

跨孔声波 CT 技术在花岗岩球状风化体 探测中的应用

钟 宇¹, 陈 健¹, 闵 弘¹, 粟 健², 卢 松², 盛 谦¹, 黄珏皓¹

(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. 中铁西南科学研究院, 四川 成都 610031)

摘要: 花岗岩球状风化体(孤石)是花岗岩风化程度不均产生的残留,直接影响到地铁盾构施工的安全性,高效、准确地探明孤石分布是地铁工程勘察面临的难题。利用自主研发的电火花震源等探测系统和地质专家分析法,在探测区域周边的钻孔中进行震源的发射和声波的接收,根据纵波在孤石和周边地质中具有不同的传播速度等原理,通过对声波初至旅行时的记录和解译,反演成为探测区域的三维声波速度场,直观地表达了探测区域的内部地质构造。以某市地铁隧道孤石调查为实例,验证了该方法的有效性和可靠性。结果显示,跨孔声波 CT 技术能有效地揭示孤石的空间分布,成果图像形象直观,可较好地解决该类地质勘察难题,能够为后续施工提供科学依据。

关键词: 工程地质; 声波 CT; 跨孔; 花岗岩球状风化体; 地铁工程勘察

中图分类号: P 631.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2017)增 1-3440-08

Application of cross-hole sonic computer tomography to detection of spherically weathered granite

ZHONG Yu¹, CHEN Jian¹, MIN Hong¹, SU Jian², LU Song², SHENG Qian¹, HUANG Juehao¹

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. Southwest Research Institute, China Railway Engineering Group Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: Spherically weathered granite (commonly known as the "boulder") is the remnant of a granite body which has been unevenly weathered. Their existence poses a serious operational risk to the subway shield tunnel construction. Efficient and accurate detection of boulder has been a difficult problem in geotechnical investigation for subway shield tunnel. Using self-determined sparker and geology expert analysis method, sonic wave is created and received in the drills around the detection region. By the difference of longitudinal wave's speed in the boulder and other geological body, first arrival time is recorded and explained, and a 3D velocity field of sonic wave is produced by an inversion algorithm, which can describe the geological structure of the detection region. Taking the boulders survey of a certain subway as an example, validity and reliability of this method is verified. The results demonstrate that the cross-hole sonic computer tomography is a very effective technique for "boulder" detection and mapping. Thus, sonic computer tomography can successfully detect similar geological investigation problems

收稿日期: 2016-04-21; **修回日期:** 2016-05-27

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2015CB057905); 中国科学院重点部署项目、百人计划项目(KZZD-EW-TZ-12); 国家自然科学基金资助项目(51409263)

Supported by the National Program on Key Basic Research Project of China(973 Program)(Grant No. 2015CB057905), Key Program of the Chinese Academy of Sciences, One Hundred Person Project of the Chinese Academy of Sciences(Grant No. KZZD-EW-TZ-12) and National Natural Science Foundation of China(Grant No. 51409263)

作者简介: 钟 宇(1988-),男,2010年毕业于华中科技大学土木工程专业,现为博士研究生,主要从事地下空间开发与应用方面的研究工作。

E-mail: qaz8761@163.com

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2016.0407

and provide scientific basis for the follow-up construction.

Key words :engineering geology ;sonic computer tomography ;cross-hole ;spherically weathered granite ;subway engineering investigation

1 引 言

我国南方地区分布着十分广泛的花岗岩地段，花岗岩受构造应力作用产生多组节理并被分割成许多不规则岩块，节理交叉部位产生的棱角遭受的风化作用特别集中，在长期的风化作用下，棱角逐步磨圆，逐渐变为近似球形的岩块^[1]，形成球状风化残留核(俗称“孤石”)。球状风化体是花岗岩地段充分发育和突出的现象，尤其是在硬塑状的花岗岩残积土层、坚硬土状的全风化花岗岩、半岩半土状的强风化花岗岩等地层中^[2]。

球状风化体的分布、大小、形状都具有随机性，且强度一般都在 100 MPa 以上^[3]，与周围岩土体存在较大差异，破坏花岗岩风化剖面的相对均匀性。未探明的孤石对地铁隧道盾构法施工带来重大安全隐患^[2]，盾构机在含花岗岩球状风化体地层掘进时刀盘刀具磨损严重，甚至可能磨穿刀盘，造成地表坍塌或建筑物管线破坏^[4]。

花岗岩球状风化体的产生和分布具有相当的不确定性，难以准确定位，为减少其对盾构隧道工程施工的风险，迫切需要一种快速、准确的探测、定位方法^[5]。

目前，在地铁隧道工程勘察中，对花岗岩球状风化体的勘察主要采用钻探和物探 2 种手段。钻探法只能揭示球状风化体在钻孔经过处的高度和特征，物探可以从更宏观的角度得到球状风化体的空间分布情况，因而得到广泛采用^[6-7]。在各种物探方法中，地质雷达^[8]由于低电阻的潮湿土壤对电磁波有强烈吸收作用，导致探测距离有限，只能探明地下 10 m 内的地层情况。以围岩与被探测地质体之间电阻率的差异为基本前提条件的各种电测法^[9]，定量解释精度不高、勘探深度较小，易受到地形起伏、供电设备等因素的影响。瞬变电磁法^[10]只能得到球状风化体大致的分布区域，无法较为精确地确定其大小和方位。高密度电法^[11-12]在接地条件较差时，沥青道路及各类管道等构筑物往往会放大，造成误判。

目前声波 CT 法多用于地下岩溶溶洞^[13]和煤层采

空区^[14]的探测，取得了较好的结果，但用于地铁隧道孤石探测的研究较少。本文采用自主研发的跨孔声波 CT 层析成像探测及地质专家系统分析系统，搭配自主研发的高能电火花震源，通过在接收端接收震源发出的声波，记录并解译出各声波的初至旅行时，反演成为探测区域的声波三维速度场，直观地反映探测区域内部地质构造。这种方法对解决一般物探方法探测范围不足、解释精度不高、易受环境干扰等限制问题有较大的帮助作用，能够更为有效地探测出花岗岩球状风化体的空间分布情况，为工程设计和施工提供准确、可靠的地质资料。

2 层析成像探测技术

跨孔声波 CT 层析成像探测是一种地下物探方法，其原理是：借助医学界 X 射线断层扫描的基本手段，通过在井下不同位置进行人工震源的激发和接收，采集弹性波各种震相的运动学(走时、射线路径)和动力学(波形、相位、振幅、频率)资料，并结合其相关物理力学性质，采用射线走时和振幅来重构地下介质的波速衰减系数的场分布，通过像素、色谱、立体网络的综合展示，直观反映探测区域的内部结构。

在假设地下介质为均匀、绝对弹性、各向同性介质的前提下，纵波传播速度如下：

$$v_p^2 = \frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)} \quad (1)$$

式中： v_p 为纵波传播速度， E 为杨氏弹性模量， μ 为泊松系数， ρ 为密度。

由于不同岩土体的弹性参数不同，纵波的传播速度也不同，不同风化程度的岩石具体波速范围见表 1。当某条射线通过目标地质体时，将产生传播时差，在目标地质体的边缘其传播波形也会发生变化。当有多条相互交叉的射线网络时，每条射线都会在其通过目标地质体边缘时产生传播时差，借助多条射线之间的相互约束，可以反演确定目标地质体的边缘在空间的位置情况。

Radon 变换^[15]是 CT 技术的主要理论基础，所实现的具体反演方法如下：

表 1 岩石风化程度分类的参考指标

Table 1 Reference indexes for classification of rock weathering degree

岩石类别	风化强度	压缩波速度/(m·s ⁻¹)	波速比	风化程度
硬质岩石	未风化	> 5 000	0.9 ~ 1.0	
	微风化	4 000 ~ 5 000	0.8 ~ 0.9	0.9 ~ 1.0
	中风化	2 000 ~ 4 000	0.6 ~ 0.8	0.8 ~ 0.9
	强风化	1 000 ~ 2 000	0.4 ~ 0.8	0.4 ~ 0.8
	全风化	500 ~ 1 000	0.2 ~ 0.4	< 0.4
软质岩石	残积土	< 500	< 0.2	
	未风化	> 4 000	0.9 ~ 1.0	
	微风化	3 000 ~ 4 000	0.8 ~ 0.9	0.9 ~ 1.0
	中风化	1 500 ~ 3 000	0.5 ~ 0.8	0.8 ~ 0.9
	强风化	700 ~ 1 500	0.3 ~ 0.5	0.3 ~ 0.8
	全风化	300 ~ 700	0.1 ~ 0.3	< 0.3
	残积土	< 300	< 0.1	

设探测区域内共有 m 条射线，第 i 条声波射线的传播路径为 L_i ，其旅行时间为 T_i ，由 Radon 公式：

$$T_i = \int_{L_i} \frac{ds}{V(x, y)} = \int_{L_i} S(x, y) ds \quad (2)$$

式中： $V(x, y)$ 为两孔间的速度分布， $S(x, y) = 1/V(x, y)$ 为慢度。将探测区域离散成 $p \times q = n$ 个规则网格(见图 1)，在速度场变化不大的情况下，每个网格单元内的速度 V_i 是常数，其倒数为 S_i 。这样，式(2)可以写成：

$$T_i = \sum_{j=1}^m a_{ij} S_j \quad (3)$$

式中： a_{ij} 为第 i 条射线穿过第 j 个网格的长度； $j = 1, 2, \dots, n$ ； $i = 1, 2, \dots, m$ 。综合 m 条射线，就得到未知量为 S_j 的 n 个方程，形成一个线性方程组：

$$T = AS \quad (4)$$

式中： $A = (a_{ij})_{m \times n}$ 为距离矩阵， $T = (T_i)_{m \times 1}$ 为旅行时

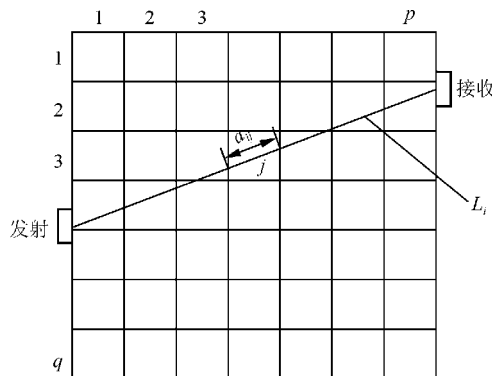


图 1 探测区域网格划分

Fig.1 Meshes of detection area

间向量， $S = (S_i)_{n \times i}$ 为慢度向量。通过求解式(4)就可以得到离散慢度分布，相应的离散速度分布也就可以求得。

按上述方法求得每个网格单元的声波速度值，采用适当的平滑插值技术绘制出声波速等值线图，从而实现探测区域的速度场反演成像。

3 CT 探测的工作方法

3.1 探测系统

探测系统包括硬件及软件两部分，系统硬件包括震源(见图 2)、发射机、集成高灵敏度检波器、HSP 地质预报系统、便携计算机等。



图 2 电火花震源及 HSP 地质预报系统

Fig.2 Sparker and HSP geological prediction system

目前常用的震源有：炸药震源、空气枪震源、电火花震源等。可根据不同的地质条件、周边环境和实际需要选用。

本文采用自主研发的高能电火花震源 ZDF-3 型，应用高频大功率发射技术将电容器储存的高压电能在一瞬间通过水介质释放，在水中产生压力作用于大地而形成声波。ZDF-3 型电火花震源的基本参数为：电容 453 uF，电压 7 000 V，能量超过 10 000 J，充电时间 1 ~ 2 min，重量 35 kg，体积 45 cm×35 cm×46 cm，地层穿透大于 200 m；单道主频为 0 ~ 300 Hz，脉冲衰减时间相对稳定，一致性好。图 3 为发射电压为 $(1.0 + nh)$ kV ($n = 1, 2, \dots, 7$ ； $h = 0.2$) 时的振动波形的合成图。

3.2 数据采集方法

跨孔声波 CT 层析成像定位探测系统采用共激发点数据采集方法，即单点激发、多点接收的观测方式采集声波数据，具有采集速度快、效率高的特点。如图 4 示，在两钻孔间布置 CT 探测剖面，手动打开放电开关，电火花震源激发声波穿过地层到达接收孔，集成放大器的高灵敏度接收传感器拾取

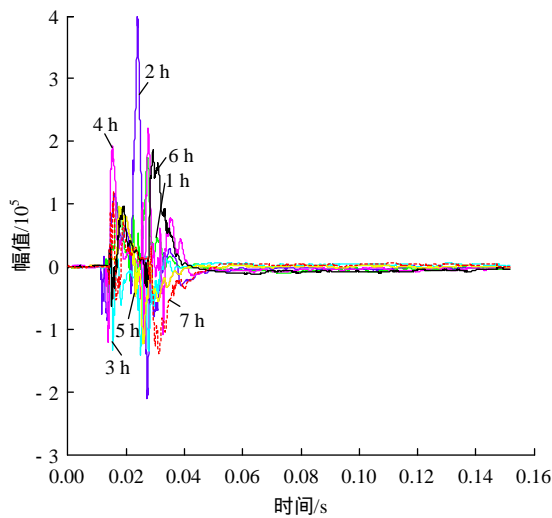


图 3 多级发射电压振动波形合成图

Fig.3 Waveform synthesis of multi-level emitter voltage

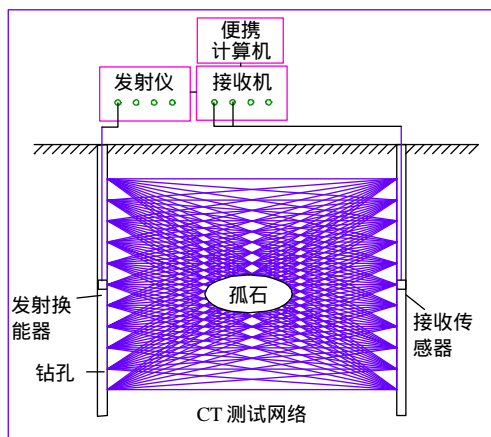


图 4 孤石 CT 层析成像探测系统布置及工作方式

Fig.4 Computer tomography system and working method

信号送入接收机，连接接收机的计算机自动保存每一个信号数据。

具体探测过程如下：

(1) 确定有效的探测深度区间。查明探测剖面两孔可用深度，确定有效的探测深度区间。

(2) 将电火花震源发射端置于发射孔的探测区间最深处，接收探头放置于接收孔内探测区间深度范围。

(3) 在发射端激发电火花震源发射声波信号后，上升 0.5 m。保持接收端不动，重复激发并上升，待发射端上升到探测区间顶部后，接收探头上升 1 m(以 2 个接收探头为例)，发射端重新置于探测区间最深处。

(4) 重复上述接收过程，直至接收探头上升到探测区间顶部，扫描全部探测剖面。

3.3 探测数据分析

若在整个剖面的探测过程中，接收端共移动过 l 个等间距位置，在接收端每个位置处震源共发射 k 次，则一共得到 $l \times k$ 条声波射线，据此信息进行反演，即可得到该探测剖面的声波速度场分布图像。具体反演流程如图 5 所示。

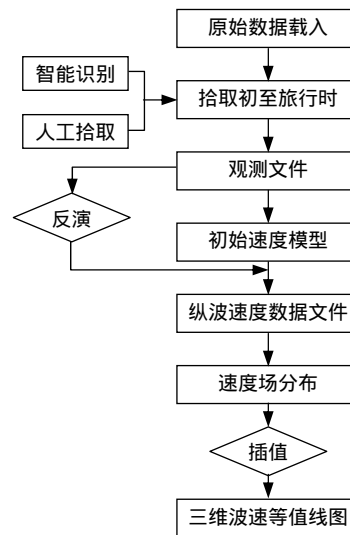


图 5 反演流程示意图

Fig.5 Process of inversion

初至旅行时是层析反演工作中最重要的基础数据，与层析精度有直接的关系。初至旅行时拾取可以在原始数据读取软件界面上用鼠标来拾取，或通过开发应用程序自动拾取，目的就是准确找到起跳点，建立观测文件。在实际拾取中，最好采用计算机与人工相结合的方式，先利用计算机自动拾取程序完成初步拾取工作，然后再进行人工修改与完善，经多次甄别后完成。

4 应用实例

4.1 工程概况

东南沿海某市轨道交通 1 号线是该市公共交通网络的主动脉线路，一期工程线路长度为 30.26 km，全线共设置车站 24 座，其中地下车站 23 座，高架站 1 座，区间隧道总长度 25.00 km，其中盾构段 11.23 km，矿山法 6.89 km。隧道穿越地区多为花岗岩地层，根据初勘结果，花岗岩球状风化体(孤石)钻孔的见孔率为 18%，孤石的存在对地铁隧道盾构、矿山法施工均会造成一定的施工风险及困难，应提前采取措施探明孤石的大小、方位等分布情况。

为此，选择某区间盾构隧道长约 75 m 区域

(YDK24+045.6 ~ YDK24+121.4)作为试验段开展孤石探测、定位试验工作。试验采用前述跨孔声波 CT 层析成像探测仪,仪器平面绝对误差小于 2 m,高程绝对误差小于 1.5 m。

4.2 探测钻孔及剖面

针对普查(瞬变电磁法探测)揭示的重点区域,根据探测目的和现场实际情况,沿隧道走向在隧道分布范围内共布设 9 个钻孔。在实际探测过程中,经过比较,优先选择了 6 个探测剖面。钻孔和探测剖面分布如图 6 所示。

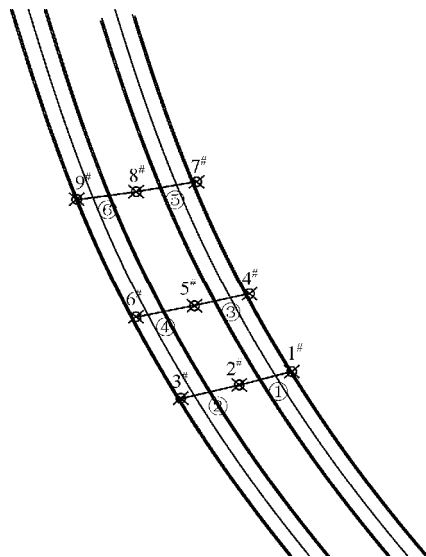


图 6 探测剖面分布图

Fig.6 Distribution of detection area

经现场实际测试,各孔可用深度如表 2 所示。各剖面情况介绍如表 3 所示

表 2 钻孔实际深度

Table 2 Depth of drilling

钻孔编号	可用深度/m	钻孔编号	可用深度/m
1#	23	6#	18
2#	23	7#	23
3#	23	8#	23
4#	22	9#	19
5#	23		

表 3 探测剖面信息表

Table 3 Information of detection sections

剖面号	发射孔编号	接收孔编号	扫描深度/m	孔间水平距离/m
1#	2#	1#	- 23 ~ - 13	13.15
3#	2#	3#	- 23 ~ - 13	12.25
4#	5#	4#	- 22 ~ - 13	11.40
6#	5#	6#	- 18.5 ~ - 13	10.20
8#	7#	8#	- 23 ~ - 13	15.00
9#	8#	9#	- 18.5 ~ - 9	8.70

本次声波 CT 接收点间距设置为 0.5 m,共 2 个检波器串联同时工作,电火花震源点距为 0.5 m。

4.3 探测结果与解释

探测系统自动记录上述 6 个剖面的孤石探测结果,使用自主编写的解译软件 HSP 水平声波剖面法地质预报分析软件(见图 7)解译原始记录数据并剔除坏点,最终生成 CT 扫描剖面波速三维等值线图。

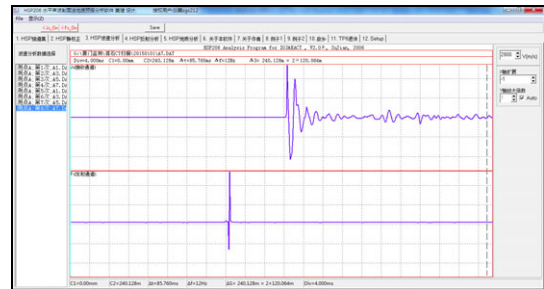
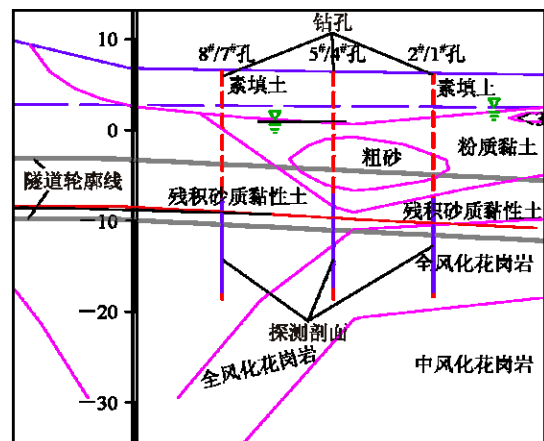


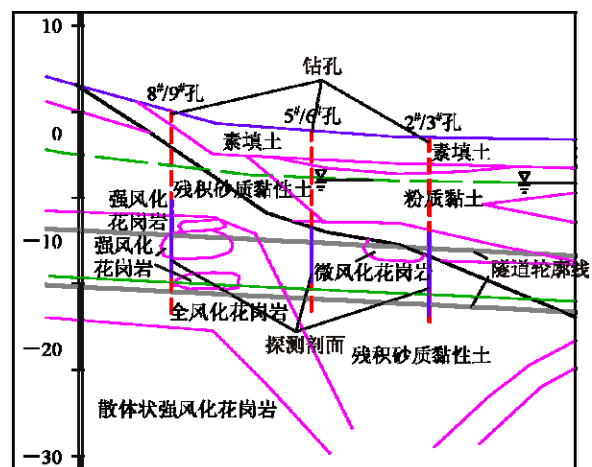
图 7 HSP 水平声波剖面法地质预报分析软件

Fig.7 HSP geological prediction analysis software

此外,结合地质勘察报告可知各剖面中波速异常区域所处的地层(见图 8)。



(a) 左线剖面



(b) 右线剖面

图 8 剖面及其地质情况

Fig.8 Sections and geological informations

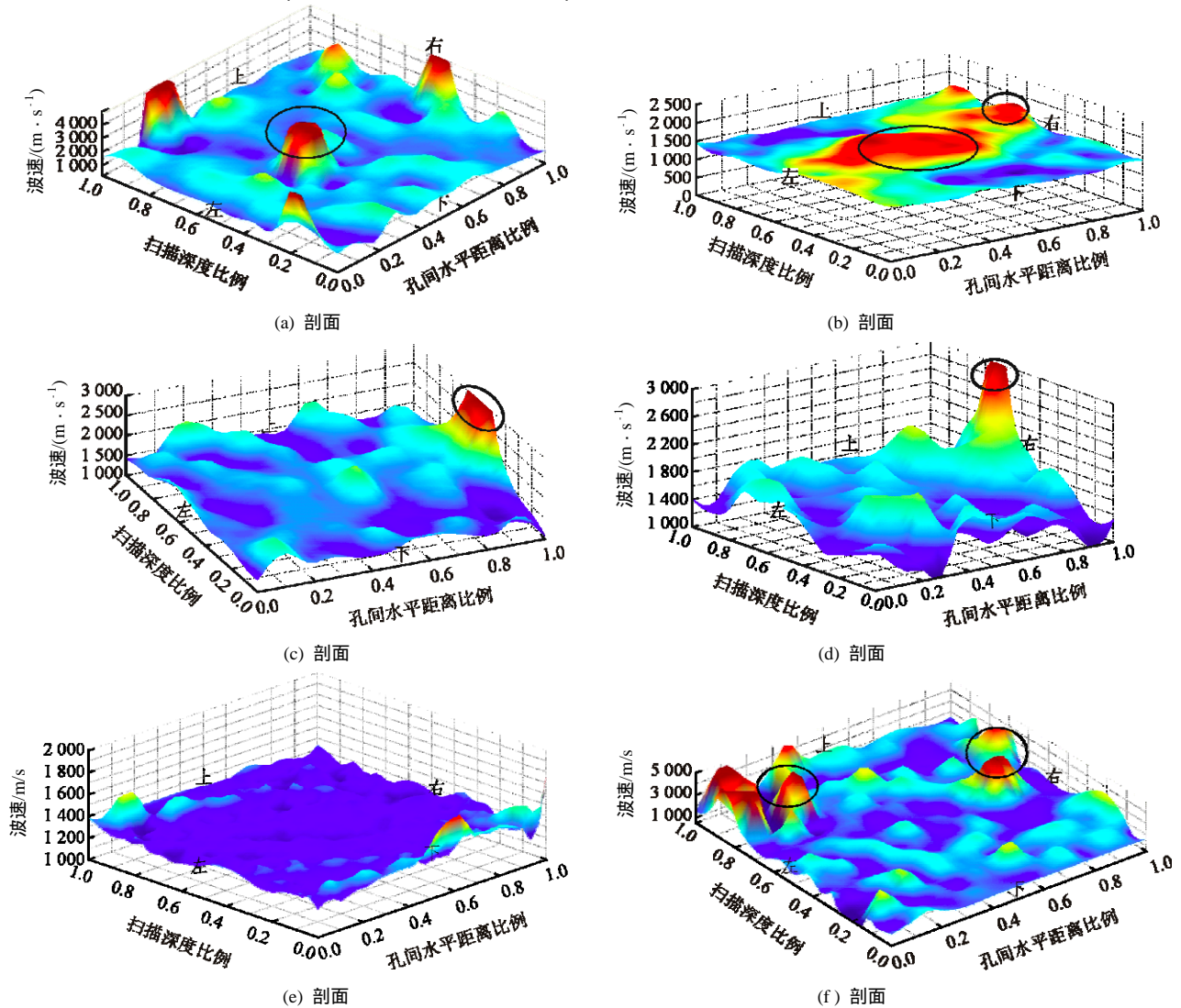
所有探测剖面的波速三维等值线图如图 9 所示。

关于探测剖面的解释以剖面 ③ 为例：由剖面地质波速三维等值线图可以看出，图中红色区域表示波速异常区，深度约为 -18 ~ -20 m，由地质勘察报告可知，所测深度范围(-23 ~ -13 m)位于残积砂质黏性土及全风化花岗岩地层(见图 8(a))，该波速异常区位于全风化花岗岩地层，且其波速与剖面最大波速之比为 0.9 ~ 1.0，表明其风化程度非常低，

可以认为该波速异常区为中、微风化花岗岩球状风化体，且穿越其中间部位。

在该异常区域上方(-13 ~ -18 m)岩土体波速为 1 000 ~ 1 500 m/s，与残积砂质黏性土地层的波速较吻合。在该异常区域下方(-18 ~ -23 m)岩土体波速为 1 500 ~ 2 500 m/s，与全风化花岗岩地层的波速较吻合。

其余剖面的解释与此类似，所有剖面的解释结果如表 4 所示。



注：黑色圆圈内区域为各剖面的波速异常区

图 9 波速三维等值线图

Fig.9 3D contour map of wave velocity

表 4 各剖面波速异常区信息表

Table 4 Information of anomaly area of wave velocity in all sections

剖面	深度/m	与钻孔距离/m	与剖面最大波速之比	所处地层	与隧道位置关系
③	-18 ~ -20	距 1#孔 2.6 ~ 7.8	0.9 ~ 1.0	全风化花岗岩	隧道下方可能与隧道相交
	18, 17	距 3#孔 3.6 ~ 7.2	0.8 ~ 0.9	残积砂质黏性土	隧道内部
④	15	距 4#孔 5.7 ~ 6.8	0.8 ~ 1.0	全风化花岗岩/残积土	隧道下方可能与隧道相交
⑤	15 ~ 16	距 5#孔 1.0 ~ 3.0	0.9 ~ 1.0	残积砂质黏性土	隧道内部
⑥	未发现				
⑦	11, 12	距 9#孔 0.5 ~ 2.2	0.9 ~ 1.0	全风化花岗岩	隧道内部

剖面 波速异常区处的地质钻孔部分岩芯如图 10 所示, 经勘探验证本次声波 CT 探测精度较高, 对孤石位置的判断较准确, 为后续孤石处理提供了很好的依据。

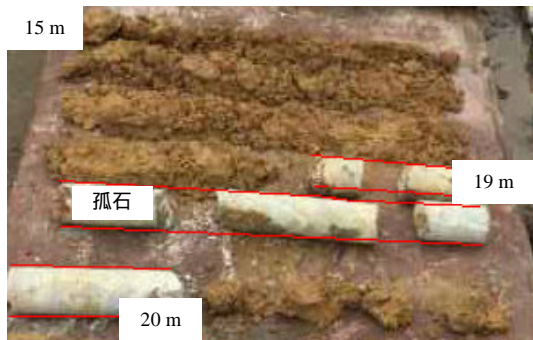


图 10 钻孔岩芯图

Fig.10 Core graph of drilling

本文解释的花岗岩球状风化体(孤石)大多位于全风化花岗岩和残积砂质黏性土地层中, 孤石的波速与周边地层的波速有较大差异, 在声波速度等值线图中波速异常区代表的孤石与周边围岩有清晰的物理边界。但即便如此, CT 探测法还是难以精确确定孤石的边界, 其主要原因是探测剖面的三维波速等值线图是由各个射线数据经加权内插得到, 孤石边界被光滑处理。孤石边界能否精确标定, 与探测时穿越孤石区域的射线条数有密切关系, 若孤石越靠近探测剖面中心位置, 用于确定其边界的数据就越多, 其边界也就越易于标定。

此外, 实际探测过程中, 工作区域周边的工程机械作业、高压电线等环境因素都会给探测数据带来干扰。以本文方法标定的孤石误差范围限制在平面绝对误差小于 2 m, 高程绝对误差小于 1.5 m, 这对实际盾构隧道掘进的地质预警工作仍具有非常重要的意义。

5 结论与建议

将跨孔声波 CT 层析成像探测方法用于地铁隧道工程的花岗岩球状风化体(孤石)探测工作, 弥补了地质雷达、瞬变电磁法等方法在孤石探测方面的不足之处。本文利用自主研发的新型高能电火花震源, 配合高频瞬时放电技术激发声波, 在探测区域周边的钻孔中分别进行声波发射和接收, 利用 HSP 地质预报系统接收并自动存储探测结果, 将自主编写的解译软件——HSP 水平声波剖面法地质预报分

析软件解译原始记录数据, 计算机智能拾取声波初至旅行时, 并经过人工反复复核后进行速度场反演, 最终将探测成果表示为探测区域的三维波速等值线图, 形象、直观地描绘了孤石的空间位置分布和形状大小。最后经勘察钻孔验证, 表明跨孔声波 CT 技术在解决这类特殊的工程疑难问题上有着良好的应用效果, 为地铁隧道工程中的孤石定位提供了一种新的方法。

在实际应用中, 有以下几个问题需要注意:

(1) 为确保探测精度, 应尽可能使孤石所有边界都有足够的射线穿过, 因此应保证探测目标区域应位于两钻孔之间的中部区域。

(2) 井深不应小于两井间距, 震源间距和接收点距不宜过大, 应小于孤石的线性尺度。

(3) 应在发射孔和接收孔内打入竖直的塑料套管保护钻孔, 并在钻孔内灌满水, 保证激发震源、接收器与井壁地质体的耦合良好。在探测工作开始时须测量并斜。

(4) 探测区域边缘部位, 有可能会因为数据稀疏而使三维波速等值线图出现畸变, 需要认真确认此处是否存在孤石。

(5) 初至旅行时的拾取是直接决定孤石探测精度的关键, 最好使用计算机智能识别和人工拾取相结合的方式, 反复确认。

参考文献(References):

- [1] 冯涛. 武广客运专线韶花段球状风化花岗岩工程特性研究[博士学位论文][D]. 成都:西南交通大学, 2007.(FENG Tao. Research on engineering properties of spheroidal weathering granite in Shaoguan-Huadu section of the Wuhan-Guangzhou high-speed railway[Ph. D. Thesis][D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007.(in Chinese))
- [2] 杨雄飞, 袁鸿. 广州地铁 3 号线孤石地层的探测及处理[J]. 建筑机械化, 2011, 32(6): 73-76. (YANG Xiongfei, YUAN Hong. The detecting and measure of the boulder layer at the site of Guangzhou metro line 3[J]. Construction Mechanization, 2011, 32(6): 73-76.(in Chinese))
- [3] 谢壮. 花岗岩球状风化体地段地铁盾构施工风险分析与控制[硕士学位论文][D]. 长沙:中南大学, 2010.(XIE Zhuang. Risk analysis and control of metro shield construction in spherical weathering granite[M. S. Thesis][D]. Changsha: Central South University, 2010.(in Chinese))
- [4] 杨书江. 厦门地铁复杂地质条件下盾构法施工技术探讨[J]. 隧道

- 建设, 2014, 34(8): 765-770.(YANG Shujiang. Shield tunneling technologies for Xiamen metro under complex geological conditions[J]. Tunnel Construction, 2014, 34(8): 765-770.(in Chinese))
- [5] 李建强, 冯 涛, 何 平. 花岗岩球状风化综合勘察技术研究[J]. 铁道建筑, 2008, (10): 73-75.(LI Jianqiang, FENG Tao, HE Ping. Study on integrated investigation techniques of spherically weathered granite[J]. Railway Engineering, 2008, (10): 73-75.(in Chinese))
- [6] 刘宏岳. 地震反射波 CDP 叠加技术在海域花岗岩孤石探测中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2010, 7(6): 714-718.(LIU Hongyue. Marine seismic reflection for the detection of the weathering residues in the granite[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2010, 7(6): 714-718.(in Chinese))
- [7] 徐佩芬, 侍 文, 凌苏群, 等. 二维微动剖面探测“孤石”: 以深圳地铁 7 号线为例[J]. 地球物理学报, 2012, 55(6): 2 120-2 128.(XU Peifen, SHI Wen, LING Suqun, et al. Mapping spherically weathered “boulders” using 2D microtremor profiling method: a case study along subway line 7 in Shenzhen[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(6): 2 120-2 128.(in Chinese))
- [8] 桑松龄. 地质雷达检测在无锡地铁不良地质段的应用[J]. 铁道建筑技术, 2015, (4): 78-80.(SANG Songling. Application of GPR in unfavorable geological section of Wuxi Metro[J]. Railway Construction Technology, 2015, (4): 78-80.(in Chinese))
- [9] 李建强. 武广客运专线韶关至花都段球状风化花岗岩综合勘查方法及勘探技术研究[硕士学位论文][D]. 成都: 西南交通大学, 2006.(LI Jianqiang. Research on compositive reconnaissance means and technology about spherical weathering granite in Shaoguan-Huadu section of the Wuhan-Guangzhou special passenger transport railway. [M. S. Thesis][D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006.(in Chinese))
- [10] 党如姣. 孤石的物探探测方法[J]. 隧道建设, 2012, 32(增 2): 56-60.(DANG Rujiao. Geophysical prospecting method for boulder[J]. Tunnel Construction, 2012, 32(Supp.2): 56-60.(in Chinese))
- [11] 张 亮, 王 蔚, 汤洪志, 等. 高密度电法和井间电磁波 CT 法在花岗岩球状风化体探测中的综合应用[J]. 工程地球物理学报, 2015, 12(1): 40-44.(ZHANG Liang, WANG Wei, TANG Hongzhi, et al. The application of the combination of high-density electrical method and electromagnetic CT to detect granite spherical weathering body[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2015, 12(1): 40-44.(in Chinese))
- [12] 李红立, 张 华, 汪传斌. 跨孔超高密度电阻率法在花岗岩球状风化体勘探中的试验研究[J]. 工程勘察, 2010, 38(8): 88-92.(LI Hongli, ZHANG Hua, WANG Chuanbin. Experimental study on the cross-hole ultra-density resistivity method used in the exploration for the spherical lightly-weathered granite[J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 2010, 38(8): 88-92.(in Chinese))
- [13] 王千年, 车爰兰, 郭 强, 等. 孔内声波 CT 技术在软土地区地下溶洞调查中的应用[J]. 西北地震学报, 2011, 33(增 1): 335-339.(WANG Qiannian, CHE Ailan, GUO Qiang, et al. Technology of borehole sonic computer tomography and its application survey of underground cave[J]. Northwestern Seismological Journal, 2011, 33(Supp.1): 335-339.(in Chinese))
- [14] 程学丰, 刘盛东, 刘登宪. 煤层采后围岩破坏规律的声波 CT 探测[J]. 煤炭学报, 2001, 26(2): 153-155.(CHENG Xuefeng, LIU Shengdong, LIU Dengxian. Sound-wave CT detection for failure patterns of surrounding rock after mining[J]. Journal of China Coal Society, 2001, 26(2): 153-155.(in Chinese))
- [15] 陈宗刚, 李平宏, 张建成, 等. 声波层析成像在特大涌水地质区域探测中的应用[J]. 物探与化探, 2013, 37(1): 180-185.(CHEN Zonggang, LI Pinghong, ZHANG Jiancheng, et al. The application of sound wave computerized tomography to the geological regional detection in an extra large water gushing channel[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2013, 37(1): 180-185.(in Chinese))