

盾构隧道接缝密封垫转角工艺分析与优化

李 焱^{1,2}

¹同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 上海

²同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海

Email: tjeduly@163.com

收稿日期: 2020年11月23日; 录用日期: 2020年12月16日; 发布日期: 2020年12月24日

摘 要

为了对盾构隧道接缝密封垫转角结构进行优化, 改进密封垫转角工艺, 保障密封垫接缝防水性能, 对密封垫的转角工艺进行分析研究, 得到了以下结论: 1) 结合工程实际, 提出密封垫实心转角问题——密封垫的实心转角更容易出现破坏和渗漏; 2) 数值分析计算发现密封垫实心转角会降低密封垫转角的压缩性, 同时增大密封垫转角的压缩力, 采用空心转角工艺可以大幅增加密封垫转角的压缩性和降低密封垫转角的压缩力, 更小的压缩力得到更大的压缩性, 有利于盾构隧道现场管片施工; 3) 密封垫空心转角工艺可以为盾构隧道管片接缝密封垫制作工艺提供参考。

关键词

盾构隧道, 密封垫, 转角工艺, 优化

Analysis and Optimization on Corner Technology for Segment Joint Gasket in Shield Tunnel

Yi Li^{1,2}

¹Department of Geotechnical Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai

²Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai

Email: tjeduly@163.com

文章引用: 李焱. 盾构隧道接缝密封垫转角工艺分析与优化[J]. 土木工程, 2020, 9(12): 1321-1328.

DOI: 10.12677/hjce.2020.912138

Abstract

In order to optimize the structure of the waterproof gasket of shield tunnel, improve the technology of sealing gasket angle and ensure the waterproof performance of sealing gasket joint, the corner structure design of sealing gasket is studied, and the following conclusions are obtained: 1) based on the engineering practice, the solid corner of the gasket is more prone to damage and leakage; 2) numerical analysis and calculation found that the solid corner of the gasket will reduce the compressibility of the gasket corner, and increase the compression force of the gasket corner. The hollow corner technology can greatly increase the compressibility of the gasket corner and reduce the compression force of the gasket corner. The smaller compression force can obtain greater compressibility, which is conducive to the construction of shield tunnel; 3) hollow corner technology of sealing gasket can provide reference for the manufacturing technology of joint sealing gasket of shield tunnel.

Keywords

Shield Tunnel, Gasket, Corner Technology, Optimization

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

盾构隧道防水设计经过长期发展, 目前国内的盾构隧道项目大多考虑采用非膨胀性三元乙丙橡胶弹性密封垫作为接缝防水材料。由于盾构隧道为拼装结构形式, 隧道环缝、纵缝的存在使得密封垫会出现相互搭接以及转角的问题, 如何对密封垫构造及工艺进行优化, 成为了目前工程和研究的重点。

根据目前的相关研究及工程应用, 龚琛杰等[1]提出了接缝密封垫防水设计方法和工程指导, 防范应用于国内盾构隧道工程。由广明[2]的研究提出, 根据盾构隧道现场排查发现存在密封垫角部被挤出现象, 可能会对接缝防水产生影响; 温竹茵[3]的研究也提出, 试验过程中刚发现密封垫的转角易出现渗漏, 需要采取措施进行处理; 黄星程等[4]提出, 由于密封垫转角工艺的限制, 转角截面采用实心截面, 导致密封垫转角处的防水性能受到影响; 金跃郎[5]等提出, 由于目前密封垫转角采用实心转角硫化搭接, 因此试验中发现密封垫防水失效主要是转角漏水; 钟元元[6]等的研究提出, 密封垫角部实心对密封垫转角防水造成影响, 尤其是对埋深较大、抗水压要求高的盾构隧道工程, 可以将转角设计成空腔结构, 或者采用 45°转角方式; 朱祖熹[7]的研究也提出, 密封垫拼装时角部通常会起“鼓”, 因此国外在施工中通常从外面钻孔来减小转角的应力集中; 吴炜枫等[8]的研究提出, 采用实心转角密封垫情况时, 密封垫转角是渗漏的多发区域, 采用空心转角可以改善密封垫转角处渗漏水的情况。

基于实际工程应用中发现的问题, 对密封垫的转角工艺进行分析研究, 总结出传统实心转角的问题, 提出空心转角工艺优化改进方案, 针对转角问题及优化方案多工况数值计算分析, 根据压缩性、压缩力计算结果对不同转角工艺进行优化分析, 从而指导类似工程的接缝密封垫制作工艺, 为今后类似工程项目设计建设提供参考。

2. 盾构隧道密封垫实心转角问题

2.1. 工程背景

国内某高水压盾构隧道工程，隧道最大水压值为 0.8 MPa，根据防水设计标准，在极限工况下，盾构隧道防水性能设计指标为 1.6 MPa。由于盾构隧道接缝的存在，接缝防水是盾构隧道整体防水设计的薄弱环节，因此隧道设计采用三元乙丙橡胶作为接缝防水密封材料。为了保证隧道在高水压下的防水性能，密封垫设计时需要其具有一定压缩性的同时，有较高的防水性能。

盾构隧道密封垫防水主要依靠密封垫之间相互挤压产生接触应力，每块管片设置沟槽粘贴密封垫，相邻管片、管片环之间互相拼装挤压，从而达到防水的目的。由于密封垫圈的设置，根据实际工程施工反馈，发现拼装之后密封垫圈的角部通常会出现欠压缩、渗水等问题，基于此现象开展了相关的研究。

2.2. 转角问题

根据盾构隧道现场密封垫制作情况调查以及盾构隧道密封垫防水性能试验结果，发现由于传统密封垫转角制作工艺存在一定问题，即密封垫转角未进行处理，导致密封垫转角的橡胶为实心密实状态，主要有两种情形，一是密封垫角部完全未做处理，即完全处于实心状态；二是角部处理不完全，导致部分实心部分空心。对现场的一批密封垫进行切割后发现，密封垫角部虽然做了部分处理，但是实际上大部分孔洞均处于封闭状态，如图 1 所示。



Figure 1. Schematic diagram of solid corner of gasket

图 1. 密封垫实心转角示意图

在传统工艺下制作的密封垫在压缩过程中，由于转角密封垫截面处于实心状态，且由于转角构造本身对于密封垫压缩会有限制作用，因此会对结构性能产生不利影响。管片拼装压缩过程可能会造成以下问题。一是由于密封垫角部实心，导致其压缩性差，施工过程中无法保证完全压缩；二是压缩力一定时，角部压缩量小，其他部位由于开孔设置压缩量大，转角更容易出现渗漏；三是为了达到一定的压缩量来满足施工要求，需要更大的压缩力，导致管片转角密封垫及附近的混凝土出现应力集中，应力过大时甚至出现混凝土开裂的情况，因此转角更容易出现渗漏。同时根据室内试验的结果显示，渗漏也经常发生在转角位置，如图 2 所示。

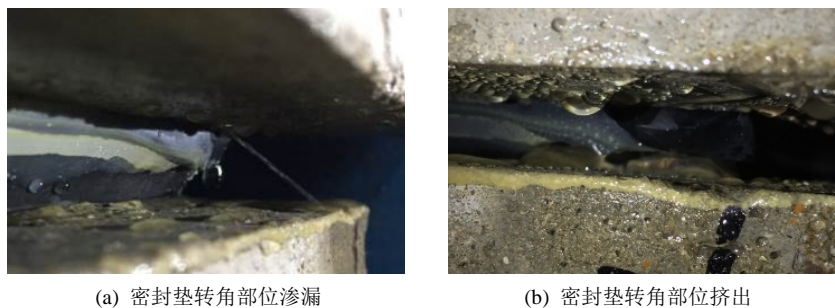


Figure 2. Leakage and extrusion of sealing gasket corner
图 2. 密封垫转角部位渗漏与挤出

3. 盾构隧道密封垫转角数值分析

3.1. 数值分析模型

盾构隧道接缝密封垫防水主要是依靠密封垫在一定的压缩量下保持一定的接触应力，其中密封垫转角是接缝密封的薄弱环节，因此开展了相关数值计算，对压缩状态下密封垫转角不同工艺进行分析，考虑密封垫实心转角、空心转角两种不同工艺进行分析研究，示意图如图 3 所示。

根据相关文献研究，本文建立了如下模型模拟密封垫转角压缩过程，如图 4 所示。采用 ABAQUS 有限元软件对密封垫转角进行数值分析。弹性密封垫材料模型选取 Mooney-Rivlin 超弹性本构模型，混凝土沟槽采用刚体模拟，密封垫与混凝土之间的相互作用采用罚函数摩擦考虑，计算参数见[4]。设置不同分析步，模拟密封垫转角拼装压缩过程。

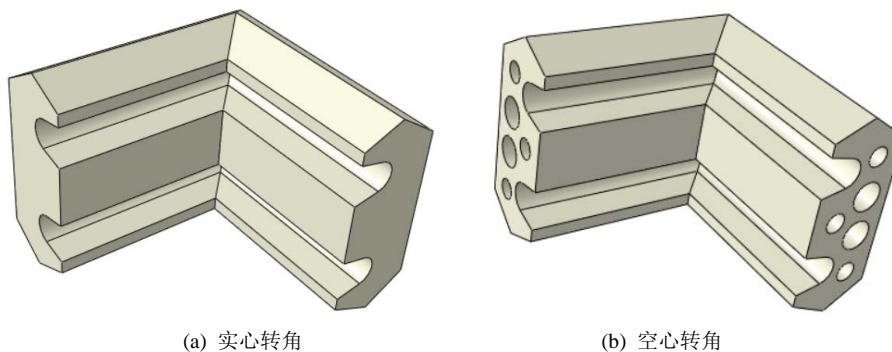


Figure 3. Schematic diagram of different technology for sealing gasket angle of shield tunnel
图 3. 盾构隧道密封垫转角不同工艺示意图

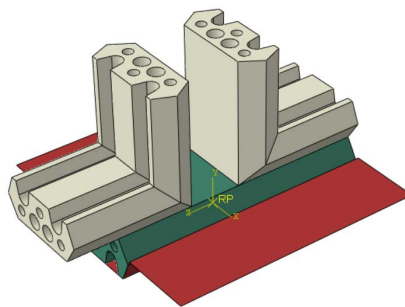


Figure 4. Numerical model of shield tunnel gasket corner
图 4. 盾构隧道密封垫转角数值模型

3.2. 数值分析工况

基于前文的分析,对不同转角工艺进行数值分析计算,为了模拟真实过程中的密封垫角部压缩情况,模拟过程考虑先将上部左右两部分向内压缩一定量,然后再整体向下压缩同样的量,保证上下各密封垫均处于同一压缩量下。根据实际工程中密封垫的压缩过程,设置了如表 1 所示的计算工况,分析在不同的压缩量情况下,不同转角工艺下不同转角位置的压缩量、压缩力的变化规律。

Table 1. System resulting data of standard experiment
表 1. 密封垫转角数值计算工况

工况	压缩量(mm)	转角工艺
1	6	实心
2	6	空心
3	8	实心
4	8	空心
5	10	实心
6	10	空心

3.3. 数值计算结果分析

为了对不同转角工艺的压缩性和力学性能进行分析,如图 5 所示,提取图示红色路径的压缩量进行分析,同时对密封垫的压缩力进行提取,具体分析结果如下。

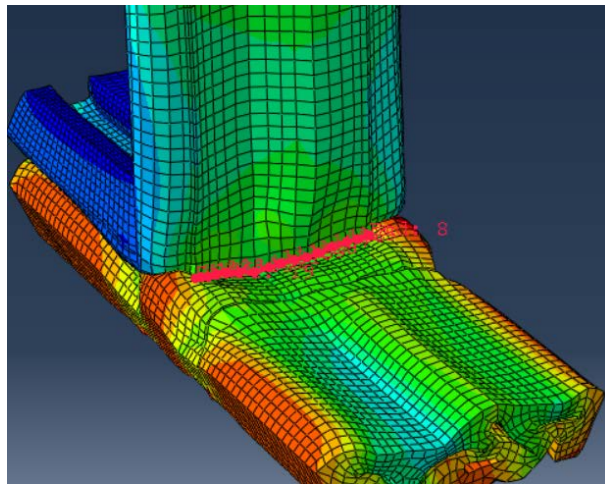


Figure 5. Calculation cloud figure of sealing gasket corner
图 5. 密封垫转角部位计算云图

3.3.1. 不同转角工艺压缩量分析

根据数值计算结果,提取不同工况下的密封垫转角部位的压缩量值,如图 6、图 7 所示。根据计算结果,在不同的压缩量工况下,空心转角工况对应的转角部位两侧压缩量大,中间压缩量小,实心转角工况对应的转角部位压缩量基本一致,中间的压缩量稍大于两侧;随着压缩量的增加,空心转角工况下,密封垫转角部位的压缩量显著提高,并且随着整体压缩量的增加,空心转角部位的压缩量逐渐大于实心转角部位;随着整体压缩量的增加,空心转角及实心转角压缩量均有所提升,空心转角对应的压缩量增加幅度更大。

在密封垫实心转角工况下,密封垫转角处相互接触部分,密封垫压缩性低,两侧压缩量小,导致压缩之后会出现密封垫被挤出现象。在密封垫空心转角工况下,转角部位压缩量中间及两侧的压缩量基本相同,整体压缩性较好且不存在密封垫挤出的情况,更有利于结构设置。在实心转角工况下,密封垫中心点压缩量较大,两侧角部位置的压缩量小,在实心转角工艺下,密封垫转角处只有中间位置压缩量大,两侧的压缩量小。在空心转角工况下,密封垫各处的压缩量基本相同,表明在空心转角工艺下,角部密封垫开孔率变大,压缩性提高,密封垫各处均较好压缩。

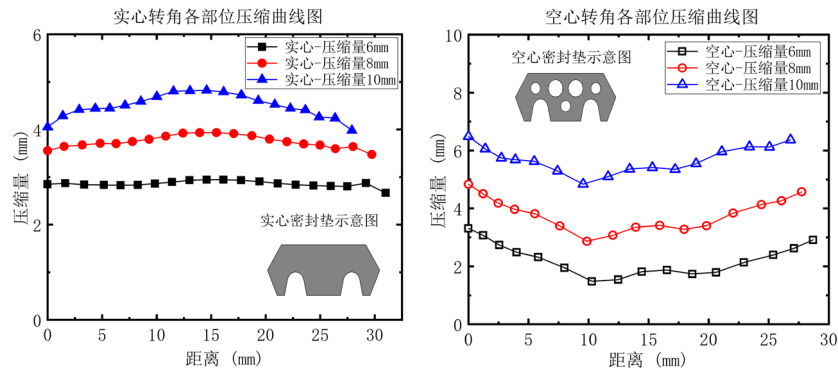


Figure 6. Compression curve of sealing gasket corner under different corner technology
图 6. 不同转角工艺下密封垫转角部位压缩曲线

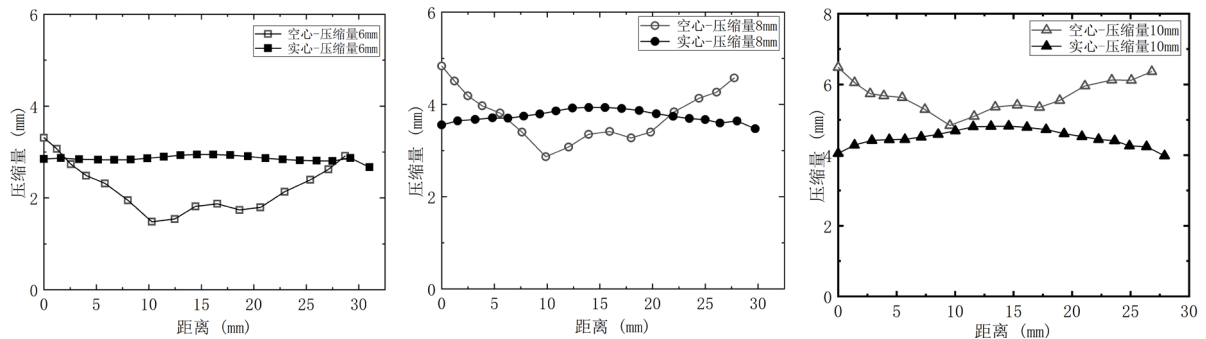


Figure 7. Compression curve of sealing gasket corner under different compression
图 7. 不同压缩量下密封垫转角部位压缩曲线

3.3.2. 不同转角工艺压缩力分析

为了确定压缩过程中密封垫角部的力学性能,对上部密封垫的压缩力进行分析,如图 8、图 9 所示。计算结果表明,随着压缩量的增加,实心转角与空心转角对应的密封垫压缩力均增加,实心转角压缩量增大时,压缩力增大的幅度更大;在压缩量一致时,实心转角的压缩力远大于空心转角,在压缩量为 10 mm 时,空心转角的压缩力仅为实心转角的 1/3,由于空心的存在使得转角的开孔率变大,从而增大了转角的压缩性,降低了转角的压缩力;同时,采用实心转角设置,在实际工程中为了达到同样的压缩量,需要的压缩力非常大,会在密封垫接触部位以及密封垫与混凝土接触部位形成非常大的应力集中。

实际工程中盾构隧道管片拼装力有限,由于实心转角的压缩力大,可能造成盾构隧道管片接缝拼装过错中无法达到设计的压缩量,从而使得管片接缝处于一定的张开量,不利于盾构隧道接缝防水体系。根据计算分析结果,空心转角的存在大大增加了密封垫转角的压缩性,同时大幅度的降低了密封垫转角的压缩力,对于实际工程施工,空心转角可以在更小的压缩力情况下实现更大的压缩量,保证了密封垫在转角这一薄弱部位,仍然能够保证足够的压缩性,提高整体结构的安全性。

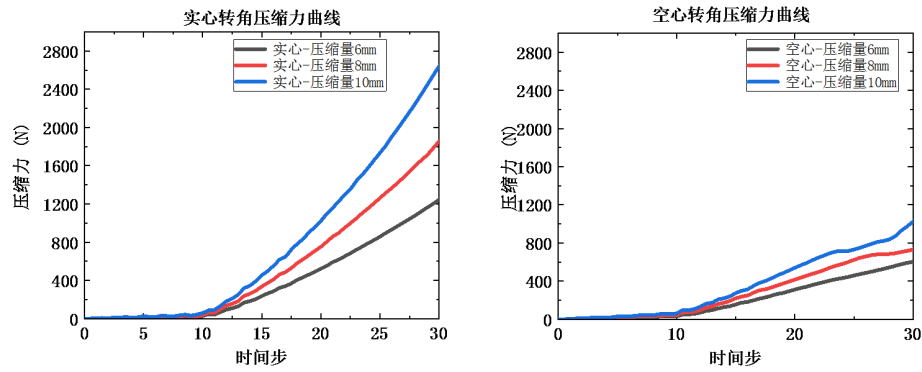


Figure 8. Compression force curve of gasket under different corner technology
图 8. 不同转角工艺下密封垫压缩力曲线

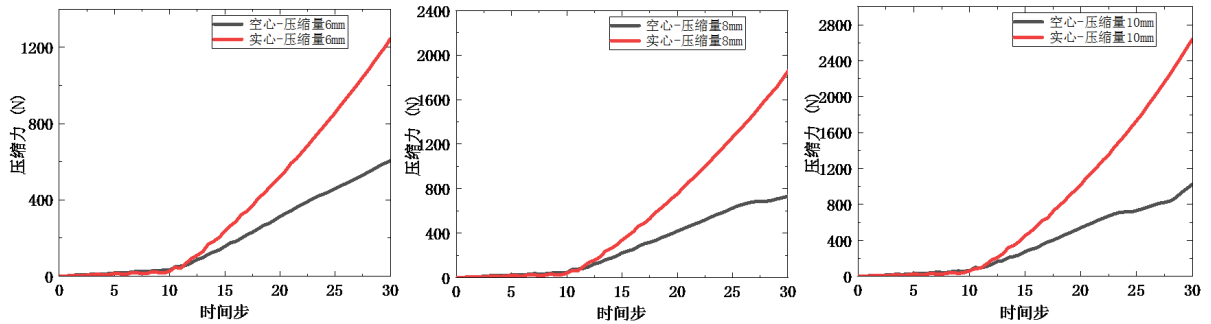


Figure 9. Compression force curve of gasket under different compression
图 9. 不同压缩量下密封垫压缩力曲线

4. 盾构隧道密封垫转角工艺优化

根据数值分析结果，密封垫实心转角会降低密封垫转角的压缩性，增大密封垫转角处的应力，非常不利于盾构隧道现场施工。因此在数值分析计算的基础上，提出需要对密封垫转角制作工艺进行改进，将密封垫转角设置为空心转角，加大密封垫转角的开孔率，从而提高密封垫转角的压缩性，减小转角部位的应力集中，如图 10 所示。根据实际工程中的应用情况，空心转角工艺的采用有效的降低了密封垫角部的欠压缩情况以及密封垫挤出情况，有利于盾构隧道现场施工，同时提高了盾构隧道接缝防水体系的可靠性。



Figure 10. Schematic diagram of hollow corner of shield tunnel sealing gasket
图 10. 盾构隧道密封垫空心转角示意图

5. 结论

本文主要分析了盾构隧道密封垫转角工艺问题，建立了数值计算分析模型，对转角问题进行分析，得出了以下结论：

1) 通过现场排查及室内试验研究结果，发现了传统密封垫实心转角工艺存在的问题，提出实心转角对于隧道密封垫防水体系的影响。针对性提出空心转角优化工艺。

2) 对不同转角工艺进行数值分析，发现实心转角会降低密封垫转角的压缩性，在相同压缩工况下，采用实心转角工艺是的密封垫的压缩量增大，大大提高了密封垫转角的压缩性，使得密封垫角部压缩的更加密实，有利于盾构隧道接缝防水结构体系。

3) 数值分析发现实心转角造成密封垫转角的压缩力非常大，采用空心转角能够大幅降低密封垫转角处的压缩力，保障在低压缩力的情况下实现高压缩性，有利于实际工程中密封垫转角部位的施工。

4) 结合分析结果，提出了密封垫空心转角的工艺优化方案，实际工程应用反馈效果好，有利于盾构隧道现场施工及隧道整体接缝防水体系。

基金项目

上海市科委科研项目(16DZ1202200, 16DZ1201701)。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 由广明. 深埋大直径盾构隧道接缝防水设计与试验研究[J]. 城市道桥与防洪, 2020(1): 196-200.
- [3] 温竹茵. 周家嘴路越江隧道管片接缝防水技术研究[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(2): 158-163.
- [4] 黄星程, 丁文其, 姜弘, 等. 盾构隧道管片接缝防水弹性密封垫 T 字缝试验研究[J]. 施工技术, 2013, 42(S): 168-171.
- [5] 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): 538-544.
- [6] 钟元元, 刘丽伟. 超埋深大直径盾构管片接缝防水探讨[J]. 隧道与轨道交通, 2019(S1): 39-43.
- [7] 朱祖熹. 盾构隧道管片接缝密封垫防水技术的现状与今后的课题[J]. 隧道建设, 2016, 36(10): 1171-1176.
- [8] 吴炜枫, 丁文其, 魏立新, 等. 深层排水盾构隧道接缝防水密封垫形式试验研究[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(6): 190-195.