

Preliminary Study on Basin Amplification Effect for Vertical Incidence of Two Kinds of SH Pulse Waves

Xueliang Chen
The Division of Strong Ground Motion
Seismology,
Institute of Geophysics, China
Earthquake Administration,
Beijing, China
xueliang_chen@aliyun.com

Jianlong Wang
Engineering Seismology Investigation
Institute
Hebei Earthquake Agency
Shijiazhuang, China
18810004576@163.com

Mengtian Gao
The Division of Strong Ground Motion
Seismology,
Institute of Geophysics, China
Earthquake Administration,
Beijing, China
gaomt1957@163.com

两类 SH 脉冲波垂直入射盆地放大效应初步研究

陈学良
强震动地震学研究室,
中国地震局地球物理研究所
北京, 中国
xueliang_chen@aliyun.com

王建龙
工程地震勘察研究院
河北省地震局
石家庄, 中国
18810004576@163.com

高孟潭
强震动地震学研究室,
中国地震局地球物理研究所
北京, 中国
gaomt1957@163.com

Abstract—Study of basin effect has important reference significance for future urban the planning of earthquake prevention and disaster reduction. The amplification effects of three ideal simple basin models, “square” shape, “inverted convex” shape and “curved” shape, were studied by using the finite element numerical simulation method of decoupled near-field wave combined with transmission boundary. The results show that: 1. Two kinds of basin models, “square” and “inverted convex”, show different rules of seismic response of basin position along with the depth of basin: the square basin model shows similar characteristics to the existing site response, while the calculation results of inverted convex basin model are more fit our existing basin knowledge. Therefore, it is not appropriate to study the amplification effect of basin earthquake ground motion only by using simple “square” basin model. 2. The seismic response of a more realistic “curved-edge” basin model is studied. The calculation results of the symmetric model show good regularity. A relatively large seismic response occurs in the center of the basin, which reflects the role of the “focusing effect” of the basin. The asymmetric basin model is located in the center of the basin and at the edge of the basin. Greater ground motion responses have been observed on both sides of the basin, even on the steeper edge of the basin, which is related to the “edge effect” of the basin; with the softening of the medium in the basin, the ground motion responses of the site in the basin gradually increase; with the increase of the stratification of the medium in the basin, the ground motion responses of the basin are larger. On the whole, the seismic response also tends to increase gradually, but there are also large differences in some locations of the basin, which reflects the complexity of the amplification effect of the seismic basin.

Keywords—Basin amplification effect; basin models; numerical simulation; SH pulse waves, data analysis

摘要—盆地放大效应研究对于未来城市的防震减灾规划,具有重要的参考意义。利用结合透射边界的解耦近场波有限元数值模拟方法,以 SH 波的形式在模型底部垂直入射 6 脉冲波和 Ricker 脉冲波,对二维“方形”,“倒凸形”和“曲边形”三种理想简单盆地模型的放大效应进行了研究,结果表明: 1. “方形”和“倒凸形”两种盆地模型中盆地场点的地震动响应随场点盆地深度的变化,表现出了不同的规律:“方形”盆地模型表现出了与现有场地反应相类似的特征,而“倒凸形”盆地模型的计算结果则更符合我们现有对于盆地放大效应的认识,因此,仅用简单的“方形”盆地模型进行地震动盆地放大效应的研究是不太合适的。2. 对更接近实际的“曲边形”盆地模型的地震动响应进行了研究,对称模型的计算结果展示了很好的规律性,在盆地中央位置出现比较大的地震动响应,体现了盆地“聚焦效应”的作用;非对称盆地模型在盆地中央和盆地边缘处均出现了比较大的地震动响应,在较陡的一侧边缘,甚至出现了比盆地中央更大的地震动响应,这与盆地的“边缘效应”有关;随着盆地内介质变软,盆地内场点的地震动响应逐渐变大;随着盆地内介质分层的增加,盆地的地震动响应整体上也逐渐增大的趋势,但在盆地内的一些位置也出现了比较大的差异,体现了地震动盆地放大效应的复杂性。

关键词—盆地放大效应, 盆地模型, 数值模拟, SH 波

I. 引言

我国有许多大城市位于盆地环境之上,伴随着我国现代化建设的快速发展,城市中出现了越来越多的中高层建筑、大跨度城市立交桥等自振周期较长的工程结构。国内外多次大地震的震害调查经验和强震观测均表明:盆地结构会显著地放大长周期地震动,增加地震动的持时。这会对城市内的中高层建筑、城市立交桥和各

种生命线设施等自振周期较长的工程结构造成严重破坏，而这些工程结构的破坏对于现代化城市打击是毁灭性的，导致城市瘫痪，给震后的应急救援带来巨大的困难，造成更大的人员伤亡和财产损失，而我国目前的抗震设计规范中还没有针对盆地效应做出特别的考虑(王建龙, 陈学良, 等, 2014)。

1985年墨西哥 Michoacán 地震 (Ms8.1)，远在震中 300 多公里以外，坐落在深软粘土盆地之上的墨西哥城，记录到的地面运动强度是盆地外附近基岩场地记录到的地面运动强度的 14 倍还多，持续时间将近是其的 3 倍，并且是周期约 2s 的简谐振动。墨西哥城内出现了严重的震害，破坏程度大大超过了该城市周围地区，甚至比震中区造成的灾害还要重 (Singh et al, 1988)。

1994 年的美国 Northridge 地震 (Mw6.7) 在洛杉矶盆地内西北部记录到的强地面运动要明显强于盆地外附近基岩场地记录到的强地面运动，Santa Monica 地区遭受的震害最为严重，在这个地区，盆地边界是由东西走向的 Santa Monica 断层控制的，而且几乎所有的结构震害都集中在断层 Santa Monica 所在位置和断层的南侧，也就是盆地内，而在断层的北侧，其他条件(震中距)相似的情况下，却没有出现类似的震害 (Graves, 1998)。同样的现象也出现在 1995 年日本的 Hyogo-ken-Nanbu 地震中，震后的震害调查发现了约 30 公里长的狭长震害集中带，而且走向与此处断层面走向一致，由于地表并未发现明显的地表破裂，且该狭长带的位置从断面向盆地内偏移了将近 1km，因此排除了此处近地表断层破裂的可能，之后的震源反演也发现此处的断层破裂主要集中在地面以下超过 10km 深的位置，因此此处深部的断层破裂不会造成如此强的地面运动，原因同样在于浅部盆地的边缘效应 (Kawase, 1996)。

1999 年 9 月 21 日台湾集集地震 (Mw7.6) 和 2002 年 3 月 31 日台湾宜兰外海地震 (Mw7.0)，处在台北盆地内的台北市均遭到了比周围地区严重的高层建筑震害，其中集集地震震中距离台北盆地约 150 公里，宜兰地震震中距离台北 200 多公里，这两次典型的震害异常现象均体现出了台北盆地内比较明显的盆地放大效应 (李宪忠, 2009)。

2008 年 5 月 12 日汶川特大地震 (Ms8.0)，位于四川盆地边缘的汉源县烈度高度异常，遭受了严重的破坏 (郭恩, 2010; 薄景山, 2009)；地处渭河盆地的西安市 (震中距约 650km) 属于低烈度区 (V 度区) 的高烈度异常 (VI 度)，位于渭河盆地边缘的宝鸡市 (震中距约 530km) 则属于 VI 度区中的 VII 异常区，震害均较严重，相关研究结果已经表明这些震害异常现象跟盆地本身造成的地震动放大效应有很大的关系 (王海云, 2011)。

在盆地地下结构比较清楚的情况下，人们可以通过理论分析和数值计算的方法研究盆地效应，但是理论分析只能解决介质简单、形状规则的少数几种理想盆地反应计算问题，而数值模拟方法可以实现对形状不规则、介质情况复杂、更接近实际的复杂盆地反应的计算分析。当前数值模拟方法中在研究一些像盆地、复杂地形等复杂体系时，更显示出了它的优势。

为了更直接地服务于抗震设计规范的修编和新一代地震动参数区划关键技术研究的需要，作为尝试性的定

性研究，采用数值方法初步分析了小“方形”，“倒凸形”和“曲边形”理想盆地模型的地震动放大效应特点，对盆地地震动放大效应与盆地深度之间的相关性进行了揭示。

II. 解耦的近场波动有限元数值模拟方法

我国学者廖振鹏等首先提出了解耦的近场波动有限元数值模拟的思想，提出了一种采用集中质量法将差分近似与有限元离散相结合的方法，从而使内节点运动方程的求解转变为一种解耦的显式时域逐步积分格式。其基本的物理假设如下：波的传播速度是有限的，因此对于有限元网格中的任意一个节点，其在下一个时刻的运动由其临近区域内的结点现在时刻及以前若干时刻的运动即可确定。集中质量显式有限元方法就是典型的显式时域逐步积分方法，该方法不需求解耦联的方程组，计算量小，省时高效。同时很好地保持了有限元自由灵活地剖分不规则形状体系的优点。

该方法利用波场分离技术，将局部透射人工边界和集中质量有限元方法相结合，实现了有限元与有限差分方法的有机结合，该方法可以有效分析地震波在大型、复杂、开放系统中的自由波动机理和波动传播规律。

III. 理想盆地模型的盆地地震动放大效应

本文初步研究了理想“方形”、“倒凸形”和“曲边形”盆地模型的地震动放大效应及其特性。

A. 二维理想“方形”盆地模型计算与分析

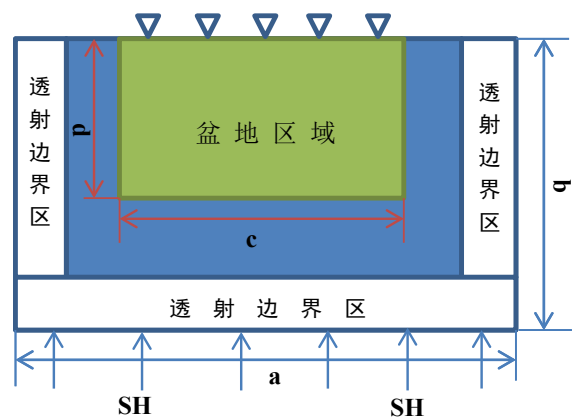


图 1 理想“方形”盆地模型 A 示意图

建立如图 1 所示的二维理想“方形”盆地模型 A，各个模型的几何参数见表 1，盆地内为介质 2 (剪切波速 $\beta_2=260.0\text{m/s}$ ，密度 $\rho_2=1900.0\text{kg/m}^3$ ，阻尼比 $\zeta_2=0.03$)，盆地外及透射边界区内均为介质 1 ($\beta_1=400.0\text{m/s}$ ， $\rho_1=2200.0\text{kg/m}^3$ ， $\zeta_1=0.03$)。利用解耦的近场波动有限元数值模拟方法，以 SH 波的方式在模型底部垂直输入单位 δ 脉冲波 (脉冲底宽 0.2s)，得到 6 个模型地表各点的反应，图 2 给出了 6 个模型地表中心点计算得到的盆地响应。

从图 2 可以看出：理想“方形”盆地模型中 (1) 相对于第一种单一水平层状模型，五个盆地模型地表中心点的反应峰值要更大，反应形式更复杂，持续时间更

长，显示出盆地对地震波有一定的放大作用；（2）整体来看，反应峰值随着盆地深度的增加逐渐增大，表明深度增加，盆地的放大效应有逐渐增强的趋势。

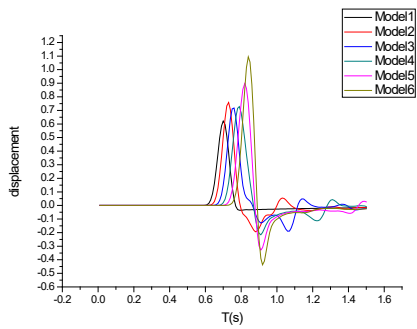


图 2 盆地模型 A 计算结果

表 1 方形盆地模型几何参数

模型	a(m)	b(m)	c(m)	d(m)
Model1	300	240	100	0
Model2	300	240	100	20
Model3	300	240	100	40
Model4	300	240	100	60
Model5	300	240	100	80
Model6	300	240	100	100

B. 二维理想“倒凸形”盆地模型计算与分析

建立如图 4 所示的“倒凸形”理想盆地模型，对理想“倒凸形”盆地模型地震动放大效应进行计算分析，重点关注了模型中一些特殊位置的计算响应，同时建立

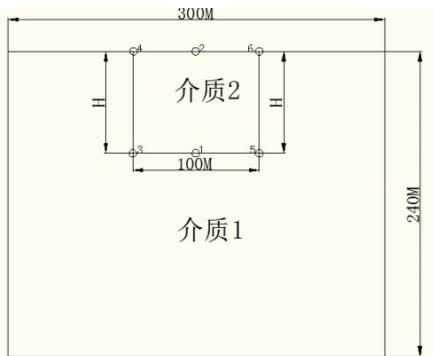


图 3 理想盆地模型 B

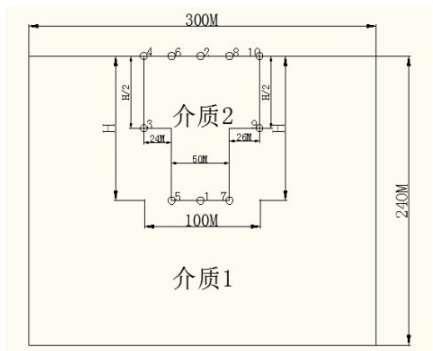


图 4 理想盆地模型 C

其他条件相同的理想“方形”盆地模型 B，如图 3 所示，所采用的介质物理力学参数为： $\beta_1=1000.0\text{m/s}$ ， $\rho_1=2200.0\text{kg/m}^3$ ， $\zeta_1=0.01$ ； $\beta_2=300.0\text{m/s}$ ， $\rho_2=1900.0\text{kg/m}^3$ ， $\zeta_2=0.02$ ，对这两个盆地模型的地震动放大效应进行对比分析。

输入 SH 波仍为单位脉冲波，分别对以上两种不同形状的盆地模型，逐渐增加盆地的深度 H，计算得到图中所示多个盆地特殊位置的反应，经过对数据的简单分析，发现模型中盆地地表中心点 2 的反应峰值均表现最大。定义盆地放大因子为 2 点与 1 点反应峰值的比值，分别计算两种盆地形状的模型盆地深度不同时的盆地放大因子，对得到的盆地放大因子与盆地深度进行了简单的分析，结果如图 5 和 6 所示。

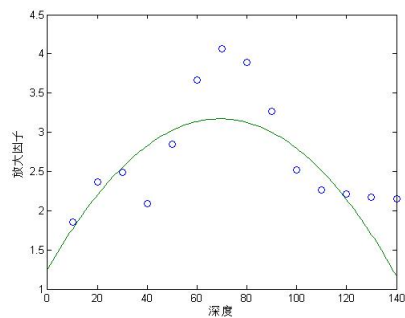


图 5 模型 B 计算结果拟合分析

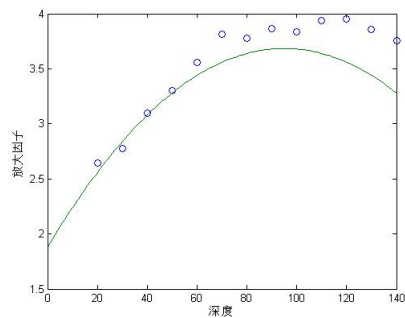


图 6 模型 C 计算结果拟合分析

从以上的计算结果初步可以看出：总体来看，随着盆地深度的增加，盆地放大因子有逐渐增加的趋势，达到一定深度后，盆地深度继续增加，盆地的放大效应增加不明显，甚至会有逐渐变小的趋势。

对比“方形”和“倒凸形”两种不同形状的盆地模型的盆地放大效应可以发现：两者还是存在一定的差异的，“方形”盆地引起的盆地放大效应，随着盆地深度的增加放大效应逐渐增大，达到某一深度之后，盆地深度继续增加，盆地的放大效应不再增加反而逐渐减小，这可能更多体现了介质阻抗差异引起的放大效应和地震波与盆地发生共振效应共同作用的结果，而“倒凸形”盆地模型引起的地震动放大效应与盆地深度之间表现出了随着盆地深度的增加，放大效应逐渐增大的特性。

C. 对称“曲边形”盆地模型计算与分析

建立如图 7 所示的理想对称“曲边形”盆地模型 1，盆地深度 $H=200\text{m}$ ，盆地宽度 $D=2H=400\text{m}$ ，输入单位 δ 脉冲波（脉冲底宽 0.4s ），介质力学参数为： $\beta_1=1000.0\text{m/s}$ ， $\rho_1=2200.0\text{kg/m}^3$ ， $\zeta_1=0.01$ ； $\beta_2=300.0\text{m/s}$ ， $\rho_2=1900.0\text{kg/m}^3$ ， $\zeta_2=0.02$ 。

$v_2=600.0\text{m/s}$, $\rho_2=2100.0\text{ kg/m}^3$, $\zeta_2=0.02$, , 并调整盆地内介质的剪切波速分别为 600m/s , 500m/s , 400m/s , 300m/s , 计算盆地地表观测点的位移反应, 对各输出点的位移峰值进行统计分析, 计算结果如图 9 所示, 将输入 δ 脉冲波, 改为如图 8 的 Ricker 子波, 重新进行计算, 得到计算结果如下图 10 所示。

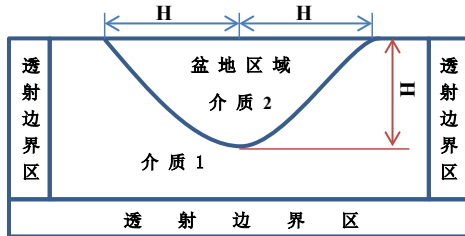


图 7 理想“曲边形”盆地模型 1 示意图

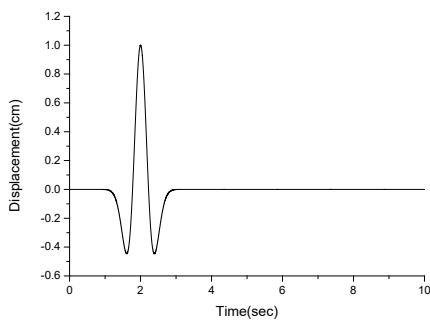


图 8 输入 Ricker 脉冲波

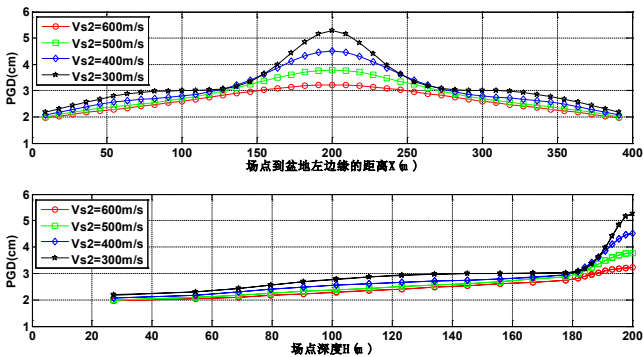


图 9 δ 脉冲波输入, “曲边形”盆地模型 1 计算结果

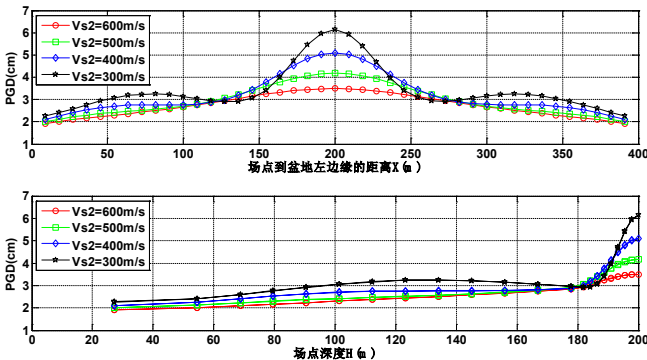


图 10 Ricker 脉冲波输入, “曲边形”盆地模型 1 计算结果

从以上的计算结果我们可以发现: 在盆地的中间位置出现了比较明显的地震动峰值, 计算结果的规律性较好, 当然这与我们所建立模型的对称性是分不开的; 随着盆地内介质剪切波速的降低, 相同位置地表输出点的峰值逐渐变大, 在盆地中间位置峰值较大的位置增大较多, 反应峰值与场点盆地深度之间表现出了比较好的随深度增加而不断增大的相关性。

D. 不对称“曲边形”盆地模型计算与分析

建立如图 11 所示的不对称理想“曲边形”盆地模型, 盆地深度调整为 $H=200\text{m}$, 盆地宽度 $D=3H=600\text{m}$, 同样输入 δ 脉冲波 (脉冲底宽 0.4s), 采用介质参数如前所示, 同样调整盆地内介质的剪切波速分别为 600m/s , 500m/s , 400m/s , 300m/s , 计算结果如图 12 所示。

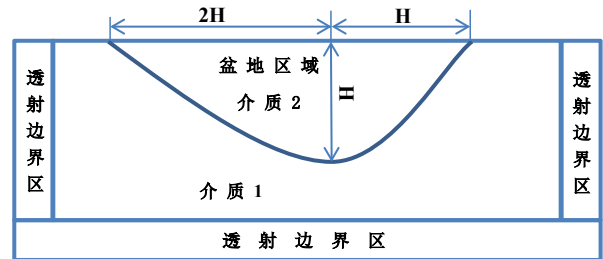


图 11 理想“曲边形”盆地模型 2 示意图

从下图 12 我们可以发现: 在盆地中间最深处和盆地两侧边缘的位置均出现了比较大的地震动峰值; 随着盆地内介质剪切波速的减小, 地表相同位置的反应峰值逐渐增大。由于盆地边缘和中央出现的较大峰值, 场点峰值与场点深度之间没有表现出如模型 1 那样好的规律性。

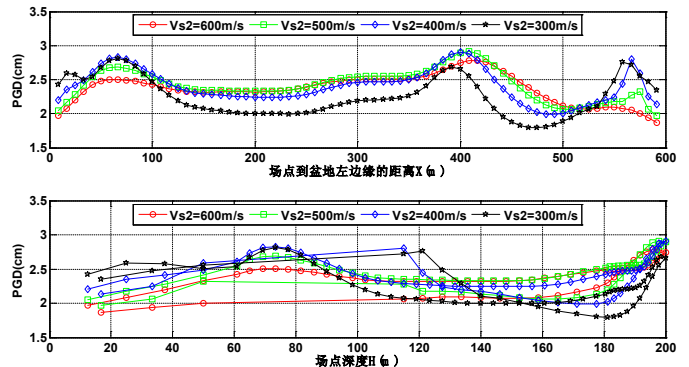


图 12 δ 脉冲波输入, “曲边形”盆地模型 2 计算结果

将输入 δ 脉冲波改为 Ricker 子波 (图 8), 重新进行计算, 得到结果如下图 13 所示, 可以发现: 在盆地右侧边缘, 出现了比盆地中部更大的峰值, 随着盆地内介质剪切波速的变小, 场点地震动峰值逐渐变大。这也提示我们在对盆地效应进行考虑时, 可能需要重点关注盆地边缘等某些特殊位置, 这跟我们从实际地震中得到的一些典型盆地地震害经验是一致的。

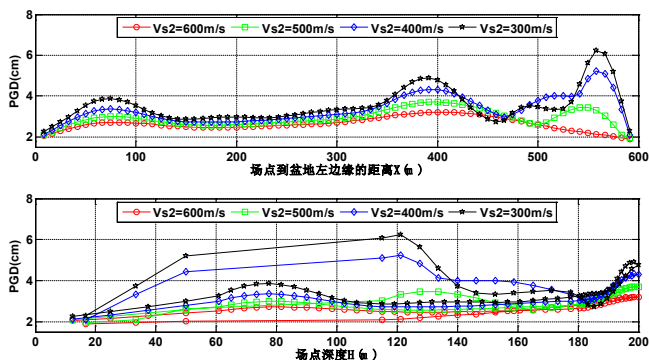


图 13 Ricker 脉冲波输入，“曲边形”盆地模型 2 计算结果

E. 多层介质不对称“曲边形”盆地模型计算分析

考虑前述计算模型中盆地内均为单一介质，为了研究盆地内介质分层状况对于盆地地震动放大效应的影响，将模型 2 中盆地内介质按深度进行平均分层处理，盆地内介质改为介质 2 和介质 3，介质 3 与模型 2 中介质 2 相同，在新的模型中加入一种新的盆地介质 2，建立多层介质不对称“曲边形”盆地模型 3，如图 14 所示，同样输入单位 δ 脉冲波（脉冲底宽 0.4s）和 Ricker 脉冲波（如图 8）分别进行计算，计算结果分别如图 15 和 16 所示。

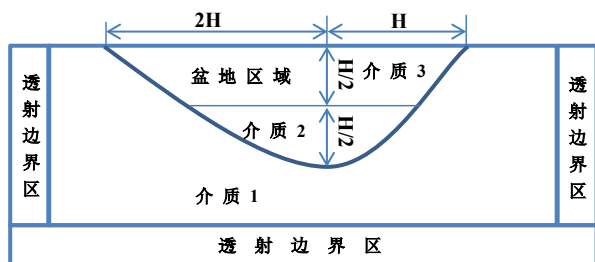


图 14 “曲边形”盆地模型 3 计算结果

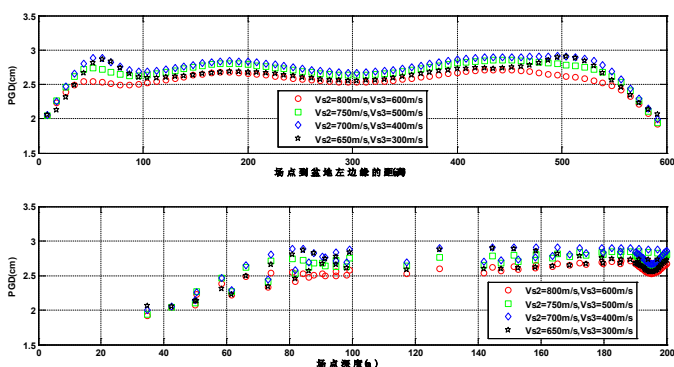


图 15 δ 脉冲波输入，“曲边形”盆地模型 3 计算结果

比较图 12 和图 15 以及图 13 和图 16，可以发现：总体来看，相同位置盆地模型 3 的反应峰值要大于模型 2 的计算结果，随着盆地内介质分层的增加，盆地地震动放大效应逐渐增大，盆地内介质的差异对盆地地震动

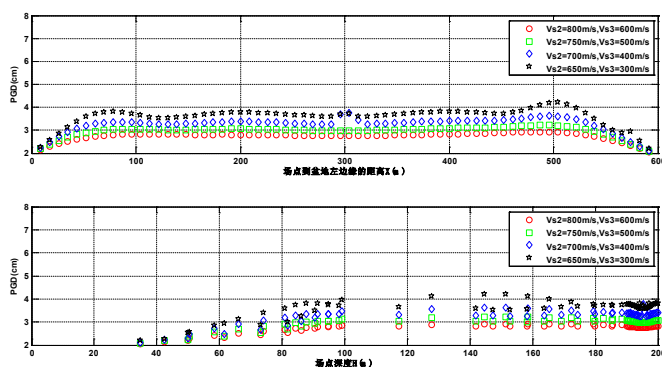


图 16 Ricker 脉冲波输入，“曲边形”盆地模型 3 计算结果

放大效应会有比较大的影响。但是，增加盆地内介质分层，会对本文的盆地模型构建，有限元网格剖分和数值计算的稳定性等方面带来比较大的困难，计算难度增大，本文在这方面采取了简化处理，在后续计算中依然采取了单一介质盆地的计算模型。

IV. 结论与讨论

利用解耦的近场波动有限元数值模拟方法，在模型底部垂直输入 SH 波，分别以近似 δ 脉冲波和 Ricker 脉冲波两种波形入射，并分别对二维“方形”，“倒凸形”和“曲边形”三种理想简单盆地模型的地震动响应进行了研究，对于地震动的盆地放大效应有了初步的定性认识，主要包括以下几点：

(1) 相对于单一水平层状模型，盆地的存在导致盆地内场点的地震动强度增强，持时增加，体现了盆地对于地震动的放大效应。

(2) 比较“方形”和“倒凸形”两种盆地模型的计算结果发现：两者的地震动响应还是有区别的，两种盆地模型中盆地场点的地震动响应随盆地深度的变化表现出了不同的规律性，“倒凸形”盆地模型的计算结果更符合我们现有对于盆地放大效应的认识，而“方形”盆地模型表现出了与现有土层反应计算结果相类似的特征，因此，仅用简单的“方形”盆地模型进行盆地地震动放大效应的研究是不太合适的。

(3) 对更符合实际的“曲边形”盆地模型的盆地地震动响应进行了研究，对称盆地模型的计算结果展示了很好的规律性，在盆地中央位置出现比较大的地震动响应，体现了一定盆地“聚焦效应”的作用；非对称盆地模型在盆地中央和盆地边缘处均出现了比较大的地震动响应，在较陡的一侧盆地边缘，甚至出现了比盆地中央更大的地震动响应，这可能与盆地的“边缘效应”有关；随着盆地内介质变软，即盆地内外介质阻抗比的增大，盆地内场点的地震动响应逐渐变大；随着盆地内介质分层的增加，盆地的地震动响应也是在逐渐增大的，但是在盆地内的某些位置出现了一定的差异，体现了盆地效应的复杂性。

致谢

本项目受国家重点研发计划(2017YFC1500205)、国家自然科学基金(51678537、51278470、51978633、51808513)和研究所基本科研业务专项基金(DQJB19B06、DQJB19A0131)的联合资助。

参考文献

- [1] S. K. Singh, E. Mena, and R. Castro, "Some aspects of the source characteristics and ground motion amplification in and near Mexico city from acceleration data of the September 1985, Michoacan, Mexico earthquakes", *Bull. Seismol. Soc. Am.* 78,451-477,1988.
- [2] R. W. Graves, A. Pitarka and P. G. Somerville, "Ground-motion amplification in the Santa Monica area: Effects of shallow basin-edge structure". *Bulletin of the Seismological Society of America*, 88(5):1224-1242, 1998.
- [3] H. Kawase, "The cause of the damage belt in Kobe: "the basin-edge effect," constructive interference of the direct S wave with the basin induced diffracted /Rayleigh-waves", *Seismological Research Letters*, 67(5):25-34, 1996.
- [4] 李宪忠, "三维地震波模拟: 谈台北都会区的地形与盆地效应", *中央研究院周报*, 第 1145 期.
- [5] 郭恩, 周锡元, "汶川地震盆地效应的思考与建议", *防灾减灾工程学报*, (4):459-465, 2010.
- [6] 薄景山, 齐文浩, 刘红帅, 刘博, 刘德东, 孙有为, "汶川特大地震震源烈度异常原因的初步分析", *地震工程与工程振动*, 29(6), 53-64, 2009.
- [7] 王海云, "渭河盆地中土层场地对地震动的放大作用", *地球物理学报*, 54(1):137-150, 2011.
- [8] 王建龙, 陈学良, 高孟潭, 李宗超, 鄢兆伦, 李铁飞, "地震动峰值放大与盆地深度关系的初步数值模拟", *地震工程与工程振动*, 第 34 卷, 增刊, S0:167-172, 2014.