

DOI: 10.11779/CJGE201501019

钱江隧道管片拼装过程中的力学行为实测分析

廖少明^{1, 2}, 门燕青^{1*}, 张迪³, 徐永¹

(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. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430063)

摘要: 钱江隧道是目前世界上最大直径的软土盾构法隧道工程之一。通过在典型地层深埋段埋设全断面的隧道试验环, 对盾构拼装管片的全过程及拼装后管片结构的受力特征进行了现场实测。监测结果表明, 管片结构内力在拼装过程中受到管片相对位置及相互接触关系的变化影响, 经历了波动、微调整直至平衡状态的变化过程。多数管片在拼装阶段的实测内力小于正常使用阶段管片理论内力的 30%, 但高于拼装阶段管片内力的理论值, 最高可达到拼装阶段理论值的 10 倍以上。管片拼装过程中的内力实测值经历了波动或跳跃后逐渐逼近拼装阶段的理论值。值得注意的是, 实测值的变化曲线表明: 个别管片局部内力出现突变, 实测突变值达到正常使用阶段理论值的 3 倍以上。因此, 尽管管片之间通过管片间接接触条件及相对位置的调整使管片结构的内力较快调整至正常状态, 但该过程中出现管片内力局部过大的情形对管片结构的耐久性和长期承载性能可能造成影响, 在今后的设计和施工控制中应予以充分考虑。

关键词: 超大直径; 盾构隧道; 管片拼装; 现场实测; 管片内力

中图分类号: U456 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2015)01-0156-09

作者简介: 廖少明 (1966-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事隧道、基坑等地下工程设计与施工控制关键技术方面的教学和科研。E-mail: liaosm@126.com

Field tests on mechanical behaviors during assembly of segmental linings of Qianjiang tunnel

LIAO Shao-ming^{1, 2}, MEN Yan-qing¹, ZHANG Di³, XU Yong¹

(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. China Railway No.4 Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan 430063, China)

Abstract: Qianjiang tunnel is one of the soft soil shield tunnels with the largest diameter by now. In order to obtain the detailed mechanical behaviors from construction to service stage, field tests on the whole ring at the typical formation are carried out. The internal forces of linings are measured step by step during the whole process of assembling stage. The results show that the internal forces of linings are influenced by the variation of relative positions and contacts between segments, and fluctuate and are slightly adjusted and finally reach a new equilibrium state. Most of the measured internal forces during assembly of segments are usually 30% less than of the theoretical values in service, while higher, even more than 10 times, than the theoretical values during assembly. The measured values gradually approach to the theoretical ones during assembly after different levels of fluctuations or jumps. It is important to note that the variation curves of monitoring data have some individual mutations, and some even more than 3 times the theoretical values at service stage. By adjusting the relative contacts and positions between segments, the mutations return to be normal quickly. However, this process, causing local high stress possibly, has an influence on the durability and long-term bearing capacity of segments. The above characteristics should be considered carefully during the design and construction of similar projects in the future.

Key words: super large diameter; shield tunnel; segment assembly; field test; internal force of lining

0 引言

盾构法隧道的管片结构在拼装阶段的受力状态复杂且存在较多的随机性和不确定性, 容易导致管片开裂、破损^[1-5]。如, 对上海地铁管片的调研发现, 拼装

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51378389); 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 (2015CB057806)

收稿日期: 2014-04-24

*通讯作者

阶段造成的管片破损能占破损能总量的 38%以上^[6]。显然, 管片在拼装阶段的受力变形状态将延续到正常使用阶段, 从而影响管片隧道使用阶段的受力变形及承载性能。但当前的盾构隧道管片设计多数只是孤立地考虑隧道结构在正常使用工况条件下的受力^[7], 而忽视了管片拼装过程中的力学行为对隧道结构正常使用阶段的受力和变形的影响。研究管片结构在拼装阶段的力学行为特征不仅有助于管片隧道结构设计的优化, 同时对盾构拼装控制具有重要指导意义。

近年来, 盾构隧道管片结构在拼装阶段的力学效应得到了诸多学者的关注。Blom 等^[8-9]基于 Heinenoord 隧道监测数据, 指出管片破损能较多地发生在管片拼装阶段, 设计中应明确拼装过程对隧道结构受力特征的影响。Sugimoto^[10]统计并分析了管片在拼装过程中导致的破损能类型和原因, 提出了规避管片破损能的相应回策。陈俊生等^[11-12]对管片拼装过程中的千斤顶推力、管片错台等对管片受力的影响进行了有限元分析, 明确了管片破损能的重点防治部位。廖少明等^[13]采用力学解析方法分析了管片拼装成环的整个过程, 得到了管片拼装对隧道衬砌结构内力的影响规律。徐前卫等^[14-15]通过盾构机模型试验, 研究了埋深、刀盘开口率等对千斤顶顶进推力的影响, 并对刀盘扭矩进行了系统分析, 得出了扭矩分量的计算方法。何川等^[16]在砂性地层中进行了地铁盾构施工全过程的受力特征的现场实测, 探讨了拼装方式对管片变形、内力分布等的影响。Molins 等^[17]、Arnau 等^[18]对大直径盾构隧道进行了原位加载试验和有限元分析, 得到了钢纤维混凝土管片在原位加载条件下的应力和变形规律。

由于超大直径隧道管片拼装过程中的管片内力监测难度大、成本高、影响盾构施工, 因此, 目前尚未有文献报道该类直径隧道管片拼装过程中的现场实测分析结果。本文结合钱江隧道工程, 选取典型地层埋设了全断面的试验环, 对盾构隧道管片拼装的全过程的受力特征进行了现场实测, 分析了分块管片拼装过程中的轴力、弯矩的变化规律, 以期为超大直径软土盾构隧道管片设计和盾构施工控制提供指导。

1 工程概况

钱江隧道选址位于杭州盐官以西 2.5 km 处, 隧道全长 4450 m, 过钱塘江段采用外径 15.43 m 的超大直径泥水平衡式盾构法施工, 盾构段长度 3245 m (以西线计), 是当前世界上最大直径的软土盾构法隧道工程之一。

钱江隧道盾构段采用圆形断面、单层衬砌的结构

形式。衬砌环外径 15.00 m, 内径 13.70 m, 管片厚度 0.65 m。衬砌环分块采用“9+1”(B1-B7、L1、L2、K)形式, 衬砌结构采用通用楔形环方式, 楔形量 40 mm, 环宽度 2.0 m, 环间错缝拼装, 环、块间均为斜螺栓连接, 如图 1 所示。管片混凝土强度等级为 C60, 抗渗等级为 P12。施工中, K 块采用半纵向插入方式 (先径向搭接 1.20 m, 后纵向插入)。

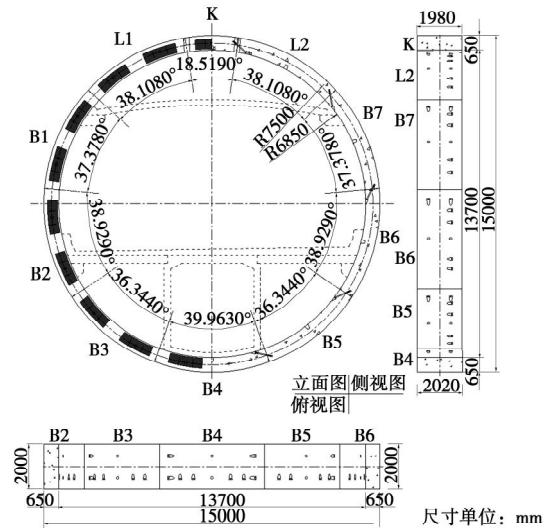


图 1 钱江隧道管片尺寸图

Fig. 1 Segment dimensions of Qianjiang tunnel

根据地勘报告, 盾构穿越段主要为透水性强的粉砂层和强度低、含水率高、灵敏度高的淤泥质黏土。江中以北以淤泥质黏土和粉质黏土为主, 江中以南以淤泥质黏土、粉土和粉砂层为主。钱江隧道沿线平、纵剖面如图 2 所示。隧道埋设位置处的土层分布及其物理力学指标如图 3 所示。

2 试验方案

试验环埋设位置为钱江隧道东线 618 环 (RK13+240 附近), 该位置上覆土层厚度 20.5 m (为江中深埋段), 平均水位高度 2.1 m。根据该区域内 JZ-III07-51 钻孔资料, 在勘探深度范围内, 自上而下土层分别为砂质粉土、粉砂、淤泥质粉质黏土和粉质黏土。刀盘切削土层为 4-2 粉质黏土和 5-3 粉质黏土, 如图 3 所示。

试验环按照拼装步 1~10 的顺序对称拼装, 测试元件布置如图 4 所示。试验环 K 块位于拱顶偏右 18.519°。试验环管片浇筑前, 沿管片环向埋设了 36 个振弦式钢筋测力计, 测力计埋设部位分为两类: ① 布置于每块管片的中轴线位置、密贴内外弧面 (第一类), 计 20 个, 测量拼装环已拼装管片受到新拼装管片的影响产生的受力状态的变化; ② 布置于 L1、L2 块分别与 K 块的邻接面, 沿管片宽度方向、等距、密

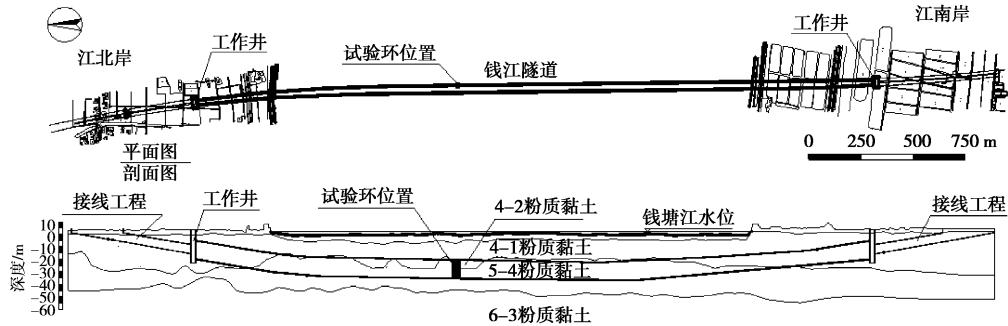


图 2 钱江隧道平纵剖面图

Fig. 2 Plane and longitudinal sections of Qianjiang tunnel

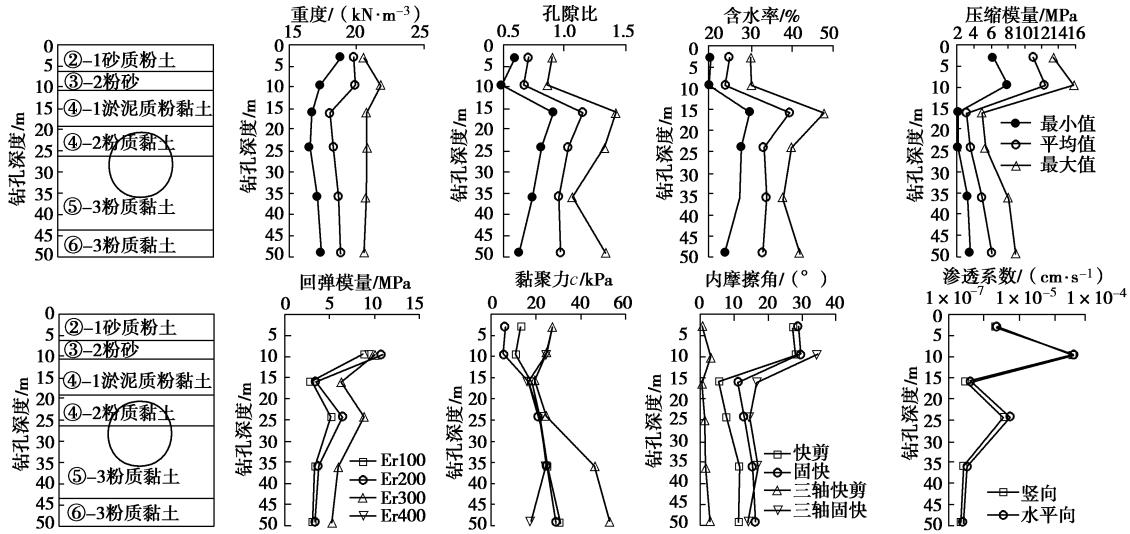


图 3 土体分层及岩土参数变化曲线

Fig. 3 Soil strata and variation of geotechnical parameters

贴内外弧面和邻接面(第二类),每侧4个,计16个,测量K块挤入时引起的邻接块等管片的受力状态的变化。测力计与钢筋笼的环向主筋采用并联方式连接,其在钢筋笼中的典型部位如图5所示。

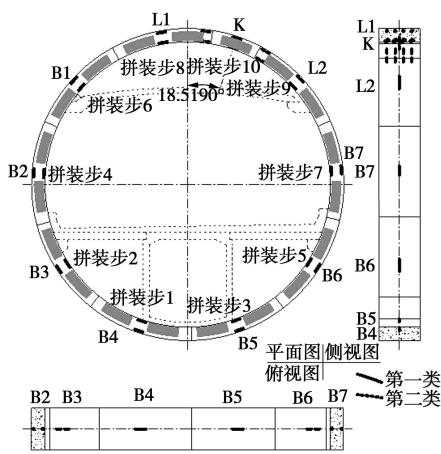


图 4 测试元件布置图

Fig. 4 Arrangement plan of embedded testing cells

本试验除对每块管片拼装后引起的内力变化进行

现场实测之外,还对特殊工况(如盾构机停机、拼装成环后等)及拼装成2 h后的管片内力进行了现场实测。在管片拼装阶段,每块管片拼装后均对已拼装的所有测试环管片进行1次人工采集数据。待拼装成环后采用DT80G智能数据采集模块进行自动采集,采集频率5 min/次。

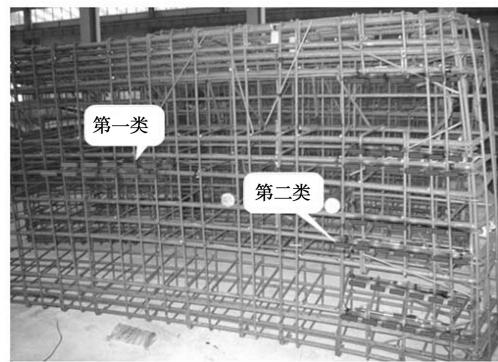


图 5 测试元件分布典型部位

Fig. 5 Typical position of testing cells in segments

3 实测结果分析

3.1 管片结构内力的理论分析

为便于理论与实测对比, 建立隧道在拼装阶段及使用阶段的有限元模型(如图6, 7所示), 对试验环在拼装阶段及正常使用阶段的管片结构内力进行有限元分析。计算分析中, 千斤顶推力考虑为管片拼装阶段衬砌结构承受的主要外部荷载, 该阶段总推力介于50000~80000 kN之间, 推力作用于千斤顶撑靴覆盖的区域(如图1中阴影所示), 推力分布考虑了各组千斤顶实际推力的大小并最终简化为梯形分布(顶部小底部大, 如图6), 此外, 承受水土压力和注浆压力等作用, 根据现场实测, 其荷载值介于300~500 kPa之间; 隧道转入正常使用阶段后, 由于千斤顶引起的隧道纵向轴力受到地层变形影响将逐步削弱, 因此考虑水土压力荷载为主要荷载, 模型顶部超载考虑了平均水位2.1 m的影响, 模型中计算参数取值详见图3。

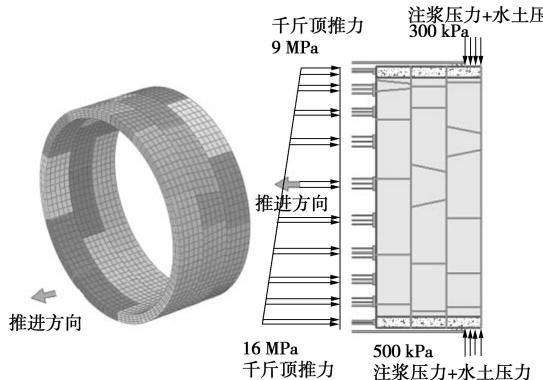


图6 拼装阶段有限元模型

Fig. 6 Numerical model of assembling process

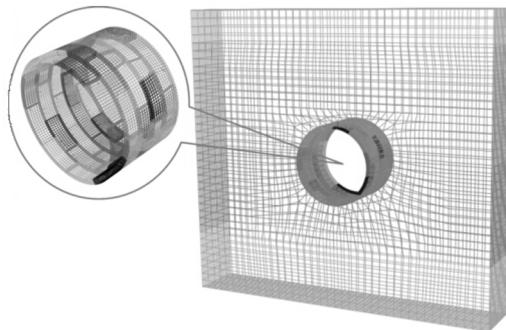


图7 使用阶段有限元模型

Fig. 7 Numerical model of service stage

管片结构在正常使用阶段承受的轴力和弯矩如图8, 9所示, 图中标注的数值点分别代表试验环监测点埋设部位的管片内力的计算值(轴力以管片受压为正, 受拉为负; 弯矩以管片内弧面受拉为正, 外弧面受拉

为负)。可见, 在正常使用阶段, 受水土压力荷载、接头位置、环间变形协调等因素的综合影响, 管片结构的轴力沿隧道断面的竖向轴线近似对称, 腰部轴力最大, 拱底次之, 拱顶最小, 轴力基本处于6000~11000 kN之间。与正常使用阶段管片结构承受的轴力类似, 弯矩沿隧道断面的竖向轴线近似对称, 弯矩值介于-1350~1300 kN·m之间, 腰部最大, 拱顶、拱底次之, 两肩最小。

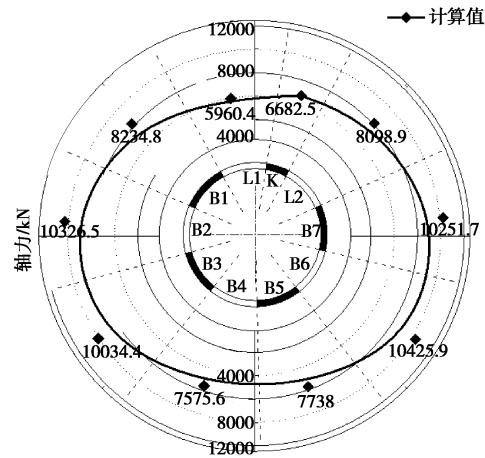


图8 正常使用阶段轴力计算图

Fig. 8 Calculated results of distribution of axial force during service stage

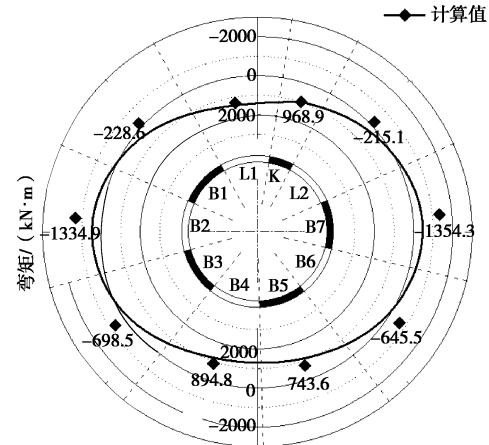


图9 正常使用阶段弯矩计算图

Fig. 9 Calculated results of distribution of bending moment during service stage

3.2 管片拼装过程的轴力实测分析

管片拼装过程中, 先拼装的管片在自身重力、千斤顶推力、螺栓预紧力和环面、块间摩擦力等共同作用下处于暂时稳定状态, 其相对位置和相互接触关系受到后续新拼装管片的挤压、千斤顶推力动态微调等扰动作用后发生动态调整, 该过程始终伴随着管片结构轴力的不断调整。管片拼装过程中实测轴力的变化

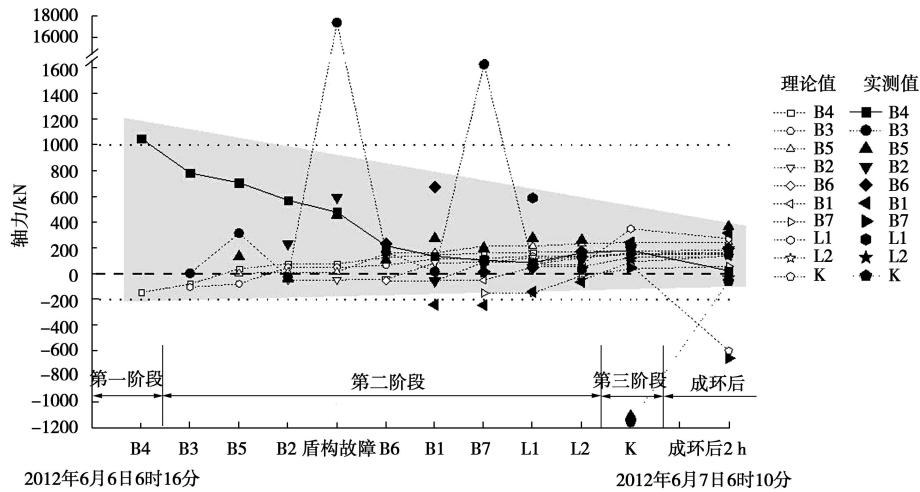


图 10 拼装过程轴力变化曲线

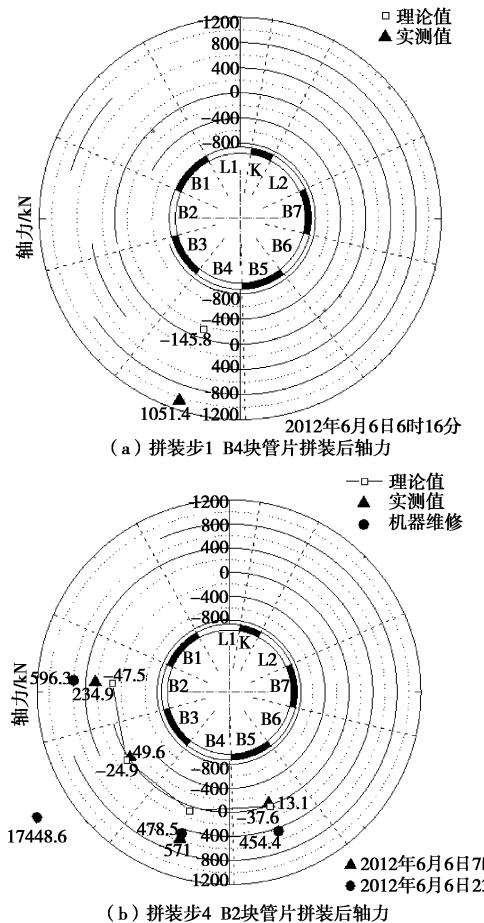
Fig. 10 Variation of axial force during assembly

曲线如图 10 所示。

由图可见，大部分管片在拼装阶段的实测轴力处于 $-200\sim1000$ kN 之间。在管片拼装后的初始阶段，各管片的实测轴力值往往大于理论值 ($-200\sim300$ kN)，个别点达到理论值的 10 倍以上，但仍小于正常使用阶段的轴力。值得注意的是，随着后续拼装步的进行，各监测点实测轴力与理论轴力的差异逐渐减小，逐渐逼近理论值，如图 10 中梯形阴影所示。

事实上，每个拼装步中管片两端（纵缝）的约束条件或接触条件在变化，即，无邻接块约束（第一阶段、拼装步 1）、单侧受邻接块约束（第二阶段、拼装步 2~9）和两端受邻接块约束（第三阶段、拼装步 10）^[19]。这种边界条件的变化是导致拼装阶段管片轴力显著变化的根源之一。轴力变化突出表现在：①第一阶段、第二阶段的管片轴力由拉力逐步过渡到压力，且渐进性增大。个别监测点实测轴力出现了明显波动，甚至呈跳跃性增长，如图 10 中 B4 块管片实测轴力先减小后增大、B3 块管片实测轴力跳跃增大；②第一阶段、第二阶段的管片受到千斤顶推力作用出现侧涨现象，监测点部位将承受拉力作用^[20~21]。但大多监测点实测轴力并非受拉，甚至初始拼装后即承受压力作用，如 B4 块管片 (1051.4 kN, 图 11 (a))、L1 块管片 (589.9 kN) 等；③管片拼装期间的轴力变化曲线存在个别突变点（如图 11 (b)、(c) 中 B3 管片），而在随后的管片拼装中又较快降至正常状态；④第三阶段的管片拼装受到 L1 和 L2 块邻接块的位移约束，L1、L2、B1 和 B7 块管片的轴力明显增大，而其他管片（K 块除外）的轴力略微增长。如图 11 (d)、(e) 实测值表明，L1 块轴力增大 4.9 倍；⑤第三阶段管片拼装成环后，K 块承受的千斤顶作用由位移控制模式转变为推力控制模式，千斤顶推力降低导致 K 块、B5 块管

片承受的拉力作用减弱，如图 11 (f) 所示。值得注意的是，受到拼装误差、施工操作等因素的影响，个别管片在拼装后所处的相对位置与理论位置存在一定的偏离，导致实测轴力值与理论值存在较大偏差，但受到后续拼装管片的影响其相对位置发生调整并逐渐逼近理论位置，使得实测值总体变化趋势和实测值的最终状态均与理论值极为接近。其中的个别突变点，可推测为管片相邻接触条件达到某种临界状态所发生的突变导致。



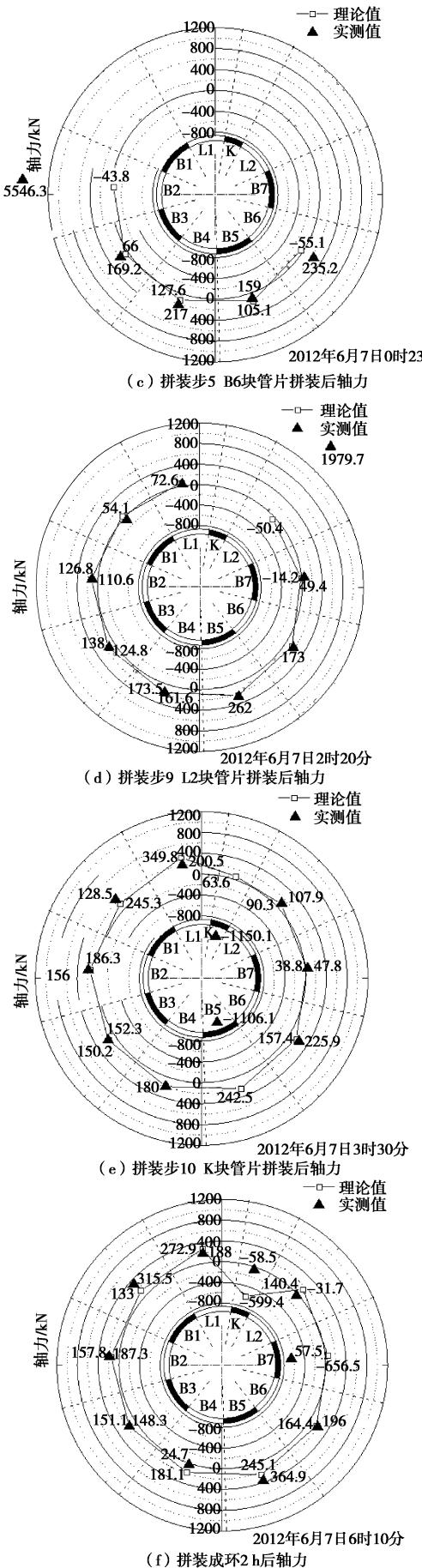


图 11 管片拼装过程轴力

Fig. 11 Axial forces during assembly

由于每个拼装步管片结构的相对位置调整的方式和调整幅度存在差异, 以及管片间接触条件的变化, 导致管片实测轴力值经历了平稳变化、明显波动、甚至急剧跳跃后逐渐逼近理论轴力。特别是, 本工程实测轴力值存在一个异常突变, 即盾构机维修后 B3 块管片轴力值达到正常使用阶段的 1.74 倍, 该工况是管片结构实测轴力的一个极端情况, 极易造成管片开裂破损, 由盾构机维修期间局部的千斤顶推力变动等因素引起, 在今后类似的超大直径软土盾构隧道管片结构设计中应注重局部配加强筋、盾构施工控制中应加强监控。

3.3 管片拼装过程的弯矩实测分析

管片结构承受的弯矩的变化曲线如图 12 所示。可见, 管片拼装阶段监测点的实测弯矩值约 86% 介于 $-200\sim80 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 之间, 该弯矩值小于对应点在正常使用阶段管片弯矩的 28%, 但是, 各分块管片在拼装后的初始阶段承受的弯矩值一般偏离理论值 ($-5\sim13 \text{ kN}\cdot\text{m}$), 最大偏离达到 28 倍 (B7 块管片拼装)。随着后续管片的拼装, 各监测点实测弯矩值与理论值差异逐渐减小, 实测值逐渐逼近理论值, 如图 12 中梯形阴影所示。管片拼装阶段实测弯矩的上述变化特征表明, 随着拼装步的变化, 已拼装管片的相对位置调整使纵缝接触面初始张开角度逐渐闭合。

与拼装过程中轴力变化类似, 管片结构承受的弯矩随拼装步变化明显, 表现为: ① 第一阶段、第二阶段的各分块管片在拼装后的实测初始弯矩值大多为负值, 且经历波动或跳跃性变化后, 最终逼近理论值, 如图 12 中 B4 管片、B3 管片; ② 管片拼装期间的实测弯矩的变化曲线存在个别突变点 (如图 13 (a)、(b) 中 B3 块管片), 而在随后的管片拼装中又较快调整至正常状态, 但拼装阶段管片结构承受的弯矩总体上远小于正常使用阶段; ③ 受对称拼装的影响, 第二阶段的管片拼装后的弯矩在下一拼装步中基本保持不变, 在同侧的邻接块拼装后发生跳跃性变化, 之后变化趋势放缓。如图 13 (a)~(c) 中 B2 管片弯矩变化; ④ 第三阶段管片拼装中, 由于 L1、L2 块管片受到的约束进一步加强, L1 块管片弯矩变化明显, 其余管片 (K 块除外) 的弯矩变化较为平缓, 如图 13 (d)、(e) 所示; ⑤ 第三阶段管片拼装成环后, K 块承受的千斤顶作用由位移控制模式转变为推力控制模式, 千斤顶推力降低导致 K 块、L1 和 L2 邻接块及 B7 块等管片的弯矩发生较明显变化, 其余管片弯矩变化极小, 如图 13 (e)、(f) 所示。总体而言, 尽管管片拼装过程中个别实测弯矩值与理论值存在较大偏差, 但实测值变化趋

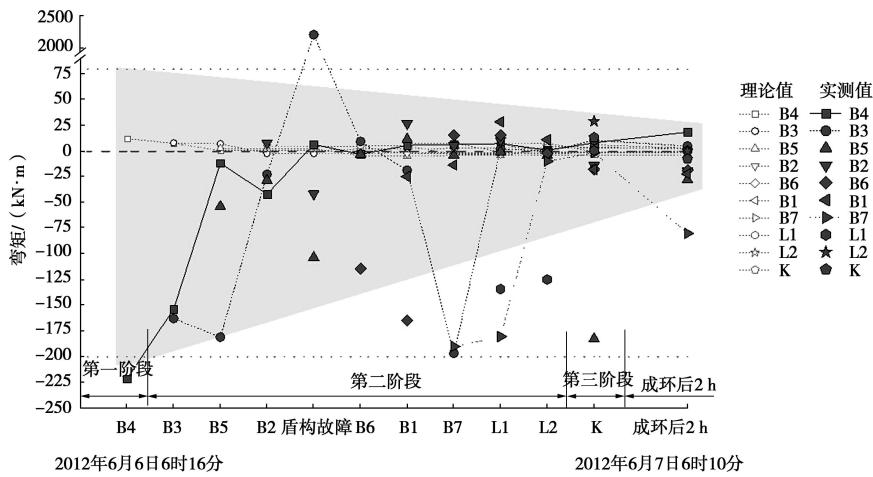


图 12 拼装过程弯矩变化曲线

Fig. 12 Variation of bending moment during assembly

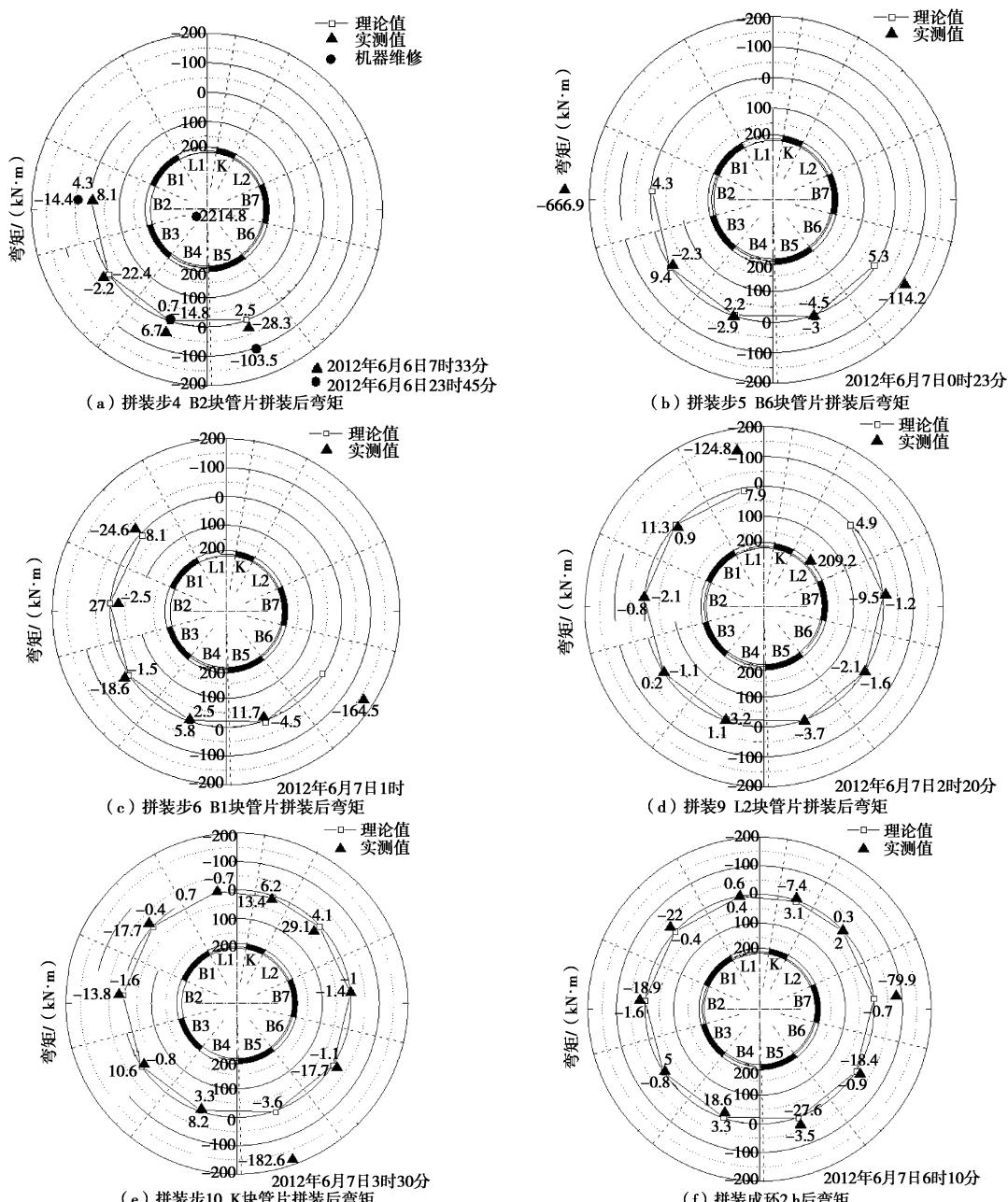


图 13 管片拼装过程弯矩

Fig. 13 Bending moments during assembly

势和最终实测值均与理论值极为接近。

综上所述, 管片结构实测弯矩值经历了平稳变化、波动或急剧跳跃后逐渐逼近理论值表明, 管片结构的相对位置逐渐调整并最终趋于新的平衡状态。实测弯矩值的个别突变随着后续拼装步较快趋于理论值, 但该过程中出现的局部应力过高可能导致管片内部损伤进而影响管片结构的耐久性和长期承载性能。

4 结 论

本文结合钱江隧道工程, 对软土地区超大直径盾构隧道管片拼装的全过程进行了现场实测, 分析了分块管片拼装过程中的轴力、弯矩的变化规律, 可得到以下4点主要结论。

(1) 管片结构实测内力经历了平稳变化、波动或急剧跳跃后逐渐逼近理论值。这一变化表明, 管片拼装过程中各管片的相对位置和相互接触关系的动态调整对隧道的受力、变形行为影响显著。

(2) 一般情况下, 管片拼装阶段的实测内力小于正常使用阶段管片受力的30%, 但明显高于拼装阶段管片内力的理论值, 甚至达到理论值的10倍以上。管片拼装后的初始阶段的实测内力值与拼装阶段的理论值可能存在较大的偏差, 但随着后续拼装步的变化, 实测值逐渐逼近理论值。

(3) 管片拼装阶段的实测内力的变化曲线存在个别异常的突变, 突变值甚至达到正常使用阶段理论内力的3倍以上, 突变后管片内力又调整至正常状态, 该过程可能对管片结构的耐久性和长期承载性能产生影响。

(4) 限于文中篇幅, K块挤入引起的拼装环既有管片力学响应、拼装成环后隧道结构长期的力学响应、管片受力和施工行为之间的关联性等将在另文给出, 在此不再赘述。

参考文献:

- [1] LIAO S M, FAN Y Y, SHI Z H, et al. Optimization study on the reconstruction and expansion of an underground rail transit center in Shanghai soft ground[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, **38**: 435 – 446.
- [2] LIAO S M, PENG F L, SHEN S L. Analysis of shearing effect on tunnel induced by load transfer along longitudinal direction[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2008, **23**(4): 421 – 430.
- [3] LIAO S M, LIU J H, WANG R L, LI Z M. Shield tunneling and environment protection in Shanghai soft ground[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2009, **24**: 454 – 465.
- [4] SUGIMOTO M, ARAMON A. Theoretical model of shield behavior during excavation. I: Theory[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2002, **128**(2): 138 – 155.
- [5] SRAMON A, SUGIMOTO M, KAYUKAWA K. Theoretical model of shield behavior during excavation. II: Application[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2002, **128**(2): 156 – 165.
- [6] 吴鸣泉. 钢纤维混凝土盾构管片在地铁隧道工程的应用研究[J]. 广东建材, 2004(3): 6 – 8. (WU Ming-quan. The study on steel fiber reinforced concrete segment used in subway tunnels[J]. Guangdong Construction Material, 2004(3): 6 – 8. (in Chinese))
- [7] Working Group No.2, International Tunnelling Association. Guidelines for the design of shield tunnel lining[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2000, **15**(3): 303 – 331.
- [8] BLOM C B M, van der Horst E J, JOVANOVIC P S. Three-dimensional structural analyses of the shield-driven “Green Heart” tunnel of the high-speed line south[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1999, **14**(2): 217 – 224.
- [9] BLOM C B M. Design philosophy of concrete linings for tunnels in soft soils[D]. Delft: Delft University of Technology, 2002.
- [10] SUGIMOTO M. Causes of shield segment damages during construction[C]// International Symposium on Underground Excavation and Tunnelling. Thailand, 2006: 67 – 74.
- [11] MO H H, CHEN J S. Study on inner force and dislocation of segments caused by shield machine attitude[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2008, **23**: 281 – 291.
- [12] CHEN J S, MO H H. Numerical study on crack problems in segments of shield tunnel using finite element method[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2009, **24**: 91 – 102.
- [13] 廖少明, 徐进, 焦齐柱. 盾构法隧道管片拼装过程中的衬砌内力解析[J]. 土木工程学报, 2013, **46**(3): 127 – 135. (LIAO Shao-ming, XU Jin, JIAO Qi-zhu. Mechanical behaviors of tunnel lining during segment assembly[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(3): 127 – 135. (in Chinese))

- Chinese))
- [14] 徐前卫, 朱合华, 廖少明, 等. 均匀软质地层条件下土压平衡盾构施工的合理顶进推力分析[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(1): 79 – 85. (XU Qian-wei, ZHU He-hua, LIAO Shao-ming, et al. Analysis of reasonable thrust force during tunnel excavation in homogeneous soft ground by use of earth pressure balance shield machine[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(1): 79 – 85. (in Chinese))
- [15] 徐前卫, 朱合华, 丁文其, 等. 均质地层中土压平衡盾构施工刀盘切削扭矩分析[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(1): 47 – 54. (XU Qian-wei, ZHU He-hua, DING Wen-qi, et al. Cutting torque during tunneling process of earth pressure balance shield machine in homogeneous ground[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(1): 47 – 54. (in Chinese))
- [16] 何川, 曾东洋. 砂性地层中地铁盾构隧道管片结构受力特征研究[J]. 岩土力学, 2007, **28**(5): 909 – 914. (HE Chuan, ZENG Dong-yang. Research on mechanical characteristics of metro shield tunnel segment in sandy strata[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(5): 909 – 914. (in Chinese))
- [17] MOLINS C, ARNAU O. Experimental and analytical study of the structural response of segmental tunnel linings based on an in situ loading test. Part 1: test configuration and execution[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2011, **26**(6): 764 – 777.
- [18] ARNAU O, MOLINS C. Experimental and analytical study of the structural response of segmental tunnel linings based on an in situ loading test. Part 2: numerical simulation[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2011, **26**(6): 778 – 788.
- [19] 徐进. 盾构隧道管片拼装力学机理分析[D]. 上海: 同济大学, 2013. (XU Jin. Mechanical behaviors of tunnel lining induced by segments assembly[D]. Shanghai: Tongji University, 2013. (in Chinese))
- [20] 宋克志, 袁大军, 王梦恕. 盾构法隧道施工阶段管片的力学分析[J]. 岩土力学, 2008, **29**(3): 619 – 623. (SONG Ke-zhi, YUAN Da-jun, WANG Meng-shu. Segmental mechanical analysis of shield tunnel during construction stage[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(3): 619 – 623. (in Chinese))
- [21] 周济民, 何川, 方勇, 等. 黄土地层盾构隧道受力监测与荷载作用模式的反演分析[J]. 岩土力学, 2011, **32**(1): 165 – 171. (ZHOU Ji-min, HE Chuan, FANG Yong, et al. Mechanical property testing and back analysis of load models of metro shield tunnel lining in loess strata[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(1): 165 – 171. (in Chinese))