

doi:10.3799/dqkx.2014.045

# 岩体结构面产状测量的钻孔摄像技术及其可靠性

曹洋兵<sup>1</sup>, 晏鄂川<sup>1\*</sup>, 胡德新<sup>2</sup>, 季惠彬<sup>2</sup>

1. 中国地质大学工程学院, 湖北武汉 430074

2. 北京东方新星石化工程股份有限公司, 北京 100070

**摘要:** 针对钻孔摄像技术对结构面产状测量只限于垂直孔的现状, 以钻孔孔口圆心为原点, 建立空间左手直角坐标系, 对倾斜孔中结构面产状的确定方法进行了详尽的阐述和推导, 得出了精确的解析计算公式, 并基于C#语言进行编程, 开发了IDOIB软件, 通过测试表明此方法及其程序的正确性。采用PVC管模拟钻孔孔壁, 进行钻孔摄像技术用于结构面产状测量的可靠性试验研究, 结果表明:(1)对于垂直孔, 测量结果的倾向绝对误差为[−3°, 4°]、倾角绝对误差为[−1.5°, 1.0°], 说明该技术用于垂直孔进行结构面产状测量是可靠的, 能满足工程应用精度。(2)当PVC管的倾伏向为270°、倾伏角为25°时, 结构面产状可靠度为0.10; 倾伏向为176°、倾伏角为60°时, 结构面产状可靠度为0.67。PVC管倾伏角的不同导致结构面产状可靠度的差异。(3)一般岩体工程的结构面产状测量结果应具有高等级可靠度(不小于0.8), 即须在倾伏角不小于71°的钻孔内采用该技术进行测量。

**关键词:** 钻孔摄像技术; 岩体; 结构面; 产状; 可靠性; 影像解译; 工程地质。

中图分类号: P642

文章编号: 1000-2383(2014)04-0473-08

收稿日期: 2013-06-19

## Calculation Methods of Rock Mass Discontinuity Orientation Measured by Borehole Camera Technology and Technology Reliability

Cao Yangbing<sup>1</sup>, Yan Echuan<sup>1\*</sup>, Hu Dexin<sup>2</sup>, Ji Huibin<sup>2</sup>

1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Beijing New Oriental Star Petrochemical Engineering Co. Ltd., Beijing 100070, China

**Abstract:** For the issue that borehole camera technology only is applied to the vertical borehole currently, the calculation process for discontinuity orientation in inclined borehole is presented in this paper. With the circle centre of drill orifice as the origin, the left-handed Cartesian coordinate system is constructed and the precise analytic formulas for discontinuity orientation in inclined borehole are obtained. On this basis, the IDOIB software is developed using C# programming language. The validity of analytic formulas and program are verified by the principle of borehole camera technology. In addition, the PVC pipe experiments are conducted to examine the reliability of borehole camera technology for measurement of discontinuity orientation. Results show that: (1) For vertical holes, absolute errors of dip directions range from −3° to 4°, and those of dips range from −1.5° to 1.0°. The technology is reliable for measurement of discontinuity orientation in vertical boreholes, and it can satisfy the needs of rock engineering. (2) For inclined PVC pipes with trend of 270° and plunge of 25°, the reliability degree of discontinuity orientation is 0.10; while inclined PVC pipes with trend of 176° and plunge of 60°, the reliability degree of discontinuity orientation is 0.67. The difference of pipe plunge results in the reliability difference of discontinuity orientation. (3) The reliability of discontinuity orientation should be high (the reliability degree is no less than 0.8) for general rock engineering, so the plunge of inclined borehole should be no less than 71°.

**Key words:** borehole camera technology; rock; discontinuity; orientation; reliability; image interpretation; engineering geology.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(No.41172282); 国家重点基础研究发展计划“973”项目(No.2011CB710605); 北京市科学技术委员会重点项目资助项目(No.20090102-2796)。

**作者简介:** 曹洋兵(1987—), 男, 博士研究生, 主要从事岩体稳定性评价与防治方面的研究. E-mail: cybing1140504@163.com

\* 通讯作者: 晏鄂川(1969—), E-mail: yecyec6970@163.com

钻孔孔壁岩体结构面由于具有极强的隐蔽性,对其调查和研究一直受到限制,当前的研究主要是基于钻孔岩心的相关测定和描述,但采用此方式所获得的结构面信息较少、且精度不高,一般不能满足工程建设的需要。因而,钻孔摄像技术被开发和不断改进(毛吉震,1994;葛修润和王川婴,2001;王川婴和 Law,2005),用于弥补钻孔岩心的不足,已在众多工程中得到了应用。

基于钻孔摄像技术,孔壁岩体结构面的连通性(王川婴等,2009)、发育特征(Kanaori, 1983;周科平等,2007;杨举等,2011)、影像自动判读(吴剑等,2011)以及孔壁岩体完整性(王川婴等,2010)、风化程度(孔广胜,2005)和场区地应力(毛吉震等,2008)方面得到了深入研究,对于全面、深入认识岩体工程地质特性和研究区工程地质条件等具有重要价值。尤其是利用钻孔影像进行岩体水力学和渗流特性方面的研究,一直以来都受到重视并得出了诸多有益的成果(Williams and Johnson, 2004; Cunningham, 2004; Cunningham *et al.*, 2004; Hamm *et al.*, 2007; 马峰等,2011; Lo *et al.*, 2012)。但目前钻孔摄像技术在结构面产状测量方面的应用,仍主要被限定在垂直钻孔(直线型)内,对于工程中广泛存在的倾斜钻孔(直线型),由于钻孔摄像原理及其与结构面真实空间信息架构的复杂性,尚缺乏准确的结构面产状确定方法,但此确定方法又为工程建设和研究人员所急需。此外,目前工程界和研究人员对钻孔摄像技术的研究主要处于应用层面,着重于利用其勘测更多的地质和工程信息,以更好地解决各种工程问题,对于技术本身的精度和工程应用的可靠性等问题则缺乏深入的探讨。但这种应用的可靠性问题对于结构面产状测量尤为重要,因为钻孔直径相对于结构面规模往往很小,摄像精度的微小变化能使产状结果产生明显差异,且由于结构面产状是影响岩体稳定性及其工程处置决策的关键因素,对其结果可靠性进行研究具有重要的工程价值和理论意义。

本文基于钻孔摄像原理,对倾斜孔中结构面产状的确定方法进行了详尽的阐述和推导,得出了精确的计算公式,开发了相应的软件,并对垂直孔和倾斜孔中结构面产状测量结果的工程应用可靠性进行了试验研究,得出了诸多有益的结论。

## 1 钻孔摄像原理与产状确定方法

### 1.1 摄像原理与垂直孔结构面产状解译

钻孔摄像技术是一种地球物理测井技术,于 20

世纪 50 年代诞生,其应用流程类似于其他测井技术(骆森等,2008;梁宏伟等,2013)。钻孔摄像技术可识别常规方法无法探测的孔壁地质信息,是目前应用较广、发展较快的一种工程技术。该技术先后经历了钻孔照相、钻孔摄像和数字光学成像 3 个阶段,其工作原理(葛修润等,2001;王川婴等,2005)为通过处于探头前部的高清晰度单片摄像器件,对探头前方钻孔及孔壁四周进行扫描摄像,然后通过硬件变换,将 360°钻孔孔壁图像转换为全景图像,再通过所建立的坐标系统和计算机软件将其还原成真实的钻孔孔壁图像。其中,全景图像和空间信息(深度和方位)需要进行叠加处理,深度由专用的测量轮获得,平面方位由磁性电子罗盘提供,它安置于锥面反射镜的中央。钻孔摄像实质是一个连续过程,其获得的全景图像与相应的深度和平面方位同步地进行变化,在二维展开图中,按照 N—E—S—W—N 的顺序展开(图 1)。

现阶段垂直孔内结构面产状确定方法为:平面展开图中结构面曲线最低点所在方位为该结构面的倾向(图 1);倾角  $\varphi$  (°)由结构面展开曲线的最高点和最低点之间的高差  $h$  (m)与钻孔直径  $d$  (m)之比的反正切函数求得,见图 1 和公式 1。

$$\varphi = \arctan(h/d) \cdot (180/\pi). \quad (1)$$

### 1.2 倾斜孔结构面产状确定方法

针对岩体工程中广泛存在的倾斜钻孔,目前尚无合理、准确的斜孔内结构面产状确定方法。本文在深入分析钻孔摄像原理基础上,根据磁性电子罗盘

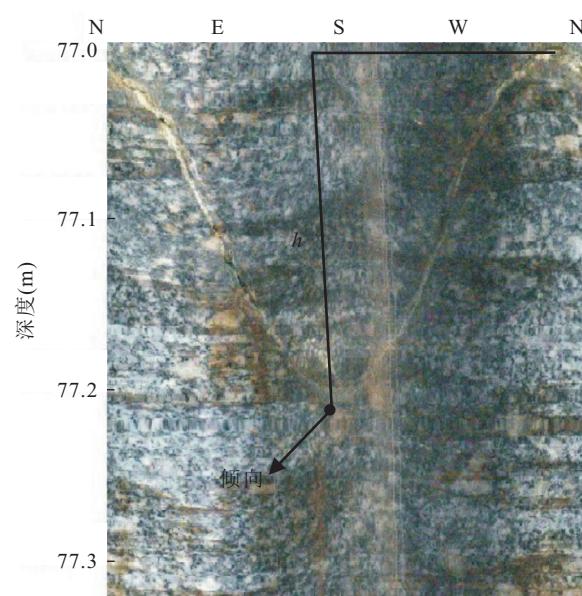


图 1 孔壁影像二维展开截面

Fig.1 Two dimension unfolded section of hole wall image

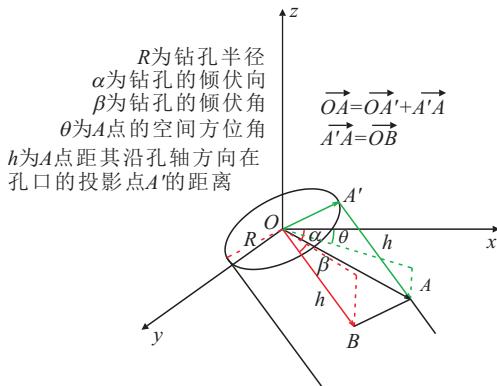


图2 孔壁任意点A空间坐标的计算模型

Fig.2 Space coordinate calculation model of any point A in borehole wall

定位原理和全景图像、空间信息图像叠加后的展开方式建立起相应的倾斜孔结构面产状计算坐标系，即以钻孔孔口圆心为原点，建立左手空间直角坐标系  $NEZ(xyz)$ ，其中  $x$  轴指向北为正、 $y$  轴指向东为正、 $z$  轴指向上为正。将倾斜钻孔看作线状构造，采用倾伏向和倾伏角表征其空间方位，利用钻孔半径表征其孔壁界限，在坐标系  $NEZ(xyz)$  的基础上构建如图 2 的计算模型，以求取孔壁内任意点 A 的空间坐标。根据不共线的 3 点确定 1 个平面的原理，若分别计算结构面与钻孔相交曲线上的 3 个点坐标，则可确定该结构面的产状。确定方法的关键步骤如下所述。

(1) 求出 A 点沿孔轴方向在孔口的投影点  $A'$ ，假设 A 点距  $A'$  点的长度为  $h$  (符号下同)，构造向量  $\overrightarrow{OB}$  (图 1)，使  $\overrightarrow{OB} = \overrightarrow{A'A}$ ，则：

$$\overrightarrow{A'A} = \overrightarrow{OB} = (h \cos\beta \cos\alpha, h \cos\beta \sin\alpha, -h \sin\beta), \quad (2)$$

式中： $\alpha$  为钻孔的倾伏向 ( $^\circ$ )， $\beta$  为钻孔的倾伏角 ( $^\circ$ )，符号下同。

(2) 在原  $xOy$  平面内构建  $x'Oy'$ ， $x'$  轴正向为钻孔倾伏向， $y'$  正向为  $x'$  正向顺时针旋转  $90^\circ$  所得，假设 A 点的空间方位角为  $\theta$  ( $^\circ$ )，记  $A'$  点在  $x'Oy'$  坐标平面下的投影点为  $A''$ ，则其方位角同为  $\theta$ ，如图 3 所示。

孔口圆在  $x'Oy'$  坐标平面下投影所得的椭圆方程为：

$$\frac{(x')^2}{(R \sin\beta)^2} + \frac{(y')^2}{R^2} = 1, \quad (3)$$

式中： $R$  为钻孔半径。由于  $-360^\circ < \theta - \alpha < 360^\circ$ ，为了计算的方便，将  $\theta - \alpha$  按公式(4)进行转换，转换后的  $\omega$  范围在  $[0, 360^\circ]$ ，符号表示下同。

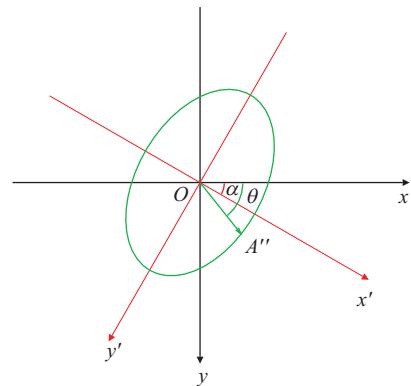
图3  $x'Oy'$  坐标系及  $A''$  点平面位置

Fig.3  $x'Oy'$  coordinate system and plane position of  $A''$  point

$$\omega = \begin{cases} \theta - \alpha + 360 & (-360^\circ < \theta - \alpha < 0), \\ \theta - \alpha & (0 \leq \theta - \alpha < 360^\circ). \end{cases} \quad (4)$$

则在  $x'Oy'$  坐标平面内，直线  $OA''$  的方程为：

$$\begin{cases} y' = \tan(\omega) x' & (\omega \neq 90^\circ, 270^\circ), \\ x' = 0 & (\omega = 90^\circ, 270^\circ). \end{cases} \quad (5)$$

联立求解方程(3)和(5)，可得到  $A''(x', y')$  在  $x'Oy'$  坐标系下的坐标为：

$$\begin{cases} x' = \frac{R \sin\beta}{\sqrt{1 + \sin^2\beta \tan^2\omega}}, & y' = \frac{R \sin\beta \tan\omega}{\sqrt{1 + \sin^2\beta \tan^2\omega}} \\ & (\omega \in [0, 90^\circ] \cup (270^\circ, 360^\circ)); \\ x' = 0, & y' = R (\omega = 90^\circ); \\ x' = \frac{-R \sin\beta}{\sqrt{1 + \sin^2\beta \tan^2\omega}}, & y' = \frac{-R \sin\beta \tan\omega}{\sqrt{1 + \sin^2\beta \tan^2\omega}} \\ & (\omega \in (90^\circ, 270^\circ)); \\ x' = 0, & y' = -R (\omega = 270^\circ). \end{cases} \quad (6)$$

根据平面直角坐标系的转换规则，通过公式(7)将  $A''$  点在  $x'Oy'$  坐标系下的坐标  $(x', y')$  转换到  $xOy$  坐标系下的坐标  $(x, y)$ ：

$$\begin{cases} x = x' \cos\alpha - y' \sin\alpha, \\ y = x' \sin\alpha + y' \cos\alpha. \end{cases} \quad (7)$$

$A'$  点的  $x$ 、 $y$  坐标值与  $A''$  相同， $A'$  点的  $z$  坐标值通过公式(8)计算而得。

$$z =$$

$$\begin{cases} \sqrt{R^2 - x^2 - y^2} & (\omega \in [0, 90^\circ] \cup [270^\circ, 360^\circ]), \\ -\sqrt{R^2 - x^2 - y^2} & (\omega \in (90^\circ, 270^\circ)). \end{cases} \quad (8)$$

$A'(x, y, z)$  点可通过公式(6)~(8)计算而得，具体不再赘述。

(3) 根据  $\overrightarrow{OA} = \overrightarrow{OA'} + \overrightarrow{A'A}$ ，可利用上两步计算

结果求得  $\overrightarrow{OA}$ , 即得到点 A 的空间坐标。

(4) 假设通过上述 3 步已求得某结构面在孔壁上任意 3 个点的空间坐标, 分别记为  $U=(x_1, y_1, z_1)$ 、 $V=(x_2, y_2, z_2)$ 、 $W=(x_3, y_3, z_3)$ 。求出向量  $\overrightarrow{UV}$  和  $\overrightarrow{UW}$ , 如公式(9):

$$\begin{cases} \overrightarrow{UV} = (x_2 - x_1, y_2 - y_1, z_2 - z_1), \\ \overrightarrow{UW} = (x_3 - x_1, y_3 - y_1, z_3 - z_1). \end{cases} \quad (9)$$

为方便利用结构面法向量反求产状, 统一使用  $z$  坐标值不小于 0 的法向量作为该结构面的唯一法向量。根据三维向量叉积左手规则(本文所建为左手坐标系), 首先按照公式(10)求出结构面法向量  $a$ :

$$\begin{cases} a_x = (y_2 - y_1)(z_3 - z_1) - (y_3 - y_1)(z_2 - z_1), \\ a_y = (z_2 - z_1)(x_3 - x_1) - (z_3 - z_1)(x_2 - x_1), \\ a_z = (x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - (x_3 - x_1)(y_2 - y_1). \end{cases} \quad (10)$$

若  $a_z < 0$ , 则采用  $-a$  作为该结构面的法向量。求得结构面法向量后, 将其进行单位化处理, 即求取结构面的单位法向量( $n$ )。

(5) 基于结构面单位法向量  $n=(n_x, n_y, n_z)$ , 根据  $n_x$  和  $n_y$  的取值情况, 通过公式(11)计算该结构面倾向  $\alpha(^{\circ})$ ; 通过公式(12)计算其倾角  $\beta(^{\circ})$ :

$$\begin{cases} n_x \geq 0, n_y = 0, \alpha = 0; \\ n_x < 0, n_y = 0, \alpha = 180; \\ n_y > 0, \alpha = \arccos(n_x) \cdot 180/\pi; \\ n_y < 0, \alpha = 360 - \arccos(n_x) \cdot 180/\pi. \end{cases} \quad (11)$$

$$\beta = \arccos(n_z) \cdot 180/\pi. \quad (12)$$

## 2 确定方法的程序化及其验证

基于 Microsoft Visual Studio 平台, 利用 C# 语言对上述倾斜孔中结构面产状确定方法进行编程, 开发了相应的 IDOIB(interpretation of discontinuity orientation in inclined borehole) 软件(图 4), 并具有通过文本文档(.txt)进行批量数据处理的功能。

基于钻孔摄像原理, 通过选取多种特殊情况下的结构面对软件进行理论测试, 如图 4 中所输入的钻孔参数和 3 个点信息, 通过理论判断可知该结构面倾向与钻孔倾伏向相反、倾角互余, 软件所得的结果与此相同。通过大量的此种理论测试表明, 本文倾斜孔内结构面产状的确定方法及其程序是正确的, 可以应用于相关工程实践。

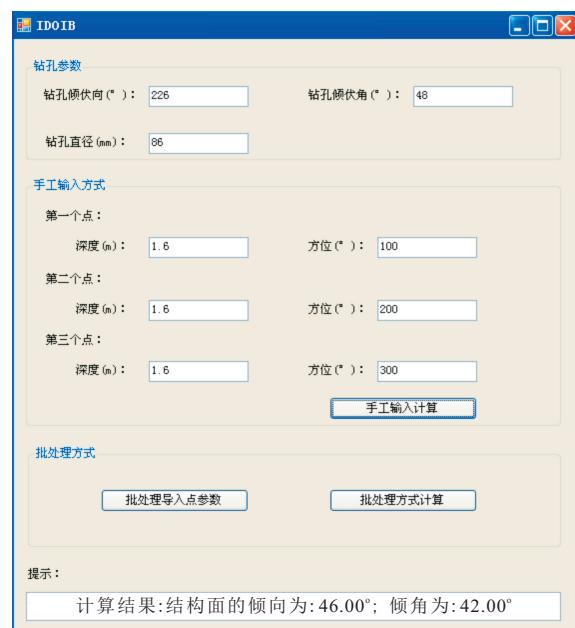


图 4 IDOIB 软件界面

Fig.4 Interface of IDOIB software

## 3 产状测量的钻孔摄像技术的可靠性

由于钻孔摄像技术本身仍存在一些有待继续研究和完善的技术难题, 如成像质量、图像拼接、磁性电子罗盘的精度和灵敏性以及倾斜孔中存在的磁性电子罗盘呈倾斜状等, 因而目前通过该技术所测得的结构面产状无法避免地存在一定的系统误差。但该种系统误差究竟有多大、所得出的产状结果是否有足够的工程应用可靠性等问题, 一直缺乏相应的试验报道。本次采用 PVC 管模拟钻孔, 进行该技术可靠性试验研究, 试验采用国内先进的钻孔摄像仪器, 其型号为 JL-IDOI(A)。

### 3.1 垂直孔中结构面产状的可靠性研究

本试验采用内直径为 103 mm 的 PVC 管模拟孔壁, 其基本流程为:(1)根据 PVC 管的内径, 按每 80.85 mm 表示  $90^{\circ}$ , 在米格坐标纸上设计出各种产状的结构面二维展开曲线;(2)用罗盘在 PVC 管内标记测量场区的真实方位, 并将坐标纸精细贴于 PVC 管, 且使坐标纸所设计的方位情况与 PVC 管重合(图 5);(3)按规范的钻孔摄像步骤进行测量, 对摄像过程中的下放速率、探头居中等问题进行精细控制, 并通过多次测量取平均值以使测量过程中可能产生的误差降到最低。通过钻孔摄像技术所得的结构面产状(摄像产状)和设计的真实产状对比情况(表 1), 表中结构面的编号按照其在 PVC 管的位



图5 垂直孔产状可靠性试验模型

Fig.5 Reliability test model of discontinuity orientation in vertical hole

置从高到低依次进行。

该试验反复进行多次,所得的结构面倾向和倾角在不超过 $0.5^{\circ}$ 的范围内波动,其结果相当稳定,表1中的影像值数据为多次测量的平均值。通过表1可知,倾向绝对误差(影像值与真实值的差,下同)为 $[-3^{\circ}, 4^{\circ}]$ 、倾角绝对误差为 $[-1.5^{\circ}, 1.0^{\circ}]$ 。对于一般岩体工程所需的精度,以上绝对误差范围是能够满足的,即钻孔摄像技术应用于垂直孔中的结构面产状测量是可靠的。

### 3.2 倾斜孔中结构面产状的可靠性研究

本试验采用长为4 m、内直径为84 mm的PVC管,在其上沿任意方向进行切割,共切割13处,每个切缝可模拟钻孔内的一处结构面。将切割好的PVC管固定在托板上,并将13处切缝沿着托板依次编号(表2和表3中的编号)。试验过程中,保持PVC管的切缝宽度在3 mm左右,以方便在其中插入硬板(其厚度约为2.8 mm),再使用罗盘测量其真实产状。

改变PVC管的线产状分别进行测试,以研究钻孔方位的变化对结构面产状测量结果的影响。基于取得的影像资料,采用前述的倾斜孔内结构面产状确定方法和IDOIB软件,通过选取结构面影像上3个点的空间信息可得出其产状。在选取结构面影像点时需注意,由于各点的高程信息差别较小和读取各点信息时难免存在一定的误差,因而选取的3个点一般是深度数值最大点、最小点和平均点,如图6的选取。各PVC管空间方位下,所得的影像解译产状和真实产状对比情况见表2~3。

表1 PVC管垂直时的真实产状和影像产状对比

Table 1 Contrast of authentic orientation and image orientation in vertical PVC pipe

编号	倾向( $^{\circ}$ )			倾角( $^{\circ}$ )		
	真实值	影像值	绝对误差	真实值	影像值	绝对误差
1	270	274	4	34.2	34.0	-0.2
2	20	17	-3	36.6	35.1	-1.5
3	135	137	2	55.5	56.0	0.5
4	180	182	2	53.7	54.2	0.5
5	225	228	3	44.2	45.1	0.9
6	78	77	-1	25.6	25.1	-0.5
7	165	166	1	34.4	35.4	1.0
8	314	316	2	45.3	46.0	0.7
9	128	130	2	39.8	40.0	0.2

表2 倾伏向 $270^{\circ}$ 、倾伏角 $25^{\circ}$ 时的结构面产状结果对比

Table 2 Contrast of discontinuity orientation while PVC pipe with trend of  $270^{\circ}$  and plunge of  $25^{\circ}$

编号	倾向( $^{\circ}$ )			倾角( $^{\circ}$ )		
	真实值	影像值	绝对误差	真实值	影像值	绝对误差
1	270	284	14	78	74	-4
2	150	141	-9	80	75	-5
3	135	129	-6	38	40	2
4	148	137	-11	75	84	9
5	143	141	-2	69	78	9
6	160	145	-15	73	59	-14
7	108	100	-8	65	62	-3
8	290	303	13	75	69	-6
9	123	127	4	29	25	-4
10	104	99	-5	32	42	10
11	75	87	12	60	57	-3
12	122	136	14	48	53	5
13	280	291	11	87	79	-8

表3 倾伏向 $176^{\circ}$ 、倾伏角 $60^{\circ}$ 时的结构面产状结果对比

Table 3 Contrast of discontinuity orientation while PVC pipe with trend of  $176^{\circ}$  and plunge of  $60^{\circ}$

编号	倾向( $^{\circ}$ )			倾角( $^{\circ}$ )		
	真实值	影像值	绝对误差	真实值	影像值	绝对误差
1	327	323	-4	61	58	-3
2	51	45	-6	58	60	2
3	64	62	-2	19	22	3
4	44	49	5	52	54	2
5	42	44	2	47	45	-2
6	52	48	-4	64	63	-1
7	339	344	5	35	33	-2
8	181	180	-1	72	73	1
9	117	120	3	13	17	4
10	221	223	2	8	6	-2
11	294	291	-3	38	37	-1
12	342	340	-2	18	21	3
13	342	337	-5	61	60	-1

上述两组试验反复进行多次,所得的结构面倾向和倾角在不超过 $2^{\circ}$ 的范围内波动,其结果还是基本稳定的,表 2 和表 3 中的影像值数据为多次测量的平均值。从表 2 可知,倾向绝对误差在 $[-15^{\circ}, 14^{\circ}]$ 、倾角绝对误差在 $[-14^{\circ}, 10^{\circ}]$ ;从表 3 可知,倾向绝对误差在 $[-6^{\circ}, 5^{\circ}]$ 、倾角绝对误差在 $[-3^{\circ}, 4^{\circ}]$ 。根据钻孔摄像原理可推测,这两种 PVC 管方位下的结构面产状可靠度差异主要为 PVC 管的倾伏角不同所导致,与 PVC 管的倾伏向关系较小。具体而言,主要在于钻孔摄像技术及相关仪器目前都是基于磁性电子罗盘进行定位,当 PVC 管的倾伏角较小时,磁性电子罗盘呈倾斜状故无法准确定位,难以得出准确的结构面产状。

### 3.3 结构面产状可靠性的量化分析与讨论

上述试验表明,钻孔摄像技术在不同钻孔方位下测得的结构面产状精度不同、可靠程度不一。且由于此种可靠度差异主要为 PVC 管倾伏角的不同而导致,为量化比较和分析,首先基于统计学理论对结构面产状的可靠度进行计算,再通过倾伏角与可靠度之间的定量关系对钻孔摄像技术的工程适用条件进行讨论。

采用绝对误差的均值在工程应用可接受范围内的置信概率表征不同钻孔倾伏角下的结构面产状可靠度,即将产状可靠度问题转换为绝对误差均值的置信度问题。为此作以下两个假设:(1)根据垂直孔中的产状绝对误差分布特征,认为当倾向的绝对误差在 $[-4^{\circ}, 4^{\circ}]$ 、倾角的绝对误差在 $[-2^{\circ}, 2^{\circ}]$ 时,结构面产状结果具有足够的工程应用可靠度,此误差范围为工程应用可接受范围,即垂直孔内结构面产状结果的可靠度为 1.00;(2)根据误差的经验分布特征,假设倾向和倾角的绝对误差均服从正态分布。

针对倾斜孔内的结构面产状可靠度,根据表 2 和表 3 的测量样本对其对应线产状下的结构面产状绝对误差所具有的数字特征(均值和方差)作无偏估计,可得:钻孔的倾伏向 $270^{\circ}$ 、倾伏角 $25^{\circ}$ 时,其倾向绝对误差的均值为 $0.9^{\circ}$ 、方差为 $115.6^{\circ}$ ,倾角绝对误差的均值为 $-0.9^{\circ}$ 、方差为 $54.2^{\circ}$ ;钻孔的倾伏向 $176^{\circ}$ 、倾伏角 $60^{\circ}$ 时,其倾向绝对误差的均值为 $-0.8^{\circ}$ 、方差为 $14.2^{\circ}$ ,倾角绝对误差的均值为 $-0.2^{\circ}$ 、方差为 $5.5^{\circ}$ 。将绝对误差的正态分布转换为  $t$  分布,根据公式(13)可求得置信度(可靠度)为 $1-\alpha$ 时绝对误差均值  $\mu$  的置信区间为公式(14)。

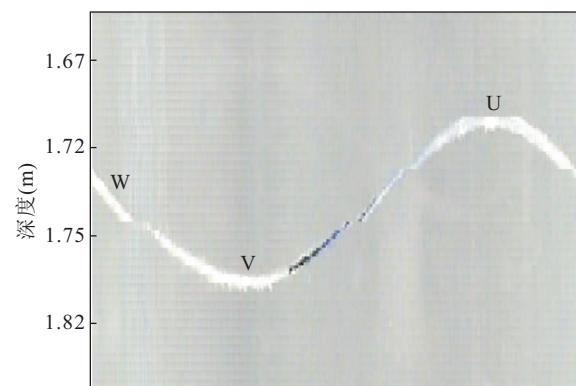


图 6 结构面影像选点示意

Fig.6 Sketch map of choice of discontinuity image point

$$P\left\{ \left| \frac{(\bar{X} - \mu) \sqrt{n}}{S} \right| < t_{\alpha/2}(n-1) \right\} = 1 - \alpha , \quad (13)$$

$$\left( \bar{X} - t_{\alpha/2}(n-1) \frac{S}{\sqrt{n}}, \bar{X} + t_{\alpha/2}(n-1) \frac{S}{\sqrt{n}} \right) , \quad (14)$$

式中:  $\bar{X}$  为样本绝对误差的均值,  $S$  为样本绝对误差的方差,  $n$  为样本数。由于倾向和倾角绝对误差的均值都较小(绝对值不超过 $1^{\circ}$ ),为简化计算,假设其值都为 0。基于  $t$  分布表,可得以上两种钻孔线产状下的结构面产状可靠度(置信概率):钻孔倾伏向 $270^{\circ}$ 、倾伏角 $25^{\circ}$ 时,倾向的可靠度为 0.10,倾角的可靠度为 0.11;倾伏向 $176^{\circ}$ 、倾伏角 $60^{\circ}$ 时,倾向的可靠度为 0.67,倾角的可靠度为 0.78。将倾向和倾角中的可靠度较小值作为该钻孔产状下的结构面产状整体可靠度,则倾伏向 $270^{\circ}$ 、倾伏角 $25^{\circ}$ 时,结构面产状可靠度为 0.10;倾伏向 $176^{\circ}$ 、倾伏角 $60^{\circ}$ 时,结构面产状可靠度为 0.67。

综合上述垂直与倾斜孔的结构面产状可靠度结果,绘制图 7。从图可知,结构面产状可靠度随钻孔倾伏角增大呈单调增大趋势,总体呈略微上凸的曲线。为合理地量化钻孔摄像技术的工程适用条件,将产状可靠度分为五级(图 7),其对应的钻孔倾伏角分别为: $[0.8, 1.0]$  为高可靠度,钻孔倾伏角为 $[71^{\circ}, 90^{\circ}]$ ; $[0.6, 0.8]$  为较高可靠度,钻孔倾伏角为 $[55^{\circ}, 71^{\circ}]$ ; $[0.4, 0.6]$  为中可靠度,钻孔倾伏角为 $[43^{\circ}, 55^{\circ}]$ ; $[0.2, 0.4]$  为较低可靠度,钻孔倾伏角为 $[32^{\circ}, 43^{\circ}]$ ; $(0, 0.2)$  为低可靠度,钻孔倾伏角为 $[0^{\circ}, 32^{\circ}]$ 。针对一般岩体工程而言,认为采用钻孔摄像技术进行结构面产状测量所获结果的可靠度应达到高级,即可靠度为 $[0.8, 1.0]$ ,则通过上述量化分

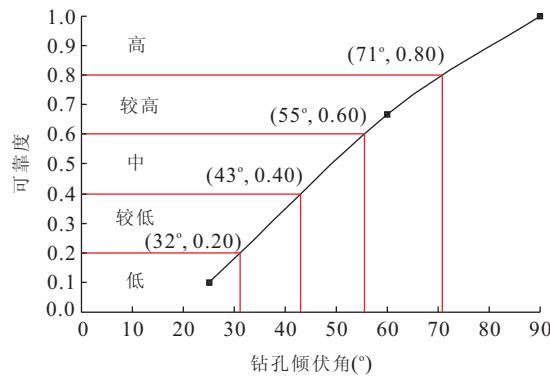


图7 钻孔倾伏角与结构面产状可靠度关系

Fig.7 Relationship between plunge of borehole and reliability of discontinuity orientation

析可知,须在倾伏角为[71°, 90°]的钻孔内进行测量,对于倾伏角小于71°的钻孔,其产状测量结果须在被其他测量技术和手段证实后,才能被用于工程建设和相关研究。

需指出的是,采用PVC管所模拟的钻孔与真实的钻孔环境仍存在差异,其主要体现在真实的钻孔环境中可能存在局部复杂变化的磁场,如由于铁质套管所产生的局部磁场紊乱或地质磁异常等。因而,在应用钻孔摄像技术进行结构面产状测量时,需要对地质磁异常等现象高度重视和提前甄别,且对于铁质套管底端以下一定距离(一般不小于15 m)不宜进行产状测量。

## 4 结论

本文基于钻孔摄像原理,推导倾斜孔内结构面产状计算的解析公式,编写相应的程序,通过产状可靠性试验研究,获得了以下结论:

(1)通过理论测试表明,推导得出的倾斜孔内结构面产状计算的解析公式及其程序是正确的,可以为相关工程应用提供支撑和参考。

(2)试验表明,钻孔摄像技术用于垂直孔中结构面产状的测量是可靠的,能满足工程应用精度,其倾向绝对误差在[-3°, 4°]、倾角绝对误差在[-1.5°, 1.0°],且所得的结果稳定性较好。

(3)基于试验和理论计算表明,当PVC管的倾伏向为270°、倾伏角为25°时,结构面产状的可靠度为0.10;倾伏向为176°、倾伏角为60°时,结构面产状的可靠度为0.67。不同PVC管方位下的结构面产状可靠度差异主要受PVC管倾伏角的影响。

(4)根据倾伏角与可靠度关系曲线及本文确定

的可靠度分级方案,认为对一般岩体工程的结构面产状测量结果应具有高等级可靠度(不小于0.8),即须在钻孔倾伏角不小于71°的钻孔内进行测量,若倾伏角小于71°,则其产状结果须在被其他测量技术证实后,才能用于工程建设和相关研究。

## References

- Cunningham, J. K., 2004. Application of Ground-Penetrating Radar, Digital Optical Borehole Images, and Cores for Characterization of Porosity Hydraulic Conductivity and Paleokarst in Biscayne Aquifer, Southeastern Florida, USA. *Journal of Applied Geophysics*, 55(1–2): 61–76. doi:10.1016/j.jappgeo.2003.06.005
- Cunningham, J. K., Carlson, J. I., Hurley, N. F., 2004. New Method for Quantification of Vuggy Porosity from Digital Optical Borehole Images as Applied to the Karstic Pleistocene Limestone of the Biscayne Aquifer, Southeastern Florida. *Journal of Applied Geophysics*, 55(1–2): 77–90. doi:10.1016/j.jappgeo.2003.06.006
- Ge, X. R., Wang, C. Y., 2001. Digital Panoramic Borehole Camera Technique and Digital Borehole. *Underground Space*, 21(4): 254–261 (in Chinese with English abstract).
- Hamm, S. Y., Kim, M. S., Cheong, J. Y., et al., 2007. Relationship between Hydraulic Conductivity and Fracture Properties Estimated from Packer Tests and Borehole Data in a Fractured Granite. *Engineering Geology*, 92(1–2): 73–87. doi:10.1016/j.enggeo.2007.03.010
- Kanaori, Y., 1983. The Observation of Crack Development around an Underground Rock Chamber by Borehole Television System. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 16(2): 133–142. doi:10.1007/BF01032795
- Kong, G. S., 2005. The Application of Borehole Acoustic Televiewer Logging Results to the Classification of Rock Weathering Degrees. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 29(4): 367–368, 373 (in Chinese with English abstract).
- Liang, H. W., Wu, S. H., Mu, L. X., et al., 2013. Base Level Cyclic Controls on the Fluvial Reservoir Physical Properties and Sonic Logging Response. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 38(5): 1135–1142 (in Chinese with English abstract). doi:10.3799/dqkx.2013.113
- Lo, H. C., Chou, P. Y., Hsu, S. M., et al., 2012. Using Borehole Prospecting Technologies to Determine the Correlation between Fracture Properties and Hydraulic Conductivity: A Case Study in Taiwan. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 17(1): 27–37. doi:10.1016/j.jappgeo.2003.06.005

2113/JEEG 17.1.27

Luo, M., Pan, H.P., Zhao, Y.G., et al., 2008. Natural Radioactivity Logs and Interpretation from the CCSD Main Hole. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 33(5): 661—671 (in Chinese with English abstract).

Ma, F., Chen, G., Hu, C., et al., 2011. Change of Permeability Tensors in Fractured Rock Mass Based on Intelligent Drillhole Optical Imager. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 33(3): 496—500 (in Chinese with English abstract).

Mao, J.Z., 1994. Ultrasonic Imaging Borehole TV and Its Application to Rock Engineering. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 13(3): 247—260 (in Chinese with English abstract).

Mao, J. Z., Chen, Q. C., Wang, C. H., 2008. Application of Acoustic Borehole Televiwer to Measurement of In-Situ Stress. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 30(1): 46—50 (in Chinese with English abstract).

Wang, C.Y., Hu, P.L., Sun, W.C., 2010. Method for Evaluating Rock Mass Integrity Based on Borehole Camera Technology. *Rock and Soil Mechanics*, 31(4): 1326—1330 (in Chinese with English abstract).

Wang, C. Y., Law, K. T., 2005. Review of Borehole Camera Technology. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 24(19): 3440—3448 (in Chinese with English abstract).

Wang, C. Y., Zhong, S., Sun, W.C., 2009. Study of Connectivity of Discontinuities of Borehole Based on Digital Borehole Images. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 28(12): 2405—2410 (in Chinese with English abstract).

Williams, J. H., Johnson, C. D., 2004. Acoustic and Optical Borehole-Wall Imaging for Fractured-Rock Aquifer Studies. *Journal of Applied Geophysics*, 55(1—2): 151—159.

Wu, J., Feng, S. K., Li, H.J., 2011. Study of Automatically Extracting Structural Plane Parameters from Borehole Images. *Rock and Soil Mechanics*, 32(3): 951—957 (in Chinese with English abstract).

Yang, J., Yan, E.C., Ji, H.B., et al., 2011. Digital Drillhole Im-

ages Based Identification of Discontinuity Classification and Development in Deep Rocks. *Journal of Engineering Geology*, 19(3): 332—337 (in Chinese with English abstract).

Zhou, K. P., Gao, F., Hu, J. H., et al., 2007. Monitoring and Analysis of Fracture Development in Pre-Splitting Hole of Cave Inducement of Roof. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 26(5): 1034—1040 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 葛修润,王川婴,2001.数字式全景钻孔摄像技术与数字钻孔.地下空间,21(4):254—261.
- 孔广胜,2005.利用钻孔超声成像的图像特征进行岩石风化程度分类.物探与化探,29(4):367—368,373.
- 梁宏伟,吴胜和,穆龙新,等,2013.基准面旋回对河流相储层物性差异及声波测井影响.地球科学——中国地质大学学报,38(5):1135—1142.
- 骆森,潘和平,赵永刚,等,2008.中国大陆科学钻探主孔自然放射性测井及其解释.地球科学——中国地质大学学报,33(5):661—671.
- 马峰,陈刚,胡成,等,2011.利用钻孔成像研究基岩地区的渗透张量变化规律.岩土工程学报,33(3):496—500.
- 毛吉震,1994.超声波成象钻孔电视及其在岩石工程中的应用.岩石力学与工程学报,13(3):247—260.
- 毛吉震,陈群策,王成虎,2008.超声波钻孔电视在地应力测量研究中的应用.岩土工程学报,30(1):46—50.
- 王川婴,胡培良,孙卫春,2010.基于钻孔摄像技术的岩体完整性评价方法.岩土力学,31(4):1326—1330.
- 王川婴,Law, K.T.,2005.钻孔摄像技术的发展与现状.岩石力学与工程学报,24(19):3440—3448.
- 王川婴,钟声,孙卫春,2009.基于数字钻孔图像的结构面连通性研究.岩石力学与工程学报,28(12):2405—2410.
- 吴剑,冯少孔,李宏阶,2011.钻孔成像中结构面自动判读技术研究.岩土力学,32(3):951—957.
- 杨举,晏鄂川,季惠彬,等,2011.基于数字钻孔影像的深部结构面类型识别及发育特征研究.工程地质学报,19(3):332—337.
- 周科平,高峰,胡建华,等,2007.顶板诱导崩落预裂钻孔裂隙发育监测与分析.岩石力学与工程学报,26(5):1034—1040.