doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2025.06.009

盾构穿越既有建筑锚索群关键技术研究
——以沈阳地铁 3 号线为例

田予东
（中铁十五局集团有限公司，北京 100083）

摘　要：为分析盾构隧道穿越锚索区的各种处理方案，以沈阳地铁 3 号线地铁文富路站—富民街站区间隧道盾构穿越既有锚索群为背景，通过技术、经济、工期等综合因素比选，结合工程实际情况，提出矿山初支法开挖隧道清除处理侵限锚索、砂浆回填后再盾构掘进的方案，针对不同施工阶段进行数值模型分析，结合现场监测数据进行对比总结分析。研究表明：采用矿山初支法可有效清除锚索，经洞内砂浆回填的方法为后阶段盾构施工排除了障碍和隐患，盾构推进无异常无需开仓处理；施工监测的地表变形数据较数值分析的略大，变形规律基本一致，均呈现中间数值大，两边小的趋势。实践证明本方法安全可靠，可为类似工程提供参考。

关键词：城市轨道交通；盾构隧道；锚索侵限；锚索清除；矿山法初支；砂浆回填；盾构掘进
中图分类号：U231　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1672-6073(2025)06-0063-09

Research on Key Construction Technologies of Subway Shield Tunneling Through Existing Building Anchor Cables Groups: Taking Shenyang Metro Line 3 as an Example

TIAN Yudong
(China Railway 15TH Bureau Group Corporation Limited, Beijing 100083)

Abstract: Based on the shield tunneling subway crossing through the existing anchor cable group between Wenfu Road Station and Fuming Street Station of Shenyang Subway Line 3 as the background. The paper analyzed various treatment schemes for shield tunneling through anchor cable areas. Through comprehensive comparison of technology, economy, and construction period, combined with the actual project conditions, a scheme was proposed involving the mining primary lining method to excavate tunnels, remove intruding anchor cables, backfill with mortar, and subsequently conduct shield tunneling. Numerical model analyses were performed for various construction stages, and comparative analyses were conducted by integrating on-site monitoring data. The results show that the mining primary lining method can effectively remove anchor cables, and mortar backfilling eliminates obstacles and hidden dangers for subsequent shield construction. The shield advancement proceeded normally without requiring chamber opening. The surface deformation data from construction monitoring is slightly larger than that from numerical analysis, but the deformation patterns are basically consistent, both showing a trend of larger values in the middle and smaller values towards the edges. Engineering practice has proven that the method is safe and reliable, and it can

收稿日期：2025-01-01　修回日期：2025-07-15
作者简介：田予东，男，硕士，高级工程师，主要从事城市轨道交通隧道、地下空间等工程技术方面的研究，tianshelang11@163.com
基金项目：上海市科技计划项目(24YF2760000)
引用格式：田予东. 盾构穿越既有建筑锚索群关键技术研究：以沈阳地铁 3 号线为例[J]. 都市快轨交通，2025，38(6)：63-71.
TIAN Yudong. Research on key construction technologies of subway shield tunneling through existing building anchor cables groups: taking Shenyang Metro Line 3 as an example[J]. Urban rapid rail transit, 2025, 38(6): 63-71.

provide a reference for similar projects.

Keywords: urban rail transit; shield tunneling; anchor cable intrusion; anchor cable removal; primary lining of mining method; mortar back-filling; shield tunneling

近年来，我国城市轨道交通快速发展，针对地铁沿线周边环境日益复杂的现状，在地铁建设过程中经常会遇到既有建筑废旧锚索、锚杆等地下障碍物，严重影响地铁的正常施工。在盾构区间施工过程中，侵限锚索必须在盾构通过前予以清除，否则易造成刀具严重磨损、锚索缠绕刀盘及螺旋机上，严重时导致刀盘及螺旋机卡死而无法正常运转，需要地下开仓清理，增大了施工风险。

针对盾构穿越侵限锚索区的情况，国内外众多学者进行了大量的研究。徐田坤等[1]在调研和总结的基础上，提出一种基于雷达-视频多手段融合的智能异物侵限检测方法，采用高清摄像机视频检测、雷达测距和双目立体测距技术等开发了一套异物侵限探测设备。初月朗等[2-3]介绍了采用增设竖井+暗挖隧道的方法进行影响区域内锚索清除；陈振成等[4-6]结合工程实际对侵限锚索处理方案进行综合比选后采用全套管回钻机拔除锚索的方案；于加云等[7-9]结合现场情况综合分析风险预处理、掘进控制措施及地面沉降控制等方面，采用注浆加固预处理、盾构掘进参数调整与开仓检修相结合的施工方案。

本文结合沈阳市地铁 3 号线一期工程文富路站—富民街站地铁隧道穿越锚索群工程实例，综合分析比选了处理锚索的各种施工方案，提出矿山法开挖清除锚索再回填配合盾构掘进通过的技术方案，并对该方案进行技术及安全性分析，验证了该施工方案的正确性。

1 工程概况

1.1 盾构隧道概况

沈阳地铁 3 号线一期工程文富路站—富民街站区间(简称“文—富区间”)，隧道全长 616.70 m，采用盾构法施工，工程隧洞为单圆断面型式，C50 预制混凝土管片，采用刀盘直径为 6.44 m 的土压平衡盾构机施工，衬砌结构外径 6.2 m，厚 0.35 m，长 1.2 m。自文富路站(左线区间 DK33+446.605)起，原紫荆御府地下室基坑支护锚索侵入区间正线隧道，锚索侵限段长度约 105 m。既有建筑基坑自上而下共设置 3 排锚索，锚固体直径为 150 mm。其中基坑第 2 道、第 3 道锚索侵入区间施工范围，共有 190 根锚索侵入区间，其中 A 型锚索 95 根，单根长 21 m，侵入盾构隧道约 4.245 m；B 型锚索 95 根，单根长 19 m，侵入盾构隧道约 4.610 m，如图 1～2 所示。

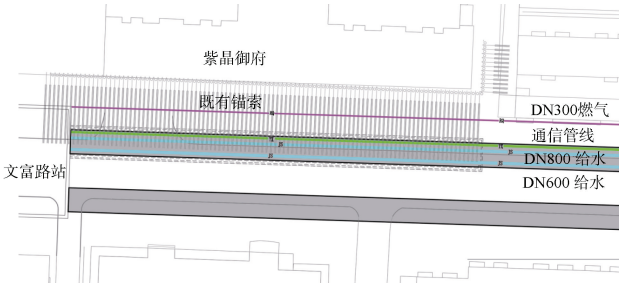


图 1 锚索侵限范围及周边建筑平面关系

Figure 1 The planar relationship of surrounding buildings within of the anchor cable intrusion

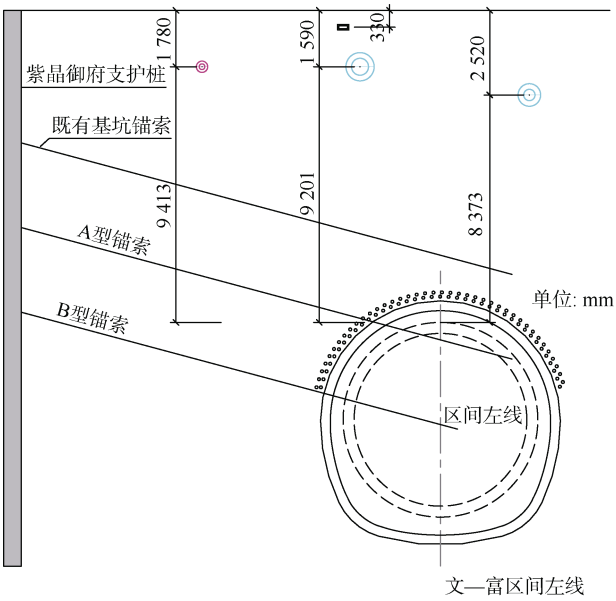


图 2 区间侵限锚索及周边管线剖面

Figure 2 Cross-sectional view anchor cable intrusion and surrounding pipelines of the interval tunnel

1.2 地质水文概况

本区间地貌单元为浑河冲洪积新扇，沈阳市的第四纪地层相对较厚，其下基岩为前震旦系混合花岗岩体。区间隧道在城区主干道下方穿行，场地地层主要由第四系全新统和更新统黏性土、砂类土及碎石类土组成。区间土层自上而下分别为杂填土、粉质黏土、中粗砂、砾砂、圆砾、中粗砂以及圆砾地层，结构顶部埋深为 10.0～12.1 m，如图 3 所示。

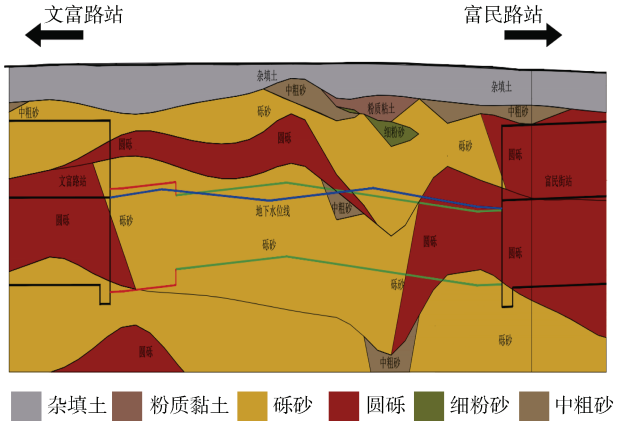


图 3　区间地质剖面

Figure 3　The geological profile of interval tunnel

该区间分布地下水赋存于中粗砂、砾砂等土层中，按埋藏条件划分，属第四系孔隙潜水。初见水位埋深约为 11.20～12.10 m，相当于水位标高约 31.60～34.43 m，稳定水位埋深为 10.70～11.60 m，相当于水位标高 31.10～33.93 m。潜水地下水水位季节性变幅在 1.0～2.0 m。施工前已进行降水工作，水位降至结构最低点以下 1.0 m 左右。

1.3　周边环境

文—富区间矿山段左线侧穿紫晶御府，地上主体 26 层(剪力墙，住宅)，裙楼 3 层(框架结构，商业)，地下室 2 层(板柱结构，较地上无外扩)，裙楼为独立扩展基础，高层为筏板基础，基础埋深 12 m，基坑采用 ϕ600 mm@1 100 mm 钻孔灌注桩，竖向 3 道锚索，单根锚索长度 19～21 m；区间外皮与该建筑物最小水平净距为 12.7 m。

区间隧道位于主街道之下，区间隧道上方沿区间方向存在较多管线，主要管线如表 1 所示。

表 1　侵限锚索区域地下管线统计

Table 1　Statistics of underground pipelines in the intrusion limit anchor cable area

地下管线类型	与地铁盾构隧道关系	埋深/m
DN600 给水管	平行于区间隧道正上方	2.52
DN800 给水管	平行于区间隧道正上方	1.59
DN300 燃气管	平行于区间隧道侧上方	1.78
通信管线	平行于区间隧道侧上方	0.33

2　侵限锚索处理方案比选

侵入盾构区间范围众多的锚索必须在盾构通过前进行处理，若不处理会出现以下问题：①锚索缠绕刀盘会减小刀盘实际开口率，造成扭矩及推力急剧增大，土体不易进入土仓，易引起较大地面及周边管线变形。严重时会使刀具失去破岩能力，增大施工风险，且锚索数量众多，要多次开仓取出缠绕的锚索，大大增加了施工成本和风险；②即使盾构剪断锚索，锚索进入土仓后，易缠绕螺旋输送机，严重时会导致无法出土，盾构无法掘进；③锚索扰动后，易形成明显的通道，对盾构开舱作业和盾构掘进时建立的泥膜带来较大影响，对开舱作业处理带来较大困难。综合本工程所处的地理位置和地质条件，采用合理、科学、安全的锚索清除方案是本工程的重点和难点。

2.1　明挖基坑法

采用明挖基坑法处理侵限锚索工艺的主要流程为：确定开挖范围→交通导改与管线迁移→围护结构施工→基坑开挖→侵限锚索切割拔除。本项目侵入左线隧道内的锚索埋深约 12 m，且影响左线隧道盾构推进的锚索较多，考虑明挖方案在影响左线盾构推进的锚索区域范围内的隧道两侧施作直径 600 mm 钻孔灌注桩，围护桩桩长约 20 m，明挖基坑宽约 8 m、深约 14 m。传统的明挖法，工艺较为成熟，可控性较高。在对既有交通疏解后，在围挡内预计锚索地点明挖，采用围护桩+钢支撑支护的方式，施工风险小，而且能够排除其他不明障碍物，可以彻底拔除锚索。但该方案围护桩施工工期约 2 个月，基坑开挖及锚索清除约 2 个月，故工期较长，且该地段位于城市中心主要交通干道，若进行围挡明挖，将严重影响交通；且既有管线复杂，迁改难度大，明挖基坑废弃工程较多。

2.2　竖井、暗挖横通道法

该施工方法首先采用人工挖孔施工竖井，挖至需拔除 2 层锚索的下层区域后，沿盾构区间轴线方向开挖横通道，采用套管套取锚索工艺进行拔除施工。锚索拔除后注浆回填锚孔，下层施工完成后回填横通道及竖井至上层锚索区，以同样方法施工上层横通道、拔除锚索、回填至全部完成。该方法的优点是施工所占场地较小，并且还能有效避开对周边土体和管线的影响。但如果人工挖孔竖井比较深或开挖范围内存在地下水，会产生一定的风险。

2.3　全套管钻机垂直切索法

在锚索锚头端开挖工作井，采用水平定向钻机沿着锚索安装的轨迹钻进 1 个小角度钻孔，全面咬合切割锚索区土体，采用特制的抓斗将锚索及锚索区土体切削物全部抓出，并向孔内注满低标号水泥砂浆，保持土层的稳定。该施工方法的优点是不需要进行大面

积基坑开挖，可选择小范围的管线迁改，且在施工时对周边建筑以及土层的影响较小，整体施工风险性较小，不需管线迁改，各分步施工，交通影响较小。但该施工方法也存在着锚索清理不完全的风险，从而影响盾构正常掘进。

2.4 盾构开仓割索法

该施工方法在盾构机掘进到锚索区域前，对此区域进行土体加固、降水，盾构施工到达锚索区域时，主动开仓人工切除锚索。该工艺在洞门处土体加固后盾构进出洞更安全，但是盾构机需频繁开仓，存在较大安全隐患和不可预测的风险。因此，此施工方法一般采用旋挖钻机钻孔清除部分锚索与盾构掘进开仓清除锚索相结合的方式。由于旋挖机钻孔技术清理锚索对地层扰动较大，会破坏地层内成型的注浆土体，影响防水效果，故旋挖钻成孔清理锚索工序要在注浆加固之前进行。

2.5 矿山法初支隧道

为了减少对地下管线及地面交通的影响，可考虑从车站端头处采用矿山法施作锚索侵限范围隧道，代替盾构隧道。该矿山法隧道尺寸略大于盾构直径，首先对矿山法开挖的隧道施作初支，并采用钢钳清除露出的锚索，锚索清理完成后施工二衬，后期盾构机一般配合喷射砾石空推通过；或者在矿山法初衬完成后，对矿山初支隧道采用回填料进行回填密实，然后再盾构掘进通过，矿山法处理锚索流程如图 4 所示。该施工方法可彻底清除影响盾构推进的全部锚索，且对地下管线和地面交通基本无影响。但该施工方法施工前需先施工竖井或从车站端部开始掘进，工期较长，工程造价和施工风险较高。

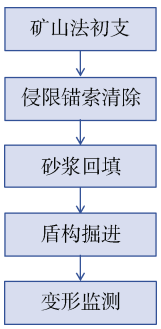


图 4 矿山法处理锚索流程示意

Figure 4 Schematic diagram of the primary lining of mining method for handling anchor cables

上述 5 种盾构区间侵限锚索处理方法均可对侵限锚索进行处理，但各有利弊及适用条件，详见表 2 所示。

表 2 区间隧道侵限锚索处理方法对比

Table 2 Comparison of treatment methods for penetrating limit anchors in interval tunnel

评价项目	明挖基坑法	竖井、暗挖横通道法	全套管钻机垂直切索法	盾构开仓割索法	矿山法
锚索清除效果	可彻底清除	大部分可清除	难以全部清除	大部分可清除	可彻底清除
工期影响	较大	较大	较小	最小	最大
对交通、管线及征拆的影响	最大	一般	较大	较小	无
工程风险	一般	较大	大	最大	较大
工程造价	高	较低	低	最低	最高
综合评价	一般	较差	差	最差	好

3 矿山法初支处理锚索回填后再盾构方案

上述 5 种锚索处理方案均可对侵限锚索进行处理，且 5 个方案均有各自的优缺点。在确定推荐方案时，主要从技术难度、风险、工期、工程造价、锚索处理效果，以及对地下管线、地面交通影响等方面综合评价方案的优劣。

表 3 从 5 个方面分别对锚索处理方案进行评价，并对各个方案进行综合加权分析。根据重要性程度分别对 5 个评价标准赋予权重值，权重值的分配根据具体工程建设条件要求而确定。对 5 种锚索处理方案的评分采用 5 分制。其中工程造价标准采用城市轨道交通工程常规的经济指标，本文不再赘述。

表 3 区间隧道侵限锚索 5 种处理方案技术经济比选

Table 3 Technical and economic comparison of several treatment schemes for anchor cables intrusion in interval tunnels

评价项目	权重系数	明挖基坑法	竖井、横通道法	全套管钻机垂直切索法	盾构开仓割索法	矿山法
清除锚索效果	0.3	5	3	2	1	4
工期影响	0.2	2	3	4	5	1
对交通、管线及征拆的影响	0.2	1	3	2	4	5
工程风险	0.2	4	2	5	1	3
工程造价	0.1	2	4	3	5	1
加权合计	1.0	3.1	2.9	3.1	2.8	3.1

对以上方案从锚索处理效果、工期、风险、造价，以及对交通、地下管线、征拆的影响等方面综合进行对比分析，并结合工程现场情况(区间长度、车站半盖挖施工方案以及工期的影响)，提出了矿山法隧道初支后砂浆回填、再盾构掘进的施工方案，如图 5 所示。

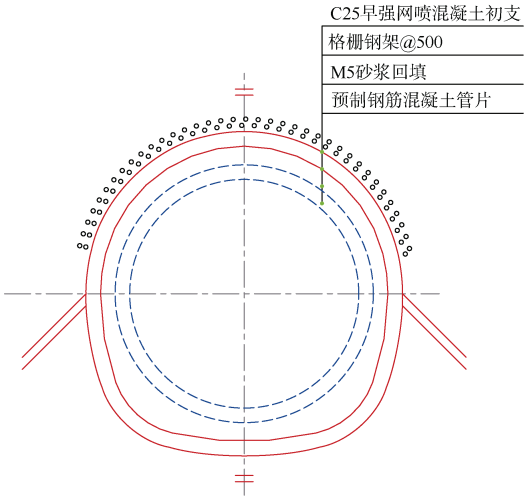


图 5　文—富区间矿山初支段结构剖面

Figure 5　The structural section of the mining method tunnel between Wenfu Road Station and Fumin Street Station

3.1　矿山初支-回填-盾构施工过程数值分析

3.1.1　模型建立

矿山段断面尺寸为 7.6 m×7.8 m，回填后采用刀盘直径为 6.44 m 的土压平衡盾构机施工，衬砌结构外径 6.2 m，厚 0.35 m，长 1.2 m，回填材料采用 M5 砂浆。

根据圣维南原理，隧道开挖引起周边土体变形范围一般为 3～5 倍的隧道直径，因此运用 Midas GTS 有限元计算软件建立高为 40 m，宽为 60 m，长为 105 m 模型。模拟主要分为：矿山开挖、砂浆回填和盾构通过 3 个阶段。矿山开挖回填施工模型包含不同的地层、内部的矿山法开挖回填区域及施作的初支结构，开挖步距 2 m，共分为 53 步开挖；盾构施工模型包含不同的地层、内部的矿山法开挖回填区域，盾壳、管片以及施加的顶推力和注浆压力，总共分 85 步开挖。土体采用库伦-摩尔本构，均为实体单元，支护结构均采用弹性本构，初支、盾壳及管片为板单元，自上而下地层分别为杂填土、粉质黏土、中粗砂、砾砂、圆砾、中粗砂以及圆砾，各材料计算参数见表 4～5 所示，模型如图 6～7 所示。

表 4　土体材料参数

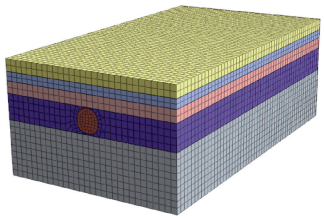
Table 4　The soil material parameter

土层	弹性模量/MPa	泊松比	容重/(kN/m^3)	黏聚力/kPa	摩擦角/°	厚度/m
杂填土	5.0	0.33	18.0	10	10	4
粉黏土	21	0.34	19.2	28.6	37	3
中粗砂	15	0.28	19.1	3	34	4
砾砂	20	0.26	19.9	3	35	8
圆砾	90	0.23	20.1	2	36	10
M5 砂浆	2 000	0.2	20	30	35	-

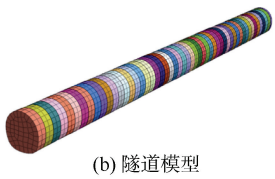
表 5　隧道结构材料参数

Table 5　The tunnel structure material parameter

材料名称	截面厚度/m	弹性模量/MPa	泊松比	容重/kN/m^3
初支	0.35	2.8×10^4	0.2	24
盾壳	0.05	2.1×10^5	0.25	78.5
管片	0.35	3.0×10^4	0.2	25



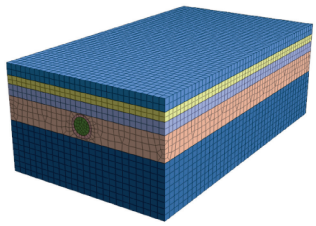
(a) 整体模型



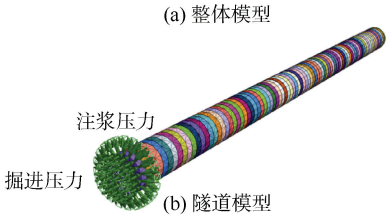
(b) 隧道模型

图 6　矿山法施工有限元计算模型

Figure 6　The finite element calculation model for mining construction method



(a) 整体模型



(b) 隧道模型

图 7　盾构施工有限元计算模型

Figure 7　The finite element calculation model for shield tunneling method

3.1.2　矿山法开挖及回填施工过程模拟

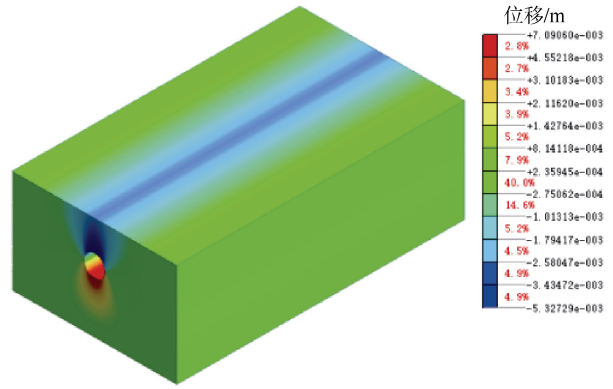
为简化矿山法施工过程，主要考虑隧道开挖以及初期支护，采用全断面开挖，开挖步距 2 m，通过空数值模型开挖土体单元及施加响应的支护结构实现动态连续的矿山法隧道施工过程模拟。具体施工步骤如下：

①赋予各地层材料参数，施加边界条件，初始应力仅考虑重力场作用，模拟土体天然堆积作用下的固结作用，进行初始地应力平衡及位移清零；②移除第 1 块区域矿山法隧道土体；③开挖下一区域隧道土体，

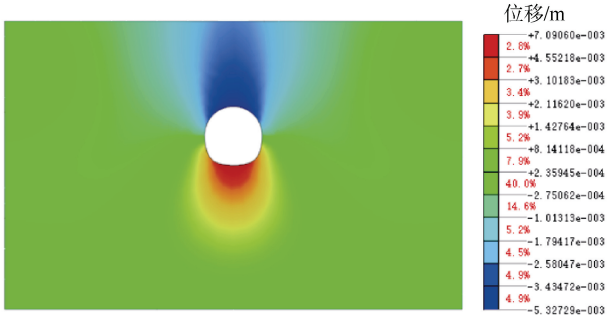
激活前一区域初支结构；④重复步骤②和③，直至隧道完全贯通；⑤初支全部完成后，最后激活回填土单元，实现隧道内砂浆回填施工。

3.1.3 矿山法开挖及回填施工过程围岩竖向变形分析

矿山法开挖工程中竖向位移变形云图如图 8 所示。砂浆回填后竖向位移变形云图如图 9 所示。



(a) 三维云图



(b) 二维云图

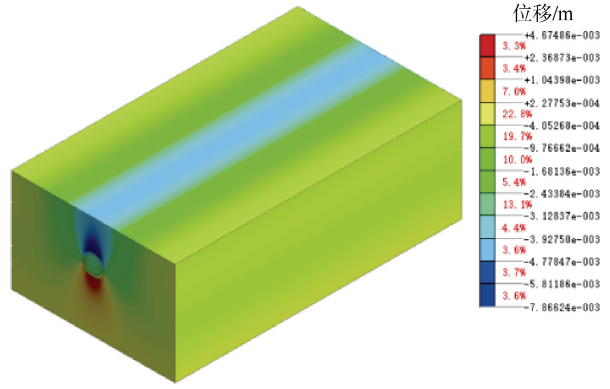
图 8 矿山法开挖地层竖向位移云图

Figure 8 Cloud map of soil vertical displacement during mining method excavation

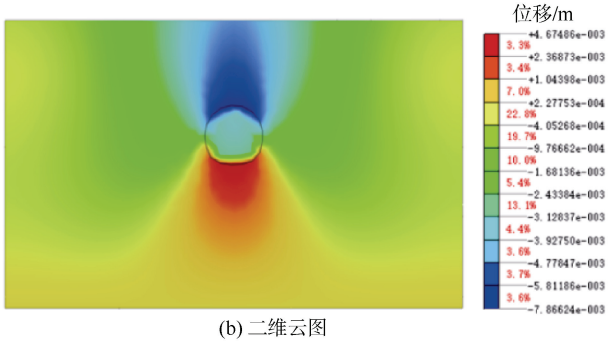
由图 8 可看出：随着矿山法隧道的开挖，地表整体发生了沉降，隧道正上方的沉降最大，地表最大沉降约为 2.8 mm，隧道周围受影响变形最大，最大沉降位于隧道顶部，约 5.2 mm，最大隆起位于拱底，约为 7 mm。

由图 9 可知：回填施工过程中，围岩受影响程度及范围加大，地表最大变形达到了 4.5 mm 左右，隧道拱顶沉降约 7.8 mm，拱底由于受到回填砂浆的自重压力，隆起变小，隆起量约为 4.5 mm。

为更直观分析施工过程地表沉降规律，提取隧道正上方地表沉降值，绘制地表沉降曲线，如图 10 所示。地表沉降形状基本呈现“V”型，从中间向隧道轴线两边逐渐减小，回填施工后地表沉降变得更大，矿山开挖最大沉降值约为 2.81 mm，砂浆回填后最大沉降值约为 4.53 mm。



(a) 三维云图



(b) 二维云图

图 9 回填施工地层竖向位移云图

Figure 9 Cloud map of soil vertical displacement during back-filling construction

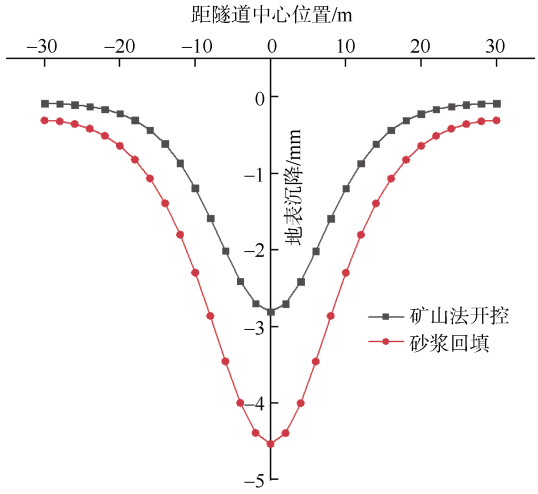


图 10 矿山法开挖、砂浆回填施工数值模拟地表沉降曲线

Figure 10 Numerical simulation of soil settlement curve for mining method excavation and mortar back-filling construction

数值分析结果表明：矿山开挖及采用 M5 砂浆回填施工阶段的地表沉降均远小于地表沉降控制值 30 mm，该施工方案安全可控。

3.2 盾构掘进施工过程数值分析

3.2.1 盾构隧道施工过程模拟

回填砂浆单元激活后，即可进行盾构掘进施工，开挖步距为 1.2 m，盾构施工步骤如下：①移除一块盾构隧道土体单元，激活对应的盾壳单元，在掌子面施加掘进压力大小取 0.4 MPa；②移除下一步盾构隧道土体单元及上一步盾壳单元，激活上一步的管片单元并施加注浆压力 0.3 MPa，对注浆过程进行模拟；③重复①、②步，完成盾构施工。

3.2.2 盾构隧道施工过程围岩竖向变形分析

1) 围岩竖向变形。图 11 为盾构穿越回填段施工地层竖向位移云图。图中显示出盾构通过后地表最大沉降约为 3.69 mm，隧道周围受影响变形最大，最大沉降位于隧道顶部，约为 6.8 mm，最大隆起位于拱底，约为 5.8 mm。图 12 为盾构掘进地表竖向位移。地表沉降形状仍呈现“V”型，由于盾构施工过程中存在注浆、掘进压力作用以及较高的盾构管片强度，盾构施工地表位移较矿山开挖及回填施工变小。

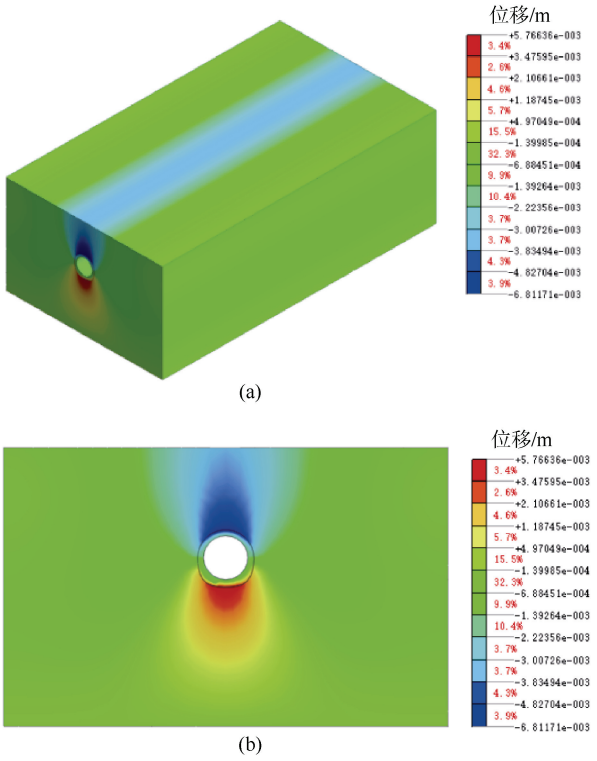


图 11　盾构穿越回填段施工地层竖向位移云图

Figure 11　Cloud map of soil vertical displacement during shield tunneling

2) 初支结构应力结果。全过程施工中，支护结构应力分布如图 13 所示，支护结构内力如表 6 所示。由图 13 可知：在不同施工步骤下，支护结构应力均显示为拱腰处最大，拱肩位置次之，仰拱和拱顶位置应力相对较小。根据表 6 内力结果的统计，从开挖到回填再到盾构掘进，初支结构受到的最大应力逐渐减小，施工全过程中主要的受力结构均为初支结构，盾构管片受力小，此时的整体结构也类似于施作了初支和二衬的隧道，初支作为主要的受力结构，盾构管片作为安全储备。

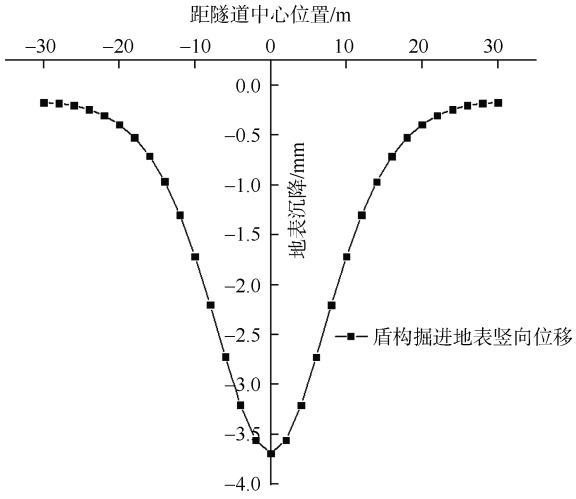
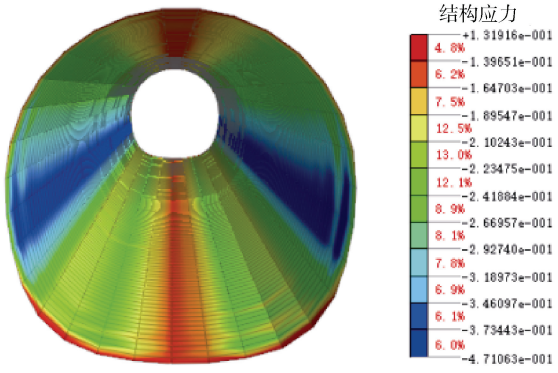
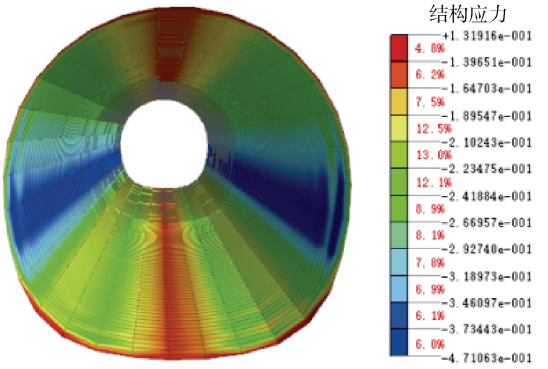


图 12　盾构掘进地表竖向位移

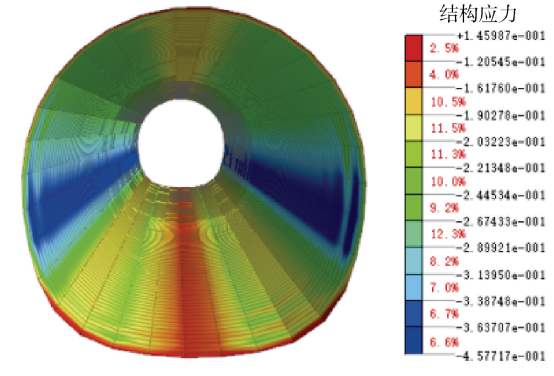
Figure 12　Vertical displacement of soil during shield tunneling



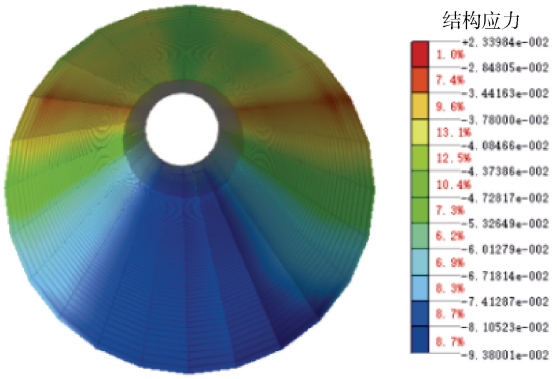
(a) 矿山开挖初支结构



(b) 回填施工初支结构



(c) 盾构掘进初支结构



(d) 盾构掘进管片

图 13　最大主应力云图

Figure 13　The cloud map of maximum principal stress

表 6　支护结构内力结果

Table 6　The result of internal forces in supporting structures

施工步骤	位置	拱顶/MPa	左拱肩/MPa	右拱肩/MPa	左拱腰/MPa	右拱腰/MPa	仰拱/MPa
矿山开挖	初支	0.128	0.220	0.223	0.463	0.471	0.131
回填施工	初支	0.190	0.295	0.310	0.456	0.457	0.146
盾构掘进	初支	0.153	0.235	0.236	0.452	0.455	0.141
	管片	0.023	0.024	0.023	0.053	0.058	0.013

4　矿山法初支–回填施工过程监测

4.1　矿山法隧道开挖支护及砂浆回填

根据前文既定方案，本段区间隧道矿山段开挖断面尺寸为 7.6 m×7.8 m，开挖步距 0.5 m，采用台阶法分上下导洞施工；超前支护采用双排小导管注浆加固，内排小导管ϕ32 mm 长度 2 m，纵向间距 0.5 m，外排小导管ϕ32 mm 长度 2.5 m，纵向间距 1 m，横向间距 300 mm；初支采用格栅钢架(间距 500 mm)+双层挂网喷锚的结构形式，初支厚度 350 mm。

开挖时遇地下锚索，采用钢筋钳或者液压钳在隧道内表面根部进行切断处理，若存在锚索预应力较大情况，采用木制或钢制挡板防护进行切断。

初支施工完成后，采用专门调配的 M5 砂浆作为初支后隧道洞口的回填材料。通过在地面打设分布下料孔的方式对开挖后的矿山段进行 M5 砂浆填充，确保回填均匀密实，为后续盾构施工做好准备。

4.2　监测数据分析

为确保施工过程的安全，并验证模拟数据的准确性，对现场矿山初支开挖、砂浆回填等施工过程进行了实时监测。现场矿山初支回填段监测约 10 m 布置一个监测断面，每个监测断面约 10 个监测点，每 5 m 布设 1 个测点。现场施工过程实测数据与模拟数据进行对比分析，地表沉降曲线对比如图 14 所示。

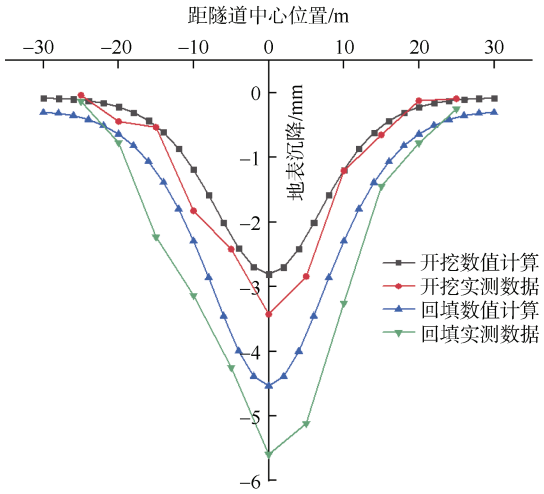


图 14　地表竖向变形

Figure 14　Vertical displacement of ground soil

从图 14 中可以看出：2 个施工阶段的监测数据得到的地表沉降规律基本一致，主要呈现中间数值大，两边小的趋势，实测数据开挖最大沉降值为 3.43 mm，回填后最大沉降为 5.59 mm，均在安全范围之内，实测数据略大于模拟结果，通过变形规律和变形量的对比可说明模拟结果和实测数据的一致性，验证了模型的正确性。

5　结论

本文基于沈阳地铁 3 号线文—富区间隧道侵限锚索处理为例，综合比选既有建筑基坑侵限锚索处理技术，结合项目的实际，首次提出矿山初支法处理侵限锚索、砂浆回填再盾构掘进的方法，并建立数值模型进行仿真分析，加强施工过程监测，最终成功应用于工程项目，为今后类似的工程提供借鉴和参考，主要结论如下。

1) 经技术、经济等综合方案比选，结合工程实际情况，提出矿山初支法处理锚索、砂浆回填再盾构掘进的施工方案，实践证明锚索清除率 100%，有效解决了在周边环境复杂、场地紧张的情况下大面积拔除锚索的问题。

2) 通过对矿山法初支、砂浆回填、盾构掘进等不同施工阶段的数值分析，精确预测各个施工阶段围岩变形及初支内力的结果。分析结果显示：矿山法初支开挖、砂浆回填、盾构掘进阶段，地表沉降值分别为 2.81、4.53、3.69 mm。在不同施工步骤下，支护结构应力均为拱腰处最大，拱肩位置次之，仰拱和拱顶位置应力相对较小；从矿山法开挖到砂浆回填至盾构掘进，初支结构受到的最大应力逐渐减小，施工全过程中主要的受力结构均为初支结构，盾构管片受力小。

3) 为确保施工过程的安全，并验证模拟数据的准确性，对现场矿山初支开挖、砂浆回填等施工过程进行了实时监测。监测结果表明：2 个施工阶段的地表沉降值分别为 3.43、5.59 mm，较数值分析的地表沉降值 2.81、4.53 mm 略大，即实测数据略大于模拟结果，但均在安全范围之内。监测数据得到的地表沉降规律与数值模拟的规律基本一致，主要呈现中间数值大，两边小的趋势，工程实践证明本方法安全可靠。

参考文献

[1] 徐田坤，李松峰，李卫军，等. 北京地铁异物侵限探测系统研发与实践[J]. 都市快轨交通, 2019, 32(5): 56-61.
XU Tiankun, LI Songfeng, LI Weijun, et al. Monitoring equipment for foreign matter intrusion in Beijing metro[J]. Urban rapid rail transit, 2019, 32(5): 56-61.

[2] 初月朗，聂晓凯，王潺. 盾构遇地下锚索障碍竖井+暗挖隧道处理施工技术应用[J]. 建设机械技术与管理，2024, 37(1): 117-120.
CHU Yuelang, NIE Xiaokai, WANG Chan. The application of the construction technology of shield tunnel with underground anchor cable obstacle shaft + underground tunnel treatment[J]. Construction machinery technology & management, 2024, 37(1): 117-120.

[3] 郑联伟，吴涛，赵建胜，等. 高水位盾构区间锚索拔除方法研究[J]. 广东建材, 2024, 40(3): 81-84.
ZHENG Lianwei, WU Tao, ZHAO Jiansheng, et al. Study on the method of removing anchor cable in high water level shield section[J]. Guangdong building materials, 2024, 40(3): 81-84.

[4] 陈振成. 盾构穿越区既有锚索拔出施工技术[J]. 四川水泥, 2022(3): 195-197.
CHEN Zhencheng. Construction technology of pulling out existing anchor cable in shield crossing area[J]. Sichuan cement, 2022(3): 195-197.

[5] 张江雄. 软弱地层全套管咬合桩拔锚施工技术[J]. 中国市政工程, 2020(1): 59-63.
ZHANG Jiangxiong. Construction technology of pulling anchor for the whole casing secant pile in soft ground[J]. China municipal engineering, 2020(1): 59-63.

[6] 张云飞. 邻近既有建筑物全套管回转钻机拔桩技术[J]. 铁道建筑技术, 2021(4): 148-151.
ZHANG Yunfei. Pile pulling technology of full casing rotary drilling rig near existing buildings[J]. Railway construction technology, 2021(4): 148-151.

[7] 于加云. 喀斯特复合地层地铁盾构穿越锚索区施工技术[J]. 天津建设科技, 2021, 31(3): 20-23.
YU Jiayun. Construction technology of shield directly cutting and passing through anchor cable group in Karst composite stratum[J]. Tianjin construction science and technology, 2021, 31(3): 20-23.

[8] 李文俊，朱元，张燕明，等. 地铁工程盾构穿越锚索区域施工技术[J]. 中国安全生产科学技术，2020, 16(S1): 100-106.
LI Wenjun, ZHU Yuan, ZHANG Yanming, et al. Construction technology of subway shield crossing anchor cable area[J]. Journal of safety science and technology, 2020, 16(S1): 100-106.

[9] 胡军. 盾构穿越邻近基坑锚索群施工方案比选与优化[J]. 铁道建筑技术, 2024(6): 132-135.
HU Jun. Comparison and optimization of techniques about constructing the anchor cable groups by piercing the shield into the adjacent foundation pits[J]. Railway construction technology, 2024(6): 132-135.

（编辑：傅依萱）