

刘峥, 徐永林, 胡俊, 赵鹏, 李斌, 吕恒俭, 章纯, 2016. 用经验格林函数法合成台湾  $M_S8.0$  级大地震估算对. 震灾防御技术, 11 (2): 360—366. doi: 10.11899/zzyfy20160219

# 合成的台湾 $M_S8.0$ 级大震在 上海产生的地震动<sup>1</sup>

刘 峥 徐永林 胡 俊 赵 鹏 李 斌 吕恒俭 章 纯

(上海市地震局, 上海 200062)

**摘要** 2015 年 4 月 25 日尼泊尔发生了  $M_S8.1$  级地震, 给人们的提示是: 在发生过强震的地方, 有可能再次发生同样强度的地震。自上世纪 20 年代以来, 台湾就发生过两次  $M_S8.0$  级大地震, 遗憾的是对两次强震均未获得强震加速度记录。上海是目前世界上高层建筑最多的城市。本文用经验格林函数法合成台湾  $M_S8.0$  级大地震, 通过合成得到加速度时程来估算对上海产生的地表面波强度。将来台湾一旦发生  $M_S8.0$  级大地震, 其面波对上海高层建筑的影响也将最为显著, 本文给出的估算强度旨在为地震应对和应急救援提供一定的参考。

**关键词:** 经验格林函数法 地震动 高层建筑

## 引言

2015 年 4 月 25 日尼泊尔发生了  $M_S8.1$  级地震, 而发生在该国距离这次强震最近的一次大地震是 1934 年  $M_S8.1$  级地震, 发生地点距离本次地震震中约 130km。同样, 台湾在 1920 年发生过  $M_S8.0$  级地震, 在 1972 年也发生过  $M_S8.0$  级地震。这些震例, 一次又一次的给人们提示: 在发生过强震的地方, 有可能再次发生同样强度的地震。

目前, 随着世界经济和科技的进步以及人口的增加, 建筑物高度不断攀升。居住在高层建筑里的人, 对远场强震的感觉比低矮建筑区的人明显得多。对于高层建筑, 由于结构的自振周期长, 远大地震对其影响较大。上海人口密度大, 也是世界高层建筑最多的特大城市。台湾是强震区, 同时也是地震多发区, 距离上海约 800km 左右, 不算很近也不是很远。自 1900 年以来, 台湾就发生过 2 次  $M_S8.0$  级大地震, 因此, 探讨台湾  $M_S8.0$  级大地震在上海产生的地震动强度, 对于估算高层建筑的地震反应具有重要的意义。

远大地震对上海的影响最主要是面波引起的 (徐永林等, 2002; 徐永林, 2004)。由于高层建筑的自振周期较长, 对于很小的地面震动, 也有可能产生较大的摆动, 极端情况下也可能造成建筑物局部破坏。如 2008 年 5 月 12 日汶川  $M_S8.0$  级大地震, 这次地震距离上海 1600 多千米, 尽管上海软土地表水平加速度大都在 3—4gal, 数值很小, 但这么小的地震动对部分

<sup>1</sup> 基金项目上海市科研计划项目资助课题 (编号 09231203700)

[收稿日期] 2016-06-26

[作者简介] 刘峥, 男, 生于 1966 年。高级工程师, 工学博士, 一级地震安评师。主要从事地震工程和岩土工程方面的研究。

E-mail: lz\_sh5203@163.com

高层建筑也会产生较大的放大作用, 如在浦东陆家嘴、浦西徐家汇、南京路等高层建筑内的工作人员在这次地震中惊慌地逃离办公楼, 在地面绿地或空区滞留, 迟迟不肯回办公室。又如 1999 年 9 月 21 日台湾南投县集集  $M_S 7.6$  级地震, 能量远小于  $M_S 8.0$  级地震, 上海强震记录显示, 地面软土水平加速度为  $4.18\text{gal}$ , 而距地面 200m 高的杨浦大桥桥塔顶部水平加速度达  $15.41\text{gal}$ , 比地表放大了约 3.7 倍, 在这次地震中居住在 15 层以上的居民震感十分强烈。

然而, 由于历史及科技等多方面的原因, 直到 1940 年人类才第一次完整地记录到了最大加速度超过  $300\text{gal}$  的 EI Centro 强震 (大崎顺彦, 1980)。之前发生的强震并未能记录到完整的地震数据, 而 1972 年发生在台湾的  $M_S 8.0$  级大地震在当地也未能获得强震记录, 为了弥补这一缺陷, 也为了探讨台湾发生的  $M_S 8.0$  级地震对上海地面的影响, 本文利用格林函数合成台湾 8.0 级地震, 以此来估算其对上海地表造成的地震动强度。

## 1 经验格林函数合成大地震法

Hertzell (1978) 和 Irikura (1983) 提出, 用小震记录的叠加合成较大的地震, 被称为经验格林函数法。该方法利用与大地震同一地点发生的小地震的地震动记录中含有与大地震传播路径相同的特性, 把小一些的地震记录作为经验格林函数。这种方法的优点是考虑到大小地震的地震波传播是同一路径, 因此, 可以不对传播路径上那些介质参数作各种假设。如果小地震的震源机制与大地震类似, 该方法可以用小地震相当成功地合成大地震。

设大地震断层破裂为矩形破裂, 长为  $L$ , 宽为  $W$ , 震源时间函数上升时间为  $\tau$ , 把大地震断层面分为  $n \times n$  个小区, 各个小区的位错为  $D_{ij}(t)$ ,  $i, j=1, 2, 3, \dots, n$ , 根据大地震与小地震断层参数之间的相似性法则及它们的地震矩  $M_0$  和  $M_{0e,n}$  可用下式给出:

$$n = \left( \frac{M_0}{M_{0e}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

而

$$D_{ij}(t) = \sum_{k=1}^n D_{0e} [t - (k-1)\tau/n] \quad (2)$$

选择破裂方式、震中距等与大地震相近, 并与大地震有相同记录地点的小地震记录作为近似格林函数, 根据 Aki 和 Richards 在定量地震学第 1 卷中得到的公式 (3.2), 即在没有体力的情况下, 大地震与小地震位移之间的关系可简化为:

$$u_n(t) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \frac{r_e}{r_{ij}} u_{ne} [t - t_{ij} - (k-1)\tau/n] \quad (3)$$

$$t_{ij} = \frac{d_{ij}}{v} + \frac{r_{ij}}{v_c} \quad (4)$$

其中,  $u_n(t)$  为合成大地震的位移,  $r_e$  为小地震至观测点之间的距离,  $r_{ij}$  为地震子源至观测点之间的距离,  $u_{ne}(t)$  为作为格林函数的小地震的位移,  $\tau$  为震源时间函数上升时间,  $d_{ij}$  为破裂初始点至第  $(i, j)$  个子断层的距离,  $v$  为断层破裂速度,  $v_c$  为地震波传播速度 (面波或体波)。

原则上利用上述假设的条件, 只要确定了断层走向、断层倾角、断层的长和宽、上升时间、地震矩、破裂速度、破裂方式等参数, 用小地震的地震动时程可计算出大地震的地震动时程。

## 2 历史上的台湾中强以上地震

台湾近太平洋海沟，在环太平洋地震带上，地震频发。据统计，从1900年至今， $M_S 6.5$ 级以上的地震共发生147次，其中， $M_S 7.0$ 级以上地震46次， $M_S 7.5$ 级以上地震10次，表1给出了1910年以来台湾发生的 $M_S 7.5$ 级以上地震（中国地震台网中心提供的地震目录资料，2015）。图1是1900年以来台湾 $M_S 6.5$ 级以上地震震中分布图（中国地震台网中心提供的地震目录资料，2015）。

表1 1900年至今台湾 $M_S 7.5$ 级以上地震

Table 1 Earthquakes of  $M_S \geq 7.5$  in Taiwan from 1900

日期	地震发生地点	震级 $M_S$
1910-04-12	台湾基隆东北海中	7.75
1920-06-05	台湾大港口东海中	8.0
1922-09-02	台湾宜兰东南海中	7.6
1951-11-25	台湾台东东北海中	7.5
1959-04-27	台湾宜兰东海中	7.5
1966-03-13	台湾花莲东北海中	7.8
1972-01-25	台湾火烧岛东海中	8.0
1972-01-25	台湾新港东海中	7.6
1999-09-21	台湾花莲西南（南投县集集）	7.6
2002-02-31	台湾以东海中	7.5

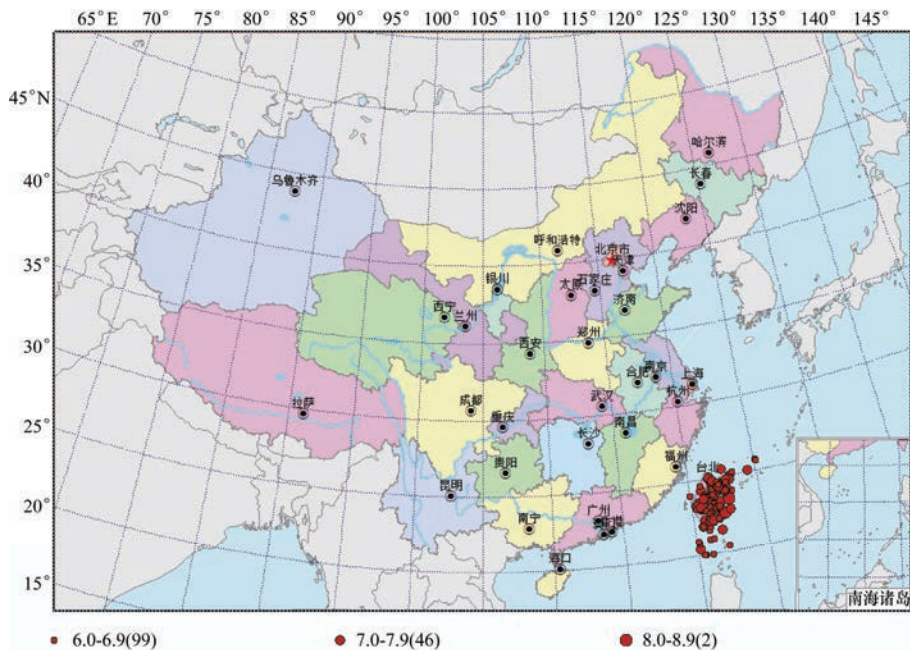


图1 1900年以来台湾 $M_S 6.5$ 级以上地震震中分布图

Fig.1 Distribution of earthquakes of  $M_S \geq 6.5$  in Taiwan from 1900

### 3 用经验格林函数法合成地震估算台湾 $M_S8.0$ 级大地震对上海软土地表产生的地震动大小

许多学者曾用经验格林函数法合成过地震(罗奇峰等, 1997; 金星等, 2002; 范军等, 2012)。对于台湾地震在上海基岩处的地震动时程合成, 庄昆元等(1997)曾利用较小地震人工合成了较大地震的地震动时程, 当时用的是 CDSN 中长周期速度型的数字地震资料。

本文用 2002 年 3 月 31 日台湾  $M_S7.5$  级地震的加速度资料作为经验格林函数值直接合成未来该震区  $M_S8.0$  级大震在上海基岩处的加速度时程。表 2 为所设  $M_S8.0$  级主震参数。

表 2 台湾  $M_S8.0$  级地震震源参数

Table 2 The parameters of earthquake with  $M_S8.0$  sources in Taiwan

断层走向	断层倾角	断层长度	断层宽度	上升时间	破裂速度
N90°E	77°	65km	32km	7s	2.5km/s

注:  $M_S8.0$  级地震的地震矩可由地震震级与地震矩的经验关系估算 ( $\lg M_0 = 1.5M_S + 16.05$ )。

经合成计算, 得到上海佘山基岩和市区软土地表在台湾  $M_S8.0$  级地震作用下的面波加速度时程。图 2、图 3 分别给出了三个不同方向的基岩与地表土层的面波加速度时程曲线。

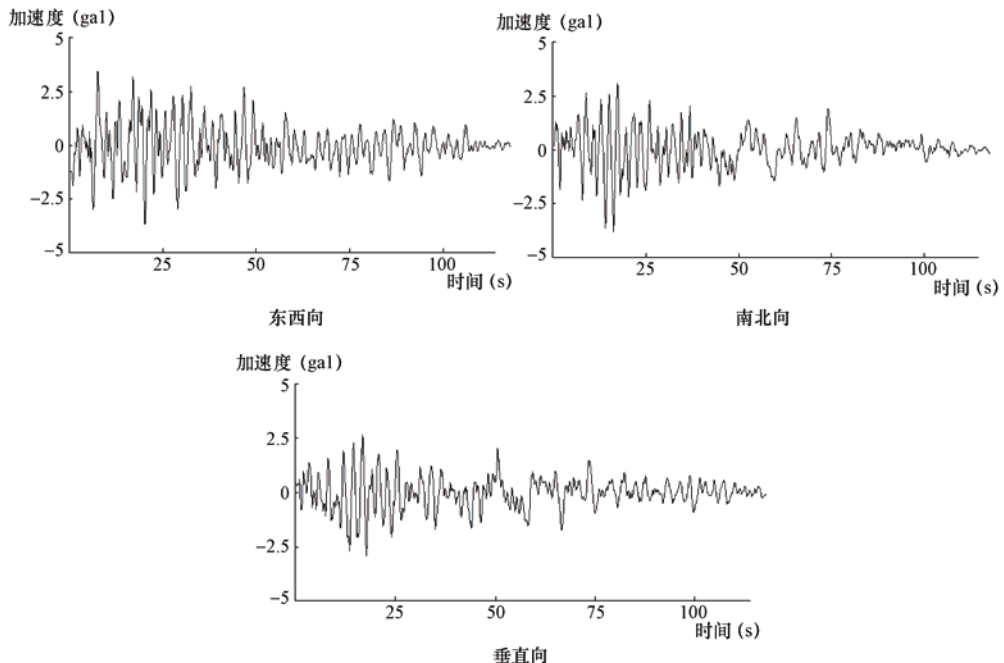


图 2 台湾  $M_S8.0$  级大震上海基岩处地震面波的加速度时程

Fig. 2 The acceleration of seismic surface wave in bedrock of Shanghai from the Taiwan  $M_S8.0$  earthquake

从合成的结果可以看出, 台湾  $M_S8.0$  级地震传至上海基岩处的面波水平向最大加速度峰值约为 3.9gal, 软土地表约为 19.3gal, 土层放大倍数约为 4.9 倍。

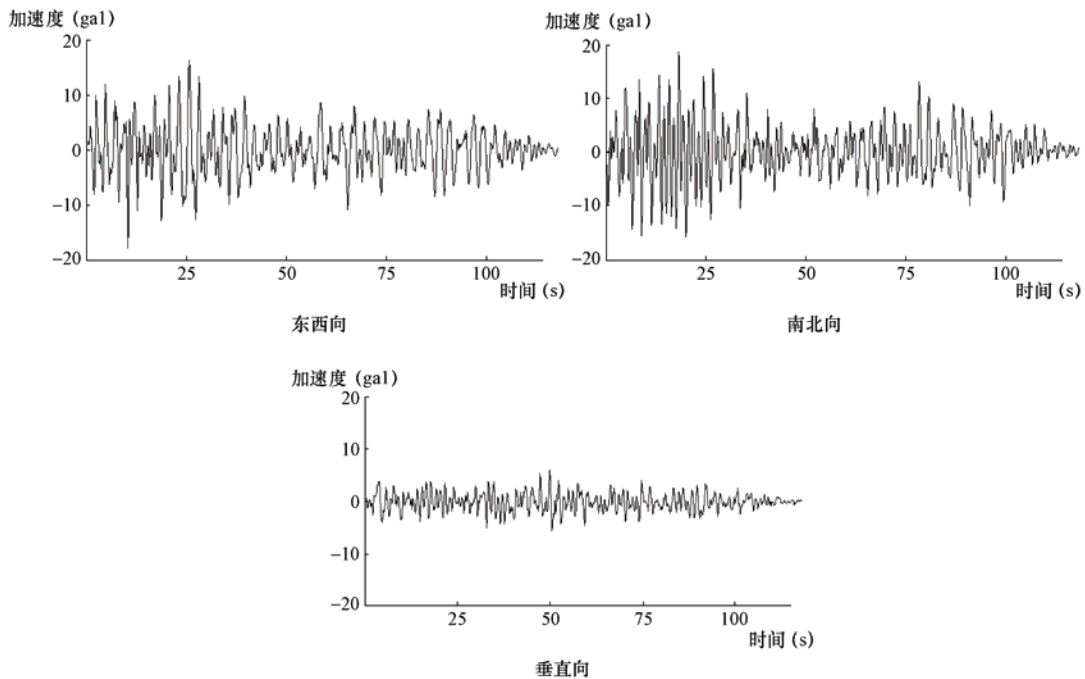


图3 台湾  $M_S8.0$  级大震上海软土地表处地震面波的加速度时程

Fig. 3 The acceleration of seismic surface wave in soft soil of Shanghai from the Taiwan  $M_S8.0$  earthquake

#### 4 上海强震网观测到的强震面波放大作用与格林函数合成地震对深厚软土层放大作用的比较

上海市 1998 年就建成了有一定规模的强震观测网, 其中有基岩台站、地表软土台站、结构台站等, 同时记录到了一些地震的地震动数据。这为定量分析软土地表的地震动放大效应和一些特定结构放大效应打下了一定的基础。

表 3 列出了上海强震观测网记录到的台湾 1999 年 9 月 21 日发生的  $M_S7.6$  级地震, 2002 年 3 月 31 日发生的  $M_S7.5$  级地震, 汶川 2008 年 5 月 12 日发生的  $M_S8.0$  级地震等几次远场强震在基岩和软土地表的地震动面波峰值大小。

表 3 几次远震基岩和软土地表面波的地震动峰值大小

Table 3 Ground motion peak values of several tele-seismic surface waves in bedrock and soft soil

地震名称	观测方向	EW ( $\text{cm/s}^2$ )	NS ( $\text{cm/s}^2$ )	UD ( $\text{cm/s}^2$ )
1999 年 9 月 21 日台湾集集地震 ( $M_S7.6$ )	基岩处	1.09	1.05	0.48
	软土地表处	4.18	3.41	1.30
	放大倍数	3.8	3.2	2.7
2002 年 3 月 31 日台湾地震 ( $M_S7.5$ )	基岩处	0.21	0.18	0.13
	软土地表处	0.84	0.87	0.29
	放大倍数	4.0	4.8	2.2

(未完待续)

续表

地震名称	观测分向	EW (cm/s <sup>2</sup> )	NS (cm/s <sup>2</sup> )	UD (cm/s <sup>2</sup> )
2008年5月12日汶川地震 ( $M_S8.0$ )	基岩处	0.80	1.10	1.13
	软土地表处	3.42	4.77	1.35
	放大倍数	4.3	4.3	1.2
本次合成的台湾地震 ( $M_S8.0$ )	基岩处	3.5	3.9	3.0
	软土地表处	19.0	19.2	6.3
	放大倍数	5.4	4.9	2.1

从上表可以看出强震观测值水平向放大倍数的范围为 3.2—4.8, 平均为 4 倍; 通过格林函数法合成地震的方式获得的水平向放大倍数为 4.9—5.4, 平均为 5.1 倍左右。

## 5 结论

通过格林函数法合成台湾  $M_S8.0$  级大地震得到的上海地表加速度面波强度和强震观测网记录到的数据对比, 可以得到以下结论:

(1) 用经验格林函数法合成得到的台湾  $M_S8.0$  级大地震对上海软土产生的地表加速度值接近 20gal。

(2) 对比实际记录到的台湾  $M_S7.5$  级地震强度的情况, 放大倍数在 5.1 倍左右, 略有增加。

(3) 合成格林函数方法, 虽然是一种半经验估计, 但得到了上海软土地表面波强度和放大倍数, 这些结论在上海以后遇上远场强震时, 可为管理部门在地震应对和应急救援中提供一定的参考。

## 参考文献

- 大崎顺彦, 1980. 《地震动的谱分析入门》. 北京: 地震出版社.
- 范军, 刘杰等, 2012. 用经验格林函数方法研究台站的场地响应. 四川地震, (1): 9—16.
- 金星, 刘启方, 2002. 断层附近强地震动半经验合成方法的研究. 地震工程与工程振动, 22 (3): 22—27.
- 罗奇峰, 胡律贤, 1997. 1976年唐山地震近、远场加速度的半经验合成. 地震学报, 19 (3): 275—282.
- 徐永林, 熊里军, 章纯等, 2002. 用强震仪记录资料研究上海地表土层的地震动放大反应. 地震学报, 24 (6): 662—666.
- 徐永林, 2004. 软土覆盖层地震面波的地震动反应及台湾 8 级地震对上海高层建筑影响估计. 西北地震学报, 26 (4): 309—314.
- 庄昆元, 徐永林, 沈建文, 1997. 台湾大地震长周期波对上海的影响研究. 地震学报, 19 (6): 634—639.
- 中国地震台网中心提供的地震目录资料, 2015. <http://www.ceic.ac.cn/>.
- Hartzell S.H., 1978. Earthquake aftershocks as Green's function. Geophys. Res. LETT, (5): 1—4.
- Irikura K., 1983. Semi-empirical estimation of strong ground motions during large earthquake. Bull. Disas. Prev. Res. Inst., 33 (298): 63—104.

# The Estimated Value of Ground Surface Wave in Shanghai by Synthesizing Taiwan $M_S8.0$ Earthquake with Empirical Green's Function

Liu Zheng, Xu Yonglin, Hu Jun, Zhao Peng, Li Bin, Lv Hengjian and Zhang Chun

(Earthquake Administration of Shanghai Municipality, Shanghai 200062, China)

**Abstract** A  $M_S8.1$  earthquake occurred in Nepal on April 25, 2015, which implies to us that macro-earthquakes may occur at the same place with same intensity. Since the 1920s of last century, two  $M_S8.0$  earthquakes occurred in Taiwan. However, no acceleration of the two earthquakes was recorded. Shanghai has the largest number of high-rise buildings. We apply empirical Green's function to synthesize Taiwan  $M_S8.0$  earthquake and to estimate the intensity of ground surface wave in shanghai. We found that if a  $M_S8.0$  earthquake occurs in Taiwan, the impact of the surface wave on Shanghai high-rise buildings will be remarkable. The estimation value is aimed to be helpful in earthquake response and emergency rescue.

**Key words:** Empirical Green function; Ground motion; High-rise buildings