

2019年地下空间工程技术热点回眸

李地元, 苏晓丽, 包焱坤

中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083

摘要 2019年地下空间工程在工程建设和技术进步方面取得了一系列成果。以重点工程为背景,介绍了超大直径盾构隧道的施工难点和技术突破;依托大型项目,分析了地下综合体的功能定位和设计趋势。由于地下工程事故现象频发,指出了目前国内对工程风险管控的不足。结合国内智能化地下工程的研究热点,介绍了信息化技术在地下空间中的应用。

关键词 超大直径盾构隧道;地下综合体;工程风险管控与防灾

近年来,中国的地下空间工程持续快速发展,在特长山岭隧道建设技术、大断面盾构施工技术、盾构施工微扰动掘进技术等方面,取得了进一步地突破,隧道及地下工程修建技术整体处于国际先进水平。例如在隧道建设方面:由西南交通大学何川教授牵头的复杂艰险山区隧道群建设及营运安全关键技术,获得了2019年度国家科学技术进步奖一等奖。此项成果形成了复杂艰险山区大规模隧道群建设与营运安全的关键技术体系。该项目成果达到了国际领先水平,并在中国大量山区隧道工程中得到了应用。除此之外,在工程建设方面也不断积累着经验。本文依据2019年重点工程,分析城市地下空间工程的重难点技术,介绍不同关键技术的技术进步。

1 超大直径盾构隧道

1.1 开挖面稳定

随着城市交通对车道数需求的增多,直径大于14 m的超大直径盾构项目逐渐出现在各大城市工程建设中(表1)。但由于盾构直径增大,施工技术面临着巨大困难。隧道在掘进过程中,由于掌子面的开挖导致前方土体应力状态的改变。开挖面直径增大时,土体扰动范围增大,自稳能力减弱,更容易引起掌子面失稳坍塌。相比小直径盾构,大直径盾构开挖的掌子面稳定控制技术更为复杂,以土压平衡盾构机为例,开挖面直径的增大会使盾构机土仓体积增大,导致内部土压力分布具有较大差异性,从而加大了大直径盾构开挖面稳定控制的难

收稿日期:2019-12-30;修回日期:2020-01-06

作者简介:李地元,教授,研究方向为岩石力学和城市地下空间工程等,电子信箱:diyuan.li@csu.edu.cn

引用格式:李地元,苏晓丽,包焱坤. 2019年地下空间热点回眸[J]. 科技导报, 2020, 38(1): 196-201; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2020.

01.017

度。黄德中研究表明,土体改良技术适用于超大直径盾构隧道施工^[1]土体改良技术可以有效减小土压力差异性分布,形成持续稳定的土压力以平衡掌子面水土压力。常用的土体改良剂有泡沫和膨润土泥浆。但目前土体改良剂的使用缺乏理论,没有标准的评价标准和评价方法,各工程依靠经验摸索,为盾构施工埋下隐患^[2]。研究组织应制定相应评价标准和评价方法,进行土体改良剂评级分类用以匹配不同地质环境,进而保证土压平衡盾构安全、经济、快速施工。

表1 中国超大直径盾构隧道统计

项目名称	直径/m	盾构选型	年份
中国上海长江隧道	15.43	泥水盾构	2006
中国上海外滩隧道	14.27	土压盾构	2007
中国南京长江隧道	14.93	泥水盾构	2008
中国上海迎宾三路隧道	14.27	土压盾构	2009
中国杭州钱江隧道	15.43	泥水盾构	2010
中国上海长江西路隧道	15.43	泥水盾构	2011
中国南京纬三路隧道	14.93	泥水盾构	2011
中国上海虹梅路隧道	14.9	泥水盾构	2012
中国瘦西湖隧道	14.93	泥水盾构	2013
中国香港莲塘公路项目	14.1	土压盾构	2015
中国武汉三阳路隧道	15.76	泥水盾构	2015
中国珠海横琴隧道	14.9	泥水盾构	2016
中国上海北横高速	15.53	泥水盾构	2016
中国汕头市苏埃通道	15.03	泥水盾构	2017
中国南京和燕路隧道	15.01	泥水盾构	2017
中国武汉和平大道隧道	15.4	泥水盾构	2017
中国济南穿黄隧道	15.74	泥水盾构	2017
中国上海周家嘴路隧道	14.9	泥水盾构	2018
中国深圳市春风隧道	15.8	泥水盾构	2018
中国南京梅仔洲隧道	15.43	泥水盾构	2018
中国温州瓯江隧道	14.93	泥水盾构	2018
中国深圳妈湾隧道	15.5	泥水盾构	2019

1.2 进出洞新技术

在城市建筑密集区,由于空间狭小,盾构机始发与接收井与建筑物基础间净距较小,为了工程安全施工,需要采用围护结构进行隔离保护。工程中常采用灌注桩、搅拌桩等作为预支护帷幕。例如上海地铁施工采用冰冻法进洞^[3],而北京地铁黄村站一义和庄站区间隧道采用了隧道内部超前注浆和径向注浆加固措施^[4]。但在这一过程中常常需要人

工开凿围护结构,而普通预加固措施在洞门破除过程中易发生较多风险事件。尤其是隧道掌子面直径增大时,拆除围护结构或预加固封门带来了巨大的施工隐患。近来有研究表明,可以利用钢套筒结合端头加固来辅助盾构始发^[5-6],也可以利用玻璃纤维筋的高抗拉强度、低抗剪强度的特性,替代钢筋,用盾构机直接切削玻璃纤维筋进出洞,发展玻璃纤维筋混凝土地下连续墙技术,从而降低施工风险^[7-8]。

1.3 刀盘

刀盘作为盾构机的重要组成部件,在掘进作业中不可避免地发生磨损,刀盘结泥饼等问题。一般情况下,需要施工人员进入带压舱内进行检查、更换刀具等工作,但是这一过程工作难度大、效率低,而且施工风险高,极易发生安全事故。因此,进舱作业是盾构施工的最大风险之一^[9]。对于大直径盾构机,由于空间较大,可以将刀盘辐条内部设计成中空,施工人员进入空腔内进行相关工作,由于空腔暴露在常压环境中从而避免了施工人员带压工作。例如深圳春风隧道超大直径盾构项目中,探索了解决高水土压力下常压换刀设计关键技术^[10]。武汉地铁8号线越江隧道工程,陈健^[11]针对大直径盾构刀盘刀具选型及常压换刀技术进行了研究,图1为常压换刀系统^[10]。

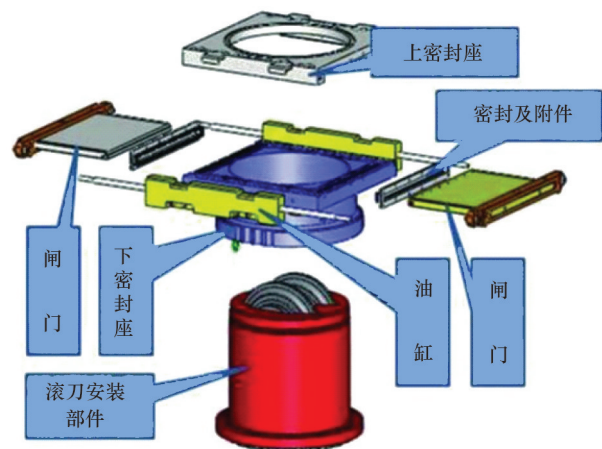


图1 常压换刀系统

对于刀盘在不同地质情况下的适应性和创新性研究方面。杨旻等^[12]研究了富水地层下的盾构刀盘刀具配置;王永贵^[13]进行了岩溶地区盾构刀盘

配置及刀具磨损分析;马海燕等^[14]开展了无水砂卵石地层盾构施工常压开仓刀盘改造技术研究。因此,针对不同地层地质对盾构刀盘进行创新性设计,使刀盘具有刀盘、刀具耐磨保护和检测系统,实现对地层的有效切削,再结合常压换刀装置实现对刀具的快速更换,可以大幅提高破岩效率。

1.4 控制沉降

严格控制地层沉降也是大直径盾构施工研究重点,尤其是在地表覆土浅、复合性地层、城市建筑密集区等复杂敏感的施工场地。盾构掘进过程中盾构推力、推进速度、刀盘转速、注浆技术、渣土改良效果等,都影响着地层稳定性。为此,需要进行大量现场试验并结合数值模拟,以合理选取盾构掘进参数如:掘进速率、轴线控制、注浆压力等。杨记芳^[15]建立三维数值模型和现场实测数据进行分析,对比讨论了大直径盾构侧穿和下穿不同桩长的桩基时高层建筑沉降及桩体变形差异。合理布置监测系统发展盾构施工微扰动掘进技术,利用试验段,预掘进技术观测盾构施工各阶段对周围土体的影响规律,确定支护土压力系数并实时监测来实现动态调节,保证盾构机安全、连续、快速地推进。同时必须设计高效应急系统,以防出现工程事故,春风隧道在设计规划过程中^[16]针对在上述方面制定了沉降控制方案,对掘进控制、敏感建筑物超前加固、同步注浆、连续动态监测以及应急处理等,提供了沉降可控的技术措施。

2 地下综合体

国内学者基于对地下空间与城市空间的耦合渗透关系以及地下空间与地面空间开发的拓扑关系的分析,得出城市空间是地上、地下二者相互交织相互作用的整体^[17],地下空间开发利用不是单纯的地下规划,重点在于加强地面规划的协调性与系统性,实现地上地下协同发展,即强调“城市与地下建筑一体化”。而形成地上地下空间一体化设计,关键在于发展具有综合功能的一体化地下空间。作为亚洲最大最复杂的地下综合体,武汉光谷广场综合体的正式完工,引起了社会的广泛关注。立足

于城市现代化发展需求,结合城市中心立体化再开发与地下综合体的互动关系,地下综合体的开发和利用为发展新型多功能城市结构提供了新理念和方向。现代、大型、绿色“超级地下城”将会成为越来越多的城市规划新选择。

2.1 功能定位

王凯等^[18]依据武汉地下空间开发探讨了城市地下空间的形态演变与地面的功能分区相关关系,得到为了高效集约利用地下空间必须合理规划城市地下综合体功能定位的结论,国内常见功能组合如表2。在开发经济功能方面,由于地下综合体高度集中城市资源、全面的综合服务功能和较广服务半径,对形成城市经济发展网络有极大导向作用。以“地下商业、休闲、娱乐”功能为主要发展模式的地下综合体较为常见,如广州金融城项目。

表2 地下综合体功能定位

地下综合体名称	规模 /万 m ²	主要功能
天津于家堡金融区	400	交通、商业
广州国际金融城	213.6	商业、金融等
前海综合交通枢纽	215.9	交通、商业、站城一体化
上海世博园	65	交通、商业、市政
广州花城广场	43	交通、商业、市政
南京新街口	40	交通、商业
苏州太湖新城核心区	30.6	商务、办公、金融
北京CBD中心区	52	市政、应急防灾

多功能高效地利用地下空间,因地制宜地结合城市需求,可以解决多种“城市病”。如将城市地下综合体与海绵城市理念相结合,将雨水调蓄、防洪除涝、优化管廊等多重功能结合的新型地下综合体。北京市中关村西区是将综合管廊作为载体,将地下空间开发与地下环形车道融为一体的地下构筑物^[19]。京通州运河核心区综合管廊建设,也与地下空间开发相结合。结合城市交通建设,解决城市交通拥堵问题,以2019年建成的武汉光谷广场地下综合体为例^[20],通过建设集成一体的大型地下综合体,实现该区域交通商业融合,解决了光谷广场交通堵塞问题。

2.2 以人为本的绿色城市发展趋势

城市地下综合体作为城市公共空间的重要组

成部分,当前,人们对地下共同体的功能、生态化和宜居度的要求越来越高。由于地下综合体设计规划的复杂性和建设后的不可逆性,创造高品质地下综合体有着现实意义。而随着地下综合体的快速扩张,过于注重经济效益,忽略人性化研究设计,缺乏系统化管理,越来越多的工程项目使用后评价表现出严重的活力不足,这必将会造成巨大的社会资源损失,以人为本,提高活力,促进立法和管理,实现社会资源的可持续发展也是亟待实现的任务之一。例如重点关注使用者需求发展监测反馈机制,为改善或发展地下共同体的空间环境规划提供经验;加强导向系统的连续性,增强标志的视觉显著性,对地下空间进行有效的引导和识别;丰富社会公共设施功能性,提高空间利用率等。

另外,综合开发地下生态城市空间也是一项解决当今城市人口、资源、环境三大危机的重要举措。未来利用地下空间的能源开发功能将促进中国绿色城市发展。尤其是在地热能开采方面,例如利用隧道衬砌内的热交换管路来提取隧道空气热能或隧道围岩中的地热能,实现隧道附近建筑的供热/制冷服务^[21],引入盾构技术开发利用深部基础地热资源^[22]。

3 地下工程风险管控和防灾

3.1 施工安全

地下工程由于其施工环境的特殊性,进行工程建设本身具有高风险。近年来,地下工程发展过快,而技术和管理体系相对落后,施工方在施工过程中没有意识到地下工程安全风险的严重性,管理部门不正确进行风险管理,导致地下工程建设中事故频发。2019年,青岛地铁4号线沙子口静沙区间施工段发生坍塌,广州地铁11号线沙河地铁站施工区域路面塌陷,这些事故造成了重大人员伤亡和经济损失,给社会带来了极其恶劣的影响。为了保证地下工程施工质量与安全控制管理,监理方必须具备专业知识素养,严格按照规定执行任务。施工单位则需培养牢固的安全意识,建立起设计、施工、监理、建设平等的协作关系。从设计、工法、建材做

到有效控制,各流程透明公开。建立现代化的质量控制理论体系,加强工程施工企业人才管理与培训。完善管理模式,对隧道工程安全风险进行评估,从而总结安全管理的方法^[23]。坚持科学发展观,尊重施工规律,杜绝形式主义,采用合理的工期、造价、方案进行科学项目管理。

3.2 运营安全

除了在建设过程中,地下工程在使用阶段也常常会萌生多种病害(如渗水、不均匀沉降、开裂等)。病害频发对地下工程结构的功能性产生破坏,将严重影响地下工程的安全运营。这就需要发展工程病害诊断技术,全面评价运营过程中结构的健康状态,在病害早期做出预警,为结构的维护养护提供可靠信息,从而保证安全运营。

长期运营阶段事故还包括火灾、爆炸等。火灾科学涉及多个专业领域,本身就具有综合性、系统性,十分复杂。地下工程火灾也具有排烟困难、散热慢、人员疏散困难、扑救困难等特点。当地下工程朝着巨型化发展时,火灾的预测与防治越发困难,引入新技术迫在眉睫。目前,在建筑行业流行的建筑信息模型(BIM)则可以快速建模,弥补以往传统仿真模拟软件建模的局限性^[24]。利用建筑信息模型实现基于BIM的火灾模拟,得到火灾模拟信息和安全疏散时间,从而建立了基于BIM的地铁车站火灾模拟仿真方法^[25]。

4 信息化智能化地下空间

近年来,信息化、智能化地下空间,越来越受到人们的重视,而人工智能在这一领域起着十分重要的作用。人工智能在工程设计、施工、运营、维护等阶段,可以起到比传统技术更好的效果。

4.1 工程中的应用

随着计算机技术的发展和各类算法的出现及越来越简便地应用,现阶段,国内外研究方向主要集中在利用各种算法来简化各类设计步骤之中。岩土工程领域有诸多方面都可以与人工智能算法和技术相结合,如利用人工智能算法可大量简化冗杂重复的计算过程。

以图像识别技术为例,将图像进行分割,获得裂隙大小、位置、形状等相关信息,旨在建立一个隧道裂隙识别与分析系统,得到岩体内部裂隙情况,用于了解岩体内部节理结构。分割网络分为两个阶段:训练阶段和推理阶段。在训练阶段,将输入图像作为数据集的分割标注数据,采用深度学习框架对分割网络进行训练。分割网络可以识别图像中的每个像素,判断图像中是否存在裂缝。在推理阶段,将新的隧道图像不加注释地发送到分割网络中,分割网络完成裂缝的分割,使裂缝的提取和分析及时采取相应的措施^[26]。

4.2 不足与展望

人工智能算法与工程的具体结合仍然有许多不足,人工智能算法的成长是需要大量的数据去学习和成长。但现阶段,工程实例地质条件参数以及相应设计参数的电子化程度十分不足,算法的学习资料十分不足,智能化的程度十分不够,其应用还是在较小的范围内,对具体工程实例设计方面的应用甚少,许多算法虽然被编写了出来,但供算法学习并成长的案例参数太少,算法并不足以满足或用于工程应用,这些仍然是今后需要解决的问题。

尽管如此,该领域未来的发展方向仍十分有前景。例如智能支护,在隧道支护过程中,如果能充分利用算法的优越性,在每段隧道中,根据地质条件的不同采取不同的支护手段,在地质良好的地段甚至可以不用支护,但这方面的研究仍然不够成熟,若真正利用起来,节省的资金与人力物力也是十分可观的。

5 结论

中国在地下空间工程领域发展迅速,不断积累着工程经验,尤其是在超大大地下空间的设计和施工方面,都取得了显著的进展。但仍然存在一些不足:超大直径盾构本身带来很大的风险,复杂地质、敏感环境下的扰动施工控制技术仍需进一步提高;对于大型地下公共空间,设计规划的不合理,后续服务功能的缺失制约着地下空间的可持续发展;在施工安全和运营安全方面,缺乏安全意识,监理制

度不健全,防灾救灾体制不完善都将会带来巨大经济及人员损失。

未来机遇和挑战并存,借用数字化监控、分析、建模等功能,克服传统施工难点、完善系统化工程设计,信息化智能化工程必将成为主流发展趋势。

参考文献(References)

- [1] 黄德中. 超大直径土压平衡盾构施工土体改良试验研究[J]. 现代隧道技术, 2011, 48(4): 65-71.
- [2] 汪国锋. 北京地铁十号线土压平衡盾构土体改良技术应用研究[J]. 现代隧道技术, 2009(4): 77-82.
- [3] 张斌. 盾构在复杂地质条件下的进出洞施工技术[J]. 隧道建设, 2009, 29(3): 54-58.
- [4] 钱新, 黄雪梅. 盾构下穿建(构)筑物控制沉降注浆技术研究与应用[J]. 现代隧道技术, 2010(4): 91-95.
- [5] 伍伟林, 朱宏海, 邹育, 等. 盾构钢套筒始发和接收关键技术研究[J]. 隧道建设, 2017, 37(7): 97-102.
- [6] 伍伟林, 王呼佳, 高鲲. 钢套筒平衡技术在泥水平衡盾构出洞工程中的应用[J]. 城市轨道交通研究, 2016, 19(9): 125-128.
- [7] 王吉云. 近十年来中国超大直径盾构施工经验[J]. 隧道建设, 2017, 37(3): 85-90.
- [8] 吕荣海. 玻璃纤维钢筋混凝土在盾构进出洞工程中的应用[J]. 城市轨道交通研究, 2018(1): 98-101.
- [9] 洪开荣. 广深港大断面特长水下盾构隧道的技术难点分析[J]. 隧道建设, 2019, 39(6): 1-3.
- [10] 谭顺辉, 孙恒. 超大直径泥水盾构常压换刀设计关键技术——以汕头海湾隧道及深圳春风隧道为例[J]. 隧道建设, 2019, 39(7): 1073-1082.
- [11] 陈健. 大直径盾构刀盘刀具选型及常压换刀技术研究[J]. 隧道建设, 2018, 38(1): 110-117.
- [12] 杨旸, 谭忠盛, 彭斌, 等. 富水圆砾地层土压平衡盾构掘进参数优化研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(S1): 94-98.
- [13] 王永贵. 岩溶地区盾构刀盘配置及刀具磨损分析[J]. 建筑机械化, 2019(5): 32-35.
- [14] 马海燕, 郑永军. 无水砂卵石地层盾构施工常压开仓刀盘改造技术[J]. 市政技术, 2019(4): 154-156.
- [15] 杨记芳. 大直径盾构隧道施工对高层建筑及桩基影响数值分析[J]. 太原理工大学学报, 2017, 48(5): 772-777.
- [16] 郭卫社, 游永锋, 高攀. 深圳春风隧道主要施工技术难题与解决方案[J]. 隧道建设, 2019, 39(7): 1165-1174.
- [17] 赵贵华, 陈志龙. 运用关联耦合分析城市地下空间资

- 源[J]. 地下空间, 2004, 24(1): 100-103.
- [18] 王凯, 黄云艺, 陈卫忠. 城市地下分层空间功能定位和形态演变探讨[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(3): 34.
- [19] 肖燃. 地下互联中关村——中关村西区综合管廊及地下空间开发设计理念[J]. 建设科技, 2004(17): 38-39.
- [20] 熊朝辉, 周兵, 何丛. 武汉光谷广场地下交通综合体设计创新与思考[J]. 隧道建设 2019, 39(9): 1471-1479.
- [21] 钱七虎. 利用地下空间助力发展绿色建筑与绿色城市[J]. 隧道建设 2019, 39(11): 1737-1747.
- [22] 张英群, 张延夕. 引入盾构技术开发利用深层地热能[J]. 城市地质, 2019(2): 53-56.
- [23] 谭磊. 论隧道施工安全风险与施工管理[J]. 冶金丛刊, 2017(1): 130-131.
- [24] 邢志祥, 张莹, 钱辉, 等. 地铁车站火灾和人员疏散仿真模拟技术发展的新思路[J]. 安全与环境工程, 2018, 25(3): 130-135.
- [25] 吕希奎, 白娇娇, 陈瑶. 基于建筑信息模型与 Pyrosim 软件的地铁车站火灾模拟仿真方法[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(6): 147-151.
- [26] Song Q, Wu Y, Xin X, et al. Real-time tunnel crack analysis system via deep learning[J]. IEEE Access, 2019, 7: 64186-64197.

A review of hotspots of underground space engineering in 2019

LI Diyuan, SU Xiaoli, BAO Yankun

School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

Abstract In 2019 underground space engineering made a series of achievements in project construction and technological progress. The paper introduces the construction difficulties in large diameter shield tunneling engineering and describes the technical breakthrough in some key projects. The function of underground complex in planning and design are analyzed. Concerning frequent accidents during underground engineering construction, the paper also interprets the lack of engineering risk control. Finally, combined with intelligent underground engineering hotspot, the application of information technology is prospected in underground space engineering.

Keywords super-large diameter shield tunnel; underground complex; engineering risk control and disaster prevention ●



(责任编辑 卫夏雯)