

有盖中弱风化岩体的弹性波有效激励与信号检测

朱德兵 ,何继善  
(中南大学 ,湖南 长沙 410083 )

摘 要 :浅层地震勘探在工程领域广泛应用 ,但在岩溶地域 ,由于覆盖层与中—弱风化岩石层之间存在明显的波阻抗分解面 ,入射波的大部分能量被约束在覆盖层中 ,从而难以在基岩中形成有效激励的弹性波 ,以至难以准确探测基岩体内的溶洞、断层等异常的响应。以两层简化模型模拟该类地层结构 ,通过波动方程的解析计算 ,发现基岩表面的能量透射规律 ,从理论上说明在浅层乃至超浅层地震勘探中 ,选择小偏移距和临界角附近横波 SV 测量的可能性 ,通过各种因素的综合考虑 ,力争获得目的体的最大响应信号。

关键词 浅层地震勘探 弹性波 ;有效激励 偏移距

中图分类号 :P631.4 文献标识码 :A 文章编号 :1000 - 8918( 2002 )06 - 0450 - 04

浅层地震勘探及相关弹性波测试技术在工程物探领域应用广泛<sup>[1~5]</sup>。尽管弹性波一类方法在岩溶地区的工程物探中有较广泛应用<sup>[6~10]</sup> ,但这种复杂背景下探测基岩岩体内的溶洞构造一直是系统解决的难题 ,主要原因有 :①近源探测 ,各种震相的响应信号相互干涉 ,形成复杂的背景 ;②地表条件复杂 ,下伏基岩岩面起伏较大 ,覆盖层中存在大量滚石、石柱或石芽 ;③覆盖层与基岩交界面上下介质波阻抗差异太大 ,透射到基岩体内的弹性波能量较弱 ,难以形成有效的响应。

弹性波在不同介质界面的反射透射研究是地震勘探的理论基础 ,在众多的地震勘探文献中有系统的论述 ,钱祖文对弹性介质非线性声学问题作了系统的研究<sup>[11~13]</sup>。综合岩溶地区地球物理特点 ,从反射系数和能量两个角度综合研究弹性波的有效激励和透射问题的研究尚没有文献报道。

在以上因素中 ,有盖中—弱风化岩石的弹性波有效激励与检测显得十分重要 ,因为 ,如果地表激励的弹性波 ,没有有效能量透射入基岩岩体 ,基岩岩体内的响应信号不能有效地传向地表介质 ,良好数据分析和信号处理技术也难以从记录信号中提取基岩岩体内异常响应信息 ,这一认识较以前强调反射系数而追索反射界面的提法更推进了一步。

以两层简化模型模拟该类地层结构 ,通过波动方程的解析计算 ,发现基岩表面的能量透射与入射角、上覆介质厚度等参数之间的规律 ,从而可以为选择测量参数和适当的偏移距进行浅层弹性波勘探工作提供参考依据。

1 理论模型

考虑到本文中所涉及的固体—固体界面一般解 ,将两层结构的弹性波传播问题进行适当简化 ,分析平面纵波 P 入射到波阻抗特性不同的两个弹性半空间的交界面 ,得图 1 所示结果。入射角为  $\alpha_1$  ,在波阻抗界面 ,发生反射和透射 ,同时产生反射纵波、反射横波、透射纵波、透射横波 ;相应的反射和折射角分别为  $\alpha_1$ 、 $\beta_1$  以及  $\alpha_2$ 、 $\beta_2$ 。介面两侧固体介质纵、横波速、介质密度参数分别用  $v_{p1}$ 、 $v_{s1}$ 、 $\rho_1$  和  $v_{p2}$ 、 $v_{s2}$ 、 $\rho_2$  表示。

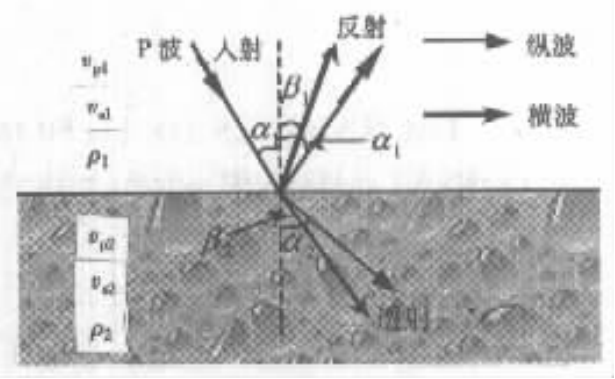


图 1 弹性波在两层结构分界面反射折射示意  
 $\rho_2$  表示。假定两个半空间在界面处紧密接触 ,

保证在接触界面处应力和位移满足弹性协调的边界条件 ,应用均匀弹性介质应力应变关系 ,即虎克定律 ,结合界面处的位移和应力必定连续的边界条件 ,

$$\begin{bmatrix} \sin\alpha_1 & \cos\beta_1 & -\sin\alpha_1 \\ -\cos\alpha_1 & \sin\beta_1 & -\cos\alpha_2 \\ \sin2\alpha_1 & \frac{v_{p1}}{v_{s1}}\cos2\beta_1 & \frac{\rho_2 v_{s2}^2 v_{p1}}{\rho_1 v_{s1}^2 v_{p2}}\sin2\alpha_2 \\ \cos2\beta_1 & -\frac{v_{s1}}{v_{p1}}\sin2\beta_1 & \frac{\rho_2 v_{p2}}{\rho_1 v_{p1}}\cos2\beta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\beta_2 \\ -\sin\beta_2 \\ -\frac{\rho_2 v_{s2} v_{p1}}{\rho_1 v_{s1}^2}\cos2\beta_2 \\ -\frac{\rho_2 v_{s2}}{\rho_1 v_{p1}^2}\sin2\beta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_p \\ R_{sv} \\ T_p \\ T_{sv} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin\alpha_1 \\ -\cos\alpha_1 \\ \sin2\alpha_1 \\ -\cos2\beta_1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

可直接用位移这个物理量得出位移反射系数与透射系数的公式<sup>[14]</sup>。式中  $R_p, R_{sv}$  分别是纵波和横波的位移反射系数。  $T_p, T_{sv}$  分别是纵波和横波的位移透射系数。

给定入射介质和透射介质的介质密度、纵波波速、横波波速以及入射 P 波的入射角,根据折射定律,可以相应地求出反射 SV 波反射角、透射 P 波的透射角、透射 SV 波的透射角,反射 P 波的反射角等于入射 P 波的入射角。

设入射波 P 的能量为  $E_0$ ,反射纵波和横波的能量分别为  $E_{rp}$  和  $E_{rsv}$ ,透射纵波和横波的能量分别为  $E_{tp}$  和  $E_{tsv}$ 。能量系数的计算公式可由下式给出<sup>[14]</sup>：

$$\begin{aligned} \frac{E_{rp}}{E_0} &= R_p^2; & \frac{E_{rsv}}{E_0} &= \frac{\tan\alpha_1}{\tan\beta_1} R_{sv}^2; \\ \frac{E_{tp}}{E_0} &= \frac{\rho_2 \tan\alpha_1}{\rho_1 \tan\alpha_2} T_p^2; & \frac{E_{tsv}}{E_0} &= \frac{\rho_2 \tan\alpha_1}{\rho_1 \tan\beta_2} T_{sv}^2. \end{aligned} \quad (2)$$

选取典型灰岩地区的一个地质地球物理模型,其参数为:覆盖层  $v_{p1}=1\,300\text{ m/s}$ ,  $v_{s1}=680\text{ m/s}$ ,  $\rho_1=1.9\text{ g/cm}^3$ ;中风化灰岩  $v_{p2}=2\,500\text{ m/s}$ ,  $v_{s2}=1\,600\text{ m/s}$ ,  $\rho_2=2.2\text{ g/cm}^3$ 。

通过计算,可以得到反射系数和透射系数随入射角度变化的规律如图 2 所示。相应地,反射能量和透射能量系数的计算结果如图 3 所示。综合两组曲

线的对比结果,可以看出如下规律。

纵波位移反射系数和能量系数随入射角的增大,在临界角范围内逐渐减小,在临界角(临界角)附近有一个较小的增大趋势,位移反射系数变化范围不大,但能量反射系数的变化幅度很大,最大最小能量系数之比达 3 倍。

纵波位移透射系数随入射角的增大而缓慢增大,在达到临界角附近时迅速增大,但能量系数在整个临界角范围内呈下降趋势,变化幅度不大。

横波位移反射系数和透射系数、能量反射和透射系数随入射角增大呈明显的增大趋势,变化幅度相当大;在一定的入射角度时超过纵波的反射或透射系数;单就能量来说,反射能量和透射能量在临界角附近同时超过纵波的反射和透射能量系数;其中反射横波在入射角附近达到极大值。

总体上看,在极小入射角时,纵波透射反射能量较强,在临界角范围靠近临界角时,横波透射和反射能量更有优势。

通过以上分析,发现了理论计算结果的一些内在规律,从分析结果中得出以下参考结论。

对于理想条件下的完全弹性介质,不论考虑给定界面上的反射波还是入射波,应该从位移系数和能量系数两组参数综合考虑。能量反射系数是一个重要的参数,在考虑弹性波在给定界面有效入射时需要着重考虑。

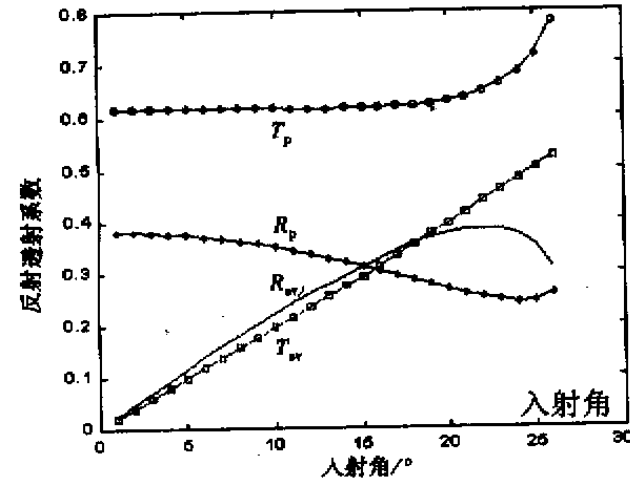


图 2 不同入射角位移反射透射系数

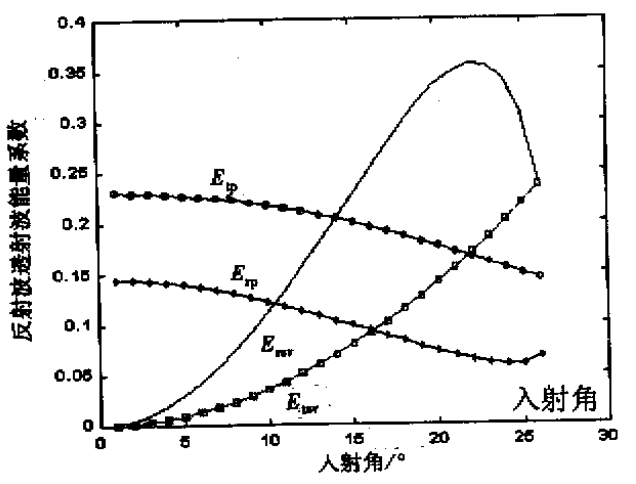


图 3 不同入射角反射波透射波能量系数

对于给定的介质模型,如果要取得较强的纵波透射、入射效果和纵波反射效果,选择的偏移距越小越好,由于在小偏移附近,纵波反射系数透射系数变化不大,因此小偏移距还有一定的灵活范围。

除了纵波反射勘测量外,从理论上可以考虑在临界角范围内采用SV波探测技术,对于岩溶地区,如果要了解风化或完整岩体内的异常结构,可以考虑多分量检波测试与综合分析解释。事实上,横波在同等地球物理前提下,其分辨能力有一定的优势,纵波激发、SV横波接收的数据采集模式在理论上也是可取的。

以上分析是基于一组特定参数的计算结果,由于岩溶地区,灰岩覆盖层或风化灰岩本身弹性波参数变化范围极大,不同的参数计算结果可能还会有一定的差异。

综合考虑浅层地震折射波等波相的干涉问题,震源垂直激励时,纵波勘探选用较小偏移距是合适的,由于震源与检波器之间还有直达波等干扰波影响,直达波与地表面的介质直接相关,在地表地质条件变化较大的地区,还应综合考虑直达波影响,通过实验选定合适的偏移距。

震源垂直激励的弹性波,在实际条件下,以一定的入射角透射入基岩,入射角越大,其在覆盖层中经过球面扩散和走时传播衰减也越大,所以其透射的能量更弱,从而很难激励起基岩体内异常结构产生响应。大偏移距测量一方面会有浅部异常结构的综合效应影响,另一方面,透射入基岩的纵波能量变弱,所以在岩溶地区实行反射波勘探时,如果勘探对象是岩体内的溶洞或构造,纵波应考虑极小偏移距测量,SV横波考虑在临界角附近测量。

从实际野外剖面记录上看,垂直激发、纵波接收,小偏移距记录上的瑞利面波几乎覆盖了浅层的所有反射信息,在理论分析时,面波实际上是纵波和横波相互干涉的一种结果,岩溶地区,覆盖层中的导波还会导致面波的频散,加重了早时段记录的复杂性。由此可以看出岩溶地区,小偏移技术在传统的反射波处理分析时有其复杂的一面。

超浅层弹性波激励响应是一个复杂的多振相干涉信号,基岩体内溶洞及构造的有效激励是岩溶物探资料解释的前提,在此之所以分析入射波的透射能量,是为研究特殊地域下伏介质的有效激励规律。

## 2 工程应用中的有关问题及注意事项

震源的性质一旦确定,我们较难选择激励的角

度或方向,因此,超浅层地震勘探中,选择适当的偏移距至关重要,与常规反射波方法对反射系数要求不同的是,若要获得基岩岩体内的溶洞构造响应,需要在界面处有足够的能量透射到基岩体内。

应用弹性波类的工程物探技术勘探基岩岩体内的隐伏地质病害,如石灰岩地区,灰岩岩体内的溶洞、裂隙等,必须要有足够的能量激励这些病害表现的地质构造,使地表安装的传感器获得足够强的响应信号,从而在一定程度上提高信噪比,通过合适的信息处理技术,提取异常特征,结合实地地质情况进行合理的解释,达到勘探的目的。

基岩表面剧烈起伏,覆盖层相对较浅地区,不论构造复杂与否,一般不适合大偏移距的反射波地震勘探,太小偏移距施工受震源的干扰极大,因此,选择适当的偏移距对岩体内的异常构造激励非常关键,折射波方法应用解释也应该在对基岩岩体内的弹性波传播机理进行深入了解的基础上进行,一般对覆盖层较浅的情况,应用也会受到限制。

上述理论模型是针对理想条件下的参数进行计算,实际工作中,理想弹性介质并不存在,而且由于基岩的岩性或风化程度不同,其波动学或动力学特性存在较大的变数,基岩上覆盖层的波动学或动力学特性也有较大的差异。

一定地域不同的地质剖面和介质参数,其基岩面上的反射透射特征有不同的规律,不能生搬硬套;实施噪声剖面调查和详细分析,对比岩土原位测试结果和地质剖面,选择合适的装置参数和弹性波检测分量是工程物探勘察成功的关键。

## 3 结语

基于完全弹性介质和完全弹性接触条件所得出的结果仅能作为实际工作的理论参考。对于浅表层介质来说,弹性波的激励在覆盖层中的传播以及在基岩表面的反射和折射特征要受到非弹性因素及复杂接触衔接条件的制约,根本不可能出现文中所述的理想情况,在实际工作中应该具体问题具体分析,选择合适的偏移距和激励方式,以获取基岩岩体内的异常结构响应信号。

浅层乃至超浅层(约激励主频一个波长深度范围内)的地震勘探,在基岩复杂地区,尤其是岩溶地区,其地质病害勘查要受到客观条件的局限,一直是没有有效攻克的难题。尽管电法、电磁法(包括地质雷达技术)在地表物理背景条件良好的情况下,可以结合地质背景对病害状况做出分析解释,但多数情

况下只能达到相当有限的程度。弹性波类方法所选择的参数与介质弹性力学参数之间有密切的联系 , 在工程地质领域有其独到的优势 , 因此研究弹性波的激励机理和有效激励具有重要的理论意义。有幸的是 , 理论上对弹性介质甚至粘弹性介质的反射透射等问题都有一定程度的系统研究<sup>[11~13]</sup> , 并不断深入 , 以此为基础 , 可以对有效激励问题进行进一步研究。

近源弹性波的有效激励不仅包括偏移距等装置参数的选取 , 还应包括与激励源、激励技术相关的许多问题 , 需要系统研究。笔者仅是抛砖引玉 , 不当之处 , 请指正 !

参考文献 :

[ 1 ] 杜平安 . 浅层地震勘探中的弹性波频率测试应用[ J ]. 物探与化探 , 1995 , 19 ( 3 ) : 238 - 240 .  
[ 2 ] 孙宏志 . 陆地声纳浅层地震勘探技术[ J ]. 煤炭科学技术 , 1999 , 27 ( 12 ) : 17 - 19 .  
[ 3 ] 薛荣俊 , 张维冈 , 李金山 , 等 . 浅层地震折射波法在跨河大桥中

的应用[ J ]. 海洋技术 , 1997 , 16 ( 4 ) : 40 - 44 .  
[ 4 ] 梁光河 , 蔡新平 , 王杰 , 等 . 浅层地震勘探在云南北衙地区隐伏金矿预测中的应用[ J ]. 黄金科学技术 , 2000 , 8 ( 6 ) : 1 - 9 .  
[ 5 ] 张立柱 . 浅层地震勘探在安阳市地震小区划中的应用[ J ]. 水文地质工程地质 , 1999 ( 1 ) : 53 - 55 .  
[ 6 ] 李彦军 . 岩溶地质综合勘察方法[ J ]. 铁道建筑 , 2000 ( 5 ) : 7 - 8 .  
[ 7 ] 李坚 . 综合物探在南昆线岩溶复查工作中的应用[ J ]. 地质与勘探 , 1998 , 34 ( 5 ) : 42 - 47 .  
[ 8 ] 刘崧 . 物探方法在岩溶勘查中的应用综述[ J ]. 地质科技情报 , 1997 , 16 ( 2 ) : 85 - 90 .  
[ 9 ] 刘保金 , 张天航 , 冷欣荣 . 不同地区工程勘察的高分辨率地震反射探查[ J ]. 西北地震学报 , 1999 , 21 ( 1 ) : 55 - 61 .  
[ 10 ] 中国地球物理学会勘探地球物理专业委员会水资源、工程物探学组 . 中国水文、工程、环境物探的回顾与展望[ J ]. 地球物理学报 , 1997 , 40 ( 增刊 ) : 369 - 378 .  
[ 11 ] 钱祖文 . 各向同性弹性介质中 P 波与 SV 波的非线性相互作用[ J ]. 声学学报 , 1996 , 21 ( 4 ) .  
[ 12 ] 钱祖文 . 有界空间的非线性声学——二阶体波的反射和折射 ( I ) P 波入射[ J ]. 中国科学 ( A 辑 ) , 1993 , 23 ( 7 ) .  
[ 13 ] 钱祖文 . 有界空间的非线性声学——二阶体波的反射和折射 ( II ) SV 波和 SH 波入射[ J ]. 中国科学 ( A 辑 ) , 1994 , 24 ( 2 ) .  
[ 14 ] 徐仲达 . 地震波理论[ M ]. 上海 : 同济大学出版社 , 1997 .

EFFECTIVE ELASTIC WAVE STIMULATION AND SIGNAL DETECTION OF MEDIUM-TO-WEAK COVERED WEATHERED ROCK

ZHU De-bing , HE Ji-shan

( Central South University , Changsha 410083 , China )

**Abstract :** Since there exists a distinct wave impedance surface between the cover and the medium-to-weak weathered rock , most energy of the incident wave was restrained in the cover and it is very difficult to stimulate effective elastic wave in the rock . Therefore , the response signal of the cavern or fault in the rock was too weak to record . Simplifying this kind of structure by two-layer model together with the analysis and calculation of the wave equation , we can find the penetration laws of the incident energy on rock surface and then theoretically show that it is possible to choose little offset and near critical angle SV wave measuring in shallow or ultra-shallow seismic survey . The consideration of as many factors as possible can lead to good ideas with which we can stimulate the most distinct response signal of the concealed targets .

**Key words :** shallow seismic survey ; elastic wave ; effective stimulation ; offset

作者简介 : 朱德兵 ( 1969 - ) , 男 , 生于湖北沔阳县 ( 现仙桃市 ) , 1998 年毕业于中国地质大学 ( 武汉 ) 物探系 , 获工学硕士学位 , 现为中南大学地球探测与信息技术专业 99 级博士研究生。研究方向 : 工程地球物理勘探和无损检测的系统设计 , 信号测试与分析方法技术 , 相关基础理论及数据数字信号处理 , 参数联合反演及综合解释。已发表论文 4 篇。