

# 大断面地铁渡线隧道开挖工法优化研究

资斌全 晁春波 凌晓东

中铁隆工程集团有限公司

**摘要:**大断面隧道施工比较复杂,尤其是隧道开挖作业。目前各个城市都在加快建设轨道交通路网,出现大量的大断面隧道工程,在施工中大断面隧道工程一直是难点,大断面隧道渡线段设计、施工都是难点,隧道附近围岩多为软土,这种地质稳定性差、变形概率大、修筑难度比较大,施工承担诸多风险,出现塌方和变形的可能,施工比较复杂,所以给施工带来了巨大的难度。本文围绕实际工程出发,结合乌鲁木齐国际机场市政配套工程的既有运营隧道改造施工,展开大断面地铁隧道的开挖施工论述。

**关键词:**地铁隧道;施工;开挖;围岩

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2022.14.065

现阶段国内外都修筑了大量的大断面公路与铁路隧道,隧道修筑朝着机械化、快速施工、超前预加固等方向发展。大断面隧道中受到隧道围岩特性以及工程开挖特征的影响,为保证施工稳定,通常将断面分割后再进行开挖。所以在我国的修筑中一般都忽视了前期的超前支护作业,施工中发现存在变形后才进行加固,这种措施消耗大量的成本。因此关于这一方面的研究也应该引起重视。

## 一、大断面隧道开挖施工方式

现阶段常用的施工作业方式有几类:①对断面进行整个开挖,这种方式使用在岩性好的隧道中;②台阶法,施工中有多个台阶法,较为常见的有三台阶临时横撑法、临时仰拱法、三台阶七步拱法等。开挖的时候将隧道断面分为上、中、下三个断面,分割成七个开挖小面,在开挖的时候将每一个部位沿着隧道纵向开挖支护推进。这种主要是以机械为主以及人工为辅,开挖后作初期支护,各分部初期紧密相连形成闭环,环向开挖形成弧形,施工中预留出核心土,支护循环后及时对仰拱围岩进行施工,将整个断面封闭起来。③CD法,这种施工方式也叫作中隔壁法,将隧道断面分成两个部分开挖,初期在中部做临时支护,让开挖部分封闭起来,再进行另外一侧的开挖,及时进行支护,之后按照顺序进行作业,先施工的一部分设置成向外鼓的弧形;④CRD法,主要是要将围岩开挖断面进行多分布的开挖与支护,上一部的开挖后做初期的支护、支撑,让其形成闭环,仰拱浇筑时再拆除,形成全断面的闭合。⑤双侧壁导坑施工,这种施工方式是进行两侧找到导坑,后开挖,导坑的周围做初期的支护以及临时的支撑,后对剩下部分进行开

挖,具体分层要按照岩性、断面来确定<sup>[1]</sup>。

## 二、区间隧道工程概述

### (一)工程概述

本项目为乌鲁木齐机场(北区)改扩建市政配套工程(二期),项目的1、2号线联络线区间位于1号线国际机场站与T航站楼之间,2号线2期线路从国际机场站出发后向西侧辐射,下穿进T3航站楼高架桥、进T3航站楼停车场高架桥、T3航站楼停车场、T3航站楼落客平台高架桥、T3航站楼连廊后,到达区间设计终点,区间中部设置1、2号线联络线。2号线单渡线区间设置2座施工竖井(包括利用国际机场站~T4航站楼盾构始发井及新建1座施工竖井),区间隧道采用矿山法施工,新建隧道长度:1号线延长线隧道长71.2m,1号线扩建隧道长52.25m,2号线2期左、右线隧道长度约443.5m和254.4m。本段线路属于山前冲洪积砾质平原单元,地形起伏变化不大,根据本次勘察成果与《乌鲁木齐市轨道交通2号线二期工程场地地震安全性评价报告》显示,拟建场地及附近无活动断裂、不存在砂土液化(具体液化判别结论详见8.4节内容)及软土震陷,未发现滑坡、崩塌、泥石流、地面塌陷、地裂缝、地面沉降等不良地质作用<sup>[2]</sup>。

### (二)工程地质与水文地质

#### 1.工程地质概况

1)拟建工程沿线地貌主要为山前冲洪积砾质平原,地形平坦,地势南高北低,地层分布以第四系上更新统卵石、圆砾为主,为同一工程地质单元。本次勘察揭露地层最大深度为50.0m,根据钻探资料及室内土工试验结果,按地层沉积年代成因类型,将本工程场地勘探深度范围内的土层划分为人工堆积层(Q4ml)、第四系上更新统冲洪积粉土、圆砾、卵石(Q3al+pl)。

#### 2)人工堆积填土层(Q4ml)

杂填土层:杂色,松散-稍密,稍湿,以圆砾、卵石以及黏性土为主组成,含砖瓦碎屑,生活垃圾及植物根系等,土质不均匀,级配较差,I级普通土。厚度1.50~7.00m,层底标高642.10~654.48m。第四系上更新统冲洪积层(Q3al+pl):粉土(Q3al+p),以层状或呈透镜体形式夹于卵石层中,厚0.5~1.5m,浅黄色,具少量孔隙,土质不均,含卵砾石约为25%,湿,中密,岩土施工工程分级为I级普通土。本层土厚度0.90~1.20m,层底标高623.50~628.80m。圆砾4-9-2:为本区间主要地层,深灰色为主,稍湿-潮湿,中

密~密实。成分以砂岩、灰岩为主，磨圆度较好，多呈浑圆状，粒径组成：2~20mm约50%，20~60mm约25%，大于60mm约15%，余以杂砂砾充填为主，局部夹杂粉砂薄层，局部含漂石，最大粒径约了50mm。岩土施工工程分级为Ⅲ级硬土。根据本次试验数据统计， $C_u=69.9$ ， $C_c=1.8$ ，颗粒级配良好。

本层土厚度1.9~19.0m，层底标高598.82~634.25m。本次钻探未揭穿该层。卵石4-10-1层：下伏于人工填土层，为本区间主要地层。以深灰色为主，稍湿~潮湿，中密。成分以砂岩灰岩、花岗岩为主，磨圆度较浑圆状，粒径组成：2~20mm约10%，20~60mm约45%，大于60mm约20%；余为杂砂砾砂与粉黏粒充填，局部夹杂粉砂薄层，局部含漂最大粒径不小于300mm。岩土施工工程分级为Ⅲ级硬土。根据本次试验数据统计， $C_u=51.1$ ， $C_c=1.56$ ，颗粒级配良好。本层土厚度2.50~14.00m，层底标高638.71~643.50m。卵石4-10-2层：为本区间主要地层。以深灰色为主，稍湿~潮湿，密实。成分以砂岩、灰岩、花岗岩为主，磨圆度较好，浑圆状，粒径组成：2~20mm约10%，20~60mm约45%，大于60mm约15%；余为杂砂砾砂与粉黏粒充填，局部夹杂粉砂薄层，局部含漂石，最大粒径不小于450mm。岩土施工工程分级为V级软石。根据本次试验数据统计， $C_u=54.9$ ， $C_c=1.8$ ，颗粒级配良好。

### 2. 水文地质

区间范围仅在强降雨时短时间内在地面有少量地表径流，但会迅速排入市政雨水管内排走，夏季绿化带中常见绿化灌溉用水。根据本次勘察结合收集资料，拟建工程地下水埋深大于50m。注：本场地勘察时未发现上层滞水，但考虑受季节变化、管线渗漏、绿化灌溉等因素影响不排除局部在上层滞水的可能性，施工时如遇上层滞水，水量较小的情况下可采用明排降水；若水量较大可采用相应的降水或止水措施。

## 三、大断面隧道施工作业

### （一）施工监测

由于地质的特殊性，导致隧道断面开挖变形有独特性，由于围岩的地层演化中挤压了应变能，开挖之前的地质处于稳定状态。隧道开挖后打破地面的平衡，开挖面就是围岩应力释放的空间，导致应力充分分布。当重力分布局部过大，将会导致土体屈服强度小于局部强度，导致围岩失重等，从而出现局部塌方的情况。隧道围岩失稳与稳定都是动态的，所以分析围岩的物理力学性能，能够了解与分析隧道开挖对地面造成的影响。进行围岩的变形监控，能够了解支护的受力情况和变形情况，分析现场变形数据，研究大断面围岩变形特征以及稳定状态。因此在施工的时候，对断面的围岩压力、初期支护应力、二衬间接触压力等进行测定。使用压力传

感器以及表面应变计监测，在断面四周布置10个测点，其频率是前15天每天两次，之后的两个月内每天监测一次，其结果一直稳定的情况下即可。

在监测的同时，也要对竖向沉降与水平收敛进行监测，每天要观测一次断面上设置的五个测点，等到进行二次衬砌施工，竖向沉降与水平收敛与应力对应，确定围岩的变形速度和变形量，用来分析围岩的特性，实现对现场施工的指导<sup>[3]</sup>。

隧道开挖中围岩稳定性是复杂的，监测在施工中已经成为指导施工的重要部分，施工方可以通过监控掌握到断面的变形和受力是动态变化的，所以可以根据变形对施工进度、速度进行指导，适当调整施工的支护结构和参数，一方面也能够为隧道设计与施工提供参考。

### （二）项目施工要点

#### 1. 断面初期支护

区间设计净空尺寸应该根据界限要求，选择复合式衬砌结构，本次项目工程开挖方法有台阶法、台阶+临时仰拱法、CRD法、双侧壁导坑法、双联拱中洞法、双侧壁导坑+CRD法。

#### 2. 施工使用材料

地铁区间隧道结构使用的材料根据结构类型、受力条件、使用要求和所处环境等因素展开，充分考虑其经济性、可靠性和耐久性。主体结构部分主要采用钢筋混凝土。初期使用C25喷射混凝土、钢筋网、螺栓、小导管、Q235b型钢、水泥-水玻璃双液浆等。

钢筋接头：采用焊接的方式对主筋进行接头，双面焊也是优先考虑的方式。《钢筋焊接及验收规程》（JGJ18-2012）中对焊接头的类型及质量有很高的要求。其中在搭接长度方面的要求是：双面焊5d，单面10d。其次对接头位置的选择：受力钢筋的接头位置应相互错开35d，位于同一连接区段内的纵向受拉钢筋接头面积百分率不宜大于50%，纵向受压钢筋接头面积百分率可不受限制。纵向连接筋连接采用单面焊，搭接长度10d。考虑施工时控制洞内空气质量，钢筋连接也可采用机械连接。

#### 3. 施工技术要求

初期做好准备工作，施工之前进行超前支护，如果遇到渗漏水 and 不明物体等，根据掌子面实际情况喷射混凝土。隧道施工严格按照流程展开，施工之前做好管线的检查工作，对图中的管线位置、高程等进行复核，如果有孔洞，应在地面进行注浆。施工之前，查明管线的渗漏、积水情况，在此基础上按照需要进行修补、排水处理。施工之前进行超前探水。格栅安装之前进行试拼装，注意是否存在误差，断面变化过渡段内的格栅等钢架断面尺寸应在两侧基础上，通过格栅钢架平面排列由线性内插来确定。严格执行等背后压浆，区间内存在

断面作业，控制地面的沉降，隧道内部做好防火作业，初期焊接的时候要注意防火，避免伤害到现场作业人员<sup>[4]</sup>。

#### 四、大断面地铁渡线隧道开挖工法优化研究

##### (一) 开挖方法

隧道开挖方式选择十分重要，本项目涉及的开挖方式由双侧导坑法、CRD、CD、台阶法等。围岩稳定性与工程经济角度对于选择安全而符合施工进度的方式施工是很重要的。本项目围岩具备一定的自稳定性，双侧壁导坑施工相对繁琐，所以从CD法、台阶法等方面展开。

##### (二) 开挖方法的对比

###### 1. 参数对比

可通过 MIDAS/GTS 有限元分析软件，进行实体单元模拟与二次衬砌等填充，钢拱架等使用梁单元，初期支护等使用平板单元。围岩假设同性且连续。建立起模型尺寸 100\*100\*36m，开挖工法为三台阶七部法、CD、CRD法，随着开挖进尺，建立起有限元模型。

分别导入围岩断面、埋深、支护设计参数中洞喷射混凝土、钢拱架、钢筋网孔间距、纵向连接钢筋等。

###### 2. 结果对比

要用模拟计算的方式分别提取围岩变形情况以及喷射混凝土应力后展开综合对比。分别进行以下分析：第一，进行围岩变形分析，在模型上分别得到工况的竖向、水平位移云图、关键时程曲线图等<sup>[5]</sup>。在位移云图上可以得到拱顶与拱腰的竖向沉降。猫耳状，拱腰位置变形最大是三台阶七部法的水平位移模型的最大特点，而且呈现向内挤压情况。CD法的左侧有明显的变形，变形范围更大，通过实践得出先开挖隧道的部分会使围岩的影响范围更大。而CRD法对围岩的影响范围就相对较小，但是在边墙的位置处有明显的变形；第二，支护的受力结构，在模型上提取关键点拱顶的竖向沉降、最大跨处的水平位移曲线，可以看到随着开挖的深入，围岩变形量不断增大，研究的三种工法在施工开挖的初期，都存在明显的变化，实际上各种研究已经证明CRD的变形更缓慢，随着隧道的开挖深入，围岩逐步稳定，因此在进行围岩沉降的控制方面，CRD法可以取得理想的效果。对拱架的模型云图可以看出，三台阶七部法拱腰部的应力最大，CD与CRD法施工的时候，拱顶到拱腰位置的应力最大，而本次模型可以看出最大的受力处于安全范围之内，且拱架部分受力最小要当属于三台阶七部法的。在施工当中，三台阶七部法的开挖中，喷射混凝土受力呈现出明显的对称方式，但CD与CRD的受力则明显表现在右边大于左面，这与临时支护相关。整体上来看三种施工方式混凝土受力大小相差不大，并且都在喷射安全强度之内。

综合来看，CRD法在围岩的变形上控制得最好，其

次是CD法可以很好的控制受力，三种都可以满足工程安全需求。但是从实际来看CRD与CD工序相对复杂，花费的成本等更高，在架设横撑与拆除的时候，很容易发生围岩失稳现象，所以，应该选择三台阶七步法开挖<sup>[6]</sup>。

在相同资源配置的情况下，通过科学组织、缩短施工工期与工序的衔接时间，并且在保证质量安全的前提下，施工可以取得以下的指标：

①三台阶七步法进尺为0.5m，关键工序4个循环，月进度指标最高达到60m，月平均进度达到45m。

②CRD进尺0.5m，关键环节进行2个循环，全断面开挖每天1.0m，最高达到45m，月平均进度达到30m。

③双侧壁导坑施工法循环进尺为0.5m，1个循环，断面开挖每天0.5m，月进度达到30m，平均进度为20m。

可以看出，三台阶七步法在施工进度上有明显的优势，这是因为这一工序不需要进行横撑的施工就可以展开大机械的作业。因此对隧道变形分析，优选出开挖工法的时候，通过3m、4m、5m三种台阶长度进行对比，认为3m更有利于控制围岩的变形，缩短台阶的长度有利于支护结构尽快封闭，减少扰动次数，更有利于围岩的控制。缩短台阶长度更有利于大型机械发挥效率保证工作质量。

##### 五、结语

综上所述，考虑到隧道的实际情况，隧道的埋深实际情况是开挖方式选择的决定性因素，施工作业中尽量减少对围岩的干扰，因此尽量使用短台阶、短进尺来开挖，及时跟进，进行工程的初期支护，及时进行仰拱，让隧道的衬砌封闭来分担围岩的压力。后适当进行二次的衬砌作业，充分释放围岩压力来发挥围岩的自承能力。

##### 参考文献

- [1] 张文龙, 万佳佳, 于海亮, 等. 城际地铁大断面隧道三台阶法开挖参数优化研究[J]. 市政技术, 2021, 39(7): 89-94.
- [2] 周凯. 超大断面地铁车站双层叠合初支拱盖法的设计与施工[J]. 价值工程, 2021, 40(36): 89-91.
- [3] 王万仁, 王海亮, 肖业辉, 张伟. TBM导洞先行大断面地铁隧道爆破方案优化研究[J]. 国防交通工程与技术, 2020, 18(6): 57-60.
- [4] 李刚. 地铁暗挖隧道单线突变双线转换施工技术[J]. 铁道建筑技术, 2020(7): 118-121.
- [5] 戴亚军, 艾国平, 黄定著, 等. 泥质粉砂岩地铁暗挖车站支护结构及施工工法优化研究[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(S1): 996-1001.
- [6] 罗光财, 邓尤东, 雷军, 等. 超大断面浅埋暗挖地铁车站转换段施工技术[J]. 施工技术(中英文), 2022, 51(7): 53-56.