

# 盾构法预制拼装隧道超前探水预报研究与实践

胡新涛<sup>1</sup>, 徐树军<sup>2</sup>, 周 昆<sup>2</sup>, 刘成龙<sup>3</sup>, 姚琦发<sup>4</sup>

[1. 青岛市地铁四号线有限公司, 山东 青岛 266000; 2. 中铁十四局集团有限公司, 山东 济南 250101;

3. 中国矿业大学(北京), 北京市 100083; 4. 北京同度工程物探技术有限公司, 北京市 102209]

**摘 要:**为解决在盾构法预制拼装隧道内做超前探水预报的技术难题,系统开展地球物理场理论研究,论证各种方法的优劣,并针对盾构隧道管片衬砌结构开展实验,改进超前探水预报探测方法,为超前预报人员提供参考。实验结果表明:通过对 CFC 法的观测方式进行改进,避开了隧道内金属机具等产生的电磁干扰,对盾构机刀盘前方围岩含水情况进行综合预报。

**关键词:** 盾构隧道涌水; 地铁隧道涌水; 不良地质; 超前探水; 管片隧道探水; 突泥涌水预防

**中图分类号:** U453.6+1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-7716(2022)03-0205-04

## 0 引 言

盾构法修建城市轨道交通隧道历久弥新、源远流长<sup>[1]</sup>。伴随着我国交通、水利水电建设工程的兴盛,具有“高效、高质量、高效益”优势的盾构法必将大展身手<sup>[2-5]</sup>。盾构法是一种易进难退的全断面施工技术,对地质条件变化十分敏感。在遇到含水构造作为灾害源引发的突泥涌水时,若不能提前、及时处理则十分危险,易产生重大工程事故,造成难以估量的人身财产损失<sup>[6-9]</sup>。目前,在 TBM 施工中开展超前预报的方法较多,如德国的应用聚焦频域激发极化原理的 BEAM (Bore-Tunnelling Electrical Ahead Monitoring) 技术<sup>[10,11]</sup>与基于面波-横波转换波模型的 ISP(Integrated Seismic Prediction)技术<sup>[12]</sup>,日本的利用掘进参数进行超前探测<sup>[13]</sup>等。在国内,则有学者研究用三维激发极化法<sup>[14]</sup>、HSP 声波反射法<sup>[15]</sup>、TST 法、CFC 法进行超前探测。综上所述,敞开式 TBM 施工隧道可应用的方法较多,但盾构隧道中适用的探测方法较少,在这少数的探测方法中,多数为探测地质构造的方法,探水的方法甚少,且不成熟。这原因在于:(1)盾构刀盘占据了掌子面,需要在掌子面上观测的方法难以实现;(2)庞大的金属机具产生的复杂的电磁环境背景致使常规电法探测效果不尽人意;(3)管片隔开了探测仪器与岩土,信号采集不便。目前盾构隧道超前预报技术研究有两条路线:一种是与盾构机集成,做智能掘进机系统,这种适用于新

建掘进机<sup>[16]</sup>;另一种是便携式仪器设备,用于现有盾构施工隧道开展具有针对性的超前预报,降低施工风险。

现着重探讨便携式电磁波预报系统,用以在盾构管片隧道中进行探水预报。本文总结了盾构隧道中电磁波反射法设备的数据采集的关键技术,并通过理论分析、工程应用和反馈对其开展了相关研究工作。最终归纳出一套适用于盾构隧道的便携式超前探水方法,供广大从事超前预报工作的技术人员学习、参考,也希望对面临类似地质问题的盾构隧道提供借鉴,以期推动盾构隧道超前地质预报技术的发展。

## 1 隧道超前地质预报原理及系统

在上世纪 90 年代初的起步阶段,超前预报方法主要以地质调查分析为主,但是很快就发现仅靠地质分析难以解决复杂地质条件与深埋隧道的地质预测问题,必须借助物探手段。地震方法和电磁方法先后加入到隧道超前预报的队伍中来,发展出诸多具有不同特点的预报技术。哪些方法技术更适合隧道超前预报,如何操作才能取得科学可靠的结果,这些都需要从基本原理上进行界定。

### 1.1 隧道超前地质预报技术理论分析

物探方法从物性上可分为地震方法和电磁方法,从物理场的特点上进行分类,地球物理场从传播特点上可分为三类,波动场,扩散场,谐和场。这三种场的探测能力有天壤之别,波动场最优,扩散场次之,谐和场最差。

波动场包括地震波场和电磁波场。波动场具有三个重要的特点,使它具有优异的探测能力。第一,波在

收稿日期: 2021-11-15

作者简介: 胡新涛(1973—),男,本科,高级工程师,从事隧道工程建设工作。

传播中遇到波阻抗变化界面会发生反射和散射,利用反射波和散射波可以发现目标;第二,均匀介质中波沿直线传播,具有明显的方向性,可以用来确定目标的方位;第三,波的传播具有速度,可以根据传播时间确定目标的距离。这三个特点使得反射波和散射法成为各种地质探测应用的首选。TSP、TST、TGP 等地震波反射、散射法在隧道地质超前预报中是主要的方法。探空雷达、探地雷达(GPR)、CFC 等设备应用的是电磁波反射法,也是隧道超前预报工作的常用方法。

扩散场的传播与空间梯度有关,具有体效应。局部异常对场的影响在传播中被平滑和削弱,远处场对目标异常不敏感。扩散场的传播不是与时间成线性,而是与时间的平方根成正比。这些特点导致难以用来确定目标体的方位、距离、大小。常用的方法包括瞬变电磁(TEM)等。

谐和场是一种稳定场,局部异常对场的贡献仅限于异常体附近,从远处难以观测到异常体的影响。外部探测只能通过改变观测位置来推测异常体的强度、位置、大小,所获得的结果是多解的,难以定量,不能运用到工程之中。谐和场包括重力场、磁力场和静电场,这些方法在隧道超前预报中应尽量避免采用。

1.2 CFC 超前探水技术原理

CFC 是一种中频电磁波反射法探水技术<sup>[16]</sup>。GPR 使用高频电磁波,探测距离 30 m 左右;CFC 使用 1MHz 为主频的中频电磁波,探测距离 100 m 左右。含水岩体具有电磁波阻抗、波速、波长和趋肤深度降低,损耗比增大的特性(如表 1 所列),在含水岩体与干燥岩体接触带电磁波发生反射和相干,接收反射波进行 CFC 计算得到前方围岩的含水率和含水量。

表 1 干燥岩体与含水岩体的物理参数差异表

| 岩体 | 特征阻抗<br>/ $\Omega$ | 波速/<br>( $10^8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) | 波长<br>/m | 趋肤深度<br>/m | 损耗比<br>/p |
|----|--------------------|----------------------------------------------|----------|------------|-----------|
| 干燥 | 106                | 1.10                                         | 110      | 43.0       | 1         |
| 含水 | 15                 | 0.18                                         | 18       | 2.9        | 20        |

2 管片结构解析及探测方法的改进

盾构隧道由于掘进机机头和管片结构,将设备与周围的土体、岩土分割开来。那么原来在钻爆隧道里面应用广泛的超前预报设备无法直接应用。

2.1 盾构机机头的限制

GPR、TEM 等方法采用空气耦合天线或线圈,在掌子面进行观测,发射的电磁波在隧道内通过空气

耦合,再进入到围岩中。在盾构隧道中掌子面被刀盘和护盾阻挡、占据,导致这两种设备不适用。

CFC 方法在隧道两侧壁进行阵列式观测,不受盾构机机头占位的影响。整个观测系统中发射和接收电极的分布类似鱼骨天线,可以改善观测的方向性,增强掌子面前方反射回来的信号,压制侧向信号<sup>[16]</sup>。

图 1 为 CFC 超前探水观测系统示意图。

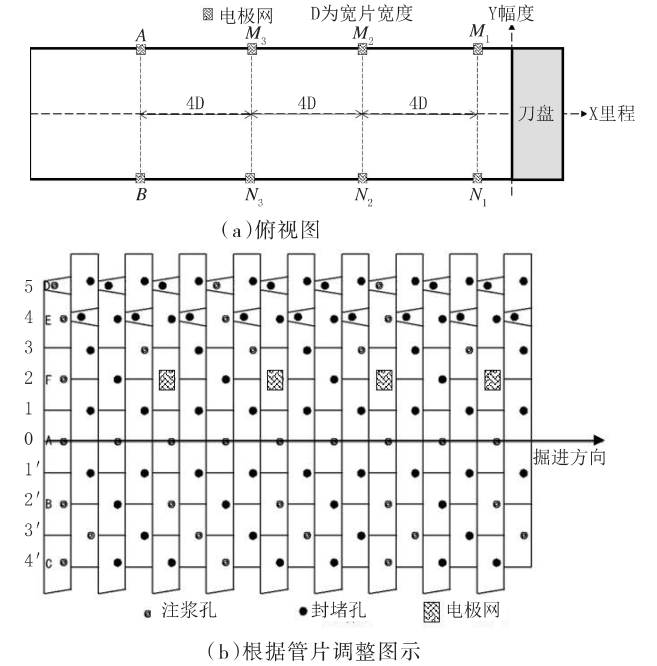


图 1 CFC 超前探水观测系统示意图

2.2 管片的限制

在盾构隧道内开展 CFC 超前探水工作,与以往在钻爆、敞开式 TBM 等隧道内数据采集方式不同<sup>[17]</sup>,需要根据管片的结构尺寸,重新设计阵列式观测系统中发射点和接收点的间距;需要摒弃以往 CFC 采用的锚杆电极,转而采用金属网电极。在管片背面布置 50 cm × 50 cm 金属网作为电极,如图 2 所示,通过注浆孔用导线连接 CFC 仪器。这种在衬砌与围岩之间布置电极网的工作方式,有效地削弱、避免了隧道内盾构机的电磁干扰。



图 2 金属网电极之图示

CFC 数据采集流程如下:首先,根据管片衬砌设计相关资料,找到对应位置的管片衬砌(对应编号)。

将金属网挂到管片背面(与围岩接触一侧),用导线连接电极网并通过注浆孔引出。然后,等盾构机施工,将管片安装到对应位置(见图3)。至所有带电极网的管片衬砌都安装完毕时,可进行CFC数据采集。发射机连接左右两侧正负发射电极网,接收机依次连接每排接收电极,阵列式采集接收数据。



图3 装好金属网电极的管片安装之图示

### 3 现场试验应用

#### 3.1 工程概况

青岛地铁四号线李家下庄站—崂山科技城站区间起点位于辽阳路和同安路路口北约350 m处,向北偏东沿张村河走向。区间起始段下穿张村河,其余段下穿民房至科苑纬一路孙刘桥附近。李崂区间左线地势起伏平坦,整体呈由西向东北缓倾,地貌类型主要为河流侵蚀堆积区,在里程ZDK17+846.05~ZDK17+853.3段为剥蚀残丘地貌。通过钻探揭示,场区范围内第四系厚度0.8~17.2 m,主要由第四系全新统人工填土层、陆相冲洪积粉质黏土、中粗砂及上更新统粉质黏土、碎石土。基岩主要为燕山晚期花岗岩、局部燕山晚期侵入细粒花岗岩、煌斑岩岩脉,局部受构造作用影响,岩体节理、裂隙发育。洞身范围内主要地层为中、微风化花岗岩,局部发育花岗岩(砂土状、块状碎裂岩)及节理密集带,局部侵入细粒花岗岩、煌斑岩岩脉。根据地下水补给埋藏条件及水化学类型等特征,该工点地下水类型主要为第四系潜水和基岩裂隙水,其中第四系潜水向下补给基岩裂隙水。

#### 3.2 综合超前预报(ZDK17+458~ZDK17+558段)

根据地表勘察和地质分析,该段穿越构造碎裂岩带。受场区区域构造影响,该段碎裂岩和节理密集带较发育,富水性、透水性中等。为保障施工安全,防止围岩坍塌变形和沿裂隙面渗水严重,导致地面沉降过大等问题,随即开展CFC法探测破碎区域含水情况。

对接收到信号进行归一化处理,基于所有记录的相干谱,结合观测系统,进行合成孔径偏移成像<sup>[17,18]</sup>,

反演成像结果如图4所示。图中横坐标为里程(单位:m),色标为反射系数,深色代表反射能量较强,围岩含水量较大,浅色代表反射能量较弱,围岩干燥。色标的划定采用百分比相对值。CFC计算出该段平均介电常数为8.429,反映该段区域围岩整体含水,结合地质情况推测存在裂隙水。ZDK17+458~ZDK17+533段CFC成果图显示大部分区域以浅色条纹为主,电磁反射波弱,反映该段围岩大部分区域弱含水。其中,ZDK17+495处CFC成果图中出现橘黄色条纹,说明该处存在含水裂隙,且水量较大。而在ZDK17+533~ZDK17+558段,CFC成果图中以浅色条纹为主,在90 m附近存在黄色、绿色条纹,说明电磁反射波增强,反映该段围岩整体含水,局部含水量稍大。综合分析该处为含水破碎带,围岩破碎含水。

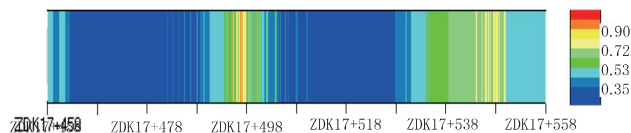


图4 地震波法和CFC法超前地质预报反演成像之图示

### 4 应用效果

盾构机掘进至ZDK17+458~ZDK17+580段,围岩完整干燥,ZDK17+478处刀盘前方围岩如图5所示。盾构机掘进至ZDK17+490处,刀盘前方大量涌水,如图6所示。掘进至ZDK17+533~ZDK17+558段,围岩破碎含水,渣样如图7所示,与预报结果较为一致。施工方及时采取排水措施,减轻出水灾害造成的损失及对施工的干扰。

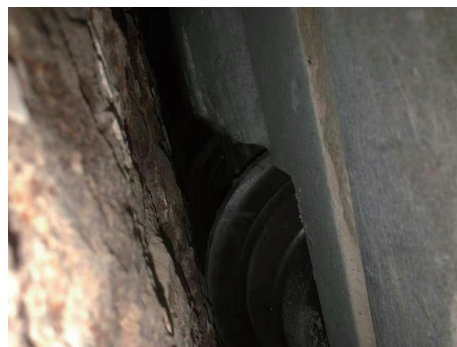


图5 开挖揭露:掌子面围岩完整干燥之图示

### 5 结论与讨论

目前盾构法预制拼装隧道的超前探水预报技术研究不多,且实际工程应用较少。现针对盾构隧道的破碎富水带不良地质情况进行系统研究,取得了一定的阶段性成果。

(1)通过地球物理场理论分析可知,在隧道超前预报应用领域,电磁波反射方法具有优异探测能力,





图6 开挖揭露:刀盘内开挖揭露涌水照片之实景



图7 开挖揭露:出渣口流水照片之实景  
是后续研究应用的方向,应该大力推广。

(2)对 CFC 超前探水技术的现场采集方式进行改进,使其适应盾构隧道的管片结构。结合地震波方法进行综合超前预报,能有效预报前方地质情况。对隧道前方围岩含水的定性预报,与开挖揭露基本相符,但无法分段计算围岩的介电常数,对含水量的精细化预报还需进一步研究。

#### 参考文献:

- [1] 何川,封坤,方勇.盾构法修建地铁隧道的技术现状与展望[J].西南交通大学学报,2015,50(1):97-100.
- [2] 王梦恕.中国铁路、隧道与地下空间发展概况[J].隧道建设,2010,30(4):351-355.
- [3] 陈馈,杨延栋.中国盾构制造新技术与发展趋势[J].隧道建设,2017,

- 37(3):276-280.
- [4] 洪开荣.我国隧道及地下工程近两年的发展与展望[J].隧道建设,2017,37(2):123-126.
- [5] 中国公路学报编辑部.中国隧道工程学术研究综述[J].中国公路学报,2015,28(5):1-9.
- [6] 王梦恕.中国盾构和掘进机隧道技术现场存在的问题及发展思路[J].隧道建设,2014,34(3):179-182.
- [7] Parise M, De Waele J, Gutierrez F.Engineering and environmental problems in karst—An introduction[J].Engineer Geology, 2008, 99(3-4):91-95.
- [8] Yin J, Shang Y, Fu B, Qu Y.Development of TBM-excitation technology and analyses and countermeasures of related engineering geological problems.[J].Engineer Geology, 2005, 13(3):389-392.
- [9] 崔玖江.盾构隧道施工风险与规避对策[J].隧道建设,2009,29(4):377-382.
- [10] 朱劲,李天斌,李永林,等.Beam 超前地质预报技术在铜锣山隧道中的应用[J].工程地质学报,2007,2(2):258-261.
- [11] Kaus A, Boening W.BEAM—Goelectrical ahead monitoring for TBM-drives[J].Geomechnik and Tunnelling 2008; 1(5):442-445[J].Geomechnik and Tunnelling, 2008, 1(5):442-445.
- [12] Stefan L ü th, R ü diger Giese, Aissa Rechlin.A seismic exploration system around and ahead of tunnel excavation—Onsite [C].India: World Tunnel Congress 2008—Underground Facilities for Better Environment and Safety, 2008:119-122.
- [13] Takuji Yamamoto et al.Evaluation of the geological condition ahead of the tunnel face by geostatistical techniques using TBM driving data [J].Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research, 2003, 18(2):213-215.
- [14] LI Shucai, NIE Lichao, LIU Bin.The Practice of Forward Prospecting of Adverse Geology Applied to Hard Rock TBM Tunnel Construction: The Case of the Songhua River Water Conveyance Project in the Middle of Jilin Province[J].Engineering, 2018, 4(1):131-134.
- [15] 叶智彰.HSP 声波反射法地质超前预报在西秦岭特长隧道 TBM 施工中的应用[J].铁道建筑技术,2011,7(7):94-98.
- [16] 谭顺辉.隧道掘进机多功能化及智能化的发展与推广[J].隧道建设,2020,40(9):1243-1246.
- [17] 侯景方,姚琦发.复频电导超前探水技术在深埋隧道的应用[J].工程地球物理学报,2019,16(2):223-226.
- [18] 陈方明,谢冕,蒋辉.复频电导技术在隧洞超前探水中的应用[J].人民长江,2015,46(21):50-52.

## 《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话: 021-55008850 联系邮箱: [cdq@smedi.com](mailto:cdq@smedi.com)