

水下隧道工程实践面临的 挑战与对策及思考

钱七虎

NOV, 2013 南京

主要内容

- **前言**
- **水下隧道的主要修建方法的比较**
- **挑战与对策和思考**

1 前言

除在城市湖泊下修建水下隧道可采用筑围堰、排水、明挖方法外，在江、河、海下一般采用暗挖法（钻爆法、TBM和盾构法）以及沉管法。



南京长江隧道



厦门翔安隧道

1 前言

➤ 钻爆法

水下隧道钻爆法与陆地隧道的无根本区别，主要的关键技术是设计埋深须满足最小覆盖层基岩的要求，以预防坍塌，遏止高压涌水。为此，要千方百计做好工程地质和水文地质的勘察调查，突水涌水的超前地质预报，在完全可靠的注浆固结封闭的条件下钻爆开挖。



1 前言

➤ 钻爆法

钻爆法的优点

- 所需设备投资较低；
- 对不同地质条件、开挖工艺、方法和断面形状的适应性好，转换场地、移动位置机动、灵活；
- 动力能源消耗少、要求低，投资小；
- 设备维修少，利用率高，在不发生事故前提下施工进度稳定；
- 比较适合我国当前的国情；

1 前言

➤ 钻爆法

钻爆法的不足

- 开挖速度提高有困难，工期长



如：日本青函隧道，因津轻海峡有九个断层破碎带，发生三次涌水停工，主隧道历时14年贯通。

1 前言

➤ TBM法和盾构法

TBM法是隧道全断面掘进机（TBM），利用刀盘刀具破碎岩石和在软土中开挖，边开挖边出渣、土并进行锚喷支护衬砌和管片支护等连续作业。



1 前言

➤ TBM法和盾构法

优点

- TBM和盾构法掘进速度快，在中、硬岩石中的月掘进速度在600米左右。如在英法海峡隧道的英国端，月掘进764米，法国端月掘进685米（地质较英国端复杂），最高速度英国端为1500米，法国端也达1170米；最适合长隧道施工；
- TBM掘进的隧道具有较平整的临空面，超欠挖极少，围岩松动范围一般都在200-500毫米以内，因受到破坏很小并及时支护，故围岩稳定，施工安全。
- 施工安全性大大提高，最大限度减少施工人员的伤亡；

1 前言

➤ TBM法和盾构法

优点

- 施工机械化程度达到95%以上；降低劳动强度，改善了劳动环境和条件，实现了隧道施工的快速、高质、高效、安全的目的；
- 施工中对海底地质不产生任何不利影响，不影响和不干扰水面航行；
- 具有极其显著的社会效益。

1 前言

➤ TBM法和盾构法

不 足

- 盾构机造价昂贵；
- 遇到复杂多变的地层时，盾构机的推进比较困难；
- 超大直径多车道的盾构机还有待研究和开发。

1 前言

➤ 沉管法

在预制场（船坞或造船厂车间）将隧道整体分段制作好，两端用临时钢封门密封，船坞放水使隧道管段上浮，采用拖运和定位等设备，使管段准确浮运至设计位置；经管段灌水压载，下沉至已开挖好的水底基槽，再依次在水下利用水力压接将管段连接起来，接口使用可靠的密封止水，最后是抛石回填，抽出管段内压载水，开启各段间钢封门，在管段内进行设备安装和装修后，即成水底沉管隧道。



1 前言

➤ 沉管法

优点

- 能做到：沉管断面顶面不侵入航道，顶面须埋在河流、海流的冲刷线以下；
- 要求地层承载力不大；
- 隧道各管段可在干坞和工厂车间内预先制备、质量有保证；
- 管段预制和水底开槽可同时进行，效率高，工期短；
- 工程造价和投资具有竞争力。

1 前言

➤ 沉管法

不足

在管节预制、防水、水下开槽、管节浮运、沉放、各管节水下对接以及沉管基础处理的各个工艺流程中出现失误的概率，相对地比其他隧道技术要多。这是因为沉管隧道是埋置或搁置于水下的大型人工构筑物，受河、海地貌、地质、水文、航道，以及设计，不可预见的繁复性施工工艺、方法的直接影响。

- ◆ 至今已建成100多座沉管隧道，最大沉埋深度（水深加覆盖层厚）40.5m，最长者5.825Km。

2 水下隧道的主要修建方法的比较

方法 内容	暗挖法			沉管法
	钻爆法	掘进机法	盾构法	
地质条件	对地质条件的适应面较宽，灵活性大，进度稳定，水底地质条件差时，需采用不易发挥掘进辅助工法	对地质条件的适应面较窄灵活性小，水底地址为多变化的岩体时，不易发挥掘进机优势	遇到砂质土层时，需采用土压平衡或泥水加压平衡（气压）施工	不怕流砂，基本上不受地质条件限制
水流速度	无关	无关	无关	水流很急时，须用水中作业平台辅助施工
水面交通	无关	无关	无关	对繁忙航道，在浮运就位时需采取短期局部航道管理措施
隧道埋深	一般设置在水下基岩 >2.0倍开挖跨度的深度	一般要设置在水底基岩下>掘进机外径的基岩深度	一般要设置在水底覆盖层下≥盾构外径的深度	沉管顶面可放置在水底标高处。可与河、海底面齐平，最深记录已达水下 41 米（管槽深 <50m，；流速≤3m/Sec）
通行车道数量	根据水下基岩情况，可做成多车道隧道	TBM当前主要使用两车道、多车道时要增建隧道（直径 <12m）	目前已有三车道（15.4 m）的土型盾构，超大型盾构正在建造或规划中	一个断面内可设置多条车道，目前已有两个8车道的记录

2 水下隧道的主要修建方法的比较

方法	暗挖法			沉管法
	钻爆法	掘进机法	盾构法	
内容				
渗漏情况	采取有效措施能做到不渗不漏	采取措施能做到不渗不漏	接缝较多，做到不渗漏需精心施工	能实现滴水不漏
工程总量	埋深大、引道段长，工程量大	从水下基岩中穿过，两岸引道长，工程量大	有一定覆盖层厚度，两岸引道较长，工程量相应较大	可做到隧道长度最短，工程总量最少
施工工期	机械化程度不高，可组织快速施工，工期仍较长	机械化程度较高，开挖速度快，工期较有保证	机械化程度高但推进循环工序较多，工期相对较长	基地开槽和管段预制分开同时进行，管段沉放时间较短，总的工期短
施工安全	水下钻爆施工要严格施工措施，安全施工是个重要问题	施工作业全部掘进机中进行，安全性好	施工作业全部在盾壳掩护下进行，安全性好	大量作业在水上，水下作业主要是由潜水员完成，安全性较好
工程单价	单位面积造价较低	单位面积造价高	单位面积造价较高	单位面积造价较低

3 挑战与对策和思考

➤ 沉管法

挑 战

面临上游建大型水库（水电站）后河流冲刷的挑战：如长江中下游水下隧道：武汉、南京、上海长江隧道，面临长江三峡水电站、向家坝、溪洛渡、乌东德、白鹤滩五大水电站（后四个发电功率为2.5个三峡电站）。

对 策

盾构法，南京、武汉长江隧道原方案为沉管法，经我建议后改为盾构法。

3 挑战与对策和思考

➤ 沉管顶部深潭部位管段局部顶面高出河床的挑战

挑 战

河床因冲刷一般呈不对称“V”型，沉管法隧道若按深潭设计势必埋深大，工程路线长、造价高。因此深潭部位管段顶面局部高出河床为工程实践意义重大的课题。

国内外有成功的实例：希腊普里维沙——阿克森沉管隧道；悉尼港沉管隧道；香港跨港公路沉管隧道西九龙沉管段；上海外滩泰和路隧道。但由于工程条件不同（工程地质、水文地质、河势冲淤变化等），不能套用已建工程实例，必须进行数模，河模试验研究。

3 挑战与对策和思考

➤ 沉管顶部深潭部位管段局部顶面高出河床的挑战

现介绍上海研究内容和结论：

数学模型计算研究主要内容：

- ◆ 管段不同抬高幅度对流态的影响程度和影响范围（重点是航道和码头）。
- ◆ 基槽开挖对流态的影响程度和影响范围。
- ◆ 临时辅助航道开挖对流态的影响程度和影响范围。

物理模型试验主要研究内容：

- ◆ 管段不同抬高程方案对流场的影响和对附近码头水域的影响。
- ◆ 分析基槽开挖区的悬沙淤积。
- ◆ 分析不同尺度管段抬高所引起的工程区河床冲淤变化和对附近码头水域的泥沙冲淤影响

3 挑战与对策和思考

➤ 沉管顶部深潭部位管段局部顶面高出河床的挑战

现介绍上海研究内容和结论：

数学模型计算研究结论：

抬高的工程实施后，对黄浦江河道内的水位基本没有影响；在隧道工程轴线附近流速有所增加，离开轴线稍远处的上游水域流速略有减少，流速变化范围很少，流场变化无异常现象。

物理模型试验研究结论：

流速影响范围在数百米以内，在河床地形调整后流速增大的幅度在5cm/S以内；覆盖区周围发生一定冲刷，冲刷区上下游出现泥沙淤积区，影响范围为数百米；冲刷幅度在1m以内，两年内，局部地形调整后，趋于稳定；冲刷可影响覆盖层与河床接合处块石稳定；冲淤对工程区附近码头及防洪等工程设施没有产生不利影响。

3 挑战与对策和思考

➤ 大型盾构穿越浅覆土层的挑战

挑 战

南京长江隧道 $\Phi 14.93\text{m}$ 盾构，始发段埋深 5.5m （ $0.4D$ ）；江中冲槽段埋深 10.49m （ $0.7D$ ），挑战：盾构姿态稳定性和江底覆土层劈裂穿透涌水的风险。

对 策

推进参数和推进技术的掌握；注浆参数和技术的掌握；劈裂机理的阐明和泥水击穿压力的判别标准；（难点）泥膜形成技术，开舱用气压置换泥浆。

3 挑战与对策和思考

不因泥水压力设定过大而发生**泥水劈裂地层**所设定的最大泥水压力

最大极限
支护压力

在江中冲槽段，
保证掘进面的
稳定性

最小极限
支护压力

维持掘进面稳定所需要而
设定的最小泥水压力

稳定性能

掘进面泥水压力设定需要满足：（1）掘进面的稳定；（2）防止掘进面发生水力劈裂。于是研究冲槽段的支护力学特性，防止劈裂发生、江水倒灌。

3 挑战与对策和思考

➤ 盾构刀盘刀具磨损的挑战

挑 战

南京纬七路、纬三路隧道、穿黄隧道、广州、成都隧道在卵砾石层，软硬复合地层中推进中都出现了刀具严重磨损，长时间停工检查修复。大盾构水下砂卵砾石层中推进过程中检修和更换刀具是施工中必须克服的难题。

大型盾构在砂卵石层中推进问题突出：南京14.93m大盾构掘进刀具的磨损为地铁6.3m盾构磨损的2.5倍；石英含量高的砂卵石层中刀具的磨损是软土地层中磨损的10倍。

3 挑战与对策和思考

➤ 盾构刀盘刀具磨损的挑战

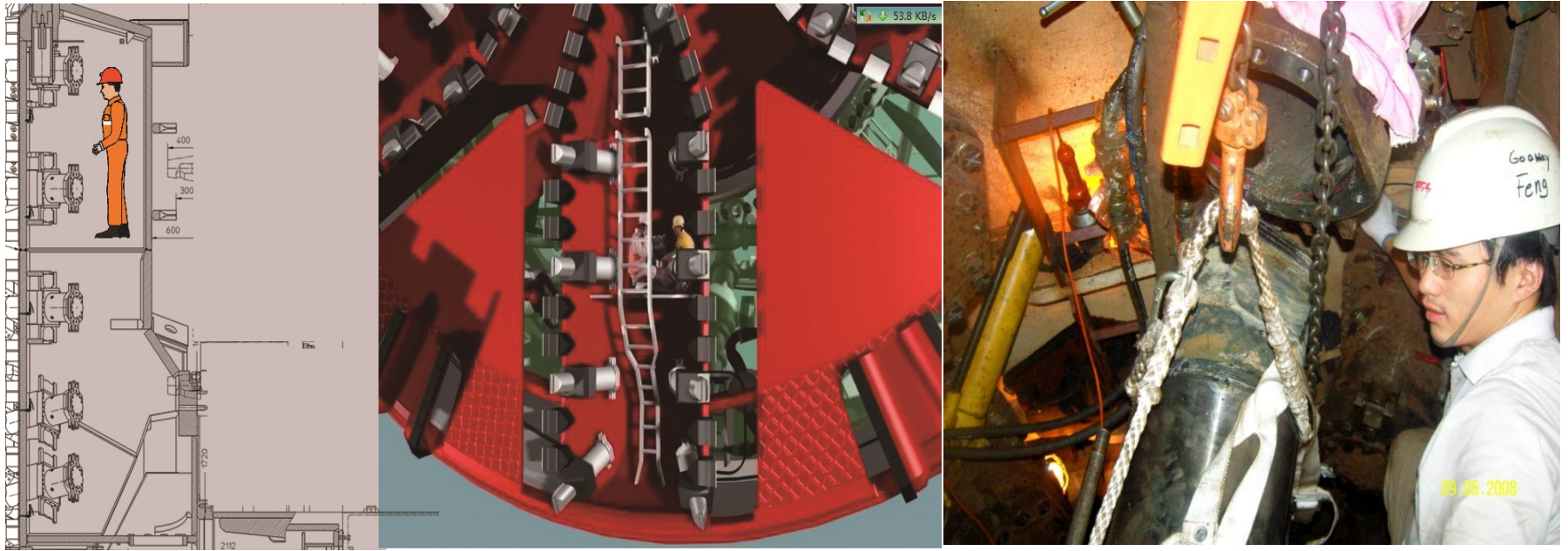
对 策

常压下磨损检查换刀作业；砂卵石层中刀具切削机理和地层适应性的研究，刀具耐磨性和材质的改进“减小前角，加大后角、增大合金、钝化刀刃”；高压换刀作业的保驾护航。

3 挑战与对策和思考

➤ 盾构刀盘刀具磨损的挑战

首次形成了高水压条件下（0.65MPa）泥水盾构常压刀具更换技术



南京长江隧道是世界上首次进行高水压条件下常压刀具更换。常压换刀的成功实施，盾构刀具适时检测和更换技术的建立，避免了高压换刀作业的巨大风险，标志着超长隧道的掘进成为可能。

3 挑战与对策和思考

➤ 盾构埋深提高的挑战

长江的大冲刷导致长江隧道的埋深大，引起在基岩中推进的困难，为减小盾构推进难度，必须减少埋深。有沉管隧道高出河床成功的实例，可减小埋深，但须解决抗浮和河床覆盖的问题。

➤ 沉管埋深增大的挑战

沉管法为浅埋工法，港珠澳大桥的沉管隧道要深埋，必须应对回淤、沉降、管片结构的挑战。

3 挑战与对策和思考

➤ 盾构法轴承损坏的挑战

丹麦大带 (great belt) 海峡东隧道，TBM掘进500m后发生轴承损坏，原因是密封润滑系统钻渣污染。

对策：换轴承，增强密封。

➤ TBM和盾构通过断层破碎带卡机的挑战

对策：工程通过断层数量多，应考虑改变盾构建设工法，或加强超前地质预报，提前注浆。

谢谢

GCYQQH@163.com