

# 顶管下穿运营铁路数值模拟与沉降控制分析

戴世颖

(轨道交通工程信息化国家重点实验室(铁一院)/陕西省铁道及地下交通工程重点实验室(铁一院), 陕西 西安 710043)

**摘要:** 本文以某中水回用管线穿越鱼儿沟—焉耆铁路线为例, 通过理论计算、三维有限元分析得出顶管施工产生的沉降变形, 并与现场实测数据进行对比分析。结果表明, 铁路路基轨道最大沉降值的理论计算值为 17.63 mm, 有限元模拟值为 9.09 mm, 实测数据值为 8.44 mm。通过对比分析可知, 三维有限元模拟所得到的最大沉降值和实测沉降值较为符合。本工程中制定的针对性、合理性监控量测方案及顶管施工沉降控制措施, 能够有效指导施工, 对相似工程项目的沉降控制具有积极的借鉴意义。

**关键词:** 顶管施工; 运营铁路; 三维模拟计算; 铁路监测; 沉降控制措施; 理论与实测分析

中图分类号: TU74

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2022)03-0241-07

## Numerical simulation and settlement control analysis of pipe jacking operation railway

DAI Shi-ying

(State Key Laboratory of Rail Transit Engineering Informatization (FSDI)/

Shaanxi Railway and Underground Traffic Engineering Key Laboratory (FSDI), Xi'an 710043, Shanxi, China)

**Abstract:** In this paper, taking a reclaimed water reuse pipeline crossing the Yuergou-Yanqi railway line as an example, the settlement deformation caused by the pipe jacking construction is obtained through theoretical calculation and three-dimensional finite element analysis, and the comparison and analysis are made with the field measured data. The results show that the theoretical calculation value of the maximum settlement value of the railway subgrade track is 17.63 mm, the finite element simulation value is 9.09 mm, and the measured data value is 8.44 mm. Through comparative analysis, it can be seen that the maximum settlement value obtained by 3D finite element simulation is in good agreement with the measured settlement value. The monitoring plan and the settlement control measures for pipe jacking construction formulated in this project can effectively guide the construction and have positive reference significance for settlement control of similar projects.

**Key words:** pipe jacking construction; operation of railways; three dimensional simulation calculation; railway monitoring; settlement control measures; theoretical and practical analysis

## 0 引言

顶管是地下通道、地下管线等非开挖施工的一种, 它的特点是将通道、管线敷设改明挖为暗挖, 该技术综合成本低、施工周期短、施工安全性好, 能够穿越公路、铁路、河川和地下结构物。

关于顶管下穿施工, 国内已开展了多项专题研究, 如: 泥水平衡顶管机在管道穿越河流中的应用、大口径给水管道穿越高速公路方案选择及顶管设计、顶管工程土与结构性状及理论研究、顶管施工

环境的有限元计算分析, 可以看出目前的研究多集中于顶管施工技术的应用及土体相互作用的方面, 关于顶管下穿营业铁路线方面的研究较少, 而关于铁路沉降分析与控制更是少见。

顶管施工时, 稍有不慎, 易导致影响范围内的铁路设施因地表沉降而发生故障。轨道的不均匀沉降, 将严重影响行车安全。

基于以上认识, 以某中水回用管线穿越鱼儿沟—焉耆铁路线为例, 以勘察报告为基础, 进行顶管设备选型, 沉降理论计算辅助三维有限元分析,

制定监控量测方案。通过数据分析,提出此工况下的沉降控制措施。

## 1 工程概况

### 1.1 中水回用管线穿越路线概况

工程新建一根中水回用管线穿越铁路线,采用1.75 m钢筋混凝土套管,覆土4.8 m,管壁厚度为17.5 cm,最大顶力4 915 kN。采用土压平衡顶管机施工,始发井位于线路右侧。

### 1.2 穿越处铁路线概况

工程顶管穿越铁路位于鱼儿沟—焉耆区间,为国铁II级、内燃、单线、p60钢轨、无缝线路,顶管穿越处为直线。路基高度约1.8 m,无既有路基护坡,套管与铁路正交设置,套管全长24 m。其平面及计算模型详见图1。

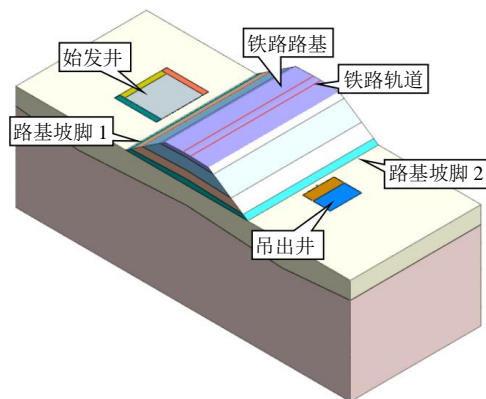


图1 项目平面及计算模型图

Fig. 1 Project plan and calculation model

### 1.3 工程地质条件

穿越范围岩性特征详述如下:人工填筑土( $Q_4^{m16}$ )分布在既有线路堤,厚度2~3 m,灰黄-灰色,主要由粉土和细(粗)圆砾土组成,土质结构不均,稍密-中密,稍湿,II级普通土;粗圆砾土( $Q_3^{p16}$ )地表普遍分布,为该工点的主体地层,钻孔未揭穿,厚度大于15 m,土黄色,浑圆状,颗粒不均,成分为砂岩、石英岩等,粒径2~20 mm的约占30%,20~60 mm的约占55%,大于60 mm的约占10%,局部颗粒较大,最大粒径约300 mm,余为杂粒砂及粉黏粒充填,稍湿-饱和,稍密-中密,三级硬土, $\sigma_0=400$  kPa,地下水水位埋深大于15 m。

## 2 顶管机刀盘参数

针对工程地层情况,需着重考虑刀盘的切削及

渣土改良,经过顶管机选型及刀盘适应性分析,刀盘的基本结构采用4个主梁+4个辅梁形式的面板式,安装焊接撕裂刀和切刀,可满足在粗圆粒地层中的快速切削,刀盘背部设计有主动搅拌棒,可对土仓内的渣土进行充分的搅拌,提高土仓内渣土的流动性,防止土仓内渣土堆积。刀盘大样详见图2所示。

刀盘面板上共设计有4个泡沫喷口,筒体中部设置1个泡沫喷口,共设5个渣土改良喷口,同时泡沫管路和膨润土管路可相互切换,保障粗圆粒地层内渣土的改良效果,刀盘参数见表1。



图2 顶管刀盘大样图

Fig. 2 Cutting head of pipe jacking

表1 刀盘参数表

Table 1 Parameters of cutting head

刀盘形式	辐条加面板式大开口刀盘	单位
刀盘规格	$\Phi 2120$	mm
旋转方向	双向	—
开口率	33	%
主要构件材料	Q355B	—
中心鱼尾刀数量	1	把
刮刀数量	56	把
撕裂刀/贝壳刀数量	8/4=12	把
撕裂刀/贝壳刀高度	120/100	mm

## 3 铁路沉降的理论估算和三维模拟分析

工程采用直径2.12 m的土压平衡顶管机,覆土深度4.8 m,穿越地层为粗圆砾土,顶管中心纵断面图详见图3。

### 3.1 Peck法-路基沉降

Peck提出地面沉降与土质情况、覆土深度、顶管机类型、操作水平等有关,估算公式如下:

$$S_{\max} \approx \frac{V_s}{2.5i} \quad (1)$$

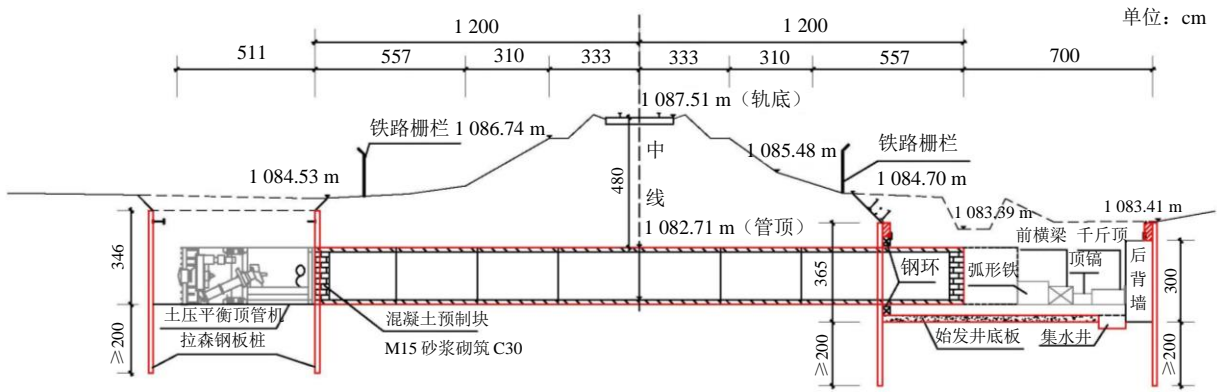


图3 顶管中心纵断面图

Fig. 3 Longitudinal section of pipe jacking center

$$i = \frac{H}{2.5 \cdot \tan(45^\circ - \varphi/2)} \quad (2)$$

式中： $S_{max}$  为轴线处最大沉降量，mm； $V$  为单位钻孔长度上的地层损失量， $m^3/m$ ， $V_s$  取（5%~8%） $V$ ； $i$  为沉降槽宽度系数，m； $H$  为覆土层厚度（地面到管轴线距离），m； $\varphi$  取  $42^\circ$ 。

按照理论公式计算，中心最大沉降 17.63 mm，影响宽度自顶管中心两侧各 7.47 m，路基沉降横向分布图详见图 4。

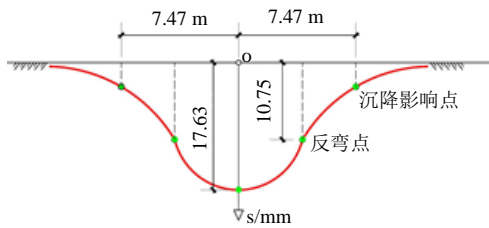


图4 路基沉降横向分布图

Fig. 4 Transverse distribution diagram of subgrade settlement

### 3.2 有限元分析

工程模型采用“地层-结构”方法模拟顶管施工状态。“地层-结构”方法采用现代岩体力学模型，该方法将结构与地层视为一个整体，按照摩尔-库伦模型定义地层各土体，通过协调变形共同承受地层荷载。该方法计算时可以考虑结构的各种几何形状、地层和结构材料的非线性特性、空间效应所形成的三维状态以及结构不连续面等。工程土体及混凝土计算参数详见表 2 和表 3 所示。

顶管施工引起的沉降数值分析采用 Midas-NX 有限元分析软件，三维地层-结构法进行模拟计算，为充分考虑顶管施工对铁路线路的影响，模型中铁路线路方向长度取 25 m，顶进方向取 65 m，工作坑基底以下取 20 m，计算模型详见图 5。其中，模型采用六面体网格划分，土体网格按照接近顶管部

位最小 1 m，地层边界最大 5 m 控制。顶管网格按照 0.2 m 进行划分。一次顶进长度为 2.0 m，注浆通过改变与顶管结构接触土体的摩阻力实现。

表 2 土体的力学计算参数

Table 2 Parameters for calculation

土层名称	重度/ ( $kN/m^3$ )	弹性模量 $E/MPa$	泊松比	内聚力/ $kPa$	摩擦角/ $(^\circ)$
人工填筑土	19	50	0.42	10	30
粗圆砾土	21	350	0.35	18	36
路基表层	19	30	0.35	15	31
路基地层	20	100	0.30	2	40

表 3 混凝土计算参数

Table 3 Parameters for concrete

构件	重度 $\gamma/(kN/m^3)$	弹性模量 $E/GPa$	泊松比 $\nu$
C15 混凝土	23.0	28.00	0.22
C30 混凝土	25.0	31.50	0.20
钢材	78.5	210.00	0.30
路基	20.0	0.48	0.25

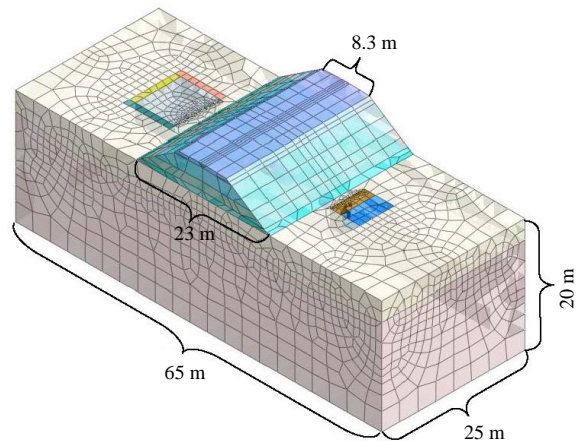


图5 计算模型

Fig. 5 Numerical model

根据《铁路路基设计规范》(TB 10001—2016) 4.2.3 节要求: 铁路列车荷载在静力分析时, 采用列车等效均布荷载, 列车荷载自轨枕底面端部向下按 45°扩散, 单位荷载标准值按照《铁路路基设计规范》(TB 10001—2016) 表 4.2.3 中选用。结合工程中铁路性质, 作用在路基面上的单位荷载标准值按 66.87 kN/m<sup>2</sup> 计算。

计算模型的施工过程分为: (1) 完成始发井及吊出井施工; (2) 施工至路基坡脚; (3) 施工至铁路线路正下方; (4) 施工至对侧路基坡脚。沉降量正值下沉, 反之运动方向相反。本次通过模拟顶管开挖土体、衬砌顶进的时空效应, 对掌子面土体及衬砌末端施加顶力, 重点分析顶管施工过程中对地表建(构)筑物的影响, 各个阶段路基横向、轨道横向、地表纵向沉降值如图 6~8 所示。

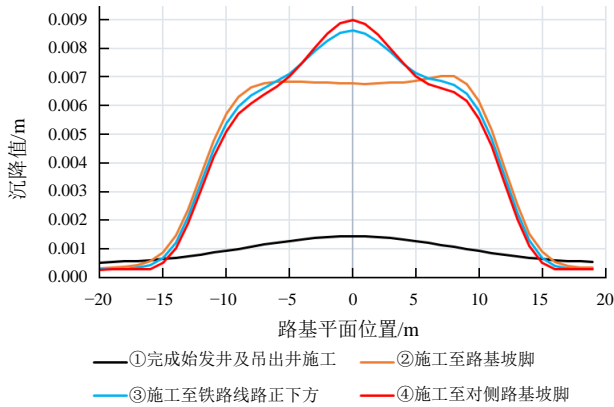


图 6 各工况路基沉降横向分布曲线图

Fig. 6 Lateral distribution of subgrade settlement under various working conditions

路基最大沉降约 8.99 mm, 影响深度自中心向两侧递减, 趋势明显。

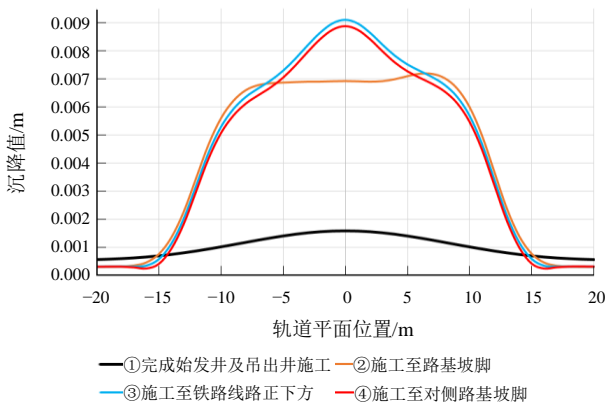


图 7 各工况轨道沉降横向分布曲线图

Fig. 7 Lateral distribution of track settlement under different working conditions

轨道最大沉降约 9.09 mm, 影响深度自中心向两侧递减, 趋势明显。

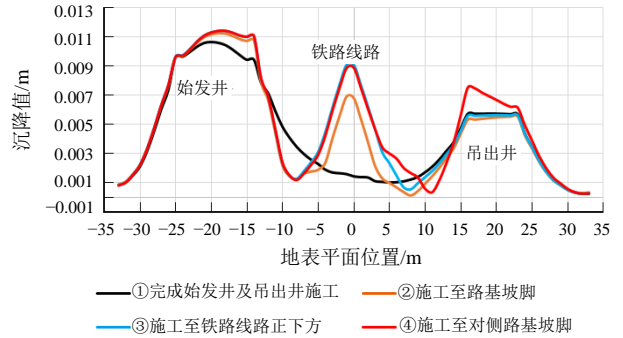


图 8 各工况地表沉降纵向分布曲线图

Fig. 8 Longitudinal distribution of surface settlement under various working conditions

始发井施工期间引起地表沉降最大为 11.30 mm, 施工时需设置角撑, 并对工作井周边土体进行加固。工程竖向总应力分布详见图 9 和图 10。

由以上图表结果及数值模拟分析可知, 在考虑列车荷载的条件下, 顶管施工引起的控制点沉降见表 4 所示。

通过分析图表判定, 轨道最大沉降约 9.09 mm, 顶进施工对路基、轨道横向影响宽度自顶管中心两侧各 10 m。

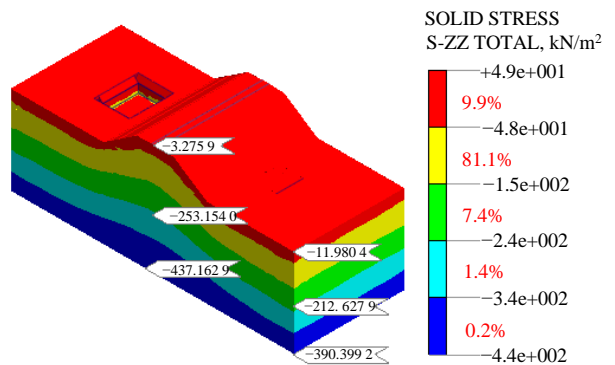


图 9 施工中实体竖向总应力分布图

Fig. 9 Distribution of total vertical stress during construction

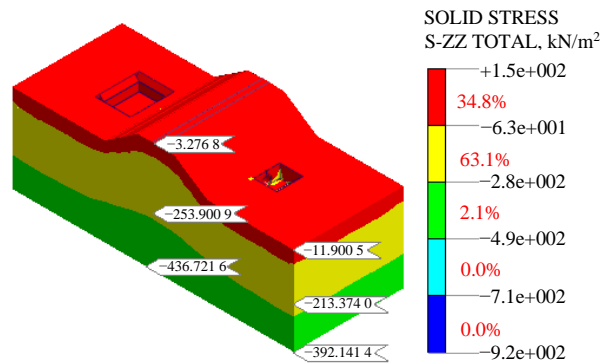


图 10 施工后实体竖向总应力分布图

Fig. 10 Distribution of total vertical stress after construction

表4 各位置沉降最大值

Table 4 Maximum settlement at different positions mm

控制点	①	②	③	④
始发井	10.68	11.19	11.30	11.30
路基坡脚1	2.29	1.89	3.11	2.91
铁路路基	1.44	6.77	8.63	8.99
铁路轨道	1.59	6.93	9.09	8.87
路基坡脚2	1.71	0.93	1.39	0.61
吊出井	5.75	5.49	5.63	6.69

注: ①~④对应各施工工况。

## 4 铁路路基实测沉降

### 4.1 铁路沉降监测方案

根据《铁路路基设计规范》, II级铁路工后沉降不应大于30cm,《普速铁路线路修理规则》规定,80 km/h <math>v\_{max}</math> ≤ 120 km/h 正线,临时修补轨道静态几何尺寸容许偏差管理值,高低15mm、轨向(直线)12mm。根据数值计算结果可看出,顶管施工引起的路基沉降、轨道变形未超过规范要求。但有限元软件无法精确分析施工的全过程,选取的地层参数对分析结果影响较大,地层的沉降是连续的渐变过程,当沉降值超过预警值时,应通过补充道砟,可保持线路平顺,满足铁路运行安全。

根据横向影响宽度及纵向沉降分布,加密影响宽度范围内路基及轨道、始发井及吊出井的监测点,详见图11所示。

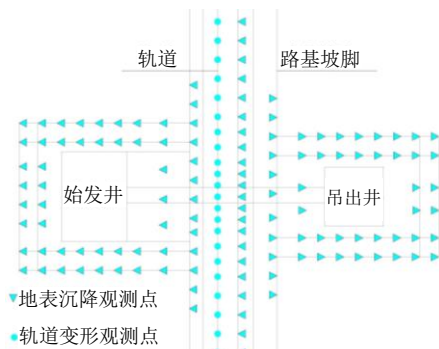


图11 监控量测布置图

Fig. 11 Layout of monitoring points

### 4.2 铁路沉降控制措施

根据有限元软件分析施工全过程沉降数据,结合工程实际状况,提出顶管施工下穿运营铁路以下沉降控制措施:

(1) 顶管机选型、刀盘设计、渣土改良是控制沉降的关键,施工前应根据勘察报告,对顶管机进行综合多方面因素的比选,以合理确定顶管机参数。

(2) 监控量测反映现场施工的真实状态,通过有限元分析制定有针对性的、合理的监控量测方案,并根据有限元分析的沉降值,确定黄、橙、红预警值,当监测数据达到预警值时,及时调整施工参数。

(3) 通过对地表沉降、土层变形及顶管机内土压力的监测,及时调整顶管机提供的压力值,避免因压力值不合理,造成地层的不必要扰动。

(4) 始发、接收井位置做好超前预注浆措施,控制顶管掘始发及到达时的沉降风险;施工中,在管道的周围进行同步注浆,加强顶管机通过后留下的管道背后空隙的填充及填充材料后期置换固化,以控制地表沉降。

(5) 通过监测校核顶管轴线与设计轴线的差异,并及时纠偏,避免因纠偏量较大产生对周围土体的剪切,控制顶管与土体间的空隙。

(6) 针对铁路路基或其它空隙较大、土体稳定性差的地层,顶管施工前对地层进行注浆加固,以保护地下管线和地面构筑物,注浆工艺由施工单位根据现场条件确定,建议采用袖阀管对出现异常位置进行注浆工艺,浆液为单液浆,注浆过程中应加强地下管线和地面构筑物的变形监测,注浆孔按扩散半径1.0m设计,注浆压力(终压值)可按0.5~1.0MPa控制,并根据监测情况确定,施工时注浆压力、浆液配比、注浆速度等施工技术参数应根据深度及地质条件,通过现场试验确定,不得因注浆而使构筑物发生超标变形,并做好施工应急预案。

### 4.3 实际施工监控量测数据分析

顶管施工期间,根据制定的监控量测方案对地表、路基、轨道进行监测,对关键阶段、位置的监测数据进行分析。路基沉降、轨道沉降、地表沉降值分别如图12~14所示。

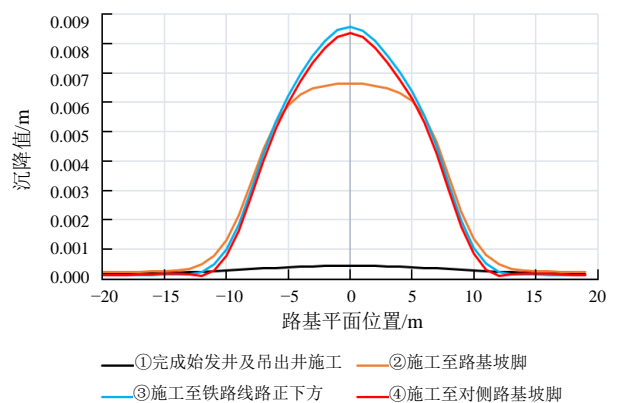


图12 实测各工况路基沉降横向分布曲线图

Fig. 12 Lateral distribution of measured subgrade settlement under various working conditions

路基最大沉降为 8.58 mm，影响深度自中心向两侧递减，趋势明显。

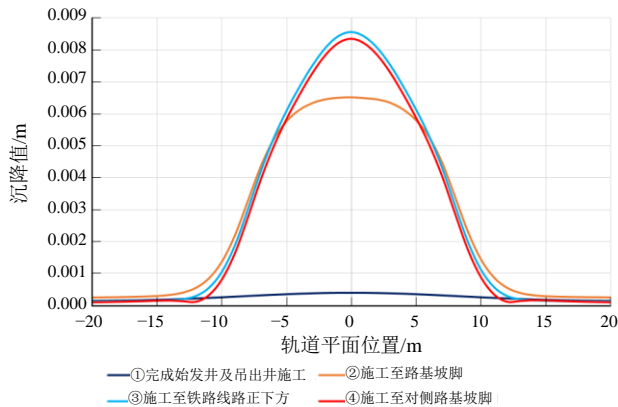


图 13 实测各工况轨道沉降横向分布曲线图

Fig. 13 Lateral distribution of measured track settlement under various working conditions

轨道最大沉降为 8.44 mm，影响宽度自中心向两侧递减，趋势明显。

由监控量测数据及图表分析可知，在考虑列车荷载、对工作井进行加固的条件下，顶管施工引起的控制点沉降见表 5 所示。

通过分析图表判定，路基最大沉降约 8.58 mm，顶进施工对路基、轨道横向影响宽度自顶管中心两侧各 6 m。

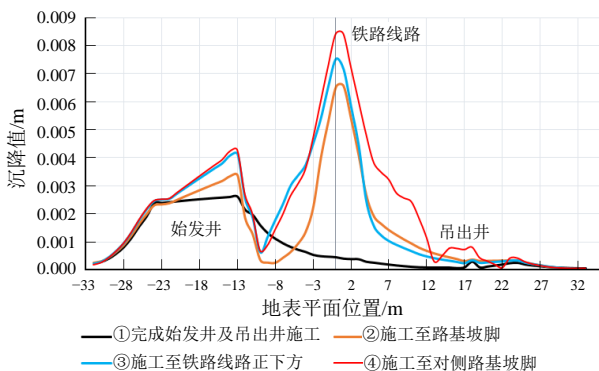


图 14 实测各工况地表沉降纵向分布曲线图

Fig. 14 Measured longitudinal distribution of surface settlement under various working conditions

表 5 各位置沉降最大值

Table 5 Maximum settlement at different positions mm

控制点	①	②	③	④
始发井	2.55	3.37	3.53	3.54
路基坡脚 1	0.81	2.86	2.77	2.60
铁路路基	0.44	6.64	8.58	8.36
铁路轨道	0.39	6.52	8.44	8.35
路基坡脚 2	0.21	1.41	2.77	3.32
吊出井	0.08	0.29	0.20	1.82

注：①~④为各施工工况。

## 5 铁路路基理论和实测沉降值对比分析

根据 3.1 节路基沉降理论公式计算得出，路基最大沉降 17.63 mm，影响宽度 7.47 m（单侧）。因未考虑铁路动荷载及公式中仅涉及内摩擦角一个土层参数，计算的影响宽度和最大沉降值误差较大，故不建议在该工况下使用。土层重度、黏聚力、地下水位、顶管机类型、结构材质等都对沉降值有一定影响，文中不作为重点研究对象。

根据 3.2 节有限元分析得出，轨道最大沉降 9.09 mm，影响深度自中心向两侧递减，趋势明显。有限元分析充分考虑了土层的弹性模量、泊松比、重度、黏聚力及内摩擦角等土层参数，也模拟了铁路动荷载、顶管顶力对沉降的影响。有限元分析中未设置结构与土体的摩阻力，未考虑顶进过程中可能出现的“背土效应”。

根据 4.3 节实际施工监控量测数据分析得出，顶管施工期间轨道最大沉降为 8.44 mm，影响宽度自中心向两侧递减，趋势明显。

综上所述，铁路路基轨道最大沉降值如下：理论计算为 17.63 mm，有限元分析为 9.09 mm，实测数据为 8.44 mm。对比分析可得出，理论和实测沉降值较为符合。

## 6 结论

(1) 工程中理论、有限元计算结果与实测结果较为符合，理论计算过程、模型定义、工况分析等具有一定的参考意义。

(2) 工程中制定的针对性、合理性监控量测方案及顶管施工沉降控制措施，能够有效的指导施工，具有积极的借鉴意义。

(3) 文章中路基、轨道、地表沉降计算结果及现场实测结果，可作为相似项目沉降控制的参考指标。

### 参考文献

[1] 葛春辉. 顶管工程设计与施工[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.  
 GE Chun-hui. Design and Construction of Pipe Jacking Engineering[M]. Beijing: China Construction Industry Press, 2012.  
 [2] 马保松. 顶管和微型隧道技术[M]. 北京: 人民交通出

- 版社, 2004.
- MA Bao-song. Edited Pipe Jacking and Micro Tunnel Technology[M]. Beijing: China Communications Press, 2004.
- [3] 葛金科, 沈水龙, 许焯霜. 现代顶管施工技术及工程实例[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- GE Jin-ke, SHEN Shui-long, XU Yi-shuang. Modern Pipe Jacking Construction Technology and Engineering Examples[M]. Beijing: China Construction Industry Press, 2009.
- [4] 胡乾彬. 泥水平衡顶管在管道穿越河流中的应用[J]. 内蒙古石油化工, 2009, 35(18): 22-24.
- HU Qian-bin. Application of mud water balance pipe jacking in pipeline crossing river[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2009, 35(18): 22-24.
- [5] 张军, 陈俊松, 于丹, 等. 大口径给水管道穿越高速公路方案选择及顶管设计[J]. 给水排水, 2014, 40(12): 100-103.
- ZHANG Jun, CHEN Jun-song, YU Dan, et al. Scheme selection and pipe jacking design of large diameter water supply pipeline crossing expressway[J]. Water Supply and Drainage, 2014, 40(12): 100-103.
- [6] 魏纲. 顶管工程土与结构的性状理论研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- WEI Gang. Theoretical study on behavior of soil and structure in pipe jacking engineering[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005.
- [7] 冯海宁, 龚晓南, 徐日庆. 顶管施工环境影响的有限元计算分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(7): 1158-1162.
- FENG Hai-ning, GONG Xiao-nan, XU Ri-qing. Finite element analysis of influence of pipe-jacking construction on environments[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(7): 1158-1162.
- [8] 余彬泉, 陈传灿. 顶管施工技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 1998.
- YU Bin-quan, CHEN Chuan-can. Pipe Jacking[M]. Beijing: China Communications Press, 1998.
- [9] 马保松. 非开挖工程学[M]. 北京: 人民交通出版社, 2008.
- MA Bao-song. Trenchless Engineering[M]. Beijing: China Communications Press, 2008.
- [10] 丁良平, 黄金明, 黄宏伟. 近距离平行顶管施工监测与技术分析[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(8): 1421-1425, 1437.
- DING Liang-ping, HUANG Jin-ming, HUANG Hong-wei. Analysis and monitoring of close parallel pipe-jacking[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(8): 1421-1425, 1437.
- [11] 罗筱波, 周健. 多元线性回归分析法计算顶管施工引起的地面沉降[J]. 岩土力学, 2003, 24(1): 130-134.
- LUO Xiao-bo, ZHOU Jian. Computation of ground settlement induced by the pipe jacking using multivariate linear regression method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(1): 130-134.
- [12] 关战伟, 孙阳. 地下顶管施工对沉井后背土体的扰动监测分析[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(增刊 1): 1630-1633, 1638.
- GUAN Zhan-wei, SUN Yang. Analysis of soil disturbance caused by pipe jacking construction[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering 2013, 9(S1): 1630-1633, 1638.