

马来西亚槟城二桥勘察新技术应用

李孝杰, 胡建平

(中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032)

摘要: 槟城二桥是马来西亚第二座跨海大桥, 地质条件复杂。勘察中大量采用拥有完全自主知识产权, 具有国际竞争力的海上船载式勘探平台、钻探取样、原位测试、软土测试与中外岩土分类数据转换为一体的综合勘察新技术, 解决了船载平台模块化设计、泥浆循环利用、标贯落距控制等一系列难题, 为提升取土质量、减低勘察成本提供了有力的技术支撑, 对我国企业跨出国门分享海外市场具有现实意义。

关键词: 勘察平台; 原位测试; 海上勘探; 软土测试

中图分类号: U652.2; U442.2

文献标志码: B

文章编号: 2095-7874(2020)11-0061-05

doi: 10.7640/zggwjs202011013

Application of new survey technology in Penang Bridge II, Malaysia

LI Xiao-jie, HU Jian-ping

(CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: Penang Bridge II is the second cross-sea bridge in Malaysia with complex geological conditions. In the survey, a large number of new comprehensive survey technologies with complete independent intellectual property rights and international competitiveness have been adopted, which include the offshore ship borne exploration platform, drilling sampling, in-situ testing, soft soil testing and the transformation of Chinese and foreign geotechnical classification data, have solved a series of problems such as modular design of ship borne platform, mud recycling, standard penetration distance control, etc. It provides a strong technical support for improving the quality of soil sampling and reducing the cost of survey, which is of practical significance for Chinese enterprises to go abroad to share overseas market.

Key words: exploration platform; in-site test; offshore exploration; soft soil test

1 工程概况

马来西亚槟城二桥是连接马来西亚槟城(岛) Bayan Lepas 南端和马来西亚西侧大陆 Hujung Bukit 的第2座跨海大桥, 是马来西亚“第九大马计划”之首要工程, 也是东南亚地区最长的跨海大桥。主桥采用三跨双塔H形斜拉桥结构, 桥面宽28.8 m, 双向四车道加双向摩托车道, 设计时速80 km/h, 桥梁结构设计寿命为120 a, 总投资额约14.5亿美元。

工程具有勘察线路长、工作量大、任务重、水深条件不利、工程地质复杂、原位测试类型多等特点, 许多技术问题亟待解决。

从2007年7月—2010年6月, 先后进行了难度高、地形复杂的跨海段约17 km海域勘察, 工程中大量采用自主研发的海上船载式勘探平台、海上钻探取样新工艺、海上原位测试及中外岩土数据转换技术, 充分展示了“中国勘察”高质量、低成本的技术优势。

2 场地工程条件

2.1 勘察线路长、勘探项目众多

槟城二桥总长度约24 km, 其中海域桥段总长约17 km(图1), 勘察分3个阶段进行。2007年第1阶段, 完成地质勘探孔205个, 主桥区域孔深约120.0 m, 其余桥段孔深一般为70.0~90.0 m, 累计钻进入土16 497.7 m; 2009年第2阶段, 完成钻探孔和静力触探试验孔18个, 入土1 684.9 m, 并在钻孔内进行旁压试验; 2010年第

收稿日期: 2020-08-13 修回日期: 2019-10-23

作者简介: 李孝杰(1971—), 男, 高级工程师, 主要从事岩土工程勘察技术开发和管理工作。E-mail: lixj@theidi.com

3 阶段，完成主桥灌注桩桩底界面取芯检验孔 32 个；还需完成波速测试孔 10 个、十字板剪切试验

孔 14 个等。要求采用马来西亚 JKR 标准，并参照英标^[1]采用全芯取样，勘察质量要求极为严格。

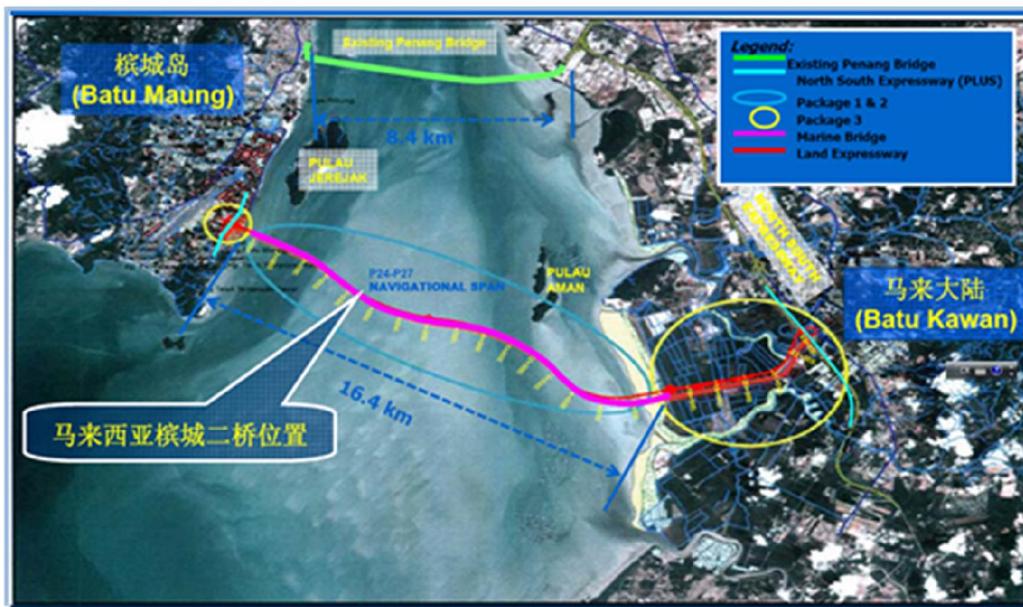


图 1 马来西亚槟城二桥位置图

Fig. 1 Map of Penang Bridge II in Malaysia

2.2 水深条件不利

靠近北海 Batu Kawan 区段为潮间带区域，落潮时滩涂裸露，涨潮时淹没，潮位差不足 1.5 m，勘察作业受制于涨退潮时间以及船的吃水深度。若采用常规的搭建作业平台法，则存在反复搭、拆、迁的过程，耗时、耗力、效率低，并影响潮间带区域生态环境。需要一种新方法解决这个勘察区域路不能建、车不能到、船不能进的盲区。

2.3 地质条件复杂

勘察区域浅部为多层不同厚度和不同硬度欠固结的全新世冲积层。不同的土层呈现不同的颜色、密度，显示经历不同的沉积条件和历史。这些沉积层的厚度介于 16~42 m。

根据土层不同的强度和颜色，分为上层土和下层土。上层土非常软，为浅~深灰色粉质黏土，局部含有腐烂的有机质和浅灰色松散的细到粗的砂透镜体。从泥面到-20 m，土的可塑性指标平均值约 50%，含水量平均值约 100%，平均密度约为 1.4 g/cm³。下层土为冲积层，主要为粉质黏土，夹有松~中密的黏质砂土透镜体。在-20 m 以下土壤的可塑性指标平均值约 40%，含水量平均值约为 50%，平均密度约为 1.6 g/cm³。

由于勘察区域覆盖层以黏性土和砂土为主，

且砂土的颗粒较粗，呈中粗砂状，混少量砾石颗粒，局部含砂质结核，给勘探中采用的泥浆护壁工艺造成了较大的影响，如果泥浆配比调配不好，孔壁在一定时间内易坍塌，导致土体扰动或原位测试数据不准确，同时增大了卡钻或埋钻的风险。

基岩风化层在不同区段性质不同，桥段大部分区域岩性为岩浆岩—花岗岩，而在靠近北海的 Batu Kawan 区段为沉积岩—页岩或变质岩—千枚岩，岩面起伏大。

2.4 原位测试类型多

根据设计意图及工程的重要性，本工程分别进行了标准贯入试验、十字板抗剪强度试验、波速试验、旁压试验和静力触探试验等多种海上原位测试项目。尤其是波速试验、旁压试验和带孔压测试的静力触探试验，其中波速试验深度达到入土 120 m，旁压试验深度达到入土 70 m，静力触探试验深度更是达到了入土 80 m，这在以密实中粗砂土地层为主的海域勘探中实为罕见。

3 技术创新

由于勘察区域地况、地貌、风浪、潮流及潮间带涨落潮等影响，勘探时间受到限制，泥浆流失易造成海上环境污染，取样质量要求高，若采用类似海上石油开采或国外专用勘探设备，所需

投入非常庞大,勘察费用昂贵,不利于海外市场的拓展。为此,采用一系列具有自主知识产权的勘察新技术:1)突破了船载平台5级海况的限制,使海上勘探作业时间延长30%以上;2)采用了海上取样新技术,获取I~II级土样,并将取样率提升至95%以上;3)提出了中外岩土分类标准数据转换方法,提供了1套符合中外规范的土工试验报告。

3.1 海上船载式勘探平台

3.1.1 平台模块化拼装设计

勘探平台采用模块化拼装设计,模块通用性广,便于集装箱装载和长距离运输。当地优选1艘自航式小平底船舶,船舷与艏艉线之间甲板上铺设模块组件,将模块中型钢、支架通过螺栓固定形成平台框架,部分悬臂于舷体一侧,铺设地板后形成勘探工作区。现场无需大型吊装设备,采用积木搭接法,拼装简便,整个安装1~2 d内即可完成,从而在现场快速形成1个海上船载式勘探平台^[2]。

3.1.2 不间断钻进法

为了缩短海上勘探时间,提升作业效率,采用独创的三钻机混合钻进法^[2]。船载平台上1台主钻机负责钻进,平台另侧2台辅助钻机交叉承担上下提引钻杆,这样可大幅缩短清孔与取样时间,减少了孔内浆液沉积,提升了取土质量。当出现卡钻故障时,集三钻机提引叠加的优势,快速排除故障,从而进一步降低了海上勘探作业的事故风险。

3.1.3 泥浆回收循环利用

泥浆循环装置由旁通接头、管道、双层过滤网、回收池、泥浆泵等组成^[2]。泥浆泵从过滤池中吸入泥浆压入管道,管道中泥浆通过钻杆、钻头被不断地压入孔底,并和孔底被钻头磨碎的土颗粒融合,形成悬浮液,在泥浆泵不断压入泥浆下,将孔底的土颗粒持续地通过钻杆外侧沿孔壁和套管内上溢,浆液带至船体平台并流回泥浆池经双层过滤后得以循环使用,既节约了资源,又保护了水域自然、生态环境。

创新设计的船载式勘察平台^[3],具有以下优点:1)不受地域限制。目前已应用于“一带一路”沿线20多个国家。2)应用范围广。船载式平台可用于潮间带~近海水域勘探。3)勘探成本低于同类产品50%。

3.2 海上钻探取样新工艺

海上勘探取样易受风、浪、涌及钻杆与套管之间碰撞等因素影响,取样成功率低,难以获取I或II级土样,需采用新技术提升取样率和取土质量。

3.2.1 双管单动取土器

为了满足本工程英标^[4]全芯原状取样要求,采用了自主研发的双管单动取芯取土器^[4-5]。这种新颖取土器可用于黏性土、粉土和粉细砂,取芯取样1个钻进回次同时完成,并具有防止土芯、土样脱落的功能,能准确控制钻进进尺,岩芯采取率达到规范规定的要求,而且取土质量优于常规取土器,钻进效率高于目前常用的取样钻探工艺。其工作原理属于重管单动回转压入取土器,具有国内外回转压入取土器的一些基本结构外,其内管由容纳土芯的岩芯管和弹簧活门装置组成,弹簧活门装置由活门座、弹簧翻板和活络管靴组成。

3.2.2 封闭式软土取样器

针对超软土取样结构易扰动、取样率低,发明了一种超软土原状取样技术^[6]。取样器由驱动缸、缸套、活塞等组成,采用独特的杆内压力传递设计,驱使翻盖自动封闭(图2),使超软土取样成功率提升至95%以上。



图2 封闭式软土取样器

Fig. 2 Closed sampler for soft soil

该取样技术可用于海床下不同深度超软土取样,为颗粒分析、泥沙沉降、淤泥流变特性试验提供样本。

3.3 海上原位测试技术

随着海上基础设计越来越重视原位测试SPT所提供的贯入击数(N),有关SPT落距的规定,中国GB 50021—2009《岩土工程勘察规范》中为

(76±2) cm; 英国 BS 1377-9: 2007 中为(76±3) cm。陆域作业时, 现有的勘探设备及方法能够准确控制落距, 但海域作业时, 勘探设备固定在船载平台上, 在波浪起伏的海况下, 无法控制穿心锤的落距, 使得标准贯入击数(N)失真。

为此研制了一种用于海上 SPT 落锤控制装置^[7], 由钻杆、钢丝绳及穿心锤等组成。驱动装置安装在船体上, 内含波浪检测模块和控制模块, 波浪检测模块内设倾角传感器和陀螺仪传感器, 倾角传感器测得船体倾斜角度, 陀螺仪传感器测得船体角速度, 实时传输给控制模块; 控制模块根据波浪检测模块测得的数据, 计算出船体下一时间段 t 内的波浪升沉变化量, 并计算出波浪补偿量, 使穿心锤获得标准落距。另外, 设计中还含有用于测量钢丝绳的张力传感器, 测量钻杆位置的测距传感器, 以及液压泵、伺服阀、液压马达和卷扬机组成的驱动装置, 见图 3。

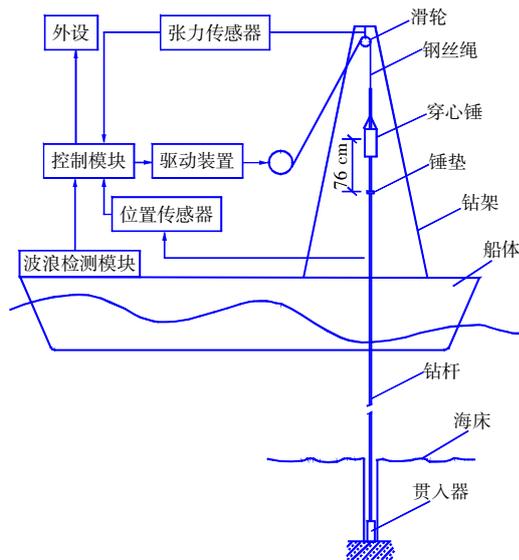


图 3 海上 SPT 落锤控制原理图
Fig. 3 Control chart of SPT drop at sea

波浪检测和控制集成模块, 可实时预测船体下一时间段升降变化量, 实时驱动钢丝绳距离补偿, 确保穿心锤标准落距与自由落体, 从而准确获得海上 SPT 贯入击数 (N); 采用自适应智能控制算法, 实现液压传动无级变速, 使陆域 SPT 依托本发明而延伸至海域, 满足了本工程的需求。

3.4 软土测试与数据转换技术

为准确预测建成后大桥基础沉降趋势, 需要准确获取土的次固结系数。为满足本工程规范标准, 需完成中外标准之间土体分类数据转换。

3.4.1 室内次固结测试方法

大桥部分基础位于软土层上。软土具有压缩性高、孔隙比大、含水量高及承载力低等特性, 易造成基础变形^[8]。目前普遍认为, 最能反映工后沉降的是次固结系数, 但在 GB/T 50123—1999 《土工试验方法标准》和行业规范中均未列入测试标准, 造成无章可循, 若参照固结试验标准, 则存在试验周期、加载方式等差异, 造成同一种土不同的试验室提交的次固结系数会不同, 无法真实反映桥基沉降特性及趋势^[9]。

为满足本工程需求, 采用一种创新测试法: 硬件采用传感器、数据传输线、采集器等构成多联全自动采集系统^[10-11]。软件采用加荷算法控制, 确保采集的试样高度变化与设定的时间同步, 实时生成孔隙比与时间对数关系曲线; 采用增点测读法, 测得次固结曲线, 反演推导出次固结系数。该方法在洋山深水港等多个海相工程中应用与验证^[12], 本工程采用海上原状取样, 室内采用分级加载、延时校正的快速测试法, 得出整个大桥次固结系数与压力变化关系。大桥建成后的工后沉降观测结果与之基本一致。

3.4.2 中外岩土数据转换技术

针对中外岩土分类差异性, 提出基于颗粒划分法、分类界限法的二叉树遍历与区域匹配算法, 自动完成中外标准之间土体分类数据转换, 从而打破了中外岩土分类差异所构成的障碍^[13]。

转换原理: 首先基于中外主流规范建模, 编制软件实现智能转换。1) 采用人机交互设计, 集信息配置、导入接口、计算、转换、导出接口 5 大模块; 2) 采用颗粒划分法(图 4)、分类界限法、二叉树遍历贪心算法, 利用二叉树结构存放着的结点信息, 通过指针赋值, 实现结点之间遍历, 软件智能完成中外标准之间土体分类数据转换^[14]。

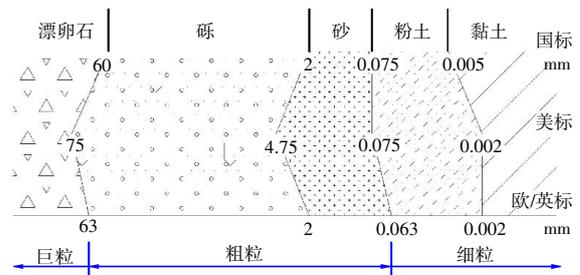


图 4 中美欧/英土的工程分类标准
Fig. 4 Engineering classification standards of soils in China, America, Europe and Britain

4 结语

集多项关键技术的“中国勘察”解决了海上勘探取样率低、原位测试数据不准等一系列难题,并将恶劣海况影响勘察的因素大为降低。在槟城二桥工程勘察实践中,勘察手段多样性、针对性强,这些都为大桥质量优与技术先进提供了有力的支撑,同时为类似的海外工程提供了宝贵经验与参考。

参考文献:

- [1] BS 5930: 1999(2015), Code of practice for site investigations[S].
- [2] 胡建平. 近海工程船载式勘探平台系统创新与应用[J]. 中国港湾建设, 2014, 34(4): 1-5.
HU Jian-ping. Innovation and application of offshore engineering ship-borne exploration platform system[J]. China Harbour Engineering, 2014, 34(4): 1-5.
- [3] 钮建定, 成利民, 胡建平, 等. 单侧悬臂式水上勘探平台系统: 中国, 200910194680.4[P]. 2012-05-30.
NIU Jian-ding, CHENG Li-min, HU Jian-ping, et al. Unilateral cantilever platform system for water exploration: China, 200910194680.4[P]. 2012-05-30.
- [4] 胡建平, 钮建定. 近海工程勘探取样新技术及新工艺[J]. 中国港湾建设, 2013, 33(6): 36-40.
HU Jian-ping, NIU Jian-ding. New technique and technology for exploration and sampling for near shore works[J]. China Harbour Engineering, 2013, 33(6): 36-40.
- [5] 乌孟庄, 张成, 董教社, 等. 双管单动活门式取芯取土器: 中国, 200610024628.0[P]. 2012-05-09.
WU Meng-zhuang, ZHANG Cheng, DONG Jiao-she, et al. Double tube single acting valve core sampler: China, 200610024628.0[P]. 2012-05-09.
- [6] 钮建定, 胡建平, 张成, 等. 淤泥质浮泥采集装置: 中国, 201310304584.7[P]. 2015-10-28.
NIU Jian-ding, HU Jian-ping, ZHANG Cheng, et al. Sludge floating mud collection device: China, 201310304584.7[P]. 2015-10-28.
- [7] 胡建平, 钮建定, 李孝杰, 等. 用于海上标准贯入试验的落锤控制装置: 中国, 201720258037.3[P]. 2017-12-05.
HU Jian-ping, NIU Jian-ding, LI Xiao-jie, et al. Drop distance control device for marine standard penetration test: China, 201720258037.3[P]. 2017-12-05.
- [8] 雷华阳, 王学超, 丁小冬, 等. 软土主次固结划分及影响因素探讨[J]. 工程地质学报, 2014, 22(3): 489-497.
LEI Hua-yang, WANG Xue-chao, DING Xiao-dong, et al. Exploration on division of primary-secondary consolidation and influential factors with soft soil[J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 22(3): 489-497.
- [9] 张建新, 岳晓鹏, 刘举, 等. 软土次固结阶段桩侧负摩阻力变化规律研究[J]. 工程地质学报, 2017, 25(3): 692-698.
ZHANG Jian-xin, YUE Xiao-peng, LIU Ju, et al. The variation law of negative skin friction of pile during secondary-consolidation of soft soil[J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(3): 692-698.
- [10] 冯蓓蕾, 钮建定, 胡建平. 室内测定软土次固结系数的方法及其用于该方法的测量装置: 中国, 201010170475.7[P]. 2012-12-26.
FENG Bei-lei, NIU Jian-ding, HU Jian-ping. A method for determining the coefficient of secondary consolidation of soft soil in laboratory and its measuring device: China, 201010170475.7[P]. 2012-12-26.
- [11] 胡建平, 李庆庆. 洋山四期自动化码头勘察新技术应用[J]. 工程地质学报, 2018, 26(5): 1 375-1 383.
HU Jian-ping, LI Qing-qing. Application of new technologies for ground investigation of Yangshan fourth automatic dock[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(5): 1 375-1 383.
- [12] 胡建平, 郑建朝. 浙江近海软黏土次固结系数研究及应用[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(4): 1 082-1 088.
HU Jian-ping, ZHENG Jian-chao. Research and application of secondary consolidation coefficient of Zhejiang coastal soft clay[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(4): 1 082-1 088.
- [13] 胡建平, 钮建定, 黄国第. 中美岩土工程土壤分类标准转换装置及方法: 中国, 201410717458.9[P]. 2017-11-03.
HU Jian-ping, NIU Jian-ding, HUANG Guo-di. Conversion device and method of Chinese and American geotechnical engineering soil classification standards: China, 201410717458.9[P]. 2017-11-03.
- [14] 胡建平, 李孝杰, 杨秋芳. 中美欧岩土工程土质分类差异性研究及转换[J]. 工程勘察, 2018, 46(4): 12-17.
HU Jian-ping, LI Xiao-jie, YANG Qiu-fang. Study and transformation of soil classification in geotechnical engineering among Chinese, American and European standard[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2018, 46(4): 12-17.