

地铁新建隧道小净距斜下穿现有运行线路 非爆破施工方法研究

赵耀¹ 王洪超² 张青¹ 邵靖淇² 高子明¹ 张连震² 陈健¹ 王宠¹ 于雷¹

1. 中铁八局集团昆明铁路建设有限公司; 2. 中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院

摘要: 新建地下轨道工程在小距离条件下斜下穿现有地铁时极易引起运行地铁所在结构的不均匀变形, 为此, 针对近接施工对现有隧道扰动大的问题, 提出了一种适用于小净距斜下穿隧道非爆破开挖的新方法, 为小净距斜下穿运营隧道变形控制提供施工依据。具体为: 开挖前对第一个开挖步距内的岩体预先进行注浆加固; 开挖时预留核心土, 采用切削研磨的方式对步距范围内隧道进行分部开挖, 先开挖隧道周边围岩, 开挖结束后进行初期支护, 后进行核心土开挖, 避免以往常见钻爆法施工引起的扰动; 开挖过程中实时监测上部运营隧道的沉降变形, 开挖结束后对沉降值大于安全限值的围岩区域下方进行注浆, 防止现有运营隧道进一步沉降。结合山东某地铁项目中小距离条件下斜下穿现有运行地铁的该工程实例, 将该方法应用到该工程隧道开挖过程中, 现有运营隧道衬砌断面内最大沉降控制在3mm以内, 验证了该施工方法的有效性, 为小净距斜下穿运营隧道施工提供了一定的借鉴。

关键词: 地铁隧道; 小净距; 斜下穿; 非爆破开挖; 非对称注浆

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2022.17.062

引言

随着我国基础建设的大规模开展, 隧道建设迎来了蓬勃发展的新时代。然而, 一个城市的地下轨道交通建设是一个漫长的过程, 大多会根据实际情况对地下轨道网络进行分批、分期建设。隧道的分期建设不可避免会带来新建隧道下穿或者上跨现有的运营隧道的情况, 这给隧道及地铁建设者们提出了新的考验。针对此问题, 国内外的专家、学者们开展了大量的、有益的探讨和分析。数值模拟方面, 相关研究多集中在最优开挖方法比选上, 徐郅崴、宋战平、王清标等、邓祥辉等^[1-4]通过有限元软件模拟了下穿隧道台阶法、CD法、CRD法、双侧壁导洞法、交叉中隔壁法等不同开挖工法对现有公路和近距离交叠隧道的影响, 发现采用CRD法开挖对围岩变形及应力状态控制较好。针对下穿隧道施工所引起的地表变形问题, 王渭明^[5]研究了不同埋深下近距交叠隧道施工引起的地表变形规律, 给出了地表的位移变形的预测公式。

然而, 以上对下穿运营隧道施工工法的研究多针对钻爆法, 钻爆法不可避免的扰动隧道拱顶上方的围岩^[6, 7], 造成围岩的力学性能损伤, 尤其当上覆围岩的厚度较薄时, 将会造成现有地铁的衬砌变形、轨道移位等问题, 给隧道安全带来极大风险, 严重威胁现有运行地铁的安全。

本文为解决小净距下穿隧道施工中钻爆法扰动大的问题, 提出了一种非爆破开挖方法, 通过对下穿段隧道

掌子面前方围岩进行超前非对称注浆以增强待开挖围岩的稳定性; 采用切削研磨方式对围岩进行分部开挖以避免围岩过大变形; 最后基于现有运营隧道沉降实时监测结果, 对沉降值不满足要求的围岩区域进行补充注浆, 将沉降值控制在安全限值内。该方法成功应用到山东某地铁项目小净距斜下穿现有隧道工程实例中, 开挖过程中现有隧道衬砌断面内最大沉降变形<3mm, 保证了现有隧道运行安全, 验证了该开挖方法的有效性。

一、开挖工法及变形控制措施

(一) 施工步骤

(1) 隧道开挖前, 根据现有隧道与新建隧道的位置关系, 确定新建隧道与现有隧道在水平及竖向投影范围内的交叉重叠部分作为薄弱区, 并针对围岩的薄弱区进行超前注浆加固。(2) 开挖掌子面时, 首先预留核心土, 对掌子面施加一个反向推力, 不至于使开挖面的围岩“挤压”出来, 从而提高开挖过程的稳定性。然后逐步沿着隧道轮廓线按照切削研磨的方式, 逐步向前开挖推进。开挖深度为一个步距, 完成隧道边缘开挖槽的施工。(3) 在开挖槽中进行初期支护。(4) 按照切削研磨的方式开挖核心土。(5) 基于隧道开挖过程中对上部运行隧道不均匀变形的实时监测结果, 实时分析隧道开挖过程中对现有隧道的影响。(6) 通过开挖隧道掌子面, 对现有隧道沉降值大于安全限值的区域下方围岩进行补充注浆, 防止现有隧道进一步沉降。(7) 进入下一个开挖步距, 重复(1)~(6)的方法, 直至完成下穿段隧道开挖。

(二) 非爆破开挖

在开挖隧道周边围岩时, 为了减小对掌子面上方围岩的扰动, 按照图1所示的开挖轨迹, 通过切削研磨的方式, 按照顺时针方向依次完成第一、第二、第三槽部的开挖。在进行隧道核心土开挖时, 按照图1所示的“之”字型开挖轨迹, 自下而上依次进行切削研磨。按照“稳、匀、准”的原则进行开挖, 并实时监测开挖过程对现有隧道的影响。

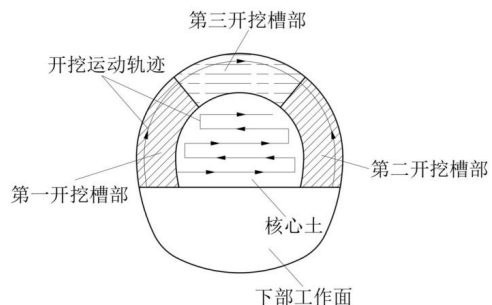
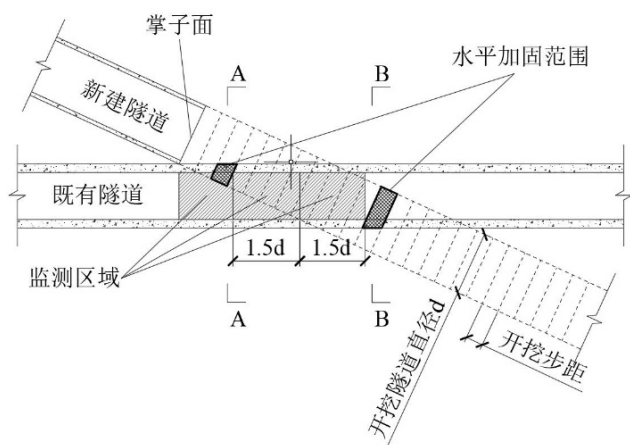


图1 开挖槽与核心土开挖轨迹

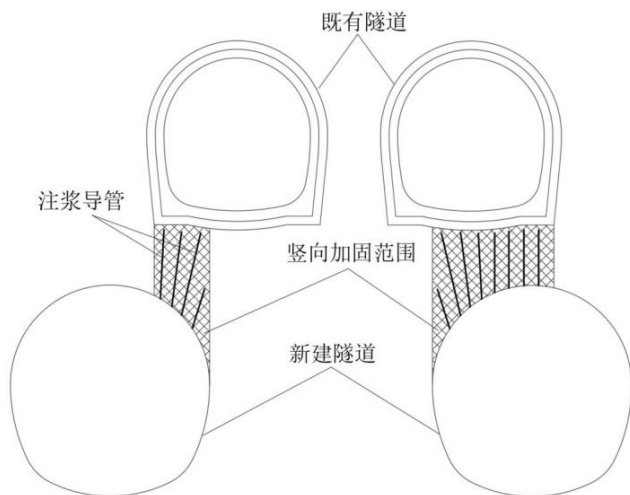
开挖过程中引进了悬臂式的专业掘进机，该机械的掘进头正面可以对土体进行有效研磨，掘进头侧面可以对围岩进行有效切削。与传统的钻爆施工方法相比，研磨方式不存在爆破冲击波，从根本上消除了震源，显著地减少了新建隧道开挖过程中对现有隧道的扰动。本工程中，开挖速度约为0.5m/天。

(三) 非对称注浆

隧道开挖前，根据现有隧道与新建隧道的位置关系，确定新建隧道与现有隧道在水平及竖向投影范围内的交叉重叠部分作为薄弱区，并针对围岩的薄弱区进行超前注浆加固。本依托工程所采用的注浆加固区域如图2所示。



(a) 俯视图



(b) A断面剖面图

(c) B断面剖面图

图2 注浆范围

依托工程所采用的注浆材料为水泥浆液，水泥采用PO42.5普通硅酸盐水泥，水灰比选为0.8~1.0。

(四) 变形监测

在进行隧道周边围岩及核心土开挖之前，在上部现有隧道开挖影响范围内设置监测点，用于监测隧道变形。

二、工程应用

(一) 工程概况

本文所依托的工程位于山东省，新建隧道为单洞单线，线距37m，平面线型为直线；现有隧道线间距为10~13m，平面线型直线、曲线相结合。新建隧道的左线首先下穿现有隧道的右线，斜穿的平面角度为15°，之后斜下穿现有隧道的左线，斜穿的平面角度为16°。施工范围内新建隧道下穿段最近距上部运行隧道仅1.7m，属于一级重大风险源，为典型的新建隧道小净距斜下穿工况，位置关系如图3所示。

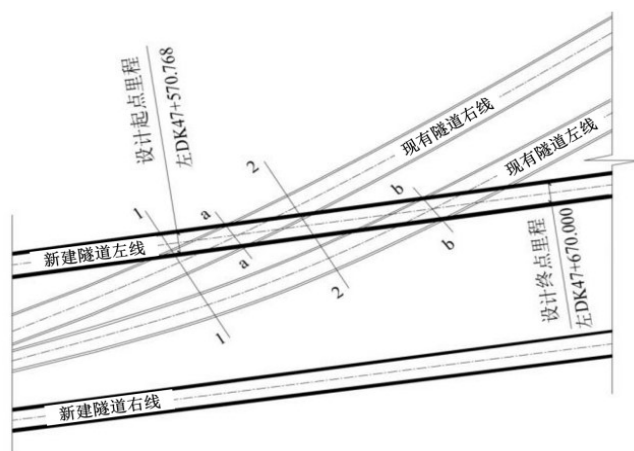


图3 新建隧道与既有隧道位置关系俯视图

待开挖隧道拱顶埋深18.3m~20.8m，开挖工法为台阶法，隧道围岩为中、微风化岩层。隧道断面结构为马蹄形。现有隧道拱顶埋深5.1~13.5m，隧道断面为马蹄形，隧道围岩为中风化岩层。地层自上而下依次为杂/素填土、中风化花岗岩、微风化花岗岩。新建隧道下穿现有隧道所在的区段存在第四系孔隙潜水、基岩裂隙水，各地层的简要水文地质条件如表1所示。

表1 地层水文地质条件

岩土层名称	简要水文地质特征	渗透系数推荐值 (m/d)
素/杂填土	空隙较大，透水性强	25
中风化花岗岩	节理很发育，富水性 和透水性较差	0.1
微风化花岗岩		0.01

(二) 下穿段施工

本工程中，新建隧道斜下穿现有隧道的区段采用第1小节中的施工步骤在上台阶进行非爆破开挖。

开挖前，根据现有隧道与新建隧道的位置关系，对新建与现有隧道水平及竖向投影范围内的交叉重叠部分进行超前注浆加固。加固纵向范围为沿开挖新建隧道一个步距的长度，本工程中为0.5m，竖向范围如图2(b)所示。

注浆加固前，以新建隧道开挖掌子面正上方现有隧道中的垂直投影位置为中心，在现有隧道中前后取10m作为开挖影响区域，在该区域内设置监测断面，监测断面相应位置布置监测点。

注浆结束后，预留核心土，沿着隧道轮廓线利用悬臂式专业掘进机按照切削研磨的方式开挖槽部。开挖槽施工结束后，进行初期支护。支护完成后，按照之字形

切削掘进核心土，在进行核心土开挖的同时，掌子面下方工作面同时进行开挖，开挖过程中保证上、下台阶间距不变，采用现有的台阶法施工，下台阶开挖后及时进行初期支护，完成一个步距的开挖推进工作。循环上述步骤，直至完成整个隧道的开挖。

在新建隧道的开挖过程中，实时监测现有运行隧道的沉降变形，并根据沉降曲线预测可能出现沉降预警的位置，对相关区域进行及时的注浆加固工作，直至下穿部分的开挖工作顺利地完成。具体地，本工程取山东省相关文件、规范中所要求的现有隧道沉降变形限值的60%作为沉降监测预警值。当现有隧道的监测断面上监测点的沉降值超过3mm时，对该断面下方围岩区域进行补充注浆，抬升该区域使其沉降值<3mm。此外，为保证工程施工安全，在新建隧道下穿施工期间，降低上部运行中地铁的速度至15-30km/h。

（三）变形控制效果分析

新建隧道与现有隧道线路交叉范围为最危险断面，为此，如图3所示，选取现有隧道a-a断面和b-b断面作为右线和左线的最危险断面进行位移变形分析。规定竖向位移向上为正，水平位移收敛为正，隧道开挖的施工周期作为监测周期，共计230天。隧道变形量随施工时间的变化曲线如图4所示。

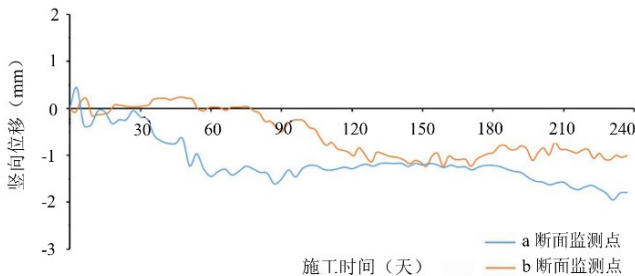


图4 监测点变形量随时间变化曲线

分析图4可知：

随着新建隧道开挖时间的增加，现有隧道的拱腰处监测点均产生沉降，右线沉降值与收敛值均大于左线，分析原因为新建隧道先下穿现有隧道右线，后下穿左线，导致右线隧道沉降与水平收敛发生较早、较大，最大沉降值为2.23mm，最大水平收敛值为1.05mm，均小于规定的安全限值3mm，满足要求，验证了该开挖方法对小净距斜下穿现有隧道变形的良好控制效果。

现有隧道右线最危险断面在施工初期轻微隆起，开挖前30天沉降量较小，保持在0.5mm范围内，第30天至90天沉降量迅速增大，分析原因为此时新建隧道直接下穿最危险截面，新建隧道开挖后产生临空面，拱顶岩体在重力作用下产生沉降，导致上部现有隧道地表沉降量增大，沉降速率加快，与此同时隧道水平收敛量在该时间段内也逐渐增大。开挖90天后沉降量与水平收敛量均趋于稳定。此时下穿新建隧道初支及二衬已完成，隧道周边围岩变形趋于稳定，最终现有隧道的沉降峰值趋于2.23mm，水平收敛峰值趋于1.05mm。

现有隧道左线最危险断面在开挖前80天沉降量与水平收敛量均很小，分析原因为此时新建隧道掌子面开挖

距现有隧道左线最危险断面较远，施工扰动小。第80天至150天现有隧道的沉降量与水平收敛量均持续增大，分析原因为从第80天开始，新建隧道逐渐开挖至现有隧道最危险断面附近，随着开挖掌子面距离现有隧道逐渐减小，下穿隧道开挖对现有隧道周边围岩的扰动造成现有隧道发生沉降与收敛，在第120~150天左右沉降量与水平收敛量达到最大，随后随着下穿隧道支护结构逐渐完成，现有隧道变形趋于稳定。

三、结论与讨论

针对新建隧道在小净距条件下，下穿现有隧道的工况提出了一种改进的开挖工法，该工法为解决新建隧道下穿现有隧道时对现有隧道的干扰问题提供了解决方案，并成功运用到了工程实践中。

该工法具有以下优点：

（1）隧道开挖前，根据现有隧道与新建隧道的位置关系，确定新建隧道与现有隧道在水平及竖向投影范围内的交叉重叠部分作为薄弱区，并针对围岩的薄弱区进行超前注浆加固。该方法可为后续开挖提供安全保障，注浆过程中围岩的轻微膨胀还可抵消开挖过程中现有隧道的一部分沉降变形。

（2）开挖掌子面时，预留核心土，首先开挖隧道周边围岩形成开挖槽并立即进行初期支护，再对核心土进行开挖。这种方式，一方面预留的核心土可以对掌子面施加一个反向推力，不至于使开挖面的围岩“挤压”出来，从而提高开挖过程的稳定性；另一方面开挖槽后立即进行初期支护可缩短开挖拱顶面临空的时间，降低隧道拱顶塌陷的风险，减少对现有运行隧道的扰动。两者均可为隧道顺利贯通提供保证。

（3）在新建隧道的开挖过程中，实时监测现有隧道的沉降变形，并根据沉降曲线预测可能出现沉降预警的位置，对相关区域进行及时的补注浆工作，有效保证了现有隧道沉降处于规范允许的范围，并最终实现了隧道的顺利贯通。

参考文献

- [1] 徐邳崴. 下穿高铁隧道施工方法对既有高速公路的沉降影响与控制标准研究[D]. 重庆交通大学, 2019.
- [2] 宋战平, 王凯蒙, 王涛等. 浅埋地铁隧道下穿高速公路施工方法比选[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2019, 51(04): 503-510+596.
- [3] 王清标, 蒋金泉, 路林海等. 不同开挖方式对近距离交叠隧道影响模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(10): 2079-2087.
- [4] 邓祥辉, 袁崇洋, 姚军等. 某超浅埋大跨隧道下穿既有公路施工工法研究[J]. 中外公路, 2018, 38(04): 201-207.
- [5] 王渭明, 李强, 曹正龙等. 不同埋深下近距交叠隧道施工地表变形研究[J]. 铁道标准设计, 2015, 59(10): 123-128.
- [6] 何如. 下穿隧道爆破作用下建筑结构的动力响应特征研究[D]. 中国地质大学, 2018.
- [7] 郑泽源. 水下隧道断层破碎带段掌子面稳定性分析方法研究[D]. 中南大学, 2012.