅值减小,且两者的效果均比较显著.但 l/b增大会明显增加计算量,而增大 $\overline{\zeta}$ 使频率偏移 量变大,在一阶展开抽取时可能会对计算结果造 成影响.明显的,式(13)解析表达了有限区域与 人工阻尼对波动幅值的影响,可作为两个关键参 数选用的依据之一.

2.3 数值计算及分析

以弹性地基上半无限杆杆端交界面力的解析 解^[8]作为基准参考值,对比分析 DSEM 地基时域 计算模型中有限区域尺寸及人工材料阻尼系数等 关键因素对结果的影响.为方便进行比较,定义 量纲一时间 $\overline{t} = tc_1/r_0$,量纲一交界面力 $\overline{R}(\overline{t}) = R(\overline{t})/K^{\infty} u_0, K^{\infty} = \sqrt{EAK_s}$ 为静力刚度系数.





针对不同的有限区域大小($l/b=1\sim6$),图6 给出了在位移激励下各时刻杆端交界面力数值解 与解析解的误差值 $\Delta R(\overline{t})$.可以看到,在所研究的 地基区域内,2倍激励持时段内数值结果与解析 解的最大误差值等于0.0087,而在较小地基区域 内,自由衰减段数值解的误差则非常明显,而随着 地基区域的增大,自由衰减段的精度也随之增大, 当增大到一定程度后,再继续增大有限区域,对数 值解的精度影响并不是很大,这与图5(a)中表现 的规律是一致的.在时域分析中,往往关心的是交 界面力的峰值,而峰值一般发生在激励持时段,此 算例中峰值点的相对误差在0.5%之内.因此,为 适应工程的应用,尽量减少计算量,以及方便建立 模型(地基有限区域取为整数),取有限区域 l/b等于1,2或3较为适宜.





基于上述研究,图 7 给出了特定有限区域内 采用不同人工阻尼系数($\overline{\zeta} = 0 \sim 3$)所获得交界 面力数值解的误差值 $\Delta \overline{R}(7)$.在激励持时段内, $|\Delta \overline{R}(7)|$ 的值达到最小时即为所要探求人工材 料阻尼系数 $\overline{\zeta}$ 的适宜参数取值.以下对 3 个特定有 限区域的情况分别讨论.

(1) l/b = 1 时,在激励持时段内,最小值出现 在 $\zeta = 0.8 \sim 1.0$,在自由衰减段内误差值较为明显,但对时域分析影响不大.

(2) l/b = 2 时,激励持时段的误差都较小,但 在 0.5 ~ 0.8 时,衰减段的误差值处于波谷段,即 两侧的 ζ 对应的计算结果误差较高,并且随着 ζ 的 增大,误差越来越大,故此有限区域对应的人工阻 尼系数取 $\zeta = 0.5 \sim 0.8$ 较为合适.

(3) *l*/*b* = 3 时,波谷段出现在人工阻尼系数 为 0.2 ~ 0.5.

总体来看,较大有限区域和较小人工阻尼的 精度要高于较小有限区域和较大人工阻尼,对于 不同的地基区域,人工阻尼系数支的增大反而使 结果的误差增大,正反映了支的增大使频率偏移 量变大,从而一定程度上造成了误差的增大.





3 基于加速度求解的 DSEM 隐式算法

3.1 地震波动信号的积分关系

DSEM 时域模型的求解精度及稳定性受较 多因素影响,此外,从输入的地震加速度信号和地 震位移信号的积分关系也可以看出,输入加速度 信号更适合工程应用,以集集地震波为例,如图 8,加速度信号与通常采用的信号无差异,但积分 速度与积分位移却出现明显漂移现象^[9].通过数 值计算发现,上述现象对传统求解算法的稳定性, 尤其在大步长条件下对求解的有效收敛可能产生 一定的影响,经试算发现,采用基于加速度的动力 求解具有相对较好的算法稳定性.



- 图 8 集集地震波动信号加速度、速度及位移 时程曲线
- Fig. 8 Acceleration record obtained during Chi-Chi earthquake and the velocity time series and the displacement time series derived from integration of the acceleration

3.2 基于加速度求解的 DSEM 隐式算法

Newmark 法^[10] 中,在任意时间步长内的速度和位移采用如下基本积分假定:

$$\dot{\boldsymbol{u}}_{t+\Delta t} = \dot{\boldsymbol{u}}_{t} + \left[(1-\beta) \, \ddot{\boldsymbol{u}}_{t} + \beta \, \ddot{\boldsymbol{u}}_{t+\Delta t} \right] \Delta t;$$

$$\boldsymbol{u}_{t+\Delta t} = \boldsymbol{u}_{t} + \dot{\boldsymbol{u}}_{t} \Delta t + \left[(0.5-\alpha) \, \ddot{\boldsymbol{u}}_{t} + \alpha \, \ddot{\boldsymbol{u}}_{t+\Delta t} \right] \Delta t^{2}$$
(14)

式中: α 和 β 为权重系数, Δt 为时间步长, $\ddot{u}_{t+\Delta t}$ 、 $\dot{u}_{t+\Delta t}$ 与 $u_{t+\Delta t}$ 分别为任意时间步内的最终加速度、速度 与位移.

依据式(4),地基内部运动量 u_m 在 $t+\Delta t$ 时刻 的动力方程可表达为

$$\widehat{\mathbf{M}}_{mm} \ \mathbf{\dot{u}}_{m,t+\Delta t} + \widehat{\mathbf{C}}_{mm} \ \mathbf{\dot{u}}_{m,t+\Delta t} + \widehat{\mathbf{K}}_{mm} \ \mathbf{u}_{m,t+\Delta t} = - \widehat{\mathbf{K}}_{mb} \ \mathbf{u}_{b,t+\Delta t} - \widehat{\mathbf{C}}_{mb} \ \mathbf{\dot{u}}_{b,t+\Delta t}$$
(15)

将式(14)代入上式动力方程中,则可得到仅 含有时间步终点未知加速度 ü_{rta}的表达式.经适

$$\widetilde{\mathbf{M}}\,\mathbf{\ddot{u}}_{t+\Delta t} = \widetilde{\mathbf{R}}_{t+\Delta t} \tag{16}$$

式中:等效质量 $\widetilde{\mathbf{M}}$ 和等效相互作用力 $\widetilde{\mathbf{R}}_{H\Delta t}$ 分别为

$$\widetilde{\mathbf{M}} = \widehat{\mathbf{M}}_{mm} + a_0 \ \widehat{\mathbf{C}}_{mm} + a_1 \ \widehat{\mathbf{K}}_{mm}$$
(17)

$$\check{\mathbf{R}}_{t+\Delta t} = -\, \widehat{\mathbf{K}}_{\mathrm{mb}} \, \mathbf{u}_{\mathrm{b}, t+\Delta t} - \widehat{\mathbf{C}}_{\mathrm{mb}} \, \, \dot{\mathbf{u}}_{\mathrm{b}, t+\Delta t} - \widehat{\mathbf{C}}_{\mathrm{mm}} \, \left(\, \dot{\mathbf{u}}_{t} + \right)$$

 $a_{2} \ddot{\boldsymbol{u}}_{t}) - \hat{\boldsymbol{K}}_{mm} (\boldsymbol{u}_{t} + a_{3} \ddot{\boldsymbol{u}}_{t} + a_{4} \ddot{\boldsymbol{u}}_{t}) \quad (18)$ 其中的系数分别为 $a_{0} = \beta \Delta t, a_{1} = a \Delta t^{2}, a_{2} = (1 - \beta) \Delta t, a_{3} = \Delta t, a_{4} = (0, 5 - a) \Delta t^{2}.$

由式(18)可首先求出时间步终点加速度 **u**_{(+Δi},所用到的仅是时间步初始数据.然后,此时 刻的速度和位移可用式(13)和(14)计算.同理可 以求得各时刻 v_m.

3.3 算例验证及分析

当归并同类项,此式可写为

基于上述推导,本节应用不同数值算法对某 半无限地基在位移激励条件下交界面力进行计 算,并将数值解与精确解进行比较,以验证该求解 算法的数值稳定性、精确度及计算效率.

某半无限地基的有限元计算模型如图 9 所示,地基区域的特征长度 b=20 m;剪切模量 G= 3.2×10⁸ Pa;泊松比 $\nu=0.25$;密度 $\rho=2.0\times10^3$ kg/m³;相应的横波波速与纵波波速分别为 $c_s=400 \text{ m/s}, c_p=693 \text{ m/s}.$



Fig. 9 FE calculation model of semi-infinite foundation

交界面位移激励采用竖向简谐波动,相应周 期为 T=0.4 s,位移幅值取 u₀=0.1 m,以函数形 式可表达为

$$u_{b}(t) = \left\{ \frac{u_{0}}{2} \left[1 - \cos\left(2\pi \frac{t}{T}\right) \right]; \quad 0 \leqslant t \leqslant 2T$$

$$0; \quad t > 2T$$
(19)

分别采用精细积分法、预报-校正法及基于加速度求解的 DSEM 隐式算法对于不同有限区域 *l/b*的情况进行计算.选择的人工阻尼系数 ζ及无限地基交界面合力时程曲线如图 10 所示.



图 10 无限地基动态交界面合力时程曲线



由图 10 示所得数值结果,通过对比分析 3 种 不同的算法可得以下几点结论:

(1)3种不同算法求得的数值解精度都较高. 取较小区域和较大阻尼系数时,在激励持时段内的峰值交界面力以及自由衰减段内有一定的差异,但相位差别不大,而随着有限区域 *l/b*的增大和人工阻尼系数ζ的减小,在激励持时段内基本与 精确解吻合,只是在自由衰减段有些许差别,这与 前面的论述是相一致的.

(2)预报-校正法是一种显式积分算法,需要 在小步长时间增量(算例取 Δt =0.5 ms)条件下 才能保证其稳定性,同样的,精细积分法虽在数值 结果上可与精确解相比拟,但也需要极小步长(算 例取 Δt =0.005/32 s)才能保证解的收敛及精度. 而基于加速度求解的 DSEM 算法作为隐式求解 的一种,是无条件收敛的,有较好的数值稳定性, 允许较大的时间步长(算例取 Δt =0.02 s),能保 证较高的精度,且满足交界面处协调性条件,为结 构的动力响应分析提供可靠数据.

(3)精度和数值稳定性是工程应用的前提,而 计算效率则是影响到大规模工程应用的关键,相 比基于加速度求解的 DSEM 隐式算法,预报-校 正显式算法在求解时,若采用集中质量阵则平衡 方程无需求逆,但为保证数值稳定性,采用的积分 时间步长至少要比基于加速度求解的 DSEM 隐 式算法所用步长小几十倍.而精细积分在实现过 程中会加倍变量维数与中间矩阵阶数,即一般的 $n \times n$ 阶变为(2n) ×(2n) 阶,以及大规模的非对 称矩阵求解,耗时较长.以本文3.3节算例为例, 分析如下: CPU 为 Intel 酷睿 2 四核 Q8300 2.5 GHz,DDR3 内存 4.0 GB,操作系统为 Windows XP,程序开发平台为 Compaq Visual Fortran Professional Edition 6.6. 取相同计算模型,单元 数为400,节点数为451.本文所提出的算法(时间 步长为 0.02 s)花费 CPU 时间为 20 s;预报-校正 显式算法(时间步长为 0.5 ms)花费时间为 145 s,与常规有限元分析相当;精细积分法在计算中 间矩阵时花费时间较多,共用时1460 s.

由此可见,本文提出的求解算法,较之其他两 种算法,在计算精度相差不大的前提下,数值稳定 性及计算效率都有所改进.

4 结 语

本文对阻尼溶剂抽取法的几个关键因素从解 析和数值两方面进行了分析,通过对比半无限杆 杆端交界面力的解析解和数值解,给出了建立基 于阻尼溶剂抽取法的地基时域计算模型时的关键 因素参考值,并提出了求解交界面力的基于加速 度求解的 DSEM 隐式算法,通过算例表明该算法 在数值精度没有损失的基础上,提高了数值稳定 性,克服了原位移求解模式中存在的交界面显隐 式积分步长协调性的问题,提高了计算效率,同时 验证了所给关键因素参考取值的有效性.

参考文献:

- [1]林 皋,杜建国. 基于 SBFEM 的坝-库水相互作用分析[J]. 大连理工大学学报, 2005, 45(5):723-729
 (LIN Gao, DU Jian-guo. Analysis of dam-reservoir interaction based on SBFEM [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2005, 45(5):723-729)
- [2] 陈健云,李建波,林 皋,等.结构-地基动力相互作用 时域数值分析的显-隐式分区异步长递归算法[J].岩 土工程学报,2007,26(12):2481-2487
- [3] 钟 红,林 皋,李建波. 空间结构-地基动力相互作 用数值分析时域算法研究[J]. 大连理工大学学报, 2007, 47(1):78-84

(ZHONG Hong, LIN Gao, LI Jian-bo. Numerical analysis of soil-structure dynamic interaction for 3-D problems in time domain [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2007, 47(1):78-84)

- [4] 李建波,陈健云,林 皋. 求解非均匀无限地基相互 作用力的有限元时域阻尼抽取法[J]. 岩土工程学 报,2004,26(2):263-267
- [5] SONG C, WOLF J P. Dynamic stiffness of

unbounded medium based on damping solvent extraction [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1994, 23(2):169-181

- [6] 丁海平,廖振鹏.动力刚度计算方法——"盐溶"法——的改进[J].地震工程与工程振动,2001,21(2):13-18
- [7] 钟万總.结构动力方程的精细时程积分法[J].大连 理工大学学报,1994,34(2):189-192
 (ZHONG Wan-xie. On precise time-integration method for structural dynamics [J]. Journal of Dalian University of Technology, 1994, 34(2):189-192)
- [8] WOLF J P, SONG C. Finite-Element Modelling of Unbounded Media [M]. New York: John Wiley & Sons Inc., 1997
- [9] 李建波,陈健云,林 皋.相互作用分析中地震动输入长周期校正研究[J].大连理工大学学报,2004, 44(4):550-555

(LI Jian-bo, CHEN Jian-yun, LIN Gao. Study of long-period correction of seismic accelerogram for dynamic interaction analysis [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2004, 44(4):550-555)

[10] 克拉夫 R. 结构动力学 [M]. 2版. 彭 津,王光 远,等译校. 北京:高等教育出版社, 2007:97-99

Analyses of key influencing factors of time-domain numerical methods based on DSEM

YIN Xun-qiang*, LI Jian-bo, LIN Gao

(Earthquake Engineering Research Division, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The key factors in the dynamic soil-structure interaction analyses based on the dampingsolvent extraction method (DSEM), artificial material damping coefficient and domain size have a significant effect on the accuracy and efficiency. In order to investigate the influence of the key factors, an analytical formula of attenuation of oscillation amplitude under artificial high damping is deduced in the frequency domain on the basis of wave propagation theory in the semi-infinite rod on an elastic foundation. What is more, the reference values used in engineering of key factors are suggested through the numerical evaluation of interaction forces of semi-infinite rod in the time domain. An implicit DSEM integral algorithm in which acceleration is solved firstly is proposed to solve the coordination problem of explicit and implicit integral algorithm with different time steps on the interface between structure and soil region and can combine with dynamic response analysis of structures conveniently. The numerical results demonstrate good stability and efficiency of the proposed algorithm. In the meantime, the reference values of the key factors exhibit good effectiveness.

Key words: damping-solvent extraction method; key factors; time-domain numerical algorithm