

深中通道沉管隧道合龙口长度评估

刘兆权¹, 锁旭宏^{2,3*}, 苏小宁²

(1. 中交第一航务工程局有限公司, 天津 300461; 2. 兰州交通大学测绘与地理信息学院,
甘肃 兰州 730070; 3. 中交一航局第二工程有限公司, 山东 青岛 266071)

摘要: 针对深中通道沉管隧道合龙口长度评估问题, 对隧道长度测量精度进行分析, 并对合龙口里程进行预测。通过分析洞内导线贯通测量精度、测量塔投点测量精度以及管节长度偏差等因素, 评估了隧道长度测量的可靠性。同时, 结合实测数据, 对合龙口里程进行了预测, 为最终接头制作配切提供参考数据。

关键词: 深中通道; 沉管隧道; 合龙口长度; 测量精度; 里程预测

中图分类号: U652.6; U612.334 文献标志码: A 文章编号: 2095-7874(2024)07-0006-05

doi:10.7640/zggwjs202407002

Evaluation of closure gap length of immersed tube tunnel in Shenzhen-Zhongshan Link

LIU Zhao-quan¹, SUO Xu-hong^{2,3*}, SU Xiao-ning²

(1. CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Tianjin 300461, China; 2. Faculty of Geomatics, Lanzhou Jiaotong University,
Lanzhou, Gansu 730070, China; 3. No.2 Engineering Co., Ltd. of CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd.,
Qingdao, Shandong 266071, China)

Abstract: Aiming at the problem of evaluating the closure gap length of the immersed tube tunnel in the Shenzhen-Zhongshan Link, the measuring accuracy of tunnel length was analyzed, and the mileage of closure gap was predicted. The reliability of tunnel length measurement was evaluated by analyzing the factors such as the accuracy of in-hole guide wire breakthrough survey, the accuracy of measurement tower casting point survey, and segment length deviation. Meanwhile, combining measured data, the mileage of the closure gap was predicted, which provides reference data for the preparation of the final joint cutting.

Key words: Shenzhen-Zhongshan Link; immersed tube tunnel; closure gap length; measurement accuracy; mileage prediction

0 引言

随着我国基础设施建设的快速发展, 跨海通道工程逐渐成为交通建设的重要方向。深中通道作为连接广东省深圳市和中山市的重要跨海通道, 对于促进区域经济一体化具有重要意义。其中, 沉管隧道作为深中通道的核心工程之一, 其合龙口长度的准确评估对于隧道施工和最终接头制作配切具有关键作用^[1-2]。

合龙口长度是指沉管隧道最终接头两侧管节之间的距离, 其准确评估对于确保隧道施工质量和安全具有重要意义。然而, 在实际施工过程中, 受管节预制精度、管节安装偏差及接头 GINA 压缩等诸多因素的影响, 合龙口长度往往与设计值存在一定的差异。因此, 对合龙口长度进行准确评估, 对于确保隧道施工质量和安全具有重要意义。

收稿日期: 2024-01-05 修回日期: 2024-04-26

作者简介: 刘兆权 (1980—), 男, 山东青岛人, 正高级工程师, 测量工程专业, 主要从事工程测量施工技术管理与研究工作。

*通讯作者: 锁旭宏, E-mail: 1398900215@qq.com

本研究针对深中通道沉管隧道合龙口长度评估问题,对隧道长度测量精度进行分析,并对合龙口里程进行预测。通过分析洞内导线贯通测量精度、测量塔投点测量精度以及管节长度偏差等因素,评估了隧道长度测量的可靠性。同时,结合实测数据,对合龙口里程进行了预测,为最终接头制作配切提供参考数据。

1 工程概况

深中通道岛隧工程已完成 E1—E20 管节及 E24—E32 管节的浮运安装。E21—E22 管节已完成浇筑。受管节预制精度、管节安装偏差及接头 GINA 压缩等诸多影响因素的累积,当前 E20 管节和 E24 管节安装的实际轴线和里程同设计相比,均存在不同程度的差异。结合目前沉管隧道长度和待安管节预制长度的实测量值情况,对最终接头合龙口尺度进行预估,为最终接头制作配切提供参考数据。

E20 管节安装完成后贯通测量里程偏短 46.0 mm(偏向中山侧),E24 管节安装完成后贯通测量里程偏短 35.1 mm(偏向深圳侧)。

E1—E20 管节及 E24—E32 管节安装期间,分别在 E15、E18、E20 管节和 E29、E26、E24 管节采用“测量塔投点+GNSS 静态观测”方法对洞内贯通测量成果和沉管安装精度进行检核。

东人工岛侧沉管安装“测量塔投点+GNSS 静态观测”和洞内贯通测量结果在 X、Y 方向上的坐标差值分解至管节横向轴线和里程方向^[3-4],横线轴线方向最大偏差 11.0 mm(E24 管节),里程方向最大偏差 9.3 mm(E24 管节)。

西人工岛侧沉管安装“测量塔投点+GNSS 静态观测”和洞内贯通测量结果在 X、Y 方向上的坐标差值分解至管节横线轴线和里程方向,横向轴

线方向最大偏差 4.2 mm(E18 管节),里程方向最大偏差 14.4 mm(E18 管节)。

2 隧道长度测量精度分析

E1—E20 管节及 E24—E32 管节安装期间的隧道长度测量方法采用洞内贯通测量为主,测量塔投点+GNSS 静态观测为辅的方法,隧道长度测量误差主要包括洞外 GNSS 控制网测量误差、洞内外激光投点误差、进洞导线的测距长度误差及导线测距长度投影改正误差等。

2.1 进洞导线纵向贯通测量精度分析

贯通测量进洞导线分洞内测量与洞外测量两部分。洞外测量通过与深中通道独立控制网 GNSS 联测确定进洞导线起算点位坐标,洞内测量通过全站仪测量导线,其隧道纵向贯通测量精度主要受洞外点位 GNSS 网测量误差和洞内导线网测量误差的影响。

2.1.1 E20 管节洞内导线纵向贯通测量精度分析

1) 洞外 GNSS 网测量误差

洞外控制网点观测使用 GNSS,静态平面标称精度 $\pm(5\text{ mm}+0.5\times10^{-6}D)$ (D 为测距,mm,下同),按照 JTG C10—2007《公路勘测规范》二等 GPS 测量,洞外控制网点基线平均边长 3 km,测距边测距中误差估算 $\sigma_s=\pm\sqrt{5^2+(0.5\times13)^2}=\pm5.22\text{ mm}$ 。

2) 洞内导线网测距误差

E20 管节贯通测量布设左右车道联合双导线网,网形如图 1 所示,近似为等边直伸支导线进行纵向精度估算,洞内导线观测使用 Leica TS60 全站仪,测距误差为 $\pm(1.0\text{ mm}+1\times10^{-6}D)$,边长不足 1 km 时按 1 km 计算,导线边长平均约 700 m,共 6 条导线边,纵向测量精度估算结果如下:

$$\sigma=\pm\sqrt{n}\sigma_s=\pm\sqrt{6}(1.0+1.0)=\pm4.90\text{ mm}$$

式中: σ_s 为距离观测误差; n 为导线边数。

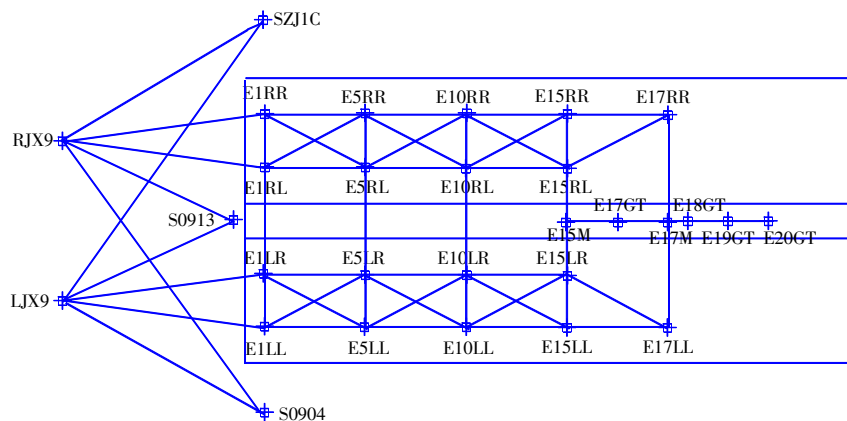


图 1 E20 管节贯通测量网型

Fig. 1 E20 pipe segment breakthrough survey network type

3) 贯通测量纵向综合误差

综上所述, E20 管节贯通测量纵向综合中误差为 $\pm\sqrt{5.22^2+4.90^2}=\pm 7.16\text{ mm}$ 。

2.1.2 E24 管节洞内导线纵向贯通测量精度

1) 洞外 GNSS 网+投点测量误差

洞外控制网点观测使用 GNSS, 静态平面标称精度 $\pm(5\text{ mm}+0.5\times 10^{-6}D)$, 按照《公路勘测规范》二等 GPS 测量, 洞外控制网点基线平均边长 3 km, 测距边测距中误差估算 $\sigma_s=\pm\sqrt{5^2+(0.5\times 3)^2}=\pm 5.22\text{ mm}$ 。

东人工岛堰筑段内贯通测量导线起算点通过洞外 GNSS 静态+激光投点建立, 因此, 洞内导线起算点点位中误差评估与测量塔投点精度一致, $m_l=m_{\text{投}}=\pm 3.80\text{ mm}$ ($m_{\text{投}}$ 为激光投点误差, 见 2.3.2 节)。

堰筑段内投点建立的导线起算点未埋设强制对中装置, 全站仪和棱镜架设的对中安置误差按照 2 mm 估计。因此 E24 洞内导线起算点中误差为 $\pm\sqrt{5.22^2+3.80^2+2.0^2}=\pm 6.76\text{ mm}$ 。

2) 洞内导线网测距误差

E24 管节贯通测量采用支导线, 网形如图 2 所示, 近似为等边直伸支导线进行纵向精度估算, 洞内导线观测使用 Leica TS60 全站仪, 测距误差为 $\pm(1.0\text{ mm}+1\times 10^{-6}D)$, 边长不足 1 km 时按 1 km 计算, 导线边长平均约 400 m, 共 3 条导线边, 纵向测量精度估算结果如下:

$$\sigma=\pm\sqrt{n}\sigma_s=\pm\sqrt{3}(1.0+1.0)=\pm 3.46\text{ mm}$$

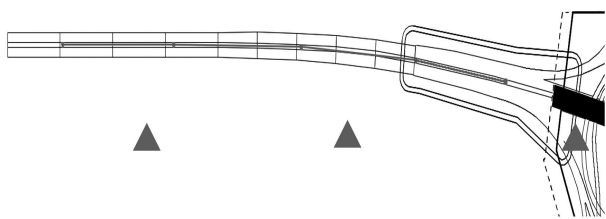


图 2 E24 管节贯通测量网型

Fig. 2 E24 pipe segment breakthrough survey network type

3) 贯通测量纵向综合误差

综上所述, E24 管节贯通测量纵向综合中误差为 $\pm\sqrt{6.76^2+3.46^2}=\pm 7.59\text{ mm}$ 。

2.2 导线归算至深中通道工程+35 m 高程面的测距边长度改正

E26 和 E18 管节安装完成后, 随着沉管安装距离最终接头合龙口位置越来越近, 为了更加精

确预测最终接头合龙口尺度, 在已安管节贯通测量成果和管节安装精度检核数据的基础上, 考虑地球曲率半径的影响, 按照下列公式对导线测距边长进行严密的投影改正^[5]。导线边长投影改正计算公式如下:

$$D_1=D_0'(1+\frac{H_p-H_m}{R_A})$$

式中: D_1 为导线测距边长度, m; D_0' 为导线测距两端点的平均高程面的水平距离, m; H_p 为深中通道工程投影面高程+35.0, m; H_m 为导线测距两端的平均高程, m; R_A 为地球曲率半径, 约为 6 371 km。本项改正只针对管节里程方向, 不影响管节横向轴线方向。

通过上式计算, E18 管节 3.5 km 导线测距边长度投影累计改正+28.0 mm, E26 管节 1.1 km 导线测距边长度投影累计改正+6.9 mm, 改正后的 E18 和 E26 管节贯通测量里程偏差相较改正前的里程偏差总体减少 34.9 mm。

2.3 测量塔投点坐标确定隧道长度的精度

2.3.1 测量塔投点测量原理

测量塔投点是在沉管对接完成、压载结束, 在测量塔顶架设 GNSS 接收机与深中通道独立控制网联测, 确定测量塔顶端坐标, 然后在隧道内架设投点仪, 利用投点仪将测量塔顶端坐标穿过人孔井传递到管节内部连接点上, 确定连接点坐标; 在管内架设全站仪, 利用洞内导线测量成果测出连接点坐标, 对比两种方法得到的连接点坐标^[6]。测量塔投点如图 3 所示。

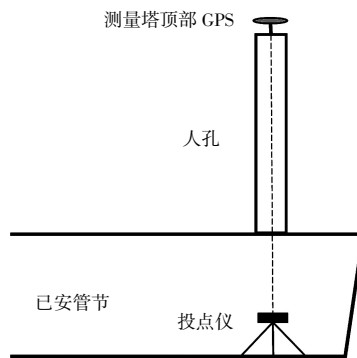


图 3 测量塔投点示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the casting points of the measuring tower

2.3.2 测量塔投点误差

根据测量塔投点工作原理可知, 测量塔投点误差主要包括 GNSS 测量点位误差、投点误差和

极坐标测量放样误差。

1) GNSS 测量点位误差

测量塔顶部架设 GNSS, 静态平面标称精度 $\pm(5 \text{ mm}+0.5 \times 10^{-6}D)$, 按照《公路勘测规范》二等 GPS 测量, 洞外控制网点基线平均边长 3 km, 测距边测距中误差估算 $m_1=\pm\sqrt{5^2+(0.5 \times 3)^2}=\pm 5.22 \text{ mm}$ 。

2) 投点误差

通过测量塔人孔把 T 点的坐标投射到隧道内部, 投点记为 J, 即 J 点的点位误差包括投点仪的仪器误差和对中、整平等误差^[7]。

仪器误差: 仪器置平后, 仪器误差主要指仪器竖轴误差。按激光投点仪的设计要求, 仪器竖轴与轴套间的最大夹角不得超过水准管格值的 0.2~0.5 倍, 取极值 $0.5\tau_1$, 则由此而引起的投点仪器竖轴误差 m_1 为:

$$m_1=\pm\frac{0.5\tau_1s}{\rho}$$

式中: τ_1 为水准管分划值; $\rho=206\,265''$; s 为投点深度。

仪器安置误差 m_2 : 根据以往实测经验分析, 仪器安置误差 1~2 mm, m_2 取极大值, 则 $m_2=\pm 2 \text{ mm}$ 。

确定激光光斑中心点的误差 m_3 : 对于精度为 1/20 000 的激光投点仪, 投点深度 50 m 左右时, 可取确定光斑中心点的误差 $m_3=\pm 3 \text{ mm}$ 。

综上所述, 激光投点误差 $m_{\text{投}}$, 主要由仪器竖轴误差 m_1 、仪器安置误差 m_2 、确定激光光斑中心点的误差 m_3 等几部分误差综合影响, 即:

$$m_{\text{投}}=\pm\sqrt{m_1^2+m_2^2+m_3^2}=\pm\sqrt{0.25\left(\frac{\tau_1s}{\rho}\right)^2+(0.002)^2+(0.003)^2}$$

取 $s=50 \text{ m}$, $\tau_1=20''/2 \text{ mm}$, 代入上式得:

$$m_{\text{投}}=\pm 3.80 \text{ mm}$$

3) 全站仪测量放样误差

利用全站仪进行管内投点坐标测量时, 全站仪至投点的距离约 20 m。全站仪的测距误差为 $\pm(1.0 \text{ mm}+1 \times 10^{-6}D)$, 边长不足 1 km 时按 1 km 计算, 距离测量误差为 2.0 mm。则极坐标放样误差:

$$m_{\text{f}}=\pm\sqrt{m_d^2+e^2+\left(\frac{m_\beta}{\rho}D\right)^2+\tau_2^2}=\pm 2.44 \text{ mm}$$

式中: m_d 为测距误差, 取 2.0 mm; e 为仪器和棱镜对中误, 差取 1.0 mm; m_β 为测角误差, 取 $1''$; D 为测距边长; ρ 为 206 265''; τ_2 为放样点标定误差, 取 1 mm。

4) 投点确定隧道长度总误差

综合上述各项误差, 测量塔投点测量隧道长度的总误差 $M_{\text{投总}}=\pm\sqrt{m_T^2+m_{\text{投}}^2+m_F^2}=\pm 6.90 \text{ mm}$ 。

2.4 小结

隧道长度导线贯通测量方法和测量塔投点测量方法理论精度相当, 隧道导线测距边长经投影改正后, 2 种方法测量的隧道长度结果互差在 10 mm 左右, 其成果差值均在测量精度评估误差范围之内, 由此验证了目前洞内导线贯通测量成果的精度及其可靠性。

洞内导线贯通测量(全站仪坐标法)现场便于重复操作与检核, 可以作为测定隧道长度的主要方法; 测量塔投点法可以作为检核方法。后续 E21—E22 管节安装中继续采用 2 种方法对隧道里程和横向轴线进行复核检验。待 E24 管节端提供精密导线测量条件, 采用左右车道双线形联合锁网对 E24 管节安装精度进行检验^[8-9]。

3 合龙口里程预测

3.1 参数选取

3.1.1 导线测距误差

E20 管节贯通测量隧道长度偏短 46.0 mm(偏中山侧), 导线测距贯通测量理论估算中误差为 $\pm 7.16 \text{ mm}$; E24 管节贯通测量隧道长度偏短 35.1 mm(偏深圳侧), 导线测距贯通测量理论估算中误差 $\pm 7.59 \text{ mm}$ 。

正负 1 倍标准偏差的概率 68.3%, 正负 2 倍标准偏差的概率 95.5%, 正负 3 倍标准偏差的概率 99.7%, 取 2 倍标准偏差作为导线测距的极限误差, E20 管节导线测距极限误差 $\pm 14.32 \text{ mm}$, E24 管节导线测距极限误差 $\pm 15.18 \text{ mm}$ 。

3.1.2 管节长度偏差

1) E1—E22 管节出运前联合验收情况

E1—E22 管节出运前联合测控中心进行管节制作精度的测量验收, 管节长度较设计最大偏长 22.0 mm(E5 管节), 最小偏短 5.5 mm(E4 管节); E1—E22 管节长度较设计累计偏长 161.2 mm, 平均每管节偏长 7.3 mm。

2) E1—E22 管节浇筑后长度监测情况

E1—E22 管节桂山岛浇筑后顶推至一次舾装区, 联合测控中心对管节浇筑后的线形进行复核测量, E1—E22 管节浇筑后的长度较设计累计偏长约 115.5 mm, 相较出运前的管节长度偏差缩短 45.7 mm。

3) E1—E20 管节安装后长度监测情况

E1—E20 管节浇筑后, 通过贯通测量计算管节长度, E1—E20 管节安装后长度较设计累计偏短 104.6 mm。

E1—E20 管节安装后的长度相较管节浇筑后的长度普遍缩短, 管节长度累计缩短量 203.7 mm, 按平均每节沉管缩短 10.2 mm (203.7/20) 计算, E21—E23 管节可能累计缩短量级 30.6 mm。

4) 待安装管节长度偏差

已完成预制浇筑的 E21—E22 管节长度, 按照管节浇筑后的实测量偏差考虑。

未完成预制的 E23 管节长度误差评估原则为:

①不考虑管节预制偏差; ②按照出厂预制长度平均偏长+7.3 mm 考虑; ③按照管节预制长度设计允许偏差 $\pm(10+(L-20)/10) \approx \pm 24$ mm 考虑。

3.1.3 GINA 压缩量偏差

沉管安装完成后, 在结合腔选取 14 个 GINA 压缩量测点部位, 测点分布见图 4。采用钢直尺量测, 计算 GINA 实际压缩量。

通过对 E1—E20 管节 GINA 压缩量进行统计, E1—E20 管节设计 GINA 压缩量 4 476.0 mm, 量

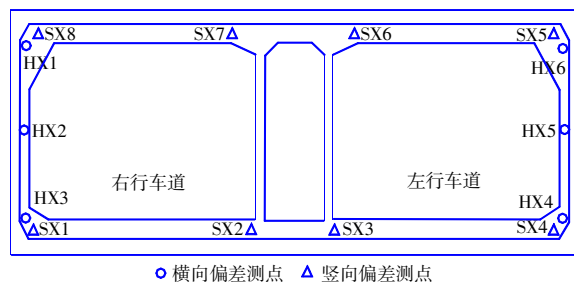


图 4 结合腔 GINA 压缩量量测示意图

Fig. 4 Schematic of the GINA compression measurement of the joint cavity

测计算后 GINA 压缩量 4 671.4 mm, 换算 GINA 压缩量较设计累计偏小 195.4 mm, 平均每个管节 GINA 压缩量偏小 9.8 mm。

在 GINA 自然压接状态下, 参考端钢壳面板制作平整度 ± 4 mm 设计允许误差, E21—E23 管节 GINA 压缩量累计误差可能达到+10 mm。

3.2 预测结果

当前阶段 E23 管节预制长度误差未知, 合龙口尺度预估计算分别按照不考虑 E23 管节预制偏差、E1—E22 管节预制长度平均偏差、预制长度设计允许偏差 3 种方案进行。比选方案见表 1。

表 1 E24 和 E20 管节安装后合龙口尺度预估

Table 1 The closure size estimation after the installation of E24 and E20 pipe segments

方案	贯通测量里程偏差/mm		误差影响因素/mm									预估合龙口里程偏差/mm
	E24	E20	导线测距误差		管节长度偏差						GINA 压缩影响	
					预制偏差			水下形变				
			E24	E20	E21	E22	E23	E21	E22	E23		
1	-35.1	-46.0	±15.3	±14.3	+9.6	+6.8	0	-10.2	-10.2	-10.2	+10	比设计宽度增加约 85±30
2	-35.1	-46.0	±15.2	±14.3	+9.6	+6.8	+7.3	-10.2	-10.2	-10.2	+10	比设计宽度增加约 85-7±30
3	-35.1	-46.0	±15.2	±14.3	+9.6	+6.8	±24.0	-10.2	-10.2	-10.2	+10	比设计宽度增加约 85±24±30

4 结论与建议

4.1 结论

本研究通过对深中通道沉管隧道合龙口长度评估问题的研究, 分析了隧道长度测量精度、测量塔投点坐标确定隧道长度的精度以及合龙口里程预测。研究表明, 通过对隧道长度测量精度和测量塔投点坐标的分析, 可以较为准确地评估合龙口里程预测值。

4.2 建议

针对合龙口长度评估问题, 提出以下建议:

在实际施工过程中, 应加强对隧道长度测量精度的控制, 确保测量结果的准确性;

在合龙口里程预测过程中, 应充分考虑各种

因素的影响, 提高预测结果的准确性;

在后续研究中, 可以尝试采用更多先进的测量技术和方法, 提高隧道长度测量的精度。

通过以上研究, 为深中通道沉管隧道合龙口长度的准确评估提供了理论依据和技术支持。在实际工程中, 还需结合实际测量数据, 不断完善和优化预测方法, 以确保隧道施工的顺利进行。

总之, 深中通道沉管隧道合龙口长度评估研究为隧道施工提供了有益的参考。未来研究方向可以从高精度测量技术、数据处理与分析方法、合龙口里程预测模型优化、施工过程监控与控制等方面进行拓展, 以期能为隧道工程提供更优质的

(下转第 33 页)