

文章编号: 0253-3782(2006)04-0417-12

台湾集集大地震及其余震的长周期地震动特性^{*}

李春锋¹⁾[♦] 张 眇¹⁾ 赵金宝²⁾ 唐 晖³⁾

1) 中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所

2) 中国北京 100098 中航勘察设计研究院

3) 中国哈尔滨 150080 中国地震局工程力学研究所

摘要 用丰富的高质量数字强震记录对台湾集集大地震及余震的长周期地震动特性进行了研究。本文主要研究了长周期地震动的强度随震级、距离及场地条件的变化情况;同时对近断层的长周期地震动特性进行了分析。结果表明,集集大地震及余震的长周期地震动反应谱的形状主要受场地条件和震级控制(D+E类场地的反应谱要比B+C类的宽,震级大的反应谱要比震级小的宽),而受距离影响并不显著;近断层长周期地震动明显受断层活动特性影响:上盘的长周期地震动比下盘的强,北部的比南部的强。

关键词 集集地震 长周期地震动 反应谱 车笼埔断层

中图分类号: P315.9 **文献标识码:** A

引言

长周期地震动衰减关系研究是经济发展的需要。1964年6月16日本新潟7.5级地震,1977年3月24日罗马尼亚7.3级地震,1970年3月29日土耳其戈迪兹7.1级地震,1983年5月26日本海中部7.7级地震,1985年9月19日墨西哥8.1级地震,1994年9月16日台湾海峡7.3级地震,1996年11月9日南黄海6.1级地震等,都存在不同程度的长周期震感和震害。随着经济进一步发展,会有更多长周期建筑出现。长周期建筑无疑会经受未来可能的长周期地震动的考验。另外,一些大城市往往建在沉积盆地中,松散沉积层会进一步放大地震波的长周期成分,从而加大长周期震害。

对于长周期建筑来说,规范中反应谱的长周期范围已不能完全适应设计的要求(Hu, Yu, 2000),而且规范谱中的长周期部分(一般指大于3~4 s的部分)可能与实际并不相符。

有关研究人员已为长周期地震动研究做出了非常有价值的工作。但由于资料匮乏及资料可靠程度和处理方法的局限,研究工作仍需不断完善。目前,大多数反应谱的周期还不够长,反应谱所反映的谱形与距离、震级和场地条件的关系还很有限。从反应谱的周期长

* 国家自然科学基金项目(50278090)资助。中国地震局地球物理研究所论著 06AC2011。

2005-09-28 收到初稿, 2006-05-31 决定采用修改稿。

♦ 通讯作者。E-mail: dqslcf@yahoo.com.cn

度来看, 模拟式加速度强震记录只能给出周期为 0~3 s 左右的可靠反应谱; 日本气象厅低放大倍数位移式强震仪记录的研究只能给出周期为 10 s 以内的可靠反应谱; 谢礼立等 (1990) 的研究主要分析、比较的反应谱周期为 1~10 s; Faccioli 等 (2004)、周雍年等 (2004) 分别给出了周期长度为 10 s 的反应谱; Hu 和 Yu (2000) 给出了周期长度为 20 s 的反应谱。从场地类型来看, 模拟式记录以及 Hu 和 Yu (2000) 的研究给出的是基岩谱; 谢礼立等 (1990)、周雍年等 (2004) 的研究给出了三种场地条件 (基岩场地、一般场地和软土场地); Faccioli 等 (2004) 的研究给出了 A+B 和 C+D 两种场地条件 (A, B, C, D 为 USGS 分类)。从震级分配来看, 各级震级档分类的差别也较大。

从目前情况来看, 未来工作应在确切弄清谱形和距离、震级及场地条件的关系上下功夫, 用可靠资料尽可能延长反应谱的周期长度 (20 s 以上)。

充足和可靠的资料是获得理想反应谱的基础。高精度的宽频带数字地震记录给长周期地震动的研究带来了曙光。数字地震仪的频率特性、动态范围和记录精度都有了很大改善。由于数字记录不需要进行人工数字化, 从而降低了长周期误差。因此, 数字记录较有利于长周期地震动研究。

台湾运行着世界上最密集的数字化强震台网 (在主要城区, 每隔 3 km 便有一个地震台), 已布设强震仪 1 500 多台。当地时间 1999 年 9 月 21 日台湾 M_w 7.6 集集地震及余震记录无疑给长周期地震动的研究工作注入了活力。这一密集台网在集集大地震及余震中, 获得了 1 万多条记录。所获得的近场强震记录之多更是前所未有。集集地震之前, 全球震级大于 7 级、断层距小于 20 km 的强震记录只有 8 组; 而集集主震中断层距小于 20 km 的强震记录达 54 组 (每组 3 个分量)。

本文力图利用丰富的高质量集集大地震及余震资料对长周期地震动衰减关系进行研究, 争取精确地揭示长周期地震动衰减关系, 为抗震设防及震害预测提供依据。

表 1 本文用的地震目录

发震时间		$\varphi_N/(\circ)$	$\lambda_E/(\circ)$	深度/km	M_L
年-月-日	时:分:秒				
1999-09-20	17:47:12.60	23.86	128.84	7.0	7.6 (M_w)
1999-09-20	17:57:15.31	23.9255	121.0257	11.04	6.44
1999-09-20	18:03:41.16	23.8123	120.8590	8.19	6.60
1999-09-20	18:21:28.60	23.9564	121.0630	9.68	5.22
1999-09-20	18:32:55.07	23.8290	120.9912	16.83	5.07
1999-09-20	19:40:32.57	23.5509	120.8759	7.40	5.28
1999-09-20	19:57:52.63	24.0278	120.8134	11.98	5.19
1999-09-20	20:02:15.90	23.9823	120.7406	12.08	5.35
1999-09-20	20:21:59.67	24.1077	120.9757	11.12	5.22
1999-09-20	21:27:56.71	24.0851	121.0346	11.90	5.0
1999-09-20	21:46:37.49	23.6121	120.8110	1.05	6.59
1999-09-20	21:54:47.08	23.6230	120.7741	4.31	5.33
1999-09-20	22:22:46.00	23.5510	120.8342	5.02	5.15
1999-09-20	23:18:13.21	23.4490	120.9052	9.57	5.10
1999-09-22	00:14:40.77	23.8260	121.0470	15.59	6.80
1999-09-25	23:52:49.63	23.8540	121.0020	12.06	6.80

1 资料选取

本文用的资料来源于台湾地区 TWCWB 提供的 3 张光盘: the CD (April 3, 2001)(主震), CWB Strong Motion Data Series CD-002 (August 28, 2001)(主余震), CWB Strong-Motion Data Series CD-003 (August 31, 2001)(其它余震). 与本文相关的地震目录如表 1 所示. 本文选取的地震记录为具有明显震前和尾波的时间序列.

2 资料的可靠性分析及处理方法

台湾布设的地震仪多为 12 位以上的高性能数字地震仪. 数字地震仪具有动态范围大、频带宽、采样率高(IDS & IDSA 为 200 Hz, 其它为 250 Hz)、震前记录长(可达 20 s)等特点, 能记录较长周期的地震信息. 本文根据每条记录的震前部分长短不同, 尽可能长地选取了有效的震前部分, 然后从记录中减去震前部分的平均值, 再用 Butterworth 滤波器对记录进行截止频率为 0.05 Hz 的高通滤波.

3 记录分组原则

台湾自由场地的类型如表 2 所示, 共分为 B, C, D, E 四类(Lee *et al.*, 2001). 由于 B, C, E 类场地的记录往往较少, 且场地类型为通过地表地质调查而划分, 相邻类型的划分可能会出现一定偏差, 因此, 根据 B 类和 C 类场地之间, D 类和 E 类场地之间剪切波速相对接近的原则, 把 B 类和 C 类场地合并, D 类和 E 类场地合并.

场地类别合并之后, 再根据断层距(车笼埔断层被认为是集集主、余震的发震构造)对不同场地的记录进一步分类. 所用断层距为台站与断层的最小距离. 由于不同距离不同场地条件下地震记录的数量往往有很大差别, 同时又要分析长周期地震动随距离的衰减特性, 根据实际情况, 以 30 km 作为断层距的分类间隔.

最后进行震级档分类. 震级档分为 $M_w = 7.6$ (主震), $6.0 \leq M_L < 7.0$, $5.0 \leq M_L < 6.0$ 三档. 总的分类结果如表 3 所示. 所用的记录均为水平向记录.

4 分析结果

在分别计算每条记录的绝对加速度反应谱后, 以组为单位, 对每组不同记录的反应谱进行了平均, 并在此基础上来分析场地条件、震级、距离对长周期地震动反应谱形状的

表 2 场地条件分类

分类	$v_S / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	场 地 条 件
B	760~1500	岩石: 灰岩, 岩浆岩, 以及变质岩等
C	360~760	密实土和软岩石: 砾岩和火山碎屑岩, 红土
D	180~360	刚性土: 刚性粘土和砂土
E	<180	软土

表 3 地震记录分组

断层距 /km	场 地 类 型	地震记录个数		
		$M_w = 7.6$	$6.0 \leq M_L < 7.0$	$5.0 \leq M_L < 6.0$
0~30	B+C	42	135	162
	D+E	116	423	586
30~60	B+C	50	184	106
	D+E	134	340	350
60~90	B+C	52	147	12
	D+E	142	421	68
90~120	B+C	32	56	
	D+E	108	263	

影响.

4.1 场地条件对反应谱的影响

从图 1a, b, c 的反应谱中看出, 场地条件对反应谱形状的影响趋势完全一致. D+E 类场地反应谱的宽度明显比 B+C 类场地的大; 反应谱末端的谱值也比 B+C 的高. 这说明, D+E 类场地的放大效应比 B+C 的大; D+E 类场地的长周期地震动衰减速度要比 B+C 类的小. 在图 1a 的三组反应谱中, 每组中两条反应谱的最大差值分别为 0.25632 ($T=0.16$ s), 0.410669 ($T=0.65$ s), 0.71909 ($T=0.75$ s); 两组反应谱在 $T=20$ s 时的差值分别为 0.000343714, 0.00112, 0.0021. 这说明, 随着距离的增加, 两类场地反应谱长周期部分的差值有增加趋势. 这种情况同样出现在图 1b 中, 尽管第一组谱中两谱的差距明显比其它三组中的小. 在图 1b 的四组谱中, 两条谱的差别主要出现在 $T=1\sim10$ s 的区间内. 在图 1a, b, c 中, 反应谱的拐点周期明显受到了震级的影响: 图 1b 中的谱要比图 1a 中的略宽, 而图 1c 中的谱(它们的拐点周期大约在 $T=10$ s 附近)比图 1b 中的略宽.

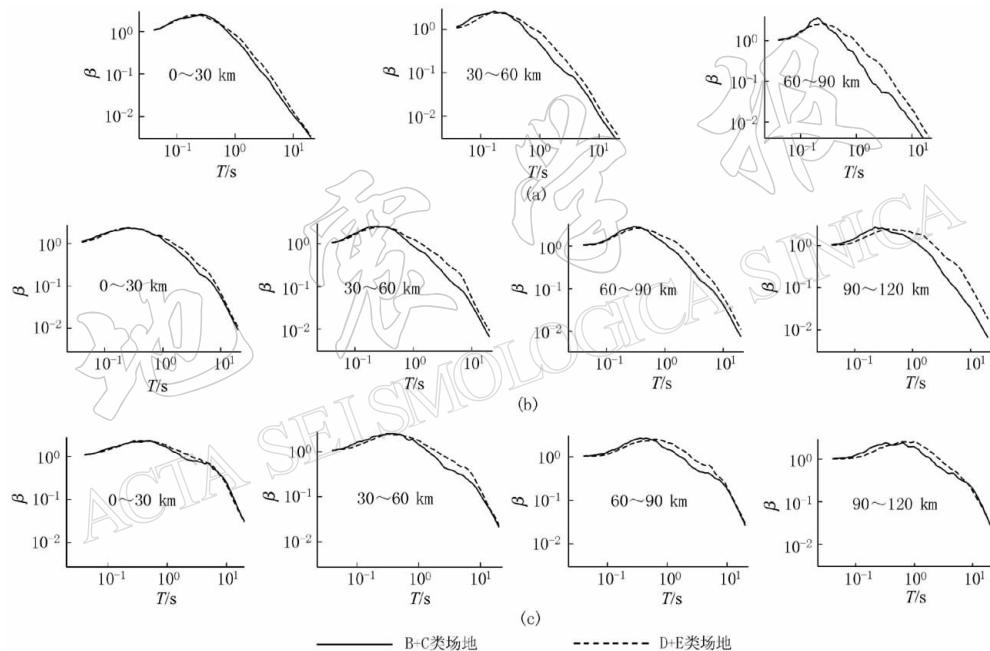


图 1 不同场地条件下的 20s(5% 阻尼比)平均绝对加速度反应谱(β 谱)

(a) $5.0 \leq M_L < 6.0$; (b) $6.0 \leq M_L < 7.0$; (c) $M_w = 7.6$

4.2 震级对反应谱的影响

由图 2 可见, 无论在 B+C 类场地, 还是在 D+E 类场地, 随着震级增加, 反应谱的宽度和谱值均明显加大. 这表明大震的震级谱有更多的长周期成分, 震级越大长周期地震动的衰减速度就越慢. 以图 2a 的第一组谱为例可见, $M_w 7.6$ 地震(主震)的谱值和震级档为 $6.0 \leq M_L < 7.0$ 及 $5.0 \leq M_L < 6.0$ 地震的谱值的最大差值分别为 0.5208 和 0.98358. 主震的拐点周期在 5 s 附近, 而另两个震级档的拐点周期均小于 1 s. 图 2 中的谱受距离的影响并不明显, 但受场地条件的影响清晰可见. 总体来说, D+E 类场地的反应谱比 B+C 类的宽.

4.3 断层距对反应谱的影响

一般来说, 随着距离增加, 反应谱宽度也随之增大, 但增大的幅度往往并不明显。从本文的分析结果来看, 断层距对反应谱的影响并不显著, 似乎并没有太多规律可循(图3)。值得注意的是, 在断层距为0~30 km的区间, 反应谱的宽度往往比其它区间的要大。这种情况在图3a中表现得更为明显。这说明, 强震发生时近断层的强烈活动可能产生了丰富的长周期地震动成分。图4a中的车笼埔断层为集集地震的发震构造(张建兴等^①; Kao and Chen, 2000)。集集主震曾产生过强烈的近断层地表位移, 车笼埔断层的北端断距达8~10 m

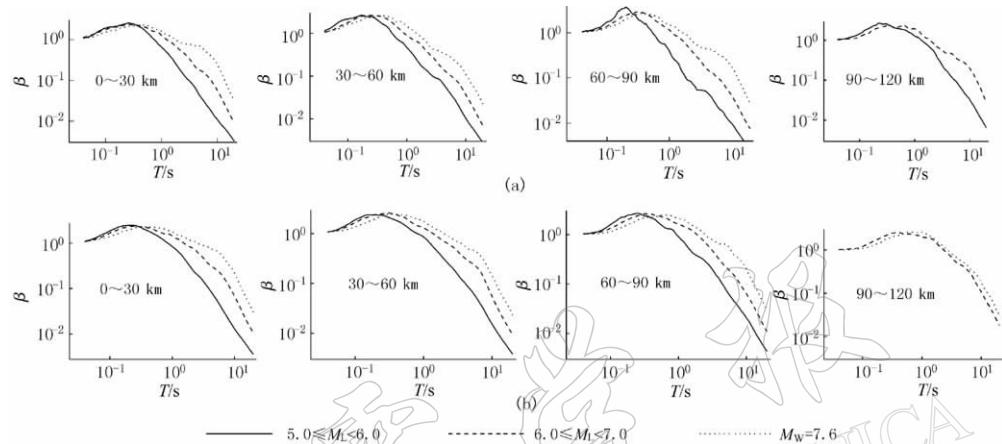


图2 不同震级的20s(5%阻尼比)平均绝对加速度反应谱(β 谱)
(a) B+C类场地; (b) D+E类场地

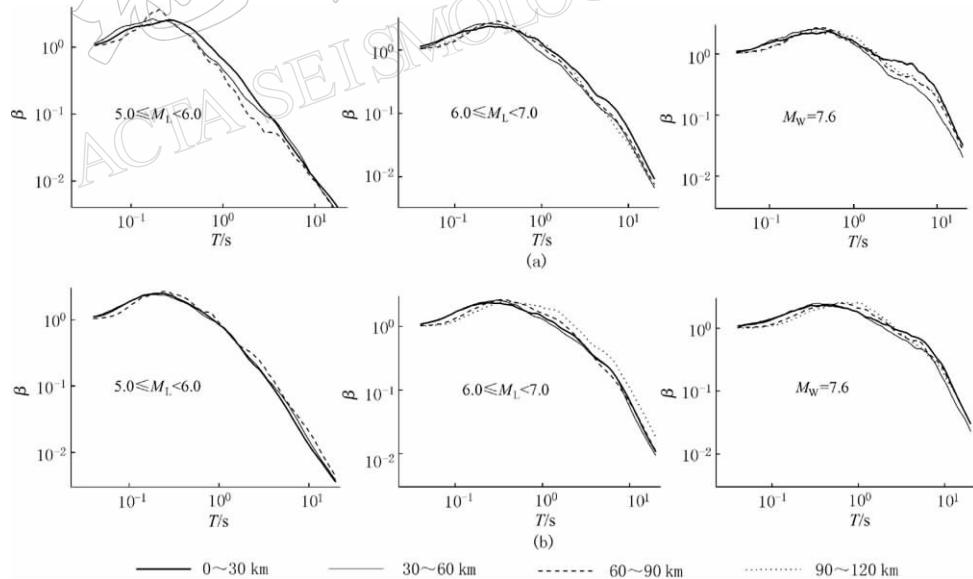


图3 不同断层距的20s(5%阻尼比)平均绝对加速度反应谱(β 谱)
(a) B+C类场地; (b) D+E类场地

① 张建兴, 吴逸民, 辛在勤, 等. 1999. 集集大震初始破裂之探讨. <http://www.cwb.gov.tw/>

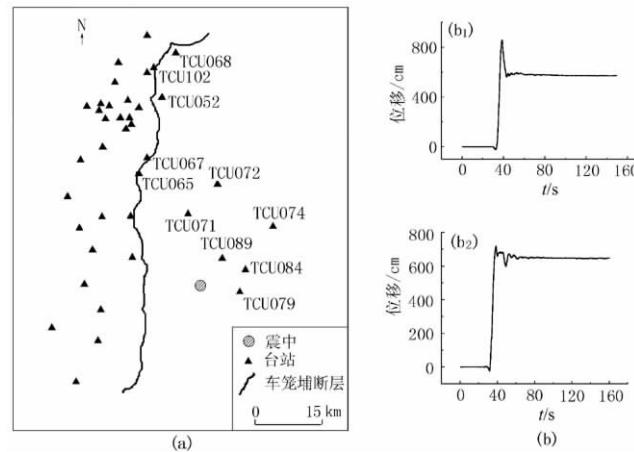


图 4 集集 $M_w 7.6$ 地震的震中位置和附近的台站分布(a)及位移时程(b)

图(b₁)为 TCU068 台的位移时程, (b₂)为 TCU052 台的位移时程

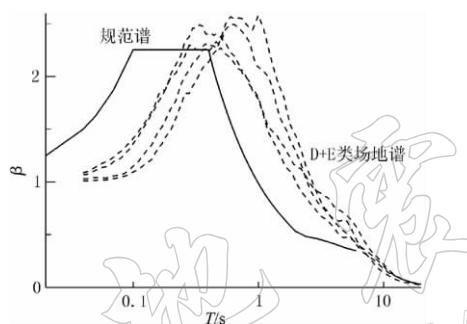


图 5 $M_w 7.6$ 地震(D+E类场地)的反应谱与规范谱($T_g=0.40$ s)的比较

左右(地表地质调查). 这种情况与图 4b 中位移时程所显示的永久位移具有一致的趋势. 在图 3 中可以看出, 随着震级的增大, 谱的宽度也在总体增大.

4.4 与规范谱的比较

在图 5 中, 把 D+E 类场地的主震反应谱和规范(建筑抗设计规范 GB50011-2001)谱进行了比较. 结果发现, 在长周期部分, $M_w 7.6$ 主震的反应谱的拐点周期明显向右偏移. 这表明, 在规范谱的现有周期范围内, 强地震动的长周期部分已被低估. 如果按规范谱现有的伸展趋势向长周期进行延伸, 规范谱似乎又要高估强地震动的长周期部分.

4.5 标准差

为了清楚地了解反应谱的离散情况, 图 6 给出了各级平均反应谱的标准差, 以供有关工作参考使用. 实线代表平均反应谱, 虚线代表平均反应谱加上一倍的标准差.

5 近断局长周期地震动特征

在前面的研究中, 为了比较方便, 无论对近断层还是远场记录, 均以断层距为准进行分组研究. 但应该指出的是, 相对于远场而言, 近断层地震动特性往往更强烈地受断层活动性质的控制, 特别是对于大震级的集集主震来说, 这种控制作用可能更显著. 下面将对发震构造(车笼埔断层)对近断局长周期地震动的影响进行探讨, 以作为上述研究的补充.

5.1 车笼埔断层的断层面形态

集集地震的地表破裂长达 105 km 左右, 断层两侧的最大垂直落差达 11 m, 最大水平错动亦达 10 m 之多. 车笼埔断层主要由东南向西北的逆冲作用形成, 断层面朝东倾斜 $20^\circ \sim 40^\circ$ (平均 30°), 向南倾斜约 10° . 图 7b 是用浅层地震勘探得到的三维车笼埔断层面. 可

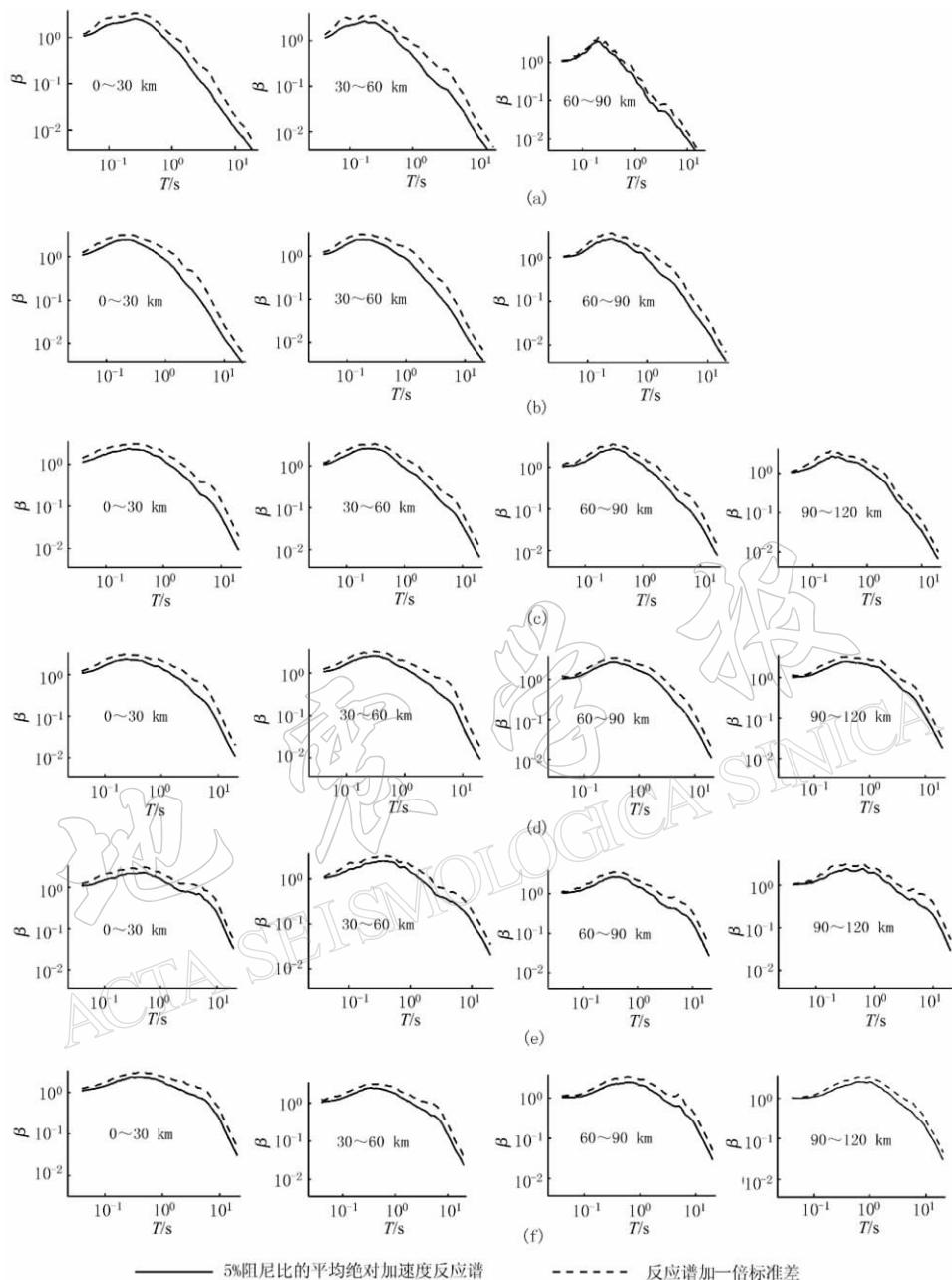


图 6 反应谱的标准差

(a) B+C 类场地 ($5.0 \leq M_L < 6.0$); (b) D+E 类场地 ($5.0 \leq M_L < 6.0$); (c) B+C 类场地 ($6.0 \leq M_L < 7.0$);
 (d) D+E 类场地 ($6.0 \leq M_L < 7.0$); (e) B+C 类场地 ($M_w = 7.6$); (f) D+E 类场地 ($M_w = 7.6$)

以看出, 断层面从主震震源处的 8 km 深, 向北升高至大甲溪南岸时为 1 km 深。从南到北, 有 4 个大的隆起。第一个在集集北方(南投)。此隆起的底部即是主震震源的位置。第二个隆起在乌溪南岸(草屯)。因此, 乌溪以南断层面较深, 可能不易产生大的滑动。第三个隆起位于雾峰至头汴溪之间, 造成雾峰凸起。第四个隆起发生在大坑以北、大甲溪以南。断

层面在大甲溪南岸几乎接近地表, 容易滑动, 发震时错动量更大, 并出现东转的现象(图 7a).

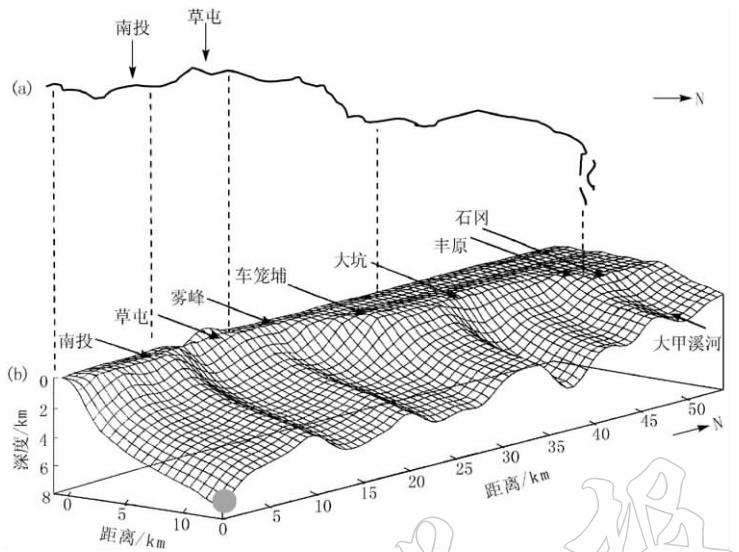


图 7 车笼埔断层

(a) 平面图^①; (b) 三维断层面形态(Wang *et al.*, 2002), ● 为集集 $M_w 7.6$ 主震震中

李元希等^②利用锦水页岩顶面等高线, 绘出了南北向的锦水页岩顶面地下剖面图. Hung 和 Suppe(2002)利用 5 条深部地震剖面, 绘出了车笼埔断层滑脱面南北向的地下构造剖面图. 他们的工作所显示的车笼埔断层的断层面表面形态和 Wang 等(2002)的结果大体相同(从集集主震震中向北, 断层面主体逐渐升高).

实际上, 从表 1 的震源深度分布也能看出断层面北高南低的特点.

5.2 近断层同震位移分布

车笼埔断层的断层面表面形态控制了地震时断层的活动行为(断层面浅的地方活动相对强烈). 通过对 GPS 的观测结果、卫星图象的解译结果、野外地质调查的结果和来自强震记录的永久位移的比较可以发现, 这些不同手段得出来的近断层的同震位移分布大致相似, 即表现出南低北高, 上盘高下盘低, 且具有方向性的特点. 这种情况应归结于车笼埔断层的断层面特殊形态, 并成为图 7 的佐证.

5.2.1 GPS 的观测结果

Yu 等(2001)给出了相对于金门岛的集集主震的同震位移分布. 无论是水平位移还是垂直位移的分布均明显受到车笼埔断层的断层面形态的影响. 从水平位移分布来看, 上盘的位移比下盘的要大得多, 北段的位移明显比南段的大(这是因为北段的断层面比南面的浅), 远离地表破裂则位移减小(对于上盘而言, 这主要是由于断层面向东南倾斜的原因; 对于下盘而言, 是因为越远离地表破裂, 所承受的上盘的逆冲作用就越小). 上盘的位移主要以北西向为主, 与逆冲作用的方向(康耿豪, 2000)相同; 下盘位移的方向和逆冲作用的

^① 王乾盈. 2004. 台湾车笼埔断层钻探计划. <http://www.ccsn.tp.edu.tw/>

^② 李元希, 吴维毓, 石同生, 等. 2000. 九二一集集地震地表变形特性-坪丰桥以东. <http://www.ndcnc.gov.cn/>

方向相反. 在车笼埔断层北端的转向处, 水平同震位移最高(8 m 以上), 同震垂直位移的分布情况与水平位移的大体相同.

5.2.2 卫星图象的解译结果

Dominguez 等(2003)通过卫星图片分析给出的沿车笼埔断层地表破裂分布的水平向同震位移与野外实测的结果吻合得很好, 即显示出北高南低的趋势. 水平向位移在丰原(车笼埔断层北端的转向处)达到最高(大于 8 m).

5.2.3 野外地质调查的结果

侯进雄等^①利用高精度测量仪测量给出的车笼埔断层地表上下盘高差的数据表明, 当断层面深度较小时, 断层的地表抬升量就较大; 断层面深度较大时, 地表的抬升量就较小. 在丰原附近测得的抬升量为 9 m, 为本区最高.

康耿豪(2000)在地震当天所做的实际测量结果表明, 水平位移的平均走向为北西. 水平位移和垂直位移均大体呈现由南向北递增的趋势. 水平位移在断层的转向处达到最大(9.8 m). Chen 等(2001)给出了通过野外地质调查得到的车笼埔断层的垂直位移分布. 在集集—丰原一带, 垂直位移逐渐增高.

5.2.4 来自强震记录的永久位移

本文在处理强震记录时, 采用了王国权(2001)提倡的基线校正方法. 通过对近场强震加速度记录进行适当的基线校正, 两次积分后, 便可得到含有永久位移的位移时程. 本文对图 4a 中地震台的水平向强震记录进行基线校正, 经两次积分, 得到位移时程. 结果表明, 峰值位移及永久位移的分布和前述几种情况大体相同. 峰值位移和永久位移在断裂北端的转向处附近达到最大(图 4b). 从图 4a 看出, 如果以主震震中为参考点, 那么越向断裂的南端或北端, 震中距就越大. 因此, 我们以震中为参考点, 以震中距为参数绘出的图 8, 基本上反应了地表破裂附近由南向北的位移分布. 图 8 中的横坐标是震中距, 负值为震中以南的台站, 正值为震中以北的台站. 从图中可以看出, 位移分布有从南向北递增的趋势.

上盘台站的最大水平永久位移分别为 6.07 (TCU068), 6.64 (TCU052), 2.22 (TCU072), 2.18 (TCU071), 1.83 (TCU074), 2.34 (TCU089), 2.09 m (TCU084) 和 1.58 m (TCU079). 下盘永久位移大于 1 m 的只有位于地表破裂附近的几个台站. 它们的水平向最大永久位移分别为 1.32 (TCU067), 3.69 m (TCU065) 和 1.19 m (TCU075). 而其余台站的永久位移均小于 1 m. 因此, 可以明显看出, 上盘台站的永久位移要比下盘的大得多. 值得说明的是, 这里所说的永久位移都是单分向的位移, 不是总位移.

5.3 发震构造对长周期地震动的控制作用

震中是震源在地表的垂直投影, 地震学上给出的震源可以被理解为断层的初始破裂点. 而对于具有较大规模发震构造的集集大地震来说, 真正的震源应处于整个断层面所在

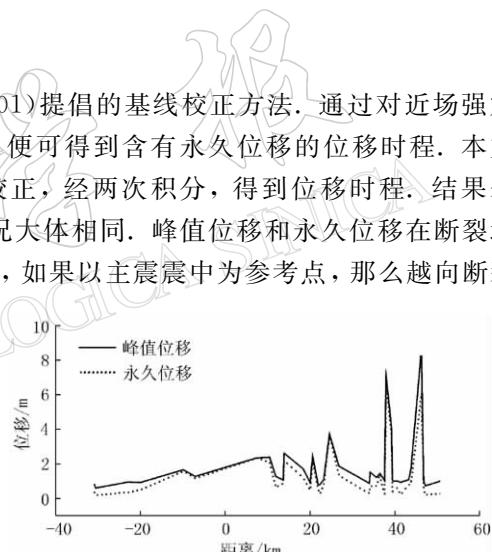


图 8 永久位移和峰值位移分布

^① 侯进雄, 赖典章, 费立沅, 等. 2000. 高精度测量在车笼埔活动断层监测与调查上之应用研究——九二一地震前后测量结果比较. <http://www.ndcnc.gov.cn/>

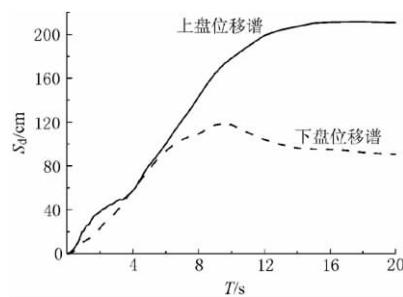


图 9 上下盘 5% 阻尼比的水平向平均相对位移反应谱

的位置. 从上述分析中可以看出, 车笼埔断层面的表面形态(产状)控制着断层的活动强度, 在断层面较浅的部位, 断层的活动强度比断层面深的部位强. 图 9 给出了图 4a 中的上下盘所有台站水平向平均相对位移反应谱. 上盘的位移比下盘的要大得多. 这说明上盘的活动规模要比下盘大得多. 这种情况在地震动的衰减特征中也能反映出来. 从图 9 可以看出, 在长周期部分(大约 6 s 之后), 上盘反应谱的谱值要比下盘的高得多.

为了说明近断层附近从北到南长周期地震动

的衰减规律, 本文还比较了上盘台站东西分量 20 s(5% 阻尼比)平均相对位移反应谱(图 10). 从图 7 可以看出, 断层面虽然向东和向南倾斜, 但是, 它是波状起伏的, 断层面上相对靠北(或靠西)的某一点的标高, 并不一定比其它靠南(或靠东)的某一点的高. 换句话说, 断层面上相对靠南(或靠东)的某一点的活动规模可能比相对靠北(或靠西)的某一点的强烈. 尽管如此, 图 10 仍大体上反映了反应谱的长周期部分从南到北递增的趋势. 在图 10a 中, 由于 TCU068 和 TCU052 两个台站处于车笼埔断层北端, 此处断层面最高, 同震位移最大, 两个台站相对位移反应谱的长周期部分明显比其它台站的高. 图 10b 所示的是除 TCU068 和 TCU052 两个台站以外的其它台站长周期反应谱的比较结果.

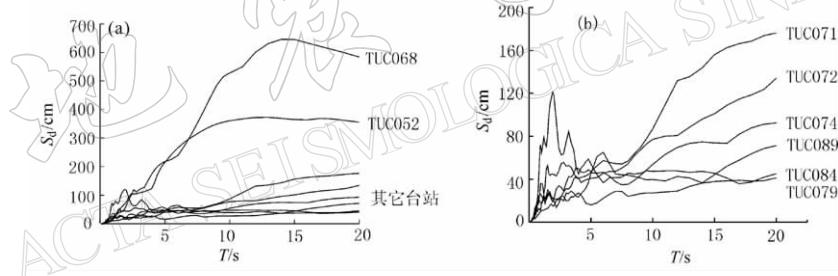


图 10 集集主震近断层 5% 阻尼比的东西向平均相对位移反应谱

(a) 上盘反应谱; (b) 下盘反应谱

应该指出的是, 同震位移不应是影响长周期反应谱的唯一的因素. 断层的滑动速率, 不同场地的放大效应等, 也可能是影响长周期地震动反应谱的因素. 上述分析中因资料有限, 未能就这些方面做进一步研究.

6 讨论和结论

台湾集集大地震及余震长周期地震动反应谱的形状主要受场地条件和震级的控制, 而受距离的影响并不显著. D+E 类场地的反应谱的宽度要比 B+C 类的大, 震级大的反应谱要比震级小的宽. 在规范谱的现有周期范围内, 强地震动的长周期部分被大大低估了. 如果按规范谱现有的伸展趋势向长周期进行延伸, 规范谱似乎又要高估强地震动的长周期部分. 进一步研究表明, 近断层的长周期地震动明显受断层活动特性影响: 上盘的长周期地震动比下盘的强, 北部的比南部的强. 近断层地震动的研究将依赖于活断层探测技术的发

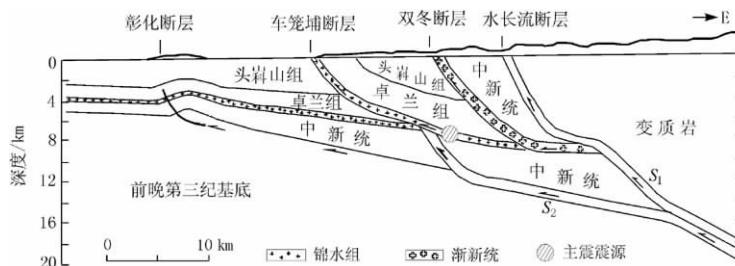


图 11 车笼埔断层剖面图(据 Wang et al., 2000)

展。两者的共同发展对近断层的长周期震害预测有重要意义。

由于场地条件的资料来源于地表地质调查, 这会影响分析的精度。由于记录有限, 在研究近断层的长周期特征时, 没有区分局部场地条件。

张建兴等^①、Kao 和 Chen (2000)等认为车笼埔断层(图 11)是集集主震的发震构造。林庆伟等^②认为双冬断层和集集余震的发生有关。其理由是, 余震的震中分布向东迁移, 而且震源也有同时加深的趋势。但并没有直接的地质学证据。事实上, 在集集地震发生的整个过程中, 只有车笼埔断层有明显的地表位移, 而双冬断层并没有地表破坏。很难想象车笼埔断层在集集主震发生后便静止不动, 而由双冬断层触发了所有余震。从表 1 可以看出, 除了两个余震外, 其它的余震都是紧接着主震相继发生。从此来看, 很难说余震和车笼埔断层无关。如果从震中分布来看, 集集主震的震中恰好落在双冬断层而不是车笼埔断层上, 但双冬断层并没有产生同震地表破裂, 而是车笼埔断层产生了 10 m 左右的断距。因此可以说, 由震中分布不足以推断发震构造。有理由认为图 11 中的滑动面 S_1 和 S_2 在逆冲作用时都可能与车笼埔断层贯通, 共同滑动, 形成所谓的薄皮构造(Wang et al., 2000)。而双冬断层可能并没有参与进来, 这样就能解释双冬断层为什么没有同震地表破裂, 余震的震中分布, 以及为什么有些余震的震源深度能达到 30 km 等问题了。基于上述原因, 本文把车笼埔断层当成集集主、余震的发震构造。

另外, 值得说明的是, 每种基线校正方法都很难适合所有的地震记录。

参 考 文 献

- 康耿豪. 2000. 921 集集地震造成之地表变形模式[D]: [学位论文]. 台湾: 台湾“国立中央大学应用地质研究所”, 1~80
- 王国权. 2001. 921 台湾集集地震近断层地面运动特征[D]: [学位论文]. 北京: 中国地震局地质研究所, 1~216
- 谢礼立, 周雍年, 胡成祥, 等. 1990. 地震动反应谱的长周期特性[J]. 地震工程与工程振动, 10(1): 1~19
- 周雍年, 周正华, 于海英. 2004. 设计反应谱长周期区段的研究[J]. 地震工程与工程振动, 24(2): 15~18
- Chen Y G, Chen W S, Lee J C. 2001. Surface rupture of 1999 Chi-Chi earthquake yields insights on active tectonics of central Taiwan[J]. *Bull Seism Soc Amer*, 91(5): 977~985
- Domínguez S, Avouac J P, Michel R. 2003. Horizontal coseismic deformation of the 1999 Chi-Chi earthquake measured from SPOT satellite images: Implications for the seismic cycle along the western foothills of central Taiwan[J]. *Geophys Res*, 108(B2): 8-1~8-19

① 张建兴, 吴逸民, 辛在勤, 等. 1999. 集集大震初始破裂之探讨. <http://www.cwb.gov.tw/>

② 林庆伟, 赖文基, 黄敏郎, 等. 九二一大地震成因与断层活动机制. <http://kbteq.ascc.net/archive/ncku/des/des01.html>

- Faccioli E, Paolucci R, Rey J. 2004. Displacement spectra for long periods[J]. *Earthquake Spectra*, **20**(2): 347~375
- Hu Y X, Yu Y X. 2000. A seismological-engineering approach to the estimation of wide response spectrum for distant earthquake[A]. In: Ko J M, Xu Y L ed. *Advances in Structural Dynamics*[C]. Hong Kong: Elsevier Science Ltd, (1): 193~200
- Hung J H, Suppe J. 2002. Subsurface geometry and kinematics of the Sani-Chelungpu thrust faults[J]. *EOS Trans AGU*, **83**(22): WPGM Suppl, Abstract SE441E-09
- Kao H, Chen W P. 2000. The Chi-Chi earthquake sequence: active, out-of-sequence thrust faulting in Taiwan[J]. *Science*, **288**(5475): 2 346~2 349
- Lee Ch T, Cheng Ch T, Liao Ch W, et al. 2001. Site classification of Taiwan free-field strong-motion stations[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **91**(5): 1 283~1 297
- Wang Ch Y, Li Ch L, Su F Ch, et al. 2002. Structural mapping of the 1999 Chi-Chi earthquake fault, Taiwan by seismic reflection methods[J]. *TAO*, **13**(3): 211~226
- Wang Ch Y, Chang Ch H, Yen H Y. 2000. An interpretation of the 1999 Chi-Chi earthquake in Taiwan based on the Thin-Shinned thrust model[J]. *TAO*, **11**(3): 610~630
- Yu S B, Lee J F, Lai T Ch, et al. 2001. Preseismic deformation and coseismic displacements associated with the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **91**(5): 995~1 012

LONG-PERIOD GROUND MOTION CHARACTERISTICS OF THE 1999 JIJI(Chi-Chi), TAIWAN, MAINSHOCK AND AFTERSHOCKS

Li Chunfeng¹⁾ Zhang Yang¹⁾ Zhao Jinbao²⁾ Tang Hui³⁾

1) *Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China*

2) *AVIC Institute of Geotechnical Engineering, Beijing 100098, China*

3) *Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China*

Abstract: This paper investigates long-period ground motion characteristics of the 1999 Jiji (Chi-Chi), Taiwan, mainshock and aftershocks on the basis of a lot of the high quality digital strong motion records. The study attaches the importance to the variation of strength of the long-period motion with magnitude, distance, and site condition. In the meantime, the near-fault long-period ground motion characteristics are analyzed. The result shows that the shape of the long-period response spectrum is mainly controlled by site condition and magnitude (the spectrum of class D+E is wider than that of class B+C, and the spectrum of larger magnitude is wider than that of smaller magnitude), and the effect of fault distance on the shape is not evident. And the near-fault long-period ground motion characteristic depends on fault activity apparently, that is to say, the long-term ground motion in the hanger is stronger than that in the footwall, and the long-term ground motion in the north is stronger than that in the south.

Key words: Jiji (Chi-Chi) earthquake; long-period ground motion; response spectrum; Chelongpu (Chelungpu) fault