

超软土盾构隧道接缝防水机理及优化措施^{*}

吕延豪 孙雪兵 张海涛

(中铁第四勘察设计院集团有限公司, 430063, 武汉//第一作者, 正高级工程师)

摘要 为了对超出设计允许张开量、错台量情况下的盾构隧道接缝防水性能进行评价,探究满足防水要求的密封垫极限张开量、错台量,基于温州市城市轨道交通 M1 线地铁盾构隧道工程,对选取设计的一种密封垫进行极限张开与极限错台工况下的防水数值模拟,并对该密封垫断面进一步优化。研究结果表明:压缩密封垫需要的拼装力最大值为 38.6 kN/m,满足工程盾构隧道拼装力小于 60 kN/m 的要求;在密封张开和错台工况下,密封垫防水能力都会减小;通过优化弹性密封垫断面形状,可提高接缝防水性能,满足工程需求。

关键词 地铁;盾构隧道;防水密封垫;张开量;错台量

中图分类号 U453.6

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.01.004

Waterproof Mechanism and Optimization Measures for Shield Tunnel Joint in Ultra-soft Soil

LYU Yanhao, SUN Xuebing, ZHANG Haitao

Abstract In order to evaluate the waterproof performance of shield tunnel joints that are beyond the allowable opening amount and dislocation amount of design, and to explore the limit of sealing gasket opening amount and dislocation amount that meet the waterproof requirements, based on the shield tunnel project of Wenzhou Urban Rail Transit Line M1, a designed sealing gasket is selected for carrying out the waterproof numerical simulation under the condition of extreme opening and dislocation, then the section of the gasket is further optimized. Research results show that: the maximum assembly force required for compressing the sealing gasket is 38.6 kN/m, which meets the requirement of shield tunnel assembly force of being less than 60 kN/m; under both the working conditions of sealing opening and dislocation, the waterproof ability of sealing gasket will be weakened; but the joint waterproof performance can meet the engineering requirements by optimizing the section shape of the elastic sealing gasket.

Key words metro; shield tunnel; waterproof sealing gasket;

opening amount; dislocation amount

Author's address China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., 430063, Wuhan, China

盾构法隧道采用多块预制管片拼装而成,盾构管片接缝的张开、错台以及转动变形都可能会导致接缝密封垫丧失预期的接触应力,最终导致管片接缝出现渗漏水病害。在管片接缝防水理论方面,文献[1]建立了双道密封垫整体防水能力的计算公式。在试验研究方面,文献[2]对苏通 GIL(气体绝缘金属封闭输电线路)综合管廊超高水压盾构隧道接缝防水性能进行了试验研究,通过经验类比和理论推导,提出双道密封垫防水形式。在数值方法研究方面,文献[3]等依托南京和燕路过江隧道工程,针对高水压作用下大张开量盾构隧道接缝防水密封垫的设计与选型,提出有效接触应力概念。已有的软土地铁隧道运营经验表明^[4],渗漏水还会进一步加剧盾构隧道的结构变形。因此,接缝渗漏水问题已成为盾构隧道长期服役的重大技术难题。

1 工程概况

温州市城市轨道交通 M1 线属于城区南北向轨道交通骨干线。线路由南向北,主要穿越的地层可以分为淤泥、砂性地层、黏土、中风化凝灰岩和卵石 5 大类。其中,淤泥及淤泥质土分布广,占比高达 66%,淤泥土层厚 18~30 m 不等,平均厚度为 24 m。温州软土具有触变性强、灵敏度高、含水量高、孔隙比大、强度低、渗透系数低及压缩性高等 7 大特点。

M1 线盾构隧道外径 6.7 m、内径 5.9 m,管片分块方式为“3+2+1”,管片厚 0.4 m。根据 M1 线盾构隧道的防水设防要求,在管片接缝张开 6 mm、错台 15 mm 工况下,类比相关工程案例,本工程盾构隧道理论水压值为 0.4 MPa。为减小隧道发生渗水风

^{*} 住房和城乡建设部科学技术计划项目(2021-K-080)

险,确保隧道运营安全,工程采用 EPDM(三元乙丙)防水弹性密封垫。通过防水性能指标计算公式^[2]可得,弹性橡胶密封垫在设计使用年限内能抵抗的最高水压为 0.8 MPa。密封垫沟槽尺寸如图 1 所示。密封垫压缩量越大,防水效果越好,但过大的压缩量需要的装配力过大,会影响隧道管片拼装。根据施工机械设备的拼装能力,确定本工程中接缝密封垫拼装力不应大于 60 kN/m。密封垫断面尺寸大小如图 2 所示。密封垫分区示意图如图 3 所示。

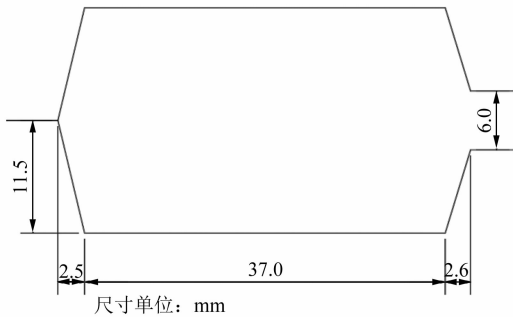


图 1 密封垫沟槽尺寸图

Fig. 1 Size diagram of sealing gasket groove

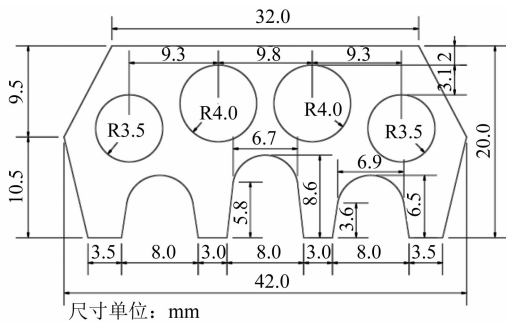


图 2 密封垫断面尺寸图

Fig. 2 Size diagram of sealing gasket section

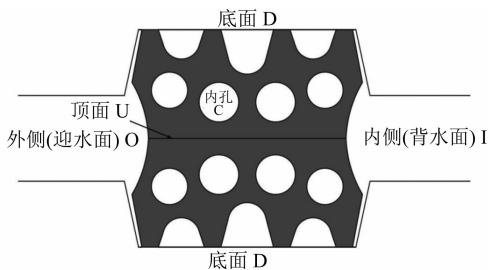


图 3 密封垫分区示意图

Fig. 3 Partition diagram of sealing gasket

2 数值模型建立

使用 ABAQUS 有限元软件对密封垫进行防水性能模拟,在单道密封垫的最不利工况(张开 6

mm,错台 15 mm)下优化密封垫的断面形式,确保密封垫能抵挡 0.8 MPa 水压。

考虑到工程的防水要求和拼装力要求,设置 4 种工况如表 1 所示。通过接缝密封垫在不同张开量和错台量工况下的数值模拟,验证工程中所用密封垫是否满足拼装力和防水性能的要求。

表 1 接缝密封垫数值模拟工况设置

Tab. 1 Working condition setting of joint sealing gasket numerical simulation

工况	张开量/mm	错台量/mm
工况一	0	0
工况二	0	15
工况三	6	0
工况四	6	15

防水密封垫和混凝土管片沟槽二维有限元模型如图 4 所示。管片沟槽采用刚体进行模拟,橡胶材料采用可变形实体单元进行模拟。

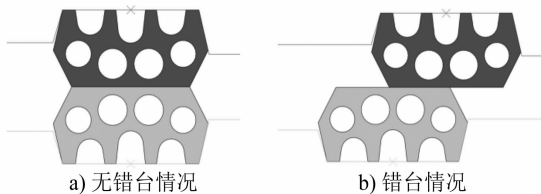


图 4 二维有限元模型

Fig. 4 Two-dimensional finite element model

2.1 参数选取

文献[5]按照既有研究结果,橡胶密封垫统一采用 EPDM 材料,邵氏硬度为 60,在后续计算中采用相关计算参数进行计算。橡胶材料为超弹性材料,在数值模拟中,弹性密封垫材料模型选取超弹性模型,应变位能模型采用 Mooney-Rivlin 模型,即:

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) \quad (1)$$

式中:

W ——应变能函数;

I_1 、 I_2 ——变形张量不变量;

C_{10} 、 C_{01} ——密封垫主要材料参数。

密封垫材料参数设置如表 2 所示。

表 2 密封垫材料参数

Tab. 2 Material parameters of sealing gasket

邵氏硬度	C_{10} /MPa	C_{01} /MPa
60	0.495	0.064

2.2 网格划分及接触设置

有限元模型采用四边形单元划分,如图 5 所示。

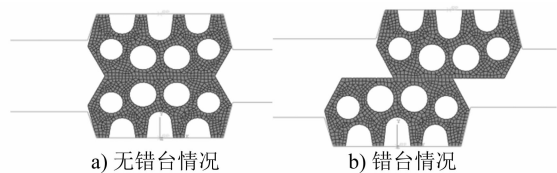


图 5 网格划分

Fig. 5 Mesh division

有限元模型中,密封垫孔洞设置为自接触,上下密封垫之间及密封垫与沟槽之间均设置为面接触,接触面法向采用硬接触,切向采用罚函数接触。密封垫之间的摩擦系数为 0.57,密封垫与沟槽之间的摩擦系数为 0.50。密封垫失效时,发生渗水的路径可能有 2 种,即密封垫与沟槽之间的接触面和密封垫之间的接触面。选取这 2 种接触面作为接触应力的提取路径,可以一定程度上反映密封垫的防水性能优劣。密封垫接触面提取位置如图 6 所示。

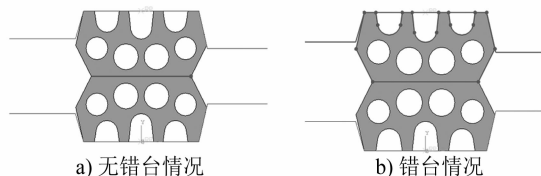


图 6 密封垫接触面提取位置

Fig. 6 Extraction position of sealing gasket contact face

3 计算结果及分析

3.1 拼装力分析

根据计算结果,对各工况下的拼装力进行整理分析。密封垫断面拼装力曲线如图 7 所示。在“张 0 错 0”条件下,密封垫断面需要的拼装力为 38.6 kN/m;在“张 0 错 15”条件下,密封垫断面需要的拼装力为 38.29 kN/m;在“张 6 错 0”条件下,密封垫断面需要的拼装力为 11.96 kN/m;在“张 6 错 15”条件下,密封垫断面所需要的拼装力为 12.09 kN/m。4 种工况下的装配力均小于 60 kN/m,本工程中密封垫设计满足工程中拼装力的需求。

3.2 应力分析

文献[3]基于密封垫接触面上接触应力分布的不均性,将接触应力大于设计水压的部分定义为“有效接触应力”,并从数值模拟结果中提取密封垫间的接触应力,绘制出内道密封垫的有效接触应力图,如图 8 所示。在“张 0 错 0”条件下,密封垫间有 2 个峰值区间的接触应力大于 0.8 MPa,满足先前

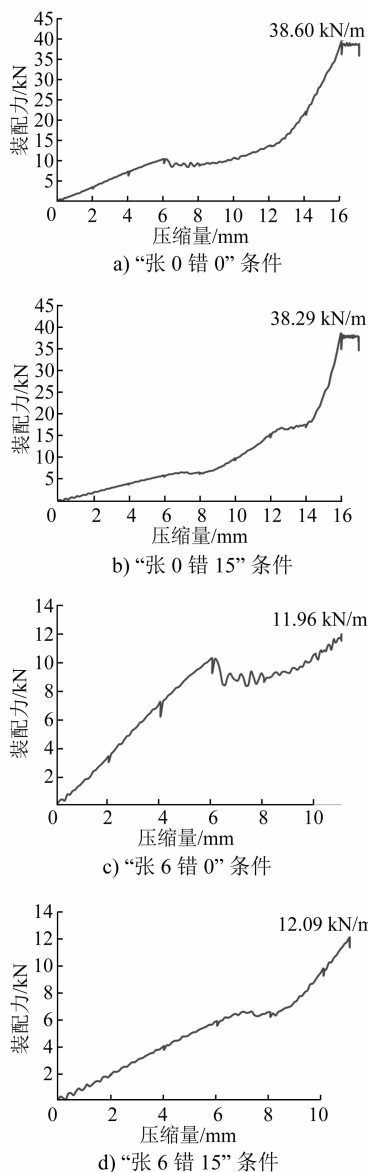


图 7 密封垫断面拼装力曲线

Fig. 7 Curve of assembly force of sealing gasket section

提出的防水指标;虽然在“张 0 错 15”条件下有一个峰值区间的接触应力大于 0.8 MPa,但是一旦该区间失效,其余部分不具备 0.8 MPa 的防水能力,安全储备较小;在“张 6 错 0”条件和“张 6 错 15”条件下,密封垫之间的接触应力减小,防水能力都小于 0.8 MPa,不能满足 0.8 MPa 的防水性能需求,需要对密封垫断面进行优化。

3.3 密封垫断面优化

在目前已有专利的基础上进行密封垫断面优化,优化后密封垫断面形式如图 9 所示。

对优化后的密封垫断面进行数值模拟,分析其在“张 0 错 0”和“张 6 错 15”这两种不利条件下

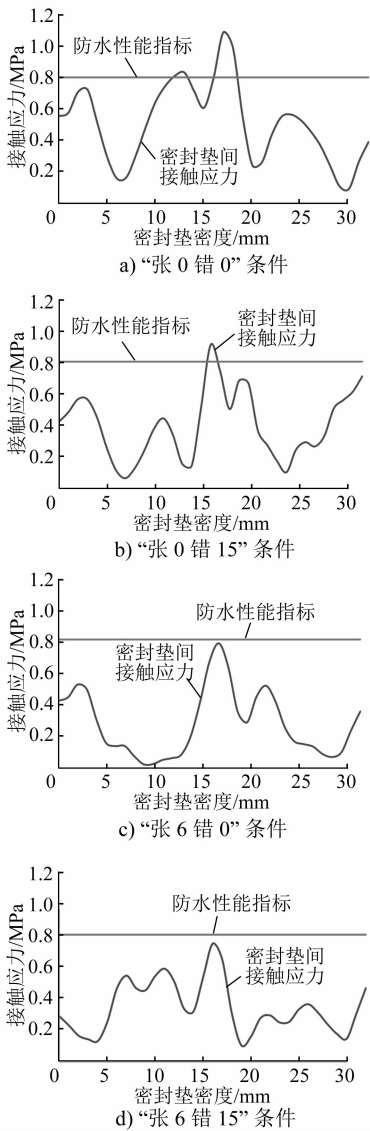


图 8 密封垫之间有效接触应力曲线

Fig. 8 Curve of effective contact stress between sealing gaskets

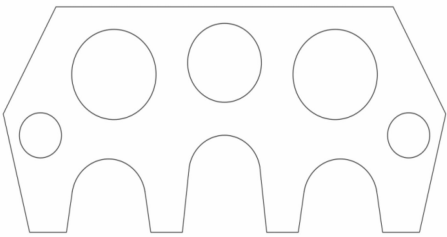


图 9 优化后密封垫断面

Fig. 9 Section of optimized sealing gasket

的力学性能及防水性能,模拟结果分别如图 10 和图 11 所示。可以看出:优化后,密封垫最大拼装力仅为 43 kN/m,满足工程中小于 60 kN/m 的拼装力需求;在防水最不利工况中,密封垫的防水性能得到了有效提高,有 4 个峰值区间的接触应力大于 0.8 MPa。

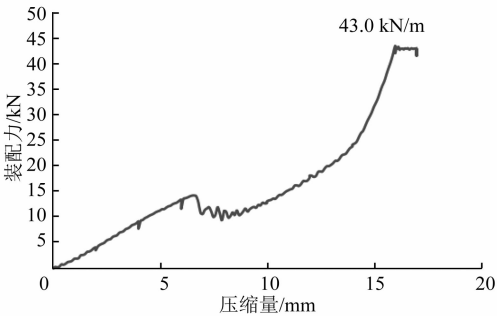


图 10 优化后密封垫断面拼装力曲线(“张 0 错 0”条件)

Fig. 10 Curve of assembly force of sealing gasket section after optimization (opening 0 and dislocation 0)

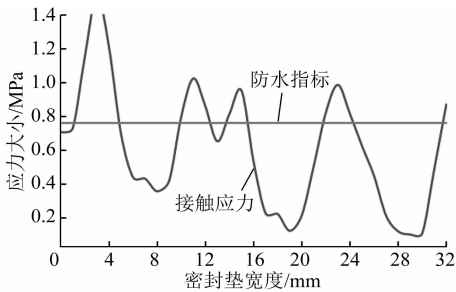


图 11 优化后密封垫接触应力曲线(“张 6 错 15”条件)

Fig. 11 Curve of contact stress between sealing gaskets after optimization (opening 6 and dislocation 15)

4 结语

本文基于温州市城市轨道交通 M1 线地铁盾构隧道工程,对选取的密封垫进行极限张开与极限错台工况下的防水数值模拟,并对该密封垫断面进行优化。通过经验类比与多工况数值模拟,得出如下结论:

1) 压缩密封垫需要的拼装力最大值为 38.6 kN/m,满足工程盾构隧道拼装力小于 60 kN/m 的要求。

2) 现有盾构隧道接缝密封垫满足盾构管片的拼装力要求,但是在不利工况下的防水性能不能满足实际防水能力的需要。

3) 通过优化密封垫断面形状使接缝防水性能满足工程需求。优化后密封垫在拼装力最不利工况(“张 0 错 0”条件)中拼装力为 43 kN/m,满足拼装力要求;在防水性能最不利工况下,有 4 个峰值区间的接触应力大于 0.8 MPa。优化后接缝防水密封垫可满足实际工程需求。

参考文献

[1] 肖明清,薛光桥,钟元,等. 盾构法隧道管片接缝双道密封垫

防水试验研究[J]. 铁道工程学报, 2021, 38(2): 85.

XIAO Mingqing, XUE Guangqiao, ZHONG Yuan, et al. Experimental research on the waterproof of double gaskets in segment joint of shield tunnel[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2021, 38(2): 85.

- [2] 金跃郎, 丁文其, 肖明清, 等. 苏通 GIL 综合管廊超高水压盾构隧道接缝防水性能试验研究[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(4): 538.

JIN Yuelang, DING Wenqi, XIAO Mingqing, et al. Experimental research on sealing behavior of segmental joints of Sutong GIL Utility Tunnel under ultra-high water pressure[J]. Tunnel Construction, 2020, 40(4): 538.

- [3] 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.

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.

- [4] 龚琛杰, 丁文其, 雷明锋, 等. 营运越江盾构隧道渗漏水病害特征及整治研究[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(增刊1): 247.

GONG Chenjie, DING Wenqi, LEI Mingfeng, et al. Case study on water leakage features and repair works of operational river-passing shield tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57(S1): 247.

- [5] 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.

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.

(收稿日期: 2022-06-27)

(上接第 11 页)

6) 两个断面的环境振动源强均与行车速度呈较显著的线性关系, 可按本文给出的 $L_{v1,z,max} - v$ 表达式进行源强计算。

参考文献

- [1] 唐锐, 吴俊泉. 中低速磁浮列车在我国城市轨道交通中的应用前景[J]. 都市快轨交通, 2006, 19(2): 12.

TANG Rui, WU Junquan. Application prospects of medium and low speed maglev vehicle in urban rail transit of China[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2006, 19(2): 12.

- [2] 彭奇彪, 罗华军, 佟来生, 等. 中低速磁浮车辆悬浮架的技术特征[J]. 电力机车与城轨车辆, 2012, 35(6): 7.

PENG Qibiao, LUO Huajun, TONG Laisheng, et al. Characteristics of maglev bogie for mid-low speed maglev vehicle[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2012, 35(6): 7.

- [3] 杨泉, 高柏松, 冯达贝. 既有长沙磁浮线路低置结构提速适应性研究[J]. 路基工程, 2018(3): 62.

YANG Quan, GAO Baisong, FENG Dubei. Research on speed-increasing adaptation of the low-placed structures in the existing maglev lines in Changsha[J]. Subgrade Engineering, 2018(3): 62.

- [4] 梁潇, 戴小冬, 谭超, 等. 既有长沙磁浮线路桥梁结构提速适用性研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(6): 1493.

LIANG Xiao, DAI Xiaodong, TAN Chao, et al. Study on the speed-increasing adaptation of the bridge structures in the existing maglev lines in Changsha[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(6): 1493.

- [5] 邹波. 中速磁浮轨道梁在日照温度下的变形及其对耦合振动的影响[D]. 上海: 上海交通大学, 2019.

ZOU Bo. Deformation of medium speed maglev guideway under sunshine temperature and its effect on coupled vibration[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2019.

- [6] 刘德军, 李小珍, 洪沁烨, 等. 中低速磁浮列车-大跨度连续梁耦合振动研究[J]. 铁道工程学报, 2017, 34(9): 53.

LIU Dejun, LI Xiaozhen, HONG Qinye, et al. Coupling vibration study of medium-low speed maglev train-long span continuous bridge system[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2017, 34(9): 53.

- [7] 洪沁烨. 徐变及温度效应对中低速磁浮大跨连续梁车桥耦合振动的影响[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.

HONG Qinye. The influence of creep-shrinkage and temperature effect on coupled vibration of low-medium speed maglev long-span continuous beam train-bridge system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.

- [8] 李小珍, 金鑫, 王党雄, 等. 长沙中低速磁浮运营线列车-桥梁系统耦合振动试验研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(13): 57.

LI Xiaozhen, JIN Xin, WANG Dangxiong, et al. Tests for coupled vibration of a train-bridge system on Changsha low-medium speed maglev line[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(13): 57.

- [9] 罗伟. 温州市域铁路高架线环境振动源强试验研究[J]. 都市快轨交通, 2021, 34(3): 108.

LUO Wei. Experimental study on the environmental vibration source of Wenzhou suburban railway elevated line[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2021, 34(3): 108.

(收稿日期: 2022-05-28)