



基于场址复杂入射波场的非一致波动输入模型

何卫平 杜修力 陈平 刘聪宇 王峰

A NON-UNIFORM WAVE INPUT MODEL BASED ON COMPLEX INCIDENT SITE WAVES

HE Wei-ping, DU Xiu-li, CHEN Ping, LIU Cong-yu, WANG Feng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2022.08.0688>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

P波垂直入射下海域岛礁场地动力反应分析

SEISMIC RESPONSE ANALYSIS OF OFFSHORE REEF SITE UNDER INCIDENT P WAVE

工程力学. 2019, 36(S1): 1-7 <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2018.04.S012>

斜入射下水下地基场地地震输入的一维化时域方法

1D TIME-DOMAIN METHOD FOR 2D WAVE MOTION IN UNDERWATER SITE WITH OBLIQUELY INCIDENT PLANE WAVE

工程力学. 2019, 36(11): 91-101 <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2018.09.0523>

地下结构地震反应分析中人工边界条件和地震波动输入方法对比研究

Comparison on artificial boundaries and seismic wave input methods in seismic analysis of underground structures

工程力学. 2018, 35(S1): 212-216,222 <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2017.05.S042>

地震波斜入射下层状TI饱和场地地震反应分析

SEISMIC RESPONSE ANALYSIS OF MULTI-LAYERED TI SATURATED SITE SUBJECTED TO OBLIQUE INCIDENT SEISMIC WAVE

工程力学. 2020, 37(5): 166-177 <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2019.07.0363>

直立堤上任意方向入射波的波压力研究

A STUDY ON ARBITRARY INCIDENT WAVE PRESSURE ON VERTICAL BREAKWATERS

工程力学. 2018, 35(5): 246-256 <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2017.01.0020>

阶梯地形成层场地的斜入射地震动输入方法

INPUT METHOD OF OBLIQUELY INCIDENT EARTHQUAKE FOR STEP-SHAPED LAYERED SITE

工程力学. 2019, 36(12): 62-68 <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2018.10.0574>



订阅号：面向读者



订阅号：面向作者

扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1000-4750(2024)12-0021-09

基于场址复杂入射波场的非一致波动输入模型

何卫平^{1,2}, 杜修力², 陈 平³, 刘聪宇¹, 王 峰¹

(1. 三峡大学湖北省水电工程施工与管理重点实验室, 湖北, 宜昌 443002; 2. 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;
3. 中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司, 湖南, 长沙 410014)

摘 要: 波动输入模型在表达地面运动非一致特征方面存在局限。为解决该问题, 首先通过地震波空间演化分析证实场址入射地震波为复杂波场, 进而提出拓展入射波假定至复杂波场的方法发展非一致波动输入模型。该文以确定性波场和粘弹性边界实现非一致波动输入模型, 通过数值模拟地面运动与解析解对比验证其可行性。研究结果显示, 非一致波动输入模型继承了波动输入模型在模拟地震波传播效应和地基辐射阻尼效应方面的优势, 可有效实现场址复杂入射波场的输入。与传统波动输入模型相比, 非一致波动输入模型可全面表达地面运动的时间滞后、峰值变化和时程形状差异等非一致特征。

关键词: 近场波动; 非一致波动输入模型; 复杂入射波场; 地震波空间演化; 时程形状差异

中图分类号: TV312; O347.4 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2022.08.0688

A NON-UNIFORM WAVE INPUT MODEL BASED ON COMPLEX INCIDENT SITE WAVES

HE Wei-ping^{1,2}, DU Xiu-li², CHEN Ping³, LIU Cong-yu¹, WANG Feng¹

(1. Hubei Key Laboratory of Construction and Management in Hydropower Engineering, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China;
2. Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of the Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;
3. Powerchina Zhongnan Engineering Corporation Limited, Changsha, Hu'nan 410014, China)

Abstract: The wave input model (WIM) cannot express the non-uniform characteristics of ground motions completely. By analyzing the spatial evolution of seismic waves from the source to the site, the incident site waves are proved to be complex waves. A strategy for improving the WIM by expanding incident waves to complex waves is proposed. The new model is named the non-uniform wave input model (NUWIM). The NUWIM is accomplished by the deterministic incident site waves and the visco-elastic boundary and is verified by the analytical ground motion. The result shows that the advantages of WIM in simulating the wave propagation effect and the radiation damping effect are inherited in the NUWIM, which can effectively achieve the input of complex incident site waves. Compared with the WIM, the non-uniform characteristics of ground motions, such as time delays, peak variations, and time history shape differences, can be synthetically simulated by the NUWIM.

Key words: near-field wave; non-uniform wave input model; complex incident site waves; spatial evolution of seismic wave; time history shape difference

地震动输入模型是工程结构地震响应分析的基础, 其中的波动输入模型^[1-5]在模拟地震波的传播效应和地基辐射阻尼效应方面具备优势, 已在水利和土木等领域的结构地震响应分析中广泛

应用^[6-19]。波动输入模型的实现包含吸收散射波能量的人工边界条件和获取边界节点力的波场分解过程。在人工边界条件方面, 目前已发展了粘性边界^[20]、透射边界^[21]、粘弹性边界^[22-24]等多种

收稿日期: 2022-08-07; 修改日期: 2023-01-10

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(51809152); 北京市博士后基金项目(Q6004014202002); 湖北省重点实验室开放基金项目(2020KSD16)

通信作者: 何卫平(1987—), 男, 河南人, 副教授, 博士, 主要从事地震动输入模型研究 (E-mail: heweiping_hwp@126.com)。

作者简介: 杜修力(1962—), 男, 四川人, 教授, 博士, 院士, 主要从事土木、水利工程结构抗震防灾研究 (E-mail: duxiuli@bjut.edu.cn);

陈 平(1987—), 男, 湖南人, 高工, 硕士, 主要从事水工结构设计研究 (E-mail: 362437373@qq.com);

刘聪宇(1998—), 男, 湖北人, 硕士生, 主要从事水工结构抗震研究 (E-mail: 2017101230@ctgu.edu.cn);

王 峰(1987—), 男, 山东人, 副教授, 博士, 主要从事水工结构研究 (E-mail: wangfengctgu@ctgu.edu.cn)。

人工边界条件可供波动输入模型采用。在波场分解方面,波动输入模型通常以平面波垂直入射或倾斜入射为基础,完成入射波波形的获取、运动场构建、边界节点力计算等步骤。

波场分解过程为运动场和边界节点力计算提供逻辑严密的计算流程,然而无论采用垂直入射抑或倾斜入射,波动输入模型得到的运动场均无法全面表达地面运动的非一致特征^[25],如时间滞后、峰值变化及时程形状差异等^[26]。具体表现为:采用垂直入射假定时,空间内运动场由垂直入射的平面 SV 波、平面 P 波及其反射波构成,得到的地面运动具备同维运动完全一致的特点,不能表达地面运动的非一致特征;采用倾斜入射假定时^[27],空间内的运动场由单一入射的平面 SV 波(或 P 波)及其反射波形成,得到的地面运动可表达时间滞后,但在峰值变化及时程形状差异等特征表达上存在缺陷。结合已有研究中对 P 波和 SV 波组合入射^[28-31]、复杂入射波场^[26]情况的探讨可知,波动输入模型无法全面表达地面运动非一致特征的直接原因是,其入射波假定无法反映场址入射地震波的真实特征,因此,加强对场址入射地震波特征的研究是改进波动输入模型的重要前提。

针对目前场址入射地震波相关研究较少的现状,本文采用空间演化法获得近源场址入射地震波的确切信息^[32],证实场址入射地震波为复杂入射波场。进而提出改进波动输入模型的研究思路:拓展入射波假定,实现场址复杂入射波场的输入。改进后的波动输入模型可模拟复杂入射波场及其反射波场在截断模型内的物理传播过程,也可实现对地面运动的时间滞后、峰值变化和时程形状差异等特征的表达,本文将之称为非一致波动输入模型。非一致波动输入模型不仅继承传统波动输入模型在模拟地震波传播效应和地基辐射阻尼效应上的优势,同时改进了传统波动输入模型在表达场址复杂入射波场和地面运动非一致特征方面的不足,可为结构地震响应分析提供更真实的输入模型。

1 场址复杂入射波场

1.1 复杂入射波场确定性信息获取

由发生震损的 Koyna 重力坝、新丰江重力坝、Pacoima 拱坝和大开地铁车站等典型案例可知,引起工程震损的强震通常为浅源($d < 30$ km),

且场址震中距较小($e < 20$ km)。因此,本文重点关注浅源地震在近源场址引起的入射地震波特征。

震源和传播介质是获取场址入射地震波信息的基础。在震源方面,本文采用线状分布的全方位 P 波震源假设,震源地震波以柱面波形式向外传播。在传播介质方面,借鉴已有研究^[33-36]采用层状介质。对于浅源地震,以层状地壳代替传播介质,层状地壳的参数列于表 1,其中波速、密度和层厚数据来自 CRUST1.0 模型^[37],介质品质因子用以表达地震波传播过程中的幅值衰减^[38]。

表 1 传播介质参数
Table 1 Propagation medium parameters

介质	波速/(m/s)		密度/(kg/m ³)	厚度/m	品质因子	
	P波	SV波			Q_p	Q_s
地层1	2500	1070	2110	1000	80	100
地层2	4600	2590	2460	1500	100	150
地层3	6100	3530	2740	10 780	200	300
地层4	6500	3710	2830	12 120	200	300
地层5	6900	3930	2920	10 780	200	300
上地幔	7960	4430	3280	—	—	—

由波动理论可知^[39-40],传播介质中存在的分界面将引起地震波数量增加和性质改变,多层介质影响下将产生数量庞大、信息复杂的场址入射地震波。何卫平针对震源地震波到场址入射地震波的空间演化过程开展研究,并提出获取场址入射地震波信息的空间演化法^[32]。本文依据该方法获得震源 P 波引起的场址入射地震波信息,研究中采用的震源深度为 16 km,场址震中距为 10 km。场址入射地震波的幅值计算以单位幅值为基础,单位幅值取震源位于地层 4 中部,在震中引起的 P 波幅值。最终获得的幅值较显著的场址入射地震波在表 2 显示。

结果显示,场址入射地震波以差异显著的小角度倾斜入射。该现象说明,波动输入模型采用的垂直入射假定、单一倾斜入射波、P 波与 SV 波组合入射的假定均与场址入射地震波的真实情况存在差异。此外,场址入射地震波在幅值和到时的上也具备较大差异性。由此可见,复杂入射波场是浅源地震在近源场址形成入射地震波的基本特征,波动输入模型的改进须从拓展其入射波假定开始。

1.2 地面运动与波场信息验证

假设场址入射地震波中存在 m 条入射 P 波和 n 条入射 SV 波。入射波到达自由面后,在空间内形成 6 类地震波:入射 P 波及其反射 P 波、反射

表2 场址复杂入射地震波信息
Table 2 Information of incident site waves

编号	入射波性质	幅值	入射角/(°)	到时/s
1	P	0.679	13.0	3.40
2	P	-0.189	12.6	4.18
3	S	0.185	5.6	3.94
4	S	0.134	5.7	4.21
5	S	0.107	5.4	4.72
6	S	-0.083	5.5	5.26
7	P	-0.064	11.5	4.79
8	S	0.064	5.0	5.59
9	S	-0.058	5.5	5.80
10	P	0.053	12.2	4.96
11	S	-0.041	5.6	6.07
12	P	0.038	3.9	9.07
13	S	-0.034	5.3	6.58

SV 波 (分别记为 P、PP 和 PS), 入射 SV 波及其反射 P 波、反射 SV 波 (分别记为 S、SP 和 SS)。下文涉及到的地震波信息均以此为下标表示。依据场址复杂入射波场信息, 叠加入射波和反射波的贡献, 可得到场址地面运动两向分量的解析解, 即:

$$h(t) = \sum_{i=1}^m g_p^i(t-t_p)(\sin\theta_p^i + A_{pp}^i \sin\theta_p^i + A_{ps}^i \cos\theta_{ps}^i) + \sum_{j=1}^n g_s^j(t-t_s)(\cos\theta_s^j + A_{sp}^j \sin\theta_{sp}^j - A_{ss}^j \cos\theta_s^j) \quad (1)$$

$$v(t) = \sum_{i=1}^m -g_p^i(t-t_p)(\cos\theta_p^i + A_{pp}^i \cos\theta_p^i + A_{ps}^i \sin\theta_{ps}^i) + \sum_{j=1}^n g_s^j(t-t_s)(\sin\theta_s^j + A_{sp}^j \cos\theta_{sp}^j + A_{ss}^j \sin\theta_s^j) \quad (2)$$

式中: h 、 v 分别为场址地面运动的水平和垂直分量; i 为入射 P 波及其反射波的编号; j 为入射 SV 波及其反射波的编号; A 为入射波引起的反射波幅值系数, 计算公式参阅文献 [39—40]; g 为入射波的波函数; t_p 和 t_s 分别为入射 P 波和入射 SV 波的到时; θ 为入射波和反射波的传播角度, 满足斯奈尔定律。

结合场址入射地震波的入射角和式 (1)~式 (2) 可知, 任意场址入射地震波均对两向地震动存在贡献, 入射 P 波及其反射波对两向地面运动的贡献是波函数 g_p 的倍数, 入射 SV 波及其反射波对两向地面运动的贡献是波函数 g_s 的倍数。关于入射波波函数与地面运动时程间的关系可参阅文献 [29]。为展示场址地面运动的形成机制, 假设震源地地震波的波形如图 1(a) 所示, 考虑波传播过程影响得到的场址入射地震波波形如图 1(b) 所示。

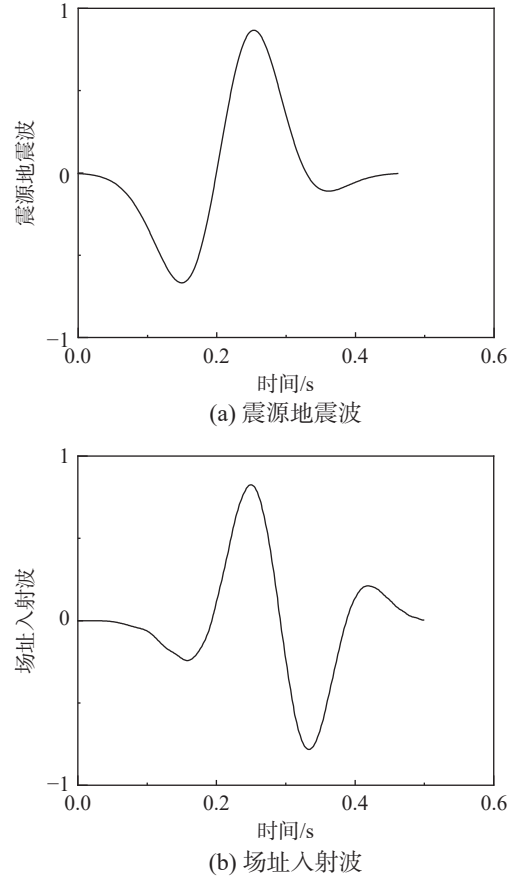


图1 震源地震波与场址入射地震波波形
Fig. 1 Waveforms of source wave and incident site wave

依据场址入射波波形、表2 数据和式 (1)~式 (2), 可得到形成两向地面运动的地震波成分。地震波成分形成两向地面运动的叠加关系在图2 展示, 图2 中时间轴上侧为地震波成分, 时间轴下侧为地震波成分叠加后形成的地面运动。在地震波成分中, 不同地震波左端对应时间为地震波的到时 (图2 中以 1P 波为例标出到时)。可看出, 空间演化形成的场址复杂入射波场存在极为复杂的叠加关系, 进而形成具备复杂时程信息的场址地面运动。

为验证表2 波场信息的正确性, 将波场对应的地面运动与数值模拟结果进行对比 (图3), 其中数值模拟结果依据全波场有限差分模拟方法获得。由图3 可知, 由复杂入射波场信息得到的场址地面运动与全波场有限差分模拟结果基本一致, 说明空间演化法得到的场址复杂入射波场信息是正确的。

2 非一致波动输入模型

2.1 非一致波动输入模型基本理念

地震波的空间演化分析说明, 浅源地震在近

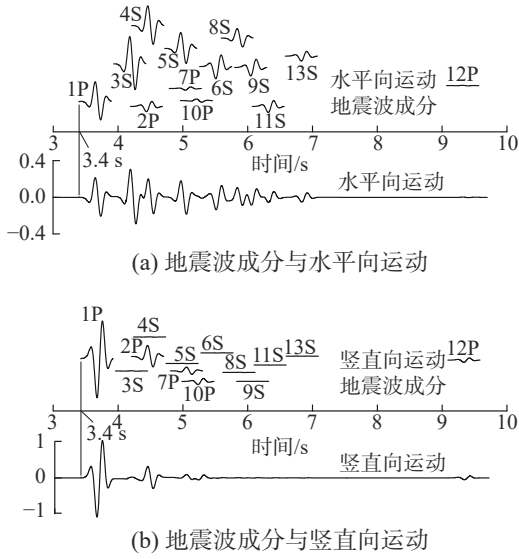


图2 场址地面运动形成机制

Fig. 2 Motion formation mechanism at the site

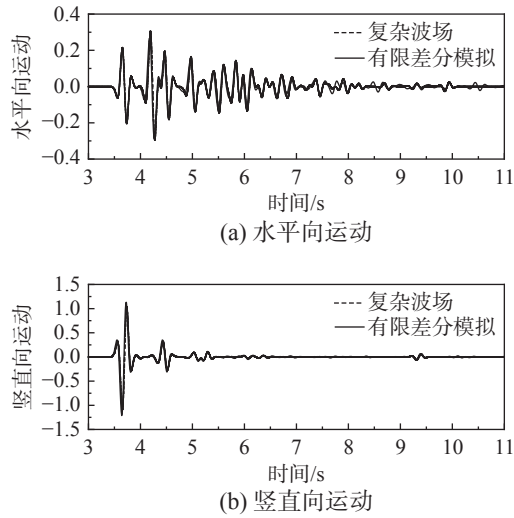


图3 复杂入射波场场址地面运动与数值解对比

Fig. 3 Motions at the site by complex incident waves and numerical simulation

源场址引起的入射地震波是复杂入射波场。鉴于当前波动输入模型采用的入射波假定与真实入射地震波特征并不完全吻合,使其在表达地面运动非一致特征上存在局限,据此本文提出发展非一致波动输入模型的基本理念:拓展波动输入的入射波假定,完成场址复杂入射波场的输入。

在复杂入射波场影响下,非一致波动输入模型边界节点的平衡方程为:

$$\begin{bmatrix} m_{xx} & 0 \\ 0 & m_{zz} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_x \\ \ddot{u}_z \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{xx} + \Delta c_{xx} & c_{xz} \\ c_{zx} & c_{zz} + \Delta c_{zz} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_x \\ \dot{u}_z \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{xx} + \Delta k_{xx} & k_{xz} \\ k_{zx} & k_{zz} + \Delta k_{zz} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_x \\ u_z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_x \\ f_z \end{Bmatrix} \quad (3)$$

式中:下标 x 和 z 代表水平向和竖直向; m 、 c 、

k 为边界节点的初始质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; Δc 、 Δk 为粘弹性边界对边界节点阻尼和刚度的修正; u 、 $\dot{u}$ 和 $\ddot{u}$ 为节点运动的位移、速度和加速度向量; f_x 和 f_z 为非一致波动输入模型对应边界节点力向量。

对于常用的方形截断模型,粘弹性边界对刚度和阻尼的修正,在侧边界为:

$$\begin{Bmatrix} \Delta c_{xx} \\ \Delta c_{zz} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Delta c_N \\ \Delta c_T \end{Bmatrix}, \quad \begin{Bmatrix} \Delta k_{xx} \\ \Delta k_{zz} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Delta k_N \\ \Delta k_T \end{Bmatrix} \quad (4)$$

在底边界为:

$$\begin{Bmatrix} \Delta c_{xx} \\ \Delta c_{zz} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Delta c_T \\ \Delta c_N \end{Bmatrix}, \quad \begin{Bmatrix} \Delta k_{xx} \\ \Delta k_{zz} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Delta k_T \\ \Delta k_N \end{Bmatrix} \quad (5)$$

式中: Δc_N 、 Δc_T 为粘弹性边界在法向和切向的阻尼修正; Δk_N 和 Δk_T 为粘弹性边界在法向和切向的刚度修正。

对于边界节点力,在侧边界为:

$$\begin{Bmatrix} f_x \\ f_z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \sum_{k=1}^n \sigma A + \Delta c_{xx} \dot{w}_x + \Delta k_{xx} w_x \\ \sum_{k=1}^n \tau A + \Delta c_{zz} \dot{w}_z + \Delta k_{zz} w_z \end{Bmatrix} \quad (6)$$

在底边界为:

$$\begin{Bmatrix} f_x \\ f_z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \sum_{k=1}^n \tau A + \Delta c_{xx} \dot{w}_x + \Delta k_{xx} w_x \\ \sum_{k=1}^n \sigma A + \Delta c_{zz} \dot{w}_z + \Delta k_{zz} w_z \end{Bmatrix} \quad (7)$$

式中: A 为边界节点面积; w 和 $\dot{w}$ 为自由场条件下单个地震波引起边界节点的位移和速度; σ 和 τ 为自由场条件下单个地震波在边界节点引起的法向应力和切向应力,计算公式见 2.2 节; n 为复杂波场中入射地震波的数量; k 为复杂波场中入射地震波的编号。

2.2 非一致波动输入模型实现过程

2.2.1 粘弹性边界参数取值

粘弹性边界参数依据文献 [23] 取值,边界法向的弹性和粘性参数为:

$$\Delta k_N = \frac{1}{1+A} \frac{\lambda + 2G}{r}, \quad \Delta c_N = B\rho v_p \quad (8)$$

边界切向的弹性和粘性参数为:

$$\Delta k_T = \frac{1}{1+A} \frac{G}{r}, \quad \Delta c_T = B\rho v_s \quad (9)$$

式中: λ 和 G 为介质拉梅常数; r 为边界与散射中心的距离,本文取为定值 (图 4); ρ 为介质密度; A 为平面波与散射波的幅值含量比; B 为物理波速与视波速的关系。

2.2.2 复杂波场的自由场应力

场址入射地震波存在 P 波和 SV 波两类性质

(表 2), 综合考虑入射波及其在自由面的反射波, 依据波动理论分别得到 6 类地震波在底边界和侧边界的应力表达式。

P 波在底边界的法向和切向应力为:

$$\begin{aligned}\sigma &= (\lambda + 2G \cos^2 \theta_p) v_p^{-1} \dot{g}_p(t - t_p - \Delta t_p^b), \\ \tau &= G \sin 2\theta_p v_p^{-1} \dot{g}_p(t - t_p - \Delta t_p^b)\end{aligned}\quad (10)$$

P 波在左侧边界的法向和切向应力为:

$$\begin{aligned}\sigma &= (\lambda + 2G \sin^2 \theta_p) v_p^{-1} \dot{g}_p(t - t_p - \Delta t_p^l), \\ \tau &= G \sin 2\theta_p v_p^{-1} \dot{g}_p(t - t_p - \Delta t_p^l)\end{aligned}\quad (11)$$

PP 波在左侧边界的法向和切向应力为:

$$\begin{aligned}\sigma &= (\lambda + 2G \sin^2 \theta_p) v_p^{-1} \dot{g}_{pp}(t - t_p - \Delta t_{pp}^l), \\ \tau &= -G \sin 2\theta_p v_p^{-1} \dot{g}_{pp}(t - t_p - \Delta t_{pp}^l)\end{aligned}\quad (12)$$

PS 波在左侧边界的法向和切向应力为:

$$\begin{aligned}\sigma &= G \sin 2\theta_{ps} v_s^{-1} \dot{g}_{ps}(t - t_p - \Delta t_{ps}^l), \\ \tau &= -G \cos 2\theta_{ps} v_s^{-1} \dot{g}_{ps}(t - t_p - \Delta t_{ps}^l)\end{aligned}\quad (13)$$

S 波在底边界的法向和切向应力为:

$$\begin{aligned}\sigma &= -G \sin 2\theta_s v_s^{-1} \dot{g}_s(t - t_s - \Delta t_s^b), \\ \tau &= G \cos 2\theta_s v_s^{-1} \dot{g}_s(t - t_s - \Delta t_s^b)\end{aligned}\quad (14)$$

S 波在左侧边界的法向和切向应力为:

$$\begin{aligned}\sigma &= G \sin 2\theta_s v_s^{-1} \dot{g}_s(t - t_s - \Delta t_s^l), \\ \tau &= G \cos 2\theta_s v_s^{-1} \dot{g}_s(t - t_s - \Delta t_s^l)\end{aligned}\quad (15)$$

SP 波在左侧边界的法向和切向应力为:

$$\begin{aligned}\sigma &= (\lambda + 2G \sin^2 \theta_{sp}) v_p^{-1} \dot{g}_{sp}(t - t_s - \Delta t_{sp}^l), \\ \tau &= -G \sin 2\theta_{sp} v_p^{-1} \dot{g}_{sp}(t - t_s - \Delta t_{sp}^l)\end{aligned}\quad (16)$$

SS 波在左侧边界的法向和切向应力为:

$$\begin{aligned}\sigma &= G \sin 2\theta_s v_s^{-1} \dot{g}_{ss}(t - t_s - \Delta t_{ss}^l), \\ \tau &= G \cos 2\theta_s v_s^{-1} \dot{g}_{ss}(t - t_s - \Delta t_{ss}^l)\end{aligned}\quad (17)$$

式中: σ 和 τ 分别为边界法向和切向应力; λ 和 G 为地基介质的拉梅常数; θ 为入射波和反射波的传播角度; $\dot{g}$ 为入射波和反射波的速度时程; t_p 、 t_s 分别为 P 波和 S 波到达参考点的时间, 从表 2 获取; Δt 为 6 类地震波在边界节点和参考点间传播引起的时间滞后; 上标 l 和 b 分别代表节点位于左侧边界和底边界。

6 类地震波在边界节点的时间滞后计算列于式 (18)~式 (23), 式中 (x, z) 为边界节点坐标。时滞的正值代表时间延后, 负值代表时间超前。

$$\Delta t_p = (x \sin \theta_p - z \cos \theta_p) v_p^{-1} \quad (18)$$

$$\Delta t_{pp} = (x \sin \theta_p + z \cos \theta_p) v_p^{-1} \quad (19)$$

$$\Delta t_{ps} = (x \sin \theta_{ps} + z \cos \theta_{ps}) v_s^{-1} \quad (20)$$

$$\Delta t_s = (x \sin \theta_s - z \cos \theta_s) v_s^{-1} \quad (21)$$

$$\Delta t_{sp} = (x \sin \theta_{sp} + z \cos \theta_{sp}) v_p^{-1} \quad (22)$$

$$\Delta t_{ss} = (x \sin \theta_s + z \cos \theta_s) v_s^{-1} \quad (23)$$

3 非一致波动输入模型的验证

3.1 截断模型和入射地震波

本部分采用有限单元法验证非一致波动输入模型的有效性, 采用尺寸为 $2 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 的方形截断模型 (图 4), 网格尺寸 5 m。地基参数由表 1 地层 1 获取, 弹性模量为 6.705 GPa, 泊松比为 0.389, 密度为 2110 kg/m^3 , P 波和 SV 波波速分别为 2500 m/s 和 1070 m/s。参考点 R 位于模型自由面中部, 位置 A 和 B 位于 R 两侧 0.5 km 位置。

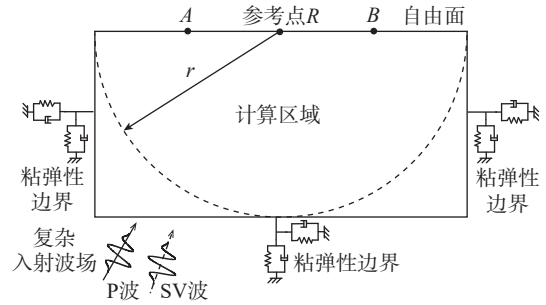


图 4 算例模型

Fig. 4 Example model

入射地震波为震源 P 波形成的场址复杂入射波场 (表 2), 入射波波形均假设为图 1(b), 模拟过程中对入射波进行滤波处理, 滤波范围为 0.1 Hz~20 Hz。

3.2 参考点运动误差

本部分采用 2 个算例验证非一致波动输入模型的效果。算例 1 的场址入射地震波由单一震源 P 波形成, 主要波场信息可参考表 2; 算例 2 的场址入射地震波由 20 个随机位置的震源 P 波形成, 该算例得到的场址入射地震波数量较多, 不再列出。两个算例中, 地面运动的解析解由式 (1) 和式 (2) 计算。另外, 为考察粘弹性边界参数取值对精度的影响, 分别采用文献 [23] 和文献 [24] 的推荐参数进行验算。

采用文献 [23] 的推荐参数时, 非一致波动输入模型得到的参考点地面运动与解析解的对比在图 5 显示。无论是单一震源情况, 还是多震源情况, 非一致波动输入模型得到的参考点地面运动与解析解基本一致, 说明非一致波动输入模型可准确表达场址内复杂入射波场引起的地面运动。

为考察非一致波动输入模型表达地面运动的误差, 将不同计算方案得到的参考点地面运动与解析解的峰值对比列于表 3。采用文献 [23] 推荐参数时, 算例 1 中参考点的水平向和竖直向运动

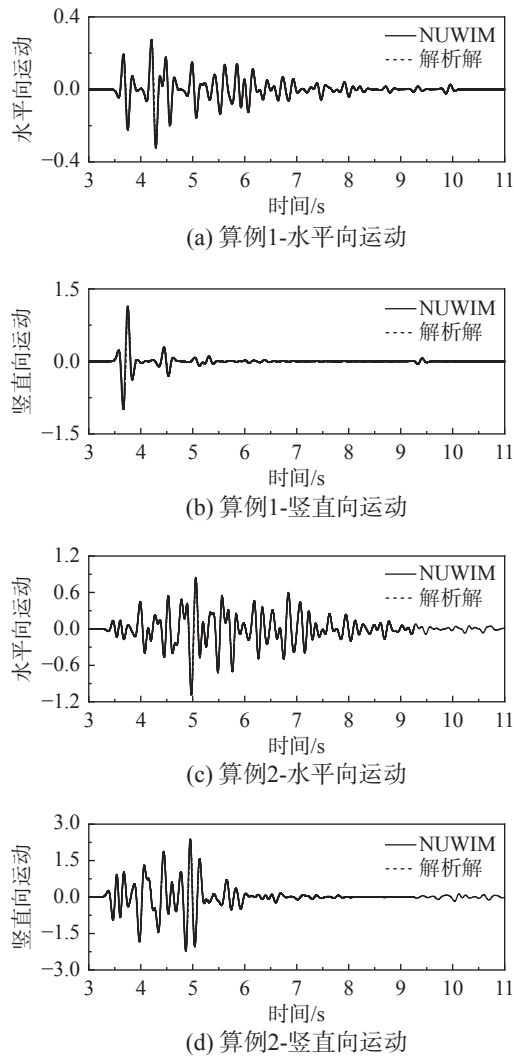


图5 非一致波动输入模型得到的参考点运动与解析解对比
($A=0.8$, $B=1.1$)

Fig. 5 Motion at point R from NUWIM and analytical result
($A=0.8$, $B=1.1$)

表3 非一致波动输入模型参考点运动误差
Table 3 Motion errors at point R from NUWIM

文献推荐参数	算例	运动分量	运动峰值		误差/(%)
			NUWIM	解析解	
$A=0.8$, $B=1.1^{[23]}$	1	水平向	-0.3245	-0.3211	1.06
		竖直向	1.1387	1.1370	0.14
	2	水平向	-1.0718	-1.0833	1.07
		竖直向	2.3834	2.3744	0.38
$A=1.0$, $B=1.0^{[24]}$	1	水平向	-0.3246	-0.3211	1.08
		竖直向	1.1387	1.1370	0.15
	2	水平向	-1.0721	-1.0833	1.04
		竖直向	2.3837	2.3744	0.39

的误差分别为 1.06% 和 0.14%，算例 2 中参考点的水平向和竖直向运动的最大误差分别为 1.07% 和 0.38%；采用文献 [24] 推荐参数时，算例 1 中水平向和竖直向运动的误差分别为 1.08% 和 0.15%，

算例 2 中水平向和竖直向运动的最大误差分别为 1.04% 和 0.39%。由此可知，在推荐的粘弹性边界参数下，非一致波动输入模型可在较高精度水平上完成场址复杂入射波场的表达。

3.3 截断模型内的波场

以算例 1 展示非一致波动输入模型对截断模型内波场的表达效果，选取 3.45 s、4.57 s 和 6.93 s 三个时刻的运动云图示于图 6。为识别模型中的主要地震波，将表 2 中的入射地震波及其反射波的波前在图中显示，波前以“编号+入射地震波性质+反射波性质”的形式在图中标注，如 1P、1PP 和 1PS 代表编号为 1 的入射 P 波及其形成的反射 P 波和反射 SV 波。表 2 中入射地震波数量为 13，其中 P 波数量为 5、SV 波数量为 8，综合考虑入射波和反射波共形成 39 个波前。

图 6(a) 为 $t=3.45$ s 的波场快照，此时模型中的波场由 1P、3S 和 4S 引起，其中 1P 产生的两条反射波 1PP 和 1PS 也在模型中出现，3S 和 4S 并未传播至自由面，尚未产生反射波。由于 1PP、1PS 和 4S 地震波尚未对模型内运动场产生显著影响，在模型中部可清晰地辨识出 1P 波，在模型底部也可辨识 3S 波对 1P 波的影响。图 6(b) 为 $t=4.57$ s 的波场快照，该时刻模型内存在 4 条入射波 (5S、7P、6S 和 10P) 和 5 条反射波 (2PP、4SP、3SS、2PS 和 4SS) 的波前。由于地震波数量较多，产生的相互叠加效果使截断模型内的运动场变得复杂，难以直观辨识出其中的地震波。图 6(c) 为 $t=6.93$ s 的波场快照，此时多数地震波已传播出截断模型范围，表 2 的入射地震波中仅有 3 条反射波 (11SS、13SP 和 13SS) 的波前仍在模型内。算例 2 的波场情况也类似。

由截断模型内的波场可知，非一致波动输入模型继承传统波动输入模型在模拟地震波传播效应的优势，可完整表达复杂波场的传播过程。

3.4 地面运动的非一致特征

本部分以采用文献 [23] 推荐参数的算例 2 展示非一致波动输入模型对地面运动非一致特征的表达。非一致波动输入模型在位置 A 和 B 得到的运动时程在图 7 显示，点 A、点 B 水平向运动的峰值的出现时间为 4.924 s 和 5.015 s，竖直向运动的峰值的出现时间为 4.907 s 和 4.990 s。此外，特征点 A 和点 B 的两向运动时程在细节特征方面也存在差异，如在水平向运动中的位置 a，点 A 运动的局部峰值大于点 B，在 b 位置则相反；在竖直向

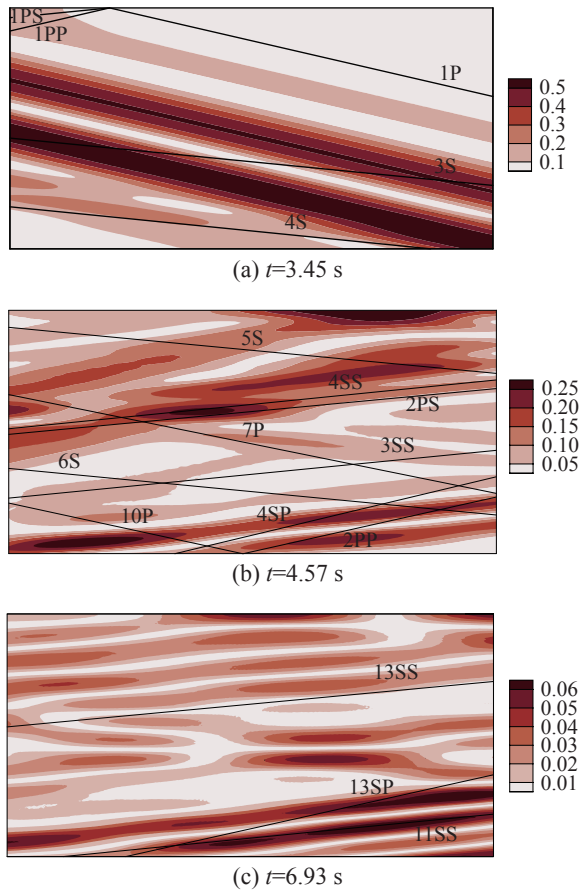
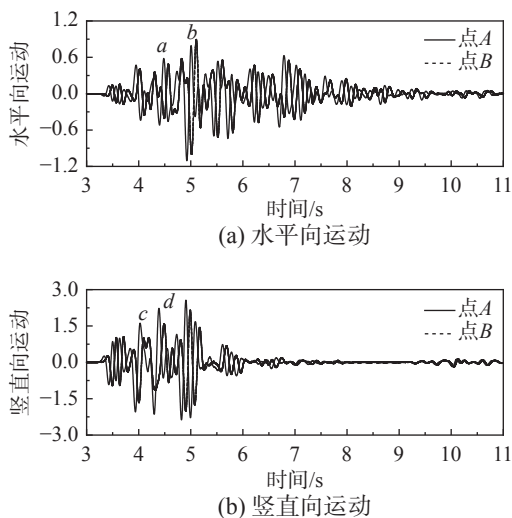


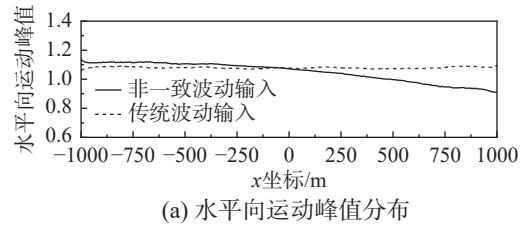
图6 不同时刻波场快照和波前示意图

Fig. 6 Wavefield snapshot at different times and wavefronts

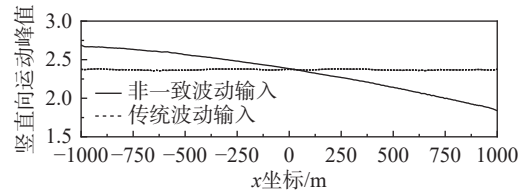
运动中 c 和 d 位置的规律类似。因此, 非一致波动输入模型可有效表达地面运动非一致特征中的时间滞后和时程形状差异现象。需要提及的是, 点 A 和点 B 的时程形状差异并不显著, 其原因是本文以确定性波场完成输入, 并未考虑震源和传播介质中随机性因素对波场的影响。

图7 点 A 和点 B 的运动差异Fig. 7 Motion shape difference at Points A and B

非一致波动输入模型和传统波动输入模型得到的地面运动峰值分布在图8显示, 非一致波动输入模型采用的波场取自算例2, 传统波动输入模型采用的地面运动取自复杂入射波场得到参考点 R 的地面运动, 并依据垂直入射假定得到入射 P 波和 SV 波的时程信息。由图可知, 传统波动输入模型的地面运动峰值基本保持一致, 其浮动由粘弹性边界的误差引起。非一致波动输入模型引起的地面运动峰值变化显著, 在模型范围内, 水平向运动峰值从左到右逐渐减小, 最小峰值 0.910、最大峰值 1.139; 竖向运动规律与水平向相同, 最小峰值 1.839、最大峰值 2.694。因此, 与传统波动输入模型相比, 非一致波动输入模型在表达地面运动峰值的空间变化方面取得显著进步。



(a) 水平向运动峰值分布



(b) 竖向运动峰值分布

图8 自由面运动峰值分布

Fig. 8 Peak motion distribution at the free surface

综上, 非一致波动输入模型可有效完成场址复杂入射波场的输入工作, 获得的参考点地面运动具备较高精度。非一致波动输入模型真实模拟了复杂入射波场在截断模型内的物理传播过程, 可全面表达地面运动的时间滞后、峰值变化和时程形状差异等非一致特征。

4 结论

波动输入模型的入射波假定无法体现场址复杂入射波场特征, 使其在表达地面运动非一致特征方面存在局限。为解决该问题, 本文通过空间演化分析获得场址入射地震波的确定性信息, 证实场址入射地震波是复杂入射波场, 并结合粘弹性边界发展非一致波动输入模型。非一致波动输入模型继承传统波动输入模型在模拟地震波传播效应和地基辐射阻尼效应方面的优势, 可有效完成场址复杂入射波场的输入工作。非一致波动输

入模型对真实入射波场和复杂波场叠加关系的表达,使其可全面表达地面运动的时间滞后、峰值变化和时程形状差异等非一致特征。

非一致波动输入模型在入射波场和人工边界方面均具备较强的拓展性,本文实现任意数量、任意角度组合入射的平面 P 波和 SV 波的模拟,虽然文中研究以震源 P 波开展,也可推广至震源 SV 波情况(场址入射地震波为体波的情况)。当场址入射地震波包含首波、面波等其他成分时,可在本文基础上拓展发展更普适的非一致波动输入模型。在人工边界方面,非一致波动输入模型也可与粘性边界、透射边界等相结合获得相应的输入模型。

本文基于空间演化法给出场址入射地震波的不确定性信息发展非一致波动输入模型。实际地震过程中,震源破裂过程和传播介质具备的复杂性和不可测性均会对场址入射地震波信息产生影响。震源方面的影响因素如地震断层类型、走向和滑移方向,断裂带的分布范围和子断裂破裂过程等;传播介质方面的影响因素如分界面的产状、复杂地质构造等。综合考虑以上因素可知,实际地震形成的场址入射地震波信息将更加复杂,提高场址复杂入射波场对场址真实波场的代表性,是推进非一致波动输入模型完善的重要工作。

近源场址地震动存在永久位移和近断层脉冲等现象,依据空间演化法波场信息对以上现象开展解释,是须进一步开展的研究。另外,受震源破裂过程和传播介质复杂性的影响,场址入射地震波可能在波形方面存在较大差异,针对场址入射地震波波形的差异性及其对地面运动的影响开展研究,对精确解释强震动的时域特征具有重要意义。笔者会继续推进相关研究的进展。

参考文献:

- [1] JOYNER W B, CHEN A T F. Calculation of nonlinear ground response in earthquakes [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1975, 65(5): 1315 — 1336.
- [2] 廖振鹏. 工程波动理论导论 [M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2002: 136 — 285.
LIAO Zhenpeng. Introduction to wave motion theories in engineering [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2002: 136 — 285. (in Chinese)
- [3] 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 Jingbo, LYU Yandong. A direct method for analysis of dynamic soil-structure interaction [J]. China Civil Engineering Journal, 1998, 31(3): 55 — 64. (in Chinese)
- [4] 杜修力. 工程波动理论与方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2009: 367 — 431.
DU Xiuli. Theories and methods of wave motion for engineering [M]. Beijing: Science Press, 2009: 367 — 431. (in Chinese)
- [5] 赵密. 近场波动有限元模拟的应力型时域人工边界条件及其应用[D]. 北京: 北京工业大学, 2009.
ZHAO Mi. Stress-type time-domain artificial boundary condition for finite-element simulation of near-field wave motion and its engineering application [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2009. (in Chinese)
- [6] 孔宪京, 屈永倩, 邹德高, 等. 强震作用下面板堆石坝跨尺度面板开裂演化分析[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(6): 989 — 996.
KONG Xianjing, QU Yongqian, ZOU Degao, et al. Cross-scale crack evolution analysis for face slab in concrete faced rockfill dams under strong earthquake [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(6): 989 — 996. (in Chinese)
- [7] 梁建文, 梁佳利, 张季, 等. 深厚软土地中三维凹陷地形非线性地震响应分析[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(7): 1196 — 1205.
LIANG Jianwen, LIANG Jiali, ZHANG Ji, et al. Nonlinear seismic response of 3D canyon in deep soft soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(7): 1196 — 1205. (in Chinese)
- [8] 李明超, 张佳文, 张梦溪, 等. 地震波斜入射下混凝土重力坝的塑性损伤响应分析[J]. 水利学报, 2019, 50(11): 1326 — 1338, 1349.
LI Mingchao, ZHANG Jiawen, ZHANG Mengxi, et al. Plastic damage response analysis of concrete gravity dam due to obliquely incident seismic waves [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(11): 1326 — 1338, 1349. (in Chinese)
- [9] HUANG J Q, ZHAO M, DU X L. Non-linear seismic responses of tunnels within normal fault ground under obliquely incident P waves [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, 61: 26 — 39.
- [10] 岑威钧, 袁丽娜, 袁翠平, 等. 地震波斜入射对高面板坝地震反应的影响[J]. 地震工程学报, 2015, 37(4): 926 — 932.
CEN Weijun, YUAN Li'na, YUAN Cuiping, et al. Influence on seismic response of high concrete face rockfill dams due to obliquely incident seismic waves [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015, 37(4): 926 — 932. (in Chinese)
- [11] 马怀发, 杨茹. 三维饱和地基人工黏弹性边界[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2015, 13(2): 128 — 135.
MA Huaifa, YANG Ru. 3D viscous-spring artificial boundaries of infinite saturated foundation [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2015, 13(2): 128 — 135. (in Chinese)

- [12] 郭胜山, 陈厚群, 李德玉, 等. 重力坝与坝基体系地震损伤破坏分析[J]. 水利学报, 2013, 44(11): 1352 — 1358.
GUO Shengshan, CHEN Houqun, LI Deyu, et al. Seismic damage and failure analysis of gravity dam and foundation system [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, 44(11): 1352 — 1358. (in Chinese)
- [13] WANG F, SONG Z Q, LIU Y H, et al. Seismic wave input method for high earth dams considering the transmission amplification effect of the bedrock — overburden interface [J]. *Computers and Geotechnics*, 2021, 130: 103927.
- [14] 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.
LI Liang, LI Guo, DU Xiuli, et al. A full explicit numerical algorithm for near-field wave motion of fluid-saturated porous media in time domain [J]. *Engineering Mechanics*, 2020, 37(8): 20 — 31. (in Chinese)
- [15] 宝鑫, 刘晶波, 李述涛, 等. 土-结构相互作用对储液结构动力反应的影响研究[J]. 工程力学, 2021, 38(增刊 1): 125 — 132.
BAO Xin, LIU Jingbo, LI Shutao, et al. Influence analysis of soil-structure interaction on the dynamic response of storage tanks [J]. *Engineering Mechanics*, 2021, 38(Suppl 1): 125 — 132. (in Chinese)
- [16] 章旭斌, 谢志南. 波动谱元模拟中透射边界稳定性分析[J]. 工程力学, 2022, 39(10): 26 — 35.
ZHANG Xubin, XIE Zhinan. Stability analysis of transmitting boundary in wave spectral element simulation [J]. *Engineering Mechanics*, 2022, 39(10): 26 — 35. (in Chinese)
- [17] 李会芳, 赵密, 杜修力. 竖向成层介质中标量波传播问题的高精度人工边界条件[J]. 工程力学, 2022, 39(5): 55 — 64.
LI Hui Fang, ZHAO Mi, DU Xiuli. High-precision artificial boundary condition for scalar wave propagation in vertical stratified media [J]. *Engineering Mechanics*, 2022, 39(5): 55 — 64. (in Chinese)
- [18] BAO X, LIU J B, LI S T, et al. A new viscoelastic artificial boundary with improved numerical stability in explicit calculation of wave propagation problems in infinite domains [J]. *Computers and Geotechnics*, 2022, 145: 104698.
- [19] WANG F M, TULAMAITI Y, FANG H Y, et al. Seismic response characteristics of polymer anti-seepage wall in earth dam based on earthquake wave motion input method [J]. *Structures*, 2023, 47: 358 — 373.
- [20] LYSMER J, KUHLEMAYER R L. Finite dynamic model for infinite media [J]. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 1969, 95(4): 859 — 877.
- [21] LIAO Z P, WONG H L. A transmitting boundary for the numerical simulation of elastic wave propagation [J]. *International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 1984, 3(4): 174 — 183.
- [22] DEEKS A J, RANDOLPH M F. Axisymmetric time-domain transmitting boundaries [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1994, 120(1): 25 — 42.
- [23] 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 Xiuli, ZHAO Mi, WANG Jinting. A stress artificial boundary in FEA for near-field wave problem [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2006, 38(1): 49 — 56. (in Chinese)
- [24] 刘晶波, 杜义欣, 闫秋实. 粘弹性人工边界及地震动输入在通用有限元软件中的实现[J]. 防灾减灾工程学报, 2007, 27(增刊 1): 37 — 42.
LIU Jingbo, DU Yixin, YAN Qiushi. A stress artificial boundary in FEA for near-field wave problem [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2007, 27(Suppl 1): 37 — 42. (in Chinese)
- [25] ZERVA A. Spatial variation of seismic ground motions: Modeling and engineering applications [M]. Boca Raton: CRC Press, 2009: 1 — 64.
- [26] 何卫平, 熊堃, 卢晓春. 确定性地震动空间差异对重力坝地震响应影响研究[J]. 水利学报, 2019, 50(8): 913 — 924.
HE Weiping, XIONG Kun, LU Xiaochun. Influence of deterministic spatial variation of motions on seismic response of gravity dam [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, 50(8): 913 — 924. (in Chinese)
- [27] KOMADA H, HAYASHI M, KITAHARA Y, et al. Three-dimensional dynamic analysis of a rockfill dam for inclined incident traveling seismic wave [C]// Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers. Japan Society of Civil Engineers, 1977, 1977(261): 77 — 92.
- [28] 苑举卫, 杜成斌, 刘志明. 基于设计地震动的地震波斜入射波动输入研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2010, 42(5): 250 — 255.
YUAN Juwei, DU Chengbin, LIU Zhiming. Study on oblique wave input based on design seismic component [J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2010, 42(5): 250 — 255. (in Chinese)
- [29] 何卫平, 何蕴龙. 基于两向设计地震动的二维自由场构建[J]. 工程力学, 2015, 32(2): 31 — 36, 44.
HE Weiping, HE Yunlong. Free field wave motions based on two components of design earthquake ground motion [J]. *Engineering Mechanics*, 2015, 32(2): 31 — 36, 44. (in Chinese)
- [30] 韩鲁, 宋志强, 王飞, 等. 基于设计地震动的覆盖层场地空间自由场构建[J]. 工程力学, 2022, 39(7): 137 — 146.
HAN Lu, SONG Zhiqiang, WANG Fei, et al. Construction of free fields in bedrock-overburden site spaces based on designed ground motions [J]. *Engineering Mechanics*, 2022, 39(7): 137 — 146. (in Chinese)

- applications to earthquake engineering [M]. XIE Lili, LYU Dagang, trans. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2005: 192. (in Chinese)
- [33] HATZIGEORGIOU G D, BESKOS D E. Inelastic displacement ratios for SDOF structures subjected to repeated earthquakes [J]. *Engineering Structures*, 2009, 31(11): 2744 — 2755.
- [34] BOORE D M, JOYNER W B, FUMAL T E. Equations for estimating horizontal response spectra and peak acceleration from western North American earthquakes: A summary of recent work [J]. *Seismological Research Letters*, 1997, 68(1): 128 — 153.
- [35] 陈传尧. 疲劳与断裂 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.
CHEN Chuanyao. Fatigue and fracture [M]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology Press, 2002. (in Chinese)
- [36] 姚卫星. 结构疲劳寿命分析 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
YAO Weixing. Fatigue life prediction of structures [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2003. (in Chinese)
- [37] 李万润, 范科友, 杜永峰. 考虑叶片旋转效应的风力发电塔架结构风 [J]. *工程力学*, 2023, 40(4): 193 — 204, 256.
LI Wanrun, FAN Keyou, DU Yongfeng. Response analysis of wind turbine structure considering blade rotation effect under wind-earthquake coupling [J]. *Engineering Mechanics*, 2023, 40(4): 193 — 204, 256. (in Chinese)
- [38] 戴靠山, 胡皓, 梅竹, 等. 长周期地震下风力发电塔架结构地震反应分析 [J]. *工程力学*, 2021, 38(8): 213 — 221.
DAI Kaoshan, HU Hao, MEI Zhu, et al. Seismic response analysis of wind power tower under long period ground motions [J]. *Engineering Mechanics*, 2021, 38(8): 213 — 221. (in Chinese)
- [39] 席仁强, 许成顺, 杜修力, 等. 工作状态对风力发电机地震响应的影响 [J]. *工程力学*, 2019, 36(4): 80 — 88.
XI Renqiang, XU Chengshun, DU Xiuli, et al. Effects of operating conditions on the seismic response of wind turbines [J]. *Engineering Mechanics*, 2019, 36(4): 80 — 88. (in Chinese)

(上接第 29 页)

- [31] 李闯, 宋志强, 王飞, 等. 地震动空间差异对沥青混凝土心墙土石坝-覆盖层地基系统响应影响研究 [J]. *振动与冲击*, 2022, 41(19): 37 — 47.
LI Chuang, SONG Zhiqiang, WANG Fei, et al. Effects of spatial difference of ground motion on seismic response of asphalt concrete core wall rockfill dam-overburden foundation system [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2022, 41(19): 37 — 47. (in Chinese)
- [32] 何卫平. 重大工程场址复杂入射波场信息的确定性评估方法 [R]. 北京: 北京工业大学, 2021: 5 — 26.
HE Weiping. Deterministic assessment of site wave field in major project site [R]. Beijing: Beijing University of Technology, 2021: 5 — 26. (in Chinese)
- [33] 陈运泰. 多层弹性半空间中的地震波(一) [J]. *地球物理学报*, 1974, 17(1): 20 — 43.
CHEN Yuntai. Seismic waves in multilayered elastic half-space (I) [J]. *Acta Geophysic Sinica*, 1974, 17(1): 20 — 43. (in Chinese)
- [34] 布列霍夫斯基赫. 分层介质中的波 [M]. 杨训仁, 译. 2版. 北京: 科学出版社, 1985: 1 — 81.
BREKHOVSKIKH L M. Waves in layered media [M]. YANG Xunren, trans. 2nd ed. Beijing: Science Press, 1985: 1 — 81. (in Chinese)
- [35] 高永新, 胡恒山. 水平分层孔隙介质中点源激发的震电波场数值模拟及分析 [J]. *地球物理学报*, 2009, 52(8): 2093 — 2104.
GAO Yongxin, HU Hengshan. Numerical simulation and analysis of seismoelectromagnetic wave fields excited by a point source in layered porous media [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2009, 52(8): 2093 — 2104. (in Chinese)
- [36] 何耀锋, 陈蔚天, 陈晓非. 利用广义反射-透射系数方法求解含低速层水平层状介质模型中面波频散曲线问题 [J]. *地球物理学报*, 2006, 49(4): 1074 — 1081.
HE Yaofeng, CHEN Weitian, CHEN Xiaofei. Normal mode computation by the generalized reflection-transmission coefficient method in planar layered half space [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2006, 49(4): 1074 — 1081. (in Chinese)
- [37] LASKE G, MASTERS G, MA Z, et al. Update on CRUST1. 0—A 1-degree global model of Earth's crust [C]// Geophysical Research Abstracts. Vienna, Austria: EGU General Assembly 2013, 2013, 15(15): 2658.
- [38] BARTON N. Rock quality, seismic velocity, attenuation and anisotropy [M]. London: Taylor & Francis, 2006: 181 — 294.
- [39] AKI K, RICHARDS P G. Quantitative seismology [M]. 2nd ed. Sausalito: University Science Books, 2002: 119 — 188.
- [40] 万永革. 地震学导论 [M]. 北京: 科学出版社, 2016: 83 — 113.
WAN Yongge. Introduction to seismology [M]. Beijing: Science Press, 2016: 83 — 113. (in Chinese)