

文章编号: 1674—8247(2024)06—0021—06

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2024.06.004

超大矩形顶管隧道新型弹性密封垫防水性能研究

崔光耀¹ 戴艾蒙¹ 宁茂权^{2,3} 蒋梦新¹ 韩 驰¹ 刘炳杰¹

(1. 北方工业大学, 北京 100144; 2. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 武汉 430064;

3. 海峡(福建)交通工程设计有限公司, 福州 350004)

摘 要:为提高超大矩形顶管隧道管片接缝的防水性能,本文以福建莆田火车站地下通道工程为依托,提出一种新型内嵌钢片弹性密封垫,采用有限元分析软件 ABAQUS,对不同张开度、错缝量下的无内嵌钢片弹性密封垫(工况 1)、内嵌单层钢片弹性橡胶垫(工况 2)、内嵌双层钢片弹性橡胶垫(工况 3)的防水性能进行对比分析。结果表明:(1)无错缝量时,工况 2、工况 3 防水性能均优于工况 1,除测线 1 张开度 0~2.4 mm、测线 2 张开度 0~5 mm 外,工况 3 防水性能均优于工况 2;(2)施加错缝量时,除测线 1 位于错缝 6 mm 张开度 0~2.3 mm、6.2~9.9 mm 与错缝 12 mm 张开度 1.6~2.8 mm 时工况 2 防水性能低于工况 1 外,工况 2、工况 3 防水性能均优于工况 1,其中除错缝 6 mm 时测线 2 处工况 3、工况 2 防水性能相近外,其余测线处工况 3 防水性能最优。综上所述,工况 3 的防水性能最优。研究结果可为隧道接缝防水提供参考。

关键词:顶管隧道;新型弹性密封垫;防水性能;接缝错动量;接缝张开量

中图分类号:U25

文献标志码:A

21

Study on the Waterproof Performance of a Novel Elastic Sealing Gasket for Large Rectangular Jacked Tunnels

CUI Guangyao¹ DAI Aimeng¹ NING Maoquan^{2,3} JIANG Mengxin¹ HAN Chi¹ LIU Bingjie¹

(1. North China University of Technology, Beijing 100144, China;

2. China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan 430064, China;

3. Haixia Traffic Engineering Design Co., Ltd., Fuzhou 350004, China)

Abstract: To enhance the waterproofing performance of joint gaps in large rectangular jacked tunnels, this study took the underground passage of Putian Railway Station in Fujian Province as an example, and introduced a new type of elastic sealing gasket with embedded steel plate. By using the finite element analysis software ABAQUS, the waterproofing performance of three scenarios was comparatively analyzed: an elastic seal without embedded steel plates (Case 1), an elastic rubber gasket with a single layer of embedded steel plates (Case 2), and an elastic rubber gasket with double layers of embedded steel plates (Case 3), under varying degrees of joint gap openings and misalignments. The findings reveal: (1) Without any misalignment, the waterproofing performance of both Case 2 and Case 3 surpasses that of Case 1, except for when the opening of Test Line 1 is between 0 mm and 2.4 mm, and that of Test Line 2 is between 0 mm and 5 mm, where Case 3 outperforms Case 2. (2) Under applied misalignments, except for when Test Line 1 experiences a misalignment of 6 mm with openings between 0 mm and 2.3 mm and 6.2 mm to 9.9 mm, and

收稿日期:2023-05-25

作者简介:崔光耀(1983-),男,教授。

基金项目:中铁第四勘察设计院集团有限公司重点科研项目(2020K143);北京市大学生创新创业训练计划项目(24XN139-248)

引文格式:崔光耀,戴艾蒙,宁茂权,等.超大矩形顶管隧道新型弹性密封垫防水性能研究[J].高速铁路技术,2024,15(6):21-26.

CUI Guangyao, DAI Aimeng, NING Maoquan, et al. Study on the Waterproof Performance of a Novel Elastic Sealing Gasket for Large Rectangular Jacked Tunnels[J]. High Speed Railway Technology, 2024, 15(6):21-26.

misalignment of 12 mm with openings between 1.6 mm and 2.8 mm, where Case 2 shows inferior waterproofing compared to Case 1, Case 2 and Case 3 generally demonstrate better waterproofing than Case 1. Among these, except for the similarity in waterproofing performance between Case 3 and Case 2 at Test Line 2 under a 6 mm misalignment, Case 3 exhibits the best waterproofing across other test lines. Overall, Case 3 demonstrates the most favorable waterproofing performance. These results provide a reference for waterproofing measures in tunnel joints.

Key words: jacked tunnel; novel elastic sealing gasket; waterproof performance; joint misalignment; joint gap opening

随着我国城市建设的加速发展,为满足城市交通要求,城市地下隧道的修建也随之增多。盾构法因其施工速度快、与地面社会活动互不影响等优点在城市隧道修建中广为出现。但随着城市隧道朝着大直径、高水压方向发展以及受到列车、上部建筑物等荷载影响,隧道施工稳定性、管片渗漏水问题成为隧道主要维护问题之一^[1-6]。因此,研究一种新型隧道管片弹性橡胶垫是非常有必要的。

目前,国内外专家、学者对于隧道管片弹性密封垫防水性能的研究主要有:孙廉威^[7]以实际工程为背景,通过数值模拟建立弹性密封垫模型,探讨不同张开度下弹性密封垫的防水性能;龚琛杰^[8]等对已有盾构隧道接缝防水构造进行分析总结,提出了弹性密封垫的设计方法;雷震宇^[9]等建立2D数值模型,探讨弹性密封垫孔洞位置、孔洞大小等材料参数对弹性橡胶垫的影响;叶美锡^[10]等经过试验验证,对密封垫防水性能影响因素进行分析;欧阳文彪^[11]以室内试验与数值分析探讨弹性密封垫开孔率、硬度等因素对其性能的影响;李拼^[12]等提出了有效接触应力的概念,并对弹性密封垫进行选型;张子新^[13]等提出将弹性密封垫与混凝土在隧道管片预制时就浇筑在一起,即嵌入式弹性密封垫概念;陈云尧^[14]等在对我国盾构隧道接缝弹性密封垫统计的基础上,建立统计样本对弹性密封垫各设计参数进行了研究;张稳军^[15]等利用数值分析软件对复合型密封垫进行了优选。

以上研究多集中于弹性密封垫的参数优化以及不同张开度、错动量下弹性密封垫的防水性能等方面,鲜有针对新型弹性密封垫的研究。本文依托福建莆田火车站地下通道工程,为提高管片接缝的防水性能,提出一种新型弹性密封垫(内嵌钢片橡胶弹性密封垫),并以ABAQUS作为数值分析软件,对无内嵌钢片以及内嵌不同层数钢片的弹性密封垫位于不同张开度以及错动量下的模型进行分析。研究结果可为隧道接缝防水提供参考。

1 研究概况

1.1 工程概况

隧址区莆田火车站南北广场东西侧地下通道位于

莆田火车站东西两侧,呈南北走向,周边现状以民宅和果园为主。隧道周边规划用地性质以商业、居住用地、绿地为主。东侧通道顶管段长212 m,西侧通道顶管段长260 m,管片外径12.6 m × 7.65 m(长×宽),壁厚0.8 m,标准管节长1.8 m。为满足接缝防水要求,在管节接缝处设置了承插口结构钢套环与防水橡胶圈形成的管节外侧防水体系,三元乙丙橡胶(Ethylene Propylene Diene Monomer, EPDM)密封垫形成的第二道防水体系。

1.2 计算模型

采用有限元分析软件ABAQUS建立弹性密封垫及上下两侧沟槽数值模型,如图1所示(以内嵌单层钢片弹性密封垫为例),弹性密封垫尺寸如图2所示(以内嵌双层钢片弹性密封垫为例)。因Mooney-Rivlin模型可以较为准确地反映橡胶材料特性,选用Mooney-Rivlin模型作为橡胶材料的本构模型,应变势能函数如式(1)所示^[16-17]。上下两侧沟槽为混凝土,计算时设置为刚体。模型采用通用接触,摩擦系数为0.5。

$$W = C_{10}(\bar{I}_1 - 3) + C_{01}(\bar{I}_2 - 3) \quad (1)$$

式中: W ——应变势能函数;

C_{10} 、 C_{01} ——橡胶的性能参数, C_{10} 为0.27 MPa、 C_{01} 为1.12 MPa;

\bar{I}_1 、 \bar{I}_2 ——应力不变量。

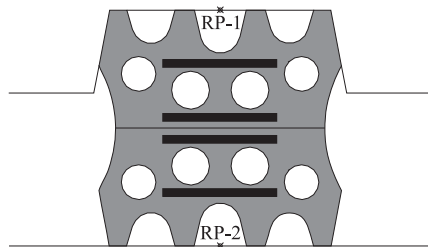


图1 计算模型图(工况3)

计算模型采用位移加载控制,为方便位移加载,在上下沟槽中间部位各建立1个参考点,下侧沟槽位移进行全约束。讨论不同张开度各工况的防水性能时,设置两个分析步,首先对上侧沟槽施加28 mm竖向位移,后施加反向28 mm竖向位移;讨论不同错开量各

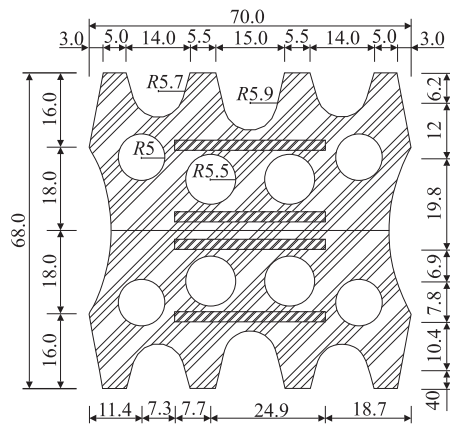


图2 工况3模型尺寸图(mm)

工况的防水性能时,设置3个分析步,先对上侧沟槽施加不同的横向位移,再施加28 mm竖向位移,最后施加反向28 mm竖向位移,加载位移时均以1 mm作为1个加载步。根据本工程相关设计文件以及国内外大型盾构设计资料可知^[10],盾构隧道管片接缝EPDM弹性密封垫需要在接缝张开量7 mm、错位量12 mm的情况下承受1.0 MPa的水压。

1.3 计算工况

为对比分析实验数据,建立计算工况如表1所示,内嵌钢片厚度均为2 mm。

表1 计算工况表

工况	计算内容
1	无内嵌钢片 EPDM 弹性密封垫
2	内嵌单层 EPDM 钢片弹性密封垫
3	内嵌双层钢片 EPDM 弹性密封垫

1.4 材料参数

计算模型材料参数如表2所示。

表2 材料参数表

材料	重度 /(kN/m ³)	弹性模量 /GPa	泊松比	C_{10}	C_{01}
混凝土	25.0	0.200 0	0.20	—	—
橡胶密封垫	12.0	0.007 5	0.46	0.7	0.035
钢片	78.5	0.300 0	0.30	—	—

1.5 测线布置

为对比不同工况下 EPDM 弹性密封垫(以下简称“弹性密封垫”)的防水性能,在计算模型可能发生渗水现象的部位建立3条测线,如图3所示(以工况3为例)。测线1设置在上侧沟槽与弹性密封垫之间、测线2设置在上下弹性密封垫的接触部位、测线3设置在下侧沟槽与弹性密封垫之间。一般认为,若任意一条测线的最大接触应力小于外侧水压,则弹性密封垫失效。

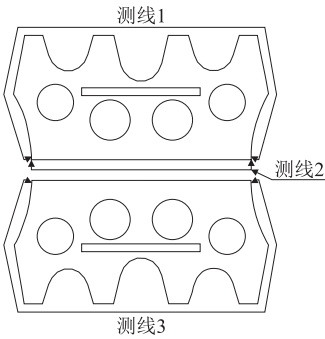


图3 测线位置图

2 计算结果及分析

2.1 接缝张开量

提取各工况下不同张开度下的接触应力与变形云图,如图4所示(以工况3为例)。

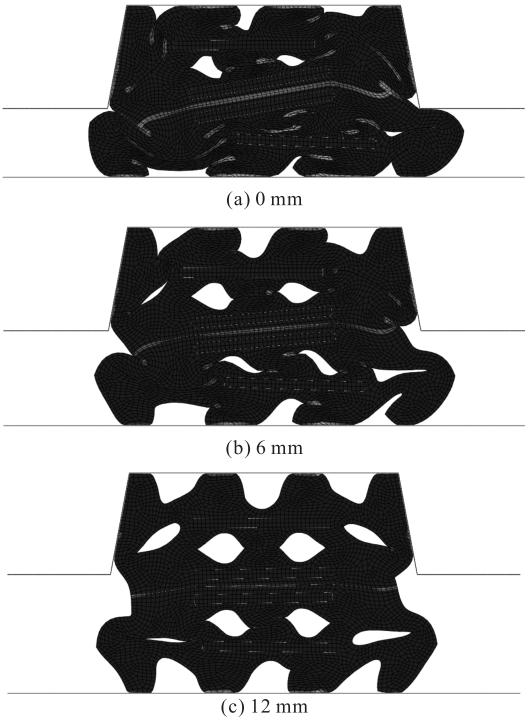


图4 接触应力与变形云图(工况3)

为分析各工况在接缝不同张开度下的防水性能,提取出各工况位于不同张开度时弹性密封垫的各测线的最大接触应力,如表3所示(以测线3为例)。同时根据不同测线将各工况最大接触应力绘制成最大接触应力云图,测线1最大接触应力如图5所示。

由图5可知,工况2、工况3中测线1的最大接触应力均大于工况1的最大接触应力。其中,工况3的最大接触应力最大值出现在张开度为3 mm处。当张开度位于0~2.4 mm时,工况2对于防水性能的提升

要大于工况3,当张开度位于2.4 mm以后时,工况3的防水性能要优于工况2。

表3 测线3最大接触应力表

张开度/mm	工况1/MPa	工况2/MPa	增强百分比/%	工况3/MPa	增强百分比/%
0	7.510	12.21	62.58	19.86	164.44
1	7.085	11.38	60.62	18.76	164.78
2	6.651	13.33	100.42	18.16	173.04
3	6.275	10.65	69.72	19.25	206.77
4	5.909	9.841	66.54	16.93	186.51
5	5.689	9.524	67.41	14.57	156.11
6	5.460	9.060	65.93	15.23	178.94
7	5.293	8.879	67.75	13.82	161.10
8	5.154	8.559	66.07	12.74	147.19
9	5.053	5.260	63.47	12.11	139.66
10	5.008	8.006	59.86	11.37	127.04
11	4.921	7.656	55.58	13.06	165.40
12	4.928	6.794	37.87	10.34	109.82

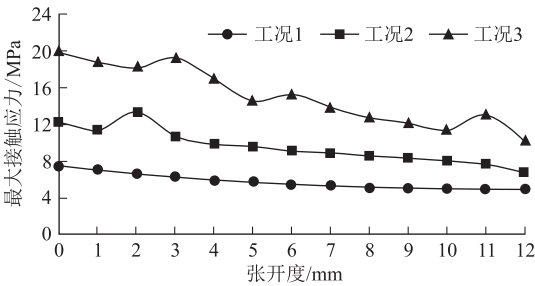


图7 测线3最大接触应力图

各测线的最大接触应力均小于工况2、工况3,可看出EPDM钢片具有良好的密封性能,从而增强了接缝处的防水效果。在不同张开度下,各测线中工况3在0~5 mm时防水性能较不稳定,在5~12 mm时的防水性能则明显优于工况2。

2.2 接缝错缝量

为分析不同错缝量下嵌入钢片弹性密封垫的防水性能,分别在 Step-1 中对各工况施加6 mm、12 mm 横向位移,如图8所示(以工况3为例)。

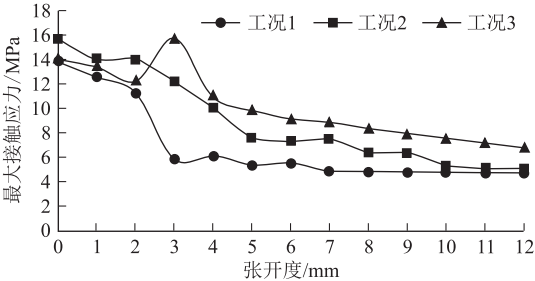


图5 测线1最大接触应力图

测线2最大接触应力如图6所示。由图6可知,对于测线2来说,工况2、工况3与工况1相比,测线2处的防水性能均有所提升。其中,当张开度位于0~5 mm时,工况2的防水性能要优于工况3,当张开度位于5 mm以后时,工况3的防水性能要优于工况2。

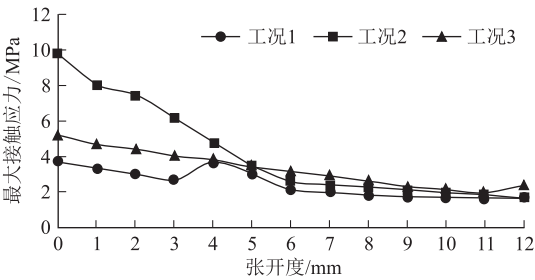


图6 测线2最大接触应力图

测线3最大接触应力如图7所示。由图7可知,对于测线3来说,工况2与工况3测线2处的防水性能均优于工况1,且提升幅度较大。工况3的防水性能在测线3处的提升幅度更为明显,优于工况2。

综上所述,各工况中测线的最大接触应力总体上呈现随着张开度的增大而减小的趋势。其中,工况1

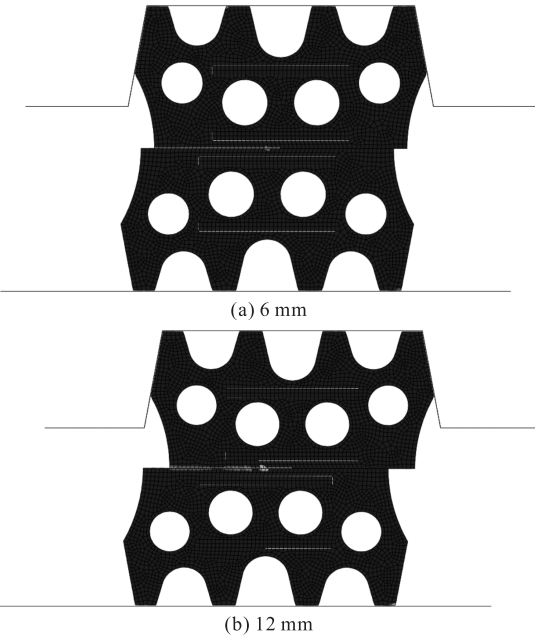


图8 模型错位云图(工况3)

为分析错缝量对各工况防水性能的影响程度,提取各工况不同测线在不同错缝量下位于不同张开度时的最大接触应力,如图9~图14所示。

由图9、图10可知,施加6 mm 错缝量后,当张开度位于0~2.3 mm、6.2~9.9 mm时,工况2测线1的最大接触应力小于工况1;工况3测线1的最大接触应力均优于工况1、工况2。与施加错缝量6 mm相比,施加12 mm 错缝量后,工况1测线1的最大接触应力除张开度位于3~6 mm外均有所减少;工况2、工

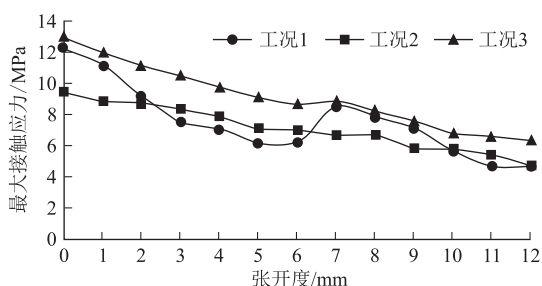


图9 错缝量6 mm 测线1 最大接触应力云图

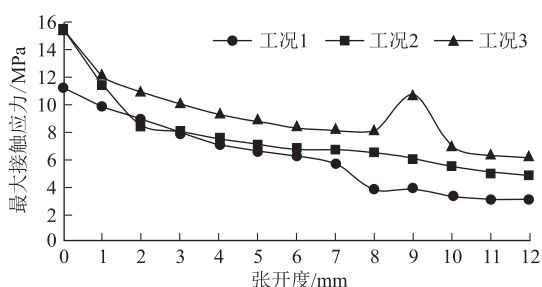


图10 错缝量12 mm 测线1 最大接触应力云图

况3 测线1 最大接触应力均有所增加。施加12 mm 错缝量后,除工况2 测线1 张开度位于1.6~2.8 mm 外,工况2、工况3 测线1 的最大接触应力优于工况1;除张开度位于0~0.8 mm 外,工况3 测线1 最大接触应力略低于工况2,其余均优于工况2、工况1。综上所述,施加错缝量后,工况3 测线1 处防水性能最优。

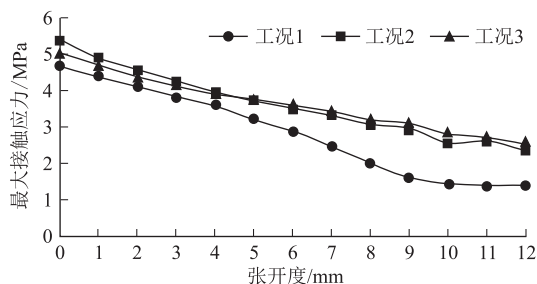


图11 错缝量6 mm 测线2 最大接触应力云图

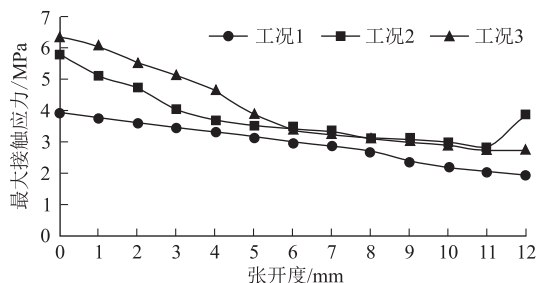


图12 错缝量12 mm 测线2 最大接触应力云图

由图11、图12可知,施加6 mm 错缝量后,工况2、工况3 测线2 的最大接触应力仍优于工况1。张开度

位于5.8 mm 以前,工况2 测线2 的最大接触应力略大于工况3;张开度位于5.8 mm 以后时,工况3 测线2 的最大接触应力略大于工况2。与错缝量6 mm 相比,施加12 mm 错缝量后,工况1 测线2 的最大接触应力在张开度位于0~6 mm 时有所减少;工况2 测线2 的最大接触应力除张开度位于6~11 mm 外,均有所提升;工况3 测线2 的最大接触应力有所提升。施加12 mm 错缝量后,工况2、工况3 测线2 最大接触应力要优于工况1,除张开度位于11~12 mm 外,工况3 测线2 处的防水性能要优于工况2。综上所述,施加6 mm 错缝量时,张开度位于0~5.8 mm 时工况2 测线2 处防水性能略优于工况3,张开度位于5.8 mm 以后时工况3 测线2 处防水性能略优于工况2;施加12 mm 错缝量时,各工况测线2 处防水性能总体上从高到低依次为工况3、工况2、工况1。

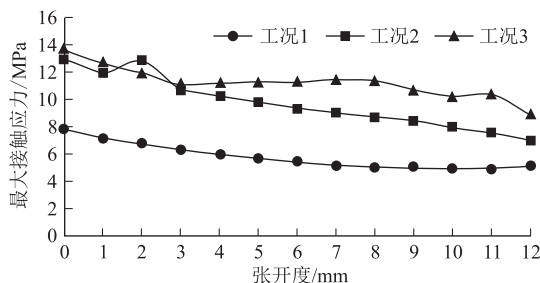


图13 错缝量6 mm 测线3 最大接触应力云图

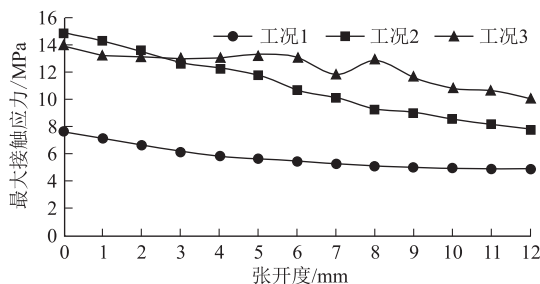


图14 错缝量12 mm 测线3 最大接触应力云图

由图13、图14可知,施加6 mm 错缝量后,各工况测线3 的最大接触应力总体上随着张开度的增大而减小。其中,工况2、工况3 的最大接触应力仍优于工况1。除张开度位于1.5~2.8 mm 外,工况3 的防水性能均优于工况2。与施加错缝量6 mm 相比,施加12 mm 错缝量后,工况2、工况3 测线3 的最大接触应力均有所增加,工况1 测线3 的最大接触应力总体上有所减小;施加12 mm 错缝量后,工况2、工况3 测线3 的最大接触应力优于工况1,当张开度位于0~2.4 mm 时,工况2 的防水性能优于工况3,2.4 mm 张开度以后,工况3 测线3 的防水性能最优。

根据上述分析结果,EPDM 钢片显著提高了错缝时管片的防水性能。测线 1 中,工况 3 的防水效果始终最优。测线 2 处于错位区间,因此随着错缝量的增加,双层钢片(工况 3)相较于单层钢片(工况 2)的性能稳定性优势愈发显著。测线 3 中张开度达到 3 mm 后工况 1 的防水性能表现更出色,而工况 2 的防水性能在整体上表现较不稳定。综上所述,施加错缝量后,各工况测线 3 处防水性能总体上从高到低依次为工况 3、工况 2、工况 1。

3 结论

(1)接缝张开度:工况 2、工况 3 任意一条测线的最大接触应力均大于工况 1 的最大接触应力。其中,对于测线 1 来说,除张开度位于 0~2.4 mm 外,工况 2 的防水性能优于工况 3,其余张开度时,工况 3 的防水性能均优于工况 2;对于测线 2 来说,当张开度位于 0~5 mm 时,工况 2 的防水性能优于工况 3,当张开度位于 5 mm 以后时,工况 3 的防水性能优于工况 2;对于测线 3 来说,工况 3 的防水性能在测线 3 处的提升幅度更为明显,优于工况 2。

(2)接缝错缝量:施加 6 mm 错缝量时,除工况 2 测线 1 在张开度位于 0~2.3 mm、6.2~9.9 mm 时,最大接触应力小于工况 1 外,工况 2、工况 3 最大接触应力均优于工况 1,测线 1 处工况 3 的防水性能最优,测线 2 处工况 3、工况 2 的防水性能相差不大,测线 3 处工况 3 的防水性能最优。施加 12 mm 错缝量时,除工况 2 测线 1 张开度位于 1.6~2.8 mm 外,工况 2、工况 3 的最大接触应力优于工况 1,各测线工况 3 总体上防水性能最优。

(3)综上所述,防水性能最优工况为工况 3(内嵌双层钢片弹性橡胶垫),合理利用 EPDM 钢片弹性橡胶垫有利于施工中接缝防水的优化处理,除提高工程质量和施工技术水平外,也促进了工程经济效益的提升,本文可为类似实际工程提供参考。

参考文献:

- [1] 张稳军, 张高乐, 李宏亮, 等. 盾构隧道管片接缝密封垫防水性能及受施工荷载影响研究[J]. 中国公路学报, 2020, 33(12): 130-141.
ZHANG Wenjun, ZHANG Gaole, LI Hongliang, et al. Waterproof Performance of Sealing Gaskets and Impact of Construction Loads on Segment Joints in Shield Tunnel[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(12): 130-141.
- [2] 张稳军, 曹文振. 地震下大断面盾构隧道接缝力学及防水性能研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(4): 653-660.
ZHANG Wenjun, CAO Wenzhen. Mechanical and Waterproof Performances of Joints of Shield Tunnels with Large Cross-section under Earthquakes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(4): 653-660.
- [3] 王崇良, 王茂靖, 赵文, 等. 兰渝铁路梅岭关隧道底鼓病害成因分析[J]. 高速铁路技术, 2020, 11(6): 63-68.
WANG Chonggen, WANG Maojing, ZHAO Wen, et al. Cause Analysis of Diseases in the Floor Heave Section of Meilingguan Tunnel in Lanzhou-Chongqing Railway[J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(6): 63-68.
- [4] 王士民, 谢宏明. 高压盾构隧道管片接缝防水研究现状与展望[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2020, 2(2): 66-75.
WANG Shimin, XIE Hongming. Review and Prospect of Waterproofing of Segment Joints of Shield Tunnel with High Hydraulic Pressure[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2020, 2(2): 66-75.
- [5] 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.
- [6] 罗远煜. 复杂环境隧道穿越强富水地层施工技术研究[J]. 高速铁路技术, 2023, 14(6): 106-110.
LUO Yuanyu. A Study on Construction Technology of Tunnel Crossing Strong Water-rich Stratum in the Complex Environment[J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(6): 106-110.
- [7] 孙廉威. 基于施加水压的盾构接缝防水机制数值分析[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(4): 603-610.
SUN Lianwei. Numerical Analysis of Waterproof Mechanism of Shield Tunnel Joint Based on Applied Water Pressure[J]. Tunnel Construction, 2018, 38(4): 603-610.
- [8] 龚琛杰, 丁文其. 大直径水下盾构隧道接缝弹性密封垫防水性能研究: 设计方法与工程指导[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(10): 1712-1722.
GONG Chenjie, DING Wenqi. Waterproof Properties of Elastic Sealing Gaskets Used in Segmental Joints of Large-diameter Underwater Shield Tunnels: Design Methodology and Engineering Guidance[J]. Tunnel Construction, 2018, 38(10): 1712-1722.
- [9] 雷震宇, 刘明. 盾构管片弹性橡胶密封垫防水性能灵敏度分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2017, 45(3): 336-341.
LEI Zhenyu, LIU Ming. Sensitivity Analysis of Water-proof Performance of Elastic Rubber Gasket in Shield Tunnel[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2017, 45(3): 336-341.
- [10] 叶美锡, 丁文其, 陈俊伟, 等. 盾构隧道管片接缝三元乙丙橡胶密封垫力学性能影响因素敏感度分析[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(S2): 200-206.
YE Meixi, DING Wenqi, CHEN Junwei, et al. Sensitivity Analysis of Influencing Factors on Mechanical Properties of EPDM Gasket for Segment Joints of Shield Tunnel[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(S2): 200-206.
- [11] 欧阳文彪. 盾构隧道橡胶密封垫力学性能试验及数值分析[J]. 隧道建设, 2013, 33(11): 933-936.
OUYANG Wenbiao. Mechanical Test and Numerical Analysis of Elastic Gaskets of Shield Tunnels[J]. Tunnel Construction, 2013, 33(11): 933-936.

- LIU Zixue, YANG Jie, YU Kai, et al. Study on Technical Scheme of Urban Rail Transit Driving Environment Safety Monitoring System [J]. Communication & Information Technology, 2017(2): 69–72, 62.
- [3] 李睿, 罗帆. 铁路交通灾害预警系统初探[J]. 中国铁道科学, 2002, 23(6): 39–43.
- LI Rui, LUO Fan. Railway Transport Disaster Warning System[J]. China Railway Science, 2002, 23(6): 39–43.
- [4] 张智媛. 关于铁路交通灾害预警系统的探究[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2016, 6(8): 6480–6481.
- ZHANG Zhiyuan. Research on Railway Traffic Disaster Early Warning System [J]. Theoretical Research in Urban Construction, 2016, 6(8): 6480–6481.
- [5] 向航鹰. 高速动车段规模的计算方法研究[J]. 中国铁路, 2005, (6): 45–46.
- XIANG Hangying. Study on Calculation Method of High-speed EMU Section Size[J]. Chinese Railways, 2005(6): 45–46.
- [6] 张炳民. 高速磁悬浮铁路车站布置图型研究[J]. 高速铁路技术, 2020, 11(S2): 36–40.
- ZHANG Bingmin. Study on Layout Pattern of High-speed Maglev Railway Station [J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(S2): 36–40.
- [7] CJJ/T 310–2021 高速磁浮交通设计标准[S].
- CJJ/T 310–2021 Standard for Design of High-speed Maglev Transit [S].
- [8] 姬昌荣, 张建超, 万鹏. 铁路隧道及隧道群火灾防治研究[J]. 高速铁路技术, 2023, 14(1): 20–25, 31.
- Ji Changrong, ZHANG Jianchao, WAN Peng. Research on Fire Prevention and Control of Railway Tunnels and Tunnel Groups [J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(1): 20–25, 31.
- [9] 李恒鑫. 高速磁浮车站客运列车作业方案优化研究[J]. 高速铁路技术, 2023, 14(4): 89–94.
- LI Hengxin. A Study on Optimization of Passenger Train Operation Scheme in High-speed Maglev Station [J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(4): 89–94.
- [10] 王梓丞, 易立富, 谭冠华, 等. 时速600 km高速磁浮运行控制系统关键技术研究[J]. 铁道通信信号, 2020, 56(11): 1–3, 11.
- WANG Zicheng, YI Lifu, TAN Guanhua, et al. Research on Key Technologies of Train Operation Control System for 600 km/h High-speed Maglev [J]. Railway Signalling & Communication, 2020, 56(11): 1–3, 11.

(上接第26页)

- [12] 李拼, 谢宏明, 何川, 等. 基于有效接触应力的大张开量盾构隧道密封垫防水性能分析[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(12): 1993–1999.
- LI Pin, XIE Hongming, HE Chuan, et al. Waterproof Performance Analysis of Water Sealing Gasket of Large Open Shield Tunnel Based on Effective Contact Stress [J]. Tunnel Construction, 2019, 39(12): 1993–1999.
- [13] 张子新, 谷冠思, 黄昕, 等. 盾构隧道管片接头嵌入式密封垫防水性能探究[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(9): 1402–1411.
- ZHANG Zixin, GU Guansi, HUANG Xin, et al. Experimental Study on Waterproof Performance of Embedded Sealing Gasket of Segment Joint for a Shield Tunnel [J]. Tunnel Construction, 2019, 39(9): 1402–1411.
- [14] 陈云尧, 张军伟, 马士伟, 等. 盾构隧道管片接缝密封垫设计参数研究[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(4): 59–66.
- CHEN Yunyao, ZHANG Junwei, MA Shiwei, et al. Study on Design Parameters of Sealing Gasket for Segment Joints of Shield Tunnel [J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57(4): 59–66.
- [15] 张稳军, 丁超, 张高乐, 等. 盾构隧道管片接缝复合密封垫选型设计研究[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(2): 246–255.
- ZHANG Wenjun, DING Chao, ZHANG Gaole, et al. Type Selection and Design of Composite Sealing Gasket for Segment Joints of Shield Tunnel [J]. Tunnel Construction, 2020, 40(2): 246–255.
- [16] 张良, 李忠华, 马新强. 橡胶 Mooney-Rivlin 超弹性本构模型的参数特性研究[J]. 噪声与振动控制, 2018, 38(S2): 427–430.
- ZHANG Liang, LI Zhonghua, MA Xinqiang. Study on Parameter Characteristics of Mooney-Rivlin Hyperelastic Constitutive Model of Rubber [J]. Noise and Vibration Control, 2018, 38(S2): 427–430.
- [17] 张琦, 时剑文, 索双富, 等. 基于 Mooney-Rivlin 模型和 Yeoh 模型的橡胶材料有限元分析[J]. 合成橡胶工业, 2020, 43(6): 468–471.
- ZHANG Qi, SHI Jianwen, SUO Shuangfu, et al. Finite Element Analysis of Rubber Materials Based on Mooney-Rivlin Models and Yeoh Models [J]. China Synthetic Rubber Industry, 2020, 43(6): 468–471.