

基于数字钻孔图像的结构面连通性研究

王川婴¹, 钟 声², 孙卫春³

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 四川大学 建筑与环境学院, 四川 成都 610065;
3. 国家核电技术公司 山东电力工程咨询院有限公司, 山东 济南 250013)

摘要: 探讨钻孔内结构面在探测区域的空间延展性及两两钻孔间结构面连通所应满足的条件, 并从结构面深度位置、两侧岩性及充填情况等方面进行结构面相关性研究, 进一步确定两两钻孔岩体结构面的对应连通关系, 最后通过开滦集团唐山矿区两两钻孔间结构面的连通性实例分析, 证明通过数字钻孔图像确定结构面连通性的方法是有效可行的。

关键词: 岩石力学; 数字钻孔图像; 结构面; 连通性; 相关性

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2009)12 - 2405 - 06

STUDY OF CONNECTIVITY OF DISCONTINUITIES OF BOREHOLE BASED ON DIGITAL BOREHOLE IMAGES

WANG Chuanying¹, ZHONG Sheng², SUN Weichun³

(1. *State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China*; 2. *School of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China*; 3. *Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Co., Ltd., State Nuclear Power Technology Co., Ltd., Jinan, Shandong 250013, China*)

Abstract: The extension of a discontinuity and the connectivity of discontinuities in adjacent boreholes were discussed. The conditional restriction of connectivity of discontinuities in adjacent boreholes was further studied according to their depths, rock characters and filling conditions of the discontinuities in adjacent boreholes. Finally, a case study of the discontinuities of adjacent boreholes in certain mining area was given; and it is proved to be available for determining the connectivity of discontinuities in adjacent boreholes by the method of digital borehole images.

Key words: rock mechanics; digital borehole images; discontinuities; connectivity; correlation

1 引 言

不同岩体由于遭受多期构造运动及浅表地质改造, 使得岩体中广泛存在规模不等、产状不同、性质各异的结构面, 这些结构面的空间分布与产

出状态构成了岩体的结构, 岩体结构特征是决定岩土工程稳定性的重要因素。国际岩石力学学会将岩体中的断层、软弱面、大多数节理、软弱节理和软弱带等各种力学成因的破裂面和破裂带定义为结构面。早在 20 世纪 50 年代, 结构面对岩体力学特性和工程稳定性的控制作用就被以 L. Muller 为代表

收稿日期: 2009 - 04 - 09; **修回日期:** 2009 - 05 - 22

作者简介: 王川婴(1962 -), 男, 1999 年于中国科学院武汉岩土力学研究所获博士学位, 现任研究员, 主要从事数字钻孔及工程应用方面的教学与研究工作。E-mail: eshengzhong@163.com

的奥地利学派和中国的谷德振等重视，并认为这是导致岩体和岩块力学与工程特性差异的根本所在，由此开展了以结构面和岩体结构研究为中心的岩体力学时代。20世纪60年代，谷德振等提出了“岩体结构”的概念，他将岩体内存在的弱联结的层面、片理面、节理面、断层面、层间错动面及各种不整合面等不连续面称为结构面。20世纪80年代，孙广忠教授进一步提出了“岩体结构控制论”，并全面、系统地以此为指导研究了岩体变形与破坏的基本规律^[1]。但由于天然露头或人工开挖面的限制，人们很难对岩体内结构面的几何参数进行系统而确定性的测量，对岩体中结构面特征的完备性描述是困难的，有时甚至是不可能的。如何利用钻孔摄像获得的高精度数字钻孔图像对岩体结构面进行分析，并对相邻钻孔零散结构面信息进行连通性研究，是一项具有重大理论和现实意义的崭新课题。

钻孔成像技术(borehole imaging technology)依靠光学原理，使人能直接观测到钻孔的内部。其发展经历了3个阶段：钻孔照相(BPC)、钻孔摄像(BVC)以及数字光学成像(DBOT)。目前采用的数字钻孔摄像技术所获取的图像，已能较真实地反映钻孔孔壁的岩体情况，并可将钻孔采集到的高分辨率、高密度信息进行数字处理并有效缝合，得出地层产状或套管的可视图像或图形，如裂隙、地层层理或套管腐蚀、穿孔、变形等。除了对孔内地质现象进行观察，还能实现数据的处理，为更准确地获取地下岩体的结构信息提供了很好的技术支持。

对于数字钻孔图像的方法研究，目前主要集中在以下4个方面：(1)数字钻孔图像系统及应用分析^[2~8]；(2)裂隙等结构面的识别与统计^[9~13]；(3)孔壁图像描述及灾害分析^[14~17]；(4)岩体完整性评价^[18]。对于2个或2个以上钻孔之间结构面的连通性的研究则相对较少，而这又是数字钻孔摄像技术辅助其他地球物理方法做精细探测的一个重要基础。因此，为了解两两相邻钻孔间结构面的连通性，本文利用钻孔摄像技术获得的高精度数字钻孔的孔壁图像，将对岩体两两相邻钻孔内的结构面进行延展性和连通性分析，通过研究两两相邻钻孔结构面连通所应满足的条件、结构面深度位置的相关性问题，确定岩体两两相邻钻孔内的结构面是否对应连通，最后通过对开滦某矿区两钻孔间的岩体结

构面进行连通性实例分析，证明该方法是有有效和可行的。

2 钻孔间岩体结构面的延展性研究

数字钻孔摄像技术应用至今，对单个钻孔结构面进行的统计分析和研究已较为深入。然而，在实际工程中，为查清某个区域的地质状况，常进行多孔钻探。为了解钻孔间岩体结构面的连通性，就必须综合这些多孔钻探资料进行分析。问题研究的关键是判断两两相邻数字钻孔图像中的结构面是否是对应连通的，还是属于不同结构面。因此，在单独分析每个钻孔图像后，必须根据钻孔内不同倾向、不同倾角、不同位置和不同环境等，对所获取的众多结构面数据进行正确的筛选和剔除，以便在相邻钻孔中找到与之对应的结构面，并形成地层结构剖面。

分析钻孔间岩体结构面的空间延展性时，作以下基本假定：(1)数字钻孔图像中反映的结构面基本上是IV、V级结构面，宽度一般从宽裂隙(100 mm左右)至微裂隙(<1 mm)；(2)延展性分析时，结构面均假设为平面；(3)钻孔均为垂直方向，直径相同。对于实际工程中可能存在的偏差，以后还将进一步做不确定分析。

如图1所示为相邻两钻孔之间的连通结构面示意图，两垂直钻孔A和B孔口坐标分别为 (x_1, y_1, z_1) 和 (x_2, y_2, z_2) ，孔深为 h_1 和 h_2 。设钻孔A中第*i*条结构面 n_i ($i = 1, 2, \dots, N, N$ 为正整数)，倾向为 α_i ，倾角为 β_i ，单位法矢量为 \vec{n}_i ，与钻孔A交于点 $P(x_1, y_1, z_1 + l_i)$ 。于是，有 $\vec{n}_i = \{\sin \beta_i \sin \alpha_i,$

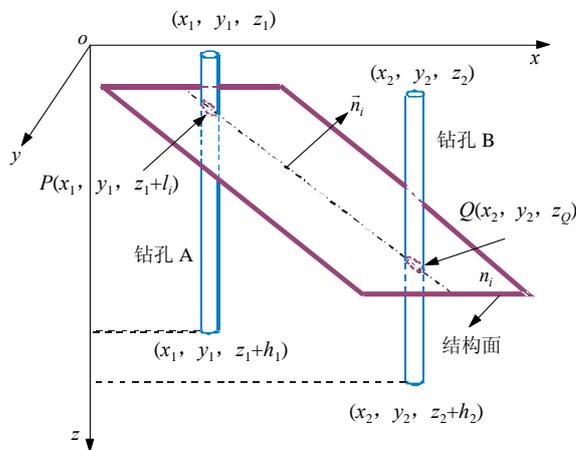


图1 钻孔间连通结构面示意图

Fig.1 Sketch of connectivity of discontinuities between boreholes

$\sin \beta_i \cos \alpha_i, \cos \beta_i\}$, 设 $\beta_i \neq \pi/2$, 此时结构面 n_i 与钻孔 A 斜交。若结构面 n_i 无限延伸, 则必与钻孔 B 的轴线相交, 设交点为 $Q(x_2, y_2, z_Q)$ 。对于向量 $\overline{PQ} \subset n_i$, 有

$$\vec{n}_i \overline{PQ} = 0 \tag{1}$$

即

$$\sin \beta_i \sin \alpha_i (x_2 - x_1) + \sin \beta_i \cos \alpha_i (y_2 - y_1) + \cos \beta_i (z_Q - z_1 - l_i) = 0$$

由此可得

$$z_Q = z_1 + l_i - \tan \beta_i [(x_2 - x_1) \sin \alpha_i + (y_2 - y_1) \cos \alpha_i] \tag{2}$$

若结构面 n_i 与钻孔 B 相交, 则有

$$z_2 \leq z_Q \leq z_2 + h_2 \tag{3}$$

以上是钻孔 A 中的结构面 n_i 与钻孔 B 相交时的情形。同理, 钻孔 B 中的结构面 $m_j (j = 1, 2, \dots, N)$ 与钻孔 A 相交时, 有

$$z'_Q = z_2 + l_j - \tan \phi_j [(x_1 - x_2) \sin \phi_j + (y_1 - y_2) \cos \phi_j] \tag{4}$$

式中: z'_Q 为钻孔 B 中结构面与钻孔 A 交点 Q 的 z 轴坐标值, l_j 为钻孔 B 中第 j 条结构面 m_j 的深度; ϕ_j 为结构面 m_j 的倾向, ϕ_j 为结构面 m_j 的倾角。同理, 若结构面 m_j 与钻孔 A 相交, 则有

$$z_1 \leq z'_Q \leq z_1 + h_1 \tag{5}$$

通过上述分析, 钻孔 A 中某结构面 n_i 是否与钻孔 B 中某结构面相连通, 必须通过式(3), (5)来验证。通过剔除不符合产状要求的数据, 可以得到符合连通性要求的一组结构面。

3 两两钻孔岩体结构面的深度位置相关性研究

上面分析了钻孔内某结构面在探测区域的空间延展性, 通过计算得出对应另一个钻孔中该结构面的位置深度。然而在该位置深度附近可能有较多的结构面, 要搜索最有可能的同一连通结构面, 就要对两两钻孔间岩体结构面进行相关性分析。所谓两两钻孔间岩体结构面的相关性分析, 指的是对钻探区域内两两相邻钻孔内的数字钻孔图像进行结构面深度位置、结构面两侧岩性、结构面形态及充填情况等方面进行相关性的比较, 以确定两两钻孔岩

体结构面的对应关系。

图 2 给出了结构面深度位置相关性图。已知在钻孔 A 中深度 l_i 处存在结构面 n_i , 交钻孔 A 于点 P 。根据式(2)对其进行延展性计算, 求出对应于钻孔 B 中点 Q 。在实际探测工作中, 由于数字钻孔摄像系统、钻探位置和角度等存在一定的误差, 势必造成点 Q 的深度位置也有一定的偏差, 故而在点 Q 计算值上下一定偏差值 δ 范围内的结构面都有可能是点 P 处结构面 n_i 的同一延展面, 设这些初步筛选出来的结构面集合为 D , 则有

$$\left. \begin{aligned} f: P \rightarrow Q \\ D = \{Q_k, Q_{k+1}, \dots, Q_l \mid Q_j \in \overline{Q_i Q_b}\} \end{aligned} \right\} \tag{6}$$

式中: $f: P \rightarrow Q$ 为从点 P 到点 Q 的映射, 符合结构面 n_i 的延展性函数; D 为钻孔 B 上映射点 Q 一定偏差值 δ 范围内所有的待选结构面的集合; $Q_j \in \overline{Q_i Q_b}$ 表示待选结构面 Q_j 位置介于线段 $\overline{Q_i Q_b}$ 之间。

设 Q_j 与映射点 Q 的偏差值为 δ_j 。同理, 对于钻孔 B 中待选结构面的集合 D 中某结构面 m_j 同样可以在钻孔 A 中找到其映射点 P_i , 设映射点 P_i 与点 P 的偏差值为 δ_i 。故结构面深度位置的相关性公式可以定义为

$$\left. \begin{aligned} K(n_i, m_j) &= \sqrt{\left(1 - \frac{|\delta_i|}{\delta}\right) \left(1 - \frac{|\delta_j|}{\delta}\right)} \quad (0 \leq |\delta_i|, |\delta_j| \leq \delta) \\ K(n_i, m_j) &= 0 \quad (|\delta_i| \geq \delta \text{ 或 } |\delta_j| \geq \delta) \end{aligned} \right\} \tag{7}$$

需要说明的是, $K(n_i, m_j)$ 值域为 $[0, 1]$ 。当 $0 < K(n_i, m_j) \leq 1$ 时, 称两钻孔内结构面 n_i 和 m_j 位置关系具有连通性, $K(n_i, m_j)$ 值越高, 其结构连通的相关性越好。而当 $K(n_i, m_j) = 0$ 时, 称两钻孔内结构面 n_i 和 m_j 位置关系不具有连通性, 此时, 称结构面 n_i 为结构面 m_j 的干扰结构面, 或当 $\delta_j \geq \delta$, 称结构面 m_j 为结构面 n_i 的干扰结构面。如图 2 所示, 结构面 F 虽然处于点 P 在钻孔 B 所涵盖的映射区域 $\overline{Q_i Q_b}$ 内, 但其反映射位置 E 却不在钻孔 A 所涵盖的映射区域 $\overline{P_i P_a}$ 内, 所以结构面 F 称为结构面 P 的干扰结构面, 应该予以剔除。

通过两两钻孔结构面深度位置的相关性, 可以确定其中一个钻孔内某结构面在另一钻孔内可能对应的结构面, 然后再通过对钻探区域内两两相邻钻孔内的数字钻孔图像进行结构面深度位置、结构面

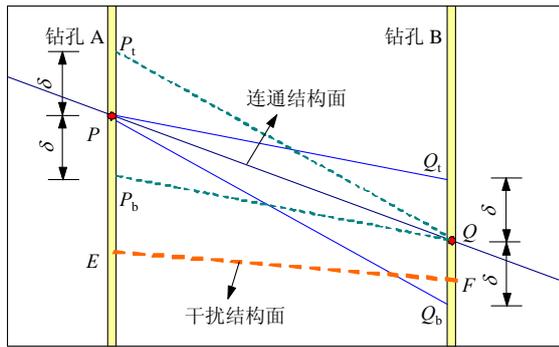


图2 结构面深度位置相关性图

Fig.2 Sketch of depth correlation of discontinuities

两侧岩性、结构面形态及充填情况等方面进行比较分析，则可以进一步确定两两钻孔结构面的连通性。数字钻孔图像能够反映出结构面两侧的岩性，判断岩性的方法主要是对岩石颜色、纹理特征、岩石颗粒的大小和排列方式等进行分析。岩石颜色是固有属性，反映在图像上，深色岩体光反性差，得到的图像就较为暗淡；浅色岩体光反性比较强，得到的图像就较为明亮。岩石纹理主要是在成岩时期原生的，或岩石受矿液浸染而成。其次是岩石后期风化，以至形成各种纹路。岩石的颗粒大小及排列方式是指颗粒的结晶程度以及晶质和非晶质在构造上的形状和排列，它和岩石的方向性有关。另外，结构面中存在的充填物，好比“示踪液”分析地下结构面的连通性一样，可以起到了示踪的作用，可以进一步确定结构面的相关性和连通性。

4 钻孔间岩体结构面连通性实例分析

开滦集团唐山矿业分公司是开滦集团有限责任公司的主要生产矿，至今已有 120 多年的开采历史，年产原煤在 4×10^6 t。由于矿区可采煤层厚度大，多煤层重复开采后会产生较大的地表沉降，再加上地处平原，第四系松散层潜水位埋深小，地表易积水，形成大范围的积水区。若按以往的方法开采铁路线下的煤层，铁路必须改线，铁路两侧的建筑物必须搬迁，由此将会产生大量不能耕作的土地，浪费了土地资源，引发了诸多的环境及社会问题。同时也大大增加了企业的经济负担。为了实现不搬迁采煤，开滦集团从 1992 年 6 月引进“地面高压注浆治理开采沉降”技术并进行了试验，取得了一些经验，对某些煤层注浆取得了成功，达到预期的减沉目的，并取得了较为丰富的注浆技术和管理经验。为对矿区的工程地质条件作进一步的勘察，利用数字全景

钻孔勘察摄像对唐山矿观测孔 T₁291 和 T₂291 进行孔内摄像，以查明钻孔的岩体节理裂隙、构造迹象、主要岩层结构面以及断裂破碎带等，并对其进行分析 and 统计。

在数字全景钻孔摄像专题勘察过程中，对矿区观测孔 T₁291, T₂291 进行了测试。图 3 给出了观测孔位置示意图，由图 3 可知，2 个钻孔间距大致为 2.828 m，观测孔 T₁291 的测试范围为 200.56~415.05 m，坐标为(383 143 m, 70 327 m, 0 m)；观测孔 T₂291 的测试范围 174.30~539.70 m，坐标为(383 145 m, 70 329 m, 1 m)。通过对 2 个观测孔数字钻孔图像的比较，发现地层岩体结构、层面、节理的发育情况等吻合得较好，局部发育有陡倾角的节理段由于现测孔不在空间延展方位上，或由于界面层面等的切割作用，未能继续向深度扩展，故而在现孔中未见具体的特征表现。以观测孔 T₁291 内 220.34 m 处的结构面与观测孔 T₂291 内 221.35 m 处的结构面为例，结构面钻孔图像如图 4 所示，其结构面特性如表 1 所示。

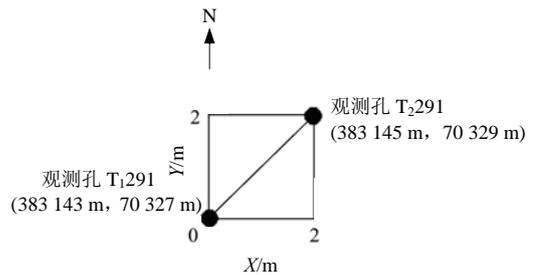
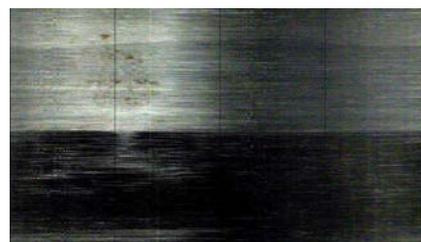


图3 观测孔位置示意图

Fig.3 Sketch of locations of two boreholes



(a) 观测孔 T₁291



(b) 观测孔 T₂291

图4 结构面钻孔图像

Fig.4 Borehole images of discontinuities

表 1 结构面特性对应表

Table 1 Undetermined corresponding discontinuities

观测孔编号	结构面深度/m	结构面产状	视隙宽度	结构面类型
T ₁ 291	220.34	S39°E∠9°	闭合	层面
T ₂ 291	221.35	S37°E∠9°	闭合	层面

根据前述位置相关性公式, 可以计算出观测孔 T₂291 内该结构面延展至观测孔 T₁291 处的深度 $z_0 = z_1 + l_i - \tan \beta_i [(x_2 - x_1) \sin \alpha_i + (y_2 - y_1) \cos \alpha_i] = 0 + 220.34 - \tan 9^\circ [(383\ 145 - 383\ 143) \sin 141^\circ + (70\ 329 - 70\ 327) \cos 141^\circ] = 220.34 + 0.047 = 220.387\ \text{m}$ 。由此可知: $\Delta z_0 = z_0 - l_j + z_2 = 220.387 - 221.35 + 1 = 0.037\ \text{m}$ 。观测孔 T₂292 内该结构面延展至观测孔 T₂291 处的深度 $z'_0 = z_2 + l_j - \tan \phi_j [(x_1 - x_2) \sin \phi_j + (y_1 - y_2) \cos \phi_j] = 0 + 221.35 - \tan 9^\circ [(383\ 143 - 383\ 145) \sin 143^\circ + (70\ 327 - 70\ 329) \cos 143^\circ] = 221.35 - 0.062 = 220.288\ \text{m}$ 。由此可知: $\Delta z'_0 = z'_0 - l_i - z_1 = 220.288 - 220.34 - 0 = -0.052\ \text{m}$ 。

关于结构面的延伸允许偏差值 δ 的选取, 主要与测试系统、产状描绘、钻探位置及角度等不确定因素有关, 此处取结构面的延伸允许偏差值 $\delta = 0.5\ \text{m}$, 根据式(7)则有

$$K = \sqrt{\left(1 - \frac{|\delta_i|}{\delta}\right) \left(1 - \frac{|\delta_j|}{\delta}\right)} = \sqrt{\left(1 - \frac{0.037}{0.5}\right) \left(1 - \frac{0.052}{0.5}\right)} = 0.91 \quad (0 \leq \delta_i, \delta_j \leq \delta) \quad (8)$$

根据推算关系, 钻孔间两结构面的延伸面深度差分别为 0.037 和 0.052 m, 观测孔 T₁291 与 T₂291 内 2 个结构面具有连通性, $K = 0.91$, 说明这 2 个结构面连通的相关性较好。另外, 由于这 2 个结构面的层面, 产状相似, 且层面两侧的岩性非常一致, 故认为, 观测孔 T₁291 内 220.34 m 处的结构面与观测孔 T₂291 内 221.35 m 处的结构面具有良好的连通性。

5 结 论

本文利用钻孔摄像技术获得的高精度数字钻孔的孔壁图像, 结合钻孔间岩体结构面连通性实际工程应用实例分析, 着重分析了岩体结构面的延展性和连通性问题, 并从结构面深度位置、结构面两侧岩性、结构面形态及充填情况等方面进一步确定两

两钻孔岩体结构面的对应关系, 得到了以下结论:

(1) 推导了两两相邻钻孔结构面连通所应满足的条件, 以此可以初步筛选出满足钻孔位置关系的结构面集合。

(2) 研究了结构面深度位置相关性的计算方法, 提出通过位置相关性系数 $K(n_i, m_j)$ 来定义两两钻孔间结构面连通的相关性, 当 $0 < K(n_i, m_j) \leq 1$ 时, 称两钻孔内结构面 n_i 和 m_j 位置关系具有连通性, $K(n_i, m_j)$ 值越高, 其结构连通的相关性越好。而当 $K(n_i, m_j) = 0$ 时, 称两钻孔内结构面 n_i 和 m_j 位置关系不具有连通性, 此时, 称结构面 n_i 为结构面 m_j 的干扰结构面。

(3) 通过研究结构面两侧岩石颜色、纹理特征、岩石颗粒大小和排列方式等岩石特征以及结构面形态和充填情况, 可对待选结构面进行二次筛选和判断, 以缩小待选范围或者确定对应的结构面。

(4) 通过对开滦某矿区两钻孔间的岩体结构面进行了连通性实例分析, 证明通过数字钻孔图像确定结构面连通性的方法是可行的, 是岩体结构精细描述的重要技术手段和研究方法。

参考文献(Reference):

[1] 黄润秋, 许 模, 陈剑平, 等. 复杂岩体结构精细描述及其工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2004.(HUANG Runqiu, XU Mo, CHEN Jianping, et al. Complicated rock mass structure elaboration and its engineering application[M]. Beijing: Science Press, 2004.(in Chinese))

[2] 王川婴, 葛修润, 白世伟. 数字式全景钻孔摄像系统研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(3): 398 - 403.(WANG Chuanying, GE Xiurun, BAI Shiwei. Study of the digital panoramic borehole camera system[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(3): 398 - 403.(in Chinese))

[3] 王川婴, LAW K T. 钻孔摄像技术的发展和现状[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(19): 3 440 - 3 448.(WANG Chuanying, LAW K T. Review of borehole camera technology[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(19): 3 440 - 3 448.(in Chinese))

[4] CUNINGHAM K J, CARLESON J I, HURLEY N F. 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[J]. Journal of Applied Geophysics,

- 2004, 55(1): 77 - 90.
- [5] 胡守平. 钻孔摄像技术在石炭系特厚煤层工作面的应用[J]. 山东煤炭科技, 2009, (1): 1 - 3.(HU Shouping. The application of panoramic borehole camera to extremely thick seam working face in carboniferous system[J]. Shandong Coal Science and Technology, 2009, (1): 1 - 3.(in Chinese))
- [6] 魏立巍, 秦英译, 唐新建, 等. 数字钻孔摄像在小浪底帷幕灌浆检测孔中的应用[J]. 岩土力学, 2007, 28(4): 843 - 848.(WEI Liwei, QIN Yingyi, TANG Xinjian, et al. Application of digital borehole camera to quality test boreholes for grout curtain in Xiaolangdi water control project[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(4): 843 - 848.(in Chinese))
- [7] 谢 猛, 甄春相, 张显明, 等. 数字全景钻孔摄像技术在铁路工程地质勘察中的应用[J]. 铁道勘察, 2009, (1): 33 - 35.(XIE Meng, ZHEN Chunxiang, ZHANG Xianming, et al. Application of digital panoramic borehole photography technique in railway engineering geological investigation[J]. Railway Investigation and Surveying, 2009, (1): 33 - 35.(in Chinese))
- [8] 秦英译, 王川婴. 前视井下电视和数字钻孔摄像在工程中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增1): 2 834 - 2 840.(QIN Yingyi, WANG Chuanying. Axial downhole TV and digital optical borehole imaging and their engineering applications[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(Supp.1): 2 834 - 2 840.(in Chinese))
- [9] WILLIAMS J H, JOHNSON C D. Acoustic and optical borehole-wall imaging for fractured-rock aquifer studies[J]. Journal of Applied Geophysics, 2004, 55(1): 151 - 159.
- [10] FREDERICK S, ANTHONY, ANDREW D. Use of advanced Borehole geophysical thchniquial to delineate fractured-rock ground-water flow and fractures along water-tunnel facilities in Northern Queens County, New York[R]. New York: U. S. Geological Survey, 2001.
- [11] YOO B O, CHUNG H S. Assumption of failure surface using borehole image processing system in failed rock slope[C]// Proceedings of the 2nd Conference of Korean Society of Exploration Geophysicists. [S. l.]: [s. n.], 1999: 217.
- [12] CUNNINGHAM K J. Application of ground-penetrating radar, digital optical borehole images, and cores for characterization of porosity hydraulic conductivity and paleo-karst in the Biscayne Aquifer, Southeastern Florida[J]. Journal of Applied Geophysics, 2004, 55(1/2): 61 - 76.
- [13] PUSCH R. Practical visualization of rock structure[J]. Engineering Geology, 1998, 49(2): 231 - 236.
- [14] PALM J A. Technique to map foliation from borehole images, a case study of borehole OL-KR12, Olkiluoto of Eurajoki, W-Finland[C]// Proceedings of the 6th SEGJ Symposium—Imaging Technology. Tokyo, Japan: [s. n.], 2003: 370 - 379.
- [15] LOVELL M, WILLIAMSON G, HARVEY P K. Borehole imaging: applications and case histories[M]. London: Geological Society, 1999: 1 - 43.
- [16] WU F Q, LIU J Y, LIU T, et al. A method for assessment of excavation damaged zone(EDZ) of a rock mass and its application to a dam foundation case[J]. Engineering Geology, 2009, 104(2): 254 - 262.
- [17] MIYAKAWA K, TANAKA K, HIRATA Y, et al. Detection of hydraulic pathways in fractured rock masses and estimation of conductivity by a newly developed TV equipped flow meter[J]. Engineering Geology, 2000, 56(1): 19 - 27.
- [18] 钟 声. 钻孔雷达与数字摄像动态勘察技术若干关键问题研究[博士学位论文][D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2008. (ZHONG Sheng. Key issues of dynamic exploration survey based on the borehole radar and digital imaging[Ph. D. Thesis][D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2008.(in Chinese))