

编号: (79) 019

内 部

出国参观考察报告

国际隧道掘进技术

科学技术文献出版社

出国参观考察报告

国际隧道掘进技术

(内部发行)

编辑者: 中国科学技术情报研究所

出版者: 科学技术文献出版社

印刷者: 中国科学技术情报研究所印刷厂

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

开本: $787 \times 1092^{1/16}$ 印张: $8^{1/2}$ 字数: 214千字

1979年12月北京第一版第一次印刷

印数: 1—4,200册

科技新书目: 143—27

统一书号: 17176·225 定价: 1.25元

目 录

第一章 国际隧道掘进技术——英国第七届国际隧道掘进会议学术报告概要

一、有关场地调查研究、地质勘探的手段、方法及效果·····	(1)
(一) 场地研究和地质勘探的典型经验·····	(2)
(二) 场地调查研究的步骤和内容·····	(3)
二、关于岩石力学和土壤力学方面的一些论述·····	(5)
(一) 岩石和土壤的性质·····	(5)
(二) 岩石的支护·····	(7)
三、在不良地层中开挖隧道的几种特殊处理方法·····	(10)
(一) 注浆法·····	(10)
(二) 压缩空气法·····	(12)
(三) 脱水法(降低地下水位法)·····	(14)
(四) 冻结法·····	(18)
四、采用全断面隧道掘进机施工的掘进速度预测和实践经验·····	(21)
(一) 在硬岩中掘进速度的预测·····	(21)
(二) 在沉积岩中使用两种直径为3.5米的全断面掘进机的效率对比和对提高机械利用率的建议·····	(22)
(三) 在不良地质隧道中使用直径6.0米全断面掘进机的成功经验·····	(25)
(四) 用土压力平衡盾构机掘进直径8.48米隧洞,取得优异成绩·····	(28)
五、井巷掘进机械在斜井和竖井中掘进的施工实践·····	(30)
(一) 用安德生(Anderson) R. H. $\frac{1}{3}$ 型炮头式掘进机在斜井中掘进·····	(30)
(二) 用多斯科(Dosco)炮头式掘进机在斜井中掘进·····	(32)
(三) 用罗宾斯71R型反井钻机挖掘竖井·····	(33)
六、在隧道掘进中用钻爆法施工的一些理论和实践·····	(34)
(一) 关于提高中空直眼掏槽和周边眼的爆破效果的探讨·····	(34)
(二) 施工组织计划方面若干有意义的做法·····	(37)
(三) 重视爆破设计,严格检查制度·····	(40)
(四) 控制超欠挖与光断面测量·····	(40)
七、关于锚杆支护的应用·····	(41)
(一) 关于锚杆与随时间变化的岩层的性能·····	(41)
(二) 锚杆的锚固力试验·····	(44)
(三) 大型岩洞锚杆支护的施工实践·····	(44)
(四) 诺拉发电站在锚杆支护中遇到的问题·····	(48)

(五) 锚杆支护系统及岩体的测试工作与仪器设备·····	(48)
八、几种较新的临时与永久支护方法和预制衬砌构件·····	(49)
(一) 避免地面沉降的伸张式预制装配拱圈砌环·····	(49)
(二) 沿拱顶开挖隧道轮廓的机械预切槽法·····	(50)
(三) 增加岩面接触的钢拱架支撑上的弹性支承带·····	(51)
(四) 球墨铸铁块衬砌和钢板及混凝土块组合衬砌·····	(52)
九、通风防尘工作要高标准, 严要求·····	(53)
十、在地质情况多变的情况下, 如何合理制定隧道承包合同·····	(54)
十一、对学术报告的几点体会·····	(55)

第二章 英国第二届国际隧道掘进会议 附设展览会情况介绍

一、凿岩机和钻车·····	(59)
(一) 凿岩机·····	(59)
(二) 液压钻臂和推进器·····	(63)
二、装载机械·····	(63)
(一) 瑞典哈格隆特 (Hagglund) 公司的HR型立爪式装载机·····	(63)
(二) 爱姆科公司Eimco 628 CLD侧卸式钻装机和彼勒特公司无链牵引侧卸式钻 装机·····	(63)
(三) 安德逊公司MC 3 A型与MC 4 A型蟹爪式装载机·····	(65)
(四) 装运车·····	(66)
三、隧道掘进机·····	(66)
四、隧道支护的材料和设备·····	(67)
(一) 预制的混凝土衬砌块·····	(67)
(二) 铸铁衬砌块·····	(67)
(三) 混凝土喷射机·····	(68)
(四) 树脂锚固剂·····	(68)
五、电子测试仪器·····	(69)
(一) 激光导向仪·····	(69)
(二) 电子测角仪·····	(69)
(三) MPF型钻孔测斜仪 (MPF 692A Borehole clinometer) ·····	(70)
(四) 研究矿山力学和观察、监测或研究隧道岩层位移变化的仪器·····	(70)

第三章 国外岩石隧道全断面掘进机近年来的发展概况

一、罗宾斯公司掘进机近期发展·····	(73)
(一) 罗宾斯151—191型掘进机·····	(73)
(二) 罗宾斯353—197型掘进机·····	(74)
(三) 罗宾斯61—176/177型斜井用掘进机·····	(75)

(四) 罗宾斯公司新厂	(75)
二、佳伐公司近年来的发展	(77)
(一) MK22型和MK30型掘进机的改进	(79)
(二) MK15型掘进机	(79)
(三) MK30型掘进机的发展	(80)
三、德马克公司掘进机	(80)
(一) 德马克掘进机的生产基本情况	(80)
(二) 德马克掘进机的构造特点	(83)
四、维尔特公司掘进机	(85)
(一) 维尔特掘进机的新系列标准及其主要技术性能	(86)
(二) 发展护盾式掘进机	(87)
(三) 扩孔式掘进机	(87)
五、对四家公司生产的掘进机的看法	(89)
六、在基尔特工地看到的罗宾斯123—133—1型掘进机	(90)
(一) 双列圆锥(单外圈、双内圈)滚柱大轴承	(90)
(二) 大刀盘的安装	(92)
(三) 导向壳体和大梁	(92)
(四) 铲斗刃口	(92)

第四章 参观七个隧道工程的情况介绍

一、英国笛诺维克 (Dinorwic) 抽水蓄能水电站	(93)
(一) 电站概貌	(93)
(二) 工程概况	(95)
(三) 施工方法及施工设备	(98)
(四) 施工特点	(99)
(五) 几点有参考价值的工程措施	(103)
二、英国基尔特 (Kielder) 水利工程的隧洞开挖	(103)
(一) 基尔特水利计划概述	(103)
(二) 基尔特隧洞概况	(105)
(三) 隧洞的施工管理	(105)
(四) 基尔特隧洞工程的主要经验	(106)
三、英国太恩和韦尔 (Tyne and Wear) 地铁工程	(107)
(一) 太恩区快速交通网路	(107)
(二) 纽卡斯尔和盖茨黑德市区地铁隧道的施工	(108)
四、英国塞尔贝 (Selby) 煤矿斜井工程	(108)
(一) 塞尔贝煤矿开发计划	(108)
(二) 工程地质和水文地质情况	(109)
(三) 建筑及设计考虑	(110)
(四) 施工方法和设备	(111)

五、比利时安特卫普 (Antwerp) 地铁工程.....	(112)
(一) 安特卫普市的新建地铁工程.....	(112)
(二) 地铁隧道的施工方法及机械设备.....	(112)
(三) 车站施工.....	(116)
(四) 安特卫普地铁工程的几点成功经验.....	(118)
六、意大利弗雷儒斯 (Fréjus) 公路隧道工程.....	(119)
(一) 工程概况.....	(119)
(二) 地质情况.....	(122)
(三) 施工方法与施工设备.....	(122)
(四) 劳动组织.....	(123)
(五) 几点成功的经验.....	(123)
七、巴黎地铁工程.....	(123)
(一) 概述.....	(123)
(二) 软土层中城市区地铁隧道施工法之一——超前挖槽薄壳顶板支护法.....	(124)
(三) 软土层中城市区地铁隧道施工法之二——建造两侧挡墙加桥面板施工法.....	(129)
(四) 巴黎地铁工程中看到的几点措施和经验.....	(130)

国际隧道掘进技术

中国隧道掘进代表团

前 言

应英国第二届国际隧道掘进学术会议的邀请，我有关部门派出中国隧道掘进代表团于1979年3月12日至26日去伦敦参加该次会议。

英国第二届国际隧道掘进学术会议系由英国矿冶学会、隧道学会、采矿工程师学会及环境部的运输和道路研究实验室联合举办。参加会议的有37个国家和地区的代表共460人，提出有关地质勘探、岩土力学和当前国际隧道施工经验等学术论文35篇；有64家厂商在会议期间展出了隧道施工用的机械实物、模型和资料。学术会议结束后，于3月18日起分两组分别到英国和西欧两地区参观英、比、意、法四国正在施工的七个隧道和地下工程，到3月26日结束参观。

由于会议的组织工作做得好，学术讨论和工地参观的内容比较丰富，使我们不但了解到国外当前隧道掘进的技术现状和今后趋向，而且还在工地看到了各国隧道掘进的施工方法和机械设备，遇到的问题和解决的办法，使我们开扩了眼界，丰富了认识，收获是不小的。

为了从这次会议中吸取有益的东西，为我所用，我们把35篇论文的主要观点结合参观的施工实例在第一章中分列十个专题作了概括性叙述；在第二、三章中根据展览会和国外厂商交谈的资料介绍了隧道掘进机械的新的发展；到工地现场参观的七个工程项目都是英法等四国的较大的工程项目，虽然资料不多，但也基本上反映了目前国外隧道施工的典型经验，故在第四章中作了介绍。

由于出国参观的时间很短，实际的工作日只十天，而涉及的专业面很广，我们的知识有限，理解不够全面，错误之处一定很多，希望同志们阅后指正。

第一章 国际隧道掘进技术—英国第二届国际隧道掘进会议学术报告概要

一、有关场地调查研究、地质勘探的手段、方法及效果

对于任何隧道工程，建设场地的调查研究，尤其是工程地质、水文地质的钻探工作是非常重要的。它在很大程度上影响到建设的规划方案，并对工程设计、施工技术和施工组织计划几乎起到决定性的影响。在我们这次所接触到的论文和工程中，都十分重视这项工作，付出了很大的精力与资金进行勘探，虽然在时间上和费用上会多花一些，但就整个工程建设来看，占的比例很小，好处却很大。不但情况明，决心大，措施得当，施工顺利，而且避免了

很多返工浪费和意外事故，节省了很多盲目的开支和设备，其结果是多快好省的。

(一) 场地研究和地质勘探的典型经验

下面，就我们了解到的有关工程，在场地研究和地质勘探方面的典型经验，择要加以介绍。

1. 英国约克(York)市郊外的塞尔贝(Selby)煤矿工程，通过60多个钻孔，探明了下层地质情况及煤层厚度和分布范围。地质工作做得很详细，从而估计出煤的储藏量为6亿吨和总产量2亿5千万吨，确定了建矿的规模和步骤，进行了规划和设计。在工程的第一阶段开挖两个斜井的施工方法，也是根据地质水文勘探的结果来制定的。在表层(冰川沉积层)

(22米深)的淤泥、粘土和砂层中，由于渗水，采取了井点和水井相结合的排水措施，稳定了土壤，用明挖法灌注了钢筋混凝土口部；到了下边二叠纪泥灰岩、含镁石灰岩层中，用劳伦斯(Lawrence)盾构和多斯科(Dosco)悬臂式挖掘机挖掘；在142~163米深处含水含镁石灰岩中采取水泥和化学注浆法的堵水措施；而在163~172米深处的二叠纪砂岩中因含水较严重，则采用冻结法的隔水措施。工程进展顺利，截止到目前为止，实践证明根据地质分析所定的施工方法是有效和经济的，这个实例说明地质工作如做得好，就可以根据不同的地层，采取不同的措施，收到经济而良好的效果。

2. 英国太恩和韦尔(Tyne and Wear)地区基尔特(Kielder)引水隧洞。详细勘察了38个可能的水库位置，最后选定了基尔特地区。因其库容大，1.88亿立方，不漏水，水源丰富，能满足将来(2001年)的需要。又详细勘察了引水隧洞的地下情况，钻了18个深孔，补充了32个浅孔，以决定岩层的纵剖面和各层的性质。他们在勘察钻探中，提出了一系列的地质报告和详细的地质纵剖面图，厚达十一卷。从而决定了隧洞轴线、各层的开挖方法和支护方法。为了确定困难地层的开挖、支护方法他们又与建筑研究院合作，修了一条试验隧洞；通过试验，证明了喷锚支护的有效性，判定了开挖和支护之间的时间间隔，肯定了隧洞使用全断面掘进机的可能性，并向参加投标的施工承包商们提供主要的岩层实际情况，以便于他们在投标时能正确地决定施工方法与设备，合理地安排施工计划，提出较低的造价。

承包合同的合理安排。创造性地用“岩石分类系统”办法根据出现的实际地质情况以调整单价(分类办法详见后文)。

在这个工程中，承包商采用了全断面隧道掘进机，他们对地质勘探结果也是非常关心的，如果采取的施工方法与地质情况不相适应，一台掘进机售价数百万英镑，如掘进机在掘进一段之后不能顺利开挖或甚至不能应用，则经济损失是很巨大的。

3. 英国诺萨伯兰给排水管理局(Northumbrian Water Authority)主办的太恩区(Tyne side)排水系统，计划在太恩河南北两岸修建约75公里的下水道干道，以承接现在已有的180条较大的下水道和大量的小排水管流来的污水，引入太恩河或邻近的海湾中去。其平均流量约3700升/秒。该系统的详细计划开始于1966年，预期在80年代中期建设完成，全部费用约为一亿英镑。

下水道的路线靠近或平行于河流和海岸，它们把污水输送到污水处理场，主要靠重力；管道的位置有地面上、壕沟中或岩石和软土中，其内径为0.6~3米；75公里线路中的三分之二是地下结构，大部分是隧洞。

这个区域的地质情况，有很多的中层和上层煤系岩层，大多数岩石上面复盖着冰河时期的冰积层，由泥砾组成，最上面是一层表土。大约75%的下水道建在冲积层中，其余25%则在煤系岩层中。

（二）場地調查研究的步驟和內容

由於規劃、設計和施工等方面的需要，對於大區域範圍內的隧道建設，要有一個研究的程序，一步一步地進行調查研究。我們覺得他們進行的調查研究做得很好，值得我們借鑒，所以比較詳細地把他們進行的場地調查研究步驟和內容介紹如下：

1. 步驟一——室內研究

任何現場研究開始之前，必須完成室內研究，其目的是使工程師們必須對所設計的隧道的地質技術特點有一個概括的了解。包括熟悉現有的和從有關部門找來的資料，擬定可能的隧道線路的初步方案，並使地質工程師能從整体上計劃他的現場研究工作。資料的範圍包括：

- （1）舊的和最新的地形圖和街市地圖；
- （2）航空照片；
- （3）地質圖、有關地質的計劃和專題報告；
- （4）現已廢棄的和正在開挖的採礦工作區位置和礦層記錄；
- （5）現有的公用事業和服務行業的位置平面圖；
- （6）在擬建線路附近的其他已建工程的場地調研報告（已經發現，由於時間的不同和各工程性質的不同，資料會有差異，所以不能過多地信賴過去的這些記錄）；
- （7）土壤圖；
- （8）土地利用圖；
- （9）水文資料和水文地質資料；
- （10）專業性雜誌和技術性刊物上的論文和著作；
- （11）檔案資料、書籍、雜誌、舊圖和工業記錄。

這些資料，對研究擬建隧道可能通過的地帶將會遇到什麼樣的情況，提供了比較廣泛的有利條件。但一般說來，這些地質圖和平面圖並不特別有助於更詳細地描述和預測靠近地表的地質狀況。地質科學研究院在提供這些背景資料方面，給予了很大的幫助。

2. 步驟二——初步現場研究

初步現場研究的目的是，在整个建設現場通過充分的工作，來：

- （1）對預先想定的隧道線路 and 對另外的選擇路線，判明其可能性與合理性。
- （2）縮小這些選擇線路的範圍。
- （3）估計這個隧道工程的大約費用。
- （4）幫助制訂主要現場調查研究的計劃。

這些工作通常包括：

- （1）沿隧道線路定下所選擇的鑽孔點（可與接近豎井的地点相一致）。
- （2）進行選定的試驗。
- （3）進行明挖的工作。
- （4）可能被委託的地球物理方面的勘測。
- （5）為了更詳細地考慮一些特殊問題，掘進顧問們提出的專門鑽孔。

3. 步驟三——主要的現場調查研究

主要的現場調查研究的目的是，獲得最後定線所需的各種資料，並使設計工程師們能據此完成他們的設計，使工程的承包者們能按此建設他們的隧道。一般可包括下述內容：

（1）現場勘探

大部分現場勘探工作必須包含鑽孔的鑽探，在軟土中用套管和螺旋鑽的方法，在岩石中

用旋转取岩芯的钻机。所取的岩土样都要妥为保存,以备直观检查。分裂的粘土岩芯要用彩色照相记录,这对层状粘土的特点特别有用,并为实验室试验之用。在土中包括取回扰动过的和没有扰动过的土样,还要包括地下水的试样。对无粘聚力的土壤要作贯入度试验。要进行抽水试验,装置立管和气压计,以作长期的地下水监测之用。在场地分析有特殊问题之处要更多地钻孔,以增补初步现场研究中所定钻孔的不足。一般的做法是这些钻孔最少偏离隧道轴线两倍隧道直径,并且在不再需要时以混凝土回填。在纽卡斯尔(Newcastle)市的实践经验表明,计划中的一条通过主要街道的地下隧道,其勘探钻孔的规定位置,被公用、服务事业的密集的地下设施严重地阻碍了,所以不得不改变钻孔位置。

(2) 实验室试验

英国规范修正草案(B.S.CP2001)中,规定了对扰动和未扰动土样、地下水和岩石的一套全面的、对设计又现实的试验项目。对土中隧道的常规试验包括:自然含水量、干密度、流限和塑限,未排水的剪切强度、硫酸盐含量和pH值测定。未排水的剪切强度可以得到土壤稳定率。在预见的特殊困难的区域,和合同中注明的关系到合同支付的一些地层物理性质,可作专门的试验。试验可以得出岩石的无侧限抗压强度、集中荷载、直接抗拉强度和斯密特(Schmidt)锤击硬度。岩类学检验和矿物学测定也是经常要进行的。

(3) 现场试验

为了帮助制定合同说明书和建筑工程清单,可能需要在现场做一些专门的技术实验,例如喷射混凝土试验,锚杆试验和注浆试验等。

(4) 下沉和危险特征的预测

那些很可能受隧道施工影响而沉陷的建筑物,其在施工前的状态,必须仔细地予以测量和照相。建筑物的平面图及其结构细部和基础设计也必须获得。简单的变形设备,例如德马克(Demec)点量计和金属丝振动应变仪,将被设置在建筑物内被选定的位置上,这些设备的安装位置,决定于建筑物的细部构造,能进入的并且预料易于损坏的地方。确定位移的量,有助于证明赔偿损失的要求。他们预测下沉的方法,在隧道通过很高财产价值的区域中,被认为是一个很必须的实践。

(5) 设计和承包人所需的另外资料

主要的现场调查研究报告,和所有的例行资料,都告知工程承包人,还有现场钻孔记录的三维模型及其岩土样芯,对于承包人来说,都是值得细读的有用材料。管理局新近所订的合同中,电视录象也用在煤系岩层的钻孔中。

由于太恩地区地质构造的复杂性,特别是上层的冰河生成物,很易变化,因此在个别钻孔之间,比较难于得出令人满意的关系,做一个场地的三维物理模型,被认为是很必要的。

4. 步骤四——隧道内的调查研究

(1) 测绘

通常的经验,在施工过程中,作业班互相交接的时候,都要移交一种测绘记录(本),记录中有隧道开挖面暴露出来的地质状况、地层边界、岩性变化和构造、渗水点或渗漏线。这些资料,都画在隧道的横断面和沿中线的纵剖面上,以便核对或补充现场调查研究的材料,有利于进一步的工作要求。

(2) 岩石掘进的支款估价

影响岩石隧道掘进速度和临时支撑难易的主要因素,是岩石的总的特性。用掘进机掘进似乎比用钻爆法掘进更易受围岩地质技术参数的影响。一个成功的承包人,能够根据现场调

研岩芯所指出的岩石类型，选用高效率的掘进方法，把资金投入于或者是全断面掘进机或者是其他的挖掘机。但是，在岩性变化频繁的地方、场地钻孔密度又反映不出某些变化的情况下，所选择的机械也不可能经常达到其预期的效率。所以，任何施工合同，由于这类变化，给承包人带来了不定的因素，有时是高度的风险。有的单位采取了如下的办法：1)在岩性变化可能产生危险的情况下，无论是谁都可以提出消除或减少这种危险的施工方法；2)制定适当的办法，估计解决这种危险的费用，合理地分配给出包和承包双方负担。管理局在最近的合同中，为了试图与承包人分担危险，系统地定出了开挖中与岩石特性有关的支付(费用)制度。这个制度允许承包人根据开挖困难程度，提出他开挖速度的价钱。这是一个十分新鲜的支付制度，现在管理局已经获得了很多经验。将来，这将是更详细的论文或文件的主题。

二、关于岩石力学和土壤力学方面的一些论述

通过地质勘探，基本摸清了隧道所在地层的物理和力学性质之后，就可以根据设计要求，进行力学分析，设计隧道的支护结构。在隧道掘进工作中，也要针对这些物理和力学性质，研究相应的措施，使开挖能够安全快速地进行。

在分析研究中，岩石力学和土壤力学占有很重要的地位。随着地下工程的日益发展，研究的问题也日益深入。因为这一次会议是隧道掘进的会议，所以对岩、土力学方面的论述很少，英国的伍德 (A·M·Muir Wood) 博士在会上作了一个报告，系统而简明扼要地介绍了当前的一些观点和理论，现择要介绍如下。

(一) 岩石和土壤的性质

虽然土壤多种多样，但都可以看成是连续介质；而岩石的性质无论在隧道工程和采矿工程中都比较错综复杂，这在表 1—1 中可以看出。

表 1—1 影响土壤和岩石物理性质的特征简表

特 性	粒 状 土 壤	粘 性 土 壤 (正 常 压 实)	岩 石
(1) 基本概念	连续介质	连续介质	带有间断节理和不定向节理的连续介质
(2) 强度分析特性	摩擦	摩擦、聚合	摩擦、聚合、脆性
(3) 含水的状态	孔隙水	孔隙水、吸附水	孔隙水、吸附水、裂隙水
(4) 长期效应	无	压实、膨胀、粘塑性蠕变	膨胀、粘塑性蠕变、晶态蠕变

这里土壤和岩石的区别多少是有些武断的：接近地表的过度压实的粘土特性在很多方面都和深层的弱页岩相似。确定介质特性象土壤还是象岩石的一个因素是“能力系数”(competence factor)，这是指在隧道所处地层中的介质，在非轴向荷载作用下的无侧限抗压强度与其覆盖层的有效压力之比。因此，在工程学的条件下，深度是确定土壤和岩石分界面的一个因素，分界面深度从稳定性方面考虑比从开挖的力学方面考虑要大。

表 1—1 说明岩石的各种特性比土壤更复杂。除了软地层和大块结晶岩石以外，岩石的性质受控制于其不连续性，表现为节理。因此，有人提出格言性的一句话：“土壤力学是研究土壤的强度，岩石力学是研究岩石的弱点。”由于节理岩石的应力形式随着开挖的结果而变化，所以变形最初取决于节理的剪切移动(可能张开和闭合)，当剪切应力增加时，新的

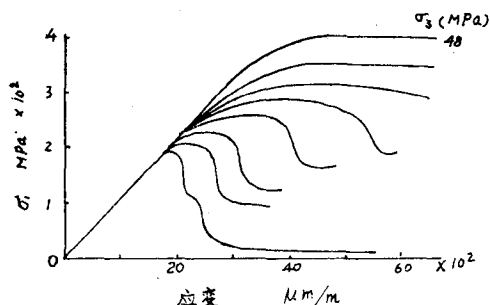


图 1—1 典型应力/应变曲线

不连续性可能发展，则变形就不再那样取决于最初节理的类型了。因此，必须搞清楚，这是一个保持原先节理类型的稳定性问题呢？还是一个极不相同的屈服岩体的问题？

土壤力学的“脆性” (brittleness) 概念，是在超过一个最大强度点后，所发生的不可恢复的强度减失的一种量度。凡是用塑性来分析岩石性质的，必须考虑到这种现象，这就增加了岩石性质实际数值模型的复杂性。如图 1—1 所示，同样的岩石根据侧限应力和主应力之比的不同而产生不同程度的脆性。

“有效应力” (effective stress) 概念是指在水压很小时的总应力，这从土壤转到岩石的过程是很慢的。当裂缝的导水性很高而渗透性很低时，从裂缝进入可压缩岩体中的孔隙水的压力传递是按照土壤压实规律而变化的。因此，岩石的物理性质，包括泊桑比，是随时间而变的。当在地下水位以下开始进行掘进时，渗透性低的弱岩的有效强度会暂时降低，直到孔隙压力到达平衡为止。需要特别注意的是：估计岩块之间的有效应力，可以十分不同于估计块体内部的有效应力。在岩石节理体系中，一个迅速降低的外水压力作用，由于上述因素，可以减小预计的岩块峰值强度和残余强度之间的差别。

粘土在静荷载作用下的随时间变化的特性取决于其含水量，初次压实引起孔隙水的压榨，二次压实使颗粒间出现滑动以切除粘附水，其作用相似于弱碎屑岩的蠕变机理。对于较硬的岩石和岩盐来说，蠕变除了与周围温度和压力有关外，还与晶体结构有关。

当研究地下洞穴周围的土壤或岩石随时间变化的性质时，必须从区别以下两点开始：

(1) 当作业面离开研究点前进时的应力场变化 (2) 蠕变因素本身，即在恒定剪切应力作用下的蠕变。

在软土中，由于土壤容易膨胀，作业面本身的短期稳定性可取决于孔隙的负压力；而局部孔隙压力的上升，使孔隙水流向作业面，就形成了不稳定（所以，细颗粒的土壤能坚持得住的时间较长）。这种情况，在岩石中未必是一个重要因素，因为它的抗压强度比大气压力高得多。

一个容易错误地把土壤力学引向岩石力学的概念，涉及到土壤的水平应力和垂直应力之比。当地面相当平坦时，土壤和岩石中的平均垂直压力必须与覆盖层相当，并应考虑水的压力。在土壤中，可把有效的水平与垂直压力之比定为 K ，方向恒定。对于硬岩，问题就复杂了，由于节理和不均匀性，水平应力可能与其平均值相差较大；再则，地壳构造运动和构造力产生的 N （水平和垂直平均压力之比）在 $N_{\max}$ 和 $N_{\min}$ 之间变化，通常 N 的值可表现为对称的形态

$$N_{\varphi} = \frac{1}{2} (N_{\max} + N_{\min}) - \frac{1}{2} (N_{\max} - N_{\min}) \cos 2\varphi$$

多年过度压实粘土的 K 值超过了 1（例如伦敦粘土 $K = 2 \sim 3$ ），其数值在接近于现地面的地方为土壤的剪切强度所控制。虽然一种类似的模型可以说明岩石中的超过 1 的 N 值，但这些值更可能产生于地壳构造力，此构造力伴随着冲断层或褶皱，在接近向斜上表面的褶皱平面上产生了很大的 N 值；在北美洲的很多地方已经出现了一个东—东北东方向的大 N 值的大陆性倾向，并且在其他地区也可能存在类似规模的现象。

高和低的N值的数值和方向，对大洞穴的定位和平洞的定向有很重要的影响。当掘进面平行于或横切于节理的主要水平部分，形成了楔子，则其特性的差别可以随它的N值的变化而产生变化。但是，在建立这种关系时必须仔细从事，因为弱岩在长时期受到单一方向的高压的情况下，可以留下一个永久性的正交各向异性的特征。这种变质作用可能比在开挖时所产生的应力状态更为重要。

地层中初始应力的主轴线，在垂直方向和水平方向上，可以有明显的差异。在峭壁附近或山谷两侧有很多这种差别的证据；地壳构造运动带有显著垂直部分的（例如冲断层）附近，也可以看到同类的效应。

（二）岩石的支护

1. 有节理的硬岩

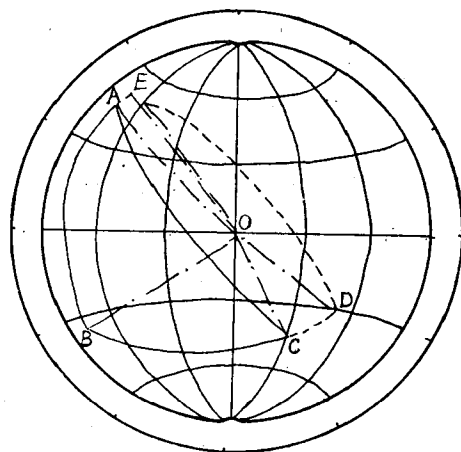
我们首先考虑的是岩石本身没有受到过大的应力状态下，其几何形状不变的稳定性问题，这取决于岩块间的相对位移。

对不稳定岩块，要考虑其节理是开缝的还是闭合的，一般节理的缝隙都是由同一方向的收缩或拉伸运动引起的，这个方向可能与节理平面呈横向关系，也可能不是。如果仅一组节理出现裂缝，那末就可以考虑利用横向的“成拱”作用。稳定性取决于岩石的抗拉强度，还取决于与隧道支撑间距有关的开缝节理群的方向和间隔。一般说来，锚杆横穿开缝的节理，是不能依赖的，锚杆本身的受力会引起岩块的位移。

单块岩石的稳定，在有的隧道开挖工程中要求有支护系统，并要求对不适宜于在开挖时直接观测的不规则间断节理的情况下进行预先处理，竖钻孔不能穿透垂直的节理，当遇到垂直节理或开缝节理时，可能损失部分岩芯，并且仅在具有昂贵的特殊设备时，才能提供有关方位的资料。导坑是提供数据和有关特殊支护问题的资料的最满意的来源，工程师对这些资料必须采用其适合的量度因素。岩石节理的强度，可以通过许多计算工作求得其节理粗糙度、岩石强度和主要应力来表示，现在巴顿（Barton N）先生正在研究和整理这些材料。

用立体网图可以通过目视来判断单块岩石的稳定性，用静力学的简单定律说明岩块在重力作用下容易脱落或者从一个或一个以上的节理面滑出（图1—2）。这样就可以根据可能的节理群间隔，把“普遍存在的节理”原则应用到设计支护的合理型式和支撑时机。其详细内容可参阅文献①②。

对于闭合节理系统，将锚杆支护和岩石表面密封结合起来，形成加固的岩拱，这在1961年就已经有了论文（Lang T.A）。对于间隔大的节理，锚杆主要是固定住不稳定的岩块，保



滑动楔OABC，节理形成边界OAC，OBC，OAB，
滑动在OAC，
塌落楔OEBC，节理形成边界OEB，ODB，OED。

图1—2 节理群所形成的岩石楔的立体线图

① Cartney, S.A.: 《The Ubiquitous Joint Method. Cavern Design at Dinorwic Power Station.》Tunnels and Tunnelling, 9, May/June 1977, 54—7

② Hoek E. and Bray J. W.: 《Rockslope Engineering》, revised 2nd edition, (London: IMM, 1977) 402p.

证岩石的成拱作用。对于间隔小的节理和发生表面能被侵蚀的地方需要加以密封,并结合密置的锚杆,因而可以在拱圈处达到足够的强度。虽然同样的方法也适用于平顶,但拱圈下部的岩石要注意能支得住。还有一个问题,就是隧道边墙的稳定性的常常容易被忽略了。

在关心块状岩石不稳定的问题时,还要认识岩石逐步破坏过程的重要性。这个过程是由

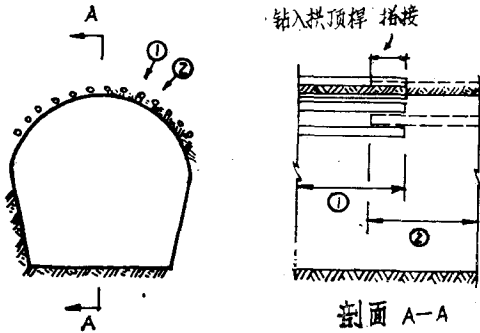


图 1-3 灌注拱顶杆要点

于连续的“关键”石块落下或滑动,使拱松动而造成的。在松散的块状石层中,这种变移会使不规则的大荷载迅速作用在已经做好的支护上。有一种处理松散的块石层的方法是可靠而满意的,但费用较高,这个方法是在隧道作业面的顶部前方,钻一排弧形的在顶部上方的孔,其方向平行于隧道轴线,然后再向孔里灌注拱顶杆(crown bar)。这样,就可以在连续的盾形护拱罩下面进行开挖。这种权宜措施,和英国木材支撑法传统采用的拱顶杆并无不同之处(图1-3)。

查理斯·范赫斯特(Charles Fairhurst)和他在明尼苏达(Minnesota)大学的同事们已经根据“相异元”(distinct elements)的概念提出了很有启发性、有理解力的岩石特性模型。每一个单元是一块;正在开挖的有支护或没有支护的岩体特性,用岩石的随时间运动的自动打印输出进行模拟,并指示出过应力或总的不稳定性。其详细内容可参阅文献*。

2. 软岩

迄今,一直假定岩石本身的强度足以避免剪切破坏。因而用最简单的准则把岩石看作弹性体,并建立最大单轴向抗压强度 σ_c 、与弹性模量 E 和泊桑比的关系式。对于半径为 a 的圆形隧道,收敛性为 u ,在周边所产生的最大切向应力 q_u ,由下式给定

$$u = \frac{1}{2} q_u \cdot a(1+\nu)/E \quad (1-1)$$

如果岩石具有弹性连续介质的特性,则在各向同性受力的岩石中,圆形隧道周围的切向应力当然是初始(压)应力的两倍。非圆形隧道与圆形隧道相差不大。方程(1-1)中,一个十分一致的收敛性预计值将意味着岩石周围暴露面上的切向应力是

$$\sigma_\theta \propto 1/r \quad (1-2)$$

表示最大半径的面上的应力集中——这和岩石特性假设的一个组所进行的很多繁杂的有限单元法分析的结果是一致的。这些理论稍作修改后,可用于椭圆形隧道,或者用于有明显正交各向异性特征的岩石中的隧道。勃郎列格和伍德已经研究了这种岩石的一般弹性情况,详见Brownrigg D. R. K. and Wood W. L.《Deformation of tunnel with variable ground reaction.》Proc. Instn. CIV. Engrs. 55: Pt2, 1973, 479—85。

实际上,这种隧道的稳定性可以通过测量收敛性以有效地加以控制,对一个特定的隧道,可以画出其收敛性的典型曲线(图1-4)不但对岩石要考虑一定程度的收敛,而且对支护特性也要考虑这一点。否则,锚杆的锚定,会由于对锚杆周围岩石伸缩的预防措施不充分

* Voegelé M.:《Rational Design of Tunnel Supports.》Ph. D. thesis, University of Minnesota, 1978.

而受到损害；最严重时，这种影响会导致锚杆的超载应力。如果超过了收敛压缩的一定程度（约0.2%），喷射混凝土要出现龟裂。

代门和范赫斯特已说明了隧道周围各向同性屈服岩石的特性。他们是根据弹塑性特征着手进行的，不改变强度特性，得出一个常用的方程式(图1-5)，以计算支护的径向压力：

$$P_i = \frac{1}{\sin \varphi} \left\{ \left[P \sin \varphi + C \cos \varphi \right] \left[1 - \sin \varphi \right] \left(\frac{a}{b} \right)^{(K-1)} - C \cos \varphi \right\} \quad (1-3)$$

式中： P_i 为支护的径向压力， P 为地层中初始均匀抗压应力， φ 为内摩擦角， C 为粘性， a 为洞的半径， b 为破碎区半径。 σ_r 和 σ_θ 为径向和切向应力（与隧道轴线有关）；

$K = (1 + \sin \varphi) / (1 - \sin \varphi) = K_p$ 。其详细内容请参阅他们的论文*。

必要时，安装足够长度的锚杆和适当的长度间距比例，加钢筋网和喷射混凝土

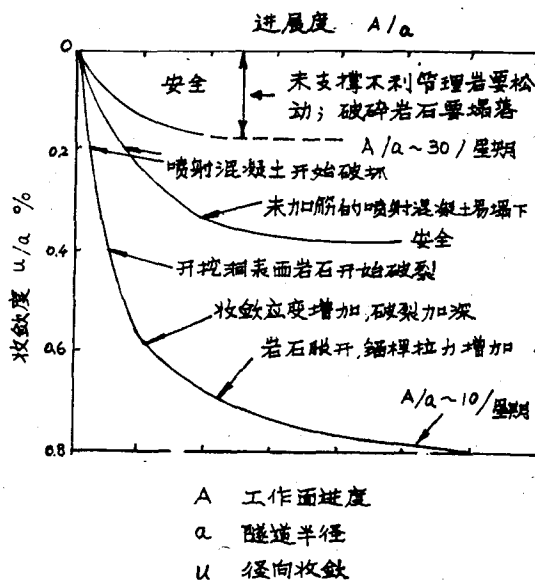


图 1-4 收敛应变标志图

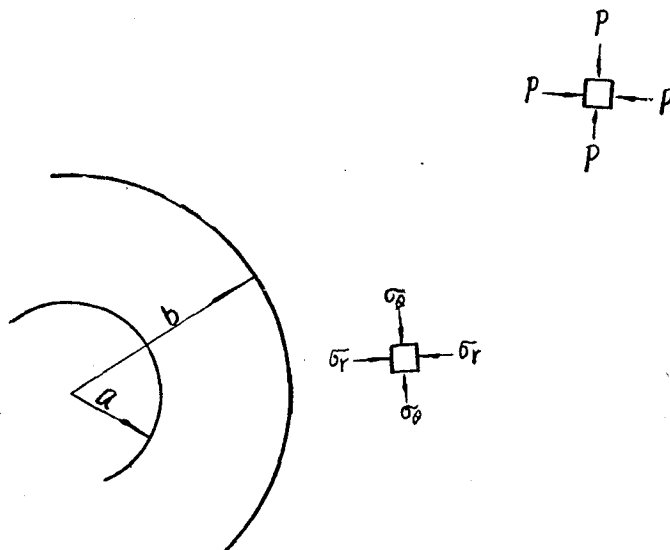


图 1-5 圆洞周围应力参考图

* Deamen J. J. K. and Fairhurst C.: 《Influence of Failed Rock properties on Tunnel Stability. In Dynamic Rock Mechanics》. Clark G. B. ed. (New York: AIME, 1971), 855-75. (Proc. 12th Symp. Rock Mech., 1970)

三、在不良地层中开挖隧道的几种特殊处理方法

从这次会议中看出,在不良地层中开挖隧道的特殊处理方法是当前国际上隧道掘进研究方面的重点。因为从现阶段来看,由于隧道建设的多方需要和城市地下铁道的日益发展,愈来愈多地遇到了不良地层,在施工中产生了很多的困难和事故,引起了建设单位、研究单位和地质、设计、施工工程师们的充分重视,并积极开展这个问题的研究。

所谓不良地层,是指含砂土层、泥砾土层、水蚀岩层、风化岩层和有裂缝或破碎的岩层等等,其承载力差,透水性强,在隧道开挖过程中,岩体不能稳定,容易塌陷,或者渗漏水严重,施工十分困难。如果没有适当的措施,施工中不但容易少慢差费,而且可能出现各种危险事故,甚至也有可能不能成洞或成洞后又报废的情况。在地下铁道建设方面,还有一个问题:因为城市多层建筑物密集,对土层压力较大,而地铁隧道一般不能太深,所以既要在设计和施工中考虑到地面建筑物的下陷和损害问题,也要考虑隧道本身的稳定问题。

在以上诸种情况下,目前国外采取的措施主要有注浆法、压缩空气法、脱水法和冻结法等。有的隧道用其中一种方法就能解决问题,有的只用一种方法还解决不了问题,要采用两种或多种方法才可以顺利施工。

下面介绍英国、日本、意大利、瑞典等地应用这些方法的经验:

(一) 注浆法

在冰川沉积层、砂砾层、有裂缝或破碎的岩石层中进行隧道施工时,为了防止地下水的渗漏和稳定岩土,可以采用注浆法。用一定的压力通过注浆孔把浆液压入岩土的空隙或裂缝中,凝固起来,以达到堵水和加固的目的。

注浆液种类很多,有水泥浆、水泥砂浆、水泥浆加水玻璃,水玻璃加有机剂和聚丙烯、酚醛和氨基的树脂聚合成的稀释单体等等,有一些浆液有专门名称,得到了专利权。注浆液在压入地层时,因为失水和沉积,粘度和稠密度逐渐增加,注浆的压力也就相应地要加大。失水是注浆法经常要考虑的一个重要因素,据一次砂砾土中的注浆的测定,失水率可达50%。水泥浆液的强度,取决于失水后的水灰比,适用于裂隙岩土中,或没有明显裂隙的渗透性大于 10^{-2} 厘米/秒的土壤中(如砂砾土)。水玻璃一类的胶液,没有稠密度问题,但粘度也是逐渐增加的,可以适用于渗透性低至 10^{-3} 厘米/秒的砂性土壤。关于聚合树脂单体一类的溶液,其粘度在固定时间内是不变的,可以渗进最细颗粒的渗透性为 10^{-4} 厘米/秒的土层。关于土壤的物理性质和渗透性,浆液的粘度、稠密度、失水、固结时间、注射压力和注浆前后土体的抗压强度等,可以通过实验室取样试验和现场灌注前后取样试验,得出最好的注浆方案和注浆效果,在很大程度上是依靠过去的经验。

注浆可在隧道内钻孔灌注,注浆孔钻成放射形;可以在隧道的导洞内注浆,超前一定距离,再开挖隧道;有的可在隧道旁开挖的管线隧洞中向将开挖的隧道区注浆;在离地面不远的隧道,可以从地面向下注浆,等等。

现举几个实例如下:

1. 在意大利米兰的一个隧道中,注浆以后,挖了一个试验隧洞,洞长15米,矩形截面3米×2米,进行直观检查和取样试验,经仔细研究,得出下列结果:1)浆液均匀地渗透进砂砾层,土壤能够凝固最细的砂层;2)由样品的物理化学分析,浆液约占土壤空隙的50%;3)样品无侧限抗压强度约30daN/cm²(弹性模数3000~4000daN/cm²);4)水泥

一粘土注浆能包住砂和卵石；5）水泥—粘土混合物小片上的试验，损失的水份相当于原容积的50~60%，这失水量至少导致强度增加了3~4倍。

2. 注浆法在日本青森到函馆的海底隧道中得到了广泛的采用。青函海底隧道位于新第三纪火成破碎的岩层，中有许多储水区。对于一般带有许多储水区的火成岩地段，他们采用注浆法以防止地下水流入隧道。现在，该工程已经用注浆法灌注了740个环圈，约6000个工作日，150,000立方米。所需通过的十个断层，目前已成功地穿透了八个，实践证明这个方法在较硬火成岩裂隙中是非常有效的。

注浆是在主隧道旁开挖的管线隧道中的支洞里向主隧道部位灌注的，后来，他们通过试验，采取从隧道作业面上的两侧部各掘进700~1000米导坑，以研究地质条件，在地下水容易流入的地区，进行灌浆和加固，以防止地下水的流入。他们对于注浆区的作用，有下述6个论点：

(1) 灌浆区范围为隧道半径的二到六倍，才能把水阻住。

(2) 已灌浆区的渗透系数应比原始地层的小 10^{-2} 厘米/秒。这意味着水压多半被灌浆区周边截住了，渗透进来的水量很小了。

(3) 当开挖隧道时，围岩要松动，灌浆区的渗透系数会增加5倍，渗透水要增加。如果松动区在灌浆区以内，则水压影响不会扩大到灌浆区边界范围以内；如果松动区扩大到灌浆区以外，隧道周围的地层会变得不稳定，而且内流量会大大增加。

(4) 虽然隧道周围地层根据其地质特征而呈现出弹塑性特性，但作用于隧道支护上的压力，被视为作用于灌浆区外边界上的水压和作用于隧道上的土压的合力。

(5) 对于有足够面积的灌浆区，可以假定水压的大部分被灌浆区承受，土压力被隧道混凝土衬砌承担。虽然衬砌上的所受的力从理论上讲是土压和水压的合力，这应依据地层的特性，求得相应的结果。

(6) 渗入水可收集并流入混凝土衬砌下的排水管中去，所以水不会进入隧道，也没有水压作用在混凝土衬砌上。

由于灌浆区的混凝土衬砌要承受土压和水压，所以灌浆区的持久性是很重要的。就灌浆材料而言，经验表明，水玻璃($MNa_2O \cdot NSiO_2$)和水泥的混合液，在某些情况下不能抵抗海水，这取决于混合的方法。现在最常用的最好的混合液，能够抗海水，其水玻璃（硅酸钠）的分子比M/N为2.0左右，水泥采用波特兰矿渣水泥，即在普通波特兰水泥中多加了50%的高炉矿渣粉。其配合比：(1) 胶体水泥浆液——水灰比800%~80%，水泥中加入分散剂0.25%，铝粉0.03%。(2) LW液——水灰比600~100，水泥浆和水玻璃比1:1，水泥中加入分散剂0.25%，铝粉0.03%。注浆一般是从管线隧道的三个支洞和进入主隧道的一个支洞进行的。注浆范围的直径为30米，等于隧道半径的五倍，注浆量为6000米³以上，在进行主隧道开挖时，在每个作业循环的作业面上向前钻七至十个孔，以保证前方无储水区或内流水源。

3. 注浆孔的安排，是根据实际情形研究决定的，下边用图1—6、1—7、1—8列举瑞典、意大利、英国的实例。

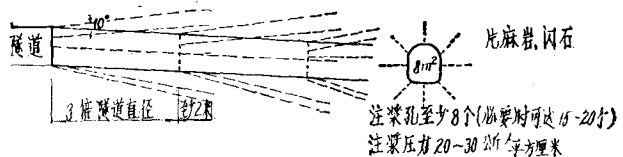


图1—6 瑞典波尔门(Bolmen)隧道(水泥砂浆注浆)