

文章编号: 1674—8247(2023)02—0006—07

DOI: 10.12098/j.issn.1674-8247.2023.02.002

# 软弱地层下穿高铁超大矩形顶管盾构隧道施工 稳定性研究

刘顺水

(海峡(福建)交通工程设计有限公司, 福州 350004)

**摘要:**为保证超大矩形顶管盾构隧道近接下穿高速铁路施工稳定性,本文依托某火车站地下通道工程,建立软弱地层近接下穿高铁超大矩形顶管盾构隧道施工力学模型,结果表明:(1)埋深因子越大,地表沉降、轨道变形和管节收敛变形越大,管节安全系数越小;(2)黏聚力因子和内摩擦角因子越大,地表沉降、轨道变形和管节收敛越小,管节安全系数越大;(3)管节因子越大,地表沉降、轨道变形和管节收敛逐渐减小,管节安全系数增加;(4)软弱地层超大矩形顶管盾构隧道近接下穿高铁施工时埋深因子越小,黏聚力因子、内摩擦角因子和管节因子越大,其施工稳定性越好。研究成果可为类似工程提供参考。

**关键词:**矩形顶管盾构;软弱地层;施工稳定性;近接施工

中图分类号: U452.2<sup>+</sup>8

文献标识码: A

6

## A Study on Stability of Super-large Rectangular Pipe-jacking Shield Tunnel for High-speed Railway Underpassing Soft Ground

LIU Shunshui

(Haixia (Fujian) Transportation Engineering Design Co., Ltd., Fuzhou 350004, China)

**Abstract:** In order to ensure the stability of super-large rectangular pipe-jacking shield tunnel near an underneath high-speed railway, the underground passage of a railway station was taken as a case for study in the paper, and a construction mechanics model of such a tunnel in soft ground was established, to study the impact of tunnel depth, stratum parameters, and element on surface settlement, track deformation, element convergence, and safety coefficient. The results show that: (1) The greater the depth is, the greater the surface settlement, track deformation, and element convergence deformation are, and the smaller the element safety factor is. (2) The greater the cohesion factor and internal friction angle factor are, the smaller the surface settlement, track deformation, and element convergence are, and the greater the element safety factor is. (3) The larger the element factor is, the smaller the surface settlement, track deformation, and element convergence are, and the safety factor of elements increases. (4) The smaller the depth is, the larger the cohesion factor, internal friction angle factor, and element factor are, and the better the construction stability is when the super-large rectangular pipe-jacking shield tunnel in soft ground is close to the construction of underpass high-

收稿日期: 2022-11-17

作者简介: 刘顺水(1995-),男,工程师。

基金项目: 国家自然科学基金项目(52178378), 中铁第四勘察设计院集团有限公司科技研究开发项目(2020K143)

引文格式: 刘顺水. 软弱地层下穿高铁超大矩形顶管盾构隧道施工稳定性研究[J]. 高速铁路技术, 2023, 14(2): 6-12.

LIU Shunshui. A Study on Stability of Super-large Rectangular Pipe-jacking Shield Tunnel for High-speed Railway Underpassing Soft Ground[J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(2): 6-12.

speed railway. The findings may be used as reference for similar projects.

**Key words:** rectangular pipe jacking shield; soft ground; stability; approaching construction

随着盾构技术的不断进步,近年来多圆盾构、矩形盾构、椭圆形盾构、微型矩形盾构等在各大城市中成功应用,必然会遇到各种各样的问题<sup>[1-3]</sup>。如何在软弱地层中保证大断面盾构隧道的施工稳定性是目前亟待解决的问题。

目前,针对大断面矩形隧道施工的研究主要有:梁荣柱等<sup>[4]</sup>推导了类矩形盾构隧道灯箱纵向抗弯刚度解;Liu 等<sup>[5]</sup>研究了矩形盾构隧道同步注浆扩散的力学模型和计算方法;柳献等<sup>[6]</sup>基于整环足尺试验优化了纵向接缝连接螺栓位置;魏纲等<sup>[7]</sup>研究了正面推力、壳-土摩擦、注浆和土体损失等因素影响下类矩形盾构的竖向位移;巩一凡等<sup>[8-9]</sup>对大断面类矩形隧道管片纵向接头抗剪性能进行分析;张治国等<sup>[10-11]</sup>研究了矩形盾构隧道施工对于周边环境的影响;邓声君等<sup>[12]</sup>研究了弹性模量、应力释放率和隧道压重等因素对类矩形隧道施工的影响;李培楠等<sup>[13]</sup>依托宁波市轨道交通 3 号线陈婆渡车站类矩形盾构隧道工程,研究了同步注浆工艺,建立了类矩形盾构隧道注浆扩散的三维空间分布模型;郑斌等<sup>[14]</sup>依托上海淞沪路-三门路下立交大断面类矩形顶管工程,提出了适用于类矩形顶管隧道的顶管壳体土压力经验系数和顶进阻力计算模型等。以上文献中有关大断面隧道近接高铁工程的研究较少,涉及大断面矩形顶管盾构隧道下穿高铁的研究更是鲜有报道。

本文依托某铁路车站两侧地下通道工程,采用有限元软件 Abaqus 模拟了超大矩形顶管盾构隧道近接下穿高铁施工过程,研究了隧道埋深、地层参数和管节长度对软弱地层顶管盾构施工中地表沉降、轨道变形、管节收敛和管节安全系数的影响。研究成果可为类似顶管盾构隧道近接施工提供参考。

1 工程概况

某铁路车站拟建西侧通道全长 820 m,其中矩形顶管盾构段单线长 260 m。该矩形顶管隧道宽 12.60 m,高 7.65 m,采用中铁工程装备集团有限公司 1051 号、1052 号顶管盾构机开挖。管节采用 C50 钢筋混凝土整环矩形管节,顶板呈微拱,内径 11 m×6.05 mm,管节厚 800 mm,长 1.80 m,单环管节重约 134.7 t。该矩形顶管盾构隧道近接下穿既有运营高速铁路,管节顶板与高铁最小距离为 4.3 m。

2 计算模型及计算参数

2.1 计算工况

为研究埋深( $C$ )、地层参数( $\varphi$  和  $c$ )和管节长度( $d$ )对复合地层矩形顶管盾构隧道施工的稳定性的影响,拟定本文计算工况共 225 组,如表 1 所示。

表 1 计算工况表

影响因素	基本值	影响因子	影响因子取值
埋深	$C_0 = 4.2\text{ m}$	$\zeta_c = C/C_0$	1.00, 1.50, 2.00
内摩擦角	$\varphi_0 = 15^\circ$	$\zeta_\varphi = \varphi/\varphi_0$	1.00, 1.20, 1.40, 1.60, 1.80
粘聚力	$c_0 = 500\text{ Pa}$	$\zeta_c = c/c_0$	2.00, 4.00, 6.00, 8.00, 10.00
管节长度	$d_0 = 1.80\text{ m}$	$\zeta_d = d/d_0$	1.00, 2.00, 3.00

注:  $C_0$  为工程近接下穿高铁段埋深,取 4.3 m; 参数  $\varphi_0$  和  $c_0$  由地勘报告取得,分别为  $15^\circ$  和 500 Pa;  $d_0$  为管节宽度,取 1.8 m

2.2 数值计算模型

建立软弱地层中矩形顶管盾构隧道施工模型,模型长、宽、高分别为 95 m、54 m 和 40 m,如图 1 所示(以  $\zeta_c = 1.0$ ,  $\zeta_d = 1.0$  为例)。模型中围岩、地基采用 Mohr-Coulomb 模型,轨道和管节采用弹性模型,采用弱化地层方式进行道砟模拟,假设开挖面保持稳定,约束开挖面位移。管节顶进采用 Surface to Surface 接触,法向采用 Hard Contact 算法,切向采用 Penalty 算法,隧道开挖采用 Model change 算法。

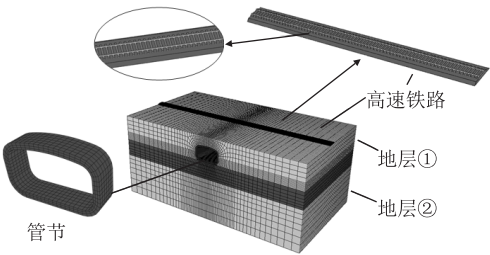


图 1 计算模型图

2.3 监测系统

综合考虑模型大小,网格尺寸和数据处理后,设置地表测点和管节测点,如图 2 所示。

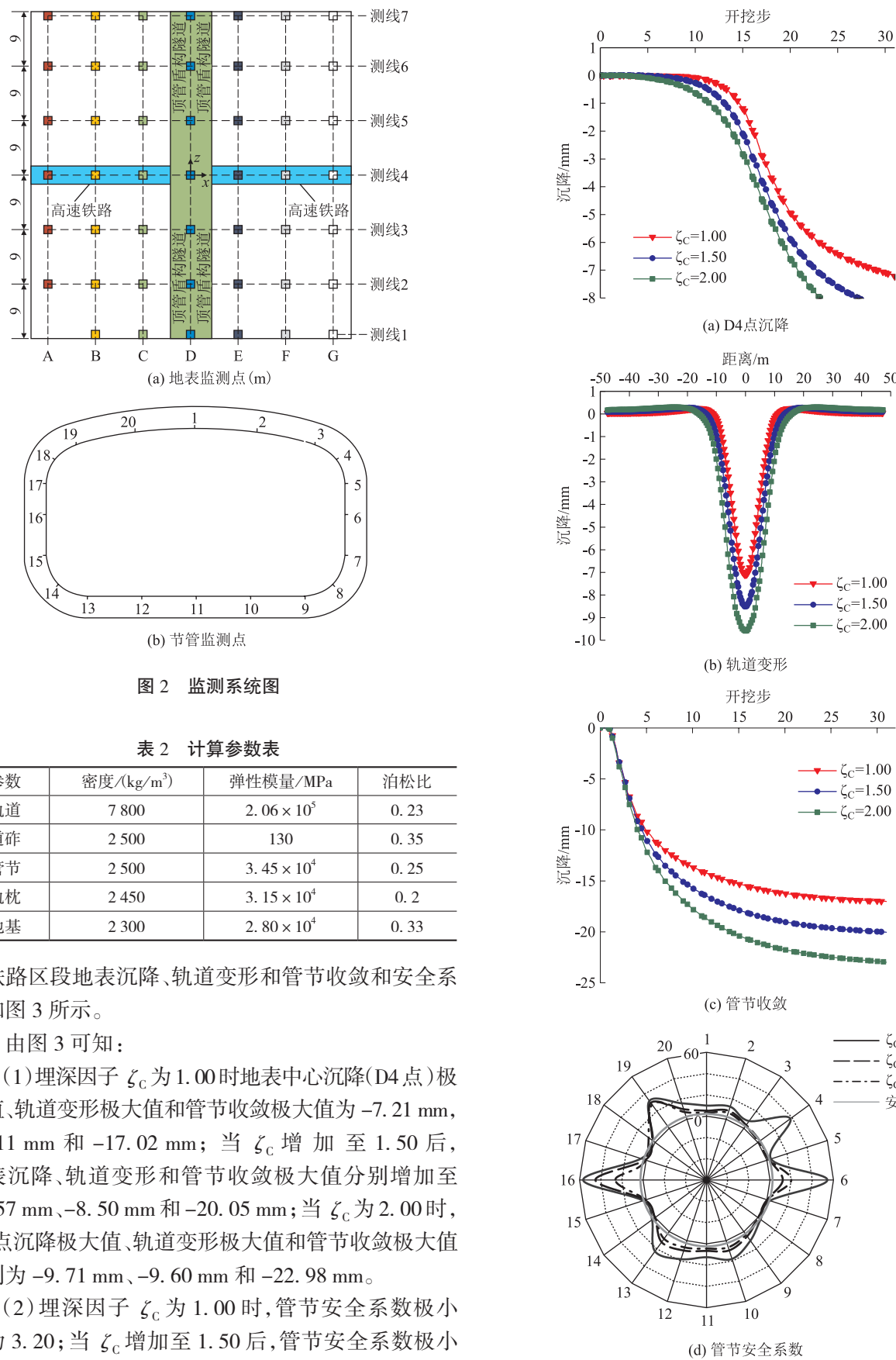
2.4 计算参数

模型中高铁和管节物理力学参数参照地勘报告和室内试验选取,如表 2 所示。

3 计算结果及分析

3.1 不同埋深因子  $\zeta_c$

不同埋深因子  $\zeta_c$  下顶管盾构隧道近接下穿高

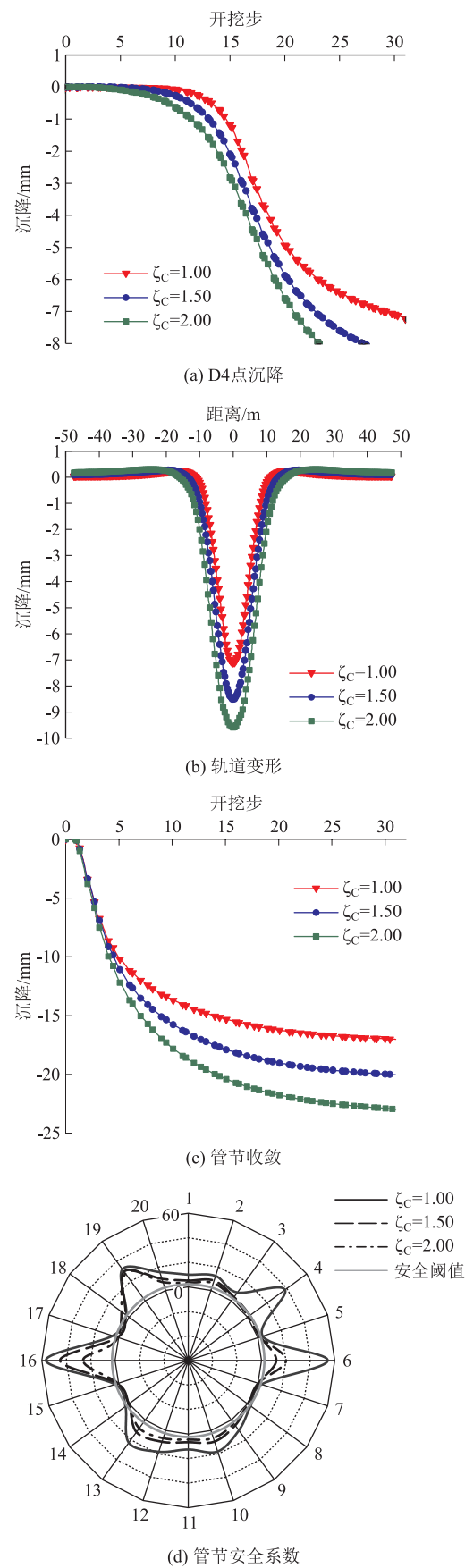


速铁路区段地表沉降、轨道变形和管节收敛和安全系数如图 3 所示。

由图 3 可知：

(1)埋深因子  $\zeta_c$  为 1.00 时地表中心沉降(D4 点)极大值、轨道变形极大值和管节收敛极大值为 -7.21 mm, -7.11 mm 和 -17.02 mm; 当  $\zeta_c$  增加至 1.50 后, 地表沉降、轨道变形和管节收敛极大值分别增加至 -8.57 mm、-8.50 mm 和 -20.05 mm; 当  $\zeta_c$  为 2.00 时, D4 点沉降极大值、轨道变形极大值和管节收敛极大值分别为 -9.71 mm、-9.60 mm 和 -22.98 mm。

(2)埋深因子  $\zeta_c$  为 1.00 时,管节安全系数极小值为 3.20; 当  $\zeta_c$  增加至 1.50 后,管节安全系数极小值减小至 0.47,  $\zeta_c$  增加至 2.00 时管节安全系数极小值为 0.19。顶管盾构施工中  $\zeta_c$  越大,管节安全性能越差。



综上所述,软弱地层中超大矩形顶管盾构隧道埋

深因子  $\zeta_c$  越大, 地表沉降、轨道变形和管节收敛变形越大, 管节安全系数越小, 顶管盾构隧道近接下穿高铁施工稳定性越差。

### 3.2 不同粘聚力因子 $\zeta_c$ 对施工的影响

软弱地层不同粘聚力因子  $\zeta_c$  下, 矩形顶管盾构近接下穿高铁区段地表位移、轨道变形、管节收敛和安全系数如图4所示。

由图4可知:

(1) 黏聚力因子  $\zeta_c$  为 2.00 时 D4 点沉降极值为 -7.12 mm, 当  $\zeta_c$  增加至 10.00 时, D4 点极值为 -6.98 mm; 不同  $\zeta_c$  的轨道变形和管节收敛的差异较小,  $\zeta_c$  从 2.00 增加至 8.00 时, 管节收敛变化值仅为 0.5 mm。

(2) 黏聚力因子  $\zeta_c$  为 2.00 时管节安全系数的极小值为 0.73,  $\zeta_c$  为 4.00 时管节安全系数的极小值为 0.78,  $\zeta_c$  为 6.00 时管节安全系数的极小值为 0.81, 当  $\zeta_c$  增加至 8.00 时管节安全系数的极小值为 0.89; 当  $\zeta_c$  为 10.00 时, 管节安全系数增加至 1.08。

综上所述, 随着  $\zeta_c$  的增加, 地表沉降、轨道变形和管节收敛逐渐减小, 管节安全系数逐渐增加, 顶管盾构和上覆高铁的安全性越好, 顶管盾构隧道近接下穿施工稳定性越好。

### 3.3 不同管节因子 $\zeta_d$ 对施工的影响

不同管节因子  $\zeta_d$  下地表中心(测点 D4) 位移曲线、轨道变形曲线、管节收敛曲线和管节安全系数如图5所示。

由图5可知:

(1) 管节因子  $\zeta_d$  为 1.00, 2.00 和 3.00 时, D4 点沉降极大值分别为 -7.01 mm, -6.95 mm 和 -6.73 mm,  $\zeta_d$  越大, 测点 D4 处地表沉降越小。

(2) 轨道变形极大值在  $\zeta_d$  为 1.00, 2.00 和 3.00 时分别为 -7.11 mm, -6.95 mm 和 -6.67 mm, 其值也随  $\zeta_d$  的增加而减小。

(3) 管节收敛极值也随  $\zeta_d$  的增加而减小, 管节收敛极值在  $\zeta_d$  为 1.00, 2.00 和 3.00 时分别为 -17.02 mm, -14.33 mm 和 -9.48 mm。

(4) 管节安全系数  $\zeta_d$  为 1.20 时测点 7、9、14 和 15 处的安全系数分别为 4.82、4.73、5.53、4.75, 高于安全阈值; 随着管节  $\zeta_d$  的增加, 其安全系数越大, 结构安全性能越好。

综上所述, 在不考虑施工难度的前提下, 顶管盾构管节  $\zeta_d$  越大, 地表沉降、轨道变形和管节变形越小, 管节安全性能也越好, 矩形顶管盾构隧道近接下穿施工稳定性越好。

### 3.4 不同内摩擦角因子 $\zeta_\phi$ 对施工的影响

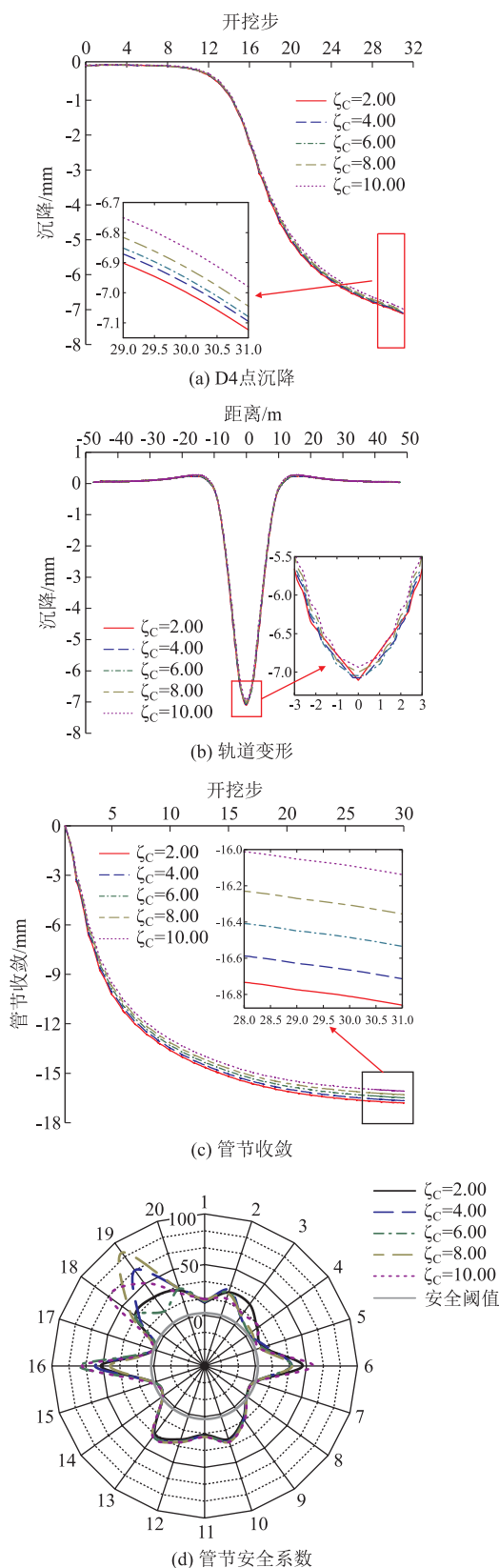


图4 粘聚力因子  $\zeta_c$  的影响图

提取不同内摩擦角因子  $\zeta_\phi$  时地表中心点位移、轨道变形、管节收敛和安全系数如图6所示。

由图6可知:



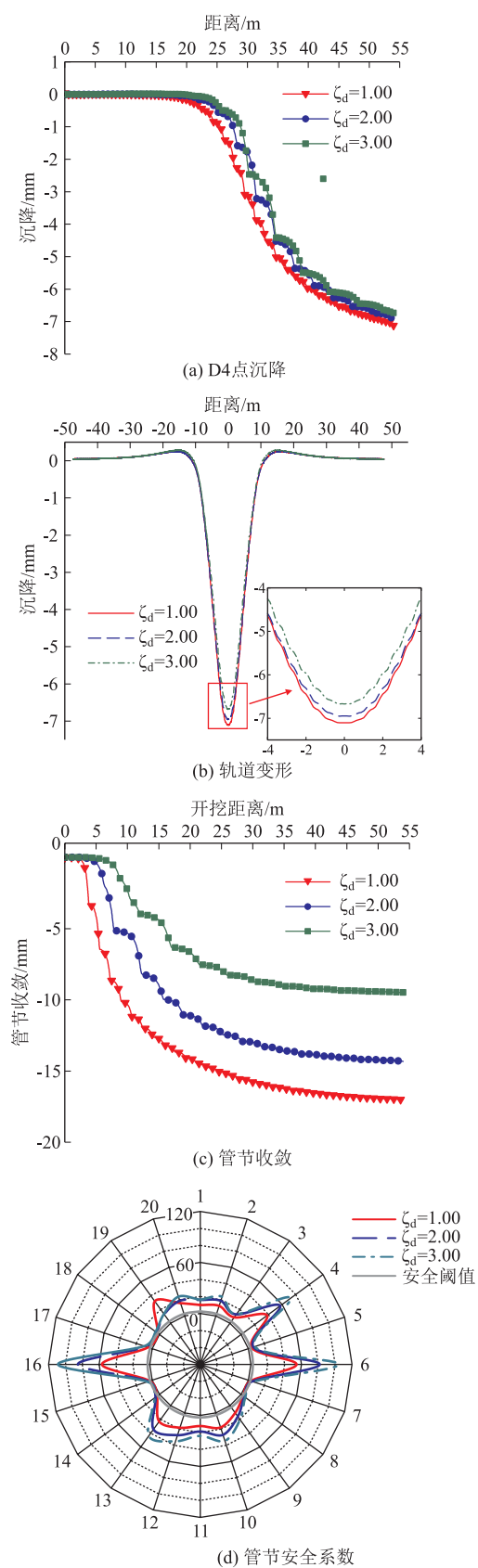


图 5 管节因子  $\zeta_d$  的影响图

(1) 软弱地层  $\zeta_\phi$  的增加将导致 D4 沉降减少,  $\zeta_\phi$  为 1.00 时, D4 点沉降为 -7.12 mm,  $\zeta_\phi$  增至 1.20、

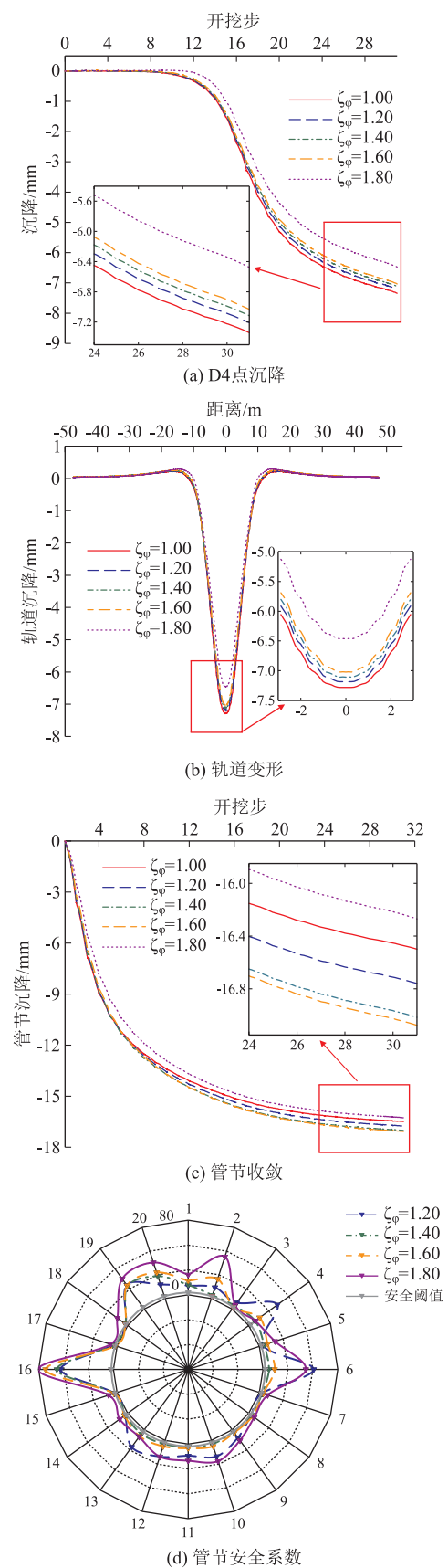


图 6 内摩擦角因子  $\zeta_\phi$  的影响图

1.40、1.60 时, 沉降极值为 -7.10 mm、-7.08 mm 和 -7.04 mm;  $\zeta_\phi$  为 1.80 时, D4 点沉降也减小为 -6.98 mm。

(2) 软弱地层  $\zeta_\phi$  的增加可导致轨道变形极值的减小,  $\zeta_\phi$  为 1.00 时轨道变形极值为 -7.28 mm、 $\zeta_\phi$  为 1.20、1.40、1.60 时极值为 -7.18 mm、-7.11 mm 和 -7.02 mm; 当  $\zeta_\phi$  增至 1.80 时, 沉降极值减小至 -6.46 mm。

(3) 顶管盾构掘进完成后,  $\zeta_\phi$  为 1.80 地层中管节沉降最小, 为 -16.27 mm, 其次为  $\zeta_\phi$  为 1.0 和 1.20 的地层, 为 -16.50 mm 和 -16.76 mm, 沉降最值出现  $\zeta_\phi$  为 1.60 的地层中, 为 -17.08 mm。

(4) 管节安全系数极小值出现矩形顶管管节左、右拱脚处), 参数  $\zeta_\phi$  为 1.20 时测点 7、8、14、15 安全系数为 3.20、3.14、3.67 和 3.16; 参数  $\zeta_\phi$  为 1.60 时测点 7、8、14、15 安全系数为 4.34、5.25、4.17 和 3.45。整体上, 矩形顶管盾构隧道施工安全性随参数  $\zeta_\phi$  的增加而增加。

综上所述, 随着内摩擦角因子  $\zeta_\phi$  的增加, 地表沉降、轨道变形、管节收敛均减小, 管节安全性能提高, 顶管盾构隧道近接下穿施工稳定性变强。

## 4 结论

本文研究了埋深、地层参数和管节对地表沉降、轨道变形、管节收敛和安全系数的影响, 得出如下结论:

(1) 软弱地层超大矩形顶管盾构隧道近接下穿高铁施工中, 埋深因子  $\zeta_c$  越大, 地表沉降、轨道变形和管节收敛变形越大, 管节安全系数减小, 顶管盾构隧道施工稳定性越差。

(2) 随着黏聚力因子  $\zeta_c$  和内摩擦角因子  $\zeta_\phi$  的增加, 地表沉降、轨道变形和管节收敛逐渐减小, 管节安全系数提高, 顶管盾构隧道近接下穿施工稳定性变强。

(3) 随着管节因子  $\zeta_d$  中的增加, 地表沉降、轨道变形和管节收敛逐渐减小, 管节安全系数提高, 顶管盾构隧道近接下穿施工稳定性变强。

(4) 综上所述, 软弱地层超大矩形顶管盾构隧道近接下穿高速铁路施工中, 其埋深因子、黏聚力、内摩擦角和管节因子越大, 施工稳定性越好。

## 参考文献:

- [1] 朱正国, 陈信宇, 陈自飞, 等. 盾构隧道下穿既有车站变形控制研究[J]. 高速铁路技术, 2019, 10(4): 6-11.  
ZHU Zhengguo, CHEN Xinyu, CHEN Zifei, et al. Research on Deformation Control of Shield Tunneling under Subway Station [J]. High Speed Railway Technology, 2019, 10(4): 6-11.
- [2] 陈湘生, 徐志豪, 包小华, 等. 中国隧道建设面临的若干挑战与技

术突破[J]. 中国公路学报, 2020, 33(12): 1-14.

CHEN Xiangsheng, XU Zhihao, BAO Xiaohua, et al. Challenges and Technological Breakthroughs in Tunnel Construction in China [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(12): 1-14.

- [3] 《中国公路学报》编辑部. 中国隧道工程学术研究综述·2015[J]. 中国公路学报, 2015, 28(5): 1-65.

Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's Tunnel Engineering Research: 2015 [J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(5): 1-65.

- [4] 梁荣柱, 王凯超, 黄亮, 等. 类矩形盾构隧道纵向等效抗弯刚度解析解[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(2): 212-223.

LIANG Rongzhu, WANG Kaichao, HUANG Liang, et al. Analytical Solution for Longitudinal Equivalent Bending Stiffness of Quasi-rectangular Shield Tunnels [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(2): 212-223.

- [5] LIU Jun, LI Peinan, SHI Lai, et al. Spatial Distribution Model of the Filling and Diffusion Pressure of Synchronous Grouting in a Quasi-rectangular Shield and Its Experimental Verification [J]. Underground Space, 2021, 6(6): 650-664.

- [6] 柳献, 叶宇航, 刘震, 等. 连接螺栓对类矩形盾构隧道结构极限承载力影响的试验研究与分析[J]. 土木工程学报, 2018, 51(8): 81-88, 95.

LIU Xian, YE Yuhang, LIU Zhen, et al. Experimental Investigation and Analysis on Effect of Connecting Bolts on Ultimate Bearing Capacity of Quasi-rectangular Shield Tunnel [J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(8): 81-88, 95.

- [7] 魏纲, 张鑫海, 徐银锋. 考虑多因素的类矩形盾构施工引起土体竖向位移研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(1): 199-208.

WEI Gang, ZHANG Xinhai, XU Yinfeng. Deriving Vertical Displacement of Ground Due to Quasi-rectangular Shield Tunneling Considering Multiple Factors [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(1): 199-208.

- [8] 巩一凡, 丁文其, 龚琛杰, 等. 大断面类矩形盾构隧道管片接头极限抗剪切承载力试验研究[J]. 土木工程学报, 2019, 52(11): 120-128.

GONG Yifan, DING Wenqi, GONG Chenjie, et al. Experimental Study on the Ultimate Shear Bearing Capacity of Segment Joint in Shield Tunnel with Large Quasi-rectangular Cross-section [J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(11): 120-128.

- [9] HUANG Zhen, ZHANG Chenlong, MA Shaokun, et al. Study of the Mechanical Behaviour and Damage Characteristics of Three New Types of Joints for Fabricated Rectangular Tunnels Using a Numerical Approach [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 118: 104184.

- [10] 张治国, 师敏之, 张成平, 等. 类矩形盾构隧道开挖引起邻近地下管线变形研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(4): 852-864.

ZHANG Zhiguo, SHI Minzhi, ZHANG Chengping, et al. Research on Deformation of Adjacent Underground Pipelines Caused by Excavation

of Quasi-rectangular Shields [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(4): 852 – 864.

[11] LIN Qingtao, LU Dechun, LEI Chunming, et al. Model Test Study on the Stability of Cobble Strata during Shield Under-crossing [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 110: 103807.

[12] 邓声君, 肖广良, 胡向东, 等. 类矩形盾构隧道数值模拟研究及若干施工因素分析 [J]. 现代隧道技术, 2016, 53(S1): 232 – 239.

DENG Shengjun, XIAO Guangliang, HU Xiangdong, et al. Numerical Simulation and Analysis of Construction Factors Affecting Quasi-rectangular Shield Tunnelling [J]. Modern Tunnelling Technology, 2016, 53(S1): 232 – 239.

[13] 李培楠, 石来, 刘俊, 等. 软土地区类矩形盾构隧道同步注浆填充扩散压力空间分布模式 [J]. 中国铁道科学, 2021, 42(2): 77 – 87.

LI Peinan, SHI Lai, LIU Jun, et al. Spatial Distribution Mode of Diffusion Pressure of Synchronous Grouting Filling for Quasi-rectangular Shield Tunnel in Soft Soil Area [J]. China Railway Science, 2021, 42(2): 77 – 87.

[14] ZHENG Bin. An Analysis of Shell Earth Pressure and Jacking Force of Quasi-rectangular Pipe Jacking with Large Cross-section: a Case Study on Underpass Project at Songhu Road-Sanmen Road in Shanghai [J]. Tunnel Construction, 2021, 41(10): 1740 – 1747.



(上接第 5 页)

Railway Engineering Geology-Southwest and Adjacent Areas [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2011.

[3] 徐正宣, 张利国, 蒋良文, 等. 川藏铁路雅安至林芝段工程地质环境及主要工程地质问题 [J]. 工程科学与技术, 2021, 53(3): 29 – 42.

XU Zhengxuan, ZHANG Liguo, JIANG Liangwen, et al. Engineering Geological Environment and Main Engineering Geological Problems of Ya'an-Linzhi Section of Sichuan-Tibet Railway [J]. Advanced Engineering Sciences, 2021, 53(3): 29 – 42.

[4] 陈明浩, 张广泽, 丁文富, 等. 成渝中线高铁主要工程地质问题及减灾选线 [J]. 铁道工程学报, 2021, 38(12): 13 – 18.

CHEN Minghao, ZHANG Guangze, DING Wenfu, et al. Main Engineering Geological Problems of Chengdu-Chongqing Middle Line High Speed Railway and Route Selection for Disaster Reduction [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2021, 38(12): 13 – 18.

[5] 杜宇本, 蒋良文. 大瑞铁路大保段主要工程地质问题及地质选线 [J]. 铁道工程学报, 2010, 27(4): 23 – 28.

DU Yuben, JIANG Liangwen. Main Problems in Engineering Geology and Alignment in Dali-Baoshan Section of Dali-Ruili Railway [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2010, 27(4): 23 – 28.

[6] TB 10027 – 2012 铁路工程不良地质勘察规程 [S].

TB 10027 – 2012 Code for Unfavorable Geological Condition Investigation of Railway Engineering [S].