

# 掌子面超前岩体挤出变形量测新技术及其应用

沈佳锋<sup>1</sup>, 姚永强<sup>1</sup>, 闵晓阳<sup>1</sup>, 陈英杰<sup>1</sup>, 郑浩<sup>1</sup>, 赖允瑾<sup>2</sup>

<sup>1</sup>浙江交工路桥建设有限公司, 浙江 杭州

<sup>2</sup>同济大学地下建筑与工程系, 上海

Email: 617026641@qq.com, laiyunjn@126.com

收稿日期: 2021年8月28日; 录用日期: 2021年9月22日; 发布日期: 2021年9月29日

## 摘要

掌子面超前岩体挤出变形是判断隧道掌子面是否稳定的重要指标, 因此, 掌子面超前岩体挤出变形的量测技术的研发十分重要。目前国内外所用的传统的多点位移计技术和专用的滑动伸长计技术都存在缺点: 前者监测寿命短, 成本高; 后者价格昂贵, 维护困难。本文介绍了一种基于磁感应原理的掌子面超前核心岩体挤出变形的量测新技术。这种新技术采用磁环作为埋设元件, 磁感应仪作为感测仪表, 可以随掌子面推进连续进行前方核心岩体的挤出变形量测, 其优点是: 成本低, 效果好。文章最后介绍了它在浙江省奇坑隧道新意法试验段的应用情况, 应用结果表明其性能和效果很好, 值得推广使用。

## 关键词

新意法, 山岭隧道, 掌子面超前岩体, 挤出变形量测技术, 磁感应原理

## A New Technology and Its Application in the Measurement of Tunnel Front Rock's Extrusion

Jiafeng Shen<sup>1</sup>, Yongqiang Yao<sup>1</sup>, Xiaoyang Min<sup>1</sup>, Yingjie Chen<sup>1</sup>, Hao Zheng<sup>1</sup>, Yunjin Lai<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ZCCC Road and Bridge Construction Co., Ltd., Hangzhou Zhejiang

<sup>2</sup>Geotechnical Engineering Department, Tongji University, Shanghai

Email: 617026641@qq.com, laiyunjn@126.com

Received: Aug. 28<sup>th</sup>, 2021; accepted: Sep. 22<sup>nd</sup>, 2021; published: Sep. 29<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

Front rock's extrusion is an important index for determining whether the workface is stable or

文章引用: 沈佳锋, 姚永强, 闵晓阳, 陈英杰, 郑浩, 赖允瑾. 掌子面超前岩体挤出变形量测新技术及其应用[J]. 土木工程, 2021, 10(9): 925-934. DOI: 10.12677/hjce.2021.109104

not. Therefore, the research and development of measuring technology for extrusion become increasingly important. From home to abroad, present used measuring technologies, which can be classified as traditional multi-point extensometer and sliding extensometer, all have their shortcomings: the former has short service life span and is expensive while the latter is both expensive and fragile. This paper introduces a new technology based on magnetism, in which the magnetic rings are measuring cells and the graduated rod is the measuring tool. This technology makes the measured cells long-lived and can remain until the workface being excavated. Its significant advantage is cost-effective and quality-reliable. In the end, this paper has displayed an application of this new technology in the tunneling of NITM trial section of Qikeng tunnel, which is located in Zhejiang Province, and the application has showed that this new technology has reaped good effect and is recommendable for other projects.

## Keywords

New Italian Tunneling Method (NITM), Mountain Tunnel, Frontcore Rock, Measurement Technology of Extrusion, Principle of Magnetic Induction

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

众所周知，隧道开挖是空间力学行为。隧道掘进时，不但隧道掌子面后方围岩会发生收敛变形和拱顶沉降，掌子面前方岩体也会发生收敛变形和挤出变形，如图 1 所示。对于全断面开挖或大断面分部开挖的隧道，掌子面超前岩土体的挤出变形是判断隧道掌子面是否稳定的重要指标，也是掌子面超前岩体加固设计的重要依据。但是，因为掌子面随开挖施工不断更新，要持续进行掌子面超前岩体挤出变形的量测，技术上还存在很大的困难，这也严重制约着全断面开挖技术的推广应用，特别是新意法技术的推广应用。因此，开展掌子面超前岩土体挤出变形量测技术的研发，对于推动新意法的广泛应用具有很大的现实意义。

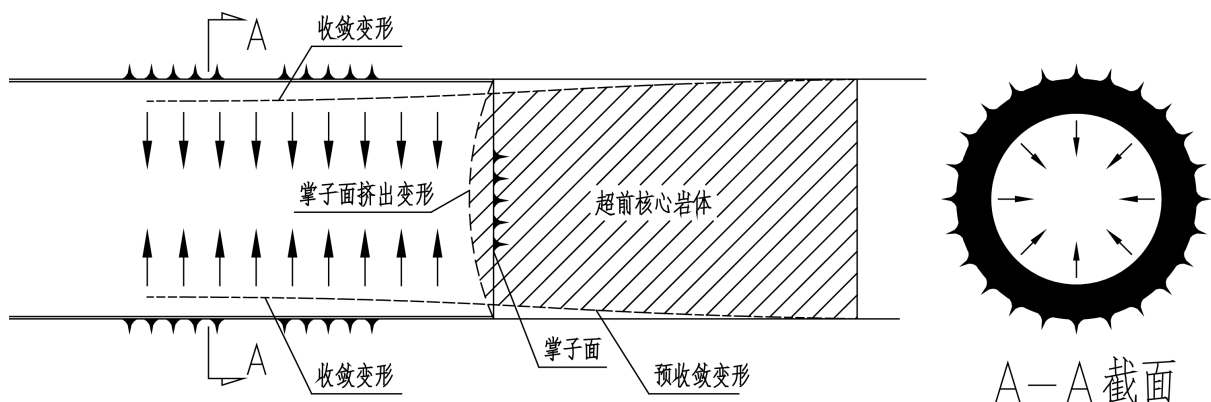


Figure 1. Deformation of tunnel after excavation

图 1. 隧道开挖后的变形状态示意图

目前，国际上掌子面超前岩体挤出变形的量测技术主要有两种：滑动式伸长计技术和多点位移计技

术。1970年代后期开始,伴随着意大利学者 Lunardi 教授提出的新意法(NITM) [1],意大利 SISGEO 公司推出了 T-REX 滑动测微计[2],目前它已被广泛应用到新意法施工的隧道工程中。针对 T-REX 滑动测微计使用上存在的问题, Thut 等人(2006)又作了改进,推出了反向头伸长计[3],如图 2 所示。反向头伸长计的量测头(即量测固定端)位于深层位置(假定为不动点),测头上配置各测点的数据记录装置,并配备导线(穿过电缆管)和外部进行数据通信。反向头伸长计的优点是:量测固定端埋置在距离掌子面的最远处,因此可以在开挖过程中连续进行量测,且对开挖工序干扰少;其缺点是成本高,维护困难。

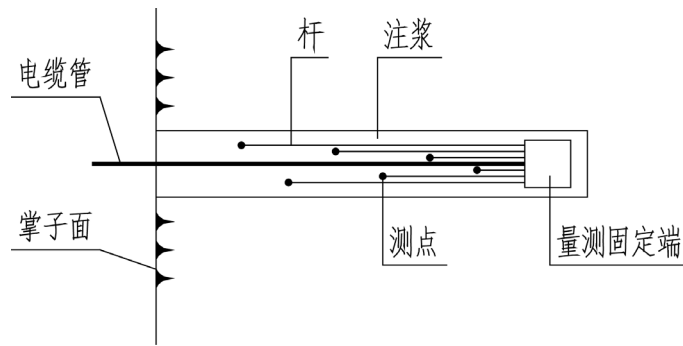


Figure 2. Schematic diagram of the reverse-head-extensometer  
图 2. 反向头伸长计构造示意图

多点位移计在国内用得较多[4],其构造如图 3 所示。多点位移计的突出缺点是只能针对一个掌子面进行量测,一旦掌子面挖除,即宣告量测结束。因而监测点寿命短,监测信息少,监测成本高。

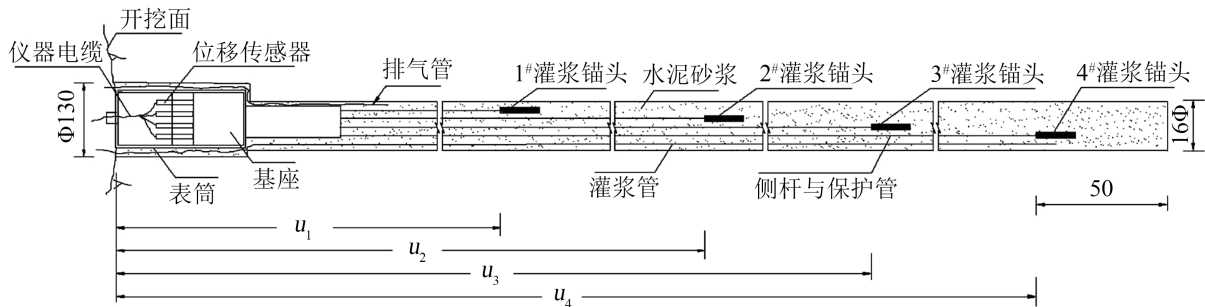


Figure 3. Schematic diagram of the multi-point extensometer  
图 3. 多点位移计构造示意图

针对目前现行的掌子面超前岩体挤出变形量测技术的缺点,依托浙江省 G25 长深高速奇坑隧道的新意法施工,作者团队研发了一种新型的掌子面超前岩体挤出变形量测技术——基于磁感应原理的掌子面超前岩体挤出变形量测技术。这项技术的优点是:获取量测信号直接、测点传感器寿命长、成本低廉、可随掌子面推进持续量测。这项技术在依托工程中得到了成功的应用,并且申请了发明专利。

## 2. 基于磁感应原理的掌子面超前岩体挤出变形量测技术

### 2.1. 掌子面超前岩体挤出变形量测的关键技术问题

和隧道拱顶沉降、洞周收敛变形的量测相比。掌子面超前岩体挤出变形量测在量测环境上有很大不同,掌子面后方的拱顶沉降、洞周收敛变形在量测时,基准面基本固定,而对掌子面超前岩体挤出变形量测来说,量测的参考面即掌子面随着开挖不断改变,而且掌子面爆破开挖时爆炸冲击波对传感元件有

巨大的损坏作用。

因此，超前岩体挤出变形的量测需要解决如下的关键技术问题：1) 采用哪种传感元件可以得到与围岩变形一致的位移信息；2) 如何在掌子面不断推进的情况下持续进行连续量测；3) 如何确保传感元件的成活。

目前流行的掌子面超前岩体挤出变形量测技术如滑动式伸长计技术和多点位移计技术，要么采用应变计原理制作，要么采用振弦式应力计原理制作，都采用内置导线输出电信号。由于导线特别容易因为爆破开挖而损毁，应变计和应力计也容易因爆破振动或地下水浸泡失效，均存在传感元件寿命短，成活率不高的技术问题。此外，对于多点位移计技术，因为基准点只有一个，即掌子面，基准点一旦破坏，量测终止，所以无法实现随掌子面推进而持续量测的目标。

借鉴软土地层分层沉降仪量测技术的原理[5]，本文作者团队开发了基于磁感应原理的掌子面超前岩体挤出变形量测技术，解决了上述关键技术问题：将磁环作为位移传感器通过水泥砂浆和围岩整体浇筑，确保了磁环和围岩位移协调；磁环磁力线不受爆破振动影响确保其量测保持成活可靠；外置量测探头和掌子面坐标跟踪量测，确保了掌子面推进时的连续量测。

## 2.2. 基于磁感应原理量测技术的量测原理

电磁学理论指出：通电导线在磁场中运动会发生电磁感应现象。如果把通电导线制成传感器探头、以永久性磁铁制成磁环，那么将传感器探头穿过磁环时，会发出电磁感应信号，将它记录下来的仪器就是磁感应仪。基于磁感应原理，我们开发出磁环位移量测计，如图4所示。

磁环位移量测计的量测原理如下：如图4，在岩体中埋设若干磁环1，每次量测时将磁感应仪探头7通过磁环，会发生磁感应现象，此磁感应信号通过探头导线传至磁感应仪10，磁感应仪立即显示，同时发出声光报警。此时测杆标尺9上对应的刻度数值，就是该磁环距离孔口的相对位置。如果测出了孔口坐标，容易算出磁环坐标值。每次测量值与前次量测值相减即为该测点的水平位移。

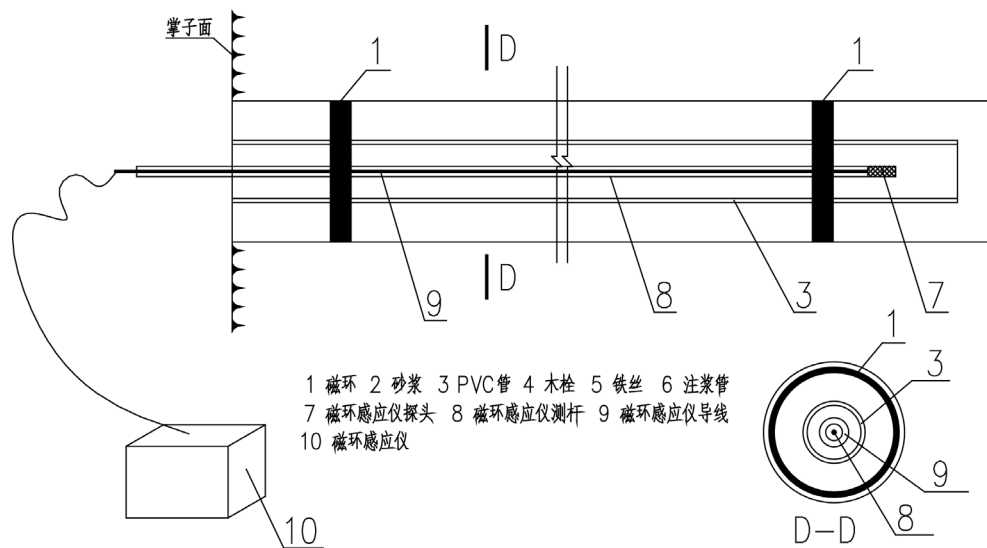


Figure 4. Schematic diagram of the magnetic extensometer  
图4. 磁环位移量测计示意图

隧道掌子面挤出变形的计算方法如图5所示。先通过全站仪量测到孔口的坐标，如何采用磁环感应仪量测磁环与掌子面的相对距离，算出磁环的绝对坐标。计算磁环的位移，即得到磁环处岩体的挤出变形。

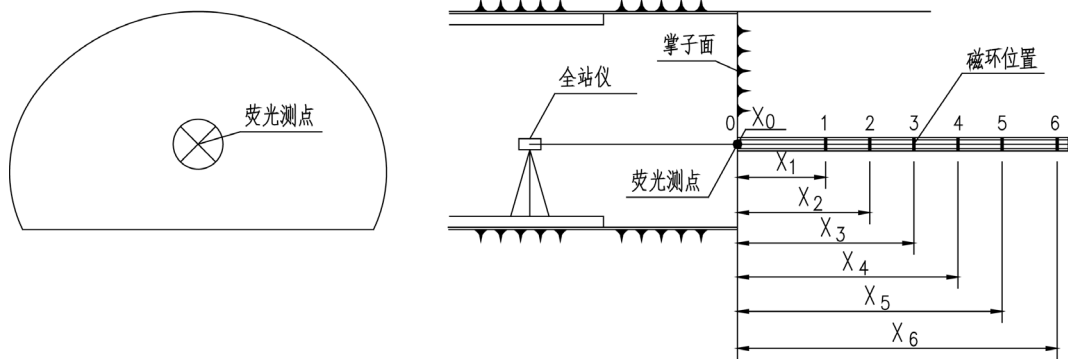


Figure 5. Schematic diagram of the extrusion measurement of the front core rock

图 5. 掌子面前方深部岩体挤出变形量测示意图

掌子面前方某点的挤出变形计算方法如下:记掌子面处在  $t=0$  时刻的水平位置坐标为  $x_0^0$ , 某测点  $i$  在  $t=0$  时刻的水平位置坐标为  $x_i^0$ , 测杆测得该点距离掌子面的距离为  $S_i^0$ , 则有

$$x_i^0 = x_0^0 + S_i^0 \quad (1)$$

记掌子面处在  $t=\tau$  时刻的水平位置坐标为  $x_0^\tau$ , 某测点  $i$  在  $t=\tau$  时刻的水平位置坐标为  $x_i^\tau$ , 测杆测得该点距离掌子面的距离为  $S_i^\tau$ , 则有

$$x_i^\tau = x_0^\tau + S_i^\tau \quad (2)$$

于是可得到  $[0, \tau]$  时间区间内, 该点的挤出变形  $u_i^\tau$  为:

$$u_i^\tau = x_i^\tau - x_i^0 \quad (3)$$

### 2.3. 设备构造

量测设备包括埋设元件、量测部件两部分。埋设元件主要包括 PVC 管、磁环、木栓塞和注浆管。磁环按监测要求以一定间距套在 PVC 管外部, 以胶带稍加固定, 确保注浆凝固后磁环和岩体一起移动。注浆管在注浆完成后拔出, 木栓塞为保护 PVC 套管免于爆破时损坏而设。如图 6 所示。

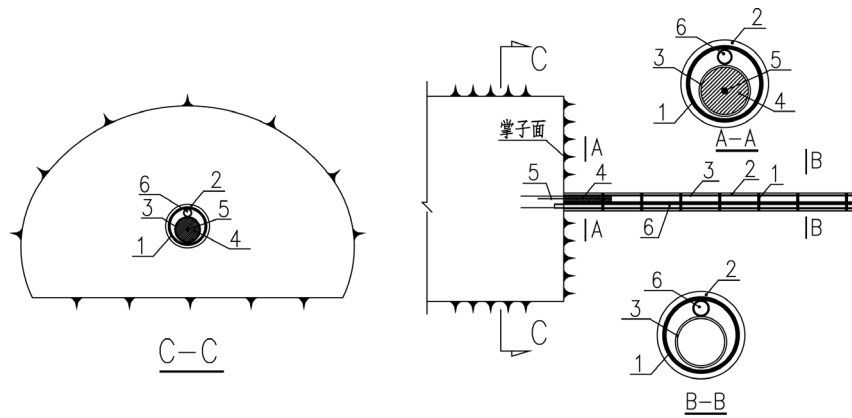
量测部分包括量测电磁感应仪、电磁感应探头和测杆, 如前述图 4 所示。电磁感应探头由干簧管和铜制壳体组成, 探头内有弹簧开关, 可倒向两个触点, 各触点连接导线引出进入测杆。测杆为有刻度的合金材料制成, 对温度不敏感, 温度对读数影响小; 测杆上可附加导向轮使其顺利进出 PVC 管。电磁感应仪和测杆导线连接, 电源开启后, 电磁感应探头通过磁环时会发出蜂鸣声。将探头安装在有刻度的测杆上, 即可以获得蜂鸣时磁环的位置, 探头通过磁环时发出蜂鸣或指示灯亮。

输出信号指示器的线路图如图 7 所示。它由微安表、电容、电阻、晶体管、扬声器、选择开关、直流电源组成。当干簧管工作时, 可以选择指示灯发光或扬声器蜂鸣之一作为输出信号, 且可通过可变电阻调节输出信号的强弱。

### 2.4. 本项技术的创新点

和目前国内外同类技术相比, 基于磁感应原理的掌子面超前岩体挤出变形量测技术具有如下优点:

- 1) 采用磁感应技术制成的传感元件和量测探头比电阻式元件具有更好的环境适应性, 不会因潮湿、高温和振动轻易失效;
- 2) 传感元件磁感应信号感知直接快速, 测量精度只取决于测杆精度, 无需象电阻应变片等进行温度修正, 因而其量测精度高;



1 磁环 2 砂浆 3 PVC管 4 木栓 5 铁丝 6 注浆管

Figure 6. Schematic diagram of the magnetic extensometer  
图 6. 磁感应位移计示意图

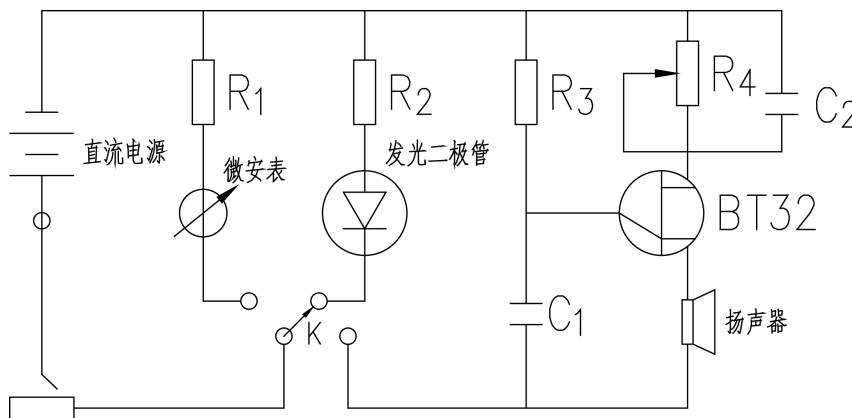


Figure 7. Circuit diagram of the output signal  
图 7. 输出信号指示器线路图

3) 磁感应元件制作简单、技术成熟稳定，可以确保质量，提高了元件的成活率。目前采用磁感应原理开发的量测仪器有分层沉降仪，有 50 多年技术沉淀，可资参考移植；

4) 维护难度低，技术培训容易，成本低。

根据国内外查新，基于磁感应原理的掌子面超前岩体挤出变形量测技术是一项自主创新的技术，取得了发明专利和实用新型专利。

### 3. 工程应用案例

#### 3.1. 工程简介

针对奇坑隧道[6]，选取了出口约 20 米作为试验段，采用新意法施工。试验段位于左洞 ZK54 + 235~ZK54 + 255 区间上，断面为三心圆，隧道毛洞净高 11.27 m，净宽 17.10 m，开挖面积为 154.5 平方米。掌子面采用玻璃纤维锚杆进行超前加固，如图 8 所示。

根据本工程新意法设计，由于掌子面及其超前岩体的挤出变形是实时判断掌子面岩体稳定的重要指标，必须在施工全过程中量测掌子面及其超前岩体的挤出变形。为此，本文作者将上述量测技术应用到本工程。



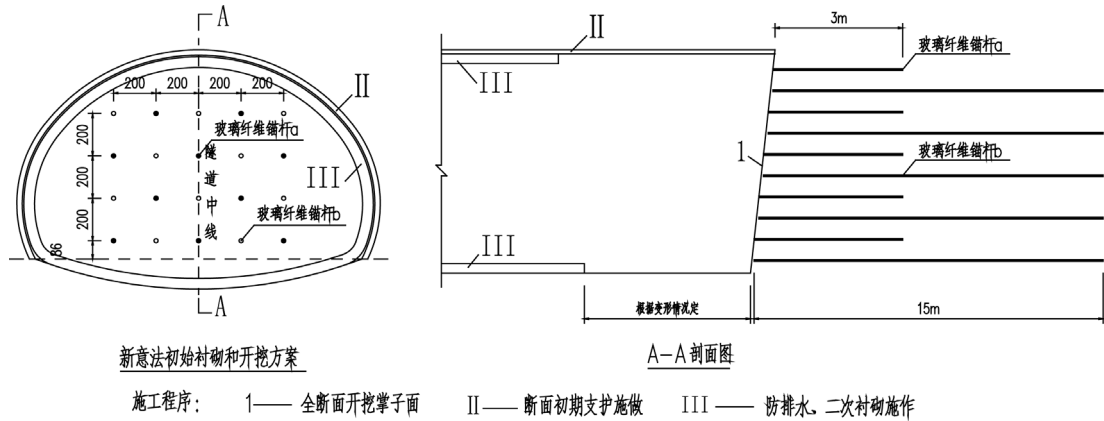


Figure 8. Layout of glass fiber bolts for improvement of front core weak rock (unit: cm)  
 图 8. 掌子面前方核心岩体玻璃纤维锚杆加固示意图(单位: cm)

### 3.2. 测点埋设和现场量测

#### 3.2.1. 测点埋设

根据试验段监测方案, 掌子面超前岩体挤出变形量测布置 3 个测孔, 孔深 15 米, 每孔布置 6 个测点。其数据可以绘就掌子面变形曲线和掌子面超前岩体监测断面的变形曲线, 也是掌子面玻璃纤维锚杆加固设计的重要依据。图 9 为测点立面布置和纵向布置示意图。PVC 管的直径为 50 mm, 磁环内径为 55 mm, 外径为 91 mm。量测探头外径为 24 mm。测孔孔径为 100 mm。PVC 管采用 4 节 2 米定长管接长而成。接长时, 为了防止在连接处水泥浆渗入管内, 连接后采用胶带纸进行密封。图 10 为现场接长及磁环组装的照片。

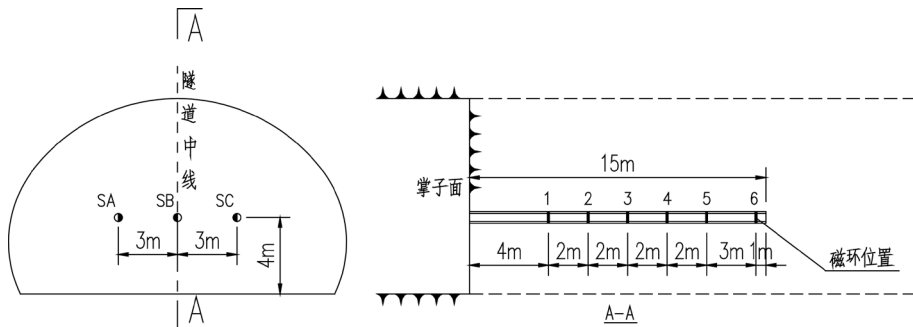


Figure 9. Layout of measurement points  
 图 9. 测点布置图

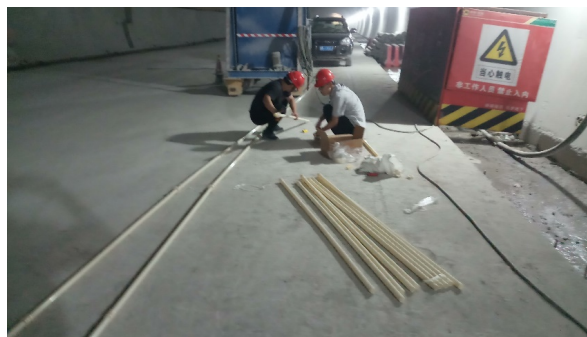


Figure 10. Photo of installation of magnet rings and PVC pipe  
 图 10. 磁环及 PVC 管组装

### 3.2.2. 现场量测

掌子面的挤出变形采用全站仪量测，超前核心岩体的挤出变形采用磁感应量测计量测。量测初读数在埋设之后立即获得，之后按 4 小时间隔测两次读数，直到掌子面爆破开挖为止。在爆破清渣后，再对剩余测点再行测量，仍按间隔 4 小时间隔。如此反复进行，直到无测点剩余。图 11 为现场量测的照片。

上述量测时间间隔的确定是综合现场各工序的持续时间确定的，尽可能减少对现场施工的干扰、同时确保量测人员的安全。现场量测和施工工序交错进行：爆破结束后进行清渣作业，清渣结束后量测一次；然后进行系统锚杆和超前锚杆钻孔和安装，锚杆安装后，再量测一次；然后继续钢拱架和挂网喷混凝土施工，网喷结束后，再量测一次；喷混凝土养护至 4 小时左右后，再量测一次；然后进行下一循环作业。



Figure 11. Photo of site monitoring

图 11. 现场量测照片

本工程各循环大约耗时 15 小时，每循环进尺约 3.5 m。

### 3.2.3. 量测结果

测点安装 4 小时后的量测结果如表 1 所示。各测量断面的挤出变形如图 12 虚线所示。

Table 1. Extrusion of front core rock of tunnel 4 hours after excavation, unit: mm

表 1. 开挖 4 小时后掌子面超前核心岩体的挤出变形(mm)

测点		0	1	2	3	4	5	6
与掌子面距离(m)			4	6	8	10	12	15
测孔	SA	14.1	4.5	1.5	0	0	0	0
	SB	15.5	5.5	2	0	0	0	0
	SC	14.3	3.5	1	0	0	0	0

测点安装 8 小时后的量测结果如表 2 所示。各测量断面的挤出变形如图 12 实线所示。

Table 2. Extrusion of front core rock of tunnel 8 hours after excavation, unit: mm

表 2. 开挖 8 小时后掌子面超前核心岩体的挤出变形(mm)

测点		0	1	2	3	4	5	6
与掌子面距离(m)			4	6	8	10	12	15
测孔	SA	15.7	4.7	2	0	0	0	0
	SB	17.8	6.3	2.5	0	0	0	0
	SC	17.0	4.0	1.5	0	0	0	0



从图 12 和表 1、表 2 的量测结果可以发现, 从断面分布看, 掌子面中央挤出变形最大, 边缘处趋于零; 从纵向位置看, 距离掌子面越近, 挤出变形越大, 掌子面最大挤出变形为 17.8 mm, 而距离掌子面 6 米处的挤出变形不到 5 mm, 至 8 米处的挤出变形基本为零, 说明开挖影响半径在 6 米至 8 米之间。这是确定锚杆的搭接位置和搭接长度的重要依据。

一般地说, 影响半径与围岩强度和洞室高度有关, 本工程为 IV 级凝灰岩地层, 毛洞高度约 11.3 米, 量测结果表明影响半径大约为毛洞高度 0.5~0.8 倍。

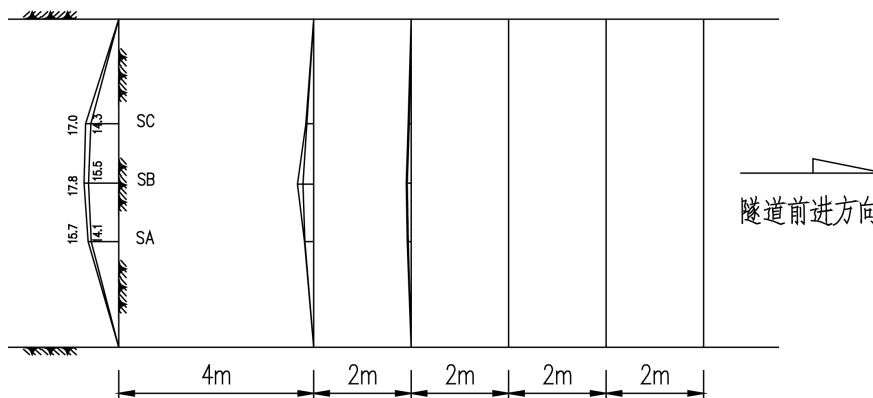


Figure 12. Diagram of extrusion of front core rock of the tunnel, unit: mm  
图 12. 掌子面超前核心岩体挤出变形(单位: mm)

#### 3.2.4. 本项技术应用结果反馈

本项技术在奇坑隧道进行的掌子面挤出变形量测的应用实践证明, 基于磁感应原理的掌子面超前岩体挤出变形量测技术可以达到随掌子面推进而连续进行量测的目的。本项技术在应用中也发现一些问题: 虽然采用木栓塞保护, 爆破施工还是存在对 PVC 管的损坏的情况, 导致 PVC 管挤压变形, 使得测杆不容易伸入; 另外, 测杆精度有限, 一旦弯曲, 误差更大, 建议采用特制多节刚性杆。

下一步可以在如下方向上持续改进: 改进量测管 PVC 保护技术, 确保测杆顺利进出 PVC 管; 采用 wifi 原理开发无线数据采集技术, 做到实时自动采集数据。

## 4. 结论

1) 无论新意法还是新奥法, 掌子面超前核心岩体的挤出变形量测都是隧道施工跟踪监测十分重要内容, 但是目前国内外现行的量测设备和技术都存在成本高、存活率低、寿命短的缺点。因此, 开展新型量测技术的研发十分必要;

2) 本文介绍的基于磁感应原理的掌子面超前核心岩体挤出变形量测技术解决了目前掌子面超前岩体挤出变形难以跟踪量测的难题, 是一项重要技术革新;

3) 基于磁感应原理的掌子面超前岩体挤出变形量测技术尚处于起步阶段, 尚需在应用中逐步完善, 特别是开发远距离无限通讯量测技术十分必要。

## 基金项目

浙江省交通厅 2019 科研计划项目(项目号 2019033)。

## 参考文献

- [1] Lunardi, P. (2008) Design and Construction of Tunnels: Analysis of Controlled Deformation in Rock and Soils. Sprin-

ger, Berlin Heidelberg.

- [2] 孙明磊, 韩现民, 朱正国. 滑动测微计在太平山隧道掌子面围岩变形监测中的应用[J]. 铁道建筑, 2014(3): 47-50.
- [3] Thut, A., Nateropp, D., Steiner, P. and Stolz, M. (2006) Tunneling in Squeezing Rock: Yielding Elements and Face Control. *8th International Conference on Tunnel Construction and Underground Structures*, Ljubljana, 221-241.
- [4] 李二兵, 韩阳, 谭跃虎, 等. 北山坑探设施开挖全过程围岩内部位移现场量测试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(11): 2741-2754.
- [5] 王美华, 王新新. 土体分层沉降监测技术的现状与发展趋势[J]. 建筑施工, 2016, 38(2): 231-233.
- [6] 闵晓阳, 斯纪平, 王玉富, 支彦锋, 韦麟, 赖允瑾. 采用玻璃纤维锚杆预加固掌子面软弱岩体的有限元分析和工程应用[J]. 土木工程, 2020, 9(12): 1292-1303. <https://doi.org/10.12677/HJCE.2020.912135>