

文章编号: 1000-7598 (2010) 04-1326-05

基于钻孔摄像技术的岩体完整性评价方法

王川婴¹, 胡培良¹, 孙卫春²

(1.中国科学院武汉岩土力学研究所, 武汉 430071; 2.国家核电技术公司 山东电力工程咨询院, 济南 250013)

摘 要: 通过钻孔摄像技术获取岩体的结构特性, 提出一种评价岩体完整性的新方法——RMDI 法, 并应用于开滦煤矿唐山矿区数字钻孔摄像工程地质勘测中的离层孔。结果表明: (1) 高精度的钻孔图像能为岩体完整性评价提供可靠的结果; (2) DIDF 能反映钻孔壁岩体完整程度的轴向分布状况; (3) RMDI 法用于评价岩体完整性是可行的; (4) RMDI 法能实现全孔段或局部孔段的岩体完整性评价, 完成对岩体不同完整段的位置搜索。

关 键 词: 钻孔摄像技术; 岩体完整性; 密度函数; 完整性指数

中图分类号: TU 459+9

文献标识码: A

Method for evaluating rock mass integrity based on borehole camera technology

WANG Chuan-ying¹, HU Pei-liang¹, SUN Wei-chun²

(1. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;

2. Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute, State Nuclear Power Technology Corporation Ltd., Jinan 250013, China)

Abstract: By borehole camera technology, the structural characteristics of rock mass can be obtained. Further, a new method, rock mass integrity index (RMDI), is proposed to describe rock mass integrity. And this method is applied to separation strata boreholes for site investigation of the digital borehole camera project of Tangshan mining area of Kailuan coal mine. The application shows that: (1) The high resolution borehole image gives superior results for evaluating rock mass quality; (2) Integrity index density function (DIDF) can reflect rock mass integrity degree along axial distribution of boreholes well and truly; (3) The use of rock mass integrity index (RMDI) to evaluate rock mass quality is feasible, accurate and effective; (4) RMDI can be used to evaluate rock mass integrity in full or part range of boreholes, and to search for the optimal position with different integrity segment of rock mass in boreholes.

Key words: borehole camera technology; rock mass integrity; intensity function; integrity index

1 引 言

长期以来, 钻孔岩芯测定方法是各类岩土工程中广泛被采用的探测岩体结构完整性不可缺少的重要手段之一, 在工程基础勘察方面发挥了巨大的作用, 为工程的设计和施工提供了第一手地质资料。然而, 由于地质条件的特殊性和复杂性, 如软弱或破碎岩体、溶洞、断层和破碎带等, 以及钻探技术的局限性, 如机械扰动导致的低取芯率或 0 取芯率, 往往使这种方法失去了其准确性, 有时甚至可能导致错误的结果。数字钻孔摄像系统^[1-2, 7]集电子技术、视频技术、数字技术和计算机应用技术于一体, 摆脱了上述制约, 解决了钻孔内工程地质信息采集

的完整性和准确性问题。

对构造岩体进行准确探查, 并进行岩体完整度的评价, 是当前工程勘测中需要进行的基础性工作之一。到目前为止, 国内外学者对工程岩体完整性的评价方法提出了很多, 主要有岩体质量指标 RQD 法、岩体龟裂系数 K_v 法等^[3-6, 8]。由于工程造价和实践操作等方面, 由美国人 Deere 提出的岩体质量指标 RQD 法应用最广, 得到了各国工程师的广泛认同和实际应用, 但 RQD 法存在的问题, 也在工程师的不断应用中得到重新认识。针对 RQD 法存在的不足, 以钻孔摄像技术为依托, 提出一种评价岩体完整性的新方法——RMDI 法, 并应用于开滦煤矿唐山矿区数字钻孔摄像工程地质勘测中的离层

收稿日期: 2009-09-10

第一作者简介: 王川婴, 男, 1962 年生, 博导, 研究员, 主要从事钻孔摄像技术和数字岩土方面的研究工作。Email: chywang@whrsm.ac.cn

孔, 获得了较好的结果。

2 钻孔摄像技术

数字全景钻孔摄像系统^[1-2,7]的关键是全景技术(截头的锥面反射镜)和数字技术(数字视频和数字图像)的突破。全景技术实现了 360° 钻孔孔壁的二维表示, 叠加方位信息后形成的平面图像称为全景图像; 数字技术实现了视频图像的数字化的, 通过全景图像的逆变换算法, 还原真实的钻孔孔壁, 形成钻孔孔壁的数字柱状图像。图 1 所示为数字钻孔摄像技术的成像原理示意图。

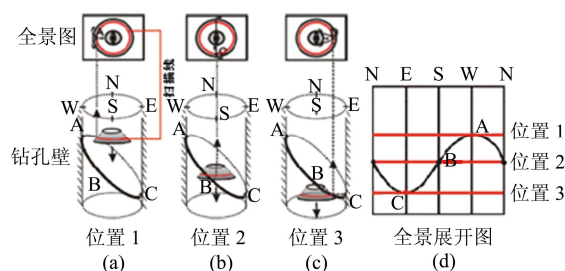


图 1 数字全景钻孔成像原理示意图

Fig.1 Sketch of imaging principle of borehole camera system

3 完整性指数密度函数 DIDF

钻孔图像直观地反映钻孔内的地质特征, 通过对全孔地质信息的提取和存储, 形成完整的信息数据库, 实现对岩体完整性的准确评价和对岩体结构特征的综合分析。

为了建立岩体完整性指数密度函数 (Integrity Index Density Function), 首先在钻孔图像中定义完整与破碎的概念。岩体是各种地质结构的综合体, 图像中的完整和破碎与地质结构有着直接的关系。例如, 闭合的各类分界面对岩体的完整性产生的影响很小, 其图像颜色、纹理分布均匀, 表现为完整

特征; 而张开的裂隙和断层破碎带则使岩体破碎, 其图像颜色、纹理变化较大, 表现为破碎特征。因此, 图像中所反映的岩体特征可定义为 2 种: 破碎型和非破碎型。破碎型以张开、疏松和破碎为特征, 而非破碎型则以闭合和完整为特征。张开和闭合是用一个量值来区分的, 即钻孔图像的分辨率。小于该量值的特征在钻孔图像上往往很难被发现, 因此, 定义为闭合。反之, 则定义为张开。疏松和破碎在图像上只反映破碎型特征的量级变化, 但在实际钻孔中疏松反映的是岩体的非致密性, 如导致岩体强度降低的风化、变质等; 而破碎反映的是各种构造运动或其他力学因素导致的结果, 如众多结构面切割岩体呈碎块状等。在确定岩体地质结构方面, 数字钻孔摄像技术从结构的识别、信息的提取、数据库的建立等方面都实现了计算机处理, 使密度函数 (DIDF) 建立过程计算机化和自动化。

完整性指数密度函数 (DIDF) 是一个沿钻孔轴向变化的单变量函数, 用 $f(z)$ 表示, 其中 z 为深度。表达式为

$$f(z) = \begin{cases} 0 & \text{破碎型特征} \\ \alpha \times 1 & \text{非破碎型特征} \end{cases} \quad (1)$$

式中: a 为反映组成岩体块度的尺寸效应影响。

RQD 法具有 10 cm 阈值和多解性, 这显然对于客观评价岩体完整性过于粗略。例如: 同样是 RQD=90% 的岩体, 其块度可以是大于 10 cm 的任意尺寸, 可以是 10~30 cm, 也可以是大于 60 cm, 甚至大于 100 cm, 而这些情况下的 RQD 相同, 仔细比较它们的完整性是存在较大差别的。针对此情况, 在定义岩体完整性指数密度函数时, 考虑了反映岩体块度大小的尺寸效应系数 α 。关于岩体完整性块度尺寸效应系数的确定, 依据国际岩石力学学会推荐的节理间距分级标准和我国工程实践和有关规范的划分情况, 也酌情考虑国外划分情况, 结果见表 1。

表 1 岩体块度大小及相应的尺寸效应系数 α ^[9-12]

Table 1 Rock mass size and corresponding size effect coefficients

规范	结构类型				
	整体状	块状	层状	碎裂状	散体状
岩土工程勘察规范 GB50021—2001	>1.0 m	>1.0 m >0.4~1.0 m	0.4~1.0 m 0.2~0.4 m	0.2~0.4 m ≤0.2 m	
铁路工程地质技术规范 TBJ12—85	>1.0 m	>0.4 m	<0.4 m	<0.2 m	
工程地质调查规范 ZBJ14003—89	>1.0 m	0.5~1.0 m	0.3~0.5 m	<0.3 m	
水利水电工程地质勘察规范 GB50287—2006	>1.0 m	0.5~1.0 m	0.3~0.5 m	0.1~0.3 m	<0.1 m
ISO/TC182/SC/WGI		>0.6 m	0.2~0.6 m	<0.2 m	
对应 α 的块度尺寸	>1.0 m	0.6~1.0 m	0.3~0.6 m	0.1~0.3 m	<0.1 m
岩体完整性块度尺寸效应系数 α	1.0	0.8	0.5	0.2	0.1

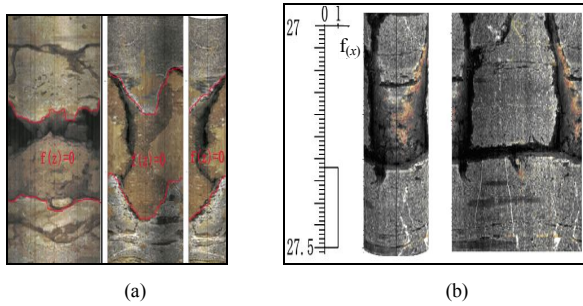


图2 泥质充填 $f(z)=0$ 与DIDF曲线
Fig.2 Mud filling $f(z)=0$ and DIDF curve

利用数字钻孔摄像技术确定钻孔内破碎型特征的位置,量测其尺寸,并确定其类型。根据破碎型特征的统计结果,定义破碎型特征处的密度函数 $f(z)=0$ (对于充填的情况,如泥质充填,也定义为0,如图2(a),除此之外就定义 $f(z)=\alpha \times 1$,为非破碎型特征, α 视岩体块度大小而确定(见表1)。图2(b)所示的为一段钻孔中完整性指数密度函数(DIDF)的曲线。

根据完整性指数密度函数DIDF的定义,连续 $f(z)=0$ 或 $\alpha \times 1$ 的区间分别代表破碎型特征 F_i 和完整岩块 I_j ,其集合表示为

$$\begin{aligned} FS &= \{ F_i \mid \text{连续 } f(z)=0 \text{ 的区间 } i=0,1,\dots,n \} \\ IS &= \{ I_j \mid \text{连续 } f(z) \neq 0 \text{ 的区间 } j=0,1,\dots,m \} \end{aligned} \quad (2)$$

则: $\|F_i\|$ 和 $\|I_j\|$ 分别为 F_i 和 I_j 对应的区间长度,集合 FS 和 IS 中最大、最小和平均区间长度分别用 MaxFS 、 MinFS 和 AveFS 与 MaxIS 、 MinIS 和 AveIS 表示,具体如下:

$$\text{MinFS} = \min(\|F_i\|) \quad F_i \in FS, i=0,1,\dots,n \quad (3)$$

$$\text{MaxFS} = \max(\|F_i\|) \quad F_i \in FS, i=0,1,\dots,n \quad (4)$$

$$\text{AveFS} = \frac{\sum_{i=0}^n \|F_i\|}{n} \quad F_i \in FS \quad (5)$$

$$\text{MinIS} = \min(\|I_j\|) \quad I_j \in IS, j=0,1,\dots,m \quad (6)$$

$$\text{MaxIS} = \max(\|I_j\|) \quad I_j \in IS, j=0,1,\dots,m \quad (7)$$

$$\text{AveIS} = \frac{\sum_{j=0}^m \|I_j\|}{m} \quad I_j \in IS \quad (8)$$

4 岩体完整性指数 RMDI

建立的岩体完整性指数密度函数DIDF反映了岩体完整度沿钻孔轴向的分布,特别有利于评价宽大结构面及其影响范围。在岩体完整性密度函数

DIDF的基础上,提出岩体完整性指数(Rock Mass Integrity Index),用于评价岩体的完整性。

岩体完整性指数(RMDI)是指在给定范围内完整岩体块度所占的尺度,用百分数来表示。若给定的深度范围为 $[h_1, h_2]$,则RMDI可用该范围内DIDF的定积分表示,其表达式为

$$\text{RMDI} = \frac{\int_{h_1}^{h_2} f(z) dz}{\int_{h_1}^{h_2} 1 dz} \quad (9)$$

除了评价整孔的岩体完整性外,RMDI还可以用于完整岩体最优区域的搜索,确定最优区域的位置,并进行局部岩体完整性的评价。为此,假定一个钻孔的深度为 h ,评价范围为固定值 Δh ($\Delta h < h$),设从 z 点开始的范围为 Δh 的岩体完整性指数函数为 $\text{RMDI}(z)$,则有:

$$\text{RMDI}(z) = \frac{\int_z^{z+\Delta h} f(x) dx}{\Delta h}$$

当 $\text{RMDI}(z)$ 在 $z=z_{\text{opt}}$ 处为最大时,则最优区域为 $[z_{\text{opt}}, z_{\text{opt}}+\Delta h]$ 。当 z_{opt} 不唯一时,可就小原则或适当增大 Δh 值,使之满足唯一性。

5 实例分析

以开滦煤矿唐山矿区数字钻孔摄像工程地质勘测中的离层孔T291为例,对岩体节理裂隙、构造迹象、主要岩层结构面及断裂破碎带等的统计与分析,实现对岩体完整性的评价。该离层孔测试范围199.65~407.40 m,通过对结构类型的划分及岩体完整性块度尺寸效应系数的确定,建立了岩体完整性指数密度函数,并以此基础,对岩体完整性指标(RMDI)进行分析。对于给定的深度范围为 $[h_1, h_2]$,RMDI用该范围内DIDF的定积分表示,具体的分段计算和统计结果见表2。

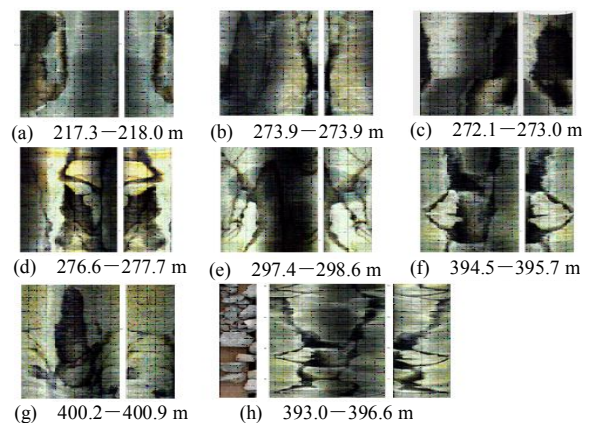


图3 钻孔摄像岩芯破碎段
Fig.3 Fractured range of core by borehole camera system

通过计算与分析,岩石质量指标 RQD 整体上较岩体完整性指数 RMDI 大,主要在于岩石质量指标 RQD 仅是长度上的累加,而岩体完整性指数 RMDI 则是考虑了岩体块度尺寸效应影响的其密度函数的定积分。从计算统计与实测图像结果对照来看,图 3 中实测破碎段的 RMDI 的值都相对较小,而 RQD 值个别与实测有较大偏差。249.79~259.51 m、311.00~321.10 m、321.10~331.44 m、350.50~360.70 m 段(见图 4(a)),RQD 与 RMDI 结果比较一致,岩体完整度相对较高;239.80~249.79 m、269.92~281.00 m、392.20~407.40 m 段(见图 4(b)),RQD 与 RMDI 结果比较一致,岩体完整度相对较低;199.65~209.42 m、218.00~229.50 m、281.00~290.14 m、370.96~381.10 m、381.10~392.20 m 段(见图 4(c)),RQD 均比较大,而 RMDI 相对较小,主要在于区段内含有不少 0.1~0.3 m、0.3~0.6 m、0.6~1.0 m 的岩块,RMDI 很好地反映了这一特征。

表 2 RQD 与 RMDI 计算结果
Table 2 Results of RQD and RMDI

深度 /m	RQD /%	RMDI /%	深度 /m	RQD /%	RMDI /%
199.65~209.42	91.01	66.88	311.00~321.10	98.93	93.49
209.42~218.00	84.48	68.61	321.10~331.44	94.63	91.12
218.00~229.50	98.70	73.96	331.44~341.99	92.50	90.87
229.50~239.80	98.44	85.09	341.99~350.50	88.41	88.41
239.80~249.79	77.64	73.83	350.50~360.70	99.91	97.46
249.79~259.51	99.38	98.07	360.70~370.96	90.68	84.79
259.51~269.92	98.36	88.35	370.96~381.10	99.03	77.17
269.92~281.00	66.46	55.63	381.10~392.20	98.82	77.78
281.00~290.14	97.36	73.08	392.20~407.40	70.27	56.35
290.14~300.94	89.42	71.78	199.65~407.40	91.02	80.18
300.94~311.00	95.73	81.89			

关于岩体完整性指数与岩体完整程度的对应关系,依据前面提出的岩体块度尺寸(见表 1)以及上述的分析统计,提出两者间的分类对应关系,见表 3。

对于整个孔段,岩体完整性指数 RMDI 为 80 % 左右,根据表 3 岩体完整性指数分类表,岩体完整性总体上良好,但对于不同的区段,岩体完整性可能有较大差异,因此,有必要建立沿钻孔深度 z 的岩体完整性指数函数 $RMDI(z)$,用于完整岩体最优区域的搜索,确定最优区域的位置,进行局部岩体的完整性评价。

表 3 RMDI 及 RQD 岩体完整度对照表
Table 3 Contrast of RMDI and RQD for rock mass integrity

完整度	优秀	良好	一般	差	极差
RQD 值	1.00~0.90	0.90~0.75	0.75~0.50	0.50~0.25	<0.25
RMDI 值	1.00~0.80	0.80~0.65	0.65~0.40	0.40~0.15	<0.15

对于 T291 建立的岩体完整性指数密度函数 DIDF(如图 5(a)),采用不同的 Δh 建立岩体完整性指数函数 $RMDI(z)$ 如图 5(b)~(f)所示。通过对比分析可以发现:对于不同的评价范围 Δh , $RMDI(z)$ 曲线具有比较相似的特性,不同的是, Δh 越小, $RMDI(z)$ 曲线越趋尖锐化,反之,则趋于平缓化。当 $RMDI(z)$ 在 $z = z_{opt}$ 处为最大时,则最优区域为 $[z_{opt}, z_{opt} + \Delta h]$ 。 Δh 越小, $RMDI(z_{opt})$ 越精细,但 z_{opt} 越不唯一,若要使 z_{opt} 唯一,可适当增大 Δh 值。对于 T291,当 $\Delta h = 25$ m, $z_{opt} = 313.22$ m 趋唯一, $RMDI(z_{opt}) = 95.22\%$ 。对于其他 Δh 的 T291 岩体完整性指数 $RMDI(z_{opt})$ 的计算结果见图 5(b)~(f)。

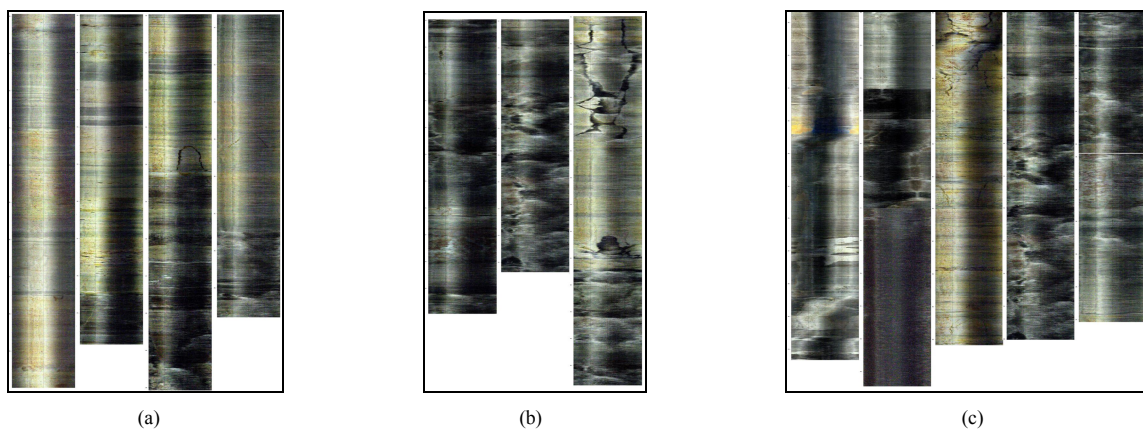


图 4 钻孔摄像图像

Fig.4 Borehole camera images

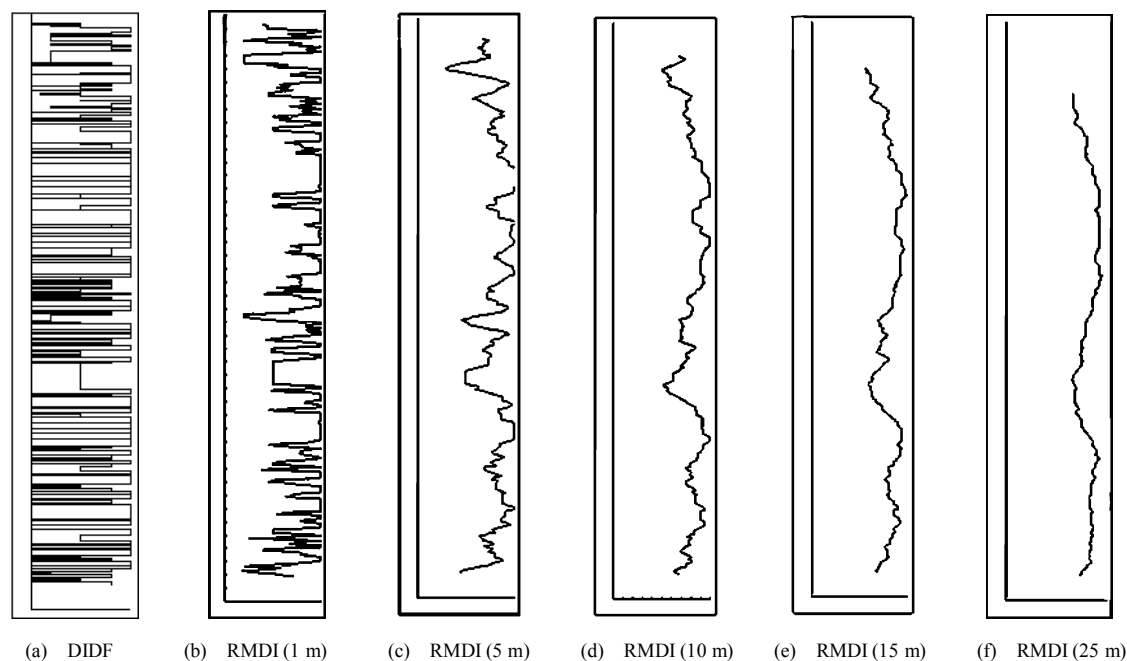


图5 DIFD 与 RMDI(z) (Δh 分别为 1、5、10、15、25 m)
Fig.5 DIFD and RMDI(z) (Δh equals 1, 5, 10, 15, 25 m respectively)

6 结 论

通过对 RMDI 法的提出、评价过程以及实例分析的全面阐述, 结果表明:

- (1) 钻孔摄像弥补了钻孔取芯的不足;
- (2) 高精度的钻孔图像能为岩体完整性评价提供可靠的结果;
- (3) DIFD 能反映钻孔壁岩体完整程度的轴向分布状况;
- (4) RMDI 法用于评价岩体完整性是可行的, 能实现全孔段或局部孔段的岩体完整性评价, 完成对岩体不同完整段的位置搜索。

参 考 文 献

- [1] PRENSKY S E. Advances in borehole imaging technology and application[C]//Borehole Imaging: Applications and Case Histories. London: Geological Society, 1999: 1—43.
- [2] JOHN H. Williams, CAROLE D. Johnson. Acoustic and optical borehole-wall imaging for fractured-rock aquifer studies[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2004, 55: 151—159.
- [3] DEERE D U. Rock quality designation (RQD) after 20 years[J]. U.S. Army Corps Engrs Contract Report GL—89—1, 1989. Vicksburg, MS: Waterways Experimental Station.
- [4] DEERE D U, DEERE D W. The rock quality designation(RQD) index in practice[C]//Rock Classification Systems for Engineering Purposes. U.S.: American Society for Testing and Materials Special Technical Publication 1988, 984: 91—101.
- [5] SEN Ze-kai. RQD models and fracture spacing[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1984, 10(2): 203—216.
- [6] SEN Z, KAZI A. Discontinuity spacing and RQD estimates from finite length scanlines[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1984, 21(4): 203—212.
- [7] 王川婴, 葛修润, 白世伟. 数字式全景钻孔摄像系统及应用[J]. *岩土力学*, 2001, 22(4): 522—525.
WANG Chuang-ying, GE Xiu-run, BAI Shi-wei. The digital panoramic borehole camera system and its application[J]. *Rock and soil Mechanics*, 2001, 22(4): 522—525.
- [8] 胡文寿, 张显志. 论工程岩体完整性的评价方法[J]. *西安工程学院学报*, 2001, 23(3): 50—54.
HU Wen-tao, ZHANG Xian-zhi. Methods for evaluating engineering rock mass integrity[J]. *Journal of Xi'an Engineering University*, 2001, 23(3): 50—54.
- [9] 中华人民共和国建设部. GB50021—2001 岩土工程勘察规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [10] 中华人民共和国铁道部. TBJ12—85, 铁路工程技术规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 1996.
- [11] 中华人民共和国水利部. GB50287—2006 水利水电工程地质勘察规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2006.
- [12] 中华人民共和国地质矿产部. ZBD14003—89 工程地质调查规范[S]. 北京: 中华人民共和国地质矿产部, 1994.