

123

城市地下工程实用技术

李相然 岳同助 编著

中国建材工业出版社

内 容 提 要

本书是一部比较全面地介绍城市地下工程建设技术的实用性专门著作。内容包括：城市地下工程的类型与建设特点、城市地下工程的规划与布局、城市地下工程勘察技术、城市地下工程的结构分析与设计、城市地下工程施工技术、城市地下工程地质环境效应与防治技术、城市地下工程的内部环境及环境设计技术、城市地下工程内部灾害特点及防灾技术、城市地下工程的防水、防潮与除湿、城市地下工程建设中经济与管理问题分析。

本书内容新颖，资料翔实，重视实践，可读性强，可供从事城市建设管理、城市规划、城市市政工程建设、国防与人防建设设计与管理、水利水电和矿山建设等专业的技术人员和管理干部参考，也可作为高等院校土木工程专业的教材或教学参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

城市地下工程实用技术/李相然编著. -北京：中国建材工业出版社，2000.7
ISBN 7-80159-018-X

I. 城… II. 李… III. 城市建设-地下工程-技术 IV. TU9

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 32816 号

城市地下工程实用技术

李相然 岳同助 编著

*

中国建材工业出版社出版 (北京海淀区三里河路 11 号)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京丽源印刷厂印刷

*

开本：787×1092 毫米 1/16 印张：19.75 字数：460 千字

2000 年 7 月第 1 版 2000 年 7 月第 1 次印刷

印数：1—3000 册 定价：38.00 元

ISBN 7-80159-018-X/TU·016

前 言

随着城市化进程加快，城市人口高度集中，生产和交通工具密集。使有限的城市空间资源不断超荷，城市用地严重不足，城市环境问题日益严重。近年来的地下空间和城市建设方面的专家学者一致认为，现代城市的建设，除了建造高层建筑，使城市向空中发展外，开发利用地下空间，向地下发展是必然趋势，日本、法国、德国、美国、英国等国家，为解决大城市中交通、商业、电力、通讯、停车场、上下水道等过密化的问题，已经开始把大量的城市设施向地下转移，城市地下建筑已经向更广泛的方向发展。早在 80 年代，国际隧道协会（ITA）就提出“大力开发地下空间，开始人类新的穴居时代”的口号；1990 年，国际隧协的调查结果表明，地下空间利用在本世纪末将达到高潮；1991 年 12 月，在东京召开的城市地下空间利用国际会议上，与会代表认为，从构成城市建筑物的发展历史看，19 世纪是桥的世纪，20 世纪是高层建筑的世纪，未来的 21 世纪是人类开发利用地下空间的世纪；美国明尼苏达大学地下空间中心主任雷·斯特林也认为，“随着土地使用压力和公众对拥有一个更为清洁环境的要求日益突出，人们将越来越多地利用地下搞建设”；1997 年在加拿大魁北克召开的第七届地下空间利用国际会议，将地下空间——明天的室内城市，作为主要议题；1999 年 9 月在中国西安召开的第八届地下空间利用国际会议，探讨了地下空间利用的跨世纪议程与展望。顺应时代潮流，许多国家已将地下空间开发作为一种国策，日本提出了向地下发展，将国土扩大 10 倍的设想，美国 1974~1984 年用于地下工程设施的投资额为 7500 亿美元，占基本建设投资的 30%。目前，一些发达国家已经将地下工程建设，作为城市建设的重要内容。

我国地下空间利用有悠久的历史和丰富的经验，60 年代的人防工程建设，已经提供了巨大的地下空间资源，近年来，为适应城市发展，相继开发利用城市地下空间资源，随着新技术、新方法、新材料的发展，先进施工机具的不断问世，各种施工方法的改进，高级防水材料的涌现，以及工程地质学、岩土力学和工程力学理论研究新进展，为城市地下工程的发展创造了条件，使地下空间的开发利用得到了较快的发展，地下空间规划和开挖技术得到进一步提高。根据专家咨询，对我国城市地下空间利用进行研究结果表明，我国在 2000 年后将进入大规模开发利用地下空间的时代。因此，根据我国国民经济发展规划，确定城市地下空间利用实施规划，研究城市地下工程规划建设技术，是一件极为重要的大事，具有重要的理论与实际意义。

本书资料的积累与整理先后经历了四年多时间，并经过三次为土木工程系学生主讲地下工程课的修改补充，在编写时，力图创立一种系统完整的框架，既探讨地下工程规划建设的新理论，又研究地下工程规划建设的新技术和新方法，还分析当前地下工程的类型与特点，使其成为一部较全面介绍城市地下工程的实用性专门论著，成为从事城市建设管理、城市规划、城市市政工程建设、人防建设设计与管理、水利和矿山建设等部门的技术人员和管理人员的重要参考书，也可以成为学校有关专业的教材。

本书内容共 10 章, 不仅论述当前我国城市地下工程的主要类型与建设特点, 如城市地下交通工程、城市地下居住工程、城市地下市政管线工程、城市地下贮库工程、城市地下工业工程、城市地下公共建筑工程、城市地下人防工程, 还详细研究了城市地下工程的规划、勘察、设计、施工、环境改善和防灾、防水与除湿等一系列技术问题。内容全面新颖, 可读性强。

本书的编著出版, 自始至终得到中国建材工业出版社李书田编辑的大力支持和帮助。编写过程中, 西安工程学院胡广韬先生, 中国地质大学张威恭先生给予许多指导与建议; 西安建筑科技大学侯继尧先生, 清华大学童林旭和李仲奎先生, 中国科学院武汉岩土力学研究所郭见扬先生, 同济大学胡玉银博士等提供了许多宝贵的资料; 烟台大学土木工程系姜继圣教授、邢纪波教授、江允正教授、周新刚教授、孙淑贤副教授等给予许多的帮助和指导; 烟台大学土木工程系 95 级学生刘忠波、任永道、张耀堂等为本书的资料整理做了许多工作; 潍坊市公路局养护工程处岳同助工程师协助编写了本书第 9 章。烟台大学的党政领导在本书编写出版过程中给予了大力支持, 在此谨表真挚谢意。在本书中引用了许多书刊的图、表、公式、定义等等, 有的在各章节中注有出处, 有的在参考文献中列出, 在此向引用的参考文献的作者致以谢意。

尽管编著者对本书的内容和体系反复推敲、研究, 但限于有关这方面的资料不足, 加之作者水平有限, 疏漏、错误之处在所难免, 恳请各位专家、同行、读者提出宝贵的批评和修改意见。

编著者

1999 年 10 月于烟台大学

绪 论

人类利用地下空间有着悠久的历史,本世纪 70 年代以来,随着世界各国在现代化建设中城市化步伐的加速,人们开始致力于城市地下空间的逐步大规模开发。联合国自然资源委员会 1982 年会议决议指出:地下空间是人类潜在的和丰富的自然资源。80 年代国际隧道协会(ITA)提出“大力开发地下空间,开始人类新的穴居时代”的口号。顺应时代潮流,许多国家将地下空间利用作为一种基本国策,开始较大规模的地下空间开发利用。

0.1 基本概念

地球是一个圈层结构的球体,地球表面是地壳,再往深处即为地幔和地核。地球表层为一层很厚的岩石圈,岩层表面风化为土壤,形成不同厚度的土层,覆盖着陆地的大部分。岩层和土层在自然状态下都是实体,在外部条件作用下才能形成空间。

地下空间(underground space)是在岩层或土层中天然形成或经人工开发形成的空间。天然地下空间,是与溶蚀、火山、风蚀、海蚀等地质作用有关的地下空间资源,按其原因为喀斯特溶洞、熔岩洞、风蚀洞、海蚀洞等,天然地下空间可以作为旅游资源加以开发利用,也可以作地下工厂、地下仓库、地下电站、地下停车场,战时亦可作为防空洞利用。人工地下空间,包括两类,一是因城市建设需要开发的地下交通空间、地下物流空间、地下贮存空间等,另一类是开发地下矿藏、石油而形成的废旧矿井空间。按现有资料统计,改造利用已经没有价值的废旧矿井,用作兵工厂、军火库等相对来说,投资少见效快,变废为宝,是充分利用地下空间资源的好途径。

地下建筑(underground buildings and structures)是建造在土层或岩层中的各种建筑物(buildings)和构筑物(structures)。地面建筑的地下室部分,也称地下建筑;一部分露出地面,大部分处于岩石或土壤中的建筑物或构筑物,称为半地下建筑;地下构筑物一般是指建在地下的矿井、巷道、输油和输气管道、输水管道、水库、油库、铁路和公路隧道、野战工事等。

地下工程(underground engineering)是建在地下的各种工程设施。随着国民经济的发展,地下工程的应用越来越广泛,城市地铁、公路、水电站、仓库、商场、体育馆、工厂等许多工程都安排在地下,某种场合下还必须安排在地下。现代地下工程发展迅速,类型多样,按其用途分为地下交通工程、地下人防工程、地下国防工程、地下贮库、地下工业工程、地下商业工程、地下农业工程、地下居住工程、地下旅游工程、地下宗教工程、地下物流工程。

0.2 地下工程的历史沿革

人类对地下空间的利用经历了一个从自发到自觉的漫长过程。推动这一过程的，一是人类自身的发展，二是社会生产力的发展和科学技术的进步。从某种意义上讲，地下空间利用的历史是与人类文明史相呼应的。概括为五个时期：

远古时期 从出现人类至公元前 3000 年的远古时期，人类就开始利用天然洞穴作为居住之用。在北京西南郊周口店村龙骨山发现的北京猿人头骨和使用火的遗迹，说明距今 50 余万年前的原始人类曾居住在自然条件比较好的天然岩洞，成为人类防寒暑、避风雨、躲野兽的处所。日本也发现有 2~3 万年前的古人类居住洞穴，如帝释峡洞窟群、权现山洞窟群、圣岳钟乳洞等。在欧洲、美洲、西亚、中东、北非等地，都有一些穴居的遗迹，但年代已不很久远。

古代时期 从公元前 3000 年至 5 世纪的古代时期，人类进入了铜器和铁器时代，劳动工具的进步和生产关系的改变，使奴隶社会中的生产力有了很大发展，导致在其鼎盛时期形成空前的古埃及、希腊、罗马，以及古代中国的高度文明，这时地下空间的利用也摆脱了单纯的居住要求，而进入更广泛的领域，期间的几千年中，遗留至今的或有历史可考的大型地下工程很多，如公元前 2650~2500 年前后埃及建造的金字塔，实际上是用巨大石块堆积成的墓葬用地下空间，在开罗近郊的胡夫金字塔，又叫齐奥普斯金字塔，形体为正方锥形，四面正向方位，塔高原为 146.7m，由于陷蚀，塔高现为 137m，底边各长 232m，是用 230 万块，重为 2.5t 的石块干砌而成，建造这个金字塔历时 30 年；前 22 世纪巴比伦地区的幼发拉底河底隧道；我国秦汉时期（公元前 221 年至公元 220 年）的陵墓和地下粮仓，已具有相当技术水准和规模，公元前 206 年建成的中国秦始皇陵，据《水经注》记载，该陵“斩山凿石，旁形周围 30 余里”。结合已发掘的兵马俑坑群可以判断，此陵可能是中国历史上最大的地下陵墓。

中世纪时代 从 5 世纪至 14 世纪的中世纪时代，在欧洲进入了封建社会的最黑暗时期，这时地下空间的利用基本处于停滞状态。中国在该时期地下空间的开发多用于建造陵墓和满足宗教建筑的一些特殊要求。如在南北朝至五代的几百年中（大约为 4 世纪中叶至 10 世纪中叶），兴建了大量佛教建筑，地下空间的利用为发展和保存这些宗教艺术珍品提供了有利条件。在陡峭的岩壁上凿出的洞窟形佛教建筑称为石窟寺（grotto），其中最著名的有山西大同的云冈山石窟（北魏），河南洛阳的龙门石窟（北魏），甘肃敦煌的莫高窟（从北魏到隋、唐、宋、元各朝），甘肃麦积山石窟（从后秦、北魏直到明清）等。1971 年，在洛阳市东郊挖掘出一座地下粮仓，是隋朝建造，一直使用到唐朝。库区面积 600×700m，已经发掘出的半地下粮仓已近 200 个，其中第 160 号仓直径 11m，深 7m，容量 445m³，可存量 2500~3000t。

近代时期 从 15 世纪开始的近代时期，欧美的产业革命，诺贝尔发明黄色炸药，成为开发地下空间的有利武器，地下空间的开发利用进入了新的发展时期。17 世纪火药的使用和 18 世纪蒸汽机的应用，使在坚硬岩层中挖掘隧道成为可能，如 1613 年建成的伦敦水道，1681 年修建了地中海比斯开湾的连接隧道（长 170m）。19 世纪以后建成的隧道就更多，1843 年伦敦建造了越河隧道，1845 年英国建成第一条铁路隧道；1871 年，穿过阿尔卑斯山，连

接法国和意大利的长 12.8 千米的公路隧道开通。

现代地下工程的迅速发展 现代地下空间的利用,在本世纪 60 和 70 年代达到了空前的规模,在一些发达国家,地下空间的开发总量都在数千万到数亿立方米,主要用于建造各种交通隧道、水工隧道、大型公用设施隧道和地下能源贮库,城市地下空间的利用也占有一定比重。该时期典型地下工程主要有:地下铁道建设,到 90 年代初,世界上已有近百个城市修建了地下铁道,线路总长达 3000 多 km,长 10km 以上的就有 41 条,我国大瑶山铁道隧道,长 14295m,自 1981 年 11 月开始施工,于 1987 年 5 月建成;日本青函隧道连接北海道与本州,总长 53850m,穿越津轻海峡,其海底长度达 23.3km,1971 正式施工,1988 年 3 月投入运营;英法海峡隧道总长 50km,海底长度 37km,1987 年动工,1994 年 5 月投入运营。公路隧道建设,著名的公路隧道主要有瑞士的圣哥达隧道,长 13.32km,法国的弗雷瑞斯隧道,长 12.7km 等。地下电站建设,现代地下电站发展迅速,其中地下水力发电站的数目,全世界已超过 400 座,其发电量达 $45 \times 10^3 \text{kW}$ 以上。城市地下空间开发利用,成为城市建设的重要内容,一些工业发达国家逐渐将地下商业街、地下停车场、地下铁道及地下管线等结为一体,成为多功能的地下综合体。日本东京新宿副都心、大阪的梅田地下街,均达到现代化建筑水准。据统计资料,1970~1979 年,相当于百万人口的地下设施长度为 3.1km/百万人口,其中挪威每百万人口拥有地下设施长度达 19km,瑞典 9.5km,美国 4.2km,日本 2.8km。

为了合理开发利用地下空间,不断交流与提高地下工程规划设计与施工技术,地下空间利用的学术研究也相继开展起来,1970 年,联合国经济合作与发展组织在华盛顿召开了隧道工程咨询会议,有 19 个国家的代表团参加,这个会议标志着地下施工开凿技术国际隧道工程学会的建立;1976 年,美国地下空间学会成立,在美国明尼苏达大学成立了地下空间研究中心,出版了《underground space》杂志,为双月刊,刊登世界各国在地下空间资源开发与利用方面的成就与经验;1977 年,在瑞典首都斯德哥尔摩召开了地下空间国际学术会议 (rockstore 77),第一次交流了与会各国开发地下空间的经验;1980 年 6 月,联合国自然资源、能源和运输中心及瑞典政府各部(农业、商业、工业、住房和规划)及学术团体(岩石力学学会、隧道工程学会、工程地质学会)共同发起组织下,召开了有 40 个国家和国际组织的官员代表团,约 1000 人参加的国际地下空间学术会议 (rockstore 80),这次会议就环境保护、廉价仓库和节约能源等方面进行国际间的学术交流,会上产生了一个致各国政府开发利用地下空间资源,为人类造福的建议书,并建议在开发利用地下空间资源中进行国际技术合作的经验交流。1988 年 9 月,在中国上海举行第三届地下空间与掩土建筑国际学术会议;1999 年 7 月,在中国西安召开第八届地下空间国际会议,会议中心议题是地下空间的跨世纪议程与展望,邀请世界各国和地区的建筑师、工程师、考古学家、地理学家和经济学家等,研究与展望地下空间发展的跨世纪议程。这些国际间的交流与合作,极大地促进了地下空间的开发与利用。

0.3 我国地下工程建设的现状

我国地下工程建设历史悠久,早在远古时代,我国开始利用天然山洞和建造地下洞穴,用于抵御大自然的侵袭和防止野兽的攻击,如北京周口店发现的北京猿人,他们是生活在

40~50 万年以前的人类,就居住在龙骨山上的山洞中;在我国北部干燥的黄土地带,几千年以前我国人民就建造了许多供居住的窑洞和储粮的地下设施,有许多特别成功的经验,至今在黄土高原地区仍有不少农民居住在不同类型的窑洞中。我国北方的菜窖、羊肉窖也普遍使用,酒窖的历史悠久,特别享有世界盛誉的贵州茅台酒、四川五粮液酒,都是在窖中酿造出来的。在本世纪 30~40 年代的抗日战争中,各地都还建设了许多防空洞和地道。我国古代地下空间的利用,有许多独特的创造,为以后地下工程建设积累了丰富的经验。

60 年代,主要是人防工程和地铁建设。该时期我国建设了许多掩蔽工事、地下工厂、储库和军事设施等,由于长期坚持和有比较稳定的资金来源,人防工程已形成相当的规模,人防工程的总量已超过几千万 m^2 。1965 年,北京开始建设地下铁道,一期工程全长 22.4km,车站 17 座,于 1971 年投入运营。60 年代我国上海市还修建了打浦路水底公路隧道。

70 年代至 80 年代,我国致力于人防工程的平战结合及公路隧道、地下商业街及地铁建设。1978 年,全国第三次人防工作会议提出了人防工程平战结合,体现战略效益、社会效益与经济效益的方针,使大量的人防工程在和平时期得到使用,据不完全统计,目前全国已利用人防工程约占总面积的 23.9%,年营业额近 11 亿元,纯利润达 1.3 亿元。1986 年,国家人防委与建设部联合召开人防建设与城市建设相结合工作座谈会,促进了人防工程建设和城市建设的发展,使人防工程体系成为城市地下空间开发利用的一个组成部分,开创了城市地下空间利用的新局面,特别是结合火车站、站前广场的修建,修建了许多广场下的地下商场,其效益一般都较好。80 年代,上海建成延安东路水底公路隧道,全长 2261m,采用直径 11.3m 超大型网格水利机械盾构掘进机施工,1984 年开工,1989 年 5 月竣工通车,建成了当时世界上第三条盾构法施工的长大隧道。同一时期上海还建成电缆隧道及其它市政公用隧道等 20 余条隧道,总长达 30 余 km。1985~1987 年,上海建成黄浦江上游引水隧道一期工程,日引用量达 $2.30 \times 10^6 t$,社会效益十分显著。1987~1989 年,全国有 46 条规模较大的地下商业街,在规划、设计、施工或利用中。天津地铁、广州地铁、南京地铁在该时期进入设计与施工准备阶段,宁波开始了公路隧道的修建工程。

90 年代,我国地下工程进入城市地铁、地下综合体、地下共同沟建设的新阶段。进入 90 年代,我国城市地下交通与市政设施加快了修建速度,已开始大规模地开发利用地下空间。城市地下空间利用的主要形式归纳如下:交通空间,是至今城市地下空间利用的主要类型,主要是为发展城市交通事业,提高城市内车辆运行时速,减少对城市的空间污染和环境干扰而建造的地下铁道、地下汽车交通道、地下步行道等,如上海、天津、广州、青岛等城市相继修建的地铁工程,其中天津已建成 7.4km 地铁,上海建成的地铁一号线达 14.4km,1989 年、1996 年建成的延安东路隧道及延安东路复线隧道;商业、文娱空间,是为改善人们的生活和居住环境而建造的,有地下商场、地下商业街、地下电影院、展览馆、运动场等,如结合火车站、站前广场的修建,滨海城市建设了许多广场下的地下商场,规模较大的地下商业街;业务空间,是指办公、会议、实验、医疗等各种业务活动空间,如滨海城市许多高层建筑的地下室,多被开发利用为各种业务活动空间;物流空间,是指各种城市公用设施的管道、电缆等所占用的地下空间及各个系统的一些处理设施,如上海浦东开发区已建成的首条地下共同沟 (underground common conduit),上海黄浦江石油输送隧道,及其各滨海城市修建的地下污水处理厂、地下变电站、地下水库、地下雨水、污水水泵站、电力、电缆隧道等等;生产空间,是利用地下的特殊环境,建设的地下工厂,主

要用于精密性仪器的生产；仓储空间，地下环境最适宜于贮存物质，许多城市大量利用已建的人防工程，用来贮存粮食、食品、石油、药品等，具有方便、安全和节省能源等特点。

总之，进入90年代，我国城市地下工程的网络体系已经建成，多在地表—30m以内修筑地下工程，可以预见，随着经济的发展，我国城市地下工程将进入蓬勃发展的新时期。

0.4 城市地下工程建设展望

0.4.1 未来城市发展与地下工程建设

0.4.1.1 城市发展引起城市用地短缺

城市是人们生活和生产聚集的地方，随着城市人口的增加，城市化进程加快，生产和交通工具的发展，导致城市问题增加与矛盾激发，其焦点主要是城市地面用地的短缺。现在城市地面用地的使用程度已经饱和，若继续采用修建高层建筑或提高城区地面建筑密度，或采用向郊区外延扩展的办法，则会更进一步使城市环境恶化，给城市管理带来一定困难。所以，不论是为了现有城市状况的改善，还是为了未来的发展，都不能走单纯扩大城市用地的道路，而必须寻求新的途径，使得既能扩大城市空间，又不多占用土地；既节约能源，又能使城市生活现代化；既保护和利用城市空间，又充分利用新技术革命的成果。一些发达国家城市发展的实践证明，合理开发和利用城市地下空间，建设地下工程，不仅对于缓解城市中的多种矛盾是一个有效的措施，而且对于未来城市空间的扩大、资源的节省、环境质量的提高等，都能发挥积极的作用。

0.4.1.2 城市发展对城市功能提出了更高的要求

随着城市的发展，对城市功能也提出了愈来愈高的要求，这主要体现在城市规模和聚集的程度，即对城市功能的要求是围绕着商品交换和改善文化生活环境以及减少受自然和战争灾害的损伤扩展的。在许多极其重要的市区，由于对城市居民周围环境注意太少，致使许多人由于缺少当地工作的机会，而迫使接受费时的每天需长距离旅行的工作。城市居民强烈要求创造一个安全、健康的环境，改进各种社会关系，减少因工作而进行的旅行，保证足够的供应，保护传统的文化遗产等，从这些方面来看，富有创造性的建设地下工程，对解决上述矛盾，满足这些功能方面，具有独特之处。

0.4.1.3 城市发展将影响到城市自然环境

根据推测，下世纪初，在城市已聚集的地区，对水、食物、房子以及其他服务设施的需要量几乎是现在需要量的一倍，这样，要求增加城市的基本空间是现在的一倍，这无疑会影响到城市的自然环境，主要表现在如下方面：（1）维持城市生活必须的资源受到迅速消耗，燃料的需要量增加，而其供应有限，空气和水受到污染，而导致经济上的损失与浪费；（2）忽视农业用地，造成邻近城区农业用地减少，农业本身技术的落后，成为城市化的牺牲品；（3）环境污染超出了陆地范围，世界范围内的水体受到污染，减少了人对食用蛋白质生产的需求量，空气污染使农作物受到损害，影响人的健康；（4）减少核燃料的供应以及核废料的处理已上升为国际性重要问题。我国城市环境质量现状不容乐观，在全世界污染最严重的10个城市中，中国就占了6个。大城市的空气污染程度通常比世界卫生标准高出3~4倍。地下空间是至今尚未开发和未被污染的巨大资源之一，它可以有效促进城

市化的合理发展，在一定程度上减少上述环境问题。

0.4.1.4 城市地下工程具有强大的生命力

从全世界范围看，地下空间虽未被很好地开发利用，但它确是一巨大的资源，目前城市内地下空间的开发深度一般已达30m左右，有人估计，即使只开发城市总面积的1/3地下空间，就等于全部城市地面建筑的容积。这样估计虽然比较大胆，但说明地下空间资源潜力很大。在城市建设地下工程，还可以保存农业用地，减少城市能源供应量，美化城市环境，提高城市贮备能力和防卫能力，具有较好的社会效益、环境效益和经济效益。

0.4.2 未来城市地下工程建设的原则与发展方向

近40年来，城市以前所未有的速度发展，人们在解决城市矛盾，考虑21世纪的城市发展时，逐渐认识到开发城市地下空间，与关于建立宇宙城市、海洋城市、海底城市的一些想法相比较，是最现实的途径。童林旭教授认为：未来城市地下工程建设的基本原则是：人在地上，物在地下；人长时间活动在地上，短时间活动在地下；先中心区后边缘区；先浅部开发后深部开发，先易后难。

根据上述原则，今后城市地下工程建设的方向为：

第一，浅层和次浅层空间全面充分的开发建设

浅层和次浅层地下空间，是指地表以下10m以内和10~30m的空间。这部分空间特点如下：使用价值最高，开发最容易；距地表较近，人员上下比较方便，也较容易保障内部的安全；自然光线传输到这样的深度不太困难。

最适宜安排在浅层地下空间的城市功能是商业、文化娱乐、体育、业务等人员较多和较集中的活动。在平面规划上，这些内容安排在与城市主要街道相对应的地下空间中，对大量人员的进出、集散比较方便和安全，与地面街道上的一些活动可以联系起来，同时，可较方便地使用地下交通系统的乘降或换乘设施；由于与地面建筑完全脱开，在结构和施工上都较为简单。为了进一步改善城市环境和景观，还可将部分地面街道改建成运河，形成一个水路系统，扩大水面面积，使地面空间进一步田园化。

第二，在次深层和深层空间建立城市公用设施的封闭性再循环系统

次深层空间是指地表以下30~100m的空间，100m以下为深层空间。尽管当代科学技术已相当发达，然而城市生活基本上处于一种开放性的自然循环系统中，主要表现在太阳的热能多数是被动利用，在夜间或阴天时，就因太阳能不能大量贮存而无法使用；水资源主要靠大气降水，城市从自然界取水，使用后排入江、河、湖、海；能源多为一次使用；大量城市废弃物不经处理和回收而堆积在城郊，对环境造成二次污染等，这种情况应在未来城市中逐步得到根本解决。

为了次深层和深层空间，服务于未来城市建设，日本学者尾岛俊雄在城市地下空间中建立封闭性再循环系统(recyclesystem)的构想，把开放性的自然循环转为封闭性再循环，用工程的方法将多种循环系统组织在一定深度的地下空间中。例如，大面积集中供热、供冷系统，对于空气的使用来说就是一个封闭循环；使用后的污水经过处理重复使用，从水的利用来看，就形成了封闭系统（现称为“中水道”系统）；城市垃圾经过焚烧或气化后，回收其中的热能和肥料，也是一种封闭循环；将电力系统和某些生产过程中散发的余热、废热回收，再重复用于发电或供热；将天然的热能、冷能、雨水等贮存起来供需要时使用等，

都可以形成一个封闭循环系统。该系统的建立,对未来城市的发展,无疑具有十分重要的意义。

第三,在深层空间建立水和能源贮存系统,以及危险品存放系统

在未来城市中,生活质量的提高在很大程度上取决于水资源和能源的状况,在水资源普遍不足和常规能源逐渐枯竭的情况下,利用深层空间的大容量、热稳定性和承受高压、高温和低温的能力,大量贮存水和能源是十分有利的。有一些对城市构成威胁的危险品,如核废料、剧毒品等,存放在地面上可能引起灾害,还要占用大量土地,存放在深层地下空间中,既安全又不占地面土地。

近年来,日本在研究大深度地下空间的开发利用中,提出了多种关于如何在未来大城市中开发利用地下空间的构想,包括一些建设地下城市的建议。如清水建设公司提出的方案是:在东京以皇宫为中心,直径40km范围内,以方格网的形式组成一座地下城市,深50~60m。在网格的每个节点建造一个扁球形建筑物,每隔10km建一个大型的,直径100m,地下8层,其中有车站、办公室、购物中心、停车场、能源供给设施,建筑面积4万m²;在10km之间,每隔2km布置一个小型扁球体,直径30m,分3层,其中布置会议厅、图书馆、小型体育馆、小游泳池、儿童活动中心等。大小扁球体的顶部,均有开向地面的天窗,下面的共享大厅中有阳光和植物,房间则围绕大厅布置。网格的直线部分为综合廊道,布置交通线路和公用设施管、线。

日本藤田工业公司的宏伟蓝图是将在200m深的地下建设一座六角形的生物城,城市交通网络依靠地下管线连接,这座命名为艾丽斯亚的地下城将于2100年建成。地下城分三部分,市区,将包括青翠的地下林荫大道和露天的如罗马建筑大厅式的广场(禁止汽车通行),这个林荫大道和广场将包括购物中心、文娱活动中心和保健中心;办公区,供商业活动之用,设有更多的商店、旅店、停车场,在每个办公中心上空,将设有日光圆屋顶,以减轻人们的幽深恐怖感,快速的电梯或地铁将通往底层。住宅区一部分人可用交通工具垂直地上下,另一部分人,则可自郊区垂直驶入地下街;基础设施区,与市区和办公区隔离,将包括发电、区域传输、废物回收和污水处理等装置。地下城与地面世界一样,既有白昼也有黑夜,四季分明,气候变化有序,地下城不受地面日益严重的环境污染困扰,信息、交通、给水、排污、供电、商业、服务网点等高效能的基础设施一应俱全。

0.4.3 城市地下工程建设前景展望

随着城市化过程加快,城市人口高度集中,生产和交通工具密集,使有限的城市空间资源不断超荷,城市用地严重不足,城市环境问题日益严重。近年来的地下空间和城市建设方面的专家学者一致认为,现代城市的建设,除了建造高层建筑,使城市向空中发展外,开发利用地下空间,向地下发展是必然趋势,日本、法国、德国、美国、英国等国家,为解决大城市中交通、商业、电力通讯、停车场、上下水道等过密化的问题,已经开始把大量的城市设施向地下转移,城市地下建筑已经向更广泛的方向发展。早在80年代,国际隧道协会(ITA)就提出“大力开发地下空间,开始人类新的穴居时代”的口号;1990年,国际隧协的调查结果表明,地下空间利用在本世纪末将达到高潮;1991年12月,在东京召开的城市地下空间利用国际会议上,与会代表认为,从构成城市建筑物的发展历史看,19世纪是桥的世纪,20世纪是高层建筑的世纪,未来的21世纪是人类开发利用地下空间的世

纪；美国明尼苏达大学地下空间中心主任雷·斯特林也认为，“随着土地使用压力和公众对拥有一个更为清洁环境的要求日益突出，人们将越来越多地利用地下搞建设”^①；1997年在加拿大魁北克召开的第七届地下空间国际会议，将地下空间——明天的室内城市，作为主要议题。顺应时代潮流，许多国家已将地下开发作为一种国策，日本提出了向地下发展，将国土扩大10倍的设想，美国1974~1984年用于地下工程设施的投资额为7500亿美元，占基本建设投资的30%。目前，一些发达国家已经将地下工程建设，作为城市建设的重要内容。

地下工程建设通常与城市规模、人口、购买力、国民经济产值等密切相关，在不同时期内，其开发项目的规模与类型是不同的，根据发达国家的经验，国民人均收入在200~300美元之间，城市地下工程建设已成为经济发展的需要；国民人均收入在500~2000美元之间，城市地下空间得到全方位的开发；人均收入超过2000美元，城市地下空间得到较高水平的开发。我国当前人均国民产值仅300多美元，从总体上看，城市似不具建设地下工程的能力，但由于历史的原因，我国一些大城市，人口、交通拥挤和环境污染的程度已不亚于60年代发达国家的城市，我国土地资源十分紧缺，为了缓解城市矛盾，在一定程度上逐步地有条件地建设地下工程，从战略上看是必要的，而且在经济上有些大城市也已具备了一定的能力。

中国地下空间利用有悠久的历史和丰富的经验，60年代的人防工程建设，已经提供了巨大的地下空间资源，近年来，为适应城市发展，相继开发利用城市地下空间资源，随着新技术、新方法、新材料的发展，先进施工机具的不断问世，各种施工方法的改进，高级防水材料的涌现，以及工程地质学、岩土力学和工程力学理论研究新进展，为城市地下工程的发展创造了条件，使地下空间的开发利用得到了较快的发展，地下空间规划和开挖技术得到进一步提高。根据专家咨询，对中国城市地下空间利用进行研究结果表明，中国在2000年后将进入大规模开发利用地下空间的时代。因此，根据我国国民经济发展规划，确定城市地下空间利用实施规划，是一件极为重要的大事。在研究未来城市地下工程建设方向时，原则上地下工程的建设必须同城市发展与经济发展相适应，应使人的居住和工作留在地上自然环境中，而将其他各种活动移到地下去，但随着时代的进步，城市地下空间的利用将更为广泛，与自然环境的差别将更为缩小，未来城市地下工程建设有着广阔的前景。

^① 世界刮起地下建设风，参考消息，1994，11，29（6）。

第1章 城市地下工程的类型与建设特点

现代地下工程发展十分迅速，各种典型工程著名浩瀚。城市建设上向内涵发展，积极进行地下工程建设，已经成为世界各国大城市的发展趋向，是拓展城市空间的重要途径。

地下工程的类型多样，按照城市地下工程的用途、存在环境和建造方式及开发深度，地下工程的类型划分如下：

(1) 按地下工程的用途分类

地下工程的用途非常广泛，到目前为止，主要表现在如下方面：

地下交通工程 是至今为止，城市地下工程建设的主要类型，是为发展城市交通事业，提高城市内车辆运行时速，减少对城市的空间污染而建造的地下铁道、地下轻轨交通、地下汽车交通道、地下步行道、水底隧道及地下停车场等。

地下人防工程 是为战备需要而建设的地下人员掩蔽部、地下指挥所、地下救护医院和地下备用电站等。例如，第二次世界大战留给世界的不只是战壕遍布和弹坑累累，也促使不少国家为自己的领袖构筑地下安全宫，希特勒、丘吉尔、罗斯福和斯大林都有既能保障人身安全，又能指挥作战的地下安全宫，斯大林地下安全宫底部离地面 37m，美国人称之为地下 12 层摩天大楼。

地下国防工程 主要指为国防需要而建设的地下飞机库、地下潜艇基地、地下导弹发射井、地下弹药库及地下军事指挥所等。如设在美国科罗拉多州的北美防空指挥作战中心，是一个地下网状建筑，由 11 座独立式的大楼组成（最高三层），室内面积 18500m²，全部建设在夏安山深处，从生活到作战指挥的各种设施一应俱全，是一个充满神奇色彩的地下世界。

地下贮库工程 地下环境最适宜于储存物质，为使用方便、安全和节省能源而建造的地下贮库，可以用来贮存粮食、食品、油类、药品等，具有成本低、质量高、经济效益好，且节约大量地上仓库用地等特点。联合国经社理事会（ESC）1983 年 6 月召开的自然委员会第八届会议通过的决议中指出：“经社理事会认识到，地下空间特别是在贮存水、燃料、食物和其它商品，以及在供水、污水处理和节能方面的潜力”。

地下工业工程 在地下进行某些轻工业、某些手工业的生产是完全可能的，特别是对于精密性生产的工业，地下环境就更为有利。目前，地下工业工程常见的主要类型有地下采矿工程、地下核电站、地下精密机械厂、地下酿造厂、地下煤炭气化工程和地下水力发电厂等。

地下商业工程 是为改善人们的生活环境而建造的地下商场、地下商业街、地下电影院和戏剧院及音乐厅、地下展览馆等。这些建筑即使在地面上，也多采用人工通风照明，若将其设置在地下，使用功能与地面无异，相反还受地面噪声、尘灰及气候的影响。

地下农业工程 主要是指为农业服务的地下灌溉渠道及一些地下种植场等。

地下居住工程 有窑洞式民居工程和覆土住宅及地面建筑物的地下室住宅等。

地下旅游工程 有天然洞室改建工程、洞中园林工程等。

地下宗教工程 是为宗教活动而建设的地下宫殿、宗教艺术石窟和地下墓穴等工程。

地下市政管线工程 是指各种城市市政公用设施的管道、电缆等工程，

(2) 按地下工程的存在环境及建造方式分类

按地下工程的存在环境及建造方式，将地下工程分为两类，即岩石中的地下工程和土中的地下工程。

岩石中的地下工程 岩石中的地下工程包括如下三种方式：一是现代城市在岩石中建设的各种上述地下工程；二是开发地下矿藏、石油而形成的废旧矿井空间加以改造利用而形成的地下工程，据现有资料统计，改造利用已没有价值的废旧矿井，用作兵工厂、军火仓库等，相对来说投资少，见效快，变废为宝，是充分利用地下空间资源的好途径；三是利用和改造天然溶洞，在改造利用天然溶洞方面，我国广西、云南、贵州、四川及湖南等省均积累了丰富的经验，节省了大量开挖岩石的费用和时间。

土中地下工程 根据建造方式分为单建式和附建式两类，单建式地下工程，是指地下工程独立建在土中，在地面以上没有其它建筑物；附建式地下工程，是指各种建筑物的地下室部分。我国上海、天津市，均有很厚的土层，其中天津市的土层达1000余m，这些城市建设的地下工程，均为土中地下工程。

(3) 按地下工程的开发深度分类

地下工程按开发深度分为三类，即浅层地下工程、中层地下工程和深层地下工程。浅层地下工程，一般是指地表至-10m的深度空间建设的地下工程，主要用于商业、文娱和部分业务空间；中层地下工程，是指-10m至-30m的深度空间内建设的地下工程，主要用于地下交通、地下污水处理场及城市水、电、气、通讯等公用设施之用；深层地下工程，主要指在-30m以下建设的地下工程，可以建设高速地下交通轨道，危险品仓库、冷库、油库等地下工程。

目前，国外一些大城市已向深层地下空间发展，如日本东京，浅层和中层地下空间已被高层建筑的地基基础和现有的地下设施占领，不能再开发利用了，但由于高昂的地价和城市设施更新的需要，已对-50m以下的深层开发建设引起极大重视

城市地下工程与地面工程相比，其主要特点表现在如下方面：

(1) 地下工程建设的无限性与制约性

地下空间资源的开发从理论上说几乎是无限的，因为地下空间是地球岩石圈空间的一部分，地球岩石圈的平均厚度也有33km，国外有人估计，在30m深度范围内，开发相当于城市总面积的1/3的地下空间，就等于全部城市地面建筑的容积，说明地下空间资源的潜力巨大，这对于未来城市的建设，无疑是极为珍贵的资源。^①因此，在一定意义上说，地下工程建设是无限的。

同时，地下工程建设要受到许多条件的限制，如地质情况，已有地下设施，已有建筑物较深基础，土地的所有权与地价，施工技术，经济能力，开发后的综合效益及对城市的影响等。因此，城市地下工程建设又有一定的制约性，必须经过深入调查、科学论证与综合规划。

^① 李相然，城市建设的新型国土资源，中国建设报，1996. 1. 8。

(2) 地下工程建设的层次性与不可逆性

如上所述,地下工程有浅层、中层和深层之分,即地下工程具有层次性特点。城市地下工程建设总是从浅层开始,然后根据需要逐步向深层发展。

另一方面,地下工程建设一旦实施,往往是不可逆的,一旦形成将不可能回到原来的状态,很难改造或消除,要想再开发也非常困难,它的存在势必影响将来附近地区的使用。

地下工程建设的层次性与不可逆性特点,要求对地下工程建设必须进行长期的分析预测,进行分阶段、分地区和分层次开发的全面规划,在此基础上,有步骤、高效益的开发利用。

(3) 地下工程的致密性与稳定性

地下空间是岩石圈空间的一部分,岩石圈空间的主要特点与位于其上的水圈和大气圈不同,它具有致密性和构造单元的长期稳定性,因此地下工程受地震的破坏作用要比地面建筑轻得多。日本的研究总结指出,岩石洞穴在地震条件下是高度安全的,比地上结构具有更多优点。地下30m以上处地震加速度约为地表处的40%,当地政府都把地下空间指定为地震时的避难所。

1.1 城市地下交通工程

城市交通(Urban transport),通常指人流的活动和物质的运输,简称客运交通和货运交通,它是城市赖以生存和发展的基本功能之一,是城市基础设施的重要内容。

城市地下交通系统包括两大类:即地下动态交通系统和地下静态交通系统。

地下动态交通系统,包括地下铁路、地下公路(含车行立交)、地下人行通道等。有些发达国家,如日本正在向地下悬浮列车(利用地球引力)、地下飞机航空等新领域进军。

地下静态交通系统,一般指地下停车库,按其使用性质不同,可进一步划分为地下社会停车库和地下自备停车库。本节就目前常见的地下交通设施,如地下铁路、地下公路和地下停车场等特点作以论述。

1.1.1 地下铁路

世界上第一条地下铁路是在1863年伦敦建成之后,城市地下铁路建设有了很大发展,从1863年至1963年的100年间,世界上共有20多个城市修建了地下铁路,而到1982年底已有80座城市有地铁运行,到1990年全世界已有近百个城市运营或正在修建地铁,其线路总长度达3000余km。目前,世界地铁总里程最长的城市依次为:纽约、巴黎、伦敦和莫斯科,全世界有85座城市建成地铁,总长达5500多km。纽约的地铁交通网总里程为416km,其中地下部分为232km,车站493个。莫斯科地铁已有9条呈辐射状的支线和一条环线组成,总长度300多km,有150多个车站,连接市区7个火车站、10多个广场,以及其它各个重要场所。据统计,莫斯科市一年的客运量54亿人次,其中地铁客运量为23亿人次。^①如果没有地铁,莫斯科的地面交通状况将不堪设想。

^① 王宪举,莫斯科的地下宫殿,中国青年报,1997年6月9日。

我国的地铁建设始于60年代,北京地铁1965年修建,1971年投入运营,一期工程全长22.4km;天津地铁1970年动工,1980年通车;香港地铁1975年开始修建,1980年全部完工并投入运营,全长43.2km,其中8.8km为地面架空线路,沿途38个车站,现有三条行车线路;上海地铁一号线全长16km已经运营,目前,地铁二号线正在建设中。香港地铁由自动列车、自动售票和电力系统等系统组成,是香港的主要交通工具之一,是世界上公认的设备完善、自动化程度较高、管理先进的典范,是最繁忙、乘客人数最多的地铁之一。^①目前我国仅有4座城市建成地铁,通车线路仅122km,全国现有100万以上人口的城市33座,其中22座城市(几十条线路)正在积极规划、筹建或扩建地铁和轻轨。

随着城市交通的发展和地下铁路的建设,近年来,一些城市形成了城市快速轨道交通系统(Urban rapid rail transist system),其定义为:凡以电能为动力,采用轮轨运行方式的交通系统,旅行速度 $>30\text{km/h}$,单向客运能力超过1万人次/小时,这样的交通系统即为城市快速轨道交通系统(童林旭,1994),它主要由地面铁路、高架铁路和地下铁路组成。

地下铁路有很多优点,主要表现在如下方面:运行速度快,运送能力大;准点、安全;对地面无太大影响(噪音小,无震动,不妨碍城市景观);不存在人、车混流现象,没有复杂的交通组织问题;不侵占地面空间;环境污染小。但是,地铁建设在地下施工,条件困难,工期长,工程建设费用较地面高。因此,对地下铁路建设必须做好可行性研究。

1.1.1.1 地下铁路建设的前提条件分析

地铁建设投资巨大,往往一个地铁车站就需耗资人民币十几亿,而利用相同资金建设高架道路,至少能修建2km长,因此,真正制约地下铁路建设的因素是经济性问题。童林旭教授(1994)认为,城市地下铁路建设的必要前提概括为如下三点:

(1) 城市人口多少

从世界上78个已有地铁运营的城市看,超过100万人的城市最多,有61个;人口在50~100万有地铁的城市有13个,少于50万人的仅有4个。在13个人口不到100万的城市中,多数已接近100万。因此,城市人口100万,应作为城市地铁建设的宏观前提。

(2) 城市交通流量情况

按城市人口多少评估该城市是否需要修建地铁只能是一种宏观前提,我国人口超过100万的特大城市已有30个,其中一些省会城市,是在建国后的40年中发展起来的,道路系统较完善,机动车辆不多,地面上各种原有的交通方式的潜力尚未充分发挥出来,虽然人口已超过百万,但除市中心区交通问题较多外,从总体上看,交通问题并未严重到必须修建地铁才能解决的地步。因此,有些专家认为,城市交通干道是否存在单向客流量超过2万人次的情况(包括现状和近期预测),是判断是否修建地铁的“分水岭”。同时,即使存在这一情况,也只能是在采取增加车辆或拓宽道路等措施,也无法满足客流量的增长时,才有必要考虑建设地铁。

(3) 城市地面、上部空间进行地铁建设的可能性

我国城市与发达国家的大城市相比,在交通等城市问题上存在如下不同点:国外发达国家城市中心区促使交通问题加剧的主要原因之一,是城市中心区土地的超强度开发,建筑容量、商业容量、业务容量过分膨胀,使得原有道路框架不胜重负,其地面、上部空间

^① 王维旗,地下通途,光明日报,1997年3月13日。

已在可能的技术条件下充分开发，调整余地不大；我国城市中心区在交通问题上往往表象上与国外发达城市相似，但实质上存在一点不同，我国的地面、上部空间并未充分开发，地面存在很大的改造调整余地，几乎大多数发展中国家都有这种特点。

上述不同点说明，国情的不同使得处理城市交通问题时所使用的方法不尽相同。我国的许多城市，完全可以通过调整城市路网和用地结构，将城市的交通矛盾予以妥善解决。因此，在地铁建设之前，应调查研究城市用地建设情况，考察是否能够通过地面和上部空间改造，缓解城市交通矛盾。如可行，则地铁建设除能获得足够经济可行性外，均不应予以支持。

修建的地下铁路应成为城市快速轨道交通系统的组成部分，为了降低整个系统的造价，应尽量缩短地下段的长度。

1.1.1.2 地下铁路路网的基本类型及其布置原则

(1) 地下铁路路网的基本类型

地下铁路是城市建设的重要组成部分，地铁路网的规划应纳入城市发展的总体规划。根据国内外已建成的地铁线路，可将地铁路网归纳成如下几种类型：

单线式 仅在客运最繁忙的地段，重点地修一、二条线路，如意大利罗马、荷兰的阿姆斯特丹均为这种形式。

单环式 在客流量集中的道路下面设置地铁线路，并闭合成环，便于车辆运行，减少折返设备。英国格拉斯哥城市即建成这种形式。

多线式 城市具有几条方向各异或客流量大的街道，可设置多线式线路网，这几条线路往往在市中心区交汇，这样，便于乘客自一条线路换乘另一条线路，也有利于线路的延长扩建。图 1-1 为美国波士顿路网示意图。

蛛网式 该路网由多条辐射状线路与环形线路组合，其运送能力很大，可减少旅客的换乘次数，又能避免客流集中堵塞，减轻象多线式存在的市中区换乘的负担。图 1-2 为莫斯

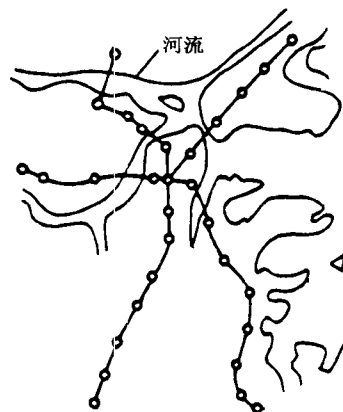


图 1-1 多线式地铁线路图

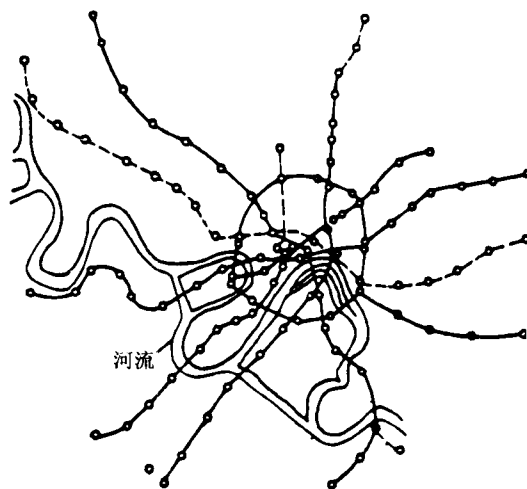


图 1-2 蛛网式地铁线路图