

# 基于时域显式数值算法的饱和冻土地震响应研究

孙雯静<sup>1</sup>, 李亮<sup>1\*</sup>, 徐静茹<sup>1</sup>, 焦弘贇<sup>2</sup>

<sup>1</sup>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

<sup>2</sup>中国地震局地球物理研究所, 北京

收稿日期: 2026年4月18日; 录用日期: 2026年5月9日; 发布日期: 2026年5月19日

## 摘要

将饱和冻土模拟为含孔隙固体三相多孔介质(PSPM), 基于Carcione-Leclaire波动方程描述其波动特性, 应用时域显式数值算法, 并结合透射人工边界条件, 进行了饱和冻土自由场地震响应的计算研究。计算结果符合弹性波动理论的规律, 表明了时域显式数值算法对于饱和冻土近场波动问题的适用性。计算结果同时表明, 在输入地震动作用下, 饱和冻土中的固体骨架、孔隙流体和孔隙固体的地震响应幅值基本一致, 表明饱和冻土中的三相物质成分在动力荷载作用下具有协同变形特征, 呈现出动力协调性。

## 关键词

饱和冻土, 含孔隙固体三相多孔介质(PSPM), 地震响应, Carcione-Leclaire波动方程, 时域显式数值算法, 透射人工边界条件

# Study on the Seismic Response of Saturated Frozen Soil Based on an Explicit Numerical Algorithm in Time-Domain

Wenjing Sun<sup>1</sup>, Liang Li<sup>1\*</sup>, Jingru Xu<sup>1</sup>, Hongyun Jiao<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering, Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing

<sup>2</sup>Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing

Received: April 18, 2026; accepted: May 9, 2026; published: May 19, 2026

\*通讯作者。

文章引用: 孙雯静, 李亮, 徐静茹, 焦弘贇. 基于时域显式数值算法的饱和冻土地震响应研究[J]. 土木工程, 2026, 15(5): 205-212. DOI: 10.12677/hjce.2026.155131

## Abstract

Saturated frozen soil was modeled as the porous media containing pore-solid (PSPM), and its wave characteristics were governed by the Carcione-Leclaire wave propagation equation. A time-domain explicit numerical algorithm was adopted. It was combined with a transmissive artificial boundary condition. Using this approach, a computational study was conducted on the free-field seismic response of saturated frozen soil. The computational results are consistent with the principles of elastic wave theory. Therefore, the applicability of the explicit time-domain numerical algorithm to near-field wave problems in saturated frozen soil is demonstrated. The results also indicate that, under the action of input seismic motion, the seismic response amplitudes of the solid skeleton, pore-fluid, and pore-solid in saturated frozen soil are essentially consistent. This suggests that the three-phase components in saturated frozen soil exhibit cooperative deformation characteristics under dynamic loading. Thus, dynamic coordination is demonstrated.

## Keywords

Saturated Frozen Soil, Porous Media Containing Pore-Solid (PSPM), Seismic Response, Carcione-Leclaire Wave Propagation Equation, Explicit Numerical Algorithm in Time-Domain, Transmitting Artificial Boundary Condition

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

多年冻土在我国东北和西北的高海拔地区广泛分布,许多工程结构,包括交通和能源基础设施修建于冻土地带之中。上述地区也是地震多发区域,冻土地带中工程结构的抗震安全性问题须进行研究。该问题的研究基础是冻土地带中工程结构地震响应特性的计算研究,这涉及到冻土中地震波的传播特性和地震荷载作用下冻土的动力响应特性的研究。上述问题属于冻土的近场波动问题,是土动力学与岩土工程领域的重要研究课题之一。

饱和冻土由固体骨架(土颗粒)、孔隙流体(水)和孔隙固体(冰颗粒)三相物质组成,其可抽象为含孔隙固体的三相多孔介质(Porous media containing pore-solid, PSPM)进行研究。与仅由固体骨架和孔隙流体组成的饱和两相介质(如饱和土)相比,饱和冻土由于组分增多,其波动特性更为复杂。Biot [1] [2]建立了饱和两相介质的波动理论,为多相介质波动理论的研究奠定了基础。Leclaire 等[3]基于 Biot 波动理论进行拓展,建立了适用于 PSPM 的波动理论。Carcione 等[4] [5]考虑了固体骨架和孔隙固体的相互作用及粘滞效应,对 Leclaire 波动理论进行了改进,从而更真实地描述饱和冻土中的波动特性。改进的波动理论模型称为 Carcione-Leclaire 模型(LCAM 模型)。

求解岩土介质近场波动问题的方法主要包括解析法和数值法两大类。近年来,基于前述的 PSPM 波动理论,学者们采用解析法对饱和冻土的近场波动问题开展了研究[6]-[10]。但解析法仅适用于计算区域的几何形状规则或者荷载和边界条件简单的波动问题,对于复杂波动问题的求解则需要借助数值方法进行。目前常用的数值方法包括有限差分法、边界元法和有限元法等,其中有限元法应用最广。按照时间域离散方式的不同,有限元方法可分为隐式方法、显式方法及二者结合的隐-显式方法。对于动力自由

度数目庞大的近场波动问题，显式方法因计算过程无需求解耦联方程组而具有计算效率的优势。

目前针对饱和两相介质近场波动问题的时域显式数值算法已有较多的研究工作开展。赵成刚等[11]基于以固体骨架位移和孔隙流体位移为基本未知量的波动方程，建立了饱和两相介质近场波动问题的时域显式有限元方法。李亮等[12]验证了该方法的适用性，并将其扩展至弹塑性[13]及横观各向同性两相介质的情形[14]。李亮等[15]还基于以固相位移和孔隙流体压力为基本未知量的  $u-p$  形式波动方程建立了两相介质近场波动问题的时域全显式数值计算方法。徐静茹等[16]在该方法的基础上进一步建立了考虑惯性耦合效应的两相介质近场波动问题的时域显式数值计算方法。

目前，针对饱和冻土等 PSPM 的近场波动问题的数值算法及其应用的研究开展得尚不充分。本文基于 Carcione-Leclaire 波动方程描述其波动特性，首次将联合中心差分法与 Newmark 常平均加速度法的时域显式分步计算方法，应用于饱和冻土等 PSPM 的动力学问题。通过对惯性耦合矩阵进行对角化处理实现方程解耦，建立显式递推格式，并结合局部透射人工边界条件[17]，最终形成适用于饱和冻土近场波动问题的显式数值计算方法。通过典型饱和冻土地震响应计算，考察了该算法对饱和冻土近场波动问题的适用性。

## 2. 饱和冻土近场波动问题的时域显式数值算法

### 2.1. Carcione-Leclaire 波动方程

应用 Carcione-Leclaire 波动方程描述饱和冻土的波动特性，其可写为[18]：

$$\rho \begin{pmatrix} \ddot{u}^s \\ \ddot{u}^w \\ \ddot{u}^h \end{pmatrix} + \mathbf{b} \begin{pmatrix} \dot{u}^s \\ \dot{u}^w \\ \dot{u}^h \end{pmatrix} = \mathbf{R} \nabla \nabla \cdot \begin{pmatrix} u^s \\ u^w \\ u^h \end{pmatrix} - \boldsymbol{\mu} \nabla \times \nabla \times \begin{pmatrix} u^s \\ u^w \\ u^h \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中： $u$ 、 $\dot{u}$  和  $\ddot{u}$  分别表示饱和冻土的位移、速度和加速度向量，上标  $s$ 、 $w$  和  $h$  分别对应固体骨架、孔隙流体和孔隙固体； $\rho$ 、 $\mathbf{b}$ 、 $\mathbf{R}$ 、 $\boldsymbol{\mu}$  分别为惯性耦合矩阵、黏性耦合矩阵、压缩刚度矩阵和剪切刚度矩阵。其可表示为：

$$\rho = \begin{bmatrix} \rho_{11} & \rho_{12} & \rho_{13} \\ \rho_{12} & \rho_{22} & \rho_{23} \\ \rho_{13} & \rho_{23} & \rho_{33} \end{bmatrix}, \boldsymbol{\mu} = \begin{bmatrix} \mu_1 & 0 & \mu_{13} \\ 0 & 0 & 0 \\ \mu_{13} & 0 & \mu_3 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} b_{12} + b_{13} & -b_{12} & -b_{13} \\ -b_{12} & b_{12} + b_{23} & -b_{23} \\ -b_{13} & -b_{23} & b_{13} + b_{23} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} K_1 + 4\mu_1/3 & C_{12} & C_{13} + 2\mu_{13}/3 \\ C_{12} & K_2 & C_{23} \\ C_{13} + 2\mu_{13}/3 & C_{23} & K_3 + 4\mu_3/3 \end{bmatrix}$$

式中， $\rho_{11}$ 、 $\rho_{22}$  和  $\rho_{33}$  分别为固体骨架、孔隙流体和孔隙固体的有效密度， $\rho_{12}$ 、 $\rho_{23}$  和  $\rho_{13}$  为各组分之间的耦合密度； $b_{12}$ 、 $b_{23}$  和  $b_{13}$  为各组分之间的摩擦参数； $K_1$ 、 $K_2$  和  $K_3$  分别为固体骨架、孔隙流体和孔隙固体的体积压缩模量； $\mu_1$  和  $\mu_3$  分别为固体骨架和孔隙固体的剪切模量， $\mu_{13}$  为二者的耦合剪切模量； $C_{12}$ 、 $C_{13}$  和  $C_{23}$  分别为各组分之间的耦合体积压缩模量。上述变量的具体表达式详见文献[18]。

### 2.2. 饱和冻土动力响应的时域显式逐步计算公式

应用伽辽金法得到了波动方程空间离散后的弱形式，并通过对波动方程中的惯性耦合矩阵实施对角

化，基于各节点惯性相互独立的假定，将单元总质量按比例系数分配至各节点，形成仅主对角元素非零的集中质量矩阵。消除方程中的惯性耦联，实现了波动方程的解耦。针对解耦的波动方程，采用中心差分法和 Newmark 常平均加速度法相结合的数值求解方案进行时间域离散，得到饱和冻土动力响应的时域显式逐步计算公式。固体骨架、孔隙流体和孔隙固体的位移表达式如下：

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_{k+1}^s = & \mathbf{u}_k^s + \Delta t \dot{\mathbf{u}}_k^s - \frac{\Delta t^2}{2} \mathbf{M}_s (\mathbf{C}_{ss} + \mathbf{M}_{s1} \mathbf{C}_{ww} + \mathbf{M}_{s2} \mathbf{C}_{hh} + \mathbf{K}_{ss} \\ & + \mathbf{M}_{s1} \mathbf{K}_{ww} + \mathbf{M}_{s2} \mathbf{K}_{hh} - \mathbf{f}_k^s - \mathbf{M}_{s1} \mathbf{f}_k^w - \mathbf{M}_{s2} \mathbf{f}_k^h) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_{k+1}^w = & \mathbf{u}_k^w + \Delta t \dot{\mathbf{u}}_k^w - \frac{\Delta t^2}{2} \mathbf{M}_w (\mathbf{C}_{ww} + \mathbf{M}_{w1} \mathbf{C}_{ss} + \mathbf{M}_{w2} \mathbf{C}_{hh} + \mathbf{K}_{ww} \\ & + \mathbf{M}_{w1} \mathbf{K}_{ss} + \mathbf{M}_{w2} \mathbf{K}_{hh} - \mathbf{f}_k^w - \mathbf{M}_{w1} \mathbf{f}_k^s - \mathbf{M}_{w2} \mathbf{f}_k^h) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_{k+1}^h = & \mathbf{u}_k^h + \Delta t \dot{\mathbf{u}}_k^h - \frac{\Delta t^2}{2} \mathbf{M}_h (\mathbf{C}_{hh} + \mathbf{M}_{h1} \mathbf{C}_{ss} + \mathbf{M}_{h2} \mathbf{C}_{ww} + \mathbf{K}_{hh} \\ & + \mathbf{M}_{h1} \mathbf{K}_{ss} + \mathbf{M}_{h2} \mathbf{K}_{ww} - \mathbf{f}_k^h - \mathbf{M}_{h1} \mathbf{f}_k^s - \mathbf{M}_{h2} \mathbf{f}_k^w) \end{aligned} \quad (5)$$

固体骨架、孔隙流体和孔隙固体的速度表达式如下：

$$\dot{\mathbf{u}}_{k+1}^s = \dot{\mathbf{u}}_k^s - \mathbf{M}_s \left\{ \mathbf{C}_a + \mathbf{M}_{s1} \mathbf{C}_b + \mathbf{M}_{s2} \mathbf{C}_c + \frac{\Delta t}{2} [\mathbf{K}_a + \mathbf{M}_{s1} \mathbf{K}_b + \mathbf{M}_{s2} \mathbf{K}_c - \mathbf{F}_{ss} - \mathbf{M}_{s1} \mathbf{F}_{ww} - \mathbf{M}_{s2} \mathbf{F}_{hh}] \right\} \quad (6)$$

$$\dot{\mathbf{u}}_{k+1}^w = \dot{\mathbf{u}}_k^w - \mathbf{M}_w \left\{ \mathbf{C}_b + \mathbf{M}_{w1} \mathbf{C}_a + \mathbf{M}_{w2} \mathbf{C}_c + \frac{\Delta t}{2} [\mathbf{K}_b + \mathbf{M}_{w1} \mathbf{K}_a + \mathbf{M}_{w2} \mathbf{K}_c - \mathbf{F}_{ww} - \mathbf{M}_{w1} \mathbf{F}_{ss} - \mathbf{M}_{w2} \mathbf{F}_{hh}] \right\} \quad (7)$$

$$\dot{\mathbf{u}}_{k+1}^h = \dot{\mathbf{u}}_k^h - \mathbf{M}_h \left\{ \mathbf{C}_c + \mathbf{M}_{h1} \mathbf{C}_a + \mathbf{M}_{h2} \mathbf{C}_b + \frac{\Delta t}{2} [\mathbf{K}_c + \mathbf{M}_{h1} \mathbf{K}_a + \mathbf{M}_{h2} \mathbf{K}_b - \mathbf{F}_{hh} - \mathbf{M}_{h1} \mathbf{F}_{ss} - \mathbf{M}_{h2} \mathbf{F}_{ww}] \right\} \quad (8)$$

式中的下标  $k+1$  和  $k$  对应计算的时间步数。各个矩阵和向量的表达式列出如下：

$$\mathbf{M}_m = \mathbf{M}_{1l} (\mathbf{M}_{4l} \mathbf{M}_{6l} - \mathbf{M}_{5l}^2) - \mathbf{M}_{2l} (\mathbf{M}_{2l} \mathbf{M}_{6l} - \mathbf{M}_{3l} \mathbf{M}_{5l}) + \mathbf{M}_{3l} (\mathbf{M}_{2l} \mathbf{M}_{5l} - \mathbf{M}_{3l} \mathbf{M}_{4l}) \quad (9)$$

$$\mathbf{M}_s = (\mathbf{M}_{4l} \mathbf{M}_{6l} - \mathbf{M}_{5l}^2) / \mathbf{M}_m, \mathbf{M}_w = (\mathbf{M}_{1l} \mathbf{M}_{6l} - \mathbf{M}_{3l}^2) / \mathbf{M}_m, \mathbf{M}_h = (\mathbf{M}_{1l} \mathbf{M}_{4l} - \mathbf{M}_{2l}^2) / \mathbf{M}_m \quad (10)$$

$$\mathbf{M}_{s1} = \frac{\mathbf{M}_{3l} \mathbf{M}_{5l} - \mathbf{M}_{2l} \mathbf{M}_{6l}}{\mathbf{M}_{4l} \mathbf{M}_{6l} - \mathbf{M}_{5l}^2}, \mathbf{M}_{s2} = \frac{\mathbf{M}_{2l} \mathbf{M}_{5l} - \mathbf{M}_{3l} \mathbf{M}_{4l}}{\mathbf{M}_{4l} \mathbf{M}_{6l} - \mathbf{M}_{5l}^2}, \mathbf{M}_{w1} = \frac{\mathbf{M}_{3l} \mathbf{M}_{5l} - \mathbf{M}_{2l} \mathbf{M}_{6l}}{\mathbf{M}_{1l} \mathbf{M}_{6l} - \mathbf{M}_{3l}^2} \quad (11)$$

$$\mathbf{M}_{w2} = \frac{\mathbf{M}_{2l} \mathbf{M}_{3l} - \mathbf{M}_{1l} \mathbf{M}_{5l}}{\mathbf{M}_{1l} \mathbf{M}_{6l} - \mathbf{M}_{3l}^2}, \mathbf{M}_{h1} = \frac{\mathbf{M}_{2l} \mathbf{M}_{5l} - \mathbf{M}_{3l} \mathbf{M}_{4l}}{\mathbf{M}_{4l} \mathbf{M}_{6l} - \mathbf{M}_{5l}^2}, \mathbf{M}_{h2} = \frac{\mathbf{M}_{2l} \mathbf{M}_{3l} - \mathbf{M}_{1l} \mathbf{M}_{5l}}{\mathbf{M}_{4l} \mathbf{M}_{6l} - \mathbf{M}_{5l}^2}$$

$$\mathbf{K}_{ss} = \mathbf{K}_1 \mathbf{u}_k^s + \mathbf{K}_2 \mathbf{u}_k^w + \mathbf{K}_3 \mathbf{u}_k^h, \mathbf{K}_{ww} = \mathbf{K}_2 \mathbf{u}_k^s + \mathbf{K}_4 \mathbf{u}_k^w + \mathbf{K}_5 \mathbf{u}_k^h, \mathbf{K}_{hh} = \mathbf{K}_3 \mathbf{u}_k^s + \mathbf{K}_5 \mathbf{u}_k^w + \mathbf{K}_6 \mathbf{u}_k^h \quad (12)$$

$$\mathbf{C}_{ss} = \mathbf{C}_1 (\dot{\mathbf{u}}_k^s - \dot{\mathbf{u}}_k^w) + \mathbf{C}_2 (\dot{\mathbf{u}}_k^s - \dot{\mathbf{u}}_k^h) \quad (13)$$

$$\mathbf{C}_{ww} = \mathbf{C}_1 (\dot{\mathbf{u}}_k^w - \dot{\mathbf{u}}_k^s) + \mathbf{C}_2 (\dot{\mathbf{u}}_k^w - \dot{\mathbf{u}}_k^h) \quad (14)$$

$$\mathbf{C}_{ss} = \mathbf{C}_2 (\dot{\mathbf{u}}_k^h - \dot{\mathbf{u}}_k^s) + \mathbf{C}_3 (\dot{\mathbf{u}}_k^h - \dot{\mathbf{u}}_k^w) \quad (15)$$

$$\mathbf{K}_a = \mathbf{K}_1 (\mathbf{u}_{k+1}^s + \mathbf{u}_k^s) + \mathbf{K}_2 (\mathbf{u}_{k+1}^w + \mathbf{u}_k^w) + \mathbf{K}_3 (\mathbf{u}_{k+1}^h + \mathbf{u}_k^h) \quad (16)$$

$$\mathbf{K}_b = \mathbf{K}_2 (\mathbf{u}_{k+1}^s + \mathbf{u}_k^s) + \mathbf{K}_4 (\mathbf{u}_{k+1}^w + \mathbf{u}_k^w) + \mathbf{K}_5 (\mathbf{u}_{k+1}^h + \mathbf{u}_k^h) \quad (17)$$

$$\mathbf{K}_c = \mathbf{K}_3 (\mathbf{u}_{k+1}^s + \mathbf{u}_k^s) + \mathbf{K}_5 (\mathbf{u}_{k+1}^w + \mathbf{u}_k^w) + \mathbf{K}_6 (\mathbf{u}_{k+1}^h + \mathbf{u}_k^h) \quad (18)$$

$$C_a = C_1 \left[ \left( \mathbf{u}_{k+1}^s + \mathbf{u}_k^s \right) - \left( \mathbf{u}_{k+1}^w + \mathbf{u}_k^w \right) \right] + C_2 \left[ \left( \mathbf{u}_{k+1}^s + \mathbf{u}_k^s \right) - \left( \mathbf{u}_{k+1}^h + \mathbf{u}_k^h \right) \right] \quad (19)$$

$$C_b = C_1 \left[ \left( \mathbf{u}_{k+1}^w + \mathbf{u}_k^w \right) - \left( \mathbf{u}_{k+1}^s + \mathbf{u}_k^s \right) \right] + C_3 \left[ \left( \mathbf{u}_{k+1}^h + \mathbf{u}_k^h \right) - \left( \mathbf{u}_{k+1}^w + \mathbf{u}_k^w \right) \right] \quad (20)$$

$$C_c = C_2 \left[ \left( \mathbf{u}_{k+1}^h + \mathbf{u}_k^h \right) - \left( \mathbf{u}_{k+1}^s + \mathbf{u}_k^s \right) \right] + C_3 \left[ \left( \mathbf{u}_{k+1}^h + \mathbf{u}_k^h \right) - \left( \mathbf{u}_{k+1}^w + \mathbf{u}_k^w \right) \right] \quad (21)$$

$$\mathbf{F}_{ss} = \mathbf{f}_{k+1}^s + \mathbf{f}_k^s, \mathbf{F}_{ww} = \mathbf{f}_{k+1}^w + \mathbf{f}_k^w, \mathbf{F}_{hh} = \mathbf{f}_{k+1}^h + \mathbf{f}_k^h \quad (22)$$

式中,  $\mathbf{M}_i (i=1 \sim 6)$  为惯性耦合矩阵,  $\mathbf{C}_i (i=1 \sim 3)$  为渗流阻尼矩阵,  $\mathbf{K}_i (i=1 \sim 6)$  为刚度矩阵。  $\mathbf{f}^s$ 、 $\mathbf{f}^w$  和  $\mathbf{f}^h$  分别为作用于固体骨架、孔隙流体和孔隙固体的边界力向量。

由式(3)~(8)可知, 动力响应的计算采用分步迭代的方式进行。应用该算法, 可以按照时间顺序进行迭代计算, 依次得到各个时刻饱和冻土的动力响应(位移和速度), 最终得到饱和冻土动力响应时程的数值结果。计算过程无须进行矩阵的整体求逆和求解耦联的动力方程组, 符合时域显式数值计算方法的基本特征。

### 3. 饱和冻土自由场地震响应研究

应用上述的时域显式数值算法并结合局部透射人工边界条件[17], 进行饱和冻土自由场地震响应的计算研究。计算模型如图1所示。饱和冻土自由场计算区域取为  $800 \text{ m} \times 800 \text{ m}$  的正方形区域, 其顶部设置为自由排水边界, 底面及两侧面设置为透射人工边界, 通过将边界节点的总波动分解为内行波与外行波, 并采用多重透射公式由内部节点历史时刻的响应外推外行波分量来实现, 以模拟边界处外行波的能量辐射效应。采用四节点矩形单元进行计算区域的空间离散, 单元尺寸为  $80 \text{ m} \times 80 \text{ m}$ , 共划分得到 100 个单元, 121 个节点。输入地震动选用天津宁河地震记录, 其位移时程和速度时程如图2所示。令地震动以剪切波(S波)的形式从计算模型的底部边界垂直入射。选取计算模型顶面的中间节点 A 作为计算节点。计算时间步长为  $5 \times 10^{-6} \text{ s}$ , 计算输入的饱和冻土的材料参数见表1。

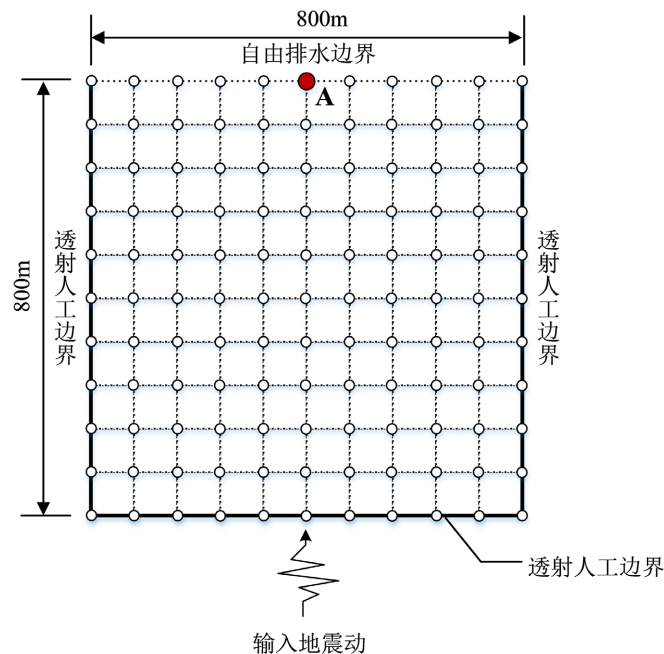
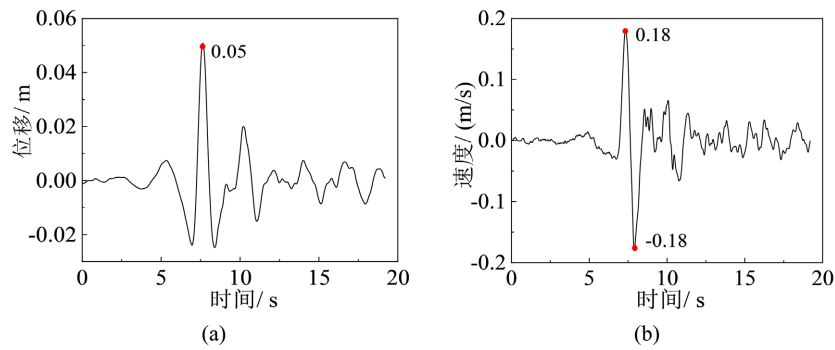


Figure 1. Seismic response calculation model of free field of saturated frozen soil

图1. 饱和冻土自由场地震响应计算模型

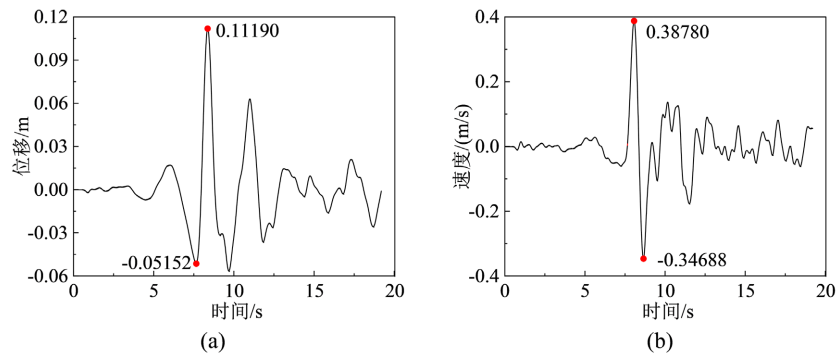
**Table 1.** Material parameters of saturated frozen soil [6]  
**表 1.** 饱和冻土材料参数[6]

$\mu_s$ /(GPa)	$\mu_h$ /(GPa)	$\rho_s$ /(kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_w$ /(kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_h$ /(kg/m <sup>3</sup> )	$K_s$ /(GPa)	$K_w$ /(GPa)	$K_h$ /(GPa)
6.83	3.32	2580	1000	920	20.9	2.25	8.58
$\kappa_{ho}$ /(m <sup>2</sup> )	$\kappa_{so}$ /(m <sup>2</sup> )	$\phi$	$\alpha$	$S_r$	$\varepsilon$	$\eta$	
$5.0 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-11}$	0.3	25	0.6	0.5	$1.8 \times 10^{-3}$	



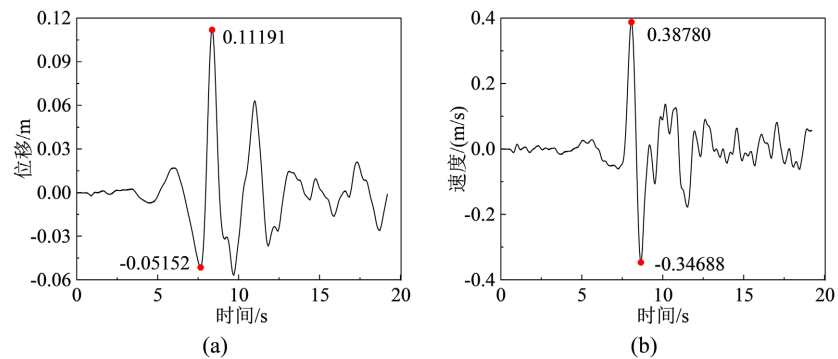
**Figure 2.** Time histories of incident seismic motion. (a) Displacement time history; (b) Velocity time history

**图 2.** 输入地震动时程。(a) 位移时程；(b) 速度时程



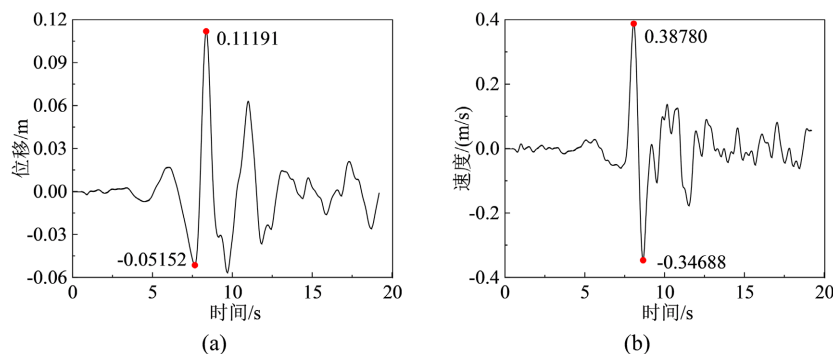
**Figure 3.** Seismic response time histories of solid skeleton. (a) Displacement time history; (b) Velocity time history

**图 3.** 固体骨架地震响应时程计算结果。(a) 位移时程；(b) 速度时程



**Figure 4.** Seismic response time histories of pore-fluid. (a) Displacement time history; (b) Velocity time history

**图 4.** 孔隙流体地震响应时程计算结果。(a) 位移时程；(b) 速度时程



**Figure 5.** Seismic response time histories of pore-solid. (a) Displacement time history; (b) Velocity time history

**图 5.** 孔隙固体地震响应时程计算结果。(a) 位移时程; (b) 速度时程

节点 A 的地震响应时程的计算结果如图 3~5 所示。通过与图 2 的输入地震动时程的对比可知, 饱和冻土自由场表面的地震响应时程的波形与入射地震动的波形相同, 这对应于地震波在饱和冻土中的传播。同时, 自由场表面地震响应幅值相对于入射地震动幅值的放大系数约等于 2, 该结果符合弹性波动理论的规律[19]。这表明了本文应用的时域显式数值算法对饱和冻土近场波动问题的适用性。另一方面, 图 3~5 中的计算结果表明, 饱和冻土中的固体骨架、孔隙流体和孔隙固体的地震响应幅值基本一致, 即饱和冻土中的三相物质成分在动力荷载作用下具有协同变形特征, 呈现出动力协调性。这是由于冻结状态下的固体骨架与孔隙固体(冰)极大地增强了饱和冻土的整体刚度, 并限制了孔隙流体的自由流动, 使得饱和冻土趋向于发生整体协同变形, 表现出动力协调特征。

#### 4. 结论

本文将饱和冻土模拟为固体骨架、孔隙流体和孔隙固体共同组成的含孔隙固体三相多孔介质 (PSPM), 基于 Carcione-Leclaire 波动方程描述其波动特性, 应用时域显式数值算法, 并结合透射人工边界条件, 进行了饱和冻土自由场地震响应的计算研究。本文方法将时域显式数值算法推广至更为复杂的饱和冻土等含孔隙固体三相多孔介质 (PSPM), 为后续冻土地中工程结构地震响应分析提供了有效的数值模拟方法。主要研究结论如下:

(1) 应用时域显式数值算法得到的饱和冻土地震响应的计算结果符合弹性波动理论的规律, 表明该算法能够对饱和冻土在输入地震动作用下的动力响应进行较为准确的计算, 验证了其对于饱和冻土近场波动问题的适用性。

(2) 在输入地震动作用下, 饱和冻土中的固体骨架、孔隙流体和孔隙固体的地震响应幅值基本一致, 表明饱和冻土中的三相物质成分在动力荷载作用下具有协同变形特征, 呈现出动力协调性。

#### 参考文献

- [1] Biot, M.A. (1956) Theory of Propagation of Elastic Waves in a Fluid-Saturated Porous Solid. I. Low-Frequency Range. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **28**, 168-178. <https://doi.org/10.1121/1.1908239>
- [2] Biot, M.A. (1956) Theory of Propagation of Elastic Waves in a Fluid-Saturated Porous Solid. II. Higher Frequency Range. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **28**, 179-191. <https://doi.org/10.1121/1.1908241>
- [3] Leclaire, P., Cohen-Ténoudji, F. and Aguirre-Puente, J. (1994) Extension of Biot's Theory of Wave Propagation to Frozen Porous Media. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **96**, 3753-3768. <https://doi.org/10.1121/1.411336>
- [4] Carcione, J.M., Gurevich, B. and Cavallini, F. (2000) A Generalized Biot-Gassmann Model for the Acoustic Properties of Shaley Sandstones. *Geophysical Prospecting*, **48**, 539-557. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2478.2000.00198.x>
- [5] Carcione, J.M., Santos, J.E., Ravazzoli, C.L. and Helle, H.B. (2003) Wave Simulation in Partially Frozen Porous Media

- with Fractal Freezing Conditions. *Journal of Applied Physics*, **94**, 7839-7847. <https://doi.org/10.1063/1.1606861>
- [6] 焦豪, 马强, 周凤玺. P波入射下饱和冻土自由场地地震地面运动分析[J]. 冰川冻土, 2024, 46(1): 137-151.
- [7] 马强, 周凤玺, 江焯. 平面水平剪切波在饱和冻土地层中的传播特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(S2): 4044-4051.
- [8] 蒋汇鹏, 马强, 曹亚鹏. P波在弹性介质与饱和冻土介质分界面上的透反射问题研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(3): 916-929.
- [9] 陈怀元, 马强. 简谐荷载作用下层状饱和冻土地基动力响应分析[J]. 工程力学, 2026, 43(4): 81-94.
- [10] 徐静茹, 李亮, 焦弘贇, 等. 热效应作用下平面 S1 波入射饱和冻土自由场动力响应特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2025, 44(11): 3113-3126.
- [11] 赵成刚, 王进廷, 史培新. 流体饱和两相多孔介质动力反应分析的显式有限元法[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(2): 178-182.
- [12] 李亮, 杜修力, 赵成刚, 等. 基于显式有限元方法的两相多孔介质地震反应研究[J]. 应用力学学报, 2007, 24(4): 550-554.
- [13] 李亮, 杜修力, 赵成刚, 等. 两相多孔介质弹塑性动力反应计算分析的显式有限元方法[J]. 北京工业大学学报, 2006, 32(9): 784-790.
- [14] Li, L., Du, X., Shi, P. and Zhai, W. (2018) Time-Domain Explicit Finite-Element Method for Dynamic Analysis of Transversely Isotropic Fluid-Saturated Porous Media. *Journal of Porous Media*, **21**, 793-811. <https://doi.org/10.1615/jpormedia.2018016221>
- [15] 李亮, 李果, 杜修力, 等. 饱和两相介质近场波动问题的一种时域全显式数值计算方法[J]. 工程力学, 2020, 37(8): 20-31.
- [16] 徐静茹, 李亮, 宋佳. 考虑惯性耦合的两相介质动力反应显式数值计算方法[J]. 防灾减灾工程学报, 2023, 43(5): 1009-1015.
- [17] Liao, Z.P. and Wong, H.L. (1984) A Transmitting Boundary for the Numerical Simulation of Elastic Wave Propagation. *International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **3**, 174-183. [https://doi.org/10.1016/0261-7277\(84\)90033-0](https://doi.org/10.1016/0261-7277(84)90033-0)
- [18] 仇浩淼, 夏唐代, 郑晴晴, 等. 饱和冻土中弹性体波传播特性影响参数研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(11): 4053-4062.
- [19] 杜修力. 工程波动理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2009.