西北地震学报

1986年 6月 NORTHWESTERN SEISMOLOGICAL JOURNAL June, 1986

永登黄土地区爆破地震动近场 效应的研究

林学文

(国家地震局兰州地震研究所)

一.前 言

不同场地条件下的强震记录,不仅对开展地震地面运动研究很重要,而且对地震工程和 工程抗震等方面的研究也极为重要。但是,由于破坏性地震发生的机率及当前地震预报的水 平所限,要取得理想的强震记录很困难,尤其是取得主震的近场记录更为困难。因此利用人工 手段模拟天然地震,从而取得强震地面运动的各种资料,是一种比较好的办法。虽然人工地 震与天然地震有差别,但作为震动源来模拟地面运动,却是一种较好的手段。这种方法具有 模拟在各种条件下不同震中距地面运动效应的方便条件,同时还有记录不丢头等优点。所以 开展人工地震与天然地震的地面运动规律研究,是工程地震和抗震工程研究的一个重要方 面。

我们利用"七七"工程在西北湿陷性黄土地区的爆破实验,进行了黄土地区加速变衰减 场及地形地貌条件对近场地面运动影响的观测,同时对爆破前后的地面脉动与土的物理力学 性质作了对比,取得了很好的结果。

二.现场观测

1.观测场地

实验现场位于甘肃省永登县境内,该区处于西北黄土高原的西部,属于臬兰峁区。区内 黄土梁峁广泛发育,实验场地梁峁连绵,冲沟交错。一般梁峁其顶部狭窄、平坦,宽仅3-5 米,地形高差不大,均在100米之内,但坡度较陡,多在30°-45°之间,沟底较开阔平坦。

该区地表多被黄土复盖,但在其下部仍发育有NWW 向构造裂隙,充分显示了本地区第 四纪以来新构造运动的活跃性和继承性。本地区的黄土,均系第四系黄土和黄土状土,厚度 达45—50米,底部为砂卵砾石层,其厚度不详。各层的确切时代不明。有关黄土的物理力学 性质及地层剖面参见文献1)。这一带地下水位较深,爆破场地范围内,50米深处尚未见到

¹⁾冶金工业部西安勘探公司,七七工程永登试验场地工程地质勘探报告,1981.

地下水。

2.爆破源

该工程是某系统系列实验的一部分。药室呈长条状,所用炸药为袋装片状"TNT", 外加导爆剂。折合"TNT"药量,102炮为64.8吨,103炮为153.6吨。药室不充填,采用电 雷管一次起爆。

3. 观测仪器

加速度观测使用的是"SC-18"和"SC-16"型光线记录示 波器,用"RPS"和"R ZS"型速度摆作拾震器,配用Fc6-400振子。位移观 测使用的是"701"摆,使用的"SC-18"型光线记录示波器记录,配用 Fc6-400振子。位移观测使用的是"701-5"型放大器。

4.测线及测点布设

为了进行爆破作用下湿陷性黄土自由场加速度的衰减规律和地形地貌条件对爆破近场地 震动影响的观测分析与对比研究,选择了相对比较开阔平坦,且坡降较小的沟底及不同方向 的山坡、山梁布设了测线和测点。同时又在102炮的1与2测点之间,进行了爆破前后地脉动 观测,並在2.9米深处取了原状土,以进行爆破前后湿陷性黄土的物理力学性能的对比试验。 在每个加速度观测点上布设了垂直向和水平径向两种拾震器,地面脉动观测点除了垂直向外, 还有两个水平向,其中一个与沟谷平行(即E—W向),另一个垂直于沟谷,即与爆破观测 的加速度径向(N—S向)一致(见图1)。



a.103炮测点布设及测线剖面图 b.102炮测点布设及测线剖面图

三、数据的处理与分析

1.数据处理

在数据处理过程中,以记录分格线为基线进行读数。全部数据进行了电算分析,所用程序同文献〔1〕。功率谱程序由本所邵世勤同志编制。

2.爆破地震动的近场效应

通过对上述资料的初步分析,可以得出:

(1)随爆心距的增加,在同一测点位置上的垂直分量与水平分量加速度最大全幅值

(或最大半幅)的变化是不同的。在一定爆心距范围内,垂直分量大于水平分量,超过这个范围之后,则水平分量大于垂直分量。例如在距102炮爆心75米处,加速度的垂直分量远大于水平分量,可是在距爆心95米以外,加速度的水平分量则大于垂直分量(见表1)。

表 1

不同爆心距垂直向与水平向加速度比值的变化

爆心距(m)	最大加速度半幅值垂直向/水平向	最大加速度全幅值垂直向/水平向
75	2.60	2.30
95	0.66	0.58
254	0.68	0.91

上述事实说明,随爆心距的增加,加速度的水平分量比垂直分量衰减慢,也可以说在一 定爆心距范围内,地面运动加速度是以垂直分量为主(对102炮来说,此范围是90米左右), 随爆心距增加,垂直分量急剧衰减。爆破作用近场地面运动这个特点,与湿陷性黄土强夯地 面运动的衰减规律是一致的〔2〕,而且也与破坏性地震的极震区内以垂直地震力为主的大量 宏观震害现象是一致的。

(2)地形对爆破作用近场地面运动的 影 响极为明显(图2、表3)。对102炮,以测 点8-11为标准与5-7测点作对比,对103炮,亦以8-11点为标准(图1、2)。相对 于其他各剖面,可以认为测点8-11是在相对平坦的地形条件下,爆破地震动加速度的近场 正常衰减曲线,表2例出了相对于标准衰减曲线,在不同爆心距和不同高程上各测点的地震 动加速度增值。这与天然地震的记录(8)、2)、8)也是一致的。

爆破地震动加速度(全幅值)随高程的变化

测点号	爆心距	高程差	加速度增值(gal)				
	(m)	(m)	水平径向	垂直向			
"102"—5	148	55	80	160			
"102"—6	219	70	640	360			
"102" — 7	253	36	-40*	- 40			
"103" — 2	250	20	110	60			
"103" — 3	286	2	- 80	- 10			
"103" — 5	246	40	80	30			
"103" — 7	306	10	110	20			

•负值表示降低。

由表 2 和图 1、 2 还可以看出, 103炮的点 1 正位于山体正前方的山 根部, 测 点 3 位于 山体正后方的山根部。这两个测点均位于地震波传播径向的同一直线上,而且高程相同(均 较爆心高 2 米),两点水平距64米。测点 1 的加速度值和地震动加速度正常衰减曲线相比,

²⁾国家地震局、辽宁省海城地震工作队,辽宁海城7.3级地震初步总结(抗震部分),1975.

⁸⁾郭玉学、于双久等,海城、营口地区的强震记录分析,中国科学院工程力学研究所地震工程研究报告,1975,

4000

1000

60

gal

120



150

10352

200



200

350



水平向增高130伽,垂直向增高320伽,而测点3的加速度值却降低了许多。102炮测点3与 测点7所处的地貌位置与103炮测点1和测点3相似,同样也有类似于103炮的情况。综合上 述现象,可以认为在地震波径向迎坡面的山根或地形突变处,地震波的反射作用极为显著, 特别是垂直分量非常突出。但在地震波径向的顺坡面,地震动的垂直分量却衰减很多。

(3) 随爆心距和高程的增加, 地震加速度周期 增长。以102炮为例, 在 测 点 8 — 11 (即标准剖面)表现得很明显,而且在相同爆心距不同地形高程各点的地震动周期亦不相 同,见表3及图3。

对比组	占位	爆 心 距	高程	高差	J	周 期	(Sec)			
	(m)	(m)	(m)	垂直向	差值	水平向	差值			
T	3	95	2057.3	6.7	0.28	0.01	0.26	0.03		
1	2	98	2064.0	0,7	0.29	0.01	0.29			
1	10	185	2047.3	57 5			0.32			
ц	5	184	2104.8	57.5	0.33		0.34	0.02		
11	11	254	2042.6	38.4	0.36		0.35	0.11		
AL	7	253	2081.0		0.42	0.06	0.46	0.11		

爆破地震动周期随爆心距及高程的变化(102) 表 3



图 3 爆破地震动周期随距离与高程的变化

Fig. 3 The variation of period of ground tremors with the distance and elevation

(4)爆破之后地面脉动的幅值及周期均较爆前大为降低。我们在102炮测点1、2之间(即爆心距85米处)作了地面脉动的爆破前后对比,其最大幅值列于表4。由表4清楚地看出,爆破后地面脉动幅值降低很多,爆破时该点的地震加速度(全幅值)水平向是1000伽(±),垂直向是2000伽(±)。与已有的爆破地震动破坏程度的对应关系见文献〔4〕。

观测方向	爆 前Amax (µ)	爆 后Amax (µ)	爆 后/爆 前
垂直向	0.389	0.094	0.24
顺 沟(E—W)	0.246	0.101	0.41
垂直沟(S-N)	0.169	0.042	0.25

爆破前后脉动最大幅值的变化 表4

表 4 及对该处爆破前后湿陷性黄土物理力学性质的分析数据充分证明,爆破时土体结构 遭受到破坏,因此使其物理力学性质降低。爆破后取土样时曾发现在平行于地震波径向的坑 壁上,有近垂直的细微裂隙对称出现,且与其底部贯通。这个现象说明该处土体发生严重破 坏,这是引起爆破后地面脉动幅值及周期变化的根本原因所在。

在编制"兰州市场地抗震区划图"时,曾对兰州市湿陷性黄土的动力参数作过测定,共 取了八个土样,其应力一应变关系见文献〔5〕。经对比,可以清楚地看出兰州黄土较永登 黄土要好。

3.频谱分析

现将102、103两炮记录的富氏谱、功率谱和加速度反应谱的最大谱幅值及其出现的位置 列于表 5 。爆破前后地面脉动的富氏谱及功率谱最大谱幅值和出现的相对位置列于表 6 ,其 频谱特性见图 4 、 5 、 6 。

由表5、6及图4、5、6可以看得出,爆破地震动近场地面运动的频谱特点是:

(1)随高程的增加, 谱幅值增加, 频率降低。

(2)随爆心距的增加, 谱幅值增大, 其峰值频率移向低频段。

(3)爆破后与爆破前相比,地面脉动的谱形态相似,峰值区段谐波成分降低,峰值更 加突出,水平分量呈双峰值出现,最大谱幅值降低,对应频率移向低频段。

西北地震学报

第8卷

表 5

最大谱幅值及其相应频率

	مر ماد بلد			最大朝	国值及								 点				
炮号	语类型	方	问	位	置	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
				幅	億		1.88	2.93	2.52	13.51	5.06	3.03	1.29	1.58		2.78	
	窗田谱	뽀	E	频	率		2.73	2.30	3.32	2.54	2.54	2.15	3.32	2.54		1.95	
		+	.514	幅	值	1.64	1.13	1.61	3.36	12.86	31.59	4.29	1.54	4.76	1.53	6.71	
				频	寜	2.73	2.93	3.52	2.93	2.34	2.93	2.15	3.91	4.88	0.20	2.73	
		Ŧ		幅	值		3.54	5.29	6.34	182.44	25.61	9.15	1.66	2.49		7.71	
"102"	功塞谱	16	31	频	率		2.73	2.30	3.32	2.54	2.54	2.15	3.32	2.54		1.95	
炮		*	.74	幅	值	2.69	1.72	2.58	11.26	165.25	997.92	18.40	2.38	22.63	2.33	40.01	
			1	频	率	2.73	2.93	3.52	2.93	2.34	2.93	2.15	3.91	4.88	0.195	2.73	
		56	百	幅	值		2.41	2.01	2.82	2.86	2.10	2.10	2.18	1.63		1.53	
	反应谱	24	.8.	周	期		0.28	0.08	0.31	0.08	0.19	0.19	0.28	0.05		0.16	
	~ <u></u> #4	+	312	幅	值	1.56	2.11	2.56	3.53	1.99	2.69	2.78	2.02	1.42	1.50	4.39	
.`			'	周	搠	0.22	0.10	0.10	0.33	0.13	0.35	0.13	0.24	0.04	0.04	0.33	
		4	垂	卣		值	0.53	0.96	0.71		2.23	0.63	2.04	0.94	0.84	0.85	1.81
	富氏谐			频	率	1.56	3.71	2.15		0.20	1.76	1.95	2.34	3.13	2.34	1.76	
		*	水平	督	值	1.25		1.66	2.52	3.73	4.05	7.84	·····		1.79	4.05	
	• .			颊	率	2.93		2.54	2.54	2.73	2.54	2.54		•	2.93	2.54	
		乗	宙	幅	值	0.28	0.93	0.51	 	4.97	0.37	4.14	0.89	0.71	0.76	3.27	
"103"	功率谱			频	率	1.56	3.71	2.15		0.20	1.76	1.95	2.34	3.13	2.34	1.76	
炮		*	.5 1 2	幅	值	1.56		2.75	2.52	13.93	16.41	7.84			3.21	16.40	
		*		频	率	2.93		2.54	2.54	2.37	2.54	2.54			2.93	2.54	
		斩	ជ	幅	值	2.71	2.59	2.71		2.24	1.82	2.08	1.78	2.31	2.59	2.31	
	反应谱				捌	0.49	0.05	0.05		0.37	0.24	0.24	0.33	0.33	0.13	0.28	
		水	अट	幅	值	1.66		2.48	3.22	3.60	3.83	3.07			2.67	2.60	
			، سر مور	周	期	0.31		0.35	0.37	0.37	0.37	0.37			0.31	0.37	
表 6				102	炮前	后地面	面脉动	力最大	谱幅	直及其	相应	频率					

		垂直	向		水	平 向	
谱类型 时 问	te Mi	频率	顺	沟		直 沟	
	"%A 124.	(Hz)	幅值	频率(Hz)	幅值	频率(Hz)	
宫源氏	爆前	8.41	4.00	6.50	4.59	5.80	3.13
	爆后:	3.84	0.88	6.16	2.93	2.19	2.05
市家述	爆前	66.26	4.00	42.29	4.59	33.59	3.13
· 切平版	瀑后	14.75	0.88	37.91	2.93	4.80	2.05





Fig. 4 The spectrum curve of No.102 blast of "七七" program







图5,七七工程103炮谱曲线

Fig. 5 The analysis on spectrum of No.103 blast of "七七" program



图 6 爆破前后地面脉动频谱分析 Fig.6 The analysis on frequency spectrum of ground pulsation before and after the blast excitation in Yongdeng

四.结 论

在国内外关于爆破地震动效应问题的研 究多数是在基岩地区进行的,有关湿陷性黄 土地区爆破作用近场地面运动效应的研究至 今尚未开展。本文是对湿陷性黄土地区爆破 地震动近场效应研究的一部分。概括"七七" 工程永登现场爆破的观测结果,可以得出:

1.爆破地震动在一定的近场范围内,地 面运动加速度的垂直分量非常强烈,但随爆 心距的增加衰减迅速,因而使水平分量成为 主要成分。

2.随爆心距增加,爆破近场地面运动加 速度幅值降低,谱幅值增大,频率降低;随 高程的增加,爆破近场地面运动加速度幅值 与谱幅值增大,频率降低。

3.在爆破地震动近场作用中,地形地貌 条件对地面运动的影响极为显著。位于地震 波径向迎坡面地貌突变处,地面运动加剧, 垂直分量突出,而位于地震波径。向的顺坡 面,地面运动幅值降低,尤以垂直分量为明显。

4.爆破地面运动强度达到一定程度时,湿陷性黄土结构发生破坏,土体物理力学性质降低。在垂直分量加速度达到2000伽、水平分量加速度达到1000伽左右时,爆破前后湿陷性黄土的动弹性模量及阻尼比的变化如表7。事实上土体结构发生破坏的地震力大小远低于上述 值,即低于"中国地震烈度表(1980)"的10°。要特别指出的是,天然地震时土体结构发

-	-
- T D	- 1
-	

爆破前后黄土动弹性模量及阻尼比的变化

样组	时间	Emax (kg/cm)	E (kg/cm)	E (kg/cm)	$\overline{\lambda}$
	爆前均值	1515.0	792.5	550.5	0.1565
A	爆后均值	1285.0	683.5	543.0	0.1625
	□ 燥后均值 燥前均值 (%)	0.85	0.86	0.99	1.04*
	爆前均值	720.0	683.0	510.0	0.187
В	爆后均值	爆后均值 649.5		439.0	0.156
	<u>爆后均值</u> (%) 爆前均值	0.90	0.77	0.86	0.83

*---λ·值极不稳定

生破坏的地震力远低于爆破时土体结构产生破坏的地震力,这可能是黄土地区地震时震害加 重的主要原因之一。

5.爆破后由于湿陷性黄土物理力学性质降低,则使地面脉动幅值及谱幅值明显下降,频 率移向低频端,但谱形态相似。

参加工作的还有左宝林同志。本文中土的物理力学性质分析由段汝文、张振中、王俊、 李兰等同志完成的。数据分析程序由邵世勤同志编制的。特此致谢。

参考文献

(1)林学文,1976年8月松潘地震强震与脉动频谱特性的分析,西北地混学报,Vol.3,
№ 2,1981.

〔2〕林学文,湿陷性黄土的强夯震动观测,西北地震学报, Vol.4, №2, 1982.

〔3〕中国科学院工程力学所、河北省地震局抗震组,唐山地震震害调查初步总结,地震出版社,1978.

〔4〕张雪良、黄树棠,爆破地震效应,地震出版社,1981.

[5]段汝文,兰州黄土动力特性的实验研究,西北地震学报, Vol.1, №2, 1979.

STUDY ON GROUND MOTION NEAR SOURCE BY BLAST EXCITATION IN YONGDENG LOESS REGION

Lin Xuewen

(Lanzhou Seismological Institute of Lanzhou, State seismological Bureau)

Abstract

Study on ground motion by blast excitation in the bedrock region has been carried out in China, but the similar study not in the loess regions. Up to now, we have not any data near source about earthquake effects during blast in the loess regions. Using a blast work, the decay regularity of ground motion and the effects of topography and geomorphy on the ground motion were studied in this paper. The comparative study on the ground microtremors characteristic and loess soil properties before and after the blast was carried out too.

The results were obtained that the blast ground motion decay regularity is very similar to that of the natural earthquake ground motion, and if the acceleration develops up to some value, the loess will be failure, and that acceleration(peak—peak) is approximatively equal to the intensity grade X (New Intensity Scale of China). The comparative observation at the time after and before blast excitation indicated that the peak value of the spactra were similar, and the dominant period of the spactra ware increased.