

文章编号: 1673-5196(2015)06-0114-06

层状饱和多孔介质中弹性波场的数值模拟

周凤玺^{1,2}, 赵王刚^{1,2}, 曹永春^{1,2}

(1. 兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 兰州理工大学 西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 基于 Biot 介质理论, 对层状饱和多孔介质中弹性波的传播进行数值模拟. 通过双相饱和和多孔介质的一阶双曲型速度-应力弹性波场分离方程, 采用交错网格高阶有限差分法实现 P-S 波在层状饱和介质中的高精度数值模拟, 并利用完全匹配层(PML)吸收边界来处理边界反射问题, 取得较好的效果. 模拟实例表明, 该方法具有很好的稳定性和较高的精度, 能够成功地将非均匀介质中的 P 波波场和 S 波波场从混合波场中分离出来, 但由于饱和多孔介质中快纵波和慢纵波相互伴生, 此方法无法实现两类纵波的分离.

关键词: 层状介质; 饱和土; 交错网格; 完全匹配吸收层

中图分类号: TU435; O342 **文献标识码:** A

Numeric simulation of elastic wave field in layered saturated porous medium

ZHOU Feng-xi^{1,2}, ZHAO Wang-gang^{1,2}, CAO Yong-chun^{1,2}

(1. College of Civil Engineering, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050; 2. Western Engineering Research Center of Disaster Prevention and Mitigation in Civil Engineering, The Ministry of Education, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China)

Abstract: Based on the Biot's theory, the propagation of elastic wave in layered saturated porous medium is numerically simulated. High-precision numerical simulation of P-S wave in layered saturated medium is implemented with first-order hyperbolic separative equation for velocity-stress elastic wave field in biphasic saturated porous medium and high-order staggered-grid finite-difference method. The absorbing boundary of perfectly matched layer (PML) is employed to deal with the problem of boundary reflection, so that a better result is achieved. The numerical results show that this method manifests very good stability and higher accuracy and can be used to separate the P wave field and S wave field in a heterogeneous medium from the hybrid wave field successfully. However, because of the association of fast longitudinal wave with slow longitudinal wave in saturated porous medium, the separation of these two longitudinal waves cannot be obtained by this method.

Key words: layered medium; saturated soil; staggered grid; perfectly matched absorbing layer

由于每一种波都含有波源介质和传播介质的物理特性信息, 因此研究波传播问题具有重要的理论实践意义和学术价值. 饱和土中波的传播问题是岩土工程、地震工程和地球物理等学科领域的一个重要课题. 由于饱和土是由流固两相组成的多孔介质, 与一般的弹性介质相比, 其中波的传播问题要复杂的多. Biot^[1-2] 将连续介质力学应用于流体饱和和多孔介质中, 分别考虑流体和固体骨架的应力应变及其

运动, 并考虑了两相之间复杂的惯性和黏性耦合作用. Biot 理论成功预言了在宏观各向同性均匀多孔介质中, 一般存在 2 种压缩波和 1 种剪切波, 3 种波均是弥散、衰减波. 有限差分是常用的一种波场数值模拟方法^[3-4], Alterman 和 Karal^[5] 首先将有限差分法应用于层状介质弹性波传播的数值模拟中, 此后 Boore^[6] 将有限差分法用于波在非均匀介质中的传播模拟. 其中交错网格有限差分算运用广泛, 有较高的精度和稳定性, 能高效地反映介质中波场的传播规律. 中外有很多学者对其进行了研究发展. R. Madariaga^[7] 应用交错网格模拟弹性介质中圆形扩展破裂产生的波动, Virieux^[8] 采用二阶时间精度、二阶空间精度, 对各向同性介质中的 SH 波和 P-SV

收稿日期: 2014-09-31

基金项目: 国家自然科学基金(11162008, 51368038), 甘肃省高等学校基本科研业务费专项(1104ZTC140), 甘肃省环保厅科研基金(GSEP-2014-23)

作者简介: 周凤玺(1979-), 男, 甘肃会宁人, 博士, 教授, 博导.

波进行了模拟研究,在精度和计算效率方面都取得了较好的效果.此后 Crase^[9] 又将这一方法运用到求解二阶弹性波方程中.董良国等^[10-12] 给出了一阶交错网格高阶差分解法,并详细讨论了其稳定性条件.陈可洋^[13] 从固流相的混合弹性波场中分离出纯纵波波场和纯横波波场.李振春等^[14] 推出满足此条件的一阶速度-应力弹性波场分离方程,并利用交错网格有限差分法对波场分离方程进行数值模拟.目前对双相介质的波场分离数值模拟大多针对各向同性或横观各向同性的均匀介质,而关于非均匀饱和多孔介质中波场的模拟研究较少.

本文研究基于双相饱和多孔介质的一阶速度-应力弹性波波场分离方程,通过对固流相任一分量的波场正演递推算子进行分裂运算,得到了任一分量各自的纯纵波和纯横波波场,并通过构建高精度正演算子和高效的完全匹配层(PML)吸收边界条件提高数值模拟结果的信噪比,从而得到层状非均匀饱和多孔介质中清晰的波场特征信息.

1 饱和多孔介质模型

基于 Biot 多孔介质理论,均匀饱和多孔介质的基本方程为

运动平衡方程

$$\sigma_{ij,j} = \rho \ddot{u}_i + \rho_f \ddot{U}_i \quad (1)$$

$$-p_i = \rho_i \ddot{u}_i + m \ddot{U}_i + b \dot{U}_i \quad (2)$$

几何方程

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (3)$$

物理方程

$$\sigma_{ij} = 2\mu \epsilon_{ij} + (\lambda e - \alpha p) \delta_{ij} \quad (4)$$

$$p = -M \alpha e + M \zeta \quad (5)$$

式中: σ_{ij} 和 p 为饱和多孔介质的总应力分量和孔隙流体压力 ($i, j = 1, 2, 3$); u_i 和 U_i 表示固体骨架位移和流体的相对位移; $e = u_{i,i}$; $\zeta = -w_{i,i}$; λ 和 μ 为固体骨架 Lamé 弹性常数; ϵ_{ij} 表示固体骨架的应变; $b = \eta/k_f$; η 为流体黏滞系数; k_f 表示渗透系数; $m = \rho_f/\varphi$ 表示与孔隙水的质量密度及孔隙几何特征有关的参数; $\rho = (1-\varphi)\rho_s + \varphi\rho_f$ 为混合物质的质量密度,其中 φ 为孔隙率, ρ_s 和 ρ_f 分别为固相和液相的密度; α 和 M 为考虑二相材料压缩性的 Biot 参数, $\alpha = 1 - K/K_s$, $1/M = (\alpha - \varphi)/K_s + \varphi/K_f$, 其中 K 、 K_s 和 K_f 分别为固体骨架、固体颗粒和孔隙流体的体积模量.

当波在二维饱和多孔介质中传播时,基本方程

可改写为如下形式^[15]

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = A \frac{\partial Q}{\partial x} + B \frac{\partial Q}{\partial z} + CQ \quad (6)$$

式中:

$$Q = [v_x \quad V_z \quad v_x \quad V_z \quad \sigma_{xx} \quad \sigma_{xz} \quad \sigma_{zz} \quad p]^T$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & R_2 & 0 & 0 & R_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ R_5 & 0 & R_{10} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ R_7 & 0 & R_{10} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ R_8 & 0 & R_9 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_2 & R_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_6 \\ 0 & R_7 & 0 & R_{10} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ R_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_5 & 0 & R_{10} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_8 & 0 & R_9 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} R_1 & 0 & R_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_1 & 0 & R_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ R_4 & 0 & R_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_4 & 0 & R_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

其中, $v_x = \partial u_x/\partial t$; $v_z = \partial u_z/\partial t$; $V_x = \partial U_x/\partial t$; $V_z = \partial U_z/\partial t$ 表示固相和液相的速度分量; $R_1 = b\varphi^2/(\varphi\rho_f^2 - \rho)$; $R_2 = 1/(\varphi - 1)\rho_s$; $R_3 = \varphi/(\varphi\rho_f^2 - \rho)$; $R_4 = b\varphi/\rho_f$; $R_5 = M\alpha^2 - M\alpha\varphi + \lambda + 2\mu$; $R_6 = -1/\rho_f$; $R_7 = M\alpha^2 - M\alpha\varphi + \lambda$; $R_8 = M\varphi - M\alpha$; $R_9 = M\varphi$; $R_{10} = M\alpha\varphi$; $R_{11} = \mu$; $R_{12} = -R_{12}$; $R_{13} = -R_{13}$.

2 饱和土波动方程完全匹配层差分格式

以完全匹配层为人工边界进行交错网格差分,要建立模拟区域和完全匹配层的差分格式.首先将一阶应力-速度波动方程的波场分为与 x 方向有关和与 z 方向有关的分量^[16]:

$$v_x = v_{x,x} + v_{z,x}, \quad v_z = v_{x,z} + v_{z,z} \quad (7)$$

$$V_x = V_{x,x} + V_{z,x}, \quad V_z = V_{x,z} + V_{z,z} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \sigma_{xx} = \sigma_{x,xx} + \sigma_{z,xx} \\ \sigma_{zz} = \sigma_{x,zz} + \sigma_{z,zz} \\ \sigma_{xz} = \sigma_{x,xz} + \sigma_{z,xz} \end{cases} \quad (9)$$

$$p = p_x + p_z \quad (10)$$

利用高阶交错网格有限差分法对式(6)进行差分离散,得到

$$v_{m+,x}(i+,j) = v_{m-,x}(i+,j) + \Delta t [R_2 D_{\Delta x} \sigma_{n,xx}(i,j) + R_3 D_{\Delta x} p_n(i,j)] \quad (11a)$$

$$v_{m+,x}(i+,j) = v_{m-,x}(i+,j) + \Delta t [R_2 D_{\Delta z} \sigma_{n,xz}(i+,j+)] \quad (11b)$$

$$v_{m+,z}(i,j+) = v_{m-,z}(i,j+) + \Delta t [R_2 D_{\Delta x} \sigma_{n,xz}(i+,j+)] \quad (11c)$$

$$v_{m+,z}(i,j+) = v_{m-,z}(i,j+) + \Delta t [R_3 D_{\Delta z} \sigma_{n,zz}(i,j) + R_2 D_{\Delta z} p_n(i,j)] \quad (11d)$$

$$V_{m+,x}(i+,j) = V_{m-,x}(i+,j) + \Delta t [R_6 D_{\Delta x} p_n(i,j)] \quad (12a)$$

$$V_{m+,x}(i+,j) = V_{m-,x}(i+,j) \quad (12b)$$

$$V_{m+,z}(i,j+) = V_{m-,z}(i,j+) \quad (12c)$$

$$V_{m+,z}(i,j+) = V_{m-,z}(i,j+) + \Delta t [R_6 D_{\Delta z} p_n(i,j)] \quad (12d)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{m+1,xx}(i,j) &= \sigma_{m,xx}(i,j) + \Delta t [R_5 D_{\Delta x} v_{n+,x}(i+,j) + R_{10} D_{\Delta x} V_{n+,x}(i+,j)] \end{aligned} \quad (13a)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{m+1,xx}(i,j) &= \sigma_{m,xx}(i,j) + \Delta t [R_7 D_{\Delta z} v_{n+,z}(i,j+) + R_{10} D_{\Delta z} V_{n+,z}(i,j+)] \end{aligned} \quad (13b)$$

$$\sigma_{m+1,xz}(i+,j+) = \sigma_{m,xz}(i+,j+) + \Delta t [R_{11} D_{\Delta x} v_{n+,z}(i,j+)] \quad (14a)$$

$$\sigma_{m+1,xz}(i+,j+) = \sigma_{m,xz}(i+,j+) + \Delta t [R_{11} D_{\Delta z} v_{n+,x}(i+,j)] \quad (14b)$$

$$\sigma_{m+1,zz}(i,j) = \sigma_{m,zz}(i,j) + \Delta t [R_7 D_{\Delta x} v_{n+,x}(i+,j) + R_{10} D_{\Delta x} V_{n+,x}(i+,j)] \quad (15a)$$

$$\sigma_{m+1,zz}(i,j) = \sigma_{m,zz}(i,j) + \Delta t [R_5 D_{\Delta z} v_{n+,z}(i,j+) + R_{10} D_{\Delta z} V_{n+,z}(i,j+)] \quad (15b)$$

$$p_{m+1}(i,j) = p_m(i,j) + \Delta t [R_8 D_{\Delta x} v_{n+,x}(i+,j) - R_9 D_{\Delta x} V_{n+,x}(i+,j)] \quad (16a)$$

$$p_{m+1}(i,j) = p_m(i,j) + \Delta t [R_8 D_{\Delta z} v_{n+,z}(i,j+) - R_9 D_{\Delta z} V_{n+,z}(i,j+)] \quad (16b)$$

式中: Δt 为时间步长; n 表示时间上的离散点; i 表示 x 方向上的离散点; j 表示 z 方向上的离散点; $v^{n+}(i,j) = v(x,z,t + \Delta t/2)$; $v^{n-}(i,j) = v(x,z,t - \Delta t/2)$; $v^{n+1}(i,j) = v(x,z,t + \Delta t)$; $i+ = (i+1)\Delta x$, $j+ = (j+1)\Delta z$; $D_{\Delta x}$ 和 $D_{\Delta z}$ 是空间求导算子。

$D_{\Delta x}$ 和 $D_{\Delta z}$ 分别代表了对 x 和 z 的导数, 比如

$$D_{\Delta x} \sigma_{n,xx}(i,j) = \{C_1 [\sigma_{n,xx}(i,j) - \sigma_{n,xx}(i-1,j)] +$$

$$C_2 [\sigma_{n,xx}(i+1,j) - \sigma_{n,xx}(i-2,j)]\} / (\Delta x)$$

其中, C_1 取 $\frac{9}{8}$; C_2 取 $-\frac{1}{24}$; 其余同理。

3 震源、稳定性条件和边界条件

震源子波选用 Richer 子波, 即 $R(t) = [1 - 2(\pi f_0 t)^2] \exp[-(\pi f_0 t)^2]$ 。式中 f_0 表示子波的主频; t 为子波长度, 最小相位子波函数符合实际地震激发的子波函数。

采用二阶时间精度、四阶空间精度时, 通过平面谐波分析, 可以得出一阶弹性波方程交错网格稳定性条件如下。

$$\Delta t \sqrt{\frac{V_p}{\Delta x^2} + \frac{V_s}{\Delta z^2}} \leq \frac{6}{7} \quad (17)$$

由式(17)可以看出, 稳定性条件与泊松比无关, 因此一阶弹性波方程交错网格高阶有限差分数值解法对于任意泊松比介质都是稳定的。该稳定性条件适用于二维各向同性介质中的空间四阶、时间二阶有限差分, 能有效地避免在差分计算过程中由于数值参数选择不合理而造成的数据溢出及网格频散^[7-9]。

由于用计算机进行波动方程数值模拟时, 只能在有限区域内进行, 因此在有限计算区域内实现无限区域的波动特性, 除了地表是自由边界外, 其它边界都要设置人工边界。边界上会出现无实际意义的反射, 严重干扰波动传播特性。因此, 加入吸收边界条件也是数值模拟中必须解决的主要问题之一。

4 数值模拟

4.1 单层均匀各向同性介质模型

模型网格点数为 600×600 , 网格大小为 $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ 。完全匹配吸收层取 50 个网格, 时间步长为 0.25 ms, 震源位于 (300, 300) 处, 纵波激发, Richer 子波频率为 30 Hz, 采用的材料参数^[15]为 $M = 2.13 \times 10^9 \text{ N/m}^2$, $\alpha = 1.53$, $\lambda = 9.97 \times 10^9 \text{ N/m}^2$, $\mu = 6.84 \times 10^9 \text{ N/m}^2$, $\rho_t = 273 \text{ kg/m}^3$, $\rho_s = 3445 \text{ kg/m}^3$, $\rho = 2195 \text{ kg/m}^3$, $\varphi = 0.3942$, $b = 0$ 。

由图 1、图 2 中的波场快照和数值模拟记录可知, 当不加边界条件, 在 0.1 s 时, 流相和固相波场中图像比较清晰, 都产生了快纵波和慢纵波, 且慢纵波振幅比快纵波明显; 在 0.3 s 时, 流相和固相中图像模糊不清, 这是由于弹性波传播到四周边界处, 产生严重的人为边界反射引起的, 影响了波场模拟结果, 达不到模拟的效果。

由图 3、图 4 的波场快照和数值模拟记录可知,

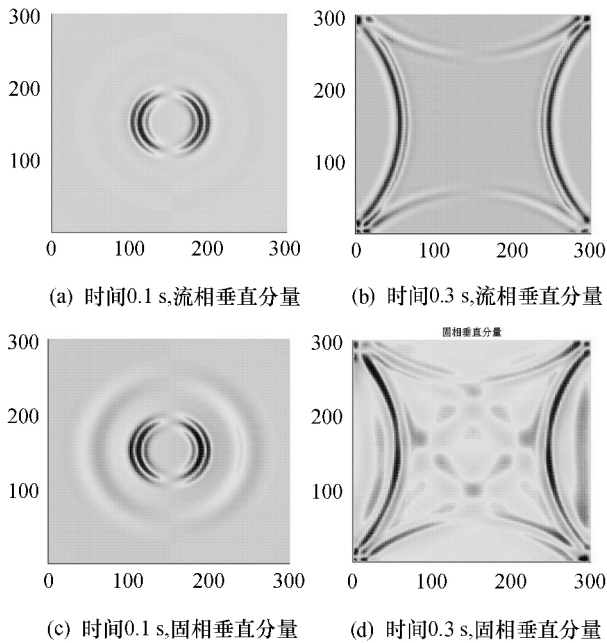


图 1 无吸收边界条件时,流相和固相垂直分量的弹性波波场快照 (m)

Fig. 1 Snapshots of elastic wave field of vertical component of fluid phase and solid phase without absorbing boundary conditions (m)

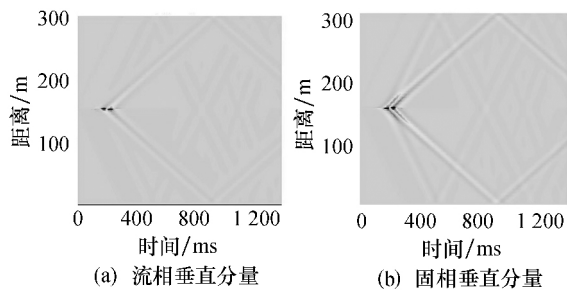


图 2 无吸收边界条件时,流相和固相垂直分量的弹性波波场数值模拟

Fig. 2 Numeric simulation of elastic wave field of vertical component of fluid phase and solid phase without absorbing boundary conditions

加入边界后,在 0.1 s 时,流相和固相波场中图像比较清晰,同样产生了快纵波和慢纵波,且慢纵波振幅比快纵波明显;在 0.3 s 时,流相和固相波场中图像也很清晰,这是因为当弹性波传播到四周边界处时,边界反射被有效地吸收,波场快照和数值模拟记录结果没有受到反射波的干扰,使得图像清晰,可以达到模拟效果.由此单层模型模拟结果还可得到,根据一阶速度-应力弹性波波场分离方程,采用交错网格高阶有限差分法数值模拟时,模拟区域波速频散较弱,精度较高;在流相和固相波场中存在 2 类纵波,即快纵波和慢纵波,可知快慢纵波均归属于纵波这一大类,这两种波相互伴生.

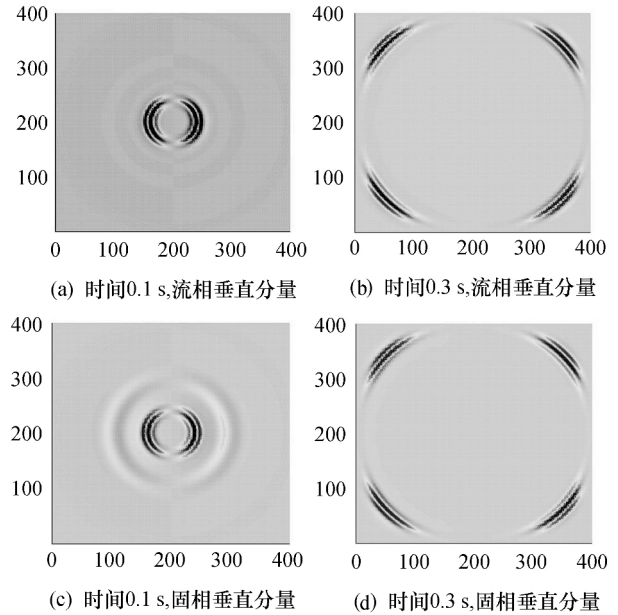


图 3 有吸收边界条件时,流相和固相垂直分量的弹性波波场快照 (m)

Fig. 3 Snapshot of elastic wave field of vertical component of fluid phase and solid phase with absorbing boundary condition (m)

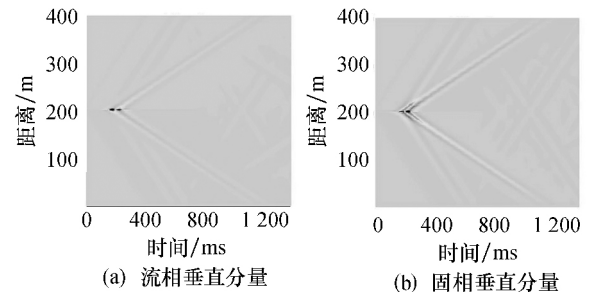


图 4 有吸收边界条件,流相和固相垂直分量弹性波波场数值模拟

Fig. 4 Numeric simulation of elastic wave field of vertical component of fluid phase and solid phase with absorbing boundary conditions

4.2 多层均匀各向同性介质模型

本文模型进行 3 层各向同性介质的波场模拟,网格点数为 $2\ 000 \times 1\ 500$,网格大小为 $5\text{ m} \times 5\text{ m}$,完全匹配吸收层取 50 个网格,时间步长为 0.5 ms,震源位于 (1 000, 1 200) 处,纵波激发,Richer 子波频率为 30 Hz,采用的材料参数如下.

上层 1~150; $M = 2.13 \times 10^8\text{ N/m}^2$; $\alpha = 1.53$; $\lambda = 9.97 \times 10^8\text{ N/m}^2$; $\mu = 6.84 \times 10^9\text{ N/m}^2$; $\rho_f = 1\ 000\text{ kg/m}^3$; $\rho_s = 1\ 560\text{ kg/m}^3$; $\rho = 1\ 560\text{ kg/m}^3$; $\varphi = 0.3942$; $b = 1$.

中层 151~250; $M = 2.13 \times 10^9\text{ N/m}^2$; $\alpha = 1.53$; $\lambda = 9.97 \times 10^9\text{ N/m}^2$; $\mu = 6.84 \times 10^9\text{ N/m}^2$; ρ_f

$= 273 \text{ kg/m}^3; \rho_s = 3\,445 \text{ kg/m}^3; \rho = 2\,195 \text{ kg/m}^3; \varphi = 0.394\,2; b = 0.$

下层 251 ~ 400: $M = 2.13 \times 10^9 \text{ N/m}^2; \alpha = 1.53; \lambda = 9.97 \times 10^9 \text{ N/m}^2; \mu = 6.84 \times 10^9 \text{ N/m}^2; \rho_f = 273 \text{ kg/m}^3; \rho_s = 3\,445 \text{ kg/m}^3; \rho = 1\,396 \text{ kg/m}^3; \varphi = 0.394\,2; b = 0.$

上层介质的快纵波相速度为 3 481.9 m/s,慢纵波相速度为 287 m/s,横波相速度为 2 376.8 m/s.中间层介质的快纵波相速度为 3 554.2 m/s,慢纵波相速度为 917.6 m/s,横波相速度为 1 902.3 m/s.下层介质的快纵波相速度为 1 421.3 m/s,慢纵波相速度为 533.5 m/s,横波相速度为 826.3 m/s.

由图 5、图 6 可知,弹性波在震源(1 000,1 200)处产生了快纵波 $P_{f,d}$ 和慢纵波 $P_{s,d}$,经过分界面的透射和反射,当 $t=0.2 \text{ s}$ 时,由快纵波 $P_{f,d}$ 波在分界面处引起的反射快纵波 $P_{f,d}P_{f,d}$ 和透射快纵波 $P_{f,d}P_{f,m}$;当 $t=0.25 \text{ s}$ 时,由快纵波 $P_{f,d}$ 波在分界面处又引起的反射横波 $P_{f,d}S_d$ 和透射横波 $P_{f,d}S_m$;接着在 $t=0.3 \text{ s}$ 时,由快纵波 $P_{f,d}$ 波在分界面处又引起反射慢纵波 $P_{f,d}P_{s,d}$ 和透射慢纵波 $P_{f,d}P_{s,m}$,在上中层分界面处又产生反射快纵波 $P_{f,d}P_{f,m}P_{f,m}$ 和透射快纵波 $P_{f,d}P_{f,m}P_{f,u}$;在 $t=0.35 \text{ s}$ 时,慢纵波 $P_{s,d}$ 在分界面处,引起的反射快纵波 $P_{s,d}P_{f,d}$ 、反射慢纵波 $P_{s,d}P_{s,d}$ 和横波 $P_{s,d}S_d$.分析对照波场快照和数值模拟记录还可以得到,对于多层饱和多孔介质,不同的材料参数引起不同波速的快慢纵波,每层界面处又会产生反射和透射.这样,在固相波场中包含了大

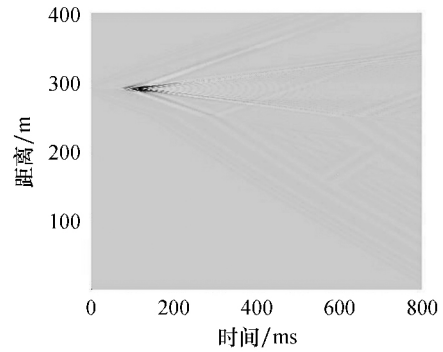


图 6 有吸收边界条件,固相垂直分量弹性波波场数值模拟记录

Fig. 6 Numeric simulation of elastic wave field of solid-phase vertical component with absorbing boundary conditions

量复杂的波型,当采用完全匹配层吸收边界,并利用交错网格高阶有限差分法时,在四周边界处弹性波都得到很好的吸收,波场图比较清晰,能达到模拟效果要求.由于采用了一阶速度-应力弹性波波场分离方程,把 P 波波场和 S 波波场成功地从弹性波场中分离出来,固相波场中有横波产生也是与流相波场的不同之处,而且显著地消弱了数值模拟频散,有很好的稳定性;当纵波传播到每层界面进行反射和透射时,会有慢波产生,也证实了存在第二类波的重要结论.

5 结论

基于 Biot 多孔介质的波动理论,利用交错网格有限差分法和完全匹配吸收边界条件,对层状饱和多孔介质中弹性波的传播进行了数值模拟分析.结果表明,在人工截断边界处应用完全匹配吸收边界条件,可以得到较为理想的边界吸收效果;同时,高阶交错网格有限差分法计算格式具有较高精度数值结果,且能实现 Biot 双相各向同性介质固相和流相弹性波的波场分离数值模拟.本文方法不局限于均匀层状介质模型,可以适应于更为复杂的非均匀 Biot 双相孔隙介质情况.

参考文献:

[1] BIOT M A. Theory of elastic waves in a fluid-saturated porous solid, I: Low frequency range [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1956, 28: 168-178.
 [2] BIOT M A. Theory of elastic waves in a fluid-saturated porous solid, II: High frequency range [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1956, 28: 179-191.
 [3] HIGDON R L. Absorbing boundary conditions for elastic waves [J]. Geophysics, 1991, 56: 231-241.
 [4] BERENGER J P. A perfectly matched layer for the absorption

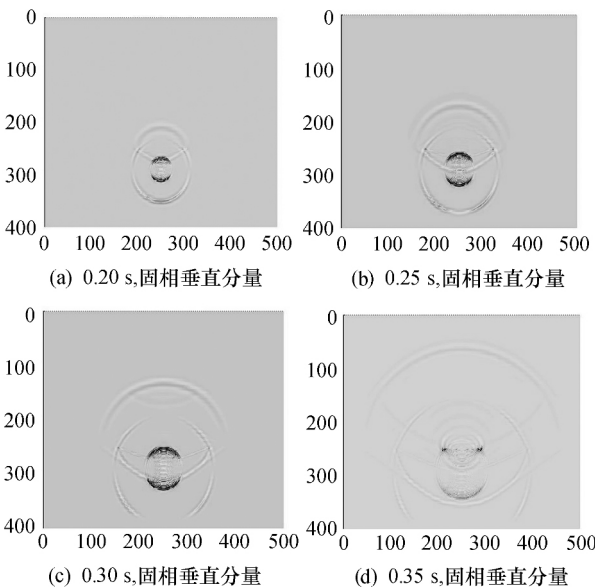


图 5 有吸收边界条件,固相垂直分量弹性波波场快照 (m)
 Fig. 5 Snapshot of elastic wave field of solid-phase vertical component with absorbing boundary conditions (m)

- of electromagnetic waves [J]. *Comput Phys*, 1994, 114(2): 185-200.
- [5] ALTERMAN Z, KARAK F C. Propagation of elastic wave in layered media by finite-difference methods [J]. *Bull Seism Am*, 1968, 58: 367-398.
- [6] BOORE D M. Finite-difference methods for seismic wave propagation in heterogeneous materials [J]. *Comput Phys*, 1972, 11: 1-36.
- [7] MDARIGA R. Dynamics of an expanding circular fault [J]. *Bull Seism Soc Am*, 1976, 66(3): 639-666 .
- [8] VIRIEUX J. P-SV wave propagation in heterogeneous media; Velocity stress finite difference method [J]. *Geophysics*, 1986, 51: 889-901.
- [9] CARSE E. High-order (space and time) finite-difference modeling of the elastic equation [J]. *Geophysics*, 1990, 10: 987-991.
- [10] 董良国, 马在田, 曹景忠, 等. 一阶弹性波方程交错网格高阶差分分解法 [J]. *地球物理学报*, 2000, 43(3): 411-419.
- [11] 董良国, 马在田, 曹景忠. 一阶弹性波方程交错网格高阶差分分解法稳定性研究 [J]. *地球物理学报*, 2000, 43(6): 856-864.
- [12] 董良国. 弹性波数值模拟中的吸收边界条件 [J]. *勘探地球物理学报*, 1999, 34(1): 45-56.
- [13] 刘洪林, 陈可洋, 杨 微, 等. 高阶交错网格有限差分法纵横波波场分离数值模拟 [J]. *地球物理学进展*, 2010, 25(3): 877-884.
- [14] 李振春, 张 华, 刘庆敏, 等. 弹性波交错网格高阶有限差分法波场分离数值模拟 [J]. *石油地球物理勘探*, 2007, 42(5): 510-515.
- [15] 陈可洋. 一阶速度-应力 Biot 双相各向同性介质弹性波波场分离数值模拟 [J]. *计算物理*, 2011, 28(3): 404-412.
- [16] DAI N, KANASEWICH E R, VAFIDIS A. Wave propagation in heterogeneous porous media: A velocity-stress, finite-difference method [J]. *Geophysics*, 1995, 60(2): 327-340.