

2009 年姚安 6.0 级地震强震动应急观测的数据 处理及其震害启示^{*}

李世成, 崔建文, 张 潜, 刘琼仙, 周 挚, 张颜琪

(云南省地震局, 云南 昆明 650224)

摘 要: 对 2009 年 7 月 9 日云南姚安 6.0 级地震应急流动观测获取的强余震记录进行了处理和分析, 包括记录的滤波及零漂处理, 5.2 级、4.7 级、4.6 级三次强余震的 PGA、PGV、PGD 及 PSV、PSD 以及对应的谱烈度(S_I)与相对持时(T_d)等的计算及其分析。结果表明: 这些强余震近场记录的滤波处理对高频成份影响较大, 对低频部分影响很小; 加速度峰值主频集中在 3~17 Hz; 速度峰值对应频率大都为 1~8 Hz; 谱烈度值为 1.5~36.6。4.7 级地震水平向峰值加速度为 825.3 gal, 对应的地震烈度为 X 度, 采用 IMM 标准, 对应的地震烈度为 VIII 度; 而其 90%、70% 的相对能量持时和 1/5 峰值分数持时的长度分别为 1.62 s、0.64 s 和 0.92 s; 最大加速度峰值与对应的谱烈度值之比值, 亦仅列众强余震的第 6 位。对此次强震动记录与地震灾害的相关问题进行了讨论。

关键词: 姚安地震; 流动观测; 地震动频谱; 谱烈度; 有效持时; 地震灾害

中图分类号: P315.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2011)04-0082-07

2009 年 7 月 9 日云南省姚安县 6.0 级地震发生后, 地震应急人员在震区迅速布设了由 5 台强震仪组成的强震动流动观测台阵, 及时地捕获了观测期间震区发生的所有 $M \geq 3.0$ 余震。截止 7 月 13 日 12 点, 5 台强震仪共捕获 196 个地震事件的 588 条加速度记录, 其中包括了 5.2、4.7 和 4.6 级三次强余震。记录中地震动峰值加速度大于 200 gal 的有 9 条, 最大地震动峰值为官屯乡台记录的 4.7 级余震的 684 gal(E-W 分向), 该峰值创云南同震级档加速度峰值记录之最。这些记录, 弥补了地震区周边因无固定强震台站而缺乏近震记录的空白, 不仅对分析确定此次地震震害具有定量的佐证作用, 而且为研究近场小震的加

速度高峰值现象, 以及地震动的峰值、持时、频谱等与地震宏观震害之间的关系等提供了基础数据。

1 地震参数及强震动流动观测台站概况

1.1 地震参数

姚安 6.0 级地震发生在滇中构造块体的南部、楚雄-建水右旋走滑地震断层北西段与通海-牟定右旋走滑地震断层北西段所挟持的地壳小隆起构造内^[1]。表 1 列出了 2009 年 7 月 9 日 6.0 级主震及主要强余震参数。

表 1 2009 年姚安 6.0 级地震及主要强余震的基本参数

序号	震级 M	发震时间	震中位置			震源深度/ km
			北 纬	东 经	参考地名	
1	6.0	2009-07-09 T 19: 19; 14.2	25.60°	101.05°	官屯、左门间	10
2	5.2	2009-07-10 T 17: 02; 0.8	25.57°	101.00°	官屯、左门间	14
3	4.6	2009-07-10 T 20: 57; 29.7	25.59°	101.00°	官屯	14
4	4.7	2009-07-13 T 00: 01; 19.3	25.55°	101.06°	官屯	9

1.2 观测仪器及主要技术参数

强震流动观测使用了美国 Kinemetrics 公司生产的 5 台 K2 型便携式强震动仪, 该仪器集记录

器、三分向 ES-T 型加速度计及供电电池于一体。传感器满量程 $\pm 2g$, 记录器频响范围 DC~80 Hz, GPS 授时^[2]。

^{*} 收稿日期: 2011-05-31

基金项目: 中国地震局公益性行业专项“宁洱 6.4 级地震现场综合考察”子项“基于强震动记录的烈度复核”(200808061)

作者简介: 李世成(1960-), 男, 湖北洪湖人, 高级工程师, 主要从事地震地质及强震动观测等工作。E-mail: lishicheng681006@21cn.com

1.3 强震动流动观测台概况

姚安 6.0 级主震微震中位于无民居山区, 宏观震中则在官屯乡官屯村一带。据此, 分别在宏观震中的官屯乡政府所在地、姚安盆地内的姚安县城和光禄镇、洋派水库坝基部位, 以及距微观震中相对较近的左门乡阿基拉村委会处各架设了一台强震动流动观测台^[2](图 1)。

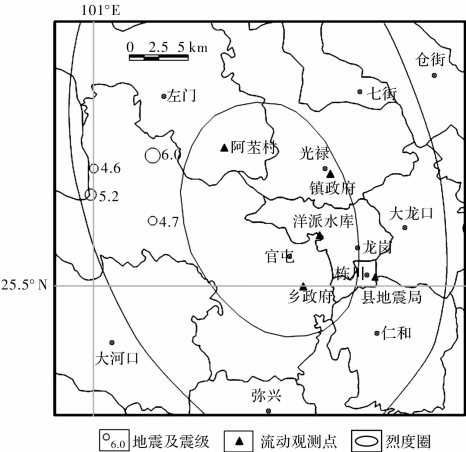


图 1 姚安 6.0 级地震强震动流动台布设和主要余震分布示意图

2 地震记录及数据处理

对获取的强震动记录进行分析处理, 包括对加速度波形数据的滤波、零漂校正, 主要强余震的速度和位移计算, 加速度反应谱、准速度反应谱、准位移反应谱以及谱烈度 (S_I) 与相对持时 (T_d) 等的计算及其分析^[3-10]。

2.1 滤波处理

所使用的数字强震仪的工作频率范围为 DC ~ 80 Hz, 利用带通滤波可分辨出各频段振动幅值的分布。对加速度记录做 0 ~ 30 Hz 低通滤波, 结果表明对加速度峰值有较大影响, 而对速度峰值影响不大(表 2)。其中, 官屯流动台 4.7 级记录滤波前后三分向的加速度幅值损失比分别为: W-E 向 18.6%、N-S 向 19%、U-D 向 46.8%。而根据加速度时程积分得到的速度峰值, 滤波前后损失比几近为 0。这反映出近源地震动记录高频响应的特征。图 2 所示为 4 个典型流动观测台 4.7 级余震记录经处理后的加速度时程。

表 2 姚安地震主要余震记录低通滤波前后信号损失比较

余震	台站	震源距/km	仪器灵敏度/(v/g)	峰值加速度/(cm·s ⁻²)						峰值速度/(cm/s)					
				滤波前			滤波后			滤波前			滤波后		
				W-E	N-S	U-D	W-E	N-S	U-D	W-E	N-S	U-D	W-E	N-S	U-D
5.2	县地震局	29.8	1.25	88.1	70.1	30.3	88.0	70.1	28.6	3.66	3.35	3.3	3.7	3.4	3.3
	官屯乡	20.2	1.25	221.2	113.5	105.8	208.9	104.3	94.5	4.46	2.93	2.4	4.5	2.9	2.4
	洋派	22.4	1.25	23.5	30.9	15.9	23.4	31.4	15.8	1.84	1.59	1.1	1.8	1.6	1.1
	阿基拉村	12.5	1.25	265.5	155.3	144.5	218.4	112.9	143.6	6.28	4.03	2.4	6.3	4.0	2.4
	光禄镇	23.7	1.25	39.1	50.5	28.6	38.9	49.1	27.0	3.19	5.45	1.8	3.2	5.5	1.8
4.7	地震局	26.4	1.25	97.6	91.2	64.3	97.9	90.2	61.6	3.61	2.55	1.6	3.6	2.6	1.6
	官屯乡	18.1	1.25	684.1	617.4	660.1	557.1	499.9	351.6	15.42	9.45	4.9	15.4	9.5	4.9
	洋派	19.7	1.25	59.0	100.6	25.6	58.9	91.7	24.9	2.41	2.66	0.9	2.4	2.7	0.9
	阿基拉村	16.1	1.25	263.0	358.0	76.8	212.8	273.0	70.8	4.78	5.90	1.4	4.8	5.9	1.4
	光禄镇	17.8	1.25	75.5	80.4	46.6	72.8	79.6	43.3	3.5	5.8	2.6	3.5	5.8	2.6

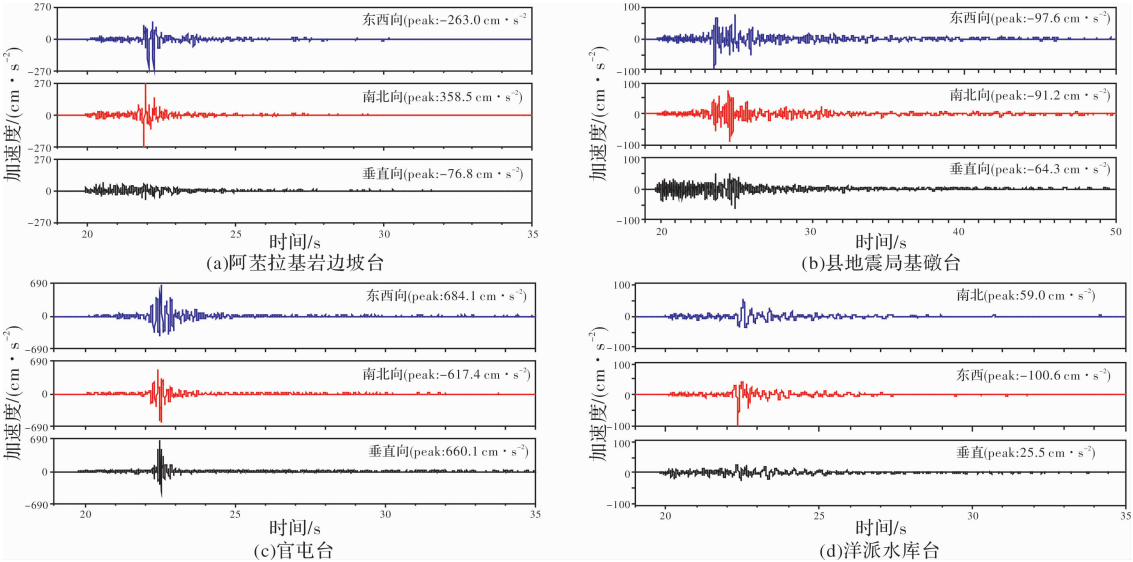


图 2 4.7 级地震加速度时程

2.2 相关谱计算

4.7 级余震在官屯台记录的三分向加速度峰值分别为 684 gal、617 gal、660 gal，创云南 4 级档地震的加速度记录之最，在全国也罕见。这里根据 5

个台站校正后的加速度记录，计算了相应谱，包括加速度反应谱、速度反应谱、位移反应谱及准速度反应谱(PSV)、功率谱密度(PSD)等(表 3、图 3)。

表 3 4.7 级地震各台站记录的 PGA、PGV、PGD 及部分谱计算结果(阻尼 0.05)

测点	分向	峰值/对应频率				
		$A/(cm \cdot s^{-2})$ f/Hz	$V/(cm \cdot s^{-1})$ f/Hz	D/cm f/Hz	$PSV/(cm \cdot s^{-1})$ f/Hz	$PSD/(cm^2 \cdot s^{-3})$ f/Hz
县地震局	CH1	97.6	3.61	0.3	9.9	24.1
		5.3	3.3	2.0	3.4	3.4
	CH2	91.2	2.55	0.16	10.3	15.3
		6.3	6.2	0.9	6.0	6.0
	CH3	64.3	1.63	0.16	5.8	11.3
		7.2	5.2	0.7	5.2	5.2
官屯	CH1	684.1	15.4	6.17	67.9	701.6
		6.3	6.2	0.1	6.2	6.3
	CH2	617.4	9.45	3.92	42.9	326.9
		6.9	6.6	0.1	6.8	6.9
	CH3	660.1	4.92	0.22	19.5	32.9
		12.9	6.2	6.2	6.2	11.9
洋派	CH1	59.0	2.4	0.14	6.9	6.7
		3.8	3.6	3.6	3.7	3.8
	CH2	100.6	2.7	0.19	6.3	5.5
		5.2	3.6	2.8	3.8	2.9
	CH3	25.6	0.9	0.08	3.4	1.3
		5.7	3.3	3.3	3.4	2.7
阿基拉	CH1	263	4.78	0.23	13.8	22.1
		10.7	5.4	2.4	5.7	6.6
	CH2	358.5	5.9	0.38	14.9	28.5
		8.2	8.1	3.6	8.1	8.1
	CH3	76.8	1.36	0.1	5.1	6.6
		9.8	7.8	1.7	9.8	10.0
光禄镇	CH1	75.5	3.46	0.39	19.4	53.6
		2.8	2.8	2.6	2.8	2.8
	CH2	80.4	5.57	0.54	17.7	36.6
		3.1	1.2	1.1	1.3	1.1
	CH3	46.6	2.58	0.16	9.28	14.9
		2.9	2.9	2.8	2.9	3.0

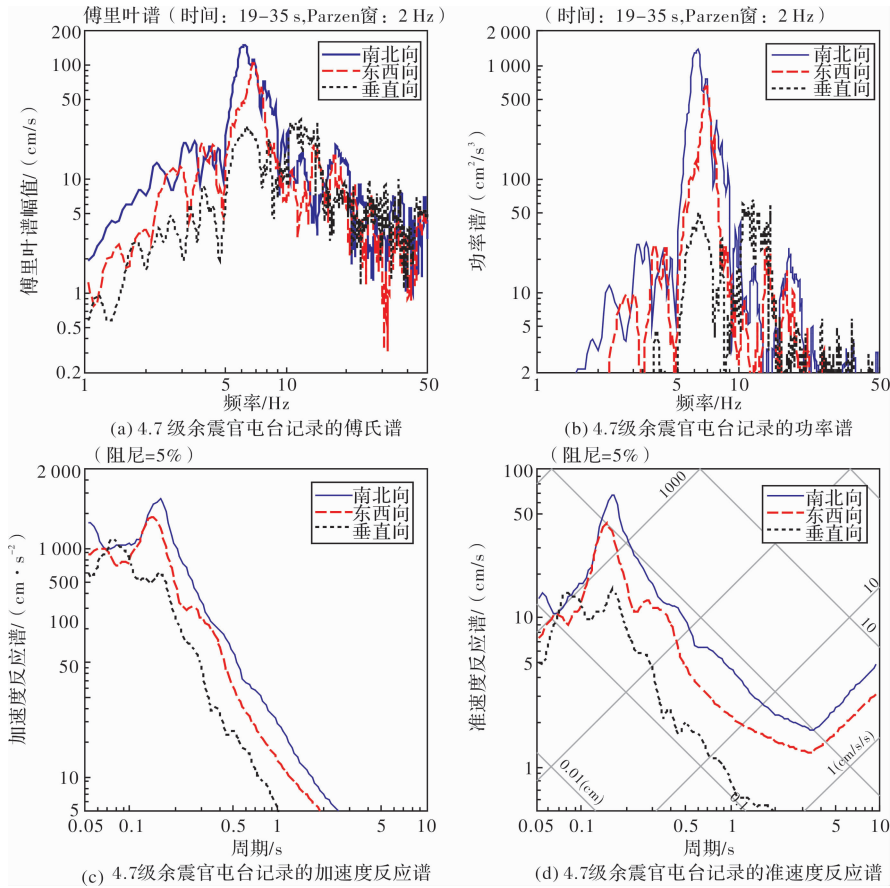


图 3 4.7 级地震官屯台强震记录谱分析

从表 3 和图 3 中看出, 4.7 级地震加速度最大峰值(E-W 分向)对应频率为 6.3 Hz, 而其垂直分向峰值的对应频率为 12.9 Hz, 即垂直分向的主频大于水平分向的主频。但随着震源距的加大(表 2), 主频这种垂直与水平分向分布的大小会发生变化, 这不排除场地因素的可能影响。其余各分向加速度峰值主频集中在 3 ~ 17 Hz; 峰值速度对应频率大都为 1 ~ 8 Hz; 峰值位移对应频率为 0.1 ~ 6.2 Hz, 显示了地震动频率由加速度、速度到位移逐渐由高变低的特征。

2.3 相关烈度计算

中国地震烈度表^[11](GB/T17742-2008), 也给出了自由场地上水平向地震动峰值加速度值、峰值速度值与宏观烈度之间对应范围的参考值。三次余震在各观测点对应的宏观烈度值列于表 5 中(对于三分向记录, 水平向地震动峰值为水平 2 分量的矢量合成值)。根据 Wald 等^[12-13]统计回归得到的 PGA、PGV 与修正默卡尼烈度(MMI)关系式, 这里也计算了此三次强余震的默卡尼烈度值(表 4)。JMAI^[14]地震烈度值是由数字强震仪记录经 ViewWave 处理软件直接给出。由于日本采用的是从零度到Ⅶ度的 8 个烈度等级, 这里仅作为参考在表中列出。

表 4 表明, 由地震动加速度、速度对应换算得到的宏观烈度值, 均高于由 Wald 回归关系式计算得到的修正默卡尼烈度值, 值差一般为 1 ~ 2。4.7

级余震在 5 个观测点的加速度峰值对应的烈度高达Ⅵ、Ⅶ、Ⅸ度, 个别点甚至达Ⅹ度。5.2 级余震的加速度峰值对应的烈度也达Ⅴ、Ⅵ、Ⅶ、Ⅷ度。显然, 与实际震害相差很大, 这主要是没考虑有效地震动的持时以及作用于结构上的地震动谱特征而造成的。

豪斯纳^[15]定义谱烈度(Spectrum Intensity)为

$$SI_{\zeta} = \int_{0.1}^{2.5} S_v(T, \zeta) dT \quad (1)$$

式中: S_v 为阻尼为 ζ 时的单质点体系的相对速度反应谱; T 为周期; ζ 常取为 0 或 0.2, 相应的谱烈度为 SI_0 或 $SI_{0.2}$; 积分上、下限分别为 0.1 s、2.5 s, 基本覆盖了结构的自振频率范围。谱烈度并不涉及任何宏观现象, 是一个客观反映地震动反应谱和结构破坏程度之间关系的物理量。

利用 ViewWave 软件, 将校正后的加速度记录, 转换成在 $\zeta = 0, 0.2$ 时的 CSV 格式记录的速度反应谱, 然后由式(1)计算出其谱烈度。用 SI_x 、 SI_y 、 SI_z 分别表示由东西分向、南北分向和垂直分向记录计算得到的谱烈度值; 则 $SI_{\max 2}$ 、 $SI_{\max 3}$ 分别表示两水平分向中的谱烈度值的大者、水平分向与垂直分向三个谱烈度值中最大者。表 6 列出了根据强震动记录计算得到的不同阻尼比下的谱烈度结果(计算中速度单位为 cm/s), 以及各观测台同一地震的最大加速度峰值(a_{\max})与最大谱烈度值($SI_{\max 3}$)之比。

表 4 主要余震的加速度有效持时、最大峰值及几种烈度值

观测点	震级 M	震源距/ km	几种相对有效持时/s			a_{\max}	谱烈度/ $\zeta = 0.2$	MMI	中国地震 烈度表	JMAI	主震烈度
			90%	70%	1/5						
阿基拉	4.6	17.2	3.29	2.05	3.49	103.5	5.7	V	V	3.4	
	4.7	12.5	2.89	0.59	0.74	358	17.4	Ⅶ	Ⅸ	4.0	Ⅶ
	5.2	12.5	2.81	1.91	2.69	265.5	14.5	Ⅶ	Ⅷ	4.1	
县地震局	4.6	28.8	7.62	3.07	7.71	53.7	5.5	∠ V	Ⅵ	3.1	
	4.7	26.4	11.79	4.33	10.57	97.6	12.3	V	Ⅶ	3.7	Ⅶ
	5.2	29.8	16.76	6.69	11.79	88.1	10.3	V	Ⅶ	3.8	
官屯	4.6	20.1	2.0	0.75	1.97	213.4	10.0	Ⅵ	Ⅷ	4.0	
	4.7	18.1	1.625	0.64	0.925	684.1	36.6	Ⅷ	X	5.1	Ⅷ
	5.2	20.2	3.855	1.48	3.18	221.2	11.5	Ⅵ	Ⅷ	3.9	
光禄镇	4.6	22.0	18.1	9.59	17.92	22.1	2.3	∠ V	∠ V	2.6	
	4.7	17.8	10.1	3.72	10.5	80.4	16.0	V	Ⅵ	4.1	Ⅶ
	5.2	23.7	17.74	12.4	21.22	50.5	15.9	∠ V	Ⅵ	3.9	
洋派水库	4.6	22.8	8.51	1.91	7.68	23.1	7.7	∠ V	V	2.0	
	4.7	19.7	5.275	1.7	4.28	100.6	5.0	V	Ⅶ	3.2	Ⅶ
	5.2	22.4	8.44	3.29	9.755	30.9	1.5	∠ V	V	3.1	

表 6 各流动观测点强余震的谱烈度值及最大加速度峰值 (a_{\max}) 与最大谱烈度值 ($SI_{\max 3}$) 之比

观测点	震级 M	谱烈度										$a_{\max 3} /$
		阻尼比 0%					阻尼比 20%					$SI_{\max 3}$
		SI_x	SI_y	SI_z	$SI_{\max 2}$	$SI_{\max 3}$	SI_x	SI_y	SI_z	$SI_{\max 2}$	$SI_{\max 3}$	Dam = 0. 2
阿苯拉	4. 6	7. 7	6. 9	3. 6	7. 7	7. 7	5. 7	5. 1	2. 3	5. 7	5. 7	10. 8
	4. 7	17. 6	20. 3	6. 5	20. 3	20. 3	13. 2	17. 4	4	17. 4	17. 4	20. 1
	5. 2	22. 7	16. 7	11. 5	22. 7	22. 7	14. 5	9. 6	6. 2	14. 5	14. 5	18. 2
县地震局	4. 6	8. 9	8. 5	7	8. 9	8. 9	5. 5	3	2. 7	5. 5	5. 5	9. 8
	4. 7	17. 3	15. 3	11	17. 3	17. 3	10. 3	7. 1	4. 3	10. 3	10. 3	8. 5
	5. 2	34. 3	37. 5	28. 4	37. 5	37. 5	12. 3	9. 8	10	12. 3	12. 3	7. 9
官屯	4. 6	12. 5	11. 2	4. 8	12. 5	12. 5	10	9	4. 1	10	10	21. 3
	4. 7	44. 7	27. 9	14. 3	44. 7	44. 7	36. 6	23. 5	12. 7	36. 6	36. 6	18. 7
	5. 2	16. 3	12. 4	9	16. 3	16. 3	11. 5	7. 9	6. 5	11. 5	11. 5	19. 2
光禄镇	4. 6	5. 6	5. 3	2. 9	5. 6	5. 6	2. 3	2. 1	1. 6	2. 3	2. 3	9. 6
	4. 7	20. 2	31. 3	11. 3	31. 3	31. 3	10. 4	15. 9	7. 1	15. 9	15. 9	5. 0
	5. 2	22. 4	38. 3	9. 9	38. 3	38. 3	9. 2	16	5. 4	16	16	3. 2
洋派	4. 6	2. 1	2. 1	1. 5	2. 1	2. 1	1. 3	1. 5	1. 5	1. 5	1. 5	3. 0
	4. 7	8. 4	9. 7	4. 3	9. 7	9. 7	6. 6	7. 7	2. 8	7. 7	7. 7	20. 1
	5. 2	9. 8	9. 7	6. 2	9. 8	9. 8	4. 8	5	2. 8	5	5	20. 6

计算结果表明,当阻尼为 0.2 时,4.6、4.7 和 5.2 三次余震的谱烈度值范围为 1.5 ~ 36.6。它们在各观测点的最大加速度峰值与其对应的最大谱烈度值的比值则为 3.0 ~ 21.3,而官屯测点最大峰值加速度(684 gal)的比值为 18.7,仅列第 6。这表明,谱烈度(的计算)不仅考虑了地震动的最大峰值、也突出了振动幅值及其对应的周期,也就是强调了地震动与结构自振频率相近部分的成份。这点,在实际的结构地震破坏中尤显突出^[16]。

2.4 地震动持时计算

地震动有效持时的长短是控制地面及地表建筑物遭遇地震破坏轻重的五大因素之一(地震动强度、谱成份、有效持时、场地条件及结构特性)。根据采用加速度的绝对值或是相对值来作持时,将地震动持时 T_d 划分为 a_0 持时(分数持时)和相对持时(地震动相对能量持时)^[17]。

对于 a_0 持时,设 $a_0 = k_{\max}$, 则有:

$$T_d = T_2 - T_1, \tag{2}$$

式中: T_1 与 T_2 分别为在 $T - a_{(t)}$ 平面坐标系中水平线 $a = \pm a_0$ 首次和末次与加速度时程 $a_{(t)}$ 的相交点。当 k 取 1/2、1/3 或 1/5 时,得到的 T_d 分别称为 1/2 持时、1/3 持时或 1/5 持时。

相对持时采用 Husid^[18] 的用地震动能量相对比值的表达方式来表示:

$$I(t) = \frac{\int_0^t a^2(t) dt}{\int_0^T a^2(t) dt}, \tag{3}$$

式中: $\int_0^t a^2(t) dt$ 表示地震动能量随时间的增长; T

为地震动总持时; $I(t)$ 是一个 0 ~ 1 的函数。现最常用的相对持时也是用式(2)来定义 T_d ^[14], 其中 T_1 与 T_2 由下式确定:

$$I(T_1) = 0.05 \text{ 或 } 0.15, \tag{4}$$

$$I(T_2) = 0.95 \text{ 或 } 0.85. \tag{5}$$

把式(4)、(5)中的 0.05(0.95)和 0.15(0.85)分别称为 90% 和 70% 持时。

将各流动观测台 3 次强余震的 90%、70% 和 1/5 持时进行了计算,计算结果见表 5。

计算结果表明: 4.7 级地震在官屯记录点的三种持时长度分别只有 1.62 s、0.64 s 和 0.92 s。尽管该处 4.7 级地震三分向的加速度峰值均大于 600 gal,且水平向合成达 825 gal(按《中国地震烈度表》对应的地震烈度为 X),但短持时是高加速度峰值的地震作用未使该处及周围震害加大加重的主要原因(记录仪安放的一层大跨度钢混会议大楼未出现诸如结构坏损或墙体开裂等地震破坏)。同时,计算结果也显示,不论是 90%、70% 持时,还是 1/5 持时,均与震源距呈正相关,震源距变大,相对持时就增长。

3 结论、启示及相关问题讨论

本文初步处理分析的结果、启示及对相关问题的讨论如下。

(1)4.7 级地震加速度反应谱幅值最大值对应的频率为 6.3 Hz; 其余各分向加速度峰值主频集中在 3 ~ 17 Hz; 峰值速度对应频率大都在 1 ~ 8 Hz; 峰值位移对应频率在 0.1 ~ 6.2 Hz,显示了地面地震动频率由加速度、速度到位移逐渐由高变低的特征。滤波对此次强余震记录的加速度峰值

有较大影响, 而对速度峰值影响不大。这也表明近源地震动记录高频响应的特征。

(2) 阻尼取 0.2 时, M4.6、M4.7 和 M5.2 三次余震各测点的谱烈度值为 1.5~36.6。而各观测点的最大加速度峰值与其对应的最大谱烈度值的比值则为 3~21.3; 且官屯测点(684 gal)的比值为 18.7, 仅列第 6。这表明, 谱烈度不仅考虑了地震动的最大峰值, 也突出了振动幅值及其对应的周期, 亦即强调了地震动与结构自振频率相近部分的成份。谱烈度亦是建立强震动峰值参数与地震宏观烈度之间对应关系的有效标度。

(3) 此次姚安 6.0 地震的应急流动观测获取的 4.7 级余震加速度峰值, 在官屯乡政府测点记录的三分向加速度峰值分别为 684 gal、617 gal、660 gal。按国标^[11]标准, 该地震 5 个观测点的加速度峰值所对应的烈度高达 VI、VII、IX 度, 个别点甚至达 X 度。5.2 级余震的加速度峰值对应的烈度也达 V、VI、VII、VIII 度。这与实际震害结果相差很大。尽管该处 4.7 级地震三分向的加速度峰值均大于 600 gal, 且水平向合成达 825 gal, 但其最大峰值的 90%、70% 和 1/5 等三种持时的长度分别只有 1.62 s、0.64 s 和 0.92 s。地震地面运动的有效持时短, 是异常高加速度峰值之地震力作用未能使该处及周围震害加大加重的主要原因。这启示我们, 作用于结构上地震动有效持时长短及地震动频谱特征, 在分析小地震高加速度峰值处的地表震害时, 是必须考虑的地震动力参数。

(4) 根据现行的国家标准^[11], 将地震动加速度、速度换算得到的宏观烈度值, 均高于由 Wald 回归关系式计算得到的修正默卡尼烈度值。一些研究者提出, 用地面加速度峰值与速度峰值相结合的方法等来确定地震烈度^[17~20], 可使计算的地震烈度值减小, 使之更接近于宏观地震烈度值。“十五”期间, 我国大陆新建了近 1 200 个数字强震动台, 已获取了一定数量的强震动记录。基于这些记录, 重新建立强震动记录参数与地震烈度之间的关系, 势在必行。

(5) 强震动记录与地震震害快速判定

强震动记录反映的是记录点在地震力作用下的运动情况。数字强震仪的发展, 大大提高了强地震动测量的精度和分辨率。虽然数字强震仪仍存在惯性传感器带来的仪器测量误差, 但经过仪器响应失真的校正处理, 其结果具有很高的精确度^[8]。构筑物地震震害的影响因素复杂且多, 包括所遭遇的地震动加速度的强度、频谱及其有效持时; 场地因素及地基条件; 结构类型、工程材料及施工质量等等^[1,17,21~22]。地表强震动记录真实

地反映了地震弹性波在传播空间的强度分布。虽然强震动记录与记录点处建构筑物震害轻重之间并非简单的线性相关, 但是, 采用适当的方法建立起强震动参数与地面某种典型建筑物破坏程度之间的关系, 并广泛用于震灾快评、烈度速报等应急工作, 是十分必要的^[23~25]。在此次姚安 6.0 级地震灾害评估的现场工作中, 5.2、4.7、4.6 及的强余震记录的快速处理结果, 为地震震害快速评估提供了不可多得的定量证据。

(6) 中小地震的高加速度峰值、低震害现象与相关规范

现行的诸多有关建筑物、构筑物、专项工程等等的抗震设计规范的国家标准^[11,26~28], 把场地地震动的峰值参数(a_m)及其反应谱(S_a), 有时给出几种阻尼下几个分向的加速度反应谱作为建构筑物的抗震设防依据。相对于中小地震而言, 大震包含了更宽域的谱成份, 使现行的有关抗震设防国家标准中强调中、大地震的设防理念更显合理, 但是中小地震亦常出现高加速度峰值。特别是近几年记录到诸多的 4 级档地震的地面水平向加速度峰值在 200 gal 以上, 按《中国地震烈度表》(GB/T17742-2008)标准换算的结果, 达地震烈度 VIII 度、IX 度甚至 X 度, 而观测点处的建筑物并没出现高烈度的震害, 实际宏观烈度大都只有 VI 度左右。这势必出现高地震动峰值低地震烈度的相悖现象。对这种相悖现象应进行相关研究, 相应的技术处理应在相关规范中予以体现。一个显著的特点是这类地震近场记录的有效持时短。实际上, 许多重大工程选址于只有中小地震背景的区域, 随着观测台站覆盖面的加大, 这种中小地震的高加速度峰值低地震烈度的现象定会更趋明显。把有效地震动持时列入现行的抗震设计规范中, 以适度权重予以体现, 使抗震设防更趋合理, 势在必行。

致谢: 感谢中国地震局强震动首席专家李小军博士、中国地震局强震中心主任温瑞智博士亲临姚安地震现场, 在百忙中对此次强震流动观测工作的指导。

参考文献:

- [1] 毛玉平, 万登堡. 2000 年云南姚安 6.5 级地震 [M]. 昆明: 云南科技出版社, 2001: 189-241.
- [2] 李世成, 崔建文, 张潜, 等. 姚安 6.0 级强震动流动观测 [J]. 地震研究, 2011, 35(3): 322-330.
- [3] 李小军, 周正华, 于海英, 等. 汶川 8.0 级地震强震动观测及记录初步分析 [C]//汶川地震建筑震害调查与灾后重建分析报告. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [4] 谢礼立, 于双久. 强震观测与分析原理 [M]. 北京: 地震出

- 版社, 1982.
- [5] Boore D M, Stephens C D, Joyner W B. Comments on baseline correction of digital strong motion data: Examples from the 1999 Hector Mine, California, earthquake [J]. BSSA, 2002, 92 (4): 1543–1560.
 - [6] Boore D M, Bommer J J. Processing of strong-motion accelerogram: needs, options and consequences[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2005, 25(2): 93–115.
 - [7] 温瑞智, 周正华, 李小军, 等. 汶川 M8.0 地震的强余震流动观测[J]. 地震学报, 2009, 31(4): 220–224.
 - [8] 张晓志, 谢礼立. 强震记录仪响应失真校正的权函数方法——时域离散序列数值分析方法与应用研究之二[J]. 世界地震工程, 2001(1): 1–8.
 - [9] 崔建文, 李世成, 高东, 等. 云南分区地震动衰减关系[J]. 地震研究, 2006, 29(4): 386–391.
 - [10] 李世成, 张潜, 崔建文, 等. 2008 年攀枝花 M6.1 地震余震的强震动观测[J]. 地震研究, 2009, 32(S0): 449–455.
 - [11] GB/T17742–2008 中国地震烈度表 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
 - [12] Wald D J, Quitoriano V, Heaton T H, et al. Relationships between peak ground acceleration, peak ground velocity, and modified Mercalli intensity in California [J]. Earthquake Spectra, 1999, 15: 537–556.
 - [13] Trifunac M D, Bradey A G. On the correlation of peak acceleration of strong motion with earthquake magnitude epicentral distance and site condition Proc[C]//US Nat Conf Earthquake Engineering, 1975: 43–52.
 - [14] Japan Meteorological Agency Seismic Intensity Scale[EB/OL]. [2010–09–28]. <http://en.wikipedia.org/wiki/JMASIS>.
 - [15] Housner G W. Characteristics of strong motion of earthquakes [J]. BSSA, 1947, 37(1): 19–31.
 - [16] 张潜, 李世成, 崔建文, 等. 盈江 5.9 级地震强震动谱烈度研究[J]. 地震研究, 2009, 33(S0): 460–463.
 - [17] 胡丰贤. 地震工程学[M]. 北京: 地震出版社, 2006: 44–201.
 - [18] 金星, 张红才, 韦永祥. 基于地震台网资料快速发布的震动烈度标准及其应用研究[J]. 国际地震动态, 2008 (10): 20–27.
 - [19] Boatwright J, Bundock H, Luetgert J, et al. The dependence of PGA and PGV on distance and magnitude inferred from Northern California shakemap data [J]. BSSA, 2003, 93 (5): 2043–2055.
 - [20] 徐杨, 罗词建, 李小军, 等. 汶川 8.0 级地震陕西省数字强震动记录分析[J]. 震灾防御技术, 2009, 4(4): 363–272.
 - [21] 李小军. 对近年大震震害现象与工程地震问题研究的思考[J]. 国际地震动态, 2001(8): 26–31.
 - [22] 李世成, 崔建文, 韩新民. 云南地区地震烈度衰减特征研究[J]. 中国地震, 2003, 19(3): 287–294.
 - [23] 李山有, 金星, 陈先, 等. 地震动强度与地震烈度速报研究[J]. 地震工程与工程振动, 2002, 22(6): 2–8.
 - [24] 李山有, 金星, 马强, 等. 地震预警系统与智能应急控制系统研究[J]. 世界地震工程, 2004, 20 (4): 21–26.
 - [25] 赵纪东, 张志强. 地震预警系统的发展、应用及启示[J]. 地质通报, 2009, 28(4): 456–462.
 - [26] 中国国家标准化管理委员会. GB/T18306–2001 中国地震动参数区划图[S]. 北京: 中国标准出版社, 2001.
 - [27] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T17741–2005 工程场地地震安全性评价[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
 - [28] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB50011–2001 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑出版社, 2008.

Processing of Emergency Strong Motion Observation Data of the Yaoan M6.0 Earthquake in 2009 and Revelation from Earthquake Disasters

Li Shicheng, Cui Jianwen, Zhang Qian, Liu Qiongxin, Zhou Zhi and Zhang Yanqi
(Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650224, China)

Abstract: The data gained by emergency mobile strong-motion observation of the aftershock of Yao'an M6.0 earthquake on July 9, 2009 are processed and analyzed, including filtering, baseline correction of their acceleration trace, calculation of the PGA, PGV, PGD, PSV, PSD, spectrum intensity (SI) and Td of M5.2, M4.7 and M4.6 aftershocks. The results indicate that filter processing of the near field records of aftershocks evidently affects the high frequency component, but its effect on the low frequency component is little; The main frequency of acceleration concentrates in 3 ~ 18 Hz; The main frequency of speed is between 1 ~ 8 Hz; Spectrum intensity values are between 1.5 ~ 36.6. The horizontal acceleration peak value of M4.7 aftershock is 825.3 gal and the corresponding seismic intensity is X; but its IMM is intensity VIII. The 90% and 70% of relative duration of ground motion and 1/5 of peak value dispersion duration respectively are 1.62 s, 0.64 s and 0.92 s; The ratio of the maximum acceleration peak value to the corresponding spectrum intensity value is only arranged 6th in the strong aftershocks. The records of strong motion and earthquake damage are discussed.

Key words: Yao'an earthquake; mobile observation; ground motion spectrum; spectrum intensity; relative duration, earthquake damage