

# 核电站浅埋围岩隧洞盾构 施工技术措施与诊断评价

芮勇勤 李永林 谢鸿辉 贾伟 刘威 王路生 张亚芳 金易锡 编著



东北大学出版社  
Northeastern University Press

# 核电站浅埋围岩隧洞盾构施工 技术措施与诊断评价

芮勇勤 李永林 谢鸿辉 贾伟 编著  
刘威 王路生 张亚芳 金易锡

东北大学出版社

• 沈阳 •

© 芮勇勤 李永林 谢鸿辉 贾伟 刘威 王路生 张亚芳 金易锡 2017

## 图书在版编目 (CIP) 数据

核电站浅埋围岩隧洞盾构施工技术措施与诊断评价 /  
芮勇勤等编著. — 沈阳: 东北大学出版社, 2017. 10  
ISBN 978-7-5517-1704-5

I. ①核… II. ①芮… III. ①核电站—浅埋隧道—围  
岩—取水—水工隧道—盾构法—隧道施工—研究 IV.  
①TM623②U459.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 252467 号

## 内 容 提 要

为了有效地解决实际工程中出现的设计、检测、分析和管理等问题, 以及更好地提高在校大学生、研究生解决实际工程能力和水平, 我们编写了《核电站浅埋围岩隧洞盾构施工技术措施与诊断评价》一书。随着我国国民经济的快速发展, 能源需求迅速增长, 能源结构面临重大调整, 清洁环保的核电正成为新能源的发展重点, 特别是沿海核电站的大规模建设, 正在发挥着重要作用。核电站取水工程多采用隧洞、沟渠取排水等引水冷却循环模式, 取水隧洞建设过程中不可避免地会遇到复杂地质条件、高地应力等问题。本书深入阐述了隧洞盾构开挖及支护, 隧洞出渣与衬砌, 隧洞初支设计, 隧洞施工围岩分级与支护和隧洞施工组织; 进而开展隧洞盾构法施工管片围岩质量雷达检测分析, 隧洞盾构法施工管片形变破损分析, 隧洞盾构法与矿山法衬砌结构验算对比分析和隧洞盾构法与矿山法施工稳定性数值模拟分析。

出 版 者: 东北大学出版社

地址: 沈阳市和平区文化路三号巷 11 号

电话: 024-83687331 (市场部)

传真: 024-83680180 (市场部)

网址: <http://www.neupress.com>

邮编: 110819

83680267 (社务办)

83687332 (社务办)

E-mail: [neuph@neupress.com](mailto:neuph@neupress.com)

印 刷 者: 沈阳市第二市政建设工程公司印刷厂

发 行 者: 东北大学出版社

幅面尺寸: 185mm × 260mm

印 张: 17.25

字 数: 438 千字

出版时间: 2017 年 10 月第 1 版

印刷时间: 2017 年 10 月第 1 次印刷

责任编辑: 孙德海

责任校对: 铁 力

封面设计: 唯 美

责任出版: 唐敏志

ISBN 978-7-5517-1704-5

定 价: 55.00 元

# 前 言

目前,我国核电领域的取水隧洞工程正在快速发展与大规模建设,为了有效地解决实际工程中出现的设计、检测、分析和管理等问题,以及更好地提高在校大学生、研究生解决实际工程问题的能力和水平,我们编写了《核电站浅埋围岩隧洞盾构施工技术措施与诊断评价》一书。随着我国国民经济的快速发展,能源需求迅速增长,能源结构面临重大调整,清洁环保的核电正成为新能源的发展重点,特别是沿海核电站的大规模建设,正在发挥着重要作用。核电站取水工程多采用隧洞、沟渠取排水等引水冷却循环模式,取水隧洞建设过程中不可避免地会遇到复杂地质条件、高地应力等问题。

由于核电站取排水隧洞安全等级不同于一般建筑物,其施工过程中力学特性和稳定性研究显得尤为重要。为此,本研究基于构造应力环境开展浅埋洞群施工安全措施研究。在总结国内外大量文献的基础上,归纳分析了盾构施工模式下围岩稳定性分析状况,围岩稳定定量评价方法,隧洞支护理论的发展历程和现代支护结构理论与结构类型;深入开展了隧洞盾构开挖及支护、隧洞出渣与衬砌、隧洞初支设计、隧洞施工围岩分级与支护和隧洞施工组织;盾构运营期双层叠合结构应考虑温度荷载、地震力和内水压力作用,表明内水压按照隧洞满流(DBF水位 5.17m)计算,最大水压力 15.6m 满足工作要求。取水隧洞抗震计算采用拟静力法,按照最不利情况计,抗震计算是在静力计算的基础上叠合水平地震荷载,设计水平地震动加速度按照极限安全水平地震动参数 SL-2 级取  $0.18g$  考虑,稳定性验算满足工作要求;进行了隧洞施工计划及保障措施和隧洞施工总体安全部署与要求研究。在对人员组织管理保证措施、技术保证措施、资金保证措施、机械设备保证措施、劳动力保证措施和不良地质段的进度保证措施建立的基础上,形成了施工进度保证措施。进而提出里程碑工作要求,建立里程碑,完成针对性保证措施。隧洞施工过程以高起点、高标准、高质量、高效益的“四高”为总体目标,精心组织,精细正规,精益求精,铸造精品工程,为此建立施工指导思想。

本书开展的基于构造应力环境浅埋洞群施工安全措施研究已经应用于实际工程中,特别是随着 1 号等机组的发电,表明隧洞施工设计经济、合理、安全。使读者了解如何解决工程实际问题。

本书取材实际,简明实用,系统性强,通过了多年的实践教学和研究生培养。本书作为一本有实用参考价值的工具书,既可以用作大专院校的选修教材,也可以供相关领域工程技术人员自学参考。

在本书的编写过程中,借鉴了一些相关的核电设计和施工参考资料,以及认真拜访了红沿河核电站建设单位,受益匪浅,在此深表感谢!

参加本书编著的有芮勇勤教授、李永琳高级工程师、谢鸿辉经理、贾伟总工程师,以及刘威、王路生、张亚芳、金易锡、郑诗文、王超、刘准、侯剑楠等研究生。我们对东北大学、长沙理工大学等学者在本书编写过程中给予的帮助和教学实践指导,在此一并表示衷心的感谢!

最后，希望《核电站浅埋围岩隧洞盾构施工技术措施与诊断评价》一书，在实际工程中的设计、分析和仿真等方面，能给予广大读者启迪和帮助。

由于编著者水平有限，加之时间仓促，书中难免有疏漏和错误，恳请读者不吝赐教。

编著者

2016年12月18日

# 目 录

<b>第1章 绪 论</b> .....	<b>1</b>
1.1 研究背景.....	1
1.2 研究目的意义.....	1
1.3 国内外研究现状.....	2
1.3.1 围岩稳定性分析状况.....	2
1.3.2 围岩稳定性定量评价方法.....	3
1.3.3 隧洞的支护理论与实践发展历程.....	4
1.3.4 现代支护结构理论与结构类型.....	4
1.3.5 盾构隧道掘发展历程.....	6
1.3.6 盾构工作原理分类与地质超前预报.....	6
1.3.7 盾构施工方法.....	7
1.3.8 盾构法施工技术的发展与应用.....	8
1.4 国内外研究对本项目的启示.....	9
<b>第2章 隧洞盾构工程与地应力环境</b> .....	<b>11</b>
2.1 隧洞工程.....	11
2.2 隧洞施工设计.....	12
2.2.1 平面设计.....	12
2.2.2 纵断面设计.....	12
2.2.3 横断面设计.....	12
2.2.4 管片设计.....	12
2.2.5 混凝土与螺栓力学参数.....	15
2.3 工程地质及水文情况.....	15
2.3.1 取水隧洞地质情况.....	15
2.3.2 取水隧洞水文地质情况.....	15
2.4 构造高地应力环境.....	16
2.4.1 高地应力的判别.....	17
2.4.2 地应力测试基本方法.....	18
2.4.3 隧洞群地应力确定.....	18
2.5 隧洞岩体工程地质特性.....	19
2.6 基岩输入地震波.....	23

<b>第3章 隧洞盾构施工设计与计算分析</b> .....	<b>25</b>
3.1 隧洞盾构施工设计.....	25
3.2 隧洞盾构衬砌构造.....	31
3.3 隧道盾构结构计算与分析.....	32
3.4 三维有限元时程分析.....	42
<b>第4章 地应力环境隧洞围岩分级与盾构施工、开仓换刀</b> .....	<b>45</b>
4.1 隧洞初始地应力的考虑.....	45
4.2 构造地应力条件下隧洞围岩稳定性分级与开挖支护考虑.....	45
4.2.1 隧洞岩体基本质量指标 ( $BQ$ ) 评价.....	45
4.2.2 隧洞巴顿岩体质量指标 ( $Q$ ) 分级.....	47
4.2.3 隧洞岩体地质力学指标值 ( $RMR$ ) 分级.....	49
4.2.4 高地应力条件下施工中隧洞开挖支护类型判定.....	50
4.3 隧洞施工布置.....	50
4.4 盾构开仓换刀位置.....	50
<b>第5章 隧洞盾构掘进施工关键技术</b> .....	<b>53</b>
5.1 指导原则.....	53
5.2 施工关键技术.....	53
5.2.1 供风系统.....	53
5.2.2 盾构始发运输方案.....	54
5.2.3 软硬不均地段处理.....	54
5.2.4 线路中出现片麻岩捕虏体.....	55
5.2.5 穿越构筑物.....	56
5.2.6 同步注浆和二次注浆.....	56
5.2.7 管片拼装与质量控制.....	57
5.3 隧洞盾构掘进过程中的安保措施.....	59
5.3.1 盾构掘进参数设定和优化.....	59
5.3.2 小半径曲线段掘进施工技术措施.....	60
5.3.3 地表变形预测、控制及监测反馈.....	60
5.3.4 隧洞地表沉降监测值单日变化速率超限分析.....	62
5.3.5 密闭空间施工安全保证措施.....	65
<b>第6章 盾构开仓换刀安保措施</b> .....	<b>67</b>
6.1 盾构开仓、换刀方案的选择.....	67
6.1.1 盾构开仓、换刀方法.....	67

6.1.2	开仓、换刀方式的选择标准	67
6.1.3	刀具更换标准	67
6.1.4	盾构机刀具配置	68
6.2	常压开仓换刀施工方案	69
6.2.1	工序步骤	69
6.2.2	常压开仓换刀控制要点	72
6.3	盾构刀具更换实例分析	73
6.4	风险分析及控制措施	75
6.4.1	风险源控制措施	75
6.4.2	安全质量技术保证措施	75
<b>第7章</b>	<b>隧洞盾构法施工管片围岩质量雷达检测分析</b>	<b>77</b>
7.1	雷达检测理论依据与工作原理	77
7.2	检测目标与应用	78
7.3	地质雷达在隧洞衬砌围岩施工质量检测特征	79
7.4	隧洞抗震措施与检测	81
7.5	隧洞管片围岩地质雷达检测分析	84
7.5.1	准备工作	84
7.5.2	雷达天线频率选择	84
7.5.3	测试参数选取	84
7.5.4	探地雷达松动圈探测成果	85
<b>第8章</b>	<b>隧洞盾构法施工管片形变破损分析</b>	<b>177</b>
8.1	隧洞盾构法施工管片形变破损	177
8.2	管片结构应力模拟方法	187
8.2.1	应力分析	187
8.2.2	有限元分析法	188
8.3	Stress Simulation 模拟功能	189
8.4	盾构衬砌结构 Stress Simulation 模拟分析	190
<b>第9章</b>	<b>隧洞盾构法与矿山法衬砌结构验算对比分析</b>	<b>205</b>
9.1	结构验算基本依据	205
9.2	结构验算基本荷载类型	205
9.2.1	衬砌自重	205
9.2.2	水压力	207
9.2.3	灌浆压力	208
9.2.4	围岩压力	208



9.3 隧洞盾构法衬砌结构验算.....	209
9.3.1 考虑地震作用效应的圆形衬砌断面荷载状况 I 验算.....	210
9.3.2 考虑地震作用效应的圆形衬砌断面荷载状况 II 验算.....	214
9.4 隧洞矿山法衬砌结构验算.....	218
9.4.1 考虑地震作用效应的圆拱直墙形衬砌断面荷载状况 I 验算.....	218
9.4.2 考虑地震作用效应的圆拱直墙形衬砌断面荷载状况 II 验算.....	223
<b>第 10 章 隧洞盾构法与矿山法施工稳定性数值模拟分析.....</b>	<b>229</b>
10.1 材料单元.....	229
10.2 材料模型 Mohr-Coulomb 模型.....	230
10.3 Hardening-Soil 模型 (各向同性 Hardening).....	232
10.4 地震波作用原理.....	234
10.5 隧洞盾构法和矿山法施工衬砌稳定分析.....	235
10.6 隧洞盾构衬砌构造应力影响稳定分析.....	247
<b>第 11 章 结论与展望.....</b>	<b>259</b>
11.1 结 论.....	259
11.2 展 望.....	261
<b>参考文献.....</b>	<b>262</b>

# 第1章 绪论

## 1.1 研究背景

进入 21 世纪,核能已成为人类的重要能源,核电成为电力工业的重要组成部分。在人们越来越重视地球温室效应、气候变化的形势下,特别是鉴于哥本哈根气候会议减少大气碳排放量和环境污染等要求,我国积极发展核电作为加强基础产业设施建设的重要举措,核电建设也因此进入了一个黄金发展时期。

目前,世界上 30 多个国家和地区 400 多座核反应堆投入商业运营,装机容量 40000 万千瓦。我国建成运行的有浙江省秦山、广东省大亚湾、江苏省田湾、辽宁省红沿河等核电基地,如图 1.1 所示。我国的核电站装机容量约占全国电力总装机容量的 2%,与世界发达国家比,差距较大,并且远远低于世界平均核能利用发电水平。

核电运行中将产生巨大的热量,保证核电运行有大量的冷却水是影响核电站选址的重要问题。为此,核电站多数建设临近沿海、江湖,目的能保证冷却循环水源的充足。核电取水隧洞建设与引水主要为核电站常规岛冷却用水、核岛安全厂用水以及海水淡化系统等提供大量海水。

本书以辽宁红沿河核电站二期工程 2 台机组 CB 取水隧洞为工程研究背景,取水隧洞平均埋深 30m,最大埋深 46m。5 号、6 号机组取水隧洞和取水构筑物工程由一个取水构筑物和 2 条取水隧洞组成,其中,5 号机组取水隧洞设计起始里程为 WK0+000,设计终点里程为 WK1+255.752,全长 1255.752m,6 号机组取水隧洞设计起始里程为 LK0+000,设计终点里程为 LK1+269.617,全长 1269.617m;取水隧洞过水断面为圆形,其内径  $\phi 5.5\text{m}$ ,其中管片外径  $\phi 6.7\text{m}$ ,厚 0.35m,管片宽度 1.5m,内衬厚 0.25m。进水口底板高程 -9.70m,出口底板高程 -10.40m,约 0.5‰ 的下坡,进水口埋深 11.50m。取水隧洞穿越复杂的地质环境,建设过程中遇到高地应力、临海分布密集节理破碎带等特殊地质问题,如何确保施工期取水隧洞安全、按期供水运营,保证隧洞施工建设过程中的安全性和稳定性,成为亟待研究、解决的重要问题。

## 1.2 研究目的意义

地下工程处在特殊环境下,同时也面临着复杂的力学环境。纵观世界水工隧洞的发展,隧洞建设过程中遇到的高地应力、断层带、高地下水渗透压等问题导致围岩的塌方、突涌水、局部失稳甚至整体失稳,时刻威胁工程的建设和工程人员的安全,见图 1.2。因此,如何保证隧洞工程建设过程中的稳定性已成为迫在眉睫的任务,这也是当今国际岩石力学研究的热点和难点。可见,针对红沿河核电站 5 号、6 号取水隧洞的施工设计、开挖支护、岩体稳定等问题开展研究,认识取水隧洞于勘察设计、施工、运营中的隧洞灾害、围岩稳定和安保技术措施问题,选用合理的评价方法,采取必要的避让、预防及治理措施,保证隧洞在建设期安全稳定,保证快速、安全地实现畅通和经济的使用性能,改善地区的经济状况,有着非常重要的现实意义。



图 1.1 国内已建核电站

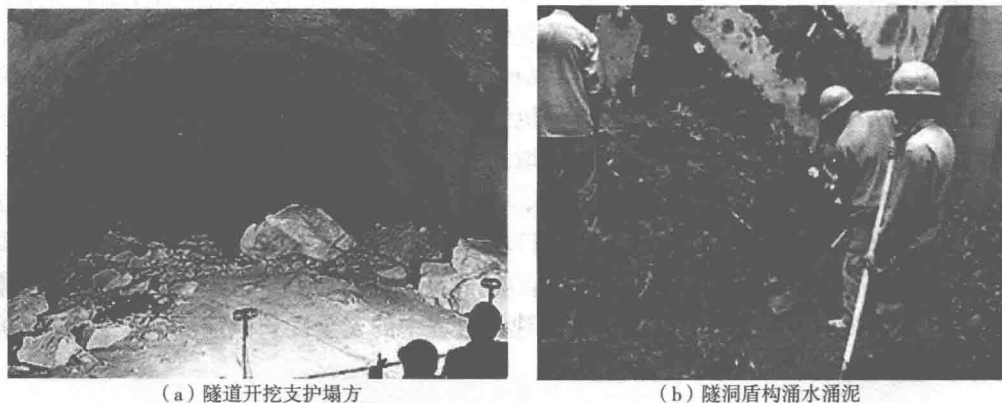


图 1.2 隧洞地质灾害

### 1.3 国内外研究现状

纵观围岩稳定性分析方法的发展,工程师\研究人员开展了各种有关岩石破坏、突变、失稳的分叉与混合研究,建立了围岩稳定的全新理论与方法。鉴于取水隧洞工程的复杂性,开展多种方法的综合分析\评价,也将成为未来工程发展的趋势。

#### 1.3.1 围岩稳定性分析状况

目前,地下隧洞围岩稳定性的分类方法有很多。例如,Stini, Franklin, Bieniawski 的 *RMR* 和 Barton 的 *Q* 等方法,以及 1995 年 Arild Palmstrom 提出的 *RMI* (*ROCK MASS INDEX*) 方法。地下隧洞围岩分类方法已经从定性到定量、从单一到复合型指标发展,使地下隧洞

围岩分类更加科学化、合理化、精确化。结合我国国情,科研人员研究了各种围岩分类方案,形成了我国围岩分类方法。例如,工程岩体分级标准(GB/T 50218—2014)论述了BQ分级方法。李世辉提出典型类比分析方法和施工过程中的位移反分析技术,并编著《隧洞围岩稳定系统分析》一书;等等。

### 1.3.2 围岩稳定性定量评价方法

分析围岩稳定性时主要有以下几种定量评价方法。

#### (1) 解析法

于学馥、刘怀恒用复变函数进行围岩应力与变形的弹性解析解分析。范广勤、汤澄波用三个绝对收敛级数相乘法建立非圆洞的外域映射求解函数。吕爱钟提出了用最优化方法建立任意截面形状巷道影射函数的新方法,开辟了新的求解途径。朱大勇提出了求解任意形状洞室影射函数的方法,分析复杂形状洞室围岩的应力弹性解析。张倬元、王士天、王兰生建立了均质围岩稳定、单一软弱结构面稳定与拱顶围岩简化块体稳定分析方法。

综上所述,精度高、分析快和易于规律性研究的解析法优点明显,解析法分析围岩稳定性的应力和变形多限于深埋工程,对于浅埋地表和地面影响荷载的隧洞围岩稳定性分析,利用解析数学处理存在很多困难。

#### (2) 图解分析法

通过空间图解分析围岩结构面、开挖临空面空间的组合关系,常用图解有赤平极射投影法、实体比例投影法和关键块体法。王思敬院士、孙玉科等在这些方面开展了系统开拓性的研究,开发出分析软件和专著。

#### (3) 物理模拟法

模型试验方法多用于重要的难以用现场试验方法解决的复杂工程,主要有相似材料模型试验法、离心机试验法和光测弹性试验法。S.C.Bandisl 等通过模拟高地应力条件圆形洞室的开挖模型试验,得出超高应力条件围岩各向异性性质明显,二次应力变形由岩体的构造控制。谷兆琪等进行了层状砂岩地下洞室稳定研究。朱维申研究了单排裂隙岩体模型的抗剪强度。陈霞龄用平面、三维应变破坏模型研究了地下洞室的稳定性。赵震英建立洞群开挖过程围岩模型,深入进行了应力和位移分布的研究,揭示了围岩破坏过程及安全度等问题。赖月强、姜小兰用平面应变地质力学模型,试验模拟彭水枢纽地下厂房洞室围岩的构造特点和力学性能,分析研究了开挖过程中的围岩应力、洞周位移、断层等的影响及变形破坏机理。孙世国等用模拟试验进行开挖岩体扰动与滑移机理的研究。

#### (4) 数值分析法

用弹塑性力学理论和数值计算方法建立数值模拟方法,研究基于应力和位移分析评价岩体在复杂环境下的稳定性。大多数的实际工程在复杂的环境特定条件下只能用数值分析法求解。目前,数值计算方法分为如下几种:

① 有限单元法(FEM)。有二维和三维计算程序。

② 离散单元法(DEM)。有 Gundall P.A.和 Hart.R.二维和三维计算程序,王泳嘉开发了应用软件,模拟研究地下洞室围岩的变形与破坏全过程。

③ 拉格朗日差分法 FLAC。FLAC 使用了“混合离散化”技术建立全过程动力运动方程,用“显示”差分求解法,统一了有限元、离散元融合的计算方法,有二维和三维计算程序。

④ DDA 方法。利用 DDA 模型与连续介质力学数值模型的结合, 实现了 DDA 模型工程应用研究发展。

⑤ 块体单元法。利用块体理论进行围岩体稳定分析, 首先寻找失稳关键块, 由块体失稳研究其滑动的可能性。

⑥ 边界元法。H.G.Poulos 等人将偏微分方程转换求解。

⑦ 块体—弹簧元分析法。Kawai 用简化刚性块体模拟不连续介质的刚体弹簧元数值模型建立求解方程, 研究缝面相对位移和应力, 分析节理岩体不连续变形和运动规律。

#### (5) 不确定性方法

可靠性理论不确定性方法, 建立不同岩石破坏判据极限状态方程, 用概率论方法求得工程的破坏概率分析稳定可靠性, 于地下工程围岩的稳定性分类应用中日益受到重视。

#### (6) 反演分析法

依据现场工程监控量测和信息反馈分析指导施工设计。依据现场监控信息, 通过反演的方法分析围岩的物理力学参数, 进而评价隧洞围岩稳定性, 目前该方法日益受到重视。

综上所述, 除了上述方法, 还有地下工程围岩开裂和破坏方法, 研究结构面的断裂扩展和连通, 采用断裂力学和损伤力学的方法研究评价节理裂隙岩体的稳定性和变形行为, 例如数值计算方法、块体理论的耦合发展, 以及系统论与控制论的引入综合研究等方法。

### 1.3.3 隧洞的支理论与实践发展历程

隧洞的支理论与实践发展进程大体上可分为 3 个阶段: 初始阶段、经典理论阶段和现代发展阶段。

#### (1) 初始阶段 (20 世纪以前)

由于隧洞开挖及隧洞结构工程的需要, 该阶段产生了一些初步的岩体应力理论, 隧洞支护设计方法大多凭经验, 普遍的支护形式有木支护、石材支护、混凝土支护等。

#### (2) 经典理论阶段 (20 世纪初—20 世纪 60 年代)

该阶段也是岩石力学学科形成的重要阶段。弹性、塑性力学引入岩石力学, 提出了围岩衬砌相互作用、共同支理论。岩石力学理论的应用使隧洞的支理论实践有了充分发展。利用围岩的自支撑能力, 适时地构筑柔性、薄层且能与围岩密贴的支护结构, 并通过动态监测, 指导支护施工的“新奥法”支理论和设计施工方法有了很大的发展。锚喷支护结构得到了广泛的应用, 呈现出理论和工程实际同步发展的良好局面。

#### (3) 现代发展阶段 (20 世纪 60 年代至今)

在该阶段, 岩石力学的进展表现在: 用更为复杂的多种多样的力学模型来分析岩石力学问题。计算机的广泛应用, 使数值计算方法 (如 GEOFEM, MIDAS, ANSYS, RFPA, FLAC 等) 在隧洞结构工程和隧洞的设计、计算、分析方面得到了广泛的应用。流变学、断裂力学、人工智能、分形理论等都被引入岩石力学问题的研究中。

### 1.3.4 现代支护结构理论与结构类型

现代支护结构理论与结构类型主要包括如下几方面:

① 现代支护结构理论建立围岩支护共同作用, 即围岩支护为两种材料的复合体。

② 围岩的自承能力充分发挥, 建立现代支护结构理论, 降低围岩压力, 改善支护受力性能。

图 1.3 (a) 为岩石应力与应变关系曲线, 图 1.3 (b) 为岩体节理面摩擦力与位移关系

曲线，两曲线都具有类似的规律。

随着实验应变位移增大，初始岩石岩体强度逐渐增大；随着应变位移增大，进入塑性区强度逐渐丧失，刚进入塑性区时自承力最大。

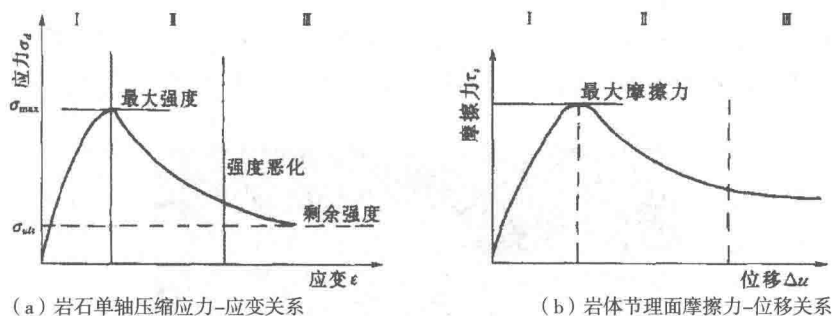


图 1.3 岩石应力-应变关系和摩擦力-位移关系曲线

现代支护结构理论要求，一方面采用快速支护、预先支护等控制手段限制围岩松动破坏；另一方面采用分次、柔性支护，以及控制仰拱施作时间，使围岩出现一定程度的塑性，充分发挥围岩自承力。

③ 现代支护结构理论原则是发挥支护本身承载力。柔性薄型、分次、封闭支护，以及加固锚杆支护，充分发挥支护承载力的作用。喷射混凝土喷层柔性大且紧密黏结围岩，使其主要受压或者受剪，比传统支护受挠破坏更能发挥承载能力。

④ 根据当前的科学技术水平，现代支护结构理论必须依据现场监控测试，分析评价预测指导施工设计，确定出最佳支护结构形式、参数，以及最佳的施工方法和施工时机。

⑤ 现代支护结构理论还要求，根据不同地质、力学特征，选用不同支护方式、力学物理模型、计算分析方法和施工设计方法。

现代支护理论与传统支护理论的主要区别体现在以下几个方面：

① 围岩压力认识方面。传统支护理论：围岩压力是洞室塌落引起围岩“松散压力”；现代支护理论：围岩具有自承能力，围岩不是松散压力作用于支护上，是阻止围岩形变压力。

② 围岩和支护间的相互工作关系。传统支护理论：围岩和支护分开，荷载围岩，承载结构支护，即“荷载-结构”体系；现代支护理论：围岩支护为统一体，组成“围岩-支护”体系共同工作。

③ 支护功能和作用原理。传统支护理论：承受荷载；现代支护理论：及时稳定和加固围岩。

④ 设计计算方法。传统支护理论：确定作用在支护上的荷载；现代支护理论：岩体地应力荷载，围岩和支护共同承载。

⑤ 支护形式和工艺。锚喷支护方式，施工简单，不需模板，无需回填，并且在围岩松动之前能及时加固围岩。

按现代支护结构的作用机理，采用支护归纳为如下 3 类。

① 刚性支护结构。通常现浇混凝土或者有的采用石砌块和混凝土砌块。

② 柔性支护结构。及时进行支护，限制围岩过大变形，避免出现松动破坏，又允许围岩出现适量变形。采取锚喷柔性支护结构，获得了极为迅速的发展。

③ 复合式支护结构。是柔性刚性支护的组合。通常初期柔性支护，采用喷锚支护；最终刚性支护，采用现浇混凝土支护或高强钢架支护。

### 1.3.5 盾构隧道掘进发展历程

根据工作原理,盾构机分为手掘式、挤压式、半机械式(局部气压、全局气压)、机械式(开胸式切削、气压式、泥水加压、土压平衡、混合型、异型)盾构。

① 日本三菱重工 (Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.), 解决了盾构对接技术, 见图 1.4。

② 日本小松制作所 (Komatsu Ltd.) 隧道工程机械包括盾构机、岩石掘进机和顶管机, 见图 1.5。

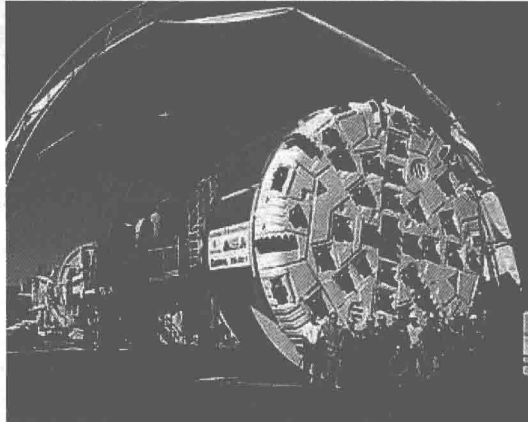


图 1.4 日本三菱重工盾构

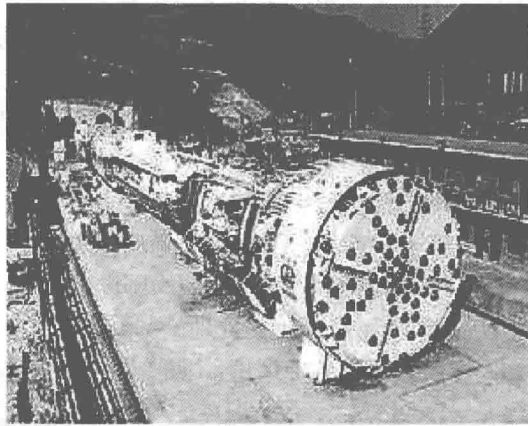


图 1.5 日本小松制作所盾构

③ 日本川崎重工 (Kawasaki Heavy Industries, Ltd.) 软岩和硬岩挖掘机, 例如东京市神田川地下调蓄工程用的直径  $\phi 13.94\text{m}$  的盾构机, 东京湾海底隧道直径  $\phi 14.14\text{m}$  的盾构机、英法海峡隧道开挖用的盾构机, 以及上海地铁隧道用的盾构机等。

④ 德国海瑞克 (Herrenknecht AG) 重大隧道工程 TBM。

⑤ 美国罗宾斯公司 (ROBBINS) 全断面隧道掘进机 (TBMs), 设备质量非常可靠。

⑥ 加拿大罗浮特公司 (LOVAT) 是唯一能提供盾构机的全面设计、制造、检测和试验的公司。

### 1.3.6 盾构工作原理分类与地质超前预报

#### (1) 盾构机工作原理

盾构机工作原理是圆柱体钢组件沿隧洞轴线, 一边向前推进, 一边对土壤进行挖掘。圆柱体钢组件的壳体即护盾, 对挖掘出的还未衬砌的隧洞起着临时支撑作用, 并且承受周

围土层的压力，还承受地下水压及阻挡地下水。

## (2) 盾构机基本分类

① 敞开式盾构机；② 机械切削式盾构机；③ 网格式盾构机；④ 挤压式盾构机。

## (3) 盾构机施工过程地质超前预报

盾构机隧道的地质超前预报非常重要。若遇到不良地质体，不及时进行掘进参数的调整和变更很容易受困，形成卡机、姿态失控等事故，甚至报废。但盾构机隧道不同于普通钻爆式隧道，盾构机上有很多精密仪器、仪表，不适合使用炸药作为震源来进行勘探的预报方式，另外盾构机盾头部分完全覆盖掌子面，不适合需要占用掌子面来进行预报的勘探方式。因此，通常使用弹性波法 TST 隧道地质超前预报系统匹配电火花震源进行断层带、岩性接触带、软弱夹层、溶洞、采空区、坍塌、冒顶、突泥、岩爆、瓦斯等地质灾害的预报，使用 CFC 复频电导技术对 TBM 掘进隧道掌子面前方含水位置和含水量进行预报，见图 1.6。

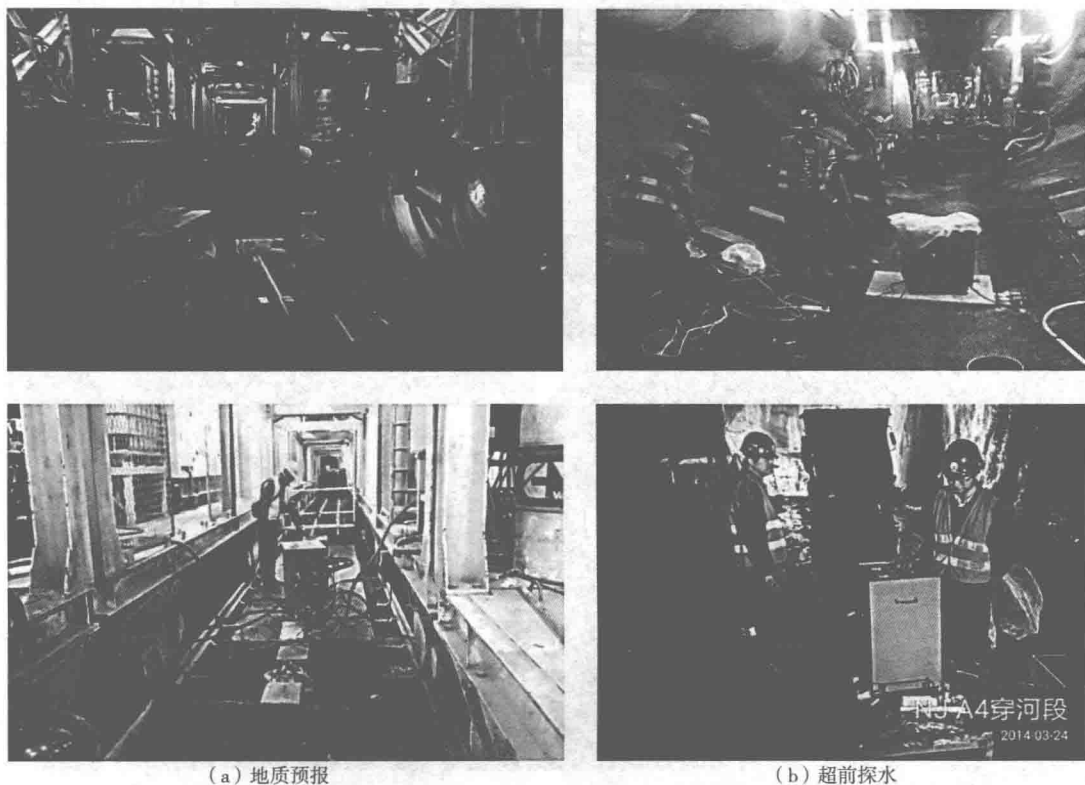


图 1.6 TBM 掘进隧道掌子面前方地质预报、含水位置和含水量预报

### 1.3.7 盾构施工方法

盾构法(Shield Method)是隧道暗挖法施工中的一种全机械化施工方法。

① 将盾构机械在地中推进，盾构外壳和管片支承围岩，防止发生坍塌；

② 开挖面前方切削土体开挖，通过出土机械运出洞外，千斤顶在后部加压顶进，并拼装预制混凝土管片，形成隧道结构。

水力盾构在工作面处有注满膨润土液的密封室。膨润土液既用于平衡土、地下水压力，又用于输送排出土体。盾构施工机具大多数盾构形状为圆形，也有椭圆形、半圆形、马蹄形及箱形等其他形式。盾构隧道施工情况见图 1.7 和图 1.8。



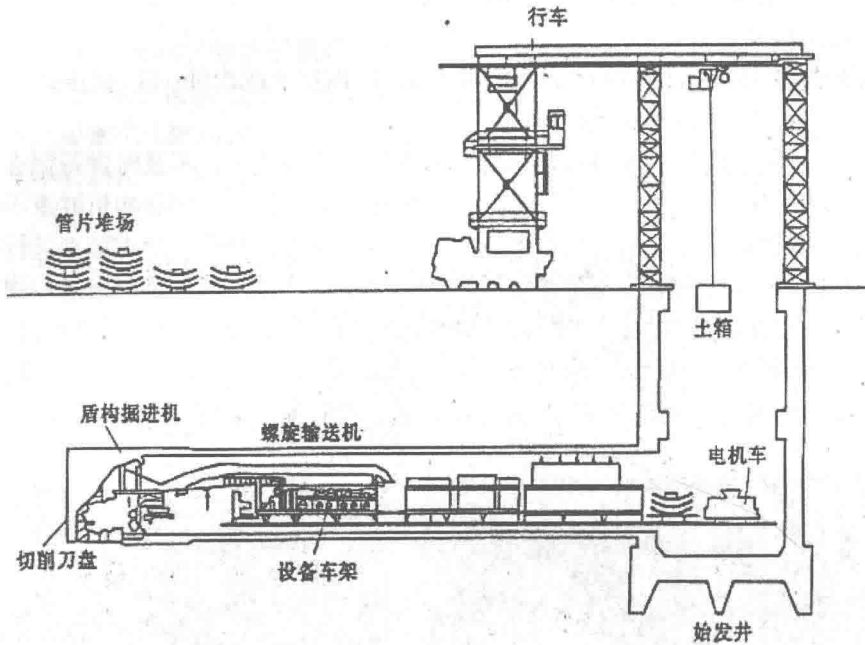


图 1.7 盾构施工步骤

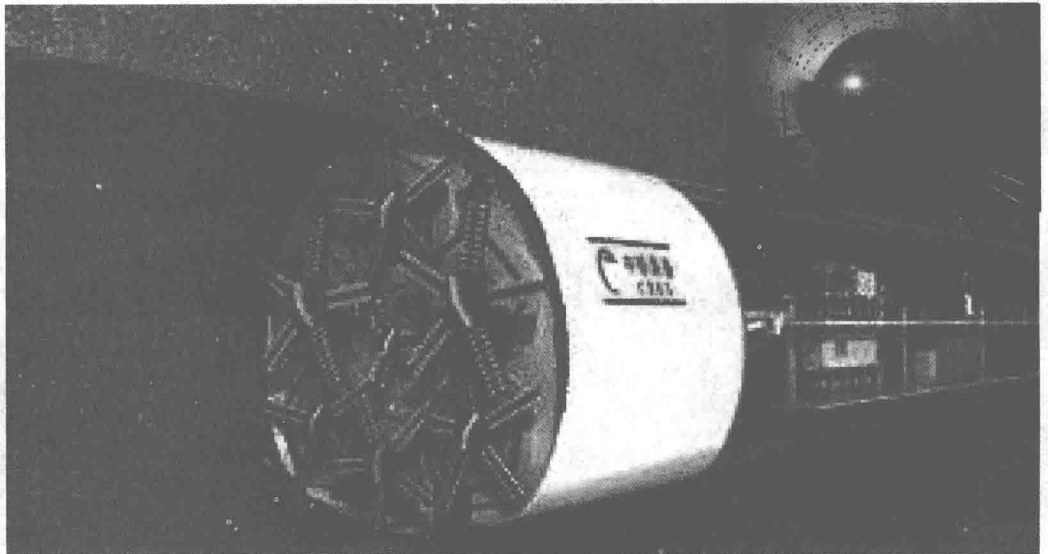


图 1.8 典型盾构施工断面

### 1.3.8 盾构法施工技术的发展与应用

开敞式手掘盾构机原型见图 1.9。1823—1841 年，用盾构第一次在伦敦的泰晤士河下修建河底隧道。1887 年，伦敦地铁南线隧道工程使用组合盾构和气压施工法(图 1.10)进行施工，奠定了近代盾构技术的基础。

近年来，软黏土中使用挤压式盾构，见图 1.11，形成了现代主流盾构技术。主要以泥水式和土压平衡式为主的闭胸式盾构，主要以泥水压力或土舱压力平衡开挖面的水土压力，实现安全快速施工的目的。现今使用的盾构多为闭胸式泥水式盾构(如图 1.12)、土压平衡式盾构(如图 1.13)，以及高智能化的大直径代表的多样化盾构(如图 1.14)。近年来，我