

大连湾海底沉管隧道施工中管节 变形规律监测分析

孙竹^{1,4}, 刘成洲^{1,2,3,4}, 于健^{1,2,3,4}, 孙文豪^{1,2,4}, 刘钊^{1,2,4}

(1. 中交第一航务工程局有限公司, 天津 300461; 2. 中交天津港湾工程研究院有限公司, 天津 300222; 3. 港口岩土工程技术交通行业重点实验室, 天津 300222; 4. 天津市水下隧道建设及运维技术企业重点实验室, 天津 300461)

摘要: 沉管管节间及节段间张合量、沉降变形是沉管隧道工程结构安全的重要指标。以大连湾海底沉管隧道为依托, 通过分析水文环境、上覆荷载变化、特殊施工工艺等条件与沉管管节间张合量、沉降量变形的相关性, 得到沉管沉降在不同荷载条件的变化规律, 管节间及节段间张合量与管内温度呈负相关, 钢绞线剪切后一段时间内沉管沉降变形明显增大。为后续管节安装及调整提供可靠依据, 确保施工安全, 指导后续设计和施工。

关键词: 沉管隧道; 施工监测; 沉降量; 张合量; 变形规律

中图分类号: U655.4 文献标志码: A 文章编号: 2095-7874(2024)04-0073-05

doi: 10.7640/zggwjs202404016

Monitoring and analysis of deformation laws of tube elements during the construction of Dalian Bay immersed tunnel

SUN Zhu^{1,4}, LIU Cheng-zhou^{1,2,3,4}, YU Jian^{1,2,3,4}, SUN Wen-hao^{1,2,4}, LIU Zhao^{1,2,4}

(1. CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Tianjin 300461, China; 2. Tianjin Port Engineering Institute Ltd. of CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Tianjin 300222, China; 3. Key Laboratory of Port Geotechnical Engineering of the Ministry of Communications, Tianjin 300222, China; 4. Tianjin Key Laboratory of Construction, Operation and Maintenance Technologies for Underwater Tunnels, Tianjin 300461, China)

Abstract: The tension and settlement deformation between immersed tube segments and sections are important indicators for structural safety of immersed tunnel project. Based on the Dalian Bay immersed tunnel, by analyzing the correlation between the hydrological environment, overlying load changes, special construction techniques, and the deformation of the tension and settlement of immersed tube elements, the variation law of immersed tube settlement under different load conditions was obtained. The tension between the tube segments and sections is negatively correlated with the temperature inside the tube, and the settlement deformation of immersed tube significantly increases after the steel strand is sheared for a period of time. It can provide a reliable basis for the subsequent installation and adjustment of the tube elements to ensure construction safety and guide subsequent design and construction.

Key words: immersed tunnel; construction monitoring; settlement; tension; deformation law

0 引言

目前世界上已建、在建的沉管隧道已达到200余座, 我国在20世纪80年代开始沉管隧道

研究^[1]。随着国内沉管建设越来越多, 诸多学者针对管节施工监测研究较多。Xiang-chun Xu等^[2]利用南昌红谷沉管隧道运营期监测数据验证其提出

收稿日期: 2023-11-10 修回日期: 2024-02-05

基金项目: 2020年度交通运输行业重点科技项目(2020-MS1-064)

作者简介: 孙竹(1987—), 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 高级工程师, 港口航道与海岸工程专业。E-mail: 38139458@qq.com

的模糊层次分析法隧道健康评估模型，并给出评价方法及评价标准；裘慧杰^[9]研究了沉管隧道施工期沉降规律和施工影响，总结不同条件下基础层压缩特性，提出导致沉降的因素，并为控制沉降提出建议；王勇^[4]、胥新伟等^[5]、成益品等^[6]以港珠澳大桥沉管隧道监测为例，分析不同阶段的监测数据，揭示沉降位移变形误差发展规律。大连湾海底沉管隧道是国内首个岩石地基上的柔性沉管隧道，在管内荷载、外部潮位、预应力钢绞线剪断施工等条件下，管节沉降、管节间及节段间张合量等均会发生变化，本文对上述条件下的沉管沉降、管节间及节段间的张合量等进行了分析总结，可为类似沉管隧道工程提供参考和借鉴。

1 工程概况

大连湾海底沉管隧道长 3 035 m，由 1 节 135 m 直线管节，12 节 180 m 直线管节和 5 节 148 m 曲线管节组成。隧道管节结构采用节段式构造。其中，E1—E13 管节平面位于直线上，E1 管节长 135 m，分为 6 个节段，节段长 22.5 m；E2—E13 管节长均为 180 m，各分为 8 个节段，节段长度 22.5 m；E14 管节位于平面直线和曲线的交汇处，E15—E18 管节平面均位于曲线上，长均为 148 m，

各分为 7 个节段，节段长度为 21.0 m、21.5 m。

本文重点介绍沉管的沉降、管节间张合量、节段间张合量、管内环境温度等方面监测内容，并对不同荷载情况下管节沉降规律、张合量(管节间、节段间)随温度的变化规律、管节间张合量随潮位变化规律、预应力钢绞线剪切施工对节段间张合量的影响等方面进行分析研究。

2 监测内容

2.1 沉降监测

管节沉降是评估沉管结构和基础稳定性的关键参数，同时也是影响沉管施工安全性的直接因素。其对荷载变化表现出高度敏感性，而在沉管隧道施工阶段，荷载变化主要来自管节两侧锁定回填及一般回填、管节上覆护面层回填、压仓混凝土浇筑、二层压仓混凝土浇筑等施工。

管节沉降采用水准测量的方法，监测精度为国家二等水准。在每个节段内，共布置了 4 个沉降监测点，用于监测管节的不均匀沉降以及各个节段和管节接头处的沉降差异。初期由于压载水箱的影响，临时沉降监测点被布置于中管廊，待水箱拆除后，监测点将会被移至左右行车廊道内，如图 1 所示。

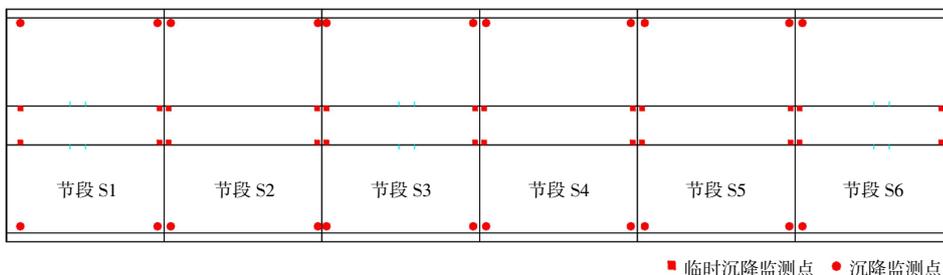


图 1 沉降监测点平面布置图

Fig. 1 Layout of settlement monitoring points

2.2 管节/节段间张合量

管节位移监测旨在直接测量管节相对位置，评估其在水平面上的线形情况，以便为下一管节

安装提供准确的测量依据。通过埋设在接头顶端，左右行车廊道侧墙的位移计进行监测，测点位置见图 2。

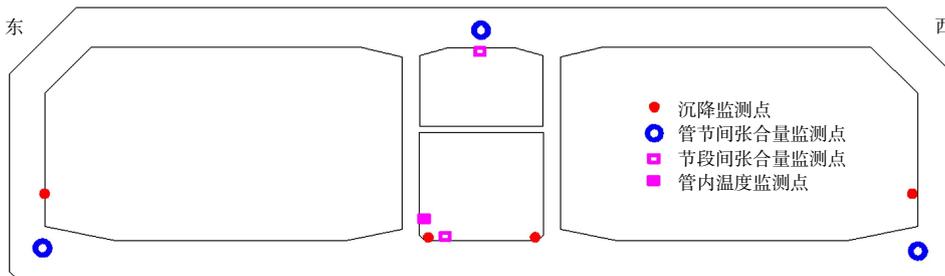


图 2 各监测点断面布置图

Fig. 2 Section layout of each monitoring point

节段间张合量是评估节段间锁定质量的主要指标。节段间张合量受到多个因素的影响,其中包括管节的线形和环境因素。由于管节受到荷载的作用,可能会引起纵向线形的变化。因此,在管节的顶板和底板的接缝位置布设监测点,以便准确记录节段之间的锁定质量情况,测点位置如图2所示。

2.3 管内环境温度

管内混凝土结构受温度影响会发生收缩或膨胀的微量变形,对管节间及节段间张合量均会产生影响,温度监测点位置见图2。

3 沉降监测数据分析

3.1 不同荷载条件下沉降数据分析

沉管管节沉降主要由自重荷载、沉管侧方及上覆荷载等引起,其中自重荷载包括管节自重、压仓水、压仓混凝土浇筑、二层混凝土浇筑等;沉管侧方荷载主要来源于沉管锁定回填、水中暗流等;上覆荷载主要来源于沉管一般回填、护面层回填、水压等。

上述荷载中,影响沉降变化较大的可变荷载为锁定回填及一般回填、护面层回填、压仓混凝土浇筑、二层混凝土浇筑。E1—E18管节,最大累计沉降量为-58.97~-31.59 mm,平均累计沉降

量在-47.23~-25.88 mm,具体统计情况见表1。

表1 管节累计沉降统计表

Table 1 Cumulative settlement statistics for pipe elements

管节编号	最大累计沉降/mm	平均累计沉降/mm	管节编号	最大累计沉降/mm	平均累计沉降/mm
E1	-52.32	-44.86	E10	-37.82	-29.77
E2	-56.48	-47.23	E11	-41.83	-29.94
E3	-58.97	-36.82	E12	-36.46	-31.64
E4	-52.04	-43.44	E13	-45.68	-37.37
E5	-45.84	-33.83	E14	-48.92	-42.18
E6	-52.11	-35.23	E15	-34.40	-30.71
E7	-38.95	-30.72	E16	-39.01	-37.16
E8	-36.29	-25.88	E17	-31.59	-29.27
E9	-42.17	-31.68	E18	-37.48	-32.04

以E2管节沉降变形为例,受可变荷载影响沉降变化如图3所示。其中,无外部荷载作用下,沉管沉降变化量较小;护面层回填对E2管节沉降影响较大,导致E2管节沉降约17 mm;综合其他管节沉降数据分析,锁定回填及一般回填施工后(7.3 kPa),沉管沉降约为15 mm;护面层回填施工后(15.0 kPa),沉管沉降约为16 mm^[2]。由此可见,管节沉降同荷载变化呈正相关,荷载变化越大,沉降变形越明显。

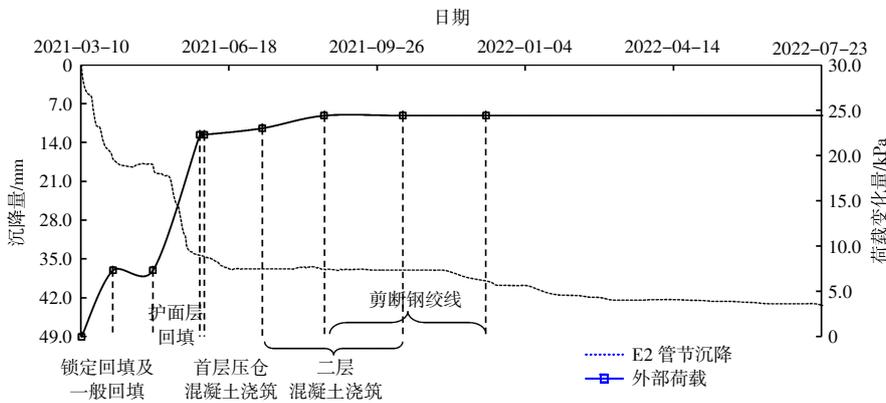


图3 同一时间维度下可变荷载与沉降量变化曲线图

Fig. 3 Variable load versus settlement curves in the same time dimension

3.2 预应力钢绞线剪断对管节沉降的影响

沉管预制后通过钢绞线将多个节段压缩形成统一的整体,便于整节沉管的运输和安装。由于管节安装后采用先铺法地基处理工艺,为了适应地基起伏及不同地基间的变形不一致的情况,同时考虑到沉管过长受温度影响较大,需要对各节段间的钢绞线进行切割,实现沉管柔性状态,更加适应不同地基及地形变化,并减小了温度对整

体管节热胀冷缩的影响。

钢绞线剪切大致分为2个阶段:1)中管廊各节段钢绞线剪切;2)左右行车廊道钢绞线剪切。以E2管节为例(见图4),选取第1、2、5、6节段累计沉降数据分析钢绞线剪切对管节沉降的影响。综合其它管节的钢绞线剪切过程可知,钢绞线剪断之前管节沉降趋于稳定,钢绞线全部剪断完毕后开始缓慢沉降了4 mm,持续45 d左右。

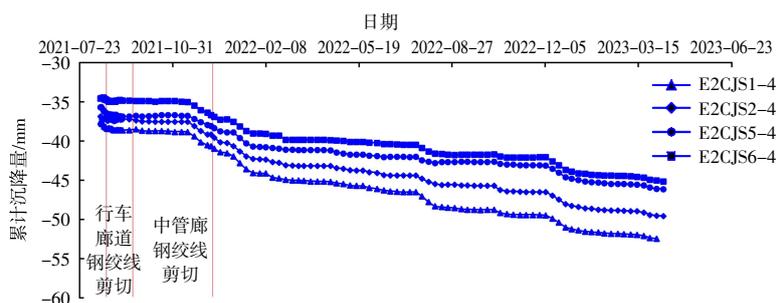


图4 钢绞线施工过程累计沉降随时间变化曲线

Fig. 4 Curves of cumulative settlement with time during construction of steel stranded wire

4 张合量监测数据分析

4.1 潮位变化对管节间张合量的影响

在沉管安装后至锁定回填间隙，新安装管节主要靠管节及压仓水自重固定，极易受到外部荷载影响，此时，管节间张合量主要影响因素为潮位变化。在此阶段需重点关注已安装管节与新安

装管节之间张合量变形情况，预防管节脱离风险。以 E6 与 E5 之间的张合量为例，张合量与潮位变化曲线见图 5，最大潮差 3.45 m，张合量变化 -0.38 mm。潮位高度与管节间张合量呈负相关性，当海水潮位升高后，临海侧管节轴线压力增大，致使张合量压缩。

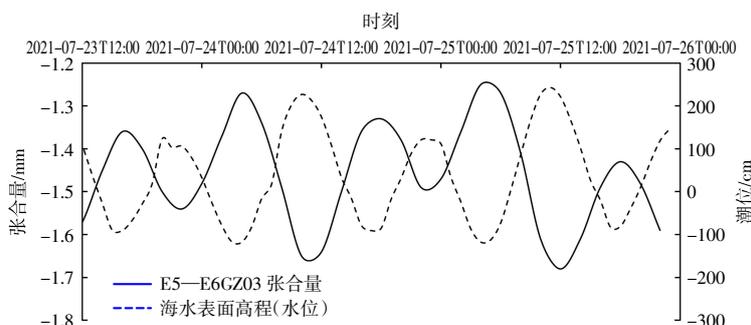


图5 同一时间维度下张合量与潮位变化曲线

Fig. 5 Curves of tension versus tide level variation in the same time dimension

4.2 温度变化对张合量的影响

沉管由多节混凝土节段组成，当温度变化时，表现出混凝土热胀冷缩特性，在节段间及管节间产生膨胀或伸缩，这种特性会使管节间及节段间张合量随温度变化有明显的规律变化。在钢绞线剪切后，管节结构转为柔性，节段间张合量随温度的变化也表现出不同特性。

以 E1 管节节段 1 与节段 2 间的节段间张合量

为例(图 6)，节段间张合量与温度呈现负相关性，温度升高，节段间张合量收缩。通过选取荷载恒定期的张合量数据与温度之间的相关性分析，管节钢绞线剪切前温度变幅 22.8℃，节段间张合量变位为 0.14 mm；钢绞线剪切后温度变幅 23.0℃，节段间张合量变位为 0.86 mm。由此可见钢绞线剪切后节段间张合量随温度变化较剪切前更为明显。

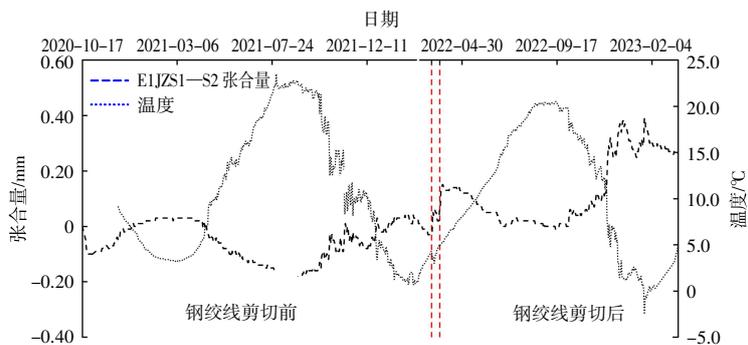


图6 节段间张合量与温度变化曲线

Fig. 6 Curves of the tension between tube sections versus temperature variation

以 E5 与 E6 管节间张合量为例,张合量与温度变化曲线如图 7 所示,管节间张合量与温度也呈现负相关性,随温度升高,管节间张合量收缩。通过选定 E5 和 E6 恒载期的节段间张合量与温

度变化的相关性分析,钢绞线剪切前温度变幅 17.2℃,管节间张合量变位约为 20.39 mm;钢绞线剪切后温度变幅 17.0℃,管节间张合量变位为 9.03 mm。

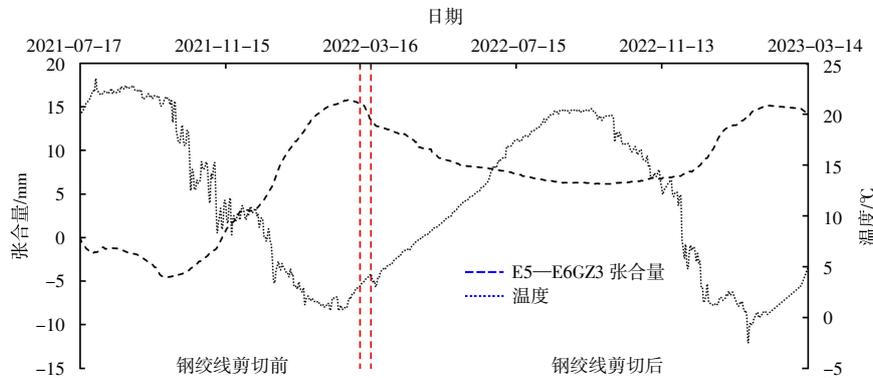


图 7 管节间张合量与温度变化曲线

Fig. 7 Curves of the tension between tube segments versus temperature variation

5 结语

大连湾海底隧道监测过程中,各种监测数据之间存在相关性。本文通过对不同荷载下管节沉降变化、外部环境对管节间张合量的影响及特殊施工情况下管节沉降变化 3 个方面进行监测数据分析,得到以下结论:

1) 沉管管节的沉降和荷载变化呈正相关,荷载变化越大,沉降变形越显著。在无外部荷载作用下,沉管沉降基本不变。

2) 新安装管节的张合量受潮位变化的影响,潮位上升导致管节间张合量压缩,潮位下降张合量增加。

3) 不论是管节间还是节段间张合量与温度都是呈负相关的,温度上升张合量收缩,温度下降张合量增加。温度变幅较大时,张合量变化也较显著。其中,管节间除受相邻管节热胀冷缩影响,亦受到海水密度随温度的影响,受温度变化影响相较于节段间影响更为剧烈。另外,钢绞线剪切前后节段间张合量受温度影响明显增大,相反管节间张合量钢绞线剪切前后受温度影响减小。

4) 管节沉降趋于稳定时开始剪断钢绞线,剪断后管节结构转为柔性,管节在一段时间内发生缓慢沉降。

参考文献:

[1] 李哈汀,胥新伟,高潮,等.港珠澳大桥沉管隧道施工监测系统

[J].中国港湾建设,2015,35(7):49-52.

LI Ha-ting, XU Xin-wei, GAO Chao, et al. Construction monitoring system of immersed tunnel of Hongkong-Zhuhai-Macao Bridge [J]. China Harbour Engineering, 2015, 35(7): 49-52.

[2] XU Xiang-chun, TONG Li-yuan, LIU Song-yu, et al. Evaluation model for immersed tunnel health state: A case study of Honggu Tunnel, Jiangxi Province, China[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 90(7): 239-248.

[3] 裘慧杰.沉管隧道施工期沉降监测分析及基础层模型试验研究[D].杭州:浙江大学,2014.

QIU Hui-jie. Settlement monitoring analysis and test study of foundation layer model during immersed tube tunnel construction[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.

[4] 王勇.深埋长大沉管隧道沉降分析及控制措施研究[D].北京:北京交通大学,2018.

WANG Yong. Settlement analysis and settlement control treatment of large deep buried immerse tunnel[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.

[5] 胥新伟,张乃受,刘思国.大型跨海沉管隧道施工监测新技术[J].中国港湾建设,2020,40(6):59-64.

XU Xin-wei, ZHANG Nai-shou, LIU Si-guo. New construction monitoring technology for large-scale cross-sea immersed tube tunnel[J]. China Harbour Engineering, 2020, 40(6): 59-64.

[6] 成益品,董理科,韩战伟.影响超长沉管隧道变形监测精度的因素及解决对策[J].中国港湾建设,2023,43(1):57-60.

CHENG Yi-pin, DONG Li-ke, HAN Zhan-wei. Factors affecting deformation monitoring accuracy of ultra-long immersed tunnel and countermeasures[J]. China Harbour Engineering, 2023, 43(1): 57-60.