

doi:10.3799/dqkx.2017.052

# 利用爆炸震源资料获得三分量旋转地震动

赖晓玲, 孙 译

中国地震局地球物理勘探中心, 河南郑州 450002

**摘要:** 三分量旋转地震动是目前地球物理研究重点之一. 利用爆炸震源的平动地震仪观测资料, 通过间接计算获得三分量旋转地震动. 利用了3炮500 kg炸药的观测资料, 3个爆炸点到观测台阵的距离分别是1.8、2.8和8.9 km, 计算得到了台阵相对于这3个爆炸点的旋转地震动, 其最大峰值旋转角速度分别是41.65、21.98和0.29  $\mu\text{rads/s}$ , 与国际同行的旋转地震动结果量级接近. 地震动峰值随震中距的衰减是地震工程中关注的问题. 提取出三分量的旋转角速度峰值, 利用指数函数对三分量的峰值进行拟合, 初步得到三分量的旋转地震动角速度峰值随震中距的衰减关系. 衰减曲线的主要特征是, 1~3 km旋转角速度能量迅速衰减, 大于5 km以后衰减逐渐减慢, 随着震中距增大曲线的变化越来越趋于平缓.

**关键词:** 地震学; 平动速度; 旋转速度; 地震台阵; 爆炸震源.

中图分类号: P315.8

文章编号: 1000-2383(2017)04-0645-07

收稿日期: 2016-11-03

## Three Component Rotational Ground Motion Obtained from Explosive Source Data

Lai Xiaoling, Sun Yi

Geophysical Exploration Center, China Earthquake Administration, Zhengzhou 450002, China

**Abstract:** Three component rotational ground motion is one of the most important point of geophysics research. In this paper, the rotational ground motions with three components were deduced by calculation using records of translational seismographs from explosions. The observational data used are from three shots with explosive charge of 500 kg for each and observational distances of 1.8, 2.8, 8.9 km respectively. The rotational motions of the array from these three shots were obtained by calculation. The largest peak angular velocities of ground motion are 41.65, 21.98 and 0.29  $\mu\text{rads/s}$  respectively, which are quite near the results from international colleagues. How the peak values of the ground motion decay with the epicenter distance is always the focal problem in earthquake engineering. In this paper, the peak angular velocities of ground motion are fit with exponent function, and the decay of peak values with distance is obtained. The main features of the decay curves are as follows: The values decay very fast within 1-3 km and slow down gradually beyond 5 km. And with the increase of the distance, the curve tends to more and more flat.

**Key words:** seismology; translational-velocity; rotational-velocity; seismic array; explosive source.

## 0 引言

地震旋转效应从被观察到至今已有近一百多年(Kozak, 2009). 从历史实例看, 被观察到地震旋转效应的绝大多数是在震中区、近场, 很多情况下地震旋转效应是在垂向摆放的物体上发现的, 如烟囱、方尖塔以及墓碑等. 近年来, 随着经济高速增长、城市

化进程加快, 出现了大量的高层高耸结构的建筑物, 地震旋转效应对这类结构的影响是不可忽略的.

旋转地震学是全面研究由地震、爆破和环境振动引起旋转运动的一个正在兴起的领域(Lee *et al.*, 2009a). 根据经典力学, 需要用平移的3个分量和旋转的3个分量来描述刚体的运动. 而传统上, 地震学只观测平移的运动, 但是还应测量旋转运动

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(Nos. 41374099, 41074069).

**作者简介:** 赖晓玲(1957-), 女, 研究员, 主要从事综合地球物理研究. ORCID: 0000-0001-9129-4224. E-mail: lxling04@163.com

**引用格式:** 赖晓玲, 孙译, 2017. 利用爆炸震源资料获得三分量旋转地震动. 地球科学, 42(4): 645-651.

的 3 个分量,通过对平移运动和旋转运动的联合观测和解释,将会加深研究人员对地震过程和机理的更多方面的了解。

旋转地震动可直接用旋转地震仪探测,也可以间接从平动地震仪的台阵来推断 (Igel *et al.*, 2003; Wassermann *et al.*, 2009). 近十多年来,数个国家或地区在旋转地震方面已经获得了许多的观测资料 (McLeod *et al.*, 1998; Takeo *et al.*, 1998, 2009; Igel *et al.*, 2003; Suryanto *et al.*, 2006; Wassermann *et al.*, 2009),前人在中国台湾地区一直在进行地震旋转效应的观测试验,并且较详细地发表了地面旋转和平移运动的观测报告 (Liu *et al.*, 2009; Wu *et al.*, 2009; Lee *et al.*, 2009b). 在 2004—2006 年的一期观测实施期间共记录到数百个地震,这期间主要是初步解决野外观测. 2007—2008 年开展了二期观测,观测到 52 个地方震,旋转速度和平移加速度信号的信噪比都有大的提高. 在中国台湾中正大学布设的台阵是由平移传感器和旋转传感器一起组成的,用于研究地面运动的特性. 此外,把平移传感器和旋转传感器布设在附近的一个建筑物内,仪器放置在不同的楼层. 目的是为了观测建筑物内的旋转运动及其对建筑设计有怎样的意义。

在近场区,地震波的旋转分量具有相当高的强度,也是引起建筑物破坏的一个重要因素. 为了在地震学和地震工程学层面上较真实的研究近场地震的细节,开展近场地震旋转观测研究是非常必要的. 爆炸震源由于位置已知,研究人员可以在离爆炸点较近的地方布设地震台阵,容易取得近场地震记录。

考虑到目前国内缺少成熟的旋转地震仪,因此,利用平动地震仪的台阵数据间接计算所产生的旋转地震动是有效的方法. 笔者做过一点初步的尝试,利用临时地震台阵的平动记录得到了垂直分量的旋转地震动 (Li *et al.*, 2012). 本文利用爆炸震源的近场台阵资料获得三分量旋转地震动,并且初步尝试拟合了旋转地震动峰值随震中距衰减的特征。

## 1 原理和计算方法

为完整地描述刚体上任一点的运动,需要 3 个平动分量和 3 个转动分量 (图 1). 若再考虑介质的形变,还需再补充 6 个应变分量. Cochard *et al.* (2006) 利用下式来描述点  $x$  的位移  $\mathbf{u}$  与其邻近点  $x + \delta x$  位移的关系:

$$\mathbf{u}(x + \delta x) = \mathbf{u}(x) + \boldsymbol{\varepsilon} \delta x + \boldsymbol{\omega} \times \delta x, \quad (1)$$

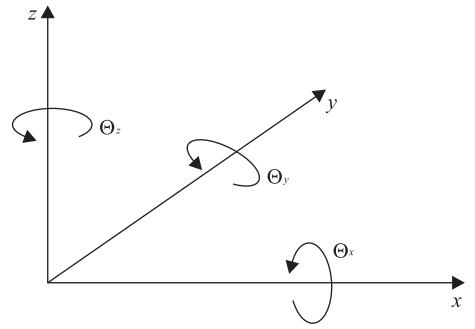


图 1 物体运动的 6 个自由度

Fig. 1 Motions with six degrees of freedom

$$\boldsymbol{\omega} = 1/2 \nabla \times \mathbf{u}(x), \quad (2)$$

式中:  $\boldsymbol{\varepsilon}$  为应变张量;  $\boldsymbol{\omega}$  为由扰动产生的代表无穷小角度刚性旋转的伪矢量. 考虑到自由表面应力张量的  $z$  分量为零,因而,  $\boldsymbol{\omega}$  在  $x, y, z$  轴上旋转运动的 3 个分量为:

$$\omega_x = \partial u_z / \partial y, \omega_y = -\partial u_z / \partial x, \quad (3)$$

$$\omega_z = 1/2 (\partial u_y / \partial x - \partial u_x / \partial y). \quad (4)$$

间接方法是利用现有地震仪 (平动地震仪) 的地震记录,且必须是多个台站的记录资料,通过计算间接得到地面运动的旋转分量. 一般利用小间距台阵的平动地震记录,根据关系式 (3) 和 (4) 计算旋转分量 (Spudich and Fletcher, 2008). 所用的平动地震记录,可以是加速度、速度或位移;相应的,计算得到的旋转运动分别为角加速度、角速度和角位移。

实际资料处理的主要步骤是:挑选台站布局规则的几个台站的记录,由于每个台站是独立时间服务系统,要进行统一的时间校正. 根据地震仪器的类型进行平动地震动的计算,并且考虑各台仪器实际记录的增益等因素. 另外,根据需要是否进行滤波等资料预处理. 然后利用式 (3) 和 (4) 分别计算旋转地震动的 2 个水平分量和 1 个垂直分量. 作为最简单的近似计算平动运动水平导数的方法,可首先求得两个相邻台站相同分量的差值,然后除以相应的台间距. 在台站布局规则的情况下,该算法很容易实现 (Huang, 2003),由于笔者采用的是速度型的平动地震仪,所以计算的旋转地震动是角速度。

## 2 爆炸震源近场观测资料

观测资料采用了笔者在华北平原南部的太行山前布设的流动地震台阵,爆炸点和地震台阵分布见图 2, 3 个爆炸源 (SP1、SP2 和 SP3) 用“\*”标注,台阵用“0”标注 (图 2a), 3 个爆炸源均为 500 kg 的

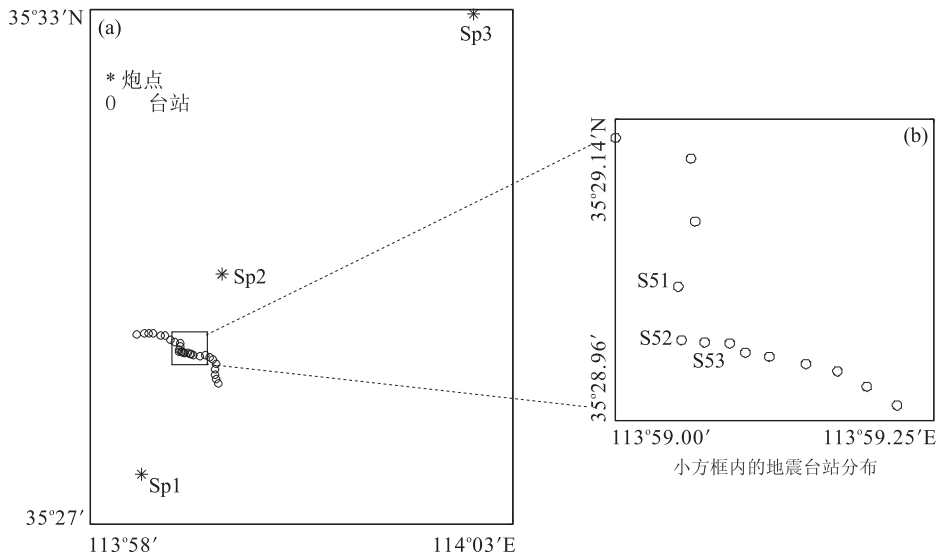


图 2 炮点和地震台阵分布

Fig. 2 Position sketch of shot points and arrays

TNT 炸药. 本试验所用地震台站位于图中小方框内 (图 2b), 选取了 S51, S52, S53, 3 个台站的记录参与计算. 其中 S51 和 S52 呈南北向展布, 台站间距为 60 m; S52, S53 呈东西向展布, 间距为 30 m. 研究区地面平坦, 所有台站都可看成位于同一水平面内. 观测所用的仪器为中国地震局地球物理勘探中心研制的 PDS-2 型三分量数字地震仪, 仪器采样率为 200 次/s.

### 3 旋转地震动计算

3 个爆炸源 (SP1, SP2 和 SP3) 到所选台站的距离大约分别是 2.8、1.8、8.9 km. 爆炸点附近具有更多的高频成分, 随着震中距增加, 地震记录的频率降低. 考虑到要处理和对比 3 炮不同震中距的资料, 直接利用原始记录进行计算.

SP2 震中距最小, 首先计算 SP2 炮的旋转地震动. 采用公式(4)计算旋转运动的  $z$  垂直分量, 反映的是水平面内的旋转运动, 利用了 S51、S52、S53, 3 个台站的水平分量记录. 图 3 给出了 SP2 炮点的平动地震记录和计算出的  $z$  分量地面旋转角速度 (单位为  $10^{-5}$  rad/s). 利用公式(3)可以计算旋转运动的  $x, y$  两个分量. 旋转  $x$  分量, 利用 S51, S52 两个台站的垂直分量记录, 图 4 给出了 SP2 炮点的平动地震记录和计算出的  $x$  分量旋转角速度. 旋转  $y$  分量, 利用 S52, S53 两个台站的垂直分量记录, 图 5 给出了 SP2 炮点的平动地震记录和计算出的  $y$  分量旋转角速度.

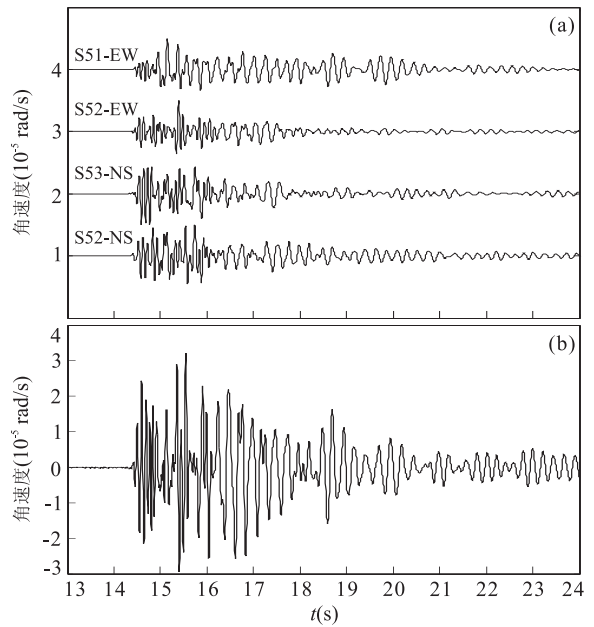


图 3 SP2 炮点的平动地震记录和计算出的  $z$  分量地面旋转角速度

Fig. 3 Seismic records and  $z$ -axis rotational velocities obtained from SP2

a. 平动地震记录; b. 旋转角速度

同样的原理, 可以计算出相对于 SP1 和 SP3 炮点的三分量旋转地震波形. 图 6 和图 7 分别对应 SP1 和 SP3 炮点的三分量旋转角速度. 从 SP1、SP2、SP3 炮点的旋转地震波形看出 SP1, SP2 两炮震中距小波形清晰, SP3 炮震中距较大, 并且放炮时在下雨, 所以计算的旋转地震波形也有些背景干扰.

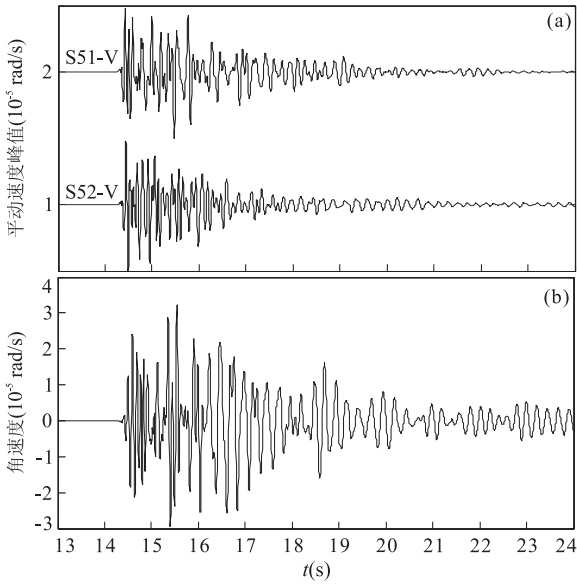


图 4 SP2 炮点的平动地震记录和计算出的  $x$  分量地面旋转角速度  
 Fig. 4 Seismic records and  $x$ -axis rotational velocities obtained from SP2

a. 平动地震记录;b. 旋转角速度

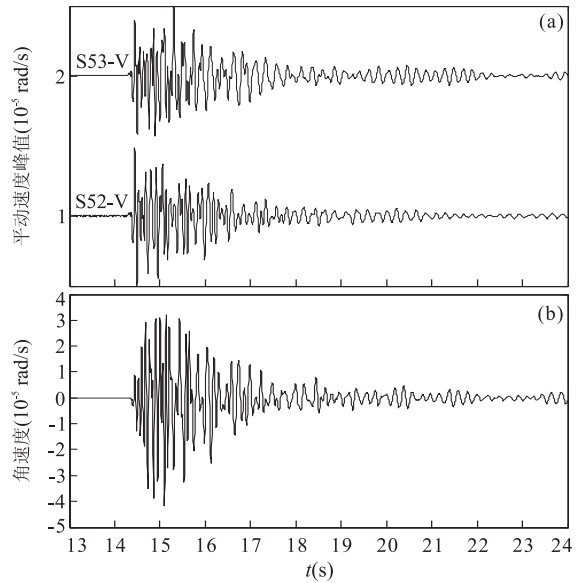


图 5 SP2 炮点的平动地震记录和计算出的  $y$  分量地面旋转角速度  
 Fig. 5 Seismic records and  $y$ -axis rotational velocities obtained from SP2

a. 平动地震记录;b. 旋转角速度

#### 4 旋转地震动峰值的衰减特征

地震动峰值随震中距的衰减是地震工程中关注的问题。由于旋转地震记录很少，所以相应的峰值衰

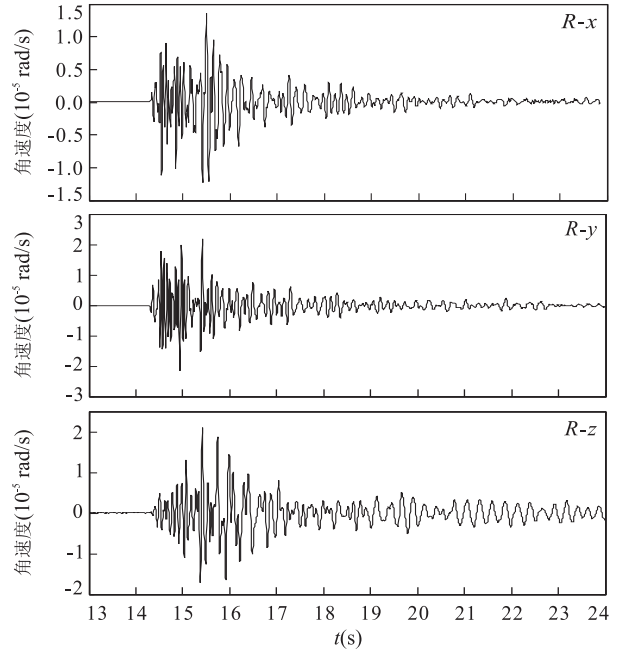


图 6 利用 SP1 炮的平动地震记录计算出的三分量地面旋转角速度  
 Fig. 6 Three component ground rotational velocities calculated by the seismic records from SP1

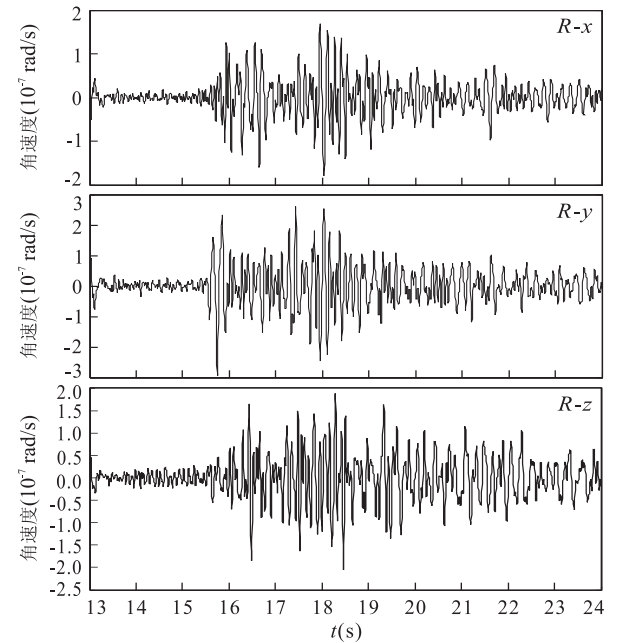


图 7 利用 SP3 炮的平动地震记录计算出的三分量地面旋转角速度  
 Fig. 7 Three component ground rotational velocities calculated by the seismic records from SP3

减关系也缺乏研究。前人在中国台湾地区开展了多年的近场地面旋转运动观测，但是数据都是从单一台站获得的，没有得到单个地震在多个台站记录的

表 1 三分量峰值旋转角速度

Table 1 Three component peak ground rotational velocities

炮点编号	$R_x$	$R_y$	$R_z$	震中距(km)
SP2	30.258	41.651	32.195	1.8
SP1	13.547	21.983	21.010	2.8
SP3	0.180	0.293	0.206	8.9

注:PGRV 单位为  $\mu\text{rad/s}$ .

表 2 三分量峰值旋转角速度随震中距的衰减关系拟合系数

Table 2 Three component fitting attenuation coefficient of peak ground rotational velocities three component with the epicentral distance

拟合系数	$R_x$	$R_y$	$R_z$
A	128.300 0	131.400 0	73.540 0
B	-0.802 8	-0.638 5	-0.454 9

数据,也未进行旋转地震动随震中距离衰减的研究(Lee *et al.*, 2009b). 本文 3 次爆破的炸药量都是 500 kg,并且震中距不同. 从 3 炮旋转角速度波形(图 3~图 7)提取出 3 个分量各自的峰值(表 1),可以看出震中距为 1.8~8.9 km,三分量的峰值旋转角速度迅速减小.

仅仅从 3 组数据难以看出旋转地震动峰值随震中距的衰减规律,利用图形可以更直观地反映衰减特征. 由于地震记录资料来自同一个接收系统,因此接收点处的局部效应可以排除. 3 个炮点的地质条件基本相同,钻井深度一致,炸药量都是 500 kg,因此震源处的局部效应可以忽略. 参考国内外地震工程学家建立平动地震动峰值随震中距衰减的基本思路,利用指数函数对 3 炮各分量的峰值进行拟合. 拟合公式为:

$$y = A\exp(Bx), \tag{5}$$

式中: $y$  是拟合的旋转角速度峰值( $\mu\text{rad/s}$ ); $x$  是震中距(km).  $A, B$  是拟合系数. 3 个分量的拟合系数见表 2. 可以看出系数 B 的拟合值都是负的,表示随着震中距的增大,旋转角速度峰值是减小的.

由图 9 可见初步得到的三分量的旋转地震动峰值随震中距的衰减特征,图中横坐标是震中距(km),纵坐标是旋转角速度峰值( $\mu\text{rad/s}$ ). 红色对应  $R_x$  分量拟合曲线和数据点,蓝色对应  $R_y$  分量拟合曲线和数据点,绿色对应  $R_z$  分量拟合曲线和数据点. 本试验是 500 kg 炸药量,震中距为 1~10 km,从旋转峰值速度随震中距衰减的初步关系. 可以看出,1~3 km 旋转速度能量迅速衰减,大于 5 km 以后能量的衰减逐渐减慢,随着震中距增大曲线的变化越来越趋于平缓. 地震动衰减关系以实际资料为

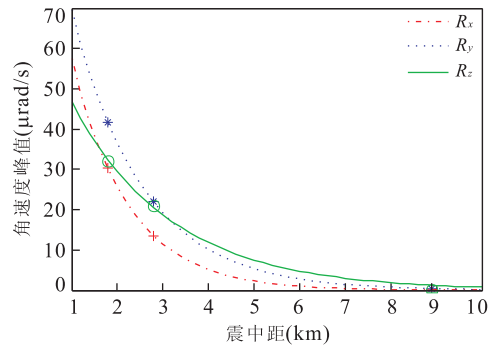


图 8 三分量旋转地震动峰值随震中距的衰减拟合曲线  
Fig. 8 Fitting attenuation curve of three component peak ground rotational velocities with the epicentral distance

表 3 三分量峰值平动速度随震中距的衰减关系拟合系数

Table 3 Fitting attenuation coefficient of three component peak ground translational velocities with the epicentral distance

拟合系数	$T_x$	$T_y$	$T_z$
A	5.009 0	3.102 0	3.038 0
B	-0.669 8	-0.480 3	-0.563 8

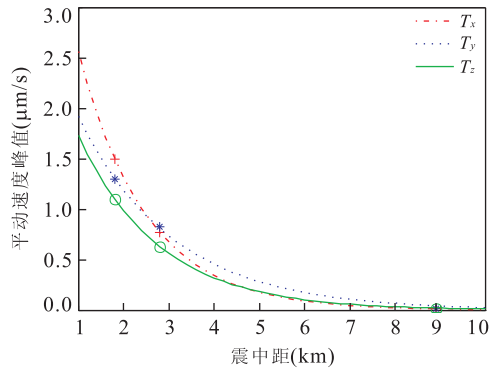


图 9 三分量平动地震动峰值随震中距的衰减拟合曲线  
Fig. 9 Fitting attenuation curve of three component peak ground translational velocities with the epicentral distance

基础,并且依赖观测资料的积累,由于旋转地震数据只有 3 炮,所以对拟合曲线只是大致趋势.

对原始平动三分量地震记录,同样提取了峰值,并利用指数函数对 3 炮各分量的平动峰值速度进行拟合(拟合系数见表 3),得到了三分量平动速度峰值随震中距的衰减特征(图 9),图中平动地震动量纲为 mm/s,横坐标是震中距(km). 红色对应  $T_x$  分量拟合曲线和数据点,蓝色对应  $T_y$  分量拟合曲线和数据点,绿色对应  $T_z$  分量拟合曲线和数据点. 图 8 和图 9 比较,可以看出旋转和平动两种地震动峰值随震中距衰减变化趋势非常相似.



前人在中国台湾地区做了多年的旋转地震动和平动地震动的对比试验,获得了较多的对比数据,并研究了旋转运动与平移运动之间的关系,分别利用 52 个地震和 216 个地震的样本数据,建立了旋转地震动峰值与平动地震动峰值的对应关系拟合图,反映了旋转和平动两种地震动峰值变化有近似线性的关系(Liu *et al.*, 2009; Lee *et al.*, 2009b). 与本研究利用两种地震动峰值随震中距衰减变化趋势的比较,所反映的意义是相似的。

## 5 结论

利用平动地震记录计算旋转地震动至少需 3 个台站的资料. 并且台站尽量分布均匀和对称. 台站间接不宜过大,据 Spudich *et al.* (2008) 的研究,台站间距小于横波速度的 1/4 波长. 本文数据观测点距分别为 30 m 和 60 m,在下一步的试验中,将采用等间距放置仪器,并且减小点距到 10 m 左右.

本文利用了 3 次 500 kg 药的爆炸震源资料计算了三分量的旋转地震动. 最近的震中距是 1.8 km,计算的旋转地震动最大峰值是 41.65  $\mu\text{rad/s}$ . Wassermann *et al.* (2009) 的试验,炸药量 150 kg,震中距 250 m,得到的旋转地震动最大峰值是 50  $\mu\text{rad/s}$ . 与笔者的计算结果很接近,他们的试验虽然炸药量小,但是震中距也近. Lin *et al.* (2009) 的 2 次爆炸震源的旋转地震动观测试验,炸药量分别是 3 000 kg 和 750 kg,震中距 250 m,最大峰值旋转速度分别为 2 740  $\mu\text{rad/s}$  和 1 750  $\mu\text{rad/s}$ ;震中距 500 m,最大峰值旋转速度分别为 627  $\mu\text{rad/s}$  和 394  $\mu\text{rad/s}$ ;他们试验的炸药量大,震中距也很近,旋转地震动峰值大约是本文试验结果的 10~65 倍.

由于 3 次爆炸的炸药量都是 500 kg,并且震中距范围 1~10 km 不等,利用指数函数拟合初步建立了三分量旋转地震动峰值随震中距的衰减关系. 主要特征是在离爆炸点 1~3 km 的近距离,旋转速度的能量迅速衰减,大于 5 km 以后能量的衰减逐渐减慢,随着震中距增大曲线的变化越来越趋于平缓. 由于旋转地震数据只有 3 炮,对拟合曲线的细节只是大致趋势. 在后续的旋转观测试验中,将采用对一次爆炸,在 10 km 的近场区不同震中距,布设多组台阵进行观测,得到更多不同震中距的观测台阵数据,可以计算多点位的旋转地震动,以便更精细的建立旋转地震动随震中距的衰减关系.

对记录的平动地震记录,同样利用指数函数对 3 炮的平动峰值速度进行拟合,建立了三分量平动地震动峰值随震中距的衰减关系,旋转和平动两种地震动峰值在 1~10 km 的范围,随震中距衰减变化趋势很近似. 台湾的相关研究,建立了旋转地震动峰值与平动地震动峰值的拟合关系,有近似线性特征,与本研究反映的意义是相似的。

## References

- Cochard, A., Igel, H., Schuberth, B., et al., 2006. Rotational Motions in Seismology: Theory, Observation, Simulation. In: Teisseyre, R., Takeo, M., Majewski, E., eds., Earthquake Source Asymmetry, Structural Media and Rotation Effects. Springer-Verlag, Heidelberg, 391–411.
- Huang, B. S., 2003. Ground Rotational Motions of the 1991 Chi-Chi, Taiwan Earthquake as Inferred from Dense Array Observations. *Geophys. Res. Lett.*, 30(6):1307. doi: 10.1029/2002GL015157
- Igel, H., Schreiber, U., Flaws, A., et al., 2005. Rotational Motions Induced by the M 8.1 Tokachi-Oki Earthquake, September 25, 2003. *Geophys. Res. Lett.*, 32: L08309. doi:10.1029/2004GL022336
- Kozak, J. T., 2009. Tutorial on Earthquake Rotational Effects: Historical Examples. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 99(2B):998–1010. doi:10.1785/0120080308
- Lee, W. H. K., Igel, H., Trifunac, M. D., 2009a. Recent Advances in Rotational Seismology. *Seismol. Res. Lett.*, 80(3):479–490. doi:10.1785/gssrl.80.3.479
- Lee, W. H. K., Huang, B. S., Langston, C. A., et al., 2009b. Review; Progress in Rotational Ground-Motion Observations from Explosions and Local Earthquakes in Taiwan. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 99(2B):958–967. doi: 10.1785/0120080205
- Li, S. L., Lai, X. L., Sun, Y., et al., 2012. Calculation of Ground Rotational Motions Using Seismic Array Data. *Journal of Earth Science*, 23(2):173–179. doi: 10.1007/s12583-012-0242-9
- Lin, C. J., Liu, C. C., Lee, W. H. K., 2009. Recording Rotational and Translational Ground Motions of two TAIGER Explosions in Northeastern Taiwan on 4 March 2008. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 99(2B):1237–1250. doi:10.1785/0120080176
- Liu, C. C., Huang, B. S., Lee, W. H. K., et al., 2009. Observing Rotational and Translational Ground Motions at the HGSD Station in Taiwan from 2007 to 2008. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 99(2B):1228–1236. doi:10.1785/

0120080156

McLeod, D. P., Stedman, G. E., Webb, T. H., et al., 1998. Comparison of Standard and Ring Laser Rotational Seismograms. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 88 (1): 495—1503

Spudich, P., Fletcher, J. B., 2008. Observation and Prediction of Dynamic Ground Strains, Tilts, and Torsions Caused by the M 6.0 2004 Parkfield, California, Earthquake and Aftershocks Derived from UPSAR Array Observations. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 100(4): 2348—2352. doi: 10.1785/0120100138

Suryanto, W., Igel, H., Wassermann, J., et al., 2006. First Comparison of Array-Derived Rotational Ground Motions with Direct Ring Laser Measurements. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 96(6): 2059—2071. doi: 10.1785/0120060004

Takeo, M., 1998. Ground Rotational Motions Recorded in Near-Source Region. *Geophys. Res. Lett.*, 25(6): 789—792. doi:10.1029/98GL00511

Takeo, M., 2009. Rotational Motions Observed During an Earthquake Swarm in April 1998 Off-Shore Ito, Japan. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 99(2B): 1457—1467. doi: 10.1785/0120080173

Wassermann, J., Lehndorfer, S., Igel, H., et al., 2009. Performance Test of a Commercial Rotational Motions Sensor. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 99(2B): 1449—1456. doi: 10.1785/0120080157

Wu, C. F., Lee, W. H. K., Huang, H. C., 2009. Array Deployment to Observe Rotational and Translational Ground Motions along the Meishan Fault, Taiwan: A Progress Report. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 99(2B): 1468—1474. doi:10.1785/0120080185

\*\*\*\*\*

(上接 644 页)

Guo, Y., Lu, Y. K., Chen, B., 2005b. Applied Circuit of Lower-Noise Preamplifier Composed by Unattached Components. *Chinese Journal of Electron Devices*, 28(4): 795—797 (in Chinese with English abstract).

Lu, Y. K., Qu, Z., Qiang, J. K., et al., 2000. An Accurate Location Method for Deep Buried and Adjacent Cables in “Waterline Area”. In: Chinese Geophysics, ed. The Chinese Geophysics, 2000. China University of Geosciences Press, Wuhan, 142 (in Chinese).

Lu, Y. L., Yang, Y. S., Lu, X., et al., 2014. An Analysis of Underground Pipeline Detecting Technology Using FDEM Method. *Office Automation*, 2014(S1): 150—153 (in Chinese with English abstract).

Xu, H. H., Wang, S. T., 1987. Virtual Component Electromagnetic Method. Geological Publishing House, Beijing, 108—118 (in Chinese).

Yang, X., Tian, Y. Z., Zhang, Z. L., 1997. Underground Pipeline Detection and Pipeline Information System. Surveying and Mapping Press, Beijing (in Chinese).

附中文参考文献

北京市测绘设计研究院, 2003. 城市地下管线探测技术规程 (CJJ61—2003). 北京: 中国建筑工业出版社.

曹立斌, 鲁永康, 周建兰, 2003. 用改进的遗传算法对密集平行管线直接反演的研究. 物探化探计算技术, 25(4): 358—362.

郭玉, 鲁永康, 陈波, 2005a. 高性能低频交变磁场传感器的研究与制作. 传感器技术学报, 18(3): 493—495.

郭玉, 鲁永康, 陈波, 2005b. 分立元件设计的低噪声前置放大器实用电路. 电子器件, 28(4): 795—797.

鲁永康, 曲赞, 强健科, 等, 2000. “水线区”深埋相邻电缆的精确定位方法技术. 见: 中国地球物理学会编, 中国地球物理学会年刊. 武汉: 中国地质大学出版社, 142.

鲁永康, 杨宇山, 鲁星, 等, 2014. 用 FDEM 法探测深埋油气管道方法技术的分析与思考. 办公自动化, 2014(S1): 150—153.

许洪海, 王守坦, 1987. 虚分量电磁法. 北京: 地质出版社, 108—118.

杨旭, 田应中, 张正禄, 1997. 地下管网探测与信息管理. 北京: 测绘出版社.