



Basin Effect of Wenchuan Earthquake From NGA-West2 Data

Ting Huang¹, Qing Wu¹, Xueliang Chen^{1,*}, Tiefei Li¹

Zongchao Li¹, Zhiwei Ji¹, Lijun Qiu^{1,2}

¹Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081

²Hebei Institute of Architecture civil engineering, Hebei Zhangjiakou 075000

*Corresponding author. Email: chenxueliang007@126.com

ABSTRACT

In this paper, we use the BSSA14 model which based on the Wenchuan earthquake data in the NGA-West2 released by the Pacific Earthquake Engineering Research Center in 2013, to study the impact of basin effect on response spectrum. Then we fit the basin coefficients under different site conditions ($V_{s30}=365$ and 760 m/s) are fitted, and summarize the relationship between basin coefficients and basin depth parameters. There is evidence that the basin has different effects on long-period ground motion under different site conditions, but the amplification coefficient of the basin increases with increasing depth.

Keywords: NGA-west2, Basin coefficient, Wenchuan earthquake, GMPE

基于 NGA-west2 数据的汶川地震盆地效应研究

黄亭¹, 吴清¹, 陈学良^{1,*}, 李铁飞¹, 李宗超¹, 纪志伟¹, 邱利军^{1,2}

¹中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

²河北建筑工程学院土木工程学院, 河北 张家口 075000

* 通讯作者. 电子邮箱: chenxueliang007@126.com

摘要

本文以美国太平洋地震工程研究中心 2013 年发布的 NGA-West2 数据库中的汶川地震数据为基础, 利用 BSSA14 模型研究盆地效应对地震动反应谱的影响, 对不同场地 ($V_{s30}=365$ 和 760 m/s) 条件下的盆地系数进行拟合, 总结出盆地系数与盆地深度参数的关系。研究发现, 不同场地条件下, 盆地对长周期地震动的影响不同, 但盆地放大系数都随深度的增加而增大。

关键字: NGA-west2 数据库, 盆地系数, 汶川地震, 衰减关系

1. 引言

2013 年, 美国太平洋地震工程研究中心 (Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER) 发布了新一代地震动衰减项目西部第二版强地震动数据库^[1] (NGA-West2)。该数据库包括 1935 至 2011 年的全球地震, 主要是从 1998 年至 2011 年加利福尼亚州的中小震级地震, 且首次记录了汶川

地震。该数据集收录了在 2530 个台站上的 21539 组地震动, 共 607 次地震。

BSSA14 模型是由 Boore 和 Stewart^[2] 等提供的用于预测浅层地壳地震 PGA、PGV 和 5% 阻尼 PSA 的地震动预测方程 (GMPE)。该模型使用混合效应残差分析评估了盆地深度的影响, 分析显示, 盆地效应会增大沉积层较厚的长周期地震动, 盆地放大系数随深度的增加而增大。

地震动观测和三维(3D)模拟表明,由于盆地内波的反射、折射和聚焦等现象^{[3]-[8]},深层沉积盆地放大了长周期地震运动。在软岩基准场地条件下,短周期内盆地效应通常可以忽略不计,但是,长周期地震动对深盆地高度敏感,盆地效应可使地震动增加 1 倍以上^[4]。我国的成都、西安等城市位于沉积层较厚的盆地中,随着经济和科技的快速发展,城市中的超高层及大跨度建筑、桥梁等大型长周期结构也日益增多,盆地结构对长周期地震动的放大效应相关研究越来越重要。美国已开展大量三维盆地地震相应的研究工作,并将其应用到新一代美国地震区划图中^[9]。

由于我国现有的基础数据不支持对盆地放大效应的考虑等原因,我国目前关于盆地效应模型的相关研究还不太成熟,尚未在五代图中明确考虑盆地效应。因此,本文以 NGA-West2 数据库中的汶川地震的地震动数据为基础,利用 BSSA14 模型研究沉积盆地对地震动反应谱的影响,分析盆地效应特征。拟合出 $V_{s30}=365$ 和 760 m/s 场地条件下平均反应谱放大系数与盆地深度的相关曲线,分析盆地系数与盆地深度参数的关系。

2. 基础数据

NGA-West2 数据库中的地震动记录取自全球范围内的拥有地震动观测台网的组织,为保证数据的一致性,数据的选取采用统一标准^[1]: (1) 自由场地记录, (2) 足够的信噪比, (3) 位置确定, (4) 不和其他设备位于同一平台。一些重要数据可以不同时满足全部条件。经过科研人员反复审查,最终,NGA-West2 数据库每一条记录包括地震震级、震源深度、震中距、 V_{s30} 等 279 项。

本文按照以下四个条件选择汶川地震的水平地震动记录, (1) 矩震级 M 为 $3.00-8.50$ 的地震, (2) 具有 V_{s30} 且其在 $150-1500$ m/s 的范围内的场地, (3) 震中距为 $0-400$ km 的地震, (4) 与研究相关的具有明确地震动参数的记录。最终,筛选得到 1158 条水平地震动数据。数据中最大矩震级和最小矩震级分别为 7.90 和 3.80 ; 场地最大和最小 V_{s30} 分别为 648.51 m/s 和 227.8 m/s; 震中距的最大值和最小值分别为 399.60 km 和 6.09 km。数据在震级和震中距上的分布如图 1 所示。汶川地震的中小余震对应震中距多在 $20-200$ km 之间分布,震级较大的主震震中距分布区间则较大,在 $60-400$ km 之间。

3. BSSA14 地震动衰减关系

本文采用的 NGA-West2 BSSA14 模型对沉积盆地效应项进行了考虑,地震动衰减关系为^[2]:

$$\ln Y = F_E(M, \text{mech}) + F_{P,B}(R_{JB}, M) + F_{S,B}(V_{s30}, R_{JB}, M) + \varepsilon_n \sigma(M, R_{JB}, V_{s30}) \quad (1)$$

其中,其中 $\ln Y$ 表示地震动地震动参数中位数的对数,地震动参数可以是地震的水平分量峰值地面加速度 (PGA)、峰值地面速度 (PGV) 或者 5% 阻尼比的反应谱加速度 (PSA)。 F_E 、 $F_{P,B}$ 、 $F_{S,B}$ 分别表示震源相关函数 (“E” 为地震事件)、路径相关函数 (“P”) 和场地放大函数 (“S”) (下标 “B” 表示基本模型)。预测变量 M 、 mech 、 R_{JB} 和 V_{s30} 分别为矩震级、断层类型、Joyner-Boore 距离 (距断层表面投影最近的距离) 和表层 30 米深度内的平均剪切波速度; ε_n 是 $\ln Y$ 的单个预测值与 $\ln Y$ 平均值之间的标准偏差分数; σ 是模型的总偏差。

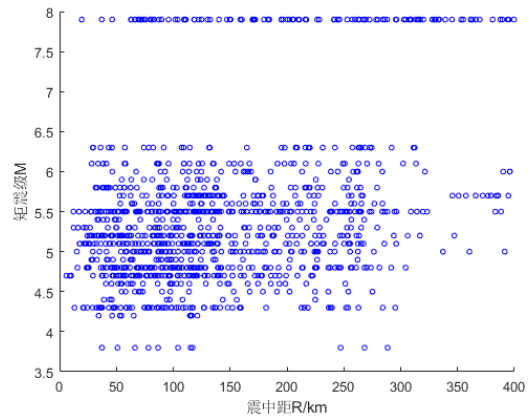


图 1 矩震级和震中距分布。矩震级 M 为 $3.80-7.90$, 主震震中距在 $60-400$ km 分布。

BSSA14 模型将盆地深度参数定义为剪切波速度达到 1.0 km/s 的岩层顶板埋藏深度 Z_1 。由于美国地质调查局没有对汶川地震的盆地深度参数 Z_1 值进行测量,本文用 V_{s30} 的函数估计 Z_1 值,函数表达式如下^[2]:

$$\ln(Z_1) = \frac{-7.15}{4} \ln\left(\frac{V_{s30}^4 + 570.94^4}{1360^4 + 570.94^4}\right) \quad (2)$$

基于 NGA-West2 数据库中的 V_{s30} , 采用式 (2) 计算了盆地深度 Z_1 。通过结果发现,汶川地震速度模型的 Z_1 值通常小于 500 m。针对此种 Z_1 值较小的特殊情况,2018 版《美国地震危险性图》的研究人员^[10]回归出一个有效深度 $Z_{1,eff}$ 值来表示盆地深度参

数。因此，为了更好的反映盆地效应对地震动反应谱的放大效应，本文采用了有效深度 $Z_{1,eff}$ 值来表示盆地深度参数关系如下：

$$Z_{1,eff}=0.1146Z_{2.5}+0.2826 \quad (3)$$

$$Z_{1,eff}=0.0933Z_{2.5}+0.1444 \quad (4)$$

$$\ln Z_{2.5}=7.098-1.144V_{s30} \quad (5)$$

其中 $Z_{1,eff}$ 表示从 $Z_{2.5}$ 导出的有效深度，两种回归权重相等。其中， $Z_{2.5}$ 为剪切波速达到 2.5 km/s 的岩层顶板埋藏深度。在没有测量值时， $Z_{2.5}$ 值遵循关系式 (5)^[10]。

4. 计算分析与讨论

基于 BSSA14 地震动衰减关系等理论基础，本文编写了相应的计算程序。根据地震动衰减关系式 (1)，求得汶川地震周期为 5 s 的加速度反应谱。NGA-West2 数据库记录的汶川地震区域场地的 V_{s30} 值在 227.8 m/s~648.51 m/s 之间，因此，本文仅分析了 BSSA14 模型与 $V_{s30}=365$ 、760 m/s 场地条件下的基础模型的地震动反应谱相对大小，并拟合了盆地深度与放大系数曲线。

根据图 2 和图 3 中 V_{s30} 标准模型的水平地震动加速度反应谱结果，和图 4 中 BSSA14 模型的水平地震动加速度反应谱结果。对比发现，相对于 $V_{s30}=760$ m/s 的标准模型，考虑盆地效应的 BSSA14 模型对地震动有明显的放大；BSSA14 模型的加速度反应谱值与 $V_{s30}=365$ m/s 的标准模型相比，则地震动放大作用不明显。在汶川东北方向的区域，三个模型的地震动加速度反应谱值均相对较大。

盆地放大系数即为 BSSA14 模型与 V_{s30} 标准模型的加速度反应谱之比。将 BSSA14 模型与基于 $V_{s30}=365$ 、760 m/s 两种场地条件下模型的加速度反应谱进行比值，取长周期地震动盆地放大系数，得到图 5 和图 6 所示结果。在 $V_{s30}=365$ m/s 场地条件下，盆地放大系数主要集中在区间 0.7~1 范围内，盆地对长周期地震动的作用不明显； $V_{s30}=760$ m/s 场地条件下盆地对长周期地震动具有显著的放大效应，盆地放大系数主要集中在 1.6~2 之间；而且，相对于加速度反应谱值较大的汶川东北方向，汶川西南方向的区域盆地结构对长周期地震动的放大效应更显著。

盆地放大系数与深度之间的关系，可用图 7 显示的拟合结果进行解释。该图为在反应谱周期为 5 s 时，两类基岩条件下盆地放大系数与深度之间关系。盆地深度增加，放大系数随之增加；不同基础

场地条件下，盆地放大系数对盆地深度的敏感性不同， $V_{s30}=760$ m/s 场地条件下盆地放大效应更为显著。由图不难看出，两类场地都有一个盆地放大系数为 1 时的深度值(本文将其称为默认场地深度值)。

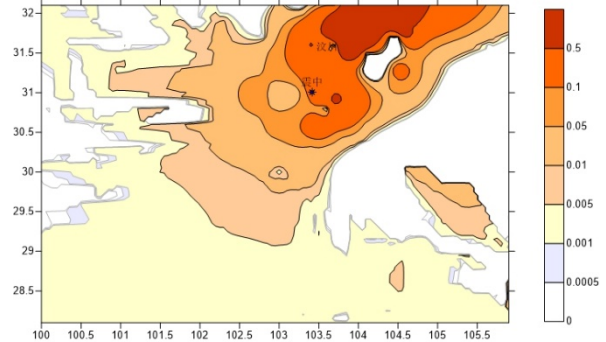


图 2 $V_{s30}=365$ m/s 标准模型的加速度反应谱

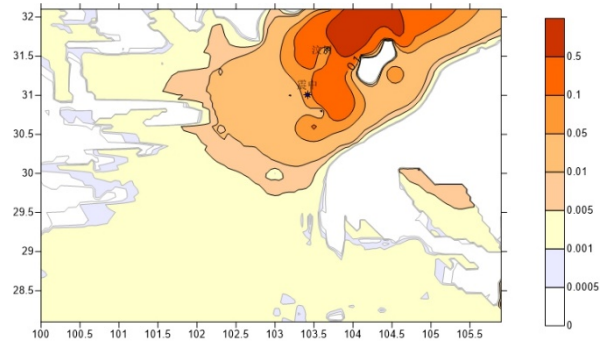


图 3 $V_{s30}=760$ m/s 标准模型的加速度反应谱

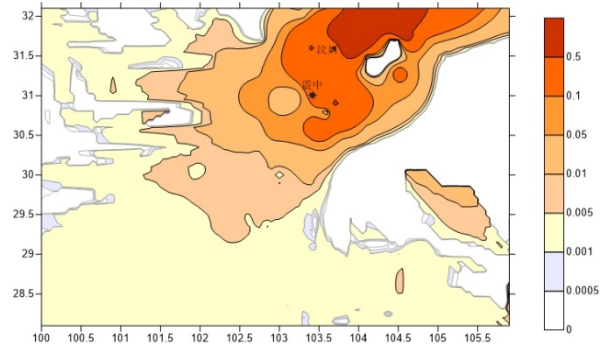


图 4 BSSA14 模型的加速度反应谱

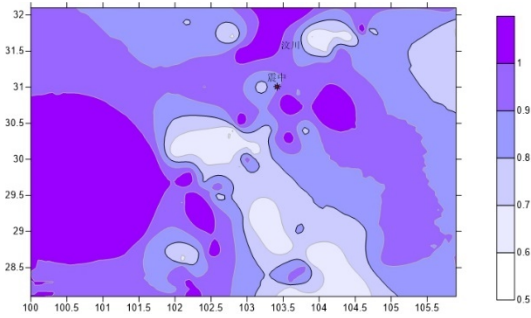


图5 $V_{s30}=365$ m/s 场地下盆地放大系数

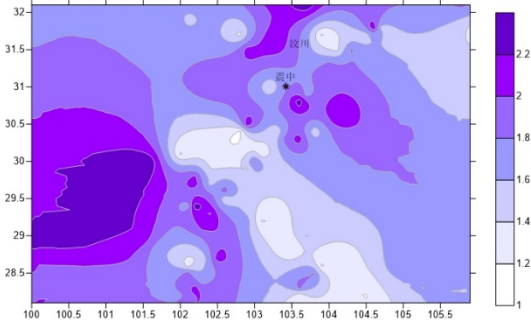


图6 $V_{s30}=760$ m/s 场地下盆地放大系数

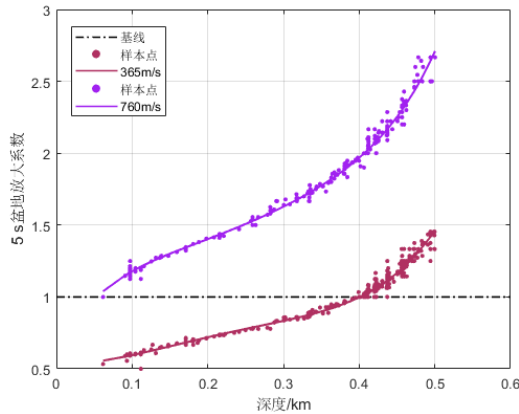


图7 5 s 周期时盆地放大系数与深度的关系

BSSA4 模型相对于 V_{s30} 基础模型是放大还是缩小地震动, 取决于盆地深度相对于默认场地深度值的深浅。当盆地深度大于默认值时, 盆地效应会放大地震动, 盆地放大系数大于 1; 盆地深度小于默认值时, 则减小地震动, 盆地放大系数小于 1。对 BSSA4 模型与两个 V_{s30} 基础模型的反应谱进行比值, 然后将比值样本数据点进行拟合, 得到回归方程:

$$af1 = 0.524e^{1.474H} + 3.558 \times 10^{-5}e^{18.52H} \quad (6)$$

$$af2 = 1.015e^{1.535H} + 1.056 \times 10^{-4}e^{17.02H} \quad (7)$$

其中, $af1$ 和 $af2$ 分别表示以 $V_{s30}=365$ m/s 和 760m/s 为默认值的加速度反应谱放大系数 (简称“盆地放大系数”), H 是 $Z_{1,eff}$ 表示的盆地深度参数。

5. 结论

本文讨论了基于 BSSA14 模型的加速度反应谱, 反应谱周期为 5s, 符合长周期地震动的有效周期范围。得到以下结论:

盆地放大系数随盆地深度参数增加而增加。当盆地深度大于默认值时, 盆地放大系数大于 1; 反之, 则盆地放大系数小于 1。

长周期地震动的放大效应与基础场地类型密切相关。基础场地条件不同, 长周期地震动对盆地的放大效应也有差别。长周期盆地效应对基于 $V_{s30}=760$ m/s 的场地有显著影响, 考虑盆地效应的地震动反应谱可增大 2 倍以上; 对基于 $V_{s30}=365$ m/s 的场地则影响较小, 盆地深度达 0.4 km 以上时, 才会出现盆地放大效应。

致谢

本文受基本科研业务 (DQJB22Z02、DQJB22Z03)、研发计划 (2017YFC1500205、2019YFC1509403)、自然科学基金 (51978633、51678537、51278470) 的联合资助。

参考文献

- [1] T.D. Ancheta, R. B. Darragh, et al. PEER NGA-West2 Database[R]. PEER Report, 2013: 1-11, 65-68.
- [2] D.M. Boore, J.P. Stewart, E. Seyhan, et al., 2014. NGA-West2 equations for predicting PGA, PGV, and 5% damped PSA for shallow crustal earthquakes. Earthquake Spectra, pp.1057-1085. DOI: <https://doi.org/10.1193/070113EQS184M>
- [3] B.T. Aagaard, T.M. Brocher, D. Dolenc, et al., 2008. Ground-motion modeling of the 1906 San Francisco earthquake, part II: Ground-motion estimates for the 1906 earthquake and scenario events. Bulletin of the Seismological Society of America, 98(2): 1012-1046. DOI: <https://doi.org/10.1785/0120060410>

- [4] A.D. Frankel, M.D. Petersen, C.S. Mueller, et al., 2002. Documentation for the 2002 update of the National Seismic Hazard Maps: U.S. Geological Survey Open-File Report 2002-420, 39 p. DOI: <https://doi.org/10.3133/ofr02420>
- [5] A. Frankel, E. Wirth, N. Marafi, et al., 2018. Broadband synthetic seismograms for magnitude 9 earthquakes on the Cascadia megathrust based on 3D simulations and stochastic synthetics, Part 1: Methodology and overall results. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 108(5A): 2347–2369. DOI: <https://doi.org/10.1785/0120180034>
- [6] R. Graves, T.H. Jordan, S. Callaghan, et al., 2011. CyberShake: A physics-based seismic hazard model for southern California. *Pure and Applied Geophysics*, 168(3–4): 367–381. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00024-010-0161-6>
- [7] Moschetti, M.P., Hartzell, S.H., Ramirez-Guzman, L., et al., 2017. 3D Ground-motion simulations of Mw7 earthquakes on the Salt Lake City segment of the Wasatch fault zone: Variability of long-period ($T \geq 1$ s) ground motions and sensitivity to kinematic rupture parameters. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 107(4): 1704–1723. DOI: <https://doi.org/10.1785/0120160307>
- [8] W.J. Stephenson, A.D. Frankel, J.K. Odum, et al., 2006. Toward resolving an earthquake ground motion mystery in west Seattle, Washington State: Shallow seismic focusing may Cause anomalous chimney damage. *Geophysical Research Letters*, 33(6):L06316. DOI: <https://doi.org/10.1029/2005GL025037>
- [9] M.D. Petersen, A.M. Shumway, P.M. Powers, et al., 2020. The 2018 update of the US National Seismic Hazard Model: Overview of model and implications. *Earthquake Spectra*, 36(1): 5–41. DOI: <https://doi.org/10.1177/>
- [10] P.M. Powers, S. Rezaeian, A.M. Shumway, et al., 2021. The 2018 update of the US National Seismic Hazard Model: Ground motion models in the western US. *Earthquake Spectra*, 37: 2315–2341. DOI : <https://doi.org/10.1177/87552930211011200>
- [11] K.W. Campbell, Y. Bozorgnia, 2014. NGA-West2 ground motion model for the average horizontal components of PGA, PGV, and 5% damped linear acceleration response spectra. *Earthquake Spectra*, 30(3):1087-1115. DOI: <https://doi.org/10.1193/062913EQS175M>

Open Access This chapter is licensed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>), which permits any noncommercial use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons license and indicate if changes were made.

The images or other third party material in this chapter are included in the chapter's Creative Commons license, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the chapter's Creative Commons license and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder.

