

国家自然科学基金重点项目

深厚表土人工冻结法凿井基础研究 (50534040)

复杂条件下钻井技术基础研究 (50234030)

联合资助出版



深厚表土特殊凿井 与地下工程

若干问题研究

主 编 周国庆 杨维好 刘志强

煤炭工业出版社

国家自然科学基金重点项目

深厚表土人工冻结法凿井基础研究(50534040)

复杂条件下钻井技术基础研究(50234030)

联合资助出版

深厚表土特殊凿井与地下工程 若干问题研究

主 编 周国庆 杨维好 刘志强

煤炭工业出版社

·北 京·

图书在版编目(CIP)数据

深厚表土特殊凿井与地下工程若干问题研究/周国庆,杨维好,
刘志强主编. —北京:煤炭工业出版社,2006

ISBN 7-5020-2873-0

I. 深... II. ①周... ②杨... ③刘... III. ①特殊凿井法
②煤矿开采—地下工程 IV. ①TD265 ②TD82

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 032784 号

煤炭工业出版社 出版
(北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)

网址: www.cciph.com.cn

北京京科印刷有限公司 印刷

新华书店北京发行所 发行

*

开本 787mm×1092mm¹/₁₆ 印张 10

字数 243 千字 印数 1—1,000

2006 年 4 月第 1 版 2006 年 4 月第 1 次印刷

社内编号 5660 定价 28.00 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,本社负责调换

**谨以此书祝贺矿山建设特殊凿井
著名专家崔广心教授七十寿辰**

前 言

人工地层冻结法和钻井法是深厚表土立井井筒建设的主要施工方法。以人工地层冻结法和钻井法为主要代表的特殊凿井、深部地下工程理论与技术的研究,是中国矿业大学岩土工程(原矿山建设工程)国家级重点学科的优势和特色之一。

从20世纪50年代浅表土人工地层冻结凿井方法的引进、消化和应用,到60~70年代极硬岩大直径深井钻机的研制和成功应用,到80年代300 m深厚表土“两壁”(冻结壁、井壁)课题的攻关研究,到80~90年代大规模立井井壁破裂机理以及治理技术的研究与应用,再到21世纪初400~700 m乃至更深的厚表土冻结凿井、钻井理论和技术的发展和创新;从20世纪60年代的冻结法凿井讲义的撰写,到80年代国内第一部特殊凿井教材的出版,到90年代深厚表土冻结壁与井壁专著的问世;从20世纪60年代特殊凿井教研室(组)的创建,到80年代中期井壁与冻结壁研究组的诞生,再到今天岩土工程研究所、岩石力学与土力学研究所的发展;从国内第一套大型物理模拟试验系统的建立,到率先创立井壁“竖直附加力”理论,到具有自主知识产权的地层注浆加固技术、可缩井壁结构、井壁应力应变实测方法,再到深土力学、深土冻土力学、地下工程结构力学等新型学科体系的构想和内涵的不断充实……这一切,记录了我国特殊凿井和深部地下工程理论与技术的创立、发展、提高、创新,见证了老一代矿山建设专家奠基、创业与新一代岩土青年学者传承、发展的历史过程。

本书的编者以及论文作者共同的导师,我国矿山建设工程界著名专家、矿山建设工程国家级重点学科带头人崔广心教授无疑是这一发展历程中的领军人。崔广心教授自1958年毕业于北京矿业学院并留校任教48年来,先后讲授本科生、研究生课程8门共20余门次,开设讲座200多场,培养硕士、博士研究生20余人。崔广心教授主持完成国家自然科学基金、煤炭工业部、国防科工委等重大科研项目30余项,获国家科技进步二等奖2项,获省部级科技进步特等级1项、一等奖2项、二等奖2项、三等奖2项,发表学术论文60余篇,编著教材、专著5部。曾任中国矿业大学教务处处长、科研处处长、建筑工程学院教授委员会主任委员,现兼任中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冻土工程国家重点实验室学术委员会委员,《煤炭学报》杂志编委,国家科技进步奖“国土资源与环境”学科评委等职。获全国优秀教师、孙越崎能源大奖、江苏省劳动模范、江苏省优秀知识分子、江苏省优秀学科带头人等荣誉称号和奖励。

光阴荏苒,岁月如歌。深厚表土特殊凿井与深部地下工程理论与技术的发展历程记载了崔广心老师48年的奋斗与辉煌,伴随了老师半世纪的光荣与梦想。今天,老师桃李天下,他们中大多已成为矿山建设、岩土工程、深部地下工程研究领域的学科带头人和青年专家。他们精心撰写了这些论文作品,以此祝贺崔老师的七十寿辰,祝崔老师健康长寿!愿未来矿建人、岩土人做得更好,无愧于老师,无愧于时代!

感谢国家自然科学基金重点项目:“深厚表土人工冻结法凿井基础研究”(50534040)、“复杂条件下钻井技术基础研究”(50234030)对本书出版的资助。

周国庆 杨维好 刘志强
2006年4月于徐州

目 录

1. 我国深厚表土层中特殊凿井的回顾与思考	崔广心(1)
2. 手掘式顶管的自摩擦增阻前行	卢清国(10)
3. 冲积层疏排水与注浆过程中井壁应变实测研究	杨维好,李峰,王宗胜(14)
4. 外壁恒温条件下单管冻结温度场研究	杨维好,杨爱东,杨志江(20)
5. 基于砂层回注水的井壁附加应变演变模型试验	周国庆,徐江(30)
6. 升温背景下高温冻土—旱桥桩基体系温度场演变分析	周国庆,李生生,王建州(37)
7. 深层粘土高压卸载特性试验研究	马金荣,崔广心(49)
8. 深厚冲积层中井壁破裂机理与结构形式研究	吕恒林,蒋其刚,朱军等(53)
9. 深厚表土层冻结壁融沉附加力变化规律的试验研究	付厚利(59)
10. 利用高频电磁波同时进行介电常数和电阻率层析成像研究	黄家会(67)
11. 深厚冲积层中冻结井外壁温度场的数值模拟方法	王衍森,宋雷,任彦龙(71)
12. 某深基坑支护中冻土墙力学特性的数值模拟研究	东兆星,崔广心(80)
13. 深厚冲积层中冻结壁厚度计算综述	王文顺(86)
14. 环境岩土工程在煤矿塌陷区治理中的应用	于广云(92)
15. 寒区铁路路基温度场分布特征的数值模拟研究	刘志强,段全江(101)
16. 广州地铁盾构法过江施工技术研究	刘联伟,赵资钦,陈坚等(110)
17. 不同边界温度下控制人工冻土冻胀的试验研究	周金生,周国庆,商翔宇(118)
18. 地层注浆防治井壁破裂的信息化监测及控制研究	赵光思,周国庆,刘志强(124)
19. 高温冻土冻融状态下桩基承载性能试验分析	李生生,周国庆,别小勇(129)
20. 冻土冻胀机理研究中几个问题的探讨	周扬,周国庆(135)
21. 竖向荷载作用下混凝土井壁破坏时应变分析	吕晓亮,周国庆,梁化强(140)
22. 深地下连续墙墙体应力分析与设计优化	张琦,周国庆(145)

我国深厚表土层中特殊凿井的回顾与思考

崔广心

(中国矿业大学建筑工程学院,江苏 徐州 221008)

摘 要:本文对新中国成立以来在表土层中特殊凿井法的工程应用进行了回顾,特别对冻结法和钻井法的技术引进与诞生、推广和发展遇到的问题及研究进展进行了分析。在深厚表土层中冻结法的冻结壁和井壁问题的研究探讨中,基于对深表土特性与浅土的区别,以及由此而引发的工程力学、热学等不同现象研究,提出了深土力学、深土冻土力学和地下工程力学的概念,研究目标,学术特点,基本内容框架。为深土中冻结法凿井冻结壁、井壁问题和大直径的井筒井壁问题的研究与技术研发,以及表土中大型地下工程的应用和技术开发提供理论和技术参考。

关键词:厚表土层;冻结法凿井;钻井法凿井;冻结壁;井壁;深土力学;深土冻土力学;深土地下结构力学

作 者:崔广心,男,教授,博士生导师,主要从事矿山特殊凿井工程和地下岩土工程方面的科学研究工作。

1 概述

我国华东、华北、华中、东北地区的煤田,大多上覆有厚表土层,在这些矿区建设矿井首先遇到的就是在表土层中建设井筒的问题。新中国成立以来,为恢复和发展国民经济,作为能源的煤炭工业首当其冲,在覆盖有浅表土的矿区均已恢复和新建后,人们就不得不到覆盖有深厚表土层的煤田建设矿井,在这种地质条件下,就只能用特殊凿井法(也称“特殊施工法”)。

特殊凿井指的是:在松散的不稳定的含水层(即表土层);或稳定但涌水量很大的裂隙岩层或破碎带中,预先采用某种特殊的技术措施或科学方法,改善施工的客观条件后再行施工;或用机械破岩法钻进井筒或巷道。这些施工技术和方法统称为特殊凿井,或特殊施工法。

1950年,鹤岗兴安台矿使用板桩法辅以超前小井降低水位^[1]。板桩法施工简单、成本低,但可靠性差。随着工程中表土层加深,逐步为沉井法所取代。1952年,在新汶孔村矿区注砂井使用沉井法下沉10.4 m成功之后,用普通沉井法施工了40多个井筒,最大下沉深度34.0 m。1958年,在淮北烈山矿风井首创震动沉井法成功,之后用该法施工了22个井筒,成功11个,最大成井直径4.75 m,最大下沉深度41.3 m。为防止沉井中涌砂冒泥,在井筒中充满水或泥浆用以平衡水压。1976年,在济宁蔡园煤矿副井下沉深度突破百米。1981年,在山东单家村矿下沉深度达192.75 m。但随着表土深度增加,沉井偏斜难以控制,下沉

速度慢、工期长,使用有局限性。我国用各种沉井法施工井筒约 140 余个^[1]。

1956 年,在阜新海州露天矿,使用掩护筒法(即“盾构法”)开凿 $\phi 2.66$ m、全长 4 141 m 的疏水巷道。之后,在沈北、淮北、大屯等矿区将其应用于立井建设。当掩护筒推进到较大深度时,漏水、涌水带砂事故频发,而被迫停止。但这个方法在浅部土层中进行地下铁道工程、越江隧道工程建设中得到广泛应用。目前,盾构法在技术水平和设备能力上已有很大的发展及提高。

1956 年,在开滦矿区林西风井引进冻结法凿井成功之后,在开滦矿区、河北、山东、安徽、河南等矿区广为采用,至今已用冻结法建设井筒 500 余个,最大成井直径 $\phi 8.0$ m,通过表土层厚达 570 m,现正向 700 m 深表土层凿井努力。

1969 年,在淮北矿区朔里南风井,大直径钻井工业试验成功,至今已用钻井法建设 50 余个煤矿井筒,钻进直径达 $\phi 9.3$ m(世界之最)。近期研制了可钻进直径 $\phi 12$ m 的钻井机。

半个多世纪的经验表明,当表土层厚度超过 150 m 时,在表土层中建设井筒只有冻结法和钻井法是可行、可靠的凿井方法;当表土层厚超过 300 m,设计井筒净直径为 $\phi 6.5$ m 或更大时,以现有设备和技术条件,冻结法就成为唯一可行的施工方法了。

2 回顾

2.1 冻结法凿井

自 1956 年我国开始使用冻结法凿井以来,对冻结法凿井的认识经历了三个阶段^{[2][3]}。

2.1.1 第一阶段是自引用时起至 20 世纪 70 年代初

其特点是引用、学习、摸索。这一阶段冻结法凿井多用在浅表土层中(表土深度不超过 250 m)。

(1) 对冻结壁的认识。

基本上是弹性的、小变形的、均质的人工的圆筒结构物,与均质混凝土相似,设计方法与井壁近似,只承受水平地压,自重由地层承载,引用岩石中井壁的设计原则,仅在施工后有一个自然解冻融化过程。冻结壁厚度计算方法以厚壁筒应力公式,应用第一(以后用第三或第四)强度理论而得到拉麦(G. Lame)公式,求算冻结壁厚度 E 。

$$E = a \left(\sqrt{\frac{[\sigma]}{[\sigma] - KP} - 1} \right) \quad (1)$$

式中 a ——井筒掘进半径;

$[\sigma]$ ——冻土单轴许用抗压强度;

P ——水平地压;

K ——系数,用第一强度理论 $K=2$,用第三强度理论 $K=\sqrt{2}$ 。

当表土层深度超过 150 m 时,用(1)式求出冻结壁厚度很大,甚至无解,故采用将冻结壁视为弹塑性体的多姆克(O. Domhe)公式。

$$E = b - a = a \left[0.29 \left(\frac{P}{\sigma} \right) + 2.3 \left(\frac{P}{\sigma} \right)^2 \right] \quad (2)$$

式中 b ——冻结壁外半径;

a ——冻结壁内半径;

σ ——冻土抗压极限强度。

工程技术人员为保障冻结壁安全,常用冻土许用抗压强度 $[\sigma]$ 取代 σ ,值得指出的是,冻土抗压强度的取值多与实际相差较大。式(2)对于冻结深度 350 m 以内的冻结壁厚度设计可以应用。

1960 年,在范各庄风井(表土深 87.81 m)采用掘进段高 78.2 m,同年在荆各庄副井(表土深 152.2 m)创掘进段高 85.8 m 的最高纪录值,都是基于对冻土壁是“弹性的岩石”的认识,虽未发生事故,但有很大冒险性。直到邢台矿井(表土深 248 m)建设时,发现并开始认识到了冻结壁蠕变变形。

(2) 对冻结法凿井井壁的认识。

矿山对井壁的要求是:有足够的强度和不漏水(冻结法凿井井壁,井筒段漏水量不得大于 $0.5 \text{ m}^3/\text{h}$)。第一阶段井壁强度无大问题,主要是渗漏水。开滦矿区范各庄矿主井为解决井筒淋水问题,在井壁内套筑 200 mm 厚混凝土井壁,取得减少淋水的较好效果。从河北邢台矿主井在井壁设计时就采用了双层井壁结构。其主导思想是:内、外层井壁共同承受水平地压。内层井壁自下而上一次连续砌筑,可以密实防水。实践结果并不尽如人意,且随着表土深度的增加,井壁裂缝漏水问题逐渐严重,以至在淮北矿区临涣矿主井,再套一次井壁,形成三层井壁的复合井壁。

(3) 关于冻结孔钻进问题。

在冻结孔钻进施工中,由于钻机能力和水平所限,冻结孔垂直度难以满足要求,随表土深度增加,冻结深度加大,以至偏斜率更难以控制。

这一阶段从工程中反映出冻结法凿井的冻结壁问题、井壁问题和钻垂直度合乎要求的冻结孔三个问题,简称“二壁一钻”问题。

2.1.2 第二阶段从 20 世纪 70 年代初至 80 年代,即由表土层厚 250 m 发展到 400 m 的阶段

其特点是把浅部表土层冻结法凿井的理论和经验直接运用到深厚表土层中,各种事故频发。科技工作者开始认识到冻结法在浅部表土层与深部表土层的区别,认识到只凭从国外学习的冻土力学理论和浅部土的冻结凿井经验已不能顺利完成深厚表土中凿井任务,因而开始着手进行针对我国地质条件的关于深厚表土中冻结法凿井的实验室研究。

(1) 对冻结壁的认识。

20 世纪 70 年代初,淮南、淮北、兖州、大屯、徐州和平顶山等矿区进行了大规模开发。这些矿区多为深厚表土层。表土层厚度大、水平地压大,按原有理论计算冻结壁厚度在 6~12 m,甚至更大,人们主观愿望想缩短工期、节省电能,而要减少冻结壁厚度。为在理论上寻找依据或采用第四强度理论,或加大冻土强度值,以至引用前苏联学者维亚洛夫(С.С.Вялов)^[4]教授和所列茨基(Ю.К.Зарецкий)教授把冻土视为理想塑性体,应用第四强度理论,按掘进段高上下两端固定的力学模型推导了冻结壁厚度计算公式。

当上端固定、下端未冻实时:

$$E = \sqrt{3} \frac{Ph_d}{\sigma_c} \quad (3)$$

当段高内上、下两端均固定时:

$$E = \frac{\sqrt{3}Ph_d}{2\sigma_t} \quad (4)$$

式中 P ——计算位置的水平地压;

h_d ——掘进段高;

σ_t ——荷载作用时间 τ 时的冻土极限强度。

这一阶段,以淮南矿区为代表发生多次因冻结壁蠕变,而将已砌筑的外层井壁在施工中压溃的现象(有时连同金属模板同时压溃),多次发生冻结管断裂,并造成冻结壁“开窗”,甚至发生了淹井事故(淮南矿区谢桥矿)。这期间各矿区开展了大规模的工程实测研究。工程实践和实测研究启发并教育了科技工作者:经不住实践考验的理论,不能主观应用于工程,要开展深入的实测和实验室试验研究,认识新事物,建立新理论,以服务于工程需要。

(2) 对井壁的认识。

这期间对冻结凿井井壁漏水机理认识上有一次飞跃^[3]。在实测井壁受力研究中,发现内层井壁受施工过程温度变化影响而产生温度应力,使井壁产生裂纹。解冻后,出现漏水现象。研究学习国外经验,试验在内、外层井壁间加塑料隔层,消除两者间约束,使内、外层井壁间可以有少量滑动,从而消除了温度应力,保证了内壁无裂纹裂缝,达到了防治漏渗水的目的。这一认识上的飞跃,对解决井壁漏水起了关键作用。在此基础上,为提高井壁承载能力,开发了高强混凝土,以及适用于不同环境和受力状况的多种复合结构的井壁,并取得了很好的应用效果。至此可以说:人们关于冻结对井壁的影响,其认识已从影响混凝土凝固阶段的强度增长,提升到了对冻结法施工全过程的考虑,特别是对温度应力和冻结压力的认识。

这一阶段对钻冻结孔的设备技术和监测技术都有长足进展,引用、吸收消化了国外定向钻进技术,使冻结孔的施工在钻进 800 m 深孔时偏斜值在 1 500 mm 以内,基本解决了钻深冻结孔技术。

2.1.3 第三阶段始于 20 世纪 80 年代^[5]

它在第二阶段取得新认识的基础上开展了对深部表土层冻土和由深土冻土构成的冻结壁进行实测和实验室研究。实测数据是第一手的宝贵资料,它是实验研究和理论研究的基础。也有以数值模拟为手段进行研究的,其结果用实测研究成果进行修正,也有以物理模拟为手段进行研究的并取得了一定的进展。

总之,独立自主地开展深厚表土中冻结壁的研究工作开始了,其技术路线不同,可能是相辅相成的,能否取得突破性进展取决于对深厚表土中冻结壁环境和受力的创新认识,符合深表土冻结壁工作环境和条件的研究路线是取得开创性成果的关键。

这一阶段对井壁的认识获得又一次飞跃:正当科技工作者对冻结井壁结构进行研究的时候,1987 年 6 月开始在淮北、大屯、徐州等矿区,先后有 20 余个在厚表土层中的井筒井壁发生破裂。破裂位置多处于表土与基岩交界处附近,裂隙或破裂带呈横向环状,井筒罐道、管道呈“S”形扭曲,罐梁向上弯曲,破裂处漏水,有时水带砂,地质条件多是表土层最下含水层直接覆盖在煤系地层或有明显水力联系。这一突发灾害,给安全和生产带来严重危害。其来势之猛、范围之广、危害之大为煤炭行业所未有,国际采矿史所罕见。对这一灾害,经数年攻关研究获得井壁破裂机理是:在表土层底含水层直接覆盖在煤系地层的条件下(也称“特殊地层条件”),由于采矿活动或人工排水使含水层水位下降,造成土层固结收缩,而对井

壁外壁施加一个竖直附加力是造成井壁破坏的主因。气候变化使井壁冬夏之间有 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右温差,产生的温度应力是井壁多在夏季破坏的诱因。这是对井壁受力认识上的一次飞跃。传统观念中,表土段井壁和岩石段井壁一样,主要承受水平地压作用,井壁自重主要由地层承担。实际上在特殊地层条件下,井壁竖向不仅要承受其全部自重,还要承受竖直附加力,也就是说深厚表土层中井壁受力不是静态的平面问题,而是三维空间的动态受力问题。

在获得井壁破裂机理的基础上,研究获得:竖直附加力在表土深 350 m 以内沿井筒深度分布规律及诸参数间的关系,并研发了井壁开“卸压槽”、注浆加固地层和井壁竖向可缩装置等治理和预防井壁破裂技术,取得成功并推广应用。

2.2 钻井法

20 世纪 60 年代以前,由于我国钢铁工业和机械加工技术和能力所限,钻井法只是作为文字知识在行业内研讨。60 年代中期由于国防建设,需要在极硬岩(抗压强度达 $180\sim 240\text{ MPa}$) 中钻井,而开展了钻井法凿井工艺的试验和钻井设备——主要为钻机和刀具的研制。1969 年元旦在淮北矿区朔里矿风井用石油钻机改造的钻井设备,完成了钻进直径 $\phi 4.3\text{ m}$ 、净径 $\phi 3.5\text{ m}$ 的风井建设并取得成功。用钻井法在表土层中凿井,具有井下作业地面化,工艺简单,施工安全,成本较低的优点。因此从 60 年代末至 70 年代末,钻井机和钻井凿井可称“遍地开花”。在常州卜弋桥矿、江苏扬州地区所属矿井、天津林南仓矿、辽宁省沈南矿区都用石油钻机改造配套的大直径钻机在表土层钻大直径井筒。辽宁沈南矿区红阳矿西风井是用一次全断面的行星式钻头钻井成功的。山东兖州矿区曾试验过井下动力钻机但未获成功。

20 世纪 60 年代末为钻井而专门研究设计制造的专用钻机“92 钻机”获得成功,满足了国防建设任务要求。并将主要设备和技术转为民用,而开发了在表土层中钻大直径井筒的转盘扩孔钻机 SZ9/500 型、ND-1 型和 BZ-1 型等。至今已钻凿井筒 50 余个,最大钻进直径 $\phi 9.3\text{ m}$,通过表土厚度达 547 m ,钻井深达 582 m 。

由于表土层深度增加,钻进直径 $\phi 9.3\text{ m}$ 条件下井筒净直径受到限制,加大钻进直径是解决在深表土中钻凿大直径井筒的唯一出路。在这个思想指导下,最近研制的 AS12/800 型钻机可钻进最大直径 $\phi 12\text{ m}$,即使在 700 m 深厚表土中钻井,其最终井壁净直径也能满足 $\phi 7\text{ m}$ 的要求。但同时也带来一些新问题,如:洗井液循环量加大、钻杆直径加大、电耗增加和成本增加,比冻结法在成本上的优势缩小,工期短的优势也将随钻进直径加大而消失。另外地面预制井壁占地面积大,泥浆对环境的污染等问题突出,有待解决。

20 世纪 80 年代开始研发了反井钻机已成功应用在矿山、水工等工程,但均是岩石中的钻井工程。

3 思考

半个多世纪以来,我国应用了各种特殊施工方法,50 年的实践表明,表土层厚超过 150 m ,可靠的施工方法只有冻结法和钻井法。冻结法中冻结壁可隔绝地下水向井内的流入,又可抵抗井外的水土压力。钻井法中泥浆既可平衡井内水土压力,防止地下水的流入,又保持了井帮的稳定,因此这两个凿井法被认为是安全可靠的。从(1)式可知,无论是冻结壁还是永久井壁,随表土深度的增加,外载的变化规律、参数间关系、材料的性质和力学性能以及与结构物间的关系都要进行深入的研究和探索。也就是确定深部地下结构物外载的

基础理论——深部土力学(简称“深土力学”),深部土冻结壁的力学、热学研究——深土冻土力学,以及深土地下结构力学——结构力学的一个新的生长点,就成为深表土中地下工程力学的新课题。

3.1 深厚表土层地下结构物外载的基础理论——深土力学^[6]

工程实践中出现的诸多问题,使工程技术人员开始进行新的研究。从工程实测、实验室试验到工程物理模拟研究,发现深部土与浅部土的物理力学性能有明显区别。在进行深厚表土层中地下结构物的物理模拟试验中发现,深部土的密度可达 $2.3 \times 10^3 \sim 2.7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ (与岩石近似)。在解除模拟深度的应力后,试验用土的力学参数随时间的改变而变化,其值与土力学所提供的数值相差很大,介于土与岩之间。对厚表土层井壁的 40 年工程实践和实验研究^{[3][5]},我们认识到在深厚表土层中井壁外载的确定仅借鉴岩石力学和土力学作为结构外载的基础理论有许多不适用和不足之处,在借鉴和研究的基础上,建立和发展适用于深厚表土中地下结构物外载的深土土力学(暂冠称“深土力学”)成为岩土工程学科的一项迫切任务。

3.1.1 深土力学的应用目标

研究深土力学的目的主要是确定深部地下结构物在各方向的荷载(地压)、以及荷载随时间、空间的变化规律。深土地压除与土性、埋深、地下水运动、施工方法有关外,还与结构物的形式和功能有关。常规土力学以研究土承载为主,深土力学以研究土对结构的荷载为主,这是两者的重要区别之一。

3.1.2 深土力学的主要特点

(1) 深土的物理力学参数是埋深的函数。深部土的初始状态是高围压,自重力一般取 $\rho g H$ (ρ 为密度, kg/m^3 ; H 为埋深, m)。由于埋深不同其应力状态不同,致使力学参数各异。而浅土的初始状态是无外载(或称无围压或低围压状态),故把浅土的力学参数基本视为定值。

(2) 深土地下工程中,土的受力特点是在高初始围压条件下,一维或二维突然减载或卸载,至地下结构物建成后又逐渐增载的过程。而浅土工程则是由零至最大值的加载过程,所以两者的应力—应变关系(本构关系)、力学行为、破坏准则都是不同的,土的加载与卸载两过程变形是不可逆的。因此将常规土力学的成果简单地沿用到深土,将造成计算和设计的较大误差,甚至错误。部分实测资料证实这种情况是存在的,它将给工程造成严重后果。

(3) 深土的物理力学参数的实验方法和数值确定方法有待建立。土力学多用于一维承载的基础工程,故用一般材料的力学试验方法(加载过程实验)求得试件力学参数并应用于工程是可行的,它已被工程实践所证实。而深土的物理力学参数是在高围压条件下先卸载,然后受阻而变为加载过程的条件下获得的,目的是确定土对结构的荷载,故试验方法和设备都要改变。重新研究建立深土力学性能参数的实验方法、设备和规范就成为必要的了。

应当指出:深土力学的研究方法和理论有些可以借鉴常规土力学的研究方法和理论。例如,研究井壁破裂机理的模拟试验所得结论证明有效应力原理在深部土中同样正确。但许多研究要从头开始,特别是深土的力学参数、本构关系、破坏准则需从实验研究和实测研究开始,其获得的力学、数学模型近期多为回归方程,虽难说明其物理意义,但它反映了深土力学规律,将是理论分析和建立深土力学理论的基础。

3.1.3 深土力学的基本内容

深土力学属土力学范畴,其基本内容包括:

- (1) 深土物理力学性能参数的实验方法和数值的确定;
- (2) 深土应力分析及试验研究;
- (3) 深土的应力—变形特性及本构关系;
- (4) 深土中地下结构物的土压力,土与地下结构的耦合作用;
- (5) 地下水运动对深土的力学性质及土压力的影响和变化规律;
- (6) 深土的地质工程——深土加固与对水的处理(包括堵水);
- (7) 其他深土中,土与工程施工及工程结构的力学问题;
- (8) 深土的冻土力学特性,冻土结构物和工程结构物的力学、热学耦合作用。

第(8)可单列为“深土冻土力学”,它是“冻土力学”发展的一个重要领域。

3.2 深表土中冻结壁力学、热学研究——深土冻土力学^[7]

3.2.1 深土冻土力学的应用目标

“常规”冻土力学源于浅表土层中冻土,也应用于浅表土冻土中。如果说常规冻土力学是天然冻土上(或其中)的建筑物基础工程的基础理论,那么深土冻土力学则是以人工冻土为材料的地下结构物,即冻结壁的基础理论。它对各种地下工程,如矿山工程、地下铁道、越江隧道、海底隧道等,用人工冻结法施工的冻结壁的外载构成、形成机理、力学参数的变化规律及数值确定,冻结壁整体强度与试件强度的关系进行研究,并对工程应用起指导作用。

3.2.2 深土冻土力学的主要特点

(1) 力学参数是深度的函数。天然冻土基本不受有外载,即使深 10~20 m 的土所受外载也很小,可以认为是在无外载条件下一维(大面积)传热形成的冻土。而深土冻土是人工制冷,在有外载(也称“高围压”)条件下形成的。这个外载是土赋存深度的函数。所以深土冻土的力学参数是深度的函数,甚至其物理参数也与深度有关。这些关系和规律有待试验研究。

(2) 特殊的荷载历史。深土冻土力学的特点之一是以人工制冷形成的冻结壁,在形成中和形成后都受外载。然后在冻结壁内侧一维或二维突然减载至另一结构物建成阻止其变形后,冻结壁内侧又存在一维或二维的增载过程。所以深土冻土和浅土冻土的应力—变形关系(本构关系)、力学行为、破坏准则和强度理论有何不同有待研究确定。

(3) 深土冻土力学性质的实验方法和数值确定方法有待建立。浅土冻土力学多用常规的材料力学试验方法,即加载过程试验,求得试件力学参数并应用于工程是可行的,它已被工程实践所证实。而深土冻土力学应用是在已受载条件下形成的冻土,且在一维或二维卸载后变形受阻转为加载的荷载历史。故需用有荷载条件下制造试件,用卸载和变载试验求得其力学特性参数,所以其试验方法、设备都要改变。重新建立深土冻土力学参数的实验方法、设备和规范就成为急迫而必要的了。

(4) 要研究试件力学参数与结构强度的关系。在材料力学中研究固体材料(特别是金属材料)在均质的、弹性的、小变形的前提下建立的弹性力学可以求出简单结构物的应力分布,再与加载过程的试件力学参数值结合,来确定结构物安全的整体强度和稳定性的方法是成功的。但对于非均质、非弹性的冻土仍用上述方法,无论是应力分布和材料力学参数,以及力学参数与结构形式和几何尺寸的关系都有待研究。

混凝土材料不只作试件强度,而且作原型结构试验进行对比后得出试件强度(标号)与不同的构件条件下可取用的材料强度值的关系。它可作为深土冻土力学参数与冻结壁结构强度关系研究的借鉴。

3.2.3 深土冻土力学的基本内容

深土冻土力学的基本研究内容应当包括:

(1) 在研究深土的力学参数与深度(即围压)间关系的基础上,实验研究深土冻土力学物理参数、力学特性及数值与深度的关系;

(2) 深土冻土(即有围压条件下形成的冻土)力学性能参数实验方法和数值的确定;

(3) 研究有围压条件下形成的冻土试件,在卸载或变载试验条件下的本构关系、破坏准则和强度理论;

(4) 深土中冻土试件强度与冻结壁强度间关系(包括几何效应和均质效应等)的实验研究;

(5) 深土中土、冻结壁、工程结构物间力学、热学及其耦合作用研究;

(6) 深土中冻结壁形成和解冻过程与土性和地下结构物间的力学关系;

(7) 其他深土中人工冻结工程力学问题研究;

(8) 深土冻土力学的试验方法、原理及测试技术。

对深土冻土力学的研究方法有些可以借鉴浅土冻土力学的方法和成果。首先要明确深土冻土力学的学术思想和特点,并在其指导下开展深土中冻土力学的实验设备、力学特性、本构关系、破坏准则和强度理论的实验研究,并逐步上升到规律和理论。

3.3 深土地下结构力学——结构力学的一个新的生长点

至今对地下工程结构物的设计计算均引用常规结构力学的方法、公式和地面建筑物的规范。随着深部地下工程及结构物各种问题的出现及研究进展,已初步认识到地下结构物力学现象与地面结构物的不同。它的主要特点有:① 结构与周围的介质关系是承载与荷载可以转化。地面结构物外载就是外载,而地下结构物外载有时可转化为承载(支撑),如地下多边形结构拐点处无弯矩条件下仍可是稳定结构。② 地下结构与介质耦合作用明显。例如,改变结构形状或变形性能时,外载值将发生变化,有时是巨大的变化。③ 一些常规力学理论对于深表土将不适用。例如,在某一深度以下,土压力将不服从挡土墙理论,在深土中可能出现“自然拱”现象。④ 地下结构将不只受力学作用,而是受热学、水力学和力学的共同作用。对于这些特点都有待进一步深入研究。

深土力学、深土冻土力学和地下结构力学将构成“地下结构工程力学”——结构工程学的新增长点。

4 结束语

井巷工程学科是土木工程与采矿工程两学科相结合的产物,虽然带有浓厚的采矿学科色彩,但它的根是土木工程学科。在复杂地层(如表土层、破碎带、裂隙含水层、极硬岩层等)中的井巷工程,就必须用特殊的方法。由于我国覆盖厚表土矿区多、且深厚,它给冻结法凿井和钻井法凿井的发展提供了空间。

近年来各种地下工程:城市地铁、越江隧道、地下商城、地下核电站、地下停车场等工程,也向“大和深”发展,其深度虽没有井筒深,但面积远大于矿井。在超过 20 m 深的大型基坑

工程也遇到了相同的问题。用冻结法施工大型建筑基坑、河中桥墩工程、地下铁道的交叉道、车站、排水井等工程已较普遍。在高架桥、海港等基墩工程中应用大直径钻井法方兴未艾,都会面临由“深”和“大”而带来的新问题。

地下建筑物的主要优点是:① 有利于节省土地;② 有利于环境保护;③ 有利于节约能源;④ 有利于生态平衡;⑤ 抗震性能及防护性能好。缺点是造价高。

随着人们社会和生活需要的增长,生产必将向新地区、新条件、新领域发展,人们已有的理论知识和工程经验将被引用。可行与否? 正确与否? 要由工程实践来检验,当已有的理论和经验都不能满足工程实践要求时,就要对新实践工程的领域进行探索和研究,以取得新的知识和工艺。实践出真知,它是一条真理。通过实践(工程的实验的研究)获得新的认识,累计的多次实践与认识将获得新的知识,只有新知识的升华才能得到新理论,新理论将开发新工艺,指导新实践取得成功,而新实践又对新理论进行检验、修正和再升华、再发展、再完善。深土力学、深土冻土力学、深土地下结构力学,就是在深土工程(主要是矿山井筒)的实践与研究中认识到的,它目前处于实践、认识、新知识阶段,还有待升华,升华是艰巨的,但这是我们不可推卸的责任,是科学发展的必然。

土木工程界人士一种普遍的观点是:“19 世纪是桥的世纪,20 世纪是高层建筑和高速公路的世纪。以英吉利海峡隧道工程为里程碑,土木工程开始进入地下工程时代。21 世纪将是人类开发利用地下空间的世纪。”把地下岩土体作为一种新型国土资源,除在矿山建设作出贡献外,在地下工程的建设舞台上,将发挥优势作出新的贡献。

参 考 文 献

- [1] 路耀华,崔增祁. 中国煤矿建井技术. 徐州:中国矿业大学出版社,1995
- [2] 崔广心. 关于冻结壁几个问题的探讨. 见:王长生. 地层冻结工程技术和应用——中国地层冻结工程 40 年论文集. 北京:煤炭工业出版社,1995
- [3] 崔广心. 关于冻结法凿井井壁问题的探讨. 见:王传久,虞咸祥. 矿井建设技术论文集. 徐州:中国矿业大学出版社,1995
- [4] 中国矿业学院主编. 特殊凿井. 北京:煤炭工业出版社,1981
- [5] 崔广心,杨维好,吕恒林. 深厚表土层中的冻结壁和井壁. 徐州:中国矿业大学出版社,1998
- [6] 崔广心. 论深厚表土层中确定地下结构物外载的基础理论——深土力学. 煤炭学报,1999,20(2):123~126
- [7] 崔广心. 深土冻土力学——冻土力学发展的新领域. 冰川冻土,1998,20(2):97~99

手掘式顶管的自摩擦增阻前行

卢清国

(北京工业大学 北京 100022)

摘 要:顶进中的管道与土体摩擦力常被作为制约手掘式顶管顶进长度的不利因素予以克服,本文提出一种变此不利为有利因素推动顶管工具管前进的方法,并介绍了方法的原理、前进阻力和增加阻力的关系,以及推动工具管前行的可行性。

关键词:手掘式顶管;管土间增阻;自驱动顶管

作 者:卢清国,男,博士,教授,主要从事地下工程、隧道工程领域的教学与科学研究工作。

1 前言

顶管施工法是目前地下工程中使用较多的一种非开挖施工技术,在城市市政管线建设中被大量使用。其中尤以手掘式顶管设备简单、成本低而被普遍应用。但因其原理是利用在管道后方安置的推力千斤顶推动管道配合前方出土前进,在整个顶管过程中,千斤顶顶推一串管道在土中运动,随管道的顶进距离增大,整串管子不断加长,管道外周与周围土体接触面积不断加大,单纯加大顶进千斤顶推力将受到管道强度制约,又会影响顶进工作坑千斤顶后背墙的稳定性的。目前为加大一次顶进距离采用的常规方式是在管道顶进长度上设立中继间接力和向管道与土体间压注润滑浆液降低管与土体摩擦阻力,否则只能是采用多次顶进方式,即在地面上隔一定距离,增挖顶管接收和工作井来累加顶进长度。长距离顶进尤其是超长距离顶进受地面条件等多种因素制约,实现困难。本文提出一种利用人为增阻方式不仅不去减摩克服管道与土体之间摩阻力,反而努力增大此摩擦阻力的方法,利用此增大的阻力作为管道头即顶管工具管在管道前方自行进切入土层,配合工具管后方的其他成管工艺完成整个管道的土体地下管线施工方法,可形成一套新型的土体中长距离管道施工技术。

2 工具管前行动作原理

2.1 顶进工具管构成

顶进工具管由三节特制的管段组成,它靠自身伸缩蠕动来完成自行进的过程。顶进工具管的三节管段分别定义为管前节、管中节和管后节,主要组成部件如图 1 所示。

2.2 顶进工具管自行进动作机理

2.2.1 管前节切入土层开挖

顶进工具管欲前行形成土体的通道时,分别向布置在管中节和管后节外侧的增阻部件

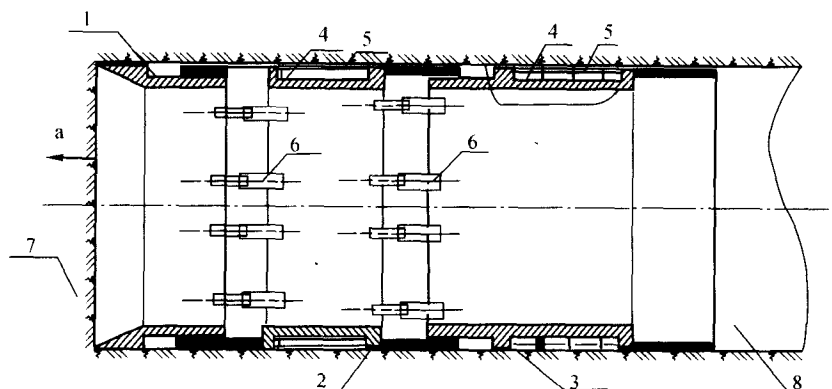


图1 顶进工具管纵断面

1—管前节；2—管中节；3—管后节；4—液压囊；5—增阻片；
6—液压缸；7—前方土体；8—已自行进形成的隧道

充液注压撑起增阻环片部件与管体周围土体紧密接触,此时依赖连接管前节与管中节内布置的液压缸的伸长动作,推动管前节切入工作面前方土层,使管前节前进一个步长的行程。

2.2.2 管中节前行

利用管后节外侧增阻部件与周围土体所产生的撑紧阻力,依赖管中节与管后节的液压缸的伸长动作;还借助管前节切入土体后的外侧与周围土体的接触摩擦力,收缩连接管前节与管中节的液压缸,推、拉管中节前进一个步长的行程。

2.2.3 管后节前行并完成工具管行进一个步长

向管中节外侧注压撑起管中节上的增阻环片与周围土体紧密接触后,卸除管后节的外侧周向增阻压力并使之与土体脱离,收缩连接管中节与管后节的液压缸,用管前节与外侧土体的摩擦力和管中节与土体的撑紧增阻力联合拉动管后节前行一个步长,完成一个整体工具管的全部三节管段的行程。如此周而复始,配合出土和衬砌技术使工具管在土体中形成一条长距离的管道。

3 工具管前行的力学原理

由于工具管在自行式前进时,只依赖自身管体外侧与土体撑紧后产生的支反力,从力学上说明工具管可在土体中前进任意远的距离。

3.1 工具管行进阻力

影响手掘式工具管前行的阻力主要为管前节行进时管外周与土体的摩阻力,当前方挖土不充分时,还有管前节的环刃切入土层的正面阻力。

3.1.1 管前节侧面阻力 F_F

借助顶管施工计算方法,管前节侧面阻力 F_F 与施工方法无关,可根据式(1)计算:

$$F_F = k\mu(2F_V + F_H + F_B) \quad (1)$$

式中 F_V ——管顶的垂直土压力,kN;

F_H ——管侧的侧向土压力,kN;

F_B ——管前节重量,kN;