

张芳, 叶文坤. 深埋隧洞管片衬砌结构受力分析[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(S1): 46-52.

ZHANG Fang, YE Wenkun. Numerical analysis of segment linings in deep buried tunnels [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(S1): 46-52.

深埋隧洞管片衬砌结构受力分析

张 芳, 叶文坤

(深圳市原水有限公司, 广东 深圳 518000)

摘 要: 深埋水工隧洞在高内水压作用下, 其管片结构受力变形情况十分复杂。依托深圳某隧道工程, 从承担不同施工开挖荷载和不同管片拼装方式两个角度, 探明高水压水工隧洞管片衬砌结构的力学特性。结果表明: (1) 管片承担的施工开挖荷载越大, 管片“横椭圆”变形越明显, 管片环向应力分布越趋于“颈缩”形态。环向螺栓应力与管片接缝张开量有关, 在承担不同施工开挖荷载时, 管片接缝张开量分布情况有所不同。(2) 错缝拼装结构环与环之间存在明显的位移错动, 纵向螺栓和环间摩擦力的存在使其具有明显的纵向加强作用。(3) 纵向螺栓可分担环向螺栓的受力状态, 单环管片刚度明显小于多环管片, 建议在数值模拟中剪力多环管片结构。(4) 通缝结构管片基本不存在环间相互作用效应, 错缝结构管片内力存在一个传递的过程, 由中间环向两端下降, 在管片间相互作用力及纵向螺栓的作用下, 中间环管片刚度有所提升。

关键词: 高水压; 盾构隧洞; 开挖荷载; 管片拼装方式; 受力变形

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.S1.009

中图分类号: TV314

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)S1-0046-07

Numerical analysis of segment linings in deep buried tunnels

ZHANG Fang, YE Wenkun

(Shenzhen Raw Water Co., Ltd., Shenzhen 518000, Guangdong, China)

Abstract: Deep buried hydraulic tunnels bear both external soil and water loads as well as internal water pressure during operation. Under high internal water pressure, the stress and deformation of their pipe structure are very complex. Relying on the Changhua River Water Resources Allocation Project in Hainan Province, the mechanical characteristics of the segment structure of high-pressure shield tunnels were explored from two perspectives: bearing different construction excavation loads and different segment assembly method. The results show: (1) The larger the excavation load borne by the pipe segment, the more obvious the “transverse elliptical” deformation of the pipe segment, and the more the circumferential stress distribution of the pipe segment tends towards a “necking” shape. The stress of circumferential bolts is related to the opening amount of pipe joints, and the distribution of pipe joint opening amount varies when bearing different construction excavation loads. (2) There is significant displacement and displacement between the staggered assembly structure rings, and the presence of longitudinal bolts and friction between the rings gives it a significant longitudinal strengthening effect. (3) Longitudinal bolts can share the stress state of circumferential bolts, and the stiffness of single ring pipe segments is significantly lower than that of multi ring pipe segments. It is recommended to use shear multi ring pipe segment structures in numerical simulations. (4) There is basically no interaction effect between the rings in the seamless structure pipe segments, and there is a process of internal force transmission in the

收稿日期: 2024-12-15

作者简介: 张 芳(1987—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事水利工程建设管理及相关技术研究。E-mail: 243661819@qq.com

叶文坤(1994—), 男, 工程师, 硕士, 主要从事水利工程建设管理及相关技术研究。E-mail: 1203550573@qq.com

staggered structure pipe segments, which decreases from the middle ring to both ends. Under the interaction force between the pipe segments and the action of longitudinal bolts, the stiffness of the middle ring pipe segments is improved.

Keywords: high water pressure; shield tunnel; excavation load; assembly method of pipe segments; deformation and stress

0 引言

在“双碳”目标的推动下,水利水电工程正在大力发展抽水蓄能^[1-2],同时建设大量的引调水工程,从而优化水资源配置。水工隧洞是水利枢纽的重要组成部分,其衬砌受力情况十分复杂,在运行期同时受到外部水土荷载和内水压力的作用^[3-6]。

近年来,盾构法在水工输水隧洞中的应用愈加广泛^[7-9]。为保证施工开挖过程隧洞围岩的稳定性,同时充分发挥围岩的自承能力,初次支护时机的选择尤为关键^[10-11]。但施工开挖情况复杂多变,隧洞开挖、盾构机推进、管片拼装等过程都将引起洞周应力重分布,因此在分析隧洞内水压力承载能力时应考虑施工开挖荷载应力释放的影响^[12-13]。

在盾构工法中,若干弧形管片通过环向螺栓连接成环,各整环间再由纵向螺栓拼接形成多环衬砌结构。其中单环管片的拼装方式分为通缝和错缝两种,管片拼装方式决定着衬砌的力学性能,对其结构变形与防水控制起着关键性作用^[14]。现阶段,国内外学者主要通过理论计算、数值模拟及现场试验的方式研究管片拼装方式对衬砌结构的影响^[15]。张少辉^[16]通过模型试验和数值模拟的方法,以南京地铁一期盾构隧道为背景,得到管片不同拼装方式下的力学特性。何川等^[17]研究了高水压下衬砌的力学特性及与周围土体的相互作用关系,并以室内相似试验和数值计算相结合的方式,讨论了管片衬砌拼装方式对内力分布的影响。彭科峰等^[18]应用梁-弹簧模型及修正惯用法,通过调整封顶块位置和错缝角度研究了高水压下管片拼装方式对结构受力的影响,得到管片轴力、弯矩随错缝角度呈现周期化变化的结论。梁坤等^[19]基于苏通 GIL 综合管廊隧道工程,通过结构原型试验,选取封顶块分别位于拱顶和拱腰两种工况,研究了封顶块位置对管片结构的影响。

本文依托深圳某隧道工程,通过数值模拟分析不同施工开挖荷载下运行期输水隧洞的受力变形规律,比较不同拼装方式下高内水压隧洞管片的结构性能,以为水工盾构隧洞管片衬砌结构的设计提供指导。同时对比了单环管片与多环管片的数值模拟结果,为隧洞管片衬砌建模提供参考。

1 工程概况及有限元模型

1.1 工程背景

根据工程总体布局,建设内容包括向阳水库及引水隧洞、大广坝至石碌水库引水隧洞(引大济石隧洞)、乐东引水工程等。向阳引水隧洞大隆主洞及引大济石隧洞主要采用双护盾 TBM 施工,隧洞开挖断面为圆形断面,采用预制管片衬砌结构,洞周与围岩间隙采用豆砾石进行回填灌浆。

1.2 有限元模型及材料参数

本次数值模拟所选洞段为Ⅲ类围岩,隧洞上覆岩层厚度为 544 m,开挖洞径 4.6 m,豆砾石回填厚 100 mm,预制混凝土管片厚 300 mm,净断面 3.8 m。预制混凝土管片宽 1.2 m,采用“3+2+1”分块形式,包括一块封顶块(K)、两块连接块(L1、L2)和三块标准块(B1、B2、B3)。封顶块圆心角为 25.71°,连接块圆心角为 51.42°,标准块圆心角为 77.13°。每片衬砌管片纵缝通过 2 根纵缝连接螺栓连接,每环管片共 12 根纵缝连接螺栓,螺栓采用斜螺栓型式。

模型左、右侧边界及模型底部与隧洞中心距离为 30 m(约 6.5 倍开挖洞径 D),施加法向位移约束,模型上部施加竖向均布压力模拟上覆土层,整体模型如图 1 所示。单环管片模型纵向宽度为 1.2 m,通缝、错缝拼装结构模型纵向宽度为 3.6 m。通缝、错缝结构中间环管片与单环结构管片的封顶块(K)均位于洞顶,错缝拼装前后邻接环管片相对于中间环旋转 35°布置,三个算例的管片模型如图 2 所示。

围岩采用摩尔-库伦塑性本构模型,其他材料均为线弹性模型。螺栓型号为 8.8 级 M24,管片混凝土强度等级采用 C50,模型中涉及的材料力学参数如表 1 所列。

表 1 模型中的材料力学参数

结 构	密度/kg·m ⁻³	弹性模量/GPa	泊松比
围 岩	2 650	12.0	0.260
C50 管片	2 750	34.5	0.167
8.8 级 M24 螺栓	7 850	206.0	0.300
回填豆砾石	2 650	3.0	0.270

1.3 相互作用及加载工况

围岩、豆砾石、管片混凝土均采用实体单元模

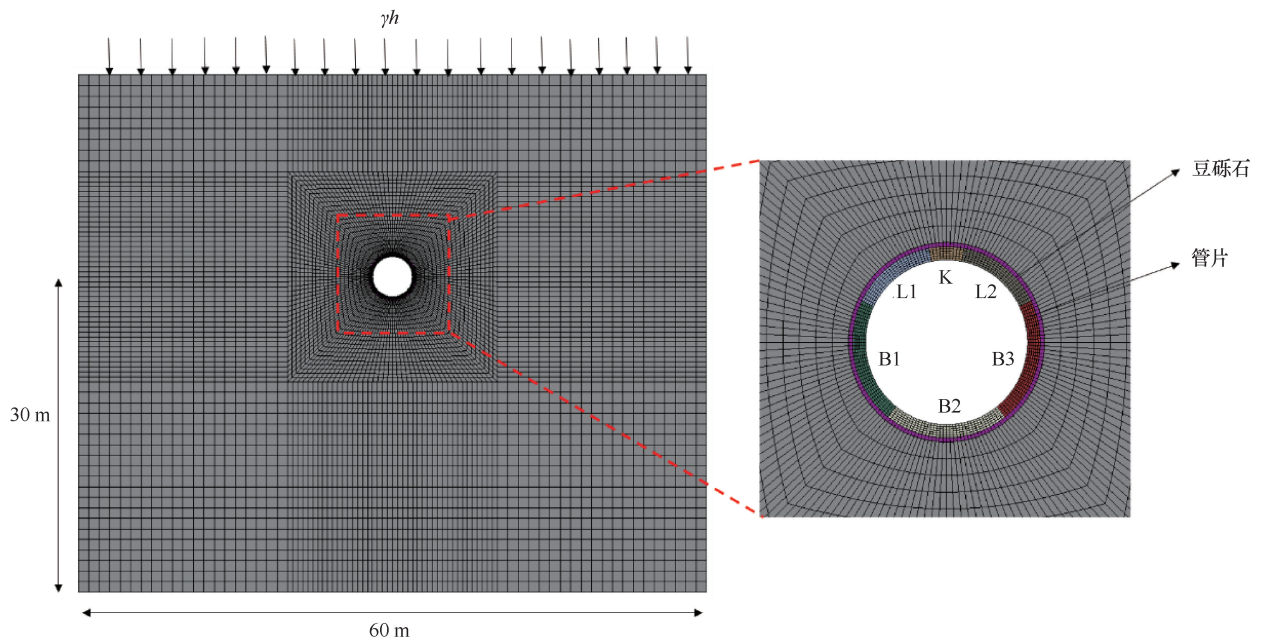


图1 整体模型

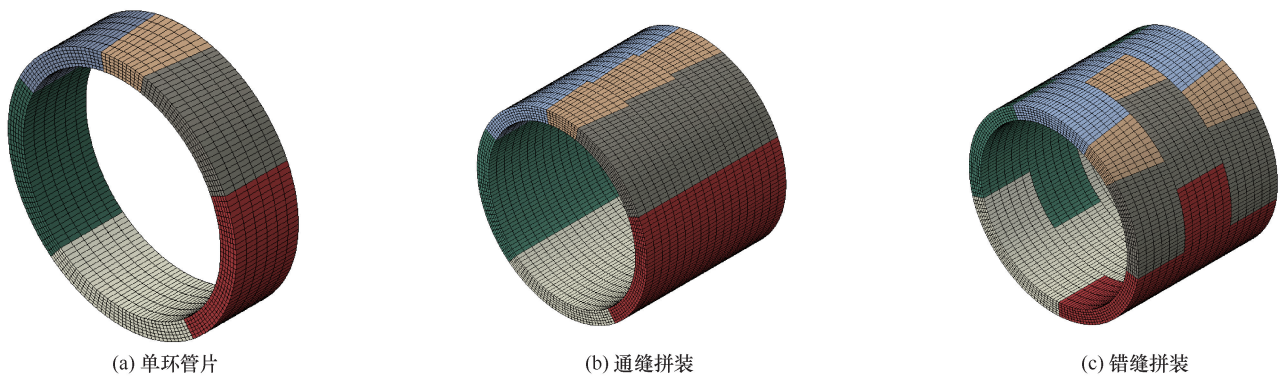


图2 三个算例的管片模型

拟, 螺栓采用杆单元模拟。围岩与豆砾石之间设置为绑定约束, 管片与管片、管片与豆砾石之间设置为面-面接触, 由惩罚函数定义接触的切向行为, 摩擦系数设置为 0.6, 法向行为设置为“硬”接触, 即切向上只传递压力不传递拉力, 允许接触面分离。将螺栓(杆单元)嵌入管片(实体单元)中, 认为二者不发生黏结滑移。

不考虑外水压力, 将内水压力设置为沿管片高度变化的不均匀水头, 洞轴线水压为 2.16 MPa。数值模拟分两方面进行: (1) 模拟施工开挖荷载对管片结构的影响。在开挖荷载释放 50%、60%、70%、80%、90%、100% 时激活支护结构(豆砾石、管片、螺栓), 分析单环衬砌结构在承担 0%~50% 开挖荷载时的内水压力承载能力。(2) 模拟拼装方式对管片结构性能的影响。假设支护结构不承担施工开挖荷载, 仅在内水压力作用下比较单环管片结构、通缝错缝拼

装结构的结构性能。

2 高内水压下开挖荷载对管片结构的影响

以单环管片环轴线中点为坐标原点建立柱坐标系, 提取管片环内表面径向位移、环向应力及环向螺栓应力如图 3—5 所示。其中极坐标图中黑色虚线圆是径向位移(环向应力)为 0 的基准圆, 径向扩张和拉应力为“+”, 径向收缩和压应力为“-”。

2.1 管片径向位移

由图 3 可知, 在外土压力与内水压力的共同作用下(管片承担施工开挖荷载 10%~50%), 径向变形呈现出“横椭圆”特征, 且承担的开挖荷载越大, “横椭圆”特征越明显; 当管片不承担施工开挖荷载, 仅受到内水压作用时, 径向变形出现“上抬”的趋势。在管片承担 20%~50% 开挖荷载时, 管片顶部底部收缩, 左右两腰扩张; 在承担 0%~10% 开挖荷载

时,管片整体向外扩张。在管片接缝处,存在错台现象。

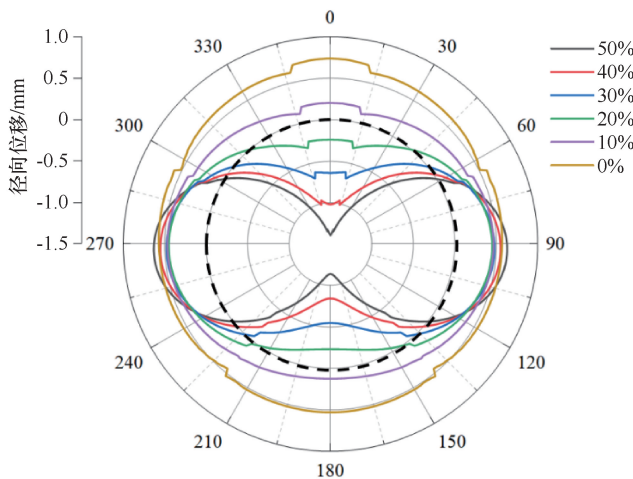


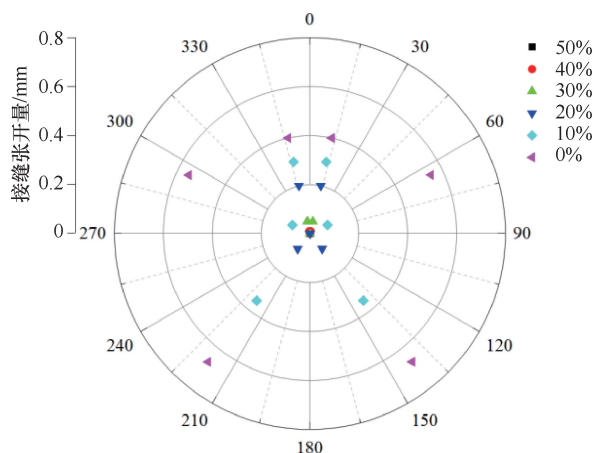
图3 单环管片径向位移

2.2 管片环向应力

由图4可知,管片衬砌环向应力分布规律在环向路径上呈现出“颈缩”的特征,随管片承担外部土压力逐渐减小,图形逐渐向外扩张,“颈缩”特征不再明显。当承担20%~50%开挖荷载时,管片环向应力主要为压应力,在左右两腰处压应力最大,在管片底部受拉。当外部土压力逐渐减小(承担开挖荷载0%~10%),由图3可知管片整体向外扩张,管片接缝附近环向应力接近0。在承担10%开挖荷载时,外土压力与内水压力水平相当,管片整体应力较小,仅在标准块B2处受较大的拉应力。在不承担开挖荷载,仅有内水压作用时,除封顶块K及管片接缝处,管片整体受拉。

2.3 环向螺栓应力

环向螺栓应力与管片接缝张开量有关,如图5(a)



(a) 接缝张开量

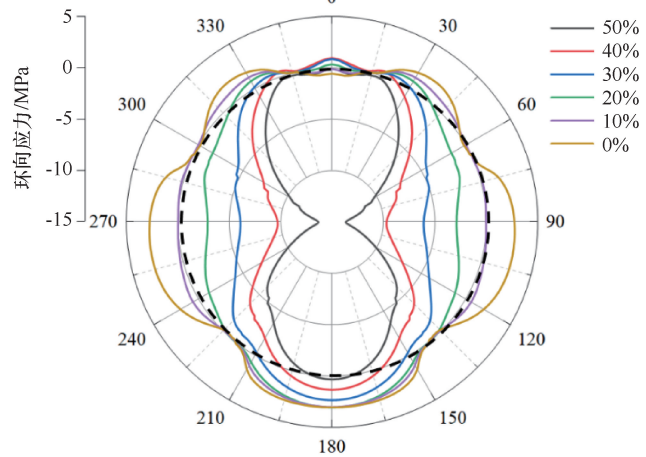


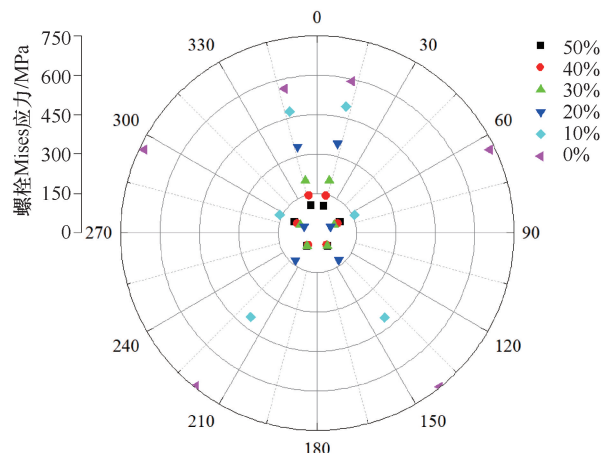
图4 单环管片环向应力

所示,当管片承担30%~50%开挖荷载时,由图4可知管片环基本处于受压状态,各接缝开度接近0,因此环向螺栓应力较小,如图5(b)。当管片承担10%~20%开挖荷载时,接缝L1-B1和L2-B3张开量较小,其他位置接缝张开量较大,相应地,接缝L1-B1和L2-B3处螺栓应力较小,其他位置处螺栓应力较大。管片不承担开挖荷载时接缝开度的分布规律与承担10%~20%开挖荷载时有所不同,即在接缝L1-K和L2-K张开量较小,其他位置接缝张开量较大,相应地,接缝张开量较大位置处的螺栓应力也较大,此时螺栓应力为730 MPa,已超过8.8级螺栓的屈服应力。

3 通缝拼装与错缝拼装中间环管片受力变形情况

3.1 环向应力分布

图6为单环管片及通缝、错缝拼装方式下中间环



(b) 螺栓Mises应力

图5 单环管片接缝张开量与螺栓 Mises 应力

管片的内表面环向应力分布图。从整体上看三者环向应力分布规律基本相同：封顶 K 承受环向压应力，临接块 L1、L2 及标准块 B1、B2、B3 承受环向拉应力，在管片环间接缝附近处环向应力为压应力；每块盾构管片均在其中间位置处达到最大值，并向左右两端逐渐减小，其中在封顶块 K 中部环向压应力最大，在标准块 B2 中部环向拉应力最大。

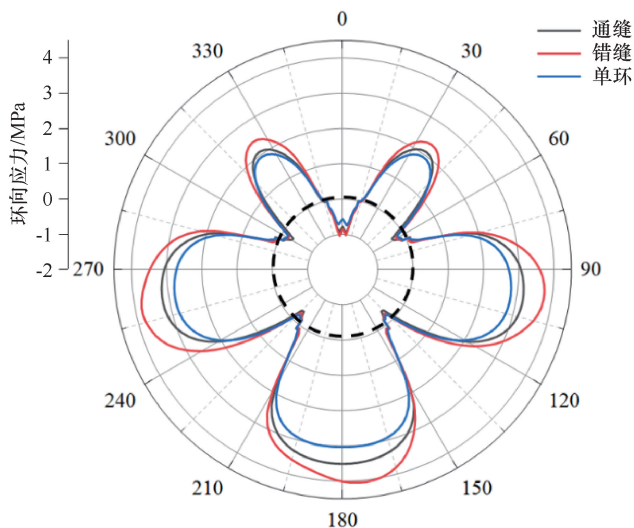


图6 单环管片及通缝错缝管片环向应力

在整环管片各点位处，错缝拼装的管片环向应力普遍比通缝拼装大，其中在各拼装块中间位置处相差最大，在管片接缝处及封顶块位置数值相差较小；单环管片的环向应力值最小，相对更接近于通缝拼装结构。

3.2 径向位移分布

由图7可知，三者的径向位移分布规律大致相同，管片整体向外扩张，从管片顶部向底部径向位移逐渐减小，在封顶块 K 中部达到最大值。接缝处径向位移发生突变，管片出现错台现象。由于受到洞壁围岩的约束，径向位移数值大小相差不大。

3.3 螺栓 Mises 应力分布

盾构管片采用环向、纵向螺栓联接，螺栓为结构提供了预紧作用，提高了结构的整体性，且使管片间的摩擦、咬合作用增强。环向螺栓应力分布大致相同，环向螺栓应力与管片接缝的状态相关，对应呈现上小下大的趋势，通缝、错缝结构螺栓应力最大分别为 420.4 MPa、383.6 MPa，通缝结构环向螺栓较错缝提高了约 8.75%。纵向螺栓应力与管片环与环之间的受力变形状态相关，在内水压作用下，每环管片封顶块位置变形最大，通缝结构三个环管片变形一致，而错缝结构管片环与环之间存在

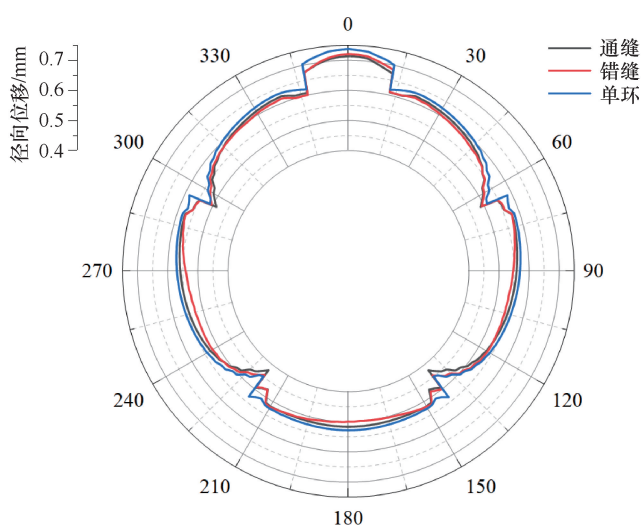


图7 单环管片及通缝错缝管片径向位移

明显的错位变形状态。由图5得到，通缝、错缝结构纵向螺栓 Mises 应力分别为 45.82 MPa、78.96 MPa，错缝结构纵向螺栓较通缝提高了约 41.97%。单环管片环向螺栓应力远大于多环管片，由此体现纵向螺栓可分担环向螺栓的受力状态。

3.4 轴力、弯矩分布

单环管片、通缝及错缝结构中间环管片内力的整体分布规律基本一致，在内水压作用下管片各截面承受轴拉力，从顶部向底部轴力逐渐增大；规定管片外表面受压、内表面受拉时弯矩为正，反之为负，管片各截面弯矩为正值，与轴力分布规律相似，同样是从顶部向底部弯矩逐渐增大（见图8）。比较单环、通缝及错缝结构管片内力大小可知，错缝结构>通缝结构>单环结构，尤其在管片腰部以下区域内力值相差较大，在管片顶部及接缝处差别较小。这是由于错缝结构具有纵向加强作用，而使管片刚度增大，受力增大；同样，三环结构的管片刚度大于单环结构。

3.5 三环管片内力分布情况

在内水压力作用下，三环通缝拼装结构与三环错缝拼装结构的变形情况有所不同，通缝结构三个管片环变形基本一致，而错缝结构环间位移存在明显差别。管片环间的相对位移产生了环间的相互作用，主要由纵向螺栓的剪切作用及环间的摩擦阻力引起环间弯矩、剪力、轴力的传递，使得管片环向弯矩、轴力有所区别。如图9、10所示，通缝结构三个管片环轴力基本相同，第一环和第三环弯矩在标准块 B1—B3 上相对于第二环大小相等符号相反，弯矩剪力整体分布曲线光滑且对称性较强，可见通缝结构基本不存在环间相互作用效应。错缝结构第一环和第三环管片轴力、弯矩分布曲线基本重合，由于环间的相互作用效

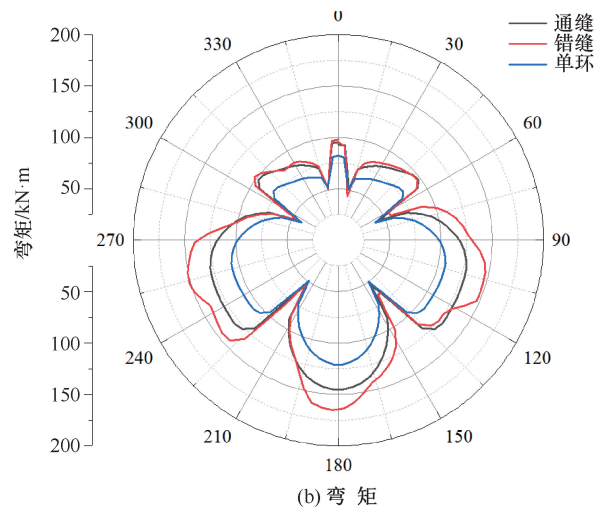
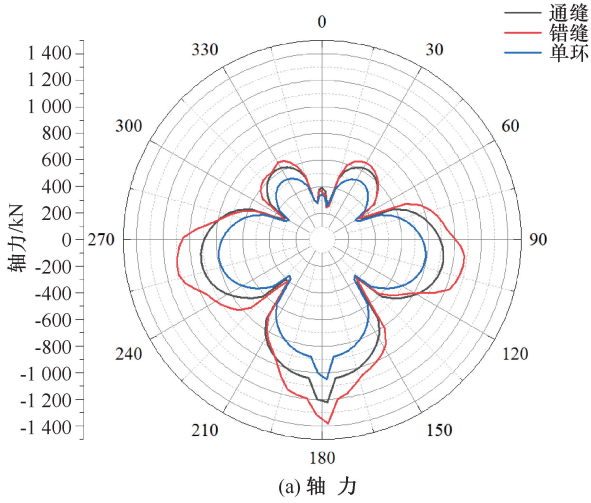


图 8 单环管片及通缝错缝管片轴力和弯矩分布

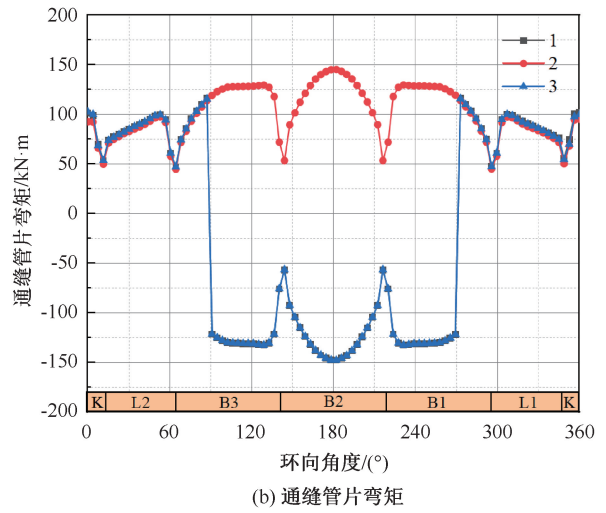
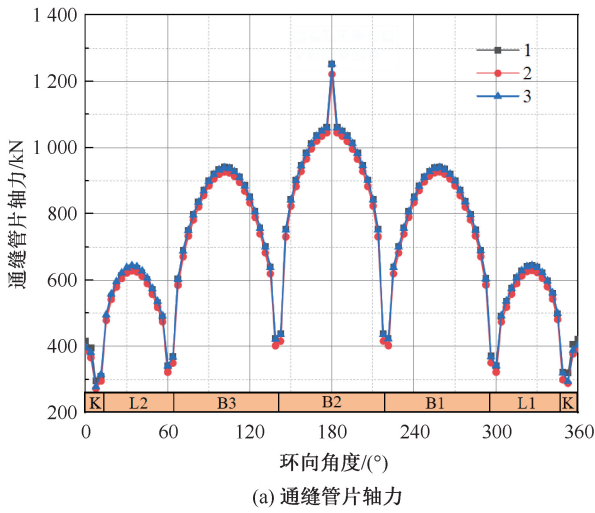


图 9 通缝管片轴力和弯矩分布

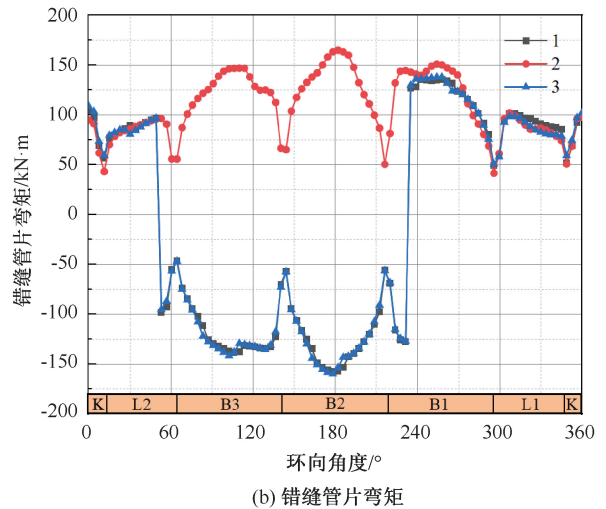
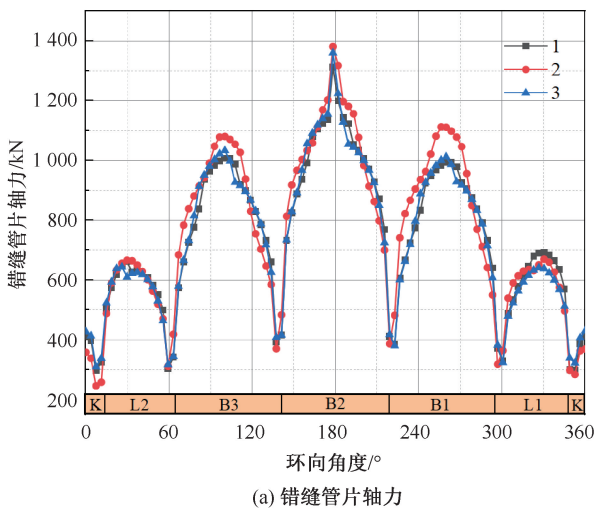


图 10 错缝管片轴力和弯矩分布

应,中间环管片局部区域的轴力出现明显波动,第一环和第三环标准块 B2、B3 的弯矩与中间环符号相反,整体分布曲线对称性较差。可见,错缝管片内力存在一个传递的过程,由中间环向两端下降,在管片间相互作用力及纵向螺栓的作用下,中间环管片刚度有所提升。

4 结论

本文基于深圳某隧道工程,研究高内水压作用下盾构管片衬砌的受力特性。主要分为两个方面:一是分析高内水压下施工开挖荷载对管片结构受力变形的影响,二是分析高内水压下管片拼装方式对衬砌力学特性的影响。主要得到以下结论。

(1)管片承担的施工开挖荷载越大,管片“横椭圆”变形越明显,管片环向应力分布越趋于“颈缩”形态。环向螺栓应力与管片接缝张开量有关,在承担不同施工开挖荷载时,管片接缝张开量分布情况有所不同。

(2)在承担相同荷载情况下,错缝拼装结构环与环之间存在明显的位移错动,纵向螺栓和环间摩擦力的存在使其具有明显的纵向加强作用,错缝结构中间环管片刚度增大,弯矩、剪力相应增大。

(3)纵向螺栓可分担环向螺栓的受力状态,单环管片刚度明显小于多环管片,其环向螺栓应力远大于多环管片,且管片弯矩、剪力较小,建议在数值模拟中剪力多环管片结构。

(4)通缝结构管片弯矩、剪力整体分布曲线光滑且对称性较强,基本不存在环间相互作用效应;错缝结构中间环管片轴力存在明显波动,弯矩分布曲线对称性较差,管片内力存在一个传递的过程,由中间环向两端下降,在管片间相互作用力及纵向螺栓的作用下,中间环管片刚度有所提升。

参考文献:

[1] 谭显东,刘俊,徐志成,等.“双碳”目标下“十四五”电力供需形势[J].中国电力,2021,54(5):1-6.

- [2] 张建云,周天涛,金君良.实现中国“双碳”目标水利行业可以做什么[J].水利水运工程学报,2022(1):1-8.
- [3] 张有天.我国水工地下结构建设的理论与实践[J].水力发电,1999(10):48-52.
- [4] 洪开荣.我国隧道及地下工程发展现状与展望[J].隧道建设,2015,35(2):95-107.
- [5] 王汉辉,王博士,张存慧,等.水工隧洞组合衬砌结构开裂特性研究[J].人民长江,2024,55(10):173-181.
- [6] 韩峰,徐磊,金永苗.输水隧洞内压作用下衬砌结构破坏分析[J].人民长江,2020,51(S1):149-152.
- [7] 付艳斌,王福道,陈湘生,等.破碎带地层盾构隧道建造关键问题[J].铁道标准设计,2023,67(1):25-33.
- [8] 莫键豪,唐欣薇,严振瑞.盾构输水隧洞单层衬砌结构承载变形特性研究[J].岩土工程学报,2023,45(7):1365-1373.
- [9] 赵鹏涛,娄宗科.TBM输水隧洞管片衬砌设计模型优选研究[J].中国农村水利水电,2010(3):83-86.
- [10] 张妍璐,苏凯,周利,等.基于收敛-约束法的隧洞纵向变形演化规律研究与支护时机估算[J].岩土力学,2017,38(S1):471-478.
- [11] 苏凯,崔金鹏,张智敏.隧洞施工开挖过程初次支护时机选择方法[J].中南大学学报(自然科学版),2015,46(8):3075-3082.
- [12] 加瑞,高天润,杨岗.施工应力释放和扰动对隧道地震响应影响分析[J].地下空间与工程学报,2022,18(S2):916-925.
- [13] 孟凡衍.软粘土地层施工扰动对盾构隧道和地基工后沉降影响[D].杭州:浙江大学,2019.
- [14] 钟小春,朱伟,秦建设.盾构隧道衬砌管片通缝与错缝的比较分析[J].岩土工程学报,2003(1):109-112.
- [15] 王士民,申兴柱,何祥凡,等.不同拼装方式下盾构隧道管片衬砌受力与破坏模式模型试验研究[J].土木工程学报,2017,50(6):114-124.
- [16] 张少辉.不同拼装方式下管片结构的力学行为研究[D].成都:西南交通大学,2004.
- [17] 何川,封坤,杨雄.南京长江隧道超大断面管片衬砌结构体的相似模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2007(11):2260-2269.
- [18] 彭科峰,周书剑,李树忱,等.高水压隧道盾构管片不同拼装方式力学性能分析[J].人民长江,2023,54(8):166-172.
- [19] 梁坤,封坤,肖树,等.封顶块位置对高水压通缝拼装管片结构的影响[J].西南交通大学学报,2020,55(6):1231-1239.

(责任编辑 王璐)