

我国若干中强震地面运动参数的 初步研究

刘朔宽 陈丙午

(国家地震局兰州地震研究所)

前言

强烈地震时、引起地面建筑物的破坏大体可归结为两种原因即：表层地基的失效和结构所受惯性力的作用。这两种破坏原因又都与地震时地面运动有直接关系，对地震工程来说，正确地认识和掌握不同场地地基的地面运动特征及各项参数具有头等重要的意义。近年来国外由于取得了一定数量的强震记录，这方面的研究有了一些进展〔1〕〔2〕。

目前我国也取得了几次大地震中的中、强震地震加速度记录〔3〕、〔4〕、〔5〕，为了不断地提高认识，及时总结已获得的资料，尽快地提供给抗震设计参考使用，我们对这些资料作了一些初步分析和整理。由于资料较少，且多是较低烈度区的，所得出的一些结论可能会有一些片面性，错误之处望批评指正。

一、地震时地面运动的特征

据我国近年来连续发生的几次强烈地震，如海城〔4〕、唐山〔5〕、松潘——平武〔3〕地震等的主震、余震所观测到的资料，经过初步分析整理、结果如下：

1. 地震时地面运动的最大加速度

最大加速度与震级、震中距的关系，如图 1、2 所示。可见不论是在土层上还是在基岩

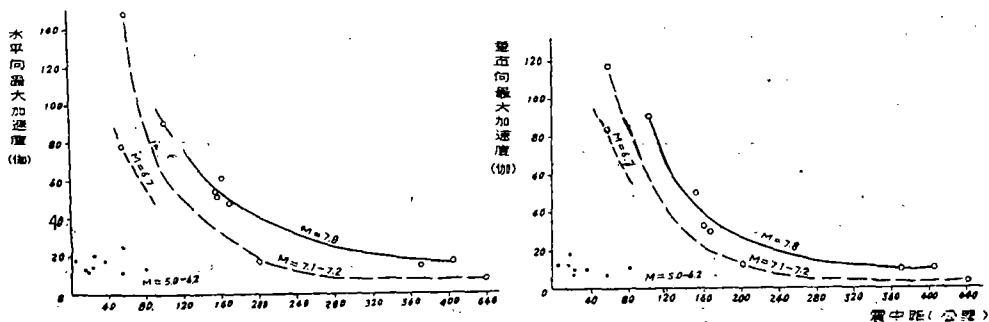


图 1

上，水平及垂直的最大加速度一般都是随震级增大而增大，随震中距变远而有规律的衰减。从衰减速度来看：在基岩上比在土层上快得多。

据近震中区余震资料较多的加速度来看，其离散性较大，即震级大的加速度值不一定就大。

据现有的烈度低于7度的一些资料（表1）来看，在震中距大于30公里时，土质地基上的加速度总是大于基岩的。而震中距小于30公里时，则这种规律就不甚明显。国外资料也有类似趋势。Seed〔1〕等人据 $M=6.0\sim 6.6$ 的153个不同场地上的强震记

录分析结果表明：在加速度值比较小时，土层上的加速度峰值总是大于基岩上的，但是当加

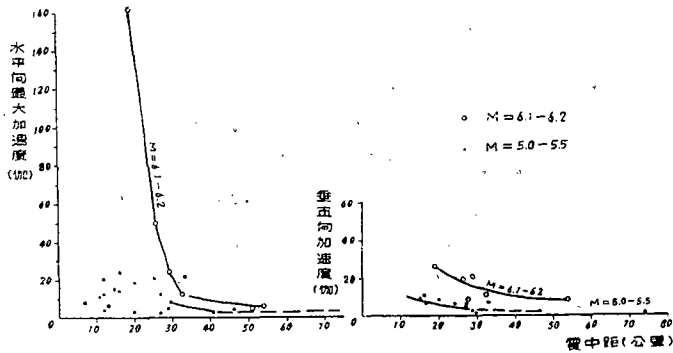


图 2

表 1

震 级	震 中 距 (公里)	地 基 土	水 平 向 最 大 加 速 度 (伽)			土 a_{max} 岩 a_{max}
			东 西	南 北	平 均	
5.0	18	土	12.8	11.7	12.3	0.945
	12	石灰岩	12.3	13.6	13.0	
5.0	4.25	土	20.8	14.1	17.5	2.04
	7.0	石灰岩	8.4	8.8	8.6	
5.1	17.0	土	10.1	15.9	13.0	0.63
	12.0	石灰岩	16.8	24.3	20.6	
5.5	22	土	21.1	18.6	19.9	1.31
	16	石灰岩	18.2	12.2	15.2	
5.5	22	土	16.2	11.7	14.0	0.875
	15	石灰岩	14.2	17.8	16.0	
4.6	33.0	土	11.9	11.3	11.6	1.54
	27.5	石灰岩	9.4	5.7	7.5	
6.1	35.0	土	15.9	18.6	17.3	1.05
	32.5	石灰岩	13.5	19.3	16.4	
6.2	55.5	土	12.2	13.2	12.7	2.59
	51.0	石灰岩	5.4	4.3	4.9	
7.8	405	土	16		16	2.0
	393	基 岩	8		8	

速度较大时（近中震中区、高烈度），由于土层的非线性影响，上层刚度降低，阻尼增大，基岩上的大加速度值不易传至地表。因此这种对比关系就会反过来，即：基岩上的加速度往往大于土层地基上的。

加速度的垂直分量一般多是低于水平分量，从两个分量之间的比值与震级、震中距的关系图3来看，近震中区比值偏大而远震中区偏小。在近震区还多出现大于水平分量的现象，离散性也较大。这一现象在震中区建筑抗震设计时应给予注意。

图4表明：加速度值与主震周期还有一定的依赖关系，随着震中距的增加高频分量大大衰减，结果不断突出低频分量加速度的震动特征。

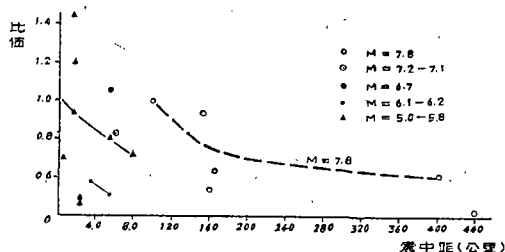


图 3

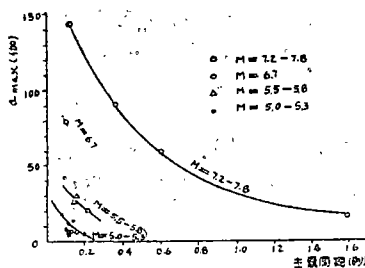


图 4

从所收集到的资料中，再根据以下条件对资料加以选择。首先舍去加速度值过小的记录，选取最大加速度值在20伽以上者。其次也舍去震中过大或过小者（均为小震级的）。而选取震中距在20公里 $\leq R \leq 200$ 公里范围内的。震级则在 $M=5.5 \sim 7.8$ 范围内。这些记录全部是在Ⅱ类地基上取得的。

选择如下形式的回归方程：

$$a = A \cdot 10^{BM} (R + 20)^{-n}$$

其中：a——地面运动最大加速度。

A、B、n——根据回归分析来确定的常数。

经过分析，得出经验方程如下：

$$a_{\text{水平max}} = 8 \times 10^0 \cdot 4M (R + 20)^{-1}$$

$$a_{\text{垂直max}} = 160 \times 10^0 \cdot 5M (R + 20)^{-2}$$

据以上两式计算的地面加速度最大值与实测值的对比关系如图5所示。从上两式可见，垂直加速度随震中距的衰减速度远大于水平分量的衰减速度。

2. 加速度的主震周期

由图6可知：7.8级地震时，随震中距增大，其主震内期明显变长，

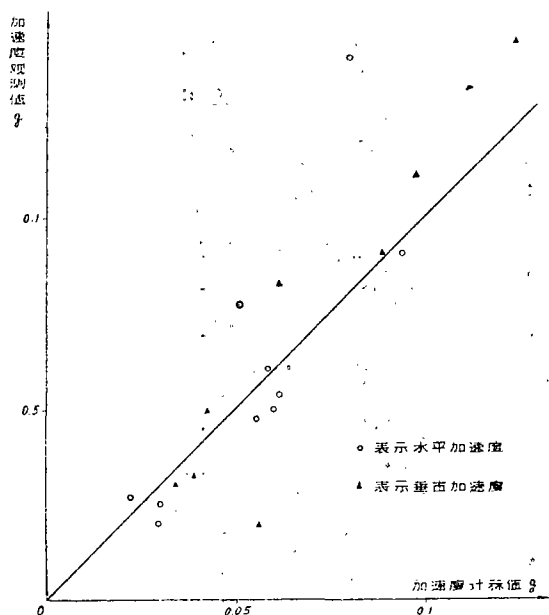


图 5

表明：主震周期与震中距间存在着一定规律性关系。而在近震中区，不论震级大小，其主震周期皆在短周期范围内，尚看不出有明显变长的趋势。只有当震中距达到一定远距离以后地震动的高频成份大大衰减时，其主震周期才会明显变大。

由图 7 可知，在基岩地面上的加速度主震周期在近震中区亦是在短周期范围内。据现有资料，震中距在 55 公里内基岩地基加速度主震周期尚无明显变长的显示。

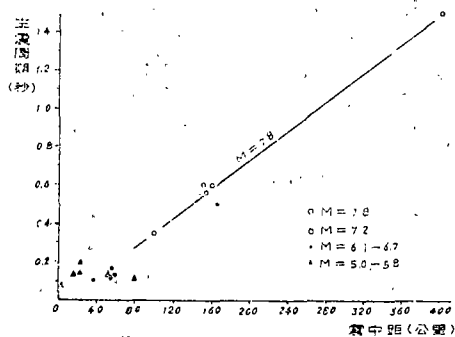


图 6

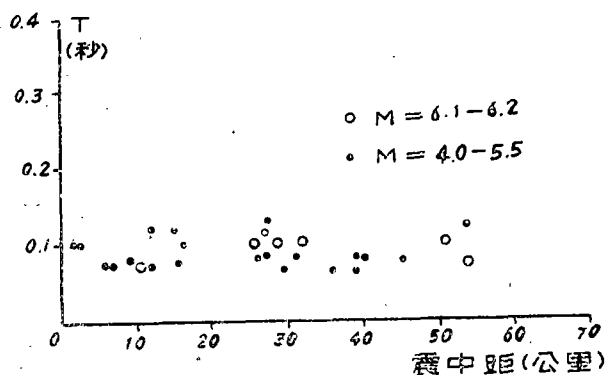


图 7

土层 (Ⅱ类) 与基岩 (Ⅰ类) 地基主震周期

表 2

震 级	震 中 距 (公里)	地 基 土	水 平 向 加 速 度 主 震 周 期 (秒)			T _土 / T _岩
			东 西 向	南 北 向	平 均	
4.6	33.0	土	0.16	0.18	0.17	1.31
	27.5	石 灰 岩	0.13	0.13	0.13	
5.0	18.0	土	0.07	0.14	0.10	1.43
	12.0	石 灰 岩	0.07	0.07	0.07	
5.0	4.25	土	0.07	0.08	0.08	1.14
	7.0	石 灰 岩	0.07	0.07	0.07	
5.1	17.0	土	0.12	0.16	0.14	1.22
	12.0	石 灰 岩	0.10	0.13	0.115	
5.5	22.0	土	0.25	0.16	0.20	2.0
	16.0	石 灰 岩	0.10	0.10	0.10	
5.5	22.0	土	0.17	0.13	0.15	1.3
	15.0	石 灰 岩	0.13	0.10	0.115	
6.1	35.0	土	0.10	0.10	0.10	1.0
	32.5	石 灰 岩	0.09	0.11	0.10	
6.2	55.5	土	0.09	0.15	0.17	1.7
	51.0	石 灰 岩	0.10	0.10	0.10	

从唐山震区土层与基岩地基加速度主震周期对比资料表 2 来看, 土层(Ⅱ类土)上的总是大于基岩上的主震周期。

另据海城震区余震观测资料表 3 可看出, 在松软Ⅱ类地基土上的主震周期又长于较坚实Ⅲ类土地基上的。

海城震区岩、土层及基上的主震周期

表 3

观测站名称	地基土类别	主震相平均周期(秒)		
		东西向	南北向	垂直向
析木	Ⅱ	0.15	0.144	0.05
海革站	Ⅱ	0.217	0.28	0.07
营口市	Ⅲ	0.29	0.36	0.083
海城和大石桥	I	0.1—0.2		

这清楚的表明随着地基岩土由硬至软, 土质柔性的增加主震周期变长。对于松软Ⅱ类地基由于高频震动分量更易衰减, 而长周期分量将被放大, 随着震中距的增加, 其主震周期变长的速度会更快, 其间差值会更大。这显示了松软土层的强烈滤波和放大作用。

综上, 主震周期不仅与地基岩土类别有关, 还与震中距的远近有着密切关系。这一因素对于远震中区, 尤其是松软土层地基, 是要予以注意的。

3. 地面振动的持续时间

据表 4 资料, 土层(Ⅱ类)地基的总震动时间与震中距的关系, 是震中距远的总持续时间长于震中距近的。

土层地基震中距与震动总持续时间

表 4

震级	地点	地基土类别	震中距(公里)	震动总持续时间(秒)
7.8	北京密云水库	Ⅱ	153	114
	北京朝阳区	Ⅱ	155	120
	北京东城区	Ⅱ	160	130
	北京海淀区	Ⅱ	168	130
	河北省隆尧县	Ⅱ	405	150

由表 5 可见, 每次地震地面震动总持续时间是不等的。但从其平均趋势来看, 当震级较小的情况下, 在近震中(震中距小于 30 公里)区, 土层震动的总持续时间总是大于基岩上的。震中距变远(震中距大于 30 公里)时, 则出现了土层震动总持续时间小于基岩上的。

唐山震区地基土类别与震动总持续时间

表 5

震 级	震中距 (公里)	地 基 土 类 别	总震动持续时间(秒)	$T_{S总土}$
				$T_{S总岩}$
4.6	33.0	土	11	1.1
	27.5	石 灰 岩	10	
5.0	18.0	土	17	3.4
	12.0	石 灰 岩	5	
5.0	4.25	土	18	6.0
	7.0	石 灰 岩	3	
5.1	17.0	土	24	8.0
	12.0	石 灰 岩	3	
5.1	25.0	土	17	2.8
	20.5	石 灰 岩	6	
5.5	22.0	土	16	1.07
	16.0	石 灰 岩	15	
5.5	22.0	土	16	1.07
	15.0	石 灰 岩	15	
6.1	35.0	土	11	0.69
	32.5	石 灰 岩	16	
6.2	55.5	土	12	0.71
	51.0	石 灰 岩	17	
7.8	405	土	150	0.83
	393	石 灰 岩	180	

这种在近震中 (小于30公里) 区, 土层震动总持续时间大于基岩地基, 而在远离 (大于30公里) 震中区震动总持续时间土层小于基岩上的现象, 是否为普遍规律和产生这种现象的原因, 尚需今后进一步研究探讨。

对于建筑物的破坏, 总震动持续时间虽然可能是一个因素, 但对破坏最起作用的还是相当最大加速度 $\frac{1}{3}$ 以上的, 即 $\Delta T_{a_{max} \frac{1}{3}}$ 的持续时间。因为在这段时间内, 地震加速度大, 持续时间再长, 对建筑物的破坏作用则显得更明显。据国外资料, 软弱场地土上的强震动持续时间平均比中等场地土上长5—6秒, 而比坚硬场地土上长10—12秒。这是建于松软土层地基上建筑物震害较重的原因之一。

二、地震地面运动特征与震害的关系

1. 最大加速度与震害

由表 6 可知：烈度高的地区最大加速度值也是偏高的，表明地震烈度与最大加速度间是有一定关系的。但与甘肃文县记录到的 7.2 级地震最大加速度与烈度表 7 对比可知，在相同烈度区其加速度值相差又是悬殊的，说明其离散性是较大的。看来尽管最大加速度与烈度间虽有一定相关性，但不能仅凭这一个指标来对应烈度。

唐山地震烈度与最大加速度间关系

表 6

震 级	地 点	震 中 距 (公 里)	最大加速度 (伽)		烈度(度)
			水平向	垂直向	
7.8	天 津 市	99	80—100	80—100	7
	北 京 市	160±	47—60	30—32	6
	河 北 省 黄 壁 庄	370	15	10	4
	河 北 省 隆 尧 县	405	16	10	4

相同烈度区地面加速度间的差异

表 7

日 期	震 级	地 点	震 中 距 (公 里)	地 面 最 大 加 速 度 (伽)				烈 度
				水平向最大 加速度 (伽)	主震周期 (秒)	垂直向最大 加速度 (伽)	主震周期 (秒)	
1976.7.28	7.8	北京市东城区	160	60	0.6	32	0.5	6
1976.8.16	7.2	甘肃省文县	60	142	0.13	117.8	0.07	
1976.7.18	7.8	天 津 市	99	80—100	0.3—0.4	80—100	0.2—0.3	7
1976.8.9	6.2	河北省迁西县	19.5	163	0.07	26.5	0.07	

2. 加速度主震周期与震害

许多震例表明，震害程度不完全取决于加速度的大小。随着震中距的变远长周期成分增大，若地基土质较松软时，主震周期增长尤为明显。虽然加速度值经衰减已可能不大，但长周期波仍会使某些建筑物破坏。这方面的典型震例很多，如：

1954年12月16日美国内华达州地震，1964年阿拉斯加地震，1957年和1962年墨西哥（瓦哈尔）地震等等，这种震害特征都已为大家所熟悉。

我国海城地震和唐山地震时都有这方面的震例。如唐山地震时，在汉沽 9 度区，有 53 座砖烟囱建于Ⅲ类松软土上，几乎全部倒塌。据在 9 度区统计的 9 个砖筒水塔，两个建于Ⅰ、Ⅱ类地基土上的，仅遭到中等或严重破坏，建于Ⅲ类土上的 7 个全部倒塌，震害之重不低于唐山的 10 度区。示出在Ⅲ类地基土上的长周期建筑物震害衰减十分缓慢。其主要原因是软弱Ⅲ类地基土主震周期长，对长周期结构物的地震反应大，两者共振效应所造成的。

由此可见,结构物所受的地震力不单纯与地面加速度有关,而且与地面运动的主要周期(频谱)有密切关系。而主震周期又与土质条件及震中距离两个因素有关。目前我国抗震规范中规定的不同土质条件采用不同的谱曲线,只考虑了土质条件对地面运动主要周期的影响,但对于震中距的不同而表现出来的地面运动特征的差异未予考虑。这个问题需有待进一步研究解决,使之更加完善。

3. 持续时间与震害

地震波造成建筑物破坏的主要因素,虽然主要是最大加速度的大小及其主震周期,即震动的频谱特性等。但地震动的较大加速度的持续时间也是个重要因素。

如:1966年加利福尼亚的帕克费尔德地震,最大加速度达 $0.5g$ 。但因其持续时间短,所以建筑物几乎没有造成灾害。

在日本地震时也有这方面的震例,如表9。

震动持续时间的长短对震害的影响资料

表9

日期	震级	震中位置	观测台站	最大加速度 (g)	台站的烈度 (JMA表)	持续时间(秒)	
						较大加速度的	总的
1968.5.16	7.9	十胜冲	八户	No.23(Eo.18)	V	11	40
1970.1.21	6.8	日高山脉	广尾	Eo.44(No.37)	V	3.5	15

我国唐山7.8级地震时,震害严重、范围甚广,虽与震级较大有关外,与较大加速度的持续时间较长可能也有关,表10。

震动持续时间与震害程度关系

表10

日期	震级	震中位置	震中距 (公里)	观测地点	最大水平面 加速度 (伽)	烈度 (变)	持续时间(秒)	
							较大加速度的	总的
1976.7.28	7.8	河北唐山	160	北京城区	60	6		130
		河北唐山	153	北京密云水库	53	6	35	114
1976.8.16	7.2	四川松潘	60	甘肃文县	142	6	10	60
1976.8.22	6.7	四川松潘	55	甘肃文县	78	5		60

这是因为长时间的重复震动,轻微的非弹性破坏是积累的,即使最初看不出裂缝,经过反复挠曲也可能最后导致严重的破坏或倒塌。

综上所述,从地面运动特征与震害间的关系知道,强地震时建筑物震害程度,不仅与地震强度有关,而且密切的与地面运动的各种特征,以及结构物的类型(动力特征)有关。即地震时造成地面建筑物的破坏,取决于地震——场地条件——建筑物强度与结构类型三个方面的互相作用。因此需要综合考虑震害产生的原因。

三、结 语

1. 根据我国现有部分中、强地震强震观测资料, 地震时地面运动参数与震级、震中距的关系, 可归结如下:

(1) 除极震区外, 加速度峰值随震级加大而增加。随震中距增加而衰减。岩石地基加速度衰减比土质地基衰减为快。远震区, 基岩上加速度一般小于土层上的加速度。

(2) 加速度主震周期, 无论土层上还是基岩上, 都是随震中距增加而加长。土层上主震周期总是长于基岩上的主震周期, 土层随其柔性增加而增长。

(3) 主震周期与加速度之间有一定关系。一般来说, 相对于较大加速度的主震周期较短。

(4) 一般说地震动的持续时间随震中距增大而增加。

2. 震害与地震地面的运动参数关系是比较复杂的。加速度峰值较大, 一般震害较重, 有着正相关的关系, 但离散性大。这说明加速度峰值不是决定震害的唯一指标, 而必须全面考虑各种地面运动参数对震害的影响。在相同或相近的加速度峰值的条件下, 主震周期长时, 一般震害较重。同时震动持续时间对震害也有重要影响。

参 考 文 献

- [1] H. B. Seed, R. Muraka, J. Lysmer, I. M. Idriss: Relationships of Maximum Acceleration, Maximum Velocity, Distance from Source and Local Site Conditions for Moderately Strong Earthquakes BSSA Vol. 66, № 4. 1976
- [2] 金井清、平能金太郎等:
松代地区的强震观测结果 科学技术参考资料(国外地震资料) 1973. 第6期
- [3] 国家地震局兰州地震研究所:
1976年松潘——平武地震强震加速度记录频谱分析 1978
- [4] 海城地震工作队:
辽宁海城7.3级地震初步总结、四. 抗震 1975
- [5] 中国科学院哈尔滨工程力学研究所:
唐山7.8级地震强震观测初步总结 1978