

DIXIAGONGCHENG

地下工程

主 编 张庆贺

副主编 朱合华 黄宏伟



- 地下工程的规划与建筑设计
- 地下结构的计算原理和设计方法
- 地下工程的施工
- 地下工程监理
- 地下工程设备
- 灾害与防护
- 计算机技术在地下工程中的应用

同济大学出版社

地下工程

主 编 张庆贺

副主编 朱合华 黄宏伟

同济大学出版社

前 言

本书得到同济大学教材、学术著作出版基金委员会资助,为同济大学“十五”规划教材。

本书可作为土木工程专业高年级学生开设的选修课教材,它克服了原先小专业知识覆盖面窄的缺点,适应社会对综合素质复合型人才的需求,是地下建筑专业方向为其他专业方向学生专门开设的一门精炼型课程。本书可以用作岩土工程、工民建、铁路工程、道路工程、桥梁与隧道工程、水利水电工程等专业科技工作者及大专院校师生、培训班学员的参考用书。

本书第一章概略介绍地下工程发展的历史和前景、地下工程分类方法、地下工程设计计算理论的演变、地下工程施工、防灾、计算机应用的新技术。第二章通过工程实例介绍地下工程规划设计,建筑及室内环境设计原理和方法。第三章重点阐述地下工程结构选型,荷载计算、计算模型、断面设计及构造设计,并有工程实例。第四章简要介绍地下工程施工组织设计,施工技术管理知识,对地下工程各种施工工法及工艺作了较详细的论述,附带介绍了与施工相关的施工监测和现场保护的方法及特点。第五章介绍地下工程监理的概念、内容和方法。第六章简要介绍了地下工程施工、使用阶段的供配电、照明、给排水及通风设备的设计。第七章介绍地下工程如何防御各种自然灾害、战争和人为破坏。第八章介绍地下工程CAD、结构计算软件应用、施工多媒体仿真监控技术。第二、第三、第四章要求熟练掌握内容,学生学完本课程,有能力从事一般性地下工程建筑规划设计、结构计算,并会组织地下工程施工;第一、第八章要求掌握其中主要内容;第五、第六、第七章要求学生作一般了解,以便毕业后工作遇到类似的问题,也不会感到陌生而无从下手。

本书由张庆贺、朱合华、黄宏伟主编,杨林德主审。第一章由张庆贺、杨林德执笔;第二章由王璇、王宝勇执笔;第三章由朱合华执笔;第四章由黄宏伟执笔,山东科技大学李大勇参加了第四章部分章节的编写;第五、第六、第七章由张庆贺执笔;第八章的第二、第三节分别由汤永净、李晓军执笔,第一、第四节由胡向东执笔。本书由张庆贺做了统稿和校对。同济大学地下建筑系地下建筑工程研究所的同志对本书编写提纲提出了许多宝贵的意见;土木工程学院各位领导对本书编写提出了很好的指导思想和建议;同济大学出版社的领导、编辑、校审人员为本书的出版付出了辛勤劳动。此外,邓忠义、严长征、高卫平等研究生为本书打印、校对、编排做了许多工作。为此,在本书付梓之日,作者对于为本书编写出版给予支持和帮助的所有同志表示衷心的感谢。

在本书的编写过程中,作者虽然力求通俗易懂,便于使用,突出重点,内容精炼,兼顾系统性、准确性、科学性和实用性,但因时间和水平有限,书中有不当和错误之处,敬请同行专家和读者批评指正。

作 者

2004年10月15日

于上海同济大学

目 录

前 言	1
第一章 绪 论	1
1.1 地下空间开发的历史与发展前景	1
1.2 地下工程分类	10
1.3 地下工程设计计算方法的进展	12
1.4 地下工程施工技术的进展	20
1.5 地下工程防灾	24
1.6 计算机技术应用	25
复习思考题	26
第二章 地下工程的规划与建筑设计	27
2.1 概述	27
2.2 地下工程(城市地下空间)规划设计	30
2.3 地下工程建筑设计	36
2.4 地下工程室内环境和装饰	54
复习思考题	59
第三章 地下结构的计算原理和设计方法	60
3.1 概述	60
3.2 地下结构的荷载	61
3.3 地下结构选型与构造	72
3.4 地下结构设计模型与计算方法	75
3.5 地下结构计算原理和设计方法中的新进展	94
3.6 工程设计实例	99
复习思考题	99
第四章 地下工程的施工	100
4.1 概述	100
4.2 施工组织设计	100
4.3 施工技术管理	106
4.4 岩石地下工程施工方法	109

4.5	软土地下工程施工方法	128
4.6	地下工程的辅助工法	156
4.7	地下工程施工监测和环境保护	167
	复习思考题	169
第五章	地下工程监理	171
5.1	概述	171
5.2	监理的特点、内容和方法	178
5.3	地下工程监理实例	190
	复习思考题	190
第六章	地下工程设备	191
6.1	供配电及照明	191
6.2	地下工程给排水	205
6.3	地下工程的通风与环境控制系统	212
6.4	压缩空气供应	228
	复习思考题	231
第七章	灾害与防护	233
7.1	灾害分类	233
7.2	地下工程地震灾害防护	234
7.3	火灾防护	243
7.4	地下工程的防水	250
7.5	施工诱发环境灾害的预测和防护	261
7.6	战争灾害的防护	267
	复习思考题	274
第八章	计算机技术在地下工程中的应用	275
8.1	计算机技术的发展	275
8.2	地下工程计算软件	281
8.3	地下工程 CAD	288
8.4	地下工程施工监控软件	292
	复习思考题	297
参考文献		298

第一章 绪 论

1.1 地下空间开发的历史与发展前景

一、地下空间开发的历史

1. 上古时期(古人类出现~公元前 3000 年)

人类在地下空间利用方面有着悠久的历史。早在几十万年前,北京猿人已利用周口店的天然溶洞作为栖身之处。远在上古时期,我们的祖先就已修建了黄土窑洞和地下墓穴。

黄土窑洞是我国历代劳动人民在长期生活实践中,认识、利用、改造黄土的智慧结晶。它起源于古猿人脱离巢居而“仿兽穴居”时期,历经上百万年。考察古猿人居住天然岩洞到人工凿穴的历史,可以追溯到五、六十万年前的陕西蓝田猿人和六千年前的西安半坡村穴居时代。距今 1 万年前,被称为“新洞人”和“山顶洞人”的两种古人类居住地址也在北京周口店龙骨山自然条件较好的天然岩洞中。我国黄河流域已发现安磁山的窑址和窑穴,典型的村落遗址有临潼姜寨、郑州大和村等,住房多为浅穴,房中央有火塘。同时期在日本也发现有人类居住的洞穴。

2. 古代时期(公元前 3000 年~公元 5 世纪)

公元前 3000 年以后,世界进入铜器和铁器时代,劳动工具的进步和生产关系的改变,导致生产力有很大的发展,出现了古埃及、古希腊、古罗马及古代中国的高度文明。国外最早的典型地下工程是著名的埃及采矿穴和罗马的下水道。公元前 2180 年~2160 年,巴比伦城幼发拉底河下修建了人行隧道。

我国从夏、商、西周起由原始氏族社会进入奴隶制社会。河南郑州一带发掘出炼铁和制陶器的作坊,在其附近有长方形的半穴居遗址,显然是从事手工业的奴隶居所,另外还发现建在地面上的较大房屋的遗址,有板筑墙和夯土地基,显然是奴隶主住房。秦汉出现砖瓦,建筑材料生产和建筑技术发展有很大进步,楼阁、宫廷建筑的规模更加宏伟。陵墓、墓穴已由半圆形筒拱结构发展到转弯砖顶。拱圈砌筑技术不断改进,为以后窑洞民居采用土坯拱、砖石拱奠定了基础。公元前 206 年建成的秦始皇陵,从已发掘出的兵马俑坑群看可能是我国历史上最大的地下陵墓工程,被称之为世界人类历史上的第八大奇迹。据史记记载:“始皇初即位,穿治骊山。及并天下,天下徒送诣七十余万人,穿三泉,下铜而致椁,宫观百官奇器珍怪徒满之。令匠作机弩矢,有所穿近者辄射之。以水银为百川江河大海,机相灌输,上具天文,下具地理,以人鱼膏为烛,度不灭者久之。”我国考古发掘的长沙马王堆汉墓、徐州中山靖王之墓等墓室建造水平和技巧可令今人叹为观止。

3. 中世纪时期(公元 5 世纪~14 世纪)

欧洲经历了千年文化低潮,在此期间地下工程的开发处于停滞状态。隋、唐时期,是我国封建社会发展的高峰时期,也是中国古代建筑发展的成熟时期,已经能建造宏伟的宫殿、

庙宇和墓室。黄土窑洞大量用于官府的粮仓。公元7世纪,我国隋朝在洛阳东北建造了面积达 $600\text{ m} \times 700\text{ m}$ 的近295个地下粮仓,其中第160号仓直径11 m,深7 m,容量 445 m^3 ,可存粮250~300 t;自4世纪中叶佛教传入我国后,到了魏晋及南北朝时期,石工技术达到了很高水平,当时凿崖造石窟寺庙之风遍及各地,相继建成著名的云冈石窟、龙门石窟、敦煌莫高窟,以及甘肃麦积山和河北邯郸响堂山石窟等,这些石窟岩洞形成一个大型的雕刻艺术空间。“永宁寺其地为三国时魏人曹爽的故宅,经始之日,于寺院西南隅的爽窟室,下入地可丈许,地壁悉垒方石砌之,石作精细,都无所毁”(《水经注疏》)。

4. 近代时期

从15世纪开始,欧洲出现文艺复兴,产业革命、科学技术开始走在世界的前列,17世纪黄色炸药的使用和18世纪蒸汽机的使用,使地下工程迅速发展。1613年英国建成伦敦地下下水道,1681年修建了地中海比斯开湾长170 m的连接隧道,1843年伦敦建成越河隧道,1863年英国在伦敦建成世界第一条城市地下铁道,1871年穿越阿尔卑斯山,连接法国和意大利的长12.8 km的公路隧道开通。到20世纪90年代初,世界上已有100多个城市修建地下铁道,目前线路总长度将达5 000 km(其中地下线路近3 000 km)。世界各国重视城市地下空间的开发与综合利用,修建了大量的地下存储库、地下停车场、地下商业街、地下文体设施 and 用地下管线等连接为一体的地下综合建筑群体,这在缓解城市用地紧张矛盾和城市现代化建设过程中起着越来越重要的作用。

地下商业街和地下街自20世纪30年代开始出现,日本、加拿大、法国等国家的地下商业街较为有名。日本第一条地下街建成于1932年,至1985年共建有76处地下街,总面积达 $820\,000\text{ m}^2$,其中27.4%用于交通通道,29.3%用于商店,26.6%为地下停车场。东京八重州地下街长约400 m,宽80 m,分为三层,总面积约 $73\,000\text{ m}^2$ 。加拿大的蒙特利尔市坐落于一个小岛上,人口290多万,降雪期达6个月。该市为了节省空间,方便市民,修建长达17 km、建筑面积 $910\,000\text{ m}^2$ 的地下街。其中有142家餐馆,1 024个商铺、24家电影院、4家剧院、26家银行。巴黎市中心列·阿莱广场的地下街道总面积 $400\,000\text{ m}^2$,除商铺外,还有大型歌剧院。

第二次世界大战中,参战国都大量修建了防空袭地下工事。到1946年,德国已建143座坑道式工厂。日军在太平洋上的比托岛、帛疏岛、硫磺岛等岛修建了大量的坑道工事和掘开式工事。帛疏岛工事共九层,美军登陆后约1 000名日军退守坑道长达半年之久。中国抗日军民在河北省焦庄及冉庄等地构筑四通八达的地道工事,在战争中发挥了显著的作用。

朝鲜战场上,在第三次战役中,中国人民志愿军共构筑1 200 km的坑道工事,形成了以坑道为骨干的防御阵地,每天伤亡人数减少41.6%。抗美援朝指挥坑道工事建于1951年,建筑面积约 $15\,790\text{ m}^2$ 。它的出入口建有防护坑道、防护门,在长约1 600米的隧道内,主体工程自然防护层厚度为420 m,防护门上部防护层亦厚达240 m。防护工事内通信、防护、通风等建筑设备完善。

我国北部黄土高原具有沟谷纵横、梁峁密布的地貌特点,干旱少雨的气候条件,以及黄土自身具有强度高、稳定性好的力学特征(无支护直立边坡高度可达10~20 m,甚至更高,且能长期稳定,如黄土柱、黄土天生桥等),适合建造窑洞民居。窑洞可节约居住用地,不占或少占耕地。其突出优点之一是保温隔热,冬暖夏凉,其温度和相对湿度的稳定性好,有益

于人体的健康,住在窑洞里舒适,能延年益寿,深受人们的喜爱。因此,在黄土高原地区窑洞民居一直有很大发展,在小河两岸、沟谷之中、梁峁周围分布大量村镇居民等,并有“窑洞之乡”之称。一些地方 70%~90% 的居民选择窑洞。目前黄土高原地区约 200 多个县(市),其中,约 3 千万~4 千万人口定居窑洞。

自 1887 年我国在台北——基隆窄轨铁路线上的石丘陵铁路隧道(长 261.4 m)建成后,到 1949 年共建造 331 条隧道,总长度 100.1 km,其中只有 238 条隧道投入运营。截至 1997 年,在我国的铁路线上已建成并正式交付运营的隧道大约有 5 200 座,总长度 2 457.89 km。若包括南昆、南疆、青藏等临时路线上的隧道,共建 5 500 余座,总长度超过 2 700 km、占铁路网总长度的 4.69%。中国铁路隧道占世界铁路隧道的总长度的 1/5,居世界第一位(日本为第二位,意大利居第三位)。

20 世纪 50 年代修建宝成铁路时,由于当时不具备修建长隧道的技术能力,不得不在山区采用迂回展线方法,在山顶附近建一座 2~3 km 的老秦岭隧道,穿越分水岭后再迂回下山。现在看来,隧道缩短了,线路拉长了,不仅工程费用增加,而且弯道多,坡道陡,线路质量低,运输能力不大,形成铁路的咽喉地段。1980 年修建衡广复线,废弃了沿河绕道迂回展线的方案,决定采用线路拉直、长隧道过大瑶山的方案。1981 年 11 月正式开工,1987 年 12 月完工,用 73 个月,建成长 14.295 km 的双线隧道。长隧道方案避开了沿河绕道多处不良地段,避开了多处小半径曲线弯道。据测算与沿河绕道相比,线路缩短了 14.9 km,节约工程费 9 000 万元人民币。大瑶山隧道采用深孔光面爆破技术,既充分发挥大型液压钻机的效率,又减少了工序频繁倒换,大大提高了掘进速度。引进并掌握了四壁液压钻孔台车和液压钻机、大型装渣机、大型通风机、喷混凝土三联机、模板台车等,形成了双线铁路隧道施工机械化一条龙,使平均单口月掘进速度达 144 m。成功地推广了锚喷支护“新奥法”大断面开挖施工技术。20 世纪 90 年代修建南昆铁路米花岭隧道,遇到许多新的技术挑战。这条隧道全长 9 383 m,是我国目前已建成隧道中最长的单线隧道。该隧道采用门架式台车开挖,出渣采用梭式矿车的轨道系统运输。米花岭隧道各工作面累计折合进尺,实现月成洞 768 m 的全国最好成绩。除门架式液压凿岩台车为引进瑞典进口设备外,其他设备均以国产为主。实践证明,米花岭隧道施工机械化配套技术,形成了我国单线铁路隧道机械化施工一条龙的配套模式,并得到推广。南昆铁路家竹青隧道号称天下“第一险洞”,高地应力、高地热、多瓦斯、多处地层塌方,地质条件恶劣。20 世纪 90 年代中采用“新奥法”成功地建成家竹青隧道,这标志着我国钻爆法隧道施工技术达到了世界先进水平。

1997 年 12 月 18 日,在西安至安康铁路的秦岭隧道采用了全断面隧道掘进机(TBM)。秦岭隧道为两条平行的单线隧道,全长 18.46 km,最大埋深 1 600 m。山体受多种地质构造影响,出现了多种不良的地质灾害。岩石的平均抗压强度 150 kPa,最高达 300 kPa 以上。受全断面施工的影响,隧道断面设计为半径 8.8 m 的圆形,采用复合式衬砌。Ⅰ线隧道的进口和出口各配置一台德国威尔特(Wirth)公司设计制造的开敞式硬岩全断面掘进机(TB 850/1000E)。掘进机的掘进、出渣实现全面机械化,减少了超挖和对围岩扰动,极大地改善了施工作业环境,开挖速度快,劳动力省,劳动强度低。秦岭隧道所采用的掘进机,其主机有破岩、装载、转载的功能。后配套辅助设备有出渣、支护、超前钻探、注浆加固、激光导向、防灾、环保等功能。其机械本身也配有环保功能状态显示设备,可以及时反映机械的作业状态及故障情况,指示操作管理人员及时围护和处理。秦岭隧道使用掘进机成功建造,使

我国铁路隧道修建技术又上升到一个新台阶。

据不完全统计,目前我国已建成 400 余座公路隧道,总长度已超过 100 km,隧道长度千米以上的有 40 多座,其中一半以上是最近几年建成的。1994 年开通的成渝高速公路中梁山隧道,缙云山隧道,把我国公路隧道单洞长度提高到 3 000 m 以上,并且在处理塌方、瓦斯、地下水、通风和营运管理与交通监控技术等方面取得了突破性进展,为我国今后修建长大公路隧道积累了宝贵的经验。近几年来,我国已经修建三车道大断面的公路隧道,例如已建成的北京八达岭高速公路潭峪沟隧道;正在施工的重庆市川黔公路的真武山隧道。云南楚大高速公路的九顶山隧道上行线长 3 204 m,下行线长 3 190 m,其单洞累计长度达到 6 403 m。川藏公路上的二郎山隧道全长 4 160 m,为我国当前最长、海拔最高的公路隧道,单孔两车道双向行驶,周围气候环境十分恶劣,不可能有效地利用自然风和车辆行驶的活塞风,通风及消防尤为复杂。从 20 世纪 60 年代起我国开始用盾构法施工越江公路隧道,在上海先后建成穿越黄浦江的打浦路、延安东路过江隧道南北线,复兴东路和大连路越江隧道等多条,总长度超过 7 km,隧道内径 10.5 m,单向两车道。上海正在建设的上中路越江隧道,双管圆形隧道,内径为 14.57 m,单管长度超过 1.5 km 以上。

自 1910 年美国建成世界上第一条沉管隧道底特律河铁路隧道到现在,世界上已建和在建各种类型沉管隧道已有 150 多条。沉管隧道预制管段由早期的单层或双层钢壳作为模板和防水结构,过渡到采用钢壳和聚合物防水层相结合。20 世纪 90 年代以后,欧洲国家的预制钢筋混凝土管段基本上以本体自防水为主。1996 年 6 月广州珠江沙面水下公路地铁共用沉管隧道建成通车,揭开了我国使用沉管法建造大断面水域公路隧道新的一页。2001 年建成通车的宁波常洪沉管隧道总长 3 266.85 m,其中包括沉管法隧道 395 m,工作井 20 m,暗埋段 129 m,引道段 509.5 m,收费广场 300 m,地面道路 711.42 m,接线道路 1 201.93 m。工程总投资 4.8 亿元人民币。沉管段横断面为 2 孔 1 管廊。外包尺寸 22.8 m × 8.45 m,每孔净尺寸为 9.2 m × 6.1 m。设备管廊尺寸 5.6 m × 1.4 m,管段底板厚 1 200 mm,顶板厚 1 150 mm,侧墙厚 950 mm,中隔墙厚 550 mm,如图 1-1。整条隧道共分四节段, E₁ 管段长 95 m, E₂、E₃、E₄ 管段各长 100 m。

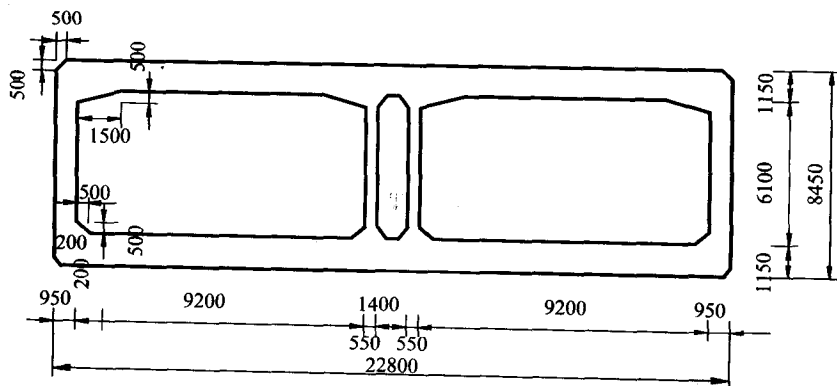


图 1-1 常洪隧道管段横断面图

已经建成的上海外环线越江隧道工程位于距吴淞口约 2 km 的吴淞公园附近,东起浦东三岔港,西至浦西吴淞公园,越江点黄浦江宽 780 m。工程范围为:浦西同泰北路西侧至

浦东严家港,为双向八车道水下公路交通沉管隧道,工程全长 2 870.127 m,其中江中沉放段 724 m,浦西暗埋段 469 m,浦西引道段 270 m,收费广场 550 m,浦东暗埋段 469 m,浦东引道段 149 m,收费广场 550 m,接线道路 531.127 m。浦东收费广场处设有隧道管理中心大楼,浦西全线设三座降压变电所,两座雨水泵房,一座消防泵房,两座江中泵房,并设风塔一座。工程总造价 19 亿元。沉管管段横断面为 $9.55\text{ m} \times 43\text{ m}$,如图 1-2。最大埋深为 33 m,共设七节管段,每节长 100~108 m 不等,设计车速 80 km/h,其规模位居国内之首,亚洲第一。上海外环隧道规模大、工期紧、技术复杂,是集多领域新技术于一体的综合性系统工程。

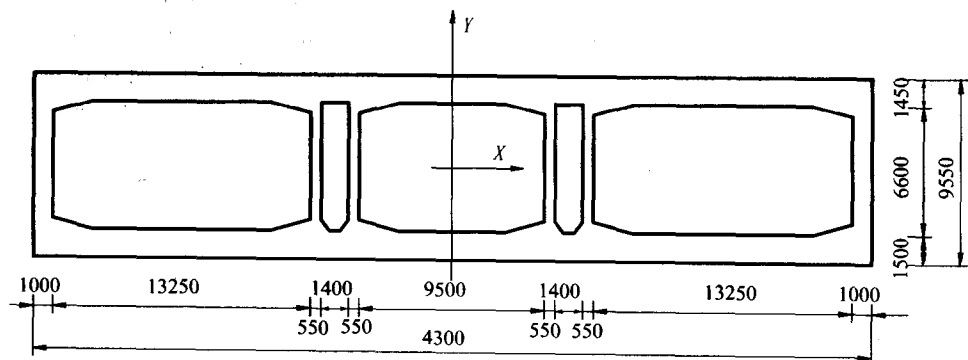


图 1-2 上海外环线沉管断面图

二、地下工程发展前景

1. 城市可持续发展的要求

据预测,本世纪初世界人口将增加到 85 亿,其中 45 亿人口将生活在城市圈范围。到 2010 年世界将有 500 多个百万人以上的大城市,其中 26 个城市达到 1 000 万人以上。首次出现居住在城市的人口比居住在乡村的人口还多。城市人口、地域规模、城市的生存环境和 21 世纪城市可持续发展的战略是当今世界的最热门话题。

城市是现代文明和社会进步的标志,是经济和社会发展的主要载体。伴随着我国城市化的加快,城市建设快速发展,城市规模不断扩大,城市人口急剧膨胀,许多城市不同程度地出现了建筑用地紧张,生存空间拥挤,交通堵塞,基础设施落后,生态失衡,环境恶化等问题,被称之为“城市病”,给人类居住条件带来很大影响,也制约了经济和社会的进一步发展,成为现代城市可持续发展的障碍。如何治理“城市病”,提高居民的生活质量,达到经济与社会、环境的协调发展,成为亟待解决的重要社会课题。

改革开放以后,中国经济高速发展,促进了城市化水平的迅速提高。从 1989 年的不到 20%,提高到 2000 年的 35.7%,2010 年将达到 45% 左右。城市化水平提高表现在城市数量增加,城市规模扩大。根据预测,到 2010 年,中国的城市总数将从目前的 640 个增加到 1 000 个,城镇人口相应达到 4.5~6.3 亿人。又据气象卫星遥感资料判断和测算,1986~1996 年 10 年间,全国 31 个特大城市城区实际占地规模扩大 50.2%。据国家土地管理局监测数据分析,已建城区规模扩展都在 60% 以上,其中有的城市成倍增长。其结果是占用了大量的耕地。我国人多地少,人均耕地占有面积只有世界平均水平的 1/4。城市不能无限制地蔓延扩张,只能着眼于走内涵式集约发展的道路。城市地下空间作为一种新型的国土

资源,适时地、有序地加以开发利用,使有限的城市土地发挥更大的效用,这是必然的趋势。

按照国际标准,城市人口 2 万人/ km^2 属于拥挤情况,我国上海城区人口平均密度为 4 万人/ km^2 ,局部地区为 16 万人/ km^2 。北京城区的四个区平均为 2.7 万人/ km^2 ,均为超饱和状态,位于世界城市人口密度之首。随着城市经济发展和房地产开发,城市建筑和道路大规模建设,使可用于园林绿化面积日益减少,据 1990 年统计,我国城市人均绿化面积只有 3.9 m^2 。上海市 2000 年人均绿地 7 m^2 ,距国家制定的人均 10 m^2 的绿化卫生标准,还有相当的差距。按联合国建议,城市公共绿地应达人均 40 m^2 。莫斯科人均绿地 44 m^2 ,伦敦为 22.8 m^2 ,巴黎为 25 m^2 。我国大中城市与上述要求及发达国家大城市相比,差距更远。

交通拥塞、行车速度缓慢已成为我国许多城市普遍的非常突出的问题。就连新兴的城市深圳也不例外。如北京市主干道平均车速比 10 年前降低 50% 以上,而且正在以每年 2 km/h 的速度递减。市区 183 个路口中,据统计,严重堵塞的达 60%,阻塞时间长达半个小时。交通拥塞的关键在于城市人均道路面积及道路与城市面积比太低。根据 1996 年《国际统计年鉴》资料表明,东京人均道路面积 11.3 m^2 ,道路面积占城市总面积的 15%;巴黎、莫斯科、伦敦、纽约这两项指标分别为 7.32 m^2 (15%), 9.10 m^2 (8.12%), 21.3 m^2 (9.3%), 13.9 m^2 (12.38%)。北京城区人均道路面积 4.4 m^2 ,道路面积占城市面积的 8.4%。上海也是相对落后。上海每公里汽车拥有量为 506 辆,北京每公里汽车拥有量 345 辆,为发达国家大城市相应拥有量的 1 倍乃至数倍。北京快速道路面积居全国之首,立交桥数量占全国城市立交桥之半,即使这样,北京道路面积自改革开放以来仅增加了 60%,而同时期机动车数量增加 10 倍。道路的扩展远远赶不上车辆的增长。发达国家解决城市“交通难”的经验表明,发展以地下铁道为主的高效益、低能耗、轻污染的轨道交通才是根本出路。

完善的基础设施是改善城市环境的必要条件。我国一些大城市城区普遍存在污水排放和污水处理设施陈旧,固体垃圾郊区堆放,供电、通讯、供水、供热公用基础设施落后于城市的扩展和城市人口的增加,必然造成城市环境相应恶化。当前城市大气污染日益严峻,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 40%。城市污水 80% 未经处理排入江河,城市河段水质超过 3 级标准已占 78%,50% 以上的城市地下水受到污染,全国有 7~8 亿人饮用污染超标水。垃圾围城现象普遍,我国年生产生活垃圾 1.46 亿吨,还在以每年 10% 的平均增长率上升。生活垃圾只有 2.3% 被处理,其余只能堆积,堆存量高达 60 多亿吨,占地 30 多万亩。先进国家城市建设的经验之一是把市政公用设施管道汇集,建立便于维修管理的多功能公用隧道——城市共同沟。修建地下垃圾收集管道系统,修建地下垃圾焚烧厂,以减量化、无害化、资源化方式处理垃圾,是城市垃圾的根本出路和解决问题的长远目标,但投资大,周期长,对发展中国家难以承受。因此,在市郊结合部,利用荒地、滩涂修建符合卫生标准的大型地下堆场的解决方案被提了出来。

对于人口和经济高度集中的城市,不论是战争或是自然灾害,都会给城市带来人员的伤亡、道路和建筑被破坏、城市功能瘫痪等重大灾难。众所周知,地下工程具有良好的抗震、防空袭和防化学武器等多种功能,是人们抵御自然灾害和战争危险的重要场所。在城市建设过程中兼顾城市防灾修建大量平战两用的地下工程,使城市总体抗灾抗毁伤能力有所提高,也是实现城市可持续发展的重要内容。

当今发达国家的城市已把地下空间开发利用作为解决城市人口、环境、资源三大危机的重要设施和医治“城市综合症”、实施可持续发展的重要途径。1983 年联合国经济社会发展

理事会通过了利用地下空间的决议,决定把地下空间的利用列入该组织下属的自然资源委员会的工作计划之中。1991年在东京召开的城市地下的空间利用国际学术会议上通过了“东京宣言”,提出了这样一个观点:21世纪是人类地下空间开发利用的世纪。国际隧道工程技术协会提出了“为了更好地利用地下空间”的口号,正在为联合国准备题为“开发地下空间,实现城市的可持续发展”的文件,其中,1996年第22届年会的主题就是“隧道工程和地下空间在可持续发展中的地位”。

2. 地下空间开发规划

城市向三维空间发展,即实行立体化的再开发,是城市中心区惟一现实可行的途径。城市产生之初,其发展总是沿二维延伸,只有当生产力和科学技术的发展使得人类有能力向高空和地下发展时,城市才走上沿三维方向综合发展的轨道。发达国家大城市中心区都曾经先出现向上部畸形发展,而后出现“逆城市化”的教训。由于城市中心区经济效益高,尤以房地产业集中于城市中心区投资,造成城市中心区高层超高层建筑林立,人流车流高度集中。为了解决交通问题,又新建高架道路。高层建筑、高架道路的过度发展,使城市中心区环境恶化,城市中心区逐渐失去了吸引力,出现了居民迁出,商业衰退的“逆城市化”现象。城市发展的历史表明,以高层建筑和高架道路为标志的城市向上发展的模式不是城市空间最合理的模式。人类对于城市空间资源的开发利用,大致经历了以下几个阶段:平面扩展→高空以及浅层地下空间→深层地下空间。在实践中形成地面空间、上部空间和地下空间协调发展的城市空间构成的新概念,即城市立体化再开发。

城市地下空间是不可多得的宝贵资源,必须进行系统科学的规划,不仅要适应当前的发展,还要适应未来长远的发展。城市地下空间开发利用是城市建设的有机组成部分,与地面建筑紧密相连成为不可分割的整体,地下空间规划要做到与地面规划的协调性与系统性,形成一个完整的体系,地上地下协同发展。在城市地下空间的开发利用中,要重点突破、协调发展,以大型骨干项目为纽带,带动地下空间建设的发展。城市地下空间开发不能只搞单一的某一项工程,只考虑单一的某一项功能,而是要综合考虑各方面的需要,建成地下多功能综合体,地下和地上协调一致才能充分发挥作用。一个城市可以先确立几个大的项目,如地铁、地下商城、地下大型公共设施等,竖向分层开发与地面建筑相呼应、相衔接,依次带动其他单体工程的开发。大型项目预留出接口,点线结合,滚动开发,逐步完善,形成由大型工程连带起来的地上地下相互联系的主体网络体系。城市地下空间开发利用都属于地下建筑,它与地面建筑有较大的不同,一旦建成则局部改变了地层结构,并将永久地保存,不像地面建筑那么容易拆除改建。隧道及地下工程建设周期长,投资额大,施工困难大,必须依靠科学技术,按照基本建设的规律和程序进行。

城市地下空间开发利用,是城市经济高速发展和空间容量上迫切需求的客观需要。其标志是人均国民生产总值和城市地价的急剧升值。发达国家开发地下空间的历史表明,当人均国民生产总值超过500美元,才能进入开发利用地下空间的阶段。人均国民生产总值超过1000美元,开发利用地下空间达到高潮。我国现阶段人均生产总值已超过600美元。我国沿海地区人均国民生产总值超过1000美元,上海地区人均国民生产总值已超过5000美元。我国人口众多,土地资源短缺,仅为世界水平的1/3。我国一些大城市人口众多,交通拥挤,环境污染的程度不亚于发达国家20世纪60年代经济高速发展的阶段。进入90年代,我国大城市地价急剧上升。北京三环线以内土地价格达到每平方米万元以上,上海市中

心地段达到每平方米楼面价 3 880 美元。因此,地面建筑计入土地费每平方米造价已大大超过每平方米的地下建筑造价。据调查,我国城市浅层地下建筑造价不到地面建筑造价的 3~4 倍。目前,我国城市地下空间开发不需要支付或支付很少土地费用,因此开发地下空间就具有了很大吸引力。工程实践证明,地下空间开发在我国一些大中城市特别是沿海城市条件已趋成熟,而且是现代城市开发的必然趋势。

城市地下空间是一个十分巨大而丰富的空间资源,如果得到合理开发,其节省土地资源的效果是十分明显的。一个城市的可发展利用的地下空间资源量一般是城市的总面积乘以开发深度的 40%。如取合理开发深度为 100 m,以北京为例,其地下空间资源量为 1 193 亿立方米,可提供 64 亿平方米的建筑面积,将大大超过北京市现有建筑面积。大连市城市空间利用规划纲要(讨论稿)中考虑近期开发浅层地下空间(深度 30 m),其面积为城市建设用地的 30%(道路与绿地建设用),再乘以 0.4,则其城市地下空间经济资源开发量为 5.8 亿立方米,可提供建筑面积 1.94 亿平方米,超过现有大连市房屋建筑面积(5 921 万平方米)。

地下空间开发应做好立体规划,分层开发。地下第一层 3~5 m,布置公共事业管网的干线支线,共同沟。地下二层深度 6~10 m,地下步行商业街,地下停车场,地铁车站,地下文化娱乐厅等。地下三层 10~30 m,配置地下铁道区间隧道,地下河(排水沟渠),立型地下停车场,地下垃圾收集站,加工场。放射性和有毒的固体垃圾,应存放在更深的地层中。

3. 日益发达的地下街

日本城市地下空间利用已达到相当规模。东京、横滨、大阪、名古屋等八大城市,地下铁路营运总里程达 500 多 km。各大城市有地下街 82 处,面积 110 万平方米(含在建工程 17.6 万平方米)。地下机动车停车场 152 所,占停车场总数的 43%,可停车 30 万辆以上,占总停车所的 50%。地下自行车停车场 50 处,可停放车辆 3 万辆以上。49 个城市建有共同沟,总长 300 km。目前,日本正向深层次、多功能的地下空间开发。日本学者尾岛俊雄在 20 世纪 80 年代提出了城市地下空间建立封闭性城市再循环系统设施,变开放性的城市自然循环为封闭的再循环,用工程手段将多种城市循环系统组织在一定深度的地下空间中。提出建立一个深度城市基础设施复合干线建议,干线为直径 10~15 m 的管线、铁路道路的综合廊道,埋深在地下 50~100 m。主干线和相交节点组成若干三角形单元,覆盖整个东京 23 个区的范围。节点间距 2.5~3.5 km,每一个节点处是一个大型的地下构筑物,引入相当的城市功能,形成一个地下综合体。所有的物流管理系统如运输、处理、回收都在这个大循环体系中进行。

自 20 世纪 80 年代以来,我国城市地下空间开发执行平战结合,与城市建设相结合,以地下铁道工程为主题,陆续建成一批经济效益和社会效益明显的地下商场和地下综合体。上海结合地铁 1 号线修建的人民广场、徐家汇地下商业街,既疏散了客流,又方便了居民的购物,沈阳新客站综合开发体,鞍山、西安、石家庄、郑州、武汉、洛阳、大连、长沙等站前广场综合体,西安、吉林、长春、哈尔滨和成都的地下商业街初具规模。哈尔滨市若干个地下商业街连成一体,形成面积为 25 万平方米的地下城。

4. 地下铁道建设方兴未艾

目前世界上许多国家的城市正在建设和筹备建设地下铁道。在发展中国家,随着城市交通日趋紧张,地下铁道逐步得到发展,已有开罗、德黑兰、平壤等 19 个城市运营 730 km 地铁线路,占世界地铁线路总量的 14%。事实证明,地下铁路的运营对这些城市的社会经济

发展起到巨大推动作用,给居民提供了良好的出行条件。结合我国大中城市道路、车辆、客流实际情况,借鉴发达国家解决交通问题的经验,20世纪80年代中期我国大城市交通策略已明确,在大城市发展快速轨道交通体系。城市发展快速轨道交通体系一般指地铁和轻轨铁路运输。必须“上天入地”,实行多层次、多结构的立体化交通。继京、津、沪、穗四大城市后,我国已有约20个大中城市进行了地铁和轻轨交通系统规划,先后提出25项地铁和轻轨项目。如上海地铁2、3、4、6、7、8、9号线,北京地铁复8(4、5、10、9等号)线,广州地铁2、3、4号线,天津地铁1、2、3号及延伸线,青岛地铁1号线、南京地铁1号线一期、深圳地铁1号线等7个城市十几个项目已落实投资,进入施工准备,有的已在全面施工。这些项目总长达150.5 km。沈阳、杭州、成都地铁1号线,广州、重庆、武汉、哈尔滨等15个城市15个项目处于可行性研究,或者策划阶段,其总长达320 km。

香港从20世纪80年代中期开始修建地铁,现在已有荃湾、观塘、港岛三条地铁线,总长43.2 km,共有38个车站。地铁列车在非繁忙时,运行间隔3~4 min,在早上繁忙时间的最短间隔只有112 s。日均客运量220万人次左右。1994年香港地铁总收入51.3亿港元,扣除经营开发、折旧、利息和财务开支后,当年利润为10.38亿港元。世界各国地铁均靠政府补贴,唯独香港地铁既解决市民出行同时又可创利。它为国内其他城市地铁建设和管理提供了成功经验。

为适应首都经济发展的需要,修改后的北京地铁路网规划,由原来8条线263 km增至12条800 km,并将现有1号线向东延伸12.7 km,修建通过市中心的复8线。根据最近修订的上海市轨道交通路网规划,上海将建设约780 km的轨道交通线,其中,11条地铁线约385 km,10条轻轨约177 km。未来的天津市市区快速轨道交通主要为环线放射线形路网格局,既有3条穿越市中心的放射线和一条环线组成,路网总长177 km,其中地下铁路长106 km,郊区外环线预留71 km远期轻轨线路。深圳市整个客运轨道交通规划网络系由“一主三重五辐射”共9条线组成。地铁1号线主要承担着各个组团最密集的东西向的客流及所有其他轨道线路的换乘客流;三重:平南,平盐和广深组成的特区与两区之间的通勤铁路;五辐射:2,3,4,5,6号线均以地铁1号线为基础,沿交通走廊呈向外辐射状。整个轨道交通网总里程365 km,总站数为105个,总投资约1200亿元人民币。深圳地铁一期工程由1号线(罗湖站至香密湖站)和4号线(皇岗站至水晶岛站)组成,全长14.825 km,1座地面车站和1座车辆段,两线在金田站呈十字形换乘。设计工作于1998年9月全面展开,已于1998年开工。除此以外,沈阳、重庆、南京、青岛、广州、成都、武汉、哈尔滨、杭州、长春、鞍山、大连、兰州、佛山、苏州等城市也都完成了市区地铁轨道交通的路网规划、客流预测、可行性报告和总体方案,有的已经开工,有的已做了初步设计。有的城市对地铁车辆与设备做了调查,并向国外做了询价,今后一旦具备条件进行工程建设时,将会获得较快进展。

5. 快速发展的水底隧道

日本青函隧道的勘察工作从1946年开始分四个阶段进行,经过25年的勘察研究,1972年确定了这条跨越津轻海峡总长53.85 km的海底隧道,海底部分23.3 km。1964年5月开始在南北两岸海滨挖掘以勘察为主要目的的斜井工程,经过长达24年的艰难施工,直到1988年终于建成了这条世界上最长的海底隧道。地层加固注浆用水泥水玻璃84.7万立方米,喷射混凝土22.9万立方米,共耗资5000多亿日元。另一个重要的世纪性工程是英法海底隧道,总长约50 km,海底部分约38 km,1986年开工,1993年12月建成通车,历经7年

7个月,英法海底隧道采用全断面隧道开挖机(Tunnel Boring Machine 缩写 TBM),英国端使用开口型 TBM 盾构机,法国端为闭口型盾构机。南线、北线及服务隧道,直径 7.6~10.0 m。法国侧最高月成峒 1 177 m,它的概预算总造价 7 亿英镑。这一隧道是交通最繁忙、客运量最大、最现代化的海底铁路隧道。跨越日本东京湾的 409 号国道的东京湾横断道路总长 15.1 km,桥梁部分长 4.4 km,川崎及木更津人工岛长 0.4 km,盾构法施工的双管四车道圆形隧道约 9.4 km,所使用的混合型盾构机内径为 14.3 m,为当时世界上直径最大的最现代化的盾构机,它应用了中途盾构机对接等高难度的盾构法隧道施工技术。这条隧道 1989 年开工,1995 年建成通车。受青函隧道、英法海底隧道的鼓舞,在世界范围内引起一场海底隧道热。意大利计划横跨海峡隧道,把本土和西西里岛连接起来;日韩两国正在筹建穿越对马海峡隧道。此外在丹麦大海峡、直布罗陀海峡、白令海峡、马六甲海峡、巽他海峡、博斯普鲁斯海峡、宗谷海峡、间宫海峡等世界许多海峡都在进行海底隧道的规划和调查。我国国内除对琼州海峡隧道完成可行性研究以外,不少有识之士提出了跨越渤海湾的南桥北隧固定联络通道,跨越长江入海口连接上海→崇明→启东江底隧道,京沪京广高速铁路跨越长江的南京和武汉沉管隧道,有人甚至提出了兴建台湾海峡的隧道设想。海峡隧道以它全天候、大运输量、低能耗、安全高效等优点,越来越引起各国工程界的重视。海底长隧道建设耗资巨大,有的还不是我国急于上马的项目。但由于海底隧道要求技术高、施工难度大、建设周期长,特别需要长时间的工程地质勘察等特点,因此,目前可以组织力量对海峡隧道进行地质勘察、可行性研究,做好技术储备。随着经济发展,国力增强,技术进步,未来开凿琼州海峡、连接大连到蓬莱跨越渤海湾隧道,并非遥远的事情。

1.2 地下工程分类

所有地层表面以下建筑物和构筑物统称为地下工程,也称为岩土工程。地下工程有许多分类方法:按其使用性质分类,按周围围岩介质分类,按设计施工方法分类,按建筑材料和断面构造形式分类。也有按其重要程度、防护等级、抗震等级分类等。最常用是按使用性质分类。

1. 按使用功能分类

地下工程按使用功能依次可分为交通工程、市政管道工程、地下工业建筑、地下民用建筑、地下军事工程、地下仓储工程、地下娱乐体育设施等。可以按其用途及功能再分组如下:

- (1) 地下交通工程:地下铁道、公路(隧道)、过街人行道、海(河、湖)底隧道……
- (2) 地下市政管道工程:地下给(排)水管道、通讯、电缆、供热、供气管道、将上述管道汇聚一起的共同沟。
- (3) 地下工业建筑:地下核电站、水电站厂房、地下车间、地下厂房、地下垃圾焚烧厂……
- (4) 地下民用建筑:地下商业街、地下商场、地下医院、地下旅馆、地下学校……
- (5) 地下军事工程:人防掩蔽部、地下军用品仓库、地下战斗工事、地下导弹发射井、地下飞机(舰艇)库、防空指挥中心……
- (6) 地下仓储工程:地下粮、油、水、药品等物资仓库、地下车库、地下垃圾堆场、地下核废料仓库、危险品仓库、金库……

(7) 地下文娱文化设施:图书馆、博物馆、展览馆、影剧院、歌舞厅……

(8) 地下体育设施:篮球场、乒乓球场、网球场、羽毛球场、田径场、游泳池、滑冰场等。

2. 按四周围岩介质分类

可以把地下工程分为软土地下工程、硬土(岩石)地下工程、海(河、湖)底或悬浮工程,按照地下工程所处围岩介质的覆盖层厚度,又分为深埋、浅埋、中埋等不同埋深工程。

3. 按施工方法分类

地下工程常分为:浅埋明挖法地下工程、盖挖逆作法地下工程、矿山法隧道、盾构法隧道、顶管法隧道、沉管法隧道、沉井(箱)基础工程等。

4. 结构形式分类

地下建筑和地面建筑结合在一起的常称为附建式,独立修建的地下工程称为单建式。地下工程结构形式可以为隧道形式,横断面尺寸远远小于纵向长度尺寸,即廊道式。平面布局上也可以构成棋盘式或者如地面房间布置,可以为单跨、多跨,也可以单层或多层,通常的浅埋地下结构为多跨多层框架结构。地下工程横断面可根据所处部位地质条件和使用要求,选用不同的形状,最常见的有圆形、口形(人张开嘴)、马蹄形、直墙拱形、曲墙拱形、落地拱、联拱(塔拱)、穹顶直墙等。

5. 按衬砌材料和构造分类

衬砌结构材料主要有砖、石、砌块混凝土、钢筋混凝土、钢轨(型钢、格栅拱)、锚杆、喷射混凝土、铸铁、钢纤维混凝土、聚合物钢纤维混凝土等。

根据现场浇筑施工方法不同,衬砌构造形式又分为:

(1) 模筑式衬砌

采用现场立模浇筑整体混凝土或砌筑砌块、条石,壁后孔隙进行填实和灌浆,使它与围岩紧贴。

(2) 离壁式衬砌

衬砌与围岩岩壁相隔离,其间隙不充填。为了保证结构的稳定性,一般均在拱脚处设置水平支撑,使该处衬砌与岩壁相互顶紧。此种衬砌可做成装配式,便于施工。它多在稳定或较稳定的围岩中采用,对防潮有较高要求的各类地下仓储工程尤为适合。

(3) 装配式衬砌

最典型的是盾构法隧道,其圆形隧道由若干预制好的高精度钢筋混凝土管片在盾壳保护下由拼装机装配而成。管片之间和相邻环面之间接头用螺栓连接。根据隧道防水、地基稳定性、抗震方面要求,有的为单层钢筋混凝土管片衬砌,也有的在内部施加防水层和模筑混凝土,构成复合衬砌。在地下水位低,抗震设防要求不高的地区,也有用在工厂预制顶板、边墙,在现场现浇钢筋混凝土底板上,借助焊接、樁槽、插筋现场装配,可以快速地建造地铁区间隧道和车站。再有,在大型船坞内,分节制作隧道的管节,然后靠驳船浮运到水域现场沉放到预先开挖好的基槽内,从而形成大型的沉管隧道。

(4) 锚喷支护衬砌

用锚杆喷射混凝土或者锚杆钢丝网喷射混凝土来支护围岩的一种衬砌形式。锚杆间距直径、长度、喷层厚度强度、钢丝网间距直径等支护衬砌的参数按围岩分类等级确定。用“新奥法”施工时,锚喷结构通常作为初次支护,根据断面收敛的量测信息,在其内圈再整体模筑二次衬砌,两次衬砌之间敷贴防水层,这种衬砌形式也称为复合衬砌。

1.3 地下工程设计计算方法的进展

一、地下工程设计与计算方法的发展

早期地下工程的建设完全依据经验,19 世纪初才逐渐形成计算理论,开始用于指导地下结构的设计与施工。

19 世纪前期的地下结构大多是以砖石材料砌筑的拱形圬工结构,特点为截面尺寸很大,结构受力后产生的弹性变形很小,因而最先出现的计算理论是将地下结构视为刚性结构的计算理论,如压力线理论等。

19 世纪后期,混凝土和钢筋混凝土材料陆续出现,并被用于建造地下工程,使地下结构具有较好的整体性。从这时起,地下结构开始按弹性连续拱形框架计算内力,并据以进行截面设计。

地下结构在主动荷载作用下发生弹性变形的同时,还将受到地层对其变形产生的约束作用。将这类约束作用假设为弹性抗力,地下结构的计算理论便有了与地面结构不同的特点。由此建立的典型假定抗力方法为朱拉波夫-布加也娃法(1934),以及将边墙视为弹性地基梁的力法(1956)、角变位移法及不均衡力矩与侧力传播法等。

由于人们认识到地下结构与地层是一个受力整体,20 世纪以来,按连续介质力学理论建立地下结构内力计算方法的研究也逐渐取得成果。已经建立的方法既有解析解,又有各类数值算法。

20 世纪 60 年代以来,随着电子数字计算机的推广應用和岩土介质本构关系研究的进步,地下结构的数值计算方法有了很大的发展,并已编制了多种功能齐全的程序软件。

20 世纪 70 年代起,随着隧道施工力学研究的发展,人们开始致力于对采用“新奥法”施工的隧道建立仿真计算技术的研究,并据以对复合支护提出计算方法和设计方法,后者同时包括对地下工程施工的安全性监测和完善量测技术,以及对其建立分析理论和对地下工程的设计引入反馈设计方法,以优化工程设计和确保工程施工的安全性。鉴于目前建造的宽体平坦形公路隧道多采用“新奥法”施工,复合支护计算理论与设计方法的发展对地下工程设计技术的进步更有价值。

应予指出,在地下结构计算理论研究的发展过程中,后期提出的计算方法一般并不否定前期的研究成果。鉴于岩土介质性质的复杂多变性,这些计算方法一般都有各自的适用场合,并都带有一定的局限性。

二、地下结构的计算方法

按对衬砌与地层相互作用模拟方式的不同,地下结构的计算方法可区分为两类:荷载结构法和地层结构法。鉴于大量岩土工程问题的分析目前仅有数值解,因而理论解析解常被视为与数值方法不同的另一类算法。然而,如从衬砌与地层相互作用方式差异的角度区分,封闭解析解与数值算法可分别归属于荷载结构法和地层结构法。

认为地层对结构的作用只是产生作用在地下结构上的荷载(包括主动地层压力和被动