

盾构施工技术

程 晓 潘国庆编著



DUNGOU SHIGONG JISHU

上海科学技术文献出版社

43

盾构施工技术

程 骁 潘国庆 编著

上海科学技术文献出版社

编 者 的 话

盾构是一种在软土地基中进行隧道施工的机械，到目前为止，我国已用盾构法修建成20多条隧道。在上海，有穿越黄浦江的2条水底公路隧道，发电厂的进、排水隧道。上海地铁的区间段也决定用盾构法修建隧道。随着我国社会主义建设事业的发展，盾构施工技术的应用必将日益增多。为此我们尝试，通过本书把盾构机械和盾构施工中的有关技术，介绍给从事地下工程设计和施工的工程技术人员。

本书主要内容有：盾构机械发展概况；各种类型盾构的性能和特点；盾构在软土中施工的工艺流程；管片的设计与制作；防水材料的选择和使用；隧道的工程测量、注浆加固以及周围环境的保护等。

本书的第六章由程骁高级工程师撰写，其余章节由潘国庆工程师编写。在编写过程中得到俞志强工程师的支持。全书经上海市地铁工程指挥部王振信总工程师审阅并作序，在此深表感谢。本书系我们初次大胆尝试，由于水平有限，错误和不足之处，热诚欢迎读者提出宝贵的意见。

序

盾构施工技术自 1823 年由布鲁诺尔首创于英国伦敦的泰晤士河的水底隧道工程以来，已有 160 余年的历史。在这 160 余年的风风雨雨中，经过几代人的努力，盾构法从一种只能在极少数欧美发达国家中才见应用的特殊技术，发展成在发达国家中极为普通，在发展中国家中亦见应用的隧道施工技术。

日本是欧美国家以外第 1 个引进盾构施工技术的国家。1939 年的关门隧道是日本首次采用盾构施工技术的隧道工程。由于战争及战后困难时期的缘故，此项技术一直没有得到发展。直到 1957 年东京地铁的丸之内线采用盾构施工技术修建了一段区间隧道，1961 年名古屋地铁采用此法修建了觉王山区间隧道取得圆满成果之后，盾构施工技术在日本有了飞速的发展。在短短的 20 余年之内共制造了 2000 余台盾构，在世界上处于领先地位，把盾构法的鼻祖——英国远远的抛在后边。不过欧美国家亦不甘落后，在盾构施工技术方面不断有所创新。目前正在修建的、连接英法两国的英吉利海峡隧道，全长 48.5 公里，海底段长 37.5 公里，隧道最深处在海平面下 100 米。这条隧道全部采用盾构法技术施工，英国侧共用 6 台盾构，3 台施工岸边段，3 台施工海底段，施工海底段的盾构要向海峡中心单向推进 21.2 公里，与从法国侧向英国方向推来的盾构对接。法国侧共用 5 台盾构，2 台施工岸边段，3 台施工海底段。海峡隧道由 2 条外径 8.6 米的单线铁路隧道及 1 条外径为 5.6

米的辅助隧道组成。由于海底段最大深度达 100 米，因此无论盾构机械还是预制钢筋混凝土管片衬砌结构均要承受 10 个大气压的水压力，又由于单向推进 21.2 公里，盾构推进速度必须达到月进 1000 米的速度才能在 2 年左右完成，因此盾构的构造及其后续设备均须采用高质量的、耐磨耗及腐蚀的材料。所以该隧道的修建标志着盾构施工技术的最新水平。亦是融英美法日德等国家盾构施工技术于一体的最高成就。

盾构施工技术在解放前的旧中国还是一项冷门。解放初虽在东北的煤矿及北京的市政工程曾有过用小直径盾构施工的尝试，但系统的从盾构机械的设计制造，预制钢筋混凝土管片的试验、研究、设计制作到接缝及衬砌结构的防水技术，以地铁和水底公路隧道为目标的试验性工程是 1963 年在上海塘桥进行的，外径为 4.2 米的浅推进作为正式起步的。1966 年开始的、外径为 5.8 米的地铁区间隧道及外径为 10 米的打浦路隧道的建设成功，一下子就使我国在盾构施工技术方面赶上了国际水平。特别要指出的是在饱和含水地层中采用单层预制钢筋混凝土管片，国际上亦是在 60 年代才发展起来的。1987 年建成的延安东路隧道，外径为 11 米，是我国盾构施工技术的最新成就。迄今为止，仅由上海市隧道工程设计院设计，上海市隧道工程公司用盾构法施工的各类隧道就达 15 公里以上，使我国成为发展中国家中唯一能跻身于世界盾构施工技术之林的国家。盾构施工技术在我国虽已有 20 余年的历史，但有关该项技术的中文版专著，除 50 年代由唐山铁道学院翻译苏联纳乌莫夫的“用盾构法及特殊方法修建的隧道”一书外尚付阙如，本人作为新中国第一代从事盾构施工技术的一员，对此深感不安，常夙早日结束这种令人不快的局面。现有上海市隧道工程公司程骁等同志编著的盾构施工技术一书的出版，实为我国隧道及地下工程界

的一个喜讯,应编者之嘱,作序以表祝贺之意。

上海市隧道工程设计院院长
上海市地铁工程建设指挥部总工程师

王振信

1989年10月

目 录

序

第1章 盾构施工法

- 1.1 盾构法概述 1
- 1.2 盾构法的历史 3
 - 1.2.1 手掘式盾构施工法 3
 - 1.2.2 机械式盾构 4
- 1.3 盾构法的特点及问题 11
 - 1.3.1 盾构法的特点 11
 - 1.3.2 盾构法的缺点 11

第2章 调查和基本计划

- 2.1 施工沿线调查 13
 - 2.1.1 障碍物调查 13
 - 2.1.2 地形和地质调查 13
- 2.2 基本计划 16

第3章 衬 砌

- 3.1 衬砌的构造 17
- 3.2 衬砌的分类 17
 - 3.2.1 钢筋混凝土管片(RC管片) 17
 - 3.2.2 复合管片 18
 - 3.2.3 铸铁管片(DC管片) 18
 - 3.2.4 楔形管片 18
 - 3.2.5 压注混凝土衬砌 19
- 3.3 管片设计 20
 - 3.3.1 隧道直径 20
 - 3.3.2 管片的宽度 25
 - 3.3.3 圆环的分块 25

3.3.4	管片设计概要	25
3.3.5	管片接头	25
3.3.6	管片精度及螺孔尺寸	36
3.3.7	管片计算	37
3.4	圆隧道的荷载、覆土及保护层	41
3.4.1	土压与水压分算或合算的条件	50
3.4.2	垂直土压	50
3.4.3	水平土压	52
3.4.4	水压	55
3.4.5	土体抗力	55
3.4.6	结构自重	61
3.4.7	地面荷载	61
3.4.8	施工荷载	61
3.4.9	地震影响	61
3.4.10	双行隧道的影响	62
3.4.11	相邻结构物的影响	62
3.4.12	圆隧道的覆土及保护层	62
3.5	管片防水	63
3.5.1	全断面粘结防水	63
3.5.2	弹性橡胶条防水	64
3.5.3	嵌缝和弹性橡胶条组合防水	66
3.5.4	螺孔防水	66
3.6	二次衬砌	66
3.7	管片设计的现状及动态	67
3.8	管片生产流程及管片配比	69

第4章 盾构

4.1	盾构的构造	72
4.1.1	钢壳	73
4.1.2	推进机构	74
4.1.3	开挖面支撑	80
4.1.4	举重臂	81
4.1.5	真圆保持器	82
4.2	盾构的形式	82
4.2.1	手掘式盾构	83

4.2.2	挤压盾构	84
4.2.3	半机械式盾构	87
4.2.4	机械式盾构	88
4.2.5	泥水加压盾构	94
4.2.6	土压平衡盾构(土压系盾构).....	108
4.2.7	削土加压式盾构.....	116
4.2.8	加水式盾构.....	120
4.2.9	高浓度泥水加压盾构.....	122
4.2.10	加泥式盾构	125
4.3	特殊盾构	127
4.3.1	半盾构.....	127
4.3.2	长方形盾构和马蹄形盾构.....	127
4.4	盾构选型	127

第5章 盾构施工设备

5.1	盾构推进设备	133
5.1.1	基地.....	133
5.1.2	竖井.....	133
5.1.3	推进用基座和后座.....	133
5.2	气压设备	135
5.2.1	气压施工的效果.....	135
5.2.2	气压和地层的关系.....	136
5.2.3	气压设备.....	138
5.3	出土设备	142
5.3.1	后部出土设备.....	142
5.3.2	隧道内出土方式.....	143
5.3.3	竖井出土设备.....	147
5.4	壁后注浆及其设备	149
5.5	衬砌设备	150
5.5.1	管片运送设备.....	150
5.5.2	二次衬砌设备.....	151
5.6	电力设备	152
5.7	给排水设备	152
5.7.1	给水设备.....	152
5.7.2	排水设备.....	153

5.8 测量	153
5.8.1 井外测量	153
5.8.2 洞内测量	154
5.8.3 推进控制测量	154
第6章 辅助施工法	
6.1 降水法	158
6.1.1 井点降水	159
6.1.2 深井降水	160
6.1.3 先导隧道排水	161
6.1.4 施工注意事项	163
6.2 注浆加固法	163
6.2.1 注浆加固法的分类	163
6.2.2 注浆加固材料	165
6.2.3 注浆材料的渗透性	170
6.2.4 注浆施工方法	171
6.2.5 注浆效果的检测	175
6.2.6 注浆施工法实例	177
6.3 冻结法	178
6.3.1 冻结法的分类	178
6.3.2 施工时的注意事项	178
6.3.3 冻结法的施工实例	179
6.4 建筑物的基础加固	179
6.4.1 托换基础法	179
6.4.2 承压板(临时支撑)法	180
6.4.3 隔离墙法	181
6.4.4 软土注浆加固的范围	181
6.4.5 软土地基注浆加固的设计原则	185
第7章 挤压式盾构施工实例	
7.1 工程概要	189
7.1.1 地质概要	189
7.1.2 盾构选择条件	190
7.1.3 盾构	192
7.1.4 施工	195
7.1.5 施工情况考察	197

第8章 土压平衡盾构施工实例

8.1 工程概要	199
8.2 盾构	202
8.3 同步注浆与注浆材料	204
8.4 施工管理	207
8.4.1 初始推进	207
8.4.2 地基变形量测	207
8.4.3 正常推进管理	208
8.5 主量测段情况考察	209

第9章 地表沉降

9.1 概要	215
9.2 地层的变形特征	215
9.2.1 粘性土体的变形模量	215
9.2.2 砂性土体的变形模量	218
9.2.3 互层地层的评价	218
9.2.4 横截面沉降的实测结果及分析	219
9.2.5 单层地层沉降弹性解	222
9.2.6 互层地基的沉降弹性解	225
9.2.7 互层地基沉降的预测方法	227

第1章 盾构施工法

1.1 盾构法概述

建造隧道的方法有多种多样,但是用盾构法建造隧道,具有其独到之处。特别是在人口密集、交通繁忙的大城市中,盾构法是一种必不可少的施工方法。

随着地下建筑物、地下管线、地下铁道的不断发展,在城市中建造地铁及其它地下结构物,将逐步深层化。盾构法施工的费用一般不受深度因素和覆土深浅的影响,该法适宜于建造覆土较深的隧道;在同等深层的条件下,盾构法与明挖法施工相比,较为经济合理。近年来,盾构有了较大的突破性改进,已由初期的气压手掘式盾构发展到最近的泥水加压盾构、土压平衡盾构、加泥式盾构等。日本从1955年起到1985年3月,30年间共制作盾构3000台左右。

1. 泥水加压盾构

1975年始,在日本国内的隧道业中,几乎兴起了泥水加压盾构热。到1981年时,泥水加压盾构约占全部盾构总数的1/3。大部分人认为泥水加压盾构对不同土层的适应性强,便于采用自动化管理。而在1983年2月的日本第4次隧道技术讨论会上,否定了泥水加压盾构对不同土层适应性强这一提法,认为至少该盾构不适应在未加辅助施工条件下的砾石层和含粘性土极少的卵石层中施工。一般认为,在砂性土为主的洪积层中采用泥水加压盾构较为有利,而在粘性土为主的冲积层中施工时,需要较高的泥浆处理费用。泥水加压盾构施工后地表沉降量可控

制在 10mm 以内,问题是如何降低泥浆处理的费用,降低后续设备的造价(泥水式盾构的造价高于土压式盾构)。

2. 土压平衡盾构(含加泥式盾构)

土压平衡盾构于 1974 年进入实用阶段,1978 年时,数量急剧增加,到 1981 年 12 月止,制作台数占盾构总数的 29%,土压平衡盾构较适应于在软弱的冲积土层中推进。但在砾石层中或砂土层推进时,加进适当的泥土后,也能发挥土压平衡盾构的特点。因此 1983 年后,一般认为土压平衡盾构的适应性是强的,土压平衡盾构施工后的地表沉降量可控制在 30mm 以内。但其要求施工人员具有相当丰富的施工经验,能根据地层和施工条件的变化采用一系列的施工管理方法。

3. 不同盾构的地质适应条件

泥水式:

(1) 细粒土(粒径 0.074mm 以下)含有率在粒径加积曲线的 10% 以上。

(2) 砾石(粒径 2mm 以上)含有率在粒径加积曲线的 60% 以上。

(3) 自然含水量 18% 以上。

(4) 无 200~300mm 的粗砾石。

(5) 渗透系数 $K < 10^{-2}$ cm/s。

土压式:

(1) 细粒(粒径 0.074mm 以下)含有率在粒径加积曲线的 7% 以上。

(2) 砾石(粒径 2mm 以上)含有率在粒径加积曲线的 70% 以下。

(3) 粘性土(粘土、粉砂土含有率 4% 以上)的 N 值在 15 以下。

(4) 自然含水量,砂:18%以上,粘性土:25%以上。

(5) 渗透系数 $K < 5 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ 。

4. 不同盾构的现状

泥水加压盾构和土压平衡盾构是当前最先进的盾构形式,它们有自己的特点,但是,它们不能完全取代其它类型的盾构形式,其理由之一就是它们的造价一般都高于其它类型的盾构。

当某施工范围内的土层为软土,并且地质情况变化不大,地表控制沉降的要求不高时,可采用挤压盾构。当施工沿线有可能出现障碍物时,也有采用开胸手掘式盾构的(手掘、机械兼用等)。

1.2 盾构法的历史

1.2.1 手掘式盾构施工法

据说盾构法的设想是人们看到船蛆在木材上蛀孔,再用分泌物涂在孔的四周而想到的。

约在 150 年前,生于法国的布鲁诺尔,最早使用了盾构法,1918 年他在英国取得了该施工法的专利。1823 年布鲁诺尔用他自己的想法制成盾构,并施工了泰晤士河的水底隧道。这条道路隧道的断面(11.3m × 6.7m)相当大,施工中遇到了坍方和水淹,加上隧道的损坏,当时处于难于进展的状态,从计划制订后,花了 18 年才贯通。他用的盾构和现在的盾构有很多类似点,在盾构中间分成能互相独立推进的构格这一复杂的结构,和现在的盾构又有所不同。

“盾构”最初称为小筒(cell)或圆筒(cylinder),1866 年莫尔顿在他的专利中用了“盾构”这一术语。

现在的盾构形式,最早出现于 1869 年。那时用格兰脱海特氏设计的圆形盾构和巴罗氏研制的铸铁管片,建设了泰晤士河

的水底地铁隧道。此后，格氏的圆形盾构广泛地应用于伦敦地下铁道的建设。

1830年库拉乃发明了实用的气闸，但由于容量不足，未被盾构工程采用。1886年南伦敦地铁隧道开挖处于粘土和含水砂砾土层时，采用了气压盾构。

1917年日本国铁羽越线的折渡隧道（总长4719米）的一段，曾用盾构法施工，但由于地质条件差而被迫中途停止。1939年日本正式应用盾构法施工国铁关门隧道下行线门司方向的海底隧道部分（盾构外径7.182m，隧道总长725.8m），该工程奠定了日本盾构技术的基础。

此后，1961年名古屋市地下铁道觉王山附近的区间隧道工程中采用了盾构法施工。从此以后，盾构施工法作为城市隧道的施工法在日本引人注目，并于1963年后，在大城市的地下铁道，上、下水道，电力通讯设施的建设工程中得到了大量应用。

1.2.2 机械式盾构

1879年英国的汤姆逊设计的机械式盾构，首次应用于伦敦地铁隧道施工，该盾构的开挖机械不是安装在盾构上，而是安装在后面的车架上。

今天使用的机械式盾构的雏形是1896年波拉依斯研制成功的。他提出的盾构型式是：盾构中心装有旋转轴，在旋转轴上设置了用支架固定的刀盘，由刀盘的旋转开挖土层。此后，英国、美国和苏联对机械式盾构作了很多改进。

日本的机械式盾构是和手掘式盾构同时研究发展起来的。1963年，大阪市上水道大淀送水管工程（总长227m）首次应用了外径2.592m（隧道外径2.350m）的机械式盾构。1964年，大阪市地下铁道2号线谷町工区（总长447m）的区间隧道中，采用了外径6.970m（隧道外径6.800m）的大断面机械式盾构。同

年,在东京都下水道局神谷3丁目2区(总长668.4m)采用了外径3.410m的(隧道外径3.300m)机械式盾构,标准施工月进度达360m。1967年,日本近畿铁道难波线上本町难波间1488米区间采用了外径为10.041m(隧道外径9.900m)的机械式盾构。

从此,人们对机械式盾构更为关注。能用于日本那样复杂地层的各种机械盾构进一步得到了发展。特别是小断面盾构,在缩短工期的研究中也取得了很大的进步。同时在软弱地基中还研制了挤压式盾构。

近年来,日本把机械式盾构作了改进,研制出了用加压泥浆稳定开挖面的泥水加压盾构和用开挖出的土体平衡开挖面的土压平衡盾构。

图1.1为1964年到1981年日本各年度制作的不同种类盾构的数量。表1.1是大阪不同时期的盾构法技术情况汇总。

近年来日本开发了具有不同特点的盾构有:

- (1) 泥水加压盾构
- (2) 土压平衡盾构
- ① 削土加压式盾构
- ② 加水式盾构
- ③ 加泥式盾构
- (3) 局部气压盾构
- (4) 铰接盾构

下面为最近研究的盾构施工技术

1. 暗挖法车站施工法

- (1) 插入梁法
- (2) 半盾构法
- (3) 管棚法

2. 先导盾构法

(台)250 200 150 100 50 0 50 100 150 200 250(台)

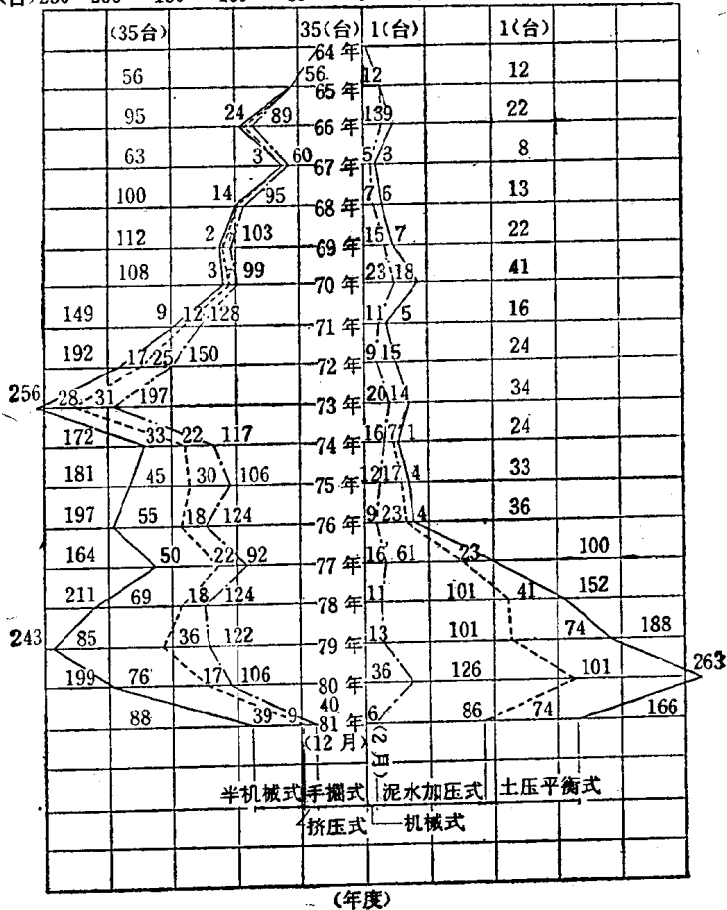


图 1.1 日本不同年度不同机种盾构的制作台数