P-SV 波斜入射时成层半空间自由场的时域算法∞

赵 密¹,杜修力¹,刘晶波²,韩 强¹

(1. 北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室,北京 100124;

2. 清华大学土木工程系,北京 100084)

摘 要:刘晶波和王艳提出了一种弹性水平成层半空间中平面 P-SV 波斜入射时平面内自由波场 时域计算的一维化有限元方法,该方法采用黏性人工边界条件近似地模拟下部基岩半空间的辐射 阻尼,可导致平面 P-SV 波以大角度入射时自由场计算精度降低。本文提出一种精确模拟基岩半 空间辐射阻尼的人工边界条件。由于基岩半空间中外行波是传播方向已知的平面 P 波和 SV 波, 利用弹性介质的应力—位移本构关系建立了人工边界处应力与速度的阻抗边界条件;采用该人工 边界条件替代黏性边界条件,改进了 P-SV 波斜入射时成层半空间自由场的时域算法。数值试验 表明,与采用黏性边界条件的自由场算法相比,改进方法具有更高的计算精度,其计算结果与理论 解吻合更好。

关键词:成层介质;平面内波动;斜入射;时域数值算法;人工边界条件 中图分类号:TU435 文献标识码:A 文章编号:1000-0844(2013)01-0084-07 DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2013.01.0084

Time-domain Method for Free Field in Layered Half Space under P-SV Waves of Oblique Incidence

ZHAO Mi¹, DU Xiu-li¹, LIU Jing-bo², HAN Qiang¹

 The Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A 1D finite element method in time domain has been proposed by Liu and Wang for calculating the in-plane free wave field in elastic layered half space under the plane P and SV waves of oblique incidence (Engineering Mechanics, 2007, 24(7): 16-22 (in Chinese) and Acta Mechanica Sinica, 2007, 23: 673-680). The viscous artificial boundary condition is used in this method to approximately model the radiation damping of underlying bedrock half space. This leads to the 1D finite element method with low accuracy. An artificial boundary condition is proposed in this paper, which can exactly model the radiation damping of bedrock half space. Due to that the outgoing waves in bedrock are the plane P and SV waves with known propagation directions, using the constitutive relation between stress and displacement in elastic media, the impedance boundary condition between stress and velocity on artificial boundary condition to replace the viscous boundary condition. Numerical examples indicate that the improved 1D finite element method has the higher accuracy than the original method, and the solution using the improved method is identical very well with the theoretical solution.

基金项目:国家 973 计划(2011CB013602);国家自然科学基金(51008170);北京市科技新星计划(2011017)

.,

① 收稿日期:2013-02-20

作者简介:赵 密(1980一),男,吉林人,博士,副研究员,硕士生导师,主要从事波动数值模拟、人工边界条件等方面的研究工作。 E-mail: zhaomi@bjut. edu. cn

Key words: Layered media; In-plane wave motion; Oblique incidence; Time-domain method; Artificial boundary conditio

0 引言

地震作用下土与结构动力相互作用分析中,首 先需要计算地震自由波场作为波动输入^[1]。在自由 场计算中,入射地震波可以简化为竖直入射或者倾 斜入射的平面体波,场地可以简化为弹性均匀半空 间或者弹性成层半空间。在一般工程结构的地震反 应分析中,可以采用地震波竖直入射的均匀半空间 或者成层半空间场地模型,该问题是空间一维的,能 够方便地在时域内求解。对于高坝、核电站、大型地 下结构等重大工程结构,则需要考虑地震波倾斜入 射引起的场地运动非一致变化对结构地震反应的影 响。地震波斜入射时,均匀半空间自由场可以根据 波动传播规律在时域内计算^[2-4];而成层半空间自由 场只能采用解析方法在频域内求解^[5],为了获得时 域反应需要多次执行快速傅里叶变换,因而需要大 量的计算时间和存储空间。

为了在时域内计算地震波斜入射时成层半空间 自由波场,刘晶波和王艳^[7-9]提出了一种简便易行的 空间一维化计算方法。该方法采用矩形有限单元进 行网格虚拟划分,竖直方向采用满足波动精度要求 的网格尺寸;水平方向的网格尺寸等于时间步长与 水平视波速的乘积。基底设置黏性人工边界条 件[10]模拟基岩半空间的辐射阻尼,并将波动输入转 化为等效荷载施加在人工边界结点上。将集中质量 有限元法和时间中心差分相结合建立结点运动方程 组。然后根据斯奈尔定律,将水平方向相邻结点的 运动用该结点相邻时刻的运动表示,从而将求解结 点运动的空间二维方程组化为空间一维方程组。求 解此方程组,即得到自由波场中竖向一列结点的运 动。最后根据行波传播的特点,可方便地确定整个 空间的自由波场。这样,计算地震波斜入射时水平 成层半空间自由场的空间二维问题转化为简单的空 间一维问题。

对于出平面 SH 波问题^[6],修正的黏性边界能 够完全吸收外行波,精确模拟基岩半空间的辐射阻 尼;然而对于平面内 P-SV 波问题^[7-8],黏性边界及 其修正形式均不能完全吸收外行波,形成的虚假反 射波将污染自由场反应。地震波倾斜入射角越大, 计算结果与真实波场之间的误差越大。实际上,黏 性边界^[10]、黏弹性边界^[11-12]、多次透射公式^[13]、高 精度人工边界条件^[14-15]均不能精确和高效地模拟该 问题中基岩半空间的辐射阻尼。本文利用平面内波 动问题中外行波是传播方向已知的平面 P 波和 SV 波这一波动特性,提出一种适用于该问题的精确人 工边界条件,应用该条件替代黏性边界,建立 P-SV 波斜入射时成层半空间自由场的一维化时域算 法。

1 人工边界和地震荷载

地震波(平面 P-SV 波)斜入射时成层半空间 波动问题如图 1 所示。水平成层介质位于半空间 上,成层介质表面满足应力为零的自由边界条件,各 层介质交界面处满足位移和应力连续条件。第 j(1…N)层弹性均匀介质的厚度为 h_j ,密度为 ρ_i , λ_i 拉 梅常数为和 G_j 。下部弹性均匀半空间的密度为 ρ , 拉梅常数为 λ 和G。平面 P 波或者 SV 波从半空间 无限远处向右上方倾斜入射,入射角为 θ 。在计算 中,将下部半空间截去,此时第 N 层介质与半空间 的交界面为人工边界,本节建立能够精确模拟下部 半空间辐射阻尼的人工边界条件,给出人工边界处 入射波的等效荷载。

0 <i>x</i>		
第1层 y	$\mathbf{\nabla} \rho_1 \boldsymbol{.} \boldsymbol{\lambda}_1 \boldsymbol{.} \boldsymbol{G}_1$	h_1
第2层	ρ_1, λ_1, G_1	<i>h</i> ₂
1		Ì
第N-1层	$\rho_{N-1}, \lambda_{N-1}, G_{N-1}$	h_{N-1}
第 <i>N</i> 层	ρ_N, λ_N, G_N	h _N
半空间	ρ,λ,G / 人工边界	



Fig. 1 Wave propagation problem in layered half space under seismic wave of oblique incidence.

1.1 精确的人工边界条件

半空间内向无穷远处传播的外行波由平面 P 波和平面 SV 波构成,两者的势函数可以分别表示 为

$$\phi_P^\circ = g_P^\circ(x\sin\theta_P + y\cos\theta_P - c_P t \qquad (1)$$

$$\phi_{\rm S}^{\rm o} = \mathbf{g}_{\rm S}^{\rm o}(\mathbf{x}\sin\,\theta_{\rm S} + \mathbf{y}{\rm cos}\theta_{\rm S} - c_{\rm S}t \qquad (2)$$

其中,上标 o 表示外行波; g_{P}^{s} 和 g_{S}^{s} 为任意波形函数; t 表示时间; $c_{P} = \sqrt{(\lambda + 2G)/\rho} \pi c_{S} = \sqrt{G)/\rho}$ 分别是 P 波波速和 SV 波波速; θ_{P} 和 θ_{S} 分别为 P 波和 SV 波的传播方向与 y 轴的夹角。根据斯奈尔定律, 波 动传播的水平视波速为

$$c_x = \frac{c_{\rm P}}{\sin \theta_{\rm P}} = \frac{c_{\rm S}}{\sin \theta_{\rm S}} \tag{3}$$

当 P 波入射时, $\theta_P = \theta$,可由式(3)确定 θ_s ;当 SV 波 入射时, $\theta_s = \theta$,可由式(3)确定 θ_P 。位移的势函数表 达式为

$$\begin{pmatrix} u_x \\ u_y \end{pmatrix} = \begin{cases} -\frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial x} \end{cases} \phi_{\rm S} + \begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \end{cases} \phi_{\rm P}$$
(4)

对于外行波,将式(1)和(2)代入式(4),得到位移向 量 $u^{\circ} = \{u_x^{\circ} = \{u_y^{\circ}\}^T$ 为

$$\boldsymbol{u}^{\circ} = \begin{bmatrix} -\cos\theta_{\mathrm{S}} & \sin\theta_{\mathrm{P}} \\ \sin\theta_{\mathrm{S}} & \cos\theta_{\mathrm{P}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{g}_{\mathrm{S}}^{\circ'} \\ \boldsymbol{g}_{\mathrm{P}}^{\circ'} \end{bmatrix}$$
(5)

其中,上标撇号表示波形函数的导数。

对式(5)求时间偏导数,得到速度向量为

$$\dot{\boldsymbol{u}}^{\circ} = \begin{bmatrix} -c_{\mathrm{s}}\cos\theta_{\mathrm{s}} & c_{\mathrm{P}}\sin\theta_{\mathrm{P}} \\ -c_{\mathrm{s}}\sin\theta_{\mathrm{s}} & -c_{\mathrm{P}}\cos\theta_{\mathrm{P}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{g}_{\mathrm{s}}^{\circ'} \\ \boldsymbol{g}_{\mathrm{P}}^{\circ''} \end{bmatrix}$$
(6)

其中,变量上方的点号表示时间导数。弹性均匀介 质的应力一位移本构关系为

$$\tau_{xy} = G(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x}) \tag{7a}$$

$$\sigma_{y} = \lambda \frac{\partial u_{x}}{\partial x} + (\lambda + 2G) \frac{\partial u_{y}}{\partial y}$$
(7b)

对于外行波,将位移式(5)代入式(7)得到应力向量 为

$$\boldsymbol{\sigma}^{\circ} = \begin{bmatrix} \sigma^{\circ}_{xy} & \sigma^{\circ}_{y} \end{bmatrix}^{T} \boldsymbol{\mathcal{B}} \\ \boldsymbol{\sigma}^{\circ} = \begin{bmatrix} G(\sin^{2}\theta_{S} - \cos^{2}\theta_{S}) & 2G\sin\theta_{P}\cos\theta_{P} \\ 2G\sin\theta_{S}\cos\theta_{S} & +\lambda 2G\cos^{2}\theta_{P} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g^{\circ^{\circ}}_{S} \\ g^{\circ^{\circ}}_{P} \end{bmatrix}$$
(8)

其中,阻抗矩阵为

$$\boldsymbol{S} = -\begin{bmatrix} G(\sin^2 \theta_{\rm S} - \cos^2 \theta_{\rm S}) & 2G\sin \theta_{\rm P}\cos \theta_{\rm P} \\ 2G\sin \theta_{\rm S}\cos \theta_{\rm S} & +\lambda 2G\cos^2 \theta_{\rm P} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} c_{\rm S}\cos \theta_{\rm S} & -c_{\rm P}\sin \theta_{\rm P} \\ -c_{\rm S}\sin \theta_{\rm S}P - c_{\rm P}\cos \theta_{\rm P} \end{bmatrix}$$
(10)

在人工边界处,式(9)是精确的人工边界条件, 它由边界速度计算半空间作用于成层介质的应力。 有限元计算中,该边界条件可以采用集中离散方式 实现。可以看到,对于不同的人工边界结点,本文边 界条件是空间解耦的;但对于每个结点的两个自由 度,本文边界条件是耦联的,这一点与黏性边界不 同,正是耦联特性保证本文边界条件能够精确地同 时吸收外行 P 波和 SV 波。

1.2 人工边界上的地震荷载

本节给出尚未施加人工边界条件时,入射波在 人工边界处的等效荷载。

1.2.1 平面 P 波入射情况

入射平面 P 波的势函数为

$$\phi_{\rm P}^{\rm i} = g_{\rm P}^{\rm i}(x\sin\theta - y\cos\theta - c_{\rm P}t) \qquad (11)$$

其中,上标 i 表示入射波;gⁱ,是任意波形函数。

对于入射波,将式(11)代入式(4)并求时间导数,得到速度向量 $\dot{u}^{i} = \{\dot{u}^{i}_{x} = \dot{u}^{i}_{y}\}^{T}$ 为

$$\dot{\boldsymbol{u}}^{i} = -c_{\mathrm{P}} \left\{ \frac{\sin \theta}{-\cos \theta} \right\} g_{\mathrm{P}}^{i}$$
(12)

如果规定入射波合速度的正方向与入射波传播方向 一致,则在人工边界和 y 轴交点处已知的入射 P 波 合速度时程可以表示为

 $\dot{u}_{P0}(t) = -c_P g_P^{r}$ (x = 0, y = $\sum_{n=1}^{N} h_n$) (13) 联立式(12)和(13),消去波形函数得

$$\dot{\boldsymbol{u}}^{i} = \begin{cases} \sin \theta \\ -\cos \theta \end{cases} \dot{\boldsymbol{u}}_{P_{0}}(t)$$
(14)

对于入射波,将式(11)代入式(4),然后代入式(7), 得入射波作用下半空间作用于成层介质的应力向量 $\dot{\boldsymbol{\sigma}}^{i} = \{\tau^{i}_{xy} \quad \sigma^{i}_{y}\}^{T}$ 为

$$\dot{\boldsymbol{\sigma}}^{i} = \left\{ \begin{matrix} -2G\sin\theta\cos\theta\\ \lambda + 2G\cos^{2}\theta \end{matrix} \right\} \mathbf{g}_{P}^{r} \quad (\mathbf{x} = 0, \ \mathbf{y} = \sum_{n=1}^{N} \mathbf{h}_{n})$$
(15)

联立式(13)和(15),消去波形函数得

$$\dot{\boldsymbol{u}}^{i} = -\frac{1}{c_{\rm P}} \left\{ \frac{-2G\sin\theta\cos\theta}{\lambda + 2G\cos^{2}\theta} \right\} \dot{\boldsymbol{u}}_{\rm P0}(t) \qquad (16)$$

1.2.2 平面 SV 波入射情况

(9)

入射平面 SV 波的势函数为

$$\phi_{\rm S}^{\rm i} = g_{\rm S}^{\rm i}(x\sin\theta - y\cos\theta - c_{\rm S}t) \qquad (17)$$

其中,上标 i 表示入射波;gs 是任意波形函数。

对于入射波,将式(17)代人式(4)并求时间导数,得到速度向量 $\dot{u}^i = \{\dot{u}_x^i \ \ \dot{u}_y^i\}^T$ 为

$$\dot{\boldsymbol{u}}^{i} = -c_{s} \left\{ \frac{\cos \theta}{\sin \theta} \right\} g_{s}^{i'}$$
(18)

如果规定入射波合速度的正方向为入射波传播方向 顺时针旋转 90°角的方向,则在人工边界和 y 轴交 点处已知的入射 SV 波合速度时程可以表示为

$$\dot{u}_{so}(t) = -c_s g_s^{t}$$
 (x = 0, y = $\sum_{n=1}^{N} h_n$) (19)
联立式(18)和(19),消去波形函数得

$$\dot{\boldsymbol{u}}^{i} = \begin{cases} \cos\theta\\ \sin\theta \end{cases} \dot{\boldsymbol{u}}_{S0}(t) \tag{20}$$

对于入射波,将式(17)代入式(4),然后代入式(7), 得入射波作用下半空间作用于成层介质的应力向量 $\dot{\sigma}^{i} = \{\tau^{i}_{xy} - \sigma^{i}_{y}\}^{T}$ 为

$$\dot{\boldsymbol{\sigma}}^{i} = \left\langle \begin{matrix} -G(\cos\theta - \sin\theta) \\ -2G\sin\theta\cos\theta \end{matrix} \right\rangle g^{\vec{s}}$$

$$(x = 0, y = \sum_{n=1}^{n} h_n)$$
(21)

联立式(19)和(21),消去波形函数得

$$\dot{\boldsymbol{\sigma}}^{i} = \frac{1}{c_{s}} \left\{ \frac{2G(\cos^{2}\theta - \sin^{2}\theta)}{2G\sin\theta\cos\theta} \right\} \dot{\boldsymbol{u}}_{s_{0}}(t) \quad (22)$$

2 有限元结合中心差分的一维化算法

对于半空间上部的 N 层介质,采用矩形四结点 双线性平面应变有限单元进行虚拟网格划分,沿 y轴方向的单元尺寸 Δy 为,沿 x 轴方向的单元尺寸 为 Δx ,时间步长为 x=0 列结点 p 时刻的集中质 量有限元方程为

$$\boldsymbol{M}_{0}\ddot{\boldsymbol{u}}_{0}^{p} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{K}_{0,-1} & \boldsymbol{K}_{0,0} & \boldsymbol{K}_{0,1} \end{bmatrix} \begin{cases} \boldsymbol{u}_{0,-1}^{p} \\ \boldsymbol{u}_{0}^{p} \\ \boldsymbol{u}_{1}^{p} \end{cases} = \boldsymbol{f}_{0}^{p} (23)$$

其中, u_{0}^{α} 是x=0列结点p时刻的位移向量,按照结 点 y坐标增加的顺序存放结点位移,同一结点先x向位移后y向位移; u_{-1}^{α} 和 u_{1}^{α} 分别是 $x=-\Delta x$ 和x= Δx 列结点p时刻的位移向量,自由度的存放顺 序与 u_{0}^{α} 相同; M_{0} 是集中质量矩阵; $K_{0,-1}$ 、 $K_{0,0}$ 和 $K_{0,1}$ 是刚度矩阵; f_{0}^{α} 是结点荷载向量。

人工边界处波场满足叠加原理,可以分解为外 行波场和入射波场,x=0处人工边界结点的荷载和 速度可以分别写为

$$f^{p}_{0,N-1} = (\sigma^{o,p} + \sigma^{i,p})\Delta x \qquad (24)$$

$$\dot{u}_{0,N-1}^{p} = \dot{u}^{o,p} + \dot{u}^{i,p}$$
 (25)

其中, $f_{\ell,N-1}^{o}$ 和 $\dot{u}_{\ell,N-1}^{o}$ 分别是 f_{ℓ}^{o} 和 \dot{u}_{ℓ}^{o} 中第 N+1 个 结点的荷载和速度向量; $\sigma^{o,p}$ 、 $\dot{u}^{o,p}$ 、 $\sigma^{i,p}$ 和 $\dot{u}^{i,p}$ 分别是 σ^{o} 、 \dot{u}^{o} 、 σ^{i} 和 \dot{u}^{i} 在p时刻的值。将式(25)中 $\dot{u}^{o,p}$ 代入 式(9),然后代入式(24),最后代入式(23),整理得到

$$\boldsymbol{M}_{0}\ddot{\boldsymbol{u}}_{0}^{p} + \boldsymbol{C}_{0}\dot{\boldsymbol{u}}_{0}^{p} + [\boldsymbol{K}_{0,-1} \quad \boldsymbol{K}_{0,0} \quad \boldsymbol{K}_{0,1}] \left\{ \begin{matrix} \boldsymbol{u}_{-1}^{p} \\ \boldsymbol{u}_{0}^{p} \\ \boldsymbol{u}_{1}^{p} \end{matrix} \right\} = \boldsymbol{F}_{0}^{p}$$
(26)

$$C_{0} = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & \Delta x S \end{bmatrix}$$
(27)
$$F_{0}^{p} = \int_{0}^{0} \vdots$$
(28)

$$\mathbf{F}_{0}^{p} = \begin{cases} 0 \\ \Delta x(\mathbf{S} \mathbf{u}^{i,p} + \sigma^{i,p}) \end{cases}$$
(28)

其中,*S*、*u*^{*i*,*v*}和*σ*^{*i*,*v*}分别由式(10)、式(14)(或者式 (20))和式(16)(或者式(22))给定。

时间导数的中心差分公式为

$$\ddot{\boldsymbol{u}}_{0}^{p} = \frac{\boldsymbol{u}_{0}^{p-1} - 2\boldsymbol{u}_{0}^{p} + \boldsymbol{u}_{0}^{p-1}}{\Delta t}$$
(29)

$$\mathbf{u}_{0}^{p} = \frac{\mathbf{u}_{0}^{p-1} - 2\mathbf{u}_{0}^{p} + \mathbf{u}_{0}^{p-1}}{\Delta t}$$
(30)

成层半空间中的平面波服从斯奈尔定律,即全 部平面波的水平方向视波速相等。如果取水平方向 的有限元尺寸 Δx 等于时间步长 Δt 与水平视波速 c_x 的乘积,即 $\Delta x = c_x \Delta t$ 。则根据斯奈尔定律,x=0列结点 p+1时刻的位移可以用 $x = -\Delta x$ 列结点 p时刻的位移表示,x=0 列结点 p-1时刻的位移可 以用 $x = \Delta x$ 列结点 p 时刻的位移表示,即

$$\boldsymbol{u}_{-1}^{p} = \boldsymbol{u}_{0}^{p+1} \tag{31}$$

$$\boldsymbol{u}_{1}^{p} = \boldsymbol{u}_{0}^{p-1} \tag{32}$$

这样,空间二维问题能够被转化为简单的空间一维问题。将式(29)~(32)代入式(26),整理得到 *x*=0 列结点从前两时刻位移递推当前时刻位移的线性代数方程组

$$\left(\frac{\boldsymbol{M}_{0}}{\Delta t^{2}}+\frac{\boldsymbol{C}_{0}}{2\Delta t}+\boldsymbol{K}_{0,-1}\right)\boldsymbol{u} \, b^{p+1} = \boldsymbol{F}_{0}^{p}+\left(\frac{2\boldsymbol{M}_{0}}{\Delta t^{2}}+\boldsymbol{K}_{0,0}\right)\boldsymbol{u}_{0}^{p}-\left(\frac{\boldsymbol{M}_{0}}{\Delta t^{2}}-\frac{\boldsymbol{C}_{0}}{2\Delta t}+\boldsymbol{K}_{0,-1}\right)\boldsymbol{u} \, b^{p-1}$$
(33)

式(33)的初始值为

$$\boldsymbol{u}_0^{-1} = \boldsymbol{u}_0^0 = 0 \tag{34}$$

逐个时刻的求解式(33),可以得到自由波场中竖向 一列结点的运动。根据波动水平方向视速度相等的 特点,可以方便地确定整个空间的自由波场。

竖直方向有限元尺寸 Δy 应满足波动精度要求。确定时间步长 Δt 的数值稳定性条件,以及方法的精度分析见文献^[7-9]。

3 数值算例

为了验证本文改进方法的精度和有效性,分析 半空间基岩表面覆盖单层土问题,该算例也见文献 [9]的 3.8 节。土层厚度为 50 m,质量密度为1 000 kg/m³,P 波波速为 346 m/s,SV 波波速为 200 m/s。基岩的质量密度为 1 500 kg/m³,P 波波速为 866 m/s,SV 波波速为 500 m/s,人工边界截去地表 深度 100 m 以下的基岩,即保留厚度 50 m 的基岩 作为有限元区域。在人工边界和 y 轴交点处入射波 位移时程如图 2 所示。深度方向的空间步距为 5 m,满足数值稳定性条件的时间步长为 0.005 s。



Fig. 2 Time history of displacement of incident wave.

首先研究平面 P 波斜入射情况。文献[7,9]的 研究表明,入射角越大,应用黏性边界的自由场算法 的精度越低,限于篇幅,本文仅研究 60°角大角度入 射的情况。图 3 给出 P 波 60°角入射时地表(坐标 原点)的位移时程结果,其中理论解是采用频域传递 矩阵法^[5]结合快速傅里叶变换得到的。为了更清楚 地观察本文方法相对于刘晶波一王艳(Liu-Wang) 方法^[7-9]的改进效果,图 3 也给出了两种方法计算结 果相对于理论解的误差,即每种方法结果与理论解 的差的绝对值。可以看到,新方法的计算结果与理 论解吻合良好,而 Liu-Wang 方法的计算误差相对 较大,说明本文人工边界条件能够进一步提高 P 波 大角度入射时平面内自由场一维化时域算法的精 度。

当平面 SV 波斜入射时,本文仅考虑入射角小 于临界角的情况,即自由波场中仅含有均匀平面波 的情况。与 P 波入射类似,本文研究 SV 波 30°角入 射的情况。图 4 给 SV 波 30°角入射时地表(坐标原 点)的位移时程结果,其中理论解同样是采用频域传 递矩阵法^[5]结合快速傅里叶变换得到。图 4 也给出 了本文新方法计算结果和 Liu-Wang 方法^[8-9]计算 结果相对于理论解的误差。可以看到,新方法的计 算结果与理论解吻合良好,而 Liu-Wang 方法的计 算误差相对较大,说明本文人工边界条件能够进一 步提高 SV 波大角度入射时平面内自由场一维化时 域算法的精度。



图 3 P波 60°角入射时地表位移时程 Fig. 3 Time history of displacement on ground surface under P wave of 60° angle incidence.

4 结语

刘晶波和王艳[69]建立了一种在时域内计算地



图 4 SV 波 30°角入射时地表位移时程 Fig. 4 Time history of displacement on ground surface under SV wave of 30° angle incidence.

震波斜入射时成层半空间瞬态自由场的数值方法。 本文对该方法进行了改进,提出一种新的精确人工 边界条件替代黏性边界,解决了平面 P-SV 波大角 度入射时由于底部吸收边界条件精度低而导致整套 自由场时域算法精度降低的问题。本文考虑自由波 场中仅含有均匀平面波的情况,自由波场中含有非 均匀平面波和面波的波动问题有待深入研究。

[参考文献]

- Wolf J P. Dynamic Soil Structure Interaction [M]. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1985.
- [2] 徐海滨,杜修力,赵密,等. 地震波斜入射对高拱坝地震反应 的影响[J]. 水力发电学报,2011,30(6):159-165.
 XU Hai-bin, DU Xiu-li, ZHAO Mi, et al. Effect of Oblique Incidence of Seismic Waves on Seismic Responses of High Arch Dam[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011, 30(6): 159-165.
- [3] 苑举卫, 杜成斌, 刘志明. 地震波斜入射条件下重力坝动力响 应分析[J]. 振动与冲击, 2011, 30(7): 120-126.
 YUAN Wei-ju, DU Chen-bin, LIU Zhi-ming. Time-domain Seismic Response for Gravity Dam to Obliquely Incident and Seismic Waves[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30 (7): 120-126.
- [4] 郜新军,赵成刚,刘秦.地震波斜入射下考虑局部地形影响和 土结动力相互作用的多跨桥动力响应分析[J].工程力学, 2011,28(11):237-243.

GAO Xin-jun, ZHAO Cheng-gang, LIU Qin. Seismic Response Analysis of Multi-span Viaduct Considering Topographic Effect and Soil-structure Dynamic Interaction Based on Inclined Wave[J]. Engineering Mechanics, 2011, 28 (11): 237-243.

- [5] 傅淑芳,刘宝诚. 地震学教程[M]. 北京: 地震出版社, 1991.
 FU Shu-fang, LIU Bao-cheng, Seismology Tutoria[M]l. Beijing: Seismic Press, 1991.
- [6] 刘晶波, 王艳. 成层半空间出平面自由波场的一维化时域算法[J]. 力学学报, 2006, 38(2): 219-225.
 LIU Jing-bo, WANG Yan. A 1-D Time-domain Method for 2-D Wave Motion in Elastic Layered Half-space by Antiplane Wave Oblique Incidence[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2006, 38(2): 219-225.
- [7] 刘晶波, 王艳. 成层介质中平面内自由波场的一维化时域算法[J]. 工程力学, 2007, 24(7): 16-22.
 LIU Jing-bo, WANG Yan. A 1D Time-domain Method for Inplane Wave Motion of Free Field in Layered Media[J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(7):16-22.
- [8] LIU Jing-bo, WANG Yan. A 1D Time-domain Method for inplane Wave Motions in A Layered Half-space[J]. Acta Mechanica Sinica, 2007,23:673-680.
- [9] 王艳.非一致地震动场数值方法研究及在结构动力分析中的 应用[D].北京:清华大学,2007.

WANG Yan. Research on the Numerical Method for Asynchronous Seismic Wave Motions and Its Application in Dynamic Analysis of Structures[D]. Beijing: Tsinghua University, 2007.

- [10] Lysmer J, Kulemeyer R. Finite Dynamic Model for Infinite Media[J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 1969, 95: 759-877.
- [11] LIU Jing-bo, LÜ Yan-dong. A Direct Method for Analysis of Dynamic Soil-structure Interaction Based on Interface Idea [A]// Proceedings of the Chinese-Swiss Workshop on Dynamic Soil-Structure Interaction[C]. Beijing: International Academic Publishers, 1997.
- [12] 杜修力,赵密,王进廷. 近场波动模拟的人工应力边界条件
 [J]. 力学学报,2006,38(1):49-56.
 DU Xiu-li, ZHAO Mi, WANG Jin-ting. A Stress Artificial Boundary in FEA for Near-field Wave Problem[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2006, 38(1): 49-56.
- [13] 廖振鹏.工程波动理论导论(第二版)[M].北京:科学出版 社,2002.
 LIAO Zhen-peng. Introduction to Wave Motion Theories for Engineering (Second Edition) [M]. Beijing; Science Press,

2002.

- [14] DU Xiu-li, ZHAO Mi. A local Time-domain Transmitting Boundary for Simulating Cylindrical Elastic Wave Propagation in Infinite Media[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2010, 30(10): 937-946.
- [15] ZHAO Mi, DU Xiu-li, LIU Jing-bo, et al. Explicit Finite Element Artificial Boundary Scheme for Transient Scalar Waves in Two-dimensional Unbounded Waveguide[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2011, 87 (11), 1074-1104.

(上接 68 页)

[11] 江义,杨迪雄,李刚. 近断层地震动向前方向性效应和滑冲 效应对高层钢结构地震反应的影响[J]. 建筑结构学报, 2010,31(9);103-110.

JIANG Yi, YANG Di-xiong, LI Gang. Effects of Forward Directivity and Fling Step of Near-fault Ground Motions on Seismic Responses of High-rise Steel Structure[J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(9): 103-110.

- [12] 张鹏,陈新民,王旭东. 近断层地震动与汶川地震灾区滑坡 破坏特征分析[J]. 南京工业大学学报,2009,31(1):55-59. ZHANG Peng, CHEN Xin-in, WANG Xun-dong. Analysis of Near-fault Ground Motion and Seismic Landslide Failure Mode in Wenchuan Earthquake[J]. Journal of Najing University of Technology, 2009, 31(1):55-59.
- [13] 哀一凡,孙柏海. 汶川 8.0 级地震工程震害概览[J]. 地震工程与工程振动, 2008, 28(增刊): 1-118.
 YUAN Yi-fan, SUN Bai-tao. General Introduction of Engineering Damage of Wenchuan M_S 8.0 Earthquake[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2008, 28

(Supp): 1-118.

- Idriss I M, Seed H B. Seismic Response of Horizontal Soil Layers[J]]. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 1968, 94(SM4): 1003-1029.
- [15] 刘波,韩彦辉. FLAC 原理、实例与应用指南[M]. 北京:人民交通出版社,2005.
 LIU Bo, HAN Yan-hui. FLAC Principle Instanxes and Application Guide[M]. Beijing, China Communication Press, 2005.
- [16] 刁桂苓,徐锡伟,陈于高,等. 汶川 Mw7.9 和集集 Mw7.6 地震前应力场转换现象及其可能的前兆意义[J]. 地球物理 学报, 2011, 1(54): 128-136.
 DIAO Gui-ling, XU Xi-wei, CHEN Yue-gao, et al. The Precursory Significance of Tectonic Stress Field Transformation before the Wenchuan Mw7.9 Earthquake and the Chi-Chi Mw7.6 Earthquake [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 1(54): 128-136.