

大直径海底盾构隧道施工过程中衬砌管片受力分析*

麻凤海¹ 郑叶琳¹ 王洪亮²

(1. 大连大学建筑工程学院, 116622, 大连; 2. 北京安捷工程咨询有限公司, 116021, 大连)

摘要 [目的]为判定海底大直径盾构隧道结构工程的安全性和可靠性,需对其衬砌管片的受力进行分析。[方法]以大连地铁5号线大连站站—梭鱼湾南站区间海底盾构隧道衬砌管片为研究对象,利用MIDAS GTS有限元分析软件对该盾构隧道结构和周围岩体进行建模,得出施工一段时间后衬砌管片的受力情况,并与现场监测数据、理论计算数据进行对比分析。[结果及结论]衬砌管片所受土压力随施工推进基本稳定;同一监测断面不同测试点土压力存在一定差异,拱顶和拱底位置处受力较大,因此在隧道施工期以及未来运营期,拱顶和拱底均为着重关注部位,可通过一定物理手段对其加强处理;现场监测数据和数值模拟数据显示,衬砌管片内力结果较为接近,在一定简化条件下,数值模型能够较为真实地反映衬砌管片的实际受力情况。

关键词 海底隧道;大直径盾构隧道;衬砌管片;管片受力

中图分类号 U456.3⁺¹

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.08.028

Stress Analysis of Large-diameter Undersea Shield Tunnel Lining Segments during Construction Process

MA Fenghai¹, ZHENG Yelin¹, WANG Hongliang²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Dalian University, 116622, Dalian, China; 2. Beijing Anjie Engineering Consulting Co., Ltd., 116021, Dalian, China)

Abstract [Objective] To assess the engineering safety and reliability of undersea large-diameter shield tunnel structures, it is essential to analyze the stress on lining segments. [Method] Taking the lining segments of Dalian Railway Station – Suoyuwan South Station Interval undersea shield tunnel on Dalian Metro Line 5 as research object, MIDAS GTS finite element analysis software is used to model the shield tunnel structure and the surrounding rock mass. The stress on lining segments after a period of construction is obtained and comparatively analyzed with field monitoring and theoretical calculation data. [Result & Conclusion] The earth pressure on lining segments remains relatively stable as construction progresses. There are certain differences in earth pressure at different points on the same mo-

onitoring section, with the arch vault and bottom experiencing higher stress. Therefore, during both the construction and future operation periods of the tunnel, the arch vault and bottom should be areas of key focus and be reinforced through physical measures. The onsite monitoring and numerical simulation data indicate that the internal forces on lining segments are quite similar. Under certain simplified conditions, the numerical model can quite realistically reflect the actual stress conditions of lining segments.

Key words undersea tunnel; large-diameter shield tunnel; lining segment; segment stress

0 引言

随着城市轨道交通的建设发展,针对盾构隧道衬砌管片应力的研究已经较为广泛^[1-2]。国内已成功建成许多直径为6 m左右的城市轨道交通盾构隧道,可供参考的数据较为充分^[3-4],但对于直径大于10 m的大断面盾构隧道而言,不同地质条件下管片受力不尽相同,不同工程间的通用之处相对减少,需因地制宜分析^[5-6]。目前,采用工程类比和数值模拟方法对工程进行分析监测,是最为有效的分析方法^[7-10]。

为判定海底大直径盾构隧道结构工程的安全性和可靠性,本文以大连地铁5号线(以下简称“5号线”)大连站站—梭鱼湾南站区间(以下简称“大梭区间”)海底隧道为工程背景,采用加拿大ROCT-EST公司生产的土压力计和渗压计对盾构隧道衬砌管片进行现场监测。研究成果可用来判定隧道结构工程是否安全可靠,亦可为类似工程设计和施工提供参考。

1 工程概况

5号线大梭区间海底隧道以大连站站为起点,由南向北敷设,下穿香炉礁海域后,以梭鱼湾南站

* 辽宁省自然科学基金项目(51474045)

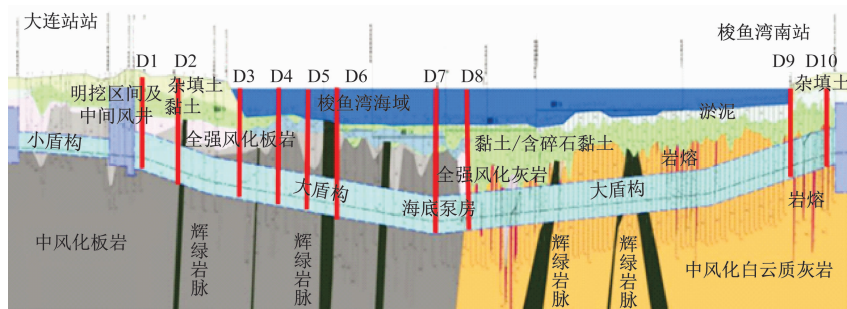
为终点。该隧道全长为 3 317.044 m,其中盾构在海下的施工长度达 2 310.000 m。在大连站一侧岸边设置中间风井,线路整体纵向坡度呈 V 字形。

海底隧道外径为 11.8 m,内径为 10.8 m。隧道的设计使用年限定为 100 年。采用抗渗等级为 P12 的 C50 混凝土。盾构管片厚度为 0.5 m,宽度为 2.0 m。盾构管片采用错缝搭接;每环管片由 8 块分块组成,即 1 块封顶块、2 块邻接块及 5 块标准块;盾构管片纵、环向采用斜螺栓连接,螺栓规格为 M36。

2 大直径盾构隧道衬砌管片受力现场监测结果与分析

2.1 监测断面与测点布置

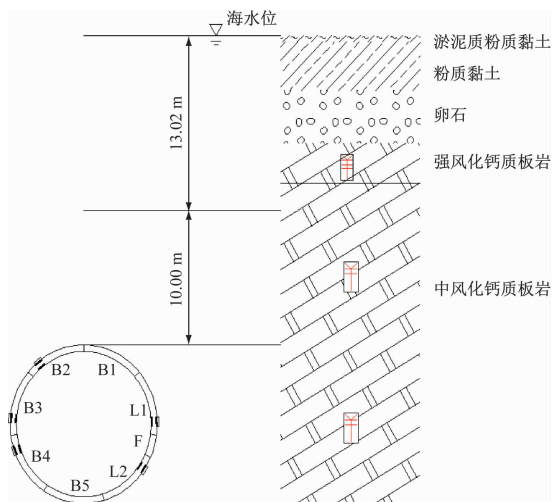
盾构隧道监测断面及测点布置应重点考虑以



注:D1—D10 为监测断面。

图 1 海底盾构隧道监测断面布置图

Fig. 1 Layout diagram of undersea shield tunnel monitoring profile



注:F、B1、B2、B3、B4、B5、L1、L2 为管片环号。

图 2 海底隧道衬砌管片测点布置横断面图

Fig. 2 Cross-sectional diagram of undersea tunnel lining segment measuring points arrangement

本文主要关注点在于:初衬与地层接触土压

下情况:①土压力和水压力较大的位置;②覆土厚度小且隧道有上浮风险的位置;③隧道结构断面出现变化的地方,以及底层条件突变处的不良地质位置等。

为保证监测系统的可靠性,在重要位置布置 2 套传感设备,方便数据互相印证,防止出现 1 套设备发生问题后无法对重点部位进行监控的情况。根据上述原则,在隧道跨海段设置 10 个监测断面。海底盾构隧道监测断面布置图如图 1 所示。

本文选取 1 个代表性监测断面 D6(第 1042 环管片),该断面里程为 K10+844.910,隧道的拱顶覆土 H 为 23.02 m,设计水深为 13.02 m。隧道拱顶和拱腰处均为中风化板岩。参照钻孔 M5Z3-THS-101,海底隧道衬砌管片测点布置横断面图见图 2。地层物理力学参数取值见表 1。

力、渗透水压力随盾构推进的变化过程。整个监测过程包含施工期和未来运营期,为施工中和竣工后提供直观的参考数据。传感器埋设位置如表 2 所示。第 1042 环衬砌管片拼装位置及压力盒埋设示意如图 3 所示。渗压计与土压力计邻近埋设,故其埋设位置与土压力计相同。

2.2 监测结果分析

对海底隧道衬砌管片进行监测的渗压计和压力传感器均为加拿大 ROCTEST 公司生产。根据现场的水文资料,视情况进一步加强海水腐蚀防护措施,保证在传感器安装前不会因产品本身产生失误。

监测断面 D6 从 2020 年 7 月 1 日第 1042 环管片安装结束后开始测试,监测过程历时 4 个多月。监测系统每天读取数据两次,由于数据量偏大,无法全部表现出来,故主要选取距离当前时间最近的数据进行分析,累计监测 40 次。监测数据不是最终的结果,需通过力学公式进行转化求解。

表 1 地层物理力学参数取值

Tab. 1 Stratum physical and mechanical parameters

地层	层厚/m	饱和重度/(kN/m ³)	侧向土压力系数	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	泊松比
淤泥质粉质黏土	0.5	18.1	0.72	6	2	0.40
粉质黏土	3.6	20.4	0.43	28	13	0.35
卵石	3.9	20.0	0.33		38	0.27
强风化钙质板岩	3.0	26.0	0.30		40	0.30
中风化钙质板岩	50.0	27.8	0.30		55	0.20

表 2 传感器埋设位置

Tab. 2 Buried position of sensors

管片环号	土压力计编号	水压力计编号
F		
L1	EPA171223	100D1702303
L2	EPA171133	100D1702302
B1		
B2	EPA171220	100D1702305
B3	EPA171225	100D1702301
B4	EPA171222	100D1702304
B5		

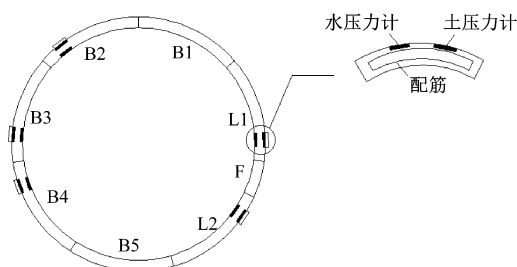


图 3 第 1042 环衬砌管片拼装位置及压力盒埋设示意图

Fig. 3 Diagram of 1042 ring lining segments assembly position and pressure box buried position

图 4 为土压力随时间变化曲线。图 5 为水压力随时间变化曲线。

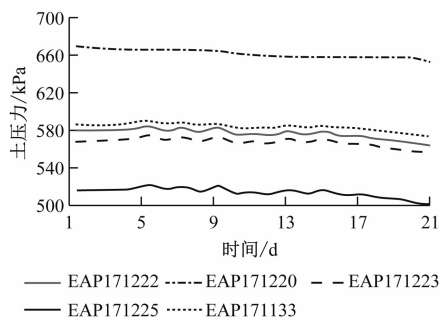


图 4 土压力随时间变化曲线

Fig. 4 Curve of earth pressure changing over time

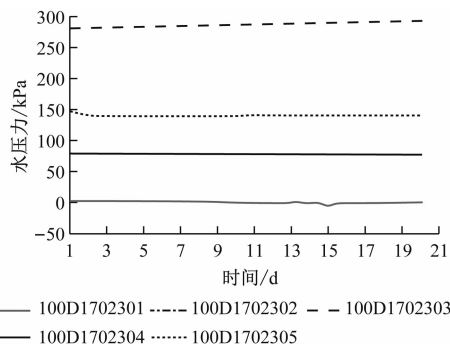


图 5 水压力随时间变化曲线

Fig. 5 Curve of water pressure changing over time

3 大直径盾构隧道衬砌管片受力计算与分析

3.1 理论计算分析

1) 竖向土压力。该管片处覆土厚度 $H < 2d$ (d 为管片直径), 拱顶土压力按实际埋深全覆土进行计算。

$$P_v = \gamma H \quad (1)$$

式中:

P_v ——竖向地层压力;
 γ ——上覆土层的平均重度;
 H ——上覆土层的厚度。

2) 侧向土压力。根据垂直土压力和静止侧压力系数确定。

3) 顶部水压力 P_{w1} 和底部水压力 P_{w2} 计算公式为:

$$P_{w1} = \gamma_w h_w \quad (2)$$

$$P_{w2} = \gamma_w (h_w + d) \quad (3)$$

式中:

γ_w ——水的重度;
 h_w ——地下水位线至隧道中心的作用水头。

根据相关理论,对 D6 断面采用水土分算,计算管片环宽取单位长度 1 m。参照 5 号线设计图纸的

土层参数,侧向土压力系数取 0.3,地层水平刚度系数取 200 MPa/m,垂直刚度系数取 200 MPa/m。通过计算得到:地面超载 $P_0 = 133.46 \text{ Pa}$, $P_v = 342.45 \text{ Pa}$,顶部侧向土压力 $P_{e1} = 122.75 \text{ Pa}$,底部侧向土压力 $P_{e2} = 185.76 \text{ Pa}$, $P_{w1} = 369.41 \text{ Pa}$, $P_{w2} = 490.36 \text{ Pa}$,拱底竖向反力 $P_2 = 355 \text{ Pa}$ 。

3.2 数值模拟计算分析

根据现场实际情况和地勘资料,本文对第 1042 环管片 D6 断面进行简化模拟。考虑到隧道开挖对周围土体的影响范围,最终确定模型边界以隧道中线为准向左、右各增加 25 m,盾构机前进方向取 30 m,竖直高度取 50 m。隧道埋深为 23.02 m,管片厚度为 0.50 m。模型边界在考虑自重及周围土体约束作用的影响下,取 Y 轴方向为隧道轴线方向。考虑到衬砌采用内外复合衬砌,根据设计要求,内衬与管片之间通过设置缓冲层来连接,使内外衬砌在一定程度上隔离,主要受力结构仍为管片结构,因此建模时可忽略内衬。

采用 MIDAS 软件建立模型时,需重点关注隧道开挖完成后管片的受力情况。参考目标管片所在地层条件,土体采用莫尔-库伦模型,混凝土管片内衬结构采用线弹性板单元模拟分析。对管片结构附近土体的网格细分,其他部位的网格则相对粗略。

3.3 对比分析

选取海底盾构隧道衬砌管片断面施工完成一段时间后的监测数据。纵视图 4 整体数据分布:衬砌管片土压力出现忽高忽低的轻微波动,总体而言趋于稳定且呈现略微降低的趋势,减少幅度约为 1.5%。由图 4 可直观看到管片拱顶土压力约为 660 kPa,拱腰 B4、L2 处土压力约为 580 kPa。此时,第 1042 环管片施工完成,已进入后期固结变形,土层与管片之间需进行长时间应力重分布。由盾构施工造成的平衡破坏仍可通过地层进行力的传导,导致土压力曲线波动。该隧道断面各点处土压力随时间变化较小,位于拱腰左右的两个监测仪器位置相对对称,可互为参照,且监测数据相差不到 5%。加之土压力计安装初期数据的缺失,使得早期土压力数据未能在图 4 中体现。

观察图 5 可见:管片不同位置处水压力差距较大。拱顶 B2 处水压力约为 150 kPa,拱腰 L1 处水压力为 260 kPa,还存在拱腰左右 B3、L2 两侧水压力为零的情况。受客观因素影响,水压力稳定本就

较为困难,加上隧道埋设较深,渗透系数较大,作用于管片上的海水压力补给较多,从而导致不同测点处出现 50% 以上的水压力差。零水压力是由于人工安装失误,渗压计不发挥作用所致。该盾构隧道采用双层衬砌,受仪表安装位置的影响,盾尾密封较严,未有水透过。尤其该盾构隧道还存在三段岩溶地段,溶洞处理对水造成的影响更为复杂。

第 1042 环管片的土压力和水压力云图由图 6—图 7 所示。由图 6—图 7 可以看出:隧道拱顶和拱底所受水、土压力明显较大,最大压力可达 720 kPa,与监测数据相差 8%;隧道两侧拱腰处所受水、土压力较小,整体大致呈轴对称分布;与 B2、B4、L2 等相应位置对比,水、土压力模拟值和监测值相差较小,拟合度相对较高,但模拟值大于监测值。

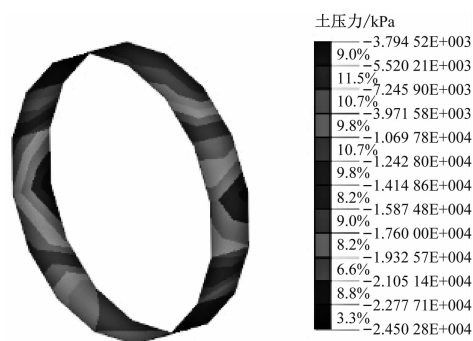


图 6 第 1042 环衬砌管片土压力云图

Fig. 6 Nephogram of 1042 ring lining segment earth pressure

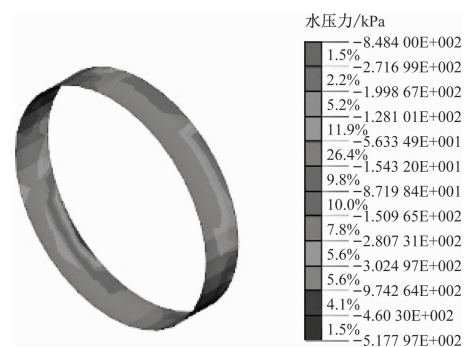


图 7 第 1042 环衬砌管片水压力云图

Fig. 7 Nephogram of 1042 ring lining segment water pressure

由图 7 可以看出:水压力在 150 kPa 左右分布较为广泛,衬砌管片个别位置存在水压力较大值。究其原因因为水压力受外界环境、施工缝隙及注浆等的影响较大,加上部分水压力计安装存在失误,使得监测结果与预期出现偏差。水压力计发挥作用

对应位置处的最大误差也达到 40%, 需谨慎对其进行处理。

即使部分水压力计未能发挥作用, 根据已掌握数据也可做出水压力曲线。衬砌管片水、土压力分布图如图 8—图 9 所示。

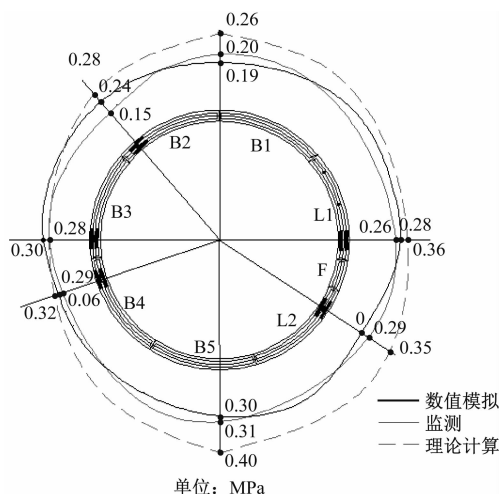


图 8 衬砌管片水压力分布图

Fig. 8 Distribution diagram of lining segment water pressure

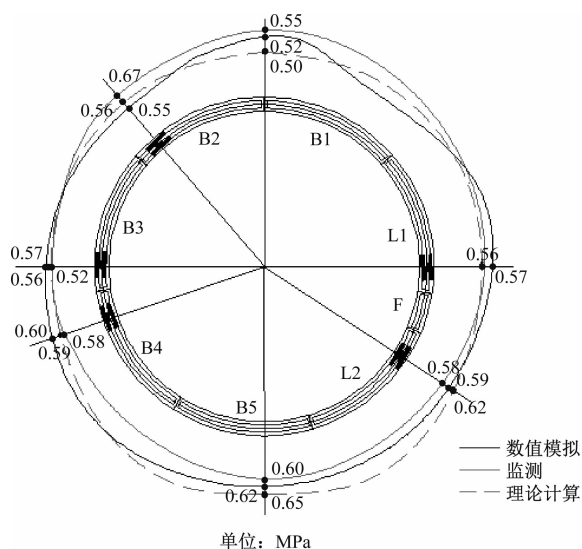


图 9 衬砌管片土压力分布图

Fig. 9 Distribution diagram of lining segment earth pressure

由图 8 和图 9 可以看出: 衬砌管片土压力数值模拟、监测及理论计算等三种曲线的吻合度更高, 尤其在拱腰位置更为明显。由此可见, 在建模过程中所采用的地层参数是精准的, 且对双层衬砌管片进行简化处理时忽略二次衬砌的做法是可取的。因水自身流体形态研究较为困难, 水压力理论计算曲线与其他两种曲线不吻合, 但水压力数值模拟曲线与监测曲线吻合度良好。由此可见, 该模型可反

映实际情况。

4 结语

1) 衬砌管片所受力随盾构向前推进进行重分布, 其数值在某一固定值上下波动, 且波动幅度较小; 同一衬砌管片断面不同测试点所受力存在差异, 其中拱顶和拱底受力相对较大, 因此盾构隧道施工期间应着重关注隧道拱顶和拱底的受力。

2) 第 1042 环管片埋深为 23.02 m, 小于隧道开挖直径的 3 倍, 可不考虑弹性抗力。对拱顶土压力采用全覆土计算, 结果均大于数值模拟值和现场监测值, 由此可见, 理论计算结果会使盾构隧道结构安全性更有保证。

3) 鉴于大直径盾构隧道自身建设困难以及解决方案的特殊性, 其结构设计无固定模板可以参考。本文仅为直径大于 10 m 的盾构隧道提供参考。

参考文献

- [1] 叶宇航, 王建, 徐文田, 等. 软土地基大直径地铁盾构隧道衬砌结构受力特性数值分析研究[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(增刊2): 151.
YE Yuhang, WANG Jian, XU Wentian, et al. Numerical analysis of mechanical behaviors of lining of large-diameter metro shield tunnel in soft ground[J]. Tunnel Construction, 2018, 38(S2): 151.
- [2] 王林峰. 超深埋盾构隧道管片结构设计新方法与实践[J]. 中国市政工程, 2017(2): 1.
WANG Linfeng. New method & practice of segmental structure design for ultra-deep shield tunnel[J]. China Municipal Engineering, 2017(2): 1.
- [3] 周济民, 何川, 方勇, 等. 黄土地层盾构隧道受力监测与荷载作用模式的反演分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(1): 165.
ZHOU Jimin, HE Chuan, FANG Yong, et al. Mechanical property testing and back analysis of load models of metro shield tunnel lining in loess strata[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(1): 165.
- [4] 谢家冲, 王金昌, 黄伟明, 等. 软土地区盾构隧道管片开裂特性实测分析及影响因素研究[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(增刊2): 180.
XIE Jiachong, WANG Jinchang, HUANG Weiming, et al. Analysis on cracking characteristics of TMB tunnel lining in soft soil area and its influencing factors[J]. Tunnel Construction, 2020, 40(S2): 180.
- [5] 罗泽军, 张清照, 何一韬, 等. 大直径盾构隧道双层衬砌管片结构计算[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(5): 79.

(下转第 173 页)

- 力试验[J]. 中国公路学报, 2017, 30(8): 134.
- GONG Chenjie, DING Wenqi. Experimental investigation on ultimate bearing capacity of steel fiber reinforced concrete segment joints in shield tunnels[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(8): 134.
- [7] 彭勃, 陈志源, 王立华. CFRC 中碳纤维长度分布对强度和电阻率的影响[J]. 建筑材料学报, 2002, 5(3): 235.
- PENG Bo, CHEN Zhiyuan, WANG Lihua. Length distribution of carbon fibers in CFRC and its influence on the resistivity and strength[J]. Journal of Building Materials, 2002, 5(3): 235.
- [8] 周乐, 王晓初, 刘洪涛. 碳纤维混凝土应力-应变曲线试验研究[J]. 工程力学, 2013, 30(7): 200.
- ZHOU Le, WANG Xiaochu, LIU Hongtao. Experimental study of stress-strain curve of carbon fiber reinforced concrete[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(7): 200.
- [9] 任传军, 孙家瑛, 施惠生, 等. 纤维增强沥青混凝土路用性能研究[J]. 公路, 2006, 51(2): 148.
- REN Chuanjun, SUN Jiaying, SHI Huisheng, et al. A study on asphalt concrete road service properties improved with polymer fiber[J]. Highway, 2006, 51(2): 148.
- [10] 李德明, 董占武, 温书亿, 等. 基于裂后线性软化模型的钢筋碳纤维混凝土盾构管片应用研究[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(1): 148.
- LI Deming, DONG Zhanwu, WEN Shuyi, et al. Research on the application of steel fiber reinforced concrete segment in shield tunnelling based on the post-cracking linear softening model[J]. Modern Tunnelling Technology, 2021, 58(1): 148.
- [11] 徐振, 李德明, 王彬, 等. 硬岩隧道纯碳纤维混凝土管片应用[J]. 山东大学学报(工学版), 2020, 50(5): 44.
- XU Zhen, LI Deming, WANG Bin, et al. Application of pure steel fiber concrete segment in hard rock tunnel[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2020, 50(5): 44.
- [12] 董晓农, 李萌, 孙志恒, 等. 预应力钢筒混凝土管内壁复式碳纤维加固试验与计算分析[J]. 水利学报, 2019, 50(6): 780.
- DONG Xiaonong, LI Meng, SUN Zhiheng, et al. Laboratory testing and calculation analysis of reinforcement for prestressed concrete cylinder pipe with compound carbon fiber[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(6): 780.
- 收稿日期: 2022-03-21 修回日期: 2022-08-26 出版日期: 2024-08-10
Received: 2022-03-21 Revised: 2022-08-26 Published: 2024-08-10
· 作者: 赵立财, 正高级工程师, zhaolical1314@foxmail.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 165 页)

- LUO Zejun, ZHANG Qingzhao, HE Yitao, et al. Calculation of the double-layer lining segment structure of large-diameter shield tunnels[J]. Modern Tunnelling Technology, 2018, 55(5): 79.
- [6] 王伟. 杭州地铁大直径越江隧道总体设计关键技术[J]. 都市快轨交通, 2020, 33(6): 91.
- WANG Wei. Overall design and construction of the large-diameter cross-river tunnel of Hangzhou Metro[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2020, 33(6): 91.
- [7] 向亮, 王飞, 靳宝成, 等. 黄土深埋大直径盾构隧道围岩压力研究[J]. 土木工程学报, 2020, 53(增刊1): 112.
- XIANG Liang, WANG Fei, JIN Baocheng, et al. Surrounding rock pressure of loess deep large-diameter shield tunnel[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(S1): 112.
- [8] 章登精, 龚彦峰, 古常友, 等. 南京夹江隧道不同变形模式下结构受力特性分析与控制标准探讨[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(增刊1): 359.
- ZHANG Dengjing, GONG Yanfeng, GU Changyou, et al. Structural mechanical behaviors analysis and control standards of Nanjing Jiajiang Tunnel under different deformation modes[J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57(S1): 359.
- [9] 封坤, 徐凯, 彭祖昭, 等. 大直径盾构隧道拼装过程管片力学响应研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(12): 2243.
- FENG Kun, XU Kai, PENG Zuzhao, et al. Mechanical response of large-diameter shield tunnels during assembly[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(12): 2243.
- [10] 武建力, 高抗. 基于可靠度理论的水下大直径盾构隧道耐久性设计[J]. 低温建筑技术, 2020, 42(10): 125.
- WU Jianli, GAO Kang. The durability design of large shield tunnels based on the reliability theory[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2020, 42(10): 125.
- 收稿日期: 2022-03-07 修回日期: 2022-04-25 出版日期: 2024-08-10
Received: 2022-03-07 Revised: 2022-04-25 Published: 2024-08-10
· 第一作者: 麻凤海, 教授, xkb@vip.163.com
通信作者: 郑叶琳, 硕士研究生, 996818969@qq.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

欢迎投稿《城市轨道交通研究》

投稿网址: tougao. umt1998. com