

城市地下空间岩土工程技术发展新动向

岩土工程技术指的是以岩体和土体为工作对象，涉及十分广泛的综合性工程与技术，是传统的土木工程的一部分，在铁路、水电、矿山、交通、地基、市政、国防等各种工程建设中都有十分重要的意义。由于它与复杂多变的自然条件密切联系，施工中需要解决一系列技术问题，涉及到多门学科，因而往往成为工程建设的难点，保证工程质量、提高工程经济效益和社会效益的关键。

城市地下岩土工程是岩土工程的一部分，是城市可持续发展，特别是我国大城市可持续发展所面临的诸多问题之一，更是摆在岩石力学工作者面前的新课题和新任务。

1 城市地下岩土工程是新世纪城市建设的重要环节

随着国民经济的高速发展，我国城市化水平正在快速提高，从1990年的18.96%提高到1997年末的28.9%。城市化水平的提高标志着城市工程建设的飞速发展。但是，我国城市建设基本上沿用“摊大饼”的粗放发展模式，给国民经济带来不应有的损失。主要是：

(1)城市范围无限制地外延扩展，耕地损失严重。据卫星遥感资料判断和测算，1986~1996年间，全国31个特大城市城区实际占地规模扩大50.2%，有的城市占地成倍增长。另据预测，至2010年，我国城市总数将从1996年的640座增加到1000座，其结果是占用了大量耕地。到下世纪中叶，我国城市化水平将提高到65%左右，这意味着城市人口将比1990年增加7亿多人，按每个城市人口用地100 m²计，将占用耕地1亿多亩。土地问题是我国可持续发展的关键，城市人口急剧增长与地域规模的限制已成为城市发展的突出矛盾，城市发展非走节约土地的集约化发展模式不可。

(2)城市人口密度大，形成了所谓的“城市综合症”。首先表现在城市交通阻塞，行车速度缓慢。例如北京市干道的平均车速比10年前降低50%以上，且正以年递减2 km/h的速度持续下降。上海、北京每公里道路的汽车拥有量相应为506辆与345辆，为发达国家大城市相应拥有量的1倍及至数倍。其次是，由于城市基础设施落后于城市面积的扩展和城市人口的增长，造成城市环境的恶化。当前我国城市环境形势日趋严重，大气污染日趋加剧，全国500多座城市大气质量达到一级标准的不到1%，酸雨面积超过国土面积的40%，重庆等城市尤为严重；城市污水80%未经处理排入江河；城市地下水受到污染；垃圾围城现象普遍；噪声污染普遍超标，建筑空间拥挤，城市绿地减少，生态恶化。

(3)城市总体抗灾抗毁能力偏低。在城市总体规划中，除防洪、防空外，目前尚缺少综合防灾的内容，城市基础设施的防灾措施处于空白。为了克服这方面的弊端，解决城市人口、环境、资源三大危机，医治“城市综合症”，实施城市可持续发展，世界发达国家都在把地下空间作为新的国土资源，开发利用城市地下空间，成为越来越受到重视的城市建设指导方

针和发展方向。

城市功能空间能转入和宜转入地下的领域是很广阔的，包括商业、交通、部分市政设施、文化娱乐休闲、部分工业生产、仓储、防灾(避难)和救灾空间等。充分利用地下空间是城市立体化开发的最重要组成部分。它可以达到扩大空间容量、提高开发集约度、消除步车混杂、交通顺畅、商业更加繁荣，地面绿地增加，环境优美开敞，购物与休闲，娱乐相互交融的多功能效果，与向城市上空发展的模式相比，是一种更为合理的发展模式。

向地下要土地、要空间已成为城市建设发展的必然趋势，显示了无比的优越性。我国及国外大城市的地下商业城(街)、地下车库、地下影剧院、地下铁道、地下人防系统，是众所周知的城市地下工程。有的国家已开始实施和计划采用地下污水收集和处理设施、地下垃圾处理厂、地下超导磁直接储存电能、地下供热供冷系统、地下多功能公用隧道(共同沟)以及具有抗灾功能的地下空间系统。它们是未来城市建设的发展方向。

2 城市地下岩土工程的特点及难点

众所周知，地下岩土工程是一个具有悠久历史的领域。可以说自有人类以来就有岩土工程，特别是进入工业社会以后岩土工程处处存在，但是城市岩土工程，除了传统的地面房屋工程外，地下岩土工程却是随着现代城市的兴起而发展的。经过最近几十年的实践，无论从设计、施工、设备和工艺，还是理论、技术和经验，都已达到相当高的水平，特别是深埋地下岩石工程，更是达到了较成熟的程度。

但是，城市地下岩土工程却具有与一般岩土工程不同的特点，主要是：多数埋深较浅。地面建筑、交通设施密集，地下管线多，开挖造成的影响大，地质条件复杂，多以土体为主，常有膨胀土、沙层、地下水，尤其是沿海沿江城市，淤土、软土的开挖难度更大。因此，城市地下岩土工程存在许多需要解决的特殊问题。主要是：

(1)浅埋、超浅埋暗挖施工技术。城市地下工程的埋深，不仅直接影响工程造价，而且关系到工程使用方便与否，因此，城市地下工程一般埋深较浅。在浅埋、特别是超浅埋的条件下，地下工程需要穿越建筑物和线路、街道，地面保护成为施工技术中的首要问题。

(2)复杂、恶劣环境下的开挖技术。诸如流砂层、膨胀土、高压缩性软土淤土、风化破碎岩石、高浓度瓦斯地层、大涌水、硫化氢、岩溶、高应力、地下管线、地面大车流量、大型载重车多、建筑物密集等等，都是地下岩土工程施工中的难题。

(3)大断面隧道开挖、支护技术。主要是地铁车站及商场、仓库、厅、室，其跨度尺寸达10 m以上。

(4)开挖影响控制技术。随着工程埋深的减小，开挖对地面的影响越来越大，在超浅埋条件下，开挖影响的控制与开挖方式、施工工艺、支护方法等众多因素有关，是地下工程施工中最为复杂的问题。

3 城市地下岩土工程的开挖技术及其适应条件

我国城市地下工程建设起步较晚，随着人防、地铁、地下商场、仓库、影剧院等大量工程的建设，特别是近年来的工程实践，城市地下空间开挖技术得到了长足发展和提高。我国城市地下隧道及井孔工程先后采用了明挖法、暗挖法、盖挖法、盾构法、沉管法、冻结法及注浆法等，这些技术有的已达到国际先进水平。

3.1 明挖法

明挖法具有施工简单、快捷、经济、安全的优点，城市地下隧道式工程发展初期都把它作为首选的开挖技术。其缺点是对周围环境的影响较大。

明挖法的关键工序是：降低地下水位，边坡支护，土方开挖，结构施工及防水工程等。其中边坡支护是确保安全施工的关键技术。主要有：

(1)放坡开挖技术。适用于地面开阔和地下地质条件较好的情况。基坑应自上而下分层、分段依次开挖，随挖随刷边坡，必要时采用水泥粘土护坡。

(2)型钢支护技术。一般使用单排工字钢或钢板桩，基坑较深时可采用双排桩，由拉杆或连梁连结共同受力，也可采用多层钢横撑支护或单层、多层锚杆与型钢共同形成支护结构。

(3)连续墙支护技术。一般采用钢丝绳和液压抓斗成槽，也可采用多头钻和切削轮式设备成槽。连续墙不仅能承受较大载荷，同时具有隔水效果，适用于软土和松散含水地层。

(4)混凝土灌注桩支护技术。一般有人工挖孔或机械钻孔两种方式。钻孔中灌注普通混凝土和水下混凝土成桩。支护可采用双排桩加混凝土连梁，还可用桩加横撑或锚杆形成受力体系。

(5)土钉墙支护技术。在原位土体中用机械钻孔或洛阳铲人工成孔，加入较密间距排列的钢筋或钢管，外注水泥砂浆或注浆，并喷射混凝土，使土体、钢筋、喷射混凝土板面结合成土钉支护体系。

(6)锚杆(索)支护技术。在孔内放入钢筋或钢索后注浆，达到强度后与桩墙进行拉锚，并加预应力锚固后共同受力，适用于高边坡及受载大的场所。

(7)混凝土和钢结构支撑支护方法。依据设计计算在不同开挖位置上灌注混凝土内支撑体系和安装钢结构内支撑体系，与灌注桩或连续墙形成一个框架支护体系，承受侧向土压力，内支撑体系在做结构时要拆除。适用于高层建筑物密集区和软弱淤泥地层。

3.2 暗挖法

适用于城市中不能采用明挖法施工的地方，亦适用于松散层及含水松散层地层。

一般应按照“新奥法”原理设计和施工，采用较强的初期支护，先注浆后开挖的方法。施工原则是：“管超前、严注浆、短开挖、强支护、快封闭、勤量测”。一般用30~50 mm钢管超前棚顶导管，然后注入水泥或化学浆，形成“结石体”，以增强围岩自稳能力。每次开挖进尺0.75 m左右，先进行环状开挖，留核心土，预喷5~8 cm混凝土，架拱架和钢筋网，再喷25~30 cm混凝土，形成初期支护，做防水层后再做二次衬砌。

暗挖法有单拱单跨和多拱多跨暗挖施工技术。北京地铁西单车站为多拱多跨。也有三连拱、四连拱、五连拱地铁车站、公路隧道和地下商场。北京天外天地下商场为五连拱结构。还有平直墙暗挖施工技术。国际上传统的暗挖法其顶部都是拱形结构，我国创造出平顶直墙超浅埋暗挖施工技术，如北京长安街过街道。

在岩石中进行暗挖施工时，一般采用钻爆法。为了保护围岩的自承能力，普遍采用光面爆破技术。为了减少对地面的振动影响，还采用微差爆破及合理设计爆破参数等减振技术。

3.3 盖挖法

指的是边坡支护为连续墙、混凝土灌注桩，其上为盖板所构成的框架结构，并在其保护下开挖及结构施工的方法。它具有快速、经济、安全的优点，是较明挖法对环境影响少，较暗挖法成本低的一种方法。适于市区高层建筑密集区。

盖挖法可分为由浅而深地逐层开挖、逐层做结构的盖挖逆作法以及依次开挖至底后再做结构的正作法两种。前者适用于地质条件复杂、开挖断面大的情况，后者反之。

3.4 盾构法

指的是全断面推动圆筒状钢盾构进行开挖的方法。施工方法有人工、半机械及全机械化多种。盾构由液压千斤顶推进。用盾构法能完成直径几十厘米至十多米尺寸的隧道，以及双联、三联和四联盾构的大型工程。它适于稳定和不稳定松散含水地层。

从施工技术上看，盾构法有泥水盾构法、土压平衡法(可控制地面沉降)、开敞式机械化盾构、气压盾构、插刀盾构及混合盾构等多种。在岩石地层中，也可采用隧道掘进机(岩石盾构)。

此外，国内外还开发了称为“地老鼠”的非开挖技术，包括导向钻进、定向钻进、冲击矛、夯管、水平顶管及螺旋钻等。我国首都机场跑道下采用这种方法完成一次顶进273 mm、壁厚8 mm、长110 m作为安装通讯电缆用的钢管。我国最长铺管长度可达500 m，最大铺管直径800 mm，铺设备达到国际先进水平。

3.5 冻结法

地层冻结法是采用人工制冷固结不稳定松散砂土地层或软岩地层，并隔断地下水的施工方法。在拟开凿的地下工程周围钻凿一定数量的冻结孔，通过冻结管中的供液管，循环由制冷设备提供的低温盐水，使地层局部形成不透水且有一定强度能抵抗地压的冻结壁，并在其保护下进行开挖施工，工程完工后，冻结壁融化，地层岩土恢复原状。此法适用于松散含水地层，已在煤矿广泛采用。上海地铁 1#线、2#线的联结通道及泵站、上海杨树浦水厂泵站基坑、北京地铁大北窑区间隧道等复杂高难地段，均用此法获得成功，并首次试成水平冻结技术及液氮快速冻结技术。

3.6 沉管(箱)法

沉管(箱)法是采用将事先预制的钢筋混凝土结构，焊封头部钢板、然后放水浮运沉入到设计的位置来建造水下岩土工程的方法。国外及我国煤矿均有大量施工实例。广州珠江隧道采用了这种方法。适于修建过江、过海隧道的水中部分及浅表土层中的竖井施工。

3.7 钻井法

钻井法是一种用途广泛、技术先进的岩土井、孔施工方法，其全部开挖工程在地面操作，工人不需“入地”，劳动强度小，它是通过专门的大直径钻机(我国最大钻井直径 9.3 m)驱动钻杆及钻头钻进，泥浆护壁，压气排渣，井壁漂浮下沉，壁后充填固井等工序，一次超前钻进，分级扩孔成井。我国煤矿已成功采用此法完成 47 个深井井筒。此外还有由下而上施工的反井钻进技术。钻井法在我国矿山、铁路、交通、国防、水电等复杂及水下岩土工程中得到成功应用。

3.8 注浆法

注浆法指的是通过注浆设备以选定的注浆工艺利用钻孔进行岩土加固的一种施工技术。它早就被广泛应用。根据注浆材料不同有单液和双液注浆，水泥注浆、粘土水泥和化学材料注浆；根据注浆机具不同有重力注浆和压力注浆，有渗透注浆和喷射注浆等。

近年来发展起来的高压喷射注浆法，在岩土工程的加固和治水中更是发挥了独特作用，例如高压旋喷桩法、高压定喷墙法以及水平旋喷法。三重管高压旋喷桩法在上海地铁 1#线的施工中，对淤泥地层进行帷幕堵水、防渗加固，效果十分理想。高压旋喷桩与灌注桩结合法在高层建筑地基基坑护坡工程中更是得到广泛应用。

4 城市地下岩土工程中的开挖影响及环境保护

城市地下岩土工程中的开挖影响指的是开挖引起的围岩移动与地面沉降，不包括其它扰民影响。地下开挖必然会在其周围岩土体中引起位移与变形。由于开挖深度小，其影响必然要波及到地面上，但由于开挖宽度有限，其影响也是可以控制的。影响的程度与范围，取决于众多因素。对于浅埋、超浅埋隧道式开挖工程，主要取决于开挖方式、断面跨度、导坑形式、机具、支护方式与时机、构件刚度、回填、地面载荷(动、静载)、岩土体性质及地下水抽排等。

据实测研究，隧道式开挖引起的地面沉降，其横剖面一般呈盆状，大体上用可概率积分曲线来描述。

对于浅埋和超浅埋隧道式开挖引起的地面沉降，其最大下沉值大致由开挖空间支护前的下沉、地下水抽排引起的下沉以及开挖空间支护后的下沉等构成。这些下沉可通过采取一定的减沉措施减少到最小程度。从北京、上海和广州等城市的地铁施工实例结果看，北京地铁“复一八线”两侧高大建筑物累计下沉量最大仅为 2.5 mm，北京地铁西单车站正上方累计地表最大下沉量也未超过 30 mm；广州地铁有一段隧道横穿市区主干道天河路，隧道顶距路面 7 m，地层为饱含水细砂层，地下密布有供水管、污水管及电缆线，地面昼夜车流量约 12 万辆，还有载重 30~60 t 大型集装箱运输车快速通过。开挖后，据对 128 个测点观测，最大下沉为 20.7 mm，低于国际上地面沉降控制标准。

根据国内外浅埋开挖实践，地面减沉的措施有：

(1)围岩预加固。为了加固软弱和松散岩、土体，一般采取导坑或全断面预注浆。对于

软弱或破碎岩体，采用单液或双液压力预注浆；对于松散土体，采用单液或双液高压旋喷预注浆。

(2)强力支护。包括预支护、提高支护构件刚度及壁后充填等。预支护有管棚和插板两种方法。管棚钻孔深度受导坑尺寸限制，可兼作注浆管，适用条件广泛。插板需用千斤顶顶进，具有防水效果，但不能用于卵石地层。及时支护可以有效减少支护前的下沉。锁脚锚管是用于分步支护构件基础的稳定，为下部开挖与支护安装创造良好条件，减少上部支护构件的沉降。提高支护构件刚度可以减少支护后的下沉。壁后充填是减少支护构造与岩土体之间空隙的有效措施，在一次支护和二次支护后采用小导管注浆法进行充填。

(3)分步开挖，及时支护。实践证明，分步开挖、及时支护可以有效地减少围岩及地面下沉。例如北京长安街过街道，跨度大(开挖跨度 11.6 m)、超浅埋(表土厚度仅 0.6~1.0 m)、有动载、地下管线多，为了减少地面下沉，采用“中洞法”分步施工，地面下沉减到 24 mm，效果良好。

(4)降水—回灌技术，是治理地下水和减少地面下沉的有效方法，已在北京地铁施工中推广应用。一般是“浅抽深灌”或“前抽后灌”。据北京地铁“复一八线”实测，采用此法后其两侧高大建筑物下沉未超过 2.5 mm。

值得研究的是，近年来我国试验成功的“高水速凝材料”，具有快速固结含水砂层的性能。如能在地下工程中进行试验，对于阻隔地下水渗入施工空间，将具有良好的应用前景。

5 国外地下岩土工程开挖技术的新进展

(1)全过程机械化。从护坡、土方开挖、结构施工，包括暗挖法施工的拱架安装、喷射混凝土、泥浆配制和处理等工序的机械化，同时采用计算机技术进行监控，从而保证了施工安全、快速施工和优良的工程质量。

(2)盾构法得到较大发展。近 30 年内英、美、法、日等国大量采用盾构施工技术，日本已生产盾构近万台，用于地铁、铁路、公路，水工及管网施工，已出现双联、三联、四联盾构，能完成三跨地铁车站，开挖宽度达 17 m。日本正设想设计直径 80 m 的盾构，在地下建造人造太阳和住宅区。

(3)微型盾构和非开挖技术已广泛应用。主要用于建造各种直径的雨、污水、自来水管和电缆管道。微型盾构就是直径 2 m 以下的盾构。刀盘掘进，遥控和卫星定位控制方向和坡度，然后安装管片。非开挖技术就是采用微型钻机，通过切割轮成孔，退回钻杆后安装管线或电缆。

(4)预砌块法施工技术。拱圈是在土方开挖后采用拼装机安装，管片上留有注浆孔，衬砌拼装完成后，由注浆孔向壁后注浆，堵塞空隙，增强围岩与衬砌的共同作用。法国用此法施工的最大单拱跨度达 24.48 m。

(5)预切槽法施工技术。意、法等国制造了一种地层预切槽机，采用链条沿拱圈将地层切割出一条宽 15 cm，长 4~5 m 的槽缝，然后向槽缝内喷射混凝土，并在其保护下开挖土方，做防水层及二次衬砌，形成隧道。

(6)顶管大管棚法。修建地铁车站时，在顶管内灌混凝土，形成大管棚，再在其保护下进行暗挖施工。

(7)微气压暗挖法。就是在具有 1 个大气压以下的压缩空气环境下，按照“新奥法”原理进行施工。优点是可以排出地下水，保证工作面干燥；由于气压存在，可减少地面沉降；还可降低衬砌成本。

(8)数字化掘进，又称计算机化掘进(Data drilling, Computerised drilling)，应用于硬岩工程的开挖。在数字化掘进时，钻杆的推进是程序化的，从一个洞到另一个洞也是自动的。掘进机手可以同时管理 3 套钻杆，其作用是监督钻杆的运动，必要时予以调整。孔位、孔深和掘进序列预先已在掘进机的计算机软件中安排，掘进方向由激光束控制，实现了孔的严格定位，从而可以实现掘进工艺的最优化以及曲线隧道的掘进。数字化掘进的优点是：控制隧道

掘进的超挖；实现掘进方案的优化；消除了工作面上的人工测量。

作者简介 刘天泉 教授，院士，1927年生，1958年毕业于波兰克拉科夫矿冶学院采矿系，获硕士学位，1959年起至今，在煤炭科学研究总院从事地下开挖影响理论与控制技术研究工作。地址：北京市和平里煤炭科学研究总院，邮码：100013。

作者单位：刘天泉（中国工程院院士，煤炭科学研究总院）

钱七虎（中国工程院院士，总参军事科学技术委员会）

参 考 文 献

- 1 城市地下空间开发利用设计与施工技术.中国建筑科学研究院，1998(8)
- 2 钱七虎.可持续城市化与地下空间开发利用.世界科技研究与发展，1998(10)
- 3 邵根大.北京地下铁路建设中的最新的技术进步.北京地铁建设，1994(5)
- 4 侯景岩等.北京地铁工程降水一回灌技术研究.北京地铁建设，1996(4)
- 5 洪伯潜等.地下工程特殊施工技术.能源与矿业工程学部学术报告汇编，1998
- 6 傅同雷.从广州地铁施设中探求防止地面下沉的方法.北京地铁建设，1996(3)