

超大型泥水盾构 越江施工技术研究与实践

——南京长江隧道

郭信君 戴洪伟 主 编

王守慧 王华伟 陈 健 刘 涛 副主编

中国建筑工业出版社

责任编辑：王 梅 李天虹

封面设计：张悟静



经销单位：各地新华书店、建筑书店

网络销售：本社网址 <http://www.cabp.com.cn>

中国建筑出版在线 <http://www.cabplink.com>

中国建筑书店 <http://www.china-building.com.cn>

本社淘宝天猫商城 <http://zgjzgycbs.tmall.com>

博库书城 <http://www.bookuu.com>

图书销售分类：建筑结构及岩土工程（S20）

ISBN 978-7-112-16218-5



(24976) 定价：99.00 元

超大型泥水盾构越江施工技术 研究与实践

——南京长江隧道

郭信君 戴洪伟 主 编
王守慧 王华伟 陈 健 刘 涛 副主编

中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

超大型泥水盾构越江施工技术研究与实践——南京长江隧道 / 郭信君, 戴洪伟主编. — 北京: 中国建筑工业出版社, 2014. 3

ISBN 978-7-112-16218-5

I. ①超… II. ①郭… ②戴… III. ①隧道施工—泥水平衡盾构—工程施工—研究—南京市 IV. ①U455.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第306599号

本书系统地介绍了南京长江隧道工程中的超大直径盾构隧道穿越长江建设工程技术, 将建设中采用的施工技术、组织管理和科学研究进行了认真总结, 按概述篇、施工篇、施工关键技术篇、工程质量安全管理篇、科研篇、成果篇六部分汇编成书, 以综合反映南京长江隧道的工程技术。

本书适合从事盾构隧道建设的广大施工、管理及科研工作者参考借鉴。

责任编辑: 王 梅 李天虹

责任设计: 董建平

责任校对: 李美娜 关 健

超大型泥水盾构越江施工技术研究与实践

——南京长江隧道

郭信君 戴洪伟 主 编

王守慧 王华伟 陈 健 刘 涛 副主编

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京京点图文设计有限公司制版

北京顺诚彩色印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 28 字数: 700 千字

2013年12月第一版 2013年12月第一次印刷

定价: 99.00元

ISBN 978-7-112-16218-5

(24976)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

编写委员会

主任委员：夏国斌 韩风险

顾问：钱七虎 梁文灏

主编：郭信君 戴洪伟

副主编：王守慧 王华伟 陈健 刘涛

编委：	张公社	沙明元	王清明	李学乾	何川
	朱伟	袁大军	柳献	徐明新	李国根
	夏晓中	苏秀婷	赵松壮	夏国斌	韩风险
	王玉泽	田要成			

序一

通读书稿，掩卷长思，不禁感慨万千：南京长江隧道的建成是国之幸事，民之幸事，也是我们科研工作者的幸事，该工程凝聚了无数人的心血智慧，是十分有必要进行好好归纳总结的，该书的著成很好地完成了这一历史使命。

南京长江隧道是目前中国长江流域已建成的和正在建设的超大型盾构隧道中地质条件最复杂、技术难题最多和施工风险最大的工程：

- 盾构开挖直径相当于5层楼高，为当下世界最大直径的盾构隧道
- 隧道每平方厘米所承受的水压高达6.5kg
- 施工中击穿冒顶、江底沉降、透水坍塌等风险巨大
- 高压条件下进仓更换刀具

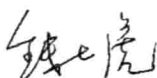
……

项目建设及施工单位勇敢应对挑战，用科研的力量和先进的管理方法力推工程，攻坚克难，不断破解世界级技术难题，确保了工程的顺利实施，积累了极其丰富的盾构施工经验，实在令人欣慰！

科研人员先后完成了30余项专题论证，15项专利申报，并就6项大课题29项子课题进行了科学研究，取得了诸多科研成果，填补了相关领域研究的空白。大批青年才俊的成长让我感到高兴，愿你们在盾构事业上再接再厉，再创新高。

正是在各级领导的关怀与帮助下，在相关单位的协助下，辛勤工作在南京长江隧道工程一线的技术、施工和管理人员通过共同努力，并溶入众多专家教授的智慧，才有此书的面世，此诚为幸事！

值此书即将问世之际，愿向广大同仁推荐此书，以共享此创新成果。此书以概述篇开篇，以施工篇、施工关键技术篇、工程质量安全管理篇、科研篇相辅，以成果篇总之，相辅相成，浑然一体。书中既有成熟理论、工艺的再开发，又有新理论、新工艺的创新；既有理论分析和探讨的文章，又有工程实践应用的实例，是不可多得的一本好书。我相信，本书的出版将对南京地区和长江流域，乃至全国跨越江河盾构隧道的技术发展产生深远的影响，同时，也为盾构施工管理、勘察设计、施工等单位的管理和专业技术人员起到一定的借鉴和参考作用。

中国工程院院士： 

2013年10月23日

序二

南京长江隧道宛如蛟龙，横过长江，连通两岸，成就千秋功业，而今再回首，浮想当时场景，深有感触。

南京长江隧道工程克服了“薄、险、高、长、杂、大”六大难题，累计完成盾构隧洞总长近 6000m，取得了丰硕成果：超大断面盾构隧洞结构原型试验为世界首例该类型试验；成功解决高水压、高压条件下刀盘修复这一世界级难题；适用于砂卵石复合地层的刀具研究获得重大突破；盾构隧道质量达到世界先进水平等，不可尽言。

在各种疑难问题得到逐步解决的同时，也为国家培养了一批高素质的施工队伍、高水平的科研团队，涌现了诸多行业领军人物、科研和管理的先进代表，为我们学习和掌握跨江隧道的关键技术和理念提供了实践平台，显示了我国盾构隧道技术的进步，确立了超大直径盾构施工核心技术的领先地位，实在令人欣慰。“前途是光明的，道路是曲折的”，这一唯物辩证法的基本规律在此工程中得到了充分展现。

本书翔实记录了这段曲折而又光明的历程，为我们还原了攻坚克难的过程，充分展现了建设者的智慧和风采。全书共分六篇——概述篇、施工篇、施工关键技术篇、工程质量管理篇、科研篇、成果篇，既可独立成章又能浑然一体，内容充实，治学严谨，理论与实践并重，其理念、观点和方法对我们开拓思维和视野，是大有裨益的。

这是一本极具参考价值的好书，希望有志从事大型工程建设事业的朋友们能从中有所收获。

“路漫漫其修远兮，吾将上下而求索”，与诸位读者共勉！

中国工程院院士：梁文灏

2013 年 10 月 23 日

前 言

《超大型泥水盾构越江施工技术研究与实践——南京长江隧道》经过全体撰稿者和编辑的努力，终于顺利出版了。本书旨在使广大读者能比较系统地了解该工程的建设者如何运用各项先进的专业施工技术，克服南京长江隧道工程的“薄、险、高、长、杂、大”六大难题，工程得以圆满的建设完成。并将建设中采用的施工技术、组织管理和科学研究进行了认真总结，从三个方面反映了南京长江隧道工程在建设中的施工方法和科研成果，特按类汇编成书，以求综合反映南京长江隧道的工程技术。同时，介绍给从事盾构隧道建设的广大科研工作者作为参考借鉴。希望本书起到抛砖引玉的作用，为活跃我国盾构隧道的学术科研气氛，促进我国盾构隧道的发展作出新贡献。

本书分为概述篇、施工篇、施工关键技术篇、工程质量安全管理篇、科研篇、成果篇。

概述篇介绍了本工程背景、建设意义以及工程概况，同时对盾构机的选型进行研究。

施工篇按照工法的不同，分别介绍了明挖段和盾构段的施工。本篇以空间为主线，以施工顺序为线索，详细记录了南京长江隧道工程的施工始末。对于明挖工程，根据空间位置的不同分为浦口段和梅子洲段，浦口段又细分为盾构始发井段、盾构井后续段、暗埋标准段和引道段。对于隧道工程，从施工顺序的角度出发，分为盾构始发段、试掘进段、正常掘进段、特殊掘进段、盾构到达段以及隧道洞门段。由此化整为零，分段介绍了各部分工程概况及采用的施工工序、施工工艺，令读者可以清晰地了解南京长江隧道各个组成部分的施工情况。

施工关键技术篇，分别介绍了为克服施工难题采用的关键技术。具体包括：为保证洞门前方土体稳定，始发时采用高压旋喷桩地基加固、地层降水和冷冻墙封闭加固相结合的措施，保证了 5.5m 超浅覆土条件下盾构安全始发，创下了世界上超大直径盾构最浅覆土安全始发记录；针对防洪大堤沉降量控制严格和坡脚覆土厚度薄（仅为 0.8 倍洞径）等特点，采用三维仿真模拟，现场全方位监测及参数优化等手段，有效地实施沉降控制，安全顺利地穿越了防洪大堤，并创造出了差异沉降控制在 5mm 之内，累计沉降控制在 15mm 之内的记录；针对长江江底软硬不均的复杂地质层，建设者们在水压高达 $5\text{kg}/\text{cm}^2$ 、世界罕见的作业环境下，展开对长 135m、相当于 5 层楼高、重约 4000t 的盾构机进行刀具检修、更换的技术攻关。盾构在江底掘进中要经过一长 150m 的冲槽超浅埋地段，该处最浅埋深为 10.49m，仅有 0.72 倍洞径，属于当今世界上同类盾构隧道水中最小覆土穿越工况；施工中通过三维数值仿真模拟、室内盾构模型试验、岸边现场原位试验、高致密泥浆开发及掘进参数优化控制，成功破解了上述难题；大直径盾构在强透水地层接收中，密封结构极易失效，造成严重后果。本工程利用端头搅拌桩、冷冻封闭墙和井内灌水平衡相结合的办法，有效地规避了大直径盾构在复杂地质条件下接收的重大风险。

工程质量安全管理篇详细介绍了为保证工程质量、安全、进度等，项目团队所采用的管理手段，为今后规模较大的项目管理工作提供了有益的启示和借鉴。在采取新型管理模

式的同时，项目团队高扬科技先导的大旗，坚持“重大技术方案专家论证、疑难问题专家咨询”，“产、学、研”相结合的自主创新之路，紧紧依靠专家团队的智慧，充分利用社会资源，建立三级专家体系，尤其在钱七虎院士和梁文灏院士及各位专家的全过程指导和帮助下，联合各大科研院所组织了六大科研课题、60余项专业技术课题，现场组织科技攻关。用科研成果破解技术难题，化解施工风险。

科研篇详细介绍了针对工程中遇到的施工难题，科研工作者采取严谨的科研态度，汲取团体的智慧，解决一个又一个的难题，为工程的顺利进行奠定了坚实的基础。

成果篇介绍了在本工程的建设中得到的各种荣誉和科研成果。建设者为工程的顺利进行所付出的辛苦汗水结出了累累硕果。铁军建设者的不怕吃苦、奋勇争先的精神也将会更加发扬光大。

本书在编辑过程中，得到有关专家和领导的指导和大力支持，在此一并致谢。

由于编者水平所限，本书中的缺点、错误在所难免，希望专家们批评指正。

目 录

序一
序二
前言

概 述 篇

第一章 工程背景及建设意义.....	2
1.1 工程背景.....	2
1.2 工程建设意义.....	4
第二章 工程概况.....	6
2.1 线路规划.....	6
2.2 建设规模及工程范围.....	6
2.2.1 左汊隧道.....	8
2.2.2 右汊桥梁.....	8
2.2.3 附属结构.....	10
2.3 周边环境.....	11
2.3.1 建构物.....	11
2.3.2 管线.....	12
2.4 地质条件.....	12
2.5 水文条件.....	15
2.5.1 地表水.....	15
2.5.2 地下水.....	16
2.6 工程特点及难点.....	17
第三章 盾构选型.....	19
3.1 盾构法隧道的基本原理及特点.....	19
3.1.1 盾构法隧道的基本原理.....	19
3.1.2 盾构法隧道的特点.....	19

3.2 盾构的构造及分类..... 20

3.2.1 盾构的构造..... 20

3.2.2 盾构的分类..... 21

3.3 盾构机选型的意义..... 22

3.4 盾构机选型的影响因素..... 23

3.5 盾构机的选型原则及依据..... 23

3.5.1 选型原则..... 23

3.5.2 选型依据..... 24

3.6 盾构机选型的一般程序..... 24

3.7 大直径泥水盾构机的适应性分析..... 26

3.7.1 泥水盾构的工作原理..... 26

3.7.2 选型依据..... 27

3.7.3 盾构机的选择..... 28

3.7.4 盾构机参数分析..... 30

3.7.5 盾构机掘进情况及使用效果..... 33

施 工 篇

第四章 明挖施工..... 36

4.1 概述..... 36

4.2 浦口段..... 37

4.2.1 盾构始发井施工..... 37

4.2.2 盾构井后续段施工..... 45

4.2.3 暗埋标准段施工..... 47

4.2.4 引道段施工..... 49

4.3 梅子洲段..... 50

4.3.1 盾构始发井施工..... 50

4.3.2 盾构井后续段施工..... 54

4.3.3 暗埋标准段施工..... 56

4.3.4 引道段施工..... 57

第五章 盾构施工..... 58

5.1 盾构始发..... 58

5.1.1 始发辅助工程施工..... 58

5.1.2 负环管片及箱涵安装..... 59

5.1.3	洞门破除.....	60
5.1.4	始发参数控制.....	61
5.2	试掘进.....	61
5.2.1	试掘进段的地质情况.....	62
5.2.2	试掘进段的掘进参数选取.....	62
5.2.3	试掘进段的目的.....	62
5.2.4	地面沉降控制.....	63
5.3	正常段掘进.....	63
5.3.1	掘进开挖控制.....	63
5.3.2	泥水控制管理.....	67
5.3.3	注浆管理.....	80
5.3.4	管片箱涵拼装.....	83
5.3.5	盾构掘进姿态控制与调整.....	86
5.4	特殊施工.....	88
5.4.1	近距离盾构施工.....	88
5.4.2	始发、到达段浅覆土盾构施工.....	89
5.4.3	穿越长江大坝施工.....	90
5.4.4	穿越江底段浅覆土盾构施工.....	91
5.4.5	软硬不均地层（卵石层）盾构施工.....	92
5.4.6	曲线段盾构施工.....	94
5.5	盾构到达.....	95
5.5.1	端头加固.....	95
5.5.2	盾构机定位及到达端洞口位置复核测量.....	95
5.5.3	盾构到达段掘进.....	96
5.5.4	渣土清理及洞门临时密封装置安装.....	97
5.5.5	接收基座安装及盾构机步上接收基座.....	97
5.5.6	洞门圈封堵.....	97
5.5.7	盾构到达施工技术要点及措施.....	97
5.6	盾构隧道洞门施工.....	98
5.6.1	洞门预埋环的制作与安装.....	98
5.6.2	洞门衬砌及防水施工.....	99
5.6.3	洞门保圆措施.....	100
5.6.4	洞门施工注意事项.....	100

施工关键技术篇

第六章 盾构冷冻始发施工技术	102
6.1 施工方案优化	102
6.2 施工设计	103
6.2.1 冷冻加固设计	103
6.2.2 冻结加固尺寸	103
6.2.3 冻结孔的布置	103
6.2.4 主要技术参数	104
6.3 施工工序	104
6.4 施工工艺	104
6.4.1 钻孔施工	104
6.4.2 冻结施工	105
6.4.3 始发条件	105
6.4.4 破壁注意事项	105
6.4.5 冻结管拔除	106
6.4.6 冷冻体掘进	107
6.5 施工效果	107
第七章 始发段超浅覆土掘进技术	108
7.1 施工方案优化	108
7.2 施工工序	108
7.3 施工工艺	109
7.3.1 切口水压控制	109
7.3.2 严格控制主要掘进参数	110
7.3.3 加强壁后同步注浆控制	111
7.3.4 泥水质量控制	113
7.3.5 盾构平面高程姿态控制	113
7.3.6 加强监控量测, 严格控制沉降	114
7.4 施工效果	114
第八章 长江大堤穿越施工技术	115
8.1 施工工艺	116
8.1.1 施工调查	116

8.1.2	水土压力控制.....	116
8.1.3	管片壁后注浆管理.....	116
8.1.4	加强盾尾保护.....	116
8.1.5	跟踪注浆补强.....	116
8.2	施工效应.....	117
第九章	盾构穿越江中砂砾复合地层技术.....	118
9.1	施工方案优化.....	118
9.2	施工工艺.....	119
9.2.1	盾构机掘进控制.....	119
9.2.2	背填注浆控制.....	120
9.2.3	盾构姿态控制.....	120
9.2.4	其他控制措施.....	121
9.3	施工效果.....	121
第十章	江中带压开舱更换刀具技术.....	122
10.1	施工方案.....	123
10.2	常压更换刀具的程序.....	124
10.2.1	刀盘的结构和刀具的布置.....	124
10.2.2	常压更换刀具的拆卸步骤.....	125
10.3	常压更换刀具的改进.....	126
10.4	施工效果.....	127
第十一章	盾构穿越江中冲槽段施工技术.....	129
11.1	施工方案比选.....	130
11.1.1	江底覆土加固方案.....	131
11.1.2	江底非抛填施工方案.....	131
11.1.3	方案比选.....	131
11.2	施工工艺.....	131
11.2.1	参数选取及施工控制措施.....	131
11.2.2	管片上浮控制及处理措施.....	134
11.3	施工效果.....	135
第十二章	超大直径盾构到达施工技术.....	137
12.1	施工方案比选.....	137

12.1.1	原施工方案.....	137
12.1.2	优化后方案.....	137
12.2	施工工序.....	138
12.2.1	到达段各种参数的选取原则及控制措施.....	138
12.2.2	洞门破除.....	139
12.2.3	竖井内堆填黏土和灌水.....	139
12.2.4	到达段掘进.....	139
12.2.5	加固区段掘进.....	139
12.2.6	工作井内推进.....	139
12.3	施工工艺.....	140
12.3.1	总体到达方案.....	140
12.3.2	接收基座施工.....	140
12.3.3	洞门端头土体加固.....	141
12.3.4	洞门端头井点降水.....	141
12.3.5	贯通测量.....	142
12.4	施工效果.....	143

第十三章 临近江河超大深基坑施工技术..... 144

13.1	盾构始发井深基坑降水施工.....	145
13.1.1	降水设计要求.....	145
13.1.2	降水方法的选择.....	145
13.1.3	轻型井点降水.....	145
13.1.4	深井井点降水.....	146
13.1.5	降水系统设计.....	146
13.1.6	降水井布设.....	148
13.2	盾构到达深基坑降水技术.....	149
13.2.1	降水井布置.....	149
13.2.2	降水效果.....	151
13.2.3	降水引起的地面沉降分析.....	151
13.3	临近江河超深基坑施工技术.....	153
13.3.1	测量放线.....	153
13.3.2	导墙施工.....	153
13.3.3	泥浆制备.....	154
13.3.4	成槽施工.....	154
13.3.5	钢筋笼制作和吊放.....	155

13.3.6	锁口管与混凝土施工	156
13.3.7	墙趾注浆施工	157
13.3.8	地下连续墙施工	157

工程质量安全管理篇

第十四章	工程监测	160
------	------------	-----

14.1	基坑工程施工监测	160
14.1.1	施工监测的目的	160
14.1.2	施工监测的组织机构	160
14.1.3	监测工作流程	161
14.1.4	监测项目及方法	161
14.1.5	监测点保护措施	167
14.1.6	工程应急抢险方案	167
14.2	隧道工程施工监测	169
14.2.1	监测项目与频率	169
14.2.2	测点布置原则	169
14.2.3	测点布置	170
14.2.4	江堤监测	170
14.3	自动化监测	171
14.3.1	自动化监测系统概述	172
14.3.2	自动化监测系统设计	173
14.3.3	系统实施效果	177

第十五章	工程质量安全管理及措施	178
------	-------------------	-----

15.1	组织机构与管理	178
15.1.1	质量管理组织体系	178
15.1.2	各方管理职责	178
15.1.3	制度保证体系	181
15.2	工程质量管理	182
15.2.1	工程质量保证目标、体系及创优规划	182
15.2.2	质量保证技术措施	186
15.3	工程安全管理	189
15.3.1	安全生产目标及体系	189
15.3.2	安全保证技术措施	190

15.4 环境保护措施..... 192

15.4.1 环保组织框架..... 192

15.4.2 具体措施..... 193

15.5 风险评估及管理..... 200

15.5.1 概述..... 200

15.5.2 风险管理..... 201

科 研 篇

第十六章 超大直径泥水盾构浅覆土长距离穿越长江关键技术研究 206

16.1 研究背景及意义..... 206

16.2 研究内容..... 207

16.3 刀具切削机理研究..... 208

16.3.1 砂卵石地层特性..... 208

16.3.2 盾构刀盘刀具选型..... 210

16.3.3 刀具切削机理分析..... 220

16.4 刀盘刀具地质适应性设计分析..... 222

16.4.1 刀盘设计..... 223

16.4.2 先行刀设计..... 223

16.4.3 周边刀设计..... 223

16.4.4 刮刀设计..... 224

16.4.5 合金与刀体结合工艺分析..... 227

16.5 现场掘进试验研究..... 228

16.5.1 可更换刮刀改进方案..... 228

16.5.2 刮刀更换实验方案..... 229

16.5.3 正常磨损系数统计比较..... 229

16.5.4 各改进刮刀设计评价..... 232

16.5.5 刮刀优化设计..... 233

16.6 刀盘扭矩影响因素的分析..... 233

16.6.1 锥入度对刀盘扭矩的影响..... 233

16.6.2 泥水压力与地层有效应力对刀盘扭矩的影响..... 238

16.6.3 刮刀磨损对刀盘扭矩的影响..... 240

16.7 刀盘扭矩及刮刀切削扭矩数学模型..... 245

16.8 盾构掘进对土体扰动研究..... 248

16.8.1 盾构掘进过程中对土体扰动的机制..... 249