

空中三维导线法在沉管隧道施工变形监测中的模拟试验研究

成益品, 韩战伟

(中交一航局第二工程有限公司, 山东 青岛 266071)

摘要: 在深中通道钢壳混凝土沉管隧道施工变形监测中, 开展空中三维导线法变形监测试验研究, 通过理论精度分析、模拟试验及工程验证, 空中三维导线法在满足沉管隧道施工监测精度要求的情况下, 相较常规水准测量法, 具有操作简便, 节省人力物力, 缩短监测时间, 显著提高了施工监测工效, 可为同类工程的施工变形监测提供参考。

关键词: 沉管隧道; 空中三维导线; 变形监测; 水准测量

中图分类号: U655; U612.334

文献标志码: A

文章编号: 2095-7874(2024)07-0039-05

doi:10.7640/zggwjs202407008

Simulation test of three-dimensional aerial traverse method in deformation monitoring of immersed tunnel construction

CHENG Yi-pin, HAN Zhan-wei

(No.2 Engineering Co., Ltd. of CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266071, China)

Abstract: In the deformation monitoring of the steel-shell concrete immersed tunnel construction in the Shenzhen-Zhongshan Link, the experimental research on deformation monitoring with three-dimensional aerial traverse method was carried out. Through theoretical precision analysis, simulation test, and engineering verification, the three-dimensional aerial traverse method meets the accuracy requirements of immersed tunnel construction monitoring. Compared with the conventional leveling method, it has the advantages of simple operation, saving manpower and material resources, shortening monitoring time, significantly improving the working efficiency of construction monitoring, and can provide a reference for the construction deformation monitoring of similar projects.

Key words: immersed tunnel; three-dimensional aerial traverse; deformation monitoring; leveling

0 引言

近年来大型海底隧道工程的建设越来越多, 促使工程测绘工作朝着同步创新和改进的更高层次发展^[1]。

目前, 工程施工变形监测中主要是以几何水准测量技术为主^[2-8], 其中心内容是利用仪器提供水平视线, 测定地面两点的高差, 通过高差传递, 推算待测高程, 这种方法尽管可以满足实际工作需要, 但在进行数据采集时, 其观测步骤、视线长度、前后视距、任意测站累计视距差及视线高度等都应满足 GB/T 12897—2006《国家一、二等水

准测量规范》^[9]的严格要求, 监测工作耗时长、人力与物力投入大。尤其针对超长沉管隧道施工监测而言, 隧道监测精度及频次要求高, 受隧道设计坡度调整大、管内错综复杂的施工环境等不利因素影响, 为保证监测数据精度, 水准测量需在狭长的管段空间内严格按照国家相关规范布设水准路线, 要在长期潮湿光滑的管节地面频繁搬迁仪器, 不仅工作强度大, 监测耗时长, 而且需要克服人员及设备滑摔安全风险, 给监测工作实施带来很大困扰。

如今全站仪的测距测角精度、自动搜索目标

与照准、自动记录和存储功能得到很大的提升,给施工变形监测方法的拓展带来了便利^[10]。结合沉管隧道分节段安装施工的工艺特性,提出一种隧道施工变形监测空中三维导线监测方法,应用全站仪实施精密的沉降和位移监测工作,在满足精度及监测设计要求的情况下,可以实现沉管隧道沉降和位移的同步监测,节省人力与物力,缩短监测时间,大大提高了施工监测效率。

1 空中三维导线法

1.1 测量原理及方法

空中三维导线法是基于三角高程测量原理^[11],采用 2 台高精度全站仪,在全站仪顶部设计标靶棱镜,标靶安装效果如图 1 所示。结合利用全站仪高精度测距测角、自动搜索目标与照准、自动记录和存储功能,在隧道内布设三角高程闭合路线,实现对沉管隧道施工变形的精密监测。监测方法及流程如下:

1) 2 台全站仪分别架设在第 1 个管节(E_n)和第 2 个管节(E_{n+1})沉降位移监测工作基点,量取 2 台全站仪底座至顶部标靶棱镜高度,相互定向,测定工作基点的往返高差与坐标。

2) 第 1 个管节(E_n)和第 2 个管节(E_{n+1})的全站仪分别对 100 m 视距范围内的形变监测点的三维坐标进行多个测回重复观测与记录,以此计

算各监测点的高程和平面坐标。

3) 将第 1 个管节(E_n)全站仪迁站至第 3 个管节(E_{n+2})工作基点,第 3 个管节(E_{n+2})全站仪与第 2 个管节(E_{n+1})全站仪相互定向往返测量高差,将第 2 个管节(E_{n+1})高程及平面坐标传递至第 3 个管节(E_{n+2})工作基点,如此,再将第 2 个管节(E_{n+1})迁站至第 4 个管节(E_{n+3}),逐步将高程和平面坐标向前传递。

4) 按照上述测量方法,2 台全站仪依次交替架设,每个管节工作基点上形成三角测量闭合路线,依次对所在管节的形变监测点进行测量。监测线路如图 2 所示。



图 1 全站仪安装标靶棱镜效果图

Fig. 1 Effect chart of total station installation target prism

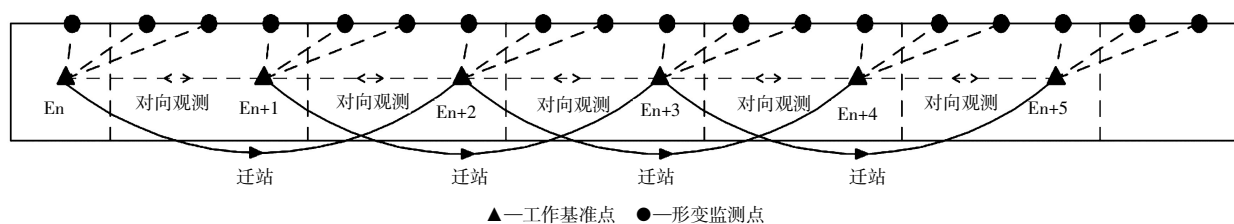


图 2 监测流程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of monitoring process

1.2 精度分析

沉管隧道管节长度大于 150 m,相邻 2 个工作基点最大距离可能接近 200 m。采用三角高程测量方法,球气差影响接近 2.7 mm,空中三维导线法测量采用了对向观测方法,可以有效消除球气差改正。另外,空中三维导线法测法中,工作基点上的基座在作为测站和镜站时未有变动,可以免除仪器高和棱镜高的量取误差。根据三角高程测量原理,此时临近工作基点的高差测量误差只受仪器测角精度的影响。

全站仪高度角测角精度包括仪器精度和目标

瞄准精度,当采用测角精度为 $0.5''$ 的全站仪,且采用测回法观测高度角,消除仪器 i 角等影响时,在小于 200 m 的视距内测角误差引起的测高误差可以忽略不计,在小于 200 m 视距内,采用全站仪自动搜索目标(ATR)的单次瞄准误差小于 1 mm,且为随机性误差,多个测回测量对同一目标有多次瞄准,因此瞄准误差应在 0.2~0.5 mm。由此可以认为,由空中三维导线法测量法对基准点的高程传递误差可控制在:

$$m_{h_n} = 0.5 \sqrt{n}$$

式中: m_{h_n} 为高程传递误差, mm; n 为传递测站

数。

对形变监测点的测量误差,不可避免地存在球气差影响。但对形变监测来说,采用同一测站的仪器观测的监测点,其球差是相同的,对形变监测没有影响。气差改正受观测时的环境气温和空气质量影响,但测站至监测点的视距小于 100 m,此项影响最大不超过 0.1 mm。

2 模拟试验研究

2.1 试验场地选取

深中通道沉管隧道是世界范围内综合难度和规模最大的钢壳混凝土沉管隧道,隧道全长 6 845 m,其中沉管隧道全长 5 035 m,自西向东由 32 个重达 6~8 万 t 的管节拼接而成。沉管隧道结构为两孔一廊道,两侧为行车道,中间为综合管廊,标准管节长 165 m,宽 46 m,高 10.6 m。隧道施工期间的设计监测要求按照国家二等水准测量技术标准进行监测,管节荷载期每天监测 1 次,恒载期每周监测 1 次^[12]。隧道管节划分如图 3 所示。

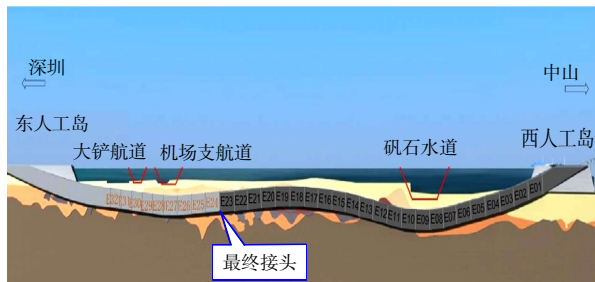


图 3 隧道管节划分示意图

Fig. 3 Sketch map of pipe section division of tunnel

受隧道左右两侧行车道压载水箱和压舱混凝土施工影响,沉管隧道施工期的沉降位移监测主要在中间综合管廊实施。空中三维导线法试验选择在 E4—E10 管节中间管廊进行,试验线路长度总计 1 155 m。隧道内施工错综复杂,受空气、温度等不利观测因素影响,易造成成像模糊、读数偏差,导致监测数据不稳定等现象,影响测量机器人观测精度,在监测过程中布设轴流风机,保障隧道内空气流通,减少烟雾。

2.2 点位布设

沉管采用钢壳混凝土整体式管节,每个管节之间采用安全门阻隔,为确保获取到整个管节的形变数据,在每个管节布设 1 个工作基点和 3 个形变监测点^[13]。工作基点采用钢柱体强制对中观测墩,焊接在管节尾端安全门位置地面上。形变

监测点采用 Leica 圆棱镜,通过 L 形不锈钢支架在管节的首、中、尾侧墙上各布设 1 个,3 个形变监测点之间间距约 70 m。为了便于水准测量倒尺检核,圆棱镜布设高度距地面约 2.3 m, L 形支架采用专门装配设计,棱镜安装后的棱镜中心与支架底缘高差为 5 cm。形变监测点位布置见图 4。

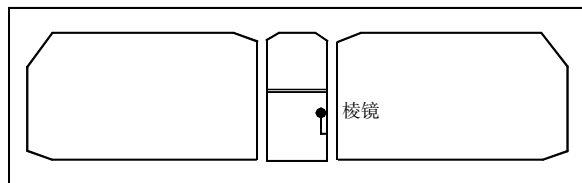


图 4 形变监测点位布置示意图

Fig. 4 Sketch map of deformation monitoring point layout

2.3 实施步骤

固定 2 台 Leica TS60 全站仪,将全站仪手柄更换为照准标靶棱镜,2 台全站仪依次交替架设在相邻管节观测墩上,相互定向测量往返高差获得观测墩的坐标及高程信息后,进行逐个管节的形变监测。实施具体步骤如下:

1) 首先将第 1 台全站仪架设在 E4 管节观测墩 E4GT, E4GT 平面与高程已知,分别量取观测墩顶面到仪器中心高及到全站仪上方标靶棱镜中心高,进入设站程序,选择已知点定向,输入仪器高;将第 2 台全站仪架设在 E5 管节观测墩 E5GT, E5GT 平面已知,高程未知,分别量取观测墩顶面到仪器中心高及到全站仪上方标靶棱镜中心高。

2) E4GT 观测墩全站仪瞄准 E5GT 观测墩全站仪上方标靶棱镜,输入棱镜高进行定向测量,完成定向后,进入测量界面,输入 E5GT 观测墩全站仪上方棱镜高,测量 2 台全站仪观测墩的高差,测量 6 个测回。

3) E5GT 观测墩架设全站仪,进入设站程序,选择方位角定向,输入仪器高,瞄准任意方向进行定向确认,完成定向后,进入测量界面,输入 E4GT 观测墩全站仪上方棱镜高,测量 2 台全站仪观测墩的高差,测量 6 个测回。统计 2 台全站仪往返高差并计算观测墩高差平均数,计算 E5GT 观测墩高程。

4) 将计算的 E5GT 观测墩高程输入全站仪设站程序,将形变监测点棱镜高输入 0, E4GT 观测墩全站仪控制 E4 管节长度的前 2/3,即监测 E4J1

和 E4J2; E5GT 观测墩全站仪控制 E4 管节长度的后 1/3 及 E5 管节长度的前 2/3, 即监测 E4J3、E5J1、E5J2。

5) E4 和 E5 管节形变监测完成后, 先将 E4GT 观测墩全站仪迁站至 E6 管节 E6GT 观测墩,

观测墩 E5GT 和 E6GT 相互定向与往返高差观测, 计算观测墩 E6GT 平面及高程, 然后依照步骤 1) —5) 的操作步骤进行管节的形变观测。

2 台全站仪按照上述操作流程依次交替迁站监测各个管节的形变。观测及迁站示意图 5。

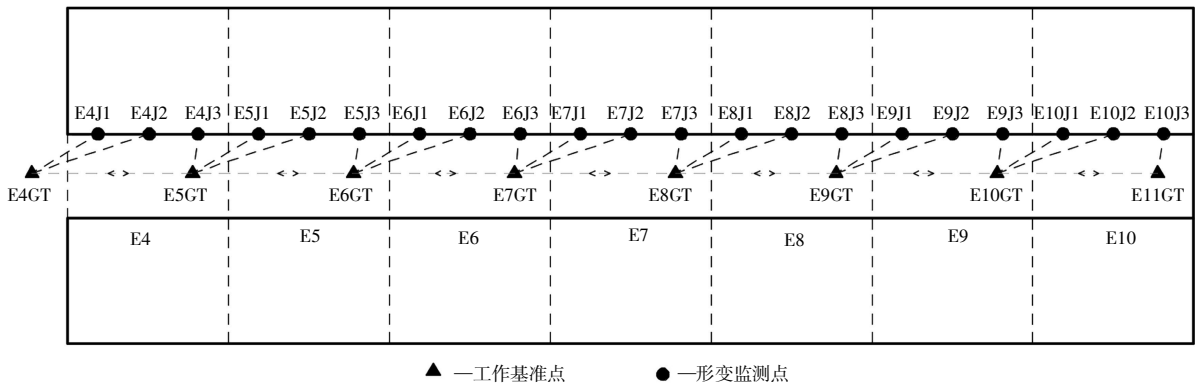


图 5 观测及迁站示意图

Fig. 5 Observation and relocation diagram

3 数据统计及分析

E4—E10 管节完成荷载已处于恒载期, 采用 LS15 电子水准仪按照国家二等水准测量要求监测, 连续 1 个月以来的平均沉降速率不到 0.01 mm/d, 管节沉降基本稳定。采用空中三维导线法在沉管隧道 E4—E10 管节进行连续 10 d 的变形监测数据采集, 每天监测时间段固定在上午 9:00—11:00。监测试验的第一天与最后一天同步采用 Leica LS15 电子水准仪按照国家二等水准观测要求对空中三维导线测量成果进行检核。统计 2 种不同观测方法测量成果并进行对比分析。E4—E10 管节空中三维导线法监测相对高差统计见表 1,

与水准测量方法测量绝对高程比对统计见表 2。

表 1 空中三维导线法监测相对高差统计

Table 1 Statistics of relative height difference in three-dimensional aerial traverse monitoring

管节	监测高差累计变化量/mm			备注
	J1	J2	J3	
E4	-0.5	0.1	0.7	“+”代表上升; “-”代表沉降
E5	-0.3	0.1	-0.2	
E6	-0.1	-0.1	0.6	
E7	-0.9	-0.7	-0.8	
E8	-0.8	-0.1	-0.3	
E9	-0.8	-0.3	-0.2	
E10	0.8	0.1	-0.2	

表 2 2 种监测方法绝对高程比对表

Table 2 Absolute height comparison table of two monitoring methods

点号	参数	管节						
		E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10
J1	导线法/m	-19.997 3	-22.929 9	-25.660 9	-28.453 4	-31.016 7	-32.455 4	-32.479 2
	水准法/m	-19.996 8	-22.929 5	-25.660 4	-28.453 3	-31.016 4	-32.455 1	-32.479 0
	差值/mm	-0.5	-0.4	-0.5	-0.1	-0.3	-0.3	-0.2
J2	导线法/m	-21.190 3	-24.072 9	-26.880 7	-29.556 5	-31.681 8	-32.521 4	-31.967 5
	水准法/m	-21.190 1	-24.072 7	-26.880 4	-29.556 3	-31.681 5	-32.520 9	-31.967 2
	差值/mm	-0.2	-0.2	-0.3	-0.2	-0.3	-0.5	-0.3
J3	导线法/m	-23.313 1	-26.143 2	-28.931 0	-31.618 0	-33.715 4	-34.557 2	-34.034 7
	水准法/m	-23.313 0	-26.142 8	-28.930 6	-31.617 2	-33.714 8	-34.556 9	-34.033 8
	差值/mm	-0.1	-0.4	-0.4	-0.8	-0.6	-0.3	-0.9

从表1统计数据分析可以看出,所有管节的形变监测点连续10 d的监测高差变化范围均稳定控制在1.0 mm之内,单个测点的竖向最大变化-0.9 mm,最小变化0.1 mm,平均绝对值变化0.4 mm,从7个管节监测点的变化规律来看,表现为正负随机性误差,且均在正常的瞄准误差范围内。

当采用水准测量法直接检核空中三维导线法测量得到的监测点高程时,由于球差改正正在100 m视距内的误差为偏低0.8 mm,因此需要加上此项改正后,两者才可以进行比较。从表2统计数据分析可以看出,空中三维导线法改正前的形变监测点高程相较水准测量高程均偏低,将形变监测点高程加上球差改正后,两者最大偏差0.8 mm,最小偏差0.1 mm,平均绝对值偏差0.4 mm,球差改正后的两者差值均在1.0 mm以内。

4 结语

工程实践表明,通过超长沉管隧道形变监测空中三维导线法与水准法测量高程数据对比分析来看,两者测量的高程偏差较小,均在1.0 mm内,符合国家二等水准测量规范检测高差限差要求,测量成果可靠,空中三维导线法可以达到沉管隧道工程施工形变监测二等水准监测精度要求。

空中三维导线法的研究及应用,实现沉管隧道沉降和位移的同步监测,不仅保障了监测精度,而且有效解决了沉管隧道沉降和位移监测耗时长、人力与物力投入大、工作效率保障难等问题,显著提高施工监测工效。试验阶段的内业计算方法采用的EXCEL表编辑完成,若开发集数据自动采集与实时处理软件,现场监测效率还会进一步提高,可为类似隧道或线形工程施工形变监测提供参考。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 廖浩然,张青鹏.高速公路隧道施工监控量测技术应用[J].交通世界,2021(20):149-151.
LIAO Hao-ran, ZHANG Qing-peng. Application of monitoring measurement technology in expressway tunnel construction[J]. Transpoworld, 2021(20): 149-151.
- [3] 戎刚.隧道施工监测及质量控制分析[J].交通世界,2021(17):154-155.
RONG Gang. Tunnel construction monitoring and quality control analysis[J]. Transpoworld, 2021(17): 154-155.
- [4] 张华.软土地基沉管隧道变形观测的实践[J].中国港湾建设,2007,27(5):17-19.
ZHANG Hua. Practice of observation for deformation of immersed tunnel of soft soil foundation[J]. China Harbour Engineering, 2007, 27(5): 17-19.
- [5] 刘正根,黄宏为,赵永辉,等.沉管隧道实时健康监测系统[J].地下空间与工程学报,2008,4(6):1110-1115.
LIU Zheng-gen, HUANG Hong-wei, ZHAO Yong-hui, et al. Immersed tube tunnel real-time health monitoring system[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2008, 4(6): 1110-1115.
- [6] 奚笑舟.水下检测与监测技术在沉管隧道工程中的应用[J].现代隧道技术,2015(6):36-41.
XI Xiao-zhou. The application of underwater monitoring and testing techniques in immersed tunnels[J]. Modern Tunneling Technology, 2015(6): 36-41.
- [7] 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.
- [8] 许光明,李平.港珠澳大桥沉管隧道施工期变形监测[J].城市建设理论研究,2018(1):143-145.
XU Guang-ming, LI Ping. Deformation monitoring of Hongkong-Zhuhai-Macao Bridge immersed tube tunnel during construction[J]. Theoretical Research in Urban Construction, 2018(1): 143-145.
- [9] GB/T 12897—2006,国家一、二等水准测量规范[S].
GB/T 12897—2006, Specification for the first and second order leveling[S].
- [10] 韦洪昌,王德丰.全站仪中间设站短距三角高程测量在地质滑坡变形监测中的应用[J].世界有色金属,2021(4):162-163,166.
WEI Hong-chang, WANG De-feng. Application of short distance trigonometric elevation survey with total station in the middle of total station to deformation monitoring of geological landslide[J]. World Nonferrous Metals, 2021(4): 162-163, 166.
- [11] 陈永奇.工程测量学[M].4版.北京:测绘出版社,2016.
CHEN Yong-qi. Engineering surveying[M]. 4 ed. Beijing: Surveying and Mapping Publishing House, 2016.
- [12] 深中通道管理中心.深中通道项目岛隧工程质量检验评定标准[S].试行版.2019.
Shenzhen-Zhongshan Link Management Center. Quality inspection and evaluation standard for island and tunnel engineering of Shenzhen-Zhongshan Link project[S]. Trial version. 2019.
- [13] JGJ 8—2007,建筑变形测量规程[S].
JGJ 8—2007, Code for deformation measurement of building and structure[S].