

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201811064

沉积谷地二维非线性地震反应 FEM-IBIEM 耦合分析*

刘中宪^{1,2}, 陈 颀¹, 黄 磊³, 张 彦¹

(1. 天津城建大学土木工程学院, 天津 300384; 2. 天津市土木建筑结构防护与加固重点实验室, 天津 300384;
3. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072)

摘要: 采用有限元-间接边界积分方程耦合方法(FEM-IBIEM)并结合土体等效线性理论,对地震波入射下二维沉积谷地的非线性地震响应进行了模拟分析,得到了半圆形沉积谷地典型观测点的加速度时程曲线及反应谱曲线。结果表明,与线性模型相比,等效线性化模型场地加速度时程幅值有明显下降趋势,部分点位降幅可达40%;加速度时程在SV波垂直入射情况下的降幅普遍大于30°斜入射时情况;加速度反应谱幅值在高频段下降更为显著,且某些点位加速度反应谱卓越周期有较大增长。

关键词: 沉积谷地; 等效线性模型; 地震响应; FEM-IBIEM 耦合方法

中图分类号: TU435 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)02-0287-07

Nonlinear Seismic Response Analysis of Sedimentary Valley based on the Coupled FEM-IBIEM

LIU Zhongxian^{1,2}, CHEN Di¹, HUANG Lei³, ZHANG Yan¹

(1. Department of Civil Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China;
2. Tianjin Key Laboratory of Civil Structure Protection and Reinforcement, Tianjin 300384, China;
3. Department of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The finite element-indirect boundary integral equation coupling method (FEM-IBIEM) combined with the soil equivalent linear theory is used to analyze the nonlinear seismic response of 2-D semi-circular sedimentary valleys under SV wave incidence. The acceleration time history and response spectrum curves at the observation point of the sedimentary valley are obtained. The results show that, compared with that of the linear model, the amplitude of site acceleration time history of the equivalent linear model has a significant downward trend, and the reduction at some points can reach 40%. The amplitude reduction of acceleration time history in the case of SV wave perpendicular incidence is generally greater than that in the case of 30 degree oblique incidence. The acceleration response spectrum decreases more significantly at high frequency, and some predominant period of ac-

* 收稿日期:2018-11-29;修回日期:2019-02-22

基金项目:天津市自然科学基金重点项目(18JCZDJC39200)、天津市科技重大专项(18ZXQSF00110)、国家自然科学基金项目(51878434)资助

作者简介:刘中宪(1982—),男,教授,博士后。主要从事地震工程与工程波动领域的研究。E-mail:zhongxian1212@163.com

通讯作者:黄磊(1989—),女,博士研究生。主要从事地震工程与工程波动领域的研究。E-mail:huanglei1289@163.com

celeration response spectrum at some locations increases by a large margin.

Keywords: sedimentary valley; equivalent linearity; seismic response; FEM-IBIEM coupled method

引言

多次震害调查分析表明,沉积谷地对地震波的传播特性和地震动响应有明显影响,主要反映为沉积场地处的地震动幅值明显增大。这种现象本质上是由于沉积谷地内外介质刚度的差异及特殊几何特征,致使地震波在沉积谷地中产生局部聚焦效应和边缘面波转换效应。该问题的求解可以采用数值法和解析法。其中,数值方法包括有限元法(FEM)^[1-2]、谱元法(SEM)、有限差分法(FDM)^[3]、边界元法(BEM)、间接边界积分方程法(IBIEM)和离散波数法等;解析法主要指波函数展开法^[4]。

本文针对二维沉积谷地非线性地震反应,采用有限元-间接边界积分方程耦合方法(FEM-IBIEM),一是对于沉积外部采用间接边界积分方程法分析,其优势是不需要引入人工边界条件,满足无限远辐射条件,还能降低求解问题的维数;二是对于沉积内部采用有限元法,这样可以有效的模拟沉积内部复杂的土体条件和介质参数。刘中宪等^[5]采用FEM-IBIEM研究了沉积盆地的地震动响应,但尚未考虑土体的非线性特征。

在地震工程领域,土体等效线性模型已经得到广泛的应用,该模型在1968年首先由H.B.Seed等^[6]提出,考虑了土体剪切模量和阻尼比随剪应变幅值的变化。廖振鹏等^[7]利用该法对成层土层在地震作用下的反应进行分析,并编制了程序。齐文浩等^[8]分析了等效线性模型与完全非线性模型的各自原理及优劣,并对结果进行了分析对比。尤红兵^[9]等利用等效线性方法分析了层状场地在斜入射地震波下的反应。王笃国等^[10]针对二维水平土层模型,提出一种在地震波斜入射下的非线性地震反应分析方法,并对层状场地中地震动反应规律随入射角度的变化做了研究。杨笑梅等^[11]将等效线性化模型应用到二维土层中,对其进行了地震时程反应等效线性化解答。综上,当前等效线性模型大多研究的是水平层状场地,对复杂场地非线性地震动放大效应的研究仍然不够系统深入。

本文基于等效线性模型,将FEM-IBIEM耦合法拓展到土体非线性地震反应分析。考虑地震波

垂直入射及斜入射情况,对二维沉积谷地的非线性地震反应进行了计算分析。通过非线性化模型与线性模型的结果对比,获得了一些有益的结论。可为实际河谷场地地震小区划及工程抗震设防等工作提供部分理论参考。

1 计算模型

以一半圆形沉积谷地为例(图1),沉积区设为DI,沉积外部域设为DE,且设定DE为各向同性弹性半空间,沉积区DI与外部弹性基岩DE的交界面设为B。假定沉积谷地的横截面沿纵轴方向无形状变化,且无限延伸,入射SV波方向平行于沉积谷地截面,即荷载不沿纵轴向方向变化,因此该模型可简化为一个平面应变问题。谷地半径 R 取200 m,平面SV波设为垂直入射及 30° 斜入射(与竖向夹角)。

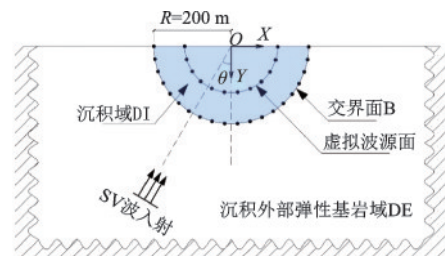


图1 计算模型

Fig.1 Calculation model

2 求解方法

采用有限元法(FEM)离散沉积内部土体,利用间接边界积分方程法(IBIEM)求解沉积外部弹性基岩半空间的波动,采用MATLAB编制程序进行计算。本文采用三角形三节点常应变单元离散土体,质量矩阵采用协调质量矩阵。根据在沉积内部和弹性基岩半空间的交界面B处的应力和位移连续性条件,进行FEM-IBIEM耦合。考虑到沉积土体具有较强的非线性,尤其是地震动较大情况下,土体非线性特性不可忽略。本文利用等效线性化模型,与有限元法相结合,首先在频域中计算:利用等效剪切模量和等效阻尼比代替土体在不同剪应变下的剪切模量和阻尼比迭代得到等效剪切模量与

阻尼比取代不同应变幅值下的剪切模量与阻尼比,非线性问题由此转化为线性问题;进而通过傅里叶逆变换得到时域结果。由此将复杂的非线性问题转化成简单的线性问题。

2.1 FEM-IBIEM 耦合分析

假定入射波为平面SV波,则稳态波传播的运动微分方程为:

$$\text{div}(\sigma) + \rho\omega^2 u = 0 \quad (1)$$

其中, σ 和 u 分别为应力和位移矢量; ω 为入射波圆频率, ρ 为波传播介质的密度。

将沉积内部区域DI进行有限单元离散,每个单元的运动方程在频域内可以表示为:

$$K^e U^e - \omega^2 M^e U^e = P^e \quad (2)$$

式中, M^e 为单元质量矩阵; K^e 为单元刚度矩阵; U^e 为单元节点位移列阵; P^e 为单元表面牵引力矢量,可表示为^[12]:

$$P^e = R^e \sigma^e \quad (3)$$

其中, R^e 为等效转换矩阵。

记 $K^e = K^e - \omega^2 M^e$,则运动方程(2)可化为:

$$K^e U^e = R^e \sigma^e \quad (4)$$

对每个单元刚度矩阵和质量矩阵进行组装得到总的刚度矩阵和质量矩阵,总运动方程可表示为:

$$KU = R\sigma \quad (5)$$

沉积内部离散的节点可分为内部节点和交界面上的边界点,总运动方程转化为:

$$\begin{bmatrix} K_{II} & K_{IB} \\ K_{BI} & K_{BB} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{II} \\ U_{BB} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{II} & R_{IB} \\ R_{BI} & R_{BB} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{II} \\ \sigma_{BB} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中,I代表沉积内部,B代表交界面。

在地震波输入时,视地震动作为一种外荷载施加在沉积土体模型的交界面B处,沉积土体(DI)内部节点不直接承受外荷载作用,仅交界面B处的节点直接承受地震动外荷载,故 $R_{II}=R_{IB}=R_{BI}=0$,于是总运动方程可简化为:

$$(-K_{BI}K_{II}^{-1}K_{IB} + K_{BB})U_{BB} = R_{BB}\sigma_{BB} \quad (7)$$

根据叠加原理,总位移场可以表示成散射场位移加上自由场位移,总应力场同理。具体表达如下:

$$U = U^f + U^s \quad (8)$$

$$\sigma = \sigma^f + \sigma^s \quad (9)$$

其中, U^f 和 σ^f 分别为弹性半空间自由场位移和自由场应力,可以分别由自由场的位移函数和应力函数

求出; U^s 和 σ^s 分别为散射场位移和散射场应力,由下式计算:

$$U^s = G_u A \quad (10)$$

$$\sigma^s = G_t A \quad (11)$$

式中, G_u 为位移格林函数矩阵; G_t 为应力格林函数矩阵; A 为波源密度矩阵。

在交界面B处,考虑到位移和应力的连续性,应满足下式:

$$U = U_{BB}, \sigma = \sigma_{BB} \quad (12)$$

将式(8)~(12)代入式(7),可得:

$$L(U^f + G_u A) = R_{BB}(\sigma^f + G_t A) \quad (13)$$

上式可表达为简洁形式:

$$GA = f \quad (14)$$

其中: $L = -K_{BI}K_{II}^{-1}K_{IB} + K_{BB}$, $G = LG_u - R_{BB}G_t$, $f = R_{BB}\sigma^f - LU^f$ 。

式(14)采用最小二乘法可求出虚拟波源密度矩阵 A ,进一步利用式(8~11)可求出沉积外部各节点的应力和位移。由式(6)可求出沉积内部各节点位移。

2.2 等效线性化分析

土是常见的非线性材料,土体受到外力所产生的应力和应变表现出复杂的非线性关系。且地震动作用越大,土体所表现出的材料非线性越强。根据实验测出的土动力特性曲线如图2所示,意在采用等效剪切模量 G 和等效阻尼比 λ 来取代土体在不同剪应变下产生非线性反应时对应的剪切模量和阻尼比。该方法已在工程抗震分析中得到广泛应用,包括岩土工程^[13-14]、桥梁工程^[15]、建筑工程^[16]、核工程^[17]以及近年来颇受关注的土-结构物相互作用^[18]等方向。

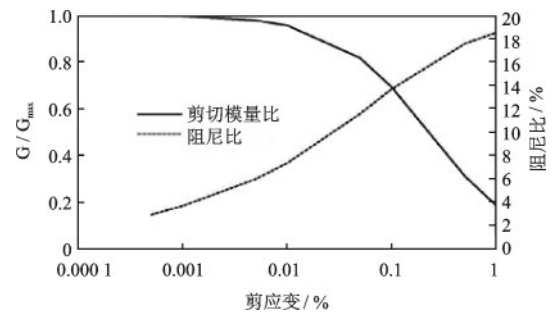


图2 场地土动力特性曲线

Fig.2 Site dynamic characteristic curve

2.2.1 土体单元剪应变计算理论

根据弹性力学理论,由二维平面问题几何方程,土体剪应变可表示为如下矩阵形式:

$$\epsilon(x, y) = \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = [\partial] N(x, y) \cdot q^e = B(x, y) \cdot q^e \quad (15)$$

式中, q^e 为节点位移列阵; B 为几何矩阵, 可表示为:

$$B(x, y) = [B_1 B_2 B_3] \quad (16)$$

其中:

$$B_i = \frac{1}{2a} \cdot \begin{bmatrix} b_i & 0 \\ 0 & c_i \\ c_i & b_i \end{bmatrix}, i = 1, 2, 3 \quad (17)$$

$$a = \frac{1}{2} (a_1 + a_2 + a_3) = \frac{1}{2} (b_1 c_2 - b_2 c_1) \quad (18)$$

$$\begin{cases} a_1 = (x_2 y_3 - x_3 y_2) \\ b_1 = y_2 - y_3 \\ c_1 = -x_2 + x_3 \end{cases} \quad 1, 2, 3 \text{ 轮换} \quad (19)$$

本文有限元离散部分采用常应变三节点三角形单元, 故剪应变 γ_{xy} 在各单元内为常量, 可由上述方程求得。

2.2.2 等效剪应变的确定

将频域内的剪应变经傅里叶逆变换转换到时域, 按照一维情况采用等效剪应变来描述二维应变状态。等效剪应变在实际工程中可取为^[17]:

$$\gamma_{eff} = 0.65 \cdot \max |\gamma_{max}(t)| \quad (20)$$

其中, $\max |\gamma_{max}(t)|$ 为剪应变时程幅值。

假定沉积外部半空间为各向同性均匀介质, 仅对沉积内部 DI 进行等效线性化模拟, 实施步骤如下:

(1) 对某典型场地土动力特性曲线(图2): 剪切模量比—剪切应变($G/G_{max} - \gamma$)曲线和阻尼比—剪切应变($\lambda - \gamma$)曲线进行拟合, 得出公式。

(2) (a. 初始步) 在低应变状态下, 为沉积土体假设初始剪切模量 G_{max} 和阻尼比 λ , 输入地震波时程进行计算, 计算得出土体单元剪应变时程, 进而得出土体各单元最大剪应变 γ_{max} 。

(b. 迭代步) 利用新的物理量 G 和 λ 对模型进行计算, 计算得出土体单元剪应变时程, 进而得出土体各单元在该时间历程中的最大剪应变 γ_{max} 。

(3) 由当前最大剪应变 γ_{max} 计算等效剪应变 γ_{eff} , 一般取 $\gamma_{eff} = 0.65 \gamma_{max}$ 。

(4) 由当前的等效剪应变 γ_{eff} , 代回土动力特性曲线拟合公式得出新的剪切模量和阻尼比。

(5) 判断收敛情况。新的剪切模量和阻尼比与上一步剪切模量和阻尼比的相对误差大于等于 0.05 时, 取代之前的剪切模量和阻尼比, 转至(2.b)进行

新一轮迭代计算, 循环从(2.b)步到(5)步。如二者相对误差均小于 0.05 时则终止计算, 得到收敛的剪切模量 G 和阻尼比 λ 。

(6) 根据收敛的剪切模量和阻尼比对沉积盆地进行地震反应分析。

3 算例与分析

针对二维沉积谷地非线性地震反应, 进行等效线性化分析, 并与相应的线性结果对比。模型参数取值如下: 谷地半径 $R=200$ m, 沉积内部土体密度取 1800 kg/m^3 , 泊松比为 0.3, 初始剪切波速设定为 300 m/s , 初始阻尼比设定为 0.01; 基岩介质的剪切波速取 1000 m/s , 基岩密度取 2000 kg/m^3 , 泊松比为 0.25。交界面离散点取 81 个, 虚拟波源面离散点取 45 个, 虚拟波源面半径为 $0.6R$ 。考虑平面 SV 波垂直入射及 30° 斜入射两种情况, 输入地震波为 Tartarazana 波, 地震动加速度峰值调整为 $0.2g$ 。计算出沉积表面典型点位($X/R=0, 0.4, 0.8$) 水平主向的加速度时程与加速度反应谱曲线。

图3为 SV 波垂直入射下, 沉积地表各观测点($X/R=0, 0.4, 0.8$) 的线性与非线性加速度时程对比。与线性结果相比, 非线性加速度时程峰值(PGA)有所降低。例如在 $X/R=0$ (沉积谷地中心) 处, 线性 PGA 为 $0.51g$, 非线性 PGA 为 $0.4g$; 在 $X/R=0.4$ 处, 线性 PGA 为 $0.38g$, 而非线性 PGA 仅为 $0.24g$ 。且从整体曲线上看加速度幅值普遍降低。该现象是由于相比线性分析, 在等效线性化方法迭代过程中, 土体单元阻尼比增大加快了地震动能量的衰减。

图4反映了相同模型参数下, 沉积地表各观测点($X/R=0, 0.4, 0.8$) 的线性加速度反应谱和非线性加速度反应谱对比。与线性结果比较, 非线性结果峰值同样有一定程度下降, 如 $X/R=0.4$ 处, 垂直入射时非线性结果峰值为 $0.5g$, 较线性结果 $0.9g$ 降幅明显; 反应谱曲线削弱集中在高频段。在 $X/R=0.4$ 处, 线性特征周期出现在 0.2 s 左右, 非线性特征周期出现在 0.3 s 左右, 其余两观测点位特征周期变化不大。

图5给出了在 SV 波 30° 斜入射下, 沉积地表各观测点($X/R=0, 0.4, 0.8$) 的线性与非线性加速度时程对比。与垂直入射情况相似, 各观测点的 PGA 存在不同程度的降低。以 $X/R=0.4$ 处为例, 线性 PGA 为 $0.43g$, 而等效线性 PGA 仅为 $0.37g$ 。

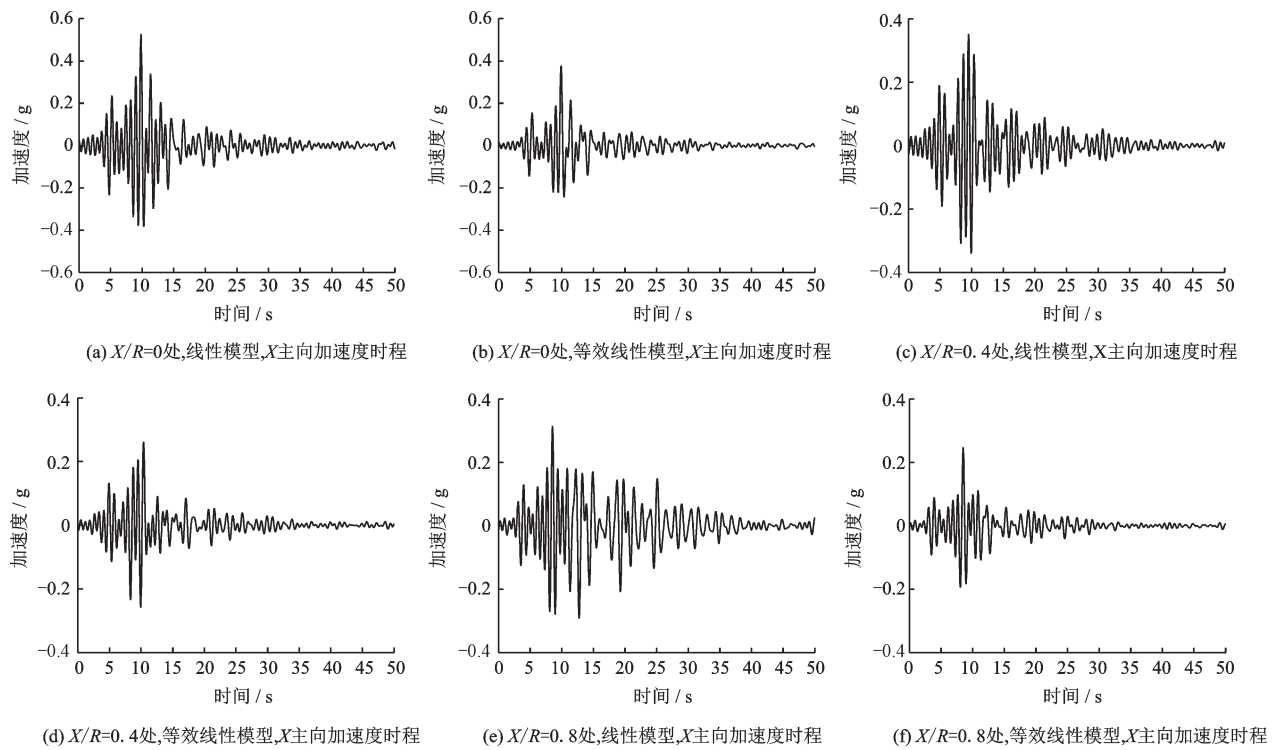


图3 垂直入射情况加速度时程对比

Fig.3 Acceleration time history comparison (vertical incidence)

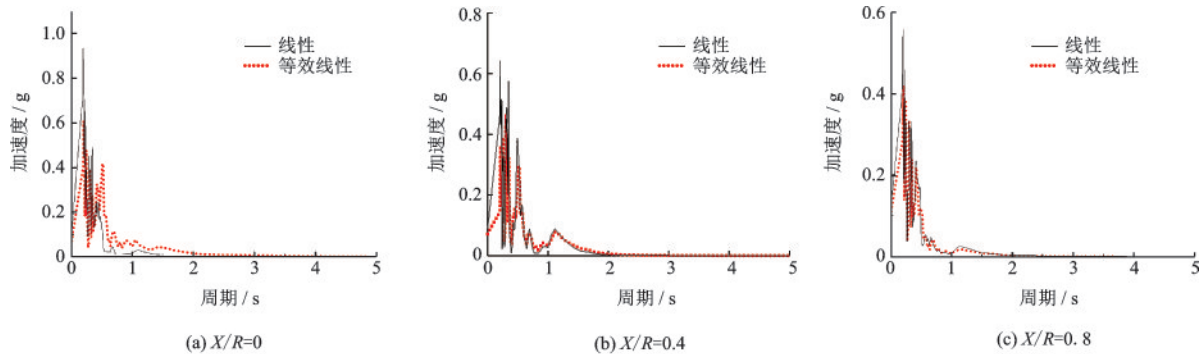


图4 垂直入射情况加速度反应谱对比

Fig.4 Response spectrum comparison (vertical incidence)

由图3、图5对比可发现,SV波垂直入射时,沉积表面 $X/R=0,0.4,0.8$ 处加速度时程峰值分别为 $0.4g,0.28g,0.26g$ 。当入射角为 30° 时,沉积表面 $X/R=0,0.4,0.8$ 处加速度时程峰值分别为 $0.34g,0.38g,0.25g$ 。这反映了沉积谷地不同位置点位的地震动特性存在明显差异,且空间分布规律显著依赖于输入波入射角。另外综合图3、5的结果,基于等效线性模型,加速度时程曲线在SV波垂直入射情况下的降低幅度普遍大于 30° 斜入射时情况。总体上降幅为 $10\% \sim 40\%$ 不等。

图6反映了SV波 30° 斜入射下,沉积地表各观测点位($X/R=0,0.4,0.8$)的线性加速度反应谱和

非线性加速度反应谱对比。结果同先前工况相仿。如在 $X/R=0.4$ 处,等效线性结果峰值为 $0.62g$,较线性结果 $0.87g$ 有明显的下降。

综合图4、6来看,反应谱曲线的削弱集中在高频段($>3\text{ Hz}$),低频段降幅并不明显。反应谱曲线特征周期两方法结果差别不大,在某些点位上等效线性结果有增大的趋势。例如垂直入射下在 $X/R=0.4$ 处,线性模型卓越周期出现在 0.2 s 左右,等效线性化模型卓越周期出现在 0.3 s 左右。类似的规律也出现在 30° 斜入射情况。这是由于根据等效线性化理论进行迭代计算,随着土体单元剪应变变化,等效剪切模量相应迭代调整,相比线性分析场

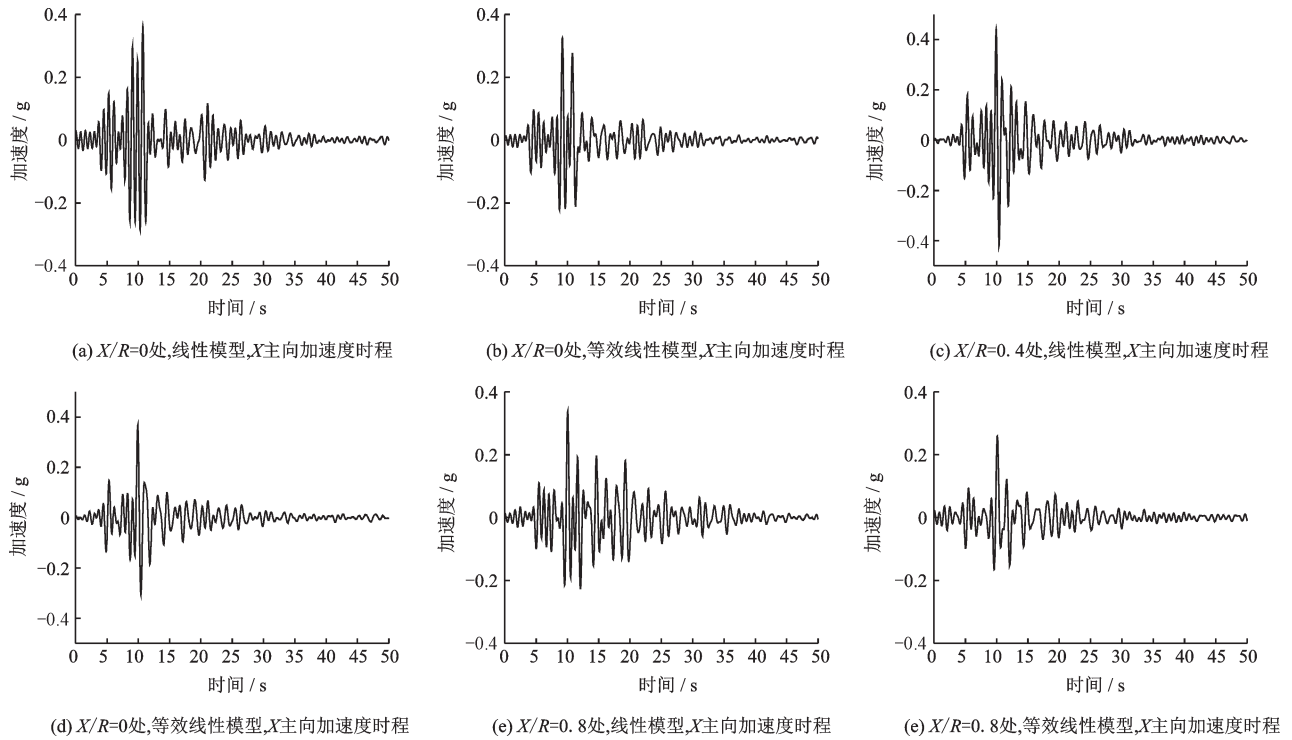


图5 30°斜入射情况地表加速度时程对比

Fig.5 Ground acceleration time history comparison (30-degree incidence)

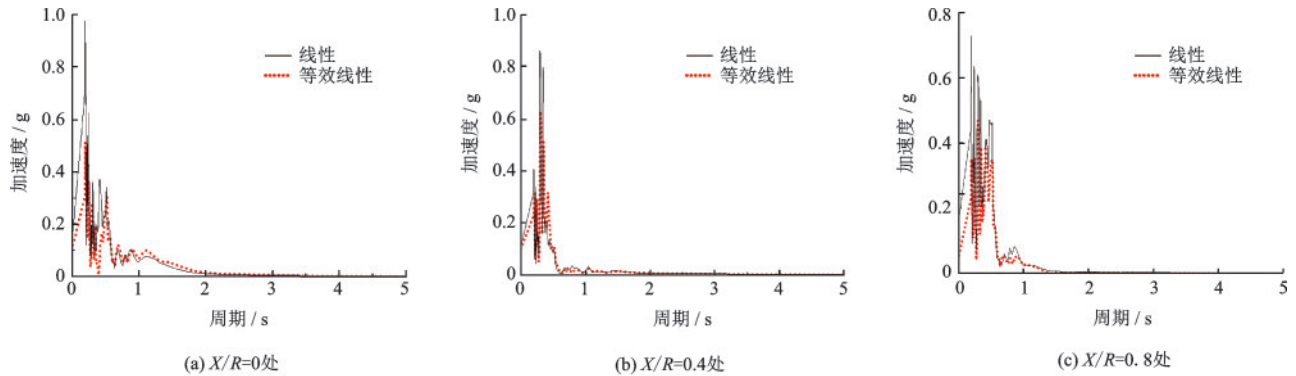


图6 30°斜入射情况地表加速度反应谱对比

Fig.6 Ground response spectrum comparison (30-degree incidence)

地整体刚度自然降低,相应的沉积谷地表面地震动卓越周期变长。这对较长周期结构抗震可能产生不利影响。

4 结论

利用FEM-IBIEM方法结合等效线性理论,求解分析了SV波在垂直入射和倾斜入射下沉积谷地非线性地震响应问题,结果表明:

(1)一般在沉积谷地的中部放大效应最为显著,且SV波以30°(接近临界角)斜入射下沉积谷地地震加速度反应比垂直入射情况更为强烈。

(2)与线性分析结果相比,考虑非线性效应,沉

积地表加速度峰值有明显的下降趋势,降幅约为10%~40%,且加速度在SV波垂直入射情况下的降低幅度普遍大于30°斜入射情况。

(3)与线性结果相比,沉积地表加速度反应谱幅值均有不同程度的降幅,降幅主要集中在高频段,且某些点位加速度反应谱卓越周期增长明显。

综上所述,对沉积河谷场地地震动进行非线性分析是必要的,可更精细地定量评估实际场地地震动放大效应。

参考文献:

[1] 周国良,李小军,侯春林,等. SV波入射下河谷地形地

- 震动分布特征分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(4): 1161-1166.
- Zhou G L, Li X J, Hou Ch L, et al. Characteristic analysis of ground motions of canyon topography under incident SV seismic waves[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(4): 1161-1166. (in Chinese)
- [2] 刘晶波. 局部不规则地形对地震地面运动的影响[J]. 地震学报, 1996, 18(2): 239-245.
- Liu J B. Effects of local irregular topography on seismic ground motion [J]. Acta Seismologica Sinica, 1996, 18(2): 239-245. (in Chinese)
- [3] 张孝波, 景立平, 肖文海. 大型河谷场地地震动特性研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2010, 30(6): 644-649, 654.
- Zhang X B, Jing L P, Xiao W H. Research on ground motion characteristics of large-scale valley [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2010, 30(6): 644-649, 654. (in Chinese)
- [4] 马宏伟, 陈文化, 宗琦, 等. SV波引起的水下输水隧洞平面地震响应研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2016, 36(5): 766-772.
- Ma H W, Chen W H, Zong Q, et al. Transverse responses of underwater convey tunnel to incident SV waves [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2016, 36(5): 766-772. (in Chinese)
- [5] 刘中宪, 黄磊. 含软夹层层状沉积谷地对P、SV和Rayleigh波的散射[J]. 地震工程与工程振动, 2015, 35(1): 105-117.
- Liu Zh X, Huang L. P, SV and Rayleigh waves scattering in layered alluvial valleys with soft interlayer [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2015, 35(1): 105-117. (in Chinese)
- [6] Seed H B, Idriss I M. The influence of soil conditions on ground motions during earthquakes [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1969, 95(1): 93-137.
- [7] 廖振鹏, 李小军. 地表土层地震反应的等效线性化解法, 地震小区划一理论与实践[M]. 北京: 地震出版社, 1989: 141-153.
- Liao Zh P, Li X J. Linearization method for computing earthquake response of ground layered soil [M]. Beijing: Seismological Press, 1989: 141-153. (in Chinese)
- [8] 齐文浩, 薄景山. 土层地震反应等效线性化方法综述[J]. 世界地震工程, 2007(4): 221-226.
- Qi W H, Bo J Sh. Summarization on equivalent linear method of seismic responses for soil layers [J]. World Earthquake Engineering, 2007(4): 221-226. (in Chinese)
- [9] 尤红兵, 赵凤新, 荣棉水. 地震波斜入射时水平层状场地的非线性地震反应[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(2): 235-236.
- You H B, Zhao F X, Rong M Sh. Nonlinear seismic response of horizontal layered site due to inclined wave [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(2): 235-236. (in Chinese)
- [10] 王笃国, 赵成刚. 地震波斜入射时二维层状介质自由场求解的等效线性化方法[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(3): 554-561.
- Wang D G, Zhao Ch G. Two-dimensional equivalent linear seismic analysis of free field in layered half-space due to oblique incidence [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(3): 554-561. (in Chinese)
- [11] 杨笑梅, 赖强林. 二维土层地震反应分析的时域等效线性化解法[J]. 岩土力学, 2017, 38(3): 847-856.
- Yang X M, Lai Q L. Time-domain equivalent linearization method for two-dimensional seismic response analysis [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(3): 847-856. (in Chinese)
- [12] Mossesjian T K, Dravinski M. Application of a hybrid method for scattering of P, SV and Rayleigh waves by near-surface irregularities [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1987, 77(5): 1784-1803.
- [13] Falcone G, Boldini D, Amorosi A. Site response analysis of an urban area: a multi-dimensional and non-linear approach [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, 109: 33-45.
- [14] Tropeano G, Chiaradonna A, Donofrio A, et al. A numerical model for non-linear coupled analysis of the seismic response of liquefiable soils [J]. Computers and Geotechnics, 2019, 105: 211-227.
- [15] Carbonari S, Morici M, Dezi F, et al. Soil-structure interaction effects in single bridge piers founded on inclined pile groups [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2017, 92: 52-67.
- [16] Li M, Lu X, Lu X, et al. Influence of soil - structure interaction on seismic collapse resistance of super-tall buildings [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2014, 6(5): 477-485.
- [17] Gatti F, Lopez-Caballero F, Paolucci R, et al. Near-source effects and non-linear site response at Kashiwazaki-Kariwa Nuclear Power Plant, in the 2007 Chuetsu-Oki earthquake: evidence from surface and downhole records and 1D numerical simulations [J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2018, 16(3): 1105-1135.
- [18] 杜修力, 许紫刚, 许成顺, 等. 基于等效线性化的土 - 地下结构整体动力时程分析方法研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(12): 2155-2163.
- Du X L, Xu Z G, Xu Ch Sh, et al. Time-history analysis method for soil-underground structure system based on equivalent linear method [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(12): 2155-2163. (in Chinese)

(本文责编: 赵霞)