

doi: 10.11720/wtyht.2020.1230

王飞详,梁风,左双英.基于探地雷达岩体浅部节理面识别的模型实验[J].物探与化探,2020,44(1):185-190.http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.1230

Wang F X, Liang F, Zuo S Y. Model test on the identification of shallow joints in rock mass based on ground penetrating radar[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(1): 185-190. http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.1230

基于探地雷达岩体浅部节理面识别的模型实验

王飞详,梁风,左双英

(贵州大学 资源与环境工程学院, 贵州 贵阳 550025)

摘 要: 为准确获取隐藏于岩体内部和浮土覆盖的节理面信息,基于探地雷达探测技术,通过建立节理面倾角、倾向及长度的三角函数测量公式,实现了对岩体产状和长度等信息的准确求解,同时采用湿木板-细砂模型实验,验证了理论求解的合理性。

关键词: 探地雷达;节理面;产状;砂箱模型

中图分类号: P631

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2020)01-0185-06



0 引言

节理是岩体在各种力的作用下形成未发生明显位移的断裂^[1],是岩体中广泛发育的不连续面。岩体中大量发育的节理切割削弱了岩石的整体性,使其强度变差,严重影响着岩土体稳定性和工程建设的安全,节理为地下水和矿液的循环、储存、渗漏、聚集提供了通道和空间,节理对水利建设和矿体赋存有着重要影响;因此,在岩土工程、地质工程等领域查明岩体节理信息极其重要。

节理在岩体内形成空的或被充填的裂缝,由于节理面隐藏于岩体内部^[2],对节理调查的传统方法是在岩石露头上采用地质罗盘、卷尺等进行测量,这样使得测量的精度和范围受到了限制,且不能获取节理在岩体内部的信息及其延伸情况,当岩体表面有浮土覆盖时就更难以测量。

众多学者针对传统节理调查方法的局限性做了大量的研究。S. Slob^[3]、董秀军^[4]、William C. Haneberg^[5]、王树根^[6]等研究了应用三维激光扫描技术、数字近景摄影测量技术等,测量了岩体节理面信息的方法;王贵宾^[7]、杨春和^[8]等提出了岩体节

理平均迹长估计方法;刘东坤^[9]、刘伟^[10]等分析了探地雷达对不同性质的不良地质体的探测结果;上述研究均取得了丰硕的成果,但不同程度地存在一定的局限性^[11,12]。

为了能对隐藏于岩体内部和浮土覆盖的节理面进行方便、快速、准确的测量,文中基于探地雷达探测技术和节理面真视倾角、倾向及长度的三角函数关系,建立了节理面砂箱模型,测量了节理面相关参数,取得了较好的效果。

1 基于探地雷达的节理面测量公式

探地雷达的工作原理是利用发射天线向地下目标物体发射高频脉冲电磁波,当电磁波遇到介质中的电性差异分界面时,电磁波发生反射和折射^[10],反射电磁波由雷达接收天线接收,得到探地雷达时间剖面,该剖面反应了地下地质体的信息。

野外工作中使用探地雷达对岩体内部、上部覆盖有土层的节理面探测,测线移动方向难以保证和倾向一致,变为盲测,所读出的是界面倾角而不是真倾角;节理面长度是视倾斜线长度,而不是节理面真实长度。沿两条与待测节理面斜交的方向布置测

收稿日期: 2019-04-23; 修回日期: 2019-09-12

基金项目: 贵州省科技平台及人才团队计划项目(黔科合平台人才[2017]5402号);贵州省大学生创新创业训练计划项目(201610657016)

作者简介: 王飞详(1995-),男,硕士研究生,主要从事地质工程方面的科研工作。Email:1064160523@qq.com

通讯作者: 梁风(1976-),男,讲师,主要从事地质工程与工程物探的教学和科研工作。Email:3830361@qq.com

线,从两条测线的探地雷达剖面图像中读出节理面视倾角和视长度值并进行转化计算,可得出节理面的真倾角、倾向和真实长度值。

1.1 节理面产状测量公式

真倾角与视倾角关系如图 1 所示,其中 α 为真倾角, β, β' 为视倾角, ω, ω' 为真倾向与视倾向间的夹角, DH, CH 为视倾斜线,真倾角与视倾角的关系可用数学式表示: $\tan \beta = \tan \alpha \cdot \cos \omega$ 。

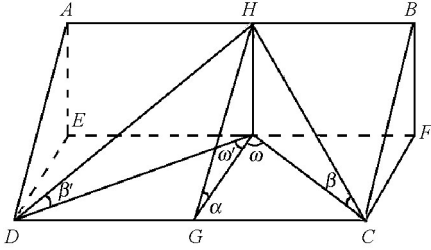


图 1 真倾角与视倾角的关系

Fig.1 Diagram of relation between true inclination and apparent inclination

探地雷达天线沿视倾向探测节理面所得视倾角,可通过数学公式转换求得真倾角 α 。如图 1,沿与待测节理面斜交的 HD, HC 方向布置两条测线,理论上可以从两张雷达剖面图中得出视倾角 β, β' 值,通过记录测线 HD, HC 前进方向,如 HC 方位角为 γ_{HC} , HD 的方位角为 γ_{HD} ,由此可计算出两个测线夹角 $\omega + \omega'$ 的值,假设 $\omega + \omega' = \theta$, θ 为已知值,即有:

$$\begin{cases} \tan \beta = \tan \alpha \cdot \cos \omega, \\ \tan \beta' = \tan \alpha \cdot \cos \omega', \\ \omega + \omega' = \theta. \end{cases} \quad (1)$$

联立上式计算 ω 、倾角 α ,可得:

$$\omega = \arctan \left(\frac{\tan \beta'}{\tan \beta \sin \theta} - \cot \theta \right), \quad (2)$$

$$\alpha = \arctan \frac{\tan \beta}{\cos \left[\arctan \left(\frac{\tan \beta'}{\tan \beta \sin \theta} - \cot \theta \right) \right]}. \quad (3)$$

式中的 α 即为通过视倾角 β, β' 经数学公式所得的节理面真倾角计算值。野外探测时需保证两条测线位于真倾向线 HG 两侧,或保证探测节理面的两条测线夹角大于 90° ,即 $\omega + \omega' = \theta > 90^\circ$ 。通过现场测量探地雷达天线移动的方向角 γ_{HC}, γ_{HD} ,可求出节理面倾向:

$$\gamma_{HG} = \gamma_{HC} + \arctan \left(\frac{\tan \beta'}{\tan \beta \sin \theta} - \cot \theta \right), \quad (4)$$

$$\gamma_{HG} = \gamma_{HD} - \theta + \arctan \left(\frac{\tan \beta'}{\tan \beta \sin \theta} - \cot \theta \right). \quad (5)$$

如果探地雷达天线移动的方向角为 γ_{CH}, γ_{DH} ,则节理面倾向为:

$$\gamma_{HG} = \gamma_{CH} \pm 180^\circ + \arctan \left(\frac{\tan \beta'}{\tan \beta \sin \theta} - \cot \theta \right), \quad (6)$$

$$\gamma_{HG} = \gamma_{DH} \pm 180^\circ - \theta + \arctan \left(\frac{\tan \beta'}{\tan \beta \sin \theta} - \cot \theta \right). \quad (7)$$

上式中,如 $\gamma_{CH} < 180^\circ$ 或 $\gamma_{DH} < 180^\circ$,则式中“ \pm ”号用“+”号运算;如 $\gamma_{CH} \geq 180^\circ$ 或 $\gamma_{DH} \geq 180^\circ$,则式中“ \pm ”号用“-”号运算。

1.2 节理面长度测量公式

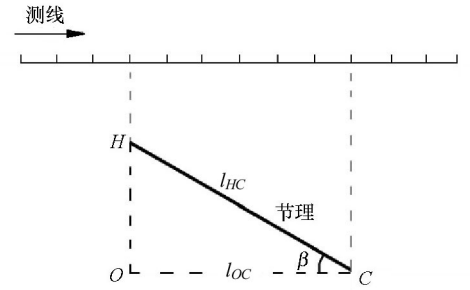


图 2 探地雷达探测节理面长度示意

Fig.2 Schematic diagram of joint surface length detected by GPR

如图 2, l_{OC} 是视倾斜线上节理面在水平投影上的长度, β 为视倾角,通过三角函数公式转换求得节理面长度 l_{HC} 为:

$$l_{HC} = \frac{l_{OH}}{\sin \alpha} = l_{OC} \tan \beta$$

$$\sin \left\{ \arctan \frac{\tan \beta}{\cos \left[\arctan \left(\frac{\tan \beta'}{\tan \beta \sin \theta} - \cot \theta \right) \right]} \right\}. \quad (8)$$

若探地雷达天线沿视倾斜线 HD 方向移动,则有:

$$l_{HC} = \frac{l_{OH}}{\sin \alpha} = l_{OD} \tan \beta'$$

$$\sin \left\{ \arctan \frac{\tan \beta}{\cos \left[\arctan \left(\frac{\tan \beta'}{\tan \beta \sin \theta} - \cot \theta \right) \right]} \right\}. \quad (9)$$

2 模型实验

为了对上述各测量公式进行验证,进行了砂箱模型实验。模型为长 1.2 m、宽 0.7 m、高 0.8 m,装满干净细砂的木箱,将两块长×宽×厚分别为 30 cm×30

cm×2 cm 和 40 cm×30 cm×2 cm 的湿木板埋于木箱中模拟节理,上覆不同厚度的砂土,如图 3 所示。采用湿木板是为了增大介电常数,与细砂产生明显的物性差别,类似于岩体中节理面与围岩存在明显的介电常数差异。通过改变木板的埋设角度、倾向、尺寸、数量、深度等,来模拟不同产状、不同深度、不同长度、不同组数的节理面,并用探地雷达进行探测,

根据雷达剖面图像中节理面的埋深、组数、排列、间距、几何形态、产状及长度与实测信号解释进行比较、分析,判断探地雷达探测节理面的可行性和准确性。实验前根据砂箱内砂体的厚度对介电常数进行校核计算,经反算实测得到砂土的相对介电常数为 $\epsilon_r=4.5$ 。试验仪器用 GISS 公司的 SIR-20 型探地雷达,采用 900 MHz 天线。

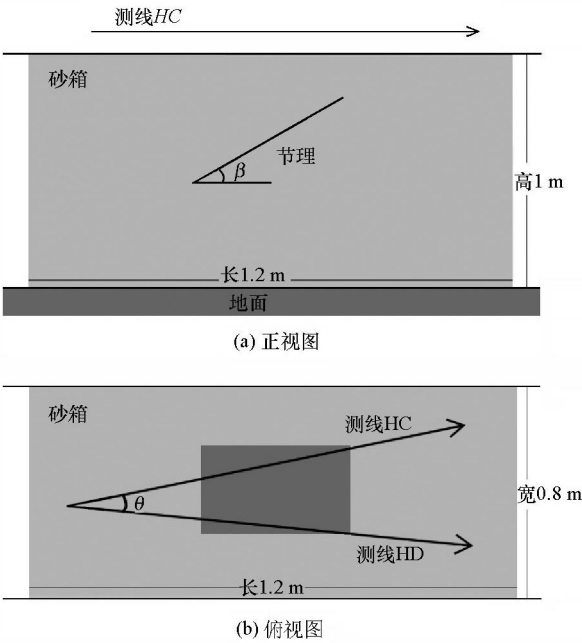


图 3 砂箱试验模型示意
Fig.3 Schematic diagram of sand box test model

3 试验结果分析

湿木板模拟单组节理面、双组平行节理面、“X”型交叉节理面、“人”字型节理面等,不同产状、长度和不同组合类型的节理面,使用探地雷达沿视倾向 DH、CH 方向布置 2 条测线探测砂箱中模拟节理面,经距离归一化和时深转换等处理后的雷达剖面图像如图 4 所示。由于湿木板、砂箱中砂土、地面三者介电常数的差异,从图中可以得到模型节理面的几何形态、埋深、组数、排列、间距等,经与实际模型节理面对比,雷达剖面图像中节理面的几何形态、组数、排列情况与实际模型较一致。

3.1 产状测量解释

测量出图 4 中模拟节理面的视倾角 β, β' ,通过公式计算出节理面的真倾角 α 和真倾向 γ 、产状的计算值与实际值对比,结果见表 1。从表 1 可以得出通过两条测线探测节理面所读视倾角 β 和 β' 值,经三角函数公式计算出的倾角 α 与实际倾角 α 近似相等,倾角误差 $\leq 10\%$ 。通过三角函数计算出的

倾向值与模拟节理面的实际倾向值大致相等,倾向误差在 2% 左右,误差较小。通过计算得到的倾角和倾向在工程中均能满足实际要求,且结果较准确。

3.2 节理面长度测量解释

读出图 4 中模拟节理面的视倾角 β 、节理面在水平投影上的长度 l_{oc} 和计算出的节理面倾角 α ,通过前文给出的三角函数计算公式计算出节理面长度 l_{hc} 的计算值和真实值、长度误差值,结果见表 2。

表 2 显示模拟节理面长度 l_{hc} 的计算值与实际值近似相等,误差值均小于 5%,由此可见通过计算得出的节理面长度值在工程中能满足实际要求。

使用探地雷达探测湿木板—细砂模型箱中节理面的产状和长度等信息存在一定的误差,主要来自于仪器系统误差以及探测对象电性不均匀、电磁干扰、地质界面不平、地形起伏等。

4 结论

1) 基于探地雷达技术,沿两条与待测节理面斜交的方向布置测线对未知节理面进行探测,从图像

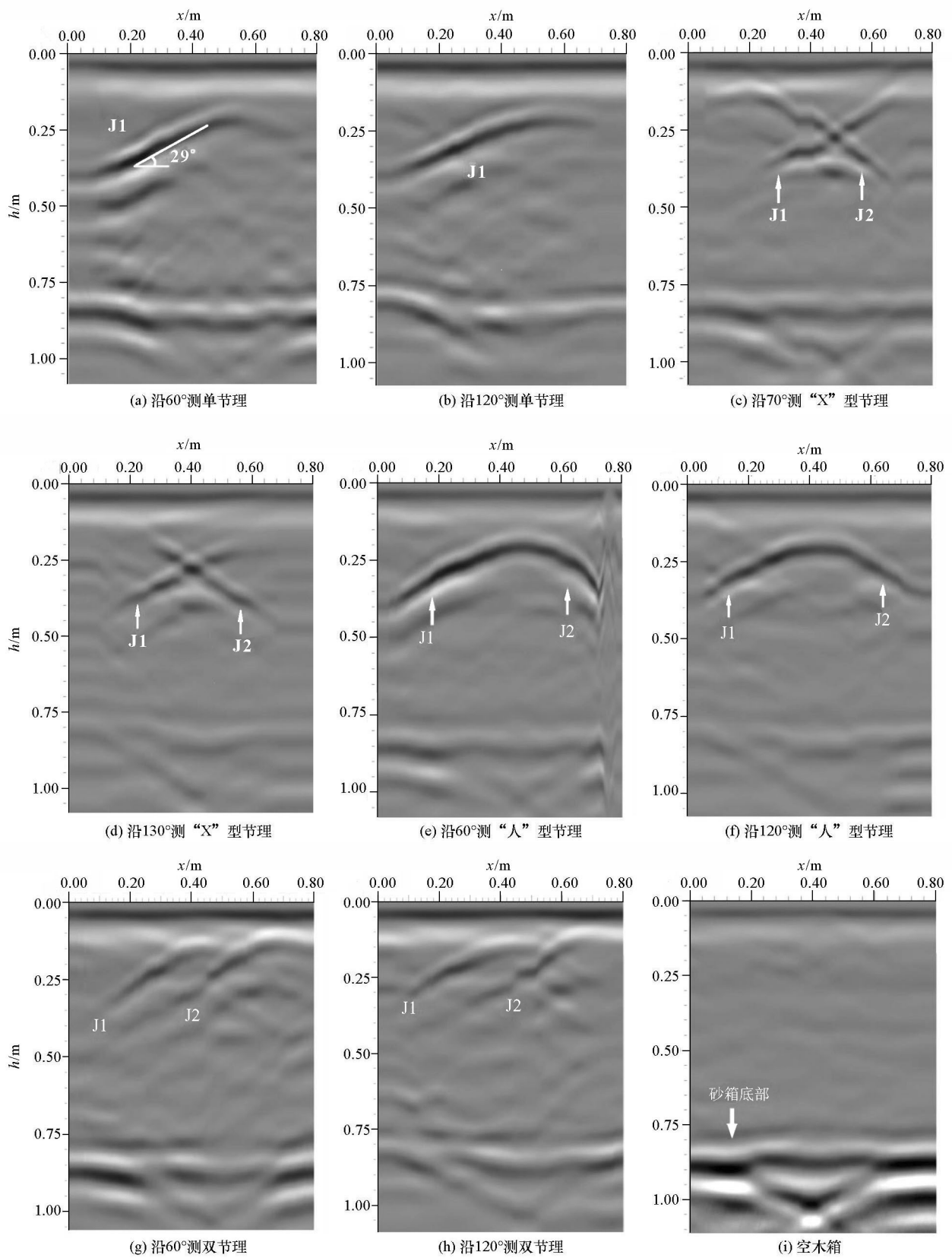


图 4 沿视倾向探测砂箱中模拟节理面的雷达剖面图像(图中角度为方位角)

Fig.4 Radar profile images of simulated joint surfaces in the sandbox detected along the apparent dip direction(the angle in the figure is azimuth angle)

表 1 沿视倾向探测砂箱中模拟节理的产状的真实值与测量值

Table 1 The true and measured values of simulated joint occurrence in the sandbox detected along the apparent dip direction

雷达图像	节理	扫描方向 /(°)	视倾角 β,β' /(°)	天线夹角 $\omega+\omega'$ /(°)	计算倾角 α' /(°)	真实倾角 α /(°)	倾角误差 /%	计算倾向 $\gamma_{HG}/(^{\circ})$	真实倾向 $\gamma_{HG}/(^{\circ})$	倾向误差 /%
图 4a,图 4b	J1	60	29	60	31.5	30	5	264	270	2.2
	J1	120	26							
图 4c,图 4d	J1	70	34	60	36	40	10	270.5	270	0.1
	J1	130	29							
图 4c,图 4d	J2	70	37	60	39.5	40	1.25	92	90	2.2
	J2	130	33							
图 4e,图 4f	J1	60	30	60	32.5	35	7.14	264	270	2.3
	J1	120	27							
图 4e,图 4f	J2	60	36	60	39	40	2.5	85	90	5.6
	J2	120	33							
图 4g,图 4h	J1	60	37	60	40	45	9.8	264.5	270	2
	J1	120	34							
图 4g,图 4h	J2	60	37	60	40.5	45	10	266	270	1.5
	J2	120	35							

注:误差=(真实值-计算值)/真实值,根据施工经验,误差值应在 10%以内

表 2 沿视倾向探测砂箱中模拟节理面的长度的真实值与测量值

Table 2 The true and measured values of the simulated joint surface length in the sandbox detected along the apparent dip direction

雷达图像	节理	扫描方向 /(°)	视倾角 β /(°)	l_{oc} 测量值 /cm	计算倾角 α' /(°)	l_{HG} 计算值 /cm	l_{HG} 真实 /cm	长度误差 /%
图 4a	J1	60	29	36	31.5	38.2	40	4.5
图 4c	J1	70	34	36	36	41.3	40	3.25
图 4c	J2	70	37	34	39.5	40.3	40	0.75
图 4e	J1	120	27	33	32.5	31.3	30	4.33
图 4e	J2	120	33	30	39	30	30	0
图 4g	J1	60	37	25	40	29.3	30	2.3
图 4g	J2	60	37	26	40.5	30	30	0

中可以快速清晰地获知节理面的视倾角、几何形态、埋深、组数、排列、间距等信息。

2) 使用探地雷达沿视倾向对未知节理面进行探测,在处理后的探地雷达剖面图像中读出视倾角 β,β' 、天线夹角 $\omega+\omega'$ 、节理面在水平投影上的长度 l_{oc} 等信息,通过建立三角函数测量公式减少野外盲测节理面时产生的误差,可计算出节理面产状和长度。

3) 利用探地雷达对野外节理面进行识别是一种高效、先进的无损探测方法,具有采集方便、速度快、成本低、剖面直观、实时图像显示等优点。

参考文献 (References) :

[1] 李忠权,刘顺.构造地质学(第三版)[M].北京:地质出版社,2010:96-98.
Li Z Q,Liu S. Structural geology(the third edition)[M].Beijing: Geological Press,2010:96-98.

[2] 奚春雷.岩体节理数据的概率统计[D].沈阳:东北大学,2003.

Xi C L. Probability statistics of rock joints data abstract[D]. Shenyang: Northeastern University,2003.

[3] Slob S, Van Knapen B, Hack R, et al. Method for automated discontinuity analysis of rock slopes with three-dimensional laser scanning[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2005, 1913:187-194.

[4] 董秀军,黄润秋.三维激光扫描技术在高陡边坡地质调查中的应用[J].岩石力学与工程学报,2006,25(S2):3629-3635.
Dong X J,Huang R Q. Application of 3D laser scanning technology to geologic survey of high and steep slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006,25(S2):3629-3635.

[5] Haneberg W C. Using close range terrestrial digital photogrammetry for 3-D rock slope modeling and discontinuity mapping in the United States[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2008, 67(4):457-469.

[6] 王树根,朱宜萱.用近景摄影测量测定地质产状的作业方法[J].测绘通报,1993(5):17-20,29.
Wang S G,Zhu Y X. The method of using close-range photogrammetry to determine the attitude of rock[J].Bulletin of Surveying and Mapping,1993 (5):17-20,29.

[7] 王贵宾,杨春和,包宏涛,等.岩体节理平均迹长估计[J].岩石

力学与工程学报,2006(12):2589-2592.

Wang G B, Yang C H, Bao H T, et al. Mean trace length estimation of rock mass joint[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(12): 2589-2592.

[8] 杨春和, 包宏涛, 王贵宾, 等. 岩体节理平均迹长和迹线中点面密度估计[J]. 岩石力学与工程学报, 2006(12): 2475-2480.

Yang C H, Bao H T, Wang G B, Bao H T, Wang G B, et al. Estimation of mean trace length and trace midpoint density of rock mass joints[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(12): 2475-2480.

[9] 刘东坤, 巨能攀, 霍宇翔. 地质雷达在不同介质填充下的频谱差异分析[J]. 现代隧道技术, 2013, 50(5): 23-28.

Liu D K, Ju N P, Huo Y X. Analysis of the spectrum difference of ground penetrating radar (GPR) for difference media fillings[J]. Modern Tunnelling Technology, 2013, 50(5): 23-28.

[10] 刘伟, 周斌, 甘伏平, 等. 隧道超前预报中不同性质充填溶洞地质雷达正演实验研究[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(1): 153-158, 198.

Liu W, Zhou B, Gan F P, et al. GPR forward simulation of filled karst caves in advance geological prediction for tunnels[J]. Modern Tunnelling Technology, 2014, 51(1): 153-159, 198.

[11] 李华东, 邓辉, 姜永玲. 激光测距仪在高陡边坡结构面产状测量中的应用[J]. 山地学报, 2010, 28(4): 487-491.

Li H D, Deng H, Jiang Y L. Application of laser range finder in the measurement of the attitude of structural planes in high and steep slope[J]. Journal of Mountain in Science, 2010, 28(4): 487-491.

[12] 程昊, 唐辉明, 孙森军, 等. 基于半迹长测线法的岩体结构面全迹长概率分布及平均迹长新算法[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(S2): 3073-3082.

Cheng H, Tang H M, Sun M J, et al. New algorithm to determine rock mass discontinuity trace length probabilistic distribution and mean trace length based on semi-trace scanline surveys[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(S2): 3073-3082.

Model test on the identification of shallow joints in rock mass based on ground penetrating radar

WANG Fei-Xiang, LIANG Feng, ZUO Shuang-Ying

(Resource and Environmental Engineering College, Guizhou University, Guiyang 550025, China.)

Abstract: In order to accurately obtain the information of the joint surface which hides inside the rock mass and the floating soil cover, the authors employed the geological radar detection technology, established the trigonometric function measurement formula of the true and apparent dip angle as well as inclination and length of the joint surface and obtained he accurate solution of such pieces of information as attitude and length. Using wet wood-fine sand indoor model test, the authors verified the rationality of the theoretical solution.

Key words: ground penetrating radar; joint; attitude; sandbox model

(本文编辑: 沈效群)