

甘肃与邻近地区地震波运动学和动力学特性的某些观测研究及其应用

闵祥仪

摘 要

本文利用永登地区人工地震资料和九条岭、南坪、松潘天然地震资料研究甘肃及其邻近地区地震波特性。结果表明：在甘肃东部与邻近地区地壳中反射纵波的平均速度是6.21公里/秒， $\sigma_v = 0.029$ 公里/秒；河西地区为6.32公里/秒， $\sigma_v = 0.016$ 公里/秒。人工地震产生的回折纵波的衰减较天然地震横波快得多。在临界反射区以内，人工地震反射纵波的频率基本上保持稳定，反射波振幅与回折波振幅比 $\frac{A_{P11}}{A_P}$ 按距离大体分为三段，每一段随距离变化不太明显。观测结果对于本区地震研究、测震分析有一定参考意义，也为观测震前振幅比异常提供了依据。

在分析速度分布和振幅衰减的基础上，本文认为甘肃及邻近地区地壳模型可取为单层不均匀介质（沉积层除外），本区西部地壳厚度为54公里，东部为50公里，在局部地区为47公里。

为了给今后本区的观测工作积累经验，对野外工作方法和仪器调试作了简要讨论，并编绘了爆破地动速度随震中距衰减的经验曲线，可供野外工作参考。

一、概 论

甘肃及其邻近地区地震活动水平较高，观测台站比较密集，积累了较丰富的天然地震资料。近年来，甘肃境内工业爆破频繁，这为利用人工地震资料探索地壳结构、研究地震波传播的区域性特征以及监视地震危险区并寻找地震预报指标等工作提供了良好的条件。本文利用永登地区人工地震资料，研究了在近爆破区附近地表浅层介质的速度剖面，并求得本区地壳中反射纵波的平均速度，绘出了本区人工爆破地动速度随震中距衰减的经验曲线。使用九条岭、南坪、松潘19次地震资料，对河西地区和甘肃东部及其邻近地区（简称东部地区）分别探讨了地震波振幅的衰减规律。对相应的区域性地壳结构得出了初步结果，为今后在甘肃

及邻近地区进行的孕震区透视等工作打下了基础。

我国大陆幅员广阔，地势起伏，东受太平洋板块的俯冲，西南受印度洋板块的挤压，在长期地质作用下，断裂纵横，整个应力场分布很不规则，地壳结构具有明显的区域性特征，为了考察地震发生的构造背景及探测深部地下资源等多种目的，必须详细研究具体地区的地壳结构，为此首先就要较深入地研究区域性地震波运动学和动力学特性。

使用人工地震和天然地震资料，观测地震波速度、振幅、频谱等方面的区域性特点以及随时间的变化规律，有助于精确测定地震参数、了解地震发生的物理机制并监视地震孕育过程，这不仅对于研究区域地震活动性、圈划地震危险区、寻找地震预报指标有较大的实际意义，而且对于测震分析，工程抗震等其它地震学研究课题也十分必要。

目前研究地壳结构的主要方法是人工地震法。从本世纪廿年代开始，在许多著名学者，如莫霍洛维奇、古登堡、杰弗瑞斯、妹泽克维、金井清等人研究的基础上，用地震方法研究地球结构获得了很快发展^[1]。山金(Н. В. Шаньгин)根据在爆破近区内利用回折纵波研究地表浅层内地质剖面的实际工作经验，指出^[2, 8]：在地震勘探中利用地震波的衰减规律可以提高地质构造分层的准确度和详细程度。

曾融生、滕吉文等先生对我国地壳构造的研究结果表明^[4, 5, 6]：我国地壳特点是南北构造带为界，西部较厚、东部较薄。西藏高原地壳巨厚；青海、甘肃东北部地壳厚约50—52公里；在景泰地区发现20公里深处存在一个厚约6公里的高速夹层，在柴达木东盆地也发现与上述相似的高速夹层，并测到地壳下部还有一个反射界面，介质的密度和地震波速度都更高。

在地震勘探仪器和资料处理方面，随着电子技术的飞快发展，现已出现数字地震仪，大大提高了记录的精度和仪器的动态范围，地震仪的道数已扩展到一千道以上^[7]，为恢复地震波真振幅、利用地震波的动力学特性研究地壳构造或地震波传播的区域性特点提供了有利条件。

用天然地震资料研究地壳结构也有很长的历史。主要方法有远地震观测法和近地震观测法。在研究地壳与上地幔构造方面，按使用的波型远地震观测法又可分为面波方法(包括导波)、自由振荡法和体波方法。近地震观测法对于研究特定地区地壳详细结构来说是很有前途的方法之一，至今为人们所广泛采用。

使用地震勘探方法并结合天然地震的观测结果，人们对于地壳和上地幔已获得如下基本认识：从全球范围来说，地壳结构大致分为大陆型和海洋型两种基本类型，在某些地区两者之间可能存在过渡型；大陆型地壳厚度约由20公里至70公里，海洋型地壳薄得多，约为10至20公里。对于大陆型地壳，多数学者认为山区地壳比地台区地壳要厚些，但也有人主张在低地也可能具有很大厚度。柯斯明斯卡娅等曾指出，褶皱愈古老，地壳厚度愈小，且具体的地壳结构也可能有差别。

关于大陆型地壳结构目前还有一些争议，古登堡研究地震波在地壳中传播时，发现振幅随距离的衰减较理论结果慢得多，在1951年假定地壳中有一个低速波导存在，后来有些学者提出不同看法。其次，根据苏联中亚地区的实际观测结果，某些地区康腊德界面很不明显，或者至少是断续相间的，从而P*波的实质并不是花岗岩和玄武岩界面上传来的首波，可能是莫霍界面传来的超临界反射波或是非均匀地壳介质内的多次回折波或反射波。关于海底地壳结构问题，近年来对于传统的海底为单一的玄武岩层的看法也开始动摇。

甘肃及其邻近地区地震地质构造比较复杂,历史上曾经发生过多的大震,是地震活动的频度和强度均较高的地带。但这一地区地震活动的史料记载不多,研究工作也不十分充分。据文献^[8,9]研究结果,祁、吕、贺兰山字形构造的主体占据着甘、陕、宁三省(区)的大部分地区。自中生代以来的各个地质时期,主要活动构造体系是与青藏高原隆起有关的陇西系、祁吕系、阿拉善弧形构造型式。甘肃北部紧靠阿拉善地块,东部与鄂尔多斯地台毗邻,甘肃、青海交界在挤压应力场作用下形成北西向褶皱山脉和山间谷地,在山脉与谷地的交接地带发育着许多高角度逆掩断层,在河西走廊南部出露的断层面倾角约 20° — 30° ,倾向以南西为主。这一构造带中断裂较多,延伸距离较长,断裂深度一般并未达到地壳底部。

河西地区挤压运动的效果也影响到甘肃东部和南部应力场的方向,从海原地震表现的左旋运动特点来看,西吉、海原、固原地震带与其南部的天水、武都、川西北一线除了受挤压应力之外还受一个剪切应力场控制。天水地区位于北东、北西及东西向三组构造线交汇地带,历史上地震活动水平较高,地形变资料表明这一地区升降运动也颇剧烈,在震源机制上与甘肃西部地区可能有所差别。在研究地震波传播的区域性特点时应加以注意。

二、观测方法和仪器调试

(一) 爆破地震仪的调试及仪器间的协调

为了研究地震波的动力学特性,必须对资料的可靠性提出一定的要求。对于人工地震,起爆零时和震源位置可以认为是准确的,地震波的激发条件是已知的,地震记录图的可靠程度主要取决于时间服务系统的精度、距离测定的准确度和爆破地震仪的稳定性。分析资料时,振幅值的误差主要来源于各台仪器之间放大倍数上的差异;时间服务系统的精度取决于石英振荡器的频率稳定性和准确度。

我们使用的仪器是国家地震局地球物理所生产的CBY—2型便携式爆破地震仪,全套仪器包括DJ—1型垂直向拾振器、电子放大——调频器、磁带记录机、解调器、光学记录示波器。地震记录图的振幅正比于地动速度,在地动频率为10Hz时仪器放大倍数约为120万。

仪器的调试工作主要包括以下四步:拾振器参数的测定和阻尼系数的选取;包括调频器、示波器在内的记录仪器幅频特性曲线的绘制;全套仪器频率特性曲线的测定;时间服务系统的准确性和稳定性检验。

拾振器的主要技术指标列于表1。调频器线性放大性能的校验选用图1所示的方法。调

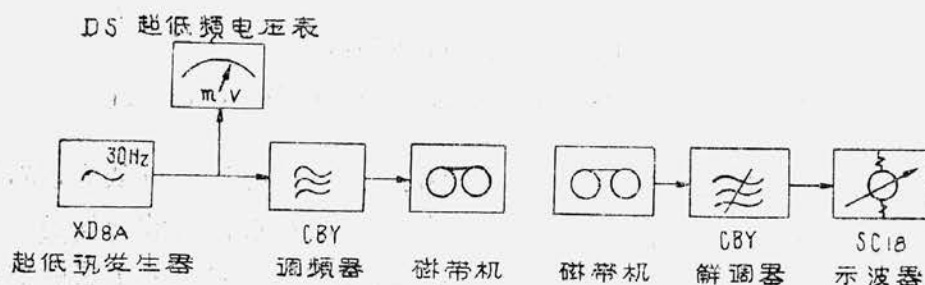


图1 校验仪器线性性能的装置图

Fig. 1 The devices which test the linear characteristic of the instrument

频器线性实测曲线绘于图 2，当输入电压在 0.2—12mV 范围内变化时，记录图上的振幅与输入电压基本上成线性关系，相关系数 $\gamma > 0.8$ 。

Table 1:

表 1

拾震器	自振频率	f_0	2.0Hz
	机电转换系数	S	528V·sec/m
	阻尼常数	D	0.5
FC ₀ 振子	自振频率	f_1	400Hz
	阻尼系数	D_1	0.7
	非线性误差	ε	$\leq 0.3\%$
拾震器—调频器耦合系数		η	0.93
振子灵敏度		M_s	8mm/V

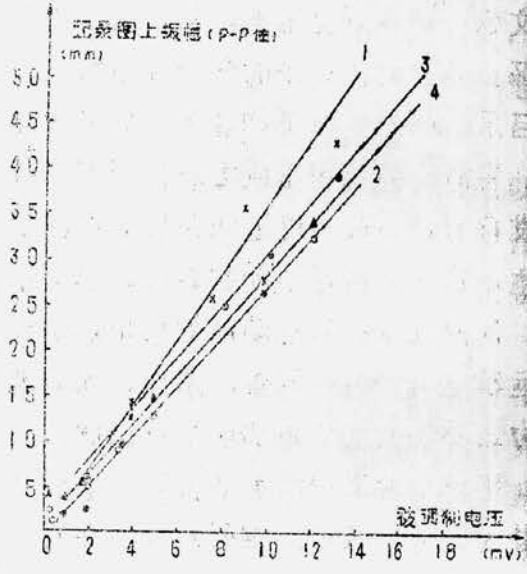


图 2 调频器线性实测曲线举例

Fig. 2 The real-tested curve of the frequency modulator

考虑拾振器的频率特性和阻尼系数对仪器放大倍数的影响后，可绘制频率特性曲线（图 3）。这里使用公式 $V_K = M_s \cdot K \cdot S \cdot \eta \cdot U_K \cdot \omega$ 计算。式中各符号的含义：S 为拾振器机电转换系数， M_s 为振子灵敏度， U_K 为拾振器的频率响应系数， η 为拾振器——调频器之间的耦合系数，与阻抗匹配情况有关，K 为放大器的频率响应系数， ω 为地动频率。

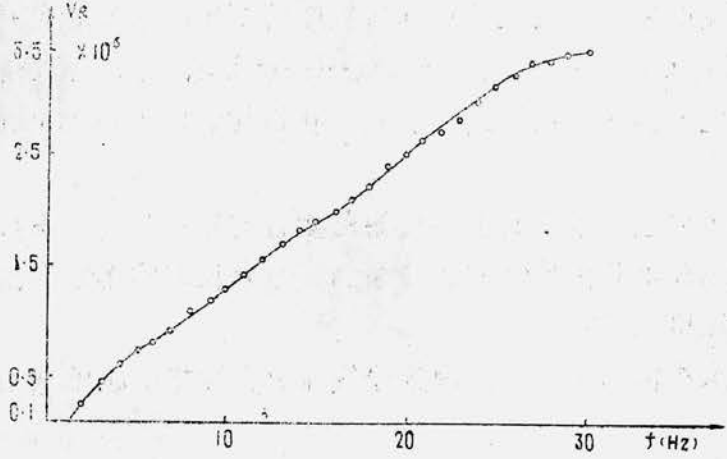


图 3 频率特性曲线

Fig. 3 The frequency characteristic curve

由于使用的绝大部分仪器是同一厂家生产的相同型号产品，可以认为仪器的频率特性曲线的基本形态是一致的，依据野外一致性实验的结果可修正仪器的放大倍数。

对时间服务系统从两个方面进行调试，一是准确度，使用四踪电子示波器连续观测调频器内 10kHz 振荡电压信号、与作为标准的石英钟的 10kHz 信号进行对比，相对误差应小于 10^{-4} 。二是为适应野外工作的要求，需要测试晶体振荡器频率的温度稳定性：用室温下的石英钟作标准，调频器在环境温度为 -10°C 至 20°C 时，频率相对变化率不能大于 10^{-3} 。

（二）人工地震野外观测方法概述

关于野外工作方法已有很多专著，我们仅谈一点体会。

首先根据工作任务以及拾振器的数量，决定测线的长度、走向和拾振器的间距。用于监视或圈划地震危险区的地震勘探，测线方位要多变（两个同心圆、扇形等），这样便于对比，可根据地震传播和衰减特性上的差别研究孕震区的变化趋势。由于这种勘探目的的特殊性，在同一地区应该进行重复观测，且保持每次观测时台基一致。利用多次工业爆破时，应注意各测线间的衔接。在选定主要测线之后，测点应尽可能取在一条直线上。

其次，观测点尽可能有安静的环境以保证资料的信噪比，要远离村镇、公路、高压电线、电力变压器。发现临时性干扰（如牛羊畜群等），可变更观测点（沿测线走向移动）；对于无法排除的突发性干扰，更应注明。测点一般应选在出露地面的基岩上，但在黄土覆盖地区，则可选在原生黄土上，安放拾振器时，务必要旋紧底脚螺丝。摆线一定要埋入土中才能免除杂散干扰。

据Nicholls研究^[10]：定义炸药的特性阻抗为炸药的装填密度与爆轰速度之积。当炸药的特性阻抗与场地周围介质的特性阻抗相等时，耦合可达最佳状态。爆破场地无交流电源时，可以使用调频器观测起爆零时。

仪器的一致性校正及稳定性检查直接关系到资料的可靠程度。要固定信号线和拾振器的连接方法，保证记录图上相位的一致性。观测结束时应复测仪器主要特性，可对资料的可靠程度给出补充信息。

（三）天然地震观测台网的工作情况

我们使用了甘肃省境内的21个地震台的观测资料研究天然地震波的衰减规律。除天水、兰州、陇西台建在黄土、红砂岩等软台基上之外，大多数地震台为基岩台基，使用仪器以BЭГИК、B73和64式短周期仪为主，走纸速度为1毫米/秒和2毫米/秒，位移放大倍数约为 10^4 。

三、资料的分析处理

（一）资料概况

在西部地区使用九条岭九次天然地震（见表2）和永登202吨矿山爆破资料，在东部地区使用了松潘、南坪九次天然地震（见表3）以及永登地区某次爆破资料（图4）。绘制综合振幅曲线时，以南坪 $M_L 3.6$ 级和九条岭 $M_L 3.2$ 级地震作为标准，将不同震级的地震都折算到同一水平。

据^[11]研究，设在黄土台基上的仪器记录的地动位移与基岩上的相比，振幅偏大1.4—5倍。因此，我们舍弃了来自个别软台基上的台站的某些数据点。在某些黄土覆盖地带观测人工地震时，发现记录图上出现类似正弦波振荡的情况（见图5a），这是因为地震波的卓越周期与覆盖层的固有周期（ $T = \frac{4h}{v}$ ）相近引起的共振效应，我们剔除了这种记录。

（二）震相的选取和识别

在近震和地方震的情况下，天然地震的横波是优势波，直达横波水平分量比较清晰，便于识别和测量，不再赘述。人工地震主要产生纵波，我们选用一次回折波和莫霍面的反射波

九条岭地震 表2

table 2 The earthquakes in Jiu-tiao-ling

日期	发震时刻	震级
1974. 1. 24.	16—17—26.0	3.2
1975. 3. 16.	03—44—33.3	2.7
1976. 4. 4.	22—39—53.4	3.0
1976. 8. 8.	23—50—03.8	3.0
1978. 6. 20.	07—17—58.1	4.4
1979. 12. 20.	15—19—27.2	5.0
1980. 12. 22.	04—31—33.0	3.8
1982. 6. 19.	17—00—07.6	3.0
1982. 8. 26.	09—19—18.5	3.4

南坪、松潘地震 表3

table 3 The earthquakes in Nanping and Songpan.

日期	发震时刻	震级
1973. 11. 24.	00—34—17.4	2.7
1974. 11. 17.	01—44—31.3	4.2
1975. 8. 16.	03—16—26.5	3.6
1975. 6. 27.	06—02—21.7	3.8
1976. 2. 8.	10—33—29.2	4.4
1979. 5. 30.	20—30—36.1	3.2
1975. 10. 20.	14—38—22.0	3.4
1976. 12. 20.	10—50—49.8	5.0
1977. 6. 20.	01—45—30.9	2.9

P_{11} 震相。在干扰背景较小时, 根据波形能区分一次回折波P和浅层速度界面上的首波 P_g 。 P_{11} 震相较难辨识。从深层反射波的动力学特征上分析: P_{11} 与回折波波形的差别不大, 初动比较清晰, 波形的正弦形态明显。 P_{11} 波的振幅值在临界反射区附近达到相对极大值, 其它干扰波在相应的距离上却是在减弱(图5.b—d)。

在距震源50公里以内的近爆破区, 黄土覆盖层与沉积岩层对P波传播的影响较大, 尤其是在黄土爆破而接受点也有较厚的黄土层的时候更是这样。地表自由界面、黄土层与沉积岩层界面对地震波都具有良好的反射条件, 浅层界面及地表的多次回折波和反射波都使得记录图变得较复杂。但浅层反射波随着反射次数的增加其强度迅速降低, 高于二次的浅层反射波事实上已可忽略, 而介质的不均匀所引起的波的聚焦作用以及波在地面反射过程中具有较高的反射系数, 能量耗散很小, 多次回折波因而成为主要的干扰波。对于这些干扰, 可利用多次回折波的运动学特点加以排除。

在临界反射区和超临界反射区 P_{11} 震相的识别相对来说比较容易, 因反射波已经渐变成优势波了。

(三) 误差估计及讨论

人工地震各测点都以记录的中央人民广播电台的整点信号作标准, 时间服务系统的精度优于 10^{-5} , 从整点信号起、到观测结束的几分钟内的积累误差可以忽略, 只考虑时标的读图误差(小于0.05秒); 影响速度准确性的主要原因是距离公式的精度不够, 然而它属于系统

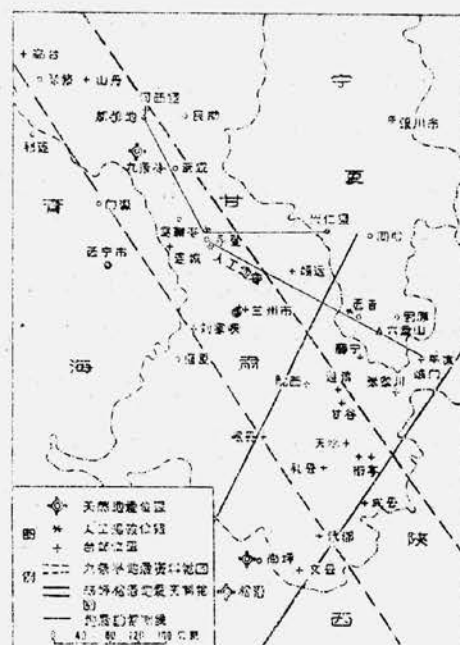


图4 震源和台站位置示意图

Fig. 4 A map of the seismic source and the station.

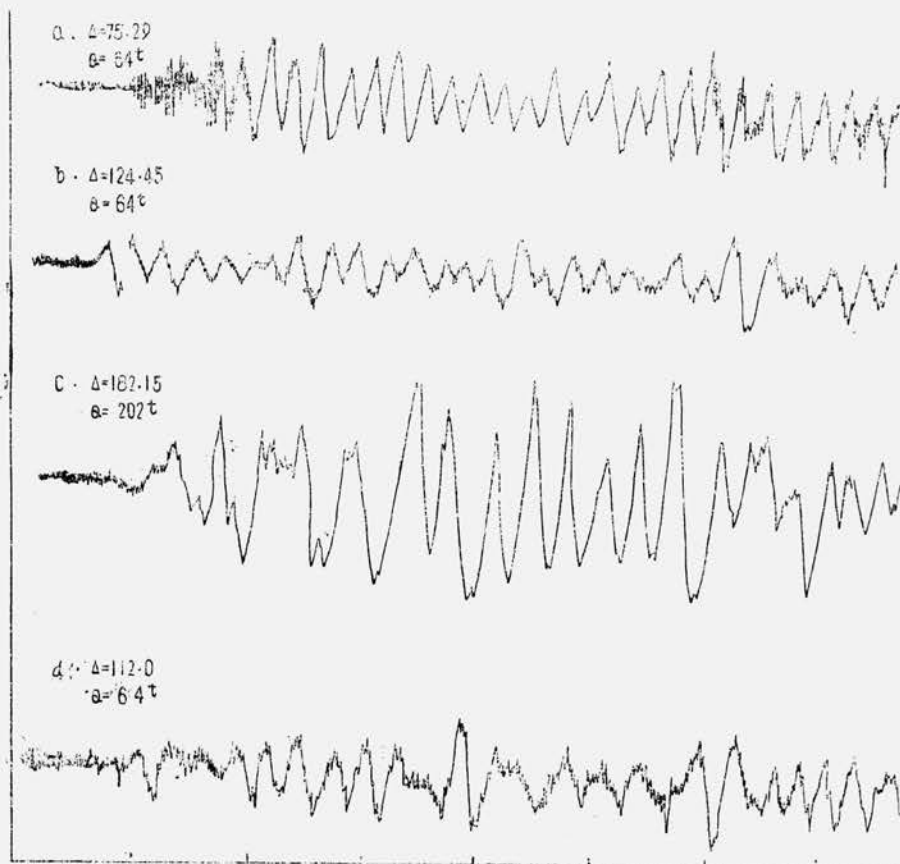


图5 典型记录图举例

Fig. 5 The examples of the seismogram.

误差，对计算结果的离散度影响不十分明显。当观测点距爆破点距离为100km、距离误差估计为0.5km，平均速度的绝对误差约为0.05km/s。由 $H = \frac{\sqrt{(vt)^2 - \Delta^2}}{2}$ 计算地壳厚度时，误差约为0.5km。

四、甘肃及邻近地区地震波运动学与动力学特性和地壳结构的某些观测结果

(一) 地震波运动学特性的观测结果

1. 地表浅层的速度剖面 地震波的传播速度与介质的压力、含水性、岩石的种类、层理结构、破碎程度等多种因素有关。本区内沉积层较厚，沉积层的性质对地震波射线有明显的影响。为了讨论地震波射线的形态及其速度分布，研究地表浅层的速度剖面对观测人工地震来说具有特殊意义。根据永登爆破资料，绘出近爆破区的走时曲线（见图6实线，点划线绘出了视速度）。用Чибисов方法得到爆破点附近地表浅层介质的速度剖面（图7）。计算结果指出：在震中距增加时，地震波射线的最低点到地面的距离（穿透深度）并不是线性增加的，例如震中距为5公里时，射线的穿透深度约占水平距离的 $\frac{1}{3.5}$ ，在10公里时为 $\frac{1}{4.7}$ 。

2. 人工地震回折波在地壳中的速度 永登爆破资料表明：震中距从90km至250km，初至波走时曲线的线性很好，可求得视速度为6.0—6.2km/s，平均为6.09km/s，这和本区天

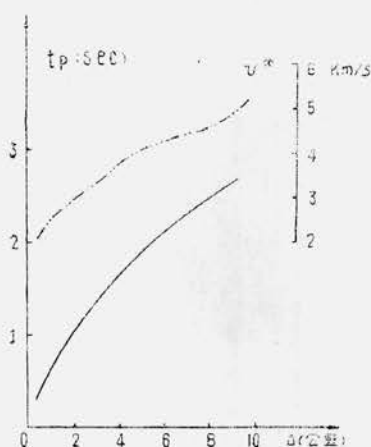


图6 近爆破区的走时曲线和视速度

Fig. 6 The time-travel curve and apparent velocity in near explosive region.

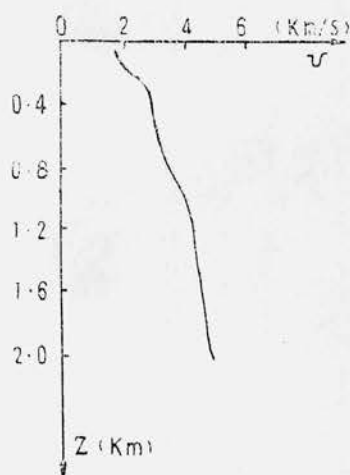


图7 地表浅层速度剖面

Fig. 7 The velocity profile in the shallow layer of earth-surface.

然地震P波走时的观测结果符合得很好^[12]。

3. 莫霍界面反射波的平均速度 在一定距离范围内, 设莫霍面是水平的, 可用反射波走时的一级近似公式 $\bar{v}_{p11} = \frac{\sqrt{\Delta^2 + (2H)^2}}{t_{p11}}$ 计算地壳内反射波的平均速度和地壳厚度H。按震中距的远近将测线分段, 在震中距变化不大的情况下, 来自地壳底部的反射波速度趋于一常量, 使用双曲线拟合的方法确定H和 $\bar{v}_{p11}$ 。本区西部地区 $\bar{v}_{p11} = 6.32$ 公里/秒, $\sigma_v = 0.016$ 公里/秒; 东部地区为 $\bar{v}_{p11} = 6.21$ 公里/秒, $\sigma_v = 0.029$ 公里/秒。

由于地表浅层速度变化剧烈, 而且地表介质的地区性差异较明显, 所以不能用上述方法获得浅层反射波的速度。

(二) 地震波动力学特性的观测结果

人工地震发生于地表, 与天然地震相比, 爆破所产生的地震波能量较多地分布在地表浅层介质内。理论结果指出: 由于介质存在的纵向不均匀性, 地震波的几何发散 $L_*(M)$ 依赖于震中距。在讨论振幅衰减时, 人工地震和天然地震选取的波型也不相同, 介质对纵波的吸收作用通常大于对横波的吸收。因此, 我们分别对人工地震和天然地震两种情况, 讨论回折波地面振动速度的垂直分量和横波的地动位移的水平分量随震中距的衰减。

1. 回折纵波地面振动速度振幅的衰减 观测人工地震使用的爆破地震仪记录的是地动速度垂直分量, 本文用A表示地震图上振幅的峰值, 用 A_p 和 A_{p11} 表示震相上的区别。

图8是根据实测资料绘出的, 在近爆破区回折波地动速度的垂直分量随震中距的增加起先急剧衰减, 逐渐平缓, 可近似用 $A = A_0 x^{-n} e^{-\beta x}$ 来描述。当 $20\text{km} < x < 200\text{km}$ 时, $n \approx 1 \sim 1.4$, 取 $n = 1$, 求得黄土爆破时 $\beta = 0.01$, 岩石爆破时 $\beta \approx 0.025 \sim 0.043$ 。并且发现震中距增大时 β 值减小, 这可能是因为穿透深度增加同时地震波中的高频成分在减少的缘故。

介质吸收系数 β 与地震波频率有关。增加爆破炸药用量或采用组合爆破, 可以使地震波的频谱向低频方向移动, 从而增加穿透深度和传播距离。在黄土覆盖层巨厚的地区工作时, 应选用适当的爆破方式和有利于波的激发和传播的炮点位置。

我们根据本区多次爆破观测结果, 试编绘了地动速度振幅的垂直分量(优势波的最大

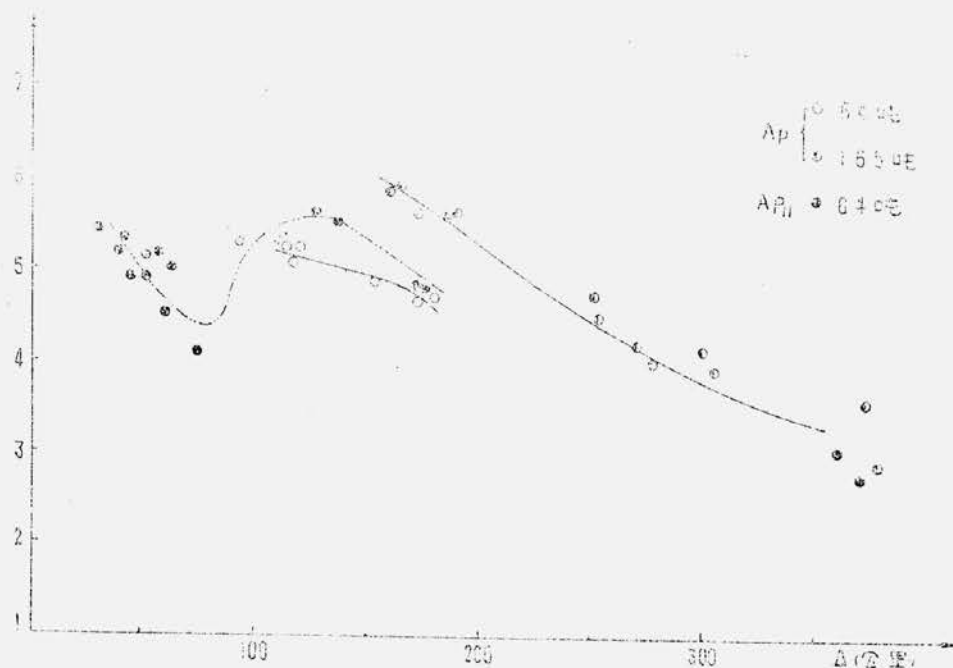


图8 永登爆破地动速度振幅的垂直分量

Fig. 8 The vertical component of ground-particle velocity in Yongdeng explosion.

值)随震中距衰减的经验曲线(图9),供今后开展孕震区透视等工作参考。为了方便,也标上用DJ-1拾振器和CBY调制器时应选用的衰减档。

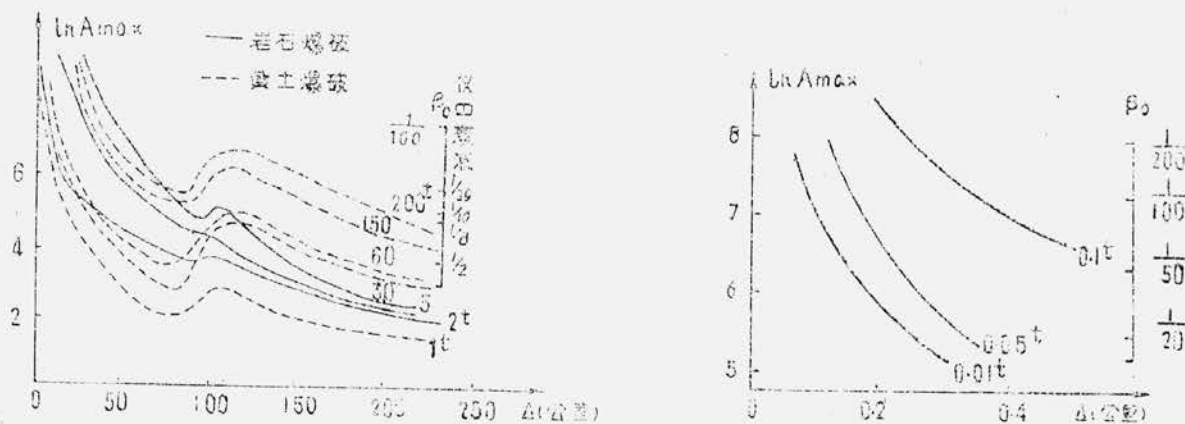


图9 地动速度的垂直分量与震中距的关系

Fig. 9 The relation between the vertical component of ground-particle velocity and the distance from the earthquake epicenter.

2. 反射波和回折波的振动速度比 $\frac{AP_{11}}{AP}$ 振幅比是利用同一台观测仪器在相同的激发和接受条件下的记录图上得到的。对仪器放大倍数的依赖程度较小。振幅比除与 AP_{11} 和 AP 各自的衰减直接有关外,主要取决于不同深度的介质的性质,地壳中最不稳定的表层部分的具体差异和基岩上层可能具有的块状结构,容易反映到这个比值中来。在同一条测线上重复观测振幅比的变化,可望了解该段介质的应力状态随时间的变化,是分析应力积累单元(应变能聚积区)的位置和地应力场变化趋势的可能途径之一。

图10表明在近爆破区振幅比与距离的关系,浅部沉积层虽然对P波吸收大,但因运行距

离短, 射线向上弯曲, 集聚能量, 因而回折波能流密度较高。相反, 尽管深层反射波的出射角利于垂直向拾振器的记录, 但这时在反射界面上的反射系数却很小, 地震波运行路径又很长, 故有 $\frac{A_{P11}}{A_P} < 1$ 。在远距离上, 反射波已进入临界反射区, 这是在 $\Delta > 130 \text{ km}$ 的地区

$\frac{A_{P11}}{A_P} > 1$ 的主要原因。

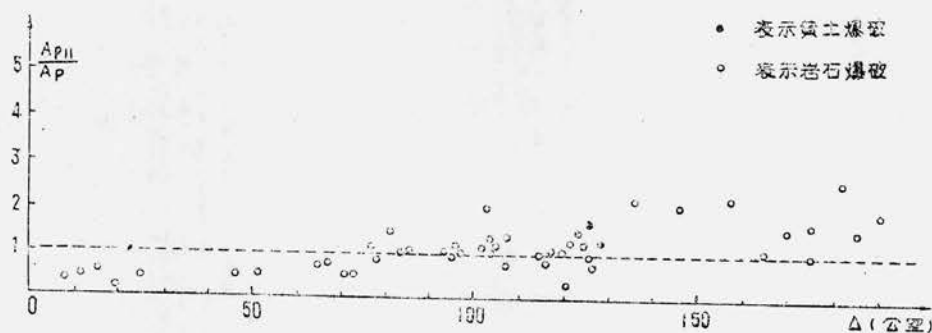


图10 人工地震振幅比与距离的关系

Fig.10 The relation between the amplitude ratio of man-made earthquake and the distance.

3. 横波地动位移随震中距的变化 天然地震横波的衰减规律与人工地震回折纵波的衰减存在较大差别 (图11, 12)。几何衰减指数 n 和介质吸收系数都较人工地震为小。

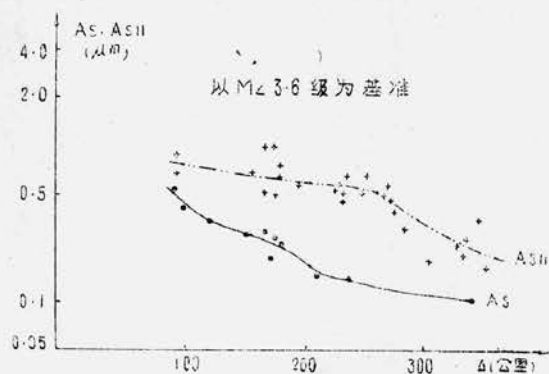


图11 南坪地震地动位移

Fig.11 The ground displacement of the Nanping earthquake.

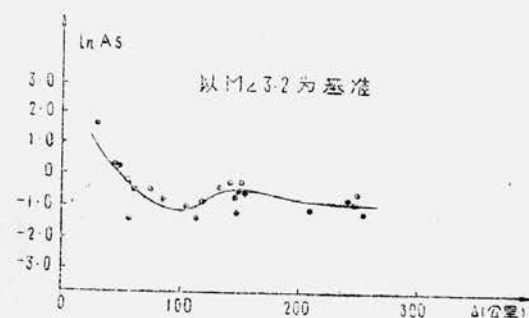


图12 九条岭地区天然地震 $A_S - \Delta$ 曲线

Fig.12 The $A_S - \Delta$ curve of natural earthquake in Jiutiaoling.

据文献14、15、16理论研究结果, 岩石中的孔隙度对纵波的波形和振幅能产生显著的影响, 当孔隙内为空气时, 地震波通过这种介质后, 振幅会比没有孔隙时增加, 而当孔隙内为水时, 在地面观测到的位移则减小。利用岩石受压进水前后对地震波衰减特性产生截然不同影响这一效应, 在地震危险区用人工地震方法考察地震波形和振幅变化趋势, 同时结合纵横波速比等其它观测结果探讨震前地震波传播异常有一定实际意义。

4. 莫霍面反射纵波的卓越频率与震中距的关系 观测人工地震时使用的仪器的走纸速度较快, 从记录图上可以较准确地计算卓越频率。由图13可见: 在震中距为130km时 f 卓越显著变高, 而在达到临界反射以前, 频率在相当大的距离范围内保持稳定。

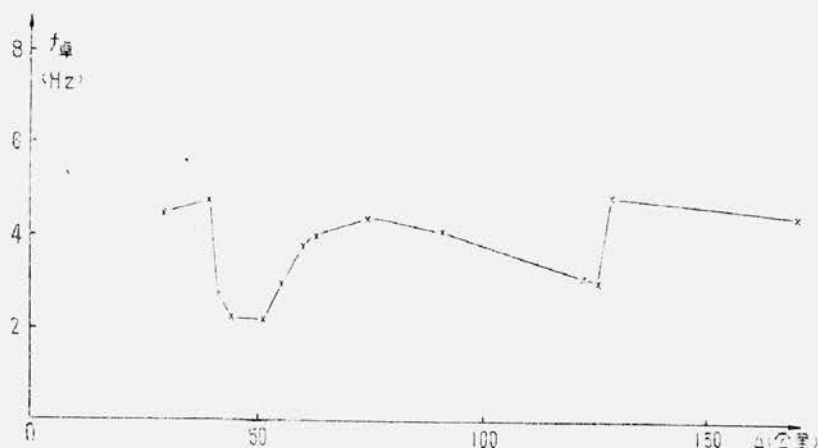


图13 黄土爆破莫霍面反射纵波的卓越频率与震中距的关系

Fig.13 The relation between the predominant frequency of the reflection P wave in soil explosion.

(三) 对本区地壳结构的初步认识

本区大部分地区位于黄土高原，普遍覆盖不同厚度的黄土层，由永登地区近爆破区地震记录，在300米深处速度梯度有一明显改变，推断黄土层及泥岩、砂砾岩等低速覆盖层厚度约300米，纵波速度从2.2公里/秒上升到3.0公里/秒左右。

震中距从50公里开始，时距曲线的线性很好，随着震中距的增加、曲线的斜率略有减小，介质内回折波速度值与天然地震直达纵波速度符合得很好；据大量天然地震资料，甘肃及邻近地区地震记录图上没有发现明显的P*震相；假如在震源和反射面之间存在某个强的折射界面，则反射波在达到极大值之后衰减率将会比观测到的快得多，而且反射波在传播过程中将受到中间界面的影响，卓越频率有可能发生明显的改变。总之，本区地壳从粗结构上说，模拟为单层（含有地表沉积层）非均匀非理想介质较好，康氏面不明显。

用地震波的运动学特征确定本区地壳厚度，河西走廊地区约为54公里，西吉附近为50公里，在兰州以东榆中县境内莫霍界面有一个明显的隆起，那里地壳厚度约为47公里。

为了定性对比理论与观测到的振幅曲线，我们引用冯德益老师对单层均匀地壳模型的计算结果^[1]，并与本区爆破实际观测曲线比较（图14，理论模型已考虑了介质的吸收性质）。可以发现主要区别是回折纵波振幅的真实衰减大于理论计算结果，主要是因为西北的黄土沉积层的厚度较大，地壳浅层的介质吸收系数较大。除此之外，两种曲线衰减规律相似，尤其是莫霍面的反射波随距离的衰减曲线（虚线）与实测曲线（实线）符合得较好，而且 $\frac{A_{P11}}{A_P}$ 随距离的变化形式也基本符合实测结果。

五、初步结论

1. 本文对甘肃及邻近地区地壳内地震波运动学特性进行了初步的观测研究。结果表明，人工地震激发的莫霍面反射纵波在甘肃东部及邻近地区的传播速度为 $\bar{V}_{P11} = 6.21$ 公里/秒， $\sigma_v = 0.029$ 公里/秒；甘肃西部地区 $\bar{V}_{P11} = 6.32$ 公里/秒， $\sigma_v = 0.016$ 公里/秒。地壳内回折波速度为 $V_P = 6.09$ 公里/秒，与天然地震观测结果一致，说明在本区 V_P 是一项很稳定的地

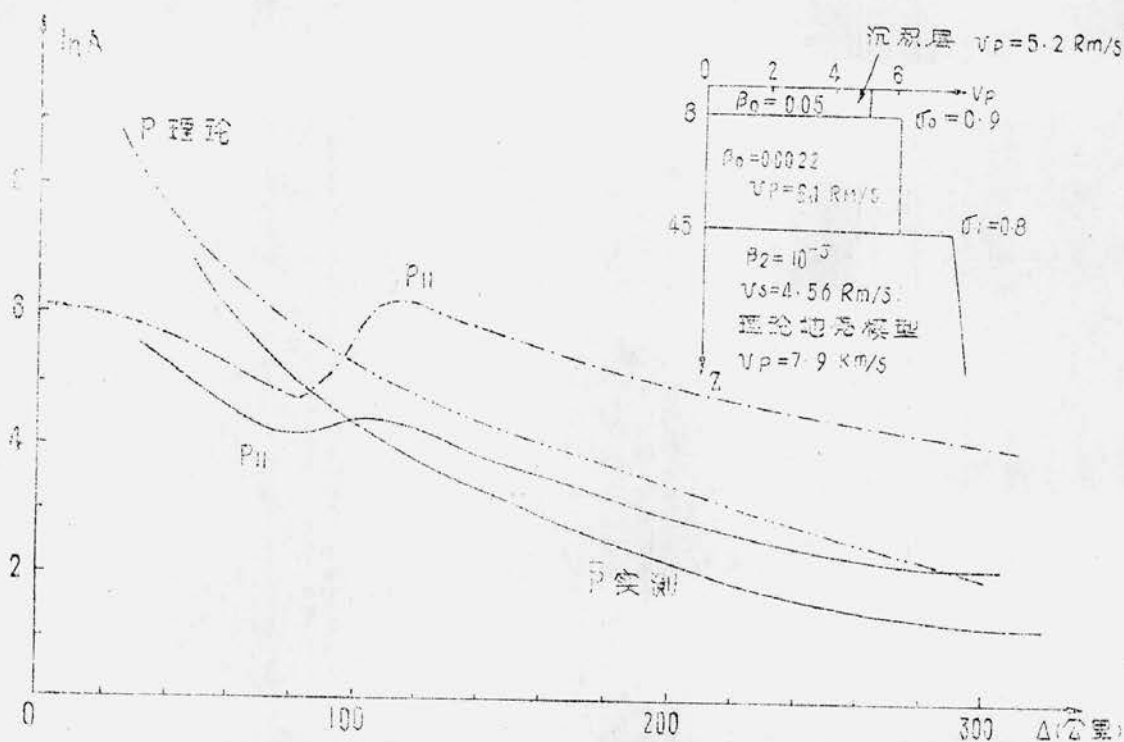


图14 扩散中心型震源理论衰减曲线与实验曲线

Fig.14 The attenuation curve in the divergence center type source model and experimental curve.

震波运动学指标。可供本区的测震分析及地震活动性与波速异常等研究工作参考。

2. 对本区地壳内的地震波动力学特性的观测结果表明：在人工地震的情况下，对于黄土地区回折纵波介质的吸收系数 $\beta = 0.01$ ，几何衰减指数 $n = 1$ ；对岩石地区 $\beta = 0.025 \sim 0.043$ 当震中距减小时， β 还有增高的趋势。

反射波和回折波的振动速度比 $\frac{A_{P11}}{A_P}$ 随震中距的增加而上升。按 A_{P11} 与 A_P 的相对大小可将震中距分为三段，每一段随距离的变化不太明显。这为观测 $\frac{A_{P11}}{A_P}$ 以研究震前的前兆异常提供了依据。

根据人工爆破观测结果，试编绘了地动速度振幅的垂直分量随距离的衰减曲线。为今后在本区开展孕震区透视等工作中选取合适的仪器放大倍率提供参考。

3. 对甘肃及邻近地区地壳结构进行了某些探讨。根据反射纵波的卓越频率随距离的增大变化比较平坦以及回折波的时距曲线线性较好，莫霍面反射波在振幅达到极大值后随距离的衰减比较缓慢，认为甘肃及其邻近地区取单层（沉积层除外）非均匀地壳模型作为粗略描述较合适，此处对于数公里厚的薄层未作讨论。本区地壳总特点仍是西部较厚（54公里）东部较薄（50公里），在兰州、西吉之间存在一个莫霍面隆起区。

本文是在冯德益老师具体指导下完成的。承蒙滕吉文、宋仲和老师审阅全文并提出十分宝贵的修改意见，作者致以衷心的感谢。

在资料搜集过程中，兰州地震研究所研究生周民都、聂永安协助进行了很多观测工作，

在此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] 冯德益, 地震波理论与应用, 待出版。
- [2] 山金等, 地球物理问题(中译本), 地震波衰减现象的应用经验, 列宁格勒大学学报, №.249, 10期, 中国工业出版社, 1963.
- [3] Шаньгин Н.В., К вопросу о затухании сейсмических волн, Уч. зап. ЛГУ, сб. Геофизика, вып. 9, №.210, 1956.
- [4] 滕吉文, 中国地壳与上地幔的地球物理探测, 地球物理学报, Vol.22, №. 4, 1979.
- [5] 曾融生, 中国深部构造研究的进展, 地球物理学报, Vol.22, №. 4, 1979.
- [6] 滕吉文等, 柴达木东盆地的深层地震反射波和地壳构造, 地球物理学报, Vol.17, №. 2, 1974.
- [7] 长春地质学院, 地震勘探仪器, 地质出版社, 1980.
- [8] 李玉龙, 陕甘宁青四省(区)新构造与现代构造应力场及其动力来源的初步分析, 西北地震学报, Vol. 1, №. 4, 1979.
- [9] 崔中元, 陕甘宁青主要构造体系特征及活动性构造体系探讨, 西北地震学报, Vol.4, №. 1, 1982.
- [10] Bollinger G.A., 爆炸振动分析(中译本), 科学出版社, 1975.
- [11] 姚振兴、陈培善、肖承邺、徐果明, 1966年邢台地震的烈度异常, 地球物理学报, Vol.17, №. 2, 1974.
- [12] 兰州地震大队预报室测震组、传计组, 甘肃及邻近地区近地震波走时表, 1977.
- [13] 付昌洪、朱传镇, 北京地区地壳Q值随深度分布特征, 西北地震学报, Vol. 4, №. 4, 1982.
- [14] 冯德益, 地震波速异常, 地震出版社, 1981.
- [15] 李清河、冯德益, 孕震介质中地震波振幅特性的某些理论与实际研究, 西北地震学报, Vol. 4, №. 1, 1982.
- [16] Gupta I.N., Seismic Velocities in rock subjected to axial loading up to shear fracture, Journal of Geophysical Research, Vol.78, №.29, pp. 6940, 1973.

PRELIMINARY STUDY ON KINEMATIC AND DYNAMIC CHARACTERISTICS OF SEISMIC WAVES IN GANSU AND ITS VICINITY AND THEIR APPLICATIONS

Min Xiangyi

Abstract

In order to study the kinematic and dynamic regional characteristics of seismic waves in the crust and the upper mantle of Gansu Province and its vicinity, we have used a series of data concerning the blasts and some earthquakes.

The results obtained are as follows:

- 1) The average velocity of the longitudinal wave from M discontinuity is 6.21—6.32 km/sec passing the crust and the upper mantle of Gansu.
- 2) Inclusive of the relative thick sedimentary layer, the crustal thickness is 54 km in the west and 50 km in the east of the region, and in the other area it is 47 km.
- 3) The dominant frequency of the reflected wave is stable before critical reflection. A possible model of the crust about this region is given roughly.