

# 地下生命线工程地震反应的超声模拟\*

孙进忠 彭一民

(中国北京 100083 中国地质大学)

赵鸿儒

里宏亮

(中国北京 100871 北京大学)

(中国大庆 163000 大庆石油学院)

## 摘 要

本文应用超声地震模型实验方法研究地下生命线工程的地震反应.按一般的场地条件,根据相似原理设计了地下生命线工程非均匀场地、均匀场地实验模型.除进行了解释震波传播的震相分析外,还重点展开了以质点振动为中心的一系列分析工作,结果表明:

距离震中越近,地震地面运动的强度变化幅度及变化速率越大,从而对地下管线越不利;在软土覆盖层中,压缩波主要造成管线的径向弯曲变形,剪切波则主要引起管线的轴向伸缩变形或派生纵弯作用;当覆盖层较薄(厚度小于震波波长)时,地震地面运动强度的节律性变化,主要受基岩中震波波长的控制;地表覆盖层岩土性质,对地震地面运动强度有显著影响;不同性质的覆盖层介质对地震地面运动各分量的影响程度不同;波的传播效应使地表在不同时刻处在不同时刻处在不同的质点振动状态下,在横向突变的非均匀覆盖层条件下,不同岩土单元的的接触部位,将存在显著的振动相位差异和强度差异.由于地下管线与周围岩土层变形一致,故上述关于地震地面运动的结果,也即不同条件下地下管线的变形特点,需针对不同情况加强地下管线的抗震措施.

**关键词** 地下生命线工程;地震反应;地震地面运动;质点振动;超声模拟

## 一、引 言

上下水道、煤气管道、输油管道、地下电缆等地下管道设施,参与对城市的物质和能源供应、信息传递及环境保护等,形成城市功能的中枢,称为生命线工程,研究这类工程的地震反应对抗震防灾具有重要意义(土木学会,1983).地下生命线工程一般为岩土体所包围,沿浅表延伸很远,因此不能忽视波的传播效应对它的影响.本文应用二维超声地震模拟方法(赵鸿儒等,1986)研究地震波传播情况下地下管线的地震反应,着重研究地下管线延伸方向地震波动的相位差异效应.

通过对一般场地条件的概括,提出了均匀场地和非均匀场地两种模型(图1),管线在覆盖层浅部穿过,两种场地的岩土参数示于表1中.对于两种场地,均设震源深度为

\* 本工作系博士学科点专项科研基金资助项目成果之一.

1989年10月8日收到本文初稿,1991年1月20日决定采用.

15 km，地震波的卓越周期为 0.6s，研究范围为震中距 0—45 km。

表1 地下生命线工程场地岩土参数

场 地		$v_s$ (m/s)	$\mu$	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )
均 匀	覆盖层	250	0.38	1.8
	基 岩	2000—3000	0.28	2.5
非 均 匀	覆 盖 层	250	0.38	1.8
		1000—1500	0.32	2.0
	基 岩	2000—3000	0.28	2.5

注：  $v_s$  为横波速度；  $\mu$  为泊松比，  $\rho$  为密度。

二、模型设计及实验观测方式

1. 原型的合理简化

按相似比将原型缩小为模型时,管线的截面积将缩小到可以忽略不计的程度,而其延伸方向上的长度无论如何也不能忽略,这就给管线的严格模拟带来了很大困难.然而,实验和分析都表明,在地震波动作用下地下管线和周围岩土之间的相对运动可以忽略不计;另外,地震波横过管线传播时波形不受管线的影响(O'Rouker and Wang,1985).这样就可以把地下管线的地震反应问题,转化为管线所在岩土体的地震反应问题,从而在模型上完全可以将管线忽略掉.

2. 模型设计及观测方式

按原型及相似性要求所选定的模型材料示于表 2 中.实验模型如图 2 所示,按相似比,  $D$  型总厚度与地壳厚度相当.

表 2 模型材料参数

模 拟 对 象	材 料	$v_p$ (m/s)	$v_s$ (m/s)
基岩	玻璃板	5422	3448
覆盖层 1	盖塑板	752	352
覆盖层 2	石英砂环氧树脂板	2800	1500

注：  $v_p$  为纵波速度；  $v_s$  为横波速度

在模型上以 1cm 的间距布设测点,观测质点振动的水平分量(X)和铅垂分量(Z).激发点位置、测线的布设方式以及观测范围也一并示于图 2 中.

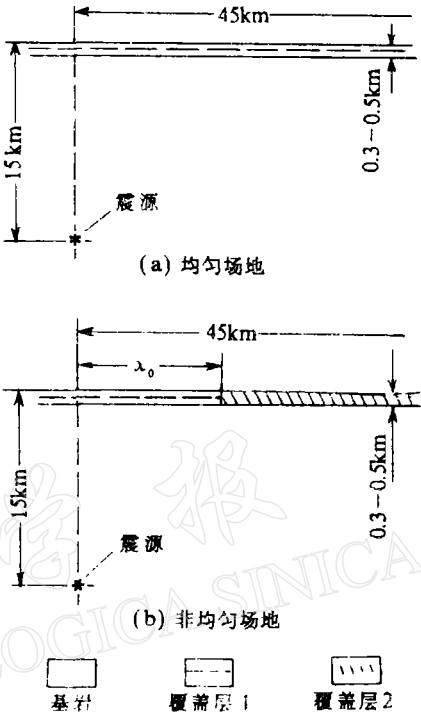


图 1 地下生命线工程场地条件示意图

## 三、实验研究

为研究地下管线延伸方向地震反应的相位差异效应,除解释震波传播的震相分析外,本文展开了以质点振动为中心的一系列分析.

## 1. 震相分析

通过震相分析可了解给定场地条件下震波波场的分布规律(孙进忠等,1985).

到达场地的主要体波震相示于图 3a 中.在软土覆盖层条件下,由于覆盖层波阻抗  $\rho_1 v_1$  远小于基岩波阻抗  $\rho_2 v_2$ ,因此,即使基岩入射波以很小的掠射角入射到基岩顶面,覆盖层内波射线也将是近铅垂向(图 3b).这样,压缩波主要引起铅垂向的土体变形,剪切波则主要引起水平向的土体变形.进而可知,压缩波主要造成管线的径向弯曲变形,剪切波则主要引起管线的轴向伸缩变形或派生纵弯作用.总

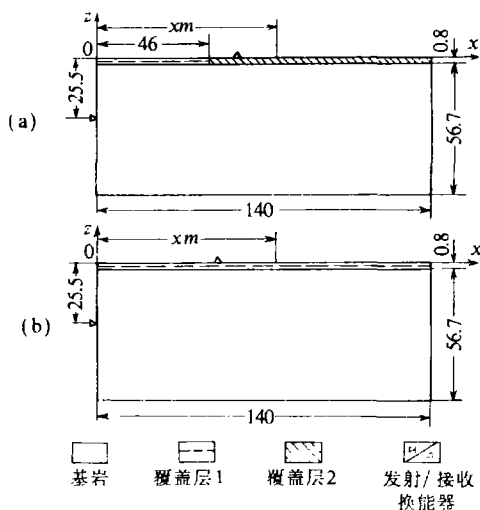
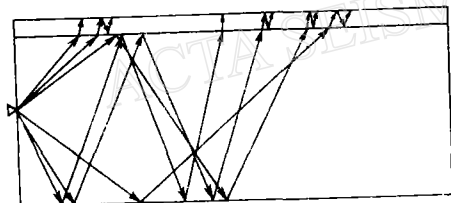


图 2 实验模型及观测方式示意图

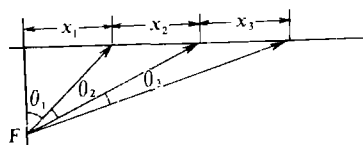
图中长度单位为 cm;  $xm$  为最大观测距离

(a) 模型 1——地下生命线非均匀场地模型

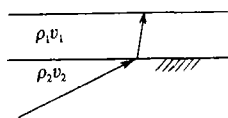
(b) 模型 2——地下生命线均匀场地模型



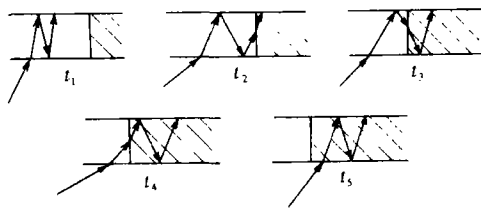
(a) 主要体波震相射线路径示意



(c) 不同震中距震波强度的射线示意



(b) 覆盖层对射线的折射示意



(d) 不均匀覆盖层对震波射线的影响示意

图 3 震相射线分析示意图

之,震波对管线的作用方式取决于波动本身的振动方向与管轴线方向的相互关系.

如图 3c 所示,远近不同的三个距离段对应震源有三个角域,当  $x_1 = x_2 = x_3$  时,有  $\theta_1 > \theta_2 > \theta_3$ .考虑震源能量辐射的方向性,可以推论,地震地面运动强度变化及其变化速率在  $x_1$  范围内最大,在  $x_3$  范围内最小.因此,在均匀介质条件下,震中距离越近对管线

越不利. 另外, 不均匀覆盖层对震源亦会产生显著的影响, 图 3d 以不均匀场地模型覆盖层内的三次波为例, 示意了横向突变的不均匀覆盖层对震波射线的影响.

除上述体波震相外, 模型表面沿测线传播的面波震相对地震地面运动也有相当贡献. 各类震相相干叠加, 构成强能量团向前传播.

## 2. 地震地面运动强度分布

最大振幅 - 距离曲线可以反映地震地面运动强度分布(彭一民等, 1987; 孙进忠等, 1986, 1988).

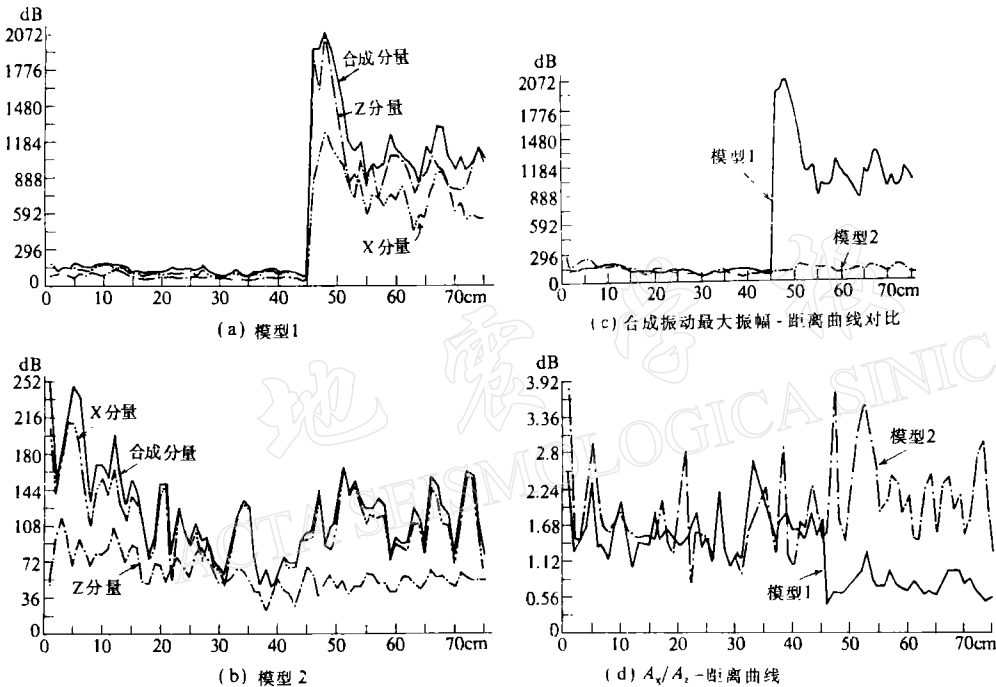


图 4 最大振幅-距离曲线

由图 4 可以看出, 在模型 1 两种覆盖层接触带附近, 最大振幅出现了非常大的阶跃, 在覆盖层 2 上的地震地面运动强度显著加强. 在具有均匀覆盖层的模型 2 上就不存在上述阶跃, 相比之下, 覆盖层横向变化对地震地面运动强度的影响是相当可观的(图 4c). 由图 4a 可知, 接触带两侧 X 分量最大振幅相差约 13 倍, Z 分量最大振幅相差约 54 倍, 合成振动的最大振幅相差约 30 倍. 软硬土界面附近振幅变化幅度很大, 较大振幅发生在硬土中, 大致影响范围相当于基岩中横波波长的 2.9 倍, 振幅曲线峰值在距交界面约一个(0.96 倍)波长之处. 由此, 管线防震段至少应包含硬土中距交界面约一个波长的区段(此距离与界面两侧的岩土特性有关, 应针对不同情况确定之).

对比不同分量的最大振幅曲线可见, 均匀场地模型上 Z 分量的强度不超过 X 分量, 局部区段两者相当; 在非均匀场地模型上, 对应于覆盖层 1 的区段 Z 分量的强度仍不超过 X 分量, 而对应于覆盖层 2 的区段 Z 分量的强度明显高于 X 分量. 这反映了不同介质对地

震动影响的差异,与覆盖层 1 比较,覆盖层 2 使地震地面运动的 Z 分量得到了加强,由图 4d 可求出,均匀场地模型的水平向最大振幅与铅垂向最大振幅之比  $A_x/A_z$  的平均值为 1.94.

另外,由图 4 可见,地震地面运动的强度表现出节律性变化,其峰点间隔为 3cm 左右,与模拟基岩中的震波波长相当.可见,地震地面运动强弱变化的节律性主要取决于基岩中的波动,而厚度有限(小于震波波长)的覆盖层对其影响甚小.

### 3. 质点振动矢量分析

最大振幅-距离曲线勾勒出了地震地面运动强度分布的轮廓,通过质点振动矢量分析,则可进一步详细了解波传播造成的地震地面运动的相位差异效应.

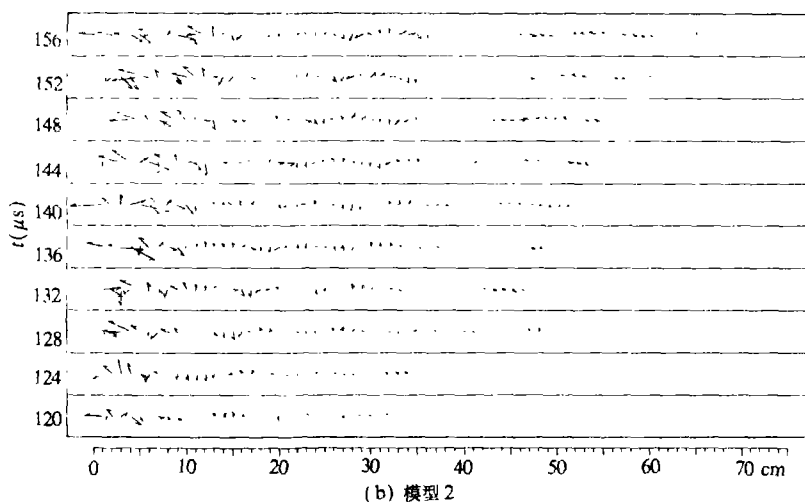
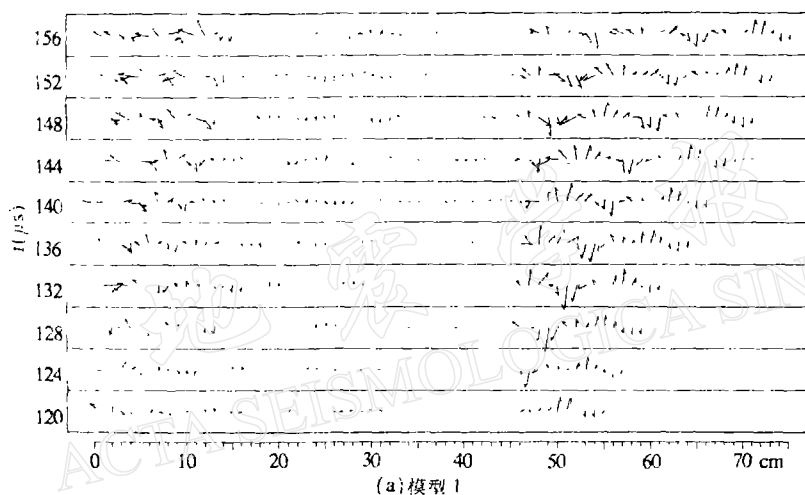


图 5 120—156 $\mu$ s 时段地震地面运动质点振动矢量图

图 5 所示质点振动矢量图总体反映了测线范围内,波传播引起的地震地面运动的动态过程.

随着时间的推移和距离的增加斜向观察, 可以看到波前的推进和等相位振动矢量的传递. 起初模型上各测点均处于静止状态, 随着时间的推移, 各测点先后受到扰动, 震中距越大受到初始扰动的时间越晚. 随着时间的推移, 到达测点的震相越来越丰富, 质点振动的强度逐渐增大, 方向变化越来越复杂. 可以看到振动方向大致相同或渐变的同相位振动矢量, 随时间推移不断向较大震距传递. 同相位振动矢量有的以较大的矢径在某点上出现, 在向较远震中距传递的过程中, 矢径波动减小趋于消失. 在传播过程中, 同相位矢量的方向在某段距离上保持稳定, 而在某些区段发生渐变、出现相移. 各类震相相干叠加, 在一定的持续时间和观测区段上形成较大的能量团传播. 大能量团经过后, 质点振动逐渐减弱、趋于平静.

固定在某一时刻沿测线横向观察, 可以看出不同测点同一时刻的质点振动状态, 从而反映出波传播所引起的不同测点上, 质点振动的相位差异. 例如, 在  $t = 140\mu\text{s}$  时模型 1 整个测线的质点振动状态示于图 5a 中. 从质点振动的强度来看, 1—11cm 为正常的波传播所造成的大能量团所在区段; 而 11—46cm 为初始扰动影响区段, 此区段内, 波前已经过去, 但大能量团震波尚未到达, 振动强度明显弱于前段; 在 46—69cm 区段, 为使图面清晰, 所示矢径已缩小了 5 倍, 即使如此, 仍可明显看出质点振动的显著加强. 模型上  $x = 46\text{cm}$  处为覆盖层 1 和 2 的接触带, 振动的加强正反映了覆盖层介质变化; 在 69—75cm 区段上, 震波尚未到达, 质点仍处于静止状态. 从质点振动的方向来看, 在 1—11cm 区段上, 振动矢量以水平指向震中始, 又以大致水平指向震中终, 其间矢量方向顺时针转动两次, 呈周期性波动变化, 波长约为 5cm; 11cm 以后的区段上矢量方向也有类似的波动变化, 波长约为 10cm. 上述质点振动方向的变化, 清楚地勾勒出了测线上质点振动的相位差异图象. 地下管线在这种情况下将受到类似的波动, 而且, 当穿过  $x = 46\text{cm}$  处的介质突变带时, 管线会遭受很强的差应力作用. 对模型 2 进行类似的分析, 由于其覆盖层为均匀的, 故其质点振动矢量没有象模型 1 那样的强度异常.

## 四、结 论

1. 距离震中越近, 地震地面运动强度变化的幅度及速率越大, 从而对地下管线越不利.

2. 在软土覆盖层条件下(覆盖层波阻抗远小于基岩波阻抗), 压缩波主要引起铅垂向土体变形, 剪切波主要导致水平向的土体变形. 进而, 压缩波主要造成管线的径向弯曲变形, 剪切波主要引起管线的轴向伸缩或派生纵弯作用.

3. 当覆盖层较薄(厚度小于震波波长)时, 地震地面运动强度的节律性变化主要受基岩中震波波长的控制, 节律变化的峰值间隔与基岩中震波波长大致相当.

4. 地表覆盖层岩土性质对地震地面运动的强度有显著影响. 覆盖层岩土性质的横向突变, 可能造成地震地面运动强度十几甚至几十倍的变化. 在本文实验条件下, 较大振幅发生在硬土中, 影响范围大致相当于基岩中横波波长的 2.9 倍, 振幅曲线峰值发生在距软硬土界面约一个(0.96 倍)波长之处. 由此, 管线防震段至少应包含硬土中距界面约一个波长的区段.

5. 不同性质的覆盖层对地震地面运动各分量的影响程度不同. 从实验结果看, 刚度

较大的介质使地震地面运动表现出较强的铅垂向振动. 因此, 当管线穿过不同岩土单元时, 应注意在不同方向上采取不同的抗震措施.

6. 由于波的传播效应, 不同震相的震波相干叠加形成大能量团的传播, 使地表在不同时刻处在不同的质点振动状态下, 穿越于覆盖层中的地下管线, 将随质点振动的状态产生相应的变形. 管线较大的变形发生在地震波动的大能量团所经之时, 另外, 不同岩土单元的接触部位及其附近, 也将是振动相位和强度差异显著的部位, 尤其要注意加强这些部位的抗震措施.

### 参 考 文 献

- 彭一民、孙进忠、郝宪生, 1987. 北京凹陷地震反应的数学物理模拟. 地质学报, 4: 308—321.
- 孙进忠、赵鸿儒、彭一民, 1985. 全波模型的震相分析. 石油地球物理勘探, 20, 352—362.
- 孙进忠、赵鸿儒、彭一民, 1986. 全波模型的震相分析(续篇)——射线、振幅、波谱、质点振动方式分析. 石油地球物理勘探, 21, 638—646.
- 孙进忠、彭一民、赵鸿儒, 1988. 北京凹陷地震地面运动超声模拟. 地震学报, 10, 98—109.
- 土木学会编, 路秉杰、曲则生、孙吉乾译, 1983. 地震反应分析及实例, 423—430. (日). 地震出版社, 北京.
- 赵鸿儒、唐文榜、郭铁栓, 1986. 超声地震模型试验技术及应用. 石油工业出版社, 北京.
- O'Rouker, M. and Wang, L. R. L., 1985. 地下管道的地震反应. 地震工程 and 土动力问题译文集, 448—457. (美).
- Idriss, I. M. 等著, 谢君斐等译, 地震出版社, 北京.