

doi: 10.11720/wtyht.2020.1594

石春娟, 翟慧明. 数字全景钻孔摄像技术在文物遗址保护工程中的应用[J]. 物探与化探, 2020, 44(6): 1490–1494. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.1594>

Shi C J, Zhai H M. The application of digital panoramic borehole camera technique to the protection engineering of cultural relics sites[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(6): 1490–1494. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.1594>

数字全景钻孔摄像技术在文物遗址保护工程中的应用

石春娟¹, 翟慧明²

(1. 山东英才高级技工学校, 山东 济南 250104; 2. 中国重汽集团 济南桥箱有限公司, 山东 济南 250104)

摘 要: 由于外动力地质作用, 大足石刻造像遗址的保护工程急需高精度的地质工程勘察数据, 而数字全景钻孔摄像技术能够精确地获得地下岩体的结构特征与精度 1 mm 的结构面信息。利用数字全景钻孔摄像技术对重庆大足千手观音附近的岩土地质工程进行勘察分析, 结果表明: 区域内岩体的完整性整体较好, 结构面主要表现为节理, 并构成了区内的主要渗水通道。数字全景钻孔摄像技术为大足千手观音的岩土工程勘察提供了原始图像数据, 方便了大足千手观音文物遗址保护工程的实施与决策。

关键词: 数字全景钻孔摄像; 岩体结构; 大足石刻; 文物保护工程

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2020)06-1490-05

0 引言

重庆大足宝顶山石刻区的石像形成于公元 12 世纪末至 13 世纪中叶, 共有大小石刻造像近万余座。这些石像历史悠悠、雕刻精美、独具风格, 达到唐宋时代雕刻艺术的顶峰, 具有不可磨灭的宗教文化与历史艺术价值^[1-2]。然而, 在外动力地质作用下, 石像地基中的岩体结构破坏严重, 岩体结构的稳定性受到很大的影响, 严重影响了所在区域石刻造像的岩土地质安全和历史文物保护价值。由于水土侵蚀和地应力作用, 岩体内部新发育的结构面很少能够通过岩体表层开挖等方式得到观测评估, 其余大部分的岩体结构面埋藏于岩体内部, 无法得到有效的勘察分析。近些年来大足石刻灾害情况受到国家文物局的重视, 并对大足石刻造像进行了维护, 也开展了大量的勘察探测技术工程与修复保护工作^[3-5]。为了更好地保护文物, 需要进行岩体内部结构的精细探测, 因此, 采用数字全景钻孔摄像技术来进行大足石刻区岩体内部结构的精细探测与研究, 并对大足千手观音石刻区附近的现有钻孔进行

重新观测分析, 获取最新的钻孔图像数据以及结构面产状信息, 为大足千手观音的勘察保护工作提供真实可靠的数据支持和决策依据。

1 数字全景钻孔摄像与测试方法

重庆大足宝顶山石刻区的地层相对单一, 岩性比较简单, 构造情况相对比较平缓, 岩层的倾角相对小, 基本上为近水平状的岩层, 岩体结构面的倾角也相对较小。该区域的砂岩内有相互交错的层理, 因此, 该区域内的岩体完整性整体较好, 结构面主要表现为节理, 不存在断层。

1.1 数字全景钻孔摄像系统

数字全景钻孔摄像系统由中国科学院武汉岩土力学研究所研制, 该系统采用了一种截头的锥面镜来实现钻孔孔壁的全景反射成像, 其成像原理如图 1 所示。锥面镜反射成像形成了环状的全景图像, 通过计算机信号的逆变换和成像数据的数字化即可还原钻孔孔壁的原始信息, 并实现钻孔全景图像及其平面展开图和虚拟岩心图的实时同步显示。钻孔图像平面展开图全面完整地展示了钻孔孔壁的岩体

结构特征和细节,而可以旋转的虚拟钻孔岩心图则提供了相关的空间形状和位置信息。该系统生动形象地展示并记录了钻孔孔壁的真实岩体结构特征和岩层信息特点,实现了钻孔孔壁图像化和数字化的描述分析,极大地促进了钻孔摄像技术的发展^[6-7]。

该系统解决了钻孔内原位工程地质信息无法准确、完整地采集到的问题,在实际工程应用中还具有如下功能特点:①孔内实时孔壁图像的分析处理;②能够形成孔内全景图、钻孔图像平面展开图和钻孔图像虚拟岩心图;③具有统计分析能力,包括计算结构面产状和隙宽等;④能够对探测结果建立数据库并进行保存。该系统已经广泛应用于工程检测与岩土勘察中。

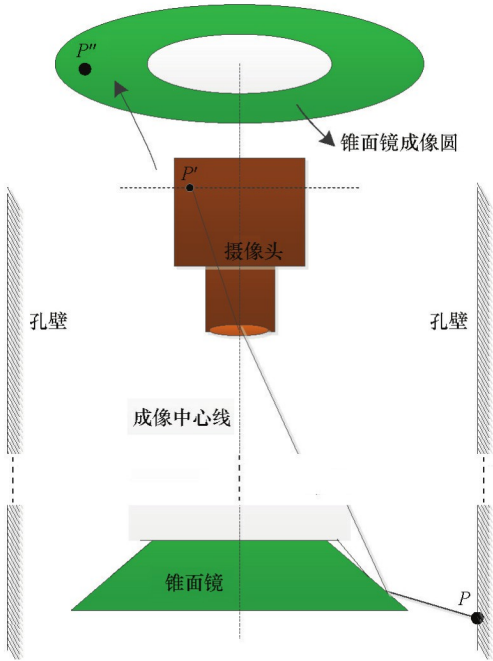


图1 数字全景钻孔摄像系统工作原理

Fig.1 The schematic diagram of digital panoramic borehole camera system

1.2 全景钻孔图像特征及其测试方法

利用数字全景钻孔摄像系统对不同位置的钻孔进行数字全景摄像,获得孔内视频图像。在利用系统分析软件进行视频图像分析后,主要可以得到以下3种结果图像:①孔内实时全景图像;②钻孔图像平面展开图;③钻孔图像虚拟岩心图。这3种图像可以统称为钻孔图像,文中所述的钻孔图像主要是指孔内全景图像的平面展开图。

孔内实时全景图像是数字全景钻孔摄像系统获得的原始视频图像数据,也是其他各种结果图像数据的基础。图2所示为实际钻孔测试视频的截图图像,图中包括了位于图像中央的罗盘指针和右上角

的深度值,该罗盘指针用于指示当前位置下钻孔摄像探头所处的方位。

钻孔图像平面展开图是由全景图像经变换后形成的钻孔孔壁全景图,如图3所示。该图真实地反映了钻孔孔壁四周的岩性、岩体色彩及其结构面等情况,图像顶部的字母用于指示方位,展开图的左边标识了此处钻孔孔壁的实际深度。

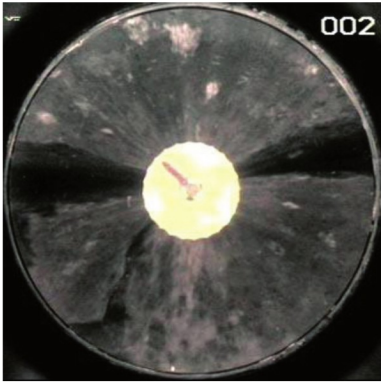


图2 孔内实时全景图像

Fig.2 Panoramic image of borehole vedio

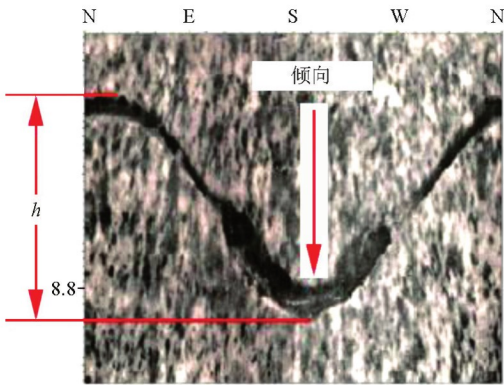


图3 钻孔图像平面展开

Fig.3 The expanded image of borehole panoramic image

虚拟岩心图是以旋转三维岩心的形式展现出来的孔壁图像,如图4所示,在系统软件中可以通过旋转按钮完成整个钻孔孔壁图像的观测。

另外,该数字全景钻孔摄像系统还提供了一套专门的分析软件用以实现钻孔图像岩体结构工程参数获取,这些参数包括结构面和破碎带的深度、方位、几何特征等,可以直接从分析软件中得出并存入数据库加以保存使用,如图5所示。

1.3 结构面特征计算方法与工程应用

为了准确测量石刻区岩体结构面的产状,假定z轴为钻孔的中心轴,x轴和y轴的平面位于地表面,其正向分别指向东和北。基于该坐标系,在结构面平面上取3个不共线的点 P_1 、 P_2 、 P_3 ,由此可得

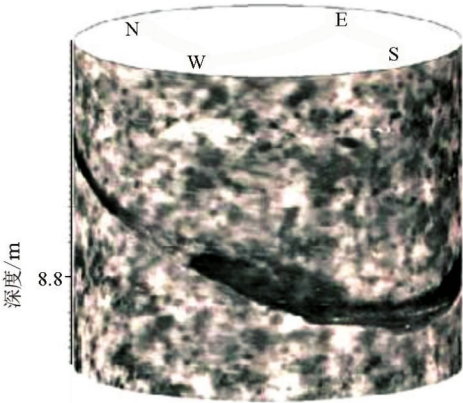


图 4 钻孔图像虚拟岩心

Fig.4 Panoramic image schematic diagram

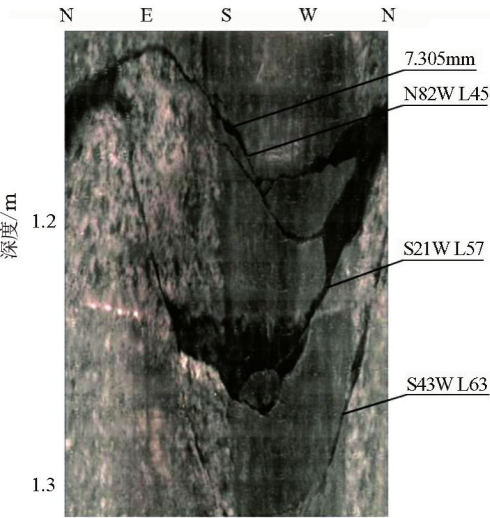


图 5 软件分析部分结果展示(结构面的产状和隙宽)

Fig.5 Partial results of software analysis (cracks and gaps)

该平面上的 2 个向量 V_1 、 V_2 ，并求出该平面的单位法向量 N ，若 N 的 z 分量小于零，则取其相反向量 $N_0 = \{x_0, y_0, z_0\}$ ，因此，该结构面的倾角可以由 $\beta = \arccos z_0$ 计算得到。假定向量 $N_p = \{x_p, y_p\}$ 为单位法向量 N_0 在 xy 平面上的投影，那么，该结构面的倾向 α 可以由

$$\alpha = \begin{cases} 90^\circ - \arctan(y_p/x_p) & x_p > 0; \\ 90^\circ & x_p = 0, y_p > 0; \\ 270^\circ - \arctan(y_p/x_p) & x_p < 0; \\ 270^\circ & x_p = 0, y_p < 0. \end{cases}$$

计算得到。另外，由于结构面在平面展开图上呈现正弦曲线状的图像，如图 5 所示，最小值点的方位表示该结构面的倾向，而其倾角(β)也可以由该正弦曲线的最大和最小值点之间的垂直距离(h)与钻孔直径(d)之比的反正切函数求得，即：

万方数据 $\beta = \arctan(h/d)$ 。

钻孔图像岩体结构面的隙宽可以利用结构面曲线带上下边界二个点之间的距离获得。整个测量过程是在平面展开图中进行的，系统分析软件给出了专门用于测量二点距离的对话框。由于平面展开图中的点仍是空间坐标，测得的隙宽是二点的空间距离，因此，结构面的产状和隙宽在系统软件的帮助下只需用鼠标在平面展开图上进行简单操作即可实现。该系统获得的钻孔图像展开图横向分辨率为 1024 dpi，垂向(深度)测量精度可达 1 mm。

2 应用结果与数据分析

在大足千手观音石刻区的钻孔中，利用以上数字全景钻孔摄像系统对石刻区的钻孔孔壁进行数字全景摄像和钻孔图像数据的统计分析。下面给出部分有代表性的分析结果。

ZK2 孔深 17 m，孔径 91 mm，由于深度编码器在孔口，探头玻璃窗口距离深度编码器为 0.7 m，该钻孔的起测深度为 0.7 m(即摄像是从地面 0.7 m 处开始)，由于孔口装有套管且孔底有沉渣，实际探测深度为 3.7~16.2 m。此次共发现 6 条结构面和节理分界面，图 6 为其中一处钻孔图像，可以看出在 3.7~5.5 m 处出现较为发育的结构面。从 ZK2 整个测量段来看，结构面大多为中等，宽度较大，多数位于岩性较好的岩石与较差岩石的分界面上。

ZK3 孔深 16 m，孔径 91 mm，由于 7.5 m 处有水，实际探测深度为 2.2~15.2 m。从图像上看，结构面较不发育，宽度较小(图 7)。在总长约 13 m 的测量段中，节理结构面在 NE、NW 方向上分布较多，产状以缓倾角为主，占有统计节理的 80% 左右。

同样，在孔深 16 m、孔径 91 mm 的 ZK10 中共发现 4 条结构面、2 处破碎及空洞区域，如图 8 所示。该钻孔的节理结构面主要在 NW 及 SE 方向上分布较多，产状以缓倾角为主，结构面宽度大小分布主要在 10~50 mm 之间。

ZK17 孔深 20 m，孔径 91 mm，由于孔内水位大致在 9.55 m，孔口套管，实际探测深度为 1.7~20 m，共 18.3 m。孔中共发现 10 条结构面，图 9 为部分孔段的钻孔图像虚拟岩心。在此钻孔中，结构面大多未发育，宽度较小，岩石岩性相对较差。

对所有钻孔图像数据进行统计分析，结果见表 1。结合原始资料和数字全景钻孔摄像系统的统计结果可知，该勘察区域内主要存在 3 组构造结构面，产状分别为：①走向 NW280°~310°，倾角近直立；②走向近 EW，倾角近直立；③走向 NE20°~40°，倾

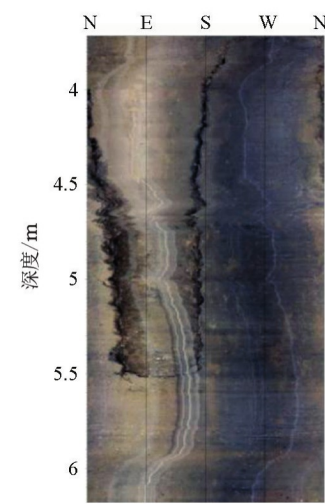


图 6 ZK2 孔 3.7~6 m 段图像

Fig.6 Borehole image of 3.7~6 m in ZK2

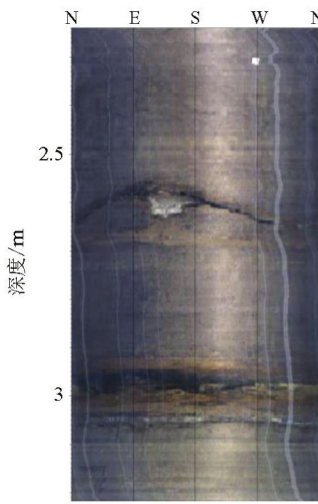
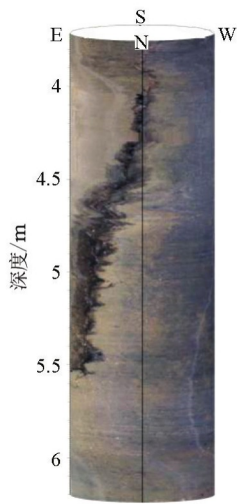


图 7 ZK3 孔 2.2~4 m 段图像

Fig.7 Borehole image of 2.2~4 m in ZK3

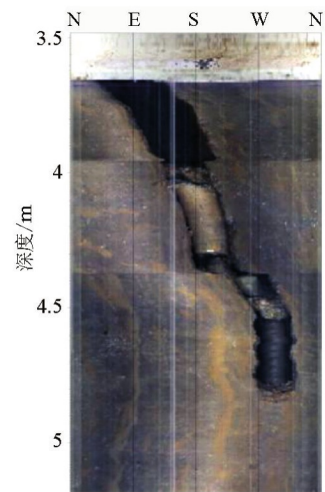
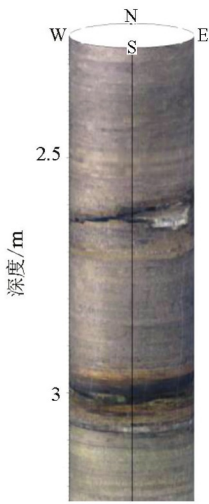


图 8 ZK10 孔 3.5~5.2 m 段图像

Fig.8 Borehole image of 3.5~5.2 m in ZK10

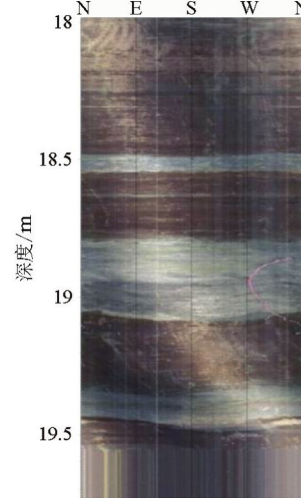
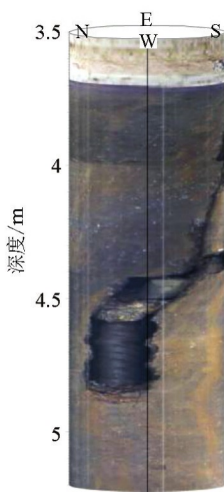


图 9 ZK17 孔 18~20 m 段图像

Fig.9 Borehole image of 18~20 m in ZK17

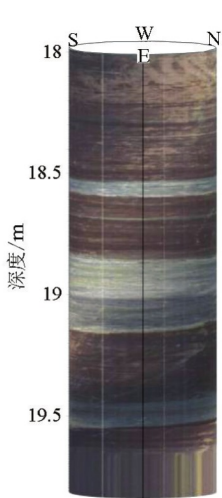


表 1 数字全景钻孔摄像所获得的主要结果

Table 1 Main results obtained by digital panoramic borehole camera

钻孔编号	隙宽较大的结构面			岩性较差区域范围/m	水位/m
	深度/m	宽度/mm	产状		
ZK2	3.7~5.5	57.6	几乎垂直	14~16	14.2
ZK3	3.981	69	N10°W ∠ 15.1°		7.48
ZK7	3.992	35.01	S10°E ∠ 19.1°	10.4~11.6, 13~14	
ZK10	3.8~4.7	67.74	几乎垂直,形成空洞	14~15.5	14
ZK11	5.2~5.8	35.6	垂直	8.5~12.5, 13.5~16.5	
ZK17	7.5	26	N46°W ∠ 21.8°	11~19.5	9.55
	12.283	34	N13.5°E ∠ 15.8°		
ZK18	11.778	87	N84.6°E ∠ 12.8°	14.5~21.5	14.35
	14.394	127	N34°W ∠ 47.5°		
ZK21	23.278	113.03	S61°W ∠ 79.9°	11.5~13.5, 19.5~25.5	24.26
	24.297	59.47	S66°W ∠ 78.3°		
ZK25	5.31	51	N78°W ∠ 2.3°		
ZK27	1.8~3.34	35.8	几乎垂直	14.6~15.1, 20.5~25.5	21.34
	21.34	62	S42°E ∠ 10°		

向 NW, 倾角 $65^{\circ} \sim 80^{\circ}$ 。这些构造结构面间距相对大, 密度一般为每 10 m 一条, 结构面的张开度较大并且延伸较长。大足石刻区内除构造裂隙外, 还发育有层面结构面和平行于陡壁的卸荷结构面, 这些结构面相互交切, 构成了区内的渗水系统, 是该区域地下水的主要渗流通道和内部储存空间。

3 结论

通过对大足千手观音石刻区数字全景钻孔图像数据的统计分析, 完成了对岩体内部结构的精细探测, 获取了其结构面产状信息。本次数字全景钻孔摄像测试过程有效地协助了石刻区文物遗址保护工程的实施, 为有关文物遗址保护工作提供了参考价值。由于钻孔数量有限, 现有设备也不能进行长期钻孔监测, 今后结合声波探测方法进行智能联合勘察具有更全面更广泛的意义。

参考文献 (References):

[1] 童登金. 大足石刻的保护与展望[J]. 文物保护与考古科学, 2003, 15(3): 57-60.
Tong D J. Protection and outlook of Dazu Rock Carvings[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2003, 15(3): 57-60.

[2] 王晓朋, 卢晓仓, 李鹏飞, 等. 大口径钻孔在西藏地区水电工程土料勘察中的应用研究[J]. 水利水电技术, 2013, 44(8): 105

- 108.

Wang X P, Lu X C, Li P F, et al. Application of large-diameter borehole to earth materials investigation for a hydropower project in Tibet [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2013, 44(8): 105-108.

[3] Bae D S, Kim K S, Koh Y K, et al. Characterization of joint roughness in granite by applying the scan circle technique to images from a borehole televiewer [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2011, 44(4): 497-504.

[4] 石春娟. 重庆大足千手观音造像的电磁勘探和水文地质勘探[J]. 物探与化探, 2018, 42(6): 1306-1310.

Shi C J. Research on electromagnetic prospecting and hydrogeological exploration for the statue of Thousand-Hand Avalokitesvara at Dazu, Chongqing[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2018, 42(6): 1306-1310.

[5] 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.

[6] 杜鹏, 刘晓玲, 徐新战, 等. 利用温度检测钻孔灌注桩混凝土拌合物面的研究[J]. 物探与化探, 2019, 43(3): 667-671.

Du P, Liu X L, Xu X Z, et al. Research on concrete mixture surface detection for bored pile based on temperature[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(3): 667-671.

[7] 王川婴, Law K T. 钻孔摄像技术的发展与现状[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(19): 3440-3448.

Wang C Y, Law K T. Review of borehole camera technology[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(19): 3440-3448.

The application of digital panoramic borehole camera technique to the protection engineering of cultural relics sites

SHI Chun-Juan¹, ZHAI Hui-Ming²

(1. Shandong Yingcai Advanced Technical School, Jinan 250104, China ; 2. SINOTRUK Jinan Axle & Transmission Co., Ltd., Jinan 250104, China)

Abstract: Due to the external dynamic geological process, the protection of Dazu Rock Carvings sites needs high precision geological engineering survey data, and the digital borehole panoramic camera technique can accurately obtain the structure characteristics and underground rock mass discontinuities with precision of 1 mm. In this study, the authors used digital panoramic borehole camera technique to analyze the geotechnical engineering of Thousand-Hand Kwan-yin at Dazu, Chongqing, and the results show that the integrity of the rock mass in this region is good, with the discontinuities being mainly manifested as joints and constituting the main seepage channel in the region. This technique can provide original imaging data for the geotechnical engineering of Thousand-Hand Kwan-yin. It offers a advantage for the protection of cultural relics sites, which improves the implementation and decision-making of engineering.

Key words: digital panoramic borehole camera; rock mass discontinuity; Dazu Rock Carvings; engineering for cultural relic protection

(本文编辑: 沈效群)