

深层地震勘探在深埋特长隧道勘察中的应用

黄正发^{1,2}, 王云安¹, 王红明¹

(1. 湖北省交通规划设计院, 湖北 武汉 430051; 2. 中国地质大学, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 以沪蓉国道主干线湖北省高坪- 吉心段大水井隧道的工程地质勘察为例, 讨论了深层地震勘探在深埋特长隧道勘察中的应用。利用深层地震反射波法可以有效地探测覆盖层、各风化层以及不同基岩界面的埋藏深度, 根据波速判断隧道围岩类别、探测不良地质现象(喀斯特、断层、节理裂隙等) 等。因此, 深层地震勘探可为隧道的设计、施工提供必要的地质依据。

关键词: 沪蓉国道; 深埋特长隧道; 深层地震; 工程地质勘察

中图分类号: P631. 4

文献标识码: A

沪蓉国道主干线湖北省高坪- 吉心段地处鄂西南喀斯特山区, 形成了较为典型的峰丛槽谷和峰丛洼地等地貌景观, 槽谷、洼地、漏斗、落水洞、溶洞和地下暗河等喀斯特现象极为普遍。本区特长深埋隧道埋深大(局部埋深 > 600 m)、地形起伏大, 常规物探方法很难达到设计需求的勘探深度和精度。

对本段控制性隧道——大水井深埋特长隧道, 采用深层地震反射法勘探。该方法与浅层地震方法相比较, 其特点是最大接收道为 120 道以上, 勘探深度大(可达 3 000 m, 而浅震为 100 m 以内), 测量精度高(为了加快施工速度, 必须上 GPS 仪器, 而浅震一般用皮尺测量), 覆盖次数高(由于其道数多, 对地下同一点可达到 6 次以上), 震源深、药量大, 采用组合检波(一个点用多个检波器接收信息) 等。

地震勘探基本工作方法是利用炸药或非炸药性震源, 在地表某测线上或浅井中激发地震波, 当地震波向下传播遇到弹性不同的分界面时, 就会发生反射透射和折射; 由于地震波在介质中传播时, 其传播路径、震动强度和波形将随所通过的介质的结构和弹性性质的不同而变化; 根据接收到的地震波旅行时间和速度资料, 可以推断解释地质构造的形态; 根据地震波的振幅、频率、速度等参数, 可能推断岩石的

性质, 从而达到勘探隧道洞身围岩的目的^[1]。

1 勘测工区地震地质条件

1.1 表层地震地质条件

区内地形起伏大, 高差 ≥ 200 m。部分地区表层为第四纪沉积盖层, 厚度为 0. 1~ 3 m, 粘土为主。大部分地区表层为石灰岩, 速度在 3 400~ 3 500 m/s 间。工区西部地形变化较大, 地层倾角较大。低速带厚度在 0~ 3 m 间, 低速层速度在 500~ 800 m/s 间, 无降速层。

1.2 深部地震地质条件

大水井隧道所在区域属于峰丛洼地- 峰丛槽谷地貌类型, 构造上位于客坊背斜的核部偏东翼。客坊背斜在该区表现为斜歪褶皱特点, 东翼产状相对较缓, 倾角最缓处仅 19° , 一般为 40° 左右; 西翼产状陡倾, 倾角一般 $60^\circ \sim 85^\circ$ 。该背斜核部出露的最老地层为大冶组第一段的灰色中- 厚层微晶灰岩与黄绿色页岩互层, 灰岩层厚度一般 30~ 50 cm, 页岩层厚度一般在 10~ 30 cm; 两翼依次出露大冶组第二段灰色薄- 极薄层微晶灰岩, 层面上常有几毫米- 几厘米厚的页岩、大冶组第三段薄- 中厚层微晶灰

收稿日期(Received date): 2004- 02- 01; 改回日期(Accepted): 2004- 03- 20。

基金项目(Foundation item): 国家发展改革委员会项目(发改交运[2003] 1082 号)。[Supported by the national key project of the Planning Commission of China(20031082).]

作者简介(Biography): 黄正发(1971-), 男(汉), 江西波阳人, 在读博士。主要研究方向: 工程勘察工作。[Huang Zheng-fa (1971, male, post graduate, mainly work on the exploration of the express way.]

岩以及嘉陵江组灰色或肉红色中厚层状微晶灰岩和灰色巨厚层状或块状角砾状灰岩。该区断裂构造不发育, 裂隙以层面裂隙以及垂直层面(走向 $120^{\circ} \sim 130^{\circ}$) 的陡倾角为主, 地表大型喀斯特形态——溶蚀洼地和溶蚀槽谷以及溶蚀微地貌形态——溶沟和溶槽都沿这两组方向的结构面发育。

2 地震数据采集方法及采集参数

2.1 前期试验

1. 进行检波器敲地试验(测试检波器), 通过试验确定用于采集施工的检波器是否符合地震采集规范要求。

2. 选择本工区具有代表性的地段, 进行了生产前期试验, 确定本工区的最佳采集参数和施工参数。炮点并位定在农田地、半山地、山地和岩石出露区, 共试验物理点 7 个, 内容如下:

仪器因素: 采样率、记录长度、仪器前放增益。

观测系统: 道间距, 炮间距, 偏移距, 排列长度。

激发因素: 激发井深和药量。

2.2 采集参数

根据前期试验资料分析和采集参数论证(克朗软件)

1. 垂向分辨率

根据瑞利(Rayleigh) 准则: “一个反射波的分辨率的极限是 $1/4$ 波长”(又称“薄层分辨率”)。对于垂向分辨率的经验估算采用下式:

$$B = \lambda/4 = V/(4fb) \quad (1)$$

式中 B 为垂向分辨地层厚度(m); λ 为视波长(m); V 为目的层层速度(m/s); fb 为目的层反射波主频(Hz)。

对石灰岩地层, V 选 $2\,800 \sim 3\,500$ m/s, fb 选 $60 \sim 100$ Hz, 经计算得 $B = 7 \sim 13$ m。

2. 横向分辨率

根据经验法则, 鉴别一个小目标至少需要 $2 \sim 3$ 个 CMP 道, 即

$$\Delta X = 2D \leq 2(L/3) \quad (2)$$

式中 ΔX 为道间距; D 为 CMP 点距; L 为目标尺度; $\Delta X = 5$ m, 求取目标尺寸为 7.5 m。

3. 最大炮检距

理论分析和勘探实践证明, 当最大炮检距 X_{\max} 等于或略小于最深目的层的埋深 H_{\max} 时, 即满足 $X_{\max} \leq H_{\max}$ 时, 可保证反射系数稳定、双

曲线模型成立, 并取得最佳的勘探效果。本勘探的目的层埋深为 300 m, 则最大炮检距应以不超过 300 m 为度。

2.3 仪器参数

采样率 0.5 ms; 记录长度 1 s; 仪器前放 12 Db; 低切: 不加; 记录格式: SEG 2(summit 24 位 A/D)。

2.4 观测系统

采用垂直多次叠加观测系统

道间距 5 m; 炮间距 25 m; 偏移距 10 m; 排列长度 305 m; 叠加次数: 6 次。

2.5 激发因素

井深: $1 \sim 2.5$ m; 药量: $100 \sim 300$ g。

2.6 接收因素

采用检波器型号: CDJ~ 38 Hz 数字检波器

勘探结果证明, 采用上述采集因素, 可以达到勘察目的。

2.7 特殊地段采集工作方法

工作区地表起伏大, 岩层倾角变化大, 为了准确确定围岩物性和与测线垂直方向围岩物性变化, 施工中采用下述特殊地震采集工作方法:

1. 三维地震勘探方法。在公里桩号 $181\,635$ 处进行了三维地震勘探, 观测系统如下: 道间距 5 m; 炮间距 20 m; 检波线距 15 m; CDP 面元 $2.5\text{ m} \times 7.5\text{ m}$ 。

2. 高叠加次数观测系统。在公里桩号 $182\,755$ 处, 垂直测线上高叠加次数二维地震勘探, 测线长度 430 m。道间距 5 m; 炮间距 15 m; 偏移距 10 m; 叠加次数: 15 次。

3 地震施工资料处理方法

地震施工仪器为美国 SUN 公司产 SS20 工作站, 包括稳压电源、ups、磁带机、绘图仪、数据转储微机 1 套。处理软件为美国 CSD 公司 FOCUS4.2 地震处理软件。

1. 处理流程(图 1)

解编磁带: 把地震数据从微机中传输到 unix 工作站中, 并把 seg 2 格式数据转换成 focus 处理软件的内部格式。

定义观测系统: 定义工区测线, 炮点与排列的关系, 炮点的位置。

炮道编辑: 剔除地震记录中的不正常道和坏炮, 切除强的初至波和发生畸变的的地震波。

建立地震模型: 根据地震地质条件、地层倾角的

走向, 地震波速度与岩性、速度与深度的关系, 建立工区的地震地质模型, 并根据处理后的效果分析, 不断修改地震地质模型, 使之达到最佳。

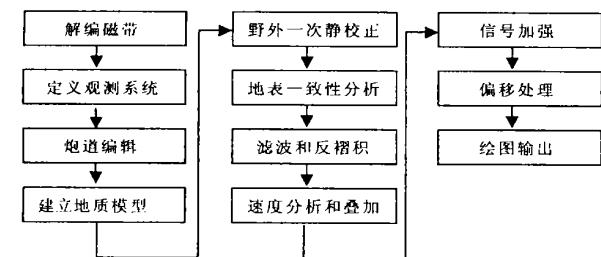


图 1 地震资料处理流程

Fig. 1 Processing flow chart of seismic monitoring data

野外一次性静校正: 将检波点、炮点校正到同一基准面上。

地表一致性分析: 地震记录的能量是沿着震源点逐渐衰减的, 浅层的能量很强。为了均衡近远道、深浅层地震波的能量上的差异, 对地震记录进行能量分析后, 对地震记录的能量做均衡和补偿。

滤波: 对单炮记录上的高、低频干扰进行过滤, 驱除干扰波, 保留有效波。

反褶积: 提高地震记录的频率, 提高分辨率。

速度分析和水平叠加: 在 cdp 道集上对地震记录进行速度分析, 为下面的动校正提供速度依据。将地震记录在 cdp 道集合进行动校正, 然后将畸变的浅层部分切除掉, 进行水平叠加。

信号加强: 对地震有效波进行能量加强, 突出地震有效层次。

偏移处理: 地层有倾角的情况下, 在剖面上反映的地层走向与实际的地层走向有一定的偏差, 偏移处理就是消除这种偏差, 使地层归位。

绘图输出: 地震剖面处理结束后, 将其加上必要的注释、说明, 按照一定的比例尺在绘图仪上输出, 供解释人员解释。

2. 原始炮记录分析

对单炮记录进行频谱分析, 得到本工区的主频为 70 Hz, 频带很宽, 在不同岩性的激发介质中激发的单炮记录差别很大。一般来说, 在岩石中激发的单炮记录效果很好, 在单炮记录上可以见到同相轴的异常变化, 有效信号可见, 能解决工程地质问题 (图 2)。

整个工区地表岩石出露, 地层倾角大, 一般在 $10^{\circ} \sim 70^{\circ}$, 岩性大部分为石灰岩, 厚度大。据钻井数

据, 石灰岩在本工区的厚度基本上在 300 m 以上。高程变化大, 整个工区的高点和低点高差在 300 m 以上, 单炮记录初至起伏不平, 处理中对静校正的要求很大, 为了保证地质剖面在时间上的完整性, 基准面选择为 1 000 m。根据频谱分析结果, 带通滤波选择范围为 (16~ 20 Hz, 90~ 100 Hz), 尽可能保留地震波的有效成分。依据地质勘察提供的地质图以及在实际工作中掌握的资料, 建立了地震模型, 并根据处理的剖面 and 速度分析结构交互对该模型进行修改, 使地震剖面的效果达到最佳。

4 资料解释

4.1 地层分界

地震反射波组为地层分界面和同一层内的波组抗分界面。

1. 嘉陵江组: 为灰色或肉红色中厚层状微晶灰岩, 表层出露。

2. 大冶组第三段: 为薄—中厚层微晶灰岩, 表层出露, 厚度约为 250 m。

3. 大冶组第二段: 为灰色薄—极薄层微晶灰岩, 表层出露, 厚度约为 590 m。

4. 大冶组第一段: 为灰色中—厚层微晶灰岩与黄绿色页岩互层, 厚度约为 410 m。

4.2 地震异常

1. 喀斯特异常

该隧道由于受客坊背斜以及马水河、马口河排泄基准面的控制, 在背斜的西翼形成了规模宏大、与构造线走向一致的桥头坝集中排泄型喀斯特水系统, 地下水自西南向北东以地下暗河形式在马口河集中排泄; 背斜东翼则发育了一系列与构造线走向近于垂直的分散排泄型小型喀斯特水系统, 地下水在层面裂隙和垂直层面的横张裂隙控制下向南东方向径流, 于马水河边分散排泄。隧道东段主要位于马天坑和蓼叶湖两个小型喀斯特水系统的分水岭地带; 隧道的西段则位于桥头坝喀斯特水系统的东部边缘地带, 因此, 属于强喀斯特化地层中喀斯特发育程度相对较弱的地区, 不存在大型的喀斯特洞穴, 岩体相对比较完整, 仅部分洞段可能会遇见溶隙或小型落水洞。

2. 裂隙(节理)

在地震剖面上主要表现反射波组错位。左幅有 9 条裂隙(节理), 右幅有 11 条裂隙(节理)。

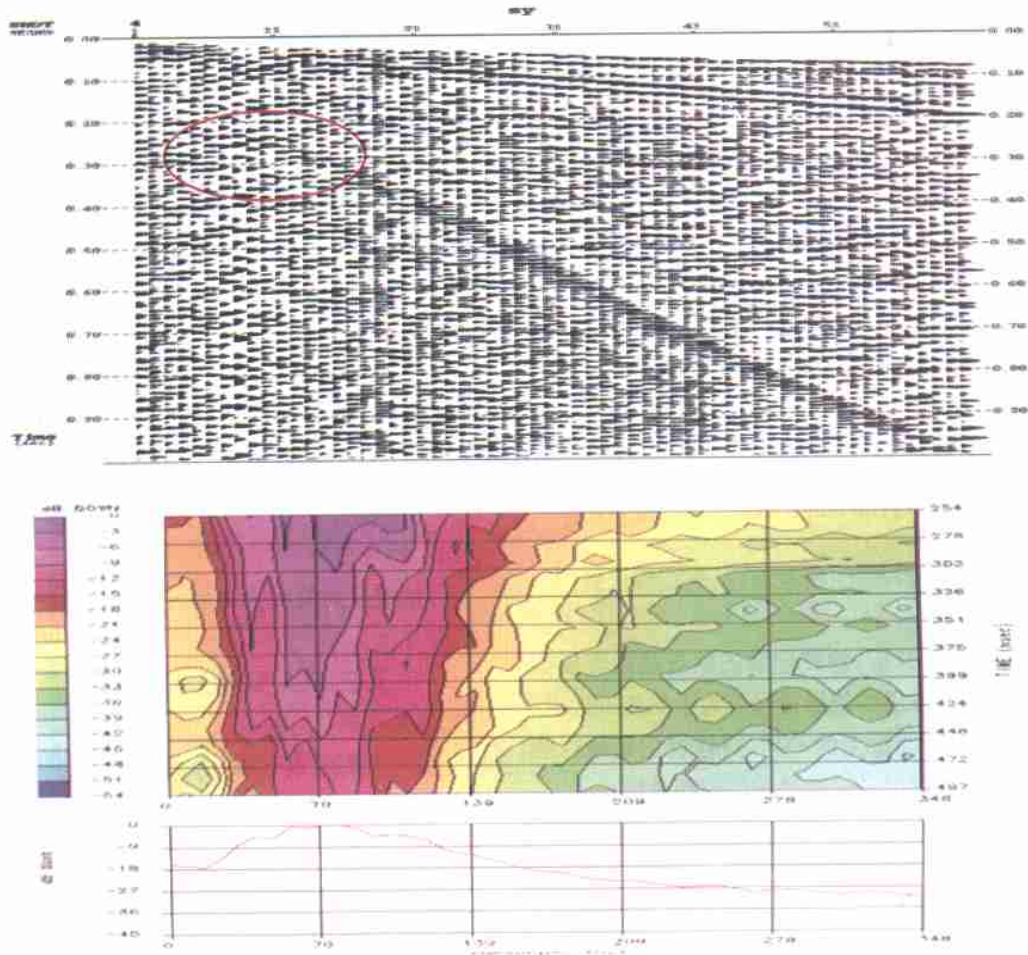


图 2 单炮记录频谱分析

Fig. 2 Analysis on frequency chart of single gun record

4.3 围岩分类

根据中华人民共和国交通部发布的行业标准 JTJ 064- 98《公路工程地质勘察规范》，可以根据地震测试的波速判断隧道围岩的类别。

4.4 深层地震勘探结论与建议

- 1. 本次地震采集方法符合地震采集规范，观测系统满足地震勘探要求，激发和接收条件合理，地震原始记录品质较好，有效波组反射明显，连续性好。
- 2. 地震处理和解释符合地震采集规范，地震剖面解释的地质层位准确，各种地震异常明显。
- 3. 本隧道不存在大不良地质情况，存在非顺层裂隙（节理），喀斯特不发育。

5 结束语

- 1. 该方法在公路勘察上的应用为国内首次。勘探结果显示：深层地震勘探结果和高密度电法，以

及钻探所得结果基本吻合。

- 2. 深层地震勘探的最大接收道多，勘探深度大，覆盖次数高、采集信息多，震源深、药量大，采用组合检波等等，但是它在浅层(0~ 100 m)基本属于盲区，仅仅对较深的地层有效。
- 3. 在深埋特长隧道工程地质勘察中，利用深层地震勘探可以有效地探测覆盖层各风化层以及不同基岩界面的埋藏深度、根据波速判断隧道围岩类别、探测不良地质现象(喀斯特、断层、节理裂隙等)^[2]，可以为隧道的设计施工提供必要的地质依据。

参考文献(References):

[1] Fan Yaowu, Sun Renguo, Lu Yuanlin. The application of synthetic geophysical techniques in the site selection of Xiaopanling road channel[J]. *Journal of Changchun University of Sci. and Tech.* 1998, 28(2): 213~ 216. [樊耀武, 孙仁国, 卢元林. 综合物探技

术在小盘岭公路遂道选线中的应用[J]. 长春科技大学学报, 1998, 28(2): 213~ 216.]

[2] Deng Hui, Huang Runqiu. The use of synthetic aperture radar interferometry to study geohazards and survey topography[J]. *Journal of Mountain Science*. 2003, 21(3) : 373~ 377. [邓辉, 黄润秋. INSAR 技术在地形测量和地质灾害研究中的应用[J]. 山地学报, 2003, 21(3) : 373~ 377.]

Application of Deep Earthquake Exploration to the Investigation of Deep and Long Tunnel

HUANG Zhengfa^{1,2}, WANG Yunan¹, WANG Hongming¹

(1. Hubei Traffic Layout Department, Wuhan, 430051; 2. China university of geosciences, Wuhan, 430074)

Abstract: In this paper, based on a case study of the engineering geological investigation in Gaoping-Jixin tunnel in H_u-Rong national highway, Hubei Province, the earthquake exploring method, which applies to the deep-imbedded long tunnels, is concretely discussed. In the deep-imbedded long tunnel engineering geological investigation, the embedding depth of the mantlerock and rock interfaces can be explored effectively with deep earthquake reflect wave method. According to the wave speed, the wall rock sort can be identified and ill geological phenomena, such as karst, fault, joints and fissures and so on, can be explored. This can provide geological foundations for the design and construction of the tunnels. By comparison with other ways of engineering geological investigation, for example, engineering geological drilling, trench and electric prospecting, the deep earthquake exploration is not only simple and convenient, but also has reasonable outcome. The case indicates that the deep earthquake is a better way of exploring.

Key words: H_u-Rong national highway; deep imbedded and long tunnel; engineering geological investigation; deep earthquake