

港珠澳大桥工程宽海域高精度高程传递方法探讨

杨培兵, 赖金富, 吴有清

(长江三峡勘测研究院有限公司(武汉), 湖北 武汉 430074)

摘要:在港珠澳大桥施工测量中,由于跨海测量距离较大,没有具体的规范和操作规程规定可循,需要根据实际情况进行专项测量方案设计。为了确保获得准确可靠的高程传递成果,针对工程实际情况分别采用经纬仪倾角法、三角高程法以及 GPS 水准法开展了高程传递施测工作。在分析宽海域高程传递所面临的主要技术问题的基础上,设计制作了专用观测标志,解决了远距离测量照准问题;针对海中测量平台晃动影响测量精度问题,探索出一套有效的测量应对流程,保证了有效数据的获得率。不同单位、不同方法测量结果的对比分析表明,此次高程传递测量成果可靠,达到了国家二等水准测量技术指标的要求。

关键词:高程传递; 测量方案; 经纬仪法; 三角高程法; GPS 水准法; 岛隧工程; 港珠澳大桥

中图法分类号: P21

文献标志码: A

DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.2015.14.019

1 工程概述

港珠澳大桥是我国的重大基础设施项目,主体工程包括沉管隧道、人工岛及结合部桥梁,其中,“海中桥隧”长 35.578 km。由于远离陆地,施工面临诸多挑战。人工岛钢护筒振沉测量定位及地基不均匀沉降控制、深水基床整平测量、管节沉放定位与贯通测量控制等,都需要高精度平面及高程测量成果。按目前海上测量技术手段,高精度平面坐标容易获得,而高精度的高程测量成果获得则比较困难。

目前,跨海(河)长距离高程基准传递的方法通常有 4 种,即静力水准法、动力水准法、GPS 水准法和常规大地测量法。由于该项目跨海距离较大,采用静力水准法成本过于昂贵,而动力水准法时间周期和精度难以满足项目需求,相比较而言,常规大地测量法(经纬仪倾角测量法和三角高程测量法)及 GPS 水准法在技术及经济上较为合理。为确保获得准确可靠的高精度高程传递成果,针对工程实际情况,分别采用经纬仪倾角法、三角高程法及 GPS 水准法开展了高程传递施测工作^[1-13]。

2 高程传递实施

精密跨河(水域)水准测量在跨距小于 3.5 km 时,《国家一、二等水准规范》GB/T 12897-2006 中有详细的规定和明确要求,但传递距离超过 3.5 km 时,国家相关测量规范中没有具体的操作规程规定,需根据工程需要进行专项测量方案设计。

该测量项目实施初期,在东、西人工岛北侧 300 m 左右各建设了一座海中测量平台(即东、西测量平台)。根据工程施工需要,应将精密高程传递到海中测量平台上(东、西人工岛测量平台,见图 1),以获取可靠、精确的高程传递成果供工程使用。港珠澳大桥岛隧工程宽海域高精度高程传递项目中,跨海高程传递在西测量平台至香港大屿山(8.9 km)之间进行,此外还有东、西测量平台之间(5.8 km)的高程传递工作。本文主要以经纬仪倾角测量法和西测量平台至香港大屿山(8.9 km)间高程传递情况为例进行说明。

经纬仪倾角法的原理主要是求本岸仪器水平视线在对岸照准标志上的具体位置,由此推出本岸仪器水平视线与对岸照准标志中心线之间的高差;根据对岸

仪器测得的对岸标志中线到对岸尺台点间的高差,反算出仪器视线至对岸尺台点间的高差,然后根据本岸仪器视线至本岸尺台点间的高差,最后求得两岸尺台点间的高差。

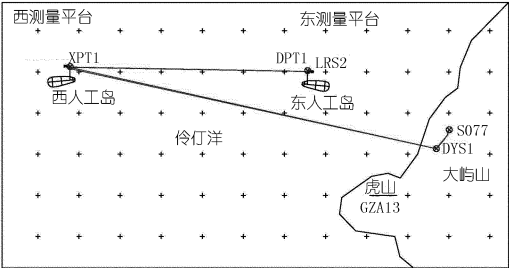


图 1 跨海高程传递附合路线

经纬仪倾角法观测如图 2 所示。

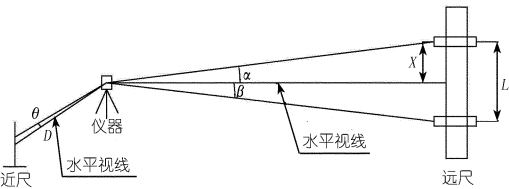


图 2 经纬仪倾角法观测示意

图中 L 为上下标志之间的实际距离,设仪器水平视线至对岸上标志中心线倾角为 α ,至下标志中心线倾角为 β ,由相似比原理,根据 α, β 及 L 可得仪器水平视线至对岸上标志中心线的距离为

$$X = \frac{\alpha}{\alpha + \beta} L \tag{1}$$

由式(1)求出 X 后,根据仪器视线高程可推得对岸上标志中线高程,而根据对岸仪器测得的尺台点与上标志间的高差可求得本岸尺台点高程;根据两岸尺台点高程可求出尺台点间的高差,从而得出两岸跨江点(尺台点)间的高差。

2.1 照准觇板标志

西人工岛测量平台为海上钢结构平台,为了减轻环境及气象因素对测量的影响,满足仪器照准要求,参照《国家一、二等水准规范》GB/T 12897 - 2006 制作安装照准标志,并对照准标志支撑结构进行加固。

鉴于观测照准标志对经纬仪倾角法和测距三角高程法测量的重要性,在反复试验的基础上,制作了符合项目照准要求的照准觇板。所制作的仪器照准觇板标志的长度、宽度以及标志线间距,参考《国家一、二等水准测量规范》(GB/T 12897 - 2006),依跨河视线长度而定,相应尺寸见表 1。

表 1 标志线大小的计算

mm

使用仪器	标志宽 a	标志长 b	上、下两标志线的间距 d
经纬仪	$S/15000$	$S/3000$	$\gamma/\rho \times S$

表中, S 为跨海视线长度,以 m 计; γ 为视准轴与对岸觇板上两标志线的夹角,以 (\prime) 计,一般取 $60\prime$; $\rho = 206\,265(\prime)$ 。

该项目跨海视线长 S 为 8.9 km ,计算得到照准觇板标志的规格为 $a = 600\text{ mm}$, $b = 2\,900\text{ mm}$, $d = 2\,580\text{ mm}$ 。

2.2 仪器及方法

由于测量项目跨距较大,具有自动搜寻目标功能的观测设备因信号微弱难以锁定目标,即使勉强使用,获取的数据离散度较大、质量差、稳定性与可靠性低,有效数据获取率较低。因此,实际观测时没有采用测量机器人进行自动观测,而是采用两台 WILD T3 光学经纬仪人工同时对向观测。WILD T3 经纬仪测角标称精度为 $1\prime$,其较大的放大倍数、精密的光学测微器等经典设计,使其远距离测量的稳定性和实际精度优于部分标称测角精度优于 $1\prime$ 的摩擦止动仪,目前在长距离精密角度测量中仍发挥着难以替代的作用。同时,由于 GPS 水准在该项目中难以按规范网型布测,其成果可靠性难以评估,所以采用 3 种方法进行传递,其目的是互相比对以印证成果的可靠性,更好地为工程服务。

选用 2 台 WILD T3 光学经纬仪,按平行四边形进行布网,依据规范进行近边、远边距离测量及水准联测;近尺、远尺角度观测顺序、测回数、时段数、限差均参照相关规范规定执行;最后用垂直度盘测定水平视线上、下两标志的倾角,计算水平视线位置,求出两岸高差。

3 主要技术问题及对策

3.1 观测标志的设计与制作

使用常规方法进行宽海域精密高程传递时,由于距离较远,受天气、能见度等因素影响,存在目标模糊难以准确照准的问题。在设备优良、观测人员技术精湛的条件下,天气及气象条件的影响及观测目标是否清晰就成为宽海域精密高程传递成败的关键。因此,观测照准标志是利用经纬仪倾角法和测距三角高程法等常规方法进行宽海域精密高程传递成功与否的一个关键因素,对项目的有效推进有重要意义。为此,设计和制作符合照准要求、能清晰辨识的照准标志显得尤为重要。

国内多个长距离跨海高程传递项目中,在运用常规方法时,一般都制作了专用观测标志,有特制灯笼形照准标志的,有直接照准大功率圆形强光源的,也有使用电子感应自动观测的(需使用自制的组合棱镜组或信号增强装置)。其中,在使用电子感应自动观测时,采用组合棱镜组虽可增强电磁波反射信号强度,但观测距离过远时,由于信号衰减迅速,自动测量难以施行,即使勉强获得测量数据其离散度也会很大,稳定可靠性差。

在港珠澳大桥岛隧工程高程传递项目实施中,经过反复试验,选用透明亚克力材料制作成灯箱式样照准标志,灯箱内部设多组 LED 灯片进行照明,光源为白色光源,使用 24 V 电瓶供电,标志支撑桁架采用结构稳定、强度高的钢材制作。观测标志固定装置设计考虑了标志水平、垂直方向调整的方便,采取了减小风阻、防雷、防雨等措施,支撑桁架稳固牢靠,强度高不易变形。

观测标准的 LED 发光片达到了照准目标能发光的效果,较好地满足了夜间观测的要求。

3.2 海中观测平台晃动影响

对港珠澳大桥岛隧工程来说,西(西人工岛)测量平台位于伶仃洋珠江出口主航道中,因海水洋流和风浪对平台的影响,测量平台有时不可避免地出现轻微晃动现象,虽然不易为人感知,但可通过仪器察觉。在项目实施期间,采用经纬仪倾角法和测距三角高程法观测时可通过以下措施解决平台晃动问题。

- (1) 选择有利观测时间段。
- (2) 避免人为影响因素。
- (3) 安置和调试仪器,以减小仪器脚螺旋发生隙动的可能;校准仪器长水准管气泡;调试指标差至零附近。
- (4) 调整照准标志和符合气泡;在低潮位、微风时,固定仪器并由固定的熟练观测人员操作,保证照准观测标志读数与垂直度盘的符合水准气泡准确符合能同时进行。
- (5) 对镜读数时,观测员应操作熟练、精神高度集中、反应敏捷、眼疾手快,仪器照准-气泡符合-测微器精准符合保持同步,照准目标时快速读出仪器垂直度盘上的度、分、秒数值。不具备观测条件,应停止观测作业。

3.3 气象环境条件对角度观测的影响

气象条件对角度观测的影响较复杂,多种因素的综合作用将对角度测量造成一定影响。观测期间,观测数据受天气、环境的影响较为明显,主要包括风、海

浪、涨潮、退潮、雾、粉尘、综合能见度等因素,故跨海高程传递工作应在气象、环境条件较好的情况下进行。

3.4 觇标稳定性对测量结果的影响

跨海测量时觇标稳定性对测角精度的影响是可以检测并计算出的。由于距离较大,觇标微幅晃动在高程上的表现是微小的,故其稳定性对跨河垂直角观测结果无明显影响,基本可以忽略。

在港珠澳大桥岛隧工程两处跨海测量过程中,多次照准觇标的检查发现,觇标测前测后相对测站点高差变化均小于 1 mm。

3.5 观测时段问题

实践表明,即使在能见度较好的白天,照准目标分别设置为对比度较醒目的红、白、黄色,仪器视窗成像仍非常模糊,基本无法施测。故该项目观测时段均安排在夜晚(观测觇板为发光目标)进行,利用专门设计制作的能发光的照准标志(合成光源照准标志),解决了目标模糊、照准困难的问题。观测时选择有利天气,分初夜和深夜进行数据采集。

3.6 水准面不平行与重力异常改正问题

通过计算,该项目跨海测量点(香港大屿山点 DYS1,西测量平台上点 XPT1)正常水准面不平行改正约 -0.02 mm,重力异常改正值在 0.001 mm 量级。这两项改正对跨海测量高差成果精度基本没有影响,在实际成果计算时未考虑其改正值。

3.7 跨海测量高差相对垂线偏差改正

地面上 a、b 两点相对垂线偏差在三角高程测量中的影响分量为

$$H_b - H_a = \frac{D}{\rho}(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \tag{2}$$

式中, D 为测线平均高程面上的平距, $\varepsilon_1 - \varepsilon_2$ 为跨海点相对垂线偏差在测线上的分量, $\rho = 206\ 265''$ 。

在该项目中,跨海平距 $D \approx 8\ 896\ \text{m}$, $D/\rho = 21.8\ \text{mm}$ 。我国中、东部地区垂线偏差各分量的值较小,变化也较平缓,故认为相对垂线偏差在本跨海高程测量中的影响可以忽略。

3.8 角度误差对高差造成的影响

根据弧长公式 $L = \rho\theta$,当距离为 8 896 m 时,垂直角角度每变化 1'',对三角高程测量单向高差的影响为 43.1 mm。该项目测量时,采用测角中误差为 1''的 T3 光学经纬仪进行了 102 次双回观测,204 次单测回测角中误差为 $\pm 0.07''$,即测角误差导致的高差中误差为 $\pm 3\ \text{mm}$ 。

3.9 边长误差对高差测量的影响

该次测量距离采用 GPS 观测边长作为跨海距离

成果,由于跨河测量倾角很小,根据计算,当跨河距离为 8 896 m,边长误差达 0.025 m 时,因距离误差导致的三角高程测量高差之差为 0.01 mm。由此可见,因跨距测量误差导致的高程传递误差基本上可以忽略。

3.10 地球曲率对高差测量的影响

由于跨海测量距离达 8.9 km,使用经纬仪测量目标垂直角时,地球曲率对单向观测高差的影响是相当大的。地球曲率(球差)对三角高程测量高差的影响为

$$\Delta h = \frac{S^2}{2R}$$

(3)

式中, S 为跨河距离,本项目中为 8 896 m; R 为地球曲率半径,测区约为 636 199 7 m。

由式(3)可计算出本项目地球曲率对单向高差的影响达 6.220 m,但这一系统误差在采用对向观测方法取往返测高差平均值作为最终高差时完全消除。

3.11 大气折光误差对高差测量的影响

地球曲率造成的“球差”容易求得,但对于由大气折光造成的“气差”来说,由于测线上气象变化万千,用测站和目标处气象数据求得的折光系数并不能代表整条测线上的真实折光系数,解决这一问题的主要方法是严格执行同时对向观测的原则,每测回由有经验的观测员进行同步对向观测,通过同步对向观测的往返高差取平均值消除和减弱“球气差”对观测高差的影响。

4 观测数据分析

4.1 经纬仪倾角法

在本岸完成一半测回数后,两岸对调仪器及人员,完后剩余测回的观测。

跨海水准测量测回数参照二等跨海水准观测了 54 个时段,双测回数 102 个,半测回中的组数为 8。

测量数据采用 PC-E500 进行现场记录,记录程序采用长江勘测技术研究所研制的商用软件。由程序即时自动计算各项限差,测量完成后自动完成测站计算,数据作为下一步计算的依据。测量完成后,将电子记录数据及时打印并装订成册,以供检查。

为方便解算高程,根据观测数据,采用水准规范中相应的表格分别计算水准测量高差与高差测量的中误差。

主要技术指标见表 2。

4.2 测距三角高程法

采用测距三角高程法观测时,当本岸完成一半测回数后,两岸仪器及人员对调,完成剩余测回的观测。

测距三角高程法主要技术指标统计指标见表 3。

表 2 经纬仪倾角法测量成果技术指标统计结果

项目	差值/ mm	容许差/ mm	说明
第一位置高差中数中误差	±3.33	-	
第二位置高差中数中误差	±3.17	-	
第一、二位置高差观测之差	3.12	±11.93	$4\sqrt{K}$
双测回间高差最大差	163.65	±170.83	$4M_{\Delta}\sqrt{NS}$
高差中数中误差	±2.30	-	102 个双测回参与计算
跨海测量高差	+1.28120	-	DYS1 与 XPT1 之间高差

表 3 测距三角高程法测量成果技术指标统计结果

项目	差值/ mm	容许差/ mm	说明
第一位置高差中数中误差	±2.55	-	
第二位置高差中数中误差	±2.32	-	
第一、二位置高差观测之差	1.72	±11.93	$4\sqrt{K}$
双测回间高差最大差	64.34	±71.60	$4M_{\Delta}\sqrt{NS}$
高差中数中误差	±1.72	-	102 个双测回参与计算
跨海测量高差	+1.29764	-	DYS1 与 XPT1 之间高差

4.3 GPS 水准法

港澳大桥工程区地形地貌特点无法按照规范图形进行跨河水准观测。该项目 GPS 水准主要思路是根据 GPS 测量、重力测量及几何水准测量成果进行工程区大地水准面精化拟合,力求得出毫米级似大地水准面成果,再根据 GPS 大地高测量成果推算海中测量平台上过江点正常高成果。

具体实现方法是根据大桥控制网 35 个 GPS 点位,包括 4 个 CORS 站、20 个首级网控制点和 11 个岛隧区新增点(包含测量平台上的过江点),采用基于连续运行参考站的同步区域网静态观测模式,获得各点观测值。

在似大地水准面计算中,使用了 134 个点的重力数据和 21 个 GPS 水准资料,以 EIGEN03 地球重力场模型作为参考重力场,由第二类 Helmert 凝集法完成了大地水准面的计算。

似大地水准面的计算采用了第二类 Helmert 凝集法(Wichiencharoen,1982;Martinec,1998),该法采用的公式均为考虑了地球曲率影响的严密球面积分公式。计算地形直接和间接影响的积分半径均为 300 km。21 个 GPS 水准资料与重力似大地水准面独立比较精度为 ±0.013 m。利用球冠谐调和分析法将 GPS 水准与重力似大地水准面联合求解得出的 2'×2'格网似大地水准面,精度达到 ±0.009 m。

5 成果对比

利用倾角法和测距三角高程法进行高程传递测量

的同时,还进行了 GPS 水准的外业观测工作,所获的观测数据由武汉大学进行处理,得到了 GPS 水准测量成果。3 种方法得到的大屿山至西测量平台的高差见表 4。

表 4 大屿山至西测量平台的高差 m			
跨海测段	经纬仪倾角法 高差	测距三角高程法 高差	GPS 水准法 高差
DYS1 - XPT1	1. 2812	1. 2976	1. 2730

从表 4 结果比较来看,3 种方法所得高差差值并不大,综合 3 类方法的作业情况,其高差差值比较如表 5 所示。

表 5 大屿山至西测量平台 (DYS1 - XPT1) 高差比较 mm			
测量方法	经纬仪 倾角法	测距三角 高程法	GPS 水准法
经纬仪倾角法	0	- 16. 4	+ 8. 2
测距三角高程法	- 16. 4	0	+ 24. 6
GPS 水准法	+ 8. 2	+ 24. 6	0

3 种方法所得到的高差之差中,就经纬仪倾角法与 GPS 水准法而言,其差值与边长之比为 1/108 400 0,其中经纬仪倾角法测回数足够多,GPS 水准法推理严谨,两者都能满足跨海高差测量的精度要求。

利用东、西人工岛(相距 5.8 km)测量平台高程传递测量成果以及业主大桥测控中心施测的东测量平台与大屿山(相距 3.5 km)间最新高程控制复测成果,加入大屿山至西测量平台经纬仪倾角法的测量高差,组成东测量平台 - 西测量平台 - 香港大屿山的水准附和路线,计算路线为 LRS2 - DPT1 - XPT1 - DYS1 - S077,线路长 14.8 km,见图 1。计算结果显示,附和路线高差不符值为 +9.1 mm,小于Ⅱ等水准限差 ±15.4 mm。

以上情况说明港珠澳大桥岛隧工程宽海域高程传递成果内符合精度较好;另外,不同单位、不同方法的测量结果十分接近,能相互印证,故认为该项目长距离高程传递测量成果是可靠的。

6 结论

通过港珠澳大桥项目跨海高程传递测量实践,得出以下结论。

(1) 经纬仪倾角法、测距三角高程法及 GPS 水准法 3 种方法所获得的高程传递结果一致,从而印证了项目长距离高程传递测量成果的正确性和可靠性。3

种方法获得的高差成果相差均较小,且根据大屿山与东西人工岛之间以及东西人工岛之间的高程传递成果组成的附和水准路线不符值仅为 9.1 mm,闭合差达到二等水准技术指标要求,故本次测量成果是可靠的,精度满足要求,可提供大桥施工单位使用。

(2) 在经纬仪倾角法和三角高程法测量过程中,照准觇牌的制作对项目成功意义重大。为本项目制作的合成光源觇牌,提高了目标清晰度和照准精度,从而提高了测角精度,具有一定推广价值。

(3) 由于海中测量平台受外界条件的影响会产生小幅的晃动,技术人员掌握有利时机开展测量,探索出一套同时对向观测流程,对使用常规光学方法开展跨海高差观测有重要意义,有利于高效采集足够的有效数据,保证照准及气泡符合与读数在精确照准时刻读取数据。这一类测量方法和流程对类似项目有一定借鉴意义。

参考文献:

[1] 李建成,姜卫平.长距离跨海高程基准传递方法的研究[J].武汉大学学报:信息科学版,2001,(6).

[2] 王鹏,姜庆峰,尹成玉.跨海高程传递方法与实践.[J].海洋测绘,2011,(2).

[3] 李凤斌,柳光魁,王晓丽,等.长距离跨海高程基准传递方法及精度[J].现代测绘,2007,(2).

[4] 赵庆海,欧阳桂崇,杨华忠.跨海高程传递方法的评价[J].海洋测绘,2012,(11).

[5] 花向红,许承权,范千.跨海大桥高程基准统一新方法研究[J].测绘工程,2009,(2).

[6] 宁津生,郭春喜,王斌,等.我国陆地垂线偏差的计算[J].武汉大学学报:信息科学版,2006,(12).

[7] 张赤军.测距三角高程中的垂线偏差问题[J].测绘学报,1997,(1).

[8] 孙风华,徐新强,邓鹏.中国陆海任意点垂线偏差的快速确定及精度分析[J].武汉大学学报:信息科学版,2005,(1).

[9] 王岩,岳建平,马保卫,等.三种高程传递方法的精度分析[J].北京测绘,2005,(1).

[10] 邓兴升,贾王莎莎,王文慧.带参数 GPS 水准拟合实现跨河高程传递[J].测绘工程,2011,(4).

[11] 艾光辉,吴颢.测距三角高程法实现长距离跨河水准测量的探讨[J].江西水利科技,2010,(3).

[12] 吴新强.经纬仪倾角法在杭州江东大桥过江水准测量中的应用研究[J].测绘与空间地理信息,2012,(2).

[13] 胡兴树,欧小善,李伟,等.琼州海峡精密高程传递方法研究与试验[J].测绘通报,2012,(S1).

(编辑:常汉生)

(下转第 87 页)

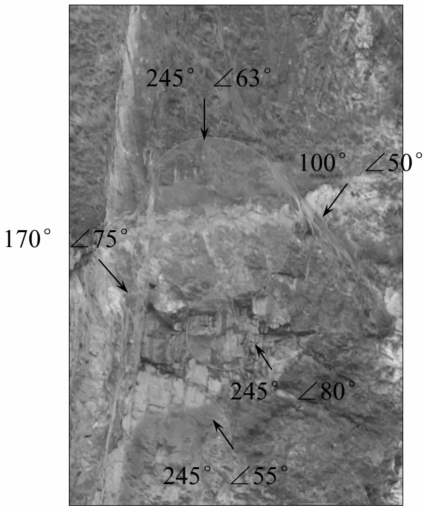


图 11 利用三维影像图搜索得到的块体

4 结论

本文对三维数码照相技术的基本原理和工作步骤进行了阐述,将其应用到乌东德水电站高陡边坡调查中,介绍了该技术在三维数码照片和等高线图生成中的应用。该技术具有高效、安全、准确等优点。

Application of 3D digital photography in geological survey of high slope

YANG Jing, WANG Jiliang, LIAO Libing, DUAN Jianxiao, PAN Jinhe

(Sanxia Exploration and Survey Co., Wuhan 430074, China)

Abstract: ADAM 3D digital photography can be applied in survey, geological logging, deformation monitoring. At present, this technique is still in the initial application stage in China. On the basis of the introduction of its basic principle and working procedure, taking the high slope at dam site of Wudongde Hydropower Station for an example, the photomontage of the 3D digital picture, contour generation, 3D coordinate extraction of any point, trace length measurement of the structural plane and extraction of its information are described. Compared with the conventional technique, this method is effective, safe and accuracy, and has wide application prospects in geology engineering and geotechnical projects.

Key words: 3D digital photography; high side - slope; structural plane; contour; 3D coordinate

(上接第 69 页)

Discussion on high precision elevation transfer method in wide sea area of Gangzhu'ao Bridge

YANG Peibing, LAI Jinfu, WU Youqing

(Sanxia Exploration and Survey Co., Wuhan 430074, China)

Abstract: In the construction survey of Gangzhu'ao Bridge works, due to the large survey distance crossing the sea and the lack of specific national standard, a specified survey scheme should be designed according to the practical condition. In order to obtain the accurate and reliable elevation transfer result, 3 methods of theodolite angle method, triangle height method and GPS leveling method were adopted in elevation transfer survey. Based on the analysis of the main technological problems in wide sea elevation transfer, the special observation mark was designed, which solved the long - distance sighting problem; a set of effective survey flow was made by considering the influence of the shake of offshore observation platform on the survey accuracy, which ensured the collection rate of effective data. The comparison and analysis of the survey results obtained by different units and survey methods show that the elevation transfer results was reliable, meeting the technological index requirement by national second order leveling standard.

Key words: elevation transfer; measurement scheme; theodolite angle method; triangle height method; GPS leveling method; island and tunnel project; Gangzhu'ao Bridge

参考文献:

- [1] 周春霖,朱合华,赵文. 双目系统的岩体结构面产状非接触测量方法[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(1):111-117.
- [2] 张春霖. 双目序列影像三维运动物体定位跟踪[J]. 测绘学报, 2006,35(4):347-352.
- [3] 范留明,李宁. 基于数码摄影技术的岩体裂隙测量方法初探[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(5):792-797.
- [4] 王凤艳. 数字近景摄影测量快速获取岩体裂隙信息的工程应用[D]. 长春:吉林大学,2006.
- [5] 董秀军,黄润秋. 三维激光扫描技术在高陡边坡地质调查中的应用[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(增2):3629-3635.
- [6] 纪勇,李孝雁. 三维激光扫描技术在水利工程建设中的应用[J]. 黄河水利职业技术学院学报,2008,20(1):23-25.
- [7] 董秀军. 三维激光扫描技术获取高精度DTM的应用研究[J]. 工程地质学报,2007,15(3):428-432.
- [8] 姜国川,赵其华. 基于三维激光扫描技术的高边坡岩体结构调查[J]. 长江科学院院报,2009,26(9):58-61.
- [9] 陈学工,黄晶晶. 等高线高程自动标注算法的研究[J]. 测绘科学, 2007,32(4):101-103.
- [10] 何秉顺,丁留谦,孙平. 三维激光扫描系统在岩体结构面识别中的应用[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2005,5(1):43-48.

(编辑:李慧)