

DOI: 10.16285/j.rsm.2021.2008

基于台阵观测的基岩地震动入射波分离方法及数值验证

阮 滨, 吉瀚文, 王苏阳, 贺鸿俊, 苗 雨

(华中科技大学 土木与水利工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 基岩地震动的准确输入对复杂场地地震效应特性评价结果的合理性具有重要影响。采用重启-迭代的方式将基岩观测记录中包含的入射波与下行波分离, 并将入射波作为输入信号转换为等效节点力与黏弹性边界组合作为地震动输入形式和基岩边界条件, 提出了一种可用于场地数值模拟分析的入射波分离方法。采用日本 KiK 强震观测台网的 IKRH01 台阵进行数值验证, 将方法与现有直接节点力输入方法、加速度输入方法对比, 并引入井上/井下谱比法从频域分析场地放大效应, 结果表明: (1) 入射波分离方法可以分离台阵基岩处入射波并实现地震动的精确输入; (2) 采用入射波分离方法得到的谱比值与台阵观测谱比的 2~6 阶波峰吻合较好, 说明该方法能有效模拟地震场地反应; (3) 对比考虑与不考虑下行波的谱比, 发现 0~10 Hz 以内井上/井下谱比主要受下行波干涉影响, 入射波引起的场地放大效应并不显著。

关 键 词: 入射波分离; 场地反应模拟; 场地效应; 台阵观测; 数值模拟

中图分类号: TU452, P631

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2022)09-2615-10

Seismic incident wave separation method based on array observation and numerical verification

RUAN Bin, JI Han-wen, WANG Su-yang, HE Hong-jun, MIAO Yu

(School of Civil and Hydraulic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: The accurate input of bedrock ground motion has a significant impact on the rationality of the evaluation results of seismic effect characteristics in complex sites. The restart-iteration method is used to separate the incident wave from the downgoing wave contained in the bedrock observation record, and the incident wave is converted into the equivalent nodal force and viscoelastic boundary as the input form and the bedrock boundary condition. The seismic incident wave separation method is proposed which can be used in the site numerical simulation analysis. The IKRH01 array of KiK-NET strong earthquake observation network in Japan is used for numerical verification, and the method is compared with the existing direct nodal force input method and acceleration input method, and the site amplification effect is analyzed from the frequency domain by surface-to-borehole spectral ratio method. The results show that: 1) The incident wave separation method can separate the incident wave at the bedrock of the array and achieve accurate input of ground motion. 2) The spectral ratio obtained by the method of incident wave separation is in good agreement with the peaks of order 2-6 observed by the array, indicating that the method can effectively simulate the seismic site response. 3) By comparing the spectrum ratio of downgoing wave with or without consideration, it is found that the surface-to-borehole spectral ratio within 0-10 Hz is mainly affected by downgoing wave interference, and the site amplification effect caused by incident wave is not significant.

Keywords: incident wave separation; site response simulation; site effect; array observation; numerical simulation

1 引 言

地震动在近地表传播并引起的复杂场地反应

一直是地震工程学的重要课题。研究表明, 地震动在近地表的传播过程既包含从基岩传至地表的入射波, 又包含经地表反射到基岩的下行波^[1]。目前,

收稿日期: 2021-11-30

修回日期: 2022-05-06

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.51908237, No.51978304, No.52008184); 中国博士后科学基金特别资助项目 (No.2021T140237); 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (No.2020kfyXJJS114)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51908237, 51978304, 52008184), the Postdoctoral Research Foundation of China (2021T140237) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (2020kfyXJJS114).

第一作者简介: 阮滨, 男, 1987 年生, 博士, 副教授, 主要从事土动力学与岩土地震工程方面的研究。E-mail: ruanbin666@hust.edu.cn

通讯作者: 苗雨, 男, 1979 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事场地地震反应、地下结构抗震防灾方面的研究。E-mail: miaoyu@hust.edu.cn

学者在分析地震引起的场地反应时多将基岩观测得到地震动信号直接作为入射波,而忽略下行波可能会导致地表与基岩谱比产生虚假的共振波峰^[2],因此,建立入射-下行波分离方法是必要的。

对于考虑下行波影响的地震场地反应分析,Bonilla 等^[3]从频域出发,利用同时刻邻近场地露头基岩的观测记录与地表观测记录建立了地表波与基岩入射波的传递函数,再通过解卷积方法得出基岩入射波,但该方法对研究场地有较大限制,场地附近需有露头基岩观测记录,且露头基岩与井下基岩应满足理想均质体假设,才能实现基岩处入射-下行波分离。然而竖向台阵所在场地通常不是单一均质土层,而是呈现几何不均匀性的复杂场地,且近地表往往还会表现出非线性特征^[4-7],经地表反射的下行波频谱特性会随地震发生过程而改变,这就造成从理论解分离基岩观测记录中的入射波较为困难。现有可用于一维土层地震场地反应分析的软件,如 DEEPSOIL,可以利用台阵地表观测加速度记录并采用频域等效线性化分析方法反演基岩地震动入射波^[8-9],但该方法无法从时域角度考虑土体非线性滞回特性。数值手段目前已被学者广泛用于场地反应研究^[10-12],利用数值方法可以考虑地层的复杂分布和土体的非线性特征^[13-15],同时还可以考虑地震发生过程中近地表剪切波速的演化过程。因此,采用数值方法从时域角度分离基岩观测记录中的入射波并将之应用于场地反应研究,可以在考虑复杂场地和土体非线性的同时,避免下行波引起的地表与基岩谱比虚假共振现象。

此外,对地下结构抗震分析,基岩地震动的精确输入十分重要,现有模拟分析地下结构抗震,多采用等效节点力与黏弹性边界组合的方式作为地震动输入形式与底部边界条件^[16-17],并选取与所研究工程场地相近的典型台站场地记录的基岩波作为输入波,但该波段是台站观测场地基岩入射波与反射波的叠加波,直接将其转化为等效节点力会过高或过低的估计地震动输入的能量,对于评价地下结构在地震中的损伤产生不利影响。因此研究基岩入射-下行波分离方法对地下结构抗震模拟的精确输入具有重要工程意义。

利用竖向台阵观测记录,从时域分析角度提出了一种基岩地震动入射波分离方法,通过不断重启-迭代,将基岩观测记录中的入射波分离出来,并采用与黏弹性边界相适应的等效节点力计算公式,只将入射波作为地震动输入信号,从而得出场地反应的精确计算结果。本方法相较于传统的一维

频域等效线性化反演方法,不仅可以从时域角度分析弱震线性场地反应,还可以结合土体非线性动力本构分析强震非线性场地反应分析以及分离基岩地震动入射波。利用日本 KiK 台网的 IKRH01 台阵观测记录验证所提出方法的可靠性。

2 基岩地震动入射波分离方法

由于基岩处下行波的频谱特性同时受到入射波和场地特征两个因素影响,且前者与后者存在时空上的因果关系。因此,分离入射波主要难点在于无法提前确定下行波在地震动传播过程中完整的频谱特性,需逐步迭代求解。

基于“重启-迭代”技术,提出基岩地震动入射波分离方法,分离基岩处入射波。利用 ABAQUS 的重启动功能,引入短时窗分析技术,将复杂无规律的演化过程分割成一系列有时间递进关系的迭代时窗分析计算,且每个短时窗的起点即为重启位置,再将前一个短时窗的修正计算结果作为下一个短时窗的起始条件,不断迭代分离入射波直至时程终点结束计算。具体操作步骤如下:

(1) 步骤 1: 根据台阵提供的土层波速结构信息,在 ABAQUS/CAE 中建立二维成层场地,将黏弹性人工边界作为模型底部边界条件,侧边界采用竖向约束^[18],如图 1 所示。

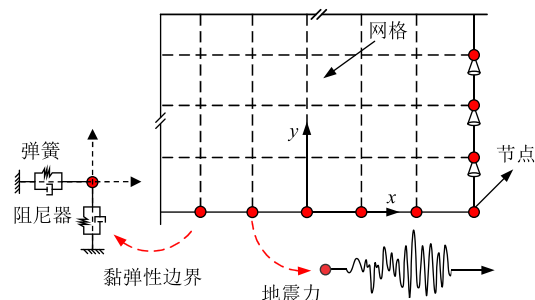


图 1 二维场地模型边界示意图

Fig.1 Boundary diagram of two-dimensional site model

(2) 步骤 2: 将台阵观测基岩加速度按时间 Δt 等间隔拆分为 Δa_i^{obs} , Δa_i^{obs} 为 $t_{i-1} \sim t_i$ 时刻的基岩加速度。为保证数值计算的稳定性,迭代时窗长度 $\Delta t \leq 2H/\bar{V}_s$, H 为场地从基岩到地表的厚度, $\bar{V}_s$ 为平均剪切波速。

(3) 步骤 3: 将 Δa_i^{obs} 转化为与黏弹性边界条件相适应的等效节点力输入至二维场地模型底部节点,建立分析步 Step- i ,并基于上一个分析步 Step- $(i-1)$ 后重启提交计算。

(4) 步骤 4: Step- i 计算完成后,采用编译 Python

命令流提取模型底部中间节点的加速度 Δa_i^{cal} , 依照入射波计算公式 $\Delta a_i^{\text{inc}} = 2\Delta a_i^{\text{obs}} - \Delta a_i^{\text{cal}}$ 得出 $t_{i-1} \sim t_i$ 时刻的基岩入射波加速度 Δa_i^{inc} , 该计算过程在编译的 Python 脚本中完成, 而下行波加速度 $\delta a_i^{\text{down}} = \Delta a_i^{\text{obs}} - \Delta a_i^{\text{inc}}$ 。

(5) 步骤 5: 将入射波加速度 Δa_i^{inc} 转化为等效节点力输入至模型底部节点, 重新提交 Step- i , 计算完成后回到步骤 3 循环, Step- i 的计算完成时刻作为下一个时窗 $t_i \sim t_{i+1}$ 计算的开始时刻重启分析, 不断循环直至达到时程终点停止迭代。

(6) 步骤 6: 将 $t_0 \sim t_1$ 时间段到 $t_{n-1} \sim t_n$ 时间段内的 n 个加速度 Δa_i^{inc} 按时间顺序拼接组成 a^{inc} , a^{inc} 即为整个地震发生过程的入射波加速度。同理, 将 δa_i^{down} 拼接组成 a^{down} , a^{down} 即为整个地震发生过程的下行波加速度。

步骤 2~6 均通过 Python 编写脚本并在 ABAQUS/CAE 中读取 Python 脚本实现, 入射-下行波分离方法操作流程如图 2 所示。

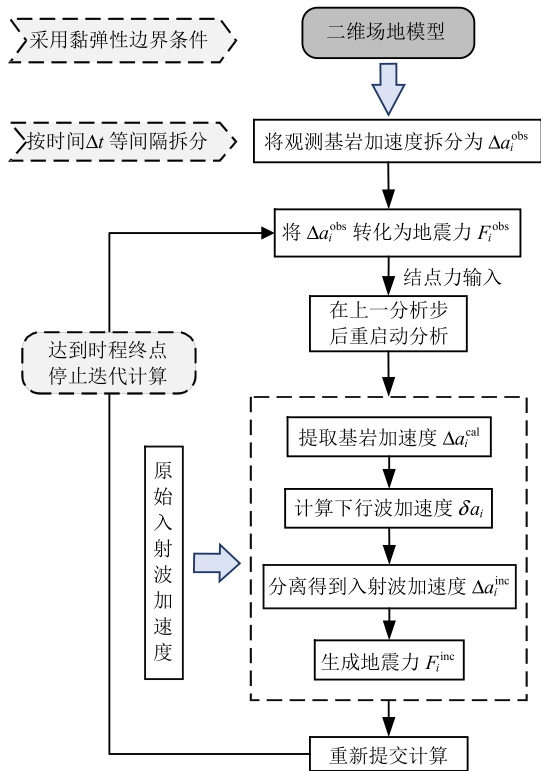


图 2 入射-下行波分离方法操作流程

Fig.2 Flow chart of incident wave separation method

3 理想自由场模型验证

现通过理想自由场模型验证所提方法的可靠性, 在二维半无限弹性空间截取长 500 m、高 50 m 的有限域作为研究区域, 将模型的顶部和底部的中点作为模型的监测点 A 和 B。材料参数如下: 密度

$\rho = 1800 \text{ kg/m}^3$; 弹性模量 $E = 105.3 \text{ MPa}$; 泊松比 $\nu = 0.3$; 剪切波速 $V_s = 150 \text{ m/s}$, 采用 4 节点平面应变单元(CPE4)对模型进行离散, 单元尺寸取 $\Delta x = \Delta y = 1 \text{ m}$, 在底部边界沿 x 方向施加单位脉冲波:

$$u(t) = \frac{1}{200} [1 - \cos(2\pi ft)] \quad (1)$$

式中: $u(t)$ 为模型底部节点的位移时程; f 为频率, $f = 4.0 \text{ Hz}$; t 为时间, $0 \leq t \leq 0.25 \text{ s}$ 。

与脉冲波相适应的等效节点力 F 按下式计算:

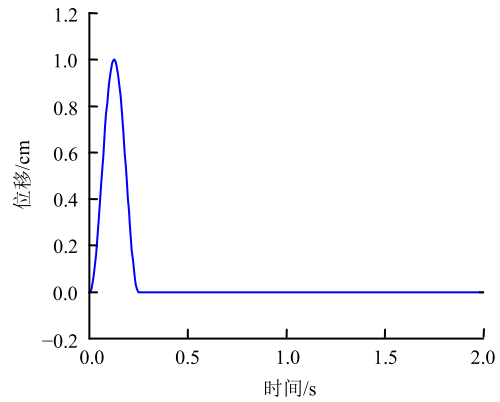
$$F = A_b [K_{\text{BT}} u_0(t) + C_{\text{BT}} \dot{u}_0(t) + \rho V_s \ddot{u}_0(t)] \quad (2)$$

式中: A_b 为网格尺寸; K_{BT} 、 C_{BT} 分别为人工边界切向的弹簧刚度和阻尼系数, 由下式计算得出^[19]:

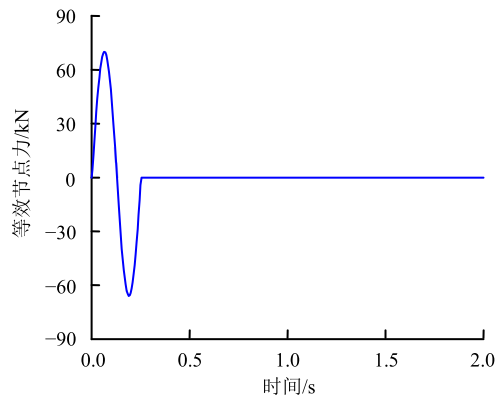
$$K_{\text{BT}} = \alpha_T \frac{G}{R}, \quad C_{\text{BT}} = \rho C_s \quad (3)$$

式中: α_T 为黏弹性边界的修正系数; G 为介质的剪切模量; R 为波源至人工边界点的距离; C_s 为介质的剪切波速。

将单位脉冲波转化为与黏弹性边界相适应的等效节点力, 脉冲波波形和等效节点力时程如图 3 所示。



(a) 入射位移-时间关系



(b) 等效节点力-时间关系

图 3 入射位移和等效节点力时程

Fig.3 Time history of incident displacement and equivalent nodal force

检测点 A、B 处计算的位移时程如图 4 所示, 检测点 B 处的时程可以看作理想自由场模型下的台阵基岩观测记录, 第 1 个波峰和第 2 个波峰分别代表基岩处的入射波和反射波, 整个时程是二者的叠加。

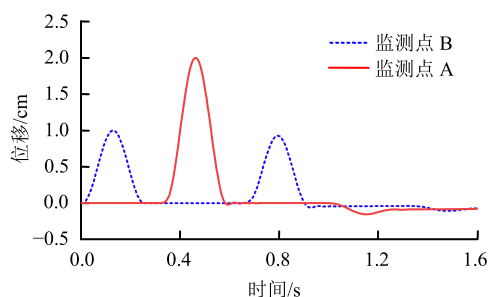


图 4 检测点 A、B 两处的位移时程

Fig.4 Displacement time history at monitoring points A and B

应用上述分离方法, 分离检测点 B 处时程中所包含的入射波信息, 时窗长度 Δt 取 0.2 s, 计算总时长为 2 s, 需重新启动 20 次即可实现入射波的分离。基于所提出方法得到检测点 B 的位移时程如图 5 所示。

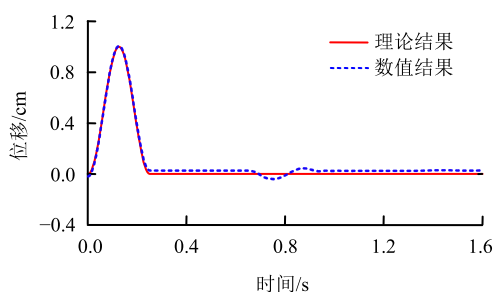


图 5 应用入射波分离方法计算的监测点 B 的位移时程

Fig.5 Displacement time history of monitoring point B calculated by incident wave separation method

从图 5 中可以看出, 应用该方法得到的入射波位移时程与图 3 的理论解基本一致, 证明了所提方法的可行性和有效性。

4 台阵数值模拟分析及应用

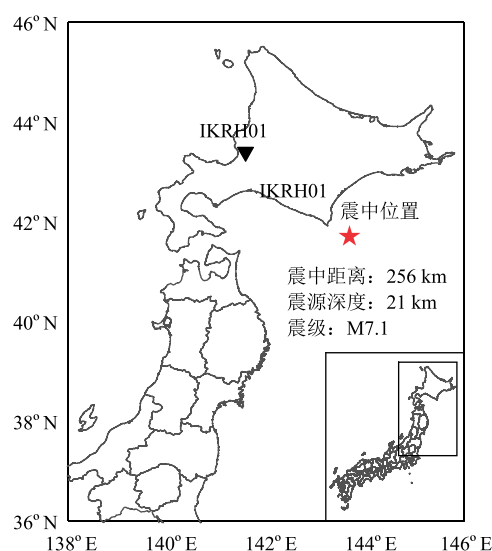
4.1 台站简介及选择依据

地震观测台网分布广泛, 其中多数台阵记录了地震发生时所在场地基岩和地表三方向的加速度时程, 为学者了解近地表地震动传播过程提供了大量的数据支持^[20-21]。日本 KiK 强震观测台网 (Kiban Kyoshin network) 包含了全日本范围内近 700 个地

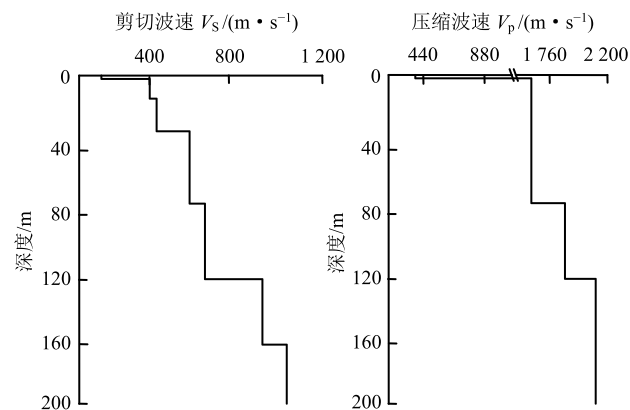
震动观测竖向台阵, 并且每个竖向台阵分别在地表和钻孔底部布设了三分量高精度加速度记录仪, 记录从 1996 年至今大量的地震动观测记录^[22]。

选用日本 KiK 台网的 IKRH01 台阵验证所提方法在真实场地的可行性, 该台阵无强震观测记录, 所记录的最强地表峰值加速度为 46.4 cm/s^2 , 地震波选用 2003 年 9 月 26 日 6 时 8 分记录的地震动信息, 其地表峰值加速度为 38 cm/s^2 , 震中距离台阵为 256 km, 震级为 7.1 级, 震源深度为 21 km。IKRH01 台阵位于日本北海道岛, 所在场地主要由强风化泥岩和砂岩构成, 钻孔底部的强震记录仪位于地表以下 200 m, IKRH01 台阵的位置信息、波速资料见图 6, 所选时段的观测加速度、台阵观测加速度大于 2 cm/s^2 的井上/井下谱比结果、井上/井下谱比平均结果如图 7 所示。台阵选择依据如下:

(1) IKRH01 台阵的观测谱比可以识别出 6 阶以上谱比峰值。



(a) 位置信息



(b) 剪切波速-深度关系

(c) 压缩波速-深度关系

图 6 IKRH01 台阵位置信息、震中位置以及波速
Fig.6 Location information of IKRH01 array, epicenter location and wave velocities

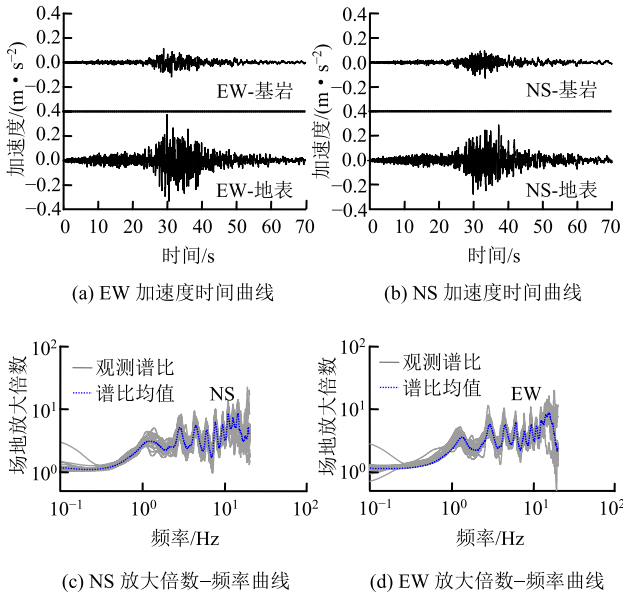


图7 观测加速度、井上/井下谱比结果以及谱比平均值

Fig.7 Acceleration time history, surface-to-borehole spectral ratio and spectral ratio average value

(2) 从台阵的波速分布图可以看出, 该台阵波速沿钻孔深度递增分布, 没有软夹层。

(3) 台阵钻孔深度合适, 根据场地建模水平长度取场地覆盖层厚度 10 倍的条件, 深度较浅可减少计算时长。

4.2 台阵场地有限元模拟方法

根据 KiK 台网所提供的波速信息, 利用下式得出场地不同深度下的弹性模量 E 和泊松比 ν :

$$G = \rho V_s^2, E = 2G(1 + \nu) \quad (4)$$

$$\nu = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{\frac{M}{G} - 1} \right) = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{1}{\left(\frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1} \right] \quad (5)$$

式中: M 为土体的压缩模量。

由于土层密度对数值计算影响较小, 因此不同深度土层密度假设为常数 $2\,000 \text{ kg/m}^3$ 。文献[23]研究表明, 荷载频率对土体的阻尼比有重要影响, 且阻尼比随振动频率的增加而减小, 采用 Rayleigh 阻尼设置土层阻尼参数时, 通过调整 ξ_1 和 ξ_2 两个阻尼比来考虑这一特性, 场地的基本频率 ω_0 可以根据下式估计得出^[6]:

$$\omega_0 = \frac{2\pi V_s}{4H} \quad (6)$$

通过 ω_0 和 ω_n 两个频率确定阻尼系数 α 和 β , $\omega_n = n\omega_0$, n 为大于 ω_c/ω_0 的奇数, 取 $n = 3$, 其中 ω_c 为地震波的主频^[24], 再结合下式即可算出 Rayleigh

阻尼系数 α 和 β :

$$\alpha = \frac{2\omega_0\omega_n(\xi_1\omega_n - \xi_2\omega_0)}{\omega_n^2 - \omega_0^2}, \beta = \frac{2(\xi_2\omega_n - \xi_1\omega_0)}{\omega_n^2 - \omega_0^2} \quad (7)$$

场地建模信息如表 1 所示。

表1 场地建模信息

深度 d/m	弹性模量 E/MPa	泊松比 ν	阻尼比		阻尼系数	
			ξ_1	ξ_2	α	$\beta/10^{-4}$
2	183	0.34	0.1	0.04	1.23	1.27
12	1 036	0.47	0.1	0.04	1.23	1.27
20	1 185	0.46	0.1	0.04	1.23	1.27
44	2 059	0.43	0.1	0.04	1.23	1.27
46	2 573	0.43	0.1	0.04	1.23	1.27
40	5 280	0.39	0.1	0.04	1.23	1.27
36	6 429	0.35	0.1	0.04	1.23	1.27

将 IKRH01 台阵所在场地的地震动传播过程视为一维波动问题进行分析, 数值模型不考虑地震波斜入射以及波型转换。应用 ABAQUS/Explicit 模块进行分析, 为保证数值计算的稳定性, 时间增量步设置为 $1 \times 10^{-4} \text{ s}$, 二维自由场地模型采用四节点双线性插值平面应变缩减积分单元(CPE4R), 为减少网格划分数量, 同时保证数值计算的效率和精确性, 模型底部和顶部分别采用边长为 4 m 和 1 m 的正方形网格, 中间局部土层采用三角形网格过渡, 模型水平长度为 2 000 m, 竖向长度取钻孔深度为 200 m, 网格数量一共有 80 000 个, 模型示意图如图 8 所示。

钻孔底部附近波速结构近似不变, 因此可采用人工截断边界作为模拟底部边界, 弹簧和阻尼器并联的黏弹性边界条件模拟下行波透射过程, 弹簧和阻尼器的力学参数由基岩材料决定^[25-26]。

建立二维场地模型分别研究直接节点力输入方法、加速度输入方法和入射波分离方法。直接节点力输入需要将基岩观测记录按照式(1)转化为地震力输入到模型底部节点上再提交计算; 加速度输入方法在模型底部直接输入基岩观测加速度, 不需设置黏弹性人工边界; 入射波分离方法需提前确定迭代时窗 Δt , 由台阵的剪切波速分布图算出该场地的平均剪切波速 $\bar{V}_s$ 为 656.23 m/s, 再根据 $\Delta t \leq 2H/\bar{V}_s$ 得出 $\Delta t \leq 0.61 \text{ s}$, 取 0.55 s 作为时窗长度, 并在 ABAQUS/CAE 界面运行已编译完成的 Python 脚本即可。3 种方法的对比如表 2 所示。

4.3 数值验证结果对比

加速度输入属于刚性约束, 因此基岩处的数值计算结果必然与 IKRH01 台阵的观测时程重合, 因

此, 只需讨论直接节点力输入方法与入射波分离方法在地震动输入上的准确性。将两种方法的数值计

算结果均与基岩观测记录对比, 二者的基岩加速度时程和 Fourier 谱结果如图 9 所示。

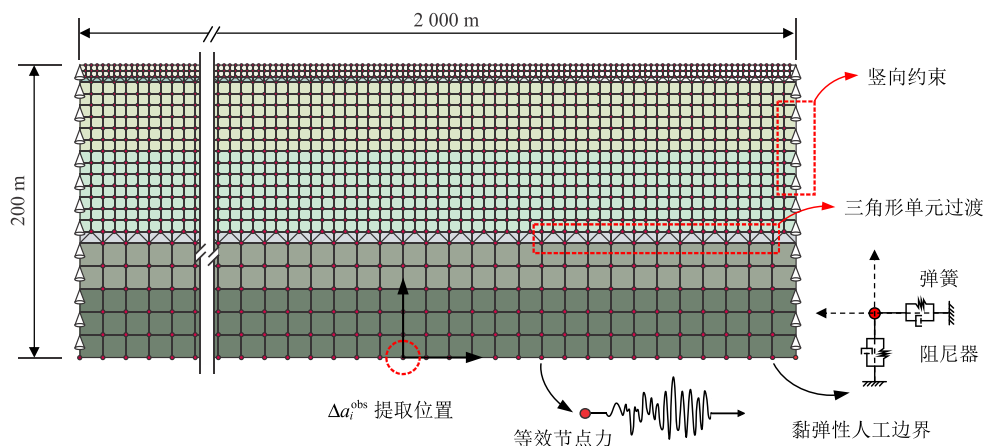


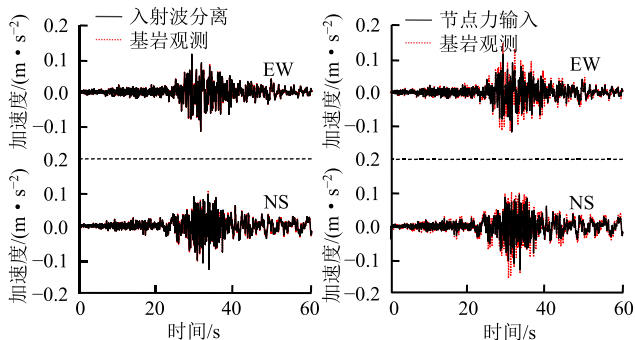
图 8 IKRH01 台阵二维场地建模示意图

Fig.8 Schematic diagram of two-dimensional site modeling of IKRH01 array

表 2 3 种输入方法对比

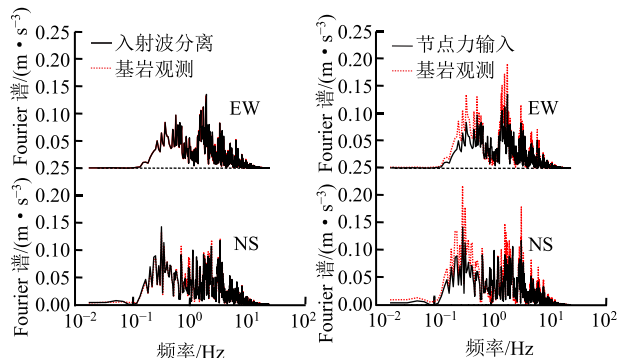
Table 2 Comparison of three input methods

地震动输入方法	输入形式	能否分离入射波	边界边界条件	
			两侧	底部
直接节点力输入	等效节点力	不能	竖向约束	黏弹性边界
加速度输入	加速度	不能	竖向约束	竖向约束
入射波分离	等效节点力	能	竖向约束	黏弹性边界



(a) 入射波分离法
加速度-时间曲线

(b) 直接节点力输入法
加速度-时间曲线



(c) 入射波分离法
Fourier 谱-频率曲线

(d) 节点力输入法
Fourier 谱-频率曲线

图 9 两种输入方法的基岩加速度时程及 Fourier 谱对比
Fig.9 Comparison of bedrock acceleration time histories and Fourier spectra with two input methods

从图 9 可以看出, 直接节点力输入的计算结果与台阵基岩观测时程存在明显差异, 原因是基岩观测记录是入射波与下行波的叠加, 直接将基岩观测记录作为地震动输入信号, 会导致输入存在偏差; 而采用入射波分离方法得到的结果只将分离得到的入射波作为输入信号, 因此无论是时域还是频域内都与基岩观测结果基本一致, 这说明将该方法作为地震动输入是精确的。采用该方法分离得到的台阵基岩入射波和下行波如图 10 所示。

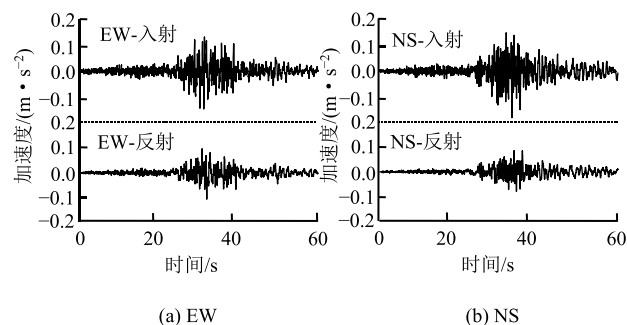


图 10 水平向基岩处入射波和下行波
Fig.10 Incident and downgoing waves at horizontal bedrock

3 种输入方法地表数值计算结果和加速度反应谱如图 11 所示。

从图 11 可以看出, 3 种输入方法计算出的地表加速度时程和反应谱均与台阵地表观测结果吻合较好。为分析不同方法得出的地表放大效应与真实台阵观测结果的关系, 从频域出发, 引入 5 种谱比计算方法, 并将谱比结果与观测谱比平均值对比^[27],

在计算谱比时预先利用 0.4 Hz 的 Parzen 窗对所选基岩和地表时程的 Fourier 谱进行平滑处理以消除谱

比后的锯齿,同时保证结果的可靠性,谱比方法和结果如表 3 和图 12 所示。

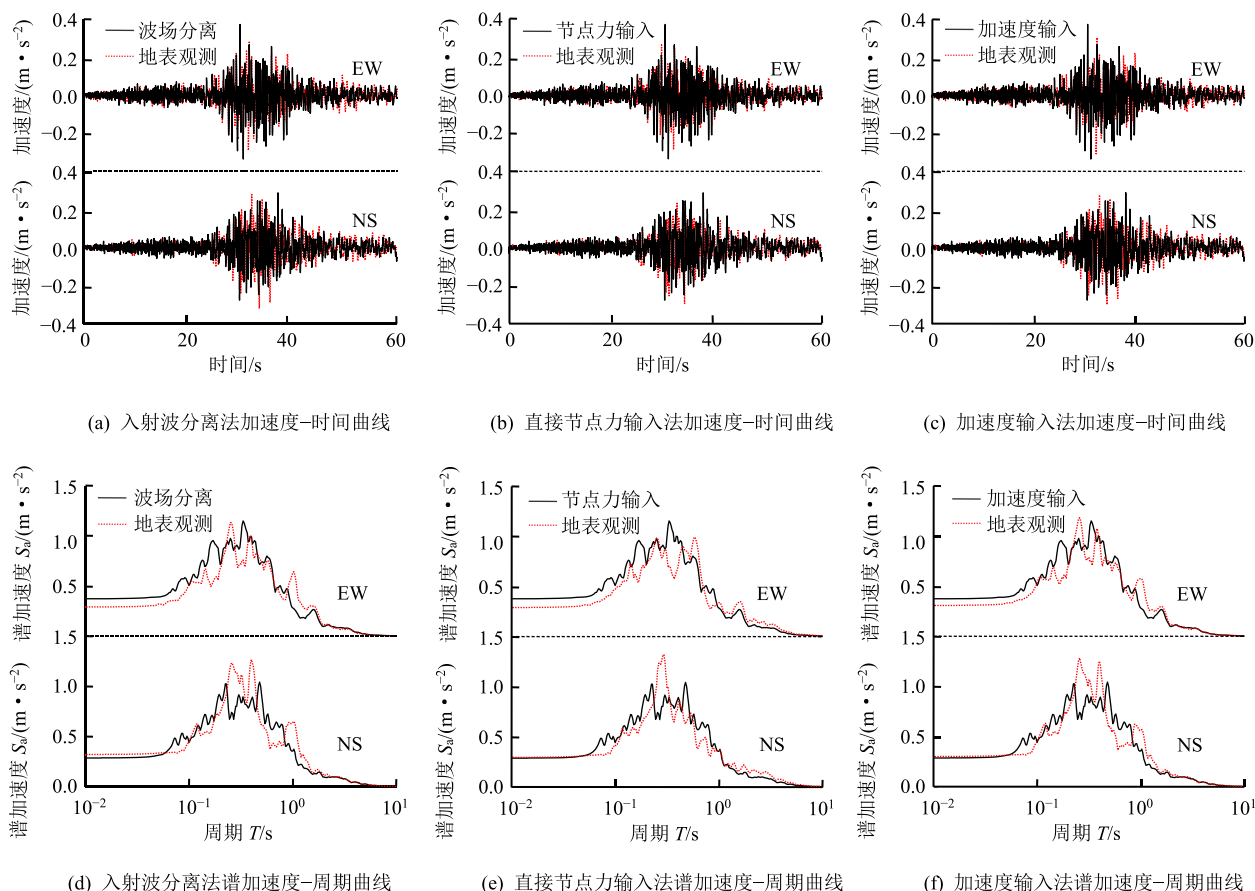


图 11 水平向 3 种输入方法计算的地表加速度与加速度反应谱

Fig.11 Surface acceleration and acceleration response spectra calculated by three input methods in north-south direction

表 3 5 种谱比计算方法

Table 3 Five kinds of spectral ratio calculation methods

编号	谱比计算方法
1	入射波分离法地表波/基岩观测波
2	直接节点力法地表波/基岩观测波
3	加速度输入法地表波/基岩观测波
4	直接节点力法地表波/直接节点力法基岩波
5	入射波分离法地表波/入射波分离法入射波

从图 12 可以看出,方法 1、3、4 得到的谱比结果与观测谱比平均值的 2~6 阶波峰吻合较好,1 阶波峰的位置和峰值稍有错动,由于方法 1 和 3 所利用的地表波分是入射波分离方法和加速度输入方法计算得到的,且这两种输入方法计算出的地表波时程也基本一致,说明入射波分离方法和加速度输入方法在场地反应分析上是等价的,但入射波分离方法能同时实现地震动精确输入和入射-下行波分离。

方法 4 的谱比与观测谱比平均值吻合,这是由

于将基岩观测波直接转化为等效节点力输入,数值计算提取的基岩波依然包含下行波,并且该波段与 IKRH01 台阵基岩观测时程并不一致,因此直接节点力方法作为地震动输入方法存在问题;方法 5 是将入射波分离法得到的入射波作为谱比的分母计算,其谱比结果虽然与观测谱比平均值相差较大,但排除了下行波所引起的虚假共振波峰,因此是真实入射波引起的场地放大效应;尽管方法 2 和 5 从频域角度得到的谱比结果相同,但方法 2 是将基岩观测波直接作为入射波得到的地表波并与基岩观测波进行谱比,未考虑真实场地基岩处的入射-下行波干涉现象,这可能会过高或过低地估计地震动输入的能量,因此不能直接将其应用于场地反应或地下结构抗震分析,而应当利用入射波分离方法得到入射波并将之转化为等效节点力输入,分析地震引起的场地反应或地下结构损伤。

另外,通过方法 5 得到的谱比结果可以看出,井上/井下谱比在 0~10 Hz 以内的放大作用主要受

下行波干涉的影响,对于只考虑地表波与入射波的谱比,0~10 Hz 以内的场地放大效应并不显著。

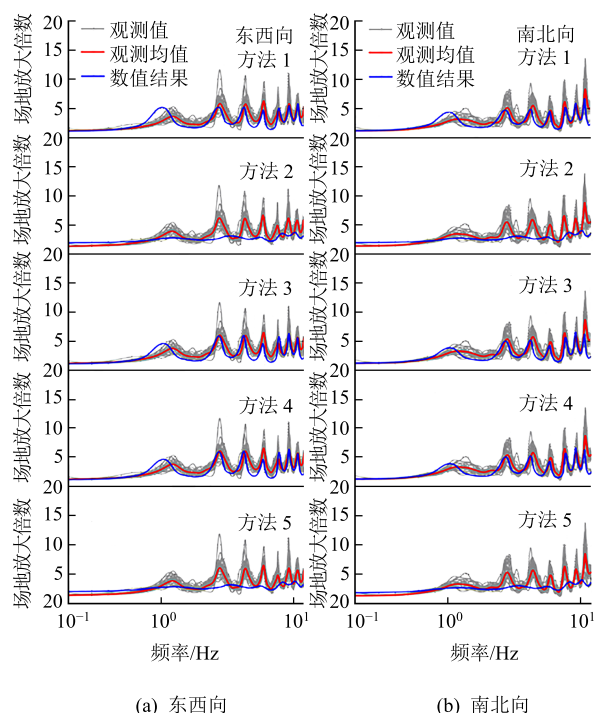


图 12 水平向 5 种谱比计算方法

Fig.12 Five spectral ratio calculation methods in horizontal direction

5 结 论

以台阵观测为背景,提出了一种基于重启动的时域入射波分离方法,成功实现将台阵基岩观测记录的入射-下行波分离,主要结论如下:

(1) 利用理想二维场地数值模型验证了所提方法的可行性,并采用真实台阵场地对比直接节点力输入法、加速度输入法和入射波分离法在基岩和地表的数值计算结果,得出 3 种方法地表波时程与功率谱均与台阵地表观测结果吻合较好,并且采用入射波分离法,能在实现分离基岩处入射波与下行波的同时,保证地震动模拟的精确输入。

(2) 根据 3 种输入方法所计算出的结果,从频域出发引入 5 种计算谱比的方法,并将 IKRH01 台阵观测谱比平均值作为参照,方法 1、3、4 的谱比与观测谱比均值的 2~6 阶波峰吻合较好,1 阶波峰稍有错动,方法 2、5 与观测谱比均值相差较大,但方法 5 得到的谱比是排除下行波引起的虚假共振波峰后真实的场地放大效应。

(3) 基于入射波分离方法得出的入射波,方法 1 和 5 分别对应考虑与不考虑下行波两种方式的频域场地放大效应,从两者的计算结果,得出 0~10 Hz

以内的场地放大效应主要受入射-下行波干涉的影响,基岩入射波引起的场地放大效应并不显著。

参 考 文 献

- [1] RÉGNIER J, BONILLA L F, BARD P Y, et al. PRENOLIN: international benchmark on 1D nonlinear site-response analysis—validation phase exercise[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2018, 108(2): 876-900.
- [2] RÉGNIER J, BONILLA L F, BERTRAND E, et al. Influence of the VS profiles beyond 30 m depth on linear site effects: assessment from the KiK-net data[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2014, 104(5): 2337-2348.
- [3] BONILLA L F, STEIDL J H, GARIEL J C, et al. Borehole response studies at the Garner valley downhole array, southern California[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2002, 92(8): 3165-3179.
- [4] BONILLA L F, TSUDA K, PULIDO N, et al. Nonlinear site response evidence of K-NET and KiK-net records from the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake[J]. *Earth, Planets and Space*, 2011, 63(7): 785-789.
- [5] QIN L, BEN-ZION Y, BONILLA L F, et al. Imaging and monitoring temporal changes of shallow seismic velocities at the Garner valley near Anza, California, following the M7.2 2010 El Mayor-Cucapah earthquake[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2020, 125(1): e2019JB018070.
- [6] CHANDRA J, GUÉGUEN P, STEIDL J H, et al. In situ assessment of the $G-\gamma$ curve for characterizing the nonlinear response of soil: application to the Garner valley downhole array and the wildlife liquefaction array[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2015, 105(2A): 993-1010.
- [7] BONILLA L F, GUÉGUEN P, BEN-ZION Y. Monitoring coseismic temporal changes of shallow material during strong ground motion with interferometry and autocorrelation[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2019, 109(1): 187-198.
- [8] 李瑞山, 袁晓铭, 李程程. 水平成层场地动剪应变与震动速度关系解析[J]. *岩土力学*, 2018, 39(10): 3623-3630.
- LI Rui-shan, YUAN Xiao-ming, LI Cheng-cheng. Analysis of relationship between dynamic shear strain and vibration velocity of horizontal soil layers[J]. *Rock and*

- Soil Mechanics**, 2018, 39(10): 3623-3630.
- [9] HASHASH Y M A, MUSGROVE M I, HARMON J A, et al. DEEPSOIL 7.0, user manual[R]. Champaign: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2017.
- [10] 章小龙, 李小军, 周正华, 等. 三维复杂山谷地形 SV 波垂直输入地震反应分析[J]. 地球物理学报, 2017, 60(7): 2779-2790.
- ZHANG Xiao-long, LI Xiao-jun, ZHOU Zheng-hua, et al. The seismic response analysis of three-dimensional Canyon complex topography under incident SV seismic waves[J]. **Chinese Journal of Geophysics**, 2017, 60(7): 2779-2790.
- [11] CHEN G, WANG Y, ZHAO D, et al. A new effective stress method for nonlinear site response analyses[J]. **Earthquake Engineering & Structural Dynamics**, 2021, 50(6): 1595-1611.
- [12] 王彦臻, 赵丁凤, 陈国兴, 等. 一维场地地震反应非线性有效应力分析法及其验证[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(3): 502-510.
- WANG Yan-zhen, ZHAO Ding-feng, CHEN Guo-xing, et al. A new nonlinear effective stress method for one-dimensional seismic site response analysis and its validation[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2021, 43(3): 502-510.
- [13] 赵丁凤, 阮滨, 陈国兴, 等. 基于 Davidenkov 骨架曲线模型的修正不规则加卸载准则与等效剪应变算法及其验证[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(5): 888-895.
- ZHAO Ding-feng, RUAN Bin, CHEN Guo-xing, et al. Validation of modified irregular loading-unloading rules based on Davidenkov skeleton curve and its equivalent shear strain algorithm implemented in ABAQUS[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2017, 39(5): 888-895.
- [14] 陈国兴, 庄海洋. 基于 Davidenkov 骨架曲线的土体动力本构关系及其参数研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(8): 860-864.
- CHEN Guo-xing, ZHUANG Hai-yang. Developed nonlinear dynamic constitutive relations of soils based on Davidenkov skeleton curve[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2005, 27(8): 860-864.
- [15] 陈国兴, 李磊, 丁杰发, 等. 巨厚沉积土夹火山岩场地非线性地震反应特性[J]. 岩土力学, 2020, 41(9): 3056-3065, 3076.
- CHEN Guo-xing, LI Lei, DING Jie-fa, et al. Nonlinear seismic response characteristics of extremely deep deposit site with volcanic hard rock interlayers[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(9): 3056-3065, 3076.
- [16] 马笙杰, 迟明杰, 陈红娟, 等. 黏弹性人工边界在 ABAQUS 中的实现及地震动输入方法的比较研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(7): 1445-1457.
- MA Sheng-jie, CHI Ming-jie, CHEN Hong-juan, et al. Implementation of viscous-spring boundary in ABAQUS and comparative study on seismic motion input methods[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2020, 39(7): 1445-1457.
- [17] 何建涛, 马怀发, 张伯艳, 等. 黏弹性人工边界地震动输入方法及实现[J]. 水利学报, 2010, 41(8): 960-969.
- HE Jian-tao, MA Huai-fa, ZHANG Bo-yan, et al. Method and realization of seismic motion input of viscous-spring boundary[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2010, 41(8): 960-969.
- [18] 陈国兴, 朱翔, 赵丁凤, 等. 珊瑚岛礁场地非线性地震反应特征分析[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(3): 405-413.
- CHEN Guo-xing, ZHU Xiang, ZHAO Ding-feng, et al. Nonlinear seismic response characteristics of a coral island site[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2019, 41(3): 405-413.
- [19] 张波, 李术才, 杨学英, 等. 三维黏弹性人工边界地震波动输入方法研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(3): 774-778.
- ZHANG Bo, LI Shu-cai, YANG Xue-ying, et al. Research on seismic wave input with three-dimensional viscoelastic artificial boundary[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(3): 774-778.
- [20] 崔昊, 丁海平. 基于 KiK-net 强震记录的场地调整系数估计[J]. 地震工程与工程振动, 2016, 36(4): 147-152.
- CUI Hao, DING Hai-ping. Estimation of site coefficient based on KiK-net strong-motion seismograph network[J]. **Earthquake Engineering and Engineering Dynamics**, 2016, 36(4): 147-152.
- [21] 王海云. 基于强震观测数据的土层场地反应的研究现状[J]. 地震工程与工程振动, 2014, 34(4): 42-47.
- WANG Hai-yun. A review of study on soil site response estimating from strong motion data[J]. **Earthquake Engineering and Engineering Dynamics**, 2014, 34(4): 42-47.
- [22] AOI S, KUNUGI T, FUJIWARA H. Strong-motion seismograph network operated by NIED: K-NET and KiK-net[J]. **Journal of Japan Association for Earthquake Engineering**, 2004, 4(3): 65-74.