

铁路工程建设  
科技动态报告文集

铁路隧道及地下工程分册

铁道部基本建设总局

1986年

铁路工程建设  
科技动态报告文集

铁路隧道及地下工程分册

铁道部基本建设总局

1986年

# 目 录

## 一、动态部分

- 隧道和地下工程技术发展趋势及展望·····高渠清(1)
- 我国铁路隧道工程的发展和现状·····梁武韬(17)
- 隧道设计理论进展·····王建宇(31)
- 隧道工程地质与岩体力学的进展·····陈成宗(46)
- 隧道工程岩体(围岩)分类趋势·····王石春(54)
- 国内外铁路隧道施工机械的现状  
及发展趋势·····柴永模 罗朝廷(64)
- 隧道施工中计算机管理的动态与设想·····胡政才(73)
- 隧道工程数据库展望·····王守仁(87)
- 铁路隧道防排水技术的现状和发展·····茅伟才(94)
- 隧道施工通风的现状 & 动向·····侯国才(100)

## 三、工程实例部分

- 大瑶山隧道的施工·····许志仁(108)
- 建设中的军都山隧道·····蒋中庸(112)
- 软岩单线铁路隧道的新奥法施工·····罗传义 倪晓庚(122)
- 南岑隧道岩溶地段施工简介·····吕麟信(126)
- 我局在大秦线双线隧道组织机械化  
快速施工的几点做法·····第十八工程局(132)
- “用眼镜法”处理大跨度隧道  
塌方的尝试·····第十六工程局(139)

## 二、国外考察部分

- 隧道施工技术、施工机械及工程管理  
赴西德考察报告·····秦淞君(143)

# 隧道和地下工程技术发展趋势及展望

西南交通大学土木系 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形成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，房建工程等比较，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。

## 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下述几种类型，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有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6km，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（18~30m）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14km。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19.8km，在瑞士境内修建的哥德赫各赫伯等隧道均长9km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，比利时的安特巴普隧

道、在1874年英国由Great Head修建的乌尔维隧道等。

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崎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。地铁也有它的特点，即运营固定费用所占比重较大，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，因不需用复杂的昂贵的机具。

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方法来稳定工作面，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两工作。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，一种是土压平衡式，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面推进盾构，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，有人担心这样价格要增加，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Telemole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Telemole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353km盾构隧道而居世界第一位，西德具有52km而居第二位，巴西、美国和泰国分别具有46km、41km和24km，法国和墨西哥两个国家各有10至20km，加拿大、委内瑞拉、奥地利、香港各有2~9km。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1210m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 $\phi 2.6\text{m}$ ，采用五个中继接力环单向顶进581m，终点上下、左右偏位均小于1cm；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，必要时要降低。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。这样做法，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面承台的下面，路面承台直接架设在墙顶上。但留有间隙的地方，墙顶只做到结构顶板面的高度，以便横越顶板上的地下管道可以在此通过。

下面简述米兰用槽壁法修建地铁的特点：

①在修建米兰地铁时，在泥浆槽中浇筑的钢筋混凝土隔墙，既是施工时对基坑两侧挡土、挡水的支护墙，又是隧道永久结构的边墙，因而降低了结构和施工的费用。

②混凝土隔墙保护基坑两侧建筑物的地基，所以不需要对建筑物进行基础加固。

③占地宽度等于结构宽度，比工字钢桩降水法占地宽度小得多。在修筑泥浆槽时，只在顺马路方向占了两条地带（还可以两条分别先后施工）。两条墙修好后，可以集中力量在很短的时间内下挖，修筑顶板，回填并恢复交通，影响地面交通较小。待顶板完成、路面恢复后，其余工作即在地下进行，除少数供人员、材料进出的竖井外，其余均对地面没有干扰，因而可减少或免除由于对地面交通干扰所引起的一切费用。

④区间和车站的内部尺寸都比较小，区间净宽为7.5m（单跨双线，车辆宽2.85m），净高3.9m；车站除四个换乘车站外，均采用标准形式的侧式车站。净宽为15m，净长106m，可停6节车，由于地下结构尺寸较小，因此造价较低。

⑤车站的埋深特别浅，顶板距地面约3m，轨顶高约在地面以下8m，减少了土方开挖和其他施工费用。

⑥变电所等均设于地面，站台上除商店和厕所外几乎没有什么运营和设备等房间，部分

郊区线路设于地上，大大减少土建工程的费用。

⑦线路标准低。例如正线上最小的曲线半径，有130m和150m的，这也是减少工程造价的一个原因。

在我们国家，地铁已经在北京、天津、上海修建，但造价较高，进度慢。在北京，我们的修建方法是敞口开挖井点降水，第一期工程从北京东站到八宝山，第二期工程是环形线，也已经修建完成通车。天津地铁修完了五公里，因为唐山地震影响停顿了好几年，现在又正式开始修建，也是采用明挖法，上海地铁是用盾构修建，完成了五百公尺试验段，因为投资上的原因，尚未正式继续修建，其他城市，如广州、沈阳等，都已在筹建阶段，但均未正式开工。

## 2. 公路及铁路水底隧道

世界上的大城市大部分都位于河流边上，为此常常要修建跨越水底的公路或铁路隧道。修建水底隧道，一般都采用盾构法，包括压缩空气法及泥水盾构法，在技术上已不成什么问题。但是由于以下原因，在有些国家采用了沉管法。

①采用盾构法施工，隧道的断面是圆形的，而用沉管法则为矩形的，圆形断面的内部净空与矩形断面的相比不能很好地利用。

②盾构法埋深较大，在跨越同样宽度的河流时隧道长得多；

③在隧道较短时，总造价要比用盾构法修建时低得多；

荷兰已经用沉管法修建了十几个河底隧道，这当然和它的地理地形条件有关（包括铁路、地铁、管道等隧道）。正在规划中的还有八、九个（1980年消息）。

用预制节段沉放法修建水底隧道的一个最卓越的例子，是鹿特丹玛斯河水底隧道的施工，该隧道设有四条汽车车道、一条人行道及一条自行车道。

在许多国家中采用沉放节段法修建水下隧道。在欧洲修建了三座这样的水下隧道。在比利时的安特已普—布鲁塞尔公路干线上修建了长600m的六车道水下隧道，它横越拉培尔河和捷耶瓦尔特运河。在运河水下安放长137.7m的预应力钢筋混凝土节段，在拉培尔河底安放两节各长99.7m的节段。在宽35.1m双跨结构的三节节段中设有两垛隔墙，按用途划分为三车道。

在运河与拉培尔河岸上修建两座干船坞。在一座干船坞内（平面尺寸为240×118m，深11.7m），制造预应力钢筋混凝土节段。在用钢板桩作围墙的另一座船坞中生产由普通钢筋混凝土制成的两节节段。

在干船坞中放水以后，把节段沿拉培尔河和运河浮运至工地，并沉放至设计位置上。该水下隧道的施工期限为5年。

在荷兰的老马斯河的水下隧道，为八车道。这个水下隧道位于鹿特丹—安特已普已改建的公路干线上。

在河床底部安放三节各长115m，宽48.3m和高8m的节段，排水量为45.000m<sup>3</sup>，它是四跨的钢筋混凝土框形结构，在距隧道位置大约10km的船坞，用四个浮鲸和九条拖船把节段从河中运至工地上，在节段的压舱室中充满水后，把节段引到隧道基准线上沉放在河底的基槽中。每节段用两台300t起重机和六台100t的卷扬机起吊。为了准确定位，采用了特殊的航海仪器，与设计位置最小偏差在5mm以下。

沉放到基槽中的钢筋混凝土节段与基础的联结是通过向节段底部压注砂浆而实现的，为

，此在基槽中设有专用压浆孔，在节段砂床填好以后，把节段上的钢丝绳解下，使接合部分密封，并把压舱室中的水排出。

英国在提兹河下用沉放管段法修建了第一座四车道水下隧道。该隧道与新公路干线上的新港大桥相距六公里。隧道总长为900m，水下部分525m，在隧道上的河面宽度常水位时为200m，在洪水期河面宽度300m，水深12.2m，流速0.6m/s。河床上覆盖着坚硬的泥灰岩和粘土，其上又有砂土和粘土薄层。八节各长为63.5m的隧道节段设计成双跨钢筋混凝土矩形构件。

每孔隧道的进车部分的宽度为7.3m，高5.1m，可通行双层大型公共汽车。

节段预定在提兹河北岸专门的场地上进行生产，预制构件在河中浮运至基槽中，该基槽由两排钢筋混凝土墙所组成，在墙上设有横向钢梁。最初节段在横梁上进行纵向移动，然后节段与横梁一起沉放水中，横梁可沿千斤顶撑杆移动。在水下基槽中安放隧道节段进行连接，回填约2.5m的岩石层和卵石层。该隧道1981年开始交付运营，施工期为3.5年。

1974年在西班牙毕尔巴鄂开始修建长980m的第一座水下隧道。它位于港口地区，预计建设四车道。水下预制节段设计成双跨框形结构，并由整体钢筋混凝土筑成。每孔隧道的尺寸为7.5×4.3m，沉放的深度距水面18m。

1972~1975年在美国切萨皮克湾底部建成双车道的长2286m的水下公路隧道。这是从汉普顿市至诺福克公路干线上的第二座水下隧道，它与桥梁共同组成桥隧建筑群。隧道与低水位桥是用人工岛来联结的，水底段由21个节段组成，其中两节各长115m，其余节段的长度为103.5m和89m。节段直径为11m，节段由钢筋混凝土筒形薄壳组成，外面用8mm的金属板和混凝土覆盖，节段的总宽度为12.5m，高12.1m。按顺序把节段沉放到水下的基槽中，用驳船上安装的50t起重机往沟底回填卵石，并用刮板扒平。使用激光仪控制垫层的质量，预制节段用起重机和卷扬机从联结一起的驳船上卸下，连接工作是在两个阶段内完成的。首先用4台千斤顶拉紧相邻的节段，而在接缝外密封后把水排出，大约用3000t的静水压力压紧橡皮垫圈，其次在端部隔板上箍上成型钢箍。在接合部的外面灌注混凝土。全部工程在1975年竣工。

预制节段沉放法在日本也获得了发展，在1971~1974年间，在川崎港与面积为570公顷的人工岛之间修建了大口岛四车道的水下公路隧道。其总长度为1525m，水下部分为660m，其隧道预制节段共6节，各长110m、宽21.3m、高6.9m，排水量为14,500m<sup>3</sup>，横断面呈双筒形，由钢筋混凝土制成。由厚为9mm的钢板作骨架，在水中拖运至施工地点，在工地灌注厚85~90cm的混凝土。预制管段沉放到水下基槽中后进行对接和回填土壤。

在东京湾修建了长1035m的六车道公路水下隧道。该隧道的深度位于水下23m处，在水下部分安装9个节段，各长115m、宽37.5m、高8.9m，排水量为38,000m<sup>3</sup>。因是在地震频繁地区修建水下隧道，决定用整体式钢筋混凝土结构，外部用金属防水层。

全部节段同时在干船坞中制造，平面为639×124m，在结合部用保证有足够的柔软性（±40mm）的弹性垫进行联结。为了使节段均匀放在基础上，向节段的底部压注水泥浆、膨润土、水和砂子。经过七昼夜，人工基础承载力为1.46kg/cm<sup>2</sup>，14天后为2.49kg/cm<sup>2</sup>，28天后为3.42kg/cm<sup>2</sup>。通过节段两侧底部两排（距离4.8m）孔眼（直径75mm）进行压浆，用超声波仪器检查压浆质量，在一个工段上，节段支撑在人工桩的基础上。

用起重机往水中沉放节段法（提兹河水下隧道），经过节段底部孔眼进行压注砂浆的工艺

(老马斯河底和东京湾水下隧道)以及在压注砂浆中掺有膨润土(东京)等作为新方法而受到重视。

为了解决发生的问题,对水下基槽的合理外形进行了调查,研究了沉放节段与水流的相互作用,查明了水下隧道承受地震力作用的动力性质等。

### 3. 水力发电站地下工程

根据地形条件,许多水力发电站厂房要设置在地下。此外还要开挖引水洞,泄水洞等地下工程。水力发电站地下厂房的跨度及净空均较大,这些厂房均采用钻眼爆破法开挖。水工隧道一般为圆形,过去采用钻眼爆破法开挖,新建水工隧道则多采用掘进机开挖。

据不完全统计,建国以来已建成的大中型水电站引水发电隧洞约140条,全长120km,最长的有压发电隧洞是四川渔子溪一级水电站,洞长8,429m,洞径4.7~5m。建设中的贵州、广西交界的天生桥坝索水电站,有压发电隧洞三条,内径9m,各长11.34km。

已建的最长无压供水隧洞为引滦入津的9690m长隧洞,断面5.7×6.25m,引水流量 $60\text{m}^3/\text{s}$ ,在隧洞通过的片麻岩地段采用光面爆破、喷锚支护全断面掘进新技术,隧洞衬砌全部采用定型化钢模板。

青海龙羊峡水电站的施工导流隧洞泄洪量高达 $3,340\text{m}^3/\text{s}$ ,断面 $15\times 18\text{m}$ ,洞长661m。在已建成的大中型泄隧洞40余条中,单洞泄洪能力最大的是甘肃碧口水电站右岸泄洪洞,断面 $8\times 12.7\text{m}$ ,洞长613m,设计泄量 $2,290\text{m}^3/\text{s}$ 。

由导流隧洞改建成永久泄洪隧洞的“龙抬头”式泄洪洞,规模最大的是甘肃刘家峡水电站,断面 $13\times 13.5\text{m}$ ,洞长539m,最大泄洪量 $2,250\text{m}^3/\text{s}$ 。

河南三门峡水电站右岸泄洪排沙洞,压力段洞直径11m,明流断面 $9\times 12\text{m}$ ,洞长514m,设计泄洪量 $1,635\text{m}^3/\text{s}$ ,通过高达 $37\text{kg}/\text{m}^3$ 的含沙量,已运行了15年。

从设计水头看,最大的是目前正在建设中的湖南东江水电站右岸放空洞,水头115m,压力段洞径8.5m,明流断面 $7.2\times 12\text{m}$ ,洞长677.4m,最大流量 $1,520\text{m}^3/\text{s}$ 。

但以上工程均未采用掘进机。

盾构开挖法如上述,一般均采用在软土地层中修建隧道,在硬土里起初有人设计了一些轻便盾构,在其保护下,利用钻眼爆破进行开挖。以后由于冶金技术的发展,就在盾构前面采用各种切削刀具,这样逐步发展成现在的掘进机。掘进机是利用装在前头的刀具直接切削岩层。首先制造掘进机的有罗宾斯、美国Java等公司。

罗宾斯公司1952年开始生产第一台掘进机,截至1983年初已生产125台,其中有20台直径大于7.6m。三十多年来,该公司不断改进掘进机的性能,发展其制造技术,其主要情况如下:

(1) 1958年制成盘式滚刀,并用于加拿大多伦多隧道工程。目前这种盘式滚刀已标准化,并用以掘进了1,000多公里的岩石隧洞和竖井。(2) 制成用于掘进较软岩石的掘进机,这种掘进机在巴基斯坦曼格拉水电站共掘进7条隧洞,曾创造每天掘进32.3m的纪录。(3) 1963年制造的直径4.93m的掘进机,在澳大利亚的波河提那水工隧洞施工中,每周掘进229m。1966年制造的直径3.09m的掘进机,在美国克罗拉多州的达浪哥水工隧洞掘进中,每月掘进2,088m。(4) 制造了向掘进工作面加压的掘进机,并用于法国巴黎的地铁隧洞(直径10.3m,长2,874m)施工。该掘进机利用由压缩空气施压的耐压舱壁向工作面施加压力,而操作人员则在大气压条件下工作。(5) 制成用于煤矿掘进的掘进机,并用于西德的莫尼波尔煤矿。

该煤矿隧洞的掘进直径为5.41m，全长11.6km，有三个弯曲段，通过两个断层和数百米地质扰动带。该掘进机的特点是带有高度机械化安装的支撑助梁系统，能很好地满足安全施工的要求。(6) 制成双盾构掘进机曾用于意大利的水工隧洞。该隧洞的直径为4.29m，长4km，于1972年竣工。这种掘进机适用于隧洞围岩易剥落和需要安装标准混凝土预制块的情况。

(7) 制成从掘进机刀盘的背面更换盘式滚刀的掘进机，并于1970年用于瑞士的隧洞工程。

(8) 1979年为美国芝加哥污水排泄洞施工制造了直径10.8m的掘进机。机械的总重量达810t，向前的推力达1,380t。在坚硬的石灰岩中掘进，曾达到日进尺36m。(9) 制成占据隧洞圆周1/4的支撑靴板系统，并于1980年用于美国纽约的隧洞工程。这种支撑靴板既可在垂直方向和水平方向加压，也可同时使用四个这样的靴板向隧洞的全圆周加压。当掘进与已建成的隧洞相距较近时，利用配有这种支撑靴板的掘进机，可减少在两隧洞间岩壁上所产生的应力。(10) 1980年为瑞士格勃里斯特公路隧道制造的直径为11.5m的掘进机，是当前直径最大的掘进机。(11) 1982年为美国阿拉斯加的隧洞工程生产最大的盘式滚刀，其直径达43.2cm。这种滚刀的耐久性很好，在硬岩中的切削速度很快。目前正在设计能适应硬岩和软岩掘进的多性能掘进机，这种掘进机采用自动化操作，并由计算机检验可能损坏的零部件。

利用掘进机开挖圆形隧道，全部工序都可机械化，工作面有4~5人就够了，所以在岩层中开挖水工隧道和地下铁道效率是很高的。在发达国家穿过岩石的较小直径圆隧道一般均采用掘进机开挖，我国已经制造了5.8m直径的水工隧道掘进机，使用效果比较好。目前我国要大量修建水电站，这种机具的发展是不可少的。

世界上最大的航运隧道是罗佛隧道 (Rove tunnel)，1920年修建，位于法国马赛至罗纳的航运线上。此隧道在马赛以北穿过聂尔特高山，是马赛——阿尔勒运河的组成部份，它使马赛与内河水道沟通，使来往船只得以避免绕道地中海。该隧道长7km多，供巨型内河航船双向通行，水深4m，其横断面为沿水面线的净宽度为22m，坑道全宽为24.5m，隧道沿中轴的净高为15.4m，坑道全高为17.5m。隧道两侧均设置宽2m的棧式便道，高出水面1.5m，采用厚1.25m的马蹄形衬砌，河床有40cm厚的混凝土铺底，隧道穿过白垩和石灰岩地层，在全长上遇到几处断层，但无地下水，采用矿山法施工。

#### 4. 铁路及公路越岭隧道

当铁路及公路穿过分水岭及复杂地形地段时，常采用隧道方案。

我国隧道最多的铁路线见表1。

表 1 中国隧道最多的铁路线

序 号	路 名	线路长度 (km)	隧道座数	隧道长度 (km)	隧道长度比 (%)	工 期
1	襄 渝	824	395	281	34	1970~1973
2	成 昆	1085	427	341	31	1965~1970
3	丰沙二线	102	60	29	28	1971~
4	丰沙一线	106	65	27	25	1952~1955
5	京 原	356	120	87	24	1966~1971
6	枝 柳	885	361	172	20	1970~1978
7	阳 安	360	146	61	17	1969~1976
8	京 通	870	114	77	14	1973~1981
9	贵 昆	639	199	81	13	1959~1965
10	湘 黔	904	292	110	12	1970~1972

在铁路线路选线及定线时，展线是越岭地段克服巨大高差的有效措施。线路在侧谷山地迂回向上，因地形的限制常常要穿入山体而采用隧道，当线路所绕弯子小于 $360^\circ$ 时，称为套线，其上的隧道，称为套线隧道。若所绕弯子大于 $360^\circ$ ，即线路在绕了一圈后在不同的水平上相交（立体交叉）时，称为螺旋线，其上的隧道称为螺旋线隧道。成（都）昆（明）铁路上曾在六个地段（见表2）成功地采用了套线及螺旋线展线，线路坡度陡，曲线弯度大，隧铁成群，桥隧相连。这七处共有隧道46座，总长44.656km，为展线总长的67.2%。

表 2 中国成昆铁路中展线地段的隧道

展线地段	展线形状	线路长度 (m)	隧 道		隧道长度占线路 长度的比重 (%)
			座 数	长 度 (m)	
白果—乃托	绳图形	14,464	9	10,404	72.5
乐 武	眼镜形	7,982	10	5,372	63.3
韩都路两河口	麻花形	25,569	16	16,409	64.2
大 渡 河	螺旋形	10,107	7	6,855	67.3
巴 格 勒	圆 形	2,122	1	2,122	100.0
桐 模 甸	灯泡形	6,218	3	3,414	54.9
合 计		66,462	46	44,656	67.2

我国铁路5km以上的长隧道共有10座（见表3），最长的为京原线的驿马岭隧道，长度为7032m。

表 3 中国铁路长隧道（5km以上）

序 号	线 路	隧 道 名 称	隧 道 长 度 (m)	工 期
1	京 原	驿 马 岭	7,032	1967~1969
2	成 昆	沙木拉打	6,383	1959~1966
3	京 原	平 型 关	6,190	1967~1971
4	成 昆	关 村 坝	6,187	1961~1966
5	南 疆	奎 光	6,152	1974~1978
6	京 通	红 旗	5,848	1973~1975
7	枝 柳	彭 木 山	5,592	1971~1973
8	襄 渝	大 巴 山	5,333	1969~1973
9	襄 渝	武 当 山	5,226	1969~1973
10	盘 西	平 关	5,139	1966~1970

中国解放以前，全国仅有十余条公路隧道，最长的不过200m，大部分为单车道，多半无衬砌。建国以来随着交通事业的发展，修建了许多隧道。现在，全国公路隧道数量为解放初期的十倍，较长的有河南省辉陵公路的向阳隧道，长1400m；林石公路的太行隧道，长960m；四川省重庆市郊的歌乐山隧道，长706m，这些隧道对改善公路行车条件，提高运输效率等起了很大作用。上海市的黄浦江打浦路隧道为中国第一条水底公路隧道。全长2761m，于1965年动工兴建，1970年9月通车，现在又已动工兴建第二条黄浦江隧道。

铁路及公路越岭隧道大多采用马蹄形轮廓的隧道，此种型式隧道大多用矿山法开挖所谓矿山法，就是把断面分成小块，边开挖边支撑，边扩大边顶替支撑，可以在隧道上部开挖好后先衬砌拱圈，后补做边墙，或全部开挖完后，从边墙开始衬砌。用矿山法开挖，支撑顶替工作比较复杂，围岩松动严重，工作净空很小，运输出碴及衬砌等不便。在矿山法中，土层

为软土时，一般采用人工操作机具，进度慢，容易引起坍方。在硬岩层中开挖时，采用钻眼爆破，我国在五十年代基本上采用矿山法开挖铁路隧道。

为了提高矿山法的效率，在软地层中可采用冻结法和灌浆法加固地层，使开挖方便而安全，但增加造价。在硬岩层中，尽量采用全断面开挖。目前钻眼爆破和支护技术有很大发展，压缩空气风钻已经被抛弃，改用高水压钻机，在一部台车上，可以装不同数目的水钻。

水钻和风钻比较具有极大的优点：钻进速度较快，可达风钻的两倍；每米钻进所消耗的能量小得多，只有风钻的三分之一；钻头及钻杆的寿命较长；省去了压缩空气管道；噪音小、粉尘少，不产生油雾，洞内工作条件大大改善；功率与机身大小的比率高，在有限的操作空间是有利的条件。

但水钻对空气中的污染特别敏感，在制造维护过程中，若不十分小心防止粉尘，在制造车间及工地若不保持环境干净，整个系统可能失灵。

风钻的优点是较轻便、简单、容易操作、初始投资少、工作人员对它易熟悉。

在小规模工程中，当时间不是主要因素时，风钻可继续使用，但对大规模的工程，则应以水钻为宜。

由于水钻性能的提高，钻眼这个环节所占的时间已经大大减少，现已有多种新式钻车，瑞典、挪威、法国都有厂家制造。日本在这方面发展也非常快，他们从法国进口钻车，但是在三年后，已经能出口类似形式的钻车，质量高、价钱低。我国大瑶山隧道在日本部分贷款技术援助下就采用了瑞典制造的Promec TH286—2四臂凿岩台车，系气控液压操纵，台车全长15m，高4.3m，宽3.5m，重42t，配备有COP 1038HD型液压凿岩机4台。使用效果很好，进度很快。从今后总的趋势看，在各种岩层中开挖马蹄形的各种跨度的长隧道，例如水电站的地下厂房、长度较大的铁路隧道、公路隧道以及其它类型较大的规模的地下工程，都应尽量采用这种快速钻机。

在钻眼爆破中，还有其他方面新技术的发展，如预裂爆破、光面爆破，这些爆破技术大大减少了超挖的程度。

高效钻车的进一步发展方向，也和掘进机一样，是提高机械化、自动化、电子远程控制的水平。

近年来隧道开挖的临时支护也有很大发展，喷锚支护已得到广泛采用。

喷锚支护有以下几种型式：喷射混凝土、喷射混凝土与锚杆、钢筋网喷射混凝土与锚杆等。

喷射混凝土是用压缩空气作动力，将混凝土直接喷射到开挖好的岩面上，凝结硬化成为围岩的支护。安装在岩体内部的锚杆加固围岩提高围岩自承能力。

喷混凝土单独使用或与锚杆配合使用，可以作为各种复杂地质条件的铁路水工等隧道的支护，对于常见的宽5~6m的单线隧道，开挖后，及时喷射5~8cm厚的混凝土，就能保持围岩的稳定，如果地质条件不好，只要加设锚杆（必要时配以钢筋网），将喷层适当加厚到10~15cm，即能作为隧道支护。

喷锚支护将混凝土的输送、灌注、捣固合为一道工序，不仅减轻了工人繁重的体力劳动，又不用任何钢、木支撑，免除了拆换支撑，使施工大为简化。它还留出很大净空，使后续的出碴二次衬砌等工作大大机械化。

当进行锚杆设计时，有必要综合考虑下列诸点：



①应系统使用锚杆，使之形成压力拱，并靠它的支护控制变形。

②裂隙发育的岩体，靠其摩擦力是不能维持稳定性的。因此，应在隧道拱顶受拉破坏区域加锚杆以维持岩层稳定。

③应考虑围岩的动态特性：围岩破坏后强度不明显恶化者，不设支护亦可达到平衡；围岩破坏后强度明显恶化者，不设支护就不能平衡；围岩破坏后强度逐渐恶化者，随之变成不稳定。

对地层缺陷部分进行重点加固，主要用在坚硬而裂隙发育或是有潜在的龟裂与节理的这类围岩。在裂隙发育的硬岩隧道中，锚杆重点安排在拱顶受拉破坏区。对水平成层岩层，锚杆应尽可能与岩层成直角布置。而在其他情况下，则沿径向使之构成楔状布置。

对于围岩局部缺陷进行重点加固，可以形成地层拱，从而使地层稳定并减少径向变形。系统布置多用在埋深较浅的软弱围岩中，以防止地面下陷，并将隧道对周围建筑物的影响限制到最小。可以对软弱岩层中的深隧道系统布置锚杆以形成支撑拱，防止围岩坍塌。

目前，喷混凝土与锚杆施工的全套机械设备均有国产产品，产量和品种不断增加，质量稳步提高。PH30—74型转体式混凝土喷射机和WG25g型双罐式混凝土喷射机，性能良好，在材料方面，继1965年研制成功红星一型速凝剂并成批生产后，又有了阳泉一型和71-1型速凝剂；还开展了喷射水泥和超早强水泥的试制试验。

新奥法的提出对地下工程施工技术是一个很大的变革。过去采用矿山法施工，工作循环时间很长，引起围岩松动，所以在很长时间里，隧道衬砌是按照承受松动围岩的重量而进行设计的（有压水工隧道则必须考虑到水压的作用）。这样设计出来的衬砌，一般厚度较大（纯混凝土），很不经济。但从这个理论也可看出，为了减少荷载，必须减少开挖工作对围岩的扰动并尽快加以支护。近代的钻眼爆破及喷锚技术是可以作到这一点的，现在已逐步发展了以锚喷支撑为特点的新奥法施工。

新奥法是旨在围岩中形成一个封闭岩石支撑环为主要目的的隧道施工方法。其要点是：

①隧道围岩是支护隧道的主要力量，而不象过去的想法单独由支撑来支护松动的围岩。

②在施工过程中，应尽量保持岩体的强度。喷上混凝土封闭开挖表面，这样就可阻止围岩继续变形而降低岩体强度。

③保持围岩的稳定，是靠锚喷支护。

④从力学角度讲，应尽量避免由于开挖出现临空面使围岩受单向或双向应力状态。

⑤近代岩石力学研究说明，当隧道开挖后，离临空面一定深度处形成一个压力圈，这个圈本身就能支持围岩，所以只要围岩及时加以支护，这个压力圈就能维持圈外围岩的稳定。

⑥经验证明，开挖后围岩的支护有一个最佳的时机。

⑦正确估计合理的支护时间的重要手段是现场测量。

⑧支护应当有一定的柔性，喷混凝土本身要薄或加设钢筋网和锚杆，而不应该增加喷混凝土的厚度。

1971年开挖的陶恩隧道采用了新奥法。其覆盖层高达1000m以上，隧道穿过的各种千枚岩，其中有一部分摩擦角极低（部分低于 $20^\circ$ ），开挖直径约为12m在很长地段上出现了约10~20cm的径向位移。

应着重指出，与地面工程相比较，地下工程的地质工作具有特别重要的意义，因为地下工程的规划、设计、施工与使用是否合理，均在很大程度上取决于地下工程所穿过的地质条