

# 长距离复合地层双模盾构机适应性评价

王华齐

中铁四局集团有限公司城市轨道交通工程分公司

**摘要:**在复合地层中进行盾构施工时,选用不合适的盾构机易导致盾构掘进效率低下、地面沉降、刀具磨损严重等问题。文章依托福州地铁滨海快线工程,基于层次分析法评估了盾构机的选型,结果表明土压-TBM双模式盾构机适用于软硬不均地层和孤石地层。根据工程特点对盾构机的刀盘进行针对性设计,提出了盾构机模式转换的时间点和具体流程,优化了施工流程,为软硬不均地层施工时的盾构机选型问题提供借鉴。

**关键词:** 软硬不均地层; 双模; 适应性评价

**【DOI】** 10.12254/j.issn.2096-6539.2022.01.062

## 一、引言

近年来,随着城市轨道交通的迅速发展,需要在软硬不均地层中施工的情况越来越多。多数城市地质条件为土层或风化严重的岩层,一般采用土压平衡盾构机或泥水平衡盾构机,在软硬不均地层中使用土压-TBM双模盾构机的工程案例较少,如何量化评价其适应性尚有不足。<sup>[1-2]</sup>

针对软硬不均地层中盾构施工容易发生的地面沉降、刀具磨损等问题,张初初<sup>[3]</sup>研究发现盾构穿越软硬不均地层时,开挖断面的大小和软硬岩的占比是影响地面沉降的主要因素。沈翔<sup>[4]</sup>等基于现场实测数据分析了软硬不均地层中掘进参数的变化,提出了掘进参数预测模型。陈文<sup>[5]</sup>认为软硬不均地层中选择合适的双模盾构机,可以避免发生严重的地面沉降,减少刀具磨损,加快施工效率。解廷伟<sup>[6]</sup>采用层次分析法对盾构机选型进行了量化评价。

选用正确类型的盾构机不仅可以降低工程风险,还能节省施工成本。本文结合福州滨海快线三盖区间软硬不均地层分布不均,有孤岩地层的工程特点,选择7项评价因子建立了软硬不均地层盾构机选型评价模型,为盾构机选型评价提供了量化指标。对刀盘配置和模式转换做了针对性设计,减少了刀具磨损量,提高了施工效率。

## 二、工程背景

三叉街站~盖山站区间左线起讫点里程ZDK11+419.677~ZDK14+045.767,全长2616.232m;右线起讫点里程YDK11+459.147~YDK14+045.767,全长2586.593m,共建4处联络通道,区间最小曲线半径800m,最大坡度26%,最大埋深43m,最小埋深10.3m,盾构管片外径8300mm,内径7500mm,厚400mm,环宽1.8m。区间盾构掘进下、侧穿建(构)筑物共20处。

三叉街站~盖山站区间隧道洞身主要穿越地层为淤泥、粉质黏土、淤泥质土、花岗岩、凝灰岩,区间左线一般土层1785m,占比68.3%;上软下硬段252m,占比9.6%;中风化全断面173m,占比6.6%;微风化全断面406m,占比15.5%;区间右线一般土层1615.6m,占比62.5%;上软下硬段331m,占比12.8%;中风化全断面202m,占比7.8%;微风化全断面438m,占比16.9%;稳定水位埋深0.76~3.74m。

根据滨海快线三盖区间掘进地层包括淤泥、淤泥质土、粉质黏土、花岗岩风化土层和中微风化岩层,最大岩石强度达186Mpa。隧道主要在市政道路下方下穿越,

敏感环境因素包括军事用地、村庄民居、建筑物和桥梁的桩基、地下管线等,推荐选用TBM-土压双模式盾构机,针对硬岩建议配置大直径滚刀和小间距轨迹线,充分考虑TBM模式与土压模式切换工艺的便捷性。

## 三、盾构机选型分析

### (一) 盾构机选型评价方法

根据现场工程地质条件、设备条件和经济条件,采用层次分析法(AHP)建立评价指标体系。各评价因子见表1,评价因子包括软硬岩占比、孤石分布、盾构机姿态控制、断面形状和大小、刀具磨损情况、工期、工程造价七个方面,得出的软硬不均地层盾构选型评价模型如图1所示。

表1 软硬不均地层盾构选型评价因子

盾构选型评价							
评价因子	软硬岩占比	孤石分布	盾构机姿态控制	断面形状、大小	刀具磨损	工期	工程造价
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7

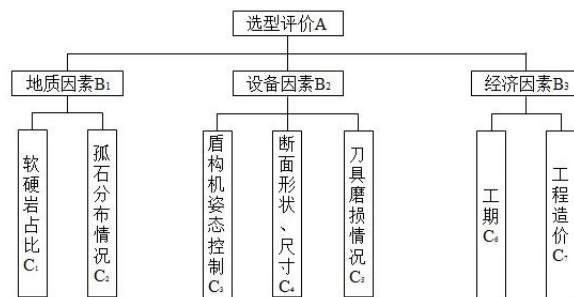


图1 软硬不均地层盾构选型评价模型

### (二) 建立盾构机选型评价矩阵

根据1到9的比例标度,进行专家咨询调查,按照影响越大评价分数越大的评价机制进行排名,影响评价分值表如表3所示。对于影响盾构机类型选择的7个因素来说,按照表2给出的分值进行两两比较,得到矩阵A,见表4。

表2 盾构选型评价标准

评价等级	判断值	说明
优	[85~100]	盾构机能够满足工程的需要
良	[75~85]	盾构机基本能满足工程的需要,但要监控设备状态,及时更换刀具
中	[65~75]	选用的盾构机施工风险较大,不推荐
差		盾构机完全无法满足工程需要

表3 盾构选型评价分值表

分值 $a_{ij}$	定义
1	i因素与j因素同样重要
3	i因素比j因素略重要
5	i因素比j因素稍重要
7	i因素比j因素重要得多
9	i因素比j因素重要得很多

2、4、6、8	i因素与j因素比较结果处于以上结果的中间
倒数	j因素与i因素比较结果是i因素与j因素比较结果重要性比较结果的倒数

表4 比较判断矩阵

风险因素	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>6</sub>	C <sub>7</sub>
C <sub>1</sub>	1	2	1/2	1/4	2	1/3	4
C <sub>2</sub>	1/2	1	1/3	1/4	1	1/5	2
C <sub>3</sub>	2	3	1	1/3	3	1/2	4
C <sub>4</sub>	4	4	3	1	5	2	6
C <sub>5</sub>	1/2	1	1/3	1/5	1	1/4	2
C <sub>6</sub>	3	5	2	1/2	4	1	5
C <sub>7</sub>	1/4	1/2	1/4	1/6	1/2	1/5	1

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1/2 & 1/4 & 2 & 1/3 & 4 \\ 1/2 & 1 & 1/3 & 1/4 & 1 & 1/5 & 2 \\ 2 & 3 & 1 & 1/3 & 3 & 1/2 & 4 \\ 4 & 4 & 3 & 1 & 5 & 2 & 6 \\ 1/2 & 1 & 1/3 & 1/5 & 1 & 1/4 & 2 \\ 3 & 5 & 2 & 1/2 & 4 & 1 & 5 \\ 1/4 & 1/2 & 1/4 & 1/6 & 1/2 & 1/5 & 1 \end{bmatrix}$$

计算得出矩阵A的特征向量W:

$$W = (0.944 \quad 0.557 \quad 1.426 \quad 3.221 \quad 0.557 \quad 2.188 \quad 0.34)^T$$

判断矩阵的最大特征值  $\lambda_{\max} = 7.2$

计算一致性指标CI:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = 0.033$$

查表得7阶矩阵平均随机一致性指标RI=1.32

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0.033}{1.32} = 0.025 < 0.1$$

一致性检验通过, 该矩阵具有良好的 consistency.

由特征向量得出各评价因子的权重集

$$B = (0.102, 0.06, 0.154, 0.349, 0.06, 0.237, 0.037)$$

根据工程资料建立评价因子

$$R = (98, 90, 85, 100, 95, 85, 85)^T$$

$$S = BR = (0.102, 0.06, 0.154, 0.349, 0.06, 0.237, 0.037) \cdot (98, 90, 85, 100, 95, 85, 85)^T$$

$$S = 92.376 > 90$$

由表2知盾构选型为优, 能够满足工程的需要.

#### 四、双模式TBM盾构机针对性设计

##### (一) 刀盘针对性设计

刀盘采用八主梁加八面板复合式刀盘, 中心区域采用整块钢板设计, 可有效将焊接应力在结构内部抵消, 减少应力带来的变形, 刀盘具体配置参数: 中心刀6把, 刀高185mm; 单刃滚刀43把, 刀高185mm; 刮刀148把, 刀高135mm; 边刮刀16把, 刀高135mm; 超挖刀1把, 刀高40mm; 刀盘磨损监测数量8个; 溜渣板8组.

(1) 刀盘防耐磨设计: 面板采用耐磨复合钢板全覆盖; 大圆环外侧为合金块全覆盖; 大圆环后端面焊接耐磨复合钢板.

(2) 刀盘防泥饼设计: 刀盘开口均匀, 开口率

30%, 较大开口有效避免泥饼形成; 刀盘布置12路渣土改良喷嘴, 能对渣土进行有效改善; 背面有6个主动搅拌棒, 与前盾上的2个被动搅拌棒一起对土仓内渣土进行搅拌, 主被动搅拌棒交错布置, 能有效改善渣土的流动性.

(3) 刀具配置设计: 刀具选用19寸滚刀, 增加了滚刀耐冲击性、耐磨性及刀圈可用磨损量, 延长刀具使用距离, 中心滚刀采用TBM安装方式, 可有效防止中心滚刀异常损坏或掉落, 采用200mm宽强型刮刀, 刮刀背部设计刮刀保护块, 防止刮刀背部受冲击, 导致刮刀脱落. 滚刀安装示意图如图2所示.

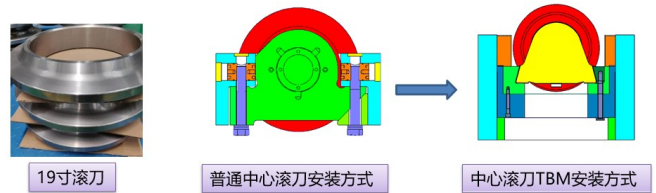


图2 中心滚刀安装示意图

##### (二) 模式转换针对性设计

土压-TBM双模式盾构机设计核心思想就是涉及土压模式与TBM模式洞内转换, 因此模式转换是盾构机针对性设计的重要部分; 模式的切换由施工的地质条件决定, 在盾构掘进区间, 若硬岩强度在30Mpa以上的地层段长300m以上建议采用TBM模式掘进, 段长300m以下硬岩段建议采用土压模式掘进.

模式转换位置确定

当盾构机从土压平衡模式转换到TBM模式时, 盾构机须进入硬岩段长度为20~25m (盾构长度10.8m加安全距离10~15m) 时停机进行转换.

当盾构机从TBM模式转换到土压平衡模式时, 盾构机须距离硬岩段长度为20~25m (安全距离) 时停机进行转换.

模式转换分为两种: 土压模式转换为TBM模式和TBM模式转换为土压模式, 两种模式转换是相互可逆的过程, 其中由TBM模式转换为土压模式流程较复杂; 本文重点阐述TBM模式转换为土压模式的方法. 模式转换流程如图3所示.

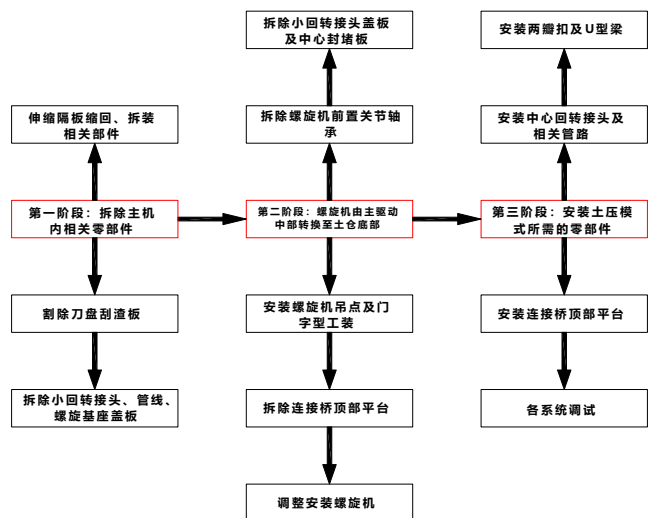


图3 TBM模式转换为土压模式流程图

为保证模式转换，洞内狭小空间将螺旋机顺利由中部转换至底部，合理选择螺旋机主吊点数量和位置是关键因素之一。

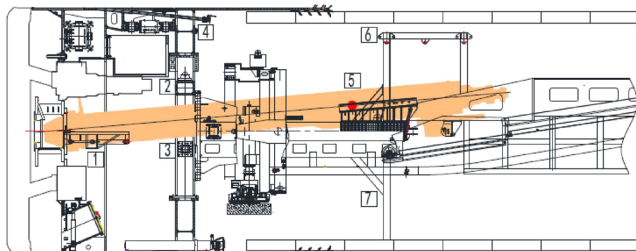


图4 吊点位置示意图

注：1为伸缩隔板支撑（含油缸）；2为人仓底部；3为米字梁中部横梁；4为米字梁顶部；5为螺旋机支撑滑道；6为螺机门型吊梁；7为拼装机主梁底部支撑，其余辅助吊点依据现场实际情况选择而定。

利用手拉葫芦、螺机伸缩油缸、工装销轴等措施将螺旋机整体向后沿螺机支撑滑道移动1200mm，移动过程中防止螺机支撑座在末端脱离滑道；拆除螺旋机前置关节轴承、防扭块等部件。具体流程如图5、图6、图7所示：

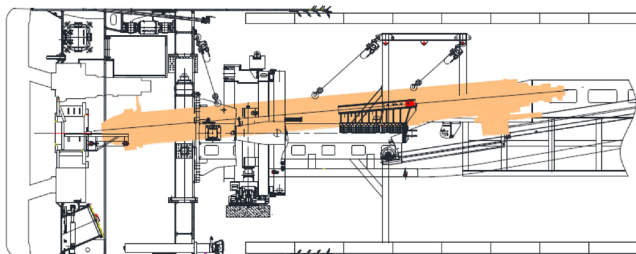


图5 吊装螺机过程示意图

拆除米字梁中部横梁后，利用手拉葫芦等辅助设备将螺旋机向下旋转一定角度，反复调整将螺机轴前端与螺机座子位置对齐；

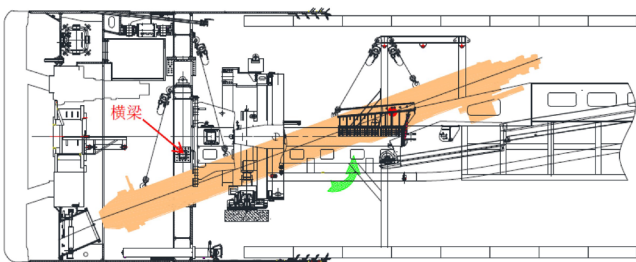


图6 吊装螺机过程示意图

吊装螺机到位后，拆除螺机支撑装置，再次调整螺机角度到23°，将螺机缓慢插入座子内，用螺栓固定并打紧；安装双拉杆、更换螺旋机出渣门1、2、出渣门防护；拆除门型吊梁、螺机支撑装置等，连接螺旋机管线。

### （三）TBM模式掘进管片壁后回填灌浆系统针对性设计

TBM模式掘进时开挖洞壁和管片外表面间隙10cm-

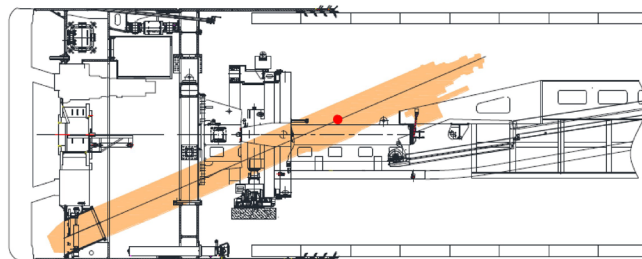


图7 吊装螺机过程示意图

15cm，可在该部分间隙内填豆砾石进行固结，豆砾石的规格一般为5-10mm，当豆砾石填充完后还需要回填砂浆来对豆砾石之间的间隙进行填充密实，达到稳定管片的目的。管片壁后注浆系统示意图见图8。

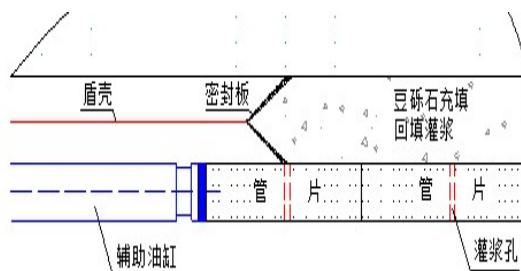


图8 管片壁后注浆系统示意图

### 五、结论

（1）基于层次分析法建立了盾构机选型评价模型，验证了土压—TBM双模盾构机适用于三义街~盖山路区间。在软土层选用土压平衡模式可以降低地面沉降发生的概率，减少施工风险，300m以上的硬岩段使用TBM模式可以有效减少刀具磨损，提高施工效率。

（2）刀盘采用八主梁加八面板复合式刀盘，中心区域由整块钢板设计，可以有效的将焊接应力在结构内部抵消，减少了应力带来的变形。

（3）盾构机模式转换的安全距离设置为地层交界前20~25m，转换模式需停机进行。TBM模式施工时，在洞壁和管片外表面间隙内填充豆砾石并回填砂浆进行固结，可以稳定管片。

### 参考文献

[1]王洪新.土压平衡盾构刀盘开口率选型及其对地层适应性研究[J].土木工程学报,2010,43(03):88-92.  
 [2]唐国荣,齐春.广湛高铁湛江湾海底隧道方案比选与盾构机选型研究[J].铁道标准设计,2021,65(10):103-110.  
 [3]张初初.软硬不均地层盾构施工引起的地表沉降变化规律研究[D].西安科技大学,2020.  
 [4]沈翔,袁大军,吴俊,付艳斌.复杂地层条件下盾构掘进参数分析及预测[J].现代隧道技术,2020,57(05):160-166.  
 [5]陈文.复合地层大直径盾构选型与掘进技术研究[J].国防交通工程与技术,2015,13(03):21-24.  
 [6]解廷伟,宋天田.基于多层分析法的盾构机适应性分析评估[J].现代城市轨道交通,2021(S1):91-95.