



中交四航院海岸工程勘察技术的回顾与展望

卢永昌

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东广州 510230)

摘要: 我国沿岸港口建设日趋饱和, 需要在自然条件更加恶劣的沿岸建设大型港口物流枢纽、大型跨海桥梁、海底隧道及清洁能源风电机组等基础设施, 海岸工程勘察常遇上浪高、流急、水深、风大等作业条件; 另一方面, 大型基础设施建设越来越需要高标准严要求的综合勘察技术以解决复杂多变的地质条件, 采用传统单一的海上工程勘察技术越来越难满足大型工程建设的需要, 寻求海岸工程勘察技术的革新是必然的要求。以四航院为例, 回顾海岸工程勘察技术的发展过程, 并展望勘察技术水平提高可增强国际竞争力, 为推动我国水运行业的海岸工程勘察技术与国际接轨并参与国际竞争提供参考。

关键词: 海岸工程勘察; 液压升降钻探平台; 波浪补偿钻机; 海床式静力触探设备; 工程测量; 地球物理勘探

中图分类号: TU 413

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)07-0009-06

Review and prospect of coastal engineering investigation technology

LU Yong-chang

(CCCC FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

Abstract: Due to the little field for the construction of coastal port construction at present, there is a need to construct large infrastructures such as harbor, bridge, tunnel and wind turbine along the coast with a worse natural condition. As a result, the bad sea conditions such as heavy wave, rapid current, deep water and huge wind are encountered for the coastal investigation work. On the other hand, the comprehensive investigation technologies adapting the high standards and strict requirements are required for the large infrastructures to find out the complex geological conditions. The traditional and single overwater investigation technologies are hard to satisfy the requirements of the large project's construction, and the new investigation technologies are necessitated to be sought for. Taking the investigation technology of CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd. as an example, this paper reviews the process of the coastal investigation technology and prospects to enhance the international competitiveness, which will provide reference for the promotion of the domestic coastal investigation technology and participate in the international competition.

Key words: coastal engineering investigation; hydraulic jacking-up; separate hydraulic drive rig; seabed CPTU system; survey; geophysical survey

近10年来, 随我国大量投资交通基础设施建设, 沿岸港口建设日趋饱和, 需要在自然条件更加恶劣的沿岸建设大型港口物流枢纽、兴建大型跨海桥梁及海底隧道以解决交通问题、在广阔的海域建设清洁能源如风电等等, 这些海岸工程的勘

察作业环境条件越来越恶劣, 如浪高、流急、水深、风大, 并远离大陆等, 采用我国水运行业传统单一的勘察设备难以完成任务和提供高质量的勘察成果, 并与国际勘察技术有较大差距。如何适应水深浪大等恶劣海况条件, 采用与国际先进

收稿日期: 2013-05-21

作者简介: 卢永昌(1964—), 男, 设计大师, 教授级高级工程师, 从事港口、航道及桥梁工程的勘察设计。

接轨的多种勘察方法进行高质量的工程勘察是四航院这几年着重考虑的问题。为了适应这些变化,四航院在2008年开始开展相关海岸工程勘察技术研究,自主研制高标准的海岸工程勘察机械设备,同时引进国外高质量原位测试设备、室内试验设备、测量仪器和物探设备,打造具有国际先进水平的工程勘察团队。

1 海岸工程钻探技术发展

我国水运行业传统的海上钻探方法是将钻机固定在钻探船上进行海上钻探,因受波浪的影响,此钻探方法有以下缺点:一是钻探质量不高,取土质量不高,难以取得真正的不扰动土样,孔内原位测试精度低;二是安全性较低,作

业时间有限;三是在国际上得不到咨工的认可。为了适应市场的变化及提高海岸工程勘察技术,2008年始,四航院根据水深、海床地质及使用情况等条件研制一系列符合国际标准的海上液压升降钻探平台(Jack up),目前研制成功4个型号的海上升降钻探平台(表1),适合水深1~20 m的海域进行工程地质钻探,为海上钻探提供稳定、安全可靠的载体;2010年根据港珠澳大桥岛隧工程精细化勘察的要求,研制了具有波浪补偿功能的分离式液压驱动钻机,钻探深度达到200 m,适合浪高小于2 m,7级大风等恶劣条件进行难度大要求高的海岸工程钻探;配置大量先进的取土设备如Piston, Shelby和Mazier等取土器采取高质量的不扰动样(表2)。

表1 海上升降钻探平台规格

平台编号	平台规格/m	适用水深/m	适用海况条件	平台特点
FHDI01	4.3×6.0×0.7	1~4	浪高<0.5 m, 风力<4级	电动升降
理想1 [#]	8.0×7.2×1.7	3~8	浪高<1.0 m, 风力<6级	液压升降, 勘察不受波浪影响
理想2 [#]	9.6×10.4×1.8	5~11	浪高<1.0 m, 风力<6级	
理想3 [#]	15.8×15.8×1.8	8~20	浪高<1.5 m, 风力<6级	

表2 钻探设备配置

钻探设备名称	规格/m	产地	用途	钻机特点
高速回旋钻机	XY-1A	中国	钻探取芯及取样	国内传统钻机, 100型
高速回旋钻机	XY-2B	中国	钻探取芯及取样	国内传统钻机, 300型
高速回旋钻机	XY-3	中国	钻探取芯及取样	国内传统钻机, 600型
分离式海洋钻机	HY-D200	中国	钻探取芯及取样	波浪补偿钻机, 钻探取样不受波浪影响, 性能与国际接轨

四航院海岸工程钻探设备已从20世纪70年代在渔船或货船安装冲击钻或100型小型钻机的粗线条的勘察设备发展到目前采用适合不同水深的液压升降钻探平台、具有波浪补偿功能的大型海洋钻机的专业化和精细化的勘察设备。钻探设备的更新换代,为四航院工程勘察技术的革新提供条件,不但可以将熟悉的传统港口、桥梁、水利等项目工程勘察业务拓展到难度更高要求更严的海底隧道、海上风电、单点系泊工程和超深水区域的海岸工程勘察,也可以按ASTM和BS等国际标准要求实施各类海上工程的精细化勘察,如2009年承担的南澳海上测风塔工程,离岸20 n mile,水深约40 m,波浪高度通常为2 m,四航院通过技术革新采用大型勘察机械设备,成功实施该项目;

2010—2011年,由四航院承担采用国际标准、国外咨工监督的港珠澳大桥岛隧工程地质勘察,勘察方案和成果获得业主、咨工、监理、设计及由国内院士、勘察大师组成的专家组的一致好评;2011—2012年“理想1[#]”、“理想2[#]”液压升降钻探平台在喀麦隆克里比港口项目工程勘察中与国际公司进行强有力的竞争,并得到法国咨工的认可,发挥非常重要作用。

展望未来,海上勘察装备专业化、集成化、大型化是必然趋势,建造固定的专业钻探船配置振动取样(Vibrocore)、多种原位测试设备及在船上建立现场土工实验室这种高度集成专一的钻探船是将来发展方向,只有这样才能与欧美等先进国家进行竞争。

2 原位测试技术发展

四航院的原位测试技术由20世纪70年代的标准贯入试验、十字板剪切试验等单一的测试手段发展到现在的海床式静力触探试验、陆域“三

桥”静力触探试验、海陆两用的电测十字板剪切试验、悬挂式波速测试、旁压试验、浅层和深层载荷板试验、海上抽水试验等综合原位测试方法，所配置的主要原位测试设备见表3。

表3 原位测试设备配置

原位测试设备	规格/m	产地	特点
海床式CPTU	ROSON	荷兰	国内首家拥有，符合国际标准
陆域CPTU	Vertek	美国	符合国际标准
标准贯入试验仪	63.5kg	中国、香港	符合国际标准
标贯分析仪	PDI	美国PDI	国内首家拥有，符合国际标准
重型动力触探	63.5kg	中国	
电测十字板仪	HJ-4	中国	
旁压仪	G-AM/PM-2	法国、中国	符合ASTM、BS等国际标准
悬挂式波速测井仪	XG-1	中国	
螺旋载荷试验仪	TDL	中国	

2.1 孔压静力触探测试技术发展

静力触探试验(CPT)是一种速度快、数据连续、再现性好、操作省力的原位测试方法^[1]。随着海洋开发的迅速发展，CPT技术在国外海洋工程领域的使用越来越普遍，在工程地质调查中起到越来越重要的作用。目前我国静力触探技术虽然在陆域上得到了广泛应用，但大量使用的仍然是“单桥”探头、“双桥”探头，仅使用少量“三桥”探头，虽然探头截面积与国际通用的探头面积相同，但测试结果有较大误差，主要是国内仪器设备的精度以及贯入速度等达不到国际要求，给测试成果的比较和国际学术交流造成了很大的困难^[2]。孔压静力触探试验(CPTU)是国外常用的工程勘察手段，并积累非常多的成功经验和数据分析，特别适合用于港口堆场、护岸、人工岛、隧道、海底管线、路由等海岸工程勘察，但在国内受仪器设备限制，海岸工程极少采用海床静力触探。

为了实施港珠澳大桥岛隧工程的大量海上CPTU测试，四航院从国外引进1套Roson 75/100 kN设备，该设备的最大贯入反力达到100 kN，工作水深可达1 000 m；2套陆域静力触探设备(CPTU)。通过这些先进设备成功应用于港珠澳大桥岛隧工程并获得高质量的原位测试数据，结合附近香港地区已有的参数，参考国外大量CPTU文献完成港珠

澳大桥主体工程岛隧工程静力触探试验结果专题评估，评估结果与荷兰隧道工程咨询公司的评估结果较一致。大量的工程实践和测试结果的数据分析，培养四航院工程技术人员能熟练操作海床式CPTU设备和具有符合国际标准的成果分析能力。

2.2 标准贯入试验的技术发展

目前国内海岸工程勘察的原位测试主要是标准贯入试验，随着四航院涉外工程及与国外工程师交流的日趋增多，四航院逐步配置符合英国BS标准、美国ASTM标准的标准贯入试验设备，可以按国际标准进行测试。并配置了国外进口的SPT分析仪，也是国内唯一一家引进的SPT分析仪的勘察设计院，主要测量锤击传递能量比，为准确应用SPT的数据带来定量分析。以SPT分析仪为基础，承担了科研课题《不同标准下的标准贯入试验差异的研究和应用》。

2.3 其它原位测试技术发展

随着旁压试验、原位十字板试验、波速测试等在海上工程勘察的应用越来越广，综合测试技术得到很大发展，目前承担了《各原位测试结果的关联性》、《海床式原位十字板剪切仪》等课题的研究和开发。

2.4 原位测试技术展望

原位测试技术是工程勘察最直观、最可靠、

快速连续的勘察手段。在做优原有的原位测试技术基础上,一方面还要加大引进先进原位测试仪器的力度,如引进可测电阻率、温度、酸碱性、剪切波的多功能静力触探探头,满足海底通讯电缆、路由、海底输油管的勘察;又如孔内直接剪切仪可以直接测量剪切强度得到原位的抗剪参数的凝聚力和内摩擦角等;第二方面要加速原位测试的数字化、集成化、自动化和网络化^[3]。

3 室内试验技术发展

室内试验是工程勘察的重要手段,测试结果是否准确关系项目成功与否。要做好室内试验,除了要保证钻探取土质量外,还需要先进的仪器设备和操作人员对试验步骤熟练度作为保证,更

需要技术人员对各种岩土物理力学特性的透彻研究。为此,四航院土工试验仪器已由20世纪70年代落后的手工操作、人工采集数据仪器发展到自动化程度极高的电脑控制、采集数据及分析成图技术。目前配置的先进的测试力学指标的仪器设备见表4,能覆盖所有岩土力学试验项目,特别是试验要求非常高的恒应变速率固结试验(CRS)和 K_0 固结不排水三轴剪切试验(CAU)等,并能按设计要求力求模拟实际土层受力状态进行试验。四航院的土工实验室在华南地区属于仪器最多、技术最齐全、成果质量最优的实验室之一,技术力量雄厚,并承担过多项国内及涉外的大型室内试验项目,同时能按英国BS、美国ASTM及香港标准承担香港和澳门地区委托的试验项目。

表4 主要试验仪器设备

仪器名称	仪器型号	产地	用途	特点
应力路径三轴仪	STDITS	英国	UU、CU、CD、CAU	ASTM, BS标准
CRS固结试验仪	STDITS	英国	IL、CRS、CGC	ASTM, BS标准
室内十字板仪	ELE	英国	软土不排水强度	ASTM, BS标准
土壤筛	ELE	英国	英标颗粒分析试验	ASTM, BS标准
数显式液限仪	ELE	英国	细粒土的液塑限试验	ASTM, BS标准
全自动三轴仪	DS08-A1	中国	UU、CU、CD	
应变控制式三轴仪	TSZ30-2.0	中国	UU、CU、CD	
全气压固结仪	GZQ-1	中国	固结试验	
无侧限仪	YYW-2	中国	无侧限抗压强度试验	
应变控制式直剪仪	ZJ-4A	中国	直接剪切试验	
微机控制电液伺服压力试验机	YAW4206	中国	岩石抗压强度、弹性模量等	

目前土工实验室承担《结构性土的力学特性研究和试验方法改进》、《多次循环固结试验的参数变化》、《 K_0 固结不排水剪切试验特性》等课题的研究。未来发展将进一步提高试验自动采集处理、试验数据网络化、达到试验数据同步分享。打造按ASTM、BS等标准实施岩土试验的具有国际竞争力的实验室。

4 工程物探技术发展

目前四航院物探技术的发展已从单一的以声波作为震源的浅地层剖间探测和侧扫声纳探测发展成多震源多频段多方法的综合海域地球物理勘探;资料采集和记录的手段也已由模拟信号发展

成数字信号,资料处理和分析已经完全实现电子化和程序化;繁杂的物探资料的滤波、动校正、静校正、归一化、道间平衡等数学处理得到广泛应用;项目的类别已经由传统的港航工程扩展到港口、码头、航道、陆域形成、海底管线、道路、桥梁、隧道、人工岛、石化仓储、高边坡、核电水工等多种类型的项目;工程的范围已经由国内的东南海域发展到遍布全国沿海及东南亚、中东、非洲、南美洲、大洋洲的二十几个国家和地区。

四航院拥有先进的全系列海洋工程物探设备及多种陆域物探设备(表5),能够独立完成浅剖、声纳、地震、海磁等海域物探工作和面波、折射、反射、高密度电阻率等陆域物探工作和海

陆域的声波测井、剪切波测试、跨孔波速测试、地震CT等原位测试工作。近10年来完成了遍布全

球的100多项大型重点工程的地层勘探、海域障碍物探测、原位测试等勘探任务。

表5 工程物探仪器设备

设备名称	规格型号	产地	用途
多功能地质检测仪	SWS-1G	北京	实施面波、折射、反射、地震映像勘探以及波速测试等，用以探测地层及原位测试等
多功能地质检测仪(面波仪)	SWS-3	北京	实施面波、折射、反射、地震映像勘探以及波速测试等，用以探测地层及原位测试等
高密度电法仪	GMD6	武汉	实施用于电阻率测试、常规电法勘探及高密度电阻率勘探等，用以探测地层及原位测试等
多功能直流电法(激电)仪	DZD-6A	重庆	实施用于电阻率测试、常规电法勘探及高密度电阻率勘探等，用以探测地层及原位测试等
声波检测仪	RS-ST01C	武汉	实施井中声波测试，用于岩土层的波速测试
悬挂式波速测井仪	XG-1	河北	实施井中声波测试，用于岩土层的波速测试
数字彩色摄像系统	RS-DTV	武汉	实施井中实况摄影成像
测斜仪	CX-5C	武汉	实施钻孔测斜等，用以探测钻孔倾斜度，配合跨孔波速测试及监测等
电火花系统	CSP-D	英国	实施浅地层剖面探测、中地层剖面探测、电火花式地震勘探、BOOMER勘探，用以探测地层
电火花系统	CSP-L	英国	实施浅地层剖面探测、中地层剖面探测、电火花式地震勘探、BOOMER勘探，用以探测地层
磁力仪	SEASPY	加拿大	实施海洋磁力探测，用以探测海底障碍物
SES参量阵测深-浅剖-声纳仪	SES2000	德国	实施水深测量、浅地层剖面探测、侧扫声纳探测，用以探测海底水深地层地貌及障碍物等
C-MAX 侧扫声纳仪	C-MAX	英国	实施侧扫声纳探测和扫海，用以探测海底底质、海底障碍物、海底面状况扫描等
跨孔地震CT成像系统	IPG1005	德国	实施水域及陆域单孔、跨孔波速测试及地震CT，用以波速测试及地层探测

由于行业的特点，四航院在水域地球物理勘探方面积累了大量的实际工作经验。近10年来，四航院每年均完成上千公里的海域地球物理勘探工作，尤其是浅地层剖面、侧扫声纳、电火花地震、地震映像、海洋磁力等技术方法，在仪器设备、技术能力、人员配备、工程实践等方面，均已处于我国水运行业内前列，而且积极参与到国际海洋工程地球物理勘探的竞争和合作中。

随着物探技术的不断深入应用和设计人员对物探期望值的不断提高，海域物探技术的应用面逐渐扩大。可以预计，将来物探技术将在下面几个方向获得更大的发展：1) 应用于已有码头构筑物的无损检测技术；2) 随着波的运动学研究和动力学研究逐渐深入提出的新理论新技术；3) 采用新的云计算模式和有限元分析模式来研发能够提供高精度薄夹层和沉积层细分成果的仪器设备。

5 工程测量技术发展

随电子技术的发展，工程测量技术突飞猛进，四航院紧随技术潮流，配置大量高精度的精密测量仪器设备(表6)，如用于高精度定位、长距离控制测量及提供远海导航定位服务的GNSS三频接收机，采用3个卫星导航信号显著提高动态用

户的实时点位精度；用于水运工程水深测量、疏浚测量的单双频测深仪；用于三维超高精度变形监测的第4代0.5"级的全自动测量机器人等等。四航院拥有多种世界工程系列中最高精度的设备，继承了近50年传统的海上测绘优势，积累了华南及非洲东、西海岸沿海丰富的区域测绘资料，另外近10年来承接了多个海外水运勘测项目，拥有丰富的海外勘测经验。

目前四航院的海上工程测量业务覆盖港口、海洋、水利、海底隧道、跨海大桥等领域的测量和技术咨询业务，具体包括陆地、水域地形测量、控制测量、变形观测及施工监测。一方面做大做强工程测量技术；另一方面加大科研技术开发力度，结合实际生产情况及国际先进测绘技术进行技术开发和推广，力争走在测绘技术的最前沿，如精密单点定位技术应用及总结、时精密单点GNSS连续运行参考站应用技术、地区性广域差分增强系统及星站差分在海外项目的应用技术、高层建筑的沉降监测综合技术应用。自主研发的信息系统及软件填补了国内外商业测量软件在水运工程测量中的空白，如水运工程图式库开发及三维绘图软件、断面图自动成图软件、GPS导航及钻探放样定位软件、数字测深后期处理软件、GPS

表6 测量仪设备

仪器名称	仪器型号	产地	用途
高速超高精度全站仪	TS30/TC2002	瑞士	测量机器人, 第4代的0.5"级的全自动全站仪, 测角精度0.5", 测距0.6 mm+1 ppm, 三维超高精度变形监测; 高铁、船舶、地铁、机场、隧道、油罐等精密测量和施工
全站仪	TS02/TC402/TC702/TC406全系列	瑞士	控制测量、地形测量、放样
高精度数字水准仪	DNA03	瑞士	控制测量及高精度变形监测0.3 mm/km
GNSS兼容接收机	R8系列(4700/R7/R8)	美国	GPS/GLONASS接收机;主要用于高精度控制测量及RTK作业
	SPS系列(SPS881/882)	美国	
	信标系列(SPS351)	美国	海上DGPS定位
	手持GPS	美国	快速定位
	SBAS系列(PROXT)	美国	远海定位
测深仪	ODEM单/双频/reson单频等	美国/丹麦	高精度测深
声速仪	DIGIBAR-PRO/Valeport_MINISVP	美国/英国	高精度声速测定
三维姿态仪	S-108三维姿态仪/波浪补偿仪SS HS-50	瑞典/英国	三维姿态修正及波浪补偿
GPS罗经	SPS361	美国	测深位置修正
验潮仪	TGR-2050/ Valeport MINITIDE	加拿大/英国	自动验潮
HYPACK软件		美国	国际通用导航及数据采集软件

同步异步环闭合差统计软件、多站水位观测水深处理软件、水运工程测量地理信息查询系统, 水运工程测量内外业标准化等等; 逐步进入高技术测量监测工作, 如地下隧道变形观测、桥梁变形观测等。

近年来四航院还在积极探索国际最新测量定位技术方面做了大量工作, 以应对国内外各种复杂项目的要求, 确保在任何困难情况下都能提出相应的测量解决方案。如实时精密单点定位技术, 该技术使得在世界范围内任何地点任何时间进行精密单点定位成为可能; HD-GNSS高精度定位处理引擎, 测量员几乎可以在所有户外环境下都能精确测量; 低空无人机遥感技术可满足在欠发达国家进行快速大面积地形地貌调查的要求;

无人船水域测量机器人技术可解决交通繁忙或复杂危险水域的水深测量工作; 而智能水下机器人的商业应用包括海岸和远海结构物检查修理、铺设电缆、海洋海底地形地貌勘测, 海底浅地层剖面测量及海洋要素测量等等。

参考文献:

- [1] 孟高头. 土体原位测试机理, 方法及其工程应用[M]. 北京: 地质出版社, 1997.
- [2] 刘松玉, 吴燕开. 论我国静力触探技术(CPT)现状与发展[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(4): 553-556.
- [3] 卓宝熙. 我国工程勘察技术的回国和展望[J]. 工程勘察, 2008(S1): 145-157.

(本文编辑 武亚庆)

