

DOI: 10.11779/CJGE201610013

# 深埋曲线钢顶管受力特性现场监测试验研究

张 鹏, 王翔宇, 曾 聰, 马保松\*

(中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 为了研究深埋曲线钢顶管施工过程中的力学特性, 依托拱北隧道曲线顶管管幕工程, 对曲线顶管管节轴向与环向应变进行了现场监测分析。实测数据结果表明, 管节应变随顶进距离增大而略微增加, 但基本保持在一定范围内。管节在顶进过程中应力曲线发生波动, 停止顶进后逐渐趋于平稳。管节轴向应力主要受顶进力影响, 而环向应力主要取决于管节外侧环向荷载, 曲线顶管管节弯曲内侧存在压应力集中。由于存在泊松效应, 大埋深条件下管节顶部和底部轴向应力受环向变形控制。随着与机头距离增加, 管节由轴向两侧受压逐渐转变为单侧受压, 受压区位于管节弯曲内侧, 应力集中更加显著。

**关键词:** 曲线钢顶管; 管幕; 受力特性; 现场监测

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2016)10-1842-07

作者简介: 张 鹏(1988-), 博士研究生, 主要从事非开挖和管道工程等领域的科研工作。E-mail: cugpengzhang@163.com。

## Site monitoring of mechanical characteristics of pipes during steel curved pipe jacking under large buried depth

ZHANG Peng, WANG Xiang-yu, ZENG Cong, MA Bao-song

(Faculty of Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China)

**Abstract:** In order to study the mechanical characteristics of pipes during steel curved pipe jacking under large buried depth, the axial strain and hoop strain of curved pipe jacking are monitored and analyzed through site tests, based on the curved pipe jacking roof of Gongbei tunnel. The results show that the strain of pipe slightly increases with the increase of jacking distance, and maintains a certain range. The stress curve of pipe fluctuates in the process of jacking, but gradually restores stability after jacking stoppage. The axial stress of pipe is mainly affected by the jacking force, and the hoop stress mainly depends on the ring load out of pipe. Pressure stress concentration is located inside the pipe jacking curve. Under large buried depth, the axial stresses of pipe top and bottom are controlled by the circumference deformation because of Poisson effect. With the increasing distance between the pipe and the jacking machine head, the mechanical characteristics of pipe change from axial compression at both sides to one-side compression. The compression occurs inside the pipe bending with more obvious stress concentration.

**Key words:** steel curved pipe jacking; pipe roof; mechanical characteristic; site monitoring

## 0 引言

近年来随着中国城市化进程加快, 地下供排水管道等基础设施建设也随之剧增。顶管法以非开挖的技术优势成为城市地下工程施工的关键技术之一。特别是中国自主开发钢顶管技术, 以其强度高、承内压高、重量轻、密封性好等特点, 在给水排水管道建设得到广泛应用, 并伴随管幕法的出现, 被扩展应用到地下支护结构的施工中。在此基础上进一步创新形成的曲线钢顶管技术, 也被应用于中国首条曲线顶管管幕隧道建设。

然而, 在顶管施工过程中, 管节处于复杂多变的力系中, 其同时受到沿管节轴向顶力、顶管机头迎面

阻力、周围水土压力、润滑注浆压力、管土摩阻力、自重以及可能存在的地表交通荷载等。加之, 顶进力是一种循环荷载, 管节在整个过程中处于不停地加载和卸载。特别是曲线顶进力实际以偏心荷载的方式作用于管节上。而且, 钢顶管相比于普通钢筋混凝土顶管, 管节属于薄壁结构, 变形性能好, 稳定性差, 更加剧其受力复杂性。因此, 掌握曲线钢顶管的实际受力特性对顶管以及顶管管幕的设计施工具有重要意义。

基金项目: 交通运输部项目(港珠澳大桥海连接线拱北隧道建设关键技术与应用研究-201331 J11300)

收稿日期: 2015-09-02

\*通讯作者(E-mail: mabaosong@163.com)

义。

目前, 国内外对于钢筋混凝土顶管和直线钢顶管受力特性采用理论分析、数值模拟和现场试验等方法进行了较为全面的研究。

(1) 理论分析: Rohner 等<sup>[1]</sup>、Haslem<sup>[2]</sup>对现有欧洲规范中顶管管节接头应力计算方法进行了分析, 总结出接头应力的影响因素为: 轨迹偏角、受压区宽度及管节长度等; CECS246—2008<sup>[3]</sup>中采用埋地管道结构力学和材料力学截面核理论, 求得管节横截面的环向和轴向应力, 认为偏心顶进力作用下, 应力沿顶推力偏移方向在截面内成线性变化; 陈建中<sup>[4]</sup>、金文航<sup>[5]</sup>均将截面核理论在曲线顶管中的应用做了详细探讨, 并推导出了不同张开状态下的轴向应力计算公式; 熊翦<sup>[6]</sup>将矩形管四边简化为受土压力作用的简支梁得出在矩形管环向应力公式, 赵志峰等<sup>[7]</sup>采用类似方法研究了圆形顶管环向应力解。

(2) 数值模拟: Zhou<sup>[8]</sup>通过有限元分析, 发现管线偏转会造成管道受拉和局部受压的现象; 薛振兴<sup>[9]</sup>采用 ANSYS 软件对钢筋混凝土管在直线和纠偏顶进状态下力学特性进行数值模拟, 分析顶进距离、埋深、管径、管材及纠偏角度对管节应力的影响规律; 陈楠<sup>[10]</sup>采用数值模拟研究了偏转角、顶力、接头和木垫片对承插口钢顶管管节接头应力的影响规律; 陈建中<sup>[4]</sup>采用 ABAUS 软件对偏转条件下玻璃纤维增强塑料管节接头进行受力分析。

(3) 现场试验监测: 牛津大学<sup>[11-12]</sup>对于钢筋混凝土顶管的管土接触压力和钢筋应力等数据进行了现场监测, 国内相关学者<sup>[13-14]</sup>对于同样的问题也开展了监测研究。潘同燕<sup>[15]</sup>对大口径急曲线钢筋混凝土顶管施工中的应力、接触压力和土体变形进行了现场试验研究, 得出曲线顶管受力规律。杨仙<sup>[16]</sup>对管幕预筑法中大直径直线钢顶管应力进行了监测分析, 结果表明管节基本处于受压状态。

综上所述, 目前对于直线和曲线钢筋混凝土顶管受力研究比较充分, 各学者研究成果规律基本一致, 对直线钢顶管受力特性仅进行了初步研究, 而对于埋深较大的曲线钢顶管受力规律还未开展。因此, 本文依托中国首条曲线顶管管幕隧道工程, 通过在钢管节上焊接应变计, 以得出大理深曲线顶管施工中管节轴向与环向应力应变的分布和变化规律。

## 1 工程概况

港珠澳大桥珠海连接线拱北隧道暗挖段采用曲线顶管管幕支护+冻结止水的双层暗挖方法下穿中国大陆路口岸——拱北口岸。如图 1 所示, 暗挖段隧道断面为卵形, 采用上下叠层结构, 全长为 255 m,

平面线形由 88 m 缓和曲线与 167 m 圆曲线组成; 管幕上部平均埋深为 4~5 m, 总体高度约为 23.8 m, 宽度约为 22.2 m, 开挖面积达到 344.8 m<sup>2</sup>。整个管幕由 36 根直径 1620 mm 钢管组成 (不包含 0 号异位试验顶管), 其中上层 17 根钢管壁厚 20 mm, 下层 19 根钢管壁厚 24 mm, 管间距 355~358 mm, 顶管管节采用 F 型接头连接。所有钢管通过东、西两个工作井实现双向顶进<sup>[17-19]</sup>。

本曲线顶管受力监测试验选择 17 号顶管, 其位于管幕底部, 中心埋深约 27~28 m, 管节壁厚 24 mm, 单根长度 4 m, 主要穿越砂质黏性土, 局部出现砾砂层, 是典型的深埋曲线顶管。

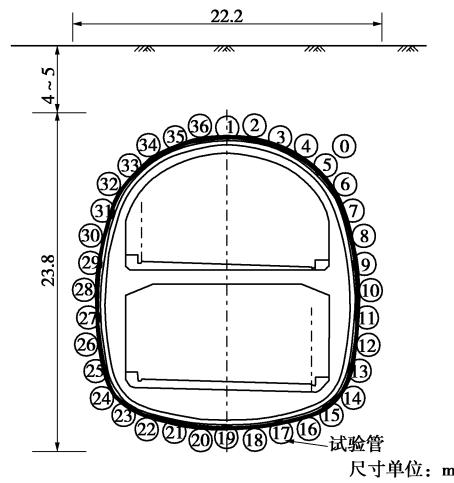


图 1 曲线管幕横断面图

Fig. 1 Cross-section of curved pipe roof

## 2 测试内容

### 2.1 监测仪器

管节应变监测采用 VS100 型振弦式应变计 (如图 2), 量程为  $-2000 \mu\epsilon \sim 2000 \mu\epsilon$ , 精度为  $1 \mu\epsilon$ 。由多通道自动采集仪 MCU32 实时对应变计频率进行采集, 并通过传感器标定系数计算得应变值。现场监测传感器布设过程中, 首先在管节内壁标出测点, 然后将应变计夹具牢固焊接在指定位置, 要保证夹具轴向同心, 最后将应变计插入夹具, 通过螺栓固定 (如图 2)。在管节未连接顶进前, 测量其初始频率, 作为后续监测的零点。



图 2 应变计安装

Fig. 2 Installation of strain meter

值得注意的是,在图 2 所示安装后的环向应变计,由于其测量值实际为管道内壁圆弧所对应的直线弦长的应变,因此需要对其测量结果的准确性进行分析。为分析环向应变测量误差,采用如图 3 所示的应变计安装示意图,其测量长度为  $L$ , 对应管道内壁弧长为  $S$ , 对应圆心角为  $2\theta$ , 管道内径为  $R$ , 当管道在荷载作用下发生变形,此时应变计测量监测到  $\varepsilon_L$  直线应变,而管道对应圆弧段产生  $\Delta S$  环向变形和  $\varepsilon_R$  环向应变,根据几何关系二者测量的相对误差  $\xi$  计算如下:

$$\left. \begin{aligned} \theta &= \arcsin[L/2R], \\ S &= 2R\arcsin[L/2R], \\ \varepsilon_R &= \frac{\Delta S}{S} = \frac{2R\arcsin[L(1+\varepsilon_L)/2R]}{2R\arcsin[L/2R]} - 1, \\ \xi &= \frac{\varepsilon_R - \varepsilon_L}{\varepsilon_L} \times 100\% . \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

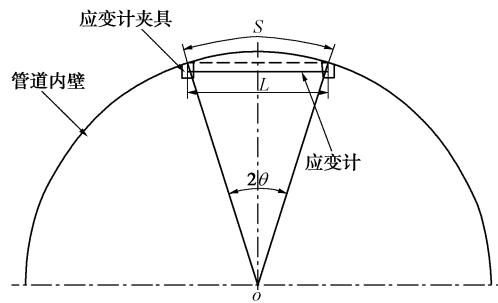


图 3 应变计测量误差计算示意图

Fig. 3 Calculation of measurement error of strain meter

根据测量结果,环向应变计实测值均在  $1000 \mu\epsilon$  以下,将传感器和管道参数  $L=100 \text{ mm}$ ,  $R=786 \text{ mm}$ ,应变计测量应变  $\varepsilon_L$  分别为  $100 \sim 1000 \mu\epsilon$  代入式 (1),环向应变计测量的直线应变与对应的管道环向应变相对误差仅为  $0.135\%$ ,二者相差极小,因此,该安装方式下应变计测量值可以反映管节环向应变。

## 2.2 测点布置

为了研究单根管节在顶管施工过程中的受力规律和不同顶进距离上管节受力的差异性,在 17 号顶管内依次布设两个应变监测断面 Y1 和 Y2,如图 4 和图 5 所示,分别位于第 8 管节和第 19 管节距前端  $1 \text{ m}$  的位置。第 8 管节距离机头后端  $28 \text{ m}$ , 第 19 管节距离机头后端  $72 \text{ m}$ ,二者沿轴线距离为  $44 \text{ mm}$ 。如图 6 所示,在第 8 管节监测断面布设上下左右 4 个测点,每个测点安装轴向与环向应变计各 1 支,由于传感器供货影响,第 19 管节监测断面只布设了 4 支轴向应变计。其中管节左侧水平位置(顶管弯曲内侧)为 1 号测点,然后顺时针编号。施工过程中,采用 MCU 以  $10 \text{ min}$  一次的频率对每个测点的数据进行采集。

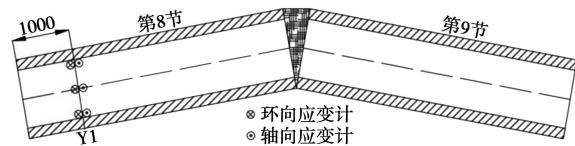


图 4 第 8 管节监测断面

Fig. 4 Monitoring section of 8th pipe

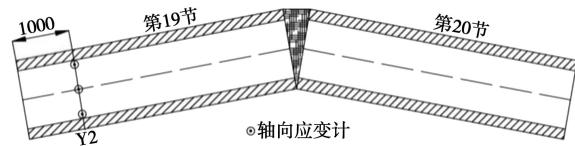


图 5 第 19 管节监测断面

Fig. 5 Monitoring section of 19th pipe

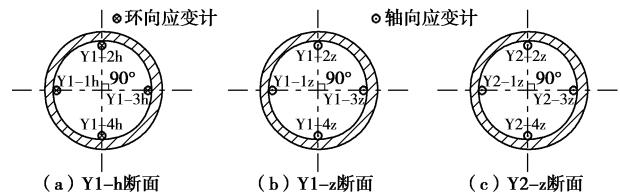


图 6 应变测点布置示意图

Fig. 6 Diagram of strain measuring points

## 3 测试结果及分析

现场管节采用材质为 Q235 钢,弹性模量取  $210 \text{ GPa}$ ,泊松比取  $0.3$ ,屈服极限为  $235 \text{ MPa}$ 。监测结果表明管节在顶进过程中处于弹性阶段。因此,以管壁环向为  $x$  轴,轴线为  $y$  轴,径向为  $z$  轴建立坐标系,根据管节内壁  $\sigma_z=0$ ,由广义胡克定律可推导如下公式:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \frac{E}{(1-\nu^2)} [\varepsilon_x + \nu \varepsilon_y], \\ \sigma_y &= \frac{E}{(1-\nu^2)} [\varepsilon_y + \nu \varepsilon_x]. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中  $E$  为管节弹性模量 ( $\text{MPa}$ );  $\nu$  为管材泊松比;  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  分别为管节轴向、环向和径向应力 ( $\text{MPa}$ );  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$ ,  $\varepsilon_z$  分别为管节轴向、环向和径向应变。将实测应变代入式 (2),即可换算得出这两个方向的应力值。现场应力共完整监测  $8 \text{ d}$ ,其中 Y1 监测断面的 Y1-4z 与 Y1-4h 应变计在施工过程中损坏,未获得数据。

### 3.1 管节应变随顶进距离变化规律

8 号管节轴向和环向应变以及 19 号管节轴向应变随顶进距离变化曲线如图 7~9 所示,由图可知:

#### (1) 8 号管节轴向应变

整个断面基本都为压应变,应变随着顶进距离略有增加,但增长趋势不明显,基本在某一数值上下波动。这是由于对于单根管节,其轴向受力主要为前端

管节的阻力、自身管节摩阻力和后续管节的顶进力, 当管节平稳顶进时, 基本处于受力平衡, 管节受到的顶进阻力大致保持定值, 因此管节轴向应变也随之变化不大。此外, 管节顶部 Y1-2z 压应变最小, 右侧次之, 左侧压应变最大, 这与管节水平向左偏转相一致。

### (2) 8 号管节环向应变

Y1 断面环向应变随顶进距离也表现为小幅波动和相对稳定的规律, 顶部为较大的拉应变, 左右两侧为相对较小的压应变, 且左侧压应变大于右侧, 即管节弯曲内侧应变大于外侧。说明在大理深条件下, 管节顶部发生竖向位移, 产生拉应变, 而管节弯曲外侧压应变较内侧小, 这是由于曲线顶管管节弯曲外侧土体抗力通常大于内侧, 限制了管节右侧的水平变形, 导致其压应变减小。由此可见管节的环向变形主要受周围环向水土压力影响, 当顶管穿越地层性质和埋深变化不大时, 环向应变基本保持稳定。

### (3) 19 号管节断面轴向应变

Y2 断面轴向应变随顶进距离增加基本保持稳定。但位于管节顶部的 Y2-2z 和右侧的 Y2-3z 表现为拉应变, 左侧 Y2-1z 和底部 Y2-4z 则表现为较小的压应变。可见, 随着顶进距离的增加, 后续管节相对于顶管机头偏转逐渐累积, 顶力作用在管节两端接头的偏心距也在增大, 使其由 8 号管节的全断面压缩变形转变为 19 号管节拉伸和压缩变形同时存在的状况。

Y2 断面压缩变形区位于左下方, 拉伸变形区位于右上方, 右侧拉应变大于顶部拉应变。这是由于 #17 管道轨迹圆曲线段每节管节水平偏角约  $0.26^\circ$ , 而竖直方向也存在 3‰的坡度, 因此实际管节向左下方呈空间曲线顶进, 导致在管节弯曲内侧的左下方出现受压区, 相反的方向出现受拉区。且水平偏角远大于竖直偏角, 这与右侧拉应变大于顶部拉应变相一致。

## 3.2 管节应力分布规律

由于 19 号管节 Y2 断面未能布设环向应变计, 无法计算出相应的轴向和环向应力, 因此以 8 号管节 Y1 断面的应力计算结果为例, 说明单根管节应力分布及变化规律。

### (1) 8 号管节轴向应力

Y1 断面轴向应力随顶进距离变化曲线如图 10 所示。由图可得: 管节左右两侧为压应力, 且弯曲内侧压应力大于外侧, 这与管节水平向左偏转, 左侧压应力集中相一致; 而顶部表现为轴向拉应力, 这是由于虽然顶部轴向表现为压应变, 但数值上相对于顶部的环向拉应变较小, 在泊松效应影响下, 最终轴向表现为拉应力。由此可见, 在管节偏转的水平方向上, 轴向顶力为轴向应力的控制因素, 而对于大理深顶管, 其管节上下竖向变形往往最大, 外壁环向荷载对其轴

向应力起控制作用。

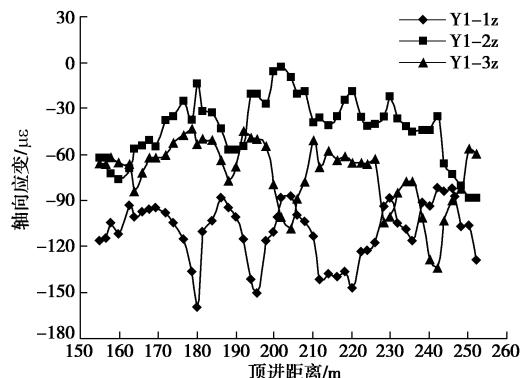


图 7 Y1 断面轴向应变曲线

Fig. 7 Curves of axial strain of Y1 monitoring section

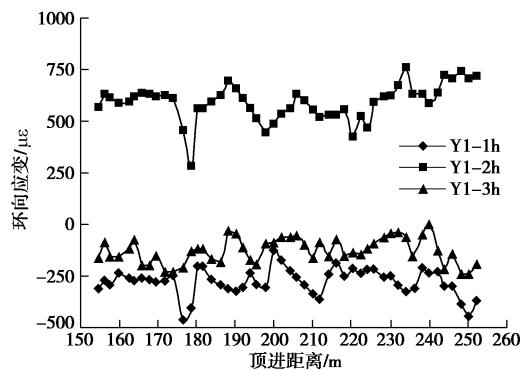


图 8 Y1 断面环向应变曲线

Fig. 8 Curves of hoop strain of Y1 monitoring section

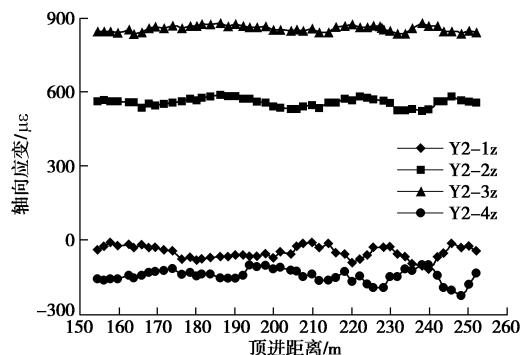


图 9 Y2 断面轴向应变曲线

Fig. 9 Curves of axial strain of Y2 monitoring section

值得注意的是, 由于管节环向应变主要受环向外荷载影响, 同一顶管不同管节环向变形相差不会太大, 所以对于 19 号管节, 其在与 8 号管节环向应变水平相当的条件下, 最有可能出现左侧受压, 而顶部、顶部和右侧受拉的情况。因此随着管节与机头距离增加, 管节轴向应力由两侧受压转变为单侧受压, 受压区面积逐渐减小, 应力集中更明显。

### (2) 8 号管节环向应力

Y1 断面环向应力随顶进距离变化曲线如图 11 所示, 由图可得: 管节顶部为较大拉应力, 而左右两侧

为较小压应力, 且弯曲内侧环向压应力大于外侧。这是由于大埋深条件下, 管节顶部环向拉应变远大于轴向压应变, 抵消了轴向压缩变形的影响, 最终受环向外荷载控制, 表现为拉应力; 而管节左右两侧环向和轴向均为压应变, 二者作用使环向和轴向压应力更显著; 对于管节弯曲内侧压应力大于外侧, 是由于外侧土体抗力通常大于内侧, 右侧较大的外压减小了该点的压缩变形, 导致其压应力减小。

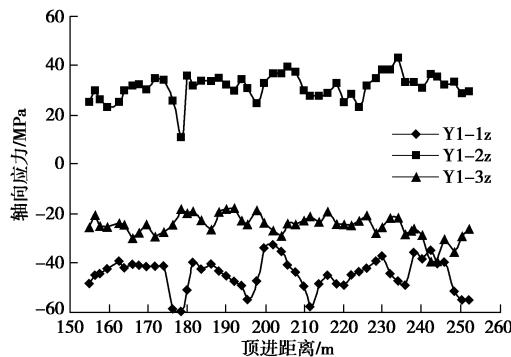


图 10 Y1 断面轴向应力曲线

Fig. 10 Curves of axial stress of Y1 monitoring section

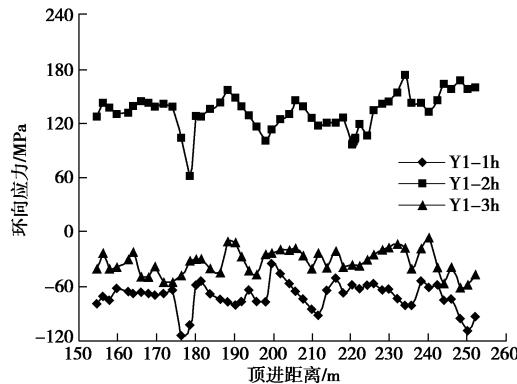


图 11 Y1 断面环向应力曲线

Fig. 11 Curves of hoop stress of Y1 monitoring section

### 3.3 顶管顶—停施工对管节应力影响

在顶管施工过程中, 管节一直处于顶进加载和停顿卸载的循环受力状态下, 其受力特性也有所不同。因此, 以下选择某一循环顶进时间段内 (顶进施工时间段为 9:02~10:12) 第 8 节管节 Y1 断面应力随时间变化曲线进行分析, 结果如图 12 和图 13 所示。

由图可得, 在顶进过程中的管节轴向和环向应力曲线发生波动, 而停止顶进之后管节应力曲线逐渐趋于平稳。具体表现为轴向应力, 在停止顶进阶段, 主要受周围静止环向水土压力影响, 当突然进入顶进状态时刻, 由于顶进力加载对各点产生附加的轴向压应力, 因此顶部拉应力减小, 左侧压应力增大; 加之, 顶进过程管节外侧土体抗力大于施工停顿, 右侧环向

土体抗力增大引起的轴向拉应力抵消了轴向顶力引起的附加轴向压应力, 因而右侧应力变化不明显。反之, 在停止顶进顶力卸载时刻, 各点应力变化与之前相反。

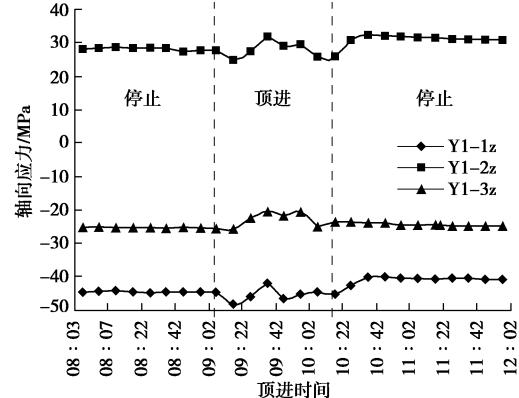


图 12 Y1 断面轴向应变随时间变化曲线

Fig. 12 Variation of axial strain with time of Y1 monitoring section

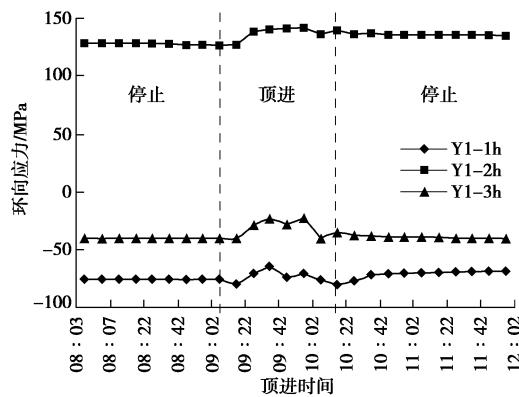


图 13 Y1 断面环向应变随时间变化曲线

Fig. 13 Variation of hoop strain with time of Y1 monitoring section

对于环向应力, 同样在施工停止阶段主要受环向静止水土压力影响, 当进入顶进时刻后, 由于管节外侧注浆压力和右侧土体抗力增大, 使得顶部拉应力增大, 右侧压应力减小; 而左侧由于位于管节弯曲内侧, 在轴向压应力集中的影响下, 表现为压应力增加, 在停止顶进卸载时刻, 则恰好出现相反的变化规律。

## 4 结 论

通过布设在大埋深曲线钢顶管管节内的传感器对顶管施工过程中应力应变进行现场实时监测, 综合上述分析结果可得如下管节受力规律:

- (1) 由于单根管节顶进过程中受到的摩阻力相对稳定, 因此应力应变随顶进距离增加虽然有略微增大的趋势, 但基本保持在某一数值上下波动。
- (2) 管节轴向应力主要受顶进力影响, 环向应力

主要取决于管节外侧的水土压力和注浆压力等荷载, 管节偏转弯曲内侧压应力最大, 出现应力集中。同时由于钢管节材质均一, 存在泊松效应, 因而轴向和环向应力还会出现耦合影响现象。特别是在大埋深条件下, 顶部较大环向应变对该点的轴向应力起控制性作用, 使其转变为拉应力。

(3)对于大埋深钢顶管, 当管节靠近顶管机头时, 由于偏心距较小, 表现为全断面较小的压应变; 而在上下位置较大的拉应变和水平两侧压应变影响下, 最终表现出顶部和底部轴向为拉应力, 左右两侧轴向为压应力。且随着管节与机头距离增大, 管节顶力偏心距逐渐增大, 管节轴向由全断面受压转变为局部受压, 从而最表现为管节弯曲内侧轴向受压, 而其他部位受拉的现象。

(4)距离机头较近的管节应力水平较低, 应力较大点为管节顶部和底部以及管节弯曲内侧; 后续管节随着顶力增大, 应力水平较大, 管节弯曲外侧最可能为拉应力最大点, 而弯曲内侧则为压应力最大点, 且拉应力大于压应力。因此, 曲线顶管施工过程中, 末端管节弯曲外侧点最容易发生受拉破坏, 设计时需要对其进行强度验算。

(5)在顶进过程中的管节轴向和环向应力曲线发生波动, 而停止顶进后应力曲线逐渐趋于平稳。在整个顶管施工阶段内, 各监测点的应力均小于管材的屈服强度, 表明管节处于弹性变形范围内, 结构安全性较好。

## 参考文献:

- [1] RÖHNER R, HOCH A. Calculation of jacking force by new ATV A-161[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2010(25): 731 - 735.
- [2] HASLEM R F. Stress formulation for joints in pipe-jacked tunnels[J]. Trenchless Technol, 1998, 12(1): 39 - 48.
- [3] CECS246—2008 给水排水工程顶管技术规程[S]. 2008. (CECS246—2008 Technical specification for pipe jacking of water supply and sewerage engineering[S]. 2008. (in Chinese))
- [4] 陈建中. 玻璃纤维增强塑料顶管接头受力分析[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010. (CHEN Jian-zhong. Analysis the force of glass fiber reinforced plastics jacking pipe joints[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010. (in Chinese))
- [5] 金文航. 长距离曲线顶管技术分析与研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005. (JIN Wen-hang. Analysis of long-distance curve pipe jacking technology[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005. (in Chinese))
- [6] 熊 薇. 矩形顶管关键受力分析[D]. 北京: 中国地质大学 2013. (XIONG Jian. Analysis of critical mechanics of rectangular pipe jacking[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2013. (in Chinese))
- [7] 赵志峰, 邵光辉. 顶管施工中钢管管壁稳定性分析及壁厚的优化[J]. 武汉大学学报 (工学版), 2011, 44(4): 481 - 486. (ZHAO Zhi-feng, SHAO Guang-hui. Stability analysis of wall stability of steel pipe in pipe-jacking and optimization of proper wall thickness[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2011, 44(4): 481 - 486. (in Chinese))
- [8] ZHOU Jian-qing. Numerical analysis and laboratory test of concrete jacking pipes[D]. Oxford: University of Oxford, 1998.
- [9] 薛振兴. 顶管施工顶力计算与力学特性研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2010. (XUE Zhan-xing. Investigation on jacking force calculation and mechanical properties of pipe jacking construction[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2010. (in Chinese))
- [10] 陈 楠. 复杂环境中大直径钢顶管的受力特性研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012. (CHEN nan. Mechanical characteristics of steel pipe-jacking with large diameter in complex environment[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012. (in Chinese))
- [11] MILLIGAN G W E, NORRIS P. Site based research in pipe jacking-objectives, procedures and a case history[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1996, 11(1): 3 - 24.
- [12] MILLIGAN G W E, NORRIS P. Pipe-soil interaction during pipe jacking[J]. Geotechnical Engineering, 1999, 137(1): 27 - 44.
- [13] 冯海宁, 温晓贵, 魏 纲, 等. 顶管施工对土体影响的现场试验研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(5): 781 - 785. (FENG Hai-ning, WEN Xiao-gui, WEI Gang et al. In-situ test research on influence of pipe jacking on soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(5): 781 - 785. (in Chinese))
- [14] 魏 纲, 徐日庆, 余剑英, 等. 顶管施工中管道受力性能的现场试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(8): 1273 - 1277. (WEI Gang, XU Ri-qing, YU Jian-ying, et al. Site-based experimental study on pipe behavior during pipe jacking[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(8): 1273 - 1277. (in Chinese))
- [15] 潘同燕. 大口径急曲线顶管施工力学分析与监测技术研究[D]. 上海: 同济大学, 2000. (PAN Tong-yan. Research of

- mechanics analysis and monitoring technology during large diameter sharp curved pipe jacking construction[D]. Shanghai: Tongji University, 2000. (in Chinese))
- [16] 杨仙. 管幕预筑法中密排大直径钢管群顶进研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012. (YANG Xian. Research of large diameter jacking-pipes with small space in pipe-roof pre-construction method[D]. Changsha: Central South University, 2012. (in Chinese))
- [17] 余晶, 程勇, 贾瑞华. 港珠澳大桥珠海连接线拱北隧道方案论证[J]. 现代隧道技术, 2012, 49(1): 119–125. (YU Jing, CHENG Yong, JIA Rui-hua. Option demonstration for the gongbei tunnel at the Zhuhai Link of the Hong Kong-Zhuhai-Macau Bridge[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 49(1): 119–125. (in Chinese))
- [18] 胡向东, 任辉, 陈锦, 等. 管幕冻结法积极冻结方案模型试验研究[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(5): 92–98. (HU Xiang-dong, REN Hui, CHEN Jin, et al. Model test study of the active freezing scheme for the combined pipe-roof and freezing method[J]. Modern Tunnelling Technology, 2014, 51(5): 92–98. (in Chinese))
- [19] 李志宏, 李剑. 曲线顶管管幕间相互影响研究[J]. 现代隧道技术, 2015, 52(3): 63–68. (LI Zhi-hong, LI Jian. A study of the interaction between the pipes of a curved pipe-roof[J]. Modern Tunnelling Technology, 2015, 52(3): 63–68. (in Chinese))

## 第27届全国土工测试学术研讨会（第2号通知）

2016年10月28~30日 中国 南京

**主办单位:** 中国土木工程学会土力学与岩土分会土工测试专业委员会; 中国水利学会岩土力学专业委员会土工测试专门委员会。

**承办单位:** 河海大学; 南京水利科学研究院; 长江水利委员会长江科学院; 南京林业大学; 交通运输部天津水运工程科学研究院; 教育部岩土力学与堤坝工程重点实验室。

**协办单位:** 《岩土工程学报》编辑部; 《防灾减灾工程学报》编辑部; 《岩土力学》编辑部; 广州欧美大地仪器设备有限公司。

为了在传统的土工测试的基础上, 深入探讨当代新的测试理论、技术与应用等问题, 提高岩土工程与测试技术的科技创新水平, “第27届全国土工测试学术研讨会”将以国家重大工程建设为背景, 以“土工测试新技术发展与应用”为主题, 对近年来土力学与土工测试领域的传统理论技术进行总结, 并对最新研究进展进行广泛的学术交流, 以期规范和完善现有测试技术和方法, 引领和推广新测试技术的发展, 更好地为工程建设服务。会议议题不仅包括传统的实验室测试、模型测试、现场测试, 还包括环境土工、新型材料、新测试技术等。

**会议议程安排:** 10月28日会议报到与注册, 10月29日大会开幕式及邀请报告, 10月30日邀请报告及闭幕式。

**参会费用:** 大会收取会务费1200元/人, 学生500元/人, 陪同人员300元/人, 中晚餐统一安排, 住宿费自理。会议期间设立展览。主要包括岩土工程仪器、设备、机械等, 热忱欢迎从事岩土工程领域的新技术、新设备的开发、生产和应用的相关公司及单位踊跃报名参加技术展览。

**会议地点:** 河海大学闻天馆; 报到注册: 华东饭店(10月28日), 河海大学闻天馆(10月29日), 住宿酒店: 请参会代表于10月10日前回复会议回执, 组委会可以为提出住宿申请的代表预定酒店住房。华东饭店(江苏省南京市鼓楼区北京西路67号, 025-68892080); 西苑宾馆(江苏省南京市鼓楼区北京西路65号, 025-80890300); 迎宾楼(鼓楼区虎踞关21号, 025-83789588); 金盾饭店(鼓楼区虎踞关21号, 025-83719939)。

**会议秘书处:** 南京市西康路1号河海大学土木与交通学院210098; E-mail: geotest2016@163.com; 袁俊平(13815861109), 沈才华(13851634409), 徐洁(13852298143); 传真: 025-83713073。

(大会组委会 供稿)