

DOI: 10.16285/j.rsm.2021.1682

超大矩形顶管盾构隧道近接下穿高铁施工 加固方案对比分析

崔光耀¹, 麻建飞², 宁茂权^{3,4}, 唐再兴^{3,4}, 刘顺水^{3,4}, 田宇航¹

(1. 北方工业大学 土木工程学院, 北京 100144; 2. 北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044;
3. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430064; 4. 海峡(福建)交通工程设计有限公司, 福建 福州 350004)

摘 要: 为保证超大矩形顶管盾构隧道近接下穿高铁的施工安全, 以某矩形顶管盾构涉铁工程为背景, 研究软弱地层中超大矩形顶管盾构近接高铁施工的安全性。结果表明: 软弱地层中超大矩形顶管盾构近接高铁施工时轨道沉降和管节安全系数远超控制阈值, 必须采取施工加固方案; 采取超前注浆可使轨道沉降减小 58.20%, 管节最小安全系数提高至 1.35; 采用人工挖孔桩+D 型钢便梁可使轨道沉降减小 63.05%, 最小安全系数增至 9.49; 采用桩板结构加固可使轨道沉降减小 70.90%, 最小安全系数增至 9.00; 人工挖孔桩+D 型钢便梁加固方案和桩板结构加固方案的效果明显优于超前注浆的加固效果, 推荐在下穿待建高铁段采用桩板结构加固方案, 在下穿既有高铁段采用人工挖孔桩+D 型钢便梁加固方案。现场监测结果表明: 超大矩形顶管盾构在近接下穿待建福厦高铁段采用桩板结构后, 顶管掘进导致的地表沉降最大值为 3.25 mm, 在近接下穿既有杭深线段采用人工挖孔桩+D 型钢便梁后, 高铁轨道最大沉降仅为 1.65 mm, 均远小于沉降阈值, 超大矩形顶管盾构顺利近接下穿待建福厦线和既有杭深线。研究结论可为类似大尺寸隧道的近接工程提供参考。

关 键 词: 隧道工程; 矩形顶管盾构; 近接施工; 加固方案; 软弱地层

中图分类号: TU457

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2022)增刊 2-0414-11

Comparative analysis of construction reinforcement scheme of super large rectangular pipe jacking shield tunnel close to and under high-speed railway

CUI Guang-yao¹, MA Jian-fei², NING Mao-quan^{3,4}, TANG Zai-xing^{3,4}, LIU Shun-shui^{3,4}, TIAN Yu-hang¹

(1. School of Civil Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China; 2. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 3. China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430064, China;
4. Haixia Traffic Engineering Design Co., Ltd., Fuzhou, Fujian 350004, China)

Abstract: To ensure the construction safety of super-large rectangular pipe jacking shield tunnel adjacent to the high-speed railway, based on an actual railway related project, the safety of super-large rectangular pipe jacking shield close to high-speed railway in soft stratum is studied. The results show that the track settlement and pipe segment safety factor far exceed the control threshold during the construction, so the reinforcement scheme must be adopted. The track settlement can be reduced by 58.20% and the minimum safety factor of pipe segment can be increased to 1.35 by adopting advance grouting scheme. Using manually dug pile and D-shaped beam can reduce the track settlement by 63.05% and increase the minimum safety factor to 9.49. After adopting the pile-plate reinforcement scheme, the track settlement can be reduced by 70.90% and the minimum safety factor can be increased to 9.00. The reinforced effects of manually dug pile and D-shaped beam scheme and pile-plate scheme is significantly better than that of advance grouting. It is recommended to adopt the pile-plate scheme in the section under the high-speed railway to be built, and the manually dug pile and D-shaped beam scheme in the section under the existing high-speed railway. The on-site monitoring results show that the maximum surface settlement caused by pipe jacking tunneling is 3.25 mm after the super-large rectangular pipe jacking shield passes through the Fuzhou-Xiamen railway section to be built. After the manually dug pile and D-shaped beam is adopted for the existing Hangzhou-Shenzhen section, the maximum settlement of the high-speed railway track is only 1.65 mm. Both track settlement and

收稿日期: 2021-10-06

修回日期: 2022-02-16

基金项目: 国家自然科学基金(No.52178378); 中铁第四勘察设计院集团有限公司科技研究开发项目(No.2020K143)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China(52178378) and the Research and Development Project for Scientific and Technological of China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., (2020K143).

第一作者简介: 崔光耀, 男, 1983 年生, 博士, 教授, 主要从事隧道与地下工程方面的教学与研究工作。E-mail: cyao456@163.com

通讯作者: 麻建飞, 男, 1997 年生, 博士研究生, 主要从事隧道与地下工程方面的研究。E-mail: majfncut@163.com

surface settlement are far less than the settlement threshold. The super-large rectangular pipe jacking shield successfully crosses the Fuzhou-Xiamen Railway and Hangzhou-Shenzhen Railway. The research conclusion can provide reference for similar large-scale tunnel proximity engineering.

Keywords: tunnel engineering; rectangular pipe jacking shield tunnel; approach construction; reinforcement scheme; weak stratum

1 引言

随着城市化发展的加快及城市地下空间的有序化和科学化,在城区既有建(构)筑下增设大断面交通设施是缓解交通拥挤、提高土地利用效率行之有效的方法^[1]。近年来,越来越多的大断面城市隧道需近接穿越对沉降和变形要求较苛刻的高速铁路,如何保证大断面隧道近接工程自身与既有建(构)筑物的安全稳定是热点问题之一^[2]。

目前,针对隧道近接工程安全稳定的研究主要有:基于深圳地铁 7 号线下穿高铁轨道群工程,李围等^[3]提出的“轨道支撑+路基加固+夹层土体加固+下隧道内支撑”加固方案确保了重叠隧道下穿施工安全;朱垚锋等^[4]借助数值模拟软件研究了淤泥地层中盾构隧道下穿既有四孔箱涵对施工的影响,并结合施工资料对注浆加固的效果进行了分析和验证;以济南地铁 R3 线下穿胶济铁路区段为背景,孙连勇等^[5]借助 Abaqus 模拟了钻孔灌注桩加固方案对于既有铁路桥梁和铁路路基的影响;王志超等^[6]依托天津地铁 7 号线下穿某铁路工程,采用 Midas-NX 研究了盾构隧道穿越施工时有、无深孔注浆时路基和钢轨的变形规律;许怀^[7]以泄水洞超近接(1.9 m)下穿龙凤隧道工程为例研究了长管棚+小导管注浆等措施在岩溶破碎地层隧道穿越施工的加固效果;李军等^[8]以长沙地铁 1 号线下穿京广线为依托,提出旋喷桩加固、横抬纵挑和优化盾构施工参数来控制掘进施工对上覆高铁的影响;杨俊龙等^[9]依托杭州某大直径泥水平衡盾构下穿沪杭铁路桥涵工程,研究了高压旋喷法加固土体对既有桥涵的影响;张治国等^[10]基于 Winkler 模型,提出了类矩形隧道施工导致邻近管线变形的计算方法;刘世行^[11]基于深圳龙岗大道匝道下穿既有地铁高架桥工程,借助数值模拟和模型试验研究了矩形隧道施工对于周边环境影响规律,并优化了临时支护拆除方案;依托京沈客专某双洞盾构下穿北京机场线工程现场施工资料,马文辉等^[12]总结盾构施工参数、地表预注浆和洞内加强注浆对路基沉降的影响规律;杜虎^[13]基于济南交通 R3 线某区间下穿胶济铁路路基、胶济客专桥梁工程,研究袖阀管注浆、钻孔灌注桩对铁路路基的加固效果;Lü 等^[14]依托广州

地铁 8 号线盾构隧道工程,研究盾构施工中采用隔离桩对既有隧道的施工影响控制效果;赵太东^[15]依托成都 9 地铁号线下穿成昆铁路段,采用 FLAC^{3D} 软件模拟了泥岩地层中盾构隧道下穿铁路施工段采用主动托换补偿地层应力损失、以保证下穿施工安全的方法;朱正国等^[16]依托黄土岭隧道穿越古长城段,分析偏压连拱隧道穿越古长城时采用不同施工方案时的结构变形及受力规律;Ayasrah 等^[17]研究了 Greater Cairo 地铁某区间施工对于既有建筑桩基的影响,并分析了隧道尺寸、埋深等因素的影响;林庆涛等^[18]以清华园隧道穿越北京地铁 10 号线为背景,研究了卵石地层中盾构隧道施工对既有隧道的影响;Xie 等^[19]建立了顶管施工掘进模型,研究了上海地铁 14 号线静安寺站的 3 条大尺寸顶管隧道施工的相互影响规律;金鑫^[20]以苏州大断面顶管穿越京杭大运河工程为背景,提出了大面顶管施工穿越京杭大运河施工控制方案。以上研究虽已为隧道近接施工研究提供了丰富参考,但由实际工程地质的复杂性、工程自身特点和施工工法的不同、近接建(构)筑影响等级存在差异等诸多因素,目前对于隧道近接施工的研究仍需依托具体工程开展。

本文以某超大矩形顶管盾构近接下穿高铁段为背景,对软弱地层中超大矩形顶管盾构隧道施工安全性进行研究,并结合现场监测数据对其加固方案进行分析和验证。研究结论可为超大尺寸矩形顶管盾构隧道近接工程提供参考。

2 矩形顶管盾构下穿施工安全精细化模拟

2.1 工程概况

某超大矩形顶管盾构涉铁工程需在既有杭深线高铁和待建福厦高铁下方修建四孔八车道双向矩形城市市政隧道,现场平面布置如图 1 所示。隧道掘进长度为 265.6 m,3‰下坡,均采用矩形顶管盾构法施工。掘进设备为中铁装备生产的天妃系列矩形顶管盾构机,顶管管节为整体式混凝土管节,外径 12.6 m×7.65 m,壁厚 0.8 m,标准管节长度 1.8 m。

该工程为目前国内顶进距离最长、且首条同时近接下穿既有已运营高铁和待建高铁的超大矩形顶管盾构城市隧道。既有杭深线高铁设计最高运营时

速 250 km/h, 近接施工段采用有砟轨道, 共 10 股股道, 3 股有缝 7 股无缝, 采用混凝土 II 型轨枕。顶管管节顶板与杭深线高铁路基距离约 2.4~3.8 m。待建福厦高铁设计最高运营时速 350 km/h, 采用无砟轨道, 共 3 台 7 线+5 股存车道, 亦采用混凝土 II 型轨枕, 顶管盾构段拱顶距离高铁道床底最小距离 4.2 m。矩形顶管盾构与地层横断面示意图如图 2 所示 (以某里程为例)。矩形顶管盾构施工现场如图 3 所示。

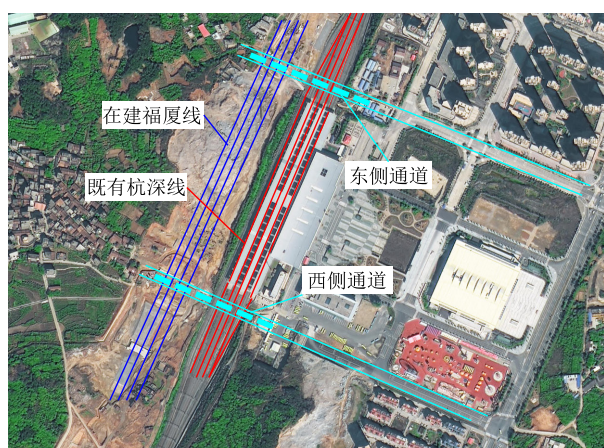


图 1 总平面位置示意图

Fig.1 Schematic diagram of general layout

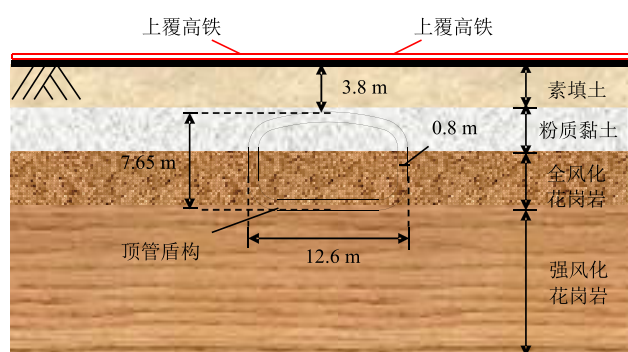


图 2 典型工程断面图 (以某里程为例)

Fig.2 Typical project section (with a certain mileage as an example)

依据规范和南昌铁路局规定^[21], 超大矩形顶管盾构隧道近接下穿施工期间高铁轨道沉降需控制在 ± 2 mm 内。如何在保证超大矩形顶管盾构隧道施工稳定的前提下, 尽可能减小顶管推进对既有已运营高铁和待建高铁的影响, 保证既有高铁的安全运营和待建高铁的安全施工是该工程的难点之一。

2.2 工程地质

矩形顶管盾构隧道区间地质主要为素填土、粉质黏土、全风化花岗岩及中风化花岗岩。以西侧通道为例 (见图 4), 顶管盾构始发段+下穿待建福厦



图 3 工程概况

Fig.3 Project profile

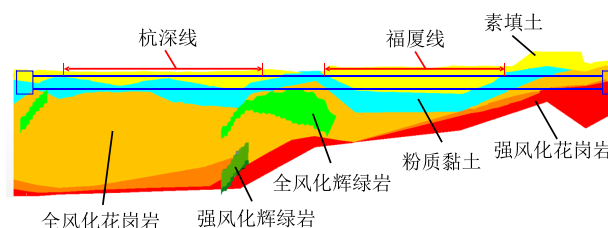


图 4 工程地质

Fig.4 Engineering geology profile

高铁段 (0~100 m) 洞身主要为粉质黏土、全风化花岗岩; 中间段 (100~138 m) 主要为粉质黏土、全风化花岗岩; 下穿既有杭深线段主要为粉质黏土和素填土; 接收段主要为全风化、中风化花岗岩, 此外, 在实际掘进中还发现球状中风化花岗岩孤石。隧道地质条件复杂, 工程自身施工风险等级、周边环境风险等级及施工监测等级均为一级^[22]。

2.3 顶管盾构隧道施工工艺

超大矩形顶管盾构施工主要包括顶管盾构安装和调试、管节预制、储存和就位、防水施作、管节顶进、渣土外运、置换浆液等, 顶管盾构隧道正常掘进工艺如图 5 所示, 部分关键步骤如图 6 所示。

2.4 精细化模型

以某超大矩形顶管盾构涉铁工程西侧通道近接下穿杭深线高铁为背景, 建立超大矩形顶管施工精细化模型, 如图 7 所示。模型长、宽、高分别为 95、54、40 m, 隧道埋深 4.2 m, 管节尺寸依据现场取得, 掘进深度取 30 环管节 (54 m)。高铁轨道位于模型上表面中央处, 与顶管空间上正交, 高铁地基层嵌入土层, 枕木与地基采用绑定连接, 轨

道与轨枕采用 3 向阻尼连接。模型中土体、道砟采用摩尔-库仑模型，管节、轨枕和轨道采用弹性模型。

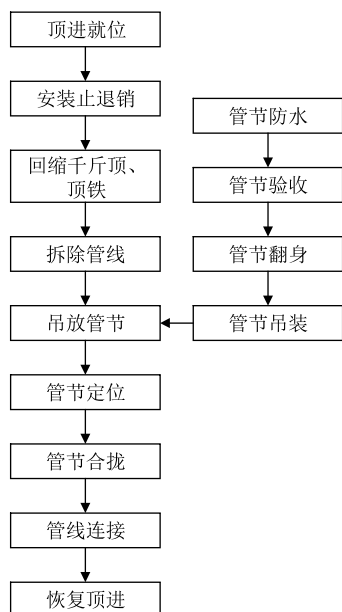


图 5 管节正常顶进工艺

Fig.5 Segment jacking construction technology



(a) 顶管盾构机拼装 (b) 装备调试 (c) 管节预制



(d) 管节储存 (e) 管节运输 (f) 管节防水



(g) 管节下井 (h) 管节顶进 (i) 渣土运输

图 6 顶管盾构关键施工步骤

Fig.6 Key construction steps of pipe jacking shield

矩形顶管盾构隧道掘进施工模拟步骤如下：①开挖首环管节前 1.8 m 土体，给首环管节施加 1.8 m 位移模拟管节顶进；②开挖首环管节前 1.8 m 范围内土体，给第 2 环管节施加 1.8 m 位移，第 1~2 环管节共同顶进；③继续开挖首环管节前 1.8 m 范围

内土体，给第 3 环管节施加 1.8 m 位移，第 1~3 环管节共同顶进；④继续开挖首环管节前 1.8 m 范围内土体，给第 4 环管节施加 1.8 m 位移，第 1~4 环管节共同顶进；以此类推，直至第 30 环管节顶进完成，矩形顶管盾构掘进完成。

模型中土体开挖采用生死单元法，用面-面接触模拟顶管管节与围岩之间、管节与管节间的相互作用，接触参数依靠大量试算测得。顶管掘进中假设开挖面无主（被）动失稳现象，约束掌子面法向位移。

计算参数由地勘报告、室内试验和大量试算取得，见表 1 所示。考虑到矩形管节超大尺寸，共布置 20 个测点，测点分布如图 8 所示。

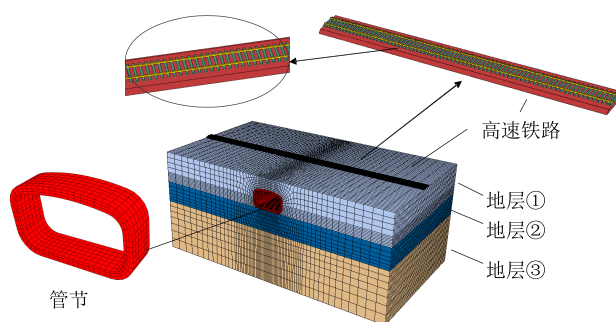


图 7 计算模型

Fig.7 Numerical model

表 1 计算参数

参数	密度 /(kg · m ⁻³)	弹性模量 /MPa	泊松比	内摩擦角 /(°)	黏聚力 /MPa
素填土	1 860	210	0.37	20	0.005
全风化花岗岩	2 500	6 000	0.25	45	1.000
管节	2 500	3.45×10 ⁴	0.20	—	—
轨道	7 800	2.06×10 ⁵	0.23	—	—
道砟	2 500	130	0.35	—	—
轨枕	2 450	3.15×10 ⁴	0.20	—	—
地基	2 300	2.80×10 ⁴	0.33	—	—

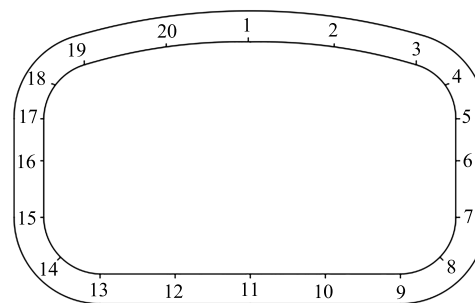


图 8 管节监测点布置

Fig.8 Arrangement of measuring points

2.5 计算结果分析

本文选取轨道变形（见图 9）和管节安全系数（见图 10）分别表征顶管盾构隧道近接下穿高速铁路施工时高速铁路和顶管盾构管节的安全稳定性，安全系数参照《公路隧道设计规范 第 1 册 土建工程》（JTG 3370.1—2018）^[23]计算得到。图 10 中环向数值为测点号，径向为最小安全系数值。

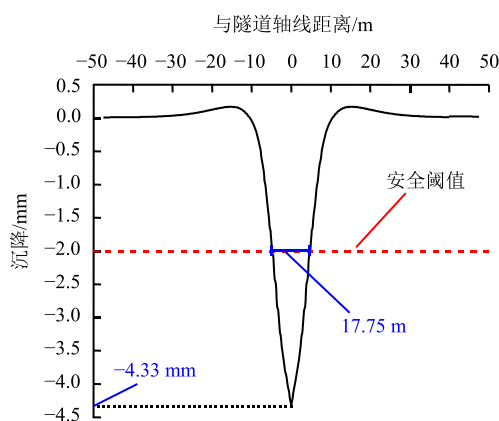


图 9 轨道变形

Fig.9 Track deformation

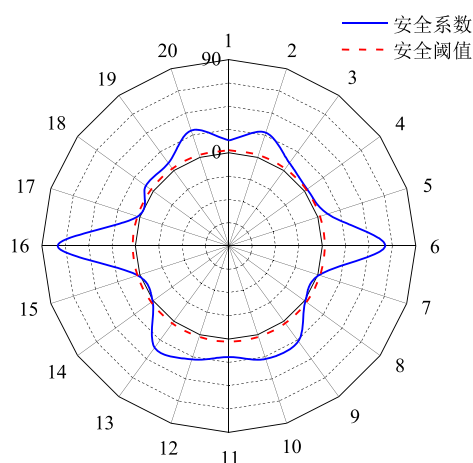


图 10 安全系数

Fig.10 Safety factor

由图 9 可知，超大矩形顶管盾构近接下穿高铁掘进后，高铁轨道沉降最大值可达 -4.33 mm ，远超安全阈值（ 2 mm ），轨道危险段长度为 17.75 m 。由图 10 可知，轨道正下方管节（第 15 环）安全系数在测点 7、8、14、15 处分别为 1.18、1.04、0.71、2.15，均小于安全阈值，顶管管节失稳破坏。

综上所述，超大矩形顶管盾构在软弱岩中近接穿越高铁时轨道变形和管节安全系数均超出安全阈值，在施工时须对该段采用施工加固方案。

2.6 安全影响因素分析

结合本文数值模拟、既有文献及本工程现场经

验可知，顶管盾构近接下穿施工中安全影响因素主要包括：①顶管盾构施工参数；②施工段地质条件；③既有结构安全控制措施；④施工监测反馈等方面。

影响顶管盾构安全性的施工参数主要包括减摩浆液注入、刀具磨损情况、顶管盾构推进速度控制、土仓内压力控制、管片止推装置应用、中继间安装施工、顶管盾构纠偏等。施工地质方面需要考虑顶管盾构穿越复杂地质（如软弱土层、复合地层、孤石等）时顶管盾构稳定性和对上覆结构安全性的影响。既有结构安全控制措施指顶管盾构施工中需对遭受到施工影响的结构采取必要的控制措施，以尽可能减小或消除施工影响。施工监测反馈方面，顶管盾构下穿施工前、施工中和施工后需对自身及周边不间断监测，保证顶管盾构及周边环境的施工安全性，同时及时调整优化施工参数，提高掘进施工效率。

3 施工加固方案优选

3.1 加固方案

参照文献和相关工程经验^[24-25]，拟对超大矩形顶管隧道下穿施工段采用超前注浆、人工挖孔桩+D 型钢便梁和桩板结构加固方案的效果进行研究。超前注浆范围拟定为沿隧道径向 3 m 范围，纵向取 9 m （5 环），采用惰性浆液；人工挖孔桩桩径 1.5 m ，高 15 m ，嵌岩设置，D 型钢便梁型号选用 D20，直接架设在人工挖孔桩顶部；桩板结构中顶板宽 7.2 m ，厚 1.5 m ，桩直径 1.5 m ，桩高 14 m ，沿高铁行进方向桩间距取 18 m ，顶板与上覆高铁地基间距取 0.40 m 。计算模型如图 11 所示。

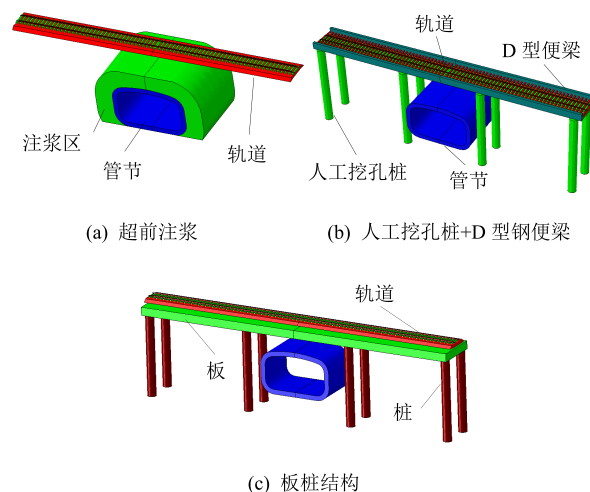


图 11 计算模型

Fig.11 Numerical model

3.2 加固效果分析

3.2.1 轨道沉降分析

软弱地层中超大矩形顶管盾构隧道近接下穿高铁段采用 3 种施工加固方案后轨道变形如图 12 所示。

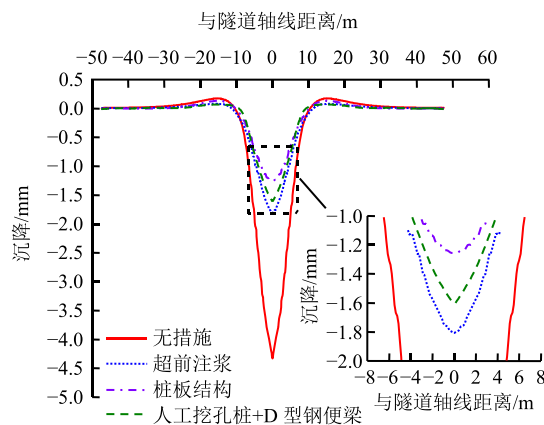


图 12 采取加固方案后轨道变形

Fig.12 Track settlement after adopting reinforcement measures

由图 12 可知:

(1) 采用超前注浆加固方案后, 轨道沉降由 4.33 mm 减小至 1.81 mm, 相比于不采取加固方案时减小 58.20%, 小于沉降控制值 (2 mm), 上覆轨道安全稳定。

(2) 采用人工挖孔桩+D 型钢便梁加固方案后, 轨道沉降降至 1.60 mm, 相比无加固方案时减小了 63.05%, 小于沉降控制值 (2 mm), 高铁轨道安全稳定。

(3) 采用桩板结构方案后, 轨道沉降为 1.26 mm, 相比无加固方案时减小了 70.90%, 小于沉降控制值 (2 mm), 高铁轨道安全稳定。

3.2.2 管节安全性能分析

计算不同加固方案下超大矩形顶管盾构隧道掘进后高铁正下方管节的安全系数^[23], 如图 13 所示。

由图 13 可知:

(1) 采用超前注浆加固方案后管节最小安全系数提高至 1.35, 在左拱脚处依旧低于安全阈值, 此时顶管盾构施工仍存在失稳风险。

(2) 采用人工挖孔桩+D 型钢便梁加固方案后, 管节最小安全系数增至 9.49, 远超规范安全阈值, 管节安全稳定。

(3) 采用桩板结构加固方案后, 管节最小安全系数增至 9.00, 大于规范安全阈值, 管节安全稳定。

综合上覆高铁轨道沉降和管节安全系数, 采用超前注浆加固方案不能满足近接施工安全稳定要求; 采用人工挖孔桩+D 型钢便梁加固方案和桩板结构加固方案后均满足施工稳定要求, 桩板结构在轨道变形控制方面略优于人工挖孔桩+D 型钢便梁。

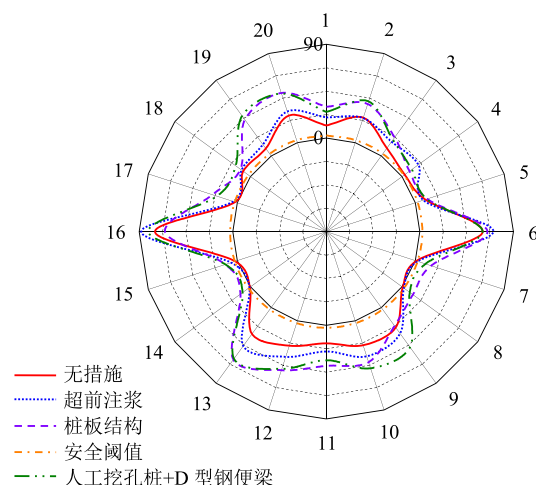


图 13 采取加固方案后管节安全系数

Fig.13 Safety factor of segment after taking reinforcement measures

考虑到桩板结构施作影响高铁正常运营, 甚至有导致高铁停运的风险, 人工挖孔桩施作对既有铁路的影响远小于桩板结构, 故推荐在穿越待建高铁线路时可采用桩板结构加固方案, 在下穿既有高铁段采用人工挖孔桩+桩板结构加固方案。

4 施工加固方案现场应用及分析

4.1 顶管盾构下穿待建福厦高铁加固方案

该超大矩形顶管盾构隧道近接下穿待建福厦高铁段采用桩板结构加固方案, 桩基采用钻孔灌注桩, 嵌入岩层深度不少于 1.5 m。桩板结构厚 1.5 m, 采用 C45 混凝土浇筑, 板底与管节间距为 0.40 m。路基采用螺杆桩加固, 桩径 0.5 m, 间距 2.0 m, 桩长 22 m, 为 C25 混凝土桩, 加固方案示意如图 13 所示, 现场施工如图 15 所示。

福厦线处于建设状态, 正进行道床施工, 为确保顶管穿越不对其造成影响。顶管盾构隧道穿越前需对全套机械设备进行彻底检查, 保证其顶进时具有良好的性能。顶进期间, 需严格控制顶管的施工参数, 防止超、欠挖; 严格控制顶管顶进的纠偏量, 减小对正面土体的扰动。施工过程中顶进速度不宜过快, 控制在 15 mm/min 左右, 尽量做到均衡施工, 避免在途中有较长时间的耽搁。在穿越过程中, 必

须保证持续、均匀压浆,使出现的建筑空隙能被迅速得到填充,保证管节上部土体的稳定。同时,下穿待建福厦高铁过程中,加强施工监测,及时反馈监测情况,并根据监测情况合理调整施工参数及施工措施。

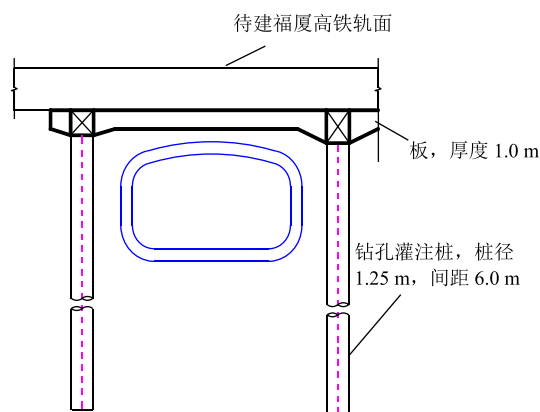
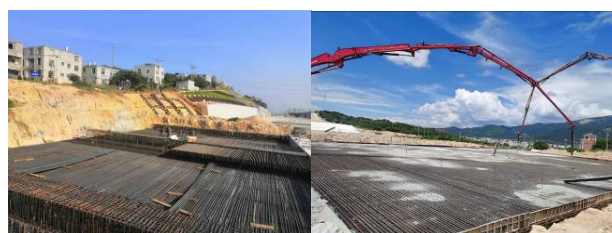


图 14 顶管盾构下穿福厦高铁加固措施
Fig.14 Reinforcement measures for pipe jacking shield under Fuzhou Xiamen high speed railway



(a) 钢筋绑扎

(b) 混凝土浇筑



(c) 模板拆除

图 15 桩板结构关键施工步骤

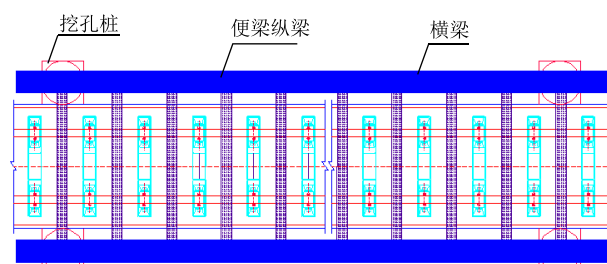
Fig.15 Key construction steps of pile-slab structure

4.2 顶管盾构下穿既有杭深线高铁加固方案

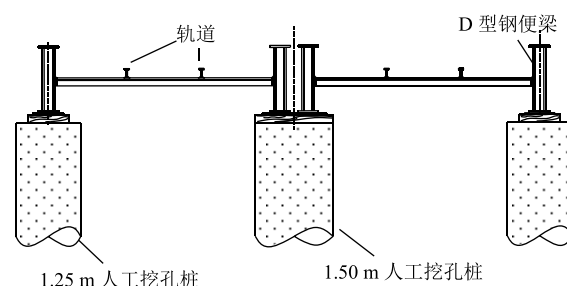
某超大矩形顶管盾构隧道近接穿越既有杭深线段工点全长 82 m, 线路加固采用 35 根人工挖孔桩+24 组 D 型钢便梁+23 组 D20 便梁+1 组 D24 便梁, 加固方案如图 16 所示。

D 型钢便梁固定在扩大基础及抗滑梁上, 横梁间距 0.67 m, 钢轨与横梁、横梁与纵梁之间采用新型绝缘扣件防止轨道联电。扩大基础尺寸 1.50 m×

1.50 m×1.50 m, 人工挖孔桩高 15 m, 直径为 1.25 m 和 1.50 m, 下穿施工总体顺序如图 17 所示, 现场施工如图 18 所示。



(a) D 型便梁俯视图



(b) 剖面图

图 16 人工挖孔桩+D 型钢便梁加固方案

Fig.16 Reinforcement scheme of manually dug pile + D-shaped beam

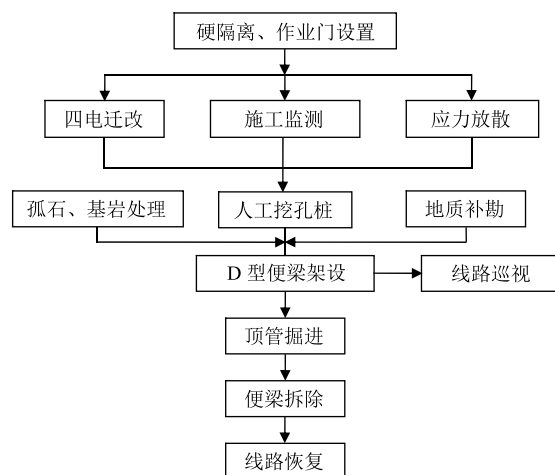


图 17 矩形顶管盾构下穿杭深线施工顺序

Fig.17 Construction sequence of pipe jacking under Hangzhou-Shenzhen railway

顶管盾构下穿杭深高铁前人工挖孔桩+D 型钢便梁需安装验收完成并达到列车放行条件。同时, 下穿施工前应对盾构刀盘刀具和盾构设备做好检查, 避免在股道下方停机检修和更换刀具作业, 确保盾构机匀速、连续下穿既有杭深线铁路。此外, 本工程在下穿既有杭深线影响区域前 36 m 设置顶管试验段, 通过试验段的掘进优化盾构施工参数,

减小对地层的扰动。待参数优化完成进行下穿顶进施工，穿越完成后 20 m 为保护段。试验段、下穿段和保护段均需严格控制土体沉降及位移，加强线路巡视，确保铁路运营的安全。



(a) 人工挖孔桩

(b) D 型钢便梁

图 18 人工挖孔桩+D 型钢便梁施工

Fig.18 Construction of manually dug digging pile + D-shaped beam

4.3 监测系统

超大矩形顶管盾构下穿高铁期间对桩板结构、D 型钢便梁、轨道、人工挖孔桩桩顶、路基等进行不间断监测^[21]。轨道变形监测系统采用激光雷达探测技术和双目立体视觉技术，结合无线传输技术，可实现自动化、非接触、全天候的轨道几何状态监测，其结构如图 19 所示。

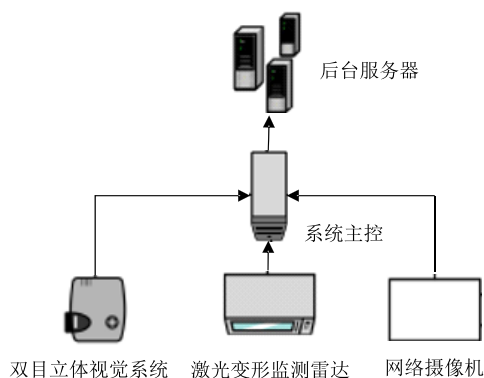


图 19 轨道变形监测系统

Fig.19 Track deformation monitoring system

监测仪器主要包括：GRST-1A 轨道几何状态监测仪、TH-STC-2000 静力水准仪、徕卡 TS09 全站仪、TH-INC-T90L 无线倾斜仪等，部分监测仪器如图 20 所示。监测频率见表 2，监测控制采用轨道沉降和变形速率双控指标，见表 3。

4.4 监测结果分析

4.4.1 近接下穿福厦高铁施工段

超大矩形顶管盾构隧道近接下穿福厦高铁桩板结构时出现最大地表沉降的测点数据如图 21 所

示，共取 30 个开挖循环，测点位于第 15 环管节正上方。



(a) 全站仪

(b) 高清摄像头

(c) 轨道几何状态监测仪



(d) 激光雷达

(e) 路基监测水准仪

(f) 钢便梁监测水准仪

图 20 监测设备

Fig.20 Monitoring instrument

表 2 监测频率

Table 2 Monitoring frequency

阶段	变形监测频率
施工前	连续观测 7 d，取平均值为初始值
施工期间	不少于 4 次/d
施工结束后	1 次/d
主体工程结束后	1 次/7 天，持续观测一个月

表 3 监测控制值

Table 3 Monitoring control value

监测项目	预警值		控制值	
	累计值 /mm	速率 /(mm · d ⁻¹)	累计值 /mm	速率 /(mm · d ⁻¹)
轨道沉降	±1.6	0.8	±2	1
路基、桩顶及扩大基础沉降	-6~3	连续 2 d 大于 1	-8~4	连续 3 d 大于 1
施工便梁沉降	-6~3	连续 2 d 大于 1	-8~4	连续 3 d 大于 1
管节竖向收敛	-6~14	连续 2 d 大于 2	-8~16	连续 3 d 大于 2
管节横向收敛	±6	连续 2 d 大于 2	±8	连续 3 d 大于 2
建(构)筑物倾斜	0.3/%	—	0.4/%	—
地表沉降	-6~14	连续 2 d 大于 2	-8~16	连续 3 d 大于 2

由图 21 可知，采用桩板结构加固方案后，超大矩形顶管盾构隧道近接下穿福厦高铁段地表最大沉降仅为 3.25 mm，远低于控制阈值(-16~8 mm)，顶进施工中其他控制指标(管节收敛、既有结构变形等)均满足要求，超大矩形顶管盾构隧道顺利穿越待建福厦高铁。

4.4.2 近接下穿杭深线施工段

以轨道变形监测结果为例,研究人工挖孔桩+D型钢便梁和桩板结构在矩形顶管盾构下穿高铁的加固效果,轨道几何监测系统位移如图 22 所示(以 2021 年 9 月 26 日 21:00 至 2021 年 9 月 28 日 18:00 某测点数据为例)。

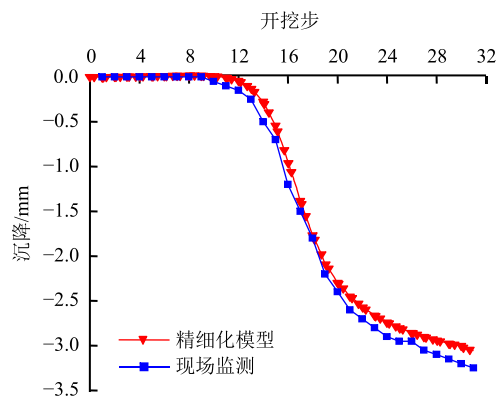
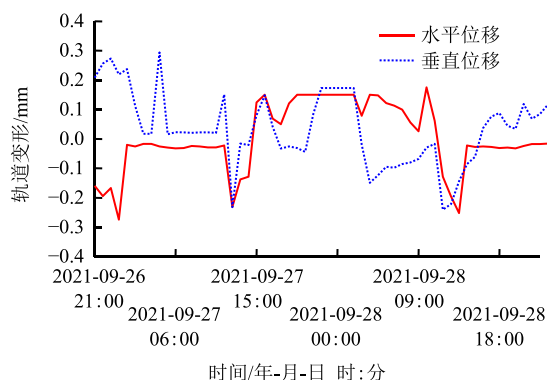
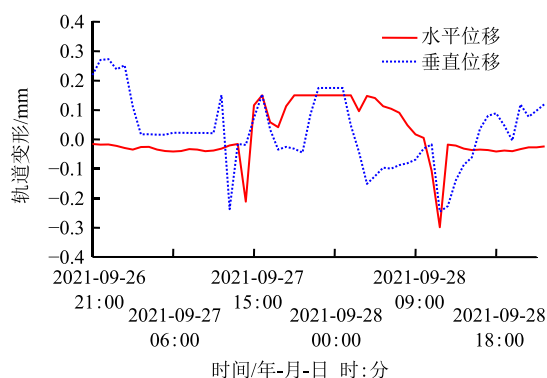


图 21 地表沉降

Fig.21 Surface settlement



(a) 测点 1



(b) 测点 2

图 22 现场监测数据

Fig.22 Data of field monitoring

由现场数据提取顶管盾构近接下穿杭深线施工完成后轨道变形数据,如图 23 所示(以顶管正上方测点为例)。

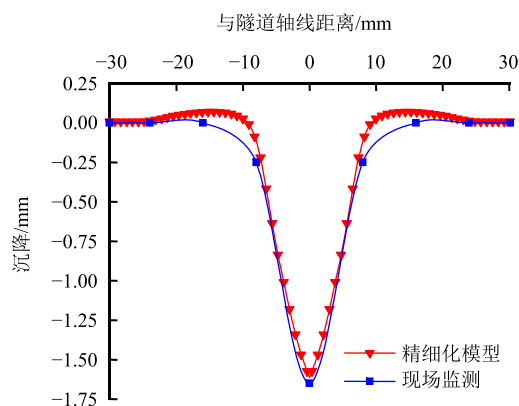


图 23 杭深线轨道沉降

Fig.23 Track settlement of Hangzhou-Shenzhen Railway

由图 23 可知:

(1) 软弱地层中超大矩形顶管盾构隧道近接下穿高铁段在采用人工挖孔桩+D型钢便梁加固后,轨道最大变形仅为 1.65 mm,低于控制阈值(2 mm);现场监测和精细化模型的沉降变化规律相同,轨道变形误差在 0.2 mm 以内。

(2) 软弱地层中超大矩形顶管盾构下穿高铁段在采用了人工挖孔桩+D型钢便梁后,轨道变形、地表沉降等均远小于控制值,顶管盾构施工期间未发生沉降和轨道变形超限现象,采用人工挖孔桩+D型钢便梁保证了超大矩形顶管盾构施工安全稳定性。

4.5 综合对比分析

由数值模拟和现场应用结果可知,本文超大矩形顶管盾构隧道近接下穿高铁工程采用超前注浆不能满足近接施工的安全要求,采用人工挖孔桩+D型钢便梁和桩板结构均可保证近接施工安全稳定和上覆高铁的安全运营。

顶管盾构隧道近接下穿既有已运营高铁时,对场地要求苛刻,若采用桩板结构加固则工程量巨大且施工影响较大,势必影响上覆高铁的正常运营,此时采用人工挖孔桩+D型钢便梁且在加强监测的前提下可保证矩形顶管盾构成功下穿。当矩形顶管盾构隧道下穿待建上覆高铁时,施工场地条件良好,采用桩板结构加固施工简单快速,且无后期便梁拆除等工作。

综上所述,人工挖孔桩+D型钢便梁加固方案可用于超大矩形顶管盾构隧道近接下施工场地条件苛刻、已建成或已运营高铁工程中,而桩板结构加固方案可用于上覆高铁未建成(待建)、场地条件良好的工程中。

5 结 论

(1) 精细化模型结果表明, 超大矩形顶管盾构近接下穿既有高铁时轨道沉降和管节安全性能均超安全阈值, 必须采取施工加固措施。

(2) 超大矩形顶管盾构近接下穿高铁施工中, 采用超前注浆加固可使高铁轨道沉降减小 58.20%, 管节最小安全系数提高至 1.35, 采用人工挖孔桩+D 型钢便梁加固可使高铁轨道沉降减小 63.05%, 管节最小安全系数增至 9.49, 采用桩板结构方案可使高铁轨道沉降减小 70.90%, 管节最小安全系数增至 9.00。

(3) 人工挖孔桩+D 型钢便梁加固方案和桩板结构加固方案的效果明显优于超前注浆的加固效果, 推荐在下穿待建高铁段采用桩板结构加固方案, 在下穿既有高铁段采用人工挖孔桩+D 型钢便梁加固方案。

(4) 现场监测数据表明, 超大矩形顶管盾构隧道下穿待建福厦高铁段采用桩板结构加固后地表沉降最大值仅为 3.25 mm, 既有杭深线在采用人工挖孔桩+D 型钢便梁加固后轨道最大沉降仅为 1.65 mm, 均远低于沉降阈值。近接下穿施工中高铁及管节均保持安全稳定, 超大矩形顶管盾构成功下穿待建福厦高铁和既有杭深线。

参 考 文 献

- [1] 王明年, 胡萧越, 唐雄俊, 等. 大直径盾构铁路隧道火灾温度荷载及结构内力特性研究[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(1): 1-9.
WANG Ming-nian, HU Xiao-yue, TANG Xiong-jun, et al. Study on temperature loads and structural internal force characteristics of large-diameter shield-driven railway tunnels in a fire scenario[J]. **Modern Tunnelling Technology**, 2021, 58(1): 1-9.
- [2] 魏纲, 齐永洁, 吴华君, 等. 盾构下穿既有地铁隧道环向围压及受力变化[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(12): 3515-3527.
WEI Gang, QI Yong-jie, WU Hua-jun, et al. Changes in circumferential pressure and stresses in existing tunnels caused by tunnel crossing[J]. **Journal of Central South University (Science and Technology)**, 2020, 51(12): 3515-3527.
- [3] 李围, 任立志, 孟庆明, 等. 盾构区间重叠隧道下穿高速铁路轨道群加固技术体系研究[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(6): 191-196.
LI Wei, REN Li-zhi, MENG Qing-ming, et al. Study on reinforcing technology system for the overlapped running shield tunnels underneath the track group of high speed railways[J]. **Modern Tunnelling Technology**, 2018, 55(6): 191-196.
- [4] 朱垚锋, 田书广, 倪金鹏, 等. 城际铁路盾构隧道下穿四孔箱涵引起沉降分析[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(11): 116-121.
ZHU Yao-feng, TIAN Shu-guang, NI Jin-peng, et al. Analysis of four-hole culvert settlement caused by underlying shield tunnel of intercity railway[J]. **China Safety Science Journal**, 2018, 28(11): 116-121.
- [5] 孙连勇, 黄永亮, 王启民, 等. 地铁盾构隧道下穿既有铁路变形控制研究[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(5): 140-145.
SUN Lian-yong, HUANG Yong-liang, WANG Qi-min, et al. Study of controlling measures for existing railway deformation caused by metro shield tunnel under-passing construction[J]. **Modern Tunnelling Technology**, 2018, 55(5): 140-145.
- [6] 王志超, 甘露, 赖金星, 等. 盾构下穿铁路路基钢轨变形及路基沉降分析[J]. 深圳大学学报(理工版), 2018, 35(4): 389-397.
WANG Zhi-chao, GAN Lu, LAI Jin-xing, et al. Analysis of track deformation and subgrade settlement of shield tunnel construction crossing existing railway[J]. **Journal of Shenzhen University (Science and Engineering)**, 2018, 35(4): 389-397.
- [7] 许怀. 泄水洞超小净距下穿高速铁路隧道设计[J]. 铁道工程学报, 2018, 35(6): 41-46.
XU Huai. Design of high speed railway tunnel with ultra-small net distance[J]. **Journal of Railway Engineering Society**, 2018, 35(6): 41-46.
- [8] 李军, 雷明锋, 林大涌. 城市地铁盾构隧道下穿运营铁路施工控制技术研究[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(2): 174-179.
LI Jun, LEI Ming-feng, LIN Da-yong. Construction control technology for an urban subway shield tunnel underneath an operational railway[J]. **Modern Tunnelling Technology**, 2018, 55(2): 174-179.
- [9] 杨俊龙, 门燕青, 廖少明, 等. 大直径盾构浅覆土下穿铁路桥涵的影响分析及施工控制[J]. 上海交通大学学报, 2019, 53(3): 297-304.
YANG Jun-long, MEN Yan-qing, LIAO Shao-ming, et al. The effect and construction control of large diameter shield tunneling under railway culvert[J]. **Journal of Shanghai Jiao Tong University**, 2019, 53(3): 297-304.
- [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 Zhi-guo, SHI Min-zhi, ZHANG Cheng-ping, 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] 刘世行. 浅埋暗挖矩形隧道近距离穿越既有地铁高架桥影响研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- LIU Shi-xing. Impact research of shallow buried rectangular tunnel undercrossing existing subway bridge in short distance[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.
- [12] 马文辉, 杨成永, 彭华, 等. 大直径泥水盾构下穿地铁挡墙路基沉降控制[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2020, 47(3): 44-53.
- MA Wen-hui, YANG Cheng-yong, PENG Hua, et al. Settlement control on retaining wall embankment affected by underneath traversing large-diameter slurry shield tunnels[J]. **Journal of Hunan University (Natural Sciences)**, 2020, 47(3): 44-53.
- [13] 杜虎. 不良地层盾构区间穿越既有铁路技术研究[J]. 铁道工程学报, 2020, 37(4): 63-68.
- DU Hu. Research on the technology of shield tunneling through existing railway in weak stratum[J]. **Journal of Railway Engineering Society**, 2020, 37(4): 63-68.
- [14] LÜ J B, LI X L, LI Z R, et al. Numerical simulations of construction of shield tunnel with small clearance to adjacent tunnel without and with isolation pile reinforcement[J]. **KSCE Journal of Civil Engineering**, 2020, 24(1): 295-309.
- [15] 赵太东. 泥岩地层盾构隧道下穿既有成昆铁路无预加固施工安全分析[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(3): 122-127.
- ZHAO Tai-dong. Analysis on construction safety of a shield tunnel beneath existing Chengdu-Kunming Railway without pre-reinforcement in argillite[J]. **Modern Tunnelling Technology**, 2020, 57(3): 122-127.
- [16] 朱正国, 方智淳, 马超义, 等. 浅埋偏压连拱隧道穿越古建筑施工控制研究[J]. 铁道工程学报, 2021, 38(5): 71-76.
- ZHU Zheng-guo, FANG Zhi-chun, MA Chao-yi, et al. Research on the construction control of shallow-buried unsymmetrical pressure double-arch tunnel crossing ancient buildings[J]. **Journal of Railway Engineering Society**, 2021, 38(5): 71-76.
- [17] AYASRAH M, QIU H, ZHANG X. Influence of Cairo metro tunnel excavation on pile deep foundation of the adjacent underground structures: numerical study[J]. **Symmetry**, 2021, 13(3): 426.
- [18] 林庆涛, 路德春, 雷春明, 等. 下穿施工时盾构-卵石地层-既有隧道相互作用模型试验研究[J]. 北京工业大学学报, 2021, 47(4): 328-337.
- LIN Qing-tao, LU De-chun, LEI Chun-ming, et al. Model test study on interaction between shield-cobble strata-existing tunnels during under-crossing process[J]. **Journal of Beijing University of Technology**, 2021, 47(4): 328-337.
- [19] XIE X, YE B. Numerical analysis on large-section pipe jacking within close distance in soft soil[C]//International Foundations Congress and Equipment Expo. New York: American Society Civil Engineers, 2021.
- [20] 金鑫. 大断面矩形顶管下穿京杭大运河土体扰动规律及控制技术[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
- JIN Xin. Disturbance law and control technology of soil mass around large section rectangular pipe jacking through Beijing Hangzhou Grand Canal[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.
- [21] 国家铁路局. TB 10314—2021邻近铁路营业线施工安全监测技术规程[S]. 北京: 中国铁道出版社有限公司, 2021.
- National Railway Administration of the People's Republic of China. TB 10314—2021 Technical specification for safety monitoring of operating railway infrastructures with adjacent constructions[S]. Beijing: China Railway Publishing House Co. Ltd., 2021.
- [22] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50911—2013城市轨道交通工程监测技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB 50911—2013 Code for monitoring measurement of urban rail transit engineering[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013.
- [23] 中华人民共和国交通运输部. JTG 3370.1—2018 公路隧道设计规范 第一册 土建工程[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.
- Ministry of Transport of the People's Republic of China. JTG 3370.1—2018 Specifications for design of highway tunnels section 1 civil engineering[S]. Beijing: China Communications Press Co. Ltd., 2018.
- [24] 赵立财. 浅埋大跨径软土地层公路隧道下穿既有铁路车站路基施工技术[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(6): 160-166.
- ZHAO Li-cai. Construction techniques for a shallow-buried long-span highway tunnel in soft soil passing under the subgrade of an existing railway station[J]. **Modern Tunnelling Technology**, 2014, 51(6): 160-166.
- [25] 陈海丰, 袁大军, 王飞, 等. 软弱地层地铁盾构下穿高铁的安全控制技术研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(增刊1): 256-260.
- CHEN Hai-feng, YUAN Da-jun, WANG Fei, et al. Study on safe control of metro shield underpassing high-speed railway in weak stratum[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2015, 48(Suppl.1): 256-260.