

兰州市区地面脉动特征

孙 崇 绍

(兰州地震研究所)

摘 要

为了进行兰州市区的场地小区划,在市区75个点上做了地面脉动观测。

观测表明,地面脉动具有明显的区域性。市区不同地点的傅氏谱多少都有相似之处,多数谱峰值出现在0.3—0.45秒范围内。但是在兰州市的不同地段,谱形上也有一定的差别。根据谱形,可将市区划分为5个地区。由此可以想见,地面脉动特征取决于整个区域的综合自然条件,局部表土层的条件反居次要地位。

地面脉动的最大幅值显然取决于表层较软土层,如黄土、亚粘土、亚砂土等的厚度,这些软土层的厚度越大,地面脉动的最大幅值也就越大。

地面脉动观测结果可用之于场地土小区划分中去。

研究地面脉动(或称常时微动)是预告场地的地震危险性、预报震害和进行地震小区划的手段之一〔3.5〕。从地震工程学的要求来看,所谓脉动,主要指1—15赫芝的微震动,因为起破坏作用的强震波主要在这个频谱范围内。

为了对兰州市区的场地进行抗震划分,我们研究了兰州市区地面脉动特征。研究范围包括市区黄河两岸,西起岸门村,东至桑园峡口,长31公里、宽约5公里的兰州东、西盆地。观测点分布在黄河两岸的漫滩、I—IV阶地的各种场地土之上。测点大部分在自由地面,少数在地下结构物内。全市共有74个观测点,其平面位置见图1。

观测使用的仪器为:701拾振器、701—5型晶体管放大器、采用SC11—16示波器记录位移。701型拾振器的自振周期为0.85—1秒,仪器放大倍数曾于观测前后两次在中国科学院工程力学研究所强震观测中心进行了整机标定,性能稳定。整机放大倍数10—15万不等,通频带1—40赫芝以上。

引起地面脉动的因素有三方面:地表的自然因素(如风力、流水、海浪等),人类活动(如工业、交通工具)所引起的噪声,弱震、远震以及来自地球内部的地热、地磁、地电等短周期变化所引起的地面微小振动〔8〕。在城市,人类活动所引起的干扰——城市噪音——非常突出,而且各区的干扰强度有较大的差别,如兰州市中心至西站一带的城市噪音显然要

• 参加工作的还有:黄祖彭、张树清、左宝林、郑铁生、李藩文诸同志

比其他地区强，而安宁区由于远离主要的工业和繁华市区，干扰程度最轻。

不仅如此，由于各测点具体位置的差异、观测时间的差别、天气的变化等，每个点上的情况都有所不同，很难找出一个所谓“平均”的观测条件。为尽量避免条件的差异，排除外界干扰，观测一律选择了无风晴朗的天气，尽量避开附近较强的干扰源。白昼观测大多在上午9—12时，夜间观测时间在午夜0—2时。这样可以把得到的记录看作是平稳随机过程(图2)，便于抽样处理。

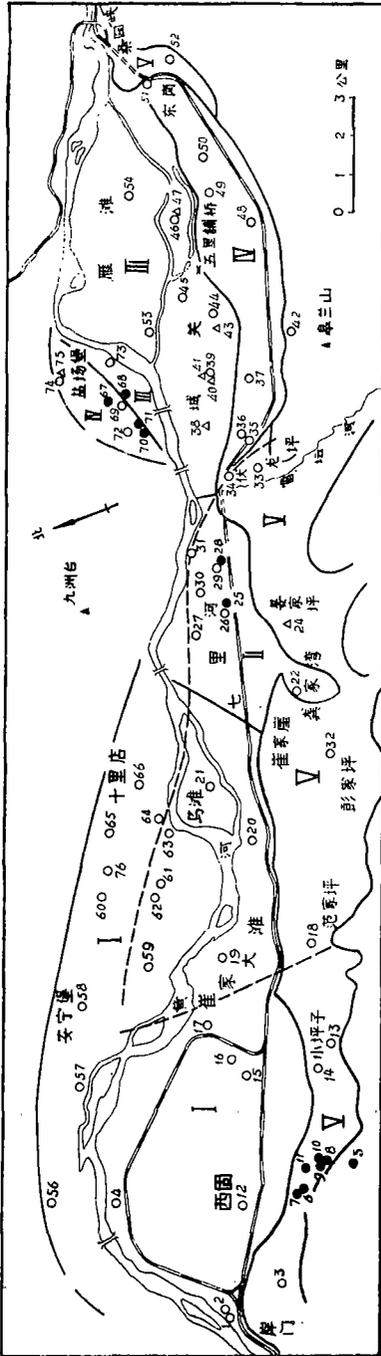


图1 兰州市区地面脉动测点位置图
 ○地面白昼测点, △地面夜间测点, 一——“七里河向斜”边界

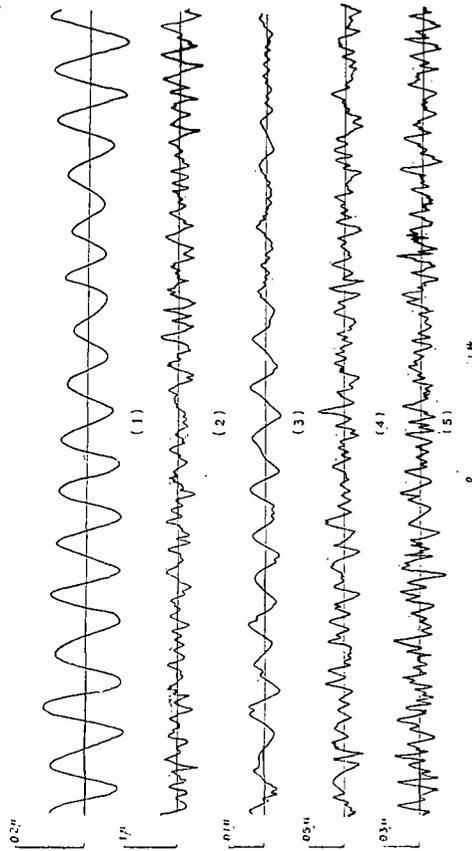


图2 部分脉动记录曲线
 (1) NO6 平洞内砂岩, 垂向; (2) NO27 水平(南北)向白昼; (3) NO41 垂向夜
 晚; (4) NO58 垂向白昼; (5) NO73 水平(东西)向, 白昼。

脉 动 幅 值

兰州市各自然区地面脉动最大幅值见表1。

兰州市各自然区地面脉动幅值(白昼观测数值) 表1

自然区域	地貌单元	观测次数	平均振幅(微米)	
			水平	垂直
比值				
西固(包括崔家崖一带)	白垩系河口群砂岩	1	$\frac{0.18}{0.10}$	1.8
	I级阶地, 卵石	1	$\frac{0.35}{0.10}$	3.5
	I-II级阶地面	6	$\frac{0.55}{0.31}$	1.8
安 宁	II级阶地面	11	$\frac{0.47}{0.22}$	2.1
七里河—城关五里铺桥以西	I-II级阶地面	9	$\frac{0.38}{0.32}$	1.2
东 岗	I级阶地面	4	$\frac{1.31}{0.87}$	1.5
盐 场 堡	I-II级阶地面	4	$\frac{0.22}{0.22}$	1.0
全 市 区	IV-V级高阶地面	9	$\frac{0.84}{0.44}$	1.9
全 市 区	河 滩	6	$\frac{0.21}{0.19}$	1.1

市区各点地面脉动的平均振幅相差达一个数量级之多。其中垂直向振幅0.1—0.87微米(μ), 水平向振幅0.13—1.40微米, 水平向的振幅平均是垂直向振幅的1.5—2倍, 但水平向中的东-西和南-北向振幅却无明显差别。若仅考虑市区坐落的主要地段(即黄河两岸的I、II级阶地), 则垂直向振幅为0.20—0.87微米, 水平向振幅为0.22—1.31微米。脉动幅值表现出以下几个特点和规律:

1. 表层土的厚度和性质对振幅有明显的影响。

兰州市区的主要部分坐落在黄河两岸的I、II级阶地上, 地表为中等密实的黄土或黄土状土, 下为卵砾石层和第三纪半胶结的砂岩、页岩*。其中黄土、黄土状土和下面的砂卵砾石层以及基岩之间的力学性质差异较大, 其厚度对脉动幅值有所影响。以各自然区而论, 土层较厚的地区(如东岗镇一带)脉动幅值较大, 垂向振幅可达0.8微米, 而黄土复盖最薄的河滩, 脉动幅值仅为阶地面上的 $\frac{1}{5}$ 左右, 如崔家大滩为0.13, 马滩为0.09—0.12, 七里河滩为0.33, 雁滩为0.08—0.14微米等等。

图3是脉动幅值与表土层厚度间的关系, 尽管各点的位置比较分散, 但幅值随着表层土

*关于兰州市区的地质情况参阅国家地震局兰州地震研究所区划抗震室:《兰州市区场地抗震区划图(初稿)说明》, 1978年

厚度的增加而加大的趋势是很清楚的。

脉动幅度随土层刚度的增大而减小，基岩小于卵石，卵石小于各类土。如西固水厂白垩

纪河口群砂岩上的脉动振幅为0.1(垂向)和0.18(水平向)微米，而同一地点卵石层上的脉动振幅分别为0.1、0.35微米，当然它们都小于附近各测点上黄土场地的脉动幅值。但是，由于外界条件比较复杂，尽管刚度有某种差异，但厚度不大、埋藏较深的淤泥质土，饱水软弱土层等，对脉动幅值却没有显著的影响。

2. 局部地形对脉动幅值有一定的影响。其中最明显的是孤突梁状地形前端(自由端)的振幅，较之后端与大山联结

处要大(表2)。这和强震时震害分布规律以及理论分析结果都是一致的〔5〕，与人工爆破时孤立山梁的反应也十分吻合〔1〕。

此外，局部突起地形的高处一般振幅较大，特别是水平向的振幅更是如此。由于地形的高处距市区较远，所受的干扰比下面小得多。因此，这里无法定量讨论地形的高度对脉动的影响。

3. 地下构筑物中的振动幅值明显比地面小(表3)，一般仅为地面脉动幅值的 $\frac{1}{4}$ — $\frac{1}{6}$ 。

4. 脉动幅值的昼夜变化较大。在东方红广场、天水路、段家滩、刘家坪、晏家坪—彭家坪五处进行了昼夜对比观测，结果见表4。

可见，白昼城市噪音可使脉动幅值增大两倍左右。但昼夜脉动的频谱特性变化不大。所以在排除了近处干扰后白昼观测到的脉动记录，可以反映该处的振动特性。

为了讨论兰州市地面脉动的面貌与水平，在图4中，我们将兰州市各测点所得的最大脉动幅值及其所对应的频率与世界上几处脉动谱曲线做了对比〔6〕。兰州市区白昼脉动幅值与莫斯科、基什涅夫等大、中城市相当，夜晚脉动幅值也在“城市平均噪声”的下限以上，与美国密执安州远离城市沉积岩上的水平相比，超出后者5倍以上，差不多是“大陆平均噪声”的10(夜晚)—100(白昼)倍。由此看来，兰州市区脉动幅值较高，噪音大、干扰强。

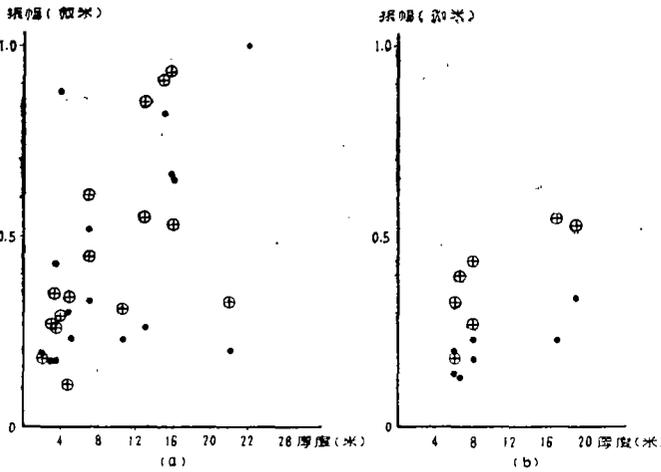


图3 地面脉动振幅与表层土的厚度间的关系
(a) 安宁以外的其他地区 (b) 安宁区

孤突梁状地形前后端脉动幅值的对比 表2

地点	测点位置	脉动振幅(微米)	
		垂直	水 平
小坪子	小坪子七队场一后端	0.13	0.15—0.20
	小坪子二队场一前端	0.34	0.75
伏龙坪	伏龙坪中学一后端	0.36	0.50
	望远坪粮站一前端	0.64	0.70

• 参见兰州地震大队抗震中队《地形条件对震害影响问题的理论分析和探讨》，1975, 11

兰州市区地下构筑物中的脉动幅值

表 3

点 号	距地面深度(米)	土 类	脉动幅值(微米)		备 注	
			垂 直	水 平		
5 (平洞)	45—50 (距洞口100米)	黄土(Q ₂)	0.39	0.18	附近,地面: 大坪(N ₈) 垂直:0.73(微米) 水平:0.93(微米) 有机厂(N ₁₂) 垂直0.66(微米) 水平0.93(微米)	
6		砂岩(N ₂)	0.10	0.10		
7		卵石(Ⅱ级阶地)	0.07	0.12		
8		砂页岩(N ₂)	0.10			
9		55—60(距洞口180 ~190米)	卵石(Ⅳ级阶地)	0.11		0.14
10			黄土(Q ₁ ³)	0.14		0.05
11	~40(距洞口50米)	黄土(Q ₈ ³)	0.04			
25	12	黄土(Q ₄)	0.46	0.36—0.53	地面,垂直:0.65 水平:0.47—0.58	
28	6	黄土(Q ₄)	0.19	0.15—0.46	地面,垂直0.20 水平0.32	
43 (平洞)	距洞口约200米	粘土岩(N ₂)	0.05			
67	14	黄土(Q ₄)	0.04	0.12	地面,垂直:0.04 水平:0.14	
68		黄土(Q ₄)		0.05		
70 (平洞)	距洞口100米	卵石(Ⅰ级阶地)	0.05	0.05		

昼夜脉动振幅对比

表 4

测 点 位 置	测点编号	地貌单元	脉动振幅(微米)	
			白昼 —— 夜晚 比值	
			垂 直	水 平
东方红广场	39, 40, 41	Ⅰ级阶地	$\frac{0.17}{0.07} 2.6$	$\frac{0.18}{0.07} 2.6$
燃化局 } (夜)	43	Ⅰ级阶地	$\frac{0.12}{0.03-0.06} 2 \sim 4$	$\frac{0.27}{0.12-0.16} 1.7 \sim 2.3$
科小 } (昼)	45			
兰大 } (昼)	44			
财货学校	46, 47	Ⅰ级阶地	$\frac{0.20}{0.12} 1.7$	$\frac{0.22}{0.11} 2.0$
刘家坪	74, 75	Ⅱ级阶地		$\frac{0.24}{0.07} 3.4$
晏家坪(夜)	24	Ⅳ级阶地	$\frac{0.27}{0.05} 5.4$	0.10
彭家坪(昼)	32			

脉动频谱特征

对于各测点所得的脉动记录,采用快速富氏变换方法(FFT法)*进行了谐波分析,FFT法分析结果见附图。由于各测点三分相记录的Fourier谱形一般很相似,故附图中只选用垂

本所邵世勤何蕴如等同志提供了FFT法计算程序,并对计算作了具体指导,特致谢意——笔者

直向的分析结果, 仅在谱形差别较大的地点同时画出了水平向脉动的Fourier谱。

根据各测点的脉动谱形, 可将兰州市分为五个区域。

I 区 龚家湾—土门墩以西的广大地区, 主要包括西固及安宁两个自然区。这里是黄河的 I、II 级阶地, 地质条件较单一, 土质均匀, 城市噪音较小。地面脉动的 Fourier 谱形状简单, 在 $T=0.43$ 秒 (2.34 赫芝) 处有十分突出而尖锐的峰值, 有时收到的记录几乎是简谐振动曲线 (图 2 (a))。本区东部陈官营、马滩、十里店一带, $T=0.25$ 秒 (4 赫芝) 左右, 常有幅度较小的次一级峰值出现。这可能和地表土层含砂卵石较多、刚度较大有关 (见附图中 №17、19、20、21)。两侧阶地后缘 $T=0.1-0.2$ 秒处, 有另一幅度较小的峰值出现 (附图 №16、57、58、60)。

然而, “七里河向斜” 的西半部恰在本区东半部通过 (图 1), 地质构造上这一明显的界线在地面脉动的频谱特性上几乎毫无反应, 比较附图中的 №17、19、20、21、64、65 三组谱曲线就可得知。地质上的分界线并不是振动特性的界线。很可能, 地面脉动特性受更大范围的、区域条件的控制。

II 区 龚家湾—土门墩以东至雷坛河口。包括黄河的 I、II 级阶地以及相当 IV 级阶地高度的黄峪沟洪积扇。市区主要在 I 级阶地上。由于这一带淤泥质土的分布较广, 复盖土层厚度较大, 城市噪音的干扰很强, 所以这一区域地面脉动 Fourier 谱的形状最复杂。大体上有两处明显的峰值, 一在 0.4—0.45 秒处, 一在 0.08—0.12 秒处。后者显然与城市噪音有关。凡是脉动幅值较大的测点 (如 22、27、29), 这一峰值的幅度都超过 0.4—0.45 秒峰值。由于土层较软弱, 故 Fourier 谱上的峰带加宽变钝, 直到 0.6 秒

处, 谱幅值才降下来。而 0.6 秒以上的低频部分也相应较高, 远不象西固、安宁一带在 $T=0.5$ 秒以后就骤然衰减下来。

III 区 城关—盐场区, 包括兰州东盆地南北两岸靠近黄河部分, 以及雁滩—骆驼滩一大

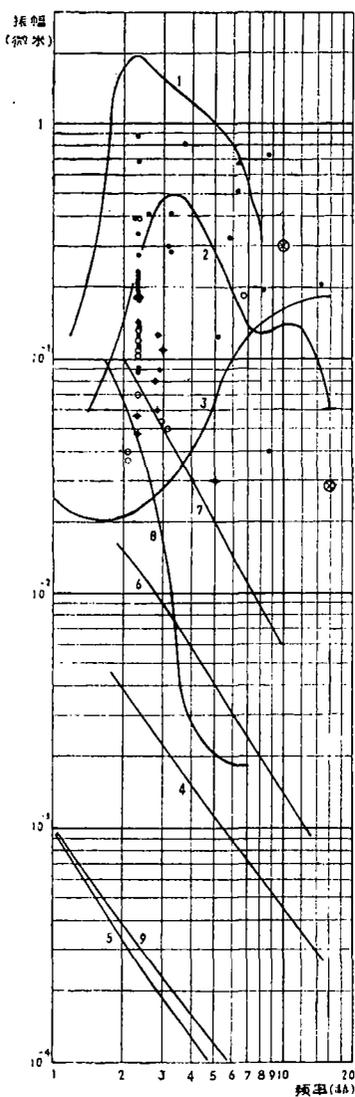


图 4 兰州市区与其他地区

地面脉动频谱对比

兰州测点 ● 白昼地面 + 夜半地面 ○ 白昼
地下 ⊕ 城市平均噪声

1. 基什涅夫 2. 莫斯科 3. 乌兰巴托 4. 大陆平均噪声
5. 大陆最小噪声 6. 密执安州 Ann-Arbor 距城市 9 公里沉积岩上 (早上观测)
7. 海洋噪声 8. 太平洋底阿胡鸟以东 800 公里水深 5200 米
9. 北冰洋底 $\varphi = 81^{\circ}50'$ $\lambda = 172^{\circ}51'$ 水深 2600 米

片滩地。这里地表黄土状土的厚度约6—8米，下为卵石层及基岩。在Fourier谱上仍表现为单一的峰值， $T = 0.4$ 秒左右（2.5赫芝），但峰值不如I区那样突出。东部在 $T = 0.2$ 秒处有次一级峰值出现。

IV区 兰州东盆地南北两山山前狭长地带，黄河南岸向东延伸包括了五里铺桥以东的东岗镇地区。这里地面脉动的Fourier谱上也有两个突出的峰点： $T = 0.11—0.18$ 秒以及 $T = 0.35—0.040$ 秒。但是这里高频峰的幅值较大，尤其在东岗一带更是如此。这一区地处山前，地表普遍有一层洪积成因、较密实的土层，厚十几到二十几米；这里城市噪音也较大，地表较硬的土层对高频振动反应较强，形成了突出的短周期峰值。

V区 黄河南岸的高坪，即IV、V级阶地。这里黄土复盖层30—50米厚，其中有10—20米厚的风成黄土。地面脉动的Fourier谱型和第I区，即西固、安宁区很接近， $T = 0.4—0.43$ 秒处具有突出的单峰。由于高阶地离市区较远，受城市干扰比其他区小，谱形单一，疏松的风成黄土在脉动特性上并没有见到什么反应。

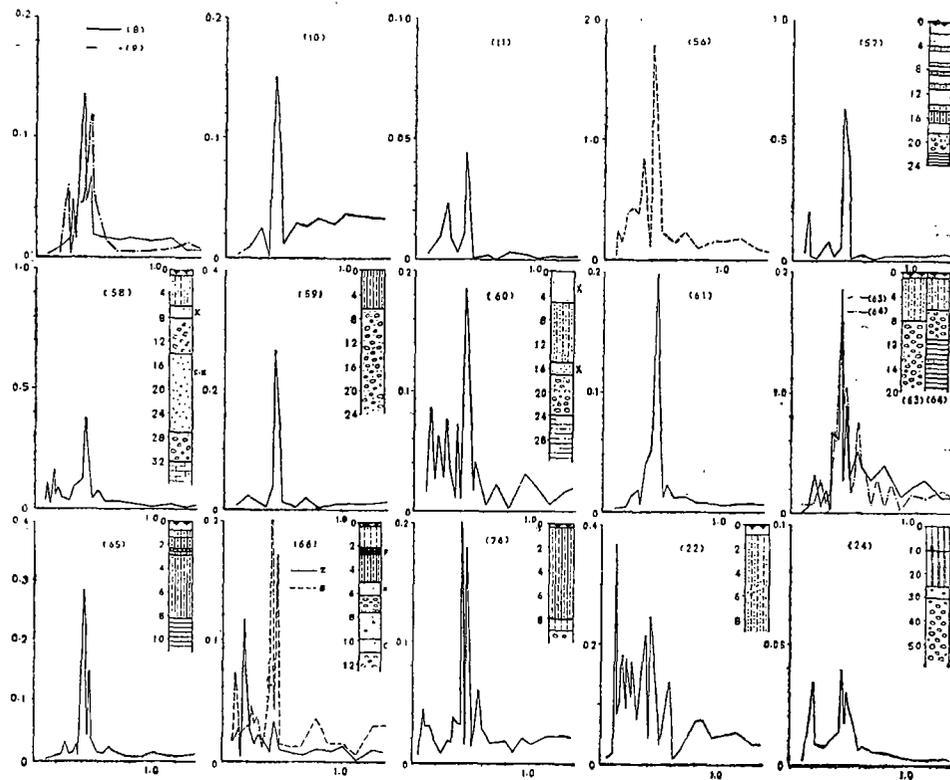
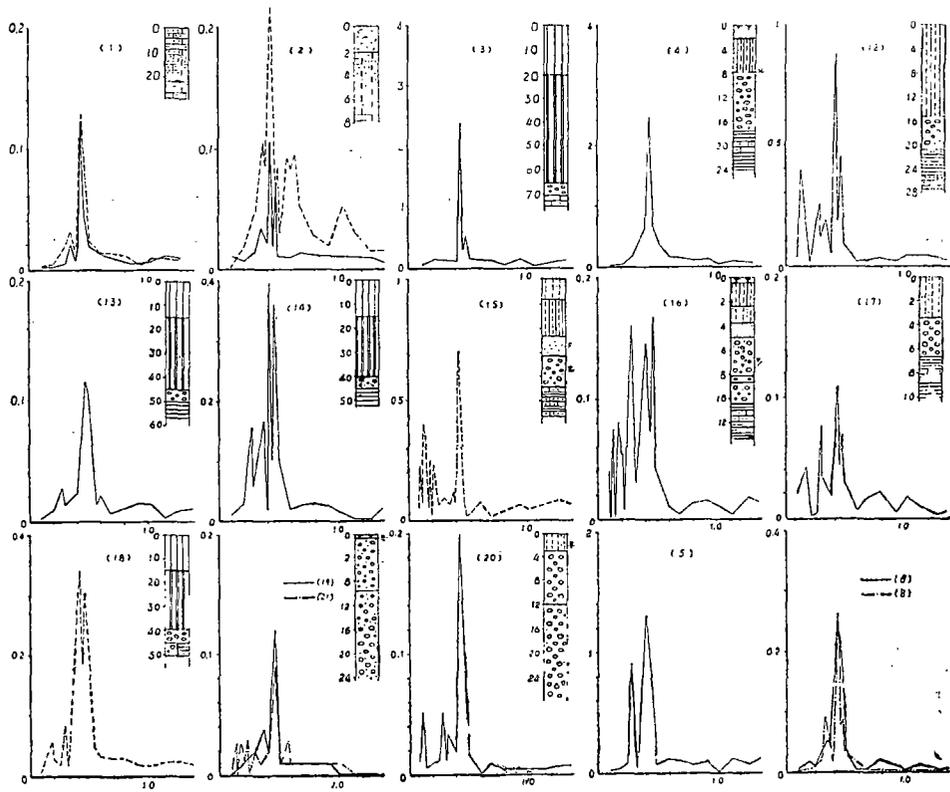
地面脉动谱型除上述分区特点而外，还和地质构造、场地土的性质以及外界干扰等各方面都有密切的关系。

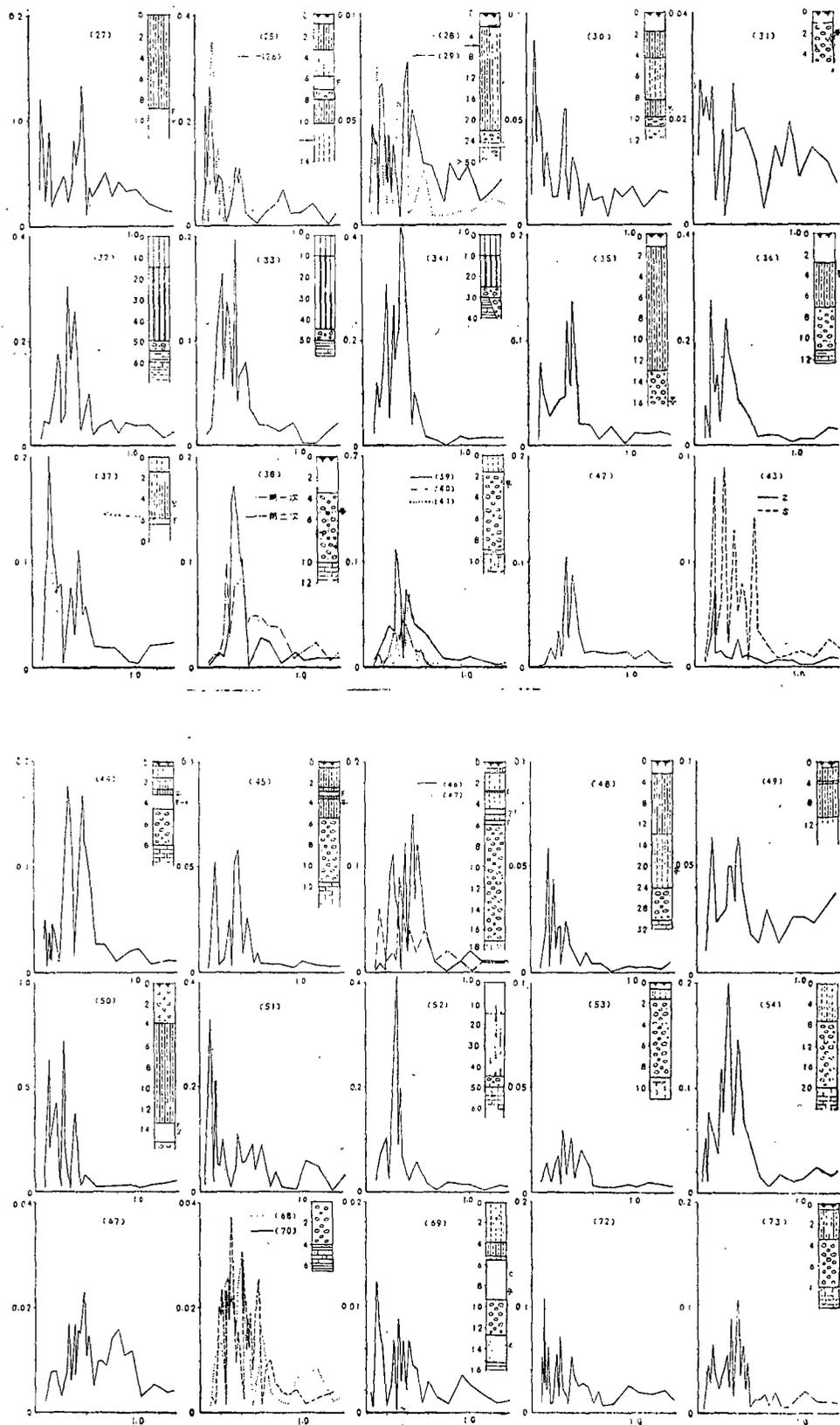
整体看来，兰州市区七十多个测点所得的地面脉动Fourier谱有一个明显的共同性，即不论哪个区内，谱峰值大都出现在0.35—0.45秒间，至0.6秒处即急剧衰减。尽管各点的场地条件有较大的差异，而且观测时间相差达一年以上，但Fourier谱的某些基本特征却没有变化。尤其是在基岩上的几个观测点（附图№1、6、8、43），谱形更为接近。而且在地质上有较大差异的地点（如七里河向斜内外）其谱形并未见到多大的差别。因此可以断定，地面脉动的基本特点是由较大的区域内各种条件综合决定的。兰州市区地面脉动卓越周期为0.35—0.45秒（2.8—2.2赫芝）。由图可知，地球上不同地区的脉动谱形和幅值差异极大^[4]。兰州市地面脉动的卓越周期远比“城市平均噪音”要长，与郊区的脉动，“大陆平均噪声”的谱型有某些共同之处。看来，决定脉动谱型的基本因素是整个区域的综合自然条件。表层场地土的性质作为滤波放大器，有选择地放大了某些频谱成分，使Fourier谱型在局部受到一定程度的改造。

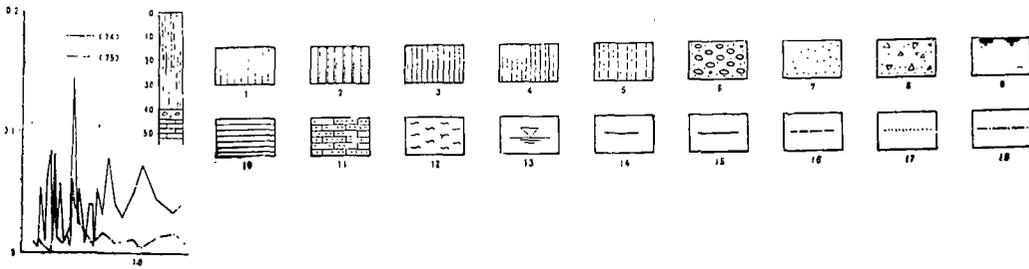
表层土中对脉动谱型影响最大的是南北两山山前洪积类土，洪积类土大多含有较多的砂、碎石，密实度较冲积土大。而且由于地形的关系两山山前地下水位深，地表有较厚的一层刚度较大的土层。因而两山前0.1—0.2秒处的高频成分比较发育，尤其是兰州东盆地形成了连续的、与邻河部分明显不同的一带。至于局部地区，仅当表层土的性质与附近有较大差别时，在谱型上才能有察觉到的影响。如七里河滩测点（№31），有厚1米左右的松土，其谱型较之本市其他地区的河滩（如№19、21等）就有了很大的差别：低频成分大大增加。

同一地点昼夜对比观测表明（附图№24、32、39、40、41、46、47、74、75），谱型在总体上是一致的。由于夜间环境安静， $T = 0.1—0.2$ 秒短周期成分大大减少，场地本身的卓越周期在Fourier谱上更加突出。

总之，在分析地面脉动谱型时，必须从整体上和区域上着眼，不可拘泥于个别的、较次要的起伏。试图单纯通过脉动观测来确定某一地点场地土的类型及特性，显然不易做到。但是通过脉动观测可以了解整个区域的频谱特征及幅值变化规律。在进行场地区划时，是一种重要而有意义的手段^[4, 5]。







1—风成黄土 2—中更新世黄土 3—粘土 4—亚粘土(黄土状) 5—亚砂土 6—砂卵砾石 7—各种砂
8—碎石土 9—人工填土 10—粘土岩或页岩 11—砂岩 12—淤泥质土类 13—地下水位 14—地下构筑物内观测点的位置
15—地面白昼垂向振动 16—地面白昼水平向振动 17—地下白昼垂向振动 18—地下夜半垂向振动 砂旁边的符号: C—粗砂 Z—中砂 X—细砂 F—粉砂 图中纵座标为傅氏系数 单位:微米·秒 横座标为周期 单位:秒。

结 论

1. 兰州市区地面脉动的频谱特征在总体上取决于较大范围内的区域地质构造条件, 各测点的谱型有共同之处, 卓越周期为0.35—0.45秒, 脉动谱型同时又有明显的区域性, 按谱形可将市区划分为5个区域。

2. 市区白昼的脉动幅值为0.05—0.8微米, 表层较松的黄土类土, 其厚度对地面脉动幅值的影响很大, 厚度增加时, 脉动幅值增大。但是表层土对频谱特征的影响不太明显, 一般只能产生次一级的峰值。

3. 城市噪音可使脉动幅值提高2—3倍, 在南北两山山前地区, $T=0.1—0.2$ 处产生相当突出的峰值。

4. 孤突山梁的前端脉动幅值增大, 但前后的频谱特性无大变化。

(本文1980年8月10日收到)

参 考 文 献

- [1] 永平爆破观测组, 不规则地形的爆破地震地面运动特性, 《西北地震学报》第1卷第4期, 1979。
- [2] 金井清, 常时微动(原载《建筑技术》, №176, 1966) 胡韦贤译。
- [3] Lewis J. Katz: Microtremor Analysis of Local Geological Conditions, BSSA, vol. 66, №1, 1976
- [4] K. Kanai and others: On Microtremors, X. 《东京大学地震研究所汇报》第44号, 第2册, 1966。
- [5] Сейсмическое Микрорайонирование, 1977。
- [6] Рыкунов А. Н. Микросейсмические Экспериментальные Характеристики Естественных Микровибраций Грунта в Диапазоне Периодов 0.07—8 сек, 1967。

THE CHARACTERISTICS OF GROUND MICROTREMORS IN LANZHOU

Sun Chong-shao
(Lanzhou Seismology Institute)

abstract

~~In order to realize microregionation of the site conditions in Lan-~~
zhou, the observation of ground microtremors was carried out in 75
points within ^{Lanzhou} this city.

It is shown that the characteristics of ground microtremors are ob-
viously regional. The Fourier spectra of different points ^{in Lanzhou}
are more or less alike with each other. The ^{Major peak values} pikes of the majority
of the Fourier spectra occur at 0.3—0.45 sec. But in different areas of Lan-
zhou there are some various characteristics in the spectra and accord-
ing to the appearance of the spectra, it is able to divide the whole area
of this city into 5 regions. ^{from the shape of the spectra} So it can be imagined that the characteristics
of ground microtremors are dependent on the total natural conditions
over the whole region rather than on the local subsoil conditions.

The maximum amplitude of the ground microtremors at 9—11 in
the morning is 0.5—1.5 μ . The maximum amplitude of ground microtre-
mors is obviously dependent on the thickness of the soft ground, such,
as loess, loam, silt ect. The thicker the stratum of the soft ground,
the greater the maximum amplitude of microtremors.

The results of microtremors measurement can be used in the micro-
regionation of site conditions.