

DAXING DIXIA DINGGUAN SHIGONG JISHU YUANLI JI YINGYONG

大型地下顶管施工技术 原理及应用

韩选江 著



中国建筑工业出版社

大型地下顶管施工技术 原理及应用

韩选江 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

大型地下顶管施工技术原理及应用/韩选江著. —北京:
中国建筑工业出版社, 2008
ISBN 978-7-112-06965-1

I. 大… II. 韩… III. 地下工程—顶进法施工 IV. TU94

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 002294 号

本书详细地介绍了地下管道工程中顶管施工的原理、特点及先进的配套施工方法,论述了直线和曲线顶管施工中影响顶推力的各种因素、顶力分析与计算研究,并通过大型顶管工程实例,针对其工程特点、场地恶劣环境和技术难度,具体说明顶进施工方法的实际应用及效果。内容主要包括顶管施工主要设备、顶管施工测量与导向、顶管常用管材、顶管对土体扰动及变形分析、直线和曲线顶管顶推力研究、顶管对土体作用的三维有限元分析等,以及对顶管施工中相关问题进行充分的分析与计算,理论与实际结合紧密。

全书将“予力”概念渗透到地下顶管施工全过程中,应用“予力技术作用原理”和“予力度”控制标准来确保顶进作业安全有效实施。本书内容丰富,并具有新颖性、先进性和实用性等特点,可供从事土木工程、市政管线工程和其他各类管道工程的设计、施工、监理和管理人员参考,同时也可作为一本兼具理论和工程应用的图书供土木建筑院校师生使用。

* * *

责任编辑:郇锁林

责任设计:肖广慧

责任校对:汤小平

大型地下顶管施工技术原理及应用

韩选江 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

北京市安泰印刷厂印刷

*

开本:787×1092 毫米 1/16 印张:21¼ 字数:516 千字

2008 年 2 月第一版 2008 年 2 月第一次印刷

印数:1—3,500 册 定价:45.00 元

ISBN 978-7-112-06965-1

(12919)

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 一

近年以来,国内的地下顶管施工技术已有很大的发展,无论是长大顶管工程或是微型顶管均有长足的进步并在许多工程领域有了可喜的成功应用。

早自20世纪60年代起,在北京、上海和南京等地就已开始应用顶管法完成了城市道路、铁路、建(构)筑物和江堤之下的许多穿越式顶进施工,普及应用了钢筋混凝土管道和钢管。到了20世纪80年代后期,我国已能自行加工、生产顶管掘进机系列,随后的10余年中,还接连创造了多条超千米的长大顶管施工记录。

1997年,在上海穿越黄浦江的引水工程中,将3.5m直径的钢管单向独头顶进1743m,使我国在大直径、长距离的水下顶管技术方面创纪录地处于国际先进水平。

从2001年开始,由本书作者韩选江教授主持的顶管技术课题组结合南京市城北污水处理厂的大型地下管网顶进施工,积极开展了顶管工程的应用研究,经过两年多来的艰苦努力,探索并不断地在实践中改进与完善,终于实现了长约30km的多管径地下管网系列成功顶进和铺设任务。这在国内外顶管施工中是一个新的突破,可喜可贺!

我们认为,韩教授及其课题组能将其潜心研制的以“予力技术”作用原理为指导,将“予力”概念渗透到地下顶管的施工全过程中,用理论原理去提升顶管技术并指导施工实践,紧紧抓住施工关键,精心组织顶管施工并不断总结提高,很好地全面实现了这项环保型工程的安全顶进,取得了较好的技术经济效益。这种创新拼搏精神,值得继续发扬光大和业界社会鼓励。

《大型地下顶管施工技术原理及应用》是一本理论与实践结合得很好的技术专著,全书从概念和研究原理入手,全面论述了三大类型顶管工法的工艺特点、基本原理、机械性能、施工程序和方法以及技术要点等方面内容,并结合工程实例进行了全面细致的分析和阐述。无论对初学的青年技术人员,还是已掌握顶管技术并具有一定工程经验的专家们,都将能从本书中得到启迪和教益。

我们深信,本书的付梓问世,将对我国地下顶管施工技术的进一步发展和提高起到相当的推动作用,这是可以预期的。承作者的邀约,高兴地写了上面的一点文字。是为序。

孙 钧

2007年晴冬佳日
于同济园

孙钧先生,同济大学资深荣誉教授、博士生导师、中国科学院(技术科学部)院士。

序 二

地下顶管施工技术从根本上改变了开槽式埋设地下管道的落后方法,有效地保护了埋管沿线的地上地下设施和环境,是一种环保型的施工方法,这是贯彻可持续发展战略目标的一个重要手段。

韩选江教授主持的课题组紧密结合南京城北污水处理厂配套的收集污水的大型地下管网顶管工程开展应用研究,并取得可喜成果,实现了南京城北闹市区的安全顶进和环境保护目标。

我曾参加了韩教授负责的有关大型地下管网顶管施工技术的两项科研成果鉴定会,听取了他们课题组的全面汇报和答辩。鉴定委员会委员一致肯定了他们的成果。

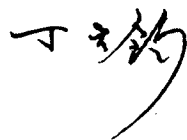
在南京城北 38.54km^2 复杂地质条件的软基上,从 $\phi 2200 \sim \phi 600\text{mm}$ 8 种不同管径有机组合叻接且顶进长度达 30 余千米长的地下顶管(包括新建和改造旧管网)。其中,有超千米曲线爬坡顶管和多次穿越内金川河的流砂地段及淤泥段,全部实现了安全顶进,实属相当不容易。

此外,该地下顶管在不少标段区域属于浅埋顶管(埋深 $H \leq 2.0D$ 管径)和超浅埋顶管(埋深 $H \leq 1.5D$ 管径)。同样在那些复杂的地层条件下顺利顶进并实现不同管径的成功叻接,也是一项施工奇迹。

20 多年来,韩教授和谢醒梅教授一起研究“予力结构技术”的理论方法和应用技巧。这是该技术理论在地下顶管工程中的又一成功运用和开花结果。在强调“创新精神”的当代社会,他们孜孜以求的探索毅力和苦干实干的拼搏精神,值得提倡和鼓励。

韩教授将他的丰富经验结合理论写成《大型地下顶管施工技术原理及应用》一书,从内容组合和展开的表现形式上都具有其特点和优点,是一本概念、原理和应用结合得较好的著作,可供从事土木工程和各类管道工程设计、施工、科研和管理工作的广大工程技术人员及高校师生学习参考。

东南大学教授



2007 年 12 月 18 日
于南京江宁校区

丁大钧教授,国内外著名工程结构专家、东南大学博士生导师。

前言

顶管施工技术是一种较好保护环境的敷设地下管线的非开挖技术。该技术对地层的适应性、对地上地下建筑设施的无干扰破坏、施工安全和施工质量可靠性及施工经济效益等方面,它都具有较大的优越性,并显现其无限生命力。

该技术在不扰动管外土层结构的条件下,利用顶进、挤压、充填、施加气压等多种予力手段的予力技术作用原理,自控自支护自平衡土压力,使顶进管壁与原地层紧密结合,并改变顶管沿线地下水的渗流方向和渗透作用,使顶管管线形成土体中的加筋体,与地层土体产生相互作用,从而也改善了沿线土体的变形性质,因此,可以说顶管施工又是一种现代化的敷设地下管线的施工方法。

本书编写力求做到技术的先进性,在内容的分列和展开上力求做到全面、系统和实用,将从应用研究的角度为顶管工程的设计和施工提供一些具有实用意义的理论探讨和应用借鉴成果,也期望收到抛砖引玉的效果。

1. 本书的酝酿成熟过程

作者在20世纪80年代,就开始接触到了顶管施工工程。1985年,北京成立城市建设发展工程研究中心,作者送过论文参加了学术讨论,并向他们建议在电、水、煤气管道和通信干线增容等增容主干线上采用现代非开挖埋管施工方法,尽量消除各单位片区增容时的挖挖填填等多次重复发生的破坏城市环境和交通人流的干扰拥挤现象。

2001年,南京城北污水处理厂经国务院批准开工建设。该工程配套的污水收集管网(及改造管网)建设工程,地处城北闹市区,为了保护地上地下建筑设施和三流(人流、车流和物流)畅通,特别不能中断长江大桥(南引桥)的南北大动脉的艰巨任务,因而选用了地下顶管施工敷设污水管网。这正是作者愿意深入工程开展研究工作的极好机会。

作者及时与中建八局工业设备安装公司领导及该污水处理厂工程项目部联系,立即得到他们公司领导和项目部的大力支持,一拍即合,他们也正需要有科研团队结合工程进展深入探讨帮助他们解决顶管中的技术难题,以确保安全顶进顺利施工。这样,双方合作签订协议并通过中建总公司第八工程局,申报了中国建筑工程总公司技术开发项目。另外,作者又通过南京工业大学在江苏省科技厅申报了另一项顶管科研课题。

随即,作者带领几名研究生和几名本科生深入该顶管工程施工现场,经过学习→认识→研究→应用→再学习→再认识→再研究→再应用的反复过程,与现场施工人员滚打摸爬在一起。经过2年多时间的艰苦努力,用理论研究探讨成果直接指导和提升施工技术,确保了这项由8种管径组成的约30km长的大型地下顶管工程顺利敷设完成。该两项成果分别于2004年3月30日和2004年6月29日通过了中国建筑工程总公司和江苏省科学技术厅组织的技术鉴定。

本书就是在这两项研究成果的基础上编写成的。它凝聚了众多人员的集体智慧和辛勤劳动,是现代予力顶管技术的概念、理论和应用并重的一本图书。

2. 施工技术的环境保护理念

传统的建设施工观念就是“先破坏，后建设”及“在建设破坏和在破坏中建设”。这种观念认为：挖挖填填和填填挖挖循环不断，似乎是建筑施工的正常现象。其实，这些都是错误理念。错就错在没有考虑到对人类自身生存环境的有效保护；更没有考虑到建筑施工污染对人体的严重危害。

2004年11月2~6日，作者出席了在我国上海召开的2004年世界工程师大会。这次大会是由世界工程师组织联合会（WFEO）和联合国教科文组织（UNESCO）发起召开的世界工程技术界的奥林匹克盛会。

大会的主题是工程师塑造可持续发展的未来（Engineers Shape the Sustainable Future）。这是从创新理念高度对工程技术发展的进一步推进和提速。

大会文件中强调：通过工程界和全社会公众的共同努力，人类在大自然的怀抱中建造了一个五彩缤纷、瑰丽多姿的人造世界。正是工程师们的工程活动在相当大的程度上改变了人类的命运和极大地改善了人类的生存发展条件。但是，也不能不看到由于认识不足，许多工程也曾给社会和人类自身带来负面影响，引起环境恶化和生态失调。如不及时更新观念，人类即将面临“温水煮青蛙”的厄运。

因此，在工程实践中不断探讨环保型施工方法以实现城市建设发展的可持续快速发展的战略目标。这是施工技术必须贯彻的环境保护新理念。本课题的深入探讨并指导应用实践，不仅做到了环保型施工，有效地保护了闹市区的繁荣景象，而且还消除了各种恶劣环境地质条件易造成的病理事故。特别保住了长江大桥南北大动脉的畅通，较好地实现了预期的目标。

3. 予力技术在顶管工程中的应用

顶管法施工依靠工具管对地层施加予力作用，先切削碎散土体甚至变成泥块泥浆排出，并以系列顶进管道占据土层空间；当机头顶进空间出现空隙时又及时注入膨润泥浆进行充填，确保顶管系列沿着顶进孔洞稳步前进，从而实现将一系列的管道敷设在既定路线的土层中。

“予力”（the given force）是人们为了改善结构体或岩土体的受力性状而主动对其施加的一种广义影响力（包括预应力、预应变、预位移和预变形等）。这种广义影响力的特征具有主动性、已知性、可控性和可调性。

因而，“予力作用”（action of the given force）就是实施该广义影响力的具体过程和环节。它在时间上、空间上、数量上及可调性方面，完全由人们在设计、施工和使用时，按照既定程序和方法进行有效地监测和调控。详细内容可参见作者书后参考文献中有关论文。

顶管法施工依靠工具管对土层施加正面顶推力，并通过掘进机头对土层施加挤压力，加上管壁与土层的摩阻力以及管壁注浆层的切向应力等，形成了一组平衡力系。它们破坏了地层的原始平衡状态，工具管的予力作用效应将不断造成地层损失的变形（也包括地表变位）；且在顶进的过程中又不断去建立新的动态平衡，以实现管道顺利向前顶进就位即完成系列管线的敷设到位。

顶进工具管机头从一开始作业，就对土体施加予力作用，就开始扰动土体使之产生变形碎化，最后还要排出大部分变形土体以留出敷设管道埋置空间并被其置换。同时，也将

使得顶进工具管机头的上部地层产生变形导致地表沉降甚至开裂。但工具管机头的予力作用又及时推进膨润土泥浆,去充填封堵顶管外壁空隙;又利用泥浆土的变形去密封该空隙,使敷设的系列管道与地层紧密结合,最终实现共同作用工作(以确保在管道内输送流体不渗漏)。

控制好“予力度”(degree of the given force)施加标准,也是确保其予力作用效应实施成功的关键。在顶管顶进的整个施工过程中,予力度的调控是以工具管的正面顶推力为主;它的恰到好处,顶进管道将稳步前进,较好地保持着顶管作用力系的动态平衡,直至完成管道敷设。

当顶进机头遇到了软硬不均土层的较大变化时,工具管的顶进马上就会出现“抬头”,或“磕头”,或“左右偏转”等病理情况,此时的予力作用将要控制好工具管机头的纠偏调直和定向前进。这时,在各个方向上的予力度控制又将成为予力作用实施的关键环节。当实施的顶进管道予力作用综合效应完成时,也就是顶进管道在地下敷设完成的圆满成功。

因此,将予力概念渗透到地下顶管工程施工全过程,应用好予力技术作用原理,调控好各个施工环节的“予力度”控制标准,将能确保顶进作业安全顺利施工,有效防止顶管病理事故发生。

4. 内容编排及完稿致谢

本书共有17章,其中前4章重点对顶管工程的基本概念、施工原理与特点,方法的优越性及局限性、国内外的技术发展动态、顶管法施工的重要机械设备、施工测量与导向技术以及常用管材及接口形式等内容做了全面介绍,使初读者对顶管工程施工技术建立一个较完整的崭新概念。

紧接第5~10章内容,将顶管施工对地层的扰动及变形特征、直线顶管和曲线顶管的顶推力、正面顶推力产生的力学效应、在顶进施工中对土体作用的三维有限元分析及超长距离顶管施工技术等方面进行深入探讨与分析,从机理上的理论高度来提升顶管施工技术,进而为各项管施工环节的“予力作用原理”和“予力度”控制标准提供理论依据。

从第11章开始至第15章,全面阐述顶管工程具体实施的施工工法分类特征,泥水加压平衡、土压平衡和气压平衡三种主要施工工法,以及顶管施工配套的工作井和接收井的设计、施工等详细内容,以方便读者进一步理解和应用时参考。

最后两章重点从施工实施方面介绍了顶管施工监测的内容和方法以及环保控制措施,并对一个大型地下管网顶管工程的有效实施方案的工程实录做了全面介绍,更方便读者应用时参考。

本书的书稿完成后,首先要特别感谢国内外的著名专家:同济大学资深荣誉教授、中国科学院的孙钧院士和东南大学的丁大钧资深荣誉教授,他们为本书写序,使本书蓬荜生辉,增色不少。

还要特别感谢中建八局工业设备安装公司罗能镇总经理、季景江副总经理、谢刚奎总工、谢文锡经理、刘宣进副经理、吴宗保、宋长贵等现场经理和项目部其他同志以及南京公用水务有限公司张旭处长等专业同仁的大力支持帮助。正是他们的大力支持为本课题的研究工作创造了许多有利条件。

还要特别感谢本校课题组的徐欣副教授、顾建平副教授、吴修锋、丁传松和赵宏华等

研究生以及几名本科生，他们的积极参与为课题的研究深入做了不少工作。特别是吴修锋和丁传松二位研究生，多次随我深入工地，并为本课题的深入探讨分析付出了极大的辛劳。

其次，对本书所引用的国内外文献的作者和出版社以及相关网站，也致以最诚挚的谢意。

再次，还要特别感谢顶管施工现场各标段的技术人员和工人师傅，正是有了他们大力支持和积极配合，才能克服一个又一个的艰难险阻，才取得了丰硕的研究应用成果，并顺利实现了预期的环保型顶管施工目标。

最后，还要感谢我的另几位研究生——王同华、孙晋川、赵翔、朱进军、王黎明、朱允伟和打印社的徐桂云和刘兵等同志以及中国建筑工业出版社的总编、责任编辑、责任校对、印装和发行等工作人员，同时也包括作者的夫人唐朝霞女士，没有他们付出的辛勤劳动，本书不可能在短时间内正式出版。

书稿已经付印，仍感到许多不尽人意的地方。限于个人的认识和理解水平，对某些技术问题仍阐述得不透，书中的缺点和错误也在所难免，敬请各位专家和同仁不吝赐教和批评指正。

南京工业大学 韩选江
2007年12月9日于南京虹桥校园

目 录

1 概述	1
1.1 管道工程与地下埋管技术	1
1.2 顶管施工的原理与特点	2
1.3 顶管施工方法分类	4
1.4 顶管施工技术的发展历程	6
1.4.1 早期的顶管施工技术	6
1.4.2 走向成熟的顶管施工技术	6
1.4.3 微型隧道技术的发展历史	8
1.4.4 顶管技术在中国的发展进程	9
1.5 顶管施工方法的优越性及局限性	10
1.6 顶管施工方法的应用与发展	13
1.6.1 地下穿越工程	13
1.6.2 地下管线敷设工程	13
1.6.3 地下管路铺设工程	14
1.6.4 地下管线在线改造工程	15
1.6.5 地下箱涵顶进施工技术	15
1.7 我国早期越江顶管施工实例	18
1.7.1 工程概况	18
1.7.2 场地的工程地质条件	19
1.7.3 顶管施工基本情况	19
1.7.4 穿墙顶进与纠偏控制	20
1.7.5 顶力控制与中继环应用	21
1.7.6 结语	21
2 顶管掘进机及主要配套设备	22
2.1 顶管掘进机及其分类	22
2.2 分步掘进式顶管机	24
2.2.1 引言	24
2.2.2 手掘式顶管机	24
2.2.3 机械挖掘式顶管机	26
2.2.4 气压平衡式顶管机 (SM-T3)	28
2.3 我国早期研制的 SFEC 顶管系统	29
2.3.1 管道系列	29

2.3.2	顶管机头——三段双铰型工具管	30
2.3.3	顶管配套设备	31
2.4	主顶设备	32
2.4.1	主顶油缸及附件	33
2.4.2	主顶油泵	34
2.4.3	控制阀	35
2.5	基坑导轨、顶铁和后靠板	35
2.5.1	基坑导轨	35
2.5.2	顶铁	36
2.5.3	后靠板	38
2.6	起重设备	38
2.7	注浆润滑设备	39
2.8	出土设备	39
2.8.1	简单出土设备	39
2.8.2	电瓶车运土	40
2.8.3	最先进的输土泵运土	40
3	顶管法施工测量与导向技术	42
3.1	引言	42
3.2	光学测量法	43
3.2.1	光学测量设备	43
3.2.2	激光与激光发射器	43
3.2.3	经纬仪	45
3.2.4	激光经纬仪	46
3.2.5	CCD 摄像机	47
3.3	陀螺测斜仪及应用	48
3.4	高程测量的液面水平法	48
3.5	顶进距离测量方法	49
3.6	测量导向系统及应用	50
3.6.1	长距离曲线顶管 SLS-RV 测量导向系统	50
3.6.2	电子激光系统 (ELS)	52
3.6.3	陀螺测量导向系统	53
3.7	顶进误差校正	54
3.7.1	引言	54
3.7.2	误差产生的原因	54
3.7.3	顶管误差校正方法	55
3.7.4	工具管的校正	56
3.7.5	抵抗力矩与校正力矩	57
4	顶管法常用管材及接口形式	60
4.1	顶管管材分类与选用原则	60

4.1.1	顶管管材分类	60
4.1.2	顶管管材选用原则	60
4.2	钢筋混凝土管及接口形式	61
4.2.1	引言	61
4.2.2	企口管的规格及接口形式	62
4.2.3	T形套环管接口形式	64
4.2.4	F形管接口形式	66
4.2.5	钢筋混凝土管道的选用	67
4.3	钢管及接口形式	69
4.3.1	钢管分类及制作要求	69
4.3.2	钢管能承受的最大顶推力	70
4.3.3	钢管接口形式	70
4.4	定长缠绕玻璃钢夹砂管及连接形式	71
4.4.1	引言	71
4.4.2	玻璃钢夹砂管道结构及技术参数	72
4.4.3	玻璃钢夹砂管的连接方式	73
4.4.4	玻璃钢管道与混凝土管道的对比	74
4.5	顶管法使用的其他管材	75
4.5.1	球墨铸铁管道	75
4.5.2	陶土管	76
4.5.3	塑料管 (PVC 管)	77
4.5.4	石棉水泥管	79
4.6	顶管管材的防腐措施	80
5	顶管施工对土体扰动及地层变形特征分析	82
5.1	顶管施工的予力作用效应	82
5.2	顶管施工引起地层移动研究	83
5.2.1	引言	83
5.2.2	经验估算公式	83
5.2.3	数值模拟	86
5.3	顶管施工引起土体扰动机理分析	87
5.3.1	引言	87
5.3.2	受扰动土体的分区	88
5.3.3	受扰动土体应力状态的变化	88
5.3.4	受扰动土体性质变化	89
5.3.5	受扰动土体的扰动范围	90
5.4	顶管施工引起的地层移动规律	91
5.4.1	引起地层移动的原因分析	91
5.4.2	地层移动的一般规律	92
5.5	小结	94

6 直线顶管施工的顶推力研究	95
6.1 国内外的顶力计算公式	95
6.1.1 目前顶力计算的理论公式	95
6.1.2 目前顶力计算的公式	96
6.1.3 顶力计算公式分析	97
6.2 顶管施工过程中影响顶推力的因素	97
6.2.1 顶管的受力分析	97
6.2.2 顶管施工中的顶力分析	99
6.3 顶力计算公式探讨	99
6.3.1 管道上的土压力	100
6.3.2 管顶土压力引起的正压力	101
6.3.3 管道侧向土压力引起的正压力	101
6.3.4 顶力计算公式	101
6.4 顶力计算数值模拟	102
6.4.1 工程概况	102
6.4.2 管道摩阻力和顶力的数值拟合	102
6.4.3 结论	104
6.5 小结	105
6.5.1 顶力的理论分析	105
6.5.2 本章小结	105
7 顶管正面顶推力产生的力学效应研究	107
7.1 引言	107
7.2 计算管段选择及场地条件	108
7.2.1 计算管段的选择	108
7.2.2 计算管段场地工程地质条件	110
7.3 计算模型与基本假定	110
7.4 明德林解与计算程序编制	111
7.4.1 明德林解积分公式	111
7.4.2 数值积分公式与计算程序编制	112
7.5 土体中附加应力与位移计算	114
7.5.1 顶进方向附加应力分布规律	114
7.5.2 侧向附加应力分布规律	116
7.5.3 土体位移的分布规律	116
7.6 小结	118
8 曲线顶管顶推力及管节轴向应力研究	120
8.1 曲线顶进施工方法	120
8.2 曲线顶管施工工法力学分析	122
8.2.1 楔形套环及楔形垫块法的力学分析	122
8.2.2 单元曲线顶管法的力学分析	125

8.2.3 两种施工方法的对比分析	126
8.3 曲线顶管的顶推力计算	126
8.3.1 顶管的荷载作用模式	126
8.3.2 顶管在顶进过程中受到的摩阻力计算	127
8.3.3 曲线顶管施工中顶推力的推导	129
8.4 算例分析	130
8.4.1 工程概况	130
8.4.2 参数确定与计算	131
8.4.3 计算结果分析	132
8.5 曲线顶管施工中管节轴向应力分析	133
8.5.1 断面核理论	133
8.5.2 管节中部的应力计算	134
8.5.3 管端接缝处的应力计算	135
8.5.4 管节轴向应力计算分析	137
8.6 曲线顶管施工对管节和土体影响数值模拟	138
8.6.1 引言	138
8.6.2 PLAXIS 有限元分析	138
8.6.3 工程概况	142
8.6.4 曲线顶管施工中的有限元模拟	142
8.6.5 有限元模型参数的确定	143
8.6.6 有限元计算	143
8.7 小结	147
9 顶管法施工对土体作用的三维有限元分析	148
9.1 引言	148
9.2 分析软件与本构模型	148
9.2.1 有限元分析软件 ANSYS 简介	148
9.2.2 土体本构关系的选择	149
9.3 荷载工况的数值模拟	151
9.3.1 正面推进力的模拟	151
9.3.2 地层损失的模拟	152
9.3.3 注浆层切向应力的模拟	152
9.3.4 单元类型选择	153
9.3.5 接触问题的处理方法	153
9.3.6 计算参数选取与网格划分	153
9.4 数值模拟结果分析	154
9.4.1 正面推进力的作用	154
9.4.2 地层损失的作用	157
9.4.3 注浆层切向应力的作用	158
9.5 共同作用及计算结果对比	159
9.6 小结	161

10 超长距离顶管施工技术	163
10.1 引言	163
10.2 触变泥浆减摩技术	164
10.2.1 基本要求	164
10.2.2 注浆材料及方法	164
10.2.3 切削刀盘位置注浆	165
10.2.4 非进入管道的注浆管注浆	166
10.2.5 进入管道的人工注浆	167
10.2.6 自动注浆	168
10.3 顶管施工的其他减阻措施	170
10.3.1 土层破碎和挤密相结合施工法	170
10.3.2 管套式顶管施工法	170
10.4 中继环的设计应用	172
10.4.1 基本原理	172
10.4.2 设计原则	173
10.4.3 中继环分类	174
10.4.4 中继环设计	175
10.5 超长距离顶管顶推力算例	176
10.6 长距离顶管内通风	177
10.7 超长距离顶管技术前景展望	178
11 地下顶管施工工法工艺选择与实施	181
11.1 顶进施工工法分类	181
11.2 顶管法施工的适用条件	184
11.3 不同土质条件对顶进工法的影响	184
11.3.1 无黏性土层	186
11.3.2 黏性土层	187
11.3.3 其他土层	190
11.4 城市地下管线工程勘察与管线探测	191
11.4.1 城市地下管线分类	191
11.4.2 城市地下管线场地分类	192
11.4.3 城市地下管线工程勘察	192
11.4.4 城市地下管线的探测	197
11.5 顶管施工工法设计内容	205
11.5.1 顶管工法设计内容	205
11.5.2 顶管工法设计要点	205
11.6 顶管施工工法实施要点	206
11.6.1 顶管机头选型	206
11.6.2 顶管施工流程图	207
11.6.3 顶管作业施工顺序	207

11.6.4	顶管作业技术要点	209
11.6.5	顶管作业有关规定	209
11.7	路基下控制地面变形的顶管措施	213
12	泥水加压平衡顶管施工工法	217
12.1	引言	217
12.1.1	基本概念	217
12.1.2	泥水加压平衡基本原理	217
12.1.3	不同土质条件的泥水平衡控制	218
12.1.4	泥水加压平衡工法的顶管系统	219
12.1.5	泥水加压平衡工法的优缺点	220
12.2	基本原理	220
12.2.1	单一式泥水加压平衡顶管原理	220
12.2.2	仅平衡地下水的泥水平衡顶管原理	222
12.3	顶管掘进机	222
12.3.1	具有浮动切削刀盘的泥水平衡顶管掘进机	222
12.3.2	具有破碎功能的泥水平衡顶管掘进机	225
12.3.3	气压式泥水平衡顶管掘进机	229
12.3.4	浓泥水平衡顶管掘进机	230
12.3.5	多边形偏心破碎式泥水平衡掘进机	233
12.4	泥水输送设备	234
12.4.1	进排泥泵	234
12.4.2	基坑旁通装置	235
12.4.3	泥水管路系统	236
12.5	施工方法	239
12.5.1	施工工法	239
12.5.2	泥水处理	242
12.5.3	泥水管理	244
12.5.4	施工要点	246
13	土压平衡顶管施工工法	247
13.1	引言	247
13.1.1	基本概念	247
13.1.2	土压式顶管机分类	247
13.1.3	土压式顶管系统	248
13.2	基本原理	249
13.2.1	土压平衡顶管施工新理念	249
13.2.2	控制土压力的范围	249
13.2.3	土压力的控制管理	250
13.2.4	土压平衡方法优缺点	251
13.3	顶管掘进机	251

13.3.1	多刀盘土压平衡顶管掘进机	251
13.3.2	DK 式土压平衡顶管掘进机	253
13.3.3	中心螺旋式顶管掘进机	256
13.3.4	切削密封土压式掘进机	256
13.3.5	土压平衡式顶管机的应用范围	258
13.4	施工方法	260
13.4.1	施工机械设备	260
13.4.2	工艺原理	260
13.4.3	施工工艺流程	260
13.4.4	施工实例	261
14	气压平衡顶管施工工法	262
14.1	引言	262
14.1.1	基本概念	262
14.1.2	气压施工的特殊要求	263
14.1.3	气压顶管施工的优缺点	264
14.2	全气压式顶管施工工法	264
14.2.1	工法原理	264
14.2.2	主要设备	265
14.2.3	全气压顶管施工操作	266
14.3	局部气压式顶管施工工法	268
14.3.1	局部气压施工概念	268
14.3.2	局部气压式半机械式顶管机	268
14.3.3	大刀盘切削的局部气压顶管掘进机	269
14.4	气压顶管施工	269
14.4.1	气压施工效果	269
14.4.2	压缩空气压力计算	269
14.4.3	压缩空气消耗量计算	270
14.4.4	工法应用范围	270
14.4.5	气崩的预防	271
15	顶管施工工作井与接收井设计与施工	272
15.1	引言	272
15.1.1	基本概念	272
15.1.2	工作井分类	272
15.1.3	顶管施工顶进形式	273
15.2	工作井布置及设计原则	273
15.2.1	工作井布置要求	273
15.2.2	工作井基本尺度要求	276
15.2.3	工作井设计原则	277
15.3	后座墙设置	278