



地震学报

ACTA SEISMOLOGICA SINICA



ISSN 0253-3782 CN 11-2021/P

## 《强地震动模拟及工程应用专辑》前言

梁建文 刘中宪 巴振宁 任叶飞

### Preface to the special issue on strong ground motion simulation and its application

Liang Jianwen, Liu Zhongxian, Ba Zhenning, Ren Yefei

引用本文:

梁建文, 刘中宪, 巴振宁, 任叶飞. 2022. 《强地震动模拟及工程应用专辑》前言. 地震学报[J], 44(1): 1–4. DOI: 10.11939/jass.20210200

Liang J W, Liu Z X, Ba Z N, Ren Y F. 2022. Preface to the special issue on strong ground motion simulation and its application. *Acta Seismologica Sinica*[J], 44(1): 1–4. DOI: 10.11939/jass.20210200

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11939/jass.20210200>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 2016年熊本 $M_j7.3$ 地震的工程地震动参数模拟及分布特征分析

Engineering ground motion parameters simulation and distribution characteristics analysis of Kumamoto  $M_j7.3$  earthquake in 2016

地震学报. 2019, 41(1): 100–110 <https://doi.org/10.11939/jass.20180070>

#### 2013年乌鲁木齐 $M_S5.6$ 和 $M_S5.1$ 地震强地震动模拟研究

Ground motion simulation of 2013 Urumqi  $M_S5.6$  and  $M_S5.1$  earthquakes

地震学报. 2017, 39(5): 751–763 <https://doi.org/10.11939/jass.2017.05.010>

#### 2016年地震和火山电磁方法国际研讨会专辑前言

Preface to the special issue on the international workshop on electromagnetic studies of earthquakes and volcanoes in 2016

地震学报. 2017, 39(4): 451–454 <https://doi.org/10.11939/jass.2017.04.001>

#### 芦山地震强地面运动之阿里亚斯强度及Newmark位移特征研究

Characteristics of Arias intensity and Newmark displacement of strong ground motion in Lushan earthquake

地震学报. 2021, 43(6): 768–786 <https://doi.org/10.11939/jass.20200180>

#### 台湾双冬断层近场脉冲型地震动的数值模拟

Numerical simulation of near-field pulse-like ground motion for the Shuantung fault in Taiwan region

地震学报. 2019, 41(3): 377–390 <https://doi.org/10.11939/jass.20180103>

#### 实际地形对2010年玉树 $M_S7.1$ 地震动力学破裂过程及地震动特征的影响

Influence of actual topography on the source dynamic rupture process and strong ground motion of the 2010 Yushu  $M_S7.1$  earthquake

地震学报. 2021, 43(1): 57–72 <https://doi.org/10.11939/jass.20200033>

梁建文, 刘中宪, 巴振宁, 任叶飞. 2022. 《强地震动模拟及工程应用专辑》前言. 地震学报, 44(1): 1-4. doi: 10.11939/jass.20210200.

Liang J W, Liu Z X, Ba Z N, Ren Y F. 2022. Preface to the special issue on strong ground motion simulation and its application. *Acta Seismologica Sinica*, 44(1): 1-4. doi: 10.11939/jass.20210200.

## 《强地震动模拟及工程应用专辑》前言<sup>\*</sup>

梁建文<sup>1)</sup> 刘中宪<sup>2)</sup> 巴振宁<sup>1)</sup> 任叶飞<sup>3)</sup>

1) 中国天津 300350 天津大学建筑工程学院

2) 中国天津 300384 天津城建大学土木工程学院

3) 中国哈尔滨 150080 中国地震局工程力学研究所

doi: 10.11939/jass.20210200 中图分类号: P315.9 文献标识码: A

### Preface to the special issue on strong ground motion simulation and its application

Liang Jianwen<sup>1)</sup> Liu Zhongxian<sup>2)</sup> Ba Zhenning<sup>1)</sup> Ren Yefei<sup>3)</sup>

1) School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China

2) School of Civil Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China

3) Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China

强地震动模拟分析涉及地震学、岩石力学、土动力学等多个学科,是工程地震学的核心内容之一,国内外学者在该领域已取得较多重要进展.近年来,随着国家韧性城乡建设的需要,区域复杂场地地震区划及重大工程建设对地震动场的准确模拟提出了更高要求.综合考虑震源、路径和场地效应的区域尺度地震动模拟以及场地-结构(群)地震相互作用等已成为当前研究的热点和难点.随着计算机软硬件技术的飞速提升及三维地质信息、地震观测数据的积累,目前已可实现从断层动力破裂到城市建筑群地震破坏的全过程模拟(陆新征, 2020).

基于物理模型的数值模拟方面,有限差分法、有限元法、谱元法、边界元法等数值方法取得了长足的进步,对实际岩土层复杂的介质特性和几何特征的适应性越发良好(贺春晖等, 2017);针对近断层地震动模拟,考虑实际复杂几何特征及局部参数的断层运动学或动力学模型逐步完善.由于核电站等抗震设计对地震动频带的要求较高,近年来地震动模拟有效频率范围也在不断提升(Poursartip *et al*, 2020).各类数值模拟方法均有其优势和局限性,仍需不断发展完善,如有限元、有限差分法在处理高频波动时存在的数值频散问题,谱元法在处理跨尺度、复杂几何形状等问题中存在的非均匀网格协调性问题,以及边界元方法存在的介质非线性的高效积分难题等.另外,由于地震动形成的全过程存在不确定性,随机有限

<sup>\*</sup> 基金项目 国家自然科学基金项目(U2139208)资助.  
收稿日期 2022-01-03 收到初稿, 2022-01-05 决定采用修改稿.  
作者简介 梁建文, 博士, 教授, 主要从事工程地震和工程抗震研究,  
e-mail: liang@tju.edu.cn



断层法、经验格林函数法等随机方法也在不断发展。综合确定性数值法和随机法的优势,采用随机有限断层法模拟高频地震动、数值法模拟低频地震动的确定性与随机性混合的模拟方法在区域尺度场地宽频地震动模拟中被广泛应用。

国内外有大量城市坐落于高地震烈度的沉积盆地或河谷之中,盆地或河谷的地震动放大效应研究已取得丰硕成果(Triffunac, 2016)。但对城市直下型地震,对于坐落在沉积盆地或河谷之中的城市而言,需考虑近断层效应和盆地或河谷效应的耦合作用,极大地增加了问题的复杂性,如何进一步提高现有数值方法的有效模拟频率、计算效率、稳定性,以及科学考虑盆地表层松软土层非线性效应,还需要进行地震学、工程学、计算科学等的跨学科探索与攻关。

场地-结构(群)相互作用方面,目前关于区域场地如盆地、山体地形等与建筑群的地震相互作用已有较多进展,揭示了密集建筑群对地震动的明显影响。另外,城市地下空间大规模开发利用,地下结构(群)对地震动的影响及临近结构物抗震问题亦引起广泛关注,特别是超大型地下结构(群)对地震波的散射效应需充分考虑结构形式、上覆土层厚度以及邻近结构相互作用等因素。

此外,随着近几年人工智能技术的推进,基于机器学习的地震动模拟与预测成为工程地震学领域的一个重要探索方向。典型应用为采用实测数据或数值模拟结果构建数据集,借助人工神经网络等构建地震动预测方程。为进一步揭示地震动形成的全过程物理机制,机器学习算法在近断层地震动和宽频地震动模拟中也有所发展(Khosravikia, Clayton, 2021)。

为了集中展示强地震动模拟及工程应用的最新进展,特组织出版《强地震动模拟及工程应用专辑》。本专辑论文共 16 篇,研究内容主要涵盖断层效应模拟、场地地震响应分析、地震动模拟方法以及场地-结构(群)相互作用等方面,具体如下:

### 1) 断层效应模拟

盆地直下型断层发震常导致坐落于盆地之上的城市发生严重震害。于彦彦等采用谱元法模拟不同位置直下型有限断层破裂时盆地内的强地震动分布场,重点研究了断层位置对三维沉积盆地地震动影响的机理,可为盆地地区地震灾害风险评估提供参考。

为拓展单台工作站模拟大尺度复杂场地地震动的能力,巴振宁等基于 CUDA 编程平台提出了工作站级的 CPU-GPU 并行异构方法。研究表明, CPU-GPU 异构并行方法可以有效地提高谱元法模拟的计算效率,具有良好的应用前景。

### 2) 场地地震响应分析

高玉峰等基于 1992 年在我国台湾翡翠河谷上观测到的六条地形影响台阵记录,利用线源 SH 波入射下非对称 V 形河谷地震波传播解析理论,模拟了河谷台阵各点的地震动,从理论上揭示了翡翠河谷地形效应对地震动影响的规律。

刘启方和陈长龙利用模拟和观测记录分析了场地非线性时变特征,研究表明,相较于移动窗谱比法,基于移动窗解卷积法可以较好地揭示场地非线性随震动水平的变化过程,识别非线性发生的阈值、非线性的变化程度及强震动后的恢复程度。

杨彩红等给出了圆弧形凹陷在 SH 波入射下瞬态反应的解析解,研究了凹陷在脉冲输入与实际地震动输入下瞬态反应的基本特征,并重点分析了凹陷对地震动的放大效应,该研究对于深入认识圆弧形凹陷对地震动放大效应具有参考价值。

韩璐等以 1979 年帝王谷地震地震为例,分别使用小波变换法、峰点法和零点法等三种

方法识别近断层强震观测记录的速度脉冲,并借助FK法合成的地震动,探讨了近断层脉冲型地震动的产生机制。

孟思博等以半圆形、V形沉积河谷为例,以入射波条件、沉积内外介质属性和河谷形状为特征参数,以沉积河谷地震动放大系数为预测目标参数,建立了基于差分进化-人工神经网络的沉积河谷地震动放大效应预测模型,具有工程参考价值。

### 3) 地震动模拟方法

波动输入是场地地震反应分析的重要环节,由于近海工程场地存在向海洋倾斜的单体边坡,且边坡一侧直接与海水耦合,其特殊的场地条件导致难以直接求解得到自由场分布,对现有的基于自由波场的场地地震波动输入方法提出了挑战。为此,宝鑫等提出了一种基于混合波场地震动输入技术的近海场地地震反应分析方法,解决了这一工程难题。

邢浩洁等将其最近发展的多人工波速优化透射边界应用于高精度谱元法的地震波动模拟当中,通过与经典的人工边界进行比较分析,证明该方法是一种便捷、高效的人工边界条件实现手段,该研究为实现简单高效的地震波动模拟提供了一种新途径。

李鸿晶和王竞雄研究了构建时域谱单元质量特性模型的数学机制,针对时域切比雪夫谱单元和勒让德谱单元建立了一种直接导出谱单元一致质量矩阵和集中质量矩阵的统一数学方法,从物理角度探讨了谱单元质量特性模型的合理性。

地震动合成方法的应用前景与其所能表达的有效频带范围紧密相关。曹泽林等研究基于频率波数域格林函数的地震动合成FK方法,分析了频带范围的关键影响要素及处理措施。该研究表明,地震动合成FK方法具有合成宽频带地震动的能力。

王竞雄等提出了一种求解水平成层场地地震反应的时域集中质量切比雪夫谱元法,通过节点积分法严格地导出集中质量矩阵,克服了传统切比雪夫谱元法由于质量矩阵为非对角矩阵形式所带来的计算效率不高的问题,具有良好应用前景。

### 4) 场地-结构(群)相互作用

针对地下结构抗震设计中埋深这一重要因素,赵密等从一维场地地震响应进行分析,研究了面向地下结构的最优地震动峰值指标随埋深变化规律,确定不同埋深下的最优地震动强度指标,可为结构抗震性能评价提供合理的地震动指标参考。

董瑞等给出了一种模拟地下结构和地面结构耦联灾变过程的模拟方法,并通过对地铁车站-桥梁相互作用模型地震灾变过程的仿真模拟,给出了地铁车站和邻近桥梁的耦联灾变机理,该研究对于地下结构选址及抗震设计具有参考价值。

输入地震动的选取是地下结构抗震设计与分析的首要环节,禹海涛等为探讨最不利地震动在地下结构抗震设计中的适用性,开展了软土隧道基于地震响应的输入地震动排序研究,该研究对软土隧道的输入地震动选择具有参考价值。

禹海涛等基于Biot饱和两相介质理论,采用间接边界积分方程法分别建立水平和竖向双线隧道动力作用分析模型,研究了SV波垂直入射下饱和和地层浅埋平行隧道动力响应机制,该研究对饱和和地层浅埋平行隧道抗震设计具有参考价值。

值此专辑出版之际,感谢审稿专家对本专辑文章提出的宝贵意见,感谢各位作者给予的大力支持。

## 参 考 文 献

- 陆新征. 2020. 工程地震灾变模拟: 从高层建筑到城市区域[M]. 第二版. 北京: 科学出版社: 1-767.
- Lu X Z. 2020. *Earthquake Disaster Simulation of Civil Infrastructures From Tall Buildings to Urban Areas*[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press: 1-767 (in Chinese).
- 贺春晖, 王进廷, 张楚汉. 2017. 基于震源-河谷波场数值模拟的坝址地震动参数确定方法[J]. *地球物理学报*, **60**(2): 585-592.
- He C H, Wang J T, Zhang C H. 2017. Determination of seismic parameters for dam sites by numerical simulation of the rupture-canyon wave field[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **60**(2): 585-592 (in Chinese).
- Khosravikia F, Clayton P. 2021. Machine learning in ground motion prediction[J]. *Computer and Geosciences*, **148**: 104700.
- Poursartip B, Fathi A, Tassoulas J L. 2020. Large-scale simulation of seismic wave motion: A review[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **129**: 105909.
- Triffunac M D. 2016. Site conditions and earthquake ground motion: A review[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **90**: 88-100.