

香港充填土风化花岗岩场址勘探中的界面识别研究

谭卓英¹, 蔡美峰¹, 岳中琦², 谭国焕², 李焯芬²

(1. 北京科技大学金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室, 北京 100083; 2. 香港大学土木工程系, 香港)

摘要: 针对香港充填土风化花岗岩场址勘探, 在液压旋转钻机安装钻孔过程监测系统(DPM), 对有效轴压力、钻具转速、冲洗压力、钻头位移及穿孔速率进行了实时监测。采用变斜率作为显著性指数, 对地层中的主、次界面进行了识别。 t -检验表明: DPM系统对岩土界面识别的置信度为99%。此外, 对穿孔参数在界面处的变化分析表明: 这些参数随孔深的变化曲线在界面处存在不同涨落, 轴压力和穿孔速率对界面上岩石强度变化的响应度为81.82%。

关键词: 仪器钻进系统; 穿孔参数; 充填土; 风化花岗岩; 界面识别

中图分类号: TU413.6

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2007)02-0169-05

作者简介: 谭卓英(1965-), 男, 博士, 教授, 主要从事工程监测、耦合分析、界面损伤与界面识别等方面的教学及研究。E-mail: markzhy_tan@163.com。

Identification of interface of earth fill with weathered granite in site investigation of Hong Kong

TAN Zhuo-ying¹, CAI Mei-feng¹, YUE Z Q², THAM L G², LEE C F²

(1. State Key Laboratory of High-Efficient Mining and Safety of Metal Mines (USTB), Ministry of Education, Beijing 100083, China;

2. Department of Civil Engineering, University of Hong Kong, Hong Kong, China)

Abstract: A hydraulic rotary drillrig instrumented with a drilling process monitoring system (DPM) was used in site investigation of Hong Kong. The penetrating parameters such as effective thrust force, rotational speed, flushing pressure, penetrating rate and displacement of the bit were monitored in real time. A varying slope was defined as a significant index for identification of dominative and subsidiary interfaces in the granite site. It was shown by the result of t -test that the confidence of the DPM in identification of the geotechnical interfaces was 99%. Besides, the analysis of variation of the penetrating parameters on the interfaces indicated that there were different fluctuations on the interfaces in the variation of the parameters with borehole depth. The response degree of the effective thrust force and the penetrating rate to variation of rock strength at the interfaces was 81.82%.

Key words: instrumented drilling system; penetrating parameter; fill soil; weathered granite; identification of geotechnical interface

0 前言

根据钻探、土工及岩石力学试验对岩土进行力学分层是岩土工程勘察中一项非常重要的工作。因此, 研究仪器钻进系统, 对钻进过程进行实时监测以取代土工和岩石力学试验的研究一直以来是国际岩土工程领域的前沿课题之一。

钻孔过程监测系统(Drilling process monitor: DPM)是一种自动记录数据的仪器钻进系统, 最初用于油气田中测量钻孔偏斜、钻具力矩、施加在钻具上的重量以及简单的地层参数分析。在英国、美国和日本等发达国家, 已于20世纪80年代开始进入试验性应用阶段。目前, 随着传感技术的发展, 该系统从静态监测模式进入到了实时随机监测模式^[1]。由于在场

址特征、数值控制及质量管理等方面的重要性, DPM系统在岩土工程中的开发和应用几乎与钻井监测是同时的。自20世纪80年代, 基于微处理器的钻机监测仪在钻机工作参数的感应、采集、存储和处理方面的应用已倍受关注, 被认为是在地层特征识别方面非常有潜力的一种方法^[2-7]。在这些系统中, 包括ENPASOL系统^[8]、PAPEROL系统^[9]及Kajima的车载地层测量系统^[10]。目前, 基于微电子的监测系统可以记录扭矩、轴压、转速、穿孔速率、钻液流速及压力等各种钻孔参数。这些参数与钻孔深度的相关性分析已用来揭露所钻地层的强度和分层特性^[11-14]。

基金项目: 香港特别行政区政府研究基金(HKU7005/01E); 国家自然科学基金重大资助项目(50490271)

收稿日期: 2005-11-28

对于如此精密的系统,其监测的准确性及可靠性不仅取决于仪器,还与作业参数的设置有关。现行的监测工作是在钻孔过程的拟标准化假设下进行的。这也是说,在此假设下将通过各子过程的标准化来识别钻孔数据。为了克服现行技术存在的不足,我们研制了一种数字式 DPM 系统,分别安装在气动冲击式钻机和液压回转式钻机上,用于香港斜坡加固工程的土钉钻进^[15-16]及简单风化花岗岩地基钻探^[17]。研究表明:钻孔过程参数随时间的动态监测可为工程质量管理、控制以及岩土工程设计与检验提供丰富、有利的真实数据和资料^[15-17]。

本研究根据 DPM 系统在香港充填土-风化花岗岩地基勘察中的应用,对穿孔参数与岩石强度间的关系进行研究,以期揭露岩石的力学分层特性,实现对地层界面的自动识别。

1 穿孔参数变化的基本规律

本次研究采用 DPM 系统^[17],勘探场址为香港某充填土风化花岗岩地层,由上覆充填土、全风化至微风化花岗岩组成,各层厚度不一。其中,充填土的厚度为 0~7.10 m。试验钻探机为 R-20 型回转式钻机,岩芯钻进采用直径 $\phi 115$ mm 金刚石钻头和 T2-101 双筒岩芯套管,岩芯直径为 84 mm,钻杆单重为 58.4 kN/m。为了全面掌握场址的岩土工程特性,共布置 47 个钻孔,钻孔的终孔深度为完整基岩以下 10 m。钻孔过程中的压力、转速和位移等参数采用 DPM 系统进行实时监测。文中以某典型钻孔为例进行分析。

1.1 轴压力随孔深变化的全过程曲线

轴压力的作用是保证钻头与孔底岩石有效接触,并使钻头压入岩石一定深度,同时保证在钻机回转过程中,钻具不致回弹。轴压力过大,会增大孔底摩擦,增大扭矩,造成卡钻和钻具失效。过小,钻齿不能压入岩石,达不到破碎岩石的效果。因此,必须维持合理的轴压力。在钻进过程中,作用于钻头上的轴压力称为有效轴压力,在数值上等于钻具重量与轴压力之和,与调压力的差值。图 1 是作用于钻头上的有效轴压力随钻头推进位移或孔深的全过程变化的曲线。

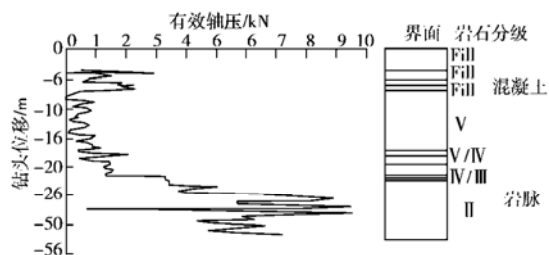


图 1 有效轴压随钻头位移的变化

Fig. 1 Variation of effective thrust force with displacement of bit

1.2 钻具转速随孔深变化的全过程曲线

R-20 属旋转式破岩,钻孔的动力主要来自钻机回转电机产生的扭矩。图 2 是钻头转速随钻头推进位移的变化曲线。

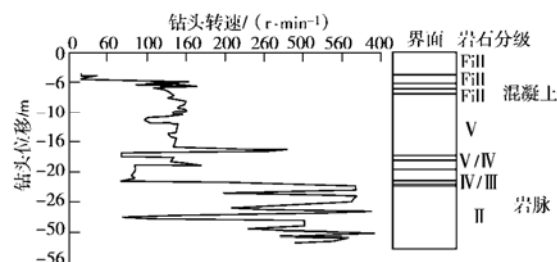


图 2 钻头转速随钻头位移的变化

Fig. 2 Variation of rotational speed with displacement of bit

1.3 冲洗水压力随孔深变化的全过程曲线

冲洗水的作用除排碴外,可润湿孔壁起到护壁的作用。同时,润湿孔底岩石,提高穿孔效率并降低钻头温度,减少磨损。图 3 是冲洗水压力随孔深的变化曲线。

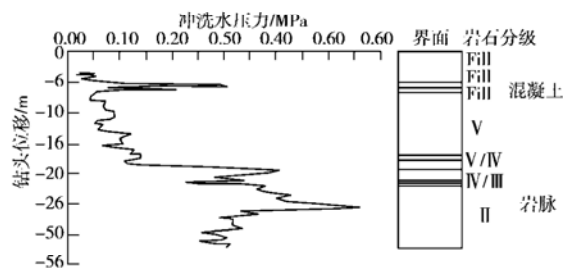


图 3 冲洗水压随钻头位移的变化

Fig. 3 Variation of flushing pressure with displacement of bit

1.4 钻头位移随钻进时间变化的全过程曲线

图 4 是钻头位移随钻进时间的变化关系曲线。曲线的斜率反映钻头的穿孔速率。因此,位移-时间曲线实际上反映的是钻头穿孔速率的变化。图 5 为界面上穿孔速率随钻头位移的变化曲线。

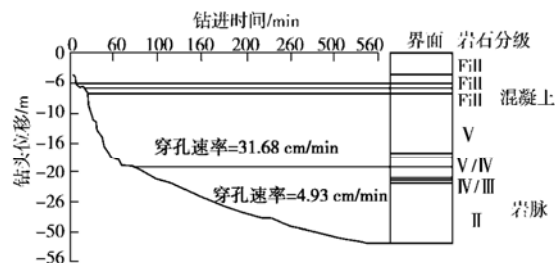


图 4 钻头位移随钻进时间的变化

Fig. 4 Variation of displacement of bit with drilling time

2 岩土界面及其与穿孔参数的关系

2.1 岩性与界面的识别

图 1~5 反映了穿孔过程中各参数的变化。为了定

义岩性界面, 用显著性指数来描述岩性的变化程度。设显著性指数 S_i 在数值上为钻进位移随时间变化曲线斜率 P 的变化率 P_r , 则:

$$S_i = P_r = \frac{P_1 - P_2}{P_1} \times 100\% = (1 - \frac{P_2}{P_1}) \times 100\% \quad , \quad (1)$$

式中, 孔深的变化步长设为 0.50 m, P_1 与 P_2 分别为相邻步距内钻进位移 - 时间变化曲线的斜率。显然, 界面的识别精度与步距有关。为了满足岩土工程的要求, 这里, 对于主界面, 显著性指数取 $S_i \geq 10.0\%$ 。主界面是具有明显地层特征的地质边界。

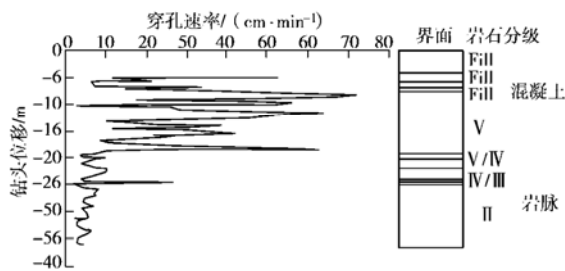


图 5 穿孔速率随钻头位移的变化曲线

Fig. 5 Variation of penetrating rate with the displacement of bit
当钻头在没有明显边界的渐进地层中钻进时, 位

移 - 时间曲线趋于平缓而无突变。这里, 次级界面可被定义为渐进地层中的另类界面。与主界面不同, 次级界面存在于同类地层的某些强烈风化或变质的局部区域。对于次级界面, S_i 设置为 $3.0\% \leq S_i < 10\%$ 。由此, 可以获得 DPM 系统下的岩性界面值如表 1。

这里, 人工录孔属传统的岩土工程勘探方法。其中, 通过标准触探试验、点载荷试验和岩性鉴别, 获得各钻孔岩性、物理力学参数及界面深度值。界面及岩性随深度的变化参见图 1~5。共获得主界面 8 个, 次级界面 3 个。为了检验 DPM 系统对界面识别的可靠性, 采用 t -检验的方法对此进行分析。

设手工方法获得的界面值为另一组观察变量 u_i , DPM 系统识别的界面深度为一组观察变量 v_i , 则问题转化为回答 u_i 和 v_i 之间是否存在显著差别。手工录孔与 DPM 系统监测结果的比较如表 2。

通过设定显著性水平 α , 可以检验两个观察变量之间的差异, 从而确定响应程度指标沿界面变化的可靠度 $(1-\alpha)$ 。 t -检验的结果如表 3。结果表明: 采用 DPM 系统对界面的识别, 与传统的手工录孔比较, 其置信度达 99%, 结果可靠。

表 1 手工和 DPM 系统所获得的岩性界面深度值

Table 1 Depths of lithology interfaces obtained from manual logging and DPM records

手工获得的界面深度范围	岩性分布	分级	DPM 获得的界面深度范围
0.00~4.00 m	充填土	Fill	0.000~3.866 m
4.00~5.00 m	充填土	Fill	3.930~5.000 m
5.00~5.60 m	充填土	Fill	5.000~5.420 m
5.60~5.90 m	混凝土	混凝土	5.420~6.090 m
5.90~7.10 m	充填土	Fill	6.090~7.100 m
7.10~15.10 m	细及粗粉沙土	V	7.100~16.860 m
15.10~18.00 m	细及粗粉沙土	V	16.860~17.870 m
18.00~19.03 m	粗粉沙土	V/IV	17.870~19.000 m
19.03~21.20 m	高及中度风化粗粒花岗岩	IV/III	19.000~21.330 m
21.20~21.60 m	高度风化花岗岩	IV	-21.300~21.510 m
21.60~21.70 m	轻度风化细至中粒花岗岩脉	岩脉*	21.510~21.680 m
21.70~31.85 m	轻度风化粗粒花岗岩	II	21.680~31.868 m

注: *为轻度风化花岗岩岩脉。

表 2 DPM 与手工方法所获主界面值的比较

Table 2 Comparison of the depths of dominative interfaces manual logging and DPM

界面处岩石的 级别变化	主界面								次界面		
	混凝土层	Fill	V	V - V/IV	V/VI - VI/III	VI/III - IV	VI - 岩脉#	II - 岩脉#	V - V	Fill	Fill
u_i/m	-5.60	-5.90	-7.10	-18.00	-19.03	-21.20	-21.60	-21.70	-4.00	-5.00	-15.10
v_i/m	-5.42	-6.09	-7.10	-17.87	-19.00	-21.33	-21.51	-21.68	-3.93	-5.00	-16.86
x_i/m	-0.18	0.19	0.00	-0.13	-0.03	0.13	-0.09	-0.02	-0.07	0.00	1.76
$ x_i /m$	0.18	0.19	0.00	0.13	0.03	0.13	0.09	0.02	0.07	0.00	1.76
$(x_i /u_i)/\%$	3.21	3.22	0.00	0.72	0.16	0.61	0.42	0.09	1.75	0.00	11.66

表 3 DPM 系统监测与手工录孔界面值的 *t*-检验结果及置信度

Table 3 Results of the *t*-test and degree of confidence on the interfaces from DPM with respect to manual logging

界面	<i>n</i>	<i>a</i>	$\sum x_i$	$\bar{x}$	<i>s</i> ²	<i>s</i>	<i>t</i> _{<i>a/2</i>} (<i>n</i> -1)	$\frac{s}{\sqrt{n}}t_{a/2}(n-1)$	100(1- α)
主界面	8	0.01	-0.13	-0.016	0.0157	0.1258	3.7074	0.4900	99
次界面	3	0.01	1.690	0.563	1.7494	1.3226	5.8409	1.1019	99

2.2 穿孔参数在界面处的变化

对应图 1~5 右侧的界面分布,可知各参数在界面处的瞬时变化。在界面处,穿孔参数均随岩石强度的改变而发生了不同程度的改变。这反映在图 1~3 及图 5 中,则表现为各参数曲线的涨落。涨落的大小反映了界面处岩石强度变化的程度。在图 4 中则表现为曲线斜率的变化。有效轴压力、钻具转速及冲洗压力一般表现为随岩石强度的增大或岩石等级的增高而增大,穿孔速率随岩石强度的增大而降低。

地层界面的识别精度取决于显著性指标的设置,一般以满足工程要求为宜。如果不计地层中小的变化,可以根据图 5 中位移曲线的斜率变化将穿透地层划分三层,第一层为表土层,属充填土,厚度达 7.10 m。其中,在 5.42~6.09 m 处夹杂有混凝土块层。总体上,该段曲线较陡,若不计混凝土层的影响,穿孔速率为 37.02 cm/min;其中,混凝土层中为 9.71 cm/min。第二层深度为-7.10~-19.00 m,为全风化花岗岩及强风化花岗岩,曲线比充填土层明显变缓,穿孔速率为 22.97 cm/min。第三层深度为-19.00~-31.87 m,为中等风化至轻度风化花岗岩,曲线变缓,穿孔速率为 4.93 cm/min。这与香港另一风化花岗岩地层中的结果一致。中等至轻度风化的花岗岩,穿孔速率为 4.79 cm/min。

但是,以上变化还不能反映与界面上岩石强度变化的直接关系。表 4 是各钻孔穿孔参数在岩性界面处的变化值。

表 4 穿孔参数在岩性界面处的相对变化值

Table 4 Relative variation of penetrating parameters on lithology interfaces

<i>H</i> /m	<i>T</i> _e 有效 轴压力	<i>R</i> _b 钻头 转速	<i>F</i> 冲洗 压力	<i>P</i> 穿孔 速率	σ 抗压 强度
-3.93	-1.039	-5.133	-6.430	-0.454	0.600
-5.00	0.088	0.399	-0.303	0.361	0.257
-5.42	0.688	0.439	0.598	-7.516	0.980
-6.09	-2.109	-0.101	0.099	0.884	-47.727
-7.10	0.265	0.303	-1.325	-0.274	0.350
-16.86	0.023	-0.780	0.135	0.486	0.042
-17.87	1.035	0.143	0.154	-1.225	0.959
-19.00	0.532	0.275	0.513	-3.509	0.656
-21.33	0.158	-0.394	-0.375	-2.305	-0.484
-21.51	-0.456	-0.111	-0.132	-0.090	0.686
-21.68	0.332	0.157	0.152	0.217	-0.104

从表 4 可知,在界面上,当岩石强度发生改变时,穿孔参数也会发生相应的改变。其中,在多数情况下,有效轴压力及冲洗压力对界面处岩石强度的变化呈正响应,其正相关率分别为 81.82%和 72.73%。这说明,轴压力及冲洗压力随界面处岩石强度的增大而增大,这与图 1 及图 3 相一致。钻具转速对岩石强度的变化呈负响应,负相关率为 54.54%,正、负响应基本相当。

穿孔速率对岩石强度的变化呈负响应,其负相关率为 81.82%。说明穿孔速率随岩石强度的增大而降低。以上穿孔参数在界面上的变化反映了其随钻进地层岩石强度变化的基本规律。但是,转速与图 2 的监测结果并不一致。从图 2 可知,在强度较小的地层中,转速低;在强度较大的地层中,转速高。但从表 4 可知,在-19.95 m 以上地层,转速对岩石强度的变化既存在正响应也存在负响应;在-19.95 m 以下,均呈负响应。这与表 4 中岩石强度的代表性有关。表中岩石的强度是典型岩芯的强度,并不能完全代表界面处岩石的实际强度。从取样岩芯分析,表 2 中,-5.10,-6.00,-18.90,-19.60,-19.95,-21.07,-24.35 及-25.15 m 等界面处,存在明显的岩芯破碎,这说明界面附近的岩石实际强度很低,在各参数图中,涨落也非常显著。说明各参数对界面处岩石强度的改变非常敏感。同时,也说明,由于受岩石强度均化的影响,导致了表 4 中界面上转速与岩石强度变化关系的不确定。同样,岩石强度均化亦会影响到表 4 中其他穿孔参数在界面处与岩石强度变化的相关性。这是造成表 4 中穿孔参数与界面处岩石强度变化相关性减弱的原因。

此外,旋转钻机一般有两种钻进方式,即低轴压-高转速钻进和高轴压-低转速钻进。在同一场址中,便于比较,应该使用同一种钻进方式。冲洗压力与孔深、排碴状态及岩石中的裂隙发育与否有关。在这次钻进中,由于裂隙不发育,因而表现出较好的规律性。当在钻进过程中,采用多种钻进方式时,亦容易造成转速的不确定性。

3 结 论

(1) DPM 系统能对风化花岗岩地层界面进行可靠的识别,*t*-检验表明,其精度可达 99%。

(2) 有效轴压力、转速、冲洗压力及穿孔速率将随界面处岩石强度的变化而变化。轴压力及穿孔速率

分别与岩石强度成正、负相关,其响应度均达到81.82%。位移曲线的斜率直接反映了穿孔速率的变化,可实现岩土剖面的划分。转速与钻机工作方式有关,冲洗压力在完整性好的地层中,与岩石强度成正相关;但总体来讲,转速与冲洗压力具有不确定性。

(3)穿孔参数对界面上对岩石强度的变化非常敏感,能通过各参数曲线的涨落来反映。但由于地层变化的复杂性,在非常量化参数的作业条件下,要建立各参数与岩石强度变化的数量关系还有待深入研究。

参考文献:

- [1] STEFAN M L. Geological well logs: their use in reservoir modeling[M]. London: Springer, 2000.
- [2] BARR M V, BROWN E T. Instrumented drilling as an aid to site investigation[C]// Proceedings of the 3rd International Congress IAEG, Madrid, 1978.
- [3] PFISTER P. Recording drilling parameters in ground engineering[J]. Journal of Ground Engineering, 1985, **18**(3): 16 - 21.
- [4] PECK J, VYNNE J F. Current status and future trends of monitoring technology for drills[C]// Proceedings of the International Mining Geology Conference. Australia: Kalgoorlie, 1993.
- [5] SCHUNNESSON H. Probing ahead of the face with percussive drilling[J]. Tunnels Tunneling, 1996: 22 - 23.
- [6] PAULO C. On the use of drilling parameters in rock foundations[C]// Geotechnical Site Characterization, Proceedings of the first International Conference on Site Characterization-ISC'98, USA:Atlanta, 1998.
- [7] BRAITHWAITE R. Exploration drilling 2000[J]. Mining Magazine, 2000: 6 - 10.
- [8] HAMELIN J P, HASS G, BURGESS N. Instrumented borehole drilling using ENPASOL system, field measurements in geomechanics[C]// Proceedings of the 5th International Symposium on Field Measurements in Geomechanics- FMGM 99. Singapore, 1999: 577 - 581.
- [9] FORTUNATI F, PELLEGRINO G. The use of electronics in the management of site investigation and soil improvement works: principles and applications. geotechnical site characterization[C]// Proceedings of the First International Conference on Site Characterization-ISC'98, USA: Atlanta, 1998: 359 - 364.
- [10] SUZUKI Y, SASAO H, NISHI K, TAKESUE K. Ground exploration system using seismic cone and rotary percussion drill[J]. Journal of Technology and Design. Architectural Institute of Japan, 1995(1): 180 - 184.
- [11] HOWARTH D F, ADAMSON W R, BERNDT J R. Correlation of model tunnel boring and drilling machine performances with rock properties[J]. Journal of Rock Mechanics Sciences & Geomechanics Abstract. 1986, **23**(2): 171 - 175.
- [12] DE P B, VIOLA G, TOMIOLO A. The use of drilling energy for soil classification[C]// Proceedings of the 2nd International Symposium on Field Measurement in Geomechanics, Kobe, 1988.
- [13] ZACAS M, KAVADAS M, MIHALIS I. The use of recording drilling parameters in rock mass classification[C]// Proceedings of the 8th ISRM Congress, 1995(3): 1121 - 1124.
- [14] GUI M W, SOGA K, BOLTON M D, et al. Instrumented borehole drilling for subsurface investigation[J]. ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2002, **128**(4): 283 - 291.
- [15] 岳中琦, 李焯芬, 罗锦添, 等. 香港大学钻孔过程数字监测仪在土钉加固斜坡工程中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, **21**(11): 1865 - 1690. (YUE Z Q, LEE C F, LAW K T, et al. Use of HKU drilling process monitor in soil nailing in slope stabilization[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, **21**(11): 1685 - 1690.(in Chinese))
- [16] SUGAWARA J, YUE Z Q, THAM L G, et al. Weathered rock characterization using drilling parameters[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2003, **40**(3): 661 - 668.
- [17] TAN Z, CAI M, YUE Z, et al. Application and reliability analysis of DPM system in site investigation of HK weathered granite[J]. J Unvi Sci Technol Beijing, 2005, **12**(6): 441 - 448.