

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.24.015

# 内置钢浮筒助浮用于大口径超长超弯钢管沉管施工

晏伟<sup>1</sup>, 唐善军<sup>1</sup>, 孙世鹏<sup>1</sup>, 王健<sup>2</sup>, 路佳<sup>3</sup>

(1. 广州打捞局, 广东 广州 510220; 2. 上海市市政工程设计研究总院<集团>有限公司, 上海 200092; 3. 南宁市排水有限责任公司, 广西 南宁 530028)

**摘要:** 南宁邕江引水工程过邕江段管线长度438 m、直径2.62 m、壁厚28 mm、质量784 t, 采用外置浮筒、气囊助浮沉管技术于2019年6月整体成功沉放。在外置钢浮筒沉管沉放过程中遇到气囊消气不及时、消气时间过长的问題, 增加了航道封航时间。外置钢浮筒导致迎流面积增大, 钢浮筒所受水流力同步作用于过江管, 需要配置较大的下沉力才能保证安全沉管。过江管在旋转摆正的过程中浮筒钢丝绳与管体接触产生勒痕, 破坏了过江管的涂层。针对上述问題提出改进方案, 利用内置钢浮筒沉管的方式, 通过模型计算后可合理控制下沉受力, 在大口径管线沉管过程中减少迎流面积, 避免钢浮筒受到水流力影响, 大幅降低下沉配重要求。吊绳在下沉控制中的受拉均匀性均有较大程度改善, 缩短了沉管过程封航时间。内置浮筒助浮是在航运繁忙河段条件下, 针对大口径长距离管线整体沉管的一种经济、安全的施工技术。

**关键词:** 钢浮筒; 助浮; 大口径钢管; 超长钢管; 沉管

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2024)24-0092-07

## Application of Built-in Steel Pontoon Floating-aid Technology in Construction of Large Diameter, Super Long and Super Bending Steel Immersed Tube

YAN Wei<sup>1</sup>, TANG Shan-jun<sup>1</sup>, SUN Shi-peng<sup>1</sup>, WANG Jian<sup>2</sup>, LU Jia<sup>3</sup>

(1. Guangzhou Salvage Bureau, Guangzhou 510220, China; 2. Shanghai Municipal Engineering Design and Research Institute Co. Ltd., Shanghai 200092, China; 3. Nanning Drainage Co. Ltd., Nanning 530028, China)

**Abstract:** The pipeline with length of 438 m, diameter of 2.62 m, wall thickness of 28 mm and mass of 784 t in Nanning Yongjiang River diversion project, was successfully sunk in June 2019 with the external pontoon and airbag floating-aid technology for immersed tube. In the process, the airbag de-aeration is not timely and takes too much time, which increases the closure time of the channel. The external steel pontoon increases the area facing the flow, and the bearing water force of it acts on the crossing pipe synchronously, so it is necessary to allocate a large sinking force to ensure safe pipe sinking. In the process of rotating and straightening the river crossing pipe, the contact between the float wire rope and the pipe body produces ligature marks, which destroys the coating of the river crossing pipe. In view of the above problems, an improved scheme is proposed. The sinking force can be rationally controlled by using the method of built-in steel pontoon for immersed tube through model calculation, which can reduce the flow area in the process of large-caliber pipeline sinking, keep the steel pontoon away from the flow force, and greatly reduce the sinking weight requirement. The uniformity of the rope tension in sinking control is improved to a great extent, and the closure time is shortened during the sinking process. The

built-in steel pontoon floating-aid is economical and safe for the integral immersed tube of large diameter and long distance in busy river section.

**Key words:** steel pontoon; floating-aid; large diameter steel pipe; super long steel pipe; immersed tube

沉管法是利用被沉物自身浮力,将被沉物调载到一定负浮力下,依靠小吊力吊驳在水下进行沉放施工。沉管法具有施工质量高、造价低、工期短、适应水深大等优点,近年来在国内外被广泛应用于沉管隧道、海洋输油输气管道、跨海输水管道、内河过江输水管道的浮运及沉放施工。

近年来过江管沉管施工主要有外置钢浮筒法、气囊助浮沉管法<sup>[1-4]</sup>、起重船吊装法<sup>[5-8]</sup>,但在大口径管线、水流流速高、管道自重大的情况下存在较高的技术难度。以南宁邕江DN2 600特大口径438 m一次性过江管道为背景,国内首创内置钢浮筒沉管法,即在直径2.62 m的钢管内放置24个直径2 m、长12 m的钢浮筒,通过钢浮筒驮钢管进行沉管。内置钢浮筒可有效减小沉管的迎流面积,减少水流推流作用,降低对起重船吊力的要求。利用浮筒与被驮物之间的面性接触,有效保护了钢管的防腐涂层,与外置浮筒沉管法相比无需在江中拆除气囊及浮筒,减少了封航时间,避免了缆绳磨损钢管外防腐层等不利因素的影响。

## 1 内置钢浮筒助浮技术

内置钢浮筒助浮沉管技术在施工现场起重船资源受限或受通航限制大型起重船资源无法到达施工现场的条件下,能够很好地解决受吊力限制管道的沉放安装问题。

内置钢浮筒助浮沉管示意图1。

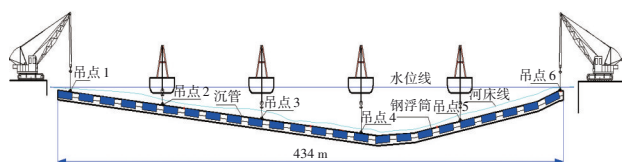


图1 内置钢浮筒助浮沉管示意

Fig.1 Schematic diagram of immersed tube with built-in steel pontoon

根据管道整体长度、各弯折点位置及分段长度、江面和岸堤现状,结合以往类似工程施工经验,综合考虑现场制管场地、管道制作后的吊装、下水方式等因素,该工程所用管道采用汽车从南岸一侧

施工便道运输至施工区域,成品短管为6 m/节,然后再将每节管道进行拼装焊接,过江管道长度约438 m,受滩涂面积限制需分成4段焊接预制,每段管道长约110 m,管道分段焊接预制完成后,通过钢轨、小车运输钢浮筒进分段管道内安装,在分段管道两端焊接盲板封堵。在分段管道底部安装气囊并充气,卷扬机牵引管道下水;浮于江边的分段管道,用履带吊起在水上对接钢浮箱上两段管道。用吊船上的卷扬机绞拉沉管横摆就位后,打开沉管两端的进水阀及排气阀对沉管灌满水,此时沉管有一定的负浮力,靠吊船吊力下沉放入基槽。内置钢浮筒沉管工艺流程见图2。

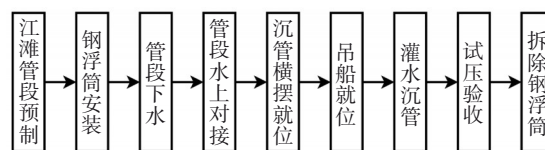


图2 内置钢浮筒沉管工艺流程

Fig.2 Process flow chart of built-in steel pontoon immersed tube

## 2 下沉力确定及钢浮筒、吊船配置

### 2.1 钢管下沉力的计算

过江管道沉放过程中受到自身重力、内置钢浮筒提供的浮力、吊船及履带吊提供的吊力和水流力的共同作用。当江水流速较大时,过江管道受到的水流力也较大,这就需要管道有较大的下沉力才能安全沉放,否则沉管将会漂向下游而不能准确沉入基槽。当下沉力:水流力>5:1时,管道将相对安全沉放。但下沉力较大,所需吊船吊力也大,这就失去了钢浮筒助浮沉管的意义,因此水流速度是沉管的关键。长期监测当地水流流速可知,平均流速为0.4 m/s,故按水流流速0.5 m/s考虑沉管施工。

#### ① 水流力

根据《港口工程荷载规范》(JTS 144—1—2010),管体所受水流力计算如下:

$$F_w = C_w v^2 A \rho / 2 \quad (1)$$

式中: $F_w$ 为水流力标准值,kN; $C_w$ 为水流阻力

系数; $\rho$ 为水密度,淡水取 $1.0\text{ t/m}^3$ ,海水取 $1.025\text{ t/m}^3$ ;  $v$ 为设计水流流速,  $\text{m/s}$ ;  $A$ 为计算构件在与流向垂直平面上的投影面积,  $\text{m}^2$ 。

查表得 $C_w=0.73$ ,管体完全沉没水中时,只考虑水流流速为 $0.5\text{ m/s}$ ,则 $A=438\times 2.62=1\,147.56\text{ m}^2$ ,  $F_w=104.7\text{ kN}$ 。

## ② 下沉力

过江管下沉力按5倍水流力考虑,宜大于 $523\text{ kN}$ 。下沉力过大时,所需吊船及履带吊资源增多,增加成本且各吊船沉放同步作业使得沉管难度加大。

沉管前需反复测量江面水流流速,了解沉管期间江中水流情况,选择合适的施工窗口期,在江中水流流速 $<0.5\text{ m/s}$ 的情况下实施沉管,流速越小对沉管越有利(流速越小,沉管负浮力也可越小),所需吊船数量也可减少。此次沉管选取下沉力区间值为 $-80\sim-50\text{ t}$ ( $1\text{ t}=9.81\text{ kN}$ ),根据设计浮筒提供的浮力确定下浮力为 $-62\text{ t}$ 。如果江水流速达 $1\text{ m/s}$ ,将会使沉管难度加大,因水流对沉管有冲力,只有增加沉管负浮力来抵消水流冲力才能确保沉管成功,对应 $1\text{ m/s}$ 的流速,需要负浮力 $-150\text{ t}$ 级才能安全沉管,这将会增加吊船数量及吊船吊力使得施工变得困难。此段江面上游有船闸,沉管期间可协调船闸限流,控制江水流速成为此次沉管成功施工的关键因素。

## 2.2 钢浮筒、吊船选型及数量

根据现有资源,可以用陆域管道来制作钢浮筒,沉管完成后,钢浮筒又可用回陆域管道,节约成本。利用现有管道制作钢浮筒,钢浮筒材质为Q235B,尺寸为 $\varnothing 2\text{ m}\times 18\text{ mm}\times 12\text{ m}$ 的螺旋钢管两端封板、钢管内部加工字钢支撑。过江管长 $438\text{ m}$ ,自重 $783.95\text{ t}$ ,完全沉没水中时,扣除钢管浮力,水中重力为 $684.081\text{ t}$ 。钢浮筒重力 $11.446\text{ t}$ ,浮力 $37.7\text{ t}$ ,扣除重力能提供给沉管浮力 $26.254\text{ t}$ 。配置24个内置浮筒,可提供浮力 $630.096\text{ t}$ ,链子、卸扣等附属物重力 $8.28\text{ t}$ ,沉管在水中下沉力为 $62.26\text{ t}$ 。

采用ANSYS软件在 $28.7\text{ m}$ 水深进行仿真静力分析:管端最大位移 $4.4\text{ mm}$ ,最大应力 $155\text{ MPa}$ ,Q235B屈服强度 $235\text{ MPa}$ ,满足安全性要求,具体见图3。

对应管体下沉力为 $62.26\text{ t}$ ,具体计算见表1。由计算可知,江中布置4艘吊力为 $20\text{ t}$ 级改装起重

船,两岸各布置1台 $100\text{ t}$ 级履带吊(按管头的跨度最大起吊能力 $40\text{ t}$ )。

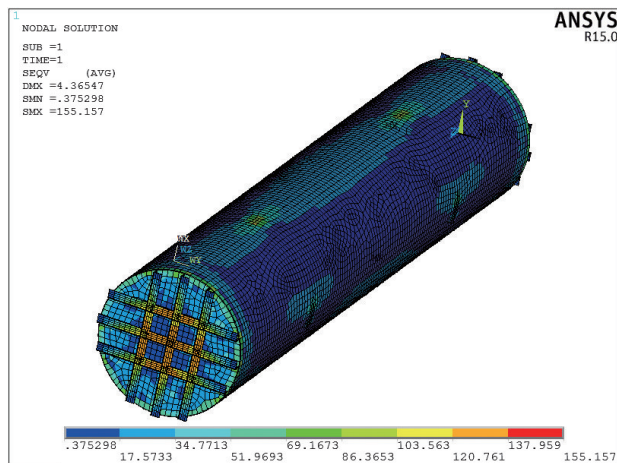


图3 钢浮筒受水压力计算

Fig.3 Water pressure calculation of steel pontoon

表1 负浮力计算

Tab.1 Negative buoyancy calculation t

管体重力	管体水中重力	附属物重力	浮筒提供浮力	管体下沉力
783.95	684.08	8.28	630.10	62.26

## 3 过江管沉放施工

### 3.1 内置钢浮筒的安装

过江管道沉管段总长 $438\text{ m}$ ,因受场地大小限制,过江管需分4段小节,在岸侧滩涂成型后,在管节内铺枕木、钢轨,通过转运小车将钢浮筒运至指定位置。用千斤顶顶起钢浮筒,移走枕木、钢轨、小车,下降千斤顶将钢浮筒放置到位,见图4。

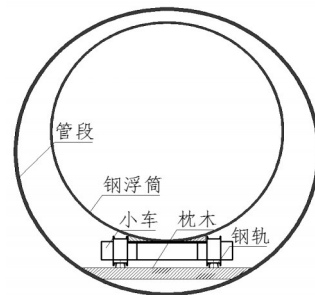


图4 钢浮筒转运

Fig.4 Transfer of steel pontoon

钢浮筒与钢浮筒之间通过链子连接,首尾两端钢浮筒与沉管盲板通过链子连接固定,以免过江管道沉放旋转时浮筒全集中到上口造成管体应力集中而断裂。每两个浮筒之间的链子安装一个转环,

以免沉管灌水时浮筒旋转使得链环扭曲打节。浮筒连接见图5。



图5 浮筒连接

Fig.5 Steel pontoon connection

### 3.2 管节分段下水及水上对接成型

① 管节两头封盲板。在管节下方人工挖去少部分土方,穿气囊过管节下方,在江边合适位置布置一个锚固点,岸侧卷扬机钢丝绳通过锚固点导向轮后牵拉管节前端,用另一台10 t卷扬机尾端进行留尾,以免管节过快下水不受控制,对气囊充气后卷扬机绞拉管节前段,缓缓拉管节下水。

② 管节水上对接。根据过江管的大小制作对接箱,两节管节接头放置在对接箱内,对接箱的半圆弧板半径宜比过江管半径大1~2 cm,如对接过程中在管节与对接箱圆弧板之间漏水,可用土工布对间隙进行加塞,对接箱内有集水井,放置2英寸(5.08 cm)水泵抽除对接箱内的积水。采用岸侧履带吊吊住对接箱对管节进行对接,对接箱侧的管头可用横梁加5 t葫芦固定管头,待管头达到对接装配要求后,焊接卡码固定两个管节管头,管尾可呈自由漂浮状态(见图6)。在管节外侧面间距300 mm安装卡码防止焊接变形,管节内侧面贴陶瓷衬垫,采用CO<sub>2</sub>气体保护焊进行焊接。

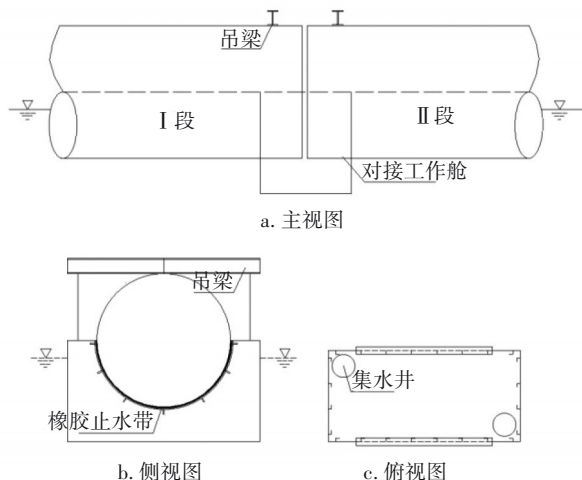


图6 沉管水上对接箱

Fig.6 Immersed tube butt at the water

③ 管节与焊接箱自由浮态分析。管节两端封板,根据阿基米德原理,空心管节所提供的浮力远大于管节自重,管节将呈现自然浮态,经计算,管节下口至自由液面高度 $h=979$  mm。管节端部放于焊接箱上时,焊接箱有5 t浮力作用于钢管上,会影响管节对接,因此初期对接时需要对焊接箱注入600 mm高度水来压载。

### 3.3 过江管横摆就位

过江管对接成型后,需要对沉管进行摆横,沉管宜逆水流方向进行横摆。沉管长438 m,为防止沉管横摆过程造成应力破坏,需对沉管漂浮状态所受水流力及极限牵拉位置进行受力计算,具体见图7。

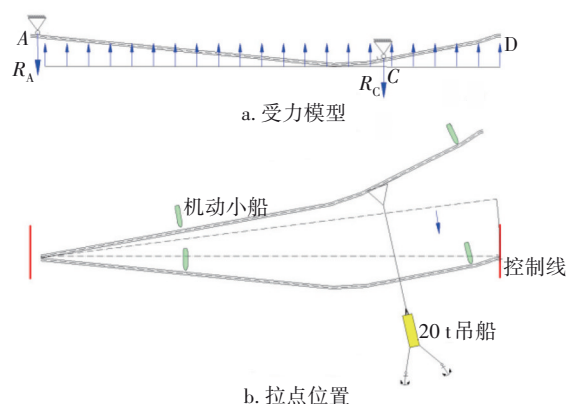


图7 沉管横摆受力模型

Fig.7 Lateral pendulum force model of immersed tube

摆横受力分析如下:

根据《港口工程荷载规范》(JTS 144—1—2010),管体所受水流力按照式(1)计算。查表得 $C_w=0.73$ 。管体浮于水面时,水流流速为0.5 m/s,横管速度为0.5 m/s,自由浮态 $A=438 \times 0.979=428.8$  m<sup>2</sup>, $F_w=156.5$  kN。

取管体浮于水面状态进行分析,可将管体看作简支梁两支点接受均布荷载作用。

#### ① 拉力计算

$$\sum M_A=0 \quad (2)$$

$$R_A+R_C=F_w \quad (3)$$

可计算出: $R_C=106$  kN, $R_A=50.5$  kN。

#### ② 最大弯矩

A—C段:以A为坐标原点, $M_e=R_A X-qX^2/2$ , $X=141.335$ 时,弯矩最大, $M_{\max}=363.72$  t·m;C—D段:靠近C点弯矩最大, $M_{\max}=221.36$  t·m。

#### ③ 最大应力



$$\delta = M/W_y \quad (4)$$

薄壁圆管抗弯截面模量:

$$W_y = \pi D^3 (1 - 4d/D)/32 = 0.146 \ 184 \ 823 \text{ m}^3, \delta = 24.38 \text{ MPa}.$$

管体材质为Q235B,产生应力远低于许用应力。过江管横摆拉点要注意位置,不能设置在管段末端,当管段末端受力时,管体所受弯矩较大,容易出现应力集中。过江管水上对接完成后,由江中布置的2艘改装起吊船、两岸侧各1台15 t绞车缓慢牵拉就位。

### 3.4 过江管灌水

横摆就位后,过江管两个管端头放在沉管轴线位置,江中4艘吊船、两岸各100 t履带吊吊住沉管,在沉管完全没水前,其靠自身浮力浮于水面,边灌水边缓慢下沉,此时,各吊点钢丝保持松弛状态,以便观察灌水进度。沉管灌满水后,保持整个弓形沉管水平沉于水面下50 cm,各吊点平均受力约102 kN,约为吊船许可吊力的50%。灌水采用2个6英寸(15.24 cm)潜水泵连接到管头封板接口,随着沉管内水位上升,浮筒由坐于沉管上到开始漂浮于沉管内水面上,直至灌满水时浮筒提供全浮力作用于沉管顶部,见图8。

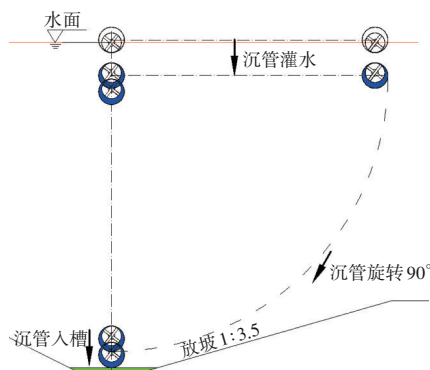


图8 灌水过程

Fig.8 Irrigation process

### 3.5 过江管沉放

两岸各一台100 t履带吊吊住沉管两头不动,4艘改装小型吊船布置在江中间同步下放吊钩,在最深江面的吊船松吊钩快,靠岸侧吊船松吊钩慢,管体旋转过程中始终保持沉管在一个平面上,避免吊船松吊钩不同步而产生的扭曲变形。当沉管向下摆90°管体中线与基槽中线重合时,4艘吊船及岸侧2台履带吊同步同速度下放吊钩,使管体下沉到基槽碎石墩上,见图9。

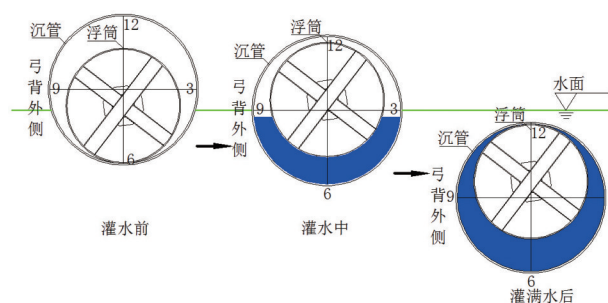


图9 沉放过程示意

Fig.9 Indicating the sinking process

沉管灌满水后通过旋转90°由悬浮于水面状态变为垂直于水面时,浮筒最大水平夹角为9.37°,浮筒提供垂直向上浮力为257 kN。 $F_1 = F_{\text{浮}} \sin 9.37^\circ = 41.84 \text{ kN}$ ,  $F_2 = F_{\text{浮}} \cos 9.37^\circ = 253.57 \text{ kN}$ 。

在浮筒外包一层2 cm厚的橡胶,以增加与钢管的静摩擦系数,钢管内涂有一层300 μm油漆,橡胶与油漆静摩擦系数为0.3~0.7,取最低值0.3,可以计算出静摩擦力  $F = \mu F_2 = 76.07 \text{ kN}$ ,由  $F > F_1$  可知浮筒将会贴于沉管内壁上。

采用ANSYS软件对沉管进行受力分析,沉管摆正后开始下沉状态为最危险状态,经过计算,管体最大应力5.67 MPa,最大位移10.8 mm,应力最大处为浮筒作用于管体边界处,位移最大处为管体两头处,见图10。

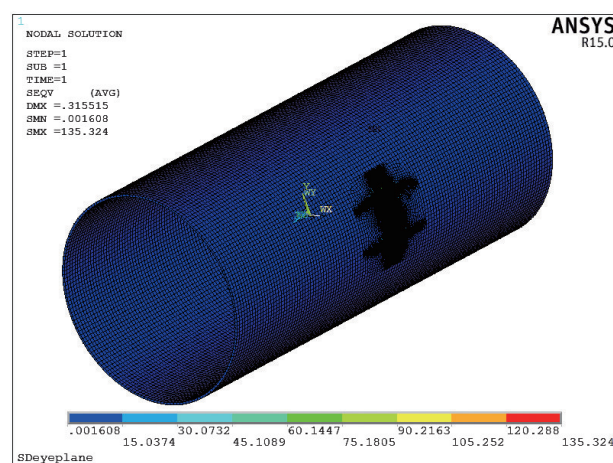


图10 沉管所受应力位移计算

Fig.10 Stress displacement calculation of immersed tube

各吊船及岸吊受力情况:北侧岸吊82.34 kN,第一条吊船109.64 kN,第二条吊船106.07 kN,第三条吊船110.15 kN,第四条吊船104.88 kN;南侧岸吊97.07 kN,见图11。所受吊力最大的为第三条吊船110.15 kN,而吊船起吊能力为250 kN,吊力占

起吊能力比值为44%,有较多富余系数,沉管较为安全。

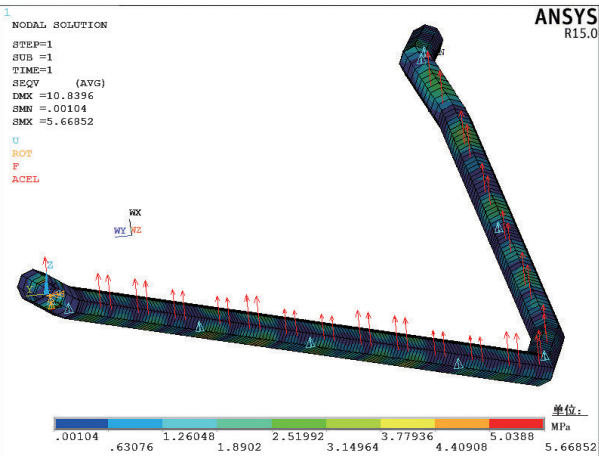


图11 过江管吊点所受应力、位移计算

Fig.11 Calculation of the stress and displacement at the lifting point of river-crossing pipe

对过江管吊点处进行受力分析,过江管吊点处最大应力135.32 MPa、吊码最大应力129.06 MPa,均处于安全状态。

3.6 内置钢浮筒拆除

对管体两头及江中两处共4处进行碎石回填,稳住管体后放松各吊点吊钩,用绳锯对过江管两头封板进行切割。2名潜水员带高压空气管进沉管内

打开钢浮筒进水阀、排气阀,当钢浮筒进水达到一定量时,在水中处于悬浮状态(如进水过多则用高压空气管连接排气阀对钢浮筒进行充气排水),拆掉浮筒与浮筒之间链子上的卸扣,由岸侧卷扬机牵引钢浮筒出沉管,履带吊吊运浮筒上岸,浮筒拆卸顺序为左右岸对称同步拆卸。

4 内、外钢浮筒助浮沉管方案比选

目前国内南宁邕江引水工程采用外置钢浮筒、气囊沉管技术已成功沉管,南宁沉管长度438 m、直径2.62 m,壁厚28 mm,自重784 t,于2019年6月整体成功沉放,但沉放过程中也存在一些问题,如气囊消气不及时、消气时间过长,增加了航道封航时间。外置钢浮筒导致迎流面积增大,钢浮筒所受水流力同步作用于过江管,需要配置较大的下沉力才能保证安全沉管。拆除江中外置浮筒需要用到起重船,影响来往船舶通航。过江管在旋转摆正的过程中浮筒钢丝绳与管体接触产生勒痕,破坏了过江管的涂层。针对上述问题提出改进方案,利用内置钢浮筒助浮技术进行沉管,缩短了封航时间,内置浮筒被驮助浮方式避开了浮筒钢丝绳对沉管防腐层的破坏,同时内置钢浮筒沉管更进一步减少对吊船、吊力的要求,具有更好的经济性、安全性。内、外钢浮筒沉管方案比较见表2。

表2 内、外钢浮筒沉管方案比较

Tab.2 Comparison of immersed tube schemes of internal and external steel pontoon

类别	方案一:内置钢浮筒沉管	方案二:外置钢浮筒、气囊沉管
经济	①钢浮筒总重274.7 t(加工、折旧费按2 000元/t计算),成本54.94万元;②安装、拆除钢浮筒成本11.4万元;③使用4艘20 t级吊船、2台100 t履带吊,1艘吊船租金4万元/月、加装A架费用2万元,100 t履带吊租金10万元/月,工期按1个月计,船机成本44万元	①钢浮筒总重244.9 t,钢浮筒成本48.98万元,9个气囊租金成本3万元;②安装、拆除钢浮筒成本6.2万元;③使用8艘20 t级吊船、2台130 t履带吊,1艘船舶租金4万元/月、加装A架费用2万元,130 t履带吊租金12万元/月,工期按1个月计,船机成本72万元
安全	①沉管用的船舶少,总体协调难度小,沉管风险较小;②安装、拆除钢浮筒相对复杂,安全风险相对大	①沉管用的船舶多,对船舶同步操作性要求高,风险相对较高;②安装、拆除钢浮筒难度小,拆除钢浮筒风险小,而拆除气囊难度大,安全风险相对较大
工期	①沉管时间短(横摆就位2 h、灌水3 h、沉管3 h,共计8 h),航道封航时间短(8 h);②钢浮筒安装、拆除工期长,整体工期略长;③沉管完成即可通航	①沉管时间相对较长(24 h),需拆除9个气囊耗时较多,封航时间长(48 h);②浮筒安装、拆除相对容易,整体工期略短;③需要拆除江中6个浮筒才能通航(需24 h)
质量	施工质量好	浮筒钢丝绳对沉管外防腐涂层有勒痕,影响管道使用寿命

从表2可以看出,内置钢浮筒沉管经济性总体好于外置钢浮筒沉管,主要是船舶、履带吊机械费用低,钢浮筒制作、安装、拆除费用相对高。在沉管安全性面,前者优于后者。在总工期上,外置钢浮筒沉管优于内置钢浮筒沉管,主要是钢浮筒安装、拆除工期短。在航道封航时间上,内置钢浮筒沉管

只需要8 h,而外置钢浮筒需要封航48 h。

5 结论

外置钢浮筒气囊沉管技术在沉管前期需要气囊进行助浮辅助,在管体灌满水后对气囊进行拆除以方便浮筒独立受力进行过江管的旋转操作,配置的9组气囊需要逐个进行拆除,耗时较长,且拆除时

存在受力不对称问题,增加了沉管的风险;内置钢浮筒助浮沉管不需要气囊助浮,整个沉管过程8 h可以完成,有效减少了航道封航时间,对周边航运经济影响小。内置钢浮筒与外置钢浮筒相比,只有沉管管体迎流,迎流面积减少了29%,沉管所受水流力减少29%,沉管所需吊船、吊力均可减少,由原来需8艘小型吊船减少到4艘。外置钢浮筒的拆除需要用到吊船作业,进而影响到航道的通行。同时外置钢浮筒沉管旋转过程中,浮筒钢丝绳作用于管体,会造成管体油漆破坏,影响沉管使用年限。

采用内置钢浮筒助浮沉管技术解决了吊船资源受限等沉管问题,施工过程中大量运用新技术、有限元软件模拟静力分析,实现了施工前全程模拟可视化,为施工过程可控打下良好基础。

#### 参考文献:

- [1] 肖杨洋,巫志文,潘明煌,等. U型过江管道沉放施工过程动力响应分析[J]. 人民长江,2022(5):204-212.  
XIAO Yangyang, WU Zhiwen, PAN Minghuang, *et al.* Dynamic response analysis on U-shaped river-crossing pipeline during immersing construction process [J]. Yangtze River, 2022(5):204-212(in Chinese).
- [2] 方一如,林平均,巫志文,等. 多浮体耦合的长大过江弯管系统沉放过程动力响应数值仿真分析[J]. 船舶力学,2022,26(1):136-149.  
FANG Yiru, LIN Pingjun, WU Zhiwen, *et al.* Numerical simulation analysis of dynamic response of long and huge river crossing curved pipeline system with coupling multiple floating bodies [J]. Ship Mechanics, 2022,26(1):136-149(in Chinese).
- [3] 何刚,王健. 长距离深槽特大口径整体沉管设计与施工[J]. 给水排水,2021,47(2):123-127,132.  
HE Gang, WANG Jian. Design and construction of long distance and large diameter integral pipeline sinking in deep channel river [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021,47(2):123-127, 132(in Chinese).
- [4] 曾劲松. 长大弯管道过江沉放施工技术[J]. 建筑技术开发,2022(19):51-55.  
ZENG Jingsong. Construction technology of long curved pipeline crossing the river [J]. Building Technique Development, 2022(19):51-55(in Chinese).
- [5] 于孝民,丁北斗,方建国,等. 大直径长距离输水沉管施工技术研究[J]. 中国水利,2018(16):52-55.  
YU Xiaomin, DING Beidou, FANG Jianguo, *et al.* Research on immersed pipe construction technology of the large diameter long-distance water delivery pipe [J]. China Water Resources, 2018(16):52-55(in Chinese).
- [6] 邓应康. 大口径输水钢管过河沉管的设计与施工[J]. 中国给水排水,2011,27(6):6-11.  
DENG Yingkang. Design and construction of sinking of large-diameter steel water transmission steel pipeline for river crossing [J]. China Water & Wastewater, 2011,27(6):6-11(in Chinese).
- [7] 边大勇,杜颖,刘建峰,等. 海底埋设管线平管起吊运动分析[J]. 船舶工程,2015,37(12):92-97.  
BIAN Dayong, DU Ying, LIU Jianfeng, *et al.* Analysis on horizontal tube lifting motion of subsea buried pipeline [J]. Ship Engineering, 2015, 37(12):92-97(in Chinese).
- [8] 王鹏飞,孔祥利,赵新义,等. 大型钢管沉管施工技术分析[J]. 浙江水利水电专科学校学报,2010,22(3):34-37.  
WANG Pengfei, KONG Xiangli, ZHAO Xinyi, *et al.* Analysis on immersed pipe construction for large-scale steel pipe [J]. Journal of Zhejiang Water Conservancy and Hydropower College, 2010, 22(3):34-37(in Chinese).

**作者简介:**晏伟(1984—),男,湖南岳阳人,本科,工程师,一级建造师,主要从事电厂循环水系统、给排水管道、隧道等施工工作。

**E-mail:**yanwei224230@163.com

**收稿日期:**2024-03-07

**修回日期:**2024-05-03

(编辑:衣春敏)