

# 日本福冈地震竖向地震动合成研究

吴迪<sup>1,2</sup>, 谭平<sup>1</sup>

(1. 广州大学 地震工程与应用技术广东省重点实验室, 广东 广州 510405;

2. 华南理工大学 亚热带建筑科学国家重点实验室, 广东 广州 510640)

**摘要:** 根据断层位错分布、破裂过程、传播路径等研究结果, 采用层状半空间的理论格林函数方法, 合成日本福冈地震近场竖向地震动。并将合成结果与观测记录进行比较。结果可知, 两者峰值大小接近。当频率在 5Hz 以内, 合成所得竖向加速度 Fourier 幅值谱与观测结果基本一致。研究结果表明, 场地不是特别复杂的情况下, 采用层状半空间格林函数方法能有效地估计近场竖向地震动。

**关键词:** 格林函数; 福冈地震; 近场; 竖向地震

**中图分类号:** P 315.2 **文献标志码:** A

日本福冈县以西海域 2005 年 3 月 20 日上午发生里氏 7 级地震, 造成的伤亡人数至 21 日升至 673 人。截至 21 日下午 6 时, 地震共造成福冈县、佐贺县和长崎县 1 人死亡、672 人受伤。地震还造成 16 幢民房完全倒塌、159 幢民房部分倒塌。7 级地震后还发生了 113 次余震<sup>[1]</sup>。这次日本九州福冈海岸以西发生的里氏 7.0 级地震<sup>[2]</sup>。震中距离上海 930 km, 上海市东南区域部分 15 层以上的高层居民有震感<sup>[3]</sup>。此次地震对日本局部地区所造成的灾害比较严重, 也是本次地震受到日本地震学研究者高度关注的重要原因之一。部分日本学者对该次地震断层破裂过程、衰减关系、日本九州岛及其受影响区域场地条件进行了全面分析。例如 SEKIGUCHI 等<sup>[4]</sup>采用多时间窗线性波形对福冈地震进行反演, 得到福冈地震的地震矩为  $M_0 = 1.15 \times 10^{19}$  Nm, 矩震级为  $M_w = 6.6$ 。

本文通过格林函数方法研究福冈地震近场竖向地震动, 利用地震断层位错分布、破裂过程、传播路径和日本福冈地区丰富的台站数据库等, 合成福冈地震近场竖向地震动。这些参数的收集、研究和地震动合成, 有助于将来进一步研究福冈地震地震动的合成。

## 1 层状半空间格林函数解析方法

层状半空间格林函数法是在严格的理论推导和计算地震学基础上, 考虑断裂和上覆盖层速度结构的影响, 依据场地的地壳结构建立计算模型, 采用格林函数表达地震波传播的解析方法<sup>[5-7]</sup>。相比随机法更为严格, 属于合成和预测强地震动所用的宽频带格林函数法。震源表达为在一个延伸的断裂面上的剪切位错双力偶点源, 格林函数中包括体波和面波, 可准确表示出它的辐射模式和大于 0.5 s 的长周期段降低、平缓的趋势。当不考虑体力和应力的间断性时, 在断层面内 1 个分界面两侧的位移间断所引起的弹性位移如下<sup>[8]</sup>:

$$u_k(x; t) = \int_{-\infty}^{+\infty} d\tau \iint_{\Sigma} [u_f(\xi, \tau)] c_{jkipq} v_k G_{ipq}(x, t, \xi, \tau) d\Sigma(\xi) \quad (1)$$

式中  $c_{jkipq}$  是断层介质的弹性模量;  $v_k$  为断层面法向的方向余弦;  $G_{ipq}(x, t, \xi, \tau)$  为断层面上  $\xi$  点与观测点  $x$  之间的路径效应, 即格林函数;  $G_{ipq}(x, t, \xi, \tau)$  是  $G_{ip}$  对  $\xi_q$  的导数。

当震源与所计算的台站深度比较接近的情况下, 采用动力格林函数解析方法进行计算场地位

收稿日期: 2012-10-30; 修回日期: 2012-12-20

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2011CB013606); 亚热带建筑科学国家重点实验室开放基金(2011KB15); 国家自然科学基金资助项目(51108105); 住房和城乡建设部科学技术计划资助项目(K2201219); 广州市属高校科研资助项目(10A057)

作者简介: 吴迪(1978-), 男, 博士, E-mail: wudiwdzooo@gmail.com

移和应力时,会出现解难以收敛的情况. 对此, LUCO和 APSEL<sup>[9]</sup>提出一种渐进线积分方法的计算方法,有效地解决格林函数积分难以收敛的问题. 该过程可以总结为如下公式:

$$G = \int_0^{+\infty} \{ (V - \tilde{V}) b_1 + (H - \tilde{H}) b_2 \} dk S + \Delta \tilde{V} + \Delta \tilde{H} \tag{2}$$

其中  $G$  为位移和应力格林函数  $b_j$  为贝塞尔函数,  $S$  为正弦函数  $k$  为水平波速  $V$  和  $H$  分别为 P-SV 波和 SH 波的位移应力向量,  $\tilde{V}$  是  $V$  在  $k$  趋于无限大时的渐进解,  $\Delta \tilde{V}$  是  $\tilde{V}$  的积分,  $\tilde{H}$  是  $H$  在  $k$  趋于无限大时的渐进解,  $\Delta \tilde{H}$  是  $H$  的积分. 但是,在求解震源与研究位置深度接近的情况下, LUCO 和

APSEL<sup>[9]</sup>提出的解析方法难于求解. 于是, HISA-DA<sup>[10]</sup>对该渐进线积分方法进一步做了修正,并使格林函数解析方法能够有效地求解层状半空间中任何位置的地震位移和应力. 本文考虑采用 HISA-DA 提出的格林函数解析方法进行地震动合成.

## 2 理论格林函数法合成日本福岡近场地震动

日本地震调查所研究者和 SEKIGUCHI 等<sup>[4]</sup>分析了此次地震断层的倾角和时空破裂过程,研究表明此次福岡地震断层是单独走滑断层,并采用 F-net 矩张量方法求解此次地震震源参数(见表 1).

表 1 福岡(  $M_w = 6.6$  )地震震源参数<sup>[11]</sup>

Table 1 Seismic parameters of Fukuoka Earthquake<sup>[11]</sup>

走向 $\varphi/(^\circ)$	倾角 $\lambda/(^\circ)$	地震矩/ ( $\text{dyne} \cdot \text{cm}$ )	震源尺寸/km	应力降/bar	震源深度/km	平均位错/m
122	87	$1.15 \times 10^{26}$	$26 \times 18$	8.7	14	0.8

断层的破裂速度为  $2.1 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ . 根据地震矩与应力降和断层几何尺寸的关系<sup>[12]</sup>,可推得断层平均应力降为  $\Delta\sigma = 8.7 \text{ bar}$ . 京都大学防灾研究所通过波形反演得到断层位错分布,并给出日本福岡地震的震中、断层、监测台站的位置和地表海拔高度.

表 2 玄海台站的坐标参数<sup>[13]</sup>

Table 2 Parameters of GENKAI station( FKOH09 )<sup>[13]</sup>

观测点名	北纬	东经	地表 标高/m	设置 深度/m
玄海( GENKAI )	33.85	130.55	25	200

将断层划分为  $2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$  的子断层,每个子断层被划分为 6 个时间窗,每个时间窗采用平滑时间窗函数,时间窗的上升时间为  $1.0 \text{ s}$ ,时间窗间隔为  $0.5 \text{ s}$ . 日本国家地震灾害研究所<sup>[13]</sup>提供了地震近场地区玄海台站的场地条件和地震记录资料,本文所采用的玄海台站场地情况可见表 3.

表 3 玄海台站场地条件参数<sup>[13]</sup>

Table 3 Site condition at station GENKAI<sup>[13]</sup>

土层名称	容重/ ( $\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$ )	P 波速/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	S 波速/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	S 波品质 因子
基岩	2.65	5 500	3 000	310

根据以上地震震源参数和玄海台站的场地条件<sup>[14]</sup>,本文采用层状半空间格林函数方法程序,计算得到玄海台站基岩地震动加速度时程,该台站的合成结果比较可见图 2 和图 3.

通过图 2 和图 3 的比较可知,加速度时程波形的不同之处在于:实际竖向地震记录峰值发生在记录的前段,而拟合结果峰值发生在时程的中

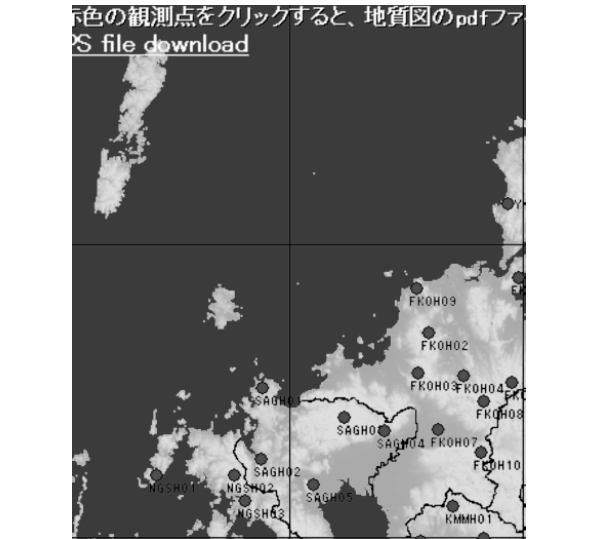


图 1 日本九州福岡地区的监测台站<sup>[13]</sup>

Fig.1 Seismic stations near epicenter of Fukuoka Earthquake

根据图 1 中位置坐标可以确定近场玄海台站的有关参数<sup>[13]</sup>如下:

段. 玄海台站合成结果和观测记录的加速度峰值分别为  $124.32 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$  和  $121.46 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$ , 结果基本一致.

对该基岩地震动加速度时程进行 Fourier 变换, 得到玄海台站竖向实际记录与合成结果的 Fourier 幅值谱比较, 见图 4.

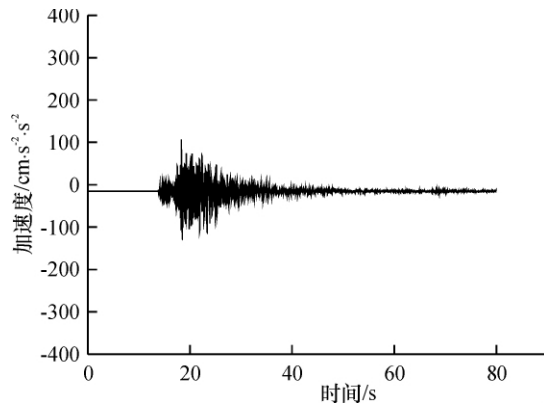


图2 玄海台站基岩竖向地震动加速度实际记录

Fig. 2 Observed acceleration in UD direction at rock site at station GENKAI

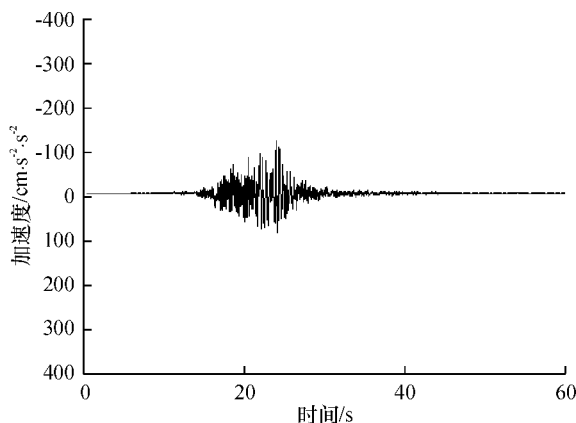


图3 玄海台站基岩竖向地震动加速度合成结果

Fig. 3 Synthesized acceleration in UD direction at rock site at station GENKAI

图4中实线为玄海台站基岩竖向加速度记录的 Fourier 幅值, 虚线为合成结果的 Fourier 幅值. 根据实际记录与合成结果的 Fourier 幅值谱比较可以发现, 其幅值谱的波形变化趋势相同. 说明在频率  $5 \text{ Hz}$  以内合成结果的 Fourier 幅值与观测记录的幅值谱基本一致.

#### 参考文献:

- [1] 新华网. 日本福冈海域强震伤亡人数升至 673 人 [EB/OL]. [2005-03-21]. <http://news.sina.com.cn/w/2005-03-21/20095423042s.shtml>.  
Xinhua News Agency. Number of casualty increased to 673 in Fukuoka Prefecture Earthquake in Japan [EB/OL]. [2005-

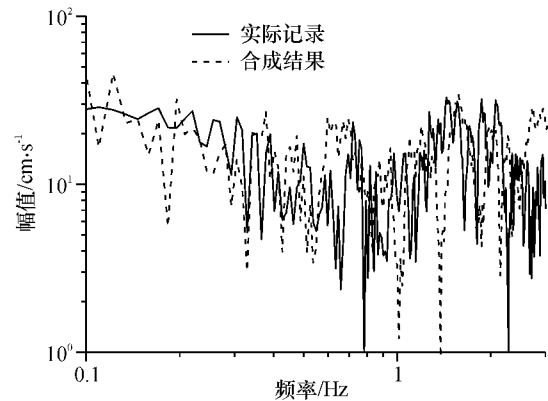


图4 玄海台站竖向地震动实际记录(实线)与合成结果(虚线)的 Fourier 幅值谱

Fig. 4 Fourier amplitude spectrum of the observed (solid line) and synthesized (broken line) accelerations in UD at station GENKAI

### 3 结 论

本文对日本福冈地震断层的破裂过程和滑移分布等地震震源参数进行收集和整理, 根据近场台站(玄海台站)的场地条件, 采用层状半空间格林函数方法合成近场的竖向地震动, 并将该结果与地震记录进行比较, 得出如下结论:

(1) 本文采用理论格林函数方法合成福冈地震近场竖向地震动, 合成结果与观测记录的峰值接近. 说明在传播路径和场地情况不是特别复杂的情况下, 采用层状半空间格林函数理论方法能有效估计福冈地震的近场竖向地震动. 本文所合成地震动的波形与实际还有一些区别, 还要考虑断层破裂过程对合成波形的影响.

(2) 格林函数等解析方法中地震动表达为震源时间函数和格林函数的卷积, 故能较好满足地震动的合成需要. 因此, 在 Fourier 谱低频范围内合成结果的幅值谱与实际记录的基本一致. 在加速度 Fourier 幅值谱高频部分, 合成结果并不是非常一致. 主要原因是场效应和局部土体复杂情况对地震动高频部分有一定影响, 这导致层状半空间格林函数理论在局部复杂场地的地震动合成方面有其不足.

- 03-21]. <http://news.sina.com.cn/w/2005-03-21/20095423042s.shtml>.
- [2] 马兴. 日本福冈县以西海域发生里氏7级地震[EB/OL]. [2005-03-20]. <http://gb.cri.cn/3821/2005/03/20/145@486665.htm>.
- MA X. West off Fukuoka prefecture earthquake ( $M_L = 7.0$ ) happened in Japan[EB/OL]. [2005-03-20]. <http://gb.cri.cn/3821/2005/03/20/145@486665.htm>.
- [3] 沈月明 董纯蕾. 日本发生地震上海有震感, 部分建筑猛烈晃动[EB/OL]. [2005-03-20]. [http://news.xinhuanet.com/newscenter/2005-03/20/content\\_2720181.htm](http://news.xinhuanet.com/newscenter/2005-03/20/content_2720181.htm)
- SHENG Y M, DONG C L. Some violent swaying of buildings happened in Shanghai during earthquake in Japan[EB/OL]. [2005-03-20]. [http://news.xinhuanet.com/newscenter/2005-03/20/content\\_2720181.htm](http://news.xinhuanet.com/newscenter/2005-03/20/content_2720181.htm).
- [4] SEKIGUCHI H, IRIKURA K, IWATA T. Fault geometry in the rupture termination of the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake[J]. *SSA*, 2000, 90(1): 117-133.
- [5] AKI K, LARNER K. Surface motion of a layered medium having an irregular interface due to incident plane SH waves[J]. *J Geop Res*, 1970, 70(5): 933-954.
- [6] KOKETSU K, KENNETT B L, TAKENAKA H. 2-D reflectivity method and synthetic seismograms for irregularly layered structures-II[J]. *Geop J Int*, 1991, 105(1): 119-130.
- [7] KOKETSU K. 2-D reflectivity method and synthetic seismograms for irregularly layered structures-I. SH-wave generation[J]. *Geop J Int*, 1987, 89(3): 821-838.
- [8] AKI K, RICHARDS P G. Quantitative seismology: Theory and methods[M]. San Diego: Academic Press, 1995.
- [9] LUCO J E, APSEL R J. On the Green's functions for a layered half-space[J]. Part 1 *BSSA*, 1983, 73(4): 909-929.
- [10] HISADA Y. An efficient method for computing Green's functions for a layered half-space with sources and receivers at close depths[J]. *BSSA*, 1994, 84(5): 1456-1472.
- [11] Kyoto University. Source rupture process and near-source ground motions of the 2005 west off fukuoka prefecture earthquake [OL]. [2005-03-21]. <http://sms.dpri.kyoto-u.ac.jp/k-asano/050320inv.html>.
- [12] KANAMORI H, ANDERSON D L. Theoretical basis of some empirical relations in seismology[J]. *BSSA*, 1975, 65(5): 1073-1095.
- [13] National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention( NIED) [EB/OL]. [2005-03-21]. [http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/data/index\\_en.html](http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/data/index_en.html).
- [14] 吴迪. 基于凹凸体模型的地震动半经验合成研究[D]. 上海: 同济大学, 2008.
- WU D. The Semi-empirical synthesis of ground motions based on asperity model[D]. Shanghai: Tongji University 2008.

## Research on vertical strong ground motion simulation of Fukuoka Earthquake

WU Di<sup>1,2</sup>, TAN Ping<sup>1</sup>

(1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Earthquake Engineering and Advanced Technology, Guangzhou University, Guangzhou 510405, China;

2. State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** The slip distributions on the fault, the source rupture process and the other seismic parameters of Fukuoka Earthquake determined by Japanese researchers are accepted in this paper. The vertical ground motion of Fukuoka Earthquake in near field is synthesized by using Green's function method for a layered half-space. A comparative study of the acceleration time history of the calculated results and records are carried out. The peak values of the calculated results are close to that of the records. The Fourier spectra of the calculated acceleration time history are basically identical with those of the records while the frequency is below 5 Hz. A conclusion is drawn that the vertical ground motion in the near field can be effectively estimated by the method of computing Green's functions for a layered half-space in the condition of the uniform geologic site.

**Key words:** Green's function; Fukuoka Earthquake; near-field; vertical ground motions

【责任编辑: 周全】