维普资讯 http://www.cqvip.com

新一代超声波钻孔电视及其在工程勘察中的应用研究

王成虎[1],郭启良[1],陈群策[2],毛吉震[1],侯砚和[1]
(1.中国地震局地壳应力研究所,北京 100085;2.中国地质科学院地质力学研究所,北京 100082)

[摘 要] 主要介绍了新一代超声波钻孔电视的主要组成部分及其性能特点,并初步比较了其与常见的光学钻孔电视和前几代超声波钻孔电视的区别。通过在某隧道工程区勘察工程中的应用研究,说明新一代超声波钻孔电视可以提供大量有效可视的钻孔岩体定量数据,为工程设计的定量化分析提供了详细的数据资料,为提升现有的工程勘察技术水平提供了一条有效的技术途径。

[关键词] 钻孔电视 工程勘察 应用 前景
[中图分类号]P634.9 [献标识码]A [文章编号]0495-5331(2007)01-0098-04

广义的钻孔电视成像技术是应用包括声、超声、光、电、磁和核磁共振等技术对钻孔周边介质进行原位扫描成像,采集的数据结果通常采用与电视图像显示相类似的直观可视方式进行表达,此类的钻孔测井技术方法被称之为钻孔电视成像技术。目前国内外使用的钻孔电视有两大类,即光学钻孔电视和超声波钻孔电视。两者的主要区别在于成像原理不同,光学类主要借助光学拍摄记录系统对钻孔周边介质进行扫描记录,主要适合于光学条件很好的钻孔中,如干孔,清水钻孔;而超声波类主要利用探头发射和接收的超声波信号对钻孔介质进行扫描记录,接收记录的反射信号的强度和时程可以反应钻孔介质的密度和强度,其应用范围较广,受钻孔测试条件限制少,可以应用到泥浆孔、清水孔。

声波钻孔电视(ATV或BHTV)是最早的能获得井壁直观图像的测井方法[1],于20世纪60年代后期由石油生产部门研制成功,并用于检测和评价钻孔裂隙特征和套管检测等[2]。早期的声波钻孔电视由于缺乏高性能计算机系统及高精度数据采集技术的支持,后期数据处理均要依靠人工分析完成,费时费力,测试和推广都较为困难[5]。直到20世纪90年代,由于声波钻孔电视探头采用了先进的声波束聚焦技术、数字记录技术和数字化数据处理技术等,其精度和测井速度大大提高,声波钻孔电视发展成为一种小口径钻孔地球物理测井工具,才广泛应用于其他领域[3,4]。声波电视测井技术成功地运用到钻孔地质调查、水文地质调查、矿产勘探和开采设计、核废物深地质处置库选址和场址评价、岩石工程等研究领域[5,6],测量深度达5375m[7]。

1 新一代超声波钻孔电视简介

本文介绍的ABI40超声波钻孔成像综合测试系统(integrative acoustic borehole imaging system)的前身为Alt FAC40[8],为由Mount Sopris公司将多种钻孔测量探头高度智能化集合而成的一套综合测量工具,系统结构如图1所示。它挂载多种钻孔测量探头,如井径-孔深-孔斜测量探头,超声波成像探头等。整个系统包括绞车系统、数据采集控制主机系统、笔记本显示系统和打印机。绞车型号为4WXB-1000,配备有2倍速调节杆,电动和手动刹车,多选择张力计,超载自动断开硅控开关,使用单芯同轴铠装电缆,测量深度可达1000多m,深度误差范围为每百米±5cm。数据采集控制主机型号为MGX-II,主要控制整个数据的采集流程和传输,有简单的状态监测和深度监测显示。数据采集的全部操作过程都由计算机控制。

系统的核心部分为ABI40探头,是一种高分辨率的钻孔成像仪器,分辨率为0.1mm裂隙隙宽,探

[收稿日期]2006-11-06;[修订日期]2007-01-02;[责任编辑]陈仁俊
[第一作者简介]王成虎(1978年—),男,获博士学位,主要从事工程地质稳定性评价、计算机技术在工程地质中的应用及地应力等方面的研究。
[基金项目]中国地震局大城市活动断层调查基本建设项目资金,项目号:15203008

维普资讯 http://www.cqvip.com

头检测结构面倾向倾角精度为 ±0.5°,发射的超声波频率 1.2 MHz,超声波束尺寸 1.5mm × 1.5 mm。探头的声学头部分结构如图 2 所示。新一代探头相对以前版本可以在各种钻孔条件下实现测试窗的自动优化,自动适应各种钻孔条件,自动改进信号检测的动态范围,而且探头还可以在 PVC 套管中使用,因此可以在更为复杂的条件下使用。

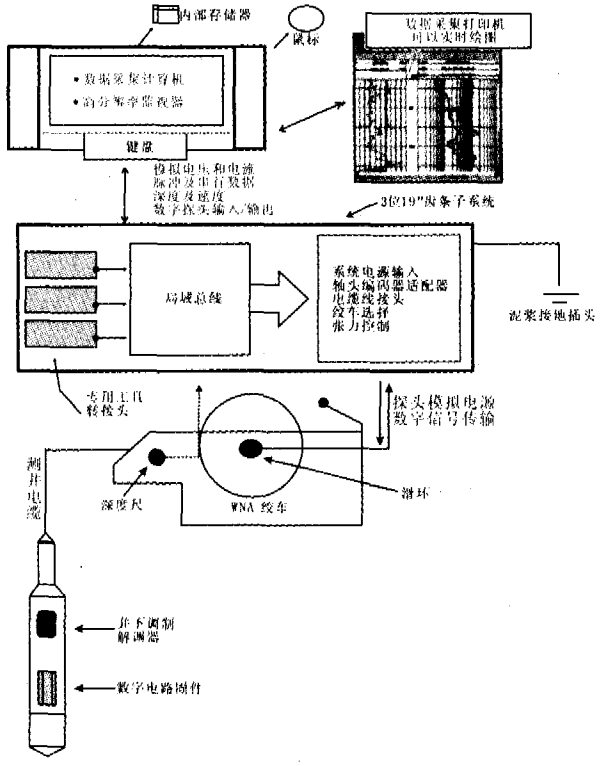
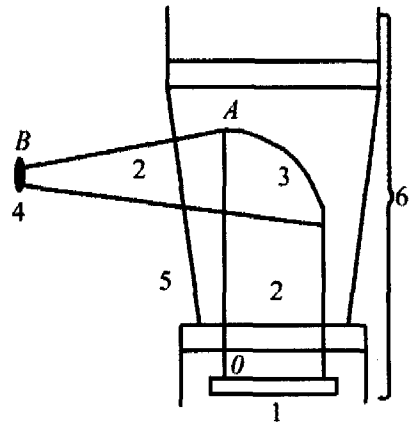


图 1　钻孔超声波成像综合测试系统结构图

基本原理:压电陶瓷晶体产生并发射的高频(1.2MHz)超声波束沿探管轴心传播,被一高速旋转的特制凹面反射镜垂直反射并聚焦,然后穿过低密度树脂透声窗和钻井液到达孔壁。部分超声波被孔壁反射并按原路径返回,被压电陶瓷晶体接收(OA + AB + BA + AO,如图 2 所示)。压电陶瓷晶体记录孔壁反射波的振幅和传播时间并转换成数字信号通过绞车电缆传送到地面主机。同时,三轴磁力计和倾斜计记录孔壁各扫描点的磁坐标和倾斜坐标。利用孔壁反射波的振幅和传播时间生成孔壁特征图像;利用磁坐标对孔壁图像定向;利用倾斜坐标计算钻孔的偏移值以及对所测得的结构面(裂隙、岩层、断层等)进行角度校正,最终形成反映孔壁特征的二维孔壁展开图像。

2　数据记录及分析解释

新一带超声波钻孔电视的测试操作和数据记录



1 - 发射/接收器(压电陶瓷晶体);
2 - 超声波束;3 - 特制凹面反射镜;
4 - 反射点;5 - 低密度树脂透声窗;
6 - 声学头

图 2　探头的声学结构图

全部由 Mslog 软件系统自动控制,只要按照操作说明书打开软件,选择正确的工具配置文件,在数据采集窗口设置数据采集模式和频率,就可以开始测试工作,现场工作量很小。在测试过程中,注意通过计算机监视探头的各种性能参数,以免发生意外毁坏探头。

数据处理主要依靠软件系统 WellCAD,该软件可以对现场采集的数据进行分析处理和解释,包括如下功能:将记录的超声波振幅值自动转换成反映孔壁特征的图像;对部分数据的缺失,可以自动进行插值修补;将二维孔壁展开图还原成三维孔壁柱状图;进行节理统计,绘制节理倾向极点图和玫瑰花图;利用测得的磁方位值对钻取的岩芯定位;可以实现节理视倾角和真倾角转换;可以和多种图像格式相互转换。经过该软件处理后得到图形图像如图 3 所示。

孔壁超声波成像平面展开图为传感器从地磁北极开始顺时针北(N)→东(E)→南(S)→西(W)→北(N)对孔壁进行扫描并随探头升降所形成的孔壁平剖图。因为不同密度和强度的物质对超声波的反射能力不同,颜色的深浅和变化反映了超声波反射信号的强弱,即反映了钻孔孔壁岩性和强度的差异性。

钻孔节理裂隙统计图是在孔壁超声波成像平面展开图的基础上经过投影处理而得到节理裂隙随深度分布情况的一个图形。图中为蝌蚪图,蝌蚪所在的区间代表节理裂隙的倾角,每 10°为一个区间,0° ~90°共九个区间,蝌蚪尾巴的指向代表节理裂隙的倾向。

孔壁超声波成像三维立体图是孔壁超声波成像平面展开图通过软件处理所形成的一种三维表达形式。钻孔节理裂隙统计极点图和玫瑰花图是对钻孔节理裂隙数据进行统计分析绘制而成。

维普资讯 http://www.cqvip.com

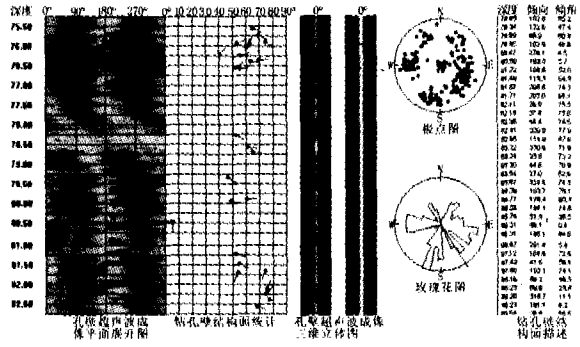


图 3 超声波钻孔电视数据处理图像

3 工程应用实例

某隧道工程位于深圳市大亚湾地区，该地区主要是燕山期花岗岩 γ_3^5 中粒二长花岗岩。勘察区浅表部为厚度不等的全风化带，一般厚度小于 2m，局部有节理密集带，新鲜岩体呈整体块状。花岗岩边缘分布有泥盆纪砂岩（主要是泥质粉砂岩、细砂岩和硅质角岩）。为了更好地查清本地区的结构面分布及性状特征，在可研阶段的四个钻孔中全部使用了新一代超声波钻孔电视进行测井，下面仅把 ZK4 的测试分析结果在本文予以展示。

钻孔 ZK4 孔口高程为 91.37m，深度 133.00m，测试时钻孔水位在 37.20m 左右，钻孔底部段被沉淀岩粉堵塞，超声波钻孔电视测试时需要钻孔内有液体介质。由于现场完孔多时，没有灌水条件，因此局部地段没能开展正常测试，钻孔超声波成像数据仅反映了钻孔 ZK4 中 37.20m ~ 116.50m 这一段钻孔的孔壁情况，在这一深度范围内，利用 WellCAD 软件共统计到结构面 258 条，下面就对现场所获得的测试图像和数据进行分析。

3.1 钻孔揭露结构面产状统计分析

WellCAD 可以根据 MSLog 实测的测试过程中探头的倾向倾角曲线将结构面的视倾向、视倾角自动转换为真倾向和真倾角。下面的分析讨论都是基于结构面的真实倾向倾角而得出的。

对钻孔 ZK4 所揭露的各种结构面的倾角进行统计，见图 4。由图 4 可知，结构面的倾角主要以 60° ~ 85°为主，约占 60% 以上，这一规律与钻孔岩芯编录结果十分一致，该结果也间接反应了该地区的构造运动方向。

图 5 为各类节理的倾向随深度变化的极点图和玫瑰花图，主要目的在于探讨倾向随深度的变化关系，同时划分出主要节理组的产状。极点图中圆心代表 0° 倾角，向外依次增大，直至半径的端点，外圆代表 90° 倾角，点分布的象限代表倾向；玫瑰花图中倾向以 10° 为间距，图中各圆的半径代表十条节理，如图 5。

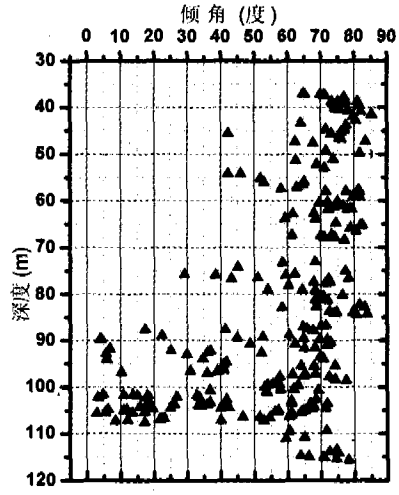
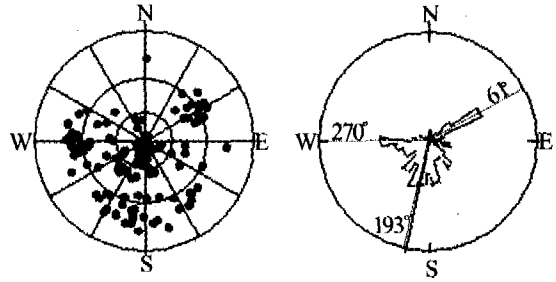
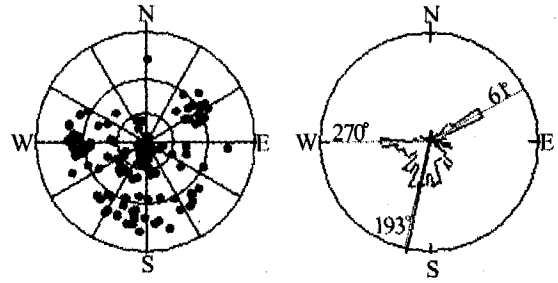


图 4 ZK4 结构面倾角类型统计直方图



（a） 孔口以下 37.20 ~ 88.00m



（b） 孔口以下 88.00 ~ 116.50m

图 5 节理倾向随深度分布的极点图和玫瑰花图

3.2 节理线密度分析

图 4 同样反映了节理线密度随深度的变化。由图 4 可知，在钻孔 ZK4 中，80 ~ 110m 的范围内，节理线密度最大，最大密度 > 6 条/米，其它部位节理线密度相对较小。

3.3 岩体完整性分析

根据图像解译结果和节理线密度统计，并结合实际的钻孔岩芯编录，划分出岩芯破碎带、节理密集带、较密集带和岩芯完整带，划分标准为：当钻孔孔壁图像有一半以上面积为暗蓝色或宽节理（结构面宽度≥20cm）很多且节理间距小于 20cm 时，即认为是岩芯破碎带；节理密集带指节理线密度 > 4 条/m

维普资讯 http://www.cqvip.com

的区域,节理较密集带指2＜节理线密度≤4条/m的区域;岩芯完整带指节理线密度≤2条/m的区域,划分结果如表1所示。

表1　钻孔ZK4在37.20m～116.50m深度范围内的岩芯完整性分析

岩芯类别	深度范围	累计长度(m)	占检测范围比例	岩芯性状描述
岩芯破碎带	40.10～42.75m、71.50～78.00m、81.75～85.00m、99.75～103.25m	15.9	20.05%	岩体十分破碎,钻孔扩径较为严重。
节理密集带	37.20～40.10m、57.00～62.00m、67.00～68.00m、78.00～81.75m、85.00～99.75m、103.25～107.50m	31.65	39.91%	岩体相对较完整,结构面清晰可辨,节理线密度非常高,而且以清晰的张性节理为主。
节理较密集带	42.75～57.00m、62.00～67.00m、68.00～71.50m、107.50～116.50m	31.75	40.04%	岩体较完整,结构面基本清晰可辨,节理线密度相对较高,而张性节理所占比例大大降低。

3.4　测试结论

总体看来,钻孔被检测部分的岩体完整性为中等程度,拟建工程所涉及部位的岩体部分位于节理较密集带内,部分位于节理密集内,岩体完整性中等,结构面较发育。

4　结论及展望

通过以上的分析介绍可知,新一代超声波钻孔电视比起光学钻孔电视和前几代声波钻孔电视具有更多的优点,受现场测试条件限制相对较少,有着广阔的应用前景。通过在某隧道工程初期工程勘察中的应用分析可知,钻孔电视可以提供大量有效可视的钻孔岩体定量数据,如钻孔周围岩体结构面的产状、分布特征等;而基于这些数据就可以初步对钻孔所揭露岩体的质量进行初步的定量化分析。这些定量化数据资料对于后续的区域稳定性分析、工程岩体质量分级、隧道工程设计等方面能够提供强有力的数据支持。而在工程勘察中引入超声波钻孔电视可以有效地弥补目前行业内技术水平偏低的缺陷,同时可以补充完善工程勘察中由于钻进技术水平的原因而导致的部分缺失信息[9]。相信在工程勘察中使用新一代超声波钻孔电视可以给工程勘察行业注入一股强劲的技术力量。

[参考文献]

[1] 薛梅,楚泽涵,姜皓. 声波测井仪器发展评述[J]. 石油仪器,2000,14(5):6－10.

[2] Zemanak J R, Glenn E E, Norton L J, et al. Formation evaluation by inspection with the borehole televiewer[J]. Geophysics, 1970, 35(2):254－269.

[3] Willianms J H, Lane J W, Kamini S J, et al. Application of advanced geophysical logging methods in the characterization of a fractured－sedimentary bedrock aquifer, Ventura County, California[R]. Ventura County: USA Geological Survey Water－Resources Investigations Report (00－4083), 2002.

[4] Johnson C D, Haeni F P, Lane J W, et al. Borehole－geophysical investigation of the university of Connecticut Landfill, Storrs, Connecticut[R]. Connecticut: USA Geological Survey Water－Resources Investigations Report(01－4033), 2002.

[5] 毛吉震. 超声波成像钻孔电视及其在岩石工程中的应用[J]. 岩石力学与工程学报,1994, Vol(13) 3:247－260.

[6] Williams J H, Johnson C D. Acoustic and optical borehole－wall imaging for fractured－rock aquifer studies[J]. Journal of Applied Geophysics, 2004, 55:151－159.

[7] Paillet F L, Pedler W H. Integrated borehole logging methods for wellhead protection application [J]. Engineering Geology, 1996, 42:155－165.

[8] 苏锐,宗自华,王驹. 高分辨率声波钻孔电视及其在核废物地质处置深部岩体研究中的应用[J]. 岩石力学与工程学报,2005, Vol(24) 16:2922－2928.

[9] 王俊茹,孙丽娜,孔永杰. 某电子公司厂房岩土工程勘察与评价[J]. 地质与勘探,2005,4:110－112.

NEW ACOUSTIC BOREHOLE TELEVIEWER AND ITS APPLICATION IN GEOTECHICAL INVESTIGATION

WANG Cheng－hu[1], GUO Qi－liang[1], CHEN Qun－ce[2], MAO Ji－zhen[1], HOU Yan－he[1]

(1. *Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing* 100085, *China*

2. *Institute of Geological Mechanics, China Academy of Geosciences, Beijing* 100082, *China*)

Abstract: This paper mainly deals with the components of new acoustic borehole televiewer and the performance characteristics; at the same time, the paper compare the new acoustic borehole televiewer with the ordinary optical one and the old acoustic one. The application case into a geotechnical investigation of a tunneling project shows that the new acoustic borehole televiewer can give large quantities of effective and apparent data rock mass around borehole, and these data are very good basis for the quantitative analysis of engineering design and point out one effective access to improve the technological level of geotechnical investigation.

Key words: borehole televiewer, geotechnical investigation, application case, prospect