

盾构隧道立交穿越铁路枢纽车场咽喉区及市政桥涵防护方案技术研究

冯高飞

中国铁路设计集团有限公司城市轨道交通事业部，天津

收稿日期：2024年3月29日；录用日期：2024年4月19日；发布日期：2024年4月30日

摘要

铁路枢纽咽喉区布置复杂、变形控制严格，盾构隧道穿越该类工程时，确保铁路运营及隧道施工的安全意义重大。本文以某地铁盾构隧道穿越铁路枢纽咽喉区及市政桥涵工程为依托，提出了对枢纽车场采取“板凳结构”和隔离注浆的预加固方案。通过对有、无加固措施工况下穿越工程的模拟分析，对比发现，在采取加固措施后，盾构施工过程引起的轨道变形可满足轨道不平顺指标管理值要求，且市政桥涵沉降明显减小，最大沉降量减小约57.7%，证实了本工程加固措施是必要且有效的。

关键词

盾构隧道，铁路枢纽，咽喉区，安全分析，沉降控制

Research on Protection Scheme of Shield Tunnel Overcrossing Throat Area of Railway Junction and Municipal Frame Structure

Gaofei Feng

Urban Rail Transit System Division, China Railway Design Corporation, Tianjin

Received: Mar. 29th, 2024; accepted: Apr. 19th, 2024; published: Apr. 30th, 2024

Abstract

It is of great significance to ensure the safety of railway operation and tunnel construction when shield tunnel passes through the complex layout and strict deformation control of the throat area of railway junction. Based on a shield tunnel passing through the throat area of railway junction

and municipal frame structure project, the paper puts forward a scheme of pre-strengthening measures of “bench structure” and isolated grouting for railway junction. Through the simulation analysis of the crossing project with and without reinforcement measures, it was found that after the reinforcement measures, the track deformation caused by shield construction could meet the management requirements of the track irregularity index, and the settlement of municipal frame structure is reduced significantly, and the maximum reduction of settlement is about 57.7%, which confirms that the reinforcement measures of the project are necessary and effective.

Keywords

Shield Tunnel, Railway Junction, Throat Area, Safety Analysis, Settlement Control

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着社会经济的快速发展，轨道交通建设已经从高速度发展向高质量发展转型，铁路、地铁与市政工程一体化建造的重大项目日益增多[1] [2]。该类工程的建设必将面临周边环境复杂、边界条件多样、近接工程庞杂等诸多工程难题。当新建地铁隧道工程穿越铁路枢纽车场时，由于枢纽车场咽喉区铁路设备设施众多，同时铁路道岔等对沉降极其敏感，咽喉区也因此成为变形控制要求最为严格的区域。

关于隧道下穿铁路枢纽咽喉区安全性的研究，仇文革[3]等通过对地铁穿越既有铁路咽喉区的地表沉降规律进行分析，提出了双层大管棚结合地层跟踪注浆的变形控制方案；部分学者[4] [5]从施工控制技术角度出发，通过盾构掘进参数优化调整，结合信息化施工监测手段，也可确保相关工程的顺利实施；当采取常规地面加固措施条件受限时，王立川[6]等提出以减小盾构出露长度为目的，通过盾构姿态控制和优化同步注浆的方法，解决变形控制的难题。对于部分地铁车站施工可结合铁路枢纽改造的项目，有研究者[7]提出了先隧后站矿山法施工的方案，确保先期地铁隧道安全穿过铁路枢纽，后期地铁车站结合铁路改造同期实施。以上成果都是以隧道穿越既有铁路枢纽车场为研究对象，且既有铁路均未预留后期穿越条件，因此，在变形控制方面需采取被动防护的安全措施，实施难度较大且风险较高，而关于铁路枢纽采取预加固的案例则鲜有研究。

本文以新建地铁盾构隧道下穿铁路枢纽车场咽喉区、市政框构桥及排水涵洞综合工程为依托，以确保盾构隧道施工期间枢纽车场及市政设施安全为目的，通过对有、无预加固措施工况下盾构施工对建(构)筑物位移的影响进行模拟分析，论证了铁路及市政桥涵预加固措施的合理有效性。

2. 工程概况

2.1. 铁路工程概况

某铁路枢纽规模为 7 台 15 线，为客运专线铁路，东侧为高速铁路车场，布置 5 台 10 线，西侧为普速铁路车场，布置 3 台 5 线，第三站台由普速车场与高速车场共用。车场铺设无缝轨道，线路为无缝线路，路基为低矮路堑。在枢纽北侧有一条规划道路，规划路与枢纽车场相交处位于站内，交叉角度约 75° (如图 1 所示)，在其下穿枢纽处设市政框构桥两座(由铁路枢纽同期代建)，框构桥地基采用桩板结构，由钢筋混凝土板和钻孔灌注桩组成(如图 2 所示)。此外，在规划道路北侧存在市政排水沟，铁

路用地范围内均采用框架箱涵跨越排水沟，排水涵也由铁路枢纽同期代建，涵身基底采用 CFG 桩对地基进行加固处理。

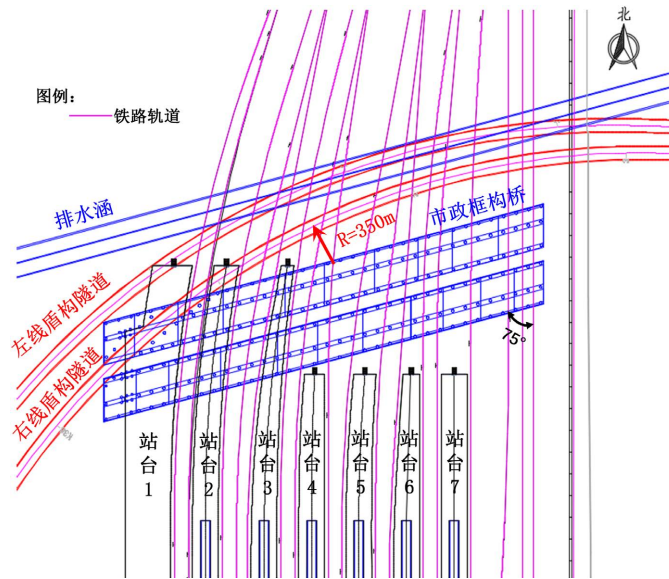


Figure 1. Planar relationship of municipal frame structure, throat area of railway and shield tunnel
图 1. 市政框构桥、排水涵、枢纽咽喉区与地铁盾构隧道平面关系图

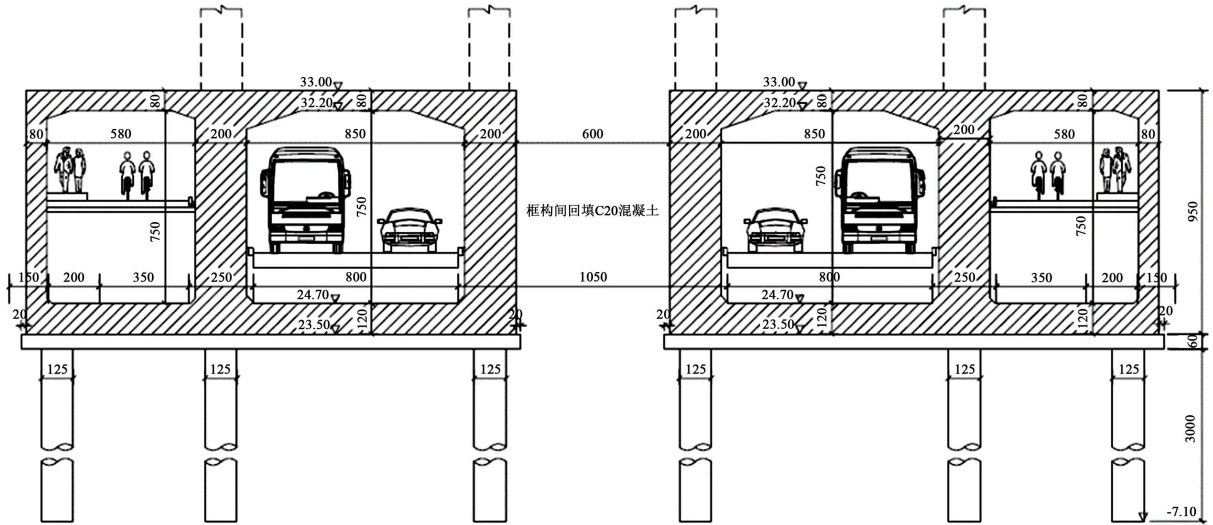


Figure 2. Vertical view of municipal framed structure
图 2. 市政框构桥立面图

2.2. 地铁工程概况

本工程中下穿铁路枢纽的地铁区间线间距为 12 m，两端车站均采用明挖法施工，区间起点处车站与高铁枢纽一体化建造。区间穿越铁路枢纽车场、市政框构桥和排水涵范围线路与铁路平面交角约 $60^{\circ}\sim 80^{\circ}$ ，穿越段线路曲线半径为 350 m (如图 1 所示)。区间隧道顶埋深(与铁路轨道净距)最深处约 19.0 m。穿越段区间隧道距框构桥结构垂直间距约 7.07~8.17 m，距框构桥桩基础最小水平间距约 1 m；区间隧道距排水涵结构垂直间距约 11.45~12.15 m，距排水涵 CFG 桩底垂直间距约 5.45~6.15 m。

区间隧道采用盾构法施工，结构内净空直径为 5800 mm，外直径为 6400 mm，管片厚度为 300 mm，环宽为 1200 mm。管片设计采用六块方案，一个封顶块 K (22.5°)、两个邻接块 B (67.5°)、三个标准块 A (67.5°)，错缝拼装，管片横断面如图 3 所示。

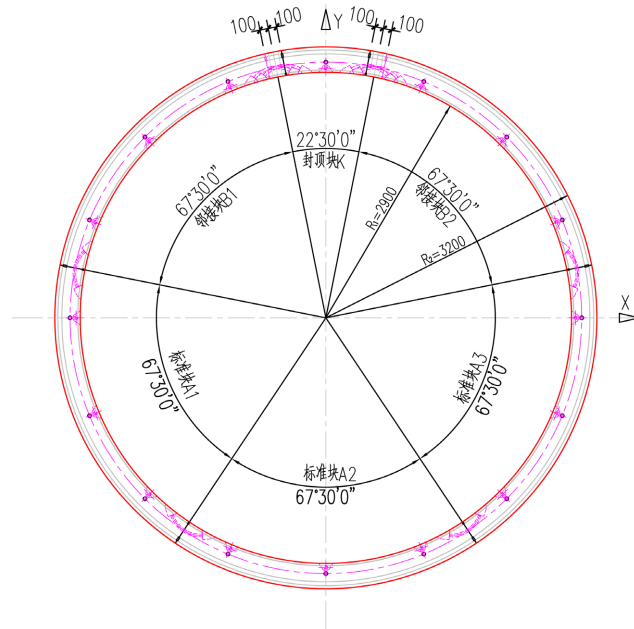


Figure 3. Cross-section diagram of shield segment
图 3. 盾构管片横断面图

2.3. 工程地质条件

本工程勘察的控制性勘探孔最大深度为 68.00 m，按照地层沉积年代、成因类型、地层岩性及其物理力学性质对地层进行划分。自上而下主要为人工堆积层的杂填土，第四纪沉积层的黏质粉土 - 砂质粉土、粉质黏土、细砂 - 粉砂、细砂 - 中砂层及圆砾 - 卵石地层等。盾构隧道穿越地层主要为粉质黏土和细砂 - 粉砂地层。

3. 穿越工程加固方案

3.1. 盾构掘进变形机理

盾构推进引起的周围岩土体稳定性变化有明显的三维特征，与盾构自身的特性属性(刚度、自重、推力等)、施工进程以及具体操作密切相关(如图 4 所示)。盾构施工引起的沉降分为五个阶段：① 先行沉降：盾构开始向前掘进后，由于地下水位降低从而导致前方土体发生固结压缩沉降；此时的沉降与土体的软弱程度有关。② 开挖面前方土体的隆起和沉降：如果开挖面土体受到的支护力大于土体原始侧压力则土体会向远离开挖面的方向移动，从而导致地表隆起；如果土体受到的支护压力小于土体原始侧压力，土体会向盾构内移动导致地面沉降。但对于封闭型盾构开挖面的稳定性比较好，另外盾构机后退也会使开挖面土体坍塌或松动造成地层损失。③ 通过沉降：由盾构对地层的扰动引起应力释放所致，如施工扰动和盾构与周围土体摩擦力引起的扰动。④ 盾尾空隙沉降：由于注浆不及时、浆液填充不足、注浆压力不合理等因素使盾尾周围土体失去原始三维平衡状态，而向盾尾空隙中移动。⑤ 后期沉降：由土体固结和蠕变变形引起。历时沉降曲线如图 5 所示。

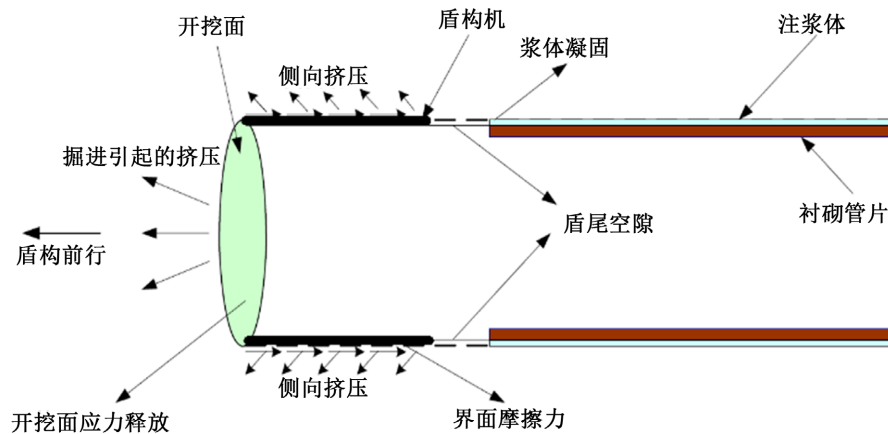


Figure 4. Pressure change of surrounding rock caused by shield
图 4. 盾构掘进引起的岩土体压力变化情况

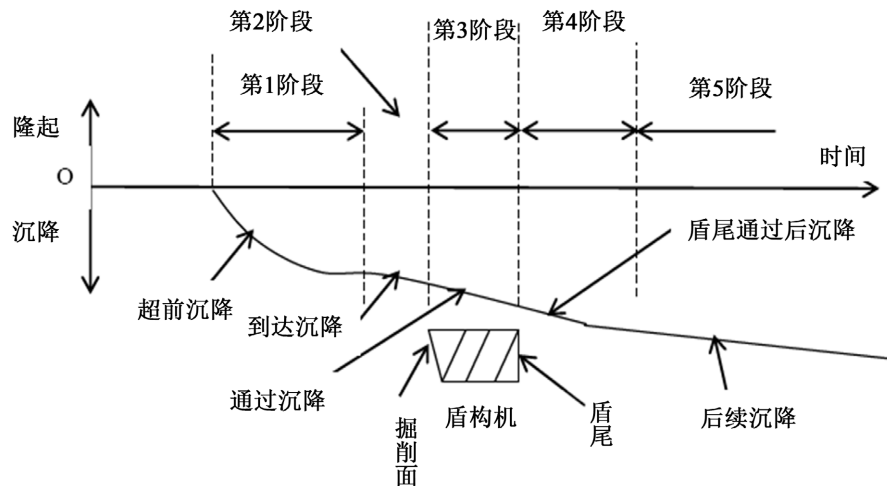


Figure 5. Settlement curve with excavation process
图 5. 历时沉降曲线

3.2. 加固工程方案

由于新建高速铁路车场及其配套市政工程在地铁区间施工前即需投入运营，为确保地铁区间施工期间铁路路基、轨道、站台等铁路及市政设施的运营安全，控制建(构)筑物的沉降，保障盾构区间的顺利穿越。应最大限度的控制隧道掘进各阶段引起的位移传到地表，因此，在枢纽高速车场(站台 3~站台 7)咽喉区范围内，地铁右线盾构区间隧道与枢纽车场路基面之间设置“板凳结构” [8]，即在地铁区间两侧设置隔离围护桩，隔离围护桩上设置板梁型盖板结构，将地铁右线盾构区间隧道与铁路路基隔离开(如图 6 所示)。同时为了减小盾构掘进过程中周边岩土体位移的向上传递，将“板凳结构”桩基础延伸至盾构隧道以下的持力层。

由于隧道左线上方有存在整体刚度较大的排水涵，且排水涵一侧为车场路基段、另一侧为预加固采取的“板凳结构”。为避免盾构掘进在地表结构物刚度突变处引起的差异沉降，减小掘进过程中隧道两侧的岩土体位移的向上传递。在左线盾构区间隧道左侧，排水涵边与枢纽路基面之间设置一排隔离桩，桩顶设置冠梁，将地铁盾构区间隧道与枢纽路基进行隔离，以此来达到控制沉降的作用。具体高速车场加固方案横断面如图 7 所示。

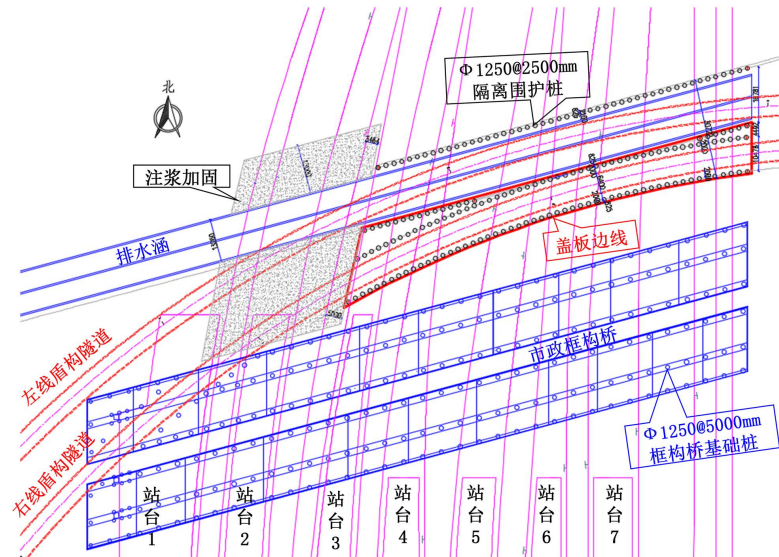


Figure 6. Diagram of reinforcement scheme for crossing project
图 6. 穿越工程加固方案平面图

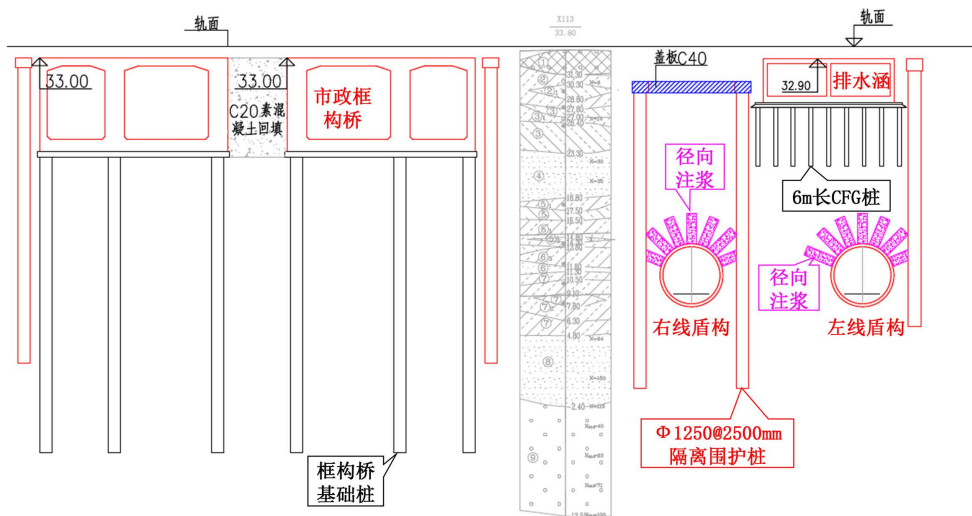


Figure 7. Cross-section of reinforcement scheme of high-speed railway junction yard
图 7. 高速车场加固方案横断面

结合相关工程经验，对于枢纽西侧已先期运营的3股普速轨道，地铁施工之前，对轨道下部进行地面深孔注浆+扣轨加固措施，注浆区域东侧与“板凳结构”加固区域邻接。此外，区间在管片拼装后均增加洞内径向深孔注浆加固措施。

4. 安全影响分析

4.1. 模型概况

本次以模拟盾构隧道立交穿越铁路枢纽车场咽喉区及市政桥涵为研究对象，根据已有的地质钻孔资料确定地层分界线，地层自上而下依次为杂填土、粉土、粉质粘土、细砂粉砂、粉质粘土、细砂和卵石等。运用MIDAS/GTS建立三维模型，为减小边界约束对计算结果的影响，模型各方向取值范围应不小于3~5倍结构影响范围，地铁区间下穿枢纽车场模型尺寸为235 m × 180 m × 50 m (X × Y × Z)，整体计算

模型如图 8(a)所示。其中,盾构隧道与市政框构桥、排水涵及铁路线路的相对位置关系如图 8(b)所示。

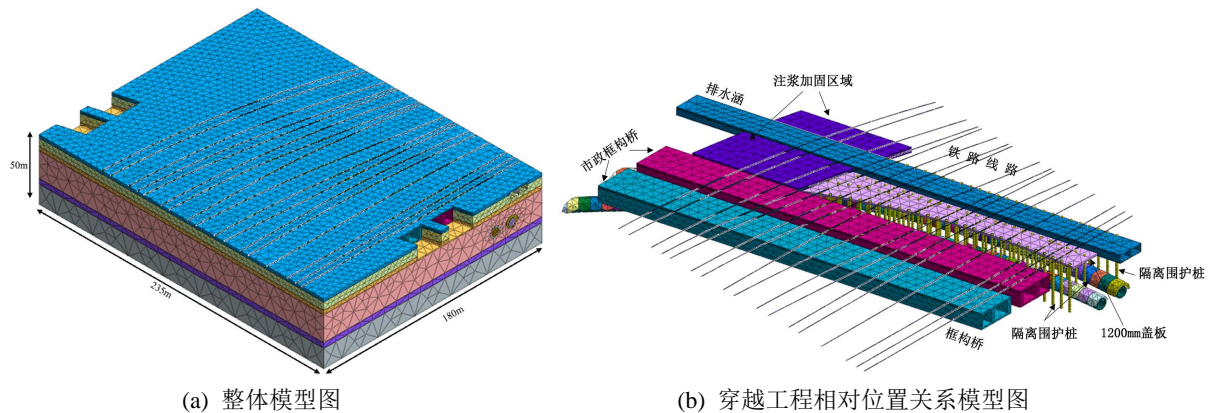


Figure 8. Three-dimensional model of numerical simulation
图 8. 三维计算模型

4.2. 本构关系及边界设定

地层采用修正摩尔-库伦本构模型,框构桥、排水涵及盖板结构采用线弹性本构模型。岩土体及框构桥采用实体单元,排水涵和盾构隧道管片采用板单元,桩采用植入式桁架单元模拟,铁路线路采用梁单元简化模拟。“板凳结构”中盖板采用实体单元,隔离围护桩采用植入式桁架单元,注浆加固区采用实体单元模拟。

在整体计算模型中,模型的顶面为自由边界,底面为竖向约束,四周为法向约束,计算过程中考虑列车荷载的影响。

4.3. 参数选取

考虑到管片接缝处强度的影响,对管片的整体刚度进行折减,折减系数定为 0.75,岩土及结构物理力学参数分别如表 1 和表 2。

Table 1. Mechanical parameters of surrounding rock
表 1. 岩土体物理力学参数表

地层	重度(kN/m ³)	粘聚力(kPa)	内摩擦角(°)	压缩模量(MPa)
1) 杂填土	17.5	0	10	-
2) 粉土	20.1	22	29	11.4
3) 粉质黏土	19.4	31	10.4	6.5
4) 细砂粉砂	20.0	0	30	33
5) 粉质黏土	20.1	44	10.1	9.3
6) 细砂	20.5	0	32	45
7) 粉质黏土	19.5	34	15.4	12
8) 细砂	20.5	0	33	60
9) 卵石	22	0	40	110

Table 2. Mechanical parameters of structure**表 2.** 结构参数表

结构名称	弹性模量 E (MPa)	泊松比 μ	容重 γ (KN/m ³)
框构桥	32500	0.2	25
排水涵	32500	0.2	25
盾构管片(C50)	34500×0.75	0.2	26
铁路线路	206000	0.25	78.5
注浆加固体	800	0.22	21

注：0.75 为盾构管片考虑环缝及纵缝影响下的刚度折减系数。

4.4. 计算假定

为便于分析，简化计算，略去次要因素影响，在计算模型中做如下假定：

- 1) 各种材料均为各向同性材料。
- 2) 土体进行弹塑性计算，混凝土结构进行弹性计算。
- 3) 初始地应力的计算只考虑初始自重应力，未考虑构造应力。
- 4) 隧道开挖后土体应力瞬间释放。
- 5) 只考虑施工过程中空间位移与力的变化，不考虑时间效应。

4.5. 模拟工况设置

结合地铁实际工程筹划及高铁枢纽运营条件，分别对有、无加固措施的施工工况进行模拟，加固措施包含“板凳结构”、地面隔离注浆等预加固措施。对于无加固工况，在初始地应力平衡后，按照盾构隧道左线自东向西方向逐环开挖进行模拟，随后逐环施作管片；左线盾构施工模拟完成后，按类似方式重复模拟右线开挖，直至右线隧道贯通。对于加固工况，需在初始地应力平衡后增设加固措施，待含加固措施的初始模型计算收敛后，参照无加固工况模拟各施工步骤。

4.6. 结果分析

根据对有、无加固措施施工工况的模拟计算结果，采用理论分析与数值模拟相结合的手段，对模拟结果进行对比分析，考虑到影响铁路枢纽及市政设施运营安全的控制性因素主要为轨道位移、框构桥沉降和排水涵沉降，因此，本文重点对这三项指标进行分析。

4.6.1. 轨道影响分析

根据模拟计算结果，在未加固工况下，隧道左、右线施工完成后，区间上方轨道最大竖向位移为 6.69 mm (高低) (竖向位移曲线如图 9(a)所示)，轨道水平最大位移为 1.51 mm (轨向)。根据轨道几何不平顺管理值要求[9]，轨道高低和轨向限值为 4 mm，说明不采取加固措施时轨道高低不满足规则要求，其他指标满足要求。其中，竖向位移最大发生在铁路线路东侧高速轨道的左、右线隧道之间，说明在未采取加固措施时，两隧道引起的竖向位移在此叠加，导致该位置轨道的竖向位移明显增大。

而在加固工况下，左、右线都穿越后，区间上方轨道最大竖向位移为 3.18 mm (高低)，轨道水平最大位移为 0.45 mm (轨向)。根据轨道高低和轨向 4 mm 的管理限值要求，采取加固措施后轨道不平顺指标满足管理值要求。说明通过采取“板凳结构”、地面隔离注浆等预加固措施可明显控制轨道的变形，证实该加固措施是有效的。而且加固后位移最大位置发生在西侧普速轨道的左线隧道上方，考虑到该位置

采取的是地面隔离注浆的加固措施,说明地面隔离加固措施的加固效果弱于“板凳结构”,因此,在铁路建设前期预留设置“板凳结构”是非常必要的,该方案可为规划条件具备的工程项目提供参考。

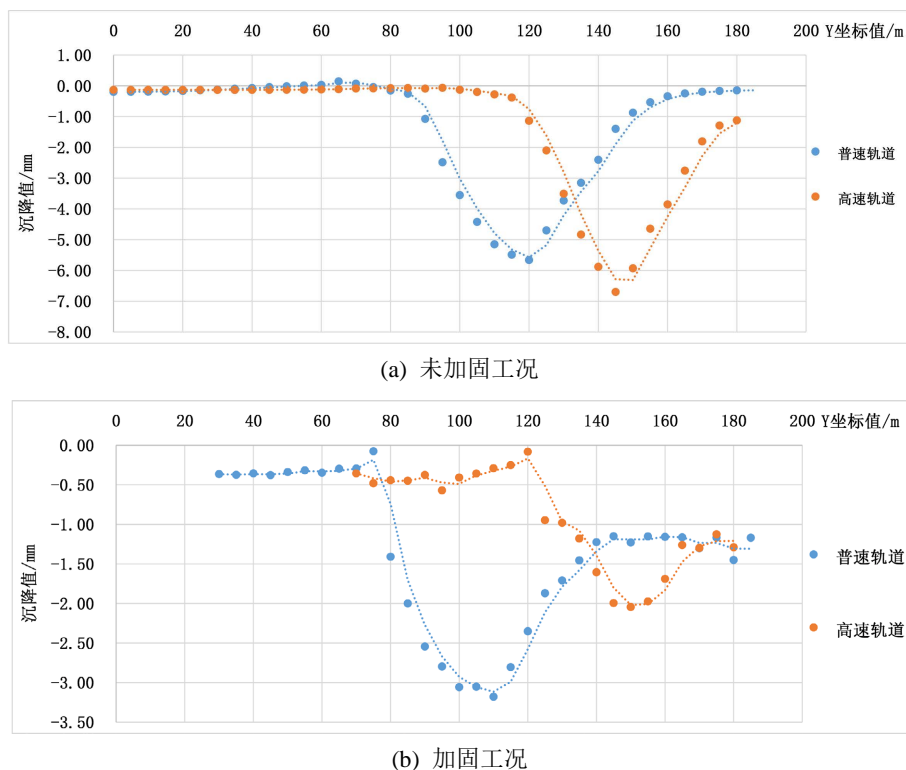


Figure 9. Vertical displacement curve after tunnel construction
图 9. 盾构穿越后轨道竖向位移曲线图

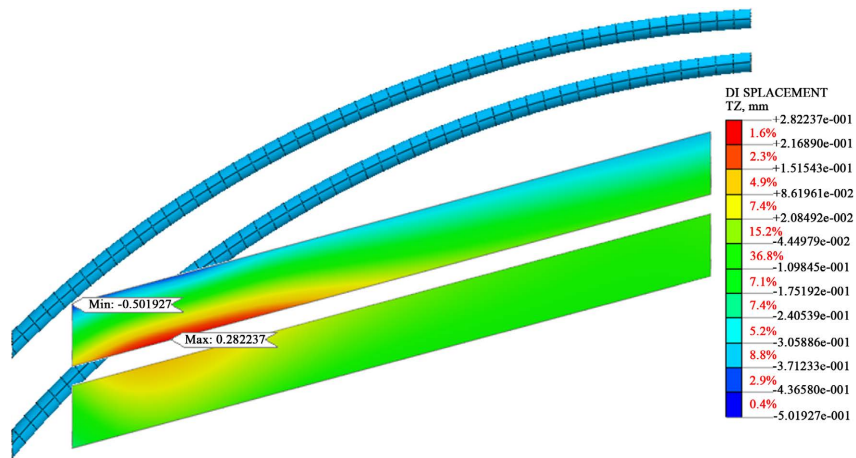
4.6.2. 框构桥影响分析

在不采取预加固措施条件下,隧道左、右线开挖后,在附加应力作用(偏向卸载)下,结构变形整体呈现单侧沉降的趋势,框构桥的最大竖向位移约为 -0.50 mm,竖向位移云图如图 10(a)所示。最大竖向位移发生在框构桥西北角,处于两区间上方。由于框构结构整体刚度较大,框构桥出现倾斜,在框构桥的另一侧上抬约 0.28 mm,说明在未采取加固措施时,盾构引起的地表沉降对框构桥有明显影响。而在采取预加固措施条件下,隧道开挖后,框构桥的最大竖向位移约为 -0.29 mm,位于右线区间正上方,两线穿越后框构桥的竖向位移云图如图 10(b)所示,结构沉降小于规范规定的工后沉降 10 mm 的限值要求 [10] [11]。但在采取加固措施后,框构桥的竖向位移减小了约 42.0% ,且整体倾斜程度明显降低,说明采取预加固措施后对沉降控制的效果较为明显。

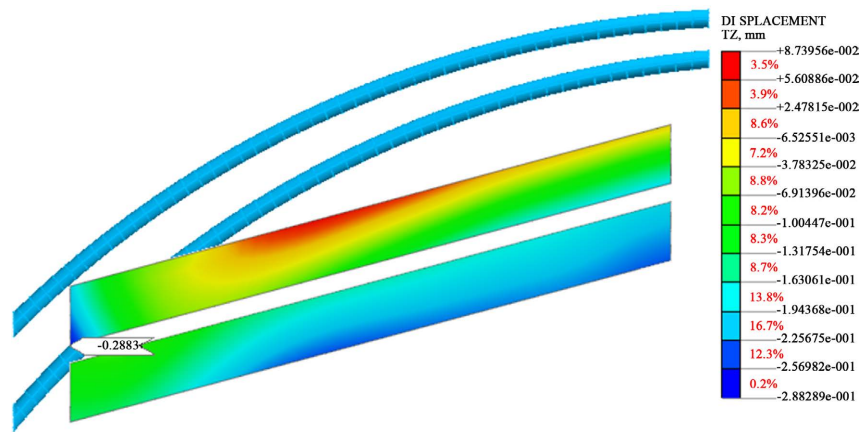
4.6.3. 排水涵影响分析

在不采取预加固措施条件下,隧道左、右线开挖后,排水涵结构位移整体呈现下降趋势,左线上方邻近右线的外缘处沉降整体较大,排水涵的最大竖向位移约为 -6.81 mm,区间穿越后排水涵的竖向位移云图如图 11(a)所示。由于排水涵处于左线隧道正上方,这也同样说明双线开挖相较于单线开挖引起的竖向位移会有明显叠加效应,导致沿两线中间位置竖向位移整体较大。而在采取预加固措施条件下,左、右线隧道都穿越后,地面隔离注浆加固区域区间上方沉降值最大,排水涵的最大竖向位移约为 -2.88 mm,两线穿越后排水涵的竖向位移云图如图 11(b)所示,结构沉降小于规范规定的工后沉降 10 mm 的限值要

求[10] [11], 且采取预加固措施后, 排水涵的沉降量减小了约 57.7%, 说明通过采取预加固措施可明显降低排水涵的变形, 预加固措施效果显著。

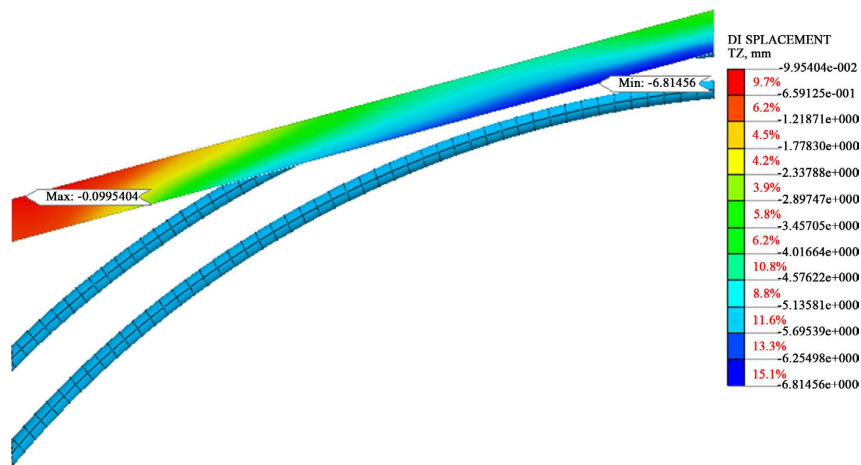


(a) 未加固工况

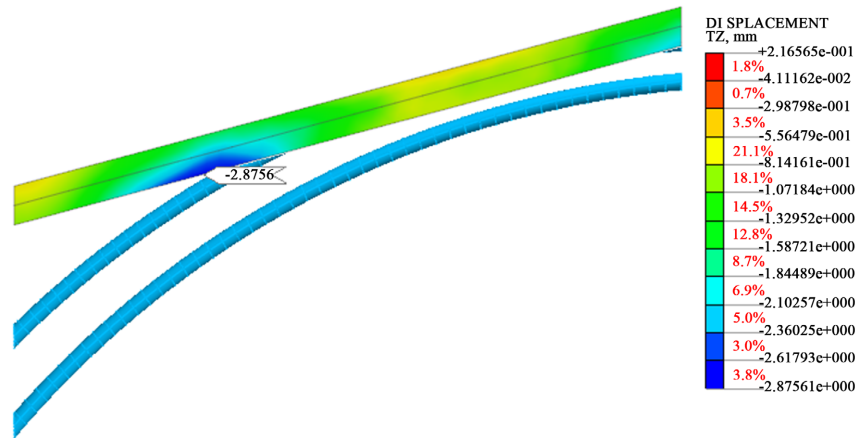


(b) 加固工况

Figure 10. Vertical displacement cloud image of municipal frame structure after tunnel construction
图 10. 盾构穿越后框构桥竖向位移云图



(a) 未加固工况



(b) 加固工况

Figure 11. Vertical displacement cloud image of municipal drainage frame after tunnel construction**图 11.** 盾构穿越后排水涵竖向位移云图

5. 结论

根据对地铁区间下穿铁路枢纽车场方案及安全性进行评估, 考虑铁路线路及相关结构物的安全控制标准, 结合铁路路外工程管理的要求, 通过分析, 主要得出以下结论:

1) 左、右线都穿越后, 未加固工况区间上方轨道最大竖向位移为 6.69 mm (高低), 轨道水平最大位移为 1.51 mm (轨向), 轨道高低不满足 4 mm 的规则要求; 采取预加固措施后, 区间上方轨道最大竖向位移减小为 3.18 mm (高低), 轨道水平最大位移减小为 0.45 mm (轨向), 轨道高低、轨向等轨道不平顺指标均满足管理值要求。

2) 盾构区间下穿市政框构桥、排水涵的施工过程会对铁路既有桥涵结构产生一定的附加影响, 通过模拟分析可知, 施工阶段引起的框架桥(涵)沉降值均满足规范规定的沉降量限值要求, 但在采取加固措施后, 桥涵的变形数值明显减小, 最大沉降量减小约 57.7%。

3) 通过采取板凳结构和地面隔离注浆等预加固措施, 盾构施工过程引起的轨道位移、框构桥(涵)沉降均满足安全控制标准要求, 且影响较无加固工况明显减小。因此, 可认为本穿越工程的加固措施是必要且有效的。目前本工程已顺利实施完成, 该方案可为后续类似工程提供参考。

参考文献

- [1] 周晓勤. 城市轨道交通高质量发展的创新之路[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(9): 2, 188.
- [2] 施仲衡. 自主创新, 实现城市轨道交通高质量发展[J]. 都市快轨交通, 2020, 33(1): 1-3, 21.
- [3] 仇文革, 万世付, 高刚刚, 等. 砂卵石地层盾构隧道下穿铁路咽喉区地表沉降控制研究[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(5): 38-45.
- [4] 陈利民. 软土地层地铁盾构下穿车站咽喉区施工技术[J]. 铁道建筑, 2020, 60(1): 62-65, 88.
- [5] 肖广良. 盾构在软土地层穿越既有铁路施工技术[J]. 隧道建设, 2008, 28(3): 324-329.
- [6] 刘志涛, 王立川, 蒋奎松, 等. 基于露空长度优化的盾构隧道下穿合肥火车站施工沉降控制探讨[J]. 隧道建设, 2021, z2: 565-573.
- [7] 翁木生. 地铁车站下穿既有铁路站场咽喉区的施工方案及防护措施[J]. 城市轨道交通研究, 2020(5): 123-127.
- [8] 同济大学, 中国铁路经济规划研究院. TB 10182-2017 公路与市政工程下穿高速铁路技术规程[S]. 北京: 国家铁路局, 2018.

- [9] 中华人民共和国铁道部. 铁运[2013] 29 号高速铁路有砟轨道线路维修规则(试行) [S]. 2013.
- [10] 中国铁路设计集团有限公司. TB 10093-2017 铁路桥涵地基和基础设计规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.
- [11] 中铁第一勘察设计院集团有限公司. TB10001-2016 铁路路基设计规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.