

UNDERGROUND

CROSSING CONSTRUCTION TECHNOLOGY

地下穿越施工技术

周 松 陈立生 编著



中国建筑工业出版社

地下穿越施工技术

周 松 陈立生 编著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

地下穿越施工技术/周松, 陈立生编著. —北京: 中国
建筑工业出版社, 2016.9
ISBN 978-7-112-19548-0

I. ①地… II. ①周… ②陈… III. ①地下工程
-工程施工-施工技术-上海市 IV. ①TU94

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 149231 号

本书为上海城建市政工程(集团)有限公司在地下施工领域多年来丰富的工程建设经验和新技术的总结, 以及对各种理论应用的创新与探索。在着重介绍了地下工程中最常采用的穿越施工方法的同时, 详细阐述了地下工程穿越施工中工程建设者所应关心的一系列难题。全书共分为 11 章, 主要内容
包括: 概述; 地下穿越类型及环境保护方法; 地质及既有建(构)筑物调查;
地下穿越设备选型; 盾构穿越的施工控制技术; 顶管穿越施工控制技术; 管
幕-箱涵穿越施工控制技术; 小半径曲线穿越施工控制技术; 穿越施工监测
量技术; 穿越施工的应急措施; 地下穿越施工典型案例。

责任编辑: 王 梅 辛海丽

责任设计: 李立志

责任校对: 王宇枢 党 蕾

地下穿越施工技术

周 松 陈立生 编著

*

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

霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版

廊坊市海涛印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 21 $\frac{3}{4}$ 字数: 540 千字

2016 年 9 月第一版 2016 年 9 月第一次印刷

定价: 58.00 元

ISBN 978-7-112-19548-0

(29055)

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)

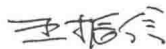
序 言

改革开放以来，我国城市建设突飞猛进，城市地下空间开发利用取得了举世瞩目的成就。目前我国城市地下空间开发数量和规模已处于国际领先水平，但从开发效益和利用效率等方面来看，正如钱七虎院士所指出的那样：“我国是地下空间开发利用的大国，但还不是地下空间开发利用的强国”。

《国家新型城镇化规划（2014—2020年）》中，提出“统筹规划地上、地下空间开发”，“建立健全城市地下空间开发利用协调机制”，“科学有序推进城市轨道交通建设”和“推行城市综合管廊”等综合开发利用城市地下空间资源的重要举措，以应对“摊大饼”式的城市发展模式和“城市空间无序开发、人口过度集聚，重经济发展、轻环境保护，重城市建设”，以及城市机动化率不断提高等所引发的日益突出的交通拥堵、城市滞涝、城市雾霾等“城市病”问题。正是在这一背景下，城市地下空间开发的理论研究和施工实践经验的总结便显得尤为重要。

本书是上海城建市政工程（集团）有限公司的广大工程建设者集体智慧的结晶，他们在积累了数十年城市隧道工程、地下工程相关的理论研究和实践经验的基础上，对城市地下空间开发中最常见的三种穿越施工工艺（顶管法、盾构法、管幕-箱涵顶进法）进行了详尽的阐述，内容基本涵盖了工程施工中所遇到的难题，也涉及了土力学、基础工程、机械工程等理论前沿问题，兼顾了地下工程施工的各个方面。本书对近年来上海城建市政工程（集团）有限公司所承揽的六个具有典型意义的大型工程案例进行了详细的阐述，在一定程度上展现了国内在隧道及地下工程施工理论、管理、工艺上的先进理念和最新科技水平。部分施工工艺，如管幕-箱涵顶进工法已达到国际领先水准。

本书中所总结的具有实际工程指导意义的方法、经验和措施，是值得我国隧道及地下工程技术人员学习和借鉴的。我相信本书的出版将进一步促进我国隧道及地下工程的施工技术、施工管理、施工工艺的研究，推动建设管理部门、施工单位和设计单位的技术及管理水平不断提高。



2016年6月

前 言

随着社会经济的高速发展及城市人口的快速增长,城市和道路交通建设日新月异,地铁、隧道及地下管线的敷设等市政工程趋于集约化、空间化、复杂化。但由于城市地面建筑物、道路逐渐增多,地下空间逐步被利用,工程建设中大量的地下工程都会遇到穿越建、构筑物 and 管线的需求。比如建造公路隧道、城市地铁隧道、地下管道工程、城市过街地道等,这些工程面对的周边环境和工程地质往往非常复杂,所穿越的对象种类繁多,工程风险极大。总结出穿越工程方面的成套施工技术是摆在我们面前的一项重要使命。

上海城建市政工程(集团)有限公司凭借在地下施工领域所拥有的先进技术,承揽了数十项大型地下穿越工程,尤其是最近10年,通过有影响力的大型穿越工程的施工,集团积累了丰富的工程建设经验,成功研发并采用了一些新技术,对各种理论的应用也进行了一些创新与探索。但是,我们深知地下工程是一门实证科学,解决地下工程施工的实际问题必须强调理论创新与实际经验的相互促进,因此,对一些典型的重大工程,系统地分析实例与数据,认真地总结经验,升华理论是非常有必要的。

根据上述设想,本书着重介绍了地下工程中最常采用的三种穿越施工方法,即盾构法、顶管法、管幕一箱涵顶进法,汇总了上述三种穿越的施工工法、施工经验及案例。同时,也介绍了一些与它们息息相关的、正在探索的地下施工方面的新理论和新技术。本书详细阐述了地下工程穿越施工时,工程建设者所应关心的一系列难题,包括:穿越类型、周边环境调查、设备选型、施工过程中的控制技术、监控测量技术以及必要的应急措施等。

本书以介绍实践经验为主,尽可能全面详细地汇集工程建设中的有关问题,也加入了许多土力学、基础工程、机械工程等理论和实践的内容,在本书第11章,对上海城建市政工程(集团)有限公司所承揽的六个大型穿越工程(盾构法、顶管法、管幕一箱涵顶进法)进行了深入的介绍,可以作为前述所有章节内容的实际应用。希望本书可供我国地下工程和隧道工程业界施工人员、设计人员、各高校科研单位相关专业的老师与研究生们等广大业界同仁们借鉴、参考。

在本书成稿编著的过程中,有幸得到了同济大学白云教授、廖少明教授,上海交通大学黄醒春教授,隧道股份杨我清教授级高工的悉心指导,他们就本书各个章节提出了许多宝贵的意见,特此感谢。另外,许多合作单位的一些科研成果和技术总结,我们也将它们引入书中,以飨读者,同时谨向这些同志致以衷心的感谢。

本书的编著成员及主要分工如下:

周松:第1章,第5章,第6章,第7章,第11章;陈立生:第1章,第2章,第5章,第6章,第11章;葛金科:第1章,第2章,第7章,第11章;彭少杰:第4章4.1节,第10章;王洪新:第2章,第5章;陈台礼:第3章;卢礼顺:第5章,第8章8.1节,第10章;荣建、徐伟忠:第9章;第11章11.2节;杨光辉:第11章11.1节、

11.3 节；张振：第 4 章 4.2 节、4.3 节，第 6 章，第 8 章 8.2 节，第 11 章 11.4 节、11.5 节；曾英俊：第 11 章 11.6 节；本书全篇由杨继范、王欢整理、编辑，并由周松、陈立生通读、统稿及主持内容、文字的修缮。

尽管本书的每一位参编作者都付出了艰辛的努力，但由于水平经验和文字表达方面的局限与不足，书中内容不尽完善，难免有疏漏和不妥之处，敬请专家和读者批评指正。



2016 年 3 月

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 穿越施工背景	1
1.2 穿越施工技术的发展与现状	1
1.3 地下穿越工程施工方法	8
参考文献	17
第 2 章 地下穿越类型及环境保护方法	18
2.1 地下穿越的分类	18
2.2 穿越施工的关键技术	28
2.3 穿越施工常用辅助方法	33
参考文献	37
第 3 章 地质及既有建（构）筑物调查	39
3.1 调查的目的与内容	39
3.2 工程与水文地质调查	39
3.3 障碍物调查（既有建、构筑物调查）	40
3.4 环境调查	42
参考文献	43
第 4 章 地下穿越设备选型	44
4.1 盾构机选型	44
4.2 顶管机选型	57
4.3 管幕箱涵工具头选型	73
参考文献	80
第 5 章 盾构穿越的施工控制技术	82
5.1 开挖面及舱内土体改良	82
5.2 现场推进试验	86
5.3 盾构土舱内压力调整与控制	88
5.4 穿越过程控制	105
5.5 同步注浆与环境保护	136
参考文献	143
第 6 章 顶管穿越施工控制技术	145
6.1 顶管工程开挖面稳定机理与管理	145

6.2 泥浆套注浆工艺	148
6.3 顶进扰动对地层位移的影响规律及环境保护	165
6.4 穿越过程中顶管顶力的控制	173
参考文献	179
第7章 管幕-箱涵穿越施工控制技术	181
7.1 钢管幕顶进施工控制技术	181
7.2 管幕内箱涵顶进施工控制技术	188
参考文献	199
第8章 小半径曲线穿越施工控制技术	201
8.1 急曲线盾构施工控制技术	201
8.2 曲线顶管施工控制技术	207
参考文献	215
第9章 穿越施工监控测量技术	216
9.1 穿越施工扰动影响下的环境保护监控测量技术	216
9.2 地下工程穿越测量的内容和特点	219
9.3 穿越过程的非开挖监测	233
参考文献	236
第10章 穿越施工的应急措施	237
10.1 盾构穿越施工应急措施	237
10.2 盾构穿越施工应急案例	241
10.3 顶管穿越施工应急措施	244
10.4 顶管穿越施工应急案例	253
参考文献	258
第11章 地下穿越施工典型案例	259
11.1 大直径泥水盾构下穿既有地铁隧道施工案例	259
11.2 大直径泥水盾构穿越机场滑行道案例	279
11.3 土压平衡盾构穿越倾斜严重超标的砖混结构居民房工程案例	284
11.4 顶管穿越的工程案例	296
11.5 管幕-箱涵穿越上海西郊宾馆案例	309
11.6 泥水平衡盾构穿越城市密集空间及河流案例	321

第1章 概述

1.1 穿越施工背景

随着社会经济的高速发展及城市人口的快速增长，城市和道路交通建设日新月异，地铁、隧道及地下管线的铺设等市政工程趋于集约化、空间化、复杂化。在这些地下工程建设过程中，由于地面交通和建筑环境的限制，通常不能采用传统的明挖法施工技术，而需采用对地面和周围环境干扰较小的地下穿越方法进行施工。

所谓地下穿越施工，是指地下工程施工中无需明挖，穿越既有建（构）筑物及管线的施工方法，相关的主要技术有：盾构法、顶管法、管幕-箱涵法等。其主要用于穿越地面有不便拆除的建（构）筑物、繁华街市、交通干道、地铁等场所。与传统的明挖法相比，地下穿越施工具有以下优势：（1）施工期间不影响上部道路的正常通行；（2）相对于桥梁方案能够节省建筑用地；（3）施工干扰少，保护城市环境；（4）能满足抵抗一定自然灾害的要求等。

由于现代城市建设中经常遇到的立体交通与地下建筑，地下穿越施工将不可避免地产生与既有建（构）筑物间的相互扰动影响，同时，地下隧道的断面尺寸也在逐步地增大，有的则需要浅覆土、长距离、矩形断面穿越。因此，对地下穿越施工新技术及其引起的环境效应进行深入研究，探求其合理可行的施工技术及环境保护技术具有良好的社会、经济和环境效益。

1.2 穿越施工技术的发展与现状

地下穿越既有建（构）筑物的问题根据被穿越物的不同大致可以分为四种类型：1）穿越地表建筑物及桩基；2）穿越地下管线；3）穿越铁路；4）穿越既有地下构筑物（包括隧道）。尽管四类建（构）筑物存在结构形式、受力方式和变形模式的差异，但在地下穿越的施工中都面临着同样的技术问题，即对隧道开挖导致土体位移的预测、土体扰动位移对既有建（构）筑物可能引起破坏的评价、既有建（构）筑物的保护措施、控制标准、既有建（构）筑物的监测和地下穿越的施工方法选择。所以，可以将其归为一类问题——穿越施工技术，而各种类型的工程评价方法则可以相互借鉴。

1.2.1 穿越施工技术发展

对于大型地下工程项目，根据建设条件要求，目前最常用的穿越施工方法有：盾构

法、顶管法、管幕-箱涵顶进法等，下面将以此三种方法为例来分别介绍穿越施工技术的发展。

1.2.1.1 盾构法的技术发展

盾构法的起源可以追溯到 1818 年，距今已有近 200 年的历史，最早由法国工程师布鲁诺提出，并于 1823~1841 年，在伦敦泰晤士河下修建了世界上第一条由盾构法施工的隧道，全长 458m。到了 1874 年，英国工程师格雷脱海特创造了比较完整的用压缩空气来平衡水土压力的气压盾构施工工艺，并用于修建伦敦城南线 Vyrnwy 隧道，为现代化盾构奠定了基础。

20 世纪初，盾构法施工在英、美、法、德、苏等国开始推广，被广泛用于公路隧道、地铁和市政隧道的建设中，并在加气压施工方法和盾尾注浆技术等方面有了突破性的发展；20 世纪 30~40 年代，这些国家已相继成功地使用盾构法建成了内径 3.0~9.0m 的多条地下铁道及水底隧道；从 20 世纪 60 年代起，盾构法在日本得到了迅速的发展，其用途也越来越广。为防止地层沉降构成对建筑物、管道的威胁，日本和德国还研究开发了盾构开挖面的稳定技术和开挖技术。1967 年世界上第一台泥水加压式盾构研制成功，1974 年世界上第一台土压平衡盾构研制成功，并相继投入使用，开辟了能有效控制地面沉降的新途径，这标志着盾构法施工技术进入了一个崭新的阶段，它们可以在大多数类型的工程地质和水文条件下使用，机械化程度高且施工速度快。除在岩石和半岩石土层的地质条件下，钻爆法和盾构法的竞争较激烈外，在软岩、不稳定岩层及软土地层中盾构法施工显得更加可靠和经济有效。从世界范围内看，在盾构法隧道施工技术方面，日本和欧洲处于领先地位。世界上第一个直径大于 14m 的超大直径盾构隧道工程是日本东京湾的海底道路隧道工程，施工用盾构机直径达 14.14m，隧道埋深 20m，海底盾构隧道段长 9.5km。1994 年，英、法两国合建完成英吉利海峡隧道，施工机械盾构机直径为 7.82m，隧道埋深达 110m，海底盾构隧道段长达 39km。这两项工程的顺利完成，把世界盾构法隧道施工技术推进到较新阶段。

我国是较早采用盾构法施工的发展中国家，虽然起步较晚，但是发展很快，目前已能自行研制和生产所需的盾构机器设备。1970 年，上海隧道工程公司使用直径为 10.2m 的网格挤压式盾构机，建成穿越黄浦江的我国第一条水下隧道，实现了中国用盾构法修建公路隧道“零”的突破。20 世纪 80 年代中期，上海开始进行土压平衡和泥水加压盾构的研制，并取得了成功。近年来，黄浦江越江隧道、合流污水工程等，尤其是地铁隧道的建设，使盾构法技术在上海得到了飞速的发展，并使上海具备了盾构设备研发的实力。其中上海崇明越江隧道工程，采用了世界最大直径（ $\phi 15.43\text{m}$ ）的泥水加压盾构施工，掘进长度为 7470m，解决了高水压软土复杂地质条件下，超大断面盾构衬砌结构设计、开挖面稳定、隧道抗浮、管片制作与拼装、隧道防水、关键部件的检修等一系列设计施工难题，于 2009 年 11 月建成通车。

目前，在国内超大直径盾构（一般为 $\phi 14\text{m}$ 以上）相关案例应用逐渐丰富起来。近 10 年来，我国超大直径盾构隧道建成通车运营的工程有 9 项，其中上海有 5 项，南京有 2 项，杭州有 1 项，扬州有 1 项。采用了 12 台盾构掘进机，掘进长度达 51.86km，超过国外 20 年来超大直径隧道工程的总长度。2004 年上海上中路越江隧道工程引进当时世界最大直径的 $\phi 14.87\text{m}$ 泥水加压盾构，建造了黄浦江下双管双层双向 8 车道的公路隧道，掘

进长度达到 1250m，穿越了饱和含水的淤泥质黏土、淤泥质粉质黏土等软弱地层，隧道最大埋深达到 45m，最浅覆土仅 8.6m，于 2009 年建成通车。2007 年上海外滩道路北段隧道采用 $\phi 14.27\text{m}$ 土压平衡盾构施工，为国内首次采用大直径土压平衡盾构在城市密集区施工，掘进长度 1098m，该工程最大特点为穿越“1 桥 2 隧 33 栋”大量重要的建构筑物和历史名胜，其中盾构边线离历史知名建筑浦江饭店桩基仅 1.7m，于 2010 年 3 月建成运营。图 1-1 为国内超大直径盾构隧道典型工程案例，其他已建的及在建的超大直径盾构隧道工程如表 1-1 所示。

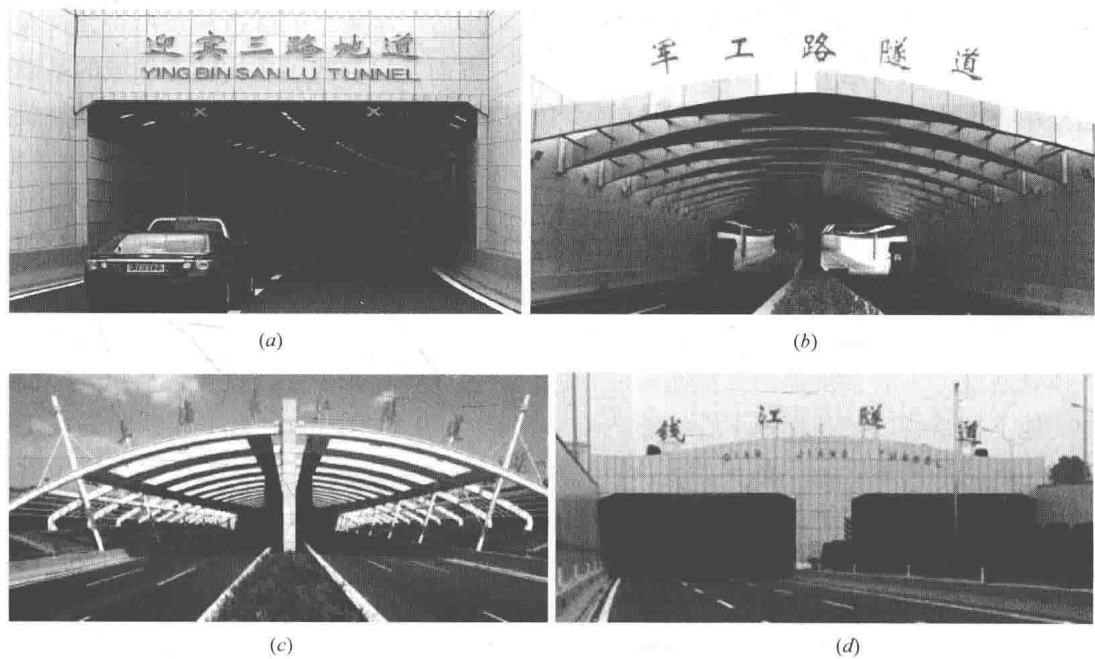


图 1-1 国内超大直径盾构隧道典型工程案例

(a) 虹桥综合交通枢纽迎宾三路隧道 ($\phi 14.27\text{m}$)；(b) 上海军工路隧道 ($\phi 14.89\text{m}$)；
(c) 上海长江隧道 ($\phi 15.43\text{m}$)；(d) 杭州钱江隧道 ($\phi 15.43\text{m}$)

我国超大直径盾构隧道工程一览表 表 1-1

工程名称	盾构直径、机型	隧道长度(km)	建设时间
上海上中路隧道	1 台 $\phi 14.89\text{m}$ 泥水盾构	1.25×2	2005~2009
上海军工路隧道	1 台 $\phi 14.89\text{m}$ 泥水盾构	1.525×2	2008~2010
上海长江隧道	2 台 $\phi 15.43\text{m}$ 泥水盾构	7.47×2	2005~2009
南京长江纬七路隧道	2 台 $\phi 14.9\text{m}$ 泥水盾构	3.835×2	2005~2010
上海外滩道路隧道	1 台 $\phi 14.27\text{m}$ 土压盾构	1.098	2007~2010
上海虹桥综合交通枢纽迎宾三路隧道	1 台 $\phi 14.27\text{m}$ 土压盾构	1.682	2009~2011
杭州钱江隧道	1 台 $\phi 15.43\text{m}$ 泥水盾构	3.02×2	2012~2014
南京纬三路过江通道	2 台 $\phi 14.93\text{m}$ 泥水盾构	$3.995 + 3.688$	2014~2015
扬州瘦西湖隧道	1 台 $\phi 14.93\text{m}$ 泥水盾构	3.6×2	2011~2014
上海虹梅南路隧道	1 台 14.93m 泥水盾构	3.39×2	2011~2015

续表

工程名称	盾构直径、机型	隧道长度(km)	建设时间
上海长江西路隧道	1 台 15.43m 泥水盾构	1.538+1.545	在建
上海沿江通道	2 台 15.43m 泥水盾构	5.09×2	在建
上海北横通道	1 台 15.56m 泥水盾构	2.751+3.665	在建
总计	17 台	78.322	

总体来说，随着我国城市地铁、公路工程建设的广泛开展，近十年来盾构技术在我国得到了空前的发展。但是，从工程造价上来看，采用盾构法施工的隧道相对昂贵，这在一定程度上制约了城市地下空间的开发和利用；另一方面，目前我国盾构隧道领域的基础研究和应用技术水平与盾构隧道技术发达的国家相比还有一定差距，在较多专业领域如装备制造，尚需进行专项研究和开发。

1.2.1.2 顶管法的技术发展

顶管法施工是借助于始发工作井内主顶油缸及中继间等的顶推力，把掘进机和紧随掘进机后的管道及中继间从工作井内穿过地层一直顶推到接收井内的一种非开挖铺设地下管道的施工方法。

顶管法施工不需要从地面开挖而形成管道，并且能够穿越公路、铁道、河川、地面建筑物、地下构筑物以及各种地下管线等。最早始于 1896 年美国的北太平洋铁路铺设工程的施工中。我国的顶管施工最早始于 1953 年的北京，在 1956 年上海也开始进行顶管试验，但一开始都是一些手掘式顶管，设备也比较简陋。1984 年前后，北京、上海、南京等地先后开始引进国外先进的机械式顶管设备，从而使我国的顶管技术上了一个新台阶。1988 年，通过引进消化吸收，上海研制成功了国内第一台 $\phi 1200\text{mm}$ 土压泥水平衡掘进机。与此同时，多刀盘土压平衡掘进机、大刀盘土压平衡掘进机、大刀盘泥水平衡掘进机也相继在上海诞生，取得了令人满意的效果。

近 20 年来，顶管施工技术无论在施工理论，还是在施工工艺和设备开发研制方面，都有了突飞猛进的发展，各种新方法新工艺不断出现，这也带动了顶管技术在我国的发展，同时有关顶管工程的理论也逐步发展起来。随着城市建设和改造项目的增多，顶管工程在我国各个城市都得到了广泛应用，顶管施工日趋普及，应用的领域也越来越宽，已应用到给水排水管、煤气管、动力电缆、通信电缆和发电厂循环水冷却系统等许多管道与隧道的施工中。比较典型的顶管工程案例有上海合流污水一期、二期、三期，上海苏州河综合整治工程等。近年来比较典型的顶管工程有：上海白龙港南线东段超大直径顶管工程，为城市污水输送干线，是国内口径最大的混凝土顶管工程，顶管内径达到 4m，外径达到 4.64m，单线总长 52km。上海青草沙原水顶管严桥支线工程，为城市生活用水输送干线，采用大口径钢顶管，其中严桥支线工程最大管径 3.6m，单线总长 54km。1997 年上海黄浦江上游引水工程的长桥支线顶管，也为城市生活用水输送干线，采用内径 3.5m 钢顶管，并实现了一次最大顶进距离 1743m，为当时的世界纪录。上海北京西路—华夏西路电力隧道为国内目前最大口径的混凝土顶管电力隧道，外径为 4.14m，内径 3.5m，顶管隧道长度为 6.2km。2015 年实施的黄浦江上游水源连通管工程，线路全长约 42km，采用 DN4000、DN3800 和 DN3600 钢管，多为超大直径、超长距离钢顶管施工。超大直径顶

管典型工程案例见图 1-2。

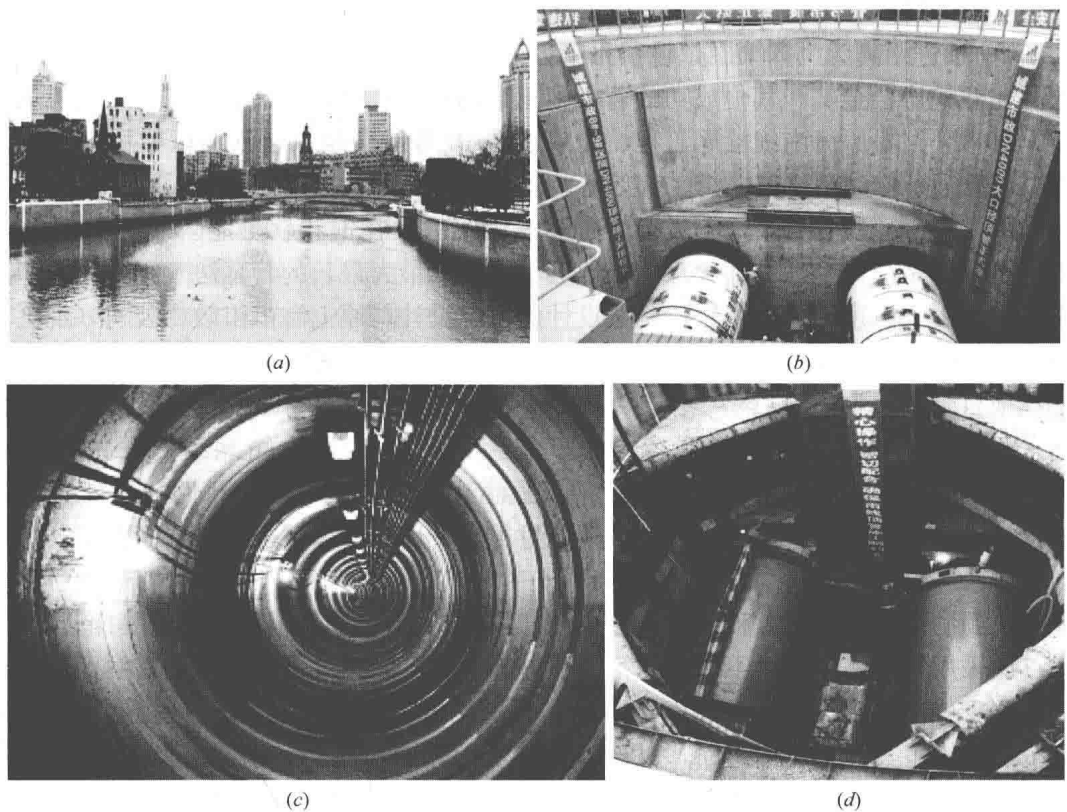


图 1-2 超大直径顶管典型案例

(a) 上海苏州河综合整治; (b) 上海白龙港超大直径顶管工程;
(c) 上海北京西路—华夏西路电力隧道; (d) 上海青草沙原水顶管金桥支线工程

1.2.1.3 管幕-箱涵法的技术发展

管幕-箱涵工法是顶管和箱涵两种顶进技术相结合而发展起来的, 包含了水平管幕(顶管) 顶进技术以及在管幕内的箱涵顶进技术。管幕-箱涵法作为一种适用于软土地层的新型地下工程非开挖技术, 可用于任意断面形状(矩形、拱形、异形) 的穿越工程, 箱涵穿越区域沉降变形控制严格, 对周边环境如地面交通、管线和房屋等影响小。该施工方法适用于填土、淤泥土、黏土、砂土、岩层等各种地层, 可用于穿越铁路、机场联络通道、高速公路、穿越繁忙的街道、建筑密集或者环境保护要求严格的地下通道等特殊条件下的地下工程施工, 尤其针对软土地层浅覆土、大断面的穿越施工, 具有明显的优越性。

管幕-箱涵工法最早于 1971 年出现在日本 Kawase-Inae 穿越铁路的通道工程, 由 Iseki 公司修建。以后近 40 年里, 作为一种新型的非开挖技术, 该施工工艺发展日趋成熟, 国内外采用该工法成功修建了许多浅埋式大断面隧道或地下通道, 并形成了多种各具特色的施工工法, 如日本的 FJ 工法、ESA 工法、中国大陆首创的 RBJ 工法等。1991 年日本近畿公路松原海南线松尾工程中, 采用 ESA 工法顶进大断面箱涵, 箱涵宽 26.6m, 高 8.3m, 顶进长度达到 121m; 2000 年日本大池—成田线高速公路线下地道工程采用 FJ 箱涵顶进工法施工穿越高速公路, 其大断面箱涵宽 19.8m, 高度 7.33m, 施工顶进长度

47m；2005年建成的上海中环线北虹路下立交工程更是管幕-箱涵工法在中国大陆的首次应用，首创采用RBJ顶进工法，箱涵结构宽34.2m、高7.85m为当时世界第一，管幕段长126m，顶进距离为世界第二，该项目工程最终还获得了2006年上海市科技进步一等奖和国际非开挖协会金奖。其他成功的著名施工案例还有：台湾复兴北路穿越松山机场地道工程、日本公路松原海南线桧尾工程、北京地铁10号线穿越京包铁路框架桥工程以及厦门市高崎互通下穿鹰厦铁路隧道工程等等，均取得了良好的效果。

其中上海中环线北虹路地下通道工程是我国第一次在饱和软土地区采用管幕-箱涵法施工工艺，也是世界上在饱和含水软土地层中施工的最大最长的管幕法工程，为八车道城市主干道，由上海市隧道工程轨道交通设计研究院设计，原上海市市政二公司（现更名为上海城建市政工程（集团）有限公司）施工修建。施工工期为2003年6月～2005年6月。该项目管幕段由80根 $\phi 970$ ，壁厚10mm带锁口的钢管形成“口”字形帷幕，相邻钢管间采用锁口连接。钢管幕管顶覆土厚度仅为4.5m，管幕内箱涵结构外包尺寸达到34.2m $\times$ 7.85m，箱涵顶进长度126m。地下通道穿越西郊宾馆和虹桥路，西郊宾馆是重要的保护对象。虹桥路为交通主干道，车流量很大，地下管线复杂，对路面变形控制要求很高。

为了顺利完成该项目工程，施工方自主开发成功了基于RBJ工法的管幕-箱涵施工方法，首次采用了管幕内土体不加固的箱涵顶进施工方案。相对于其他施工方案，RBJ施工工法适用于软土地层浅埋式大断面长距离非开挖地道工程，具有以下一些优点：1）RBJ工法依靠网格工具头稳定开挖面，对管幕内土体可不进行加固处理，安全可靠，有效降低了工程投资费用，缩短了工期；2）管幕内箱涵顶进采用顶进法取代对拉法，使受力体系更简化，在管幕与箱涵之间形成完整可靠的支承润滑介质。既可减少箱涵顶进过程中的地表沉降，又能降低箱涵顶进阻力；3）用底排钢管幕作为箱涵顶进的基准面，施工精度高，质量有可靠保证。图1-3为上海中环线北虹路地下通道工程（管幕-箱涵工法）。

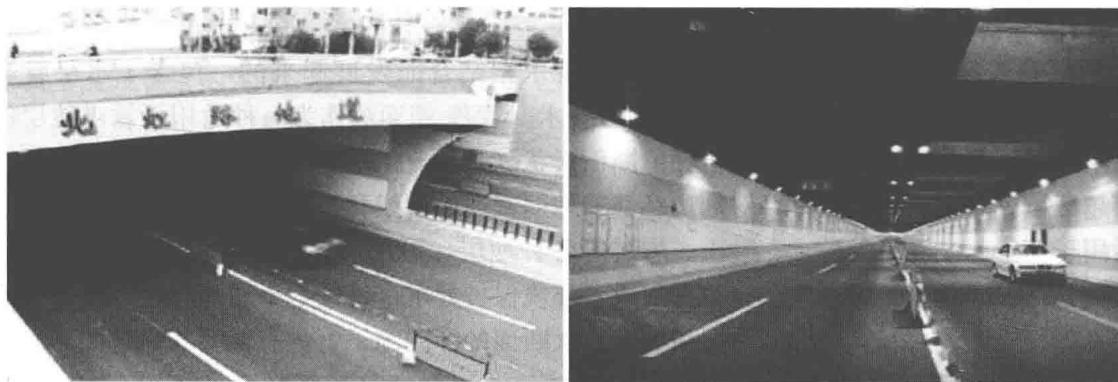


图1-3 上海中环线北虹路地下通道工程（管幕-箱涵工法）

2016年开始实施的上海市田林路下穿中环线地道工程，对上海市中环线北虹路地道的管幕工法进行了改进，主要是在口字形钢管幕内采用全断面封闭式切削的土压平衡掘进机取代钢网格工具头，分节顶进箱涵。不仅能够更好地控制地表变形，而且进一步拓宽了该工法对地层的适应性。田林路地道的箱涵断面为19.6m $\times$ 6.4m，长度约90m。箱涵顶

进通过 PLC 可编程计算器由一位控制人员对箱涵的开挖面稳定、箱涵顶进的姿态、箱涵的泥浆减阻和顶力等进行远距离集中控制。目前工程正在实施过程中。这是目前软土地层世界上最大断面的土压平衡矩形箱涵掘进机浅覆土穿越敏感公路的工程。

1.2.2 现状及存在问题

随着城市地面建筑物、道路逐渐增多,地下空间逐步被利用,在城市规划等问题上会遇到大量地下穿越工程的需求。比如建造公路隧道、城市地铁隧道、大量地下管道工程、大量城市过街地道等,这些穿越工程面对的周边环境和工程地质往往非常复杂,工程风险很大。总结出穿越工程方面的成套施工技术是摆在我们面前的一项重要使命。由于地下工程情况复杂,不可预见的因素较多,是工程风险的易发范围。穿越工程的相关理论、经验和应用技术还不够完善,集中表现在以下方面:

- 1) 地表变形控制技术尚不成熟,很难真正做到微扰动施工要求;
- 2) 施工条件复杂,受地质条件影响较大,有较多的不确定性和风险;
- 3) 对地下构(建)筑物的资料和调查很难做到精准等等。

另外,随着地下空间的不断被开发利用,交叉的地下工程与日俱增,关于穿越施工的工程实例国内外都有不同程度的研究。通过以往的研究,归纳出穿越施工存在的几个关键性问题:

1. 工程地质和水文地质条件。对于穿越工程来讲,由于其在既有结构近邻施工,工程地质和水文地质条件直接影响周边既有结构的变形和安全控制等。周围土体的具体特征是决定穿越施工时采取什么样加固措施的决定性因素,比如围岩的性质和地下水决定平衡条件和注浆效果等。因此,穿越工程的工程地质和水文地质评价是决定选用施工方法的关键,甚至是决定工程成败的关键。

2. 新旧结构之间地层的处理。穿越工程在施工前或施工中一般会对新旧结构之间的地层进行加固处理。当新旧结构之间地层的土层较厚或穿越距离较长时多采用注浆加固的方式;当新旧结构之间地层的土层较薄或穿越距离较短时多采用管棚等刚度较大的结构作支护的方式。

3. 既有结构的现状评价。结构的破坏是由于所受外力超过其极限承载力或变形大于容许值,在结构的设计过程中,设计人员对结构所受各种荷载一般都做了较保守的计算,在年限内,结构承载力一般能满足要求。但由于新建结构要穿越施工,引起了新的变形,从而产生附加内力,对于已经使用若干年的地下结构,由于长期受地下水的侵蚀,结构会受到不同程度的损伤,很多结构已经呈现开裂、渗水现象。因此,要充分做好既有结构的现状评价与监测,在全面掌握既有结构动态反应的基础上,才能给出比较合理的控制标准、变形警报值和容许值,作为选择合理的施工方案的依据,达到控制变形的目的。

4. 空间位置关系。新建结构与既有结构的空间位置关系也是影响既有结构变形的关键因素之一。比如新建隧道是紧贴既有结构还是之间夹有一定厚度的土层,此时的相互影响将取决于相对位置关系和工程地质条件。

5. 施工方法的选择。对于地下工程引起的环境问题,施工方法的选择是至关重要的,特别是对于一些大断面的地下工程,比如地下商场、地下车站等,施工方案和辅助工法是控制变形沉降的重点因素。

1.3 地下穿越工程施工方法

1.3.1 盾构穿越施工方法

1.3.1.1 基本概念

盾构穿越施工方法是暗挖法施工中的一种全机械化施工方法，它是盾构机械在地层中掘进，通过盾构外壳和隧道衬砌结构支承周围土体防止发生往隧道内的坍塌，并在开挖面前方利用切削装置进行地层开挖，同时控制开挖面的出土量以平衡地层压力，通过出土机械运出洞外，依靠后部千斤顶加压顶进，随后拼装预制混凝土管片，形成隧道结构的一种机械化施工方法。该方法常用于软土地区埋深较大的隧道工程，可穿越江河、湖泊、海底、地面建筑物和地下管线密集区。对于岩石地层，可用相应的岩石隧道掘进机（TBM）开挖施工。盾构穿越施工示意图如图 1-4 所示。

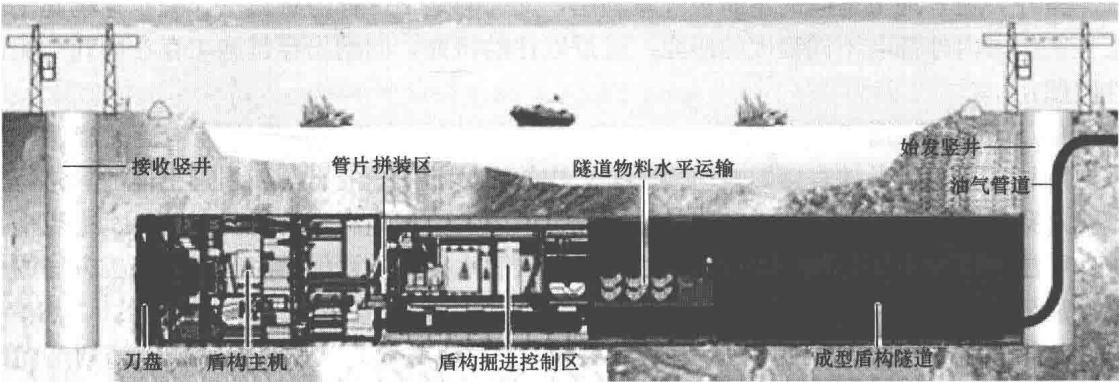


图 1-4 盾构穿越施工示意图

1.3.1.2 结构形式

盾构的结构有多种分类方式。按盾构断面形状可分为圆形（单圆、双圆等）、拱形、矩形和马蹄形等异形断面形式。圆形盾构因其抵抗地层中的土压力和水压力较好，衬砌拼装简便，可采用通用构件，易于更换，因而应用较为广泛。

按开挖面与作业室之间隔墙构造可分为全开敞式、半开敞式和密封式，其中全开敞式、半敞开式因为技术落后，目前几乎不采用，因此这里不再赘述。密封式盾构是指在机械开挖式盾构机内设置密封隔墙，开挖土体进入开挖面和隔墙之间的刀盘腔（切口环）内，采用出土设备或泥水管路输出，盾构掘进中由舱内泥水压力或土压力提供足以使开挖

面保持稳定的压力。密封式盾构又分为泥水平衡式和土压平衡式等，是目前广泛采用的盾构形式。其中土压式盾构又细分为一般土压式和加泥式土压平衡式。如图 1-5 所示。

另外，按照平衡地下水与稳定开挖面的方式可分为泥水加压、土压平衡盾构，局部气压盾构或全气压盾

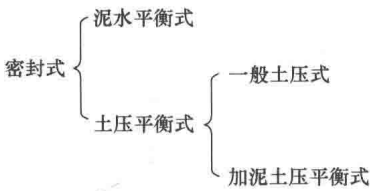


图 1-5 密封盾构结构形式分类

构等。

1.3.1.3 工艺流程

盾构穿越施工工艺流程如图 1-6 所示。可概括为：

- 1) 在盾构法施工隧道的起始端和终端各建一个工作竖井，分别称为始发井（或称拼装室）和到达井（或称拆卸室）。特别长的隧道，还应设置中间检修工作井（室）。
- 2) 把盾构主机和配件分批吊入始发井中，并组装成整机，随后调试各系统性能使之达到设计要求。
- 3) 洞口地层加固。
- 4) 依靠盾构千斤顶推力（作用在已拼装好的衬砌环和始发井后壁上）将盾构从始发井的结构开孔处推出。
- 5) 盾构在地层中沿着设计轴线推进，在推进的同时不断出土和安装衬砌管片。
- 6) 及时向衬砌背后的空隙注浆，防止地层移动和固定衬砌环位置。
- 7) 盾构进入到达井而后被拆除。如施工需要，可穿越到达井或盾构过站再向前推进。

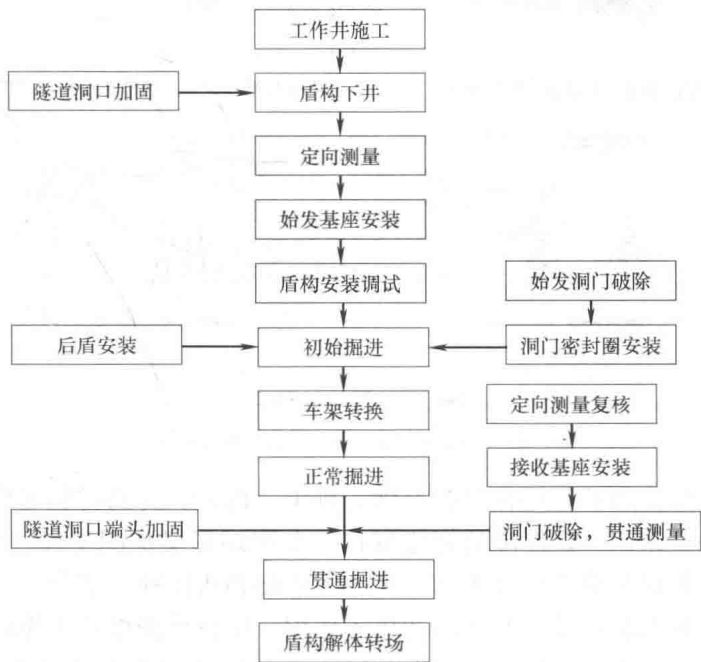


图 1-6 盾构穿越施工工艺流程

盾构掘进由始发工作井始发，到隧道贯通、盾构机进入到达工作井，一般经过始发、初始掘进、转换（台车转换）、正常掘进、到达掘进五个阶段。盾构自基座上开始推进到盾构掘进通过洞口土体加固段止，可作为始发施工阶段；盾构始发后进入初始掘进阶段；台车转换后进入正常掘进阶段（正常掘进是基于初始掘进得到的数据，采取适合的掘进控制技术，所进行的高效掘进阶段）；当盾构正常掘进至离接收工作井一定距离（通常为 50~100m）时，盾构进入到达掘进阶段。到达掘进是正常掘进的延续，是保证盾构准确贯通、安全到达的必要阶段。

施工过程中，开挖面的稳定及出土量控制、盾构沿设计路线的高精度推进（即盾构的方位、姿态控制）、衬砌拼装作业、建筑间隙填充四項工作最为关键，常称为盾构掘进控