

DOI: 10.11779/CJGE202012013

盾构隧道“T字缝”接触应力与防水性能研究

周文锋¹, 廖少明^{*1,2}, 门燕青³

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学岩土与地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;
3. 济南轨道交通集团有限公司, 山东 济南 250014)

摘要: 针对高水压海底盾构隧道防水安全问题, 以琼州海峡海底盾构隧道为背景, 开展了“T字缝”密封垫接触应力及防水性能研究。首先, 建立了“T字缝”渗流流固耦合数值计算模型, 揭示了“T字缝”密封垫间接触应力分布特点以及渗流规律; 同时, 采用自主研制的伺服式高水压试验装置开展了“T字缝”防水性能实验, 得到了不同接缝张开量情况下的渗漏临界水压; 最后, 根据数值模拟结果和试验数据建立了“T字缝”渗漏临界水压公式。研究表明: “T字缝”的环纵缝交点处的平均接触应力最大, 纵缝上距离交点 20 mm 处的平均接触应力最小, 易发生渗漏; 渗流形态与平均接触应力分布有关, 平均接触应力越小, 渗流速度越快; “T字缝”的临界水压与接缝张开量呈反比, 为保证琼州海峡海底隧道长期防水安全, 建议接缝张开量应小于 10 mm; “T字缝”渗漏临界水压公式计算结果最大误差为 15.7%, 满足精度要求。

关键词: 海底盾构隧道; T字缝; 防水安全; 渗流特性; 接触应力

中图分类号: U45 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2020)12-2264-07

作者简介: 周文锋(1987—), 男, 博士研究生, 主要从事盾构隧道防水安全方面的研究工作。E-mail: chow1025@126.com。

Contact stress and waterproof capacity of T-joint in shield tunnel

ZHOU Wen-feng¹, LIAO Shao-ming^{1, 2}, MEN Yan-qing³

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Jinan Rail Transit Group Co., Ltd., Jinan 250014, China)

Abstract: For the waterproof safety of undersea shield tunnels with high water pressure, the contact stress and waterproof capacity of T-joint are studied considering the background of Qiongzhou Strait Tunnel. Firstly, a fluid-solid coupling model for the T-joint is established to reveal the distribution characteristics of gasket-gasket contact stress and the seepage pattern. Then, a series of waterproof laboratory tests of the T-joint are conducted using the servo-type equipment developed independently to obtain the critical water pressure of joint leakage. Thirdly, the formula for the critical water pressure of leakage varying with the joint opening is derived based on the numerical data and the in-laboratory test results. The results show that the maximum value of the average contact stress is located at the corner of the T-joint, and the average contact stress of the location 20 mm away from the T-joint corner on the longitudinal seam is the lowest where the leakage is likely to occur. The seepage pattern is consistent with the distribution of the average contact stress, and the seepage velocity is greater where the average contact stress is lower. The critical water pressure of the T-joint is negatively related to the joint opening, and the joint opening should be lower than 10 mm to ensure the long-term waterproof safety of the Qiongzhou Strait Tunnel. The maximum error of the formula for the critical water pressure of leakage is 15.7%, meeting the accuracy requirements.

Key words: undersea shield tunnel; T-joint; waterproof safety; seepage pattern; contact stress

0 引言

中国河流湖泊众多, 水域面积辽阔, 盾构隧道在中国水下交通基础建设中发挥了重要的作用^[1]。与一般的地下工程相比, 水下隧道结构承担更大水压力作用, 在防水方面面临着巨大挑战, 其中管片接缝的密封性能是保证整条隧道防水安全的重要环节^[2]。

根据盾构隧道的结构特点, 管片接缝的主要防水措施是在管片四周沟槽中嵌入橡胶密封垫, 利用密封垫

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2015CB057806); 上海市“科技创新行动计划”项目(19511100802)

收稿日期: 2020-05-08

*通信作者(E-mail: engcent@tongji.edu.cn)

压缩变形或自膨胀产生的挤压应力来抵抗外部水压^[3]。目前, 常用的防水材料有氯丁橡胶、三元乙丙橡胶、吸水膨胀橡胶、聚氨酯、复合橡胶等, 其中氯丁橡胶是最早采用的防水材料, 目前已不多见; 三元乙丙橡胶因具有较好的压缩性、耐久性等, 在水下隧道防水中应用最为广泛; 吸水膨胀橡胶、聚氨酯等膨胀橡胶一般在大直径、高水压隧道中作为防水辅助手段; 随着橡胶硫化技术的提高, 将膨胀橡胶和三元乙丙橡胶进行整合, 形成了复合橡胶, 在隧道防水中的应用越来越广^[4]。

防水安全对隧道结构的安全性和耐久性至关重要。目前, 研究人员针对管片接缝的渗漏机理和防水措施开展了大量的研究, 取得了丰硕的成果^[5-7]。拓勇飞等^[8]针对超高水压大直径盾构管片接缝防水要求, 对密封垫的布置方式和断面形式进行了设计和优化; 王湛^[9]利用有限元软件对接缝张开及接缝错开情况下的密封垫防水失效机理进行了研究; 董林伟等^[10]对隧道管片接缝处密封垫的受力和变形特征进行分析, 建立了密封垫防水的力学模型; 龚琛杰等^[11]针对中国大直径水下盾构隧道接缝防水问题, 提出了一套接缝弹性密封垫的设计方法。

盾构隧道衬砌多采用错缝拼装方式, 根据形式不同可将管片接缝分为“一字缝”和“T字缝”^[12]。通过对国内外水下隧道的渗漏水调研, 发现接缝渗漏多发生在“T字缝”附近^[13]。目前, 管片接缝的防水研究主要集中在“一字缝”, 鲜有研究涉及“T字缝”的渗漏水问题。为了进一步探究“T字缝”的防水性能, 本文基于琼州海峡海底隧道项目, 利用有限元分析软件 ABAQUS 建立“T字缝”流固耦合计算模型, 通过分析密封垫间接触应力分布特征及渗流规律, 确定了接缝易渗漏位置。通过开展密封垫防水室内试验, 得到了“T字缝”不同张开量下的渗漏水临界水压, 在此基础上推导得到了“T字缝”渗漏临界水压公式。

1 工程背景

琼州海峡海底隧道为中国国家战略规划项目, 是中国东部铁路大动脉的重要一环, 在不久的将来在中国珠江三角洲和海南岛一体化发展中发挥重要作用^[14]。根据初步设计方案, 隧道北起雷州半岛, 南到海南岛, 全长 27.6 km, 外径为 16.7 m, 采用盾构法施工。根据地质勘查报告, 琼州海峡最大水深达到 114 m, 海底分布有深厚的高渗透性软土层, 隧道承担的最大水压达到 2.0 MPa。与一般水下隧道相比, 海底隧道周围海水中富含氯离子等腐蚀性离子^[15], 因此考虑到高

水压富氯环境下橡胶老化对其防水性能的影响, 橡胶密封垫的防水安全系数取 2.0, 琼州海峡海底隧道的设计水压为 4.0 MPa。

根据琼州海峡海底隧道防水方案, 管片接缝处采用两道防水措施: 弹性橡胶密封垫+遇水膨胀橡胶。其中, 靠近接缝外侧的弹性橡胶密封垫为主要防水措施, 密封垫材料为三元乙丙橡胶, 硬度为 70 Shore A, 开孔率为 38.3%, 其断面及沟槽尺寸如图 1 所示。接缝内侧为遇水膨胀橡胶, 作为辅助防水措施备用。本文主要研究弹性橡胶密封垫的防水性能。

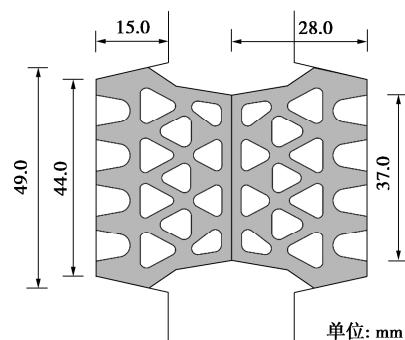


图 1 橡胶密封垫及管片沟槽断面图

Fig. 1 Cross-section of grooves and rubber gaskets

2 流固耦合数值模型

为了模拟管片接缝处的渗流过程, 本文提出基于欧拉-拉格朗日网格的流固耦合算法。与传统有限元网格不同, 欧拉网格节点 (node) 固定不动, 欧拉单元 (cell) 不会发生变形, 而材料 (material) 可在网格中自由移动, 因此欧拉-拉格朗日网格适用于流体计算等大变形分析。

采用大型有限元软件 ABAQUS 建立“T字缝”流固耦合计算模型, 如图 2 所示。该模型包括欧拉部件和拉格朗日部件。欧拉网格部件包含参考体 (reference part) 和欧拉体 (Eulerian part), 其中参考体定义了流体材料的初始形状, 而欧拉体为流体材料提供了流动空间和区域。拉格朗日网格部件包括管片沟槽 G-1, G-2, G-3 和橡胶密封垫 M-1, M-2, M-3。其中, 管片沟槽 G-3 与 G-1, G-2 形成环缝 Seam-C; G-1 与 G-2 形成纵缝 Seam-L, 如图 3 所示。

限于篇幅, 本文暂不考虑“T字缝”错台变形的影响, 将张开量设置为 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 mm, 且环缝、纵缝的张开量相同。

2.1 模型材料

橡胶材料一般视为超弹性体, 具有不可压缩性, 在数值分析中通常采用 Mooney-Rivlin 模型进行模拟, 通过橡胶材料的应变能密度函数得到橡胶弹性模量与

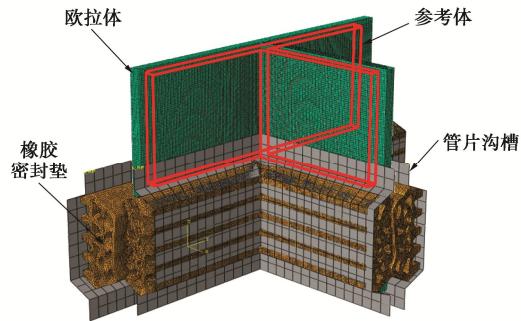


图 2 “T 字缝”渗流流固耦合数值模型

Fig. 2 Sketch of fluid-solid coupling numerical model for T-joint

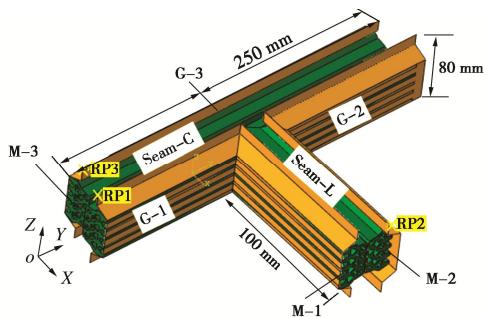


图 3 “T 字缝”结构示意图

Fig. 3 Sketch of T-joint structure

材料参数之间的关系为

$$E_0 = 6C_{10} \left(1 + \frac{C_{01}}{C_{10}} \right) , \quad (1)$$

式中, E_0 为橡胶弹性模量 (MPa), C_{01} , C_{10} 为材料参数 (MPa)。通过橡胶拉伸试验可知, 当橡胶材料硬度为 70 Shore A 时, $C_{10}=0.736$, $C_{01}=0.184$ 。

流体材料由流体状态方程 (EOS) 中的 US-UP 方程进行定义:

$$P_H = \frac{\rho_0 c_0^2 \eta}{(1-s\eta)^2} , \quad (2)$$

$$U_s = c_0 + sU_p , \quad (3)$$

式中, P_H 为 Hugoniot 压力 (MPa), ρ_0 为流体密度 (t/mm^3), η 为公称容积压缩应变, U_s 为应力波传播速度 (mm/s), U_p 为质点运动速度 (mm/s), s , c_0 为系数。具体参数取值: $\rho_0=1 \times 10^{-9} t/mm^3$, $c_0=1.45 \times 10^6 mm/s$, $s=0$, $\eta=0$, $U_p=1.00 \times 10^{-9} mm/s$ 。

2.2 模型边界

管片沟槽采用离散刚体壳单元进行模拟。密封垫脚部与沟槽刚体之间采用绑定约束 (tie)。其余部位的接触均设置为通用约束 (general contact), 法向采用硬接触, 摩擦系数为 0.5。

在壳单元上设置参考点 (RP), 用于控制沟槽的运动。首先限制 RP2 的所有自由度, 保证沟槽 G-2 固

定不动; 然后对 RP1 施加 Y 轴正方向的位移, 挤压纵缝密封垫; 最后对 RP3 施加 X 轴正方向的位移, 挤压环缝密封垫, 完成“T 字缝”拼装。接缝完全闭合时的最大压缩量为 26 mm, 当压缩量为 24, 22, 20, 18, 16, 14, 12, 10 mm 时, 对应的张开量为 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 mm。为了防止流体材料流出欧拉网格, 固定欧拉体上的所有速度边界。

3 接触应力分布及渗流规律分析

3.1 密封垫接触应力分布

由于橡胶密封垫中存在结构孔洞, 密封垫间的接触应力沿横断面并非均匀分布。孔洞压缩变形引起应力释放, 因此孔洞附近的接触应力较小 (应力谷值), 而相邻孔洞之间的橡胶实体本身无法压缩, 接触应力得到加强, 因此接触应力较大 (应力峰值), 如图 4 所示。

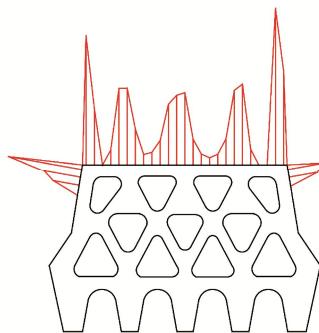


图 4 密封垫间接触应力沿横断面分布

Fig. 4 Distribution of gasket-gasket contact stress along cross-section of T-joint

为了便于描述密封垫接触应力大小, 一般采用该横断面上的平均接触应力作为接触应力特征值。根据数值模型计算结果整理得到“T 字缝”各横断面平均接触应力沿密封垫纵向的分布曲线, 如图 5 所示。其中环缝 Seam-C 由两段组成, 由于两段的橡胶密封垫型式和接缝张开量相同, 平均接触应力分布也相同, 因此图中仅作右侧环缝的平均接触应力曲线。以环缝和纵缝密封垫之间的接触面交点作为坐标原点。

通过“T 字缝”平均接触应力纵向分布曲线可以看出, 部分环缝原点附近的平均接触应力先增大后减小, 这是由于环缝中靠近纵缝一侧的密封垫由两段密封垫组成, 两密封垫接触面处的间隙使得部分环缝原点处的平均接触应力偏小。通过曲线可以看出, 环缝和纵缝交点附近的接触应力最大, 随着与交点的距离逐渐增大, 接触应力急剧减小, 其中纵缝的下降速率大于环缝的下降速率。在距离“T 字缝”交点 20 mm 处, 环缝的平均接触应力曲线趋于平缓, 在 30 mm 位

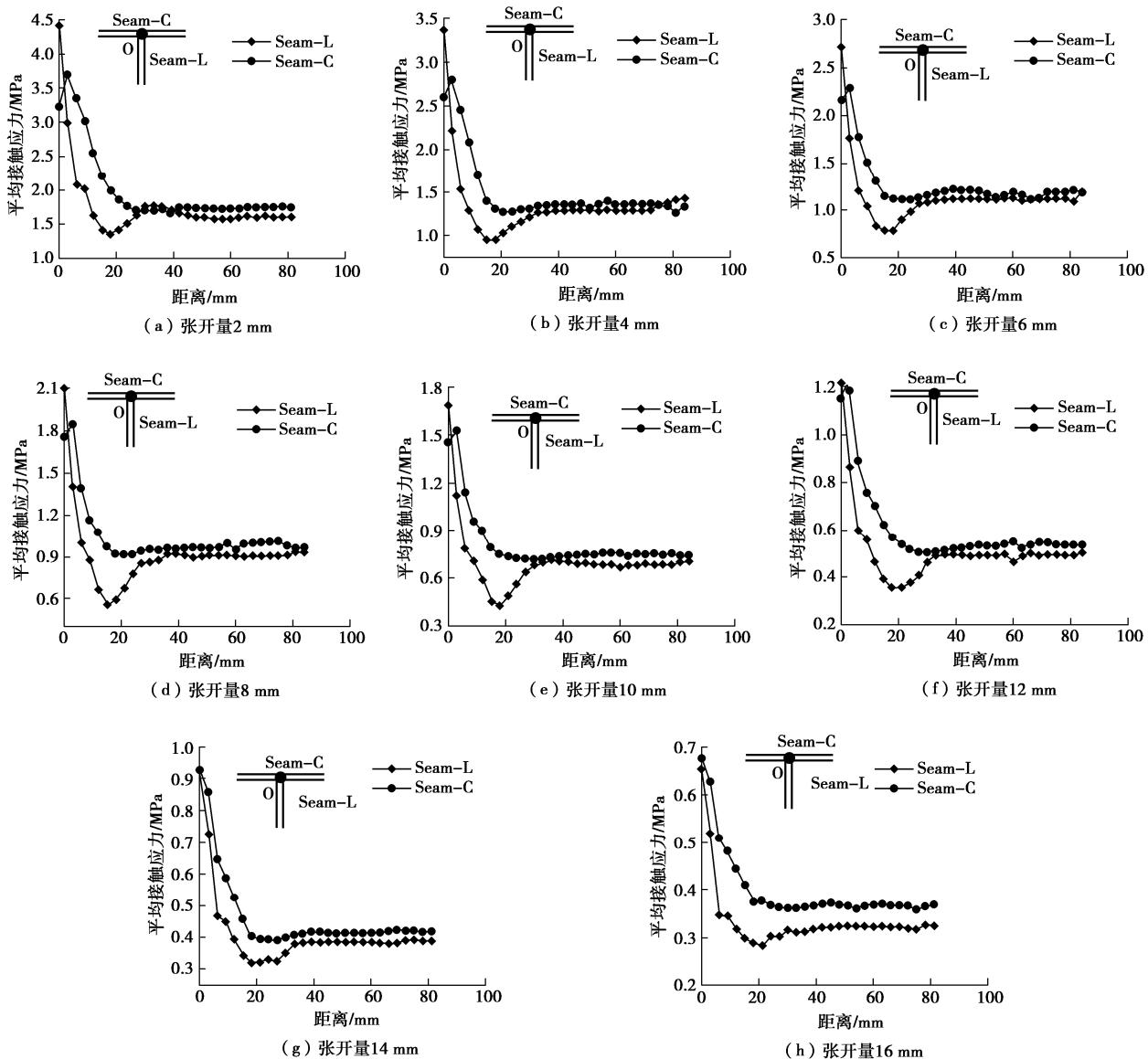


图5 “T字缝”密封垫间平均接触应力纵向分布曲线

Fig. 5 Curves of longitudinal distributions of average contact stress

置后基本保持恒定, 而纵缝平均接触应力在 20 mm 处降低至最小值后随距离反向增大, 在 30 mm 处逐渐趋于稳定, 此时纵缝的平均接触应力曲线呈凹槽形, 称为“应力槽”。

当与“T字缝”交点的距离超过 30 mm 时, 纵缝和环缝的平均接触应力曲线基本不再变化, 说明其受密封垫角部的影响较小, 此时的平均接触应力值与相同张开量下的“一字缝”一致。

通过曲线可以看出, 在相同接缝张开量情况下, 除“T字缝”交点处之外, 纵缝的平均接触应力均小于环缝, 其中纵缝的“应力槽”处为“T字缝”平均接触应力最小位置。因此纵缝上靠近“T字缝”角部的位置最有可能发生渗漏水。

纵缝“应力槽”处的最小平均接触应力与接缝

张开量关系如图 6 所示。可以看出, “T字缝”的最小平均接触应力随着接缝张开量增大而减小, 通过拟合分析得到拟合公式:

$$P_{\min} = 0.0146E_0 e^{-6.2943 \left(\frac{\delta_0 - \delta}{t} \right)} \quad (\delta \leq \delta_0) \quad (4)$$

式中, P_{\min} 为“T字缝”最小平均接触应力 (MPa), δ 为接缝张开量 (mm), δ_0 为接缝最大张开量, 本文中其值为 26 mm, E_0 为密封垫弹性模量 (MPa), t 为接缝处密封垫压缩前总厚度, 本文中为 56 mm。

3.2 “T字缝”渗流规律

为了便于分析“T字缝”的渗流形态, 环缝渗流形态图中未显示管片刚体和密封垫 M-1, M-2, 纵缝渗流形态图中未显示管片刚体和密封垫 M-1, M-3, 如图 7 所示。

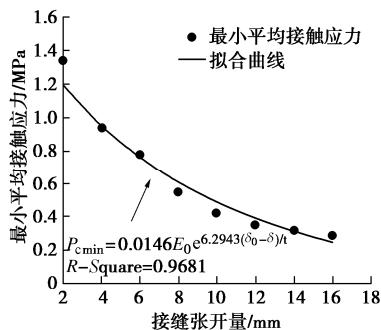


图 6 密封垫最小平均接触应力与接缝张开量的关系

Fig. 6 Relationship between minimum average contact stress and joint opening

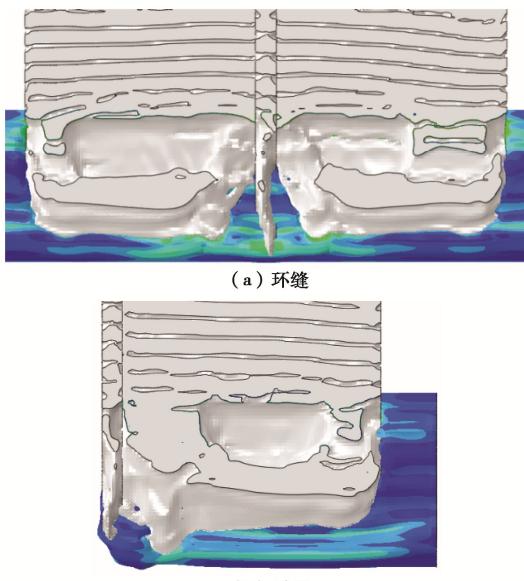


图 7 “T 字缝”渗流形态

Fig. 7 Seepage patterns of T-joint

通过张开量为 12mm 时的“T 字缝”的渗流形态可以看出,“T 字缝”环纵缝交点处的渗流速度最小,随着与交点距离增大,环缝上的渗流速度逐渐增大,当距交点超过 30 mm 左右时渗流速度不再增大并逐渐趋于稳定。在纵缝上,渗流速度随着与交点距离增大而增大,在距离交点 20 mm 时达到最大,随后渗流速度随距离逐渐减小,最后趋于稳定。

通过上述分析发现“T 字缝”渗流形态与平均接触应力分布曲线相吻合,说明渗流速度与密封垫的平均接触应力有关,平均接触应力越小,渗流速度越快。由于,“T 字缝”的纵缝“应力槽”位置的平均接触应力最小,渗流速度最快,水流最先穿透密封垫。因此,“T 字缝”最容易发生渗漏的位置为纵缝上距离交点 20 mm 处。

4 “T 字缝”防水性能试验分析

4.1 “T 字缝”防水试验研究

本试验采用自主研制的伺服式高水压管片接缝

试验装置,如图 8 所示。该装置可提供最大 4 MPa 的水压,控制精度为 0.001 MPa。采用分级加载方式,当密封垫发生渗漏水时,取其前一级水压作为“T 字缝”临界水压。



图 8 伺服式高水压接缝防水试验装置

Fig. 8 Servo-type waterproof test device for high water pressure joints

试验发现在无错缝条件下,当张开量为 10 mm 即压缩量为 16 mm 时,“T 字缝”的渗漏临界水压达到 3.84 MPa,当接缝张开量小于 10 mm 时,“T 字缝”没有发生渗漏,超过了本试验装置的水压量程,说明其临界水压大于 4 MPa。

通过观察发现,“T 字缝”的渗漏大多发生在靠近密封垫角部位置,如图 9 所示,与第 3 节中密封垫接触应力与渗流形态分析的结论基本一致,渗漏形式多为喷射状或股状流出。根据试验结果得到“T 字缝”渗漏临界水压与接缝张开量之间的关系,如图 10 所示。可以看出密封垫渗漏水临界水压随着接缝张开量的增大而减小。



图 9 “T 字缝”角部渗漏

Fig. 9 Picture of leakage at corner of T-joint

4.2 “T 字缝”防水理论分析

管片接缝主要依靠密封垫之间的接触应力来抵抗外部水压,针对密封垫的防水性能,相关学者开展了大量的研究,认为密封垫防水能力与其接触应力线

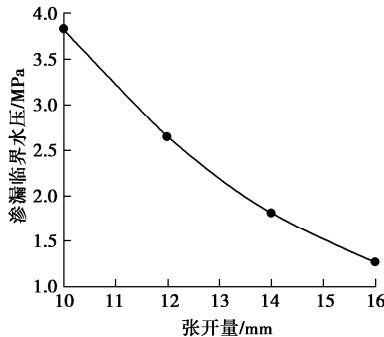


图 10 “T字缝”渗漏临界水压与接缝张开量的关系

Fig. 10 Relationship between critical water pressure and joint opening

性相关, 提出了接缝防水能力 P_w 与密封垫平均接触应力 P_c 之间的关系:

$$P_w = \lambda P_c , \quad (5)$$

式中, λ 为与接头性质相关的参数。

式(5)是根据“一字缝”的防水试验结果得到的, 未考虑接缝变形的影响, 在此基础上, 本文提出考虑接缝变形的“T字缝”渗漏临界水压公式:

$$P_w = \lambda(\delta) P_{cmin} . \quad (6)$$

根据数值分析及防水试验结果, 将“T字缝”在不同张开量条件下的最小平均接触应力、渗漏临界水压和参数 λ 值进行汇总, 见表 1。

表 1 数值及试验结果汇总表

Table 1 Summary of numerical and laboratory results

δ/mm	P_{cmin}/MPa	P_w/MPa	λ
10	0.43	3.84	8.93
12	0.35	2.66	7.50
14	0.32	1.82	5.70
16	0.29	1.27	4.44

可以看出 λ 值不是定值, 而是与接缝张开量呈负相关关系, 如图 11 所示。通过曲线拟合得到参数 λ 与接缝张开量 δ 之间的关系式:

$$\lambda(\delta) = 1.3743 e^{6.638 \left(\frac{\delta_0 - \delta}{t} \right)} \quad (\delta \leq \delta_0) . \quad (7)$$

将式(4), (7) 代入式(6), 得到考虑接缝张开的“T字缝”渗漏临界水压公式:

$$\begin{aligned} P_w &= \lambda(\delta) P_{cmin} \\ &= 1.3743 e^{6.638 \left(\frac{\delta_0 - \delta}{t} \right)} P_{cmin} \\ &= 0.02 E_0 e^{12.9323 \left(\frac{\delta_0 - \delta}{t} \right)} \quad (\delta \leq \delta_0) . \quad (8) \end{aligned}$$

为了验证“T字缝”渗漏临界水压公式的可靠性, 将由式(8)计算得到的理论临界水压 P_{wt} 和由防水试验得到的试验临界水压 P_{wl} 进行误差分析, 得到临界水压误差曲线, 如图 12 所示。可以看出, “T字缝”渗漏临界水压理论值与试验值之间的最大误差为 15.7%。

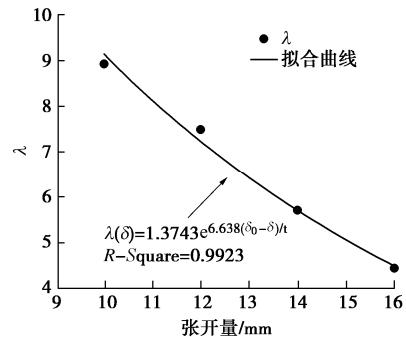
图 11 “T字缝”参数 λ 与接缝张开量之间的关系

Fig. 11 Relationship between parameter λ and joint opening

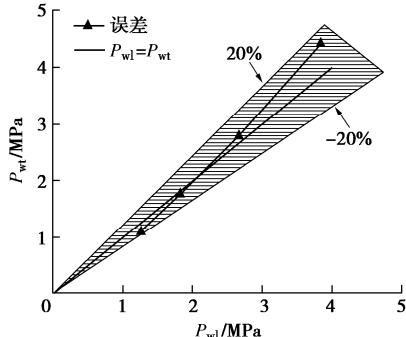


图 12 理论分析与室内试验渗漏临界水压误差分析

Fig. 12 Error analysis of critical water pressure between theoretical analysis and laboratory tests

5 结 论

本文通过“T字缝”流固耦合数值模型及伺服式高水压试验, 对“T字缝”角部附近的接触应力分布规律、渗流形态和防水性能进行分析, 并在此基础上建立了“T字缝”渗漏临界水压公式。得到如下 5 点结论。

(1) “T字缝”的环纵缝交点处的平均接触应力最大, 环缝上的平均接触应力随着与交点的距离增大而减小, 在 30 mm 处逐渐趋于稳定; 纵缝上的平均接触应力随着与交点距离先减小后增大, 在距离交点 20 mm 处形成一个“应力槽”, 在 30 mm 处逐渐稳定。

(2) “T字缝”的渗流形态与平均接触应力分布曲线吻合。密封垫的渗流速度与平均接触应力大小有关, 平均接触应力越小, 渗流速度越快。距离“T字缝”20 mm 的纵缝“应力槽”处的平均接触应力最小, 最有可能发生渗漏。

(3) 通过室内防水试验发现“T字缝”的渗漏水大多发生在角部附近, 与理论及数值分析结果一致, 渗漏形式主要为喷射状或股状流出。

(4) “T字缝”的防水能力与接缝张开量呈负相关关系。在不考虑错缝的情况下, 为保证琼州海峡海底隧道的长期防水安全, “T字缝”的张开量应小于 10 mm。

(5) “T 字缝”渗漏临界水压公式的计算得到的渗漏临界水压的最大误差为 15.7%。

参考文献:

- [1] 何川, 封坤, 方勇. 盾构法修建地铁隧道的技术现状与展望[J]. 西南交通大学学报, 2015, **50**(1): 97–109. (HE Chuan, FENG Kun, FANG Yong. Review and prospects on constructing technologies of metro tunnels using shield tunnelling method[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2015, **50**(1): 97–109. (in Chinese))
- [2] 向科, 石修巍. 盾构管片弹性密封垫断面设计与优化[J]. 地下空间与工程学报, 2008(2): 361–364. (XIANG Ke, SHI Xiu-wei. Design and optimization of elastic gasket section of shield tunnel lining[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2008(2): 361–364. (in Chinese))
- [3] 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**(增刊 2): 200–206. (YE Mei-xi, DING Wen-qi, CHEN Jun-wei, et al. Sensitivity analysis of influencing factors on mechanical properties of EPDM sealing gasket of segment joint of shield tunnel[J]. Tunnel Construction, 2019, **39**(S2): 200–206. (in Chinese))
- [4] YANG C, SHEN S L, HOU D W, et al. Material properties of the seal gasket for shield tunnels: A review[J]. Construction and Building Materials, 2018, **191**: 877–890.
- [5] 李拼, 谢宏明, 何川, 等. 基于有效接触应力的大张开量盾构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 Hong-ming, 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. (in Chinese))
- [6] GONG C J, DING W Q, XIE D W. Parametric investigation on the sealant behavior of tunnel segmental joints under water pressurization[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, **97**: 103231.
- [7] 朱洺嵌, 丁文其, 金跃郎, 等. 上海市高水压深层排水盾构隧道管片接缝密封垫形式试验研究[J]. 隧道建设(中英文), 2017, **37**(10): 1303–1308. (ZHU Ming-qin, DING Wen-qi, JIN Yue-lang, et al. Experimental study of segment joint sealing gasket forms of deep drainage shield tunnel in shanghai under high water pressure[J]. Tunnel Construction, 2017, **37**(10): 1303–1308. (in Chinese))
- [8] 拓勇飞, 舒恒, 郭小红, 等. 超高水压大直径盾构隧道管片接缝防水设计与试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(增刊 1): 227–231. (TUO Yong-fei, SHU Heng, GUO Xiao-hong, et al. Design and experimental study on waterproof gasket of large-diameter shield tunnel under ultra high water pressure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(S1): 227–231. (in Chinese))
- [9] 王湛. 水下盾构隧道弹性密封垫防水失效数值模拟研究[J]. 隧道建设(中英文), 2015, **35**(11): 1164–1168. (WANG Zhan. Numerical study on waterproof failure mechanism of elastic sealing gasket of underwater shield-bored tunnel[J]. Tunnel Construction, 2015, **35**(11): 1164–1168. (in Chinese))
- [10] 董林伟, 江玉生, 杨志勇, 等. 隧道管片接缝密封垫防水机理及试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(3): 469–474. (DONG Lin-wei, JIANG Yu-sheng, YANG Zhi-yong, et al. Experimental study and water-resistant mechanism of gaskets in joints of tunnel segments[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(3): 469–474. (in Chinese))
- [11] 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 Chen-jie, DING Wen-qi. 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. (in Chinese))
- [12] 陆明, 雷震宇, 张勇, 等. 上海长江隧道衬砌接缝和连接通道的防水试验研究[J]. 地下工程与隧道, 2008(4): 12–16, 67. (LU Ming, LEI Zhen-yu, ZHANG Yong, et al. Waterproofing test of lining joint and cross passage of Shanghai Yangtze River tunnel[J]. Underground Engineering and Tunnels, 2008(4): 12–16, 67. (in Chinese))
- [13] 陈云尧, 张军伟, 马士伟, 等. 盾构隧道管片密封垫防水失效模式及改善研究[J]. 隧道建设(中英文), 2019, **39**(6): 946–952. (CHEN Yun-yao, ZHANG Jun-wei, MA Shi-wei, et al. Waterproof failure mode and improvement for sealing gasket of shield tunnel segment[J]. Tunnel Construction, 2019, **39**(6): 946–952. (in Chinese))
- [14] 谭忠盛, 贺维国, 王梦恕. 琼州海峡工程地质条件及铁路隧道方案研究[J]. 隧道建设(中英文), 2018, **38**(1): 1–7. (TAN Zhong-sheng, HE Wei-guo, WANG Meng-shu. Study of engineering geological conditions and railway tunnel scheme across Qiongzhou strait[J]. Tunnel Construction, 2018, **38**(1): 1–7. (in Chinese))
- [15] CHEN K H, ZHANG Z, LIAO S M, et al. Durability of joint components of shield tunnel under high water pressure in erosion environment[J]. Procedia Engineering, 2016, **165**: 282–289.