

上海机场联络线深埋管片接缝防水设计研究

孙双麓¹, 张鑫霖², 杜峰¹, 韦相廷¹

[1.上海申铁投资有限公司, 上海市 200010; 2.上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘要: 针对上海机场联络线深埋管片所处的高水压环境, 考虑接缝错台与张开量、使用年限内的应力松弛等因素, 提出防水密封垫的耐水压设计指标, 同时提出密封垫的闭合压缩力指标。根据国内相关工程试验和研究, 优选两组密封垫断面开展耐水压试验及装配力试验以确定深埋段使用的密封垫断面; 对接缝结构构造等进行优化设计, 为类似工程提供参考。

关键词: 盾构; 接缝防水; 高水压

中图分类号: U455

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)07-0254-04

0 引言

随着地下空间的开发利用, 隧道越来越往深埋方向发展, 对于防水的要求也不断提高。上海轨道交通机场联络线工程浦东机场站—T3 航站楼站区间盾构隧道为上海最深的隧道之一。以该工程为背景, 介绍了深埋盾构管片接缝防水和相关构造的研究、比选和设计过程, 为类似工程提供参考。

1 工程概况

上海轨道交通市域线机场联络线工程浦东机场站—T3 航站楼站盾构区间长度约 3 075.2 m, 管片外径 9.0 m, 厚度 0.45 m, 环宽 1.8 m。线路出浦东机场站后相继下穿旅客过夜用房、迎宾大道南回转匝道、南进场路西线、滑行道、机场卫星厅连廊、S1—T4 捷运区间隧道等机场设施, 最后进入 T3 航站楼站。下穿机场卫星厅桩基处为区间埋深控制点, 隧道顶部距离机场卫星厅桩底 4 m, 覆土 52.1 m, 隧道底部埋深 61.1 m, 最大水压达到 60.6 kPa, 所处⑦₂ 粉砂层为承压含水层, 透水性强, 水压大。区间全断面进入⑦₁、⑦₂ 承压含水层的长度约 1.9 km。本区间隧道埋深深, 水压大, 全断面进入承压含水层长度长, 对于防水提出了相当高的要求。

盾构管片接缝为防水的薄弱环节。为了保证工程防水质量, 对接缝防水材料选型、接缝结构构造等进行设计和研究, 为类似工程提供参考。

2 接缝防水方案

2.1 密封垫设计

(1) 密封垫材料

接缝防水有密封垫、螺栓孔、嵌缝等环节, 其中最重要的环节在于密封垫。密封垫材料主要分为弹性橡胶、遇水膨胀橡胶以及复合型弹性橡胶。目前在盾构法隧道工程中应用最广泛的材料为三元乙丙(EPDM)弹性橡胶密封垫。长期工程实践证明该种材料止水性能和耐久性能较为可靠^[1], 对于其耐久性也经过较为充分的研究, 本工程选用三元乙丙橡胶。该材料为非膨胀性弹性橡胶, 靠弹性压密, 以接触面压应力来止水, 因此材料相对较厚, 装配力较大, 一般型式为异型多孔。

(2) 密封垫断面设计

在确定了材质后, 进行密封垫断面设计, 并通过必要的测试, 以确保达到工程所需要的防水性能。这方面已有工程经验可参考。陆明等^[3]根据试验优选了密封垫断面。温竹茵^[8]依托上海周家嘴路越江盾构隧道工程, 提出防水槽位置优化、减少接缝错台、加强角部防水能力等构造措施。文彦鑫等^[4]依托上元门越江隧道工程, 分析不同截面的密封垫变形特征、装配力增长规律以及影响耐水压力的因素。

根据研究和实践, 管片错缝和张开对于密封垫的防水能力影响是非常明显的, 必须考虑这些因素的不利影响。对密封垫主要性能指标确定如下:

a. 耐水压力

隧道底部最大埋深 61.1 m, 理论水压值 0.61 MPa。密封垫的耐水压力指标, 须考虑长期受压作用下

收稿日期: 2023-07-25

作者简介: 孙双麓(1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事市域铁路技术研究与管理工作。

的应力松弛^[5]。本工程设计使用 100 a,三元乙丙橡胶压缩应力保持率取 65%。

耐水压力=(理论水压值×安全系数)/压缩应力保持率=(0.61 MPa×1.3)/0.65=1.22 MPa,取 1.3 MPa。

b. 张开量与错位

根据一系列试验揭示,接缝张开量、错位对于密封垫耐水压力有显著影响。错位主要考虑以下因素的叠加:管片尺寸公差、管片形位公差、环向错位量、机械能力、密封垫尺寸公差、人为因素、环境影响因素等。

在测试耐水压力时,最大错位量按 15 mm 考虑,最大张开量取 6 mm。理论上正常施工工况下不会达到如此之大的错位量,但在施工过程中,因为某些原因实际错位量确实接近该数值,因此按此不利情况进行设计和测试。

c. 闭合压缩力

一方面,闭合压缩力应小于千斤顶的顶力;另一方面,应避免闭合压缩力超出外侧混凝土承载能力。根据本工程情况,密封垫的闭合压缩力限值为 70 kN/m。

d. 硬度

根据国家标准 GB/T18173.4^[10],管片三元乙丙橡胶密封垫硬度取值范围为 60~70 度。

李明^[6]通过数值分析的手段,比较了不同硬度的密封垫之间的平均接触应力与压缩量关系,在相同压缩量情况下,橡胶硬度越大,密封垫间的接触应力越大。温竹茵^[8]通过试验对 60 度硬度和 65 度硬度的密封垫进行比较,硬度为 65 度的防水能力略好于 60 度,但差距不大。提高密封垫硬度会提高接触应力,一方面提高防水能力,另一方面会提高闭合压缩力。经综合考虑,硬度取 65 度,偏差要求为±5 度。

综上,根据本工程特点,密封垫的设计要求为:在接缝张开 6 mm,错缝 15 mm 时,能长期承受 1.3 MPa 的水压。闭合压缩力小于 70 kN/m。

调研国内类似工程做法,初拟以下两种断面作为基本形式(见图 1):

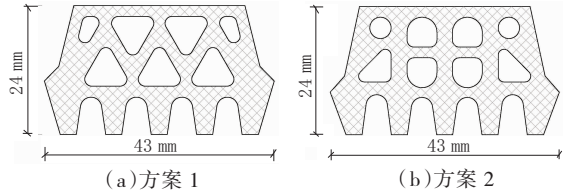


图 1 弹性密封垫断面

上述截面与管片沟槽尺寸相配套,见图 2。

两种截面参数见表 1。方案 1 的封闭孔采用三角

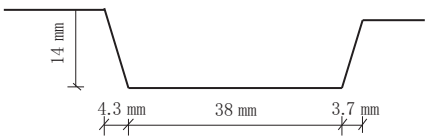


图 2 沟槽截面

形,方案 2 的封闭孔有圆形和三角形。方案 1 开孔率高于方案 2。两者高度均为 24 mm,最大压缩量均为 10 mm。

表 1 初选弹性密封垫截面参数

断面类别	方案 1	方案 2
外轮廓面积 /mm ²	783.33	769.17
孔洞面积 /mm ²	211.51	186.59
净面积 /mm ²	571.83	582.58
开孔率	0.27	0.24
密封垫面积 / 沟槽面积	0.966	0.984
压缩率	0.417	0.417

2.2 密封垫试验

对初拟的两种密封垫断面,开展耐水压试验及装配力试验。

2.2.1 EPDM(三元乙丙橡胶)密封垫耐水压试验

(1) 试验过程

按照实际管片沟槽,制作试验装备。耐水压装置模拟“T”型和“一”型接缝,测试两种密封垫在设计错位量和张开量时所能承受的水压,见图 3。

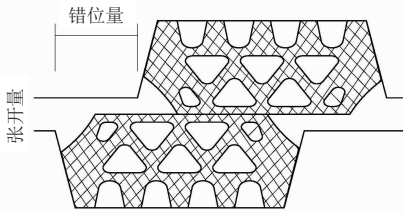


图 3 张开量及错位量示意

试验装置见图 4。将试样按设计要求粘贴于沟槽内(见图 5),拼装直角板和平板,并使缝的张开量和错位量达到设计值。每种密封垫测试 3 份试样。



图 4 耐水压试验平台



图5 试样示意

(2)试验结果

经测试,两种方案的密封垫的耐水压试验结果对比见表2。

表2 弹性密封垫极限水压

分项	方案1 极限水压 /MPa	方案2 极限水压 /MPa
试样一	1.4	1.6
试样二	1.5	1.7
试样三	1.4	1.8
平均值	1.43	1.7
最小值	1.4	1.6

根据试验结果,两组密封垫方案均达到了设计耐水压的要求。方案1试样的承载力平均值为1.43 MPa,高出设计要求10.0%;最小值为1.4 MPa,高出设计要求7.7%。方案2试样的承载力平均值为1.7 MPa,高出设计要求30.8%;最小值为1.6 MPa,高出设计要求23.0%。方案2平均方案2承受的极限水压高于方案1约14.2%。

2.2.2 EPDM(三元乙丙橡胶)密封垫装配力试验

为了验证设计的产品断面结构满足截面承载力要求,进行压缩应力性能模拟试验。利用预先制备的带有沟槽的夹具模拟橡胶密封垫实际装配时的管片沟槽,测定接缝完全闭合时的压缩应力。试验装置见图6~图8。



图6 装配力试验装置

沟槽单边高度为14 mm,密封垫单边高度24 mm。压缩至闭合后,压缩量为20 mm。试验所用沟槽长度



图7 夹具

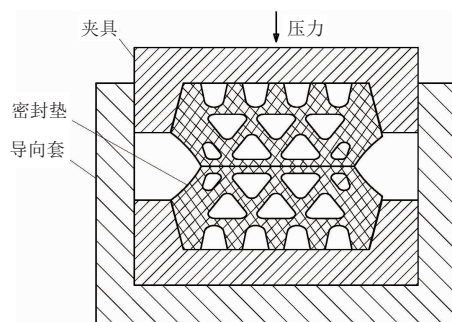


图8 试验断面模型

为20 cm,试验结果换算为每延米装配力。两种断面的装配力试验曲线见图9。

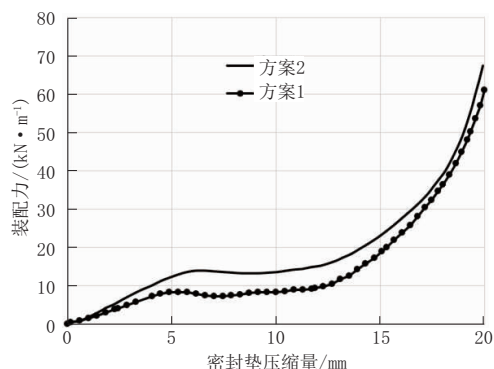


图9 密封垫装配力试验曲线

根据试验结果,密封垫方案1、2的闭合压缩力分别为62.3 kN/m、68.6 kN/m,均小于70 kN/m,满足设计要求。方案1闭合压缩力小于方案2。由图9可看出,密封垫的闭合压缩特征按以下阶段发展:(1)压缩量在0~5 mm时,力随着变形线性缓慢地增长;(2)压缩量在5~13 mm时,力没有明显增加,密封垫变形加剧,封闭孔逐渐被填充;(3)压缩量超出13 mm时,孔洞大部分被填充,压缩难度增大,压缩力迅速增加。

2.3 密封垫的比选

从上述试验结果可以得出,相同材质和外轮廓的断面,开孔率越高,极限水压越低,装配力越小。

根据装配力试验,方案2装配力高于方案1,但

均满足设计要求。

在耐水压三组试验中,方案 1 最小极限水压为 1.4 MPa,平均极限水压为 1.43 MPa;方案 2 最小极限水压为 1.6 MPa,平均极限水压 1.7 MPa。耐水压指标方案 2 优于方案 1。两组方案均满足极限水压 1.3 MPa 的设计要求,而方案 2 则具有更高的设计余量。

一方面,由于目前针对密封垫接触应力松弛的研究,基本上是考虑热氧老化的影响,事实上影响橡胶接触应力松弛的因素是很多的(如地下水侵蚀、干湿循环、冷热循环、微生物等)^[5],作用机理复杂具有一定不确定性;另一方面,更高的设计余量可以增加使用年限。综上考虑,在装配力均能满足要求,投资增加不显著的前提下,本工程深埋段(覆土 40~53 m)密封垫采用耐水压力指标更为优异的方案 2 断面。

3 接缝构造优化

除了密封垫的选型,管片接缝构造对于防水性能也有一定影响。设计从以下三个方面予以考虑和优化。

(1) 管片边缘配筋构造

密封垫中心距离管片外边缘距离为 78 mm。在原设计中,管片边缘密封垫以外破坏面(45°角范围)基本为素混凝土,在密封垫压缩力或其他外力作用下,容易发生破坏。为了提高边缘混凝土承载能力,将钢筋尽可能布置进入该区域。将外侧主筋延长 6 mm,将分布筋布置进入边缘区域,减少裂缝的开展和边角损坏率,提高防水性能,见图 10。

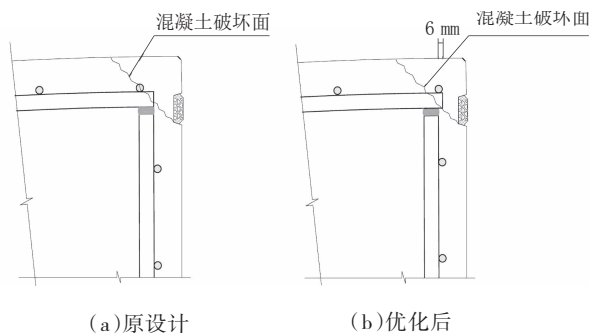


图 10 管片边缘配筋构造优化

(2) 环缝剪力销设计

隧道运营阶段由于周边建设活动等,产生荷载变形的扰动,进而导致隧道纵向变形并产生错台时,环缝密封垫防水能力下降,导致渗水严重。早期的打浦桥隧道环缝仅采用螺栓连接,错台严重,加之钢筋和螺栓锈蚀,环缝渗漏水严重^[7]。为了提高环间抗剪

能力,减少错台,减少环缝渗漏水,每环设置 22 个剪力销。单个剪力销抗剪承载力不小于 150 kN,且受剪达到 150 kN 时变形不超过 3 mm。

(3) 弹性密封垫角部设计

密封垫转角处开孔进行特殊设计,转角范围内的弹性密封垫采用空腔处理,避免传统工艺中角部的密封垫截面面积远大于管片沟槽面积引起的管片密封垫的角部应力集中的问题。为加强弹性密封垫角部防水需在密封垫外角部覆贴自粘性橡胶薄板。

4 结 论

(1) 针对上海机场联络线深埋盾构隧道所处的高水压环境,借鉴参考国内工程案例及相关研究,考虑错台与张开量最不利情况、设计使用年限过程中的应力松弛等因素,提出防水密封垫的耐水压设计指标。根据管片的承载能力,提出了密封垫的装配力指标。

(2) 根据国内相关工程试验和研究,优选了两组密封垫断面,并进行了耐水压试验及装配力试验。两组材料的耐水压指标及闭合压缩力均满足设计要求。考虑到影响橡胶接触应力松弛的因素是很多的(如地下水侵蚀、干湿循环、冷热循环、微生物等)^[5],作用机理较为复杂,深埋管片选用耐水压较高(1.6 MPa)的一组密封垫材料,在装配力均能满足要求,投资增加不显著的前提下,保留更多设计余量。

(3) 为提高接缝防水能力,对接缝结构进行了优化。通过优化管片角部配筋构造,减少裂缝的开展和边角损坏率,减少防水材料的损坏。环缝设置剪力销,提高环间抗剪能力,减少错台,减少环缝渗漏水。优化弹性密封垫角部设计,保证角部密封性能。

(4) 随着地下空间的开发利用,隧道越来越往深埋方向发展,本文成果可供拟建类似工程作为技术参考。

参考文献:

- [1] 温竹茵,周质炎,杜一鸣,等.上海越江盾构隧道的防水设计[A]//中国土木工程学会隧道与地下工程分会防水专业委员会第十三届学术交流会论文汇编[C]/2007.
- [2] 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1):227-231.
- [3] 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,2008,22(4):12-16.
- [4] 文彦鑫,霍永鹏,吴悦,等.高水压盾构隧道管片密封垫装配力与防

(下转第 261 页)

势,当排风口距离地面大于 2 m 时,污染物浓度升高趋势明显,因此排风口不宜设置的过高,距离地面小于 2 m 为宜,排风口过高会造成空间内污染物浓度的增加。

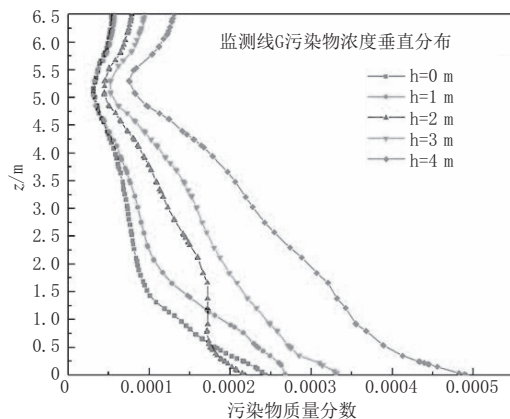


图 8 监测线 G 上的污染物浓度垂直分布图

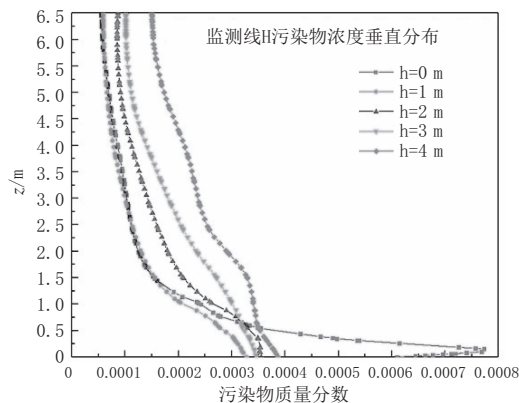


图 9 监测线 H 上的污染物浓度垂直分布图

4 结 语

本文通过点源污染和面源污染两种模型空间的构建,进行了不同排风口高度下送排风的模拟试验,

分析了排风口高度对于空间流场和污染物浓度分布的影响,主要结论如下:

(1)人呼吸高度(距离地面 1.5 m)处污染物浓度在排风口距离地面 1 m 时最低,污染物的排出效果最好;排风口过低(距离地面低于 0.5 m)时有将下部池体臭气抽吸上来的可能性,从而引起了地面上部污染物浓度的升高;模型空间内污染物浓度整体随排风口高度的增加而增大,当排风口距离地面高于 2 m 时,排风口抽吸对于整个模型空间的流场影响较小,模型底部散发的污染物不能被及时抽吸排出,造成模型空间内污染物浓度较高。

(2)排风口附近流速最高,排风口附近的流场不随排风口高度的变化而变化,不同排风口高度下排风口附近的流场基本一致。排风口的抽吸效率较低,影响范围非常有限,仅对排风口附近 0.5 m 范围内流场有较大影响,距离排风口较远的空间流场基本不变。

鉴于地下式污水处理厂建设形式的特殊性,地下大空间内通风除臭系统的设计对于保障人员安全、提升空气质量、节约运行成本等具有重要意义。通过两种模型的模拟结论可以看到,大空间内除臭排风口高度距离地面 1 m 较为合适,此高度下污染物排出效果最好。由于排风口抽吸影响范围有限,因此在大空间除臭风管设计时应尽可能均匀,同时应避免除臭风管间隔过大,以保证除臭效果。

参考文献:

- [1] 丁超,贾卫宏.地下式污水处理厂除臭系统思考与研究[J].科技展望,2016,36(5):120-121.
- [2] 谢艺强.地下式污水厂通风除臭设计[J].建筑热能通风空调,2018(4):16-17.

(上接第 257 页)

- 水性能研究[J].现代隧道技术,2022,59(4):273-282.
- [5] 伍振志,杨林德,季倩倩,等.上海长江隧道接缝防水密封垫的耐久性研究[A]// 地下工程建设与和谐发展——第四届中国国际隧道工程研讨会文集[C]//2009.
- [6] 李明.高水压工况下轨道交通盾构区间管片接缝密封垫设计与优化[J].隧道与轨道交通,2021,136(S2):66-70.
- [7] 吴怀娜,沈水龙,马宇宏,等.上海越江隧道渗漏现状调查与分析[J].

- 地下空间与工程学报 2013,9(3):663-668.
- [8] 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):152-157.
- [9] 钟小春,秦建设,朱伟,等.盾构管片接缝防水材料防水耐久性实验及分析[J].地下空间与工程学报,2011,7(2):281-285.
- [10] GB/T18173.4-2010,高分子防水材料 第 4 部分:盾构法隧道管片用橡胶密封垫[S].