

电磁波 CT 技术探测溶洞的模拟分析与应用研究

黄生根¹, 刘东军², 胡永健¹

(1. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 中交集团第二航务工程局有限公司技术中心, 湖北 武汉 430040)

摘 要: 目前应用电磁波 CT 技术进行溶洞探测时对于溶洞形态和填充状态的解释与判断尚缺乏成熟的理论依据。在 FDTD(时域有限差分法)基础上, 采用 Matlab 软件编程建立 CT 技术探测溶洞模型, 在模型边界处特意设置 PML 完全匹配层和 PEC 完善导体。模拟分析和实验探测结果表明, (1) 电磁波穿过溶洞时在溶洞边界处发生折射现象, 溶洞内部发生反射、绕射和障碍增益现象, 且电磁波能量的衰减主要由折射现象产生; (2) 当溶洞内填充物有水存在时, 因反射现象使一部分电磁波滞留在溶洞内部, 该部分电磁波在溶洞内部不断发生反复的反射和绕射现象; (3) 经过溶洞后电磁波波形的扰动主要由反射现象及滞留在溶洞内部电磁波造成; (4) 当溶洞对电磁波吸收系数发生改变时需综合考虑填充物种类及地层含水率等因素的影响。最后应用模拟结果对实际工程试验层析成像数据进行了判断和解释, 将所得判定结果与勘察资料进行对比, 二者基本吻合。验证了模拟结果的准确性和应用电磁波 CT 技术探测溶洞的可行性, 可为今后层析成像的结果解释和判断提供借鉴和理论依据。

关 键 词: 溶洞; 电磁波 CT; FDTD 算法(时域有限差分法); 吸收系数

中图分类号: TP206+.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2018)增1-0544-07

Simulation analysis and application study of electromagnetic wave computed tomography in detecting karst caves

HUANG Sheng-gen¹, LIU Dong-jun², HU Yong-jian¹

(1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China; 2. National Enterprise Technology Center, China Communications Construction Company Second Harbour Engineering Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430040, China)

Abstract: There is still a theoretical defect in interpretation and judgment of karst morphology and filling state in karst cave detection using electromagnetic wave computed tomography. In order to solve practical problems in the detection, on the basis of finite-different time-domain(FDTD) algorithm, a numerical CT detection model is established using Matlab. A perfectly matched layer(PML) and a perfect electric conductor(PEC) are set at the boundary of computation model to prevent electromagnetic wave getting into the model again after it passed through the boundary. Simulation and experiment results show that: (1) When the electromagnetic wave passes through karst cave, it refracts at the cave boundary. And within the cave, the phenomenon of reflection, diffraction, and obstacle gain occur. Energy attenuation of electromagnetic wave is mainly caused by refraction. (2) When the cave filled with water, the reflection makes a part of the electromagnetic wave remains in the cave inside, this part of wave reflects and diffracts repeatedly inside the cave. (3) After electromagnetic wave passing through the cave, the disturbance of the waveform is mainly caused by the reflection phenomenon and the electromagnetic wave trapped inside the cave. (4) We have to consider the influence of the filling type, water content and other factors when the electromagnetic wave absorption coefficient changes in karst caves. At last, the tomography data obtained in practical detection are judged and interpreted according to the simulation results. By comparing the interpretation of tomography with previous investigation data, the accuracy of the simulation results and the reliability of the application of electromagnetic wave CT technology in detecting karst caves are validated. This research provides a reference and a theoretical basis for interpreting and judging tomography results in the future.

Keywords: karst cave; electromagnetic wave computed tomography; FDTD(finite-different time-domain) algorithm; absorption coefficient

1 引 言

目前最常用的岩溶勘探手段主要有钻探和物

探^[1]。传统的钻探方法只能探明溶洞的局部状态, 无法整体反映出溶洞的大小、分布形态和填充情况等信息, 而物探能够快捷探明两钻孔之间溶洞的整

体分布情况^[2]。国内外对于电磁波 CT 技术的应用主要集中在岩溶路基注浆质量检测、水库渗漏检测以及岩溶探测等方面，应用实例较少，尚不具有可直接借鉴和推广的结论。邱恩喜等^[3]在某采空区的加固处理中使用电磁波和其他物探方法联合对加固处理效果进行评价，加固处理完成后进行电磁波测量，通过测量结果反映加固处理质量情况。郑立宁等^[4]使用电磁波 CT 对岩溶路基注浆加固效果进行质量检测，结果表明电磁波 CT 技术能够很好地探测水泥浆液在岩土体中的分布状态。陈家璋等^[5]应用电磁波 CT 技术检测东方红水库大坝渗漏情况，利用电磁波在不同介质中吸收系数的不同，探明了大坝的渗漏位置。雷旭友等^[6]应用电磁波对南昆铁路威舍车站场地下方的岩溶洞穴的位置、形态、充填情况等进行了研究，认为溶洞在吸收系数等值线图上表现为等值线密集带组成的高吸收系数封闭异常圈，电磁波在剖面图上强吸收系数形状与溶洞形状近似，并且与周围弱吸收系数有显著区别。

实际应用中用电磁波 CT 探测溶洞时对于溶洞形态和填充状态的解释与判断极大程度的依赖医学方面的研究成果和以往的探测经验，理论依据严重不足^[7]。本文在 FDTD 算法的基础上，应用 Matlab 软件建立了 CT 技术探测地下溶洞的模型，在模型边界处特意设置 PML 完全匹配层和 PEC 完善导体，从而解决和控制电磁波从模型边界传出后再次进入模型内部的问题，通过模拟计算得出电磁波在溶洞内部的传播规律，并将其应用于判断和解释现场试验所得的层析成像结果。

2 电磁波 CT 工作原理

电磁波 CT 由发射端、接收端和主机三部分组成^[8]，设发射端电磁波电场强度为 E_0 ，接收端电磁波电场强度为 E ，则 E_0 与 E 的存在关系：

$$E = E_0 \frac{e^{-\beta r}}{r} f(\theta) \sin \theta \quad (1)$$

式中： β 为介质对电磁波吸收系数； r 为收发点间距； $f(\theta)$ 为收发天线方向因子； θ 为接收点处天线与电场方向夹角^[9]。将式 (1) 变换，可得

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\mu \varepsilon}{2} \left(\sqrt{\left(1 + \frac{\sigma}{\omega \varepsilon} \right)^2} - 1 \right)} \quad (2)$$

式中： ω 为电磁波角频率； ε 为介电系数； μ 为介质的磁导系数； σ 为介质磁导率^[10]。

3 数值模拟分析

3.1 模型建立

模型通过 Matlab 软件编程实现，模型尺寸大小为 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ ，溶洞设置为圆形，半径为 2 m ，溶洞圆心与模型中心重合，模拟中以溶洞圆心为原点 $(0, 0)$ ，溶洞左边界为 $(-2, 0)$ ，右边界点为 $(2, 0)$ 。溶洞与模型边界的距离为 5 m ，考虑溶洞中的充填物一般较疏松且往往含水率较大^[11]，本次模拟采用孔隙率相对较大的饱和砂作为溶洞充填介质，采集饱和砂及实验场区灰岩为样本，经实验检测确定饱和砂及场区灰岩相关物性参数，见表 1。

表 1 模型介质参数
Table 1 Model medium parameters

介质	介电系数 A/m	磁导系数 H/m	电导率 S/m	导磁率 Ω/m
灰岩	8	1.00	2.5×10^{-2}	1.257×10^{-6}
饱和砂	30	0.18	10^{-4}	1.257×10^{-6}

为保证计算精度与模拟结果的准确性，在模型外部设置 PML 完全匹配层，厚度为 2.5 m ，反射系数大小为 10^{-8} 。PML 完全匹配层的外部使用完善导体 PEC 将模型与外界截断，防止传播到模型外部的电磁波再次传入计算模型。模型中网格大小为 $0.1 \text{ m} \times 0.1 \text{ m}$ ，整个模型共划分 36 100 个网格，模型结构组成如图 1 所示。

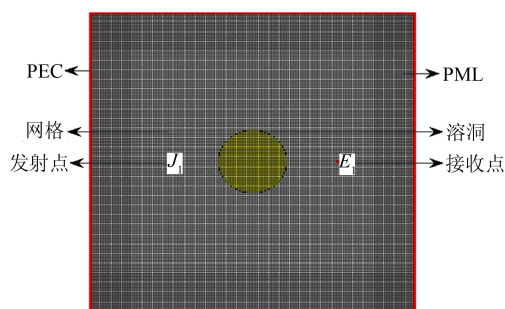


图 1 模型组成及位置关系

Fig.1 Relationship between model composition and position

本次模拟电磁波发射源采用电流源，激励源波形为归一化高斯导数波形，信号频率为 8 MHz ，以溶洞区域的圆心作为坐标轴原点，收发点间距为 10 m ，采用水平同步的方法进行探测，发射源电磁波电场波形如图 2 所示。

3.2 模拟结果与分析

当发射点、接收点分别位于点 $(-5, 0)$ 、 $(5, 0)$ 时，经历一定计算时间步后电磁波在模型中的传播

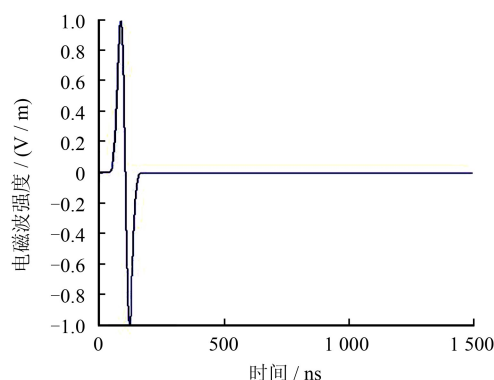


图2 激励信号电场波形

Fig.2 Excitation signal electric field waveform

图像如图3所示。图3(a)~3(d)为电磁波从溶洞左边界传播至右边界模拟图像,图3(e)~3(g)为滞留在溶洞内部的电磁波传播图像。

从图3(a)、3(b)中可以看出,当电磁波经过溶洞边界时,电磁波发生明显的折射现象,这是因为充填物的介电系数为30 A/m,磁导率为0.18 H/m,与完整灰岩相比,介电系数和磁导率发生明显改变,导致电磁波经过两种介质边界时发生较强烈的折射现象。对比图3(a)和图3(b)可知,电磁波在溶洞边界处发生折射现象后电磁波传播形态发生改变,电磁波强度由0.04 V/m降低至0.015 V/m左右,降低约62.5%,若忽略折射点处灰岩及溶洞介质对电磁波能量的吸收,可知此部分电磁波能量衰减主要由折射现象造成。由图3(a)~3(d)可知,电磁波由溶洞左边界传播至右边界时电磁波在溶洞右边界处发生明显的反射现象,溶洞右边界处电磁波强度

明显强于左侧电磁波强度,因当溶洞内部被饱和砂充填时电磁波在溶洞内部发生绕射现象,电磁波绕射是指当电磁波在传播过程遇到障碍物时电磁波绕过障碍物继续传播的现象,因此当电磁波绕过饱和砂颗粒时电磁波发生同相分离,发生分离的电磁波分量到达溶洞右边界时电磁波分量之间产生相互影响,使溶洞右部电磁波强度呈现增强现象,也被称为障碍增益现象^[12]。对比图3(a)与图3(d)可知,电磁波在溶洞左边界发生折射后,由左边界传至右边界过程中电磁波强度由约0.015 V/m降低至0.012 V/m左右,降低幅度约20%,与折射现象造成的电磁波衰减程度相比明显较小。

从图3(d)、3(e)可以看出,电磁波到达溶洞右边界时原来电磁波分成两部分,一部分电磁波经过折射现象后直接从溶洞右边界传播出溶洞,此部分电磁波强度约为0.003 V/m;另一部分电磁波在溶洞右边界发生反射现象,反射现象发生以后电磁波传播方向发生反转,电磁波强度约为0.005 V/m,由于充填物质及孔隙水的存在,这部分电磁波被滞留在溶洞内部,并在溶洞内部不断传播,传播过程中电磁波也不断发生反射、绕射及障碍增益现象。

从图3(f)、3(g)中可以看出,滞留的电磁波在溶洞内部左右边界间往复传播过程中不断地向四周扩散传播,最终传播到溶洞外部,当由溶洞内部扩散出的电磁波与从波源处传播来的电磁波相遇时两者产生相互干扰,并在相遇点处使波源处传播来的电磁波强度增大、波形发生扰动。

图4为当发射点位于(-5, 0)和接收点位于

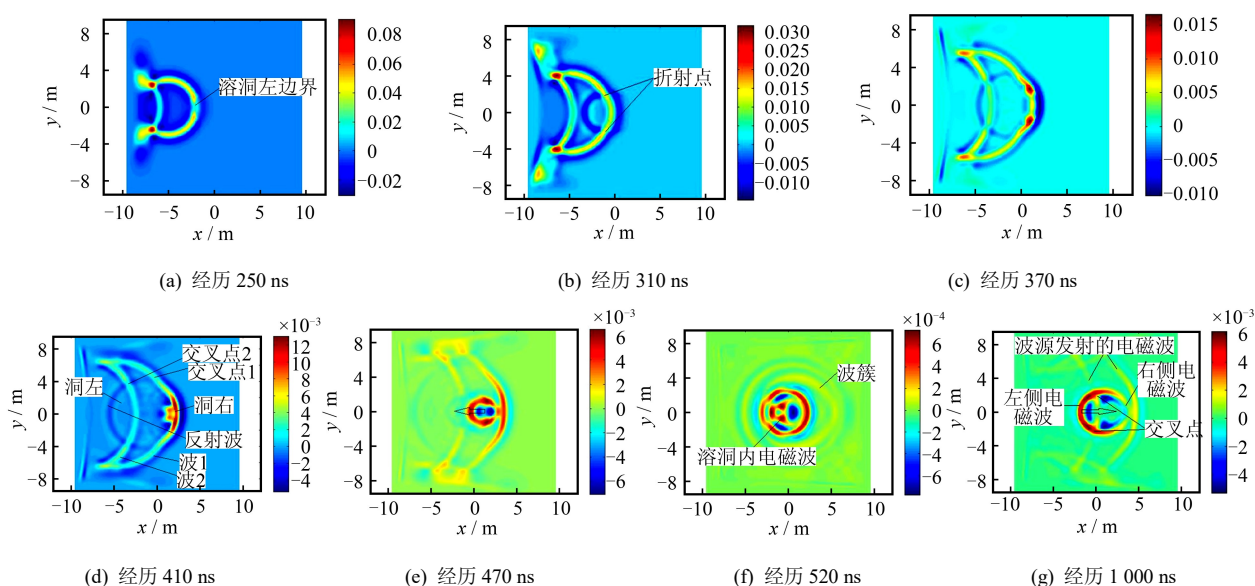


图3 不同时间步电磁波模拟图像(单位: V/m)

Fig.3 Simulation image of electromagnetic wave at different time steps(unit: V/m)

(5, 0) 时经历 1 500 时间步后接收点处接收到的电磁波电场波形图。对比图 4 与图 2 可知, 电磁波经过含有溶洞的灰岩介质后电磁波波形发生扰动, 强度明显衰减。

100 ns 前接收点处尚未接收到发射点处发射的电磁波信号, 接收到的信号强度为 0。第 100 ns~120 ns, 接收点处接收到的是直接穿过溶洞的电磁波在 120 ns 后接收点处接收到的是滞留在溶洞内部的电磁波。对比 120 ns 前后接收到的电磁波电场波形曲线可知, 后者电磁波电场强度明显较小, 波形相对更紊乱, 由前面分析可知, 滞留在溶洞内部的电磁波不断的在溶洞左右边界处发生反射现象, 反射波之间不断发生相互干扰作用, 其波形更加紊乱, 因此可知电磁波经过溶洞后, 波形的紊乱主要由反射以及滞留在溶洞内部的电磁波造成的。

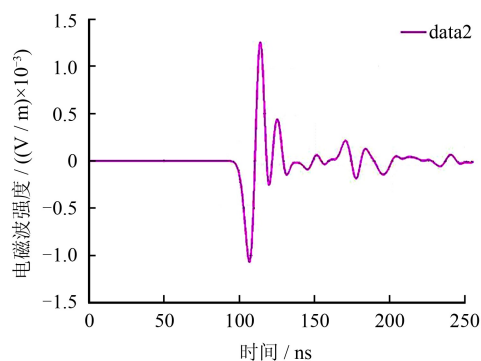


图 4 经历 1 500 个时间步电磁波模拟图像
Fig.4 Simulation image of electromagnetic wave at 1 500 ns

综上所述, (1) 电磁波穿过完整灰岩时强度发生衰减, 若忽略灰岩中孔隙的影响, 电磁波波形几乎不发生扰动, 且电磁波在完整灰岩中的衰减量与传播距离成正比。(2) 溶洞的影响, 由于溶洞及填充物质的存在, 电磁波在溶洞处发生折射、绕射以及障碍增益现象。由于反射现象的发生, 一部分电磁波滞留在溶洞内部, 最后由于填充物影响, 当电磁波穿过孔隙水和填充物颗粒时电磁波能量也会产生损失。(3) 电磁波经过含有填充物质的溶洞时电磁波能量的衰减主要由折射现象产生, 与折射现象相比, 反射现象和填充物质对电磁波能量的吸收相对影响较小。(4) 经过溶洞后电磁波波形的扰动主要由反射现象及滞留在溶洞内部电磁波造成。

4 试验分析

试验场地位于武汉地铁 8 号线南湖标段, 试验

场区下伏地层主要为素填土、粉质黏土、淤泥质黏土和灰岩。由于地下水对下伏灰岩长期的溶蚀作用, 此处灰岩上部区域裂隙比较发育且裂隙之间彼此连通, 裂隙中含有丰富的裂隙水, 下部灰岩中有溶洞存在。

4.1 试验参数设置

本次实验使用的是井下无线电波透视仪, 探测中以 YRK4128 作为发射孔, YRK4127 作为接收孔, 孔内使用 PVC 管护壁, 实验参数设置见表 2。

表 2 试验参数设置

参数	探测剖面	
	YRK4128 (发射)	YRK4127 (接收)
声测管长度/m	50.0	50.0
测试方式	定发	
测试频率/MHz	4、8、12	
扫描步距/m	1.0	0.5
角度控制/(°)	≤45	
收发点间距/m	24.3	
探测起始深度/m	20.0	24.0
探测终止深度/m	47.0	47.0

4.2 试验结果与分析

数据采集完毕后, 选用 8 MHz 频率下收发点位置在同一水平线上时所测得的电磁波电场强度衰减进行分析, 即选取从地下 24~47 m, 间隔为 1 m, 共计 24 组数据进行分析, 将电磁波电场强度衰减量随地下深度的变化拟合成曲线如图 5 所示。再应用 SIRT 算法求取每个网格对电磁波的视吸收系数^[8], 并使用 Suffer 软件进行层析成像, 层析成像结果如图 6 所示。

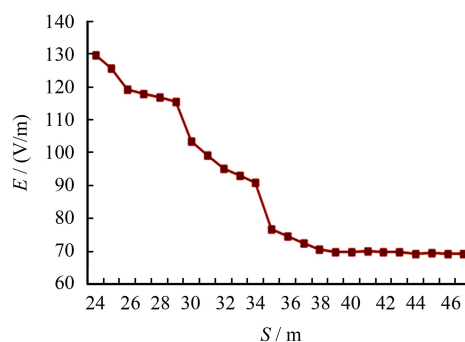
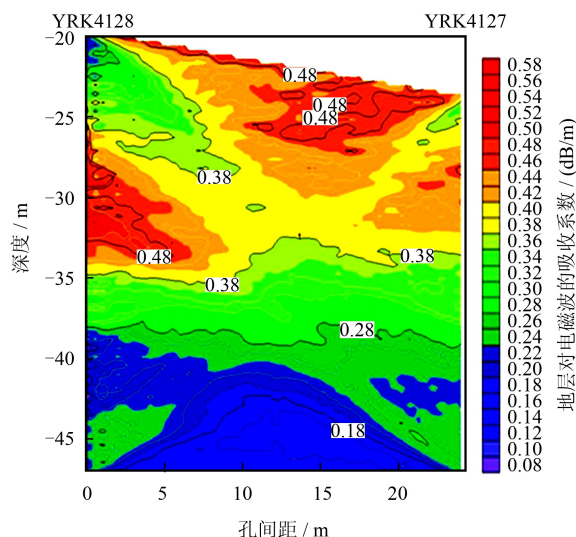
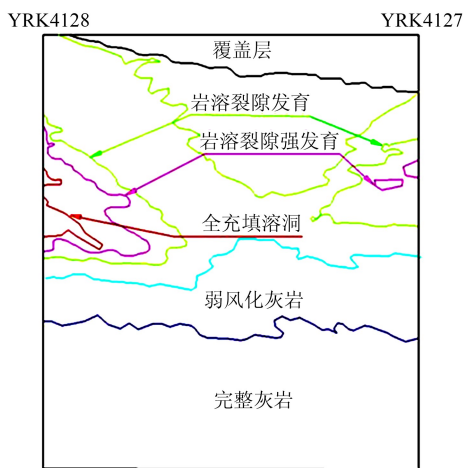


图 5 电磁波电场强度衰减量随深度变化曲线
Fig.5 Changing curve of electric field attenuate with depth

分析图 6 可知, 在 YRK4128 钻孔-20.0 m 与 YRK4127 钻孔-23.2 m 两点连线以上, 地层对电磁波吸收系数均在 0.5 dB/m 以上, 局部达到 0.56



(a) YRK4128-YRK4127层析成像结果图



(b) YRK4128-YRK4127层析成像判定结果图

图6 剖面 YRK4128-YRK4127 层析成像结果图

Fig.6 Tomography results of profile YRK4128-YRK4127

dB/m, 吸收系数普遍较大, 推测此处以上地层较破碎, 局部地层孔隙率较大。由模拟结果可知, 当电磁波在含有孔隙的介质中传播时, 电磁波发生折射、反射和绕射现象; 当局部孔隙率明显增大时, 电磁波在介质和孔隙边界处折射现象更明显, 相应地层对电磁波的吸收系数也明显较大。综上分析推断该连线即为基岩面, 基岩面以上为破碎的覆盖层。

观察图 5 可知, 基岩面至地下 29 m 范围内, 与覆盖层相比电磁波电场强度衰减量急剧减小, 因此可推测此范围地层发生改变, 且地层相对覆盖层较完整。结合图 6 可知, 中间区域地层对电磁波吸收系数从 0.52 dB/m 逐渐减小到 0.42 dB/m, 最外部岩层对电磁波的吸收系数基本小于 0.4 dB/m, 推断

中部吸收系数较大区域为岩溶裂隙强发育区, 岩溶裂隙之间彼此连通。由于此部位靠近覆盖层, 沿覆盖层下渗的地表水相对较多, 岩溶裂隙被水充填, 当电磁波经过该区域时电磁波发生折射现象较严重, 并且岩溶裂隙水也会吸收一部分电磁波能量, 此外由于水和反射作用的影响, 岩溶裂隙内滞留大量电磁波, 该区域岩层对电磁波吸收系数相对也较大。

靠近 YRK4128 钻孔-25.6~-29 m 和-30.5~-34 m 处, 对于暗红色区域, 岩体介质对电磁波的吸收系数从 0.56 dB/m 减小到 0.46 dB/m, 介质对电磁波的吸收系数与覆盖层对电磁波的吸收系数基本相同, 因此可知该区域岩体较破碎, 进而推断此处为溶洞, 且溶洞内部被松散充填物填充。由模拟结果可知, 当电磁波穿过被充填物填充的溶洞时, 电磁波在溶洞处发生折射、反射和绕射现象, 且溶洞内部滞留一定量的电磁波, 所以此处介质对电磁波吸收系数明显较大。溶洞区域以外介质对电磁波吸收系数逐渐减小, 推测其地质概况依次为岩溶裂隙强发育区-岩溶裂隙弱发育区-完整灰岩区。

-34~-38 m 范围内电磁波电场强度衰减量随地层深度的增加逐渐减小, 岩层对电磁波吸收系数由 0.4 dB/m 逐渐减小到 0.28 dB/m, 该区域岩层吸收系数较小且没有突变出现, 推断该范围为弱风化灰岩层。-38~-50.8 m 范围内电磁波电场强度衰减量随地层深度的增加基本保持不变, 基岩对电磁波吸收系数均小于 0.28 dB/m, 推断该范围基岩为完整灰岩且风化程度较弱。

4.3 试验结果对比

试验场区内钻探结果与试验结果的对比见表 3。对比将试验结果与钻探结果可知二者吻合, 验证了模拟结论的准确性, 也验证了应用模拟结论对电磁波 CT 探测结果进行解释和分析是准确的、可行的。

表3 钻探和试验结果

Table 3 Drilling and test results

深度/m	钻探结果	试验结果
0~5	素填土	
5~7.7	粉质黏土	覆盖层
7.7~10.2	淤泥质黏土	
10.2~23.2	粉质黏土	
23.2~25.6	岩溶裂隙发育	岩溶裂隙发育
25.6~29	溶洞	溶洞
29~34	溶洞	溶洞
34~38	弱风化灰岩	弱风化灰岩
38~50.8	完整灰岩	完整灰岩

5 结 论

(1) 电磁波穿过溶洞时溶洞边界处发生折射现象, 溶洞内部发生反射、绕射和障碍增益现象。电磁波能量的衰减主要由折射现象产生, 与折射现象相比, 反射现象和充填物质对电磁波能量的吸收相对影响较小。

(2) 当溶洞内充填物有水存在时, 反射现象的发生使一部分电磁波滞留在溶洞内部, 这部分电磁波在溶洞内部不断发生反复的反射和绕射现象。绕射和障碍增益现象使溶洞内部电磁波波形发生重分布, 且与电磁波传播方向相同的位置电磁波强度明显较强。

(3) 经过含有溶洞的灰岩后电磁波波形的扰动主要由反射现象及滞留在溶洞内部电磁波造成。

(4) 当溶洞对电磁波吸收系数发生改变时, 应用 CT 技术探测溶洞, 需考虑填充物种类及含水量等变化因素的影响。

对比试验结果与前期钻探结果可知二者基本是吻合的, 证明了模拟结论的准确性和应用电磁波 CT 技术探测溶洞的可行性。

参 考 文 献

- [1] 彭耀, 董艳萍, 樊永生, 等. 井间电磁波 CT 技术在武汉三叠系大冶组岩溶勘察中的应用研究[J]. CT 理论与应用研究, 2016, 25(4): 420—421.
PENG Yao, DONG Yan-pin, FAN Yong-sheng, et al. Application of the electromagnetic CT in karst exploration of T1d in Wuhan[J]. **CT Theory and Application**, 2016, 25(4): 420—421.
- [2] 吴以仁, 邢凤桐, 纪英楠, 等. 钻孔电磁波法[M]. 北京: 地质出版社, 1982: 50—100.
WU Yi-ren, XING Feng-tong, JI Ying-nan, et al. **Electromagnetic methods in borehole**[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1982: 50—100.
- [3] 邱恩喜, 谢强, 文江泉. 电测深法和电磁波 CT 法在采空区注浆加固效果检测中的综合应用[J]. 工程地质学报, 2007, 15(6): 834—839.
QIU En-xi, XIE Qiang, WEN Jiang-quan. Application of the combination of electric sounding and electromagnetic CT in detection of grouting quality[J]. **Journal of**

Engineering Geology, 2007, 15(6): 834—839.

- [4] 郑立宁, 谢强, 胡煜. 电磁波 CT 岩溶路基注浆质量检测试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(6): 71—75.
ZHENG Li-ning, XIE Qiang, HU Yu. Test study of electromagnetic CT for detecting grouting effect of Karst roadbed[J]. **Hydrogeology & Engineering Geology**, 2010, 37(6): 71—75.
- [5] 陈家璋, 陈维惠, 周厚昌. 地质学层析成像(CT)新技术在水利水电工程中的应用[J]. 水利水电技术, 1999, 30(9): 52—54.
CHEN Jia-zhang, CHEN Wei-hui, ZHOU Hou-chang. Application of geologic stratified photography technology in water projects[J]. **Water Resources and Hydropower Engineering**, 1999, 30(9): 52—54.
- [6] 雷旭友, 李正文. 地下洞穴在孔间电磁波法 CT 上的反映特征及洞径计算公式[J]. 物探化探计算技术, 2006, 28(2): 142—145, 86.
LEI Xu-you, LI Zheng-wen. Mage characters and calculation formula of diameter of underground grotto by cross-well electromagnetic wave CT technique[J]. **Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration**, 2006, 28(2): 142—145, 86.
- [7] 孙茂锐, 王双六. 电磁波 CT 二维与三维成像应用[J]. 物探与化探, 2015, 39(3): 641—642.
SUN Mao-rui, WANG Shuang-liu. The application of the electromagnetic wave CT of the 2 D and 3 D imaging[J]. **Geophysical and Geochemical Exploration**, 2015, 39(3): 641—642.
- [8] 李永涛, 陶喜林, 余建河, 等. 井间电磁波 CT 技术在长江大堤岩溶探测中的应用[J]. CT 理论与应用研究, 2009, 18(1): 56—57.
LI Yong-tao, TAO Xi-lin, YU Jian-he, et al. Application of cross-borehole electromagnetic computerized Tomography in karst detection along Yangtze river levee[J]. **CT Theory and Applications**, 2009, 18(1): 56—57.
- [9] 罗彩虹, 邢健, 郭蕾, 等. 基于井间电磁波 CT 探测岩

- 溶空间分布特征[J]. 岩土力学, 2016, 37(1): 670—671.
- LUO Cai-hong, XING Jian, GUO Lei, et al. Spatial distribution characteristics of karst based on cross hole electromagnetic computerized tomography technique[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(1): 670—671.
- [10] 向世明, 李永涛. 井间电磁波 CT 技术在管道工程岩溶探测中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2012, 9(1): 82—83.
- XIANG Shi-ming, LI Yong-tao. Application of well CT technology to the detection of pipeline engineering project[J]. **Chinese Journal of Engineering Geophysics**, 2012, 9(1): 82—83.
- [11] 韩果花, 黄明曦, 李川, 等. 井间电磁波 CT 技术及其在岩溶勘察中的应用[J]. CT 理论与应用研究, 2013, 22(4): 616—620.
- HAN Guo-hua, HUANG Ming-xi, LI Chuan, et al. Borehole electromagnetic imaging and its application in karst exploration[J]. **CT Theory and Applications**, 2013, 22(4): 616—620.
- [12] 罗小杰. 武汉地区浅层岩溶发育特征与岩溶塌陷灾害防治[J]. 中国岩溶, 2013, 32(4): 419—432.
- LUO Xiao-jie. Features of the shallow karst development and control of karst collapse in Wuhan[J]. **Carsologica Sinica**, 2013, 32(4): 419—432.

深基坑工程设计施工手册（第二版）

著译者：龚晓南 主编 侯伟生 副主编 版次：第二版 出版时间：2018-05 开本：小 16 开

出版单位：中国建筑工业出版社 标准书号：978-7-112-20808-1

【内容简介】本书全面、系统地总结了我国近年来各地应用于深基坑工程的各种围护结构形式、设计计算方法和施工技术等方面的经验。全书共分为 21 章，主要内容包括：总论、设计计算理论与分析方法、放坡开挖基坑工程、悬臂式支挡结构、水泥土重力式围护结构、内撑式围护结构、拉锚式围护结构、土钉及复合土钉支护、冻结法围护结构、其他形式围护结构、围护墙的一墙多用技术、基坑工程地下水控制技术、地下连续墙技术、加筋水泥土墙技术、渠式切割水泥土连续墙技术（TRD 工法）、咬合桩支护技术、基坑工程土方开挖、逆作法技术、深基坑工程监测、深基坑工程环境效应与对策、动态设计及信息化施工技术。

【读者对象】本书可供从事基坑工程勘察、设计、施工、检测、监理及科研、教学人员使用参考。

本书可供从事基坑工程勘察、设计、施工、检测、监理及科研、教学人员使用参考。

【目 录】第 1 章 总论 第 2 章 设计计算理论与分析方法 第 3 章 放坡开挖基坑工程 第 4 章 悬臂式支挡结构 第 5 章 水泥土重力式围护结构 第 6 章 内撑式围护结构 第 7 章 拉锚式围护结构 第 8 章 土钉及复合土钉支护 第 9 章 冻结法围护结构 第 10 章 其他形式围护结构 第 11 章 围护墙的一墙多用技术 第 12 章 基坑工程地下水控制技术 第 13 章 地下连续墙技术 第 14 章 加筋水泥土墙技术 第 15 章 渠式切割水泥土连续墙技术（TRD 工法） 第 16 章 咬合桩支护技术 第 17 章 基坑工程土方开挖 第 18 章 逆作法技术 第 19 章 深基坑工程监测 第 20 章 深基坑工程环境效应与对策 第 21 章 动态设计及信息化施工技术

(信息来源：中国建筑书店网站)