



大面积围海造陆围堰工程关键技术研究及应用

董志良, 刘 嘉, 朱幸科, 张波云, 高铭新

(中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230)

摘要: 随着沿海地区对土地需求量的日益增长, 围海造陆正越来越多地应用于工程实践中。而围堰形成作为整个围海造陆工程的基础环节, 直接影响到后续陆域形成和软基处理施工的安全顺利进行。介绍我国围海造陆的发展现状以及围堰填筑的结构形式和施工技术, 并结合港珠澳大桥珠澳口岸人工岛填海工程等项目, 重点探讨抛石围堰、砂袋围堰、复合型砂袋围堰、插入式钢结构围堰以及水上施工智能控制系统等关键施工技术, 为其推广应用提供参考。

关键词: 围海造陆; 砂袋围堰; 铺排; 插板; 智能控制; 钢结构围堰

中图分类号: U 655.54

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)02-0009-09

Key technology research and application of cofferdam construction in large-area reclamation project

DONG Zhi-liang, LIU Jia, ZHU Xing-ke, ZHANG Bo-yun, GAO Ming-xin

(CCCC Fourth Harbor Engineering Institute of Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

Abstract: With the growing demand for land in coastal areas, reclamation is increasingly applied to the engineering practice. As the basic link of reclamation engineering, cofferdam formation directly affects the safe and smooth implementation of subsequent land formation and soft ground improvement. This paper presents the development of reclamation engineering and the structure style and construction technology of cofferdam formation. Based on reclamation projects of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge-Zhuhai-Macao Port Artificial Island, etc, this paper focuses on key technologies such as riprap cofferdam, sandbag cofferdam, composite sandbag cofferdam, plug-in steel cofferdam and intelligent control system of construction on water, which provide valuable reference for the promotion and application of the technology.

Keywords: reclamation; sandbag cofferdam; laying construction; installation of PVD; intelligent control; steel cofferdam

围海造陆在我国有着悠久的历史, 早在汉代就已经有记载。新中国成立以来, 经历了4次较大规模的围海造陆潮: 第1次是在新中国成立初期的围海晒盐; 第2次是20世纪60年代中期至70年代, 围垦海涂扩展农业用地; 第3次是20世纪80年代中后期到90年代初的滩涂围垦养殖; 第4次是20世纪90年代末期至今, 围填海的用途呈综合性发展趋势。改革开放带来我国经济的巨大发展, 使得沿

海地区的用地需求不断增长, 向海要地成为解决沿海地区用地紧张的主要途径, 同时极大地推动了围海造陆技术的发展。

围海造陆是一项系统工程, 对施工设备、施工技术、工程材料等都有较高的要求。而围堰形成则是整个系统工程的基础环节, 直接影响到后续陆域形成和软基加固的安全顺利进行。它是通过人工围堰的方式在海上形成一定的造陆界限,

收稿日期: 2012-10-11

作者简介: 董志良(1965—), 男, 博士, 教授级高工, 主要从事地基处理、环境岩土工程等方面的科研、设计、施工和技术管理工作。

为后期的吹填造陆和地基处理做准备。按照施工方法的不同,围堰形成技术主要分为抛石围堰、砂袋围堰以及新兴的插入式钢结构围堰。由于围堰的结构形式较为灵活,对作业工效和填筑质量要求较高,施工过程中涌现了大量的新工艺和新技术。本文结合宁波大树D港区多用途码头围堤及陆域形成工程、港珠澳大桥珠澳口岸人工岛填海工程和香港人工岛岛隧工程等多个项目进行重点论述。

1 抛石围堰

抛石围堰是指向海中抛填一定量的石料,使其在自重或外力的作用下堆积密实,并露出水面,形成人工的分隔带,将围海造陆区与外海区分隔,以便于后续吹填施工。抛石围堰是一种传统的围堰施工技术,具有施工速度快、稳定性强、工程寿命长等优点,广泛应用于港口工程及水利工程中^[1]。按作业方式的不同抛石可分为水抛和陆抛2种。

1.1 水抛法

水抛法是指利用自带吊机的运输船舶(如方驳、开体驳等)运输石料,采用GPS定位后进行水上抛填。目前水抛施工都是通过抛石专用船只来实施的,主要有2类船舶:

1) 自航平板驳:它利用自带的反铲挖掘机或装载机将平板驳上的石料抛至海中。采用该种抛填设备其抛石的高度和厚度均能得到较好控制,对基础影响较小,效率高,且成功解决了湍急水流对模袋充填、堤身吹填影响的问题。

2) 开体驳:在驳船到达指定抛填点后,打开底部舱门,将石料填入海中,完成抛填(图1a)。



a) 开体驳抛填



b) 船载挖机抛填

图1 港珠澳大桥珠澳口岸人工岛东护岸水上抛填施工

水上抛填具有施工效果好、相互干扰少、可多点同时开工的优点。

1.2 陆抛法

陆抛法主要是利用自卸式汽车运输石料,同时挖掘机和推土机配合施工,在陆上采用逐步推进的方式抛填。该法可不受水域条件限制,施工方便,在围堰露出水面后可采用该法施工。围海造陆工程中围堰填筑前期需首先进行水抛施工。

1.3 抛石挤淤处理

无论采用水抛或陆抛法,为增加堤身密实、保证稳定、减少工后沉降,都应根据现场地质条件合理选取合适的挤淤法,具体原则如下:

1) 当水下淤泥层厚度小于5 m时,可采用直接抛石挤淤法。该法常用于处理流塑态的淤泥或淤泥质土地基,即直接将块石抛至需进行填筑的淤泥或淤泥质土地基上,利用块石自重和推土机、碾压机等设备施工,将原地基处的淤泥挤走,实现置换。

2) 当水下淤泥层厚度大于5 m时,可以结合水下强夯挤淤法、爆破挤淤法,利用外力作用确保块石置换到指定位置。爆破挤淤法是为迫使抛石落底,在抛石围堰前端或侧面的淤泥层内埋设药包,爆破后,堆石体向下、向前推移,完成对原状淤泥的置换^[2-3],如图2所示。

3) 当淤泥层厚度在10~20 m范围时,一般需先清淤后抛石。港珠澳大桥珠澳口岸人工岛填海工程(北标段)东护岸即采用该法施工。

珠澳口岸人工岛东护岸毗邻外海(图3),受风浪影响大,并且下部淤泥层平均厚度大于10 m,为确保围堰的整体稳定,抛石前须对基槽进行大



图2 阳江核电工程爆破挤淤法

开挖，清除原状淤泥。高程-8.0 m以下边坡坡度为1:3，-8.0 m以上边坡坡度为1:5（图4）。基槽大开挖以后需进行水上抛石作业，考虑到本工程东南护岸施工期防台、淤积、工期等因素，采用施工速度快、淤积影响小、防台效果好的块石材料

料进行水上抛填，回填块石采用1~500 kg，其中小于10 kg的块石含量不超过10%。图5为当时水上抛石作业的场景，采用开体驳水上抛填1~500 kg块石，见图1a），船载挖机水上抛填10~100 kg的堤心块石，见图1b）。

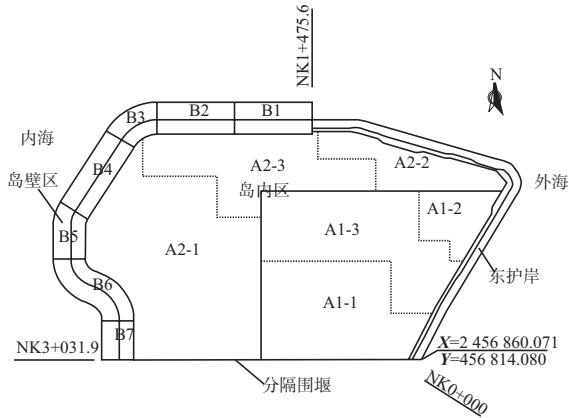


图3 港珠澳大桥珠澳口岸人工岛填海工程平面（北标段）

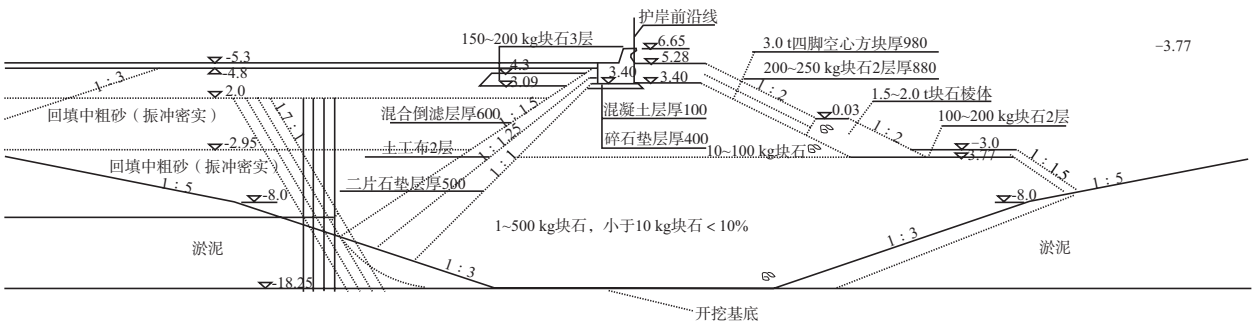


图4 港珠澳大桥珠澳口岸人工岛东护岸结构典型断面（单位：m）

4）当软土层厚度大于20 m时，清淤抛石往往不经济或不可行，可考虑复合型砂袋围堰。

2 砂袋围堰

在深厚的软基上修建永久围堰时，常规抛石围堰由于石料无法沉底、软土强度太低或不太经济等原因而无法实施时，可以采用砂袋围堰的结构形式（图5）。其施工原理是先将防老化编制土工布缝制成袋形，再采用水力充填的方法，将泥砂料溶入袋中，最后层级叠置，构筑成堰。

砂袋围堰的结构形式较为灵活，可以因地制宜，就地取材，特别在石料资源稀缺的富砂水网地区更具广泛的应用性，经济效益显著。在水上施工时可全面展开，工作面多，机械化程度高，



图5 港珠澳大桥珠澳口岸人工岛填海工程岛壁区砂袋围堰

施工速度快。完工后自身的整体性和稳定性好，对淤泥地基变形适应性强，并能与吹填砂紧密结合，相互依托，现已广泛应用于围海造陆、水利水电、海防建设等工程中。

砂袋围堰的填筑主要采用抛填袋装砂和充填袋装砂2种工艺。抛填袋装砂是在充灌船上将砂袋

充灌成型后，采用翻板滑落或网兜吊放的方式将砂袋抛填到指定位置^[4]，见图6a)。充填袋装砂是指在砂袋最终沉放的位置直接进行充灌作业，可分为2种方式：一是利用低潮时人工在滩地上铺展，见图6b)；二是利用船机设备在水深相对较深区域进行水下充灌砂袋，施工时先用钢管（或竹筋）将砂袋4个角点的水平位置固定，通过输砂管连接充砂泵与砂袋袖口。在充填过程中，由于砂袋的4个角点通过钢环与钢管连接，随着砂量的增加砂袋逐渐沉放至泥面。施工过程中需适时调整充填的袖口，保证砂袋充填均匀^[5]。

3 复合型砂袋围堰

大多数围堰建在深水、浅水或滩涂地面，地基下部多为海相淤泥，上覆堰体自重和波浪荷载



b) 潮间带人工铺设砂袋

图6 宁波大榭D港区多用途码头围堤及陆域形成工程砂袋围堰

极易引发海床孔隙水压力的动态累计，降低有效应力，不利于围堰结构的稳定^[6]。为有效消散土体中的超静孔隙水压力，防止围堰在施工过程中滑移失稳，须在围堰填筑前进行水下铺排和水上插板，形成更为稳定的复合型砂袋围堰。

图7为港珠澳大桥珠海口岸人工岛填海工程岛壁区临时围堰断面图，砂袋围堰施工前先在原泥面上铺设一层土工布和土工格栅，之后抛填中粗砂垫层，并在砂垫层上插设塑料排水板，由此可以起到加筋护底、促使砂袋地基软土排水固结的作用，更为有效地弥补单一砂袋围堰形式在结构稳定性方面的不足。



a) 网兜抛填

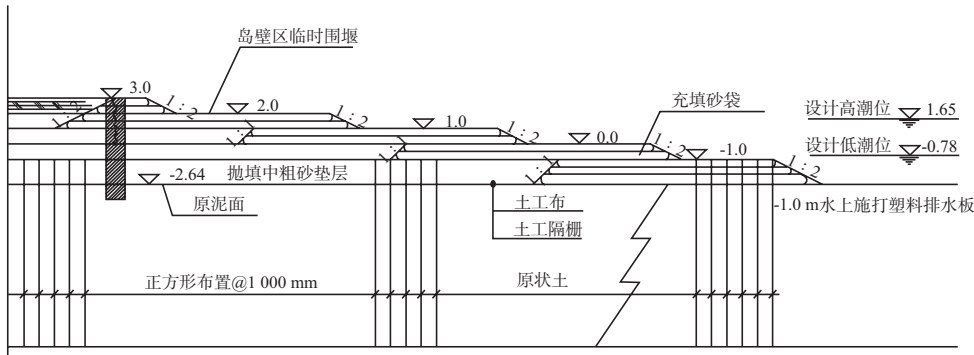


图7 岛壁区临时围堰典型断面（单位：m）

3.1 新型水下铺排关键技术

水下铺排，即铺设土工布和土工格栅复合体，在围海造陆工程中可以起到隔土、加筋、减小土体变形的作用。传统的水下铺排技术是利用滑板等辅助设备，利用排体的自重将其沉放至泥面^[7]。而海上作业时风、浪、流等荷载作用和潮位

的涨落影响较大，现有的水下铺排技术，难以准确控制铺设范围和轴线偏移量，铺设过程中船体移位易发生航迹偏离，排体铺放易出现扭结和漂浮等情况，使得基础稳定性和工程质量无法保证。

针对上述问题，为克服现有技术在铺设精

度、质量和工效上的不足，本文研发了一种快速可靠的水下铺排新技术（已获国家发明专利）。该技术利用端头锚固，下舷压排筒熨压及系、抛结合式压载的原理，将排体的定位、平铺、熨压和压载4个重要环节有机地结合在一起，可极大地提高作业工效和施工质量。

具体实施过程中，通过在铺排船上设置定位

系统，使船舶精确定位于排体铺设位置。将卷排筒上的排体展开后，面上按均匀间距系载小砂包袋（图8），并沉放下舷压排筒至涂面上方（图9）。铺设排体时，在展开的排体上再按均匀间距系载小砂包袋。铺排船在排体展开完毕后吊起下舷压排筒，并收回抛入海中的小型锚，移船进行下一位置的铺设工作。

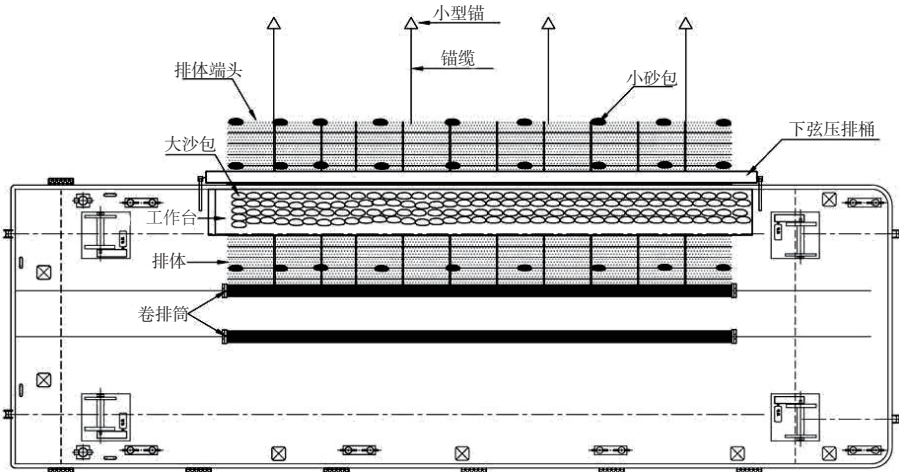


图8 新型铺排船平面构造

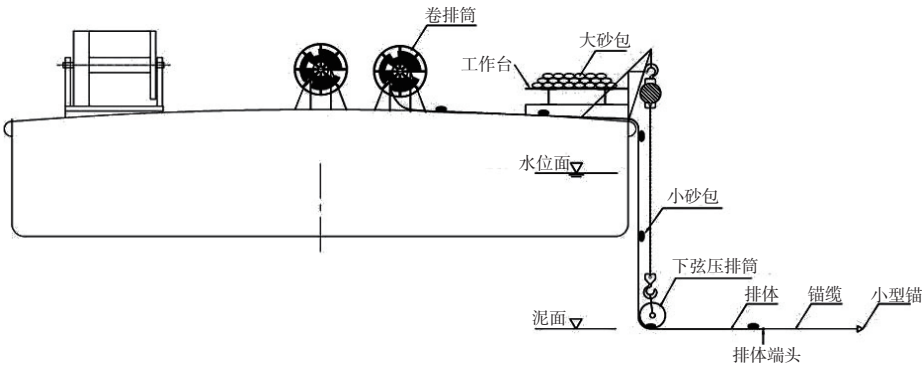


图9 新型铺排船断面构造

该项技术成功应用于珠海口岸人工岛填海工程岛壁区临时围堰的护底施工，有效地解决了近海作业时，风、浪、流等荷载作用及潮位涨落对施工的影响，使排体快速、准确地铺设于涂面之上，工作效率得以成倍提升（图10）。

3.2 新型水上插板关键技术

塑料排水板可以为下部淤泥层的排水固结提供竖向通道，加速淤泥层的固结变形。在围堰底部软弱土层中插设塑料排水板，可有效提高土体强度，有利于围堰结构的稳定。



a) 排体展开系绑砂袋



b) 放下弦压排筒

图10 港珠澳大桥珠海口岸人工岛填海工程水下铺排工艺

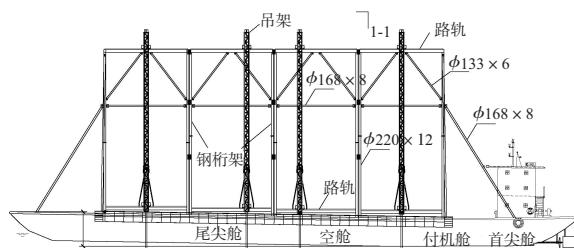
排水板的打设可由专业的插板船实施，传统的水上插板船一般作业深度有限，打设效率较低。因此，本文对水上插板技术进行了研发，设计了一种插深可达30 m、8独立桩架的水上插板船，并成功应用于港珠澳大桥珠海口岸人工岛填海工程（图11）。



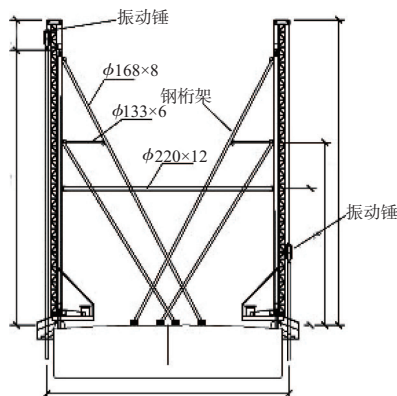
图11 港珠澳大桥珠海口岸人工岛填海工程水上插板船

插板船利用排水量1 200 t的平板驳改装而成，船型平面尺寸60 m×16 m×3.7 m（总长×总宽×型深），如图12，13，空载吃水深度0.67 m，满载吃水深度2.85 m。采用固定门架式振动插板机，8台单机单锤独立运作，施工工效可达200~250根/h。

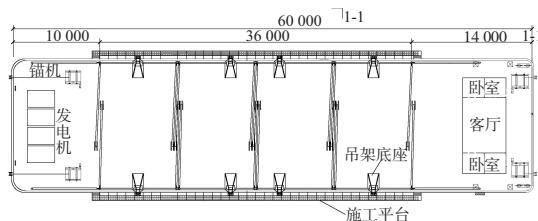
插板船分为船体和桩架两部分。船体主要作为施工作业操作平台，其上搭设钢桁架作为插板桩架的支撑，桁架间采用圆钢和斜拉索互相紧固，避免桁架松动，桁架焊接在船体上固定（图12）。行走轨道采用工字钢焊接在船体上。船舷两侧各安装4台振动式插板桩架，桩架上端采用行走小车



a) 立面



b) 1-1断面



c) 平面

图12 新型水上插板船示意图（单位：mm）

与钢桁架相连接，底端行走跑车支撑在行走轨道上，每台插板机独立工作。

该水上插板船不仅移位方便，且工作效率高，一次移船定位可打设2排72根，一次抛锚可打设3个船位。插板船配备有4个3t锚，抗风浪能力强，安全稳定性高。钢桁架结构稳定牢固，桩架高度可满足排水板打设深度较大的施工环境。

3.3 水上施工智能控制技术

作为围海造陆水上施工的一部分，由于受风浪、潮流、水深等多种因素制约，加之现有水上施工船舶的自动化和智能化程度低，移船以及定位主要依靠简单的人力控制装置^[8]，未能形成计算机智能控制的一体化，这大大影响了施工精度和工作效

率。为提高工效, 本文基于自适应算法开发了非自航船舶智能控制系统软件(已获软件著作权), 实现了在施工精度要求范围内对船舶的智能控制与定位, 并申报国家两项发明专利, 即: 一种用于非自航船舶运行控制的变频技术和一套基于自适应算法的非自航船舶智能控制系统。

非自航船舶控制系统的平面图见图13。控制系统利用计算机连接GPS, 自动获取船舶当前精确坐标, 并根据输入目标点的位置, 利用遗传算法, 计算船舶移动的路径。船舶将按照预定路径精确定位移动到目标位置, 算法结构见图14。在移位期间, 该系统会根据当前的风、浪影响, 自动调整各锚机的收放速度, 有效地解决了近海作业时, 风、浪等荷载作用对施工的影响, 保证高精度定位移动, 实现自动化定位移船(图15)。

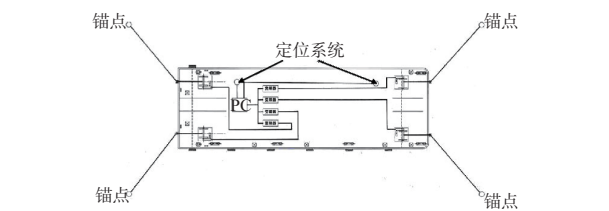


图13 非自航船舶控制系统平面图

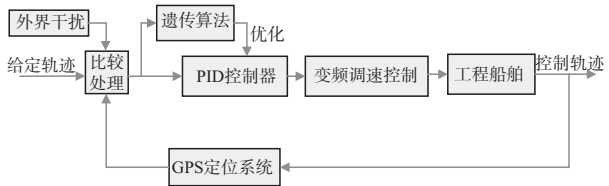


图14 自适应算法结构

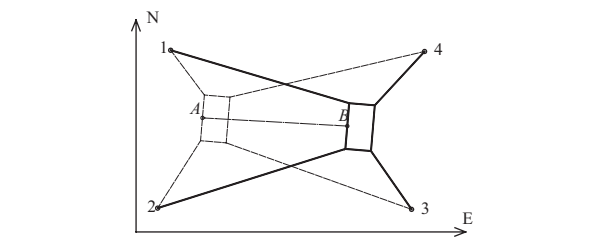


图15 非自航船舶定位移船示意图

在非自航船舶上设置有定位系统, 并与计算机连接。定位系统可通过专用控制程序中的滤波算法, 换算出高质量的工程施工中普遍采

用的北京1954坐标系。运行预先编写的专用控制程序后即可读入施工图纸, 输入目标点坐标。该程序中自主开发了CAD模块, 可识别dwg和dxf格式的施工图纸, 并根据定位系统的换算坐标, 自动在施工图纸中绘制船舶当前位置。运行专用控制程序中的“自动控制”功能, 计算机开始控制锚机, 收放缆绳, 自动定位移船至目标点位置。在此过程中, 由计算机、锚机与锚机控制系统构成硬件平台(图16), 控制程序确定运行方式后, 向锚机控制系统输出指令, 控制各锚机的运转, 并根据定位系统的坐标反馈, 计算当前风、浪对船舶的影响, 调节锚机的频率、转速等参数, 使船舶精确定位移动至目标点, 精度可达0.25 m。

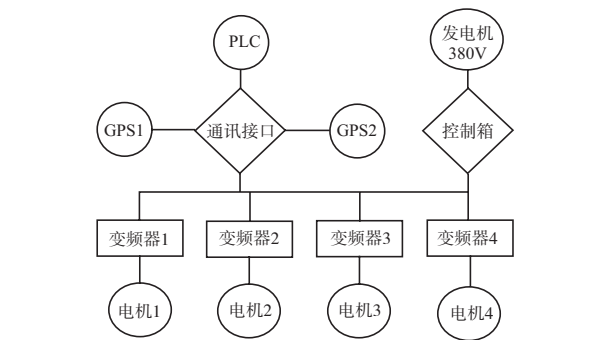


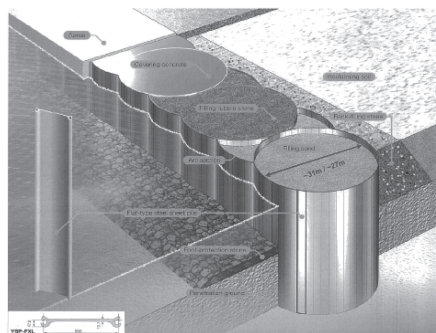
图16 控制系统硬件结构

经过现场使用和验证, 该系统能较好地适应风、浪、流作用等复杂的受力环境, 又能满足工程施工的精度要求, 同时极大的提高了工效, 实现了施工作业的智能化、自动化。

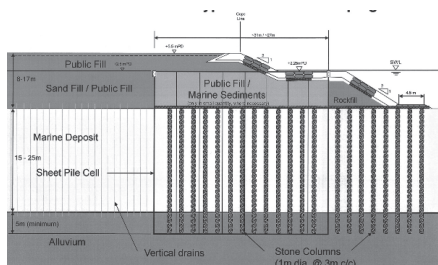
4 插入式混凝土结构与钢结构围堰

在一些重要的围堰修筑工程中, 当上覆软土层厚度大、含水率高、压缩性高、强度低甚至极低, 而下卧土层相对密实度好、强度高、压缩性低时, 可考虑采用插入式混凝土结构或钢结构围堰^[9]。插入式混凝土结构要求施工区域水流平缓、且有条件筑岛变水上作业为陆上作业, 插入式钢结构围堰则应用相对较广, 理论研究也相对较为成熟^[10], 大直径钢圆筒就是其中一种广泛应用的结构形式。

插入式大直径钢圆筒主要是利用振动器将圆筒打入软土层，并振沉至持力层一定深度。各圆筒之间采用弧形钢片搭接、嵌固见图17a)。圆筒及弧段内部回填砂料，并打设砂石桩作竖向排水体，见图17b)，使填料在上覆堆载作用下压缩固结。图18是港珠澳大桥香港人工岛大直径钢圆筒沉放场景。由8台液压锤组成的联合振动系统将直径27~31 m，高32~44 m的钢圆筒振沉到设计高程。大圆筒内回填砂料，打设砂石桩并使其固结稳定。大圆筒和内部加固土体共同组成人工岛的围堰结构。



a) 大圆筒立体图



b) 大圆筒结构断面

图17 港珠澳大桥香港人工岛岛隧工程大直径圆筒围堰结构



a) 大圆筒沉放



b) 筒内回填砂料

图18 港珠澳大桥香港人工岛岛隧工程大圆筒沉放工艺

插入式大圆筒可以直接插入软土地基，避免了地基土体的大开挖或采用特殊的地基加固处理，而且能充分发挥地基土体对结构的稳定作用，在圆筒沉设完毕后结构自身即可满足稳定性要求，可直接作为后方陆域形成的围堰。因此，在一些特定的地质条件下，该结构在工期及造价上比其他传统的围堰结构形式有较大优势。

5 结论

上述围堰形成技术有力地推动了整个围海造陆领域的科技进步，并且在工程地实践中得到了充分而有效的应用，满足了工程建设的需要。由于地理环境和工程地质条件的不同，实际工程中应根据现场客观条件，选用合适的围堰结构形式，也可在已有围堰结构形式的基础上应用新工艺、新技术，如复合新型围堰。在海上施工作业过程中，新型水下铺排技术和水上插板技术可使船舶在受风、浪等荷载作用和潮位涨落的影响下，也能准确地定位施工，同时与水上施工智能控制技术相结合，工作效率将大幅提高。插入式钢结构围堰对深厚软土地基环境具有较强的适应性，并且土方挖填相对较少，工期短，造价相对较低，应用前景好。

参考文献：

- [1] 董志良, 张功新, 李燕, 等. 大面积围海造陆创新技术及工程实践[J]. 水运工程, 2010(10): 54-67.

- [2] Zheng Z M, Yang Z S, Jin L. Underwater explosion treatment of marine soft foundation[J]. China Ocean Engineering, 1991, 5(2): 213-234.
- [3] 乔继延, 丁桦, 郑哲敏. 爆炸排淤填石法机理研究[J]. 岩土工程学报, 2004(3):349-352.
- [4] 范公俊, 贾延权, 王艳红. 几种围堰施工技术在连云港滩涂区的应用[J]. 水利水电科技进展, 2011(31):62-65.
- [5] 王玉东. 深水袋装砂斜坡堤堤心筑填工艺研究及应用[D]. 南京: 河海大学, 2005.
- [6] 吴梦喜, 楼志刚. 波浪作用下海床的有效应力分析[J]. 海洋工程, 2002, 20(1):64-68.
- [7] 李英杰, 林涌潮. 大榭港区围海造陆工程软体排施工技术[J]. 水利水电科技进展, 2007(27):60-63.
- [8] 余振刚, 徐捍卫, 谢磊. 深水塑料排水板施工技术[J]. 水运工程, 2009(11):163-166.
- [9] 李伟仪. 插入式钢质大圆筒岸壁结构的设计研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.
- [10] Curnier A, Alart P. A generalized Newton method for contact problems with friction[J]. Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 1988, 7(1): 67-82.
- (本文编辑 郭雪珍)

《水运工程》优秀论文评选

评委点评:

本文分别介绍抛石围堰水抛法和陆抛法采用的船机和工序。根据淤泥层厚度的不同, 可采取不同的软基处理方式: 淤泥厚度小于5 m可采取直接抛石挤淤; 厚度大于5 m时, 可采取水下强夯挤淤法、爆破挤淤法; 当淤泥层厚度在10~20 m范围时, 一般需先清淤后抛石; 当软土层厚度大于20 m时, 清淤抛石往往不经济或不可行。文中还分别介绍了抛石围堰、砂袋围堰、复合型砂袋围堰、大圆筒围堰结构在港珠澳大桥珠海口岸人工岛的应用实例, 介绍了水上施工智能控制专利技术。

文章对围海造陆工程围堰的结构形式做了系统的总结, 层次清楚、论点明确、叙述流畅、配图形象明了, 是一篇有良好参考价值的论文。

李贺青

2014年12月

评委简历:



李贺青, 工学博士, 高级工程师, 海军工程设计研究院副总工程师。

长期从事港口工程设计研究工作, 主持设计了国内首座深水防波堤、超厚软泥防波堤等重大工程项目, 曾获国家科学技术进步二等奖、全国优秀工程勘察设计金奖。