文章编号: 0451-0712(2007)05-0217-05 中图分类号: 452.12 文献标识码: A

瞬变电磁法在深埋长隧道勘察中的应用研究

孙英勋[1,2], 罗 斌[2], 杜光勤[2], 李文尧[1]

(1. 昆明理工大学 昆明市 650093; 2. 云南省公路规划勘察设计院 昆明市 650011)

摘 要: 介绍了瞬变电磁法(TEM)的原理、特点、工作方法和资料处理。该系统首次运用于云南省的高速公路深埋长隧道勘察中,结合其他手段,成功地解释出了隧道的岩性、地下水及断层破碎带的位置,为划分隧道围岩级别提供了较好的依据,同时也为高速公路深埋长隧道提供了一种新的勘察方法。

关键词: 深埋长隧道; 瞬变电磁法(TEM); 电法勘探

瞬变电磁法(又称为时间域电磁法),简称为TEM,在我国已成功应用在地矿、水利水电系统的找矿、找水、岩溶勘探等工程中,近年来在交通系统已逐步引进并得到推广,主要用于路基勘察、隧道施工的超前预报,但用于隧道的TEM勘察技术报道不多,目前尚属起步阶段。深埋长隧道由于其平面里程长、埋深大、地质构造复杂等特点,一直是公路工程地质勘察的难点。瞬变电磁法,具有发现异常能力强、探测深度大、受地形影响小、设备轻、效率高等优点,能较好地适合于公路深埋长隧道的勘探。

1 TEM的方法原理

瞬变电磁法是采用不接地回线或接地线源向地下发送一次脉冲电磁场,地下的导电地质体在一次脉冲磁场的激发下,被感应出涡流,并在空间形成二次瞬变磁场,利用线圈或接地电极,观测研究二次涡流磁场或电场的时空变化规律来解决地质问题的物探方法。

根据电磁感应原理,当在地表布设一个供电线圈,其电流波形为阶跃波,表达式为:

$$I(t)=\begin{cases} I & t<0 \\ 0 & t\geq 0 \end{cases} \tag{1}$$

根据电磁波传播理论,不管频率域还是时间域的电磁场,其时空分布都遵循Maxwell方程。为了方便地求得时间域的电磁场,可根据Maxwell方程先求得频率域的电磁场,然后通过富氏变换求得时间域瞬变电磁场。

垂直磁偶源条件下,均匀半空间的二次电位$V(t)$(单位为μV)表达式为:

$$V(t)=\frac{9M\cdot\rho\cdot q}{2\pi r^5}\left[\Phi(u)-\sqrt{\frac{2}{\pi}}\exp(-u^2/2)\cdot u\left(1+\frac{u^2}{3}+\frac{u^4}{9}\right)\right] \tag{2}$$

式中: M为发射磁矩, $M=I\cdot S_T$,其中I为发送电流, A; S_T为发回线面积, m^2; ρ为均匀半空间电阻率, $\Omega\cdot m$; q为接收电圈的有效面积, m^2; r为收发距, m。

$$\Phi(u)=\int_0^u\sqrt{\frac{2}{\pi}}\exp(-t^2)\,dt;$$

$u=2\pi r/\tau$,其中τ为扩散参数(m), $\tau=2\pi\sqrt{\frac{2\rho t}{\mu_0}}$, $\mu_0=4\pi\times10^{-7}$ h/m; t为观测时间(ms)。

当$\tau/r\to\infty$的极限条件下,即晚期或近区条件下,其视电阻率ρ_τ(单位为$\Omega\cdot m$)、视纵向电导S_τ(单位为s)、视探测深度h_τ(单位为m)的表达式分别为:

$$\rho_\tau=\frac{\mu_0}{4\pi t}\left[\frac{2\mu_0 Mq}{5tV(t)}\right]^{2/3} \tag{3}$$

$$S_t=\frac{16\pi^{1/3}}{\mu_0^{4/3}[3Mq]^{1/3}}\cdot\frac{[V(t)]^{5/3}}{\left[\frac{dV(t)}{dt}\right]^{4/3}} \tag{4}$$

$$h_\tau=\left[\frac{3Mq}{16\pi V(t)S_\tau}\right]^{1/4}-\frac{t}{\mu_0 S_\tau} \tag{5}$$

为方便起见,野外一般采用以下简化公式估算

基金项目: 云南省交通厅科技项目资助(811209A)
收稿日期: 2006-12-14

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

探测深度 H（单位为 m）：

$$H = 0.55\left(\frac{M\rho_1}{\eta}\right)^{1/5} \quad (6)$$

式中：ρ_1 为覆盖层电阻率，Ω·m；η 为最小可分辨电压，V。

2　TEM 的野外工作方法

2.1　设备组成

CUGTEM－2002 型大功率瞬变电磁仪由供电电瓶、发送机、接收机、前置放大器、发送线圈、接收线圈等组成。发射系统和接收系统之间用电缆同步。发送电流波形为阶跃波形，占空比为1∶1，发送电流频率为25、12.5、6.25 Hz，电流强度为25～200 A，电压为48～64 V。接收机动态范围100～150 db，最小分辨率 0.1 μV，观测时窗范围 0.001～40 ms，叠加次数任选。

2.2　数据采集

野外数据采集的步骤见图 1 所示。主要包括探测深度的确定、观测参数的选择、仪器检查、干扰的排除等。因此，野外数据采集应注意以下问题：

（1）剖面的长度要根据异常的完整性及周围要有一定的背景场进行确定；

（2）剖面点距的确定要使异常点达 3 个以上或发现异常时进行加密观测；

（3）开工前和收工后，要对仪器设备进行检查，确保仪器设备正常合格，施工中要按操作规程操作，同一测区应尽量用相同的仪器组合和相同参数；

（4）接收站的布置应避免靠近强干扰源，以及有金属干扰物的地方；

（5）布设线框时，不得将剩余导线留在线架上，应呈S 形铺于地面；

（6）遇可疑点、突变点、异常点，要进行重复观测，或检查是否为假异常。

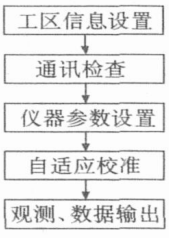


图 1　CUGTEM 野外工作框图

3　室内资料处理

资料处理主要由计算机自动完成，其处理步骤见图 2 所示，主要包括：

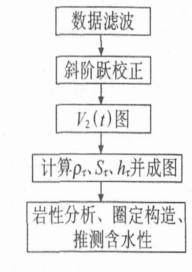


图 2　TEM 资料处理及成果解释框图

（1）对原始数据进行滤波，消除随机干扰；

（2）进行发送电源切断时间影响的改正处理；

（3）编制二次电位图，确定异常部位，通过异常初步判断异常体性质（高、低阻）、产状等；

（4）计算视电阻率及视探测深度，对视电阻率横向变化，结合二次电位，确定断层破碎带；

（5）计算视纵向电导率及视探测深度，通过视纵向电导率的拐点，进行电阻率分层。

4　应用实例

4.1　项目概况

国道 213 线磨黑～思茅高速公路坝卡箐隧道位于云南省思茅市地区境内，植被发育，地形起伏大，沟河切割深，地质构造复杂。隧道起点K13+012，止点K15+175，全长2 163 m，最大埋深271.15 m。因隧道埋深大、地表缺水、植被茂盛、工期紧，隧道中部不可能布置太多深钻孔，也不能采用浅层物探方法，故采用TEM 方法。

工作目的在于查清地面以下隧道埋深范围内的地层岩性、断层、破碎带、富水带，为进一步查明隧道的工程地质条件、划分隧道的围岩级别提供物探依据。

据区域地质资料和少量工程钻探，区内地层相对较简单，地表浅层（< 8 m）为第四系覆盖层，下伏基岩为白垩系地层，厚度较大，岩性为粉砂质泥岩夹少量粉砂岩，进口端产状约为 90 ∠50°，出口端产状约为 275 ∠70°。从电性角度看，区内第四系覆盖层、全风化岩石、含水构造带的电阻率较低，< 40 Ω·m，而强风化岩石的电阻率约为40～200 Ω·m，中风化岩石的电阻率约为200～400 Ω·m，弱风化岩石的电阻率> 400 Ω·m。它们之间的电阻率差异明显，可见，该区具备开展TEM 的电性条件。

4.2　物探方法

本次物探工作采用CUGTEM－2002 型大功率

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

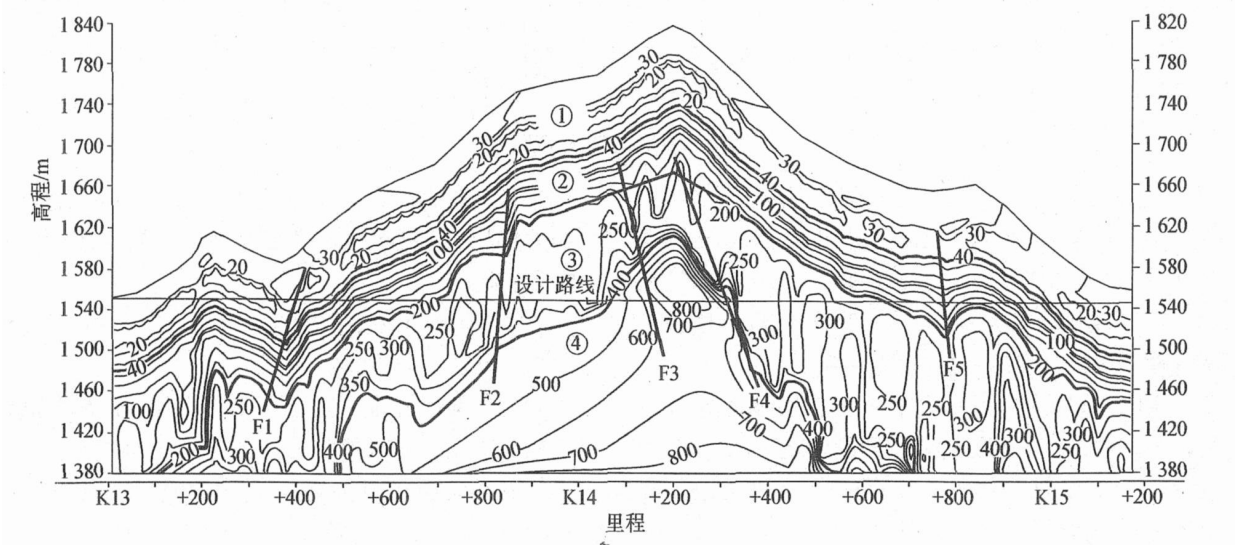
瞬变电磁仪进行勘察, 于2006 年7 月20 日开始, 8 月31 日提交正式成果资料, 沿隧道左轴线方向布置1 条TEM 剖面, 起点K13+ 000, 止点K 15+ 200, 测点点距为25 m, 共89 个点, 测点编号为100～188, 总长为2 200 m。

瞬变电磁法在施工中采用中心回线装置, 发射线圈100×100 m^2, 接收线圈10×10 m^2, 发送线圈为1 匝, 接收线圈为10 匝, 发送电流脉宽20 ms, 发射电流为100 A, 选用频率为12. 5 Hz, 32 道, 时窗范围0. 004～20 ms, 叠加次数为4 次, 点距25 m。观测参数为归一化二次电位值。每天施工前都对仪器进行检校, 达到仪器检校标准后才投入到施工中, 施工中对可疑点、异常点都进行了多次重复观测, 衰减曲线正常才记录。

4. 3　资料成果

4. 3. 1　总体评价

资料按前述方法处理, 最终得到坝卡箐隧道的TEM 成果图, 见图3、图4 所示。上述成果图反映了地下电阻率沿不同深度和测线方向的变化规律, 从而间接地反映出地下半空间的地质结构、构造特征。



①全风化层、第四系覆土　②强风化层　③中风化层　④弱风化层

图 **3**　坝卡箐隧道的视电阻率等值线断面

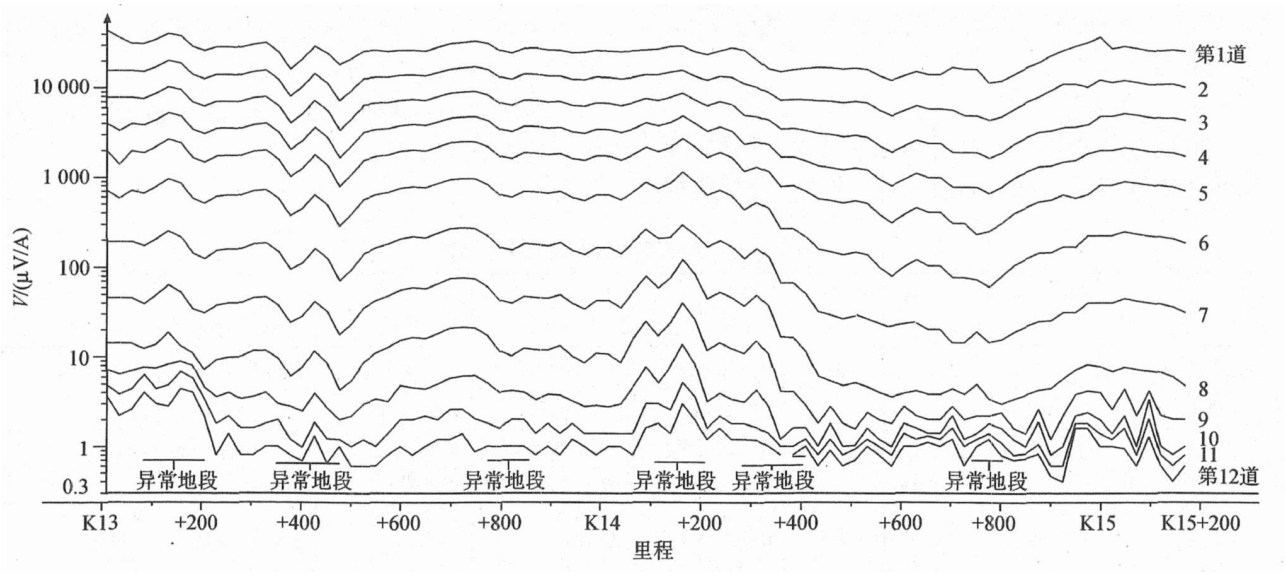


图**4**　坝卡箐隧道的二次电位剖面

总体上沿测线范围内地下介质的导电性具有横向分块, 纵向(向地下) 分层的特点。纵向上看(见图3～图5), 从地表浅层至深部, 除局部电性异常之外, 视电阻率从低(10 Ω·m) 至高(800 Ω·m), 视纵向

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

电异率由高(> 15 s)降至低(< 5 s),反映了由浅部至深部地层风化由强变弱的地质分层特点。

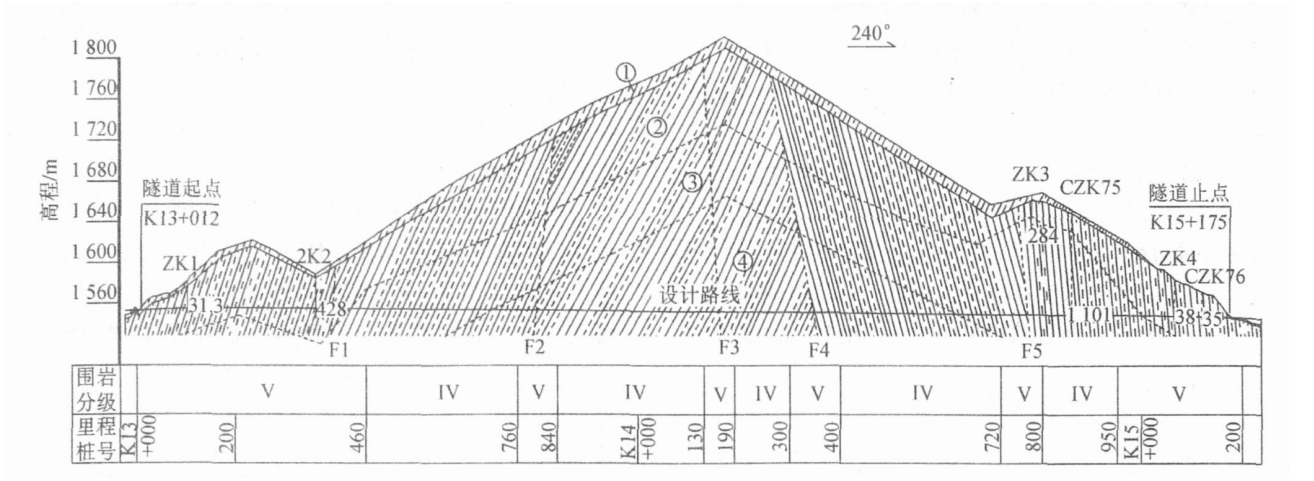


图 5　坝卡箐隧道地质剖面

横向上从左至右看(见图3、图5),视电阻率从低(10 Ω·m)至高(800 Ω·m)再至低(10 Ω·m),视纵向电异率由高(> 15 s)至低(< 5 s)再至高(> 15 s),反映了隧道进口至中部再至出口,地层风化由强变弱再至强的地质分层特点。

从图中可看出,隧道共有 6 个较明显的异常地段,二次电位及视电阻率等值线异常突变。由于K13 + 100～+ 200 地下泉水丰富,推测该异常为地下水所致,而其他异常则为断层所致。

4. 3. 2　成果解释

隧道成果解释的关注点为隧道设计线附近的地质情况,以下所述一般指隧道位置(设计线附近)的相关情况。

(1) 岩性解释。

地层岩性的划分主要根据地表情况、部分钻孔资料和电性特征来综合确定,岩石的风化分层由视电阻率和视纵向电导率的拐点综合确定,厚度分层由视电阻率和视纵向电导率与视深度的关系进行一维反演确定。

根据视电阻率、视电导率的差异,对坝卡箐隧道共划分出以下 4 层:

①全风化粉砂质泥岩、第四系覆土层,视电阻率 ρ_τ< 40 Ω·m,视电导率 S_τ> 15 s;

②强风化粉砂质泥岩夹粉砂岩层,视电阻率 ρ_τ= 40～200 Ω·m,视电导率 S_τ= 10～15 s;

③中风化粉砂质泥岩夹粉砂岩层,视电阻率 ρ_τ= 200～400 Ω·m,视电导率 S_τ= 5～10 s;

④弱风化粉砂质泥岩夹粉砂岩层,视电阻率 ρ_τ> 400 Ω·m,视电导率 S_τ< 5 s。

具体分层结果见图 3 所示,隧道轴线从左至右所经过的岩性见表 1。

表 1　坝卡箐隧道岩性初步解释成果

里程桩号	K13+ 000～+ 440	K13+ 440～+ 710	K13+ 710～K14+ 080	K14+ 080～+ 350	K14+ 350～+ 640	K14+ 640～K15+ 000	K15+ 000～+ 200
视电阻率/(Ω·m)	< 40	40～200	200～400	400～800	200～400	40～200	< 40
视电导率/s	> 15	10～15	5～10	< 5	5～10	10～15	> 15
岩性	粉砂质泥岩、覆土	粉砂质泥岩夹粉砂岩	粉砂质泥岩夹粉砂岩	粉砂质泥岩夹粉砂岩	粉砂质泥岩夹粉砂岩	粉砂质泥岩夹粉砂岩	粉砂质泥岩、覆土
风化程度	全风化	强风化,破碎	中风化	弱风化	中风化	强风化,破碎	全风化

(2) 构造解释。

根据二次电位及电阻率突变特征(图3、图4),结合野外现场调查与区域地质情况进行构造解释。断层产状根据二次电位曲线主次峰关系判断,主峰一侧为断层倾向,断层顶深据量板法确定,共判断出有 5 条断层,并大致推测出断层破碎带宽度,初步解释

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

成果见表2。

表2　坝卡箐隧道构造初步解释成果

断层编号	F1	F2	F3	F4	F5
里程桩号	K13+ 400	K13+ 810	K14+ 160	K14+ 330	K14+ 780
大致倾向	E	E	W	W	E
影响宽度/ m	60	40	60	70	40
破碎带宽/ m	20	10	20	30	10
富水状况	富水	较富水	富水	富水	较富水

(3) 含水带解释。

根据最低电阻率、隔水层岩性、构造富水等特性, 结合区域地质及地形情况, 含水带主要分布在断层附近及 K13+ 100～+ 200 地段, 其中在 K13+ 150、K13+ 400、K14+ 160、K14+ 330 附近富水, K13+ 810、K14+ 780 附近较为富水。

(4) 围岩级别的确定。

根据电阻率的变化及断层、破碎带、岩性、隧道埋深、隧道高度等特征, 结合区域地质情况、地质调查及少数已知钻孔, 可综合判断围岩级别, 见表3。

表3　坝卡箐隧道围岩分级划分成果

里程桩号	K13+ 000～+ 460	K13+ 460～+ 790	K13+ 790～+ 830	K13+ 830～K14+ 130	K14+ 130～+ 190	K14+ 190～+ 300	K14+ 300～+ 370	K14+ 370～+ 580	K14+ 580～+ 760	K14+ 760～+ 800	K14+ 800～+ 950	K14+ 950～K15+ 200
围岩分级	Ⅴ	Ⅳ	Ⅴ	Ⅲ- Ⅳ	Ⅴ	Ⅲ- Ⅳ	Ⅴ	Ⅲ- Ⅳ	Ⅳ	Ⅴ	Ⅳ	Ⅴ

4. 3. 3　解释成果的验证

经后期的浅层物探、探坑及深钻孔部分验证, 除局部里程位置上存在差异外, 物探成果与验证结果基本吻合。

考虑隧道位于云南红层软质岩区, 弱风化层又在F3、F4 断层之间, 最终地质成果中未定Ⅲ级围岩; 由于 TEM 方法计算精度的局限性及工区植被稠密, 地形变化较大, 测量定点不够精确, 资料的解释结果不可能与地下实际情况完全一致, 故最终地质成果中对断层影响宽度也适当划宽, 并要求在施工中加强地质超前预报。

5　结论

(1) 利用TEM 方法成功地在复杂地形地质条件下对坝卡箐隧道的岩性、构造、地下水进行了解释, 结合区域地质与地质调查等资料进行了围岩级别的划分, 指引了后期的钻探与浅层物探工作的开展, 并与后期勘察成果基本吻合, 达到了预期效果。

(2) 瞬变电磁法具有发现异常能力强、探测深度大、受地形影响小、设备轻、效率高及能发现电阻率差异较大的高、低阻不均匀体等特点, 是高速公路长大深埋隧道勘察的一种行之有效的手段, 值得加以推广应用。

(3) 由于TEM 不能提供岩体波速, 且地表浅层解释、计算精度较浅层地震方法差, 工作中应尽量采用多种勘察手段, 并用部分钻孔加以验证, 使物探成果更接近实际情况。

由于作者水平有限, 文中不对之处, 敬请批评指正。

参考文献:

[1] 王志豪, 张小路, 等. 大功率瞬变电磁在广西大厂外围深部找矿中的应用[J]. 物探与化探, 2006, 30(3) .

[2] 嵇艳鞠, 王艳, 等. 利用瞬变电磁技术进行地下水资源勘察[J]. 工程勘察, 2005, (6) .

[3] 陈清礼, 严良俊, 等. 瞬变电磁法探测水库坝基溶洞的效果[J]. 长江大学学报(自科版) , 2005, 2(7) .

[4] 陈韶光, 程志平. 公路路基工程勘察的物探方法研究[J]. 桂林工学院学报, 2000, 20.

[5] 薛国强, 李勇, 等. 瞬变电磁法在公路地质勘察中的应用[J]. 石油仪器, 2006, 20(2) .

[6] 李貅, 武军杰, 等. 一种隧道水体不良地质体超前地质预报方法—瞬变电磁法[J]. 工程勘察, 2006, (3) .

[7] 薛国强, 宋建平, 等. 瞬变电磁法探测公路隧道工程中的不良地质构造[J]. 长安大学学报(地球科学版) , 2003, 25(4) .

[8] 牛之琏. 时间域电磁法原理[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1992.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

文章编号: 0451- 0712(2007) 05- 0222- 05 中图分类号: 445. 411 文献标识码: B

对浅埋偏压条件下大拱连拱隧道合理开挖工序的探讨

钱文斐, 王 勇, 刘洪洲, 王廷伯, 陈 佳
(中交公路规划设计院有限公司 北京市 100010)

摘 要: 大拱形式连拱隧道是不同于典型连拱隧道的一种结构形式。通过模拟分析浅埋偏压条件下大拱形式连拱隧道在不同开挖工序下各部分结构的受力性状, 得出相对合理的开挖工序。

关键词: 连拱隧道; 大拱; 开挖工序

浅埋偏压及不利的地形地质条件, 是连拱隧道设计施工中经常遇到的情况, 大拱形式连拱隧道作为连拱隧道一种不常见的形式在国内研究成果较少。通过二维有限元程序, 模拟大拱形式连拱隧道在不同开挖工序条件下的受力性状, 从而确定相对合理的施工工序。

1 基本前提

(1) 偏压基本分为地质偏压和地形偏压, 本次模拟只考虑地形偏压, 具体参数如下: 中墙顶部覆盖层厚度15 m, 地形自然坡度为1∶1. 75。

(2) 浅埋偏压条件下, 通常围岩较破碎且自稳性较差, 因此模拟围岩条件为Ⅴ级。

(3) 大拱形式连拱隧道由于断面较大, 本次模拟开挖方法采用 "化整为零" 的方式, 即通常形式连拱隧道中常采用的 "三导洞法"。

2 施工模拟

2.1 力学参数的确定

参照《公路隧道设计规范》(JTG D70—2004) 相

收稿日期: 2006- 12- 14

Research on Application of Transient Electromagnetic Methods to Survey of Deeply-Buried Long Tunnels

SUN Ying-xun[1,2], *LUO Bin*[2], *DU Guang-qin*[2], *LI Wen-yao*[1]
(1. Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;
2. Yunnan Highway Planning Prospecting and Design Institute, Kunming 650011, China)

Abstract: The principle, characteristics, working methods and data analysis of Transient Electromagnetic Methods (TEM) are introduced based on the case study of its application to survey and investigation of the deeply-buried long tunnel in expressways in Yunnan Province. Rock property, underground water and the location of broken fractures with assistance of other technical methods are successfully explained, which provides the good basis for the classifying of surrounding rocks of the tunnel and a new method for surveying and investigation of deeply-buried long highway tunnels.

Key words: deeply-buried long tunnel; Transient Electromagnetic Methods (TEM); electronic investigation method

(c)1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net