

DOI:10.13203/j.whugis.20170196



文章编号:1671-8860(2019)05-0640-08

# 港珠澳大桥沉管隧道施工控制网布设研究

黄声享<sup>1,2</sup> 李冠青<sup>1</sup> 张 文<sup>1</sup> 王新鹏<sup>1</sup>

1 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

2 地球空间信息技术协同创新中心,湖北 武汉,430079

**摘 要:**针对港珠澳大桥沉管隧道特殊的测量环境和超高的贯通精度要求,对其施工平面控制问题进行了研究。依据测量误差分配理论,研究了长距离沉管隧道贯通误差的合理分配方案;采用贯通误差严密估算方法,分析了沉管隧道内外控制网横向贯通误差影响规律。提出了一种适宜沉管隧道结构的双线形联合锁网布测方法,通过陆地上1:1模拟试验和工程实际应用验证了双线形联合锁网的精度和可靠性。与全导线网相比,其平面控制精度提高15%~30%,平均多余观测分量提高约4%,能够满足外海超长沉管隧道的贯通精度要求,有效保障了工程的精准贯通。

**关键词:**沉管隧道;施工控制网;贯通误差;双线形联合锁网

**中图分类号:**P258

**文献标志码:**A

自1910年底特律河铁路隧道建成以来,沉管隧道已有近110 a的发展历史<sup>[1]</sup>,但直到1999年丹麦-瑞典厄勒通道4.1 km长的隧道完工,才标志着第一座真正意义上离岸跨海沉管隧道的出现<sup>[2]</sup>。2005年建设的韩国釜山-巨济通道,沉管隧道部分长3.3 km,是第二座沉管浮运和安装对接均在开敞海域完成的沉管隧道<sup>[3]</sup>。2017年贯通建成的港珠澳大桥沉管隧道是世界上又一座外海沉管隧道,长6.7 km<sup>[4]</sup>,是中国第一座、也是目前世界上最长的已贯通沉管隧道。

港珠澳大桥是集桥、岛、隧于一体的超大型跨海通道,岛隧工程是其施工控制性工程,包括沉管隧道和东、西人工岛3大部分(见图1)。其中,沉管段长5 664 m,由33个管节和最终接头组成,标准管节长180 m,自西往东分别是 $E_1 \sim E_{33}$ ,最终接头位于 $E_{29}$ 和 $E_{30}$ 之间,最终接头的西侧为直线,东侧为曲线<sup>[5]</sup>;东、西人工岛位于沉管隧道两端,实现桥、隧转换,面积约 $200 \text{ m} \times 600 \text{ m}$ <sup>[6]</sup>。与矿山法和盾构法等隧道不同,沉管隧道是由预制好的管节浮运至施工区域沉放安装、相互拼接而成。与暗挖法隧道相比,沉管隧道不仅要针对不同施工面的最终贯通偏差进行控制,还要评估每一个管节的安装效果,为后续管节的安装提供指

导,这无疑对贯通测量提出了更高的技术要求。



图1 岛隧工程平面图

Fig. 1 Plan of Island and Tunnel Project

目前,沉管隧道贯通测量尚无规范及标准可供参考,现行的《工程测量规范》《公路勘测规范》和《高速铁路工程测量规范》对相向开挖长度4~7 km的隧道,横向贯通限差要求为130~150 mm,而港珠澳大桥沉管隧道提出了70 mm的横向贯通限差控制要求,其精度远高于现行规范的规定。因此,为保障海上长距离沉管隧道的高精度贯通要求,有必要开展沉管隧道施工控制网布设研究。本文首先根据测量误差分配理论,充分考虑沉管隧道工程实际情况,合理分配并确定地面控制测量和隧道内西、东岛侧控制测量引起的横向贯通误差;然后利用横向贯通误差估算方法,研究隧道外GPS网和隧道内构建的双线形联合锁网引起的总横向贯通误差,以确保70 mm的横向贯通限差控制要求,并结合陆地上1:1模拟试验和工程应用进行了验证。

收稿日期:2018-03-08

项目资助:国家自然科学基金(41274020)。

第一作者:黄声享,博士,教授,主要研究方向为变形监测与灾害预警、卫星导航定位技术、精密工程测量。sxhuang@whu.edu.cn

通讯作者:李冠青,博士生。liguanqing@whu.edu.cn

## 1 横向贯通误差的分配

沉管隧道横向贯通误差由隧道外控制测量、隧道内控制测量、管节标定测量等几部分引起。管节标定测量可在预制厂内进行,标定点距离控制点较近,环境稳定,其测量误差影响容易控制,可忽略不计,所以沉管隧道横向贯通误差主要由隧道外控制测量和隧道内控制测量引起。港珠澳大桥沉管隧道从东、西人工岛相向施工,一个贯通面,由横向贯通限差70 mm可得其横向贯通误差 $m$ 为 $\pm 35$  mm,以此作为贯通测量精度设计的依据。

### 1.1 隧道内外控制测量引起的横向贯通误差分配

设隧道外与隧道内控制测量引起的横向贯通误差分别为 $m_s$ 和 $m_u$ ,且 $m_s$ 和 $m_u$ 相互独立。令 $m_u = km_s$ ,则:

$$m^2 = m_u^2 + m_s^2 = m_s^2(1 + k^2) \quad (1)$$

实际中,隧道外控制测量采用GPS网,隧道内为狭长型边角网。与隧道内控制测量相比,隧道外控制测量引起的横向贯通误差相对偏小,甚至可以忽略<sup>[7]</sup>。为便于比较,对 $k$ 取不同值,可得 $m_s$ 和 $m_u$ 的分配关系(见表1)。

表1  $k$ 取不同值时的 $m_s$ 和 $m_u$ 分配关系/mm

误差项	$k$					
	1	2	3	4	5	6
$m_s$	24.7	15.7	11.1	8.5	6.9	5.8
$m_u$	24.7	31.3	33.2	34.0	34.3	34.5

分析表1不难发现,当 $k \geq 3$ 时, $k$ 值继续增大, $m_u$ 变化幅度不大,但对 $m_s$ 依然有影响。如 $k$ 值由3增大到4, $m_u$ 仅增大2.4%,而 $m_s$ 的变化有23.4%。可见,当 $k > 3$ 时,既不能有效缓解隧道内精度控制的难度,又会对隧道外控制测量造成过高的要求。所以, $k=3$ 较为适宜,即按1:3的比例对隧道外和隧道内进行横向贯通误差分配,可得 $m_s = \pm 11.1$  mm, $m_u = \pm 33.2$  mm。

### 1.2 隧道内两端控制测量引起的横向贯通误差分配

考虑到沉管隧道的贯通面不在中间,贯通面至西人工岛隧道口的距离 $S_w$ 为5.6 km,至东人工岛隧道口的距离 $S_e$ 为1.1 km,设西岛端和东岛端隧道内控制测量引起的横向贯通误差分别为 $m_{u1}$ 和 $m_{u2}$ ,隧道内横向贯通误差 $m_u$ 的一种简化算

法为<sup>[8]</sup>:

$$m_u = 0.6n^{3/2} \cdot S \cdot \sigma_\beta \quad (2)$$

式中, $n$ 为导线的边数; $S$ 为导线边的长度; $\sigma_\beta$ 为测角误差。取西岛端的导线边长 $S_1 = 0.72$  km,导线边数为 $n_1$ ,东岛端的导线边长 $S_2 = 0.18$  km,导线边数为 $n_2$ ,则:

$$S_w = n_1 \cdot S_1 = 0.72n_1 \quad (3)$$

$$S_e = n_2 \cdot S_2 = 0.18n_2 \quad (4)$$

令 $m_{u1} = tm_{u2}$ ,由式(2)有:

$$t = \frac{m_{u1}}{m_{u2}} = \frac{0.6n_1^{3/2} \cdot S_1 \cdot \sigma_\beta}{0.6n_2^{3/2} \cdot S_2 \cdot \sigma_\beta} = 5.76$$

为进一步比较,也可以通过对 $t$ 取不同的值来分析 $m_{u1}$ 和 $m_{u2}$ 的分配关系(见表2)。由表2可见, $t \geq 3$ 时,随着 $t$ 的增大, $m_{u1}$ 变化渐缓,而 $m_{u2}$ 减小较快。这表明过度提高东岛端隧道内控制测量的精度,无助于改善西岛端隧道内控制测量的难度。

表2  $t$ 取不同值时的 $m_{u1}$ 和 $m_{u2}$ 分配关系/mm

误差项	$t$						
	1	2	3	4	5	5.76	6
$m_{u1}$	23.5	29.7	31.5	32.2	32.6	32.7	32.7
$m_{u2}$	23.5	14.8	10.5	8.1	6.5	5.7	5.5

可见,简单地按式(2)简化算法来推算隧道内横向贯通误差 $m_{u1}$ 和 $m_{u2}$ 的分配关系并不恰当。因此取 $t=3$ ,即西岛侧和东岛侧按3:1的比例进行横向贯通误差分配,其结果为 $m_{u1} = \pm 31.5$  mm, $m_{u2} = \pm 10.5$  mm。

最终确定出地面控制测量和隧道内西、东岛侧控制测量引起的横向贯通误差分别为 $\pm 11.1$  mm、 $\pm 31.5$  mm和 $\pm 10.5$  mm。

## 2 横向贯通误差估算方法

### 2.1 地面控制网引起的横向贯通误差

如图2所示, $J$ 、 $C$ 为隧道进出口的控制点, $A$ 、 $B$ 为其对应的定向点, $G$ 为贯通点,且工程坐标系 $y$ 轴与隧道贯通面垂直。假设定向边与进洞方向的连接角和隧道内控制测量不存在误差,分别从隧道进口控制点 $J$ 和出口控制点 $C$ 推算出贯通点 $G_J$ 和 $G_C$ ,且 $G_J$ 和 $G_C$ 不重合,其横坐标差的中误差即是地面GPS网引起的横向贯通误差影响值。影响值的权函数式 $d(\Delta X_G)$ 为<sup>[9]</sup>:

$$d(\Delta X_G) = -(1 + b_{JA}\Delta y_{JG})dx_J - a_{JA}\Delta y_{JG}dy_J + b_{JA}\Delta y_{JG}dx_A + a_{JA}\Delta y_{JG}dy_A - b_{CB}\Delta y_{CG}dx_B - a_{CB}\Delta y_{CG}dy_B + (1 + b_{CB}\Delta y_{CG})dx_C + a_{CB}\Delta y_{CG}dy_C \quad (5)$$

式中,  $\Delta y_{JG} = y_G - y_J$ ;  $\Delta y_{CG} = y_G - y_C$ ;  $a_{JA}$ 、 $b_{JA}$ 、 $a_{CB}$ 、 $b_{CB}$ 是方位角  $\alpha_{JA}$ 、 $\alpha_{CB}$  微分式的系数, 可以根据  $J$ 、 $C$ 、 $A$ 、 $B$  点的坐标计算得到。

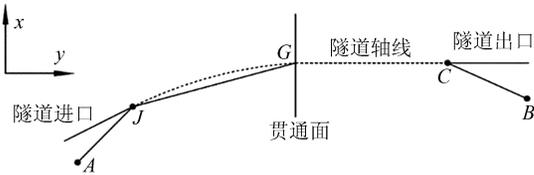


图2 地面控制网引起的横向贯通误差估算

Fig. 2 Evaluation of Lateral Breakthrough Error Caused by Surface Network

## 2.2 隧道内控制网引起的横向贯通误差

隧道距离较长、精度要求较高时,隧道内导线常布设成导线网的形式,式(2)不再适用,需要采用严密估算方法对横向贯通误差影响值进行估算。首先,根据控制网网型和工程设计图纸确定控制点的位置,推算各网点的概略坐标值,假设进洞点和定向点不存在误差,根据选用仪器的精度,模拟各边边长和角度观测值。然后,根据最小二乘原理,对隧道内控制网模拟观测值进行平差:

$$\hat{x} = (A^T P A)^{-1} A^T P l \quad (6)$$

$$D_{\hat{x}\hat{x}} = \sigma_0^2 Q_{\hat{x}\hat{x}} = \sigma_0^2 (A^T P A)^{-1} \quad (7)$$

式中,  $\hat{x}$  是  $t$  个未知点坐标参数向量的估值;  $A$  是  $n \times t$  阶的系数矩阵;  $P$  是权阵;  $l$  是  $n$  维观测向量;  $\sigma_0^2$  是单位权方差;  $D_{\hat{x}\hat{x}}$  和  $Q_{\hat{x}\hat{x}}$  是未知点坐标参数向量的方差阵和协因数阵。最后,分别由进口端和出口端隧道内控制测量得到贯通点  $G'$  和  $G''$ ,  $D_G$  是方差阵  $D_{\hat{x}\hat{x}}$  的子矩阵,为:

$$D_G = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_{xy} & \sigma_{xx'} & \sigma_{xy'} \\ \sigma_{xy} & \sigma_y^2 & \sigma_{yx'} & \sigma_{yy'} \\ \sigma_{xx'} & \sigma_{yx'} & \sigma_x^2 & \sigma_{xy'} \\ \sigma_{xy'} & \sigma_{yy'} & \sigma_{xy'} & \sigma_y^2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

贯通点  $G'$  和  $G''$  相对误差椭圆的长半轴  $E$  和短半轴  $F$  分别为:

$$E^2 = \frac{1}{2} \left( \sigma_{\Delta x}^2 + \sigma_{\Delta y}^2 + \sqrt{(\sigma_{\Delta x}^2 - \sigma_{\Delta y}^2)^2 + 4\sigma_{\Delta x \Delta y}^2} \right) \quad (9)$$

$$F^2 = \frac{1}{2} \left( \sigma_{\Delta x}^2 + \sigma_{\Delta y}^2 - \sqrt{(\sigma_{\Delta x}^2 - \sigma_{\Delta y}^2)^2 + 4\sigma_{\Delta x \Delta y}^2} \right) \quad (10)$$

式中,

$$\sigma_{\Delta x}^2 = \sigma_x^2 + \sigma_x^2 - 2\sigma_{xx'} \quad (11)$$

$$\sigma_{\Delta y}^2 = \sigma_y^2 + \sigma_y^2 - 2\sigma_{yy'} \quad (12)$$

$$\sigma_{\Delta x \Delta y} = \sigma_{xy'} - \sigma_{x'y} - \sigma_{x'y'} + \sigma_{xy} \quad (13)$$

长半轴与  $x$  轴的夹角  $\varphi$  为:

$$\tan(2\varphi) = \frac{2\sigma_{\Delta x \Delta y}}{\sigma_{\Delta x}^2 - \sigma_{\Delta y}^2} \quad (14)$$

贯通点  $G'$  和  $G''$  的相对误差椭圆在贯通面上的投影长度的一半即为横向贯通误差影响值,贯通点  $G'$  和  $G''$  的点误差椭圆在贯通面上的投影长度的一半为单侧隧道内控制网引起的横向贯通误差影响值。

## 3 隧道外控制网的布设及其对横向贯通误差的影响

港珠澳大桥隧道工程采用隧道工程坐标系,其投影高程面为正常高 -20.0 m<sup>[10]</sup>。隧道外控制网采用 GPS 网,以指导东、西人工岛和沉管隧道的施工。

由于工程远离陆地,附近均为开敞海域,不具备布设稳定控制点的条件。为给东、西人工岛快速筑岛和岛上前期施工提供定位控制基准,首先在东、西人工岛中轴线北侧约 300 m 海域处各建造了一个测量平台,在平台上各设置一个 GPS 临时参考站 (XP01、DP01) 和一个控制点 (XP02、DP02),并均与大桥首级控制网联测,作为隧道外控制网的起算点;其后在东、西岛测量平台间增设了两个新的测量平台,各布设一个控制点 (1P01、2P01)。除测量平台外,隧道外控制点仅能在面积有限且不稳定的人工岛<sup>[11]</sup>上布设,点位多在岛壁钢圆筒及副格上,控制网如图 3 所示。所有控制点建造有固定观测墩和强制对中装置。

沉管隧道 GPS 控制网有两个特点:(1)东西跨度大,长、短基线边相差悬殊,最短基线不足 100 m,最长基线超过 7 km;(2)岛上 GPS 点更新频繁,点位不稳定,不能长期保留<sup>[12]</sup>。为保障隧道外 GPS 网的精度,采用标称精度优于  $\pm(3 \text{ mm} + 0.5 \times 10^{-6} \text{ m})$ ,与 GPS 点相同数量的双频 GPS 接收机进行 72 h 同步观测,根据广播星历分段解算。GPS 网每季度复测一次,每月检测一次,参照《公路勘测规范》中二等 GPS 控制网的标准实施,具体精度指标为:最弱点点位中误差小于等于  $\pm 5 \text{ mm}$ ,长度小于 300 m 的基线最弱边边长相对中误差不作具体要求,长度大于 300 m 的基线

最弱边边长相对中误差小于等于  $3.3 \times 10^{-6}$  m, 跨海最弱边边长相对中误差小于等于  $1.0 \times 10^{-6}$  m。为确保 GPS 网测量结果的可靠性, 对人工岛上通视的短基线采用全站仪进行检核。至 2017 年沉管隧道贯通, 隧道外 GPS 网共进行了 17 次

复测, 复测成果(见图 4)满足控制网的精度指标要求, 最弱点点位中误差小于 2 mm, 长度大于 300 m 的基线最弱边边长相对中误差小于  $3.1 \times 10^{-6}$  m, 跨海最弱边边长相对中误差小于  $0.5 \times 10^{-6}$  m。

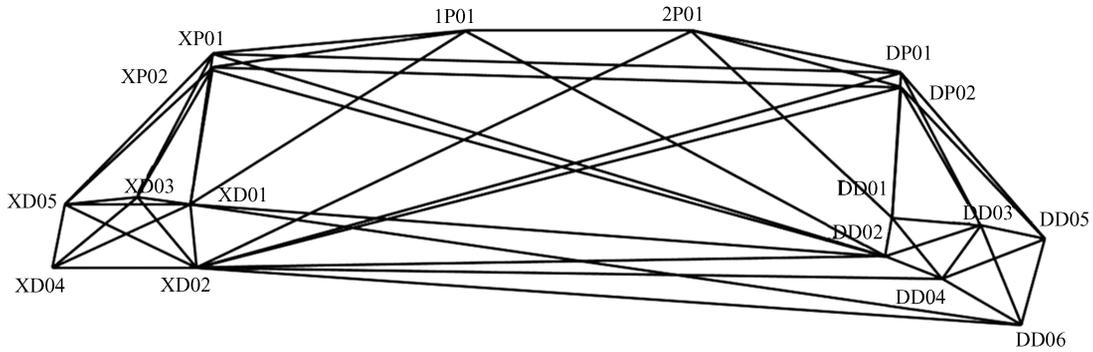


图 3 沉管隧道 GPS 控制网示意图

Fig. 3 Immersed Tunnel Surface GPS Network

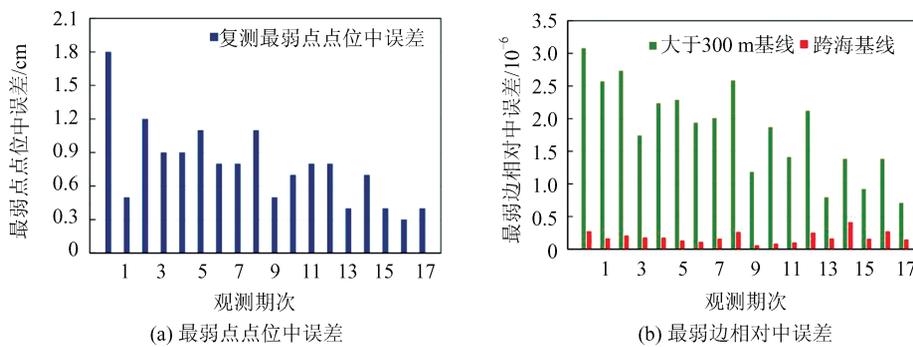


图 4 GPS 网复测成果精度统计

Fig. 4 Error of GPS Network Repeated Surveying

按照式(5), 对图 3 所示的隧道外 GPS 网引起的横向贯通误差  $m_s'$  进行估算, 选用不同的定向点, 估算结果在  $\pm(9.4 \sim 10.6)$  mm 之间。 $m_s'$  取最大值  $\pm 10.6$  mm, 满足  $\pm 11$  mm 的贯通误差分配要求。

#### 4 隧道内双线形联合锁网的构建及其对横向贯通误差的影响

隧道内高精度平面控制网有交叉双导线网和全导线网等布设方式<sup>[9,13-14]</sup>。沉管隧道内通视距离可以达到 4~5 个标准管节, 贯通面西侧每 4 个管节设置一对控制点, 东侧受平面线形曲率影响, 每个管节设置一对控制点。隧道内控制网的角度和距离观测精度分别为  $\pm 0.5''$  和  $\pm(1 \text{ mm} + 1 \times 10^{-6} \text{ m})$ 。按照 §2.2 隧道内控制网引起的横向贯通误差严密估算方法, 对交叉双导线网和全导线网进行精度估算, 结果见表 3。可以发现, 交叉

双导线网和全导线网在精度上都不能满足横向贯通误差的分配要求, 必须进行隧道内控制网布设方案设计研究。

表 3 隧道内控制网引起的横向贯通误差/mm

Tab.3 Estimation of Lateral Error Caused by Underground Network/mm

网型	横向贯通误差		
	西岛侧( $m_{s1}'$ )	东岛侧( $m_{s2}'$ )	总( $m_s'$ )
交叉双导线网	$\pm 46.54$	$\pm 7.56$	$\pm 47.15$
全导线网	$\pm 42.74$	$\pm 7.14$	$\pm 43.33$

按照控制网优化设计方法<sup>[15]</sup>,  $Q_{xx} = (A^T P A)^{-1}$ , 提高控制网的精度可以从优化设计矩阵  $A$  和改变权阵  $P$  两方面着手。在角度和边长均具有较高观测精度的条件下, 本文从增加设计矩阵  $A$  的维数(行和列)入手进行隧道内控制网的优化设计, 以提高隧道内控制测量的精度和可靠

性。具体为:添加新的控制网点,以增加A的列数,添加新的观测量,以增加A的行数,从而改善控制网网形,增强控制网图形结构。

沉管隧道采用两孔一管廊结构,如图5所示,左、右两侧为主行车孔,中间为包括排烟通道、安全通道、电缆通道的中管廊,横截面宽37.95 m、高11.4 m。每个管节安全通道左右侧墙均设置有安全门,行车孔之间可通视。为充分利用沉管隧道的内部空间和两行车孔结构,以理论精度最高的全导线网为基础,在另一个行车孔对称布设全导线网。根据两个行车孔的控制点是否通过安全门形成短边联系测量,新网有两种布设方案(见图6)。(1)方案1:双全导线网,两

个全导线网仅在最末端进行联系,相互校核;(2)方案2:双线形联合锁网,两个全导线网的每一对控制点都进行短边联系测量。短边角度测量受仪器本身的误差影响,对中误差和觇标照准误差影响较大,角度观测值误差易超限,只进行边长测量。

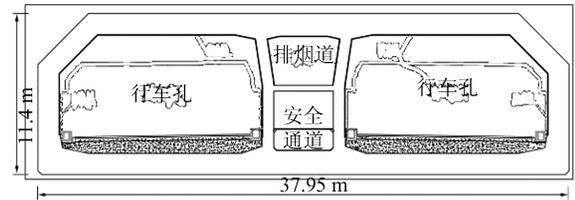


图5 沉管隧道横截面示意图  
Fig. 5 Cross Section of Immersed Tunnel

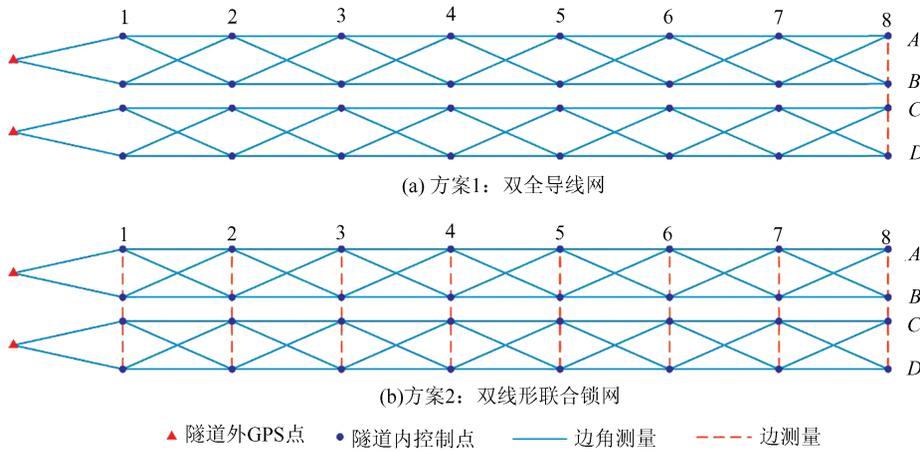


图6 隧道内控制网布设方案  
Fig. 6 Underground Network New Configurations

以点位精度为指标,对两种布设方案进行精度评估,结果如图7所示。可以发现,两种网型的精度相当,没有明显差异。鉴于双线形联合锁网增加了短边联系测量,多余观测更多,图形结构更强,选择布设双线形联合锁网进行沉管隧道内控制测量。对双线形联合锁网引起的横向贯通

误差进行严密的理论估算,总横向贯通误差  $m_u'$  为  $\pm 30.51$  mm,贯通面西、东侧控制网引起的横向贯通误差  $m_{u1}'$  和  $m_{u2}'$  分别为  $\pm 30.17$  mm 和  $\pm 4.57$  mm,满足误差分配要求。与全导线网相比,双线形联合锁网引起的横向贯通误差  $m_u'$ 、 $m_{u1}'$ 、 $m_{u2}'$  分别减小30%、30%和36%。

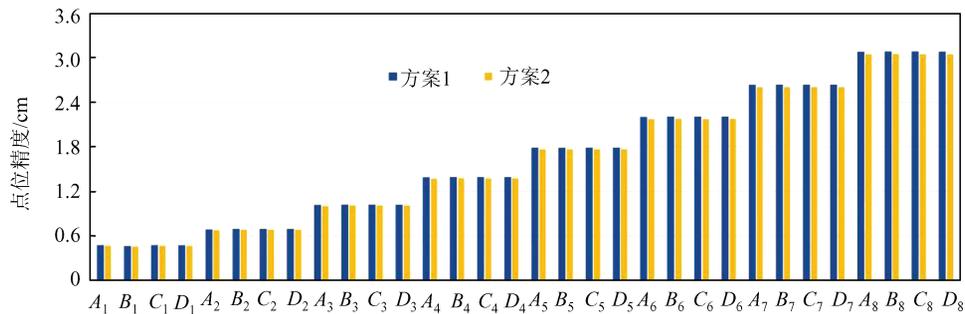


图7 隧道内控制网布设方案的精度对比  
Fig. 7 Precision Evaluation Results of New Underground Network

双线形联合锁网中,直线段每4个管节布设一对控制点,长边边长约720 m,曲线段每个管节

布设一对控制点,长边边长约180 m;同行车孔一对点间距约11 m,点间连线距洞壁1.5 m以上,两

行车孔外侧点间距30 m左右;控制点建造固定观测墩,并设强制对中装置。

东、西人工岛隧道口附近,每个行车孔对应一个进洞点,每个进洞点后视3个定向点,进洞点和定向点均为隧道外控制点。每次管节安装前进行双线形联合锁网复测,为管节安装提供指导。隧道外控制网外业观测结束后随即进行第一站进洞测量。

综上所述,隧道外布设GPS网,隧道内布设双线形联合锁网,引起的横向贯通误差  $m' = \pm \sqrt{(m_s')^2 + (m_{u1}')^2 + (m_{u2}')^2} = \pm 32.3 \text{ mm}$ , 满足工程70 mm的横向贯通限差要求。

## 5 沉管隧道施工控制网布设试验与工程应用

### 5.1 模拟试验分析

为验证上述沉管隧道施工控制网的布设方法,确保其适用于外海长距离沉管隧道施工控制测量要求,在陆地上实施了1:1的模拟试验工作。试验场地为中国珠海市金湾区升平大道,场地平、纵线形与港珠澳大桥沉管隧道相似,分双向四车道,长约7 km,宽约18 m,中间有低矮绿化

带,可以左右通视,满足模拟试验需求。

试验场地两端布设完整的GPS网,贯通面两侧分别布设双线形联合锁网,上下行线各设置一个贯通点( $G_1, G_2$ )。为验证贯通测量的可靠性,对贯通点进行GPS网联测。每个贯通点可获得3套坐标,分别为GPS测量值( $X_{GPS}, Y_{GPS}$ )、东侧双线形联合锁网测量值( $X_e, Y_e$ )和西侧双线形联合锁网测量值( $X_w, Y_w$ )。GPS网和双线形联合锁网外业观测技术参数与工程实际要求一致。试验结果如表4所示,两个贯通点的坐标差和横向、纵向贯通误差均小于1 cm,贯通精度明显优于理论估计值。

试验结果表明,本文研究的沉管隧道施工控制网布设方法能够满足港珠澳大桥沉管隧道施工控制要求。

### 5.2 工程应用效果

首先以沉管隧道最终贯通前,贯通面西侧双线形联合锁网某次的实测数据为例,分析其实际测量精度和可靠性,并与单行车孔的全导线网进行对比。外业观测采用标称精度测角 $\pm 0.5''$ 、测距 $\pm (1 \text{ mm} + 1 \times 10^{-6} \text{ m})$ 的全站仪进行,角度观测12测回,边长进行对向观测。双线形联合锁网和单侧行车孔全导线网的基本信息如表5所示。

表4 模拟试验结果/mm

Table 4 Simulation Experiment Results/mm

控制点	坐标差				贯通误差	
	$X_{GPS} - X_e$	$Y_{GPS} - Y_e$	$X_{GPS} - X_w$	$Y_{GPS} - Y_w$	横向	纵向
$G_1$	3.9	-2.6	8.8	3.8	-6.6	-7.6
$G_2$	6.8	-5.0	1.9	5.8	1.5	-8.9

表5 隧道内控制网基本信息

Tab.5 Basic Information of the Underground Network

网型	已知点	未知点	观测值数量		平均多余
	数量	数量	角度	边长	观测分量
双线形联合锁网	5	30	82	128	0.72
全导线网	4	15	41	56	0.69

点位精度分析结果如图8所示,双线形联合锁网的点位误差小于全导线网;与全导线网相比,双线形联合锁网的点位精度提高15%~30%,测量距离越远,点位精度提高的幅度越大,与理论估算结果吻合。

测量控制网的内部可靠性和外部可靠性指标均与多余观测分量 $r_i$ 有关,因此选 $r_i$ 为内、外部可靠性的公共指标<sup>[16]</sup>:

$$r_i = (Q_{vv}P)_{ii} \quad (15)$$

式中, $Q_{vv}$ 为:

$$Q_{vv} = Q - A(A^T P A)^{-1} A^T \quad (16)$$

采用平均多余观测分量 $\bar{r}$ 作为控制网的整体可靠性指标, $\bar{r} = r/n$ ,其中:

$$r = \sum r_i \quad (17)$$

按照可靠性评价指标,对双线形联合锁网和单行车孔全导线网进行可靠性评估,结果见图9。图9中,前半部分为角度观测值,双线形联合锁网与全导线网的角度观测值位置和数量相同,每个观测值的多余观测分量一致;后半部分为边长观测值,双线形联合锁网与全导线网相比,增加了行车孔之间的短边联系测量,边长观测值的数量增多,观测值的多余观测分量略有提升。双线形

联合锁网和全导线网的平均多余观测分量分别为0.72和0.69(见表5)。与全导线网相比,双线形联合锁网的平均多余观测分量提高约4%。

沉管隧道于2017年5月完成最终接头的施

工安装,横向贯通误差仅为12 mm,远小于70 mm的贯通限差要求,在远离陆地的开敞海域环境下,实现了6.7 km外海沉管隧道的高精度贯通。

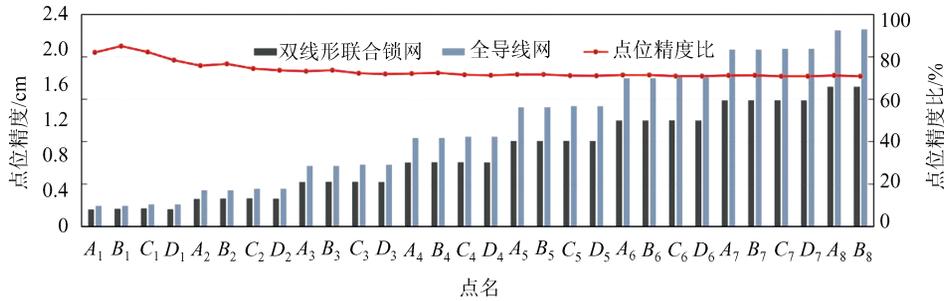


图8 隧道内控制网方案的实测精度对比

Fig. 8 Results Comparison of Precision Evaluation of the Underground Network

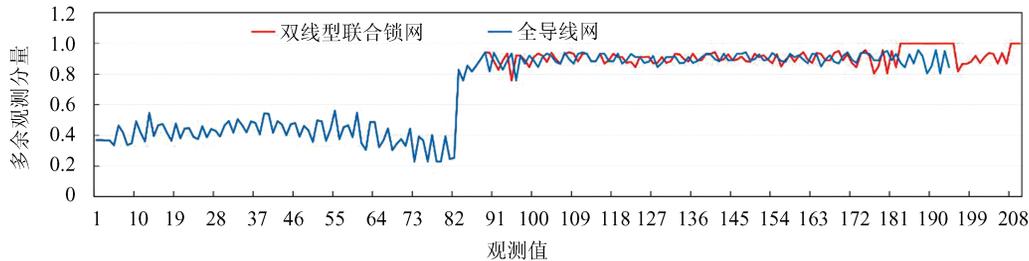


图9 隧道内控制网方案的可靠性对比

Fig. 9 Results Comparison of Reliability Evaluation of the Underground Network

## 6 结语

本文对港珠澳大桥沉管隧道施工平面控制网的布设技术进行了研究,提出了一种针对沉管隧道的双线形联合锁网布测方法。陆上1:1模拟试验和工程实测数据分析验证了双线形联合锁网的精度和可靠性。与全导线网相比,双线形联合锁网精度提高15%~30%,可靠性也有小幅提升。工程的最终高精度贯通结果进一步验证了本文精度设计、隧道外GPS网和隧道内双线形联合锁网布测的效果。

致谢:感谢港珠澳大桥岛隧工程项目总经理部提供的支持;感谢采集模拟试验数据和工程实测数据的工程管理、技术人员。

## 参 考 文 献

- [1] Rasmussen N, Grantz W. Chapter 9 Catalogue of Immersed Tunnels [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 1997, 12(2):163-316
- [2] Busby J, Marshall C. Design and Construction of the Oresund Tunnel [J]. *Civil Engineering*, 2000, 138(4):157-166
- [3] Jeong S, Kim J. The Immersed Tunnel and Bridges of Busan-Geoje Fixed Link [J]. *Structural Engineering International*, 2012, 22(1): 20-25
- [4] Li Ying, Chen Yue. The Importance and Technical Difficulties of Tunnel and Islands for Hong Kong Zhuhai Macao Bridge Project [J]. *Engineering Mechanics*, 2011(S2): 67-77(李英, 陈越. 港珠澳大桥岛隧工程的意义及技术难点 [J]. *工程力学*, 2011(S2): 67-77)
- [5] Zhang Z, Lin W, Ji H, et al. Layout and Design Techniques of Cross Section for the Large Immersed Tunnel [J]. *Procedia Engineering*, 2016, 166(1): 37-44
- [6] Yin Haiqing. Key Technologies Applied in Design and Construction of Artificial Islands and Immersed Tunnel of HongKong - Zhuhai - Macao Bridge (HZMB) Project [J]. *Tunnel Construction*, 2014, 34(1): 60-66(尹海卿. 港珠澳大桥岛隧工程设计施工关键技术 [J]. *隧道建设*, 2014, 34(1): 60-66)
- [7] Chrzanowski A. Optimization of the Breakthrough Accuracy in Tunneling Surveys [J]. *The Canadian Surveyor*, 1981, 35(1): 5-16
- [8] Stiros S C. Alignment and Breakthrough Errors in Tunneling [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2009, 24(2):236-244

- [9] Zhang Zhenglu, Deng Yong, Lü Gengchao, et al. Research on the Design of Construction Surveying Control Network of Jingping Assistant Tunnel[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(7):794-797(张正禄, 邓勇, 吕耕超, 等. 锦屏辅助洞施工控制网布设研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2010, 35(7):794-797)
- [10] Wu Dijun, Xiong Wei. Design of the Engineering Coordinate System for HongKong - Zhuhai - Macao Bridge [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2012(1):53-55(吴迪军, 熊伟. 港珠澳大桥工程坐标系统设计[J]. 测绘通报, 2012(1): 53-55)
- [11] Quanke S, Yue C, Ying L, et al. Publications HongKong Zhuhai Macao Bridge Link in China Stretching the Limits of Immersed Tunnelling, 2012 [EB / OL]. <http://tec-tunnel.com/publications>, 2017
- [12] Li Guanqing, Huang Shengxiang. The Breakthrough Error Estimation of HongKong-Zhuhai-Macao Bridge Immersed Tube Tunnel[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2016, 41(12):10-13(李冠青, 黄声享. 港珠澳大桥沉管隧道贯通误差预计[J]. 测绘科学, 2016, 41(12):10-13)
- [13] Zhang Zhenglu, Zhang Songlin, Wu Zhigang, et al. Research on the Allowable Value of Lateral Breakthrough Error for Super Long Tunnel from 20 to 50 km [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2004, 33(1):83-88(张正禄, 张松林, 伍志刚, 等. 20~50 km 超长隧道(洞)横向贯通误差允许值研究[J]. 测绘学报, 2004, 33(1): 83-88)
- [14] Fowler S. Design and Preanalysis of Underground Control Networks for Tunnel Construction [D]. Dunedin: University of Otago, 2006
- [15] Schmitt G. Optimization of Geodetic Networks[J]. *Reviews of Geophysics*, 1982, 20(4):877-884
- [16] Wu Jiangfei, Wu Shaomin. Research on Two Reliability Indicators and Their Relationship [J]. *Journal of Information Engineering University*, 2000, 1(3):53-55(吴江飞, 吴绍民. 两种可靠性指标及其关系研究[J]. 信息工程大学学报, 2000, 1(3):53-55)

## Surveying Network Design for HongKong-Zhuhai-Macao Bridge Link Immersed Tunnel

HUANG Shengxiang<sup>1,2</sup> LI Guanqing<sup>1</sup> ZHANG Wen<sup>1</sup> WANG Xinpeng<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

<sup>2</sup> Collaborative Innovation Center of Geospatial Technology, Wuhan 430079, China

**Abstract:** For the construction of HongKong-Zhuhai-Macao(HZM) Bridge link immersed tunnel with the harsh environment and ultrahigh precision requirement, particular care should be taken in the perspective of geodetic control. Firstly, the breakthrough error is distributed reasonably based on the error distribution theory. The design and implementation of surveying network are discussed. To improve the configuration strength and increase the number of redundant observation compared with traverse, the design of underground surveying network named duo-linear joint chain is presented. It is verified that the precision of duo-linear joint chain is high and this configuration can meet the requirement of immersed tunnel underground survey by a simulation experiment. The index of precision and reliability is improved 15%-30% and 4% based on the data analysis that measured in HZM link immersed tunnel. The work is demonstrated by the gratifying results of the breakthrough of HZM immersed tunnel.

**Key words:** immersed tunnel; surveying network; breakthrough error; duo-linear joint chain

**First author:** HUANG Shengxiang, PhD, professor, specializes in deformation monitoring and disaster prediction, satellite navigation and positioning technology & precise engineering surveying. E-mail: sxhuang@whu.edu.cn

**Corresponding author:** LI Guanqing, PhD candidate. E-mail: liguanqing@whu.edu.cn

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China, No. 41274020.