

汶川地震近场区转动分量统计分析

赵世伟¹, 罗奇峰²

(1. 同济大学 结构工程与防灾研究所, 上海 200092;

2. 同济大学 上海防灾救灾研究所, 上海 200092)

摘要: 通过选取汶川地区 I 类、II 类和 III 类场地共 25 个台站的地震记录按照平动分量和转动分量的关系计算得到相应的摇摆分量和扭转分量, 并进行了统计分析。根据选择的地震记录得出以下的结论: ① 转动分量和平动分量的相关性很大; ② 在平动分量峰值相同的条件下, 场地越软摇摆分量越大; ③ 扭转分量约为摇摆分量的一半; ④ 转动分量的衰减较慢。

关键词: 场地类型; 摇摆分量; 扭转分量; 衰减关系

中图分类号: TU352.11

文献标志码: A

Statistical Analysis of Rotational Components in Wenchuan Earthquake Near-field Region

ZHAO Shiwei¹, LUO Qifeng²

(1. Research Institute of Structural Engineering and Disaster Reduction, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Institute of Disaster Prevention and Relief, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The seismic records of 25 stations at the sites of Class I, II and III in Wenchuan were selected. Their tilt and torsional components were calculated and statistically analyzed according to the relationship between translation and rotational components. The results show that the correlation between translation and rotational components is robust; if the peaks of translation component are the same, the rocking component is larger in softer site; the torsional component is half of the translational component; the attenuation of rotational component is slow.

Key words: site classification; tile components; torsional components; attenuation relationship

表会发生转动。在实际地震发生后常常会观察到对称的高耸建筑物、低矮的构筑物发生转动的现象^[1-2]。这些表明地震中存在转动分量。随着大跨度复杂的建筑物以及核电站等的出现, 从确保安全的角度出发, 抗震设计一般应该考虑地震转动分量的影响。在缺少转动分量记录的情况下, 地震工作者对如何计算转动分量做了大量的研究工作。Teisseyre 介绍了与非对称应力场、对称应变及反对称旋转相一致的线性连续介质理论, 讨论了构成相关理论的定律及平衡方程, 理论证明旋转波甚至存在于均匀弹性连续介质中^[3]。Knopoff 和 Chen 用应力降速率等震源机制分析转动产生的原因, 结果表明断层中的扭矩不平衡可以产生转动并使场地产生扭转变形^[4]; 这些研究结果对理解产生地震转动的机制及逐步改进设计地震转动的合成方法是有价值的, 但目前还难以直接用于工程场地设计地震转动合成。Niazi 首次分析了在 EI centro 台阵上记录得到的三维加速度时程, 得到了具有一定精度的地面摇摆分量^[5]。王君杰和胡聿贤同样利用 SMART-1 台阵地震记录, 计算得到转动分量^[6]。这方面的研究对检验地震转动合成方法是十分有用的, 但是直接用于工程仍有困难。因为这一合成方法要求在重大工程场地设有密集台阵并有足够的有代表性的记录。除了上述两类获得转动分量的方法外, 学者主要利用地震平动记录生成转动分量并在该方面取得了较为一致的算法。廖振鹏等用弹性波动理论得到了计算地震转动分量的方法^[7-8]。李宏男等还用面波进行了试验验证^[9]。由于震源机制、场地条件及震中距等的影响, 采用地震记录得到的转动分量在精度方面尚具有较大的不足之处, 例如 Takeo 根据 1995 年神户地震观测到的转动分量指出目前计算得到的

弹性波动理论和震源动力学理论证明地震时地

收稿日期: 2013-01-16

基金项目: 国家自然科学基金(51078273)

第一作者: 赵世伟(1978—), 男, 博士生, 主要研究方向为地震转动分量。E-mail: zhaosw11@sina.com

通讯作者: 罗奇峰(1948—), 男, 教授, 工学博士, 博士生导师, 主要研究方向为地震波理论、地震灾害评估和抗震等。

E-mail: luo@tongji.edu.cn

转动分量比观测到的普遍小得较多^[10]. 鉴于目前对于转动分量的研究多集中在如何计算方面, 本文选用汶川地震中的基岩场地 3 个台站记录、Ⅱ类场地 15 个台站记录和Ⅲ类场地上 7 个台站地震记录计算转动分量并对其进行统计分析, 以揭示转动分量在某些方面的特征. 2008 年 5 月 12 日 14 点 28 分, 在我国四川省发生了震级为 $M_s 8.0$ 级的特大地震. 选用汶川地震记录有两方面的原因: 其一是从震后实际灾害情况来看, 与转动有关的现象比较普遍, 因此用其研究地震动转动分量具有一定的代表性; 其二是在统计分析地震动转动分量时消除震源机制等原因对地震动转动分量的影响.

1 地震动转动分量计算方法

根据地震平动记录生成转动分量一般计算如下^[7]:

$$\begin{cases} \ddot{\theta}_1(\omega) = i \frac{\omega}{c} \ddot{u}_3(\omega) \sin \alpha \\ \ddot{\theta}_2(\omega) = i \frac{\omega}{c} \ddot{u}_3(\omega) \cos \alpha \\ \ddot{\theta}_3(\omega) = i \frac{\omega}{2c} [\ddot{u}_2(\omega) \cos \alpha - \ddot{u}_1(\omega) \sin \alpha] \end{cases} \quad (1)$$

式中: ω 为圆频率; $\ddot{u}_1(\omega)$ 、 $\ddot{u}_2(\omega)$ 和 $\ddot{u}_3(\omega)$ 分别为某台站地震记录的东、西分量、南、北分量和竖、向分量的傅里叶变换; $\ddot{\theta}_1(\omega)$ 、 $\ddot{\theta}_2(\omega)$ 和 $\ddot{\theta}_3(\omega)$ 分别为频域中绕东、西方向的摇摆分量、绕南、北方向的摇摆分量和扭、转分量; c 为视波速, 按洪钟、罗奇峰得到的视波速频散关系计算^[11]; α 为平面内地震波入射方向和东、西方向的夹角; 本文按式(2)计算如下:

$$\tan \alpha = \frac{\ddot{u}_{x1}}{\ddot{u}_{x2}} \quad (2)$$

式中: \ddot{u}_{x1} 、 \ddot{u}_{x2} 分别为强震仪的两个水平地震记录.

在计算 α 时, 有学者采用震中和地震台站的方向和东、西方向的夹角. 根据有关的计算理论推导, 实际上该角度在地震过程中是随时间变化的, 并且采用式(2)符合其物理含义, 故本文采用式(2)计算 α 角.

根据式(1)和式(2), 可得到各个台站频域中的转动分量, 对其进行傅里叶逆变换取实部即为对应的转动分量时程.

2 所选地震台站的基本情况

选用的强震观测记录全部来源于中国数字强震

动台网所收集到的汶川地震动记录. 根据研究的需要, 在这些地震记录中, 选择已知具体场地条件的记录(经查阅有关的文献得到)作为本文研究的资料. 表 1~3 为所选不同场地台站记录的基本情况.

表 1 汶川地震中基岩场地上的台站记录的基本情况

Tab.1 The seismic station records at rock site in Wenchuan

台站名称	震中距/km	烈度	加速度/($10^{-2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$)		
			东西方向	南北方向	竖向
茂县地办	44	8	306.57	302.16	266.64
碑县走石山	132	7	120.51	142.20	99.12
文县小金	114	6	47.97	89.13	107.63

表 2 汶川地震中Ⅱ类场地上的台站记录的基本情况

Tab.2 The seismic station records at Class II site in Wenchuan

台站名称	震中距/km	烈度	加速度/($10^{-2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$)		
			东西方向	南北方向	竖向
安县塔水	86	8	289.54	203.45	179.93
大邑银屏	112	7	135.10	127.64	82.69
德阳白马	110	8	126.29	136.32	88.99
江油地震台	125	8	511.33	458.68	198.28
江油含增	116	8	519.49	350.14	444.33
江油重华	155	8	297.19	278.96	180.49
理县木卡	12	8	320.94	283.84	357.81
理县桃平	49	7	221.26	261.76	211.09
茂县叠溪	53	8	246.49	206.21	143.91
茂县南新	30	8	421.28	349.24	352.48
绵竹清平	68	8	824.12	622.91	802.71
平武木座	152	8	273.74	287.37	177.37
邛崃油榨	134	7	173.78	199.85	55.09
什坊八角	66	8	556.17	633.09	581.59
汶川卧龙	70	8	957.70	652.85	948.10

表 3 汶川地震中Ⅲ类场地上的台站记录的基本情况

Tab.3 The seismic station records at Class III site in Wenchuan

台站名称	震中距/km	烈度	加速度/($10^{-2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$)		
			东西方向	南北方向	竖向
武都	105	7	184.87	163.99	108.61
和平	104	6	41.17	44.16	24.78
草滩	109	6	54.71	48.59	13.06
大荔	110	6	31.31	31.59	10.64
华县	109.8	6	30.03	28.83	14.52
蔺店	109.2	6	33.62	36.07	10.59
渭南	109.5	6	35.10	30.59	14.02

3 地震动转动分量统计分析

3.1 转动分量和平动分量的相关性

以江油地震台站记录为例, 说明摇摆分量和地震竖向记录具有很强的相关性. 图 1 为江油地震台

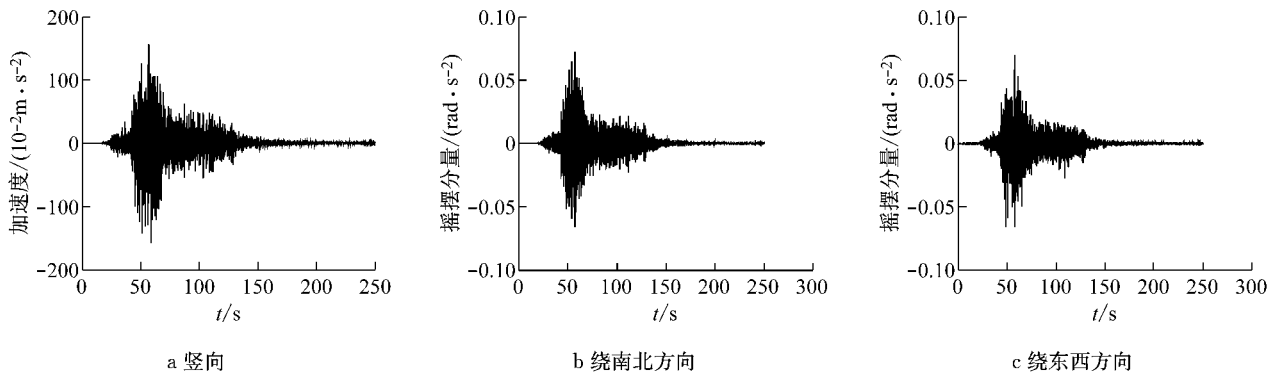


图1 江油地震台的的竖向平动分量(左)和摇摆分量(中、右)

Fig.1 The vertical translational component(left) and tilt rotational components(middle and right) of the Jiangyou Seismic Station

台站的平动分量和摇摆分量.在对所选的25个台站计算的过程中发现该结论对所有的台站都适用.

由式(1)可知,摇摆分量主要和竖向地震记录有关,比较图1的竖向地震记录和两个摇摆分量,可以看出两者在波形上是非常相似的.需要说明的是扭转分量主要和平面内的两个地震记录有关,其时程和平动分量在波形上不一致.

李宏男等^[9]利用面波对转动分量进行试验验证时采用的竖向地震动输入的数量级为 10^1 ,得到的摇摆分量的数量级为 10^{-3} .本文采用江油地震波竖向地震记录的数量级为 10^2 ,得到的摇摆分量的数量级为 10^{-2} .二者得到的摇摆分量在数量级上是一致的.

3.2 场地条件对转动分量的影响

三类场地转动分量和平动分量峰值的均值分别见表4和表5.

表4 三类场地转动分量峰值的统计值

Tab.4 The statistical rotational peaks values of three sites

转动分量	摇摆分量(东西)	摇摆分量(南北)	扭转分量
I类场地	0.049 8	0.052 5	0.028 23
II类场地	0.117 1	0.123 7	0.067 30
III类场地	0.017 7	0.017 6	0.009 70

表5 三类场地平动分量峰值的统计值

Tab.5 The statistical translational peaks values of three sites

平动分量	东西方向	南北方向	竖向
I类场地	158.35	177.82	157.79
II类场地	391.64	336.82	320.32
III类场地	58.68	54.83	28.02

由表4可知,在三个场地上,两个摇摆分量的值比较接近,扭转分量为摇摆分量的一半左右.结合表5可知,III类场地平动峰值最小,其对应的转动分量也最小;II类场地平动峰值最大,相应的转动分量的峰值

最大;I类场地的平动分量和转动分量的峰值都居中;再一次说明了转动分量和平动分量密切的关系.

如上所述,平动分量对转动分量的相关性较强.为了研究场地对转动分量的影响,对平动分量均一化,即采用I类场地、II类场地和III类场地的平动分量峰值和转动分量峰值的比来分析场地对转动分量的影响.又由于扭转分量和平面内的两个平动分量有关,而摇摆分量主要和竖向分量有关,因此采用摇摆分量和竖向平动分量的比值来研究场地对转动分量的影响.绕南北方向的摇摆分量(或东西)与竖向平动分量的比为:1:1.16:2(1:1.16:1.89).由此根据本文选择的地震记录得出:在平动分量峰值相同的条件下,场地越软摇摆分量越大.

3.3 震中距对转动分量的影响

地震动扭转分量峰值随震中距变化认为是某种和扭转有关能量的衰减,称为扭转分量衰减关系.衰减关系在地震危险性分析等方面的研究都有十分重要的作用.根据已有的平动分量研究结论,认为地震动峰值和震中距呈双对数衰减.对所有台站的扭转分量的峰值进行统计分析,得到如下的关系:

$$\ln \theta = -2.634 6 - 0.123 \ln R \quad (3)$$

式中: θ 为转动分量加速度峰值; R 为震中距.两者之间的关系如图2所示.图2的纵坐标是转动分量的对数值.由于转分量的值比较小,纵坐标的变化幅度较小,说明转动分量随震中距的衰减比较小.

3.4 烈度对转动分量的影响

《建筑抗震设计规范》^[12]规定了抗震设防烈度和设计基本加速度值的对应关系见表6.

表中括号中的数字分别为7度强、8度强对应的设计基本地震加速度值.据此,将所选台站按烈度进行统计分析,结果见表7.表中数据的计算方法如下:不同烈度的扭转分量用(1+变异系数)乘以相应烈

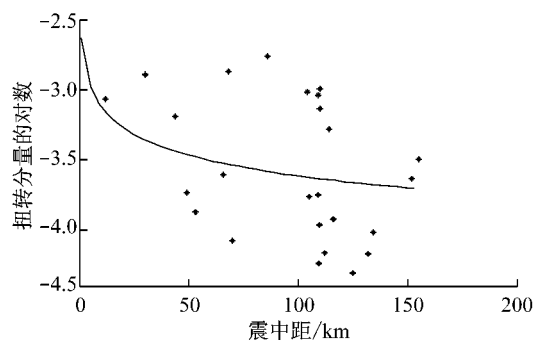


图 2 扭转分量峰值的衰减关系

Fig.2 Attenuation relationship of the torsion peak value

表 6 抗震设防烈度和设计基本加速度值的对应关系

Tab.6 The corresponding relationship of earthquake fortification intensity and design basic acceleration of ground motion

抗震设防烈度	6	7	8	9
设计基本地震 加速度值/ g	0.05	0.10(0.15)	0.20(0.30)	0.40

度的均值;不同烈度的摇摆分量将两个方向的摇摆分量做均值,然后乘以(1+最大的变异系数).由于缺少烈度为 9 度时的地震记录,因此表 7 未给出 9 度时地震转动分量的角加速度值.

表 7 抗震设防烈度和基本角加速度值的对应关系

Tab.7 The corresponding relationship of earthquake fortification intensity and design basic rotation of ground motion

抗震设防烈度		6	7	8
基本地震				
摇摆分量		0.024	0.042	0.205
角加速度值				
扭转分量		0.011	0.028	0.115

4 结论

通过不同场地的 25 个台站的地震记录得到地震转动分量,并对其进行了统计分析,得到以下的结论:

(1) 按照弹性波动理论计算得到的转动分量与平动分量有较强的相关性,竖向平动分量和摇摆分量在时程上波形类似,且在各类场地上表现出随着峰值的增大,转动分量的峰值亦增大.

(2) 在平动分量峰值相同的条件下,场地越软摇摆分量越大.

(3) 衰减关系在研究地震危险性分析等研究方面有着重要的作用,本文得到了转动分量的衰减关系并得出转动分量的衰减相对较慢的结论.

(4) 参照平动分量抗震计算时需要,本文也得到了摇摆分量和扭转分量在不同烈度下的峰值.

参考文献:

- [1] Kinoshita S, Ishikawa H, Satoh T. Tilt motions recorded at two WISE site for the 2003 Tokachi-Oki earthquake (M8.3)[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2009, 99(2B): 1251.
- [2] Yang F, Luo Q F, Che W. Torsional phenomena in the great Wenchuan earthquake[J]. Earthquake Science, 2010(1): 75.
- [3] Teisseyre R. Tutorial on the new developments in the physics of rotational motions[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2009, 99(2B): 1028.
- [4] Knopoff L, Chen Y T. Single-couple component of far-field radiation from dynamical fractures [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2009, 99(2B): 1091.
- [5] Niazi M. Inferred displacements, velocity and rotations of a long rigid foundation located at El centro differential array site during the 1979, Imperial valley California earthquake [J]. Earthquake Engineering and Structure Dynamics, 1986, 14(4): 531.
- [6] 王君杰, 胡聿贤. 地震转动分量预测[J]. 地震工程与工程振动, 1991, 11(2): 1.
WANG Junjie, HU Yuxian. Studying on the seismic rotation component [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1991, 11(2): 1.
- [7] 金星, 廖振鹏. 地震转动分量的工程预测[J]. 地震工程与工程振动, 1991, 13(4): 10.
JIN Xing, LIAO Zhenpeng. Engineering prediction of seismic rotational component [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1991, 13(4): 10.
- [8] Li Hongnan, Suarez L E, Singh M P. Rotational components of earthquake ground motions[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1997, 17(2): 37.
- [9] 李宏男, 孙立晔. 地震面波产生的转动分量研究. 地震工程与工程振动. 2001(21): 15.
LI Hongnan, SUN Liye. Research on the rotation component produced by the seismic surface wave [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2001(21): 15.
- [10] Takeo M. Rotational motions observed during an earthquake swarm in April 1998 offshore Ito, Japan[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2009, 99(2B): 1457.
- [11] 洪钟, 罗奇峰. 地面运动转动分量研究[D]. 上海: 同济大学结构工程与防灾研究所, 2010.
HONG Zhong, LUO Qifeng. Research on rotational components of ground motion [D]. Shanghai: Research Institute of Structural Engineering and Disaster Reduction of Tongji University, 2010.
- [12] 中华人民共和国国家标准. GB50111—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
The National Standard of the People's Republic of China. GB50111—2010 Code for seismic design of building [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2010.