



国家“十二五”重点图书出版规划项目
上海市科技专著出版基金资助

明挖法对既有大直径盾构隧道影响保护的 理论与实践

孙巍 张冬梅 姜向红 主编 黄宏伟 主审





国家“十二五”重点图书出版规划项目
上海市科技专著出版基金资助

明挖法对既有大直径盾构隧道影响保护的 理论与实践

孙巍 张冬梅 姜向红 主编 黄宏伟 主审



同济大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

明挖法对既有大直径盾构隧道影响保护的理论与实践 / 孙巍, 张冬梅, 姜向红主编. — 上海: 同济大学出版社, 2014. 11

ISBN 978-7-5608-5568-4

I. ①明… II. ①孙…②张…③姜… III. ①明挖法
施工—影响—隧道施工—盾构法—研究 IV. ①U455.43

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 160579 号

国家“十二五”重点图书出版规划项目
本书出版由上海市科技专著出版基金资助

明挖法对既有大直径盾构隧道影响保护的理论与实践

主编 孙 巍 张冬梅 姜向红 主审 黄宏伟

策划编辑 杨宁霞 责任编辑 高晓辉 责任校对 徐春莲 封面设计 陈益平

出版发行 同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn
(地址:上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)

经 销 全国各地新华书店

印 刷 同济大学印刷厂

开 本 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 10

字 数 249 000

版 次 2014 年 11 月第 1 版 2014 年 11 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5608-5568-4

定 价 36.00 元

本书若有印装质量问题, 请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

前言

城市地下空间的不断发展,市政地下道路建设工程的增多,越来越多的基坑工程不可避免地出现在既有盾构隧道附近。由于盾构隧道拼装结构特点,其对邻近基坑卸载的影响十分敏感,因此基坑开挖对既有盾构隧道的影响成为近年来城市建设中的热点和难点问题。由于临近基坑工程施工引发的盾构隧道产生过大变形和隧道结构损伤时有发生,严重影响了已建盾构隧道结构安全和运营安全。尤其对大直径盾构隧道的影响与保护,理论与实践都缺乏适当的借鉴。

本书以上海市已建延安东路盾构隧道上方外滩通道明挖法施工为工程背景,系统地介绍了明挖法施工对下卧既有大直径盾构隧道的影晌评价方法、设计方案和施工控制措施,以期同类工程的设计和施工提供借鉴。全书共分为9章,主要包括:绪论、运营大直径盾构隧道结构的检测方法、运营大直径盾构隧道现状评价理论与方法、大直径盾构隧道变形保护指标的确定、明挖法施工对既有大直径盾构隧道影响的离心机试验和数值模拟预测分析、明挖法设计方案及施工控制措施、控制措施效果。本书在编写过程中,兼顾了理论方法与工程实践的内容。

本书由上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司孙巍、同济大学张冬梅、上海建工集团第二建筑有限公司姜向红、同济大学黄宏伟共同编写。其中,第1,2,7章和第4,9章的部分内容由孙巍编写,第5,6章和第3,4章的部分内容由张冬梅编写,第7,8章和第9章的部分内容由姜向红编写,第3,4章的部分内容由黄宏伟编写。本书的部分素材取自于黄宏伟先前指导的研究生林楠硕士、黄栩博士的学位论文。全书由孙巍、张冬梅统稿。

本书的部分内容在研究过程中得到上海市科委“科技创新行动计划”(072112011)、十二五科技支撑计划(2012BAJ01B02)等项目的资助。

本书可供地下工程设计、施工等单位的管理、工程技术人员以及高等院校土木工程专业的师生参考。

限于编者水平,书中难免有疏漏和错误之处,不足之处敬请广大读者不吝批评指正。

谨以此书献给上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司成立60周年(1954—2014年)。

编者

2014年6月

目 录

前言

第1章 绪论	1
1.1 国内外研究现状	1
1.2 本书主要内容	2
第2章 运营大直径盾构隧道的检测方法	5
2.1 概述	5
2.2 运营盾构隧道现状检测指标	6
2.3 检测方法与仪器	10
2.4 检测方案的确定	14
2.5 上海市延安东路盾构隧道检测实例	15
第3章 运营大直径盾构隧道现状评价理论与方法	19
3.1 概述	19
3.2 隧道结构安全评估指标体系的研究	20
3.3 评价指标判定标准	32
3.4 评价指标权重	39
3.5 隧道结构安全状态的模糊综合评价模型	45
3.6 延安东路隧道现状评价实例	52
第4章 大直径盾构隧道变形保护指标确定	60
4.1 隧道变形保护指标的研究现状	60
4.2 变形保护指标确定流程	60
4.3 延安路隧道变形保护指标的确定	61
第5章 明挖法施工对既有大直径盾构隧道影响的离心机试验	68
5.1 概述	68

5.2	土工离心机试验基本原理	68
5.3	同济大学 TLJ-150 复合型岩土离心试验机介绍	70
5.4	工程背景	70
5.5	试验方案设计	72
5.6	试验结果与讨论	83
5.7	小结	87
第 6 章	明挖法施工对既有大直径盾构隧道的数值模拟	89
6.1	概述	89
6.2	计算模型及工况设定	89
6.3	计算结果	91
第 7 章	地下通道明挖法设计方案和技术措施	96
7.1	工程概况	96
7.2	工程地质条件	96
7.3	围护体系设计	102
7.4	地基加固	104
7.5	隧道抗浮及结构抗浮	106
7.6	土方开挖	106
第 8 章	明挖法对既有大直径盾构隧道影响的施工控制措施	109
8.1	清障围护桩墙施工	109
8.2	微扰动基坑加固工程应用	112
8.3	基于卸载平衡效应基坑开挖	115
8.4	应急预案	129
第 9 章	明挖法施工对既有大直径盾构隧道监测与影响评价	133
9.1	信息化监测	133
9.2	通道施工对隧道影响的实测分析	141
9.3	小结	147
	参考文献	149

第1章 绪论

随着我国经济和城市化进程的发展,各大城市地下空间的建设迅速开展,明挖法作为城市地下空间施工的方法之一,因其费用较低、施工方便而被广泛使用。隧道作为现代城市的交通命脉,其安全性极为重要。然而随着地下空间的不断发展,尤其是市政地下道路建设工程的增多,不可避免地会在已建隧道附近出现各种各样的明挖施工的基坑工程,基坑开挖引起的卸载会对邻近既有盾构隧道结构产生不利影响。并且由于盾构隧道具有接缝多的特点,基坑开挖卸载不仅会引起隧道变形,还会使隧道产生附加内力和接头位移,过大的隧道变形会引发隧道渗漏水、混凝土局部压碎等影响结构安全的问题。因此,基坑开挖对既有盾构隧道的影响是近年来城市建设中的热点和难点问题。

1.1 国内外研究现状

1.1.1 明挖法对既有盾构隧道的影响概述

根据基坑和隧道的不同位置关系,基坑施工对隧道的影响可以主要分为两类:隧道上方基坑开挖的影响(图 1-1(a))和隧道侧方基坑开挖的影响(图 1-1(b))。

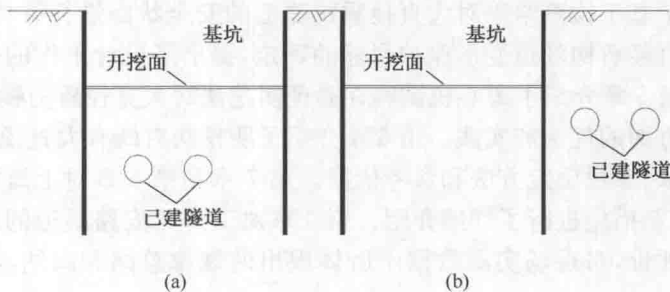


图 1-1 基坑开挖与既有盾构隧道的典型相对位置

对于第一类工程,基坑开挖对下方隧道的影响体现在以下方面:

(1) 由于隧道上方土体开挖,造成隧道在竖直方向上产生卸载,因此隧道会由于周边土压力的变化而产生相应的“竖鸭蛋变形”。

(2) 由于隧道上方的开挖卸载作用,使得隧道下方土体产生回弹变形,隧道随之产生隆起变形,但开挖区域范围有限,且卸载作用也会有一定差异,因此隧道在纵向的竖直方向上会产生不均匀沉降,从而对隧道结构和防水产生不利影响。

对于第二类工程,深基坑开挖对隧道的影响主要表现为:

由于深基坑开挖施工引起围护墙发生侧向位移及坑内隆起等,使坑外土体产生位移,埋于土层中的隧道也随土层产生附加位移。隧道的位移与其下卧土层的位移是相协调的,但由于基坑开挖是局部影响,且这一影响也有不均匀性,因此隧道会沿纵向产生不均匀位移,从而使隧道产生附加弯矩,造成螺栓受拉、受剪和环缝张开漏水以及衬砌管片压损。

与第二类工程相比较,第一类工程通常单次卸荷载量更大,可用的保护措施较为有限,工程中对隧道的保护也更为困难,且已有的工程经验较少。上海外滩通道明挖法施工对下卧大直径盾构隧道工程的影响则属于此类。

1.1.2 既有隧道上方明挖法施工的国内外发展现状

目前国内外已有一些在运营隧道上方进行开挖卸载的工程实例出现,各工程都根据现场情况及工程特点,采用了针对性的研究方法及有效的监控手段,保护了运营隧道的安全^[1-5]。表1-1列出了国内外隧道上方开挖卸载的典型工程实例^[6],为开挖卸载对运营隧道的影响和保护提供了借鉴,但这些工程所涉及的隧道多为小直径盾构隧道,而对大直径盾构隧道上方卸载,目前还没有类似的工程可以借鉴。

1.2 本书主要内容

本书以上海外滩通道明挖法施工对下卧大直径盾构隧道工程为背景,系统、全面地介绍和总结了明挖法基坑对盾构隧道的影响与保护的设计、施工方法。全文内容共分为9个章节。

第1章为绪论。第2章介绍了对已有运营大直径盾构隧道进行健康检测的方法和手段。第3章介绍了基于检测结果对大直径盾构隧道的安全状态进行评估的理论和应用。第4章介绍了大直径盾构隧道变形保护指标的确定,提出了设计工作的依据和施工过程中的控制目标。第5章介绍了离心机试验在验证明挖法对大直径盾构隧道影响设计方案和探索变形规律方面的理论和实践。第6章介绍了明挖法对既有大直径盾构隧道保护数值计算的模型选取、参数确定方法和参考依据。第7章和第8章对上海延安路隧道的设计、施工方案和控制措施进行了详细介绍。第9章对上海延安路隧道的施工完成后的效果进行了反馈和评价,对现场实测数据中所体现出的规律总结和归纳,为以后的设计和施工提供了经验。

表 1-1 隧道上方大面积卸载工程实例

序号	工程名称	隧道尺寸/m	衬砌类型	隧道的投影长度/m	隧道位于土层	开挖深度/m	坑底至随顶距离/m	围护结构	支撑体系	开挖分块	加固方式	抗拔桩设置	隧道变形/mm
1	布拉格某办公楼地下室	马蹄形 单圆形 双圆形	块石砌筑、 钢或钢筋 混凝土管片	下方 3条 隧道	泥质 页岩	12.7	7	重力式 挡墙	锚杆	未知	未知	未知	双圆净 空收敛 3.7
2	上海广场基坑工程	$\phi 6.2$	盾构拼 装管片	150	上海地区 软土	6.70	8.3	地下连 续墙	一道 斜撑	分成小块 开挖	搅拌桩格 栅加固	不设	13.58
3	杨高南路立交工程	$\phi 6.2$	盾构拼 装管片	34.5	上海地区 软土	7.4	7	地下连 续墙	2道 钢支撑	分块开挖, 横向抽条	振冲双液 注浆满堂 加固	隧道两侧 设置钻孔 灌注桩	13
4	南京龙蟠路地道	$\phi 6.2$	盾构拼 装管片	13.6	淤泥质 亚黏土	7	3	钻孔灌 注桩	2道 钢支撑	隧道上方 纵向抽条	高压旋喷 桩满堂加固	隧道两侧设置 钻孔灌注桩	5.5
5	东方路— 张杨路下 立交	$\phi 6.2$	盾构拼 装管片	18	上海地区 软土	6.5	2.8	SMW工 法桩	2道 钢支撑	隧道上方 纵向抽条	满堂加固, 隧道两侧 搅拌桩加固	隧道两侧 设置 H 型钢	12.25
6	上海地铁 8 号线大世界 站北风井	$\phi 6.2$	盾构拼 装管片	未知	上海地区 软土	9.1	7	SMW工 法桩	2道 钢支撑	隧道上方 纵向抽条	高压旋喷 桩满堂加固	隧道两侧 设置 H 型钢	6.45
7	南京火车站 站前广场西 出口基坑	$\phi 6.2$	盾构拼 装管片	11.2	淤泥质 粉质黏土	7.55	1.67	人工挖 孔桩	2道 钢支撑	隧道上方 纵向抽条	高压旋喷桩 满堂加固,后 改搅拌桩	隧道两侧设置 钻孔灌注桩	8
8	南京路下 沉式广场	$\phi 6.2$	盾构拼 装管片	下方 4 条隧道 交叉	上海地区 软土	3.8	3.3	搅拌桩 重力式 挡墙	无内支撑	隧道上方 纵向抽条	高压旋喷 桩满堂加固	隧道两侧 设置钻孔 灌注桩	8.04

(续表)

序号	工程名称	隧道尺寸/m	衬砌类型	隧道的投影长度/m	隧道位于土层	开挖深度/m	坑底至随顶距离/m	围护结构	支撑体系	开挖分块	加固方式	抗拔桩设置	隧道变形/mm
9	北京五号线东单站	马蹄形 高 5.7, 宽 6.1	暗挖法复合式衬砌	23.66	卵石圆砾层、粉土和细中砂层	9.83	0.6	暗挖法施工	复合式衬砌	分洞开挖	双液浆满堂加固	设置抗拔锚杆	未知
10	上海新金桥广场基坑	φ6.2	盾构拼装管片	未知	上海地区软土	5	4	SMW 工法桩	1 道钢支撑	隧道上方纵向抽条	搅拌桩满堂加固	隧道两侧设置 H 型钢	4.8
11	上海雅居乐广场	φ6.2	盾构拼装管片	120	上海地区软土	4.9	3.55	SMW 工法桩	一道角撑或斜抛撑	隧道上方纵向抽条	搅拌桩满堂加固	隧道两侧设置钻孔灌注桩	8.52
12	上海金昌广场	φ6.2	盾构拼装管片	120	上海地区软土	5	4	SMW 工法桩	未知	隧道上方纵向抽条	搅拌桩满堂加固	未知	7.71
13	北京成府路中段地下通道	马蹄形 高 5.5, 宽 6.06	暗挖法仅施工初期支护	未知	粉质黏土	12.2	7.33	土钉墙	无内支撑	未知	未知	未知	~20

注:“隧道上方纵向抽条”表示开挖的土条垂直于隧道线路方向。

第2章 运营大直径盾构隧道的检测方法

2.1 概述

目前评价盾构隧道结构安全的评价指标主要包括隧道外观、隧道结构变形、隧道结构材料强度、隧道结构耐久性和隧道渗漏水。隧道外观包括管片混凝土裂缝、破损和污渍。隧道结构变形包括隧道沉降、断面收敛以及接头张开和错台;隧道结构材料强度主要指混凝土材料强度;隧道结构的耐久性包括混凝土碳化以及隧道内环境特点。隧道检测是根据上述评价指标而展开的。

运营大直径盾构隧道性能现状检测是指通过对运营隧道的结构进行调查、检测、分析,调查隧道结构现状,测定其性能指标,检测隧道结构损伤状况(包括损伤位置、损伤程度),从而分析其结构安全状态,以合理评价开挖卸载对既有盾构隧道的的影响,并根据其安全状态制定合理的保护措施。

随着运营盾构隧道不断增加,盾构隧道结构安全养护与检测成为盾构隧道领域的新课题。国际隧道协会(ITA)专门成立了一个工作组(Working Group 6: Maintenance and Repair)对此问题展开研究。该工作组先后于1987年发布了 *Civil Engineering Records of Underground Structures* 研究报告^[7],1991年发布了 *Report on the Damaging Effects of Water on Tunnels During Their Working Life* 研究报告^[8],1995年发布了 *State-of-the-art of Non-destructive Testing Methods for Determining the State of a Tunnel Lining* 报告^[9]。

在盾构隧道起步较早的英国,隧道服役年限已接近或超过100年,因此对隧道结构的检测更加重视,Gleig Frazer^[10]等于1998年开始着手对自19世纪开始建造的伦敦地铁178 km隧道结构的安全现状进行检测和评估,以此来评价隧道结构的健康安全状态。

日本是隧道技术最为发达的国家,对运营隧道结构安全也十分重视,日本建设省对全国3 529座公路隧道检查,结果发现60%以上的隧道结构都存在着不同程度的病害。为此,日本政府向日本铁路技术研究所(Railway Technical Research Institute)提供520万美元的经费用于研究隧道病害的检测评估方法及整治措施。日本隧道技术研究所发布了《日本公路隧道老化手册》^[11]用以指导如何对既有隧道进行检测与可靠性寿命评估。此外还进行了多项有关公路隧道长期安全性评价和维护加固对策的专题研究,在此基础上形成了《隧道补强、修补手册》^[12]。该手册对隧道衬砌的检测进行细致的分类,并对衬砌劣化、渗漏、冻融以及衬砌混凝土爆裂等提出了应对措施。以上措施在日本的津轻(Tsukayama)、福岡(Fukuoka)等隧道的维护过程中都得到很好的应用。

在德国,检测作为主要的隧道结构维护手段被规定在 DIN1076^[13](隧道检测评估规范)中,并对隧道结构以及附属设施的检测方案及检测项目做了具体分类,给出了隧道结构检测和维护的时间和步骤安排,采用激光扫描等方法对伦斯泰格隧道进行了成功检测。

韩国的 Lee 和 Choi 等^[14]提出了基于检测数据的隧道结构系统识别方法,可根据刚度均减或裂缝概念估计隧道衬砌破损的程度和位置。

我国由于盾构隧道起步较晚,目前关于隧道检测主要集中在铁路隧道方面,而地铁隧道方面的检测主要集中在对隧道沉降和横向变形方面的量测,如王如路等^[15]通过长期从事地铁监护的工作经验和理性分析,根据对地铁结构近年来发现的诸多问题,结合引起上海地铁一、二号线车站及隧道结构沉降、渗漏水的相关因素进行了分析和研究,提出了相应的整治对策。随着运营盾构隧道不断增加,对盾构隧道结构安全检测技术的需求也日益增加。

2.2 运营盾构隧道现状检测指标

2.2.1 盾构隧道外观检测指标

盾构隧道外观检测指标是指能够在不破坏结构的情况下,可以用肉眼直接观察到的结构表面特征。

1. 混凝土开裂

盾构隧道衬砌结构在施工和运营期间,受到多种荷载的作用,经历了复杂的受力过程,加之其浇筑、运输、拼装及运营期间受温度、混凝土收缩、震动、纵向不均匀沉降等影响,可能产生裂缝。由于衬砌结构一般长期处于地下水位以下,结构一旦存在裂缝,在隧道外水压力作用下,地下水就可能渗入裂缝,造成混凝土结构水蚀变异、钢筋锈蚀。而且隧道内部漏水,影响内部设备,破坏隧道正常使用,甚至威胁隧道运营安全。

按照裂缝发展方向可分为斜裂缝、环向裂缝、纵向裂缝、不规则裂缝等,不同的裂缝产生的机理不同,所反映的隧道混凝土衬砌结构性态也不同。例如,斜裂缝、环向裂缝一般认为是由于剪切、不均匀沉降等原因引起的;不规则裂缝大多是因混凝土收缩、温度应力、施工工艺不当等原因产生的;而纵向裂缝的产生原因,影响因素较多,从其规律上分析,是由于外荷载变化所引起的。

对于混凝土裂缝,采用裂缝的长度、宽度和深度作为主要检测指标,并且采用裂缝的发展性、方向和密度作为裂缝长度和宽度的辅助检测指标。

2. 混凝土破损

混凝土破损现象也是在运营隧道中极为常见的,混凝土破损的原因主要有:①管片制作、运输过程中产生的破损,可称为初始缺陷;②隧道施工拼装过程中千斤顶顶力不均匀导致管片边缘或角部破损;③螺栓安装过程中,造成螺栓孔附近混凝土破损;④运营过程中管片受力变形导致混凝土接缝处压碎、表层剥落;⑤受外力冲击导致损伤(如隧道内异物在高速运行的列车作用下碰撞混凝土管片导致破损,隧道工作人员在工作过程中失误造成混凝土表面破损);⑥由于风化、侵蚀导致混凝土剥落甚至产生孔洞。

针对不同的破损情况,应对混凝土衬砌结构的破损位置、规模(面积或体积)、分布、发展、性质等进行全面检测,绘制结构破损展开图,并与设计和竣工资料展开对比分析,了解和

掌握隧道结构的损伤状况。

隧道检测中选取衬砌结构的破损位置、规模(面积或体积)、分布作为混凝土破损情况的主要检测指标,隧道结构破损的发展速度和趋势可作为辅助的检测指标。

3. 混凝土表面污迹

当混凝土内部钢筋产生腐蚀时,铁锈可能沿渗漏水路径,如裂缝、注浆孔(内部裂缝连通注浆孔)、接缝(内部裂缝连通接缝)等部位被水携带到混凝土管片表面,从而沉积附着在表面上,导致混凝土管片表面会产生颜色的变化,形成表面污迹。当螺栓发生腐蚀时,也会在接缝或是螺栓孔附近发现类似的污迹。此外,隧道周围土体中的有色物质或是泥沙也可能随渗漏进入隧道内表面,并附着在管片上,形成污迹。

因而,污迹不但可以判断渗漏水位置,还可以作为判断钢筋和螺栓腐蚀位置的依据,此外还可以对隧道周围腐蚀性物质进行鉴定。

对于混凝土表面污迹采用污迹的位置作为主要检测指标。此外,污迹的面积以及成分可以作为辅助检测指标。

对于有外装饰材料或保护层的盾构隧道,不仅需要对主体结构进行检测,而且需要对装饰材料或是保护层进行检测。对装饰材料或是保护层进行检测,不但可以反映其现状,而且可以辅助分析内侧主体结构的性态,并且可以为破除表层对内部主体结构进行检测提供一些有用的信息,如破除表层的位置以及规模等。

表层的检测指标为表现性态检测指标和渗漏水检测指标,具体的检测指标同主体结构检测指标,但是一般情况下只做一般性检测,不需要进行细致的检测。

2.2.2 变形及位移检测指标

1. 变形检测指标

1) 纵向沉降

隧道结构的纵向沉降指隧道沿轴线方向在竖直方向和水平方向的位移情况,反映了隧道纵向的整体力学特性,可用以评价隧道结构纵向稳定性和纵向抗震性能等。

饱和软土地层中的装配式隧道衬砌结构,受其沿线地层的物理力学性质以及荷载等条件的影响,纵向产生不均匀沉降。隧道纵向不均匀沉降将导致隧道沿纵向出现不均匀的压弯和拉伸现象,严重时会引起管片压碎破损。隧道接头的错动变形,影响隧道的防水甚至正常使用。软土地层隧道的纵向沉降性态,对隧道结构本身及其地表结构的影响都非常显著。因此,国际隧道协会(ITA)在《盾构隧道衬砌设计指南》^[16](*Guidelines for the Design of Shield Tunnel Lining*)提到,必要时要将隧道的纵向沉降影响列入荷载种类的其他荷载项予以考虑。

对于隧道纵向沉降,可以采用纵向曲率半径作为主要检测指标,辅以整体沉降、差异沉降和沉降速率等。

2) 横断面变形

在饱和度、灵敏度较高的沿海软土地区,施工阶段对土的扰动及运营阶段沿线新建工程的影响,尤其是未来城市地铁的立体化建设使得隧道结构变形的大小达到了不可忽略的程度。隧道结构横断面变形,引起接头张开量增加会给隧道横断面带来不可忽略的附加内力。横断面变形可用以判断隧道结构在该横断面处的变形和力学性能,为结构的安全评价提供

基础。一般情况下需给出隧道薄弱部位和关键断面的横断面变形。

横断面变形对隧道的影响可以用横向位移和横向收敛变形等指标来反映。对于收敛变形,采用椭圆率作为评价指标。

3) 接缝性态检测指标

装配式衬砌的重要特征是接头的存在,接缝性态直接影响着整个隧道衬砌的力学性态。同时接缝是盾构隧道防水的一道重要防线,如果接缝张开量或者错台过大,极易导致隧道渗漏水 and 接头损坏,从而影响隧道的力学性态和运营安全。此外,接缝的性态还可以反映隧道变形以及不均匀沉降的状态。因此,有必要加强隧道接缝性态的调查,以确保隧道防水是否处于安全状态。

接缝的性态检测指标主要包括接缝的错台、接缝张开量。有条件的情况下可以测定接缝防水材料的老化程度及防水性能。

2. 位移检测指标

位移检测主要是为了确定目前隧道的位置及线形,以补充原有设计及施工资料,确保临近工程设计施工采用现有隧道位置作为参考。同时,位移检测也可以辅助确定隧道变形状态。

(1) 高程测量。可以确定隧道的埋深,还可以用来计算隧道纵向沉降。

(2) 中线测量。可以确定隧道的线位,还可以用来计算隧道的水平纵向变形。

2.2.3 渗漏水检测指标

隧道工程渗漏水是盾构隧道常见的一种病害形式,尤其是在上海等多雨及地下水位较高的软土地区,除了隧道结构本身的特点影响以外,渗漏水不仅与地下工程周边地质水文环境、结构埋深、防水设计方案、防水材料等有关,还与结构混凝土性能、施工方案、施工工艺等有关,因而多数隧道工程在运营阶段或多或少都会存在局部渗漏的质量缺陷。由于隧道渗漏水,增加了隧道内空气的湿度,容易造成通讯、照明器材、机电设备及隧道结构等损坏;由于道床及轨道积水,直接危及隧道的使用功能,造成不应有的交通事故;隧道渗漏水还加快了管片混凝土的碳化速率,特别是有腐蚀性的地下水,破坏了混凝土的结构,减少了隧道的使用寿命;隧道渗漏水还可能降低地下水位,加速隧道沉降,对生态环境造成破坏。

对于隧道渗漏水对隧道的影响,可以采用渗漏部位、渗漏速率、湿渍面积等作为主要检测指标来反映。漏水压力、渗漏水中泥沙率可以作为辅助检测指标。

调查整个隧道的渗漏情况并对渗漏的程度进行分级、对严重渗漏给出渗漏路径和渗漏量,存在漏泥现象的部位,检查其结构背后空洞情况,并绘制渗漏展开图。

2.2.4 力学性能检测指标

隧道结构材料力学性能的评价指标是隧道结构安全性评价的主要指标。为满足隧道结构安全性评价的需要,力学性能检测指标可以分为混凝土、钢筋、管片螺栓和接头材料强度指标,隧道衬砌混凝土及钢筋、螺栓的动静弹性模量以及水文地质参数等。

1. 强度指标

强度指标不但是结构设计时的一项重要参数,而且也是结构安全评价的一项重要指标,如果结构材料强度不足,会导致结构的局部破坏或引起整体破坏,其后果是极其严重的。虽

然在设计之时,材料强度往往都有较大的余量,可以确保结构安全,然而由于材料的初始缺陷、质量不过关或是老化等原因;其强度并不是一个恒定不变的量,因此需要在检测时对强度指标进行测定。

强度指标主要用以判断隧道结构材料的强度状况,包括衬砌混凝土强度、钢筋强度、管片螺栓强度和接头材料强度等。

2. 弹性模量

隧道衬砌混凝土及钢筋、螺栓的动静弹性模量是进行结构变形计算的基本参数,因此也是性能检测的基本指标。

3. 水文地质参数

水文地质参数是对隧道结构性能现状进行评估的重要参数,用于提供荷载条件,一般情况下可根据隧道建设时的详细勘查资料得到,对于建设时间较早而缺乏相关资料或水文地质条件有较大改变时需重新测试。

2.2.5 耐久性能检测指标

1. 环境指标

1) 渗入水质

量测隧道内渗入水质,包括不同部位渗漏水中氯离子、硫酸根离子等有害离子含量、渗入水的 pH 值等,了解隧道结构外侧表面的有害物质含量,将其作为耐久性能检测的渗水水质指标。

2) 空气质量

空气质量指标包括隧道内二氧化碳、二氧化硫、水蒸气等的日、月或年的平均含量,了解隧道结构所处环境空气的质量以及这些指标对隧道结构的直接和间接的影响,将其作为耐久性能检测的空气质量指标。

3) 环境温湿度

隧道内日、月或年平均的环境温湿度及其变化情况,将其作为耐久性能检测环境指标之一。

2. 隧道主要结构材料指标

1) 混凝土指标

(1) 碳化深度/保护层厚度

管片混凝土的碳化一般是指空气中的二氧化碳与水泥石中的水化产物发生物理化学反应,生成碳酸盐或其他物质的现象。由于混凝土表面碳化后生成的碳酸盐硬度较高,使管片混凝土表面硬度增高,回弹值增大,对管片混凝土强度影响不大。然而,混凝土碳化会降低混凝土材料的碱度,继而破坏钢筋表面的钝化膜,使混凝土失去对钢筋的保护作用,发生钢筋腐蚀。混凝土碳化深度用以判断既有结构现状的碳化侵蚀程度,同时根据混凝土保护层厚度的实测值,结合混凝土碳化模型可估算因碳化导致钢筋脱钝的剩余时间。

(2) 氯离子(Cl^-)/硫酸根离子(SO_4^{2-})含量及浓度分布

离子侵蚀主要包括 Cl^- 侵蚀和 SO_4^{2-} 侵蚀。 Cl^- 是一种极强的去钝化剂,当钢筋表面的 Cl^- 浓度达到临界浓度时, Cl^- 便可渗入钝化膜与 Fe^{2+} 发生化学反应,生成 FeCl_2 ,从而破坏钢筋钝化膜,引起混凝土内钢筋锈蚀,并逐渐导致混凝土结构的破坏。

实验室内用滴定的方法测试混凝土中氯离子/硫酸根离子含量及其浓度分布,从而得到隧道结构的氯离子和硫酸根离子侵蚀程度,作为既有结构的耐久性性能检测的指标。

(3) 混凝土渗透性

混凝土渗透性反映了混凝土材料对外界有害物质传输的抵抗能力,对于地下工程混凝土渗透性对有害物质在混凝土内的传递机理和传递速度往往起控制作用。

(4) 混凝土化学成分

给出隧道结构混凝土材料的化学产物组成、混凝土微观结构、主要化学成分及其含量等,从而了解相应混凝土材料的微观化学组成。

2) 钢筋指标

指隧道结构主要构件主筋的锈蚀退化程度,包括钢筋的锈蚀层厚度、剩余直径、腐蚀电流、腐蚀电位、腐蚀电阻等,作为既有结构耐久性性能的检测指标。

3) 钢构件指标

了解整个隧道连接螺栓、钢构件锈蚀情况,包括钢构件的结构尺寸、锈蚀范围、锈蚀深度、腐蚀电流等,从而给出隧道结构稳定能力的丧失程度。

4) 接缝防水材料性能

防水密封材料是保证盾构隧道管片结构水密性的重要组成部分。由防水材料劣化而导致的隧道渗漏水不仅会降低钢筋混凝土管片的耐久性,而且影响到隧道内各种设施的使用功能,恶化隧道内的运营环境,是影响结构耐久性正常使用极限状态一个重要方面。

防水密封材料评价着重于要求密封材料的功能来决定既有密封垫的安全性。作为评价密封材料劣化程度的一个大致标准,可以考虑采用接触面应力的长期保持性,即如果在长期接触面应力降低较小时,则可认为其耐久性是良好的。假定以“接触面初应力由 588 kPa 降低至 196~294 kPa 的时效变化就是老化(寿命)”作为判定标准^[17],也就是从作为衡量劣化程度指标的止水性能着眼,用长期的接触面压力的变化予以判断,是目前最为有效的方法。但是考虑到评价指标的可操作性,密封垫接触面压力较难量测,而由于防水密封材料属于弹塑性材料,可以根据相应的本构关系,根据位移值确定接触面压力。因此,可以将密封垫压缩量作为防水材料性能的检测指标。

当有条件并且允许采样时,可以对接缝防水材料进行室内拉压试验和抗渗性试验。

2.3 检测方法与仪器

2.3.1 混凝土表面性能检测

1. 混凝土裂缝

通常采用目测的方法寻找有裂缝的位置,并使用裂缝尺、检验规和卷尺等进行裂缝宽度和长度的测量。裂缝的深度和方向以及混凝土内部裂缝可通过钻孔取芯进行检查。此外,超声波无损检测方法因其对隧道没有损伤而应用较为广泛。

根据检查要求的不同,将裂缝检查分为简易检测和跟踪检测。

1) 裂缝简易检测

使用简易的测量器具或方法,测量裂缝的现状并查明裂缝形状有无发展变化。

(1) 砂浆扁饼。横跨裂缝涂以拌合砂浆(扁饼),观察裂缝有无新的发展(由于振动等原因,砂浆扁饼可能掉落,因此不宜设置在隧道顶部)。

(2) 标记。目测裂缝末端位置并标记,用油漆等标明检查日期。

(3) 裂缝测量计。横跨裂缝设置机械式宽度测量计或采用裂缝观测仪,测量裂缝宽度变化。

(4) 标点。横跨裂缝设置标点,用卡尺测量其间距变化。

2) 裂缝跟踪检测

主要针对裂缝发展变化进行连续观测,可采用电阻丝应变型的裂缝变形计进行测量。由于季节的变化,裂缝会随混凝土的热胀冷缩而变化,因此宜连续测量1年以上的时间,将检测结果按时间顺序记录整理,掌握裂缝发展速度及其规律等。

2. 混凝土破损

采用目测以及卷尺对混凝土破损进行检测。

3. 混凝土表面污迹

采用目测以及卷尺对混凝土表面污迹进行检测,当需要对污迹成分进行进一步分析时,可采样带回实验室进行室内分析。

2.3.2 渗漏水

目前,渗漏水的检测主要采用目测,辅以红外热成像仪、雷达等对隧道进行定性和定量的判定方法。全隧道进行渗漏程度分类,调查渗漏严重部位、渗漏路径和渗漏量以及漏泥通道的部位,检测其结构背后空洞情况,并绘制渗漏展开图。根据检查的内容、要求等,将其分为两类进行检测。

1. 漏水简易检测

(1) 位置。采用目测的方式检查漏水的位置、数量、浑浊程度、冻结以及原有防(排)水设施的功能。检查清楚后,将漏水位置及范围标记于隧道展示图上。

(2) 漏水量。检查漏水流量、漏水状态以及排水沟内的水流状态等。水量较小时采用观察法记录水滴每分钟的个数,通过测量面积定量判断,并辅以红外热成像仪、雷达等对隧道进行定性和定量的判定。在漏水显著的情况下,可用秒表和计量容器等测定其流量。

(3) 浑浊。漏水如果是浑浊的,需要检查沙土是否和漏水一起流出;如有,需测定每处沙土流出量(如水槽内堆积的沙土量)。降雨后出现漏水浑浊的隧道,有必要进行详细的检查。

(4) 背后空洞。对渗漏严重或存在漏泥现象的部位,采用地质雷达对其结构背后空洞情况进行专项调查。

(5) pH值。漏水是助长衬砌材质劣化的原因之一,特别是漏水显示出强酸性时,混凝土有严重劣化的危险,必须引起注意。检查时,一般使用pH试纸对漏水的酸碱度做简易测定。

(6) 原有防排水设施检查。检查原有防排水设施的设置及技术状况,其功能是否发挥正常,能否满足现在的防排水要求。

2. 水质检测

当漏水有可能具有腐蚀劣化作用时,应对其水质进行检测。通过对漏水和流入隧道中