

doi:10.3969/j.issn.1672-6073.2013.06.017

盾构下穿城际客运专线引起变形的数值分析

徐会杰¹ 彭 华¹ 徐希磊¹ 刘寒迁²

(1. 北京交通大学土木建筑工程学院 北京 100044; 2. 北京京投轨道交通资产经营管理有限公司 北京 100101)

摘 要 天津市地铁3号线解放桥站——天津站站盾构区间穿越京津城际客运专线,为我国首例已实施的盾构穿越高速铁路路基段工程,通过使用 ANSYS 软件,建立地层—结构三维实体模型,模拟盾构穿越客运专线的过程,分析盾构穿越期间轨道沉降及横移变形规律,将数值分析与实际测试结果进行对比分析,表明在无轨道加固、车辆限速措施的条件下,采用严格控制施工参数的措施可以保证高速铁路的正常运营。

关键词 轨道交通;客运专线;盾构;轨道;沉降;数值模拟

中图分类号 U455.43 **文献标志码** A

文章编号 1672-6073(2013)06-0068-05

铁路天津站包含有 18 股铁路股道,自北向南依次为京津城际车场,4 台 7 线;津秦高速车场,3 台 6 线;普速车场,3 台 5 线。京津城际客运专线是我国第一条全线采用无砟轨道的线路,设计时速为 350 km(见图 1)。为保证列车能安全高速地运行,除了采取高标准施工外,对路基的沉降控制也非常严格,要求在设计、施工和管理中,以“工后零沉降”为目标。天津站京津城际车场作为客运专线线路,其对沉降的要求极为严格。盾构下穿施工作为一项不确定因素综合作用的工程,在施工过程中将会引起线路变形,从而会加剧轨道不平顺,导致轮轨作用力加大,如变形过大则会对运营安全产生严重影响。为了保证高速列车的运营安全,要求轨道路基的日变形速率控制在 2 mm 之内。

天津市地铁 3 号线解放桥站—天津站站区间(以下简称“解一天区间”)在穿越京津客运专线时,鉴于轨道结构特点和运营组织的要求,在不采取轨道加固及车辆限速措施的前提下下穿,为确保线路安全可靠,此时在施工过程中采取的诸如注浆加固、控制盾构推进时施工参数的措施等成为了确保安全的关键。

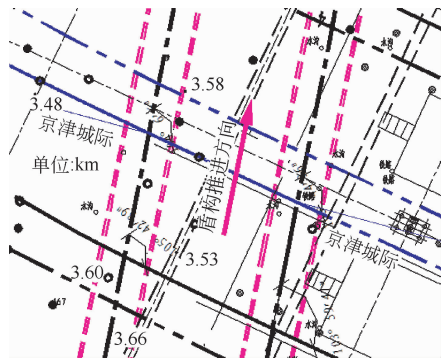


图 1 京津城际专线平面位置

1 工程概况

1.1 解一天区间工程概况

天津地铁 3 号线解一天区间在里程 DK14+378~DK14+413 范围以半径 $r=1\,500\text{ m}$ 下穿京津城际客运专线,车场所处的软土地基施工时采用 CFG 桩(水泥粉煤灰碎石桩)加固,桩径 0.4 m,桩间距 1.5 m,桩长 8.5~10 m。使用两台土压平衡盾构机,盾构管片外径 6.20 m,厚度 0.35 m,区间线间距由 13.0 m 逐渐调整加宽至 19.0 m,隧道底板埋深 28.4~35.1 m,顶板埋深 22.0~28.7 m,隧道轴线与线路交角约为 100° 。

1.2 工程地质概况

隧道上部地层为杂填土、粉质黏土、粉土、淤泥质粉质黏土。隧道范围内地层为粉质黏土、粉砂,隧道底部为粉质黏土。

本场地内表层地下水类型为第四系孔隙潜水。赋存与第Ⅱ陆相层以下粉砂及粉砂土中的地下水具有微

收稿日期: 2013-03-18 修回日期: 2013-04-22

作者简介: 徐会杰,男,博士生,主要从事地铁项目管理研究, tinnelxhj@sina.com

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51108025);中央高校基本科研业务费专项资金资助(2012JBZ011)

承压水性,为微承压水。

2 数值模拟预测

2.1 模型概述

根据既有客运专线与新建地铁区间相对位置关系及地铁区间施工范围,计算模型总体尺寸为 150 m × 135 m × 80 m。模型顶面($Y=0$)为自由边界,其他 5 个面均取法向约束。计算采用三维有限元数值模拟方法^[1],土体、注浆层、管片和客运专线路基采用 Solid 45 模拟。计算模型如图 2 所示。

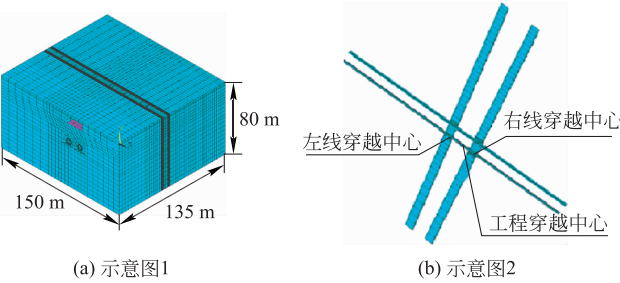


图 2 计算模型

2.2 计算假定

- 1) 土体采用弹塑性理论计算,为 M-C 模型,地表面和各土层均呈匀质水平层状分布;路基、注浆层及管片为理想线弹性材料。
- 2) 初始地应力在模型计算时只考虑土体自重应力,忽略岩土体构造应力,使岩土体在自重作用下土体达到平衡,而后再进行盾构施工的开挖。
- 3) 考虑 CFG 桩对基床土体的加固作用,取桩长为 9 m。
- 4) 假定既有铁路的路基及轨道结构变形一致。

2.3 计算参数

根据地勘资料,将土层分为 6 层,各参数选取如表 1 所示。

表 1 模型材料参数

| 材料 | 弹性模量/ MPa | 泊松比 | 容重/ (kN/m ³) | 厚度/m |
|-------|--------------------|------|-----------------------------|------|
| 土层 1 | 15 | 0.3 | 1 840 | 4 |
| 土层 2 | 30 | 0.23 | 1 900 | 16 |
| 土层 3 | 45 | 0.24 | 2 040 | 13 |
| 土层 4 | 30 | 0.30 | 1 980 | 3 |
| 土层 5 | 30 | 0.23 | 2 040 | 5 |
| 土层 6 | 38 | 0.23 | 2 050 | 36 |
| 路基 | 200 | 0.25 | 2 100 | 3 |
| 注浆材料 | 250 | 0.21 | 2 100 | 0.3 |
| CFG 桩 | 1.20×10^4 | 0.15 | — | — |
| 管片 | 3.45×10^4 | 0.2 | 2 500 | 0.35 |

模型中除考虑结构自重外,还考虑地面列车活载。针对京津城际客运专线,列车活载采用客运专线动车组特种活载模型(见图 3)^[2]。考虑安全因素,计算时地面压力取 55 kPa。

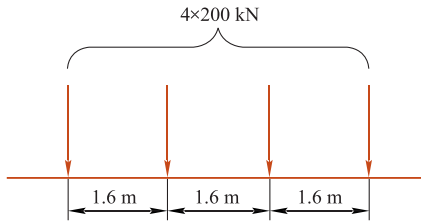


图 3 列车荷载(特种荷载模式)

2.4 施工过程模拟

为真实模拟盾构开挖施工,根据实际的施工情况,先开挖地铁右线,后开挖左线。每一步开挖分为两个计算步,第一步:杀死开挖土体单元(包括核心土、管片层、注浆层),在开挖面上施加法向力,模拟盾构机的推进,同时施加注浆压力;第二步:考虑到盾构注浆及二次注浆的影响,改变相应单元及管片参数。

3 盾构施工沉降理论分析

3.1 计算结果及分析

盾构施工改变了原有地层的初始平衡条件,造成土体移动以及应力重分布而达到另一个新的平衡^[3]。观察变形云图,右线隧道施工完成后,地表最大沉降约为 1.07 mm,左、右线隧道施工完成后地表最大沉降为 1.72 mm(见图 4)。

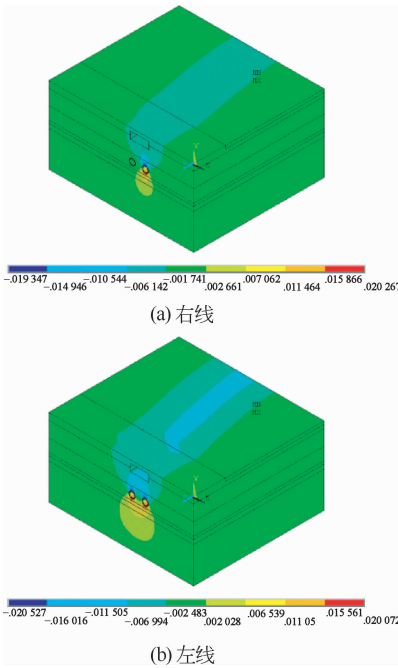


图 4 隧道施工完成后地表沉降

为研究盾构施工对轨道的影响,特沿路基纵向选取一条测线,分析盾构施工对轨道行车的安全性影响。选取盾构隧道左线中点、右线中点、工程穿越中点这 3 个点,分析其随盾构开挖产生的沉降变化趋势。

3.1.1 轨道横向沉降

选取具有代表性的工程穿越中心测点的数据,观察其沉降槽曲线。随着盾构隧道的施工,沉降槽宽度

逐渐加大,沉降槽中心逐渐从右线穿越中心向工程穿越中心偏移,并最终在工程穿越中心出现最大沉降(见图5)。

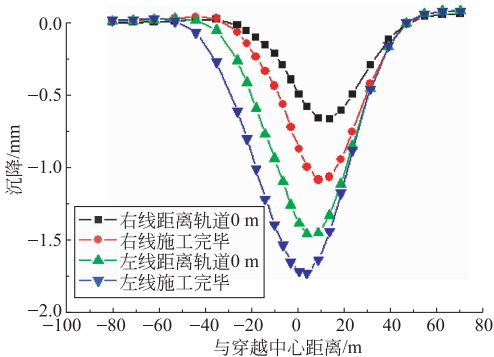


图5 轨道横向沉降

3.1.2 轨道沉降时程曲线

为了解轨道上某一点随盾构施工过程的变化情况,提取3个测点的时程曲线,由图6可知,右线隧道施工完成后轨道最大沉降为1.07 mm,左线隧道施工完成后轨道最大沉降为1.72 mm。

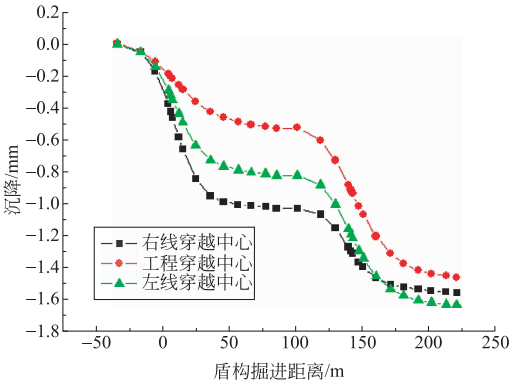


图6 轨道沉降时程曲线

当盾构隧道开挖面距离轨道15 m时,轨道沉降为0.18 mm,占总沉降量的10.5%;当盾构隧道开挖面过轨道25 m时,轨道沉降为1.03 mm,占总沉降量的60.0%。由此可以看出,盾构隧道在距离轨道15 m至过轨道25 m的范围内,轨道沉降变形明显,速率较快。开挖完成后土体应力重分布,固结、次固结逐渐完成,沉降趋于平稳。

3.2 横向变形

轨道横向变形大小关系到轨道几何形位的好坏。随着右线盾构隧道开挖面逐渐靠近轨道,轨道横向变形偏向开挖一侧,在与轨道距离为零时,最大变形值为0.184 mm;随着盾构开挖面逐渐远离轨道,轨道最大横向变形逐渐向另一侧偏离,最大值变小,右线隧道施工完毕后轨道呈S形扭曲^[4]。在左线掘进再次逐步靠近轨道时,轨道呈M形扭曲,最大变形值为0.152 mm;穿越

施工完成后再次呈现S形扭曲,最终的变形最大值为0.234 mm,钢轨横移较小,对行车影响较小,如图7所示。

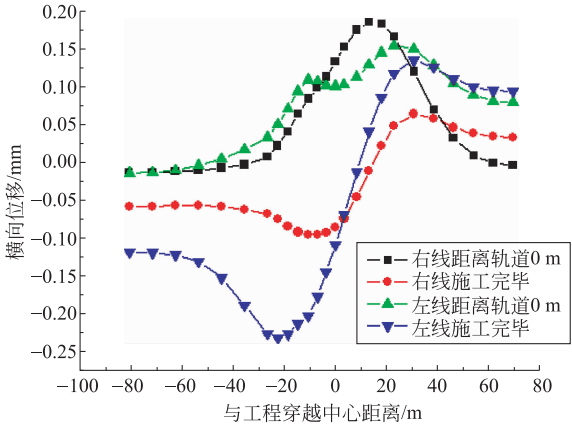


图7 轨道横向位移曲线

3.3 数值分析结果

1) 经数值计算得到,盾构穿越股道施工期间的轨道变形主要为沉降变形,最大沉降为1.72 mm,小于沉降控制值。

2) 在模拟过程中,沉降主要由右线引起,说明右线的先期注浆加固保证了左线隧道的施工;经数值计算得到右线沉降占总沉降量的62.2%。

3) 数值模拟计算结果与实际监测数据基本吻合,验证了模型的正确性和可靠性。数值分析结果表明,若控制好各项盾构参数,采取主动防护措施,加强监测,铁路相关部门做好巡视工作,及时调整轨道几何形位,在不采取任何轨道加固措施的情况下,能够保证既有轨道的行车安全。

4 监测结果对比分析

站场内路基监测全部为自动化监测,采用静力水准和智能型电子全站仪自动实时监测系统。轨道采用人工监测的方法,监测频率如表2所示。盾构通过后,应持续观测3个月(测点沉降变化量连续3周不超过1 mm/周即可停止监测工作)。

表2 监测频率

| 盾构机距试验段地表距离/m | | 监测频率/(次/d) |
|-------------------|------------------|------------|
| 穿越前盾构头部距铁路 | $30 < L \leq 50$ | 1~2 |
| | $10 < L \leq 30$ | 2~4 |
| | $L \leq 10$ | 2~4 |
| 穿越后盾构尾部距铁路 | $L \leq 10$ | 2~4 |
| | $10 < L \leq 30$ | 1~2 |
| | $30 < L \leq 50$ | 1~2 |
| $50 < L$, 监测数据稳定 | | 1次/(1~2)d |

选取模拟分析点处轨道监测数据,并对监测数据进行分析处理,得到轨道沉降监测曲线(见图8)。

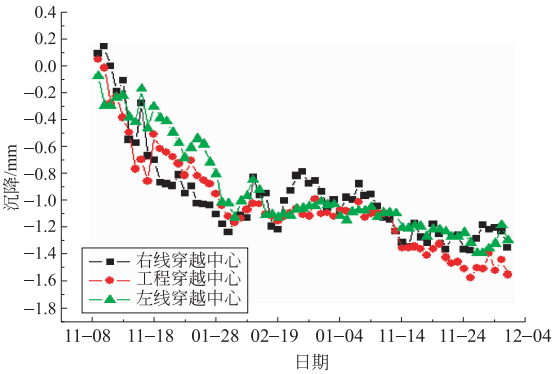
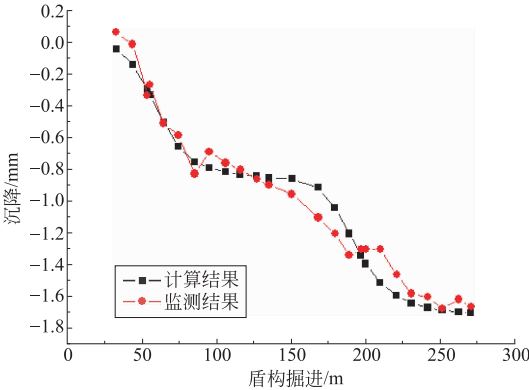
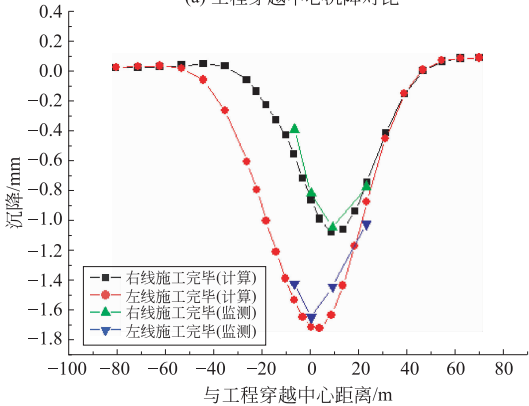


图8 监测点时程曲线

由图8可知,随着右线盾构隧道逐渐靠近既有轨道,轨道沉降逐渐变大,沉降速率变快,右线盾构隧道通过轨道10 d后,沉降趋于平稳;在左线施工期间,沉降进一步增大,直至穿越后沉降平稳。监测数据出现的偶尔较大波动与二次注浆有关,轨道最大沉降约为1.64 mm(见图9)。



(a) 工程穿越中心沉降对比



(b) 沉降对比

图9 沉降对比曲线

对比计算结果与监测数据,可以发现:

1) 在右线隧道施工完成后,轨道最大沉降在1.04 mm左右波动,与计算结果1.07 mm较为吻合;最终的轨道最

大沉降在1.64 mm左右,与计算结果1.72 mm较为吻合。

2) 在工程施工期间,根据监测信息,及时对脱出盾尾的部分进行二次注浆,有效地控制了沉降。

3) CFG桩复合地基在京津城际车场的应用,有效抑制了软土地基的变形,且高速列车的轴重远比普速列车的轴重轻,因此在施工过程中,高速车场的沉降变形较普速车场5.76 mm的沉降监测值小很多。

4) 据监测数据得出,盾构右线施工完毕后的沉降量占总沉降量的63.3%,对应的理论计算结果为62.2%,在实际施工过程中,右线施工导致轨道结构的沉降量大于左线施工导致的沉降量。

5 沉降控制的技术措施

天津市地铁3号线解—天区间下穿京津城际客运专线施工,有效地控制了地表沉降,满足了高速铁路对沉降控制的要求。在施工过程中采取的主要沉降控制技术措施如下。

5.1 合理选取试验段

在穿越高速铁路施工之前,合理选取试验段,通过先期盾构下穿普速铁路车场施工,积累经验,为盾构后期穿越高速铁路施工提供了完整的技术依据。

为了达到试验效果,将试验段细分为三个阶段:第一阶段(约28环),摸索土仓压力、刀盘转速、出土量、掘进速度、千斤顶推力、刀盘扭矩、注浆量和注浆压力等参数;第二阶段(约40环),模拟盾构下穿铁路,假定刀盘开始进入铁路范围内,通过径向注浆和二次注浆控制日单次沉降、前期累计沉降、盾构机正上方沉降、盾构机后部沉降不超限;第三阶段(10环),进行功能性试验,对刀盘伸缩功能、保压系统进行试验。

5.2 沉降控制要点

在施工过程中,依据沉降类型的不同,采取膨润土径向注入、同步注浆、二次注浆等措施有效控制沉降^[5],具体要点如表3所示。

表3 沉降控制要点

| 沉降类型 | 主要原因 | 控制要点 |
|------------|----------------------|----------|
| 先期沉降 | 地下水位降低 | 建立土压平衡模式 |
| 盾构开挖面沉降或隆起 | 工作面处施加压力:过大隆起,过小沉降 | |
| 盾构通过时的沉降 | 施工扰动,盾构与围岩(土体)间剪切错动 | 径向注入膨润土 |
| 盾尾空隙引起的沉降 | 围岩(土体)失去支撑,管片背后注浆不及时 | 加强同步注浆 |
| 后续沉降 | 结构变形、地层扰动、空隙水压下降等 | 二次注浆 |

1) 为了保证在盾构通过期间铁路的稳定,利用径向注浆孔,借助盾构机内膨润土保压系统,采用优质膨润土填补盾构机掘进时刀盘与盾体之间产生的间隙,减少土体的沉降。

2) 考虑到盾尾空隙引起的沉降,需要提高注浆填充率,每环注浆量为 $5.7 \sim 6 \text{ m}^3$,同时适当提高同步注浆压力,但不宜超过 0.45 MPa 。

3) 结合监测沉降情况,在管片脱出盾尾 $5 \sim 10$ 环后进行二次注浆,注浆压力控制在 0.6 MPa 内,以避免后续的沉降。

5.3 掘进模式的选择

根据实地的工程地质条件,采用土压平衡模式进行隧道掘进,在盾构掘进过程中匀速、连续、均衡施工,始终保证土仓压力与作业面水土压力、开挖土量与排土量的动态平衡,以保持正面土体稳定。

在盾构施工过程中一旦有超挖现象,必须对该区段进行处理,包括二次补浆、地面注浆加固等措施。

5.4 采用合理的掘进参数

1) 针对实地的工程地质情况,合理选取左、右线盾构施工的掘进参数(见表4),减少对土体的扰动,保证盾构掘进的连续性,使盾构机掘进姿态与管片姿态基本相符,并使地面沉降稳定^[6-9]。

表4 左、右线盾构施工的掘进参数

| 地质描述 | 粉质黏土、粉土 | 粉质黏土、粉土、细砂 | 粉质黏土、粉土 | 粉质黏土 |
|---------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 土压/MPa | 0.26~0.28 | 0.22~0.23 | 0.24~0.25 | 0.06~0.24 |
| 扭矩/kN·m | 2 000~2 300 | 2 700~3 400 | 2 500~1 700 | 1 800~1 700 |
| 推力/t | 1 700~2 200 | 1 900~2 900 | 2 000~1 700 | 1 700~1 100 |
| 速度/(mm/min) | 25~35 | 10~20 | 30~35 | 5~20 |
| 出土/m ³ | 38~40 | 38~40 | 38~40 | 38~40 |
| 同步注浆/m ³ | 5.7~6 | 5.7~6 | 5.7~6 | 5.7~6 |
| 注浆压力/MPa | 0.3~0.45 | 0.3~0.45 | 0.3~0.45 | 0.3~0.45 |

2) 严格控制出土量,禁止盾构机做过大的纠偏动作,单环轴线纠偏幅度控制在 $\pm 5 \text{ mm}$ 之内。

3) 采用优质泡沫进行渣土改良,使渣土具有良好的土压平衡效果,利于稳定开挖面,控制地表沉降。

4) 同步注浆时必须要做到“掘进、注浆同步,不注浆、不掘进”,在同步注浆压力和注浆量方面进行双控,做到适时、足量,并保证适时的二次及多次补充注浆。

6 结论

天津市地铁3号线解一天区间下穿京津城际客运专线施工,通过严格控制施工参数,加强同步注浆、二次及多次补浆等措施,有效地将既有高速铁路轨道的沉降值控制在变形范围内,在不采取轨道加固、车辆限速措施条件下,保证了高速列车的运营安全,为盾构下穿高速铁路施工的变形控制积累了丰富、宝贵的成功经验,可为相关工程提供借鉴。

参考文献

[1] 李兆平,马天文.地铁南京站下穿南京铁路站场施工过程的三维数值模拟及工程应用[J].北京交通大学学报,2007,31(1):55-59.

[2] 辛学忠,张玉玲,戴福忠,等.铁路列车活载图式[J].中国铁道科学,2006,27(2):31-36.

[3] 施仲衡,张弥.地下铁道设计与施工[M].西安:陕西科学技术出版社,1997.

[4] 肖立,张庆贺.盾构长距离下穿铁路股道引起的地表沉降分析[J].上海交通大学学报,2011,45(5):672-676.

[5] 王彦臻,黄达,李峰.城市地铁穿越既有线路的变形控制技术及其效果[J].都市轨道交通,2009,22(6):46-49.

[6] 李凤远.盾构选型和关键参数选择探讨[J].建筑机械化,2008,29(8):40-43.

[7] 吴逢春.地铁盾构施工对周边结构影响的时间相关性研究[D].南京:东京大学,2006.

[8] 华科.地铁盾构施工对邻近结构物的影响预测与控制方法[D].成都:西南交通大学,2008.

[9] 雷升祥,张守同.隧道施工中的风险预测与安全技术[J].铁道建筑技术,2004(4):15-19.

(编辑:郝京红)

Numerical Analysis of Ground Deformations Caused by Shield Tunneling Under - crossing Beijing - Tianjin Intercity Passenger Dedicated Railway

Xu Huijie¹ Peng Hua¹ Xu Xilei¹ Liu Hanqian²

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044;
2. Beijing Jingtong Rail Transit Assets Operation & Management Co.,Ltd.,Beijing 100101)

Abstract: Shield tunneling between Jiefangqiao station and Tianjin subway station of Tianjin subway Line 3 under - crossed a high - speed railway. Finite element software ANSYS was used to build the three - dimensional model of soil and structure to simulate the construction process of this project and then to analyse the regularity of track settlements and lateral deformations during construction. The results of numerical simulation were compared with the in - situ measured data which demonstrated that without track reinforcement measures and train deceleration measures, strict control of construction parameters could ensure the safe operation of the railway.

Key words: urban rail transit; passenger - dedicated railway line; shield; track; settlement; numerical simulation