

乐贵平 方江华 钟长平 / 主 编
王杜娟 尹清锋 乔国刚 李安清 黄威然 / 副主编

2018年
第四届

中国盾构工程技术 学术研讨会论文集

4TH PROCEEDINGS OF 2018

**CHINA
SHIELD**
ENGINEERING TECHNOLOGY
ACADEMIC SYMPOSIUM



用于汕头海湾隧道的

国内自主研发直径15.03m泥水平衡盾构机



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

4TH PROCEEDINGS OF 2018

CHINA
SHIELD

ENGINEERING TECHNOLOGY
ACADEMIC SYMPOSIUM

2018年
第四届

中国盾构工程技术 学术研讨会论文集

乐贵平 方江华 钟长平 / 主 编
王杜娟 尹清锋 乔国刚 李安清 黄威然 / 副主编



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

内 容 提 要

本论文集收录论文 60 篇,内容涉及盾构机设计与制造、盾构施工、盾构测量控制、盾构耗材生产等与盾构工程各领域有关的理论和实际问题。

本论文集可供盾构设计、施工、工程管理、教学、科研等相关专业技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

2018 年第四届中国盾构工程技术学术研讨会论文集 /
乐贵平, 方江华, 钟长平主编. —北京: 人民交通出版
社股份有限公司, 2018. 11

ISBN 978-7-114-14660-2

I. ①2… II. ①乐… ②方… ③钟… III. ①隧道施
工—盾构法—学术会议—文集 IV. ①U455.43-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 257607 号

书 名: 2018 年第四届中国盾构工程技术学术研讨会论文集

著 作 者: 乐贵平 方江华 钟长平

责任编辑: 刘彩云 李 梦

责任校对: 刘 芹

责任印制: 张 凯

出版发行: 人民交通出版社股份有限公司

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010)59757973

总 经 销: 人民交通出版社股份有限公司

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京虎彩文化传播有限公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 28.75

字 数: 724 千

版 次: 2018 年 11 月第 1 版

印 次: 2018 年 11 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-14660-2

定 价: 168.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

编 委 会

顾 问(按姓氏笔画为序)

丁建隆	王梦恕	刘卡丁	关 龙	朱瑶宏
杨广武	杨华勇	严金秀	沙明元	何 霖
张 弥	张 翌	张自太	陈湘生	竺维彬
周文波	洪开荣	施仲衡	贺长俊	钱七虎
徐滨士	彭苏萍	鞠世健		

主 任

吴煊鹏

副主任(按姓氏笔画为序)

王 良	孔 恒	史海鸥	刘 军	江玉生
朱宏军	杨秀仁	肖龙鸽	陈 馈	张志良
油新华	周 骏	周江天	胡胜利	袁大军
黄昌富	程永亮	游大江	路 刚	慧丽萍

主 编

乐贵平 方江华 钟长平

副主编

王杜娟 尹清锋 乔国刚 李安清 黄威然

前 言

经过近一年时间的筹备和组织,由北京盾构工程协会、广州地铁集团有限公司、中国建设基础设施有限公司、中铁工程装备集团有限公司和中铁十六局集团有限公司等有关单位联合主办的“第四届中国盾构工程技术学术研讨会暨复合地层盾构施工技术国际论坛”,在秋高气爽的羊城胜利召开了!这次大会是中国盾构工程界的一次盛会,来自政府、高校、研究机构、生产厂家、建设、设计、施工、监理、风险管理等单位近 600 名代表欢聚一堂,交流盾构工程技术的经验,探讨盾构工程技术的理论,共商中国盾构工程的发展大计。来自各方的代表们体现了跨部门、跨领域、跨地区、跨专业的特点,表明中国现代盾构工程技术经过近四十年的高速发展,已走向全面融合的时代,我国对盾构工程技术实行统一指导、管理、协调的机制呼之欲出。

组委会在精心组织大会主题报告的同时,从提交的 90 多篇论文中审定了 60 篇编纂成《2018 年第四届中国盾构工程技术学术研讨会论文集》。这些论文内容丰富、涉及面广,理论水平及技术水平较高。论文集展现了我国盾构技术在大直径、长距离、刀盘及刀具对各类地质的适应性、盾构工程风险管理、信息化、盾构再制造等方面的发展水平,标志着我国盾构工程技术正在全方位地赶上甚至超越了世界盾构工程技术的先进水平,代表了我国盾构工程技术发展的最高水平。

当前世界全球化发展趋势正在排除各类干扰不断向前推进,我国为解决人民追求美好生活与发展不充分、不平衡的矛盾,不断加大基础设施的建设规模;党的十八大以来,我国提出的“一带一路”倡议不断得到世界各国的高度认可和积极响应,中国盾构工程技术走出去已是不可逆的大势。盾构工程技术必将迎来快速发展的时期,我国盾构工程技术人员已经或正在与世界各国同行同台竞技,与高手过招,我国盾构工程技术全产业链的优势必定得到极大的发挥。展望未来,我们充满信心。

在论文集的编纂过程中,北京盾构工程协会秘书处为论文的征集、初步筛选做了大量卓有成效的工作,在论文出版之际对他们的辛勤工作表示诚挚的谢意!

尽管编审委员会对论文的编审和校核等方面付出了辛勤的劳动,但难免存在疏漏和不足,恳请业内同行批评指正!

预祝 2018 年第四届中国盾构工程技术学术研讨会取得圆满成功!

《2018 年第四届中国盾构工程技术学术研讨会论文集》编审委员会

2018 年 10 月

目 录

超大直径盾构施工主要风险与对策·····	钟长平 谢小兵 刘 智 周 斌(1)
苏通 GIL 综合管廊工程盾构隧道总体设计 ·····	刘 浩(15)
高黎贡山 TBM 的挑战及应对措施·····	卓兴建(23)
大直径盾构在复杂地层掘进中关键问题的梳理——基于珠海横琴三通 通工程 ·····	何 人(36)
城市多功能超大直径隧道最新建造技术 ·····	王 海 Werner Burger Thorsten Tatzki(49)
大直径盾构技术应用与展望 ·····	杨 辉 王 涛 张文强(56)
φ1.2m 微型盾构机刀盘与液压系统的设计 ·····	周庆祥 张海东 张 潮(63)
三维加载岩石试验系统设计 ·····	张 潮 周庆祥 张海东(72)
浅谈敞开式 TBM 姿态控制及主梁式 TBM 小转弯半径针对性设计 ·····	张喜东 尹威华 肖 波(76)
复合地层长距离穿越海底隧道超大直径盾构机选型 ·····	杨明先(82)
盾构地下接收室施工三维数值模拟分析及沉降控制 ·····	刘 军 张豫湘 王利民 马云新(88)
盾构突遇孤石停机原因分析及“衡盾泥”带压进舱技术·····	黄威然 区穗辉(94)
基于数值模拟的盾构机刀具优化配置研究·····	赵雪峰 王 乐 刘小林(106)
高水压复合地层海底带压进舱换刀技术·····	陈集勇 何阳油 蔡晓平(118)
广州地铁首例复合地层长距离盾构施工“零开舱、零换刀”施工技术 ·····	何颖豪 成 彬(128)
软弱地层中盾构始发及掘进技术·····	王学龙(139)
上软下硬地层盾构掘进模式的研究·····	郭庆彪(144)
北京地铁狭窄场地盾构分体始发施工技术浅析·····	李 斌(149)
盾构机拆除技术与施工组织·····	贾云飞(158)
盾构小半径曲线旁穿既有建筑物施工技术·····	郑 巍(165)
钢板接收盾构机空推平移技术研究与应用 ·····	赵志龙 朱英伟 周建伟 杨芳盛 徐 桩(172)

泥水盾构泥浆循环再利用技术研究	刘晓正	庞 林	曹金鼎	(177)	
泥水平衡盾构直接切削玻璃纤维筋进出洞施工技术	曹金鼎	庞 林	韩维畴	刘晓正(182)	
泥水平衡盾构机带压开舱施工技术研究与应用	曹金鼎	刘晓正	庞 林	(189)	
泥水平衡盾构穿越锚索区施工技术	曹金鼎	刘晓正	庞 林	韩志亮(197)	
富水砂层双螺旋土压平衡盾构施工技术	王立军	刘江浩	翟梁旭	牛宝强	杨召亮(204)
复杂地层中泥水平衡盾构掘进技术	张 磊	王 乐	(210)		
富水砂层泥水平衡盾构施工关键技术	庞 林	刘晓正	曹金鼎	韩志亮	韩维畴(217)
盾构始发洞门双帘布密封洞门的应用	李小斌	付 成	(226)		
盾构机姿态调节控制技术	周法庭	(232)			
盾构下穿既有线铁路控制技术	杜殿逵	阮应书	(238)		
上软下硬地层泥水盾构施工技术	赵东红	(248)			
小半径曲线盾构掘进安全质量控制技术	阮应书	(253)			
小半径曲线段盾构始发盾构机的轴线定位	阮应书	(265)			
严寒地区盾构冬期施工技术	王立军	刘江浩	翟梁旭	牛宝强	杨召亮(282)
砂卵石地层盾构穿越重叠重大风险源施工技术	郑永军	(287)			
西安地铁富水砂层刀盘适应性浅析	乔 龙	(292)			
气囊式盾尾密封在地铁盾构工程中的应用	卢艳伟	陈振溢	李安清	(298)	
带式压滤机在黏土地层泥浆处理中的应用技术及效果分析	武慧韬	(303)			
曲线管幕机在超大地下空间工程中的应用和探索	蒋鹏鹏	冯 猛	龚廷民	(312)	
地下停车场掘进机建造技术与展望	范 磊	谌文涛	肖 威	蒋鹏鹏	(319)
直接铺管施工技术研究与应用	王 乐	(326)			
小棱镜测量技术在管片姿态测量中的应用	麻新民	(332)			
黄土地质隧道盾构施工渣土改良技术	李志刚	(338)			
浅谈盾构机再制造	张洪涛	马晓峰	(342)		
高分子聚合物在沈阳砂砾地层土体改良中的应用	宋洪雁	(346)			
“克泥效”材料在土压平衡盾构施工中的应用	张岩涛	(348)			
海瑞克盾构机泡沫系统升级改造分析	魏 勇	(353)			
人工地层冻结法及其在盾构隧道区间联络通道施工中的应用	方江华	张兆龙	王文兵	(357)	

盾构施工监测系统在地铁施工中的应用..... 罗建利 贺泊宁 邢 茜 周 刚(361)

一种新型土体改良聚合物研究及工程应用..... 侯德超 于伟鹏 宋洪雁(367)

浅谈城市地铁盾构区间隧道快速施工组织与应用..... 王 强 李安清 帅玉兵(373)

豫机城际铁路大直径泥水平衡盾构机吊装技术..... 杜 勇(379)

国内外盾构机运输操作流程现状浅析..... 陈 月(391)

双护盾 TBM 城区转场施工技术 周泽民(403)

大断面暗挖隧道台车施工技术研究及应用..... 杨 义(412)

地铁明挖车站深基坑监测试验研究..... 刘文亮(419)

地铁高架桥预制 U 形梁混凝土外观质量控制

..... 周丽苹 周春宝 林志达 刘敦然(425)

盾构洞门涌水堵漏及继续推进处理措施..... 李小斌 付 成(431)

哈尔滨地铁智慧盾构信息监控系统的构建与应用

..... 王 虹 竺维彬 李世佳 李俊沅(436)

超大直径盾构施工主要风险与对策

钟长平 谢小兵 刘 智 周 斌

(广州轨道交通建设监理有限公司 广东广州 510010)

摘 要:随着我国城市基础设施建设的快速发展,采用盾构法建设隧道面临直径更大、埋深更深、距离更长以及地质条件更加复杂的情况,我国工程技术人员已经应用不同的超大直径盾构完成了多个工程。本文统计了国内外超大盾构工程案例,通过南京长江隧道、扬州瘦西湖隧道和春风隧道等项目,针对工程特点和施工难点,总结了超大直径泥水盾构隧道穿越诸如淤泥质粉质黏土、硬塑膨胀性黏土、粉细砂与砾砂(岩)、上软下硬复合地层等复杂地层的关键技术;研究分析了盾构选型、盾构适应性改造、洞门密封泄漏和盾构始发、江中带压开舱换刀、江中浅覆土段冒顶塌方等主要风险,并结合工程案例提出了解决风险的对策,对超大直径盾构的施工具有重要参考价值和指导意义。

关键词:超大直径;盾构施工;风险;对策

1 引言

过去的近二百年里,盾构施工技术随着生产实践应用得到不断完善和改进。仅仅是最近的一二十年间,盾构隧道外径以及盾构机直径的大小被不断刷新,盾构隧道正朝着超大直径的方向发展。

超大直径盾构隧道一般应用于公路或公路与轨道交通合建项目,其边界很难界定。20年前,直径10~11m的盾构被认为是最大的,可以满足单层2车道需求;而近10年来,随着我国城市化进程的发展及交通需求量的增长,14m及以上的直径是当前的主流,可以满足双层4、6车道或单层3车道需求。目前我们所说的超大直径盾构直径均为14m以上。

国际上,日本1994年首次采用 $\phi 14.14\text{m}$ 盾构进行东京湾隧道施工;在国内,2004年上海上中路隧道引进荷兰绿色心脏 $\phi 14.87\text{m}$ 盾构进行施工。截至2016年,直径14m及以上的盾构隧道项目有36例(含在建项目),其中国外有15例,国内有21例。国内直径14m及以上的隧道主要应用于经济发达地区,已建成项目11项,在建项目10项;采用泥水平衡式盾构工法的17项,采用土压平衡式盾构工法的4项;公路隧道19项,公路隧道与轨道交通隧道合建的2项(上海长江隧道和武汉三阳路隧道)。

2 国内外超大直径盾构发展历程

目前,盾构机已从单一模式盾构发展到泥水、土压平衡复合盾构,盾构机的尺寸也从中小盾构发展到直径可达17m的超大直径盾构。国内外部分超大直径盾构工程实例如表1和表2所示。

作者简介:钟长平(1968—),男,博士,教授级高级工程师,广州轨道交通建设监理有限公司副总经理、总工程师,华南理工大学、广州大学硕士生导师。主要从事地铁建设管理工作和盾构技术研究工作。Email:553979739@qq.com。

国内超大直径盾构工程实例

表 1

隧道名称	所在城市	规模	盾构直径/类型	设备厂商	盾构隧道长度	备注
钱江隧道	杭州	双管单层双向 6 车道	15.43m/泥水	德国海瑞克	3.245km × 2	建成通车
纬七路南京长江隧道	南京	双管单层双向 6 车道	14.93m/泥水	德国海瑞克	3.02km × 2	建成通车
纬三路过江隧道	南京	双管双层双向 8 车道	14.93m/泥水	(IHI/三菱/cccc)	南线 4.135km 北线 3.557km	建成通车
上中路隧道	上海	双管双层双向 8 车道	14.87m/泥水	法国法玛通	1.28km × 2	建成通车
上海长江隧道	上海	双管单层双向 6 车道	15.43m/泥水	德国海瑞克	7.50km × 2	通成通车
军工路隧道	上海	双管双层双向 8 车道	14.87m/泥水	法国法玛通	1.50km × 2	建成通车
虹梅南路隧道	上海	双管单层双向 6 车道	14.93m/泥水	德国海瑞克	3.39km × 2	建成通车
长江西路隧道	上海	双管单层双向 6 车道	15.43m/泥水	德国海瑞克	1.50km × 2	建成通车
A30 沿江隧道	上海	双管单层双向 6 车道	15.43m/泥水	德国海瑞克	5.09km × 2	在建
北横通道隧道	上海	单管双层双向 6 车道	15.56m/泥水	德国海瑞克	6.40km	在建
周家嘴路隧道	上海	单管双层双向 4 车道	14.93m/泥水	德国海瑞克	2.572km	在建
外滩隧道	上海	单管双层双向 6 车道	14.27m/土压	日本三菱	1.098km	建成通车
迎宾三路隧道	上海	单管双层双向 4 车道	14.27m/土压	日本三菱	1.86km	建成通车
诸光路隧道	上海	单管双层双向 4 车道	14.45m/土压	德国海瑞克	1.39km	在建
苏埃隧道	汕头	双管单层双向 6 车道	拟购新机/泥水	德国海瑞克	3.0475 km × 2	在建
三阳路隧道	武汉	双管单层双向 6 车道	15.76m/泥水	德国海瑞克	2.59km × 2	在建
城南隧道	芜湖	双管单层双向 6 车道	14.93m/泥水	德国海瑞克	3.85km × 2	在建
屯门至赤鱗角连接路 海底隧道	香港	单管双层双向 4 车道	17.60m/泥水 14.00m/泥水	德国海瑞克	4.20km	在建
龙山隧道	香港	双管单层双向 4 车道	14.10m/土压	中国北方重工	4.80km	在建
瘦西湖隧道	扬州	单管双层双向 4 车道	14.93m/泥水	德国海瑞克	1.28km	建成通车
横琴三通道	珠海	双管单层双向 6 车道	14.93m/泥水	德国海瑞克	1.10km × 2	在建

国外超大直径盾构工程实例

表 2

隧道名称	所在国家	规模	盾构直径/类型	设备厂商	盾构隧道长度 (km)	备注
汉堡易北河第 4 隧道工程	德国	单管 2 车道	14.2m/泥水	德国海瑞克	2.56	建成通车
银松森林隧道	俄罗斯	双管双层双向公铁两用	14.2m/泥水	德国海瑞克	3.20	建成通车
莫斯科 Lefortovo 隧道	俄罗斯	单管单层 3 车道	14.2m/泥水	德国海瑞克	6.90	建成通车
绿色心脏双线铁路隧道	荷兰	单管双线铁路隧道	14.87m/泥水	法国法玛通	7.00	建成通车
尼亚加拉河引水隧道	加拿大	引水隧道	14.4m/硬岩	美国罗宾斯	10.50	建成使用
阿拉斯加道路隧道	美国	单管双层 4 车道	17.48m/土压	日本日立船厂	2.80	在建
东京外环公路隧道	日本	双管单层双向 4 车道	16m/土压	日本三菱、 川崎、JTSC	18	在建
东京地铁隧道	日本	双线地铁	14.18/土压	日本 IHI	1.10	建成通车
东京湾公路隧道	日本	双管单层双向 4 车道	14.14m/泥水	日本三菱、 川崎、日立、IHI	18.80	建成通车
马德里 30km 隧道	西班牙	双管单层双向 6 车道	15.2m/15.0m/ 土压	德国海瑞克、 日本三菱	7.34	建成通车

隧道名称	所在国家	规模	盾构直径/类型	设备厂商	盾构隧道长度 (km)	备注
塞维利亚公路隧道	西班牙	双管单层双向4车道	14.00m/土压	法国法玛通	4.08	在建
水景公路隧道	新西兰	双管单层双向6车道	14.41m/土压	德国海瑞克	4.80	建成通车
卡尔塔尼塞塔公路隧道	意大利	双管单层双向6车道	15.08m/泥水	法国法玛通	3.90	在建
Al sparvo 公路隧道	意大利	双管单层双向6车道	15.55m/土压	德国海瑞克	5.164	建成通车
圣塔·露琪亚隧道	意大利	双管单层双向6车道	15.87m/土压	德国海瑞克	7.50	在建

3 施工主要风险分析及对策

3.1 盾构机选型风险

地质是基础,盾构机是关键,人是根本。

隧道建设成功与否同盾构机的选型息息相关。由于盾构法施工主要依靠盾构设备这个载体,因此盾构设备选型是施工成败的一个重要环节,是盾构施工的关键。

盾构机选型需要考虑的因素包括:工程地质、水文地质条件和岩土性质;开挖面稳定性能;隧道埋深、地下水位;设计隧道的断面;环境条件、沿线场地(附近管线和建构筑物及其结构特性);衬砌类型;工期、造价等。

盾构机选型好等于工程成功了一半,选型不好则会严重影响工程开展。

3.1.1 世界最大直径盾构“伯莎”施工情况

“伯莎”是为美国西雅图市 SR99 公路隧道服务的土压平衡盾构机,由日立造船株式会社制造,开挖直径达到 17.5m,价格为 8000 万美元,如图 1 所示。

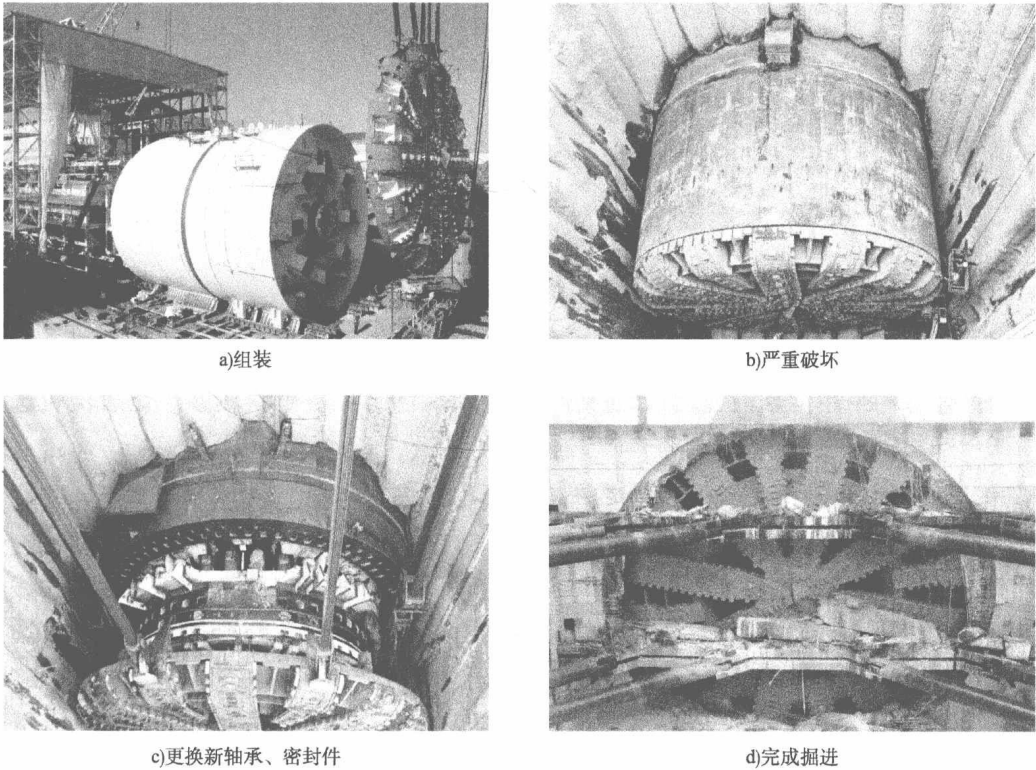


图 1 世界最大直径盾构“伯莎”(外径 $\phi 17.45\text{m}$)

2013 年 8 月,完成组装的“伯莎”在一片欢呼声中开始了工作,按计划,“伯莎”每天能推进 10m,整条隧道应在 16 个月后贯通。“伯莎”最初的表现不错,一切都在有条不紊地按计划推进,然而在 12 月初已经前进了 300m 的“伯莎”突然停了下来,这时施工方发现“伯莎”无法前进,感觉像是遇到了神秘不明物体。

调查工作随即开始,到 2014 年 1 月初,问题似乎有了眉目,人们认为是一根埋在地下的长 35m、直径 20cm 的钢管阻碍了“伯莎”的脚步,施工方认为它卡在刀盘辐条中间导致刀盘无法正常旋转。

经过紧张工作,到 1 月底,钢管剩余部分终于被清理出来,“伯莎”经过调试又可以工作了。但不幸的是,仅仅前进了 1.2m,“伯莎”再次停了下来。原来控制室内发出了过热警报,靠近刀盘的位置出现了 140℃ 的高温。随后的检查发现刀盘的开口已经被泥饼糊住,更重要的是主轴密封件已经遭到严重损坏,只有更换密封件才能将隧道掘进进行下去。

“伯莎”的刀盘被进一步分解以接受评估,随后人们发现“伯莎”的状况比预想的还要糟糕。原本以为只有主轴承的 7 个橡胶密封圈被沙子和水堵塞破坏,后来发现保护密封圈的钢筒也发生了破损,一些碎片进入了传动齿轮导致齿轮破坏。

在长达四年半的时间里,“伯莎”土压盾构历尽千辛,且经历繁杂的维修过程。其中,修理费用高达 1.43 亿美元,比“伯莎”本身价格还要高。这是盾构机选型失败的典型例子。

3.1.2 广深港客运专线大直径盾构遇到的问题

2011 年 10 月 31 日,深圳福田梅林路与梅村路交界处突然发生塌陷,出现近百平方米大坑。此前与事发地一墙之隔的中康生活区地面出现四次塌陷,均因地下的广深港客运专线施工所致,如图 2 所示。

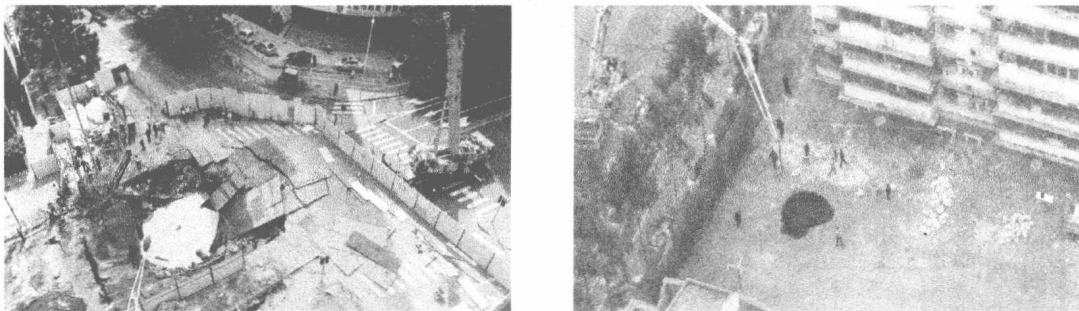


图 2 广深港客运专线盾构施工造成多次地陷

该大直径盾构采用常规刀盘,带压进舱换刀,费时费钱,工期延误较多。该盾构机选型方面也存在一些问题。

3.1.3 伊斯坦布尔博斯布鲁斯海峡隧道施工情况

伊斯坦布尔海峡公路隧道工程是在博斯布鲁斯海峡下第一次应用盾构施工的隧道,采用直径为 13.66m 的超大直径泥水平衡盾构(常压刀盘)进行掘进。该隧道全长 3.34km,线路最低点在海平面以下 106m,工作压力高达 13bar^❶,盾构掘进 16 个月后贯通。该盾构机选型正确,进展顺利,如图 3、图 4 所示。

❶ 1 bar = 10⁵ Pa = 0.1 MPa。

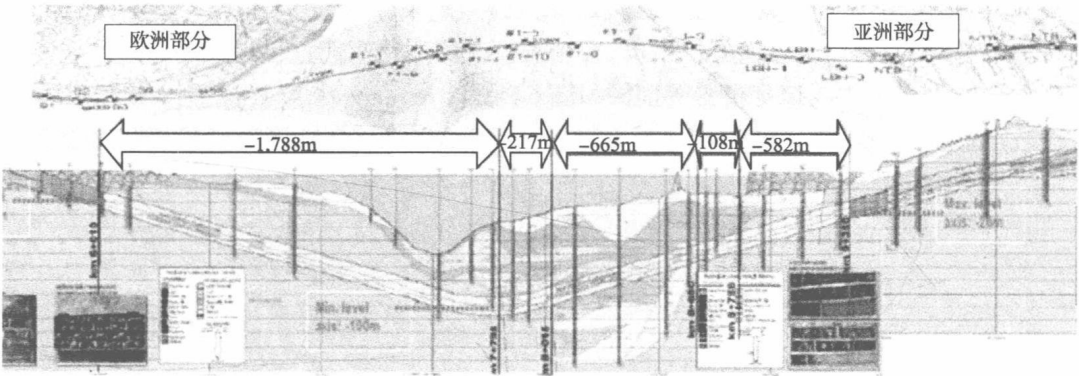


图3 盾构下穿博斯布鲁斯海峡

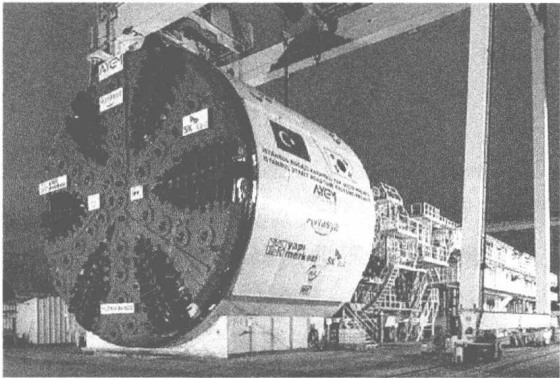


图4 伊斯坦布尔海峡公路隧道施工采用的直径13.66m盾构(常压刀盘)

3.1.4 南京长江隧道盾构选型

南京长江隧道根据其穿越的江中砾砂复合地层且水压较高的透水地层性质,采用德国海瑞克公司设计制造的泥水加压式盾构机,如图5所示。盾构机的刀盘为中心支撑、辐条面板式,6个辐条内部分刀具可以更换,便于检修。刀盘上共有118把刮刀,其中71把可以在常压下进行更换。盾构机具有泥浆舱和气压调节舱两个压力舱,气压舱的压缩空气为压力舱施加泥水压力,实现带压进舱检修;同时为方便技术人员进入到压力舱的内部进行检修还设有人闸、主舱和副舱。该盾构机较适合本项目地层的掘进。

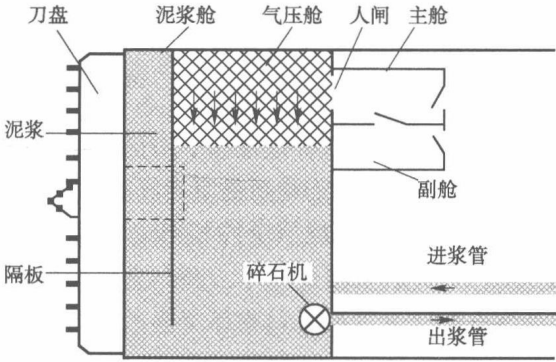


图5 南京长江隧道泥水加压式盾构机构造简图

3.1.5 春风隧道盾构选型

春风隧道工程起于上步立交东侧,沿滨河大道进入地面,下穿滨河红岭立交、地铁9号线、

布吉河、海关宿舍楼、渔景大厦、大滩大厦、广深铁路股道及深圳站等建(构)筑物;于北斗路东侧归入沿河南路,新秀立交以南穿出地面,在新秀立交西侧与东部过境高速公路市政连接线配套工程相接。该隧道工程地理位置平面图如图6所示。



图6 工程地理位置平面图

盾构段全长3.583km,盾构段最小水平曲线半径750m,最大纵坡49‰,凸形竖曲线最小半径为2800m,凹形竖曲线最小半径为7500m。盾构区间覆土厚度为8~46m。最大埋深位于罗湖车站附近,站埋深46.58m。盾构机从位于滨河污水处理厂北侧的西始发井始发,在位于沿河路与北斗路交叉口的东接收井吊出。

隧道主要穿越地层为粗粒花岗岩、构造碎裂岩、片岩、变质砂岩、凝灰质砂岩、糜棱岩,少量卵石、砾砂地层,隧道全断面岩层约占80%,存在部分上软下硬、断层破碎带地层。中、微风化岩层抗压强度普遍在50~100MPa之间,最大强度为173.7MPa。

春风隧道工程的主要特点为:

- (1)长距离、大断面,区间长度3583m,开挖直径达到15.8m。
- (2)大埋深、高水压,最大净水头压力达到5.9bar。
- (3)岩石强度高,最大岩石强度为173.7MPa。
- (4)岩层较破碎,共有11条断层破碎带,总长度约为431m。
- (5)小曲线、大坡度,最小水平转弯半径750m,最大坡度49‰。
- (6)下穿大量重要建(构)筑物。
- (7)始发段和接收段覆土较浅,存在上软下硬地层。

本标段隧道主要穿越中、微风化岩层,破碎地层多,水压较大。从破岩和刀具消耗来看,常规刀盘具有一定优势,但是由于地层常压下的稳定性具有不确定性,从检查刀具方便性和换刀安全性来说,常压刀盘更有优势。根据工程地质条件和周边环境分析与评价,以及刀盘的对比分析,决定采用常压刀盘。

3.2 盾构机适应性改造风险

扬州瘦西湖隧道借鉴南京长江隧道工程经验,为节约成本,选用南京长江隧道所用盾构机。为适应长距离、全断面硬塑膨胀性黏土地层,针对盾构机刀盘容易结泥饼、排浆管容易堵塞的问题,对盾构机刀盘冲刷和环流系统两方面进行改造,如图7所示。

刀盘冲刷系统改造包括:增加6个主刀臂冲刷,每个刀臂4个冲刷口;中心孔6个喷口分

别布置在泥水及渣土汇流集中处;中心刀替换为鱼尾刀,增加3个鱼尾刀冲刷口。

环流系统改造:增加高压冲刷系统。

高压冲刷系统采用直径250mm专用高压管道从地面清水池开始敷设,采用2台压力10bar的加压泵在地面加压,到达盾构机后分成4根100支管,每个支管分别连接一台压力14~18bar的增压泵,再用直径60mm高压管从增压泵引入舱内前闸门下方,全部均布固定在前闸门后方壳体内壁上,分别采用4个直径20mm高压清洗喷头正对出浆管吸口进行高压冲刷,使刀盘切削下的渣土及时通过排浆吸口带走。

3.3 洞门密封泄漏和盾构始发风险

3.3.1 洞门密封泄漏风险

盾构进出洞的安全是盾构法隧道施工一个非常重要的环节,目前,国内盾构法隧道多起事故均发生在盾构进出洞上,主要表现在盾构进出洞端头地层的加固效果不良、盾构进出洞时洞口涌水、盾构姿态控制困难、良好的泥水平衡没有尽快建立、洞口密封破坏等方面。洞门密封效果不佳,将导致大量泥水外溢及涌砂等后果,因此,洞门密封也是工程的风险点之一。

南京长江隧道工程洞门密封防水措施如图8所示,其中两道帘布橡胶板随盾构前进方向翻转,由于其下缘被拉伸而紧贴盾构外壁,形成一道密封止水带。此外,外侧的翻板也向内侧翻转而顶住帘布橡胶板,防止出现因前方水土压力过大而导致帘布橡胶板逆向翻转的情况出现,这是目前运用较多的盾构、顶管机出洞密封装置。

- 71把可更换的钝角刮刀改为尖齿型锐角刮刀
- 中心圆柱形刮刀改为鱼尾型刮刀
- 16把先行齿刀取消,改为刀盘冲刷孔
- 保留原有118把固定刮刀形式

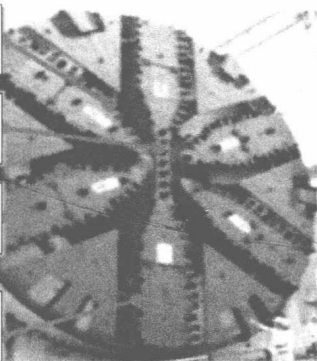


图7 刀盘刀具改造示意图

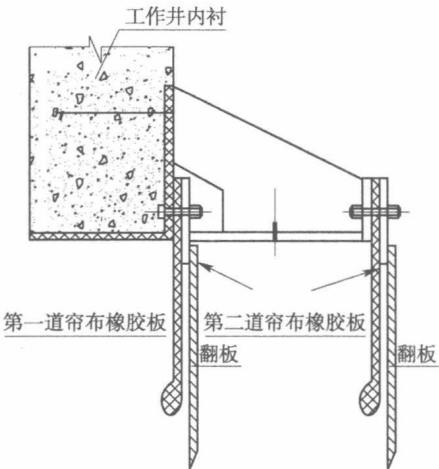


图8 洞门密封防水措施布置图

3.3.2 盾构始发风险

盾构法隧道施工中,端头土体加固是盾构机始发、到达技术的一个重要组成部分,端头土体加固成功与否直接关系到盾构机能否安全始发、到达。盾构进出洞端头地层处理不当,盾构机在进出洞时工作面可能会产生涌水、涌砂,不能及时形成压力平衡,容易导致地面大幅度沉降、盾构机被掩埋、工作井周边构筑物损坏等事故。南京长江隧道盾构机始发段的土层为淤泥质粉质黏土,洞门前方0~18m区间采用高压旋喷桩加固地层,加固深度23m,宽度23m。为了更好地增强土体强度及密封性,保证加固土体可靠地封水,在高压旋喷桩加固土体和端头地下连续墙之间设计一道宽1.6m的冻土壁,通过人工制冷工艺形成的冻土壁将高压旋喷桩加固区和地下连续墙胶结,使旋喷加固土体与冻结壁共同抵抗水土压力,以确保洞门破除和盾构机

始发的安全。

3.4 始发段超浅覆土掘进的风险

由于受线路控制影响,南京长江隧道工程盾构始发段(K3+600~730)属于超浅埋,最浅覆土厚度为5.5m,仅为 $0.37D$ (D 为盾构机直径),主要穿越地层为流塑状的淤泥质粉质黏土地层,施工技术难度非常大。盾构在浅覆土情况下施工易产生以下问题:

- (1) 由于竖向压力较小,盾构推进时姿态控制困难。
- (2) 由于覆土层薄,给切口水压控制增加了难度,泥水易窜出地面“冒浆”,破坏泥水平衡。
- (3) 土质松软,端头土体易发生失稳、涌水涌砂、地层塌陷等恶劣后果。

本工程盾构机在此段施工时,采取了严格的地表沉降监测、泥浆压力控制,并结合室内和现场泥浆劈裂试验等措施,设置了合理的盾构掘进参数,使盾构机安全通过了超浅覆土的始发段。

3.5 黏土地层泥水环流系统难点及对策

春风隧道工程为应对可能存在的黏土地层刀盘前面滞渣问题,配置独立的P0.1增压冲刷泵,可向刀盘正面提供最大 $2000\text{m}^3/\text{h}$ 的冲刷流量。刀盘中心面板区域设有7路横向冲刷,中心进渣通道设有6路开口冲刷口,刀盘主梁周边面板区域设有6路横向冲刷,降低刀盘滞渣可能性。同时,冲刷通道可实现组合分区控制,包括:中心面板区冲刷、刀盘左半区冲刷及刀盘右半区冲刷,降低喷口堵塞概率,如图9所示。

3.6 江河大堤沉降、开裂的风险

南京长江大堤起着防洪的重要作用,处于航道局严密监控之内,在盾构机通过长江大堤时,如何防止大堤沉降也是一个施工风险。盾构机两次穿越长江大堤时,其中浦口岸穿越地层为淤泥质粉质黏土地层。由于大堤防洪等级高,地表沉降要求必须控制在 $+10\sim-30\text{mm}$,且由于该处地面覆土厚度变化明显,盾构掘进施工技术参数控制难度极大。

本工程盾构机穿越长江大堤时主要穿越淤泥质粉质黏土地层,为了降低对土层的扰动,适当减小了刀盘转速,控制切口压力在较小的范围内波动,同时严格按照设计量进行同步注浆,及时回填开挖空隙,以减小大堤的沉降。

同步注浆采用水泥砂浆(单液浆),其胶凝时间为 $3\sim 10\text{h}$,1d固结体强度不小于 0.2MPa (相当于软质岩层无无限抗压强度),28d不小于 2.5MPa (略大于强风化岩天然抗压强度);壁后注浆体固结收缩率 $<5\%$;注浆压力设定为 $0.3\sim 0.6\text{MPa}$,并根据监控量测结果作适当调整;实际注浆量为建筑间隙的 $110\%\sim 130\%$,即为 $23.42\sim 28.47\text{m}^3/\text{环}$ (每环理论注浆量为: $V=\pi/4\times(14.962-14.52)\times 2=21.29\text{m}^3$)。

施工时的大堤沉降监测显示,大堤出现小裂缝,随即采用深层搅拌桩对大堤进行加固,有效地防止了大堤的沉降,并在大堤上游侧建造防渗帷幕,保障了大堤的安全稳定性。

3.7 膨胀性黏土泥水盾构开挖面稳定控制技术

因盾构施工需要,扬州瘦西湖隧道泥水盾构在掘进过程中有过几次停机,在停机过程中出现了三次开挖面失稳塌方事故,表现为近似圆桶形竖向塌方,三次塌方均发生在停机后第6d左右。针对停机时在确保开挖面支护压力不降低情况下,仍然发生了多次开挖面塌方的问题,通过深入研究后认为,黏土的膨胀性是开挖面失稳发生的主要原因。

随着盾构开挖扰动,开挖面前方具有裂隙性的膨胀土裂隙开展,渗透系数增大,加速了泥水入渗。由于泥浆入渗,膨胀土因含水率增加发生一定量的膨胀,向泥水舱内部挤入,且其强