

多维地震动输入下沉积盆地地震效应对比研究

熊甜慧,于彦彦,丁海平

(苏州科技大学 江苏省结构工程重点实验室,江苏 苏州 215011)

摘要:对于盆地等局部不均匀场地在平面波入射下的地震反应分析多假定地震动为单一波型(SV波、SH波或P波)输入,而实际入射的地震动一般为多向耦合的震动。文中基于谱元法模拟了三维半椭球形沉积盆地在平面波垂直入射下的地震动响应,通过分析地表加速度峰值、放大系数分布、地表点剖面时程以及特征频率处的反应谱比分布,对比研究了多维地震动输入下沉积盆地的地震动放大特征。结果表明:输入双向水平地震激励相比输入单向水平地震激励对盆地内地震动有明显放大作用,最大放大系数可达1.87。考虑双向水平地震动同时输入的影响后,会显著改变地表加速度峰值的分布特征,双向输入时沿各向传播的波的叠加干涉使得加速度峰值呈不对称分布。双向地震动作用使得波传播特征变得更加复杂,最强烈地震动的位置发生改变。双向输入除对反应谱值有放大外,对其卓越周期的分布也会产生一定影响。

关键词:谱元法;三维沉积盆地;平面波;双向地震动输入;放大系数

中图分类号:P315.9

文献标志码:A

Comparative study on seismic effects of sedimentary basins under multi-dimensional ground motion inputs

XIONG Tianhui, YU Yanyan, DING Haiping

(Key Laboratory of Structure Engineering of Jiangsu Province, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, China)

Abstract: In the seismic response analysis of locally irregular sites such as basins under plane wave incidence, it is usually assumed that the input seismic motion is of a single wave type, i.e., SV wave, SH wave, or P wave. However, the actual incident motion is generally a multi-dimensional coupled shaking case. Based on the spectral element method, the ground motion response of a three-dimensional semi-ellipsoidal sedimentary basin under the vertical incidence of plane waves is simulated. By analyzing the distributions of peak ground acceleration (PGA) and the corresponding amplification factor, the seismograms along the surface point profile, and the response spectrum ratio distribution at the characteristic frequencies, the ground motion amplification features of the sedimentary basin under multi-dimensional ground motion input are investigated through comparisons with the results of single wave type incidence. The results show that compared with the unidirectional horizontal seismic excitation, the bidirectional horizontal seismic input has a significant amplification effect on ground motion in the basin, and the maximum amplification factor can reach 1.87. Considering the influence of simultaneous input of bidirectional horizontal ground motion, the distribution characteristics of the peak ground acceleration will change significantly. The superposition and interference of waves propagating in different directions result in an asymmetrical PGA distributions. The bidirectional ground motion input makes the wave propagation characteristics

收稿日期:2023-12-26; 修回日期:2024-04-09

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(51808371);中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项资助项目(2021EEEEVL0001)

作者简介:熊甜慧(1997—),女,硕士研究生,主要从事场地地震效应研究。E-mail:2602756408@qq.com

通信作者:于彦彦(1986—),男,副教授,博士,主要从事场地地震效应及近场波动数值模拟研究。E-mail:yyy_usts@126.com

more complex, and the location of the strongest ground shaking changes. In addition to the amplification of the response spectrum value, the bidirectional input also has a certain influence on the distribution of the predominant period.

Key words: spectral element method; three-dimensional sedimentary basin; plane wave; bidirectional ground motion input; amplification factor

0 引言

在结构抗震分析中,实际的输入地震动是一种复杂的多维激励,结构与场地在单维及多维地震动作用下的反应是不同的^[1]。许多研究者对地震波输入不同振动方向下的地震响应分析进行了研究,如宋贞霞等^[2]通过对拱坝在双向地震动输入下的地震响应进行分析,对比了坝体和坝基的位移和应力响应。姬淑艳等^[3]指出对大型非对称结构考虑双向水平地震作用抗震设计研究的必要性。陈红娟等^[4]通过自由场振动台试验研究了锯末混合土地基在水平双向地震动激励下的场地动力特性及其变化规律,并与水平单向地震动激励下的结果进行了对比分析。JIAO 等^[5]通过三维地震分析研究了隧道入口在不同震动方向地震动作用下的动力响应。宝鑫等^[6]提出了一种考虑水平和竖向地震动及重力荷载共同作用的土层场地地震反应分析模型。

需指出的是,当前对双向地震动输入的研究主要集中在建筑结构^[7-13]及桥梁结构^[14-15]等,而关于盆地等类似复杂场地在多维地震动输入下的地震响应的研究较少,而实际地震动在到达盆地基底时理论上都是多向同时震动的状态。同时,沉积盆地作为一种典型场地,在中国乃至全球都有广泛的分布,国内外大量研究表明,沉积盆地对其内部的地震动有显著的放大效应,进而导致盆地内的震害更加严重^[16-21]。因此,有必要开展多维地震动输入对三维沉积盆地地震效应影响的研究。

本文采用一种将高精度谱元法与多次透射边界相结合的散射问题波动数值模拟方法,来模拟双向地震动输入下三维沉积盆地的地表地震动。通过分析双向地震动作用对地表加速度峰值(peak ground acceleration, PGA)及时域和频域放大系数分布的影响,研究多维地震动输入下沉积盆地的地震动放大效应。

1 计算模型与计算方法

建立三维半椭球形沉积盆地模型如图 1 所示。模型尺寸为 $8\text{ km} \times 4\text{ km} \times 0.4\text{ km}$,三维半椭球形沉积盆地尺寸为 $6\text{ km} \times 2\text{ km}$,盆地最大深度 200 m 。盆地及基岩介质参数如表 1 所示。为考虑盆地介质衰减的影响,取 S 波品质因子为剪切波速的 0.1 倍,P 波品质因子为该值的 2 倍。地震波从模型底部垂直入射。为了分析双向水平地震动作用下三维沉积盆地的地震动响应,本文首先定义当 S 波输入时,沿 X 轴(盆地长轴)方向震动的波为 SV 波,沿 Y 轴(盆地短轴)方向震动的波为 SH 波。进而开展单向地震动输入(SV 波或 SH 波单独输入)与双向地震动输入(SV 波、SH 波同时入射)下沉积盆地地震效应的对比研究。

本文采用基于高精度勒让德谱元法(四阶谱元,每个单元内包含 125 个节点)与多次透射边界相结合的三维散射问题波动数值模拟方法^[22]来模拟单向、双向地震动输入下三维半椭球形沉积盆地的地震动响应。其中在模型的侧边界和底边界设置二阶透射边界,以减少人工边界处反射波的影响。采用六面体单元模拟半椭球形盆地基底面,为更好地划分盆地边界,对盆地及邻近区域的单元进行了局部加密处理。为满足模拟精度要求,模型最小网格尺寸为 20 m ,计算时间步距为 0.0005 s 。

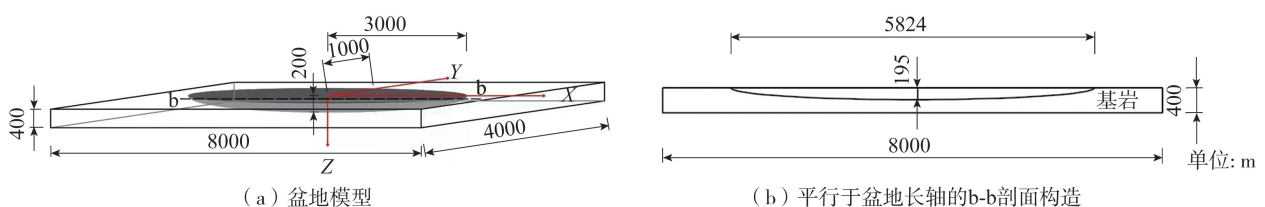


图 1 半椭球形沉积盆地模型及特征剖面示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the semi-ellipsoidal sedimentary basin model and characterized section

表1 模型介质参数

Table 1 Model medium parameters

土层	参数				
	压缩波速/(m/s)	剪切波速/(m/s)	密度/(kg/m ³)	Q_p	Q_s
盆地	600	300	1800	60	30
基岩	2000	1000	2700	9000	9000

注: Q_p 和 Q_s 分别为P波品质因子和S波品质因子。

采用 Northridge 波作为实际地震波输入,考虑台站记录为自由地表的响应,本文采用简化方法,将地震动时程除以2作为盆地模型基底输入波。入射波的时程以及反应谱如图2所示。分别以下列方式进行输入:①EW分量时程以SV波形式输入(偏振方向垂直y-z平面,即沿x方向);②NS分量时程以SH波形式输入(偏振方向垂直x-z平面,即沿y方向);③EW、NS分量分别以SV、SH波形式同时输入。

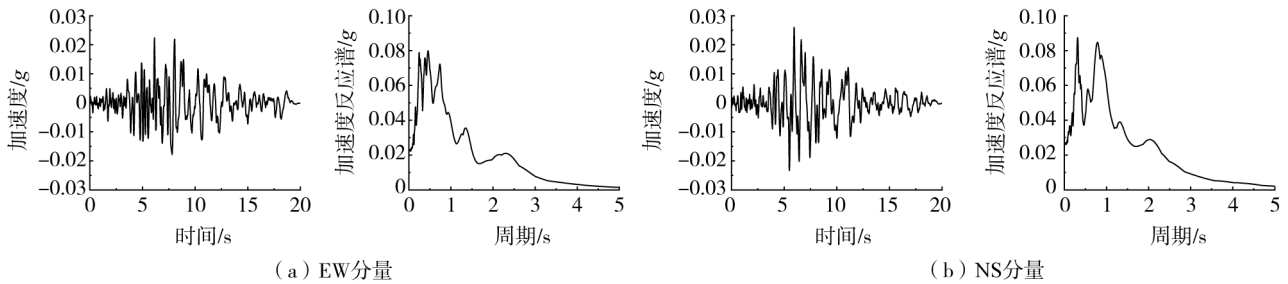


图2 Northridge波时程及反应谱

Fig. 2 Time-history and response spectrum of Northridge wave

为验证分析模型的可靠性,将基于本文方法模拟得到的半椭圆形盆地在无量纲频率 $\eta=0.5$ (定义 $\eta=2a/\lambda$,其中 a 为盆地短轴的一半, λ 为入射波波长)时的地表位移峰值与刘中究等^[23]基于间接边界元法的结果对比,如图3所示,其中盆地长短轴之比为2,深宽比为0.5,盆地内外介质阻抗比为1/3。由图可知,采用本文方法的结果与文献[23]中的结果总体上吻合较好,模拟得到的盆地对于地震动的放大系数的分布特征及其幅值较为一致。考虑到盆地基底划分方式和计算方法的不同,模拟的地表强地震动的范围有一定差异。以上结果表明本文的分析模型与计算方法可行,可用于下一步的多维地震动输入下的结果分析。

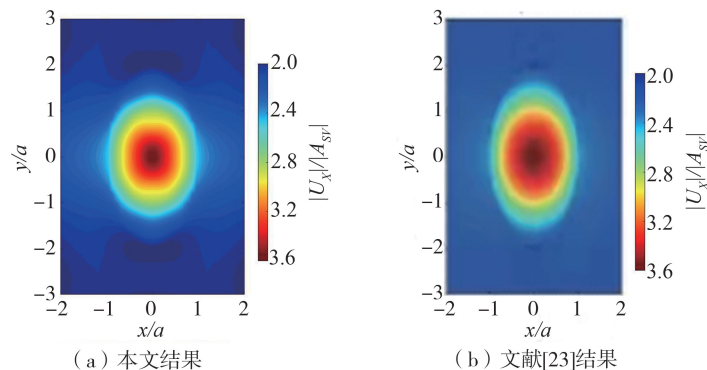


图3 SV波入射时本文结果与文献[23]所得的地表位移幅值的对比

Fig. 3 Comparison of surface displacement amplitudes of a semi-ellipsoidal valley for SV wave incidence between this paper and the results of Ref.[23]

2 结果分析

2.1 加速度峰值和放大系数分布

基于上述模型,分别输入单向水平地震激励(SV波或SH波)和同时输入双向水平地震激励(SV波、SH波同时入射)计算沉积盆地内及其周边观测点的地震动响应。不同方式地震动输入下地表加速度峰值分布情况(白色椭圆形曲线代表盆地范围),如图4所示。其中 x, y 坐标分别表示地表点与盆地中心点沿两水平方向的距离,坐标系如图1(a)所示。图4(a)~(c)分别为SV波入射、SH波入射以及双向输入时地表加速度峰值分布。

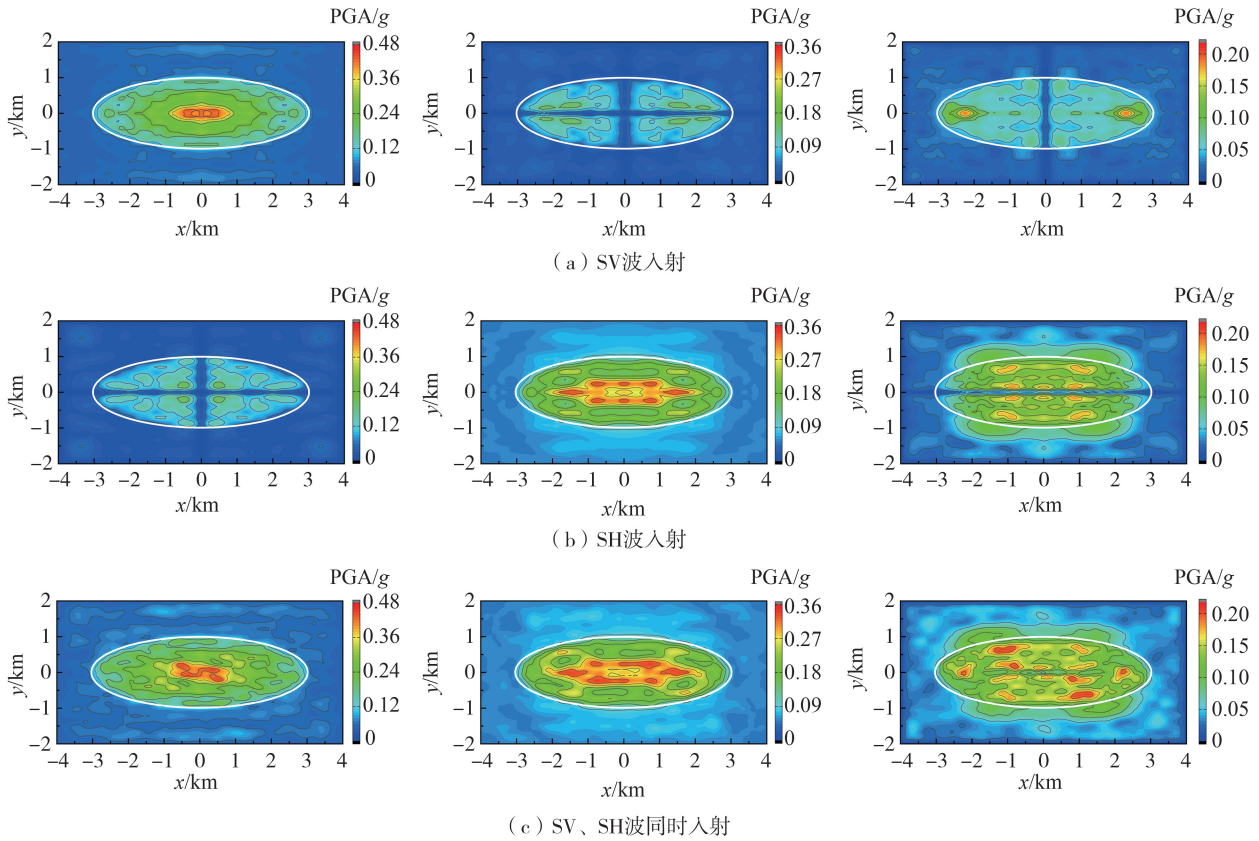


图 4 不同地震动输入方式下 EW (左)、NS (中) 和 UD (右) 分量加速度峰值分布
 Fig. 4 Distribution of peak acceleration of EW (left), NS (center) and UD (right) components under different ground motion input modes

对比图 4 中 EW 分量的结果可知,不同震动方向的地震动输入时盆地内最强烈地震动的方向及强地震动区域的位置显著不同,SV 波输入时,EW 方向地震动最强烈,盆地中心的加速度峰值明显大于其他区域;SH 波输入时,NS 方向地震动最强烈,其位置环绕盆地中心;而双向输入时在三分量上均有较明显地震动。同时,受到震动方向垂直的 2 个输入波耦合的影响,此时三分量的地表加速度峰值分布均呈不对称分布。多维地震动输入显著改变了盆地内地震动的分布特征,但总体来看,双向输入地震动应是单向输入下地震动的矢量叠加。此外,双向输入时地表加速度最大峰值大于单向输入时的值,同时单一的 SV 波或 SH 波输入时产生的垂直于波震动方向分量(如 SH 波入射时的 EW 分量)的地震动强度均不明显,甚至小于次生的垂直分量的地震动强度值。

为进一步研究不同的地震激励作用对盆地地震动放大效应的影响,定义盆地场地的放大系数(amplification factor, AF)为 2 个方向同时输入地震动与单一方向输入地震动所得的地表地震动最显著分量的加速度峰值的比值,如定义 EW 分量的放大系数为双向输入时相比 SV 波入射时 EW 分量加速度峰值的比值,NS 分量的放大系数为双向输入相比 SH 波入射时 NS 分量加速度峰值的比值。EW 分量与 NS 分量的地表加速度峰值放大系数分布如图 5 所示,其中五角星所示为放大系数较大值出现的典型位置。

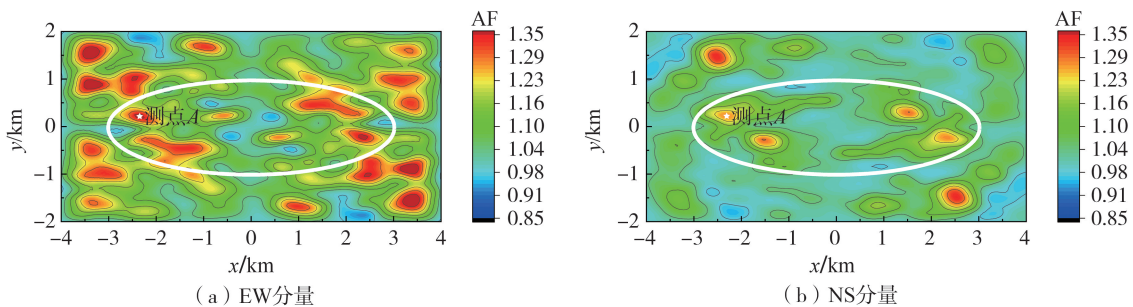


图 5 双向地震动输入下的地表加速度峰值放大系数分布

Fig. 5 Distribution of amplification factor of peak ground acceleration under bidirectional ground motion input

图5中EW分量的结果显示,多维地震动输入下盆地内地震动有放大效应。相比SV波单独输入,EW分量放大系数普遍大于1.1,最大值达到了1.86左右,且盆地外的基岩场地的地震动在双向输入时也有明显的放大效应。盆地内放大效应强烈区域主要集中在盆地边缘区域,波场快照显示是由于双向地震动同时输入时产生的干涉导致。此外,可以看出放大效应强烈区域与PGA分布类似,呈不对称分布。相比EW分量,NS分量的放大系数要小得多,盆地内最大放大系数数值为1.5左右,这可能与入射波的振动方向沿盆地短轴有关(本文假定沿短轴方向振动时为SH波)。但NS分量放大效应强烈区域的位置与EW分量的结果类似,均位于模型的斜对角线附近区域。比较而言,对本文入射波,双向输入相比入射波沿盆地长轴方向振动情况的放大系数相对更大。

2.2 特征剖面时程分析

选取横穿盆地长边的剖面b-b(图1)的加速度时程来分析不同方式地震动激励下的波动传播特征。图6分别为Northridge波输入下三分量的加速度时程,图中同时给出了对应剖面的沉积层厚度以及PGA的分布。

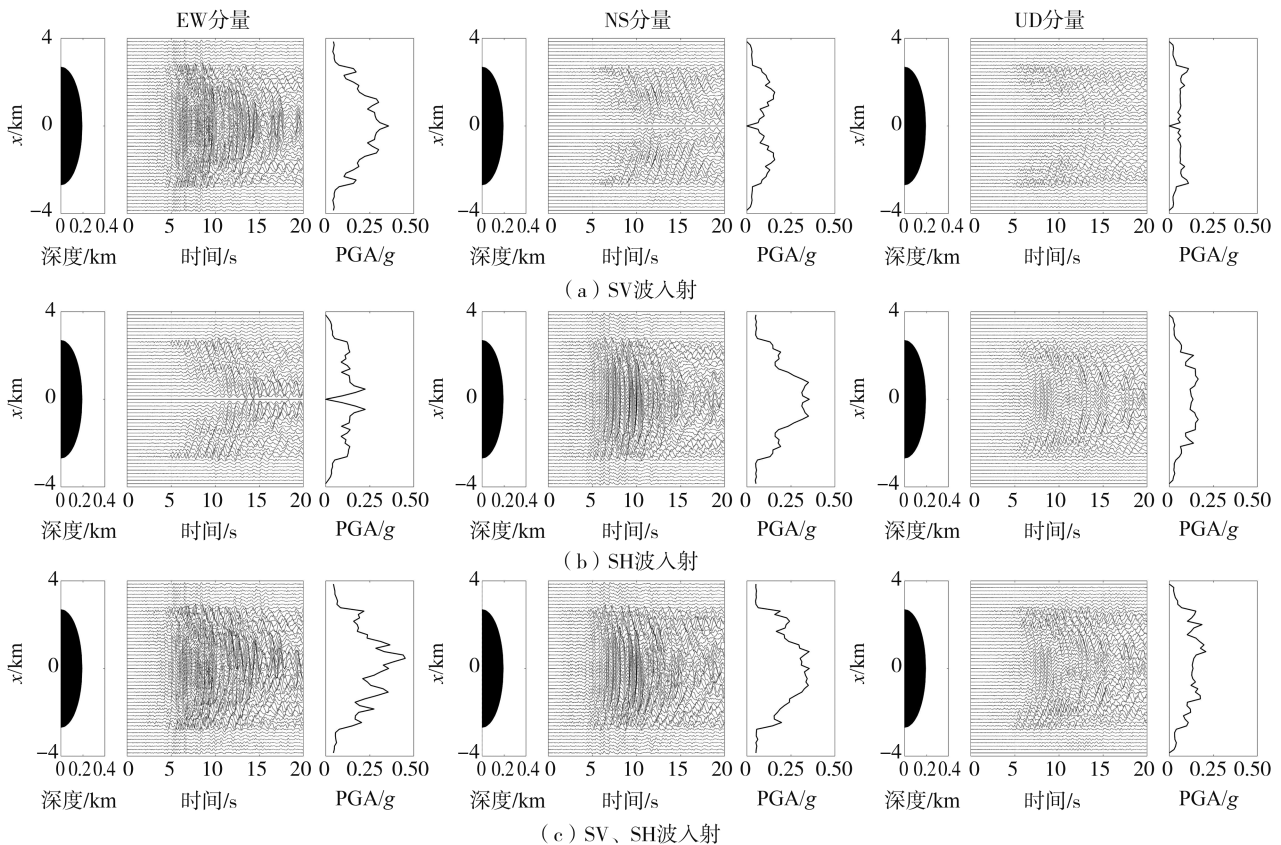


图6 不同地震动输入方式下b-b剖面三分量加速度时程

Fig. 6 Acceleration time histories along the three components of the profile b-b under different wave input patterns

从结果来看,输入单向水平地震激励(SV波或SH波)时,剖面地表加速度峰值呈对称分布,而同时输入双向水平地震激励(SV波、SH波同时入射)时,地表加速度峰值呈非对称分布。分析原因可以发现,SV波入射时,可明显看出对NS分量,剖面左右两侧对称点的震相正好相差 180° ,这一相位相反的波动在剖面中心处发生相消干涉,导致图6(a)中NS分量的加速度峰值在剖面中心处为0。而SH波入射时该剖面上EW分量的PGA值也存在类似现象。双向输入时,这些对称位置相反震相的地震波与另一方向输入波引起的振动(剖面左右两侧波动震相相同,如图6(b)中NS分量的结果)发生相长或相消叠加干涉,使得相长干涉区域(剖面上坐标为正的)的地震动被增强,相消区域(剖面上坐标为负的)的地震动幅值被削减,进而导致剖面上地震动幅值呈非对称分布,如图6(c)所示,这与前述加速度峰值分布的特征一致。因此,双向输入时地表地震动会受到两分量输入波引起振动的耦合的影响。此外,考虑双向同时输入的影响后,不同波形的叠加干涉导致波场更为复杂,且地表加速度峰值相比单向输入更大,尤其以EW分量最为明显。

分别取EW分量和NS分量地表加速度峰值放大均较为明显的测点A(图5中五角星所示),绘出其加速度时程及反应谱如图7所示。图7(a)为以SV波输入和两方向同时输入时所得的A点加速度时程及其反应谱,图7(b)为以SH波输入和双向输入时所得的地表点加速度时程及其反应谱。为更直观看出盆地对地震

动的放大作用,图中同时给出了相应的入射波时程。从中可明显看出双向输入对地面运动的放大作用,如 SV 和 SH 波入射时的反应谱极值分别为 0.5、0.7 g,而双向输入时的极值分别达到了 1.12、1.00 g。同时,值得注意的是反应谱曲线的“双峰”分布特征的变化,尽管反应谱曲线的卓越周期(峰值最大值点对应的周期值)基本保持不变,但次峰周期值在双向输入时变大,表明双向输入时地震动周期成分有“变长”的趋势。以 SV 波入射为例,单向输入时的次峰周期为 0.3 s,双向输入时则增大到 0.4 s 左右,如图 7(a)所示。此外,相比 SH 波单独入射,双向输入时除次峰周期值的变化外,次峰对应的反应谱值的放大系数(2 倍左右)比主峰值的放大作用更强烈。这些在类似盆地场地的结构抗震设计中应予以重视。

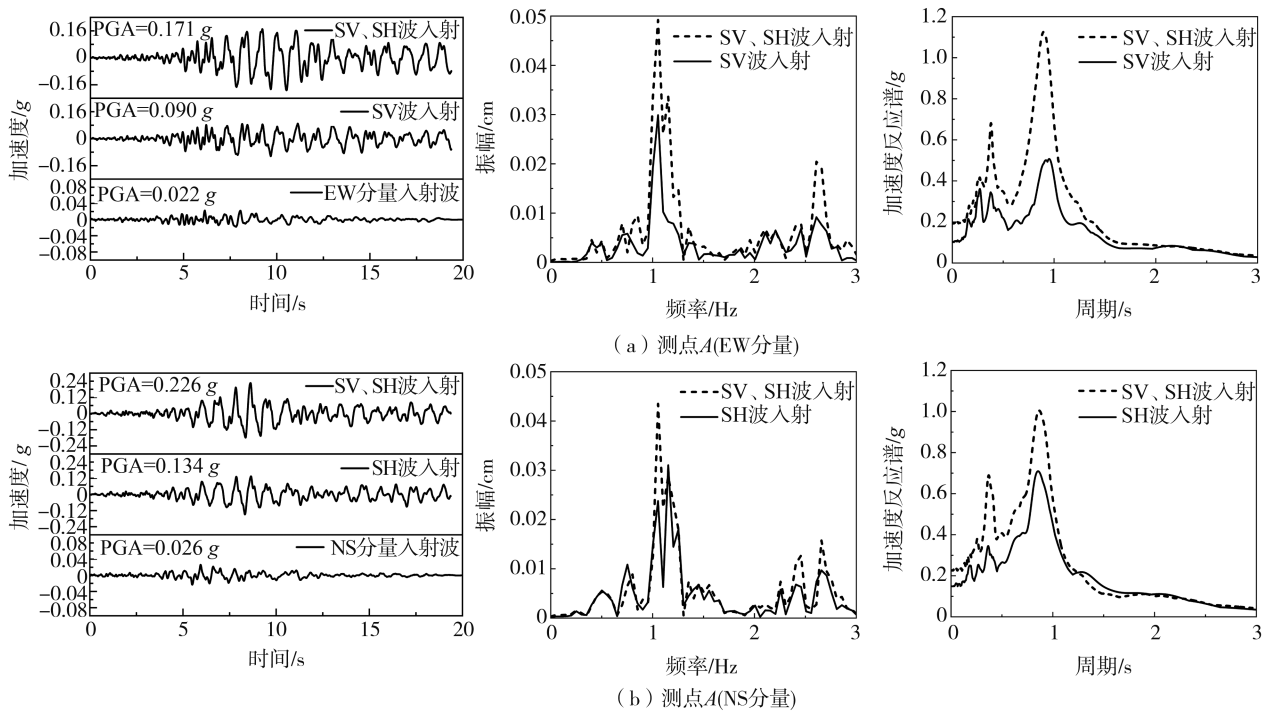


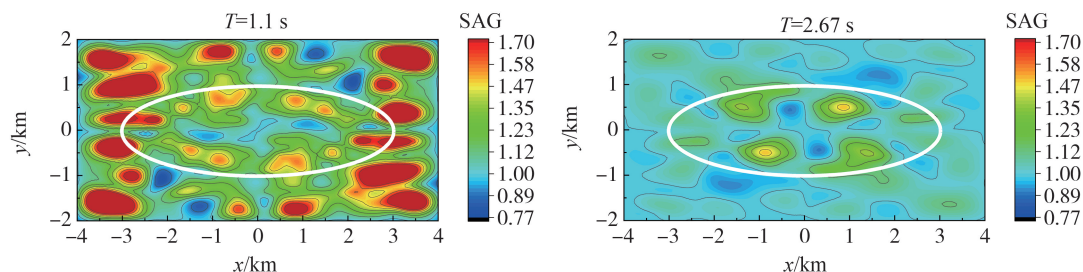
图 7 不同地震动输入方式下观测点 A 加速度时程、傅氏谱及反应谱对比

Fig. 7 Comparison of acceleration time histories, Fourier spectrum and response spectra of observation point A under different ground motion input modes

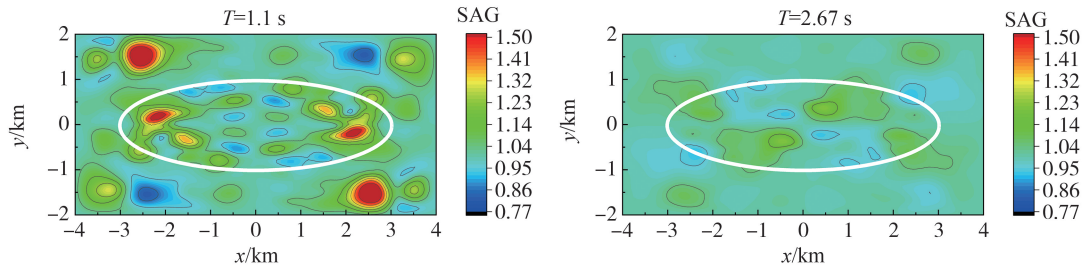
2.3 不同周期下的反应谱放大系数

为考察盆地对不同周期地震动反应谱放大特征的差异,定义盆地场地的反应谱放大系数(spectral acceleration aggravation factor, SAG)为同一盆地模型输入双向地震动和输入单向地震动时地表点加速度反应谱的比值。图 8 给出了不同方式地震动激励下,盆地地表观测点对于周期 T 分别为 1.1 s(图 7 中主峰周期)和 2.67 s(约为盆地最深处一维土层对应的自振周期)的水平分量地震动的反应谱放大系数分布。

由图 8 可知,盆地对不同周期地震动的反应谱放大特征差别较大,且相比不同振动方向的单一波动输入时的放大效应也有显著差别。 $T=1.1$ s 时,相比以 SV 波形式输入的情况,盆地地表 SAG 值普遍大于 1.3,即大部分场点处均有显著的放大作用,而相比 SH 波单独输入的 SAG 值普遍要小。此外,1.1 s 周期处的 SAG 分布存在非常明显的盆地边缘效应,SAG 较大值的区域集中在环盆地边缘区域,且盆地外基岩部分也有明显的放大作用。 $T=2.67$ s 时,其 SAG 值相比 $T=1.1$ s 显著减小,但 EW 分量依然存在放大系数值大于 1.2 的区域,最大 SAG 值可达 1.5。而对于 NS 分量,其放大作用基本不明显。



(a) 双向输入相比SV波单独输入(EW分量)



(b) 双向输入相比SH波单独输入(NS分量)

图8 地震动双向输入时三维盆地对于典型周期处的反应谱放大系数分布

Fig. 8 Distribution of response spectrum amplification factor of three-dimensional basin for typical period under bidirectional ground motion input

3 输入波对结果的影响

考虑输入地震动频谱特征的差异,采用频率成分相对更高的 Kobe 波作为本节实际地震输入,入射波的两分量时程以及频谱如图9所示。入射波输入方式同 Northridge 波。

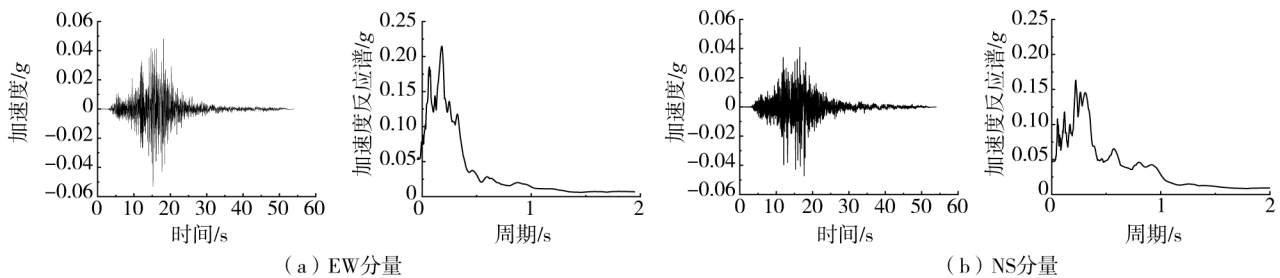


图9 Kobe波时程及反应谱

Fig. 9 Time histories and response spectrum of Kobe wave

Kobe 波双向输入时地表加速度峰值(PGA)的分布如图10所示。与 Northridge 波一致,在考虑双向输入的影响后,地表加速度峰值亦呈不对称分布,多维地震动同时输入显著改变了盆地内地震动的分布特征。相较于相对低频的 Northridge 波输入,Kobe 波输入时水平分量上盆地的聚焦效应更加突出,强烈地震动集中在盆地中心区域,而 UD 分量上盆地的边缘效应更加明显。

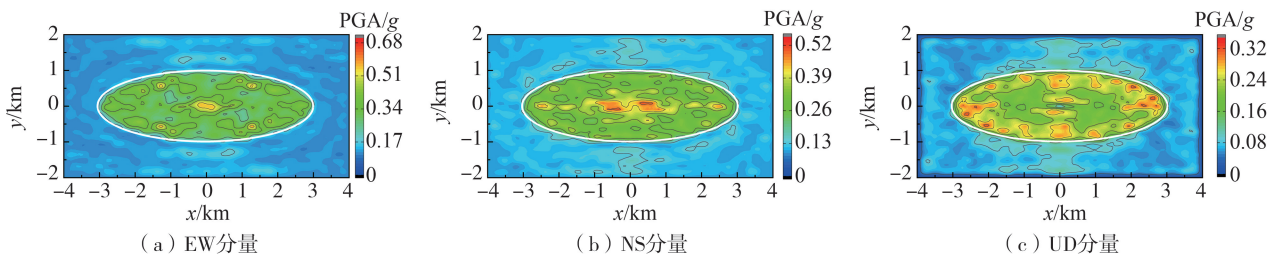


图10 双向地震动输入下加速度峰值分布

Fig. 10 Peak acceleration distributions under bidirectional ground motion input

Kobe 波入射下 EW 与 NS 分量的地表加速度峰值放大系数分布如图11所示。结果显示此时地震动放大区域主要集中在盆地内,外部基岩区域的放大系数相对要小,其中 EW 和 NS 分量的放大系数值普遍大于 1.05,放大系数最大值均达到了 1.5 左右,说明考虑双向水平地震动作用的影响后,地表加速度峰值都有普遍放大。与 Northridge 波输入结果一致,放大系数较大值仍主要位于盆地边缘附近。但与之不同的是,此时相比 SV 波单向输入时 EW 分量的放大系数小于相比 SH 波单向输入时 NS 分量的放大系数,如图11(a)和图11(b)所示。

图12为地表代表性观测点(其位置如图11中五角星所示)分别仅 SV 波、仅 SH 波输入和2个方向同时输入时的加速度时程及其反应谱图。对比 Northridge 波输入的结果(图7)可见,Kobe 波输入时的反应谱放大系数有所减小,尤其是测点 B 的 EW 分量,而该分量上 0.5~1.5 s 周期段的反应谱值有较明显增强。测点 C 的反应谱值在 0.1~0.5 s 周期段的放大作用依然明显。同时,两台站上反应谱主峰或次峰周期值变化的现象依然存在。

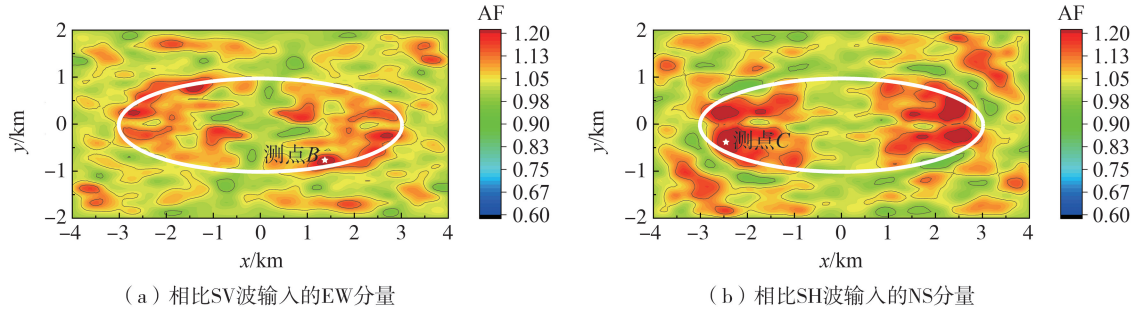


图 11 双向地震动输入下地表加速度峰值放大系数分布

Fig. 11 Distribution of amplification factor of peak ground acceleration under bidirectional ground motion input

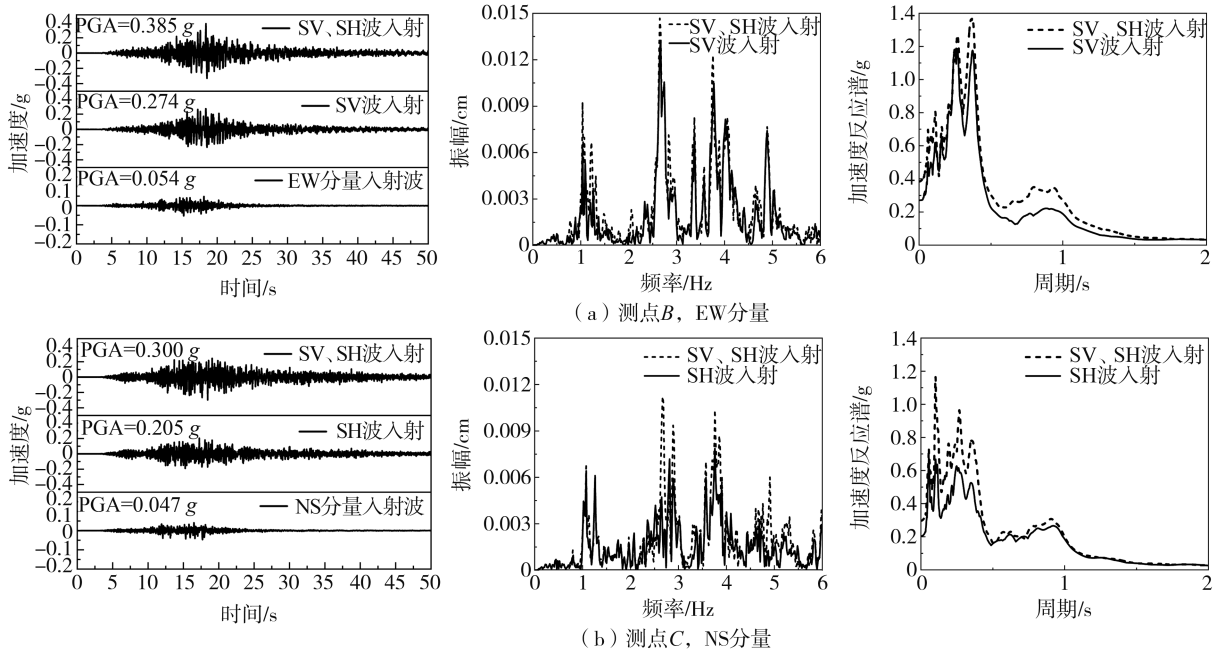


图 12 不同地震动输入方式下 EW、NS 分量加速度时程、傅氏谱及加速度反应谱

Fig. 12 Acceleration time histories, Fourier spectra and acceleration response spectra of EW and NS components under different ground motion input modes

4 结论

本文考虑多维地震动垂直入射下输入地震动的偏振方向及其耦合对三维沉积盆地地震效应的影响,利用谱元法结合并行计算技术模拟了不同地震动输入方式下,半椭圆形盆地的地表加速度峰值和放大系数分布特征以及特征点处的反应谱放大特征,得到如下主要结论:

- 1) 考虑多维地震动输入会显著改变盆地内地表加速度峰值的分布,单向输入时仅能反映双向输入的部分特征。
- 2) 双向输入时不同方向波动之间的干涉使得地表加速度峰值呈非对称分布,多维地震动输入下波传播特征变得更加复杂,最强烈地震动的位置也有所改变。
- 3) 考虑水平双向地震动同时输入的影响时,其三分量地表加速度峰值相比仅考虑单向地震动输入的结果有明显增强,加速度峰值最大放大系数达到了 1.86,但其值随输入波的不同有一定变化。反应谱值在特定周期段也有明显放大,且反应谱峰值的形态特征也受双向输入的影响。

参考文献:

[1] 潘毅, 季晨龙, 卢立恒, 等. 地震动频谱特性对基础隔震结构双向地震响应的影响[J]. 土木工程学报, 2013, 46(5): 50-55.
 PAN Yi, JI Chenlong, LU Liheng, et al. Effects of ground motion characteristics on bilateral seismic responses of base-isolated structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(5): 50-55. (in Chinese)

- [2] 宋贞霞, 丁海平. 双向地震波输入时振动方向对拱坝地震响应的影响[J]. 地震工程与工程振动, 2013, 33(3): 64-70.
SONG Zhenxia, DING Haiping. Effect of earthquake wave vibration direction on seismic responses of arch dam under bidirectional earthquake wave input[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2013, 33(3): 64-70. (in Chinese)
- [3] 姬淑艳, 李英民, 刘立平, 等. 考虑双向水平地震作用的结构设计问题研究[J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26(5): 68-72.
JI Shuyan, LI Yingmin, LIU Liping, et al. Study on bi-directional seismic action in structural seismic design[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2006, 26(5): 68-72. (in Chinese)
- [4] 陈红娟, 李小军, 闫维明, 等. 双向地震作用下锯末混合土场地动力特性分析[J]. 地震工程学报, 2019, 41(4): 1017-1025.
CHEN Hongjuan, LI Xiaojun, YAN Weiming, et al. Dynamic characteristics of sawdust-mixed clay site model under bidirectional seismic actions[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(4): 1017-1025. (in Chinese)
- [5] JIAO H Y, ZHAO M, HUANG J Q, et al. Nonlinear response of tunnel portal under earthquake waves with different vibration directions[J]. Computer Modeling in Engineering & Sciences, 2022, 131(3): 1289-1314.
- [6] 宝鑫, 刘晶波, 陆喜欢, 等. 考虑多维地震动及重力作用的土层场地地震反应分析模型[J]. 地震工程与工程振动, 2023, 43(5): 1-11.
BAO Xin, LIU Jingbo, LU Xihuan, et al. Seismic response analysis model of soil-layer sites considering the combined effect of multidirectional seismic ground motions and gravity[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2023, 43(5): 1-11. (in Chinese)
- [7] 温世臣, 杨涛. 双向地震波作用下巨子型有控结构建筑的隔震设计[J]. 地震工程学报, 2020, 42(1): 44-51.
WEN Shichen, YANG Tao. Seismic isolation design of mega-sub controlled structures under bidirectional seismic wave[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(1): 44-51. (in Chinese)
- [8] XU W Z, DU D, WANG S G, et al. Shaking table tests on the multi-dimensional seismic response of long-span grid structure with base-isolation[J]. Engineering Structures, 2019, 201: 109802.
- [9] 李霞, 杜修力, 路德春, 等. 双向水平地震作用下复杂地铁车站振动台模型试验的方案研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2015, 35(3): 321-327.
LI Xia, DU Xiuli, LU Dechun, et al. Test scheme design for shaking table model test of the seismic responses of the complex subway station under two horizontal directions seismic ground motions[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2015, 35(3): 321-327. (in Chinese)
- [10] LIN J L, TSAI K C. Seismic analysis of two-way asymmetric building systems under bi-directional seismic ground motions[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2008, 37(2): 305-328.
- [11] SHAKERI K, GHORBANI S. A pushover procedure for seismic assessment of buildings with bi-axial eccentricity under bi-directional seismic excitation[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2015, 69: 1-15.
- [12] ZHANG C, TAO M X. Strong-column-weak-beam criterion for reinforced concrete frames subjected to biaxial seismic excitation[J]. Engineering Structures, 2021, 241: 112481.
- [13] ROY R, ACHARJYA A, ROY A, et al. Response of structures to bidirectional seismic loading: Research progress and future directions[J]. Journal of Structural Engineering, 2022, 148(7): 03122002.
- [14] 程麦理, 李盛斌, 杨红霞, 等. 多维地震下考虑桩-土相互作用的曲线桥地震响应分析[J]. 地震工程学报, 2019, 41(4): 866-872.
CHENG Maili, LI Shengbin, YANG Hongxia, et al. Seismic response analysis of curved bridges considering pile-soil interaction under multi-dimensional earthquakes[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(4): 866-872. (in Chinese)
- [15] LEE S W, KIM S H, MHA H S. Dynamic responses of multi-span simply supported bridges under bi-directional seismic excitations[J]. Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, 2004, 8(4): 21-32.
- [16] ANDERSON J G, BODIN P, BRUNE J N, et al. Strong ground motion from the Michoacan, Mexico, earthquake[J]. Science, 1986, 233(4768): 1043-1049.
- [17] LEE J M. Earthquake site effect modeling in the Granada basin using a 3-D indirect boundary element method[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2013, 63: 102-115.
- [18] 刘启方. 2014年鲁甸地震龙头山镇盆地共振效应研究[J]. 地震工程与工程振动, 2021, 41(2): 43-52.
LIU Qifang. Study on the basin resonance effect in Longtoushan Town during the 2014 Ludian earthquake[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2021, 41(2): 43-52. (in Chinese)
- [19] WEN K L, PENG H Y. Site effect analysis in the Taipei basin: Results from TSMIP network data[J]. Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences, 1998, 9(4): 691.
- [20] 章小龙, 李小军, 周正华, 等. 武都盆地效应三维有限元数值模拟[J]. 振动工程学报, 2018, 31(5): 811-820.
ZHANG Xiaolong, LI Xiaojun, ZHOU Zhenghua, et al. Three-dimensional simulations of seismic-wave propagation in the Wudu basin with realistic topography based upon the finite-element method[J]. Journal of Vibration Engineering, 2018, 31(5): 811-820. (in Chinese)
- [21] 郭恩, 周锡元. 汶川地震盆地效应的思考与建议[J]. 防灾减灾工程学报, 2010, 30(4): 459-465.
GUO En, ZHOU Xiyuan. Study on basin effects of Wenchuan earthquake[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2010, 30(4): 459-465. (in Chinese)
- [22] 于彦彦, 芮志良, 丁海平. 三维局部场地地震波散射问题谱元并行模拟方法[J]. 力学学报, 2023, 55(6): 1342-1354.
YU Yanyan, RUI Zhiliang, DING Haiping. Parallel spectral element method for 3D local-site ground motion simulations of wave scattering problem[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2023, 55(6): 1342-1354. (in Chinese)
- [23] 刘中宪, 尚策, 王小燕, 等. 三维沉积盆地对地震动的放大效应——间接边界元法模拟[J]. 地震学报, 2017, 39(1): 111-131.
LIU Zhongxian, SHANG Ce, WANG Xiaoyan, et al. Simulation on the amplification effect of a three-dimensional alluvial basin on the earthquake ground motion using the indirect boundary element method[J]. Acta Seismologica Sinica, 2017, 39(1): 111-131. (in Chinese)