

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2025.006



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



考虑过程响应的盾构隧道施工管片变形研究

石州¹, 谢雄耀¹, 曾昆¹, 卜祥波², 林威¹, 徐子龙³

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 石家庄铁道大学 安全工程与应急管理学院,
石家庄 050043; 3. 杭州科技职业技术学院, 杭州 311402)

摘要:复合地层盾构掘进过程中,盾构机常会由于空间姿态偏移而与管片发生复杂相互作用,使得管片各部位发生多维变形单应,管片上浮位移和错台超限。为探明施工过程中管片结构响应及其衍生机制,建立多源荷载耦合作用三维数值计算模型,计算分析管片空间变形分布及其过程演化特性,通过现场三维激光雷达测试揭示管片变形演化模式,并对数值计算结果进行校验。结果表明,施工过程中管片“斜鸭蛋”状长轴变形增量的 64%发生在完全脱出盾尾前,管片各部位纵向旋转角均值增量的 50%发生在管片完全脱出盾尾后,而环向旋转角增量的 44%发生在逐渐脱出盾尾阶段。管片环向位移持续发展主要由盾壳环向旋转引起,在管片完全脱出盾尾后,其径向位移发展及形状改变主要受其自身环向位移改变的影响,其纵向位移的进一步发展主要受盾壳纵向偏转的影响。三维激光雷达点云测量能精确地定量评估施工过程中管片长轴和短轴变形及长轴夹角的变化。

关键词:盾构隧道;过程响应;管片变形;数值模型;三维点云

中图分类号:U455.43 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2025)05-0155-12

Segment deformation in shield tunnel construction considering process response

SHI Zhou¹, XIE Xiongyao¹, ZENG Kun¹, BU Xiangbo², LIN Wei¹, XU Zilong³

(1. School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China; 2. School of Safety Engineering and Emergency Management, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, P. R. China; 3. Hangzhou Polytechnic, Hangzhou 311402, P. R. China)

Abstract: During the shield tunnel construction in composite strata, there are complex interactions between the shield machine and segment due to spatial posture deflection. Causing multidimensional deformation response in

收稿日期:2024-11-04

基金项目:国家重点研发计划(2023YFC3806705);国家自然科学基金(52038008,52378408);上海市科委项目(22dz1203004);国网上海市电力公司项目(52090W23000B);浙江省教育厅一般科研项目(Y202455611)

作者简介:石州(1996-),男,博士生,主要从事盾构隧道管片上浮机制及智能控制研究,E-mail:shizhou19960910@163.com。
谢雄耀(通信作者),男,教授,博士生导师,E-mail:xiexiongyao@tongji.edu.cn。

Received: 2024-11-04

Foundation items: National Key R & D Program of China (No. 2023YFC3806705); National Natural Science Foundation of China (Nos. 52038008, 52378408); Science and Technology Innovation Plan of Shanghai Science and Technology Commission (No. 22dz1203004); State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company (No. 52090W23000B); General Research Project of Zhejiang Provincial Department of Education (No. Y202455611)

Author brief: SHI Zhou (1996-), PhD candidate, main research interests: mechanism and intelligent control of shield tunnel segment floating, E-mail: shizhou19960910@163.com.

XIE Xiongyao (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: xiexiongyao@tongji.edu.cn.

various parts of the segment, resulting in extreme floating displacement and segment dislocation. In order to investigate the structural response and derivative mechanisms, this study established a three-dimensional numerical calculation model under multi-source load coupling. Finally, the spatial deformation distribution and evolution characteristics of segments were calculated and analyzed by field 3D LiDAR testing. The results indicate that under the spatial deflection, 64% of the long-axis deformation of the segment occurs before detaching from the shield tail completely, and the long axis deflection is opposite to the circumferential rotation of the shield shell. In addition, 50% of the average increase in longitudinal rotation angle of the segment occurs after the segment detaching from the shield tail completely, while 44% of the increase in circumferential rotation angle occurs during the gradual detachment from the shield tail. During the entire process, the continuous development of circumferential displacement of the segments is mainly caused by the circumferential rotation of the shield shell, and after the segments completely detaching from the shield tail, their radial displacement development and shape changes are mainly affected by their own circumferential displacement changes. The lateral rotation of the shield shell would promote the longitudinal displacement of the segment in the same direction. After detaching from the shield tail, the further development of its longitudinal displacement is mainly affected by the longitudinal deflection. 3D LiDAR point cloud measurement could accurately and quantitatively evaluate the segment deformation.

Keywords: shield tunnel; process response; segment deformation; numerical model; 3D point cloud

临海区域盾构隧道长距离掘进过程中,盾构机常穿越由含水量大且性质软弱的砂土、粉土、淤泥质土及中强风化岩石等组成的复合地层。由于地层空间分布杂乱且性质差异较大,盾构机在与地层发生挤压切削等相互作用过程中常处于受力不均状态,盾构机整体会相对设计轴线发生较为明显的竖向和水平姿态偏移,甚至自身会沿着设计轴线和轴心发生横向、纵向和环向的空间转动^[1-2]。施工过程中,盾构机频繁的空间姿态变化会使其与管片之间发生复杂的相互作用,且管片与盾构机空间相对位置逐渐变化,管片外部多源荷载作用模式也随之改变,从而导致不同施工阶段中管片变形响应各异^[3]。在盾构隧道施工过程中,各阶段新的结构响应是在原有状态的基础上继续产生的,存在明显的过程效应。不同施工阶段管片变形响应持续累积,从而最终导致管片上浮位移和错台超限甚至结构开裂^[4]。因此,探明不同施工阶段间管片变形响应及相互作用机制的过程累积效应,对于施工过程中管片上浮动态控制及提升结构安全储备至关重要。

针对盾构隧道施工过程中管片工程响应,众多学者通过理论及数值计算^[5-14],现场测试和模型试验^[15-22]等研究手段,取得了一系列具有工程实践意义的研究成果。苏恩杰等^[7,18]等通过监测装置对管片竖向位移进行了连续测试,并通过卷积神经网络对其长期演化特性进行预测分析。Liu 等^[10]等对管片拼装过程的轴力及弯矩演化特性进行了测试分析。Chang 等^[21]等通过建立盾壳扭转荷载作用下多环管片数值模型,计算分析了管片变形响应及螺栓结构力学特性,并通过自研无线传感设备对管片旋

转特性进行了现场测试。黄大维等^[9]等通过考虑残余推力的理论计算模型和模型试验,对施工过程中荷载作用下管片纵向位移及环缝张开量进行了计算和测试。Shi 等^[5]计算分析了盾壳偏转与千斤顶推力偏心耦合作用下特定施工阶段管片的变形及力学响应,但未对管片结构在施工过程中的力学及变形状态动态演化特性进行深入分析。

综合分析可见,部分学者主要专注于现场测试或模型试验获取的外部荷载及管片响应数据本身的演化规律,对于管片变形响应与外部荷载间的耦合协同关系及衍生机制鲜有涉及。用全站仪及接触式仪器对管片变形测量过程中,由于测试空间及点位数量限制,难以对施工过程中管片整体变形响应进行精准测试。同时,数值计算研究中大多对施工过程中管片受到的多源外部荷载进行简化,尤其是常将盾构机与管片间复杂的空间相互作用简化为单一维度荷载直接施加在管片之上,忽略了施工过程中盾构机与管片间相互作用的多维性和空间不均性。进一步,大部分数值计算研究主要专注于某一时刻或某一状态下管片的工程响应,未涉及隧道连续推进过程中前期结构状态累积对后续结构响应的影响,从而难以从结构相互作用的过程累积效应角度出发,在不同施工阶段中对管片上浮和变形提出相应的工程控制措施。

笔者依托大直径盾构隧道工程实践,建立考虑初始状态导入和过程状态叠加的多源荷载耦合作用下的三维数值计算模型,模型中盾壳整体姿态偏移和空间姿态旋转、千斤顶推力偏压作用与工程实践相一致。基于模型计算分析盾构施工过程中管片空

间变形演化特性,揭示不同施工阶段盾壳与管片的相互作用机制,并通过三维激光雷达现场测试,揭示管片变形演化模式,并对数值计算结果进行校验。

1 工程概况

以福州滨海快线大直径盾构隧道为工程背景,盾构区间左线长4 246.399 m,右线长4 260.011 m。工程区域位于福州市滨海新区,盾构区间紧邻东海且沿海岸线铺设。盾构隧道采用气垫式泥水平衡盾构机长距离独头掘进,开挖直径为8.59 m,盾构机盾壳厚度为0.07 m,盾尾间隙为0.075 m,4道盾尾刷展平后纵向长度约为1.8 m,6组千斤顶撑靴共计19个且沿着环向均匀分布。隧道区间采用C50混凝土预制管片,管片外径为8.3 m,内径为7.5 m,环宽为1.8 m。数值模拟及现场试验对应区段地层分布及工程响应如图1所示。图1涉及的主要为与管片直接接触的盾壳后筒体姿态数据。

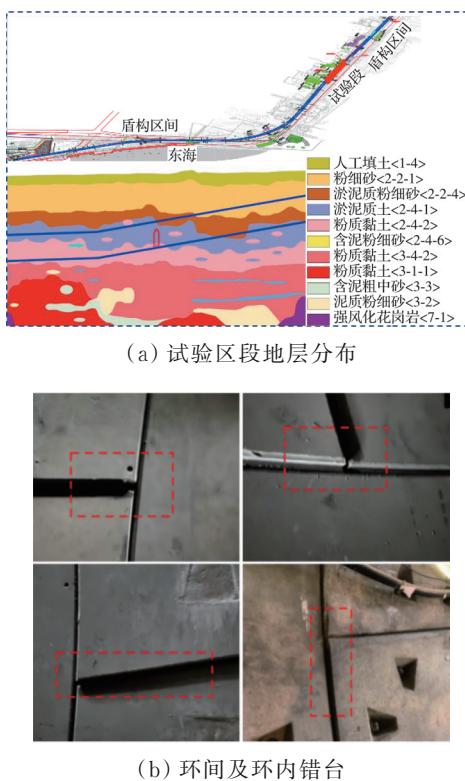


图1 试验区段地层分布及工程响应

Fig. 1 Evolution of shield shell spatial deviation and engineering response

由图1(a)可见,盾构隧道区间紧邻海岸线敷设,试验区段施工时主要穿越(含泥)粉细砂、粉质黏土和淤泥质土等组成的富水复合地层。地层孔隙水含量高且承载力较弱,盾构掘进过程中极易发生空间姿态偏移,使盾构与管片间发生复杂相互作用,导致管片在剧烈的变形响应下产生如图1(b)

所示的环间及环内错台。因此,研究盾构掘进过程中盾壳空间姿态变化对成形管片空间变形特性的影响,对于富水复合地层中盾构隧道安全高效掘进至关重要。

2 管片变形数值计算

2.1 模型设置及荷载模式

盾构隧道工程实践中,随着盾构机向前掘进,其与管片间的相对位置关系会发生变化,使得彼此间的相互作用模式也逐渐转变。根据盾构机结构构造及其与管片的作用模式,典型的盾构机与管片相互作用模式主要分为4种:管片拼装完成、盾尾刷到达管片、管片逐渐脱出盾尾及管片完全脱出盾尾。Shi等^[5]研究表明,盾构机对管片力学状态的影响效应会通过管片环间及环内螺栓的连接效应传递给纵向一定范围内的多环管片。这意味着盾构机向前掘进时,会持续地对处于固定空间位置的管片产生作用,进而使管片发生连续结构响应。管片拼装完成后即以整环形式与盾构机发生相互作用,当盾构机到达新的位置时,上述管片新的结构响应在原有初始状态基础上产生,且存在过程叠加效应。基于1 851~1 853环管片工程实践及上述分析,建立考虑状态叠加的多源荷载耦合作用下盾构隧道结构响应数值计算模型,如图2所示。

图2所示数值模型中包含的管片、盾壳、盾尾刷、千斤顶和螺栓及钢筋网的结构尺寸均以工程实践中的实际尺寸为标准。数值模型中单个千斤顶撑靴通过长、宽、高分别为0.5、0.3、0.2 m的长方体表征。纵向和环向钢筋直径分别为18、20 mm,钢筋网外侧混凝土保护层厚度为50 mm,纵向和环向钢筋间距分别为0.125、0.165 m,环内和环间螺栓长度和直径分别为0.6、0.03 m。各部件之间的相互作用模式如下:

1)数值计算工况分为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ四个阶段,其中阶段Ⅰ为管片拼装完成,阶段Ⅱ为盾尾刷前端到达管片中部,阶段Ⅲ为盾尾刷后端到达管片中部,管片逐渐脱出盾尾,阶段Ⅳ为管片完全脱出盾尾。下文中阶段Ⅰ-Ⅱ表征管片拼装完成至盾尾到达的动态过程,阶段Ⅱ-Ⅲ及阶段Ⅲ-Ⅳ同理。

2)根据工程实践经验,管片拼装采用错缝拼装,研究中不考虑橡胶止水垫等非结构部件,其在管片连接中的作用等效为管片切向的摩擦罚函数,摩擦系数为0.4,管片及各分块之间在法向保持硬接触。螺栓分为环间螺栓和环向螺栓,其与管片相互作用模式为嵌入。各分块中的钢筋网与管片之间的相互作用模式也被嵌入。

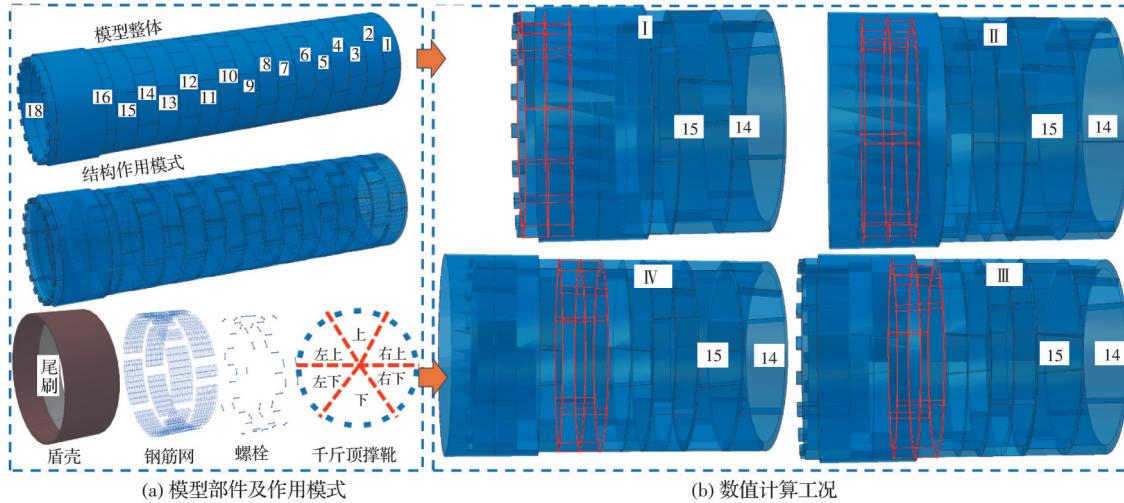


图 2 盾构隧道结构响应数值计算模型

Fig. 2 3D Numerical calculation model

3) 工程实践中盾尾刷中的油脂在长时间使用后逐渐凝固,使得各道盾尾刷之间连接成一个整体,因此,盾尾刷在数值模型中等效为一个实体部件。19个千斤顶撑靴共分为6个分区,数值模型中采用实体部件模拟撑靴,千斤顶荷载直接作用在撑靴表面,撑靴与管片在切向为摩擦接触,摩擦系数为0.4,法向为硬接触。数值模型各部件物理力学参数如表1所示。

表 1 数值模型各部件物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of each part in the numerical model

部件	密度/ (kg/m ³)	弹性模量 E/ GPa	泊松 比 μ	屈服应 力/MPa	屈服应变
盾壳	7 850	281	0.29		
撑靴	7 850	281	0.29		
管片	2 500	36.5	0.22		
螺栓	7 850	210	0.15	640/800	0/0.021
钢筋网	7 850	210	0.15	302/455	0/0.075 4
盾尾刷	7 850	70	0.31	302/455	0/0.075 4

工程数据表明,盾构机常会沿着设计轴线发生整体的竖向及水平姿态偏移,还会沿着设计轴心发生空间三维旋转。此外,富水潮湿环境中浆液难以快速凝固,已经脱出盾尾的管片长期承受外部浆液压力作用。在开挖扰动下,围岩向管片处变形而与管片发生接触作用,且地层中的孔隙水会向隧道周围流动聚集,从而导致管片结构承受外部土压力和孔隙压力作用。在与盾壳、千斤顶、浆液压力和地层相互作用过程中,管片在多源外部荷载作用下处于复杂的应力状态。管片结构多源外部荷载分布形式如图3所示。考虑初始状态导入和过程状态叠加的数值计算分析流程如图4所示。

如图3所示,根据工程实践及前期测试结果,数

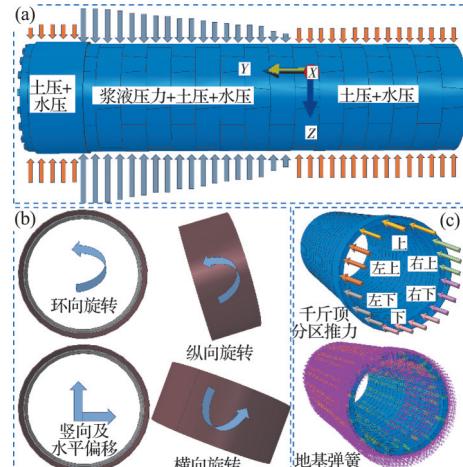


图 3 多源荷载分布及作用模式

Fig. 3 Multi-source load distribution and action mode

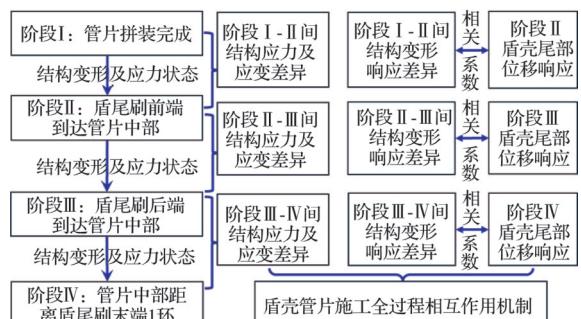


图 4 数值计算分析流程

Fig. 4 Analysis process of numerical calculation

值模型中盾构机及管片发生相互作用的同时,也承受土水压力及外部浆液荷载,结构响应也会受到周围地层约束。多源荷载分布及作用模式满足以下关系:

1) 数值模型中盾壳同时设置了环向、纵向、横向3个转动维度和竖向、水平2个位移维度的姿态变化。上述姿态变化通过ABAQUS中“荷载”模式下边界条件设置来实现。通过在模型中设置地基

弹簧来表征地层与管片间的作用模式,弹簧刚度为 $4.9 \times 10^7 \text{ N/m}$ 。通过在模型 inp 文件中添加“Nonlinear”关键字来保证地基弹簧仅在受压时发挥约束作用。

2) 数值模型中共设置了19个千斤顶撑靴,按照

工程实践划分为图3(c)中的6个分区(分别以6种不同颜色区分)。数值计算过程中各分区之间分别设置推力荷载,通过ABAQUS软件中压强荷载形式施加在撑靴上,推力数据由盾构机PLC系统导出。不同计算阶段中盾壳工程参数如表2所示。

表2 不同计算阶段盾壳工程参数

Table 2 Shield shell engineering parameters at different stages

阶段	上分区推力/MPa	右上分区推力/MPa	右下分区推力/MPa	左上分区推力/MPa	左下分区推力/MPa	下分区推力/MPa	俯仰角/(°)	摇摆角/(°)	滚动角/(°)	垂直偏差/mm	水平偏差/mm
I	9.2	9.4	20.3	20.3	7.9	20.3	0.09	0.03	0.02	39	10
II	13.9	13.5	14.5	11.7	9.5	14.3	0.13	-0.08	-0.07	39	8
III	15.6	17.7	17.7	9.1	11.1	9.6	0.20	-0.18	-0.17	35	10
IV	15.8	16.5	16.6	8.5	11.5	7.2	0.17	-0.20	-0.20	31	8

3) 数值模型中盾壳承受土压力荷载和水压力荷载,各计算工况中均设置自盾尾起沿着纵向往后10环内管片承受浆液压力作用,浆液压力沿着纵向逐渐减小,其余管片及盾壳承受土压力和水压力荷载。通过在管片及盾壳外部施加地基弹簧来模拟地层对于结构响应的约束。管片外部的浆液压力、土压力和水压力大小及分布特性以该工程区域中现场试验测试结果^[5]为依据。具体分布如式(1)~式(3)所示。

$$P_{\text{grout}} = 1000000 \times (Y - 10.8) \times (Z + 12.45) / 945.63 \quad (1)$$

$$P_{\text{soil}} = 1000000 \times (Z + 29.05) / 103.75 \quad (2)$$

$$P_{\text{water}} = 1000000 \times (Z + 14.525) / 103.75 \quad (3)$$

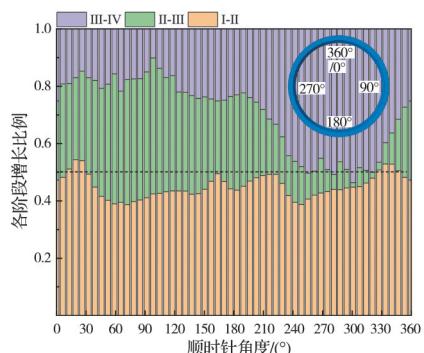
式中:Y和Z坐标方位如图3所示,分别对应掘进方向和竖直方向。式(2)和式(3)表示管片外部土水压力沿着Z轴分布,管片横向范围内各部位土水压力表现出从上部至下部逐渐增大的梯形分布特性。

4) 如图4所示,在阶段I数值计算完成后,将18环管片及螺栓和钢筋网的力学和变形响应数据作为“initial state”,全部导入阶段II模型中进行新一阶段的计算,即新一阶段管片结构响应是在上一阶段基础上继续发展的,以此类推获得阶段III和IV的计算结果。

2.2 管片上浮及错台特性

工程实践及已有研究结果表明^[7],在盾构隧道掘进过程中,从拼装完成至脱出盾尾,管片上浮位移持续发展。在新的施工阶段和荷载模式下,各环管片在原有上浮位移基础上继续产生新的结构响应,使得管片各部位上浮位移不断累积。获取不同施工阶段间管片各部位上浮位移增长比例,提出各阶段相应的处置措施,如图5所示。此外,盾构机向前掘进会使得已拼装完成的各环管片持续产生工程响应,其对管片变形特性的影响随着彼此间相对

距离的增加而逐渐减弱。计算得到了不同阶段间18环管片顶部及底部径向位移差值,以此对盾构机掘进的影响范围进行分析。不同阶段各环管片顶部及底部上浮位移差分布如图6所示。



(a) 上浮位移增量分布

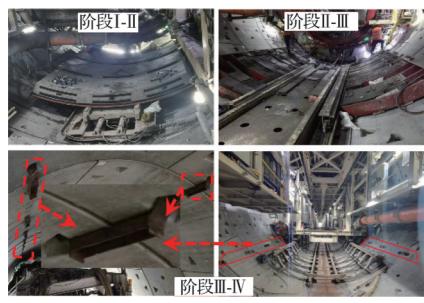


图5 不同阶段间管片上浮位移发展及处置措施

Fig. 5 Treatment measures and floating displacement at different stages

由图5可见,在不均匀千斤顶推力及盾壳姿态偏转下,管片各部位的上浮位移增量也表现出明显的非对称分布特性。管片各部位上浮位移主要发生在阶段I-II管片拼装完成至盾尾到达管片部位过程中,尤其是在管片顶部及底部位置处位移增量约占全过程的50%。这主要是因为该阶段管片完全处于盾壳之内,主要随着盾壳的竖向偏移而发生

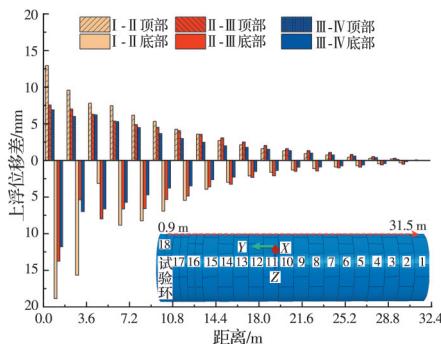


图 6 不同阶段管片顶部及底部上浮位移差分布

Fig. 6 Distribution of floating displacement difference at the top and bottom of segments

上浮位移。因此,如图 5(b)所示,在阶段 I-II 管片拼装完成至盾尾到达时,可在管片喂片机上放置 4 块管片(共 28 t),以增加竖向压力的形式来减缓管片的上浮位移。

图 5(a)显示,在阶段 II-III 中,管片右侧上浮位移增长约为左侧的 2 倍。同时可以发现,试验管片约 3/4 部分上浮位移量的 70% 是在拼装完成至逐渐脱出盾尾过程中发生的。如图 5(b)所示,在阶段 II-III 盾尾到达至管片逐渐脱出盾尾时,可继续在管片底部即下侧盾尾处放置 22 t 的配重块来抵消浆液浮力及盾壳挤压力,以此减小此阶段的管片上浮量。如图 5(a)所示,在阶段 III-IV 管片完全脱出盾尾时,其上浮位移主要受到环间螺栓的连接及外部荷载作用,此时仅有管片左侧 240°~330° 范围内上浮位移增长幅度较大,约为整体的 50%。图 5(b)显示,在阶段 III-IV 中,可在管片上部及两侧环间螺栓孔处安装型钢拉紧装置,使得相邻管片连接成整体,而减小管片局部上浮位移的继续发生。

如图 6 所示,各环管片顶部在各阶段的上浮位移差均为正值,表明随着施工的进行各环管片顶部及底部上浮位移逐渐增大。盾尾后各环管片底部

在相邻施工阶段间的上浮位移增量均比其顶部上浮位移增量大,且越靠近盾尾两者差异越大,底部增量最大约为顶部增量的 2 倍。比较发现,管片距离盾尾越远,其在相邻施工阶段间的上浮位移增量越小。试验环管片(第 18 环)往后第 5 环(图 6 中第 13 环)管片顶部最大上浮位移增量相对试验环减小了 59%,底部则相对减小了 65%,而其后第 10 环(图 6 中第 8 环)管片上述值分别为 88% 和 91%。由此可见,盾构隧道向前掘进过程中,主要导致盾尾后 10 环范围内管片的上浮位移发生响应,进而导致该范围内管片上浮位移持续累积。

2.3 管片三维变形分布

盾构隧道掘进过程中,在外多源荷载作用下,横向范围内圆形的管片各部位相对轴心发生大小不等的径向位移,使得管片形状椭圆化而存在长轴和短轴^[23]。与此同时,管片各部位以原始径向轴线为旋转半径发生环向旋转,管片各部位沿着开挖轴线方向偏离轴心而发生纵向位移,使得管片整体沿着纵向发生旋转。其中环向位移和纵向位移对应管片在横向和纵向范围内的旋转角度。获取 4 个施工阶段管片各部位的径向位移、环向旋转角度和纵向旋转角度,如图 7 所示。为了对各部位旋转角度大小进行直观比较,图 7 中的角度显示均为正值。同时,获取了不同施工阶段管片长轴和短轴变形及长轴夹角的分布,以此对管片形状椭圆化程度进行分析,如图 8 所示。

图 7(a)和图 8 计算结果表明,在盾壳空间偏转挤压作用下,各个施工阶段管片右上侧部分向隧道外的径向位移较大,管片左下侧部分向隧道内的径向位移较大。管片表现出左下与右上相对挤压,左上和右下向外扩张的“斜鸭蛋”状变形特性。各阶段变形后的管片长轴和短轴分别介于 13~60 mm

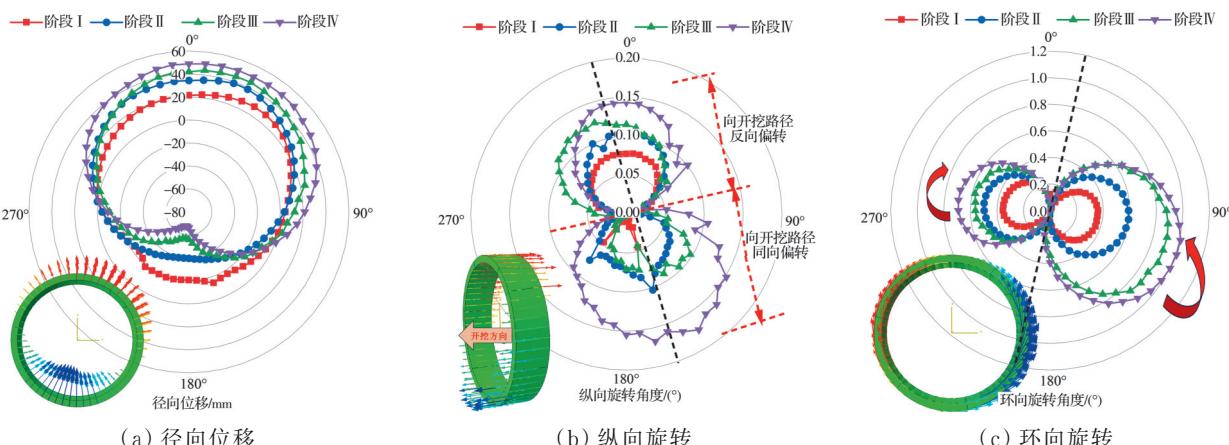


图 7 管片各部位空间挠曲变形分布特性

Fig. 7 Distribution of spatial deformation in various parts of segments

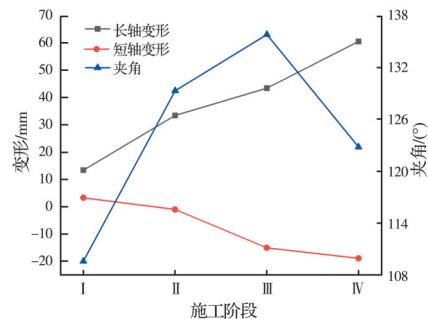


图8 不同施工阶段管片长轴和短轴变形及夹角分布

Fig. 8 Distribution of deformation and angle of the long and short axes of segments at different stages

和1~20 mm,长轴夹角介于109°~136°。进一步比较发现,管片在阶段I~III中的长轴变形增量占全过程的64%,即管片形状改变主要发生在完全脱出盾尾前。阶段I~III中长轴夹角增加了24%,且旋转方向与盾壳环向旋转一致。在完全脱出盾尾后,管片长轴变形和短轴变形相对阶段III分别增加了39%和26%,表明管片脱出盾尾后其结构扁平化程度进一步增加。相较正在脱出盾尾的管片,完全脱出盾尾后的管片长轴夹角减小了10%,即阶段III~IV中长轴发生了与盾壳环向旋转方向相反的顺时针旋转。

如图7(b)所示,在盾壳三维空间偏转挤压影响下,管片左右两侧纵向旋转角度呈现出右侧大而左侧小的分布特性,管片左右两侧纵向旋转角度分界轴相较文献[5]中的竖向中轴发生了与盾壳环向旋转同向的逆时针偏转,偏转角度约为13°。各阶段管片上部向开挖路径反向旋转,而下部纵向旋转方向则与开挖路径同向。这主要是因为在盾壳栽头翘尾的纵向姿态偏转及逆时针环向旋转下,管片右下部与盾壳间挤压力水平向前(掘进方向)的分量,及逆时针环向分量拖动管片右下部沿着纵向向前移动。因此,管片整体发生了纵向旋转,且管片右下

部纵向位移显著大于左上部,左右两侧最大偏转角度差0.075°,出现在管片右侧128°处。进一步比较发现,阶段I~IV中管片各部位纵向旋转角均值增量的50%出现在阶段III~IV中,表明管片的纵向旋转主要发生在脱出盾尾后。

图7(c)表明,与纵向旋转类似,管片左右两侧环向旋转角度的分界轴相较竖向中轴顺时针旋转了约13°,管片左右两侧部位的环向旋转角度呈左侧小而右侧大的分布特性。左右两侧最大的环向旋转角度差0.3°,出现在管片右侧110°位置处。进一步比较发现,在阶段III脱出盾尾过程中,管片各部位环向位移均值相较阶段II增加了40%,而相对阶段III,阶段IV该值为12%。同时阶段II中分界轴右侧最大环向转角是左侧最大转角的1.2倍,阶段III和阶段IV分别相对其增加了31%和21%,表明管片逐渐脱出盾尾的阶段III中,管片两侧不均匀环向旋转最为显著。进一步地,阶段I~IV中管片各部位环向旋转角增量的44%发生在阶段II~III中,即管片环向旋转急剧增长主要发生在脱出盾尾阶段。

3 管片位移演化机制

3.1 不同阶段管片位移响应

盾构隧道向前掘进过程中,新施工阶段管片的变形单响应在前一施工阶段基础上演化而来。相邻阶段位移响应的差异与新施工阶段中管片及外部荷载的相互作用直接相关。获取相邻阶段管片三维空间位移的差值,以此揭示不同阶段管片空间位移的演化规律及与外部荷载间的相互作用模式。各施工阶段管片各部位三维位移差异分布如图9所示。不同施工阶段管片环向位移及纵向位移分布如图10所示。

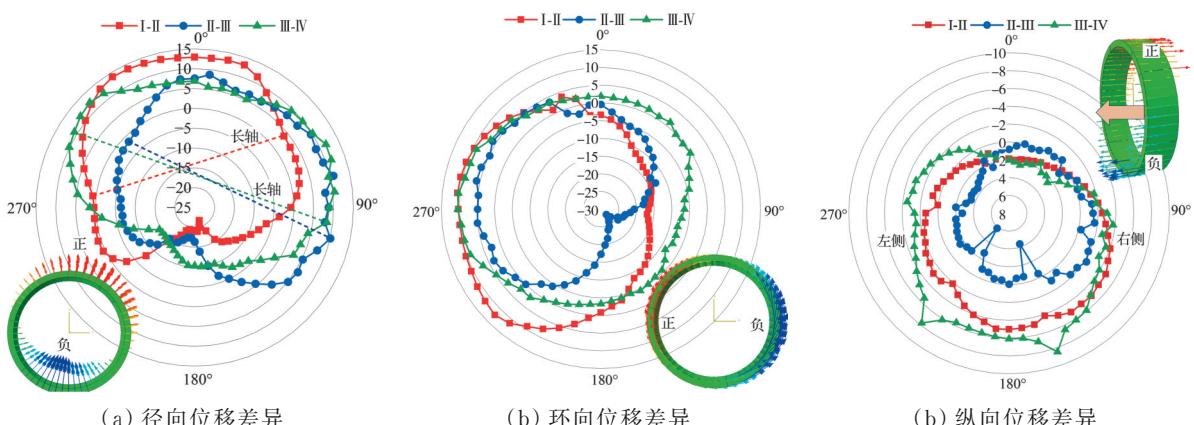


图9 各施工阶段管片各部位三维位移差异分布

Fig. 9 Distribution of three-dimensional displacement differences of segments in different stages

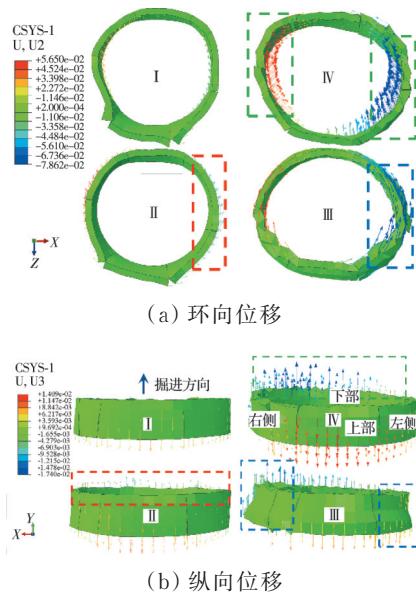


图 10 不同施工阶段中管片环向位移及纵向位移分布

Fig. 10 Distribution of circumferential and longitudinal displacement of segments at different stages

图 9(a)中位移增量图形的长轴方向均较水平轴发生了旋转。阶段 I-II 径向位移增量图形长轴相较水平轴逆时针旋转,与盾壳环向旋转方向一致。相较阶段 I-II,阶段 II-III 和 III-IV 径向位移增量图形的长轴偏转角度更大,且与盾壳环向旋转反向。表明管片拼装完成至盾尾到达阶段中,径向位移增量使得管片发生长轴向着盾壳环向旋转同向偏转的形状变化,此后至完全脱出盾尾,径向位移增量分布特性与之相反。进一步比较发现,管片径向位移增量大小的均值在阶段 I-II 最大,占全过程径向位移增量大小均值的 37%。阶段 III-IV 中管片左侧位移增量大小的均值为右侧的 1.3 倍且较其他阶段大,阶段 II-III 及阶段 III-IV 中径向位移增量图形长轴变形,相较阶段 I-II 分别相对增长了 88% 和 320%,表明管片逐渐脱出至完全脱出盾尾阶段,其左侧径向位移增长更显著,管片各部位径向位移的变化导致管片向着形状更加椭圆化方向发展。

图 9(b)中负值表示相邻阶段间管片该部位相对之前发生了更大的逆时针环向位移,正值与之相反。如图 9(b)所示,阶段 I-IV 中管片右侧各部位环向位移增量均值较左侧增加了 161%,表明施工过程中管片右侧环向位移增量较左侧更明显。相较其他阶段,盾尾到达至管片逐渐脱出盾尾(阶段 II-III)过程中,管片右侧环向位移增量均值最大,较阶段 I-II 和阶段 III-IV 分别增长了 60% 和 352%,且右侧增量方向与盾壳逆时针环向旋转同向,如图 10(a)所示。同时,阶段 II-III 中管片右侧各部位环向位移增量均值为左侧的 5 倍,阶段 I-II 和阶段 III-

IV 分别为左侧的 29% 和 16%,表明施工过程中,管片右侧环向位移的增长及左右侧环向位移的非均匀增加主要发生在管片逐渐脱出盾尾阶段。而在管片逐渐脱出至完全脱出盾尾(阶段 III-IV)过程中,如图 10(a)所示,管片左侧环向位移均为顺时针增长,且其增长均值较阶段 II-II 增长了 46%,表明管片完全脱出盾尾后,相较前一阶段,其左侧环向位移向着与盾壳环向旋转反向显著增大。

图 9(c)中负值表示管片该部位相较前一阶段向着掘进同向进一步纵向移动,正值与之相反。阶段 I-II 与阶段 III-IV 中,管片均有超过 70% 部位的纵向位移增量为负值,上述部位主要分布在管片中部及下部,且向着开挖方向进一步发生纵向位移。上述阶段间管片下部纵向位移增量显著大于上部,下部增量与上部增量间的差值最大超过上部增量的 3 倍。图 10(b)也显示阶段 III-IV 中管片下部与掘进同向的纵向位移显著增加。阶段 II-III 中管片各部位纵向位移增量均值分别为阶段 I-II 与阶段 III-IV 的 57% 和 37%,表明从盾尾到达至逐渐脱出盾尾过程中管片纵向位移增量较小,各部位纵向位移主要在完全脱出盾尾后显著增加。进一步比较发现,阶段 II-III 中,管片左侧与右侧纵向位移增量均值间的差异为 3 mm,分别为阶段 I-II 与阶段 III-IV 的 4 倍和 2 倍。可见,盾尾到达管片至管片逐渐脱出过程中,管片左侧及右侧纵向位移增量的差异全过程最大。这主要是因为该阶段间盾壳与管片剧烈挤压,导致图 10(b)所示的管片两侧发生了与盾壳横向旋转同向的纵向位移增加。

3.2 盾壳与管片相互作用模式

不同阶段管片结构响应的差异与新阶段中的相互作用密切相关。Shi 等^[5]研究发现,管片拼装完成至完全脱出盾尾过程中的力学及变形特性演化与盾壳尤其是盾壳尾部对其产生的作用直接相关。管片各维度变形在各阶段间的响应差异与新阶段中盾壳尾部该维度变形的相关系数能反映盾壳对管片变形的影响及彼此间的相互作用程度。获取 4 个阶段的管片空间变形差异数据与新阶段中盾壳尾部变形响应间的相关系数,如图 11 所示。不同阶段管片位移演化过程中,管片与盾壳间的相互作用模式如图 12 所示。

如图 11 所示,阶段 I-IV 中盾尾上浮位移与各阶段间上浮位移差值的相关系数均为正,即盾构的向前掘进会促进管片各部位上浮位移的增长。相较阶段 I-II 和阶段 III-IV,阶段 II-III 中管片上浮位移发展与盾尾上浮位移间的相关系数分别增长了

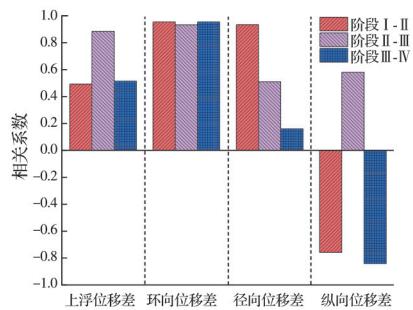


图 11 各阶段管片响应差异与盾尾响应的相关系数

Fig. 11 Correlation coefficient between segments response differences and shield tail response in different stages

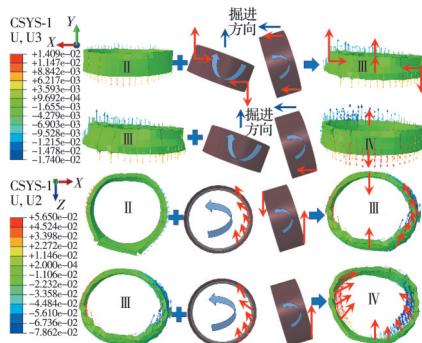


图 12 不同阶段管片与盾壳相互作用模式

Fig. 12 Interaction mode between segments and shield shell in different stages

80% 和 72%。表明盾尾到达至管片脱离盾尾过程中管片上浮位移的持续增长更容易受到盾壳姿态偏转的影响。管片完全脱离盾尾后, 盾壳姿态偏移对于管片上浮继续发展的影响效应较弱。图 11 表明, 盾壳的环向旋转位移与管片环向位移进一步发展, 在各阶段间的相关系数均超过 0.9, 表明施工过程中盾壳的环向旋转是导致管片环向位移持续发展的主要因素, 且在管片完全脱离盾尾后上述影响效应仍占主导作用。阶段 I-II 中盾壳径向位移与各阶段管片径向位移差的相关系数全过程最大, 分别为后两者的 1.8、5.5 倍。表明阶段 I-II 中管片更加扁平化的径向位移发展主要受盾壳径向位移的影响。而在阶段 II-III 中, 盾壳径向位移的改变导致正在脱出盾尾的管片上部和下部均受到向内的挤压力而使径向位移增大。但如图 12 所示, 此时盾壳逆时针的环向旋转会使管片右上侧承受较大、方向向上的摩擦作用力, 进而抵消了部分挤压力作用, 从而导致阶段 II-III 的相关系数相较阶段 I-II 减少了 45%。在阶段 III-IV 管片完全脱出盾尾后, 盾壳对其直接挤压力作用消失, 转变为下部挤压力的间接作用, 上述相关系数进一步降低。如图 12 所示, 阶段 III-IV 中管片径向位移发展及形状改变主要由其自身环向位移改变引起。

图 11 表明, 阶段 II-III 中盾壳位移与管片纵向位移发展为正相关, 即盾壳纵向变形正向促进此阶段管片纵向位移的进一步发展。如图 12 所示, 阶段 II-III 中盾壳的横向旋转使得管片在与其挤压接触下右侧受到向前分力, 左侧受到向后分力, 从而使管片两侧的纵向位移发展与盾壳纵向位移方向一致。此阶段管片受到的向前挤压力分力也会促进管片上部及下部纵向位移向着掘进方向发展。因此, 阶段 II-III 中盾壳的位移响应会促进管片与盾壳同向移动。而在阶段 III-IV 管片完全脱出盾尾后, 盾壳横向旋转对于管片两侧纵向位移的影响效应较弱, 此时主要是盾壳下部挤压力纵向分量的间接作用, 导致管片下部纵向位移向掘进方向同向发展, 而上部相反。管片整体发生纵向旋转, 且旋转方向与盾壳纵向偏转方向相反, 因此相关系数为 -0.8。阶段 III-IV 中相关系数大小全过程最大, 表明脱出盾尾后管片纵向位移的进一步发展主要受盾壳自身裁头翘尾的纵向位移响应影响。

4 管片变形点云测试分析

在工程现场对数值模型对应的第 1851 环管片前后范围内的第 1850~1879 环管片完全脱出盾尾后的变形点云数据进行采集, 以对数值计算结果的准确性进行验证。此外, 依托发生显著结构变形的上海长江西路盾构隧道, 通过三维激光扫描仪开展施工过程管片变形现场测试, 以对数值计算结果的普适性进行验证。长江西路隧道外径为 15 m, 内径为 13.7 m, 环宽为 2 m, 管片厚度为 650 mm。与福州滨海快线工程类似, 该盾构隧道施工过程中多穿越渗透性较强且承载力较弱的粉质黏土和砂质粉土, 极易发生盾构姿态偏移和管片变形。管片长轴、短轴及长轴夹角分布能对管片形状进行定量表征, 对上述 3 个指标进行分析。为了获取盾构衬砌管片的初始变形状态, 在管片拼装后立即采用三维激光扫描技术对该环管片进行全断面测量。通过在盾构机内部布设 3 个测站来解决测量过程中盾构机内部遮挡问题。施工过程中管片变形三维激光点云测试流程如图 13 所示。

三维激光点云数据处理流程已在文献[19]中详细叙述, 在此仅讨论分析管片变形结果。隧道 9~20 环管片长轴和短轴变形结果及长轴夹角分布如图 14(a)所示。其中向外扩张的变形值定义为正, 向内收缩的收敛值定义为负。受限于滨海快线现场施工条件, 仅在 1850~1880 环管片脱出盾尾 2 环后对部分位置的管片变形点云数据进行采集。

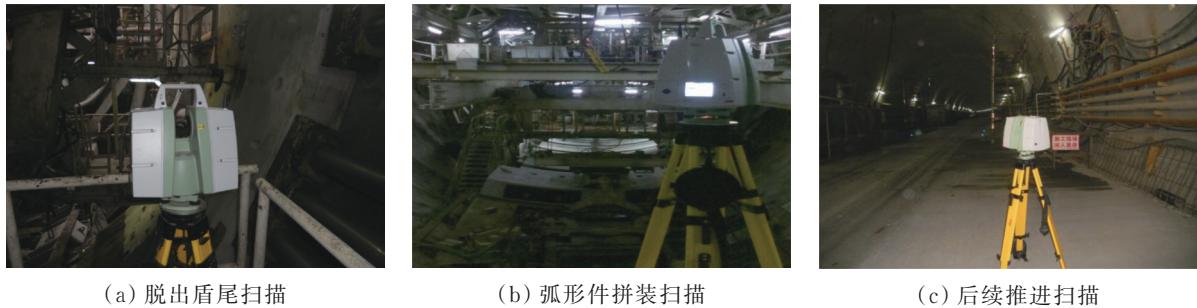


图 13 施工过程中管片变形三维激光点云测试流程

Fig. 13 3D laser point cloud testing for segment deformation during the entire process

通过数据处理得到长轴及短轴变形分布,如图 14(b)所示。

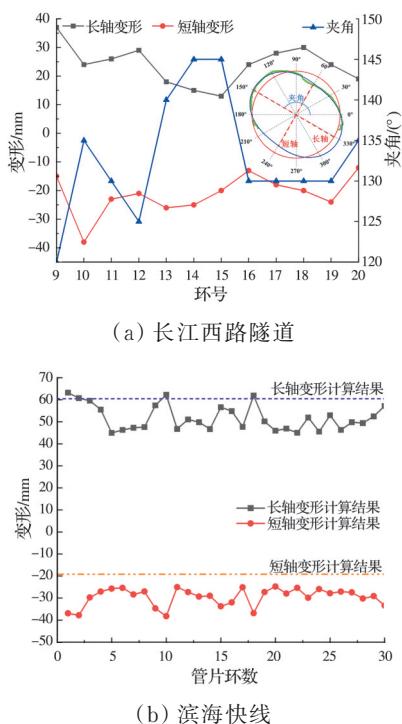


图 14 管片长轴及短轴变形及长轴夹角分布

Fig. 14 Distribution of long and short axis deformation and angle of segment

如图 14(a)所示,长江西路隧道 9~20 环管片成型稳定后其长轴变形介于 15~40 mm,短轴变形介于 -10~ -40 mm,整体呈现出沿短轴压缩和长轴扩张的椭圆化变形特性。当长轴与水平轴线夹角为 180°时,管片结构呈典型的“横鸭蛋”变形特性^[5],长江西路隧道长轴夹角介于 120~145°之间,长轴均相较水平轴发生了顺时针旋转。这与图 8 中完全脱出盾尾后管片的“斜鸭蛋”状形状分布及长轴顺时针旋转的数值计算结果趋于一致。图 14(b)显示,管片长轴和短轴变形数值计算结果与滨海快线对应区段中管片变形测试结果间的误差分别为 17% 和 36%,满足工程要求。

为了进一步对管片脱出盾尾过程中的变形特

性进行分析,在上海长江西路隧道北线第 15 环管片脱出盾尾及距离盾尾 1 环管片时分别进行扫描,利用点云规则网格化的建模方法得到两个阶段管片的三维变形云图,通过数据处理获得不同阶段管片变形分布。不同施工阶段间管片长轴变形及偏转如图 15 所示,图中绿色数据点为点云数据,蓝线为拟合曲线,表征变形后的隧道形状,红色线圈为标准圆形管片。

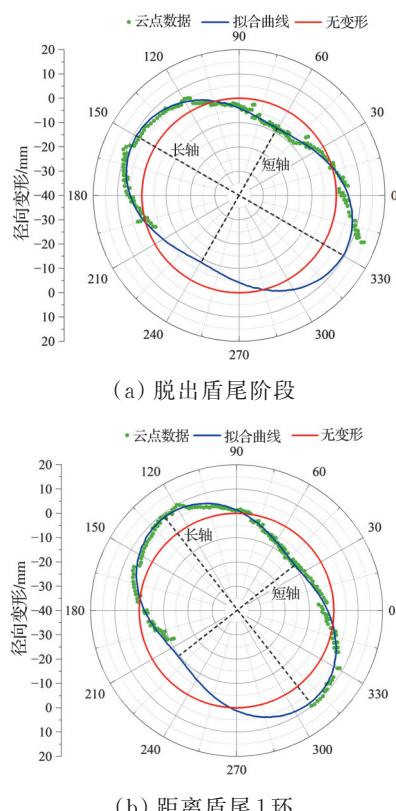


图 15 不同施工阶段间管片长轴变形及偏转

Fig. 15 Long axis deformation and deflection of segments bewteen different stages

如图 15(a)所示,管片在脱出盾尾过程中呈现为“斜鸭蛋”状变形,此时长轴变形为 18 mm,完全脱离且距离盾尾 1 环后,其长轴变形相对增加了 17%,这与图 8 中管片完全脱出盾尾后长轴变形进

一步增大一致。由此可见,与逐渐脱出盾尾阶段相比,试验管片完全脱出盾尾后管片长轴变形进一步增加,管片结构更加扁平化和椭圆化。脱出盾尾阶段管片长轴夹角为 150° ,图15(b)表明距离盾尾1环后其夹角相对减小13%,表明其长轴相较之前发生了与盾构机环向旋转反向的顺时针偏转,这与图8中长轴夹角减小10%的计算结果一致。由此可见,数值计算模型能较为准确地表征与现场工程实践相一致的结构作用模式,管片脱出盾尾后的变形计算结果也与现场测试较为吻合,尤其是能很好地揭示管片椭圆化形变中长轴变形规律及结构旋转特性。

5 结论

建立了多源荷载耦合作用下盾壳-管片三维数值计算模型,揭示了不同施工阶段盾壳与管片的相互作用机制,通过现场试验探明了施工过程中管片外部荷载分布及演化规律,依托三维激光雷达测试揭示了管片变形演化模式,并对数值计算结果进行校验。主要结论如下:

1)管片约3/4部分上浮位移量的70%在拼装完成至逐渐脱出盾尾过程中发生,同时管片顶部及底部处在脱出盾尾前的上浮位移增量约占全过程的50%。盾构持续掘进主要会导致盾尾后10环管片上浮位移继续增加。

2)管片全过程长轴变形增量的64%发生在完全脱出盾尾前。施工过程中管片各部位纵向旋转角均值增量的50%发生在阶段Ⅲ-Ⅳ中,而环向旋转角增量的44%发生在阶段Ⅱ-Ⅲ中。

3)管片环向位移持续发展主要由盾壳环向旋转引起。在管片脱出盾尾过程中,盾壳的横向旋转会促进管片沿着纵向与盾壳同向位移。在完全脱出盾尾后,管片径向位移发展及形状改变主要受其自身环向位移改变影响,纵向位移的进一步发展主要受盾壳纵向偏转影响。

4)数值计算模型能准确表征现场工程实践中盾壳与管片的相互作用机制,能很好地揭示管片椭圆化形变中长轴变形规律及结构旋转特性,现场工程测试与数值计算结果间相互印证。

5)主要对管片多维变形进行计算和测试分析,对管片变形演化过程中的错台分布涉及较少。未来需要在工程实践中通过先进传感器对管片变形和错台的空间分布特性及时序演化规律进行测试,将管片变形与管片错台及开裂损伤进行协同分析。

参考文献

[1] 刘议文,周子扬,封坤,等.盾构隧道套筒-直螺栓新型

环间接头抗剪性能研究[J].铁道科学与工程学报,2024, 21(8): 3248-3261.

LIU Y W, ZHOU Z Y, FENG K, et al. Study on shear performance of new ring joint with sleeve and bolt for shield tunnel [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2024, 21(8): 3248-3261. (in Chinese)

[2] 关振长,杨泽龙,宁茂权,等.环端面不平整条件下衬砌管片抗剪承载特性研究[J].铁道科学与工程学报,2024, 21(4): 1533-1543.

GUAN Z C, YANG Z L, NING M Q, et al. On the shearing capacity characteristics of lining segment with uneven ring surface condition [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2024, 21(4): 1533-1543. (in Chinese)

[3] YAN Z G, LI J T, SHEN Y, et al. Damage identification method on shield tunnel based on PLSR and equivalent damage analysis [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2023, 137: 105127.

[4] 石钰锋,胡梦豪,周宇航,等.不同因素导致的差异沉降对盾构隧道受力特性影响研究[J].铁道科学与工程学报,2024, 21(4): 1521-1532.

SHI Y F, HU M H, ZHOU Y H, et al. Study of the effect of differential settlement due to different factors on the force characteristics of shield tunnels [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2024, 21(4): 1521-1532. (in Chinese)

[5] SHI Z, XIE X Y, ZENG H B, et al. Disaster mechanism of large-diameter shield tunnel segments under multi-source load coupling: A case study [J]. Engineering Failure Analysis, 2024, 166: 108878.

[6] ZHANG D M, ZHANG B L, LUO T L, et al. Full-scale testing and numerical modelling of segmental-joint performance with corroded bolt [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022, 119: 104260.

[7] 苏恩杰,叶飞,何乔,等.基于卷积神经网络-长短期记忆的施工期盾构管片上浮过程预测模型[J].同济大学学报(自然科学版),2023, 51(9): 1352-1361.

SU E J, YE F, HE Q, et al. Prediction model of shield segment floating process during construction based on convolutional neural networks and long short-term memory [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2023, 51(9): 1352-1361. (in Chinese)

[8] 陈张鹏,臧延伟,杨仲轩,等.盾构管片开口解析分析方法及其应用[J].中国公路学报,2024, 37(7): 189-203. CHEN Z P, ZANG Y W, YANG Z X, et al. Analytical solution of tunnel linings subjected to opening condition and its application [J]. China Journal of Highway and Transport, 2024, 37(7): 189-203. (in Chinese)

[9] 黄大维,姜浩,罗文俊,等.考虑纵向残余顶推力的盾构隧道纵向抗弯刚度解析算法[J].中国公路学报,2024, 37(1): 165-174.

HUANG D W, QIANG H, LUO W J, et al. Analytical algorithm of longitudinal bending stiffness of shield

- tunnel considering the longitudinal residual jacking force [J]. China Journal of Highway and Transport, 2024, 37(1): 165-174. (in Chinese)
- [10] LIU M B, LIAO S M, XU J, et al. Analytical solutions and in situ measurements on the internal forces of segmental lining produced in the assembling process [J]. Transportation Geotechnics, 2021, 27: 100478.
- [11] 李霖皓, 陈珂, 陈健, 等. 基于壳单元的盾构隧道参数化结构计算与验证[J]. 铁道科学与工程学报, 2024, 21(1): 253-263.
- LI L H, CHEN K, CHEN J, et al. Parametric structural calculation and verification of shield tunnel based on shell elements [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2024, 21(1): 253-263. (in Chinese)
- [12] 魏纲, 周烨波, 王哲, 等. 盾构隧道内堆载对基坑开挖引起的隧道上浮量的控制效果研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2024, 55(7): 2727-2736.
- WEI G, ZHOU Y B, WANG Z, et al. Study on control effect of pile load in shield tunnel on tunnel floating caused by foundation pit excavation [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2024, 55(7): 2727-2736. (in Chinese)
- [13] 陶伟明, 周子扬, 刘议文, 等. 岩层隧道荷载结构响应影响因素分析[J]. 中国公路学报, 2024, 37(1): 142-153.
- TAO W M, ZHOU Z Y, LIU Y W, et al. Analysis of factors influencing the load-structural response of tunnel in rock environment [J]. China Journal of Highway and Transport, 2024, 37(1): 142-153. (in Chinese)
- [14] 黄大维, 姜浩, 封坤, 等. 纵向螺栓预紧力对盾构隧道纵向刚度影响分析[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2024, 52(9): 110-117.
- HUANG D W, JIANG H, FENG K, et al. Analysis of influence of longitudinal bolt preload on longitudinal stiffness of shield tunnel [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2024, 52(9): 110-117. (in Chinese)
- [15] JIN H, YU K W, ZHOU S H, et al. Performance assessment of shield tunnel damaged by shield shell extrusion during construction [J]. International Journal of Civil Engineering, 2019, 17(7): 1015-1027.
- [16] ZHENG G, SUN J B, ZHANG T Q, et al. Mechanism and countermeasures of progressive failure in shield tunnels [J]. Tunnelling and Underground Space Technolo-
- gy, 2023, 131: 104797.
- [17] WU S Z, HU X Y, FU W, et al. Evaluation of segmental lining response during shield tunnel construction based on field measurements and 3D FEM simulation [J]. Transportation Geotechnics, 2024, 44: 101135.
- [18] 苏恩杰, 任超, 叶飞, 等. 泥质砂岩地层盾构隧道管片连续上浮规律与分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2024, 55(2): 706-714.
- SU E J, REN C, YE F, et al. Law and analysis of continuous floating of shield tunnel segments in argillaceous sandstone stratum [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2024, 55(2): 706-714. (in Chinese)
- [19] 谢雄耀, 卢晓智, 田海洋, 等. 基于地面三维激光扫描技术的隧道全断面变形测量方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(11): 2214-2224.
- XIE X Y, LU X Z, TIAN H Y, et al. Development of a modeling method for monitoring tunnel deformation based on terrestrial 3D laser scanning [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(11): 2214-2224. (in Chinese)
- [20] SHI Z, BU X B, ZENG K, et al. Optimization study for cement-based grout mixture ratio of shield tunnel considering spatiotemporal evolution of grout buoyancy [J]. Construction and Building Materials, 2024, 442: 137600.
- [21] CHANG J Q, ZHANG D M, HUANG H W, et al. A hybrid sensing of rotation-induced stress of segmental lining during shield tunneling via WSN and surrogate numerical modeling [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2023, 140: 105315.
- [22] WU H N, XU X P, CHEN R P, et al. Observed uplift behaviors of segmental lining during shield tunneling in hard rock: A case study from Changsha, China [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2024, 150: 105816.
- [23] XIE X Y, TIAN H Y, ZHOU B, et al. The life-cycle development and cause analysis of large diameter shield tunnel convergence in soft soil area [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 107: 103680.

(编辑 胡英奎)