

二〇〇〇年的中国研究资料

第五十八集

土木工程技术的国内外发展概况与展望

内部资料
不得外传

中国科协二〇〇〇年的中国研究办公室

第 58 集

土木工程技术的国内外 发展概况与展望

中国土木工程学会

中国科协 2000 年的中国研究办公室

1985. 10

目 录

前 言

桥梁工程的现状与展望·····	李国豪 范立础 (1)
隧道及地下工程技术发展趋势及展望·····	高渠清 (8)
土力学及基础工程发展情况与动向·····	黄文熙 (26)
2000年的混凝土与预应力混凝土·····	何广乾 (33)
计算机应用的发展情况与动向·····	陈明绍 赵超燮 (49)

桥梁工程的现状与展望

桥梁及结构工程学会

李国豪 范立础

一、前言

七十年代以来,由于科学技术的进步,工业水平的提高,人类社会文明的发展,桥梁工程日新月异。随着时代的前进,人们对桥梁建筑提出了更高的要求,对桥梁适用、安全、经济、美观的原则赋以更新的内容。例如,现在对土建结构的美学要求愈来愈高,结构不再单纯作为满足使用要求的工程实体,而要作为一种空间艺术存在于人类社会之中。又如对环境保护的要求也愈来愈高,防噪音、防震动、防污染等。在城市高架道路和迂回交叉的立交线、几公里长的山谷桥或山区高速公路、甚至几十公里的海峡桥和海湾桥,以及城市郊区的高速铁路与导轨运输高架桥等新课题前,桥梁已不再是一个单一的工程实体,而是一个宽阔的行车带,犹如地上的彩虹,它对设计、施工、艺术又提出了不同的要求。

世界上各国的桥梁工作者致力寻求桥梁结构的功能、经济和美学上的辩证统一,创造出不少典型的桥例,推动了桥梁工程的发展。

二、若干桥例

从以下几个典型桥例来纵观桥梁工程的发展概况:

1. 英国东北海岸上的恒比尔桥,是目前世界上跨度最大的悬索桥。主跨1410米,桥全宽28.5米,塔高155米,采用钢筋混凝土结构,加劲梁为正交异性钣织成的尖扁形的钢箱梁,梁高仅4.5米,采用斜吊索。

悬索桥在十九世纪末,美国就已建成了主跨486米的布鲁克林桥,到二十世纪三十年代,其跨度纪录即突破千米以上,如主跨1280.2米的旧金山金门大桥。自1940年达科码桥(主跨853.4)遭受风振破坏后,对悬索桥结构的空气动力稳定理论作了广泛的研究。在六十年代后,英国通过风洞试验分析研究,提出了采用两头尖的扁平流线箱型断面代替习惯的桁架式加劲梁,1966年建成塞文河桥(主跨987.6米),后丹麦的小贝尔特桥(主跨600米)、土耳其博斯普鲁斯海峡桥(主跨1074米)以及恒比尔桥都采用此种流线型焊接箱梁。结构不但具有良好的抗风性能,而且节省了钢材,外型更纤细、美观。恒比尔桥的加劲梁高跨比为 $1/313.3$,而金门大桥则为 $1/167.8$ 。

至今,悬索桥尚是特大跨度的独一无二的桥梁结构体系。

2. 西德莱茵河的独塔钢斜拉桥,其桥跨为 $235.2+212$ 米,主梁为正交异性钣钢箱

梁，梁高2.43米，桥宽为35.5米。

西德在二次世界大战后，为修复大量的桥梁，从古老的斜拉桥体系中发展起来的各种型式的近代斜拉桥，在莱茵河上尤为突出，那里几乎是斜拉桥的“家族”所在。这种结构由于钢箱型梁、正交异性板、栓焊联结的发展，以及近代计算技术、材料、工艺、施工能力的提高而更显示了它的优越性。六十年代后，还发展了预应力混凝土斜拉桥。

目前，世界上跨度最大的钢斜拉桥（主梁为钢与混凝土桥面的复合梁）是加拿大的安娜雪丝桥，主跨465米。预应力混凝土斜拉桥的跨度纪录为西班牙鲁娜桥的440米。

3. 加拿大安娜雪丝桥，为钢复合梁的斜拉桥。塔高154.3米，采用钢筋混凝土结构。桥面宽32米，采用混凝土桥面与钢梁复合梁。钢梁为两片工字形梁，间距28米，梁高2米，上异板为35（~50）×800毫米、下异板为50（~80）×800毫米，腹板厚12~20毫米，横梁间距4.5米，亦为工形梁。目前正在建造中，预期1986年建成。

4. 西德莱茵河的全焊钢箱梁桥，跨度为125+230+125米，支承为两窄箱柱、支座为橡胶支座。正交异性板的箱梁结构使钢梁获得新的发展，特别是为各种组合体系提供了经济、合理而又美观的梁式空间结构。

5. 西德弗马恩海峡桥，是一个杰出的空间结构的创造。系杆拱的两片箱形拱肋（1.9×3米、拱脚处为4米）斜置在拱顶合拢与正交异性板的箱梁组成立体空间结构，吊杆则为交叉网状布置。主跨248.8米，拱矢高43米，桥面上单线火车。11米宽公路车道，亦为栓焊结构。

6. 日本大阪府泉北联络桥，亦为拱梁组合体系，栓焊钢箱梁结构。此桥采用单片拱肋，主跨175米，桥宽34.5米，梁高仅为2.15米。钢材总重3190吨，整孔上部结构采用浮吊安装。

创拱、梁组合体系的世界纪录的是美国弗莱蒙特桥，它为三跨连续加劲拱桥，主跨382.6米，双层桥面。该桥主跨中央275.2米的结构部分重约6000吨，采用一次提升架设。

钢拱桥（桁肋拱）的纪录为518.2米，为美国新河峡谷桥，采用缆索拼装。

可见，钢结构新型构造与联接方式的改进与发展、施工能力的提高，为这些桥型开辟了新的途径。

7. 南斯拉夫克尔克Ⅱ号桥，是世界上跨度最大的钢筋混凝土拱桥，主跨390米，采用单箱三室断面的拱肋。采用悬臂拼装法施工，中室先行合拢，再拼边室，建于1980年。

8. 日本帝释桥，采用劲性骨架悬臂浇筑施工的钢筋混凝土拱桥，主跨145米，梁宽9.9米。

钢筋混凝土拱桥在三十年代就已创造了264米（瑞典的桑独公路拱桥，1937~1942年）的纪录。但供需拱架施工，费工、费时、费料而丧失竞争能力。六十年代后，由于在拱桥中采用了悬臂施工方法，拱桥恢复了它的“青春活力”，建造了多座大跨拱桥，更由于预应力工艺的发展，预应力混凝土拱、梁组合体系的桥型也获得了发展。

9. 瑞士甘特桥，建于1981年，为配合山谷地形，构思很好的刚构与斜拉（刚性板式拉索）相结合的预应力混凝土组合体系桥型。中跨174米，边跨127米，一边在R=200米的曲线上，墩高150米，采用悬臂浇筑施工方法。

第二次世界大战后，在西德、法国等国家，预应力混凝土梁桥由于充分利用了预

应力结构受力的特点，采用了悬臂施工方法，从而以异常的速度向前发展，跨度从五十年代的百米纪录，以十年增加百米的速度，至今已达440米的纪录，桥型有梁桥、T构、刚架、连续一刚构、桁架体系、斜拉桥等等。甘特桥更体现了预应力混凝土桥的宽广前景。

下列两座海湾长桥，充分体现了结构的高度标准化、生产工厂化、施工高度机械化自动化的发展前景。

10. 科威特巴比延桥，总长2503米，由12组五跨或六跨预应力混凝土连续梁组成，主跨为53.8米，全桥共475节段，分标准节段与墩上节段两种。结构为空间构架。每一节段由顶、底板与16个标准预制三角形基本构件组成。桥跨采用斜拉导梁逐孔架设法施工。

从1981年11月打入第一根桩的钢护筒到1982年11月架完最后一孔桥跨，该桥主体工程施工期仅为一年，最快速度为18小时安装一孔桥。

11. 沙特阿拉伯—巴林岛的道堤工程，总长25公里，其中桥梁为12.5公里，投资约五亿七千五百万美元。为缩短工期，除一通航孔为85+150+85米预应力混凝土连续梁（节段施工）外，标准孔为50米，采用一66米双悬臂梁与一34米简支梁两类标准构件，均为预应力混凝土结构，基础工程为管柱，外径3.5米，每桥墩由双管柱组成，最长为77.5米。桥跨采用1400吨浮吊架设。该桥正在建造中，预计1985年末完成。

三、发展的因素与概况

从以上若干桥例可看到近二十年来设计的桥梁结构趋向轻巧、细纤，然而载重、跨度却不断增长。

要不断满足社会生产力的发展所提出的愈来愈高的要求，就需要重载、大跨的长桥。这是功能上的要求，当然还有美学、环境保护的要求，因而逐步形成桥梁向结构高强、轻型、大跨的发展趋势。工程结构理论发展了更适合实际情况的力学分析与设计理论，愈来愈重视空气动力学、振动、稳定、疲劳、非线性等分析，以充分发挥结构的承载能力，充分利用建筑材料的强度，力求工程的安全度更为科学、合理和可靠。在计算手段上，广泛应用电子计算机。在施工上力求快速，把制造工艺和架桥技术提高到高度机械化、自动化、科学管理的水平。

但在发展过程中最关键的因素是材料的改革。

十九世纪中期钢材的出现，开始了土木工程的第一次飞跃。

直至十七世纪中期，建筑材料基本上还是限于土、石、砖、木等材料。由于材料主要适于承压，这个时期的土木建筑主要采用受压的粗厚墙、柱、拱、穹等结构。受弯结构只限于小跨径的梁和小伸臂的牛腿。尽管当时人们运用这些材料建造了许多使后人赞叹不已的卓越土木工程，但结构一般比较简单，追其源，是受当时力学尚未发展所制约。诚然，那时用一些力学性能和质量都有很大缺陷的建筑材料去修建工程，也就对力学的需要不迫切，因而也就不可能对土木工程的发展给予有力的推动。

十七世纪七十年代开始使用生铁，十九世纪初开始使用熟铁建造桥与房屋。由于这些材料本身存在缺点，土木工程的发展仍然受到限制。而生铁和熟铁的出现却孕育了钢结

构的诞生，为土木工程历史性的变革奠定了基础。

到十九世纪中期，冶金工业冶炼并轧制出了拉、压强度都很高、延性好、质量均匀的建筑钢材，随后又产生了高强度钢丝、钢索，于是钢结构得到蓬勃发展。原有的梁、拱结构与新兴的桁架、框架、网架、悬索结构等出现了百花争艳的局面，跨度从砖、石、木结构的几米、几十米跃进到百米、几百米，直至千米以上，创造了在大江、海峡上修建大桥的奇迹。实践促使了理论的产生与发展，为适应钢结构工程及机械工程等发展的需要，在牛顿力学的基础上，材料力学、结构力学、工程结构设计理论等应运而生。土木工程从经验上升为科学，使工程实践和基础理论面貌一新，从而促成了土木工程第一次革命性的飞跃。

本世纪初钢筋混凝土的广泛使用，以及随后预应力钢筋混凝土的诞生，实现了土木工程的第二次飞跃。

钢材的出现，虽然促成了土木工程的变革，但它价格昂贵，影响推广。十九世纪二十年代波特兰水泥问世后，产生了混凝土。它远比钢材廉价，施工简便。但是混凝土的抗拉强度很小，因此从十九世纪五十年代起出现了钢筋混凝土这种新型的复合建筑材料，其中钢筋主要承担拉力，混凝土主要承担压力，发挥各自的优点。本世纪初，钢筋混凝土广泛应用于土木工程的各个领域。本世纪三十年代开始兴起了预应力混凝土，大大提高了混凝土结构的抗裂性能、刚度和承载能力，用途更为广阔。从此开创了钢筋混凝土和预应力混凝土结构占统治地位的新的历史时期，它带来了新的结构型式、施工技术和设计理论，使土木工程发生了又一次飞跃。

目前尚未出现各方面更好的新型建筑材料，但寻求既高强度又轻质，更耐用又价廉的材料，一直是各国学者为之奋斗的目标。

如上所述，随着建筑材料的飞跃，桥梁工程不断创造出新颖的结构型式，出现新的结构联结方式。新结构的实践必然带动桥梁设计理论的发展，寻求更合理的结构构造，创造更经济、适用、安全的型式。

当前桥梁工程一些发展概况简述如下：

1. 在钢材方面大量发展高强度低合金钢品种，其强度已从50~60公斤/毫米²发展到80公斤/毫米²，现在正向100公斤/毫米²突破，向200公斤/毫米²目标奋斗。为防锈蚀、减少养护维修工作量，耐候钢正得到发展。现在还在试用镀锌钢材，美国在1966~1972年修了11座镀锌钢桥。

预应力混凝土桥的发展也迫切需要优质高强度预应力钢材，现普遍使用150~170公斤/毫米²高强度钢丝。现国外提出使用镀锌高强度钢丝，有的国家已列入规范要求（已建成的预应力混凝土斜拉桥—马拉开波桥—在使用二十二年后，已发现钢丝锈蚀，现正在换索）。预应力钢筋还停留在Φ26~32毫米，强度60~90公斤/毫米²。目前，预应力钢材正在朝高强度、大直径、低松弛值的方向发展。

2. 混凝土现世界上已逐步使用抗压强度为600公斤/厘米²乃至1000公斤/厘米²的高强度或超高强度混凝土。现在高强度混凝土都采用高分子类高效能减水剂，已获得极成功的经验。混凝土材料潜力很大，很有发展前途。在实验室条件下，国外已有研制成功2000公斤/厘米²以上的超高强度混凝土。

轻质混凝土的研究也不断取得进展,已尝试在大跨度预应力混凝土桥梁工程上应用,现已有多座。轻质混凝土的容重比普通混凝土的低20~30%。

3. 现代钢桥发展的特点如下:

- (1) 桥面结构广泛应用正交异性钢构造;
- (2) 广泛应用箱式结构;
- (3) 栓焊结构(高强度螺栓联结)代替铆接、栓接结构,进一步发展全焊结构,使构造简单,施工工艺简便;
- (4) 应用耐候钢、镀锌钢;
- (5) 钢板的厚度与宽度增大,一般厚50~80毫米,个别的甚至达120毫米,宽1.10米,这使结构减少焊接、接缝,而获得简单的构造;
- (6) 目前各种桥型的钢桥世界纪录为:

悬索桥: 英恒比尔桥跨度1410米(1981年);

悬臂桁架桥: 加拿大魁别克桥, 跨度549米(1918年);

拱桥: 美新河峡谷桥, 跨度518.2米(1977年);

连续箱梁桥: 巴西席尔瓦海岸瓜纳巴拉桥, 跨度300米(1974年);

梁拱组合体系桥: 美弗莱蒙特桥, 跨度383米(1973年);

斜拉桥: 加拿大安娜雪丝桥, 跨度465米(预定于1986年建成)。

4. 预应力混凝土桥的发展正处在朝气蓬勃的阶段,它目前不但已挤入200~500米大、中跨桥梁与钢桥竞争的行列,而且常占有优势。目前预应力工艺、技术已提高到一个新的水平,单根预应力筋(多索组成)的锚固力已达到近千吨,这为设计更大跨度的预应力混凝土提供了预应力技术上的可能性。其次,一些新的竞争方案不断提高,并在国际上获奖。

现世界上已达到的跨度纪录为:

简支梁: 奥地利阿尔姆桥, 长度76米(1977年);

连续刚构体系桥: 澳大利亚给脱威桥, 长度260米(1983年);

斜拉桥: 西班牙卢纳巴里奥斯桥, 长度440米(1984年);

斜腿刚架: 法博洛姆桥, 长度186.3米(1974年);

拱桥: 南斯拉夫克尔光II号桥, 长度390米(1979年)。

5. 今年国际桥协(IABSE)第12届大会(大会的主题是: 结构工程的今天和明天)几十篇论文所归纳的各国在桥梁学科领域内研究的方向是:

- (1) 重视工程管理和施工管理, 强调鼓励新创造的必要性;
- (2) 大跨度斜拉桥的发展——采用钢与混凝土组合桥面;
- (3) 设计理论各方面的研究, 如材料非线性、空气动力学桥梁极限理论设计(加拿大钢结构新规范)等的研究;
- (4) 钢与混凝土组合结构有增加和扩大应用范围的趋势;
- (5) 高速(大于260公里/小时)导轨运输高架桥的修建;
- (6) 计算机辅助设计的应用;
- (7) 各国介绍了一些典型桥梁工程。

总之,桥梁工程发展的总趋势是:寻求轻质高强度的新材料;采用先进的制造工艺,快速、机械化、自动化的施工方法,充分利用计算机辅助设计,革新设计,计算理论和方法,力求创造更多、更美的桥梁结构型式,使它向长大化、轻型化的方向发展。

四、我国桥梁工程的现状与发展

中华人民共和国建国初期修复并加固了大量旧桥,随后第一、二个五年计划期间,在新建的铁路干线、公路与网线和渡口,修建了不少重要的桥梁,并取得了迅速的发展。在五十年代至六十年代,就修订了桥梁设计规程,编制了桥梁标准设计、桥梁设计计算手册。在祖国的两大河江——黄河、长江上矗立起几十座大桥,培养并形成一支强大的桥梁工程设计和施工的技术队伍。

钢桥方面,从五十年代的武汉大桥,到六十年代的南京大桥,成昆线上各种体系的钢桥,都标志着我国的建设水平,现有的纪录为:

铁路简支钢桁桥:四川成昆线金沙江三堆子桥,跨度192米(1969年);

铁路连续钢桁桥:四川宜宾金沙江桥,跨度176米(1968年);

公铁连续钢桁桥:南京长江大桥,跨度160米(1968年);

公路连续钢桁桥(栓焊结构):山东北镇黄河大桥,跨度120米(1971年);

公路悬索钢桥:四川重庆嘉陵江桥,跨度186米;

公路桁管拱桥:四川渡口金沙江桥,跨度180米(1966年);

铁路斜腿刚架桥(箱形断面、栓焊结构):陕西安康桥,跨度176米(1982年),为世界纪录。

钢材已普遍采用低合金钢(16锰桥钢),结构联结从早期的铆接已逐步过渡到使用栓、焊结构。目前正在广东省新建的一座钢筋梁桥,已第一次采用正交异性板的桥面结构。

混凝土桥方面,五十年代开始研究预应力混凝土,1956年建成第一座20米的简支梁桥后,逐步发展推广。六十年代后,开始采用悬臂施工修建T构桥,尤其在1976年后,各种体系的预应力混凝土桥获得了发展,锚具已有F式、轧丝锚、镦头锚、冷铸锚等,张拉力已发展到200余吨。现有的纪录为:

公路斜拉桥:天津永和桥,跨度260米(正在建造中);

公路斜拉桥:山东济南黄河桥,跨度220米(1982年);

公路T构桥:四川重庆长江桥,跨度174米(1980年);

公路连续梁桥:湖北沙洋汉江桥,跨度111米(1984年);

铁路斜腿刚架桥:山西邯长线滹沱河桥,跨度82米(1981年);

公路简支梁桥:河南伊河大桥,跨度50米(1977年);

公路下承式桁梁桥:福建洪塘大桥,跨度120米(正在建造)。

拱桥(混凝土、石)。中国拱桥有悠久历史,建国初期,曾大量修建石拱桥,后因费工、费时而逐步为混凝土拱桥所替代,在民间小桥所发展起来的双曲拱已完成它的历史使命,现因裂缝过多而修建甚少。现有纪录为:

公路混凝土拱桥：四川渡口金沙江桥（箱拱），长度 170 米（1983 年）。

铁路混凝土拱桥：北京丰沙线永定河七号桥（中承式），长度 150 米（1972 年）；

公路石拱桥：四川丰都九溪沟桥，跨度 116 米（1971 年）；

公路混凝土双曲拱桥：河南前河桥，跨度 150 米（1969 年）。

基础工程。我国在深水急流中修建了不少桥梁，已积累了极为可贵的深水基础工程的设计和施工经验。值得指出的是，钻孔灌注桩基础在山东北镇黄河大桥已深达 104 米。大型管柱基础从武汉长江大桥开创使用，到南京长江大桥、南昌赣江公铁两用桥的建成，管柱的直径已从 1.55 米发展到 5.8 米，最大埋入深度已达 47.5 米。

五、差距和发展方向

我国桥梁工程的设计、施工能力已有极大的提高。在基础工程的施工水平上已可赶上国际水平，在桥跨结构的施工水平方面的差距也日益缩小。在结构的设计、计算、试验研究或理论分析上也逐步缩小差距，在个别领域内已进入国际水平。但应看到，我们目前最大的问题在于建筑材料工业水平落后，施工工艺水平落后。

展望 2000 年，我国发展预应力混凝土桥势在必行，目前预应力钢材生产量过小、质量低，要迅速发展高强度、大直径、低松弛的预应力钢材；

要加强对混凝土高效能减水剂的研究，研制高强度和超高强度的混凝土；

要研究高吨位的预应力锚具与张拉设备。目前国内最大锚固力仅为 200 吨左右，国际上已达 800~1000 吨；

要改进钢结构的制造工艺，用焊接代替栓、铆联接，要采用新型结构型式；

要大量改变落后的施工技术，要发展高度机械化、自动化的施工技术和方法，组织管理要科学化，这对一个工程的经济性与工期有重要影响；

基础工程依然要研究发展的重要课题，尤其要应用现代科学技术进行工程勘察。对工程地质、地基构造要有正确的判断，使工程获得更安全可靠、合理的基础型式；

要加速桥梁学科领域中有关的理论研究工作；

要加强计算机在桥梁工程设计、施工中的应用；

要预见到我国城市立交、高速公路、铁路和导轨运输等高架桥的建造会不断提到日程上来。特别要结合我国的混合交通，研究充分利用箱梁桥空间的桥型。

我们相信，在不久的将来，我国的桥梁工程将达到一个新的水平，一个具有我国特色的水平。

隧道和地下工程技术发展趋势及展望

隧道及地下工程学会

高渠清

前 言

隧道及地下工程的发展已经有一个很长的过程,但直到最近20~30年,它才逐步在土建工程中成为一个独立的领域和各种类型的隧道及地下工程共同的规划、设计、施工的基本原理及施工方法,所以隧道及地下工程与桥梁工程、房建工程相比较,相对地说,是一门较新的学科。

虽然如此,在隧道工程界的许多有经验的工程师还常称隧道工程是艺术而不是科学,或称为有科学性的艺术。

隧道及地下工程的特点是:

(1) 造价昂贵,只有在合理条件下才能采用,但它的经济效益往往不是用经济数字所能表达的。这是在决定采用隧道方案时的很重要的因素;

(2) 施工期限长,这是由于施工工作面比较狭窄,可能容纳的劳力及机械都是有限的。随着施工机械的发展,这种情况正在改善;

(3) 由于穿过的地质条件多变,可能遇到的不可预料的情况较多,施工方法必须相应调整,因而要求规划、设计、施工、使用部门紧密合作,业主和施工单位分担责任;安全是应特别注意的问题;

(4) 承受动荷载的能力及抗震能力比地面结构强很多,因而多用于民防、国防工程及抗震结构、核电站等;

(5) 地下工程有节能的特点。它能保持建筑物内部恒温,作为地下储库更有显著优点,因而开始推广应用在民用建筑中;

(6) 应用范围广阔。可用于交通运输(铁路、公路、航运、地铁等),民用(房屋、仓库、储库等),军用(各种坑道),水力发电、灌溉等几乎所有地面结构的用途;海洋采油工程中亦可采用地下方案;

(7) 节约地皮,尤其是在城市中的交通系统,地下管道、隧道、地下商店、地下街道,分担了城市地面的负荷。

目前隧道及地下工程的用途还在不断发展及推广,尤其是随着城市建设的发展,各种地下民用建筑,如为储油、储水、储气、储粮、储热而修建的地下建筑均可采用地下方案,地下住宅、学校、电影院、图书馆亦在推广。城市交通系统设在地下具有安全、运输量大、快速等优点,已成为现代化城市不可缺少的环节。

对我国来说，铁路、公路、水工、输水等类型隧道还要大量修建。
所以总的说，我国作为发展中国家，隧道及地下工程是有广阔前景的。

一、发 展 概 况

（一）历史发展简介

人类在原始时期就利用天然洞穴作为群居及活动场所。随着生产力的发展，地下空间利用的范围也有所扩大，古代帝皇常为自己修建地下墓室，例如埃及金字塔下通向各墓室的甬道，在陕西咸阳发现的汉代武则天为她儿女所修建的墓室都具有较长的地下通道。随着手工业和商业的出现，工业人口的集中出现了城市，为了给城市供水，修建了输水隧道，在公元前一千年，犹太国王就建造了给耶路撒冷供水的隧道，公元前六百年为了灌溉和排水，在巴比伦和阿西里沃建造了有名的连通幼发拉底河和底格里斯河的隧道。公元前四世纪罗马及希腊主要城市为了给水，修建了给水隧道，从几十里外把水送到城市里，当时罗马共有十一条输水隧道。在这期间也修建了一些人行的地下通道，把皇室和神庙连通起来。又如在公元前403~221年间在湖北省铜绿山为了开采铜矿修建了竖井、斜井和平巷，在古代战争中也常常利用地道向敌人进行攻击，如三国时代（公元184~280）官渡之战，袁绍用地道向曹操进攻，但因被发现，未得逞。佛教传到中国后，大量修建的石窟，这是众所周知的，例如甘肃省的敦煌石窟、山西省大同云岗村和河南省的龙门等石窟。公元六百年前后隋唐两代修建了一些地下粮食仓库。但在长时间内，地下空间的利用仅有上述几种类型。到十二世纪前后，由于工业的进一步发展，需要大量的金属矿产、煤炭及其它矿石等，采矿工业有较大的发展。当时欧洲在陶欧甫山用人工修建了一百公里的金矿隧道，十七世纪明朝末，年宋应星所著《天工开物》记载了用竖井挖煤的方法。明代修建的帝皇陵有十三陵、定陵等，这些都是规模很大的地下建筑。随着工业及交通运输的发展，人们逐步认识到修建地下工程的重要性。如在欧洲1680年前后修建了马尔拍斯隧道，1700年前后穿过圣哥达修建了一条交通隧道。十八世纪末第一次工业革命开始，用煤冶炼矿石，对地下空间的利用有了很大的促进。但是总的讲，在这一段历史时期里，由于修建工具原始，修建地下工程都是用人工开挖，所以修建的地下建筑物的数量及规模都是有限的，人类对地下空间的利用，只是作为一种特殊工程来对待。

十九世纪五十年代中期开始第二次工业革命，蒸汽机、铁路和炼钢工业出现，并有很快的发展。1823年在英国泰晤士河下修建成功的水底公路隧道是英国著名的工程师召奈尔主持的。但由于隧道进水先后被迫停顿了十一次，后来他设计了盾构，经过十八年的努力修成了这个隧道。这是在软土层里修建隧道的一次革命性的改革。1826~1830年，在英国利物浦于硬岩中建造了两条最早的铁路隧道，以连通利物浦及孟微斯特。伦敦的地下铁道是在1860年开始修建的，第一期在1863年完成，共长6公里，修建是用明挖法，蒸汽牵引，通风问题严重，运营时困难很大。1890年伦敦开始修建深埋（18~30米）圆形断面地下铁道，采用盾构法。在1900年前后，法国巴黎也开始修建地下铁道，全长14公里。在这个时期，在欧洲大陆修建了几条较长的铁路隧道，其中有辛普伦铁路隧道，它是单轨的两条隧道，连通意大利和瑞士，全长19.8公里，在瑞士境内修建的哥德赫、

洛赫伯等隧道均长9公里多。由于盾构技术的发展,修建了不少通过水底的隧道,如美国的哈德逊河底隧道、比利时的安特已普隧道、在1874年英国由 Great Head 修建的鸟尔维隧道等。

在这个阶段,地下工程的发展主要有以下几个方面:

1. 由于铁路的发展需要穿山越岭及过河,开挖许多不同长度的隧道。
2. 由于交通运输的需要,各个国家都开挖了不少运河。为了克服高层障碍,修建了一些穿越山岭的航运隧道。
3. 由于公路的修建,相应地修建了一些公路隧道,一般地说公路可以用较大的坡度来克服高层障碍,但在高程控制点处也得以隧道穿越。
4. 采矿业的发展,修建了大量的地下巷道。
5. 在城市修建作为城市交通系统一部分的地下铁道系统。
6. 为军事的目的,修建了多种类型的地下坑道。

这个时期,由于科学技术及工业的发展,修建技术也有了很大的进步。穿越山岭岩层的隧道一般是用钻眼爆破法开挖的,在初期用水力钻岩,效率较低,后来发展为用压缩空气钻岩提高了钻进速度。在炸药方面,从使用黑色炸药发展为用烈性炸药。(TNT和硝氨炸药),爆破效果有了很大的提高。运输出碴也实行了机械的有轨或无轨运输,采用木支撑,砖石衬砌,混凝土流行后就改用现浇混凝土衬砌,在这个阶段,虽然施工技术有了较大的提高,但进度仍较慢,洞内的工作条件也很差。所以一般的长隧道修建的年限都比较长。

在地下铁道和水底隧道中逐步推广应用盾构法(在某些城市采用浅埋明挖法),其中比较突出的例子就是伦敦地下铁道。由于地质条件比较稳定,盾构法使用比较顺利,但是在跨越泰晤士河时为了防止进水,采用了压缩空气盾构法,这个方法在当时讲是比较先进的,后来为美国等国家所采用,但工人在高压空气下工作,工作时间受到很大限制,而且会引起压缩空气病危及工人生命。与此同时,荷兰曾用沉管法修建了通过马斯河的水底隧道,取得成功。

在这个阶段,不管在软土中,还是在硬岩中,基本上还是采用手提机械、人工钻岩爆破开挖及出碴。但总的说,隧道及其他类型地下工程的规划、设计、施工等方面的技术的发展,已逐步使它成为一门独立的工程学科。

(二) 现代发展概况

地下空间的利用到了二十世纪有很大的发展,其主要发展情况如下:

1. 随着世界上各个城市的不断扩大与发展和人口的增多,街内的运输已经不能满足城市居民的生产活动及社会活动的要求,修建地下铁道已经成为不可避免的措施。由于城市地面拥挤,近二、三十年来,在某些国家的大城市,如日本的东京等,还修建了地下街道、地下商场等。

2. 在发展中的国家,铁路、公路还在不断修建,因而较大量地修建铁路、公路隧道是不可避免的。我国自解放后,大约修建了2500公里的铁路隧道。在日本,已经修建了铁路隧道把几个岛屿连系起来。英法海峡的海底隧道方案已经讨论了几十年,至今还未正式开始修建,现在研究通过直布罗陀海峡的隧道方案的可行性。从九龙到香港的海

底隧道已经修建完成。非洲、南美洲、东南亚其他的发展中国家也在修建铁路及公路隧道。高速铁路的修建，要求更高的线路质量，也促进了铁路隧道的修建。

近二、三十年来高速公路的发展，也需要修建许多公路隧道，例如从瑞士穿山到达意大利的二十多公里长的圣哥达公路隧道，就是一个例子。

3. 水力发电工程在近二、三十年来有很大发展，例如，仅挪威一个国家就有192个水电站。我国解放后在西南、西北等地区都修建了许多水力发电站，例如云南的西洱河发电站，四川的515，和511发电站，湖北的葛洲坝水力发电站，青海的龙羊峡水电站，刘家峡、三门峡，以及将要修建的长江三峡水电站。近年来由于能源危机，各国更注意水力资源的开发与利用。每个水电站，都有引水隧洞、泄水隧洞、地下厂房等等地下工程。

4. 近年来为了节约能源，许多国家注意到将民用建筑修建在地下，以防止室内温度的太大变化。例如北欧的瑞典、芬兰、挪威有些公共场所和私人住宅修建在地下，利用太阳能采暖，澳大利亚某些地区，也开始考虑将住宅半埋在地下，美国有些学校图书馆、电影院、餐厅等也设置在地下。

5. 核电站为了防止污染和地震的影响，很多修建在地下，还要为核废料而修建地下储库。

6. 为军事目的而修建的地下工程是多种多样的，有些兵工厂、导弹发射洞、军备储存仓库等，一般都修建在地下。

7. 自然洞穴的利用也有很大的发展，主要用于储存日用物质、储油、储气、储热等。现在北欧一些国家已经修建了不少这样的地下仓库与储库，我国商业部门也修建了一些地下仓库。所以二十世纪对地下空间的利用是多种多样的。

(三) 各种地下工程发展综述

上述各种地下工程的具体发展情况如下：

1. 地下铁道

地铁的优点是：

①与城市其他运输形式相比，其运送能力最大。五十年代莫斯科地铁每小时内能单程运送57000名旅客，但是公共汽车、无轨电车及电车的运送能力仅不过为每小时6000、7000和16000人。

②运行最为安全。由于没有任何同一水平面内交叉的情况，及采取自动闭塞先进信号，可以保证安全。

③运行频繁而正常，给旅客以极大的便利。在将近100%地执行运行图时，地铁各列车间的间歇时间可以减少到1.5分钟或更短。

④电子计算机的应用在保证安全及提高运输效率方面更有很大发展。

⑤发生最少量的噪音，保护环境条件好。

因此，现在世界上所有大城市几乎都出现了地铁，而且有的城市地铁承担市内外的主要旅客运输任务。当然地铁只是城市运输网的一部分，它必须和地面，和运输组织相配合，才能发挥很好的作用。地铁也有它的缺点，即运营固定费用所占比重大，在城市其它各类地面运输中，这一费用仅占总运营费的15~25%，但地铁则约占75%，因此只有

客流密度极大时，它在经济上才是合算的。

地铁线路网是根据城市平面规划的特点，并考虑到城市的发展远景而设计的。

地铁线路网的规划往往受现有城市街道和长期城市建设特点的影响。

地下铁道一般可分为浅埋和深埋两种。现在修建的地铁大部分是浅埋的，因为对旅客进出较方便。深埋的地铁多半是局部的，是由地形决定的，或考虑军事上的防护问题。

浅埋地铁多半采用明挖法施工，所谓明挖法就是沿街道敞口开挖，开挖好敞坑修建地下结构后，再重新回填。但是最近一、二十年以来，因为地面开挖对于城市交通有影响，盾构施工法水平又有了提高，因此浅埋地铁也和深埋地铁一样，广泛采用盾构法施工。

盾构为一钢筒，其直径稍大于隧道衬砌的直径。用盾构时隧道衬砌通常由预制构件（铸铁及混凝土管片、砌块）装配而成。

借助盾构可完成用全断面开挖法修建隧道的工作循环，并逐环修建衬砌，使坑道在最短时间内即支承于衬砌上。

在松软的含水地层中修建隧道时，采用盾构最有意义，尤其是修建水底隧道的情况。而盾构法施工的出现与发展也正好与水底隧道及在软土中地铁的修建密切相关。

盾构是一种价格高昂的综合性机械。因此只有在开挖相当长的隧道时，采用盾构在经济上才是合理的。在松软地层中修建短隧道时，矿山法可能更加合理些，因不需复杂的昂贵的机具。

在淤泥地层中使用普通盾构容易引起工作面坍塌，为了支撑工作面，在十九世纪七十年代Great Head就提出用压缩空气的办法来稳定工作面，它的缺点前面已经说过了，为了克服这个缺点，在日本以及其他欧洲国家设计了泥水盾构，使工人不必经常在压缩空气条件下工作。到现在为止，各国提出的泥水盾构型式有各种各样，但其基本类型可以分为以下两种，一种是泥水平衡式，一种是上压平衡式，这两种盾构在日本都用得很成功。

泥水盾构采用一种在封闭于工作仓壁和隧道作业面之间的有压粘土泥浆中操作的旋转切削轮开挖地层。储气罐始终使泥浆保持需要的压力。在工作仓中的泥浆起着控制地下水和稳定作业面的作用。为了清除前进中的障碍物，可以在用压缩空气代替粘土泥浆之后，经过一个气闸口进入到作业面，泥水盾构的操作可以简化为三个基本的控制要素：压气系统、泥浆系统和推进系统。

土压平衡盾构的开挖是在有水压的仓里利用装有切削和螺旋排泥工具进行的。

另一种是切削盾构，它可能用或不用压缩空气作辅助。操作过程是用50~60公分行程的千斤顶迫使刀片分别向前推进。切削盾构的优点之一是不需要顶在衬砌上而推进盾构，因此可使用多种衬砌形式。

如果土和水的条件允许，隧道盾构施工的趋向是更加机械化而且配有挖掘机械，在不利的情况下，泥浆盾构正取代采用压缩空气以及用降水或注浆来处理地层的方法。目前的发展趋势是提供更有适应性的机械，能处理更多种类的土壤和障碍物，同时还能高速掘进。

衬砌形式趋向于大量使用混凝土管片, 喷混凝土和就地浇注的加钢纤维混凝土。

日本在泥水盾构的设计与使用方面现在渐居世界首位, 现在日本式的盾构已经销售到世界上许多国家, 其中包括美国以及欧洲、澳洲、南美洲和亚洲等国家, 日本泥水盾构设备质量好, 价格合理, 在世界市场上竞争性极强, 例如Marubeni联合企业的一个厂Sogo sho sha厂到现在为止, 已经生产了七百个盾构。现在日本盾构的发展趋势是大量采用电子仪器使其进一步自动化, 他们相信由于增加了电子仪器, 可以使盾构的性能大大提高, 有人耽心这样价格要增加, 操作要复杂, 但是事实不是这样。日本装配电子仪器的小直径盾构, 价格只增加5%, 在操作时, 甚至一个不熟练的工人都可应付自如。它的优点是工作安全, 工作人员少, 因而降低了工程的造价。

日本一个叫Tele mole的小直径机械化盾构, 全部由电子仪器控制, 人员只要在洞口就可以操作, 根据日本经验, 在城市中使用这种盾构开挖下水道效率很高, 工作顺利。日本一条47公里长的油管也是利用Tele mole盾构沿河底修建的。该工程开始于1979年5月, 完成于1981年底。

在1975~1979年期间已有15个国家建造了穿经软土的盾构隧道。

日本具有353公里盾构隧道而居世界第一位, 西德具有52公里而居第二位, 巴西、美国和泰国分别具有46公里、41公里和24公里, 法国和墨西哥两个国家各有10至20公里, 加拿大、委内瑞拉、奥地利、香港各有2~9公里。以上名次没有包括英国、捷克、匈牙利和苏联等国家的统计资料。

顶管法是在地下管线穿越铁路、道路、河流或建筑物等各种障碍物时采用的一种暗挖式敷设管道的方法。顶管时, 先以准备好的顶压工作坑(井)为出发点, 将管子卸入工作坑(井)后, 通过传力顶铁及导向轨道, 用支承于基坑后座上的液压千斤顶将管子压入土层中, 同时排除和运走管子正面的泥土。当第一节管子全部顶入土层后, 接着把第二节、第三节接在后面继续顶进, 只要千斤顶的力足以克服顶管时产生的阻力, 整个顶进过程就可循环重复下去。由于顶管法中的管子既是在土中掘进的空间支护, 又是最后的建筑构件, 具有双重作用, 而且敷设管道时无需挖槽支撑, 因而可大大加快施工进度, 降低造价。特别是采取气压等辅助施工措施后, 能进行穿越江河以及通向湖海等无法降水的特殊环境下的管道施工, 故被世界许多国家采用。近几十年来, 头部与管节分开顶进的盾构式工具管的出现, “中继接力”技术的形成, 促进了顶管法施工技术的应用, 使顶进距离越来越长。美国在不用中继间的情况下最大顶进距离为588米, 西德在用中继间的情况下创造了1210米的长距离顶管纪录。中国在1981年4月完成的穿越浙江省甬江的顶管工程, 直径为 $\Phi 2.6$ 米, 采用五个中继接力环单向顶进581米, 终点上下、左右偏位均小于1厘米; 七十年代在上海金山石油化工总厂污水口及海水取水口工程中, 采用了垂直顶升管道的方法, 在东海杭州湾内修建了进排水口工程, 标志着中国的顶管技术已经发展到成熟的程度。

如上所述, 在新兴的城市允许地铁的路线沿原有的街道延伸且又属浅埋时, 可采用明挖法。在修建过程中, 根据地质情况, 有时需要采用井点降水法以降低地上水位, 防止坍塌, 有些国家也采用冰冻、灌浆法以加固地层, 便于开挖, 但是这些方法造价都比较贵。

注浆的基本目的在于改变岩石或土壤的性质, 以减小其渗透性或提高其力学强度。

压浆时用一种会逐渐变硬或凝结的溶液或悬浮液，把它用压力通过钻孔注入地层。

加固处理常常用于低质土壤，如在水压力下会出现流砂的细粒软土等。这些土壤处理后，开挖地段周围一定范围内的地层会得到某种程度的增强。在市区，这样的结果对附近一些需要加固基础的建筑物很重要。密封处理主要用来减小透水性强的地层中的渗水，也可用于质量虽好但具有很大张开裂隙的岩体。在使用压气掘进中，为了限制压缩空气的漏损，有时甚至为了预防漏气与周围有机土壤可能发生的化学作用，也采用密封处理。

在进行压浆处理时，必须注意下列各项：

- ①隧道埋深；
- ②地表及地下的障碍物；
- ③土壤的特性和有关的处理类型；
- ④隧道掘进方法。

对处于浅层的隧道，可以考虑从地表施工，这样能把掘进和处理工作完全分开。

当埋置很深时，通常从隧道掌子面上用接近水平的钻孔进行注浆处理。

主要浆液材料为：①水泥悬浮液；②由渗入适量玻璃的反应剂组成的真溶液。

巴黎地下铁道的施工，常常采用压浆处理。

大型的巴黎高速地下铁道，东西线共长50多公里，连接东西郊，穿过市区的正中心。

巴黎的地层十分复杂，相隔很短距离即有很大变化，可能遇到的主要地层为第四纪及第三纪的各种河流冲积层、泥灰岩、石灰岩、砂岩、细粒粉砂和粘土，地下水位不很深，但随着地质情况及不同部位而变化。

由于原有地下结构物都位于浅层，故修建新线路必须放得相当深，通常总在地下水位以下。

许多地区都要求在隧道开挖前作加固及密封的综合注浆处理，以求不仅能使隧道开挖时安全些，而且也保护周围的地下和地面建筑物，避免开挖后可能出现减压效应。在某些场合，对于那些古老的大楼，还要有特殊的附加加固处理。

由于在地面上很难进行注浆处理，故大部分处理是从竖井、导坑、现有地下建筑物或隧道掌子面上进行的。注浆产生效果后，不可避免地会引起地表隆起，对此要特别注意，以便把它限制在几厘米范围内。为此，注浆压力要严格控制，必要时可降低。膨润土水泥浆也常限制使用，而用渗透性更好的化学浆液代替。

在敞口开挖方法中，最近一二十年发展了泥水连续墙法，就是在地铁结构的两个边墙位置上沿线路方向挖槽，灌进泥水，以稳定槽壁，然后灌注混凝土，这样在两条边墙的保护下，可以挖开街道，修建结构顶盖，进行回填，恢复交通，然后在顶盖保护下进行下部位地层开挖。这种方法的优点是：对交通的干扰时间短，范围小，对路边的建筑物影响小。以区间隧道施工的情况为例，若沿线分建两个单线隧道，由于跨度较小，可敷设临时路面承台，并随着土方的下挖而设置横撑。等开挖到底板面以下时，先做底板，再做顶板。这样做，开挖顶板以下的土方和修筑底板比较容易，但修筑顶板需要支立模板。具体又可有两种方法：一种是连续墙顶点做到结构顶板面的高度，墙以上部分用H型钢及挡土板作为支承台的路面和挡土之用。另一种是把连续墙间隔地修筑到临时路