

# 风化岩层盾构隧道管片壁后密实度检测

赵小辉

(杭州市地铁集团有限责任公司, 310019, 杭州//高级工程师)

**摘要** 目的:以杭州至临安城际铁路(即杭州地铁16号线)工程为例,介绍了轨道交通工程建设中,风化岩层盾构隧道管片壁后密实度检测探索与实践。分析在弱风化、中风化和强风化岩层地质的盾构隧道管片壁后密实度检测情况,为隧道壁后补浆及运营变形评估提供依据。方法:通过对打音检测法、超声成像法和地质雷达检测法分别进行现场试验,综合参考检测成果可靠性、工作效率和检测成本等,经比选确定采用地质雷达检测手段。结果及结论:通过试验对比,采用地质雷达检测法,对杭州地铁16号线的盾构隧道和矿山法隧道进行全线检测,检测结果与拆卸管片后暴露出的实际注浆密实情况的对比校核说明,二者一致性较好,未发现较大范围或严重的注浆不密实或脱空现象。风化岩层盾构隧道管片壁后密实度检测方法试验取得了预期的效果,达到预期目的。

**关键词** 盾构隧道;风化岩层;壁后密实度;检测方法

**中图分类号** U455.43;U455.49

**DOI**:10.16037/j.1007-869x.2023.07.021

## Segment Back-wall Compactness Detection for Shield Tunnel in Weathering Rock Stratum

ZHAO Xiaohui

**Abstract** Objective: Taking the Hangzhou to Lin'an Inter-city Railway project (Hangzhou Metro Line 16) as an example, the exploration and practice of the compactness detection behind the shield tunnel segment wall in weathering rock stratum during rail transit project construction is introduced. The segment back-wall compactness detection for shield tunnel in weak weathering, medium weathering, and strong weathering geological strata is analyzed to provide a basis for tunnel back-wall grouting and operational deformation assessment. Method: On-site testing is carried out using the tapping detection method, ultrasonic imaging method, and geological radar detection method, and the geological radar detection method is determined through comparative selection based on the comprehensive reference of detection result reliability, work efficiency, and detection cost. Result & Conclusion: Through experimental comparison, the geological radar detection method is a-

dopted to conduct a full-line inspection of the shield tunnel and mining method tunnel of Hangzhou Metro Line 16. The comparison and verification of the detected results with the actual grouting compactness behind the dismantled segment wall shows that there is good consistency between the detected and actual conditions, and no significantly spatial or serious grouting non-compactness or voids are found. The segment back-wall compactness detection method for shield tunnel in weathering rock stratum achieves the expected results and meets the expected objectives.

**Key words** shield tunnel; weathering rock stratum; back-wall compactness; detection method

**Author's address** Hangzhou Metro Group Co., Ltd., 310019, Hangzhou, China

## 1 概述

### 1.1 工程概况

杭州至临安城际铁路(即杭州地铁16号线,以下简称“16号线”)工程全长约为35.12 km。其中:盾构隧道单线长为30.5 km,设8个地下站,4个高架站,设计速度为120 km/h,于2020年4月23日正式开通运营。

为掌握盾构隧道的管片壁后注浆密实及矿山法隧道二次衬砌密实情况,从2019年6月至10月,对16号线全线进行盾构隧道注浆密实度检测和矿山法二次衬砌密实情况检测。本文主要探讨以16号线为例的盾构隧道管片壁后注浆密实度检测的探索与实践。

### 1.2 隧道区间地层条件分析与评价

该工程区间隧道管片的外径为6.7 m,隧道结构底板埋深约在9.29~36.14 m,盾构区间掘进断面范围内涉及的地基土主要为⑦<sub>1</sub>黏土、⑧<sub>2</sub>粉质黏土、⑨<sub>1</sub>层黏土、⑩<sub>1</sub>层黏土、(31)<sub>b-1</sub>强风化泥质粉砂岩、(31)<sub>b-2</sub>强风化泥质粉砂岩和(31)<sub>b-3</sub>中等风化泥质粉砂岩。洞体内地下水类型主要为松散岩类孔

隙潜水和基岩裂隙水,其富水性主要受岩石的风化程度、节理裂隙的构造发育程度和裂隙贯通性等控制。按 GB 50307—2012《城市轨道交通岩土工程勘察规范》确定隧道范围内围岩等级主要为 V 级,部分为 IV 级。勘察时揭露全线区间内岩体强度差异较大,根据岩石饱和抗压强度试验数据分析,大部分岩体的抗压强度值在 15 ~ 30 MPa 范围内,为较软岩;但部分勘探点饱和抗压强度值大于 30 MPa,最大值达 62.9 MPa,为较硬岩。

## 2 隧道管片壁后密实度检测方法比选

### 2.1 打音检测法

打音检测法是通过敲击在衬砌管片产生和传播声音,根据与衬砌混凝土的状态(厚度、强度、形状等)和打击物的形状以及打击强度相关的声音高低和音质、音压等随时间发生复杂的变化,来进行管片壁后密实度的检测,如图 1 所示。用小波转换时间-频率的变化关系,将其表现为等值线图。分析数据使用先进的伽柏函数,利用在打击音分析中有实际成果的小波变换,可判定管片壁后空洞缺陷等。



图1 隧道内试验打音检测法

Fig. 1 Tunnel testing with tapping detection method

本次共检测试验 4 条测线,25 片管片共设置 4 × 25 个测点。试验结果主要体现为工作效率较低,对空洞或不密实情况判别有误判。

### 2.2 超声成像法

超声成像法是一种在混凝土结构工程质量检测中广泛应用的方法,可用于检测混凝土强度和检

测混凝土缺陷。其阵列式超声波断层扫描(见图 2)采用数字聚焦阵列技术,通过多个超声波换能器组成的阵列探头来发射和接收超声波信号。阵列探头内的控制单元激活一排换能器作为信号发射端,而其他排的换能器作为信号接收端。此后,下一排换能器发生信号,其右侧的换能器接收信号,循环重复,至每排换能器都已经激发过信号为止。测试采用俄罗斯超声控制系统公司的 A1040 MIRA 型阵列式超声波成像仪。该设备采用 4 × 12 个换能器的阵列,单面检测,是超声成像领域发展起来的新设备。

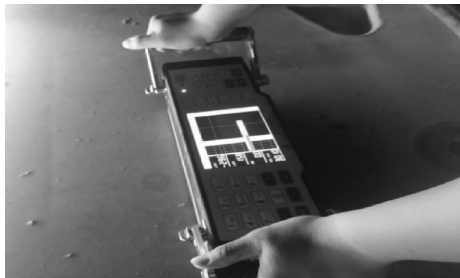


图2 阵列式超声波断层扫描实景图

Fig. 2 Site picture of array ultrasonic tomography

本次检测试验采用地下和地面进行,共测试 20 片管片,试验结果表明,可以提供分辨率较高的解析图像,但工作效率较低,检测成本高,对空洞或不密实的判别有误判。

### 2.3 地质雷达检测法

地质雷达是采用高频电磁波探测地下地质结构及物理属性空间分布的探测技术。其由发射天线向地下介质中发射一定中心频率的电磁脉冲波,电磁脉冲波在地下介质中传播时,遇到介质中的电磁性(电阻率、介电常数及磁导率)差异分界面会发生波的反射和透射;由接收天线接收反射电磁波,通过控制台进行操作和控制现场数据的采集与储存,经过处理转换成时间序列信号;在每一测点上的这种时间序列即构成该测点的雷达波形记录道,它包含该测点处所接收的雷达波的幅度、相位及旅行时间等信息。电脑所收集并存储的每一测点上的雷达波形序列形成一个由若干记录道组成的地质雷达剖面。通过对地质雷达剖面进行处理,并根据剖面上雷达回波的运动学与动力学特征便可获得沿探线剖面下方的有关地质信息(地下目标体及基本形态、地质构造及物理属性的空间分布特征等)。

盾构隧道结构分管片、注浆浆液和围岩等 3 层介质,且这 3 层介质的电性差异显著。不密实区域由于有空气或水充填,使得电性差异远大于正常结构层间差异,基于此可确定异常位置。

本次检测试验采用地下和地面进行,共测试 40 片管片,试验结果表明,可以提供较清晰的地质雷达剖面图像,工作效率较高,检测成本适中,但空洞或不密实情况的判别对资料数据处理人员的要求较高。

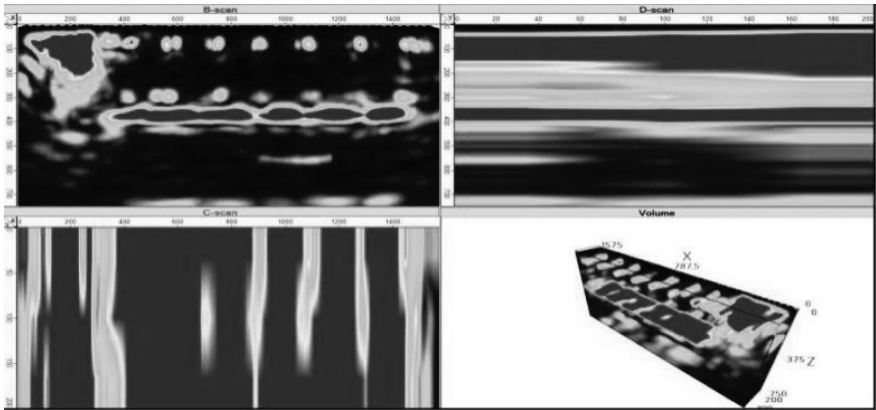


图 3 16 号线锦—临区间隧道内超声波测试波形截图

Fig. 3 Screenshot of ultrasonic detection waveform diagrams in Line 16 Jin-Lin interval tunnel

3 地质雷达检测及评价

3.1 仪器装备

本次地质雷达检测采用的仪器为瑞典 MALA 地质雷达公司生产的 RAMAC/GPR 型地面雷达及配套专用探测天线。该仪器主要技术参数如表 1。

3.2 地面穿透测试

在正式探测前,在管片堆场选择地表架空管片进行了雷达检测对比试验,以对比铁片放入架空管片底部前后,同线位地质雷达电磁波的穿透效果。地面穿透试验以预制管片为对象,管片厚度为 35 cm,电磁波速度为 0.11 m/ns,以检测波形中时间剖面 0~7.8 ns 对应的管片结构,结果表明,两剖面波形特征基本一致。放入铁片的图 4 b) 时间剖面在 8 ns 后的反射回波与不放铁片的图 4 a) 存在明显差异,同相轴发生相位倒转,且存在强振幅反射,表现为强衰减的低频特征。放铁片前后的对比效果明显,表明电磁波能够穿透钢筋混凝土预制管片。

3.3 数据处理

地质雷达数据处理采用 Reflexw7.5 专用软件进行处理,各处理参数根据工区具体的地质与地球

2.4 检测试验比选结论

针对以上打音检测法、超声成像法和地质雷达检测法等 3 种测试试验的情况,综合参考检测成果的可靠性、工作效率和检测成本等,通过比选,最终确定在 16 号线采用地质雷达检测手段。通过检测弱风化、中风化、强风化等岩层的盾构隧道管片壁后密实度,为隧道壁后补浆及运营变形评估提供了依据。16 号线锦—临区间隧道内超声波测试波形图截图如图 3 所示。

表 1 RAMAC/GPR 型地面雷达仪器主要技术参数表  
Tab. 1 Main technical parameters of RAMAC/GPR model ground radar device

参数名称	参数值	参数名称	参数值
脉冲重复频率/kHz	10~200 (标准 100)	A/D(模拟/数字)转换/次	16
样点数/道	128~8 192	迭加次数/次	1~32 768
采样频率/GHz	0.4~100	信号稳定性/s	<100
通信方式	ECP(扩展并行)	通信速度/(kibit/s)	>700
数据传输率/(kibit/s)	40~400	触发方式	距离/时间/手动

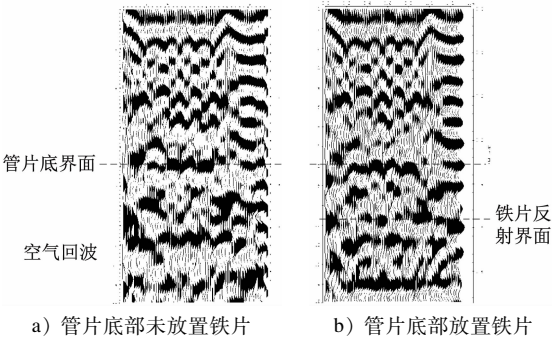


图 4 地质雷达试验剖面对比

Fig. 4 Comparison of stratigraphical radar test profiles

物理条件进行选取。地质雷达数据处理的目的是提高雷达剖面的信噪比与分辨率。次地质雷达资料处理主要包括数据编辑、能量衰减增益、数字滤波处理和背景消除等。

### 3.4 测试评价

本次检测试验工作,天线与隧道侧壁耦合情况良好,并采取对天线收发距的优化等有效措施,对测线进行正、反向对比探测。探测结果表明,雷达原始图像的走势与异常形态反映基本一致,数据符合有关规范要求。

## 4 地质雷达检测典型剖面分析

雷达检测介质分为3层:混凝土管片、壁后注浆材料和围岩。这3层介电性质差异显著,注浆不密实区域由于有空气或水(以及惰性浆液混合体)充填,使得电性差异远大于正常结构层,基于此可以确定异常位置。在地质雷达检测中,不同凝结时间的浆液与管片、围岩的电性参数(相对于介电常数、电磁波波速等)存在一定差异;管片钢筋网较密集,多次发射信号与注浆层反射信号重叠,对地质雷达信号产生叠加影响,导致判译难度增加。可以通过设置的天线收发距优化,以有效提高电磁波的一次辐射场强而压制多次反射场强,从而提高注浆层反射波信号的分辨率。现取3段,对盾构管片壁后的注浆密度进行分析。

1) 根据16号线使用的盾构机刀盘直径和盾构管片外径,确定的注浆区域检测介质厚度为0.35~0.50 m(7~10 ns)范围。由于注浆材料配比存在细微变化,故高频电磁波在其中的波阻抗也存在微弱变化,同相轴趋于水平,但不完全一致。以高新园区间站—青山湖站岩层盾构区间左线拱顶第245环—第249环地质雷达时间剖面为例,剖面中的注浆区域内同相轴振幅均衡,近水平分布,表明注浆效果较好,未见明显不密实异常。测试取得的地质剖面显示,在厚度0.5~0.7 m(10~14 ns)范围,主要对应盾构隧道的岩层区域,同相轴基本水平连续,这与盾构及管片实际情况相吻合,也表明区域内盾构管片壁后注浆密实无异常。

2) 如图5所示,分析左线拱顶第196环—第200环地质雷达时间剖面中管片和围岩的波组特征反应:第196环—第197环、第199环—第200环注浆区域的同相轴水平、振幅均匀、无明显错断,这表明壁后浆液充填均匀,注浆效果较好;但在第198环

管片,厚度为0.40~0.65 m的区域,存在同相轴错断、扭曲特征,雷达剖面图中该区域介质存在明显差异变化,这表明该处注浆不密实。

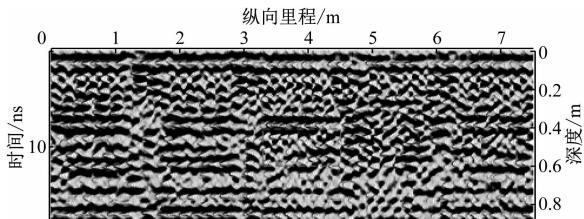


图5 左线拱顶第196环—第200环地质雷达剖面截图  
Fig. 5 Screenshot of stratigraphical radar profile of the left line vault No. 196-200 rings

3) 图6为右线左拱腰第301环—第305环地质雷达剖面。由图6可知,第301环—第303环、第305环注浆区域同相轴水平,振幅均匀,无明显错断,这表明壁后浆液充填均匀,注浆效果较好;但在第304环管片厚度0.40~0.55 m区域,同相轴存在弧形绕射特征,该区域介质存在明显差异变化,表明该处注浆不密实。

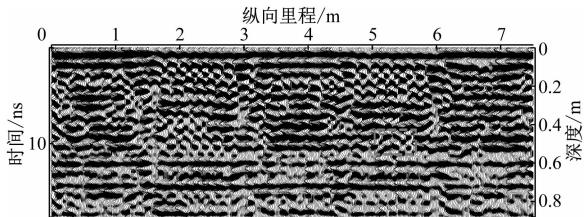


图6 右线左拱腰第301环—305环地质雷达剖面截图  
Fig. 6 Screenshot of stratigraphical radar profile of the right line left arch waist No. 301-305 rings

## 5 结语

16号线采用地质雷达对全线隧道进行检测,其中盾构隧道管片壁后密实度按照里程长度抽检10%,检测按照顶部、左右侧腰部共3条测线进行;矿山法隧道按照拱顶、左右侧腰部、左右侧边墙及底板共6条测线进行100%全检。盾构隧道和矿山法隧道检测结果总体情况良好,未发现较大范围或严重的注浆不密实和脱空现象。在检测中,对邻近联络通道钢管片部位的预制混凝土管片进行地质雷达检测后,检测结果与拆卸管片后暴露出的实际注浆密实进行对比校核,对比情况与检测结果基本吻合。

以16号线余杭段盾构隧道区间为例,南湖新城站—东工作井盾构区间的3条测线地质雷达检测合

格率为96.4%~100.0%;老余杭镇站—东工作井盾构区间合格率为96.6%~100.0%;老余杭镇站—凤新路站盾构区间合格率为96.4%~97.3%;凤新路站—绿汀路站盾构区间合格率为98.3%~99.8%。地质雷达抽测后,对检测不合格部位均进行了二次补浆及复检,复检密实度合格。

16号线通过打音检测法、超声成像法、地质雷达检测法分别进行现场试验,比选后决定采用地质雷达检测手段。对盾构隧道管片壁后密实度检测的探索与成功实践,有效地解决了在弱风化、中风化、强风化岩层的盾构隧道管片壁后密实度的检测问题,为隧道壁后补浆及运营变形评估提供了依据,可为类似工程提供参考。同时,由于壁后注浆介质成分多样,物性参数存在变化,检测结果存在一定偏差和误判,尤其在分析地质雷达剖面图像时,为甄别判断空洞或不密实情况,对资料数据处理人员的要求较高,这也直接关系到检测结果的准确性。如何有效提高地质雷达剖面图像自动化分析,是采用地质雷达检测手段对盾构隧道管片壁后密实度检测的研究方向。

参考文献

[1] 胡盛斌,徐国元,马富安,等.基于天线收发距的盾构壁后注浆雷达探测试验研究[J].中南大学学报(自然科学版),

2019,50(2):360.  
HU Shengbin, XU Guoyuan, MA Fuan, et al. Experimental study on antenna spacing of ground penetrating radar detection of grouting material behind shield segment[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(2): 360.  
[2] 张铮.地质雷达法在城市地铁检测中的技术应用[J].区域治理,2018(51):1.  
ZHANG Zheng. Technical application of ground penetrating radar method in urban subway detection [J]. Regional Governance, 2018(51):1.  
[3] 广西有色勘察设计院.盾构法隧道管片壁后注浆质量地质雷达法检测技术规范;DBJ/T 45-056—2018[S].南宁:广西有色勘察设计院,2018.  
Guangxi Nonferrous Survey and Design Institute. Technical specification for ground penetrating radar method inspection of grouting quality behind shield tunnel segment wall; DBJ/T 45-056—2018 [S]. Nanning: Guangxi Nonferrous Survey and Design Institute, 2018.  
[4] 中华人民共和国铁道部.铁路隧道衬砌质量无损检测规程;TB 10223—2004[S].北京:中国铁道出版社,2004.  
Ministry of Railways of the People's Republic of China. Code for undestructive detecting of railway tunnel lining; TB 10223—2004 [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2004.  
[5] 张凤祥.盾构隧道[M].北京:人民交通出版社,2004.  
ZHANG Fengxiang. Shield tunnel[M]. Beijing: China Communications Press, 2004.

(收稿日期:2021-09-15)



国内首条跨省城市轨道交通无感换乘线路开通

2023年6月24日上午11时,苏州轨道交通11号线开通运行,与上海轨道交通11号线无感换乘启动。这是国内首条跨省对接的城市轨道交通线路、首条全自动运行的市域轨道交通线路、县级市首条全城穿越的城市轨道交通。

作为长三角一体化基础设施互联互通的示范工程,苏州轨道交通11号线全长41.25 km,设站28座。该线西起苏州工业园区唯亭站,与苏州轨道交通3号线换乘;东至昆山花桥站,与上海轨道交通11号线换乘,可直抵上海徐家汇、迪士尼等地。设计速度为100 km/h,全程运营时间约57 min。未来,苏州轨道交通3号线将继续西延,与无锡地铁3号线衔接。

《2022长三角城市跨城通勤年度报告》显示,在上海周边地级市中,住在苏州的通勤者在上海跨城通勤者中占九成左右,具体到区县,近七成的跨城通勤者居住于昆山。据悉,早在2013年,上海轨道交通11号线昆山花桥段就开通运营,成为国内首条跨省城市轨道交通线路。从此,昆山居民仅用10 min就能到达上海市嘉定区安亭镇。

根据《长江三角洲地区多层次轨道交通规划》,到2025年,“轨道上的长三角”将基本建成,轨道交通总里程将超过2.2万 km,轨道交通服务将覆盖80%城区常住人口5万以上的城镇。有关专家认为,苏州轨道交通11号线增强了区域内空间的可达性,沪苏同城化、长三角一体化正不断加速。

(摘编自《光明日报》)