

城市地下工程浅埋暗挖 地层预加固理论与实践

孔 恒 著

中国建筑工业出版社

城市地下工程浅埋暗挖地层预加固 理论与实践

孔 恒 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

城市地下工程浅埋暗挖地层预加固理论与实践/孔恒著.

北京: 中国建筑工业出版社, 2009

ISBN 978-7-112-10825-1

I. 城… II. 孔… III. 城市建设—地下工程—工程技术
IV. TU94

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 038876 号

针对浅埋暗挖地层预加固理论研究的薄弱, 本书进行了系统研究, 提出了系列新颖观点。内容主要包括: 隧道工作面开挖的地层响应规律、上覆地层结构模型、地层预加固机理、工作面稳定与失稳模式、地层预加固的力学行为、地层预加固结构的作用荷载模式、地层预加固参数的设计与选择等。本书在理论上及实践上均有创见, 值得广大从事隧道及地下工程专业的工作者参考。

* * *

责任编辑: 田启铭/责任设计: 赵明霞

责任校对: 兰曼利 关健

城市地下工程浅埋暗挖地层预加固理论与实践

孔 恒 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

北京华艺制版公司制版

北京市兴顺印刷厂印刷

*

开本: 850×1168 毫米 1/32 印张: 11 $\frac{3}{8}$ 字数: 305 千字

2009 年 4 月第一版 2009 年 4 月第一次印刷

印数: 1—3000 册 定价: 29.00 元

ISBN 978-7-112-10825-1

(18073)

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)

本书主要由北京市人事局等 7 委办局提供的“新世纪百千万人才工程” D 类经费资助出版，同时得益于中国科学院武汉岩土力学研究所博士后流动站、北京市政路桥控股、北京市政建设集团有限责任公司 在经费等方面提供的大力支持！

序 言

我很高兴地看到学生孔恒所著的《城市地下工程浅埋暗挖地层预加固理论与实践》即将付梓。对老师来说，这是他送给我的最好礼物！我乐于作此序言！

作者不论是在求学期间，还是在工作期间，都秉承着老老实实做人，踏踏实实做事的信念，为隧道及地下工程领域的进步与发展做出了自己的贡献。自2003年博士毕业至今的5年间，他积极投身于工程实践之中，严谨求是，开拓创新，获得北京市“科学技术奖”一、二、三等奖各1项，发明专利2项，发表了很多有见地的论文，2006年入选“新世纪百千万人才工程”北京市级人选。

作者不拘泥于理论，敢于实践和创新。作为北京市政地铁指挥部总工程师，他深入施工第一线，善于观察和总结。他以技术创新为先导，指导解决施工中所出现的问题。他总结提出的“基于层次分析法（AHP）的近接施工风险重要性等级评价和浅埋暗挖隧道施工地层变位的最优控制评价”结构模型、“地层变位分配与控制原理”、“零距离穿越既有结构概念与施工技术”、“砂卵石地层施工工艺”、“双排管超前预加固技术”、“前进式分段超前深孔注浆加固技术”、“非降水浅埋暗挖施工技术”、“大断面隧道多导坑施工断面扫描组合成型控制系统”、“导洞群施工效应控制与初支拆除力系转换控制技术”“主动与跟踪补偿注浆技术”等观点和技术，已在国内隧道及地下工程的设计和施工中推广应用。上述内容有的已在本书中反映，有的将待后续出版。

本书是作者在求学与工作等各个期间，针对浅埋暗挖地层预加固理论研究的薄弱，第一次进行了全面系统的研究和总结，丰富和发展了浅埋暗挖法体系，这令我甚感欣慰和自豪！

本书的鲜明特色是内容新颖、起步较高、理论和实践并重，反映了作者理论研究和实践的成果。我相信本书的出版必将对读者大有裨益，对浅埋暗挖法的推广应用以及理论研究将产生重要的推动作用！

借写序言之际，我愿用我的一段话与读者共勉：“历史的脚步往往是毫不留情的，会把千千万万人筑起的一座座里程碑抛在后头，使他们很快就变得朦胧不清；年轻一代的神圣职责，就是在新的跨越中竖立新的里程碑”！



中国工程院院士
全国人大代表
2009年1月

前 言

浅埋暗挖法自 20 世纪 80 年代末期，首次在北京地铁复兴门折返线创立以来，经过 20 多年工程实践的不断丰富和完善，以其灵活多变、不拆迁、不扰民、不影响交通、不破坏环境、隧道结构强度高以及非常适合中国国情等突出优点，在我国地下工程建设中扮演着重要角色，创造了巨大的经济和社会效益。伴随着国民经济的发展，我国地下工程建设步入了高潮时代，特别是城市地下工程建设更是如火如荼。囿于城市建设的特殊土工环境条件、地层的复杂多变性、隧道结构的适应性和经济性等特点，可以相信，在未来一个相当长时期内，浅埋暗挖施工技术仍将发挥其在城市地下工程建设中的不可替代作用。

不可讳言，由于浅埋暗挖法不似盾构法（闭胸式）为闭式（有压）工作面，而是开式（无压或裸露）工作面。因此一般来说，在第四纪软土中利用浅埋暗挖法修建城市隧道，为了保证隧道开挖工作面的稳定以及控制地表沉降，确保施工影响范围内环境土工建（构）筑物的安全，对地层采取预加固处理措施（辅助工法）是浅埋暗挖法不可缺少的重要一环。

伴随着工程实践，尽管开发应用了多种地层预加固手段和措施（辅助工法），但总的来说，相对其实践，地层预加固技术的理论研究明显滞后。正如 Peila 等（1996）所言：“对地层预加固的真实作用机理以及建立在科学根据上的简化设计理论和方法几乎还没有进行研究，因此要想达到让设计工程师最优化的选择并灵活应用预加固技术的目的还远远没有达到”。其结果是在工程实践中，不得不过分地依赖经验类比。为丰富和完善浅埋暗挖法施工技术，围绕这一命题，本书在广泛学习前人经验的基础上，全面而系统地对城市地下工程浅埋暗挖地层预加固机理进行

了深入分析和研究，并结合工程实践，对研究成果的具体应用进行了系统总结。

本书内容共分六章：第一章在对国内外大量文献资料学习和研究的基础上，论述了地层预加固研究现状及发展趋势，提出了存在的问题，明确了研究方向；第二章系统研究了浅埋暗挖隧道工作面在开挖通过观测主断面前、通过中、通过后地层的响应规律。揭示了隧道上覆地层的区域性及结构性特点。提出了隧道工作面上覆地层沿工作面推进方向可分三个区，即①超前变形影响区、②松弛变形区、③滞后变形稳定区；而沿地层垂直剖面又可分为五带，即Ⅰ弯曲下沉带、Ⅱ压密带、Ⅲ松弛带、Ⅳ工作面影响带、Ⅴ基底影响带；第三章建立了隧道上覆地层稳定的地层结构模型；提出了隧道工作面上覆地层结构失稳坍塌的椭球体概念，分析了工作面上覆地层结构失稳的演变形态及其内在作用机制；揭示了隧道工作面无支护空间范围是影响隧道上覆地层结构稳定与否的关键区域；提出了反映地层预加固作用机理的四个效应：即地层拱的稳定促成效应、梁拱效应、拉杆效应和挡土墙效应；第四章建立了隧道工作面超前预加固结构力学行为的工作面超前预加固结构力学模型；提出了基于塑性极限理论的工作面土体稳定性分析的上限解模型；揭示了工作面土体失稳的渐进破坏概念；第五章通过建立的一系列工作面地层预加固力学行为模型的数值解，以及有限元数值模拟的结果，对浅埋暗挖隧道工作面地层预加固参数的设计与选择进行了探索。论证了地层预加固参数的最佳值概念；给出了确定超前预加固结构作用荷载的半拱法、全拱法和全土柱法理论计算公式；提出了工作面地层预加固参数设计与选择的五个指导原则：系统性原则、机理性原则、非长时性原则、动态性原则和优先性原则；最后给出了一整套确定浅埋暗挖法隧道工作面地层预加固参数的动态设计方法；第六章结合一些典型工程如深圳地铁一期工程地层大变形施工、北京地铁5号线零距离穿越既有地铁车站施工、北京地铁4号线穿越桥梁施工以及北京热力隧道富水软塑性地层穿越危旧建筑物施工等

工程实例，详细介绍了本书的研究思想和成果在工程实践中的具体应用。

本书是根据笔者在北京交通大学攻读博士学位、在中国科学院武汉岩土力学研究所博士后流动站期间、在原北京市市政工程总公司以及在北京市政建设集团有限责任公司工作的各个时期内，反复酝酿，历经8年著成。第一次系统地、对浅埋暗挖法地层预加固理论进行了探索，并详尽地介绍了研究成果在工程中的具体应用。全书内容丰富，理论和实践并重，希望能成为研究浅埋暗挖隧道工作面稳定性以及地层预加固领域提供一本比较全面的研究生教材，也可供相关工程技术人员参考使用。同时希望读者读完本书能对浅埋暗挖法的实质、隧道工作面稳定性概念、地层预加固的作用机制以及地层预加固实践方面的能力有所提高。倘能如此，笔者甚感欣慰。

我的导师“浅埋暗挖法”的开拓者、中国工程院院士王梦恕教授把我领入隧道及地下工程领域，对我在该领域的成长与发展起了至关重要的作用。先生的开放式思维和对问题认识的理念，学生受益匪浅。特别是先生常常教诲我的“德字为先”，每每回味学生的成长，“德”字必将使学生终身受益。为本书，导师亲写序言，如果没有先生的指导与关怀，本书是不可能得以顺利成稿和出版。可以说这本书也融入了导师的心血，在此，笔者深深地感激导师无微不至的关怀和培养！

在中国科学院武汉岩土力学研究所博士后流动站工作期间，得到了全体所领导以及各位老师的指导，特别是郑宏研究员给予了精心指导，也得到研究生部曾静老师的大力支持，笔者借此机会，衷心感谢流动站期间各位老师和师兄弟所给予的热情关心和帮助！

在本书成稿期间，得到工作单位原北京市市政工程总公司（北京市政路桥控股）、北京市政建设集团有限责任公司各级领导和同仁的支持，特别是对白崇智顾问总工程师、张汎总工程师、焦永达副总工程师所给予的帮助表示感谢！

本书由北京市人事局等7委办局提供的“新世纪百千万人才工程”D类经费资助，能获此殊荣得益于各级领导的培养和支持，在此特别感谢许肖列副书记、吴培京副书记以及组织人事部各位领导及同仁们的帮助！感谢北京市政集团李军董事长、王健中总经理所给予的支持！

本书在写作过程中，还得到过张弥教授、崔玖江教授级高级工程师、贺长俊教授级高级工程师、刘维宁教授等老师的指导！同时感谢张顶立教授、谭忠盛教授、袁大军教授、黄明利教授、刘军教授级高级工程师、姚海波高级工程师、皇甫明高级工程师、王占生博士、张德华博士、张成平博士以及王磊老师等的帮助！特别还要感谢的是我的研究生邹彪硕士，他为本书的编辑和修改付出了辛勤劳动！

本书的工程实例部分，是作者对近几年所负责科研成果的部分总结，在工程应用中得到深圳地铁公司陈湘生总工程师、杨少林副总工程师、齐震明部长；北京地铁建设管理有限公司罗富荣副总经理；北京市政建设集团有限责任公司关龙总工程师、李国祥副总经理、郭嘉高级工程师、王全贤高级工程师、王文正高级工程师、周秀普高级工程师、张继明高级工程师、姚建国工程师以及中铁瑞威基础工程公司王卓高级工程师、彭峰高级工程师等的支持和帮助，在此表示衷心感谢！

本书写作中参考了大量的相关文献和专业书籍，谨向上述作者深表谢意！

由于作者水平有限，对书中疏漏和不足之处，敬请读者严加斧正，不吝赐教为盼！

作者

2009年1月

目 录

序言

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 浅埋暗挖法概述	1
1.2 地层预加固技术概述	3
1.2.1 地层预加固技术的概念	3
1.2.2 地层预加固技术分类概述	4
1.3 国内外地层预加固技术研究现状	12
1.3.1 浅埋隧道开挖的稳定性研究	12
1.3.2 预加固的作用机理及加固效果研究	21
1.3.3 预加固参数的设计理论研究	31
1.4 研究存在的问题及研究方向的提出	32
1.4.1 隧道开挖的地层响应规律	33
1.4.2 地层预加固的作用机理	34
1.4.3 地层预加固的力学行为	35
1.4.4 地层预加固的参数设计	36
1.5 本书研究的主要内容与方法	36
1.5.1 研究的主要内容	36
1.5.2 研究的主要方法、技术路线和手段	39
参考文献	40
第 2 章 城市地下工程浅埋暗挖隧道工作面开挖的地层 响应	53
2.1 引言	53
2.2 工程概况	54
2.2.1 6 标段工程概况	54

2.2.2	3A 标段工程概况	55
2.3	现场测试研究内容与测点布置	56
2.3.1	地层变位测试	57
2.3.2	围岩应力测试	59
2.4	工作面开挖的地层变位规律	62
2.4.1	地层垂直位移的变化	62
2.4.2	地层水平位移的变化	69
2.4.3	地层变位规律的认识	71
2.5	工作面开挖的围岩应力变化规律	75
2.5.1	围岩径向接触应力	75
2.5.2	孔隙水压力分布	77
2.5.3	初期支护格栅钢架结构内力	78
2.5.4	超前支护体应力	79
2.5.5	拱脚与土体的接触应力	80
2.6	浅埋隧道工作面地层的分区(带)及认识	81
2.6.1	工作面周围地层应力重分布及地层移动的区 域性	81
2.6.2	隧道工作面地层分区(带)的认识	85
2.7	本章小结	88
	参考文献	90
第3章	浅埋暗挖隧道工作面地层预加固作用机理	94
3.1	引言	94
3.2	工作面上覆地层结构的概念	95
3.2.1	工作面上覆地层的拱效应	95
3.2.2	工作面上覆地层结构的相互关系	100
3.3	隧道工作面上覆地层结构的稳定性分析	101
3.3.1	上覆地层结构模型的建立	101
3.3.2	上覆地层结构模型的力学分析	103
3.3.3	上覆地层结构的平衡条件	107
3.3.4	上覆地层结构模型的几点认识	107

3.4	隧道工作面上覆地层结构的失稳坍落模式	109
3.4.1	上覆地层结构失稳的椭球体概念	109
3.4.2	隧道工作面上覆地层结构失稳坍落的椭球体 模型	110
3.4.3	椭球体模型的几点认识	121
3.5	地层预加固小结构的作用机理认识	123
3.5.1	地层预加固系统的串并联模型	123
3.5.2	地层预加固小结构的作用效应	126
3.6	本章小结	132
	参考文献	133
第4章	浅埋暗挖隧道工作面地层预加固的力学行为	139
4.1	引言	139
4.2	隧道工作面地层预加固的布置形式与 力学特征	140
4.2.1	地层预加固的布置形式	140
4.2.2	地层预加固的力学行为特征	142
4.3	工作面超前预加固结构的力学行为	142
4.3.1	超前预加固结构力学模型的建立	142
4.3.2	超前小导管预加固结构的力学分析	149
4.3.3	超前预加固结构力学模型的比较与验证	154
4.4	工作面正面土体稳定的塑性极限分析	157
4.4.1	塑性极限分析的基本理论	157
4.4.2	工作面正面土体稳定性分析的上限解	160
4.5	工作面正面土体预加固的力学行为	180
4.5.1	工作面正面土体预加固的上限解	180
4.5.2	工作面正面土体预加固上限解的分析	183
4.6	本章小结	188
	参考文献	189
第5章	地层预加固参数的设计与选择	193
5.1	引言	193

5.2	工作面拱部超前预加固参数分析	194
5.2.1	超前支护钢管(注浆管体)直径	194
5.2.2	超前支护的钢管长度	202
5.2.3	超前支护体的间排距	204
5.2.4	超前支护体的布置形式	206
5.3	工作面正面土体预加固参数分析	207
5.3.1	工作面核心土参数的有限元分析	207
5.3.2	工作面正面预支护参数分析	217
5.4	工作面超前预加固结构作用荷载的确定	220
5.4.1	土质隧道围岩压力的确定方法概述	220
5.4.2	超前预加固结构作用荷载的确定方法	223
5.5	工作面上覆地层结构稳定性的判别	227
5.6	地层预加固参数的设计与选择	228
5.6.1	工作面地层预加固参数的设计与选择原则	228
5.6.2	工作面地层预加固参数的设计方法	229
5.7	本章小结	234
	参考文献	235
第6章	工程应用实例	238
6.1	引言	238
6.2	工程实例1——复杂条件下地层大变形隧道 施工	238
6.2.1	深圳地铁一期工程全线浅埋暗挖法标段基本 概况	239
6.2.2	重点研究标段的地质概况	242
6.2.3	实测的浅埋暗挖隧道工作面的应力与变形的 一般分析	242
6.2.4	地层预加固的原始设计参数及存在的问题	248
6.2.5	地层预加固参数的动态设计及应用	253
6.2.6	地层预加固的现场实施及效果监测	263
6.2.7	本节小结	270

6.3	工程实例 2——地铁区间隧道零距离下穿既有 地铁车站施工	271
6.3.1	工程概况	271
6.3.2	地层预加固的原始设计参数及存在的问题	274
6.3.3	地层预加固参数的动态设计及应用	276
6.3.4	工程实施与效果监测	288
6.3.5	本节小结	292
6.4	工程实例 3——砂卵石地层地铁区间隧道下穿 道路桥梁施工	292
6.4.1	工程概况	292
6.4.2	地层预加固的原始设计参数及存在的问题	295
6.4.3	地层预加固参数的动态设计及应用	296
6.4.4	工程实施与效果监测	315
6.4.5	本节小结	322
6.5	工程实例 4——富水软塑性地层热力隧道下穿 危旧房屋施工	323
6.5.1	工程概况	323
6.5.2	地层预加固的原始设计参数及存在的问题	327
6.5.3	地层预加固参数的动态设计与应用	328
6.5.4	工程实施与效果监测	336
6.5.5	本节小结	348

第 1 章 绪 论

1.1 浅埋暗挖法概述

21 世纪城市地下工程建设的高峰时代已经到来。伴随着我国综合国力的提高,许多大城市将跻身于国际大都市,其城市现代化建设正在提速,最能反映这一特征的是,为缓解日益增加的交通压力而大规模进行的城市地铁建设。就目前,我国地铁在建或已通车运营的城市有北京、上海、广州、深圳、南京、天津、杭州、成都、苏州、沈阳、西安、青岛等,而处在招投标或已获批准建设的城市有重庆、哈尔滨、无锡、佛山、郑州等。另一方面,表征城市基础设施现代化水平的地下各类市政管廊也在大规模地开发建设。而囿于经济性、地层的复杂多变以及特殊的环境条件,近年来,在城市基础设施建设中一直扮演重要角色的浅埋暗挖技术,以其对地层有较强适应性和高度灵活性等特点,必将在未来一个相当长时期内,得到不断丰富和完善,愈来愈彰显其在城市地下工程建设中的重要地位。

浅埋暗挖技术始于 20 世纪 80 年代中期,大秦线军都山铁路隧道双线进口黄土试验段成功之后,首次于 1986 年 5 月至 1987 年 5 月,在北京地铁复兴门折返线工程中应用并获得成功。1987 年 8 月,北京市科委和铁道部科技司共同组织了浅埋暗挖技术成果鉴定会,经充分讨论取名为“浅埋暗挖法”^[1]。这个名称定义准确,既反映了该技术方法的特点,又明确了其普适意义——适用于各种软弱地层的地下工程设计与施工。之后,以北京地铁工程为背景总结形成的“隧道与地铁浅埋暗挖工法”也被批准为国家级工法。

浅埋暗挖法的实质是针对软弱地层的特点，继承和发展了岩石隧道新奥法（NATM）的基本原理，突出了地层改良、时空效应和快速施工等理念。其方法的实质内涵可用 18 字原则来阐明，即：“管超前”、“严注浆”、“短开挖”、“强支护”、“快封闭”和“勤量测”。其与明挖法、盾构法相比较，由于它避免了明挖法对地表的干扰性，而又较盾构法具有对地层较强的适应性和高度灵活性，因此浅埋暗挖法广泛应用于世界各国的城市地下工程建设。

目前，浅埋暗挖法已在城市地铁、市政地下管网及地下空间的其他浅埋地下结构物的工程设计与施工中得到广泛应用。该方法多应用于第四纪软弱地层，一般对地铁区间或小跨度隧道，常用的基本开挖方法有正台阶法、上半断面临时仰拱正台阶法、中隔壁法（也称 CD 法和 CRD 法）、双侧壁导洞法（眼镜工法）。而对地铁车站、地下停车场等大跨度联拱结构的基本施工方法有中洞法、侧洞法和洞桩法（PBA 法）。

浅埋暗挖法具有灵活多变，对地面建筑、道路和地下管网影响不大，拆迁占地少，不扰民，不污染城市环境等优点，是目前较先进的施工方法。但其存在的缺点是速度较慢，喷射混凝土粉尘较多，劳动强度大，机械化程度不高，以及高水位地层结构防水比较困难等。

相对而言，应用浅埋暗挖法具代表性，且占较大比重的国家有中国、英国、法国、德国、韩国、巴西等^{[2]~[7]}。日本、美国自进入 20 世纪 90 年代后，除在少数地层条件下应用浅埋暗挖法外，大部分都采用盾构法^{[8][9]}。但在 20 世纪 90 年代以前，日本则大量使用浅埋暗挖法^[2]。

值得强调的是，近十余年来，随着大量的工程实践和理论研究，浅埋暗挖技术方法不断完善，应用范围进一步扩大，由原来只适用于第四纪地层、无水、无地面建筑物等简单条件，拓展到非第四纪地层、超浅埋、大跨度、上软下硬、高水位等复杂地层和环境条件下的地下工程。尤其是信息科学技术在浅埋暗挖技术中的应用，实现了工程的全过程监控，有效地减小了由于地层损