

# 入海堪比上天难

——外海深水深槽大型沉管浮运安装技术

亦萧



沉管浮运安装

桥隧是港珠澳大桥的核心工程,而核心的核心,就是这 5.6 公里的沉管隧道。水下隧道一般采用钻爆、盾构和沉管三种方式,为了保障伶仃洋航道畅通,最终选定了沉管隧道方式。5.6 公里,将是世界公路沉管隧道长度之最!

## 一张餐巾纸的故事

投标前,中国交建牵头组织各种技术方案策划,公司主要参与人工岛部分,并未涉及沉管安装。

但锤不落地,一航人便不会放弃。于是当时,公司组织一批专家在北京随同中交大部队做人工岛施工方案,同时组织另一部分人马在公司内自行研究沉管施工方案。2009 年 11 月,公司还特意组织二公司到在建的韩国釜山—巨济跨海通道学习。回来后,将一本详细的考察报告递交给岛隧总部;同时递交的,还有二公司针对沉管隧道施工的技术准备情况,包括水下管涵施工和大型沉箱出运经验与业绩,以及抛石整平船大型专业施工船舶的研发与应用的丰富经验。

鉴于沉管安装施工对公司主业延伸和未来发展深远意义,公司主要领导也多次带队到项目总部表达请战意愿,加之东西人工岛钢圆筒的成功振沉展示了公司实力,最终赢得项目总部认可。2011 年底,项目总部将沉管安装任务交给一航局,V 工区由此产生。

港珠澳大桥建设前,我国仅做过几个几百米的江河沉管隧道。因此,一开始,

岛隧总部曾找到荷兰一家公司,表达合作意向。结果对方要价近 1 亿欧元,还仅仅是提供技术咨询,并不负责安装,也不提供设备。合作最终没有成功。面对国外技术垄断,每名技术人员都感觉到了自身压力。

“当时我们成立了三个组:整平组、浮运组和安装组,办公室就设在林总(林鸣)办公室旁边,天天讨论方案,半夜 12 点前不用回去。”V 工区副经理王伟回忆,“有时候半个多月才做出一套出坞方案,被专家会否决之后,垂头丧气的,但第二天还是精神饱满接着干。”

王伟所说的出坞方案,是指将沉管从桂山岛预制场深坞中拉出坞门。沉管都是第一次实地接触,更别说顺利出坞了。直到做到第四套方案——利用天然水域用卷扬机将沉管绞出去,才获得专家评审会通过。

仅仅编制一套《外海沉管隧道施工成套技术方案》,就花掉了项目团队近一年的时间。

为确保沉管浮运安全。2012 年底和 2013 年初,工区找了一个和沉管尺寸差不多的半潜驳进行了四次演练。第一次,八个拖轮拉着“疑似沉管”,结果开始拖不动,后来好不容易动起来,船又脱离了航道,根本不受控制。几个拖轮也不知道如何协同发力。

“当时广东省一个老引航员说,一个团队不可能同时指挥八艘船舶,最多也就指挥四艘。”V 工区总工程师宁进进说。

珠江口水域航道狭窄,仅有 240 米,沉管一旦脱离航道,便会撞上淤泥。要想指令清楚,操作简便,必须要借助信息化的手段。在港珠澳大桥,流传着“一张餐巾纸”的故事。传说林鸣在吃饭时,突然来了灵感,但手头没有打印纸,就将自己对软件的构思写在了餐巾纸上。后来,工区测量副经理刘兆权带领团队,根据这张餐巾纸,研制出了浮运导航软件。

“当时应该把这张餐巾纸留下。”刘兆权遗憾地说,“不过刚开始系统经常出现问题,好多人找我,我一直钻桌子底下进行调试,有时都不敢出来。”

有了这套软件,指挥人员就如同有了千里眼。为了方便指挥,工区在所有拖轮上也都装了这套系统。而且为确保万无一失,主安装船上还装了 3 套互相验证的系统。

“有时候浮运时不用说太多的话,林总看到之后还以为我们在偷懒。”安装船总船长刘建港说。

## 每一次都是第一次

每次出发,均是浩浩荡荡。如同一个航母编队!

前面,两艘清障船,先行 1 公里,破除鱼漂、渔网等拦路虎。

中间,10 艘左右拖轮围成一圈,护卫着沉管,两艘安装船也稳稳地骑在沉管之上。

再外围,12 艘海事警戒船 2 艘渔政船为整个编队护航,遇到擅自闯入的渔船,马上驱赶。

之所以这么隆重的出嫁,因为项目部深刻认识到:沉管浮运安装,每次的水流、天气都不一样,每一次都是第一次!所以每次都要研究窗口期,适合的气象条件,每次沉管出坞前,至少要推演 3 次,最多 5-6 次。

2013 年 5 月,E1 沉管出运安装,一直持续 120 个小时,船上人员练成了坐着也能睡着的本事。当时在指挥沉放时,刘建港脑袋曾出现一片空白,他请示林鸣,给他半小时休息时间。半小时后,他满血复活。

2014 年 3 月,E10 沉管出运时,首次穿过已安装沉管隧道上部水域,隧道基槽流速加快,流向紊乱。

2014 年 10 月,E15 沉管首次出运安装时,遭遇基床淤积,沉管被迫返航,所有人根本没有这个心理准备,都留下了委屈的眼泪;第二次回拖时,信心几近崩溃!最终,项目部三战三捷,于 2015 年 3 月安装成功 E15 沉管。

2016 年 6 月,E27 沉管出运时,珠江口连续强降雨,遭遇“龙舟水”、雷暴和强风。

“每次安装前一个星期,我都有些神经兮兮的。”王伟感触道。

## 堪比“天宫一号”的海底对接

历经千难万险,沉管终于抵达指定位置。

头一个,还是驻位问题。两艘国际领先的安装船——津安 2、津安 3 是 2012 年 11 月底陆续抵达施工现场的。安装船

组搭载着整套沉管安装核心系统,直接承载沉管浮运安装指挥任务,成为水下无人沉放对接系统的指挥平台。如何让其搭载着沉管稳稳驻位,需要更有力度的系泊锚。项目部找到一家国外生产商,但厂家只租不卖,而且要价很高。项目部根据看到锚的形状,自己设计方案,专门定做了国内最大的 8 口 8 吨和 4 口 5 吨的系泊锚。每次提前将锚固定好位置。安装船到之后,开始抛锚系泊,并用船上搭载的 4 台国内最大的 120 吨锚绞机来控制沉管的沉放。

现在沉管开始沉放。指挥室里,林鸣总指挥一步步下达指令。信息化技术又一次发挥了作用,在指挥船上,中央集成控制系统涵盖 8 项专用操控系统,实现从窗口预报、海洋监测到测控定位、沉放控制等全方位数据化管理。

“每个系统所需设备都是做了两组,一旦出坞,必须有保障。包括出现突然断电等应急情况,我们也都有预案。”工区总工程师远征说。

沉管所在的水域,水深十几米,最深处需要再向下开挖 30 米,这就形成一个深槽。深水深槽使水流更加复杂,流速随水深不断变化。没有精确的定位,如同“盲人摸象”,沉管安装采用“测量塔”和声呐相结合方式,实现了对沉管首尾两端的精确控制。

在沉管安装到最深处时,监测人员发现,水下 40 米处流速要远远大于水下 10 米处,这一奇怪现象引起大家注意。一方面,项目总部积极争取国家海洋环境预报中心预报支持,另一方面,组织团队对沉管深水姿态监测进行研究。

任务落到了港研院副总工高潮头上。这样一个茫然大物,振动幅度很小,振动也非常缓慢,属于“低频长周期振动”,对于运动速度较快,振动频率较高的物体易于监测,对这种加速度很小的物体检测,许多权威机构也无能为力。

“天宫一号都对接成功了,我们要往航天航空领域寻找办法。”高潮突发灵感。他们和中航工业集团一家单位联合攻关,利用航天领域传感器,终于解决了沉管姿态深水监测的难题。

沉管开始分阶段下沉,每一阶段都要进行观测和校核。沉管沉到距海底 2 米左右处,开始平移,在距离上一沉管 2.5 米处,开始寸动到距上一沉管 0.8 米处,不到 2 米的距离,要走一个多小时。之后沉管开始沉放到基础上,通过拉合系统与上一节沉管对接,然后通过水压自动与上一管节压接。

“沉管对接精度要求 4 厘米,我们有时候能达到几毫米。”项目书记王有祥介绍。

“我有时将沉管对接比成天宫对接,实际上我们这还要难,天宫对接毕竟在真空下进行,操作精准就行,而沉管对接,每次都要受到水流、天气的影响。”刘亚平说道。

# 深海中的“干法”施工

——大型钢圆筒围堰墩柱干法施工技术

纪子骁



4000吨起重船

波光粼粼的伶仃洋面上,一座气势恢宏的钢结构桥梁横空出世,宛如作势欲飞的巨龙,这就是中国交通史上设计使用寿命最长、技术最复杂、建设要求及标准最高的工程之一——港珠澳大桥。在这座海上奇迹的建设历程中,一航人克服重重考验,总结出一套全国首创的大型钢圆筒围堰墩柱干法施工技术,让“中国创造”闪耀在世纪工程的舞台上。

## 技术拦路,毫米级精度标准

尽管心里明白这项举世瞩目的超级工程不可能一帆风顺,但在真正看到招标文件给出的技术标准时,一公司副总经理张连江还是大吃一惊。首件墩台自重达到 2650 吨,国内此前尚无这一级别混凝土构件吊装的先例。倾斜度要求不大于 H/3000,轴线中心位置偏差小于 20 毫米,这样的技术要求即使放眼世界范围也是难以轻易攻克的高端课题。时任桥梁项目部经理的张连江不禁扪心自问,我们到底能不能干好这项工程呢?

在经历了前期的试验探索后,项目部发现招标文件所沿用的传统施工方案在很多方面并不能顺利实施。“由于受到止水胶囊材料的限制,后浇孔底板砼和钢桩间的缝隙只能预留 6 厘米,为保证墩台预留后浇孔能套入钢桩成功安装到位,打桩垂直度必须控制在 1/400 以内,平面偏差必须控制在 50 毫米内,这是常规沉桩工艺无法达到的。”张连江对技术标准评价道。此外,止水风险大、墩台自摆难、施工

船舶多且相互干扰大等诸多难题随着试验一一浮现在技术人员的眼前。大家都明白,如果按照这种方案施工,未来还将面临无数潜在的问题,无论是工程质量还是施工周期都将难以控制。经过无数次论证,技术人员最终放弃了这种传统施工工艺,将目光转而投向了预备方案。

此前在港珠澳大桥岛隧工程的施工中,由多个大直径钢圆筒组合在一起作为挡土结构的围堰工艺大获成功,钢圆筒的止水效果也得到了验证。同时,也为了有效利用闲置下来的设备资源,公司在投标之初便准备了一套利用钢圆筒营造干施工环境从而降低施工难度的预备方案。“钢圆筒振沉抽水后,钢围堰内部形成干施工条件,安装受风浪影响大、安装精度难保证、整体结构自摆难等问题迎刃而解。此外我们去掉了不必要的止水胶囊结构,将预制承台底板预留孔与钢桩间隙由 6.5 厘米调整为 16.5 厘米,使容错率得到了提升。”时任主任工程师徐波介绍道。

2012 年 10 月 15 日至 2012 年 11 月 25 日,技术团队在 K23 测量平台进行了预制墩台干法安装钢圆筒围堰专项试验。试验中,钢圆筒作为墩台安装挡水围堰的结构稳定性和振沉周转的可行性得到了验证。业主大桥管理局虽然面对多方阻力,但最终决定采用此方案。

## 施工受阻,历经工艺改进

施工方案得到了改进后,原本难以解

决的受到自然环境条件的影响降到了最低。由于施工工艺需求,公司还购置了一艘 4000 吨起重船。墩台施工也得以如火如荼地组织起来。然而这样的情况并没有持续很长时间,随着分节式墩台施工的临近,一个更为尖锐的问题出现在了技术人员的眼中。

施工过程中采用的钢圆筒围堰高达 39 米,在围堰内完成墩台安装施工后,需要使用从美国进口的 APE600 八锤联动振动锤组整体拔出并周转至下一座墩台使用。而根据设计,CB03 标段所需安装墩台设计最高标高超过了 16 米,钢圆筒围堰标高仅为 6 米,振动锤体系的空心高度更是只有 4.6 米。振动锤组因而出现了空心高度不足,无法满足钢圆筒拔出的净空要求的尴尬情况。要知道每一个钢圆筒自重近 650 吨,只有依靠八锤联动振动锤组才能在不损坏钢圆筒的前提下均匀施力进行振沉、振拔,这种情况的出现意味着标高较高的分节式墩台将全部无法按照施工计划完成安装。

“当时只有两个选择,要么改造钢圆筒围堰,要么改造振动锤组。出于成本考虑,我们还是决定拿振动锤开刀。”徐波回忆道。对于这个由公司斥资 8000 万元从美国引进的振动锤组,技术人员对它的改造也是慎之又慎,技术人员史虎彬这样解释道:“我们还是有些顾虑的,一旦在改造中造成损坏,造成的影响更加难以估计。”

不断地画图,不停地计算,振动锤组的改造工作取得了突破性进展。技术团队提出了这样一个方案:将原本焊接在一起的振动锤组与吊架拆解,用钢丝绳将吊架与振动锤连接起来。这样一来,原先的“硬连接”改为“软连接”,振动锤的空心高度凭空增加了 6 米,振动锤在拔出钢圆筒时空间不足的问题迎刃而解。2013 年 7 月 17 日,改造后的八锤联动振动锤在 23 号墩位初试锋芒,成功振沉了

2 号钢圆筒围堰,同时将振沉偏位控制在 10 厘米以内。

## 不断创新,3500 万经济效益

钢圆筒是干法施工技术的核心,营造干施工条件完全依靠筒壁的止水能力。为了满足施工需要,钢圆筒入水下往往深达十数米,承受着巨大的水压,经过 2 到 3 次振沉、振拔后,钢圆筒底部就会产生变形,不但影响止水效果,更将为施工人员带来安全风险,这就不可避免地需要对钢圆筒围堰进行修补、替换。

每一个钢圆筒的造价最少也要近 600 万元,即使是重新修补也需要 300 余万元,这样一来钢圆筒的成本对于项目部来说反而成了一种负担。为了延长钢圆筒围堰的使用寿命,技术团队展开了紧急攻关。

技术团队多次与钢圆筒设计单位进

行研讨,经过连续数周近乎不眠不休地反复研究,最终形成了一套较为完善的优化方案。针对钢圆筒底部环向变形严重的情况,钢圆筒围堰保持上部结构不变,将钢圆筒底入泥深度减少 4 米,同时在底部增加 4 道环向“π”型肋,同时在环向“π”肋的上下两侧分别布置导向板进行加固。改进后,钢圆筒高度从 39 米降低到 35 米,节省了大量钢材,且在随后施工中,最长使用寿命达到了 8 次正常周转使用而没有破损,间接地为项目部节省了维修和施工费用超过 3500 万元。

如今,虽然几经波折,但是钢圆筒围堰干法施工工艺最终还是逐渐走向了成熟。钢圆筒围堰干法施工工艺填补了国内施工领域的一项空白。这种在围堰内完成墩台安装施工后,使用振动锤组整体拔出并周转使用的干法施工工艺在全球也尚属首例。这一工艺的应用,不仅为港珠澳大桥桥梁工程 CB03 标的全部 68 座埋置式预制墩台的顺利预制安装提供了强有力的技术支持,更是对实现超高质量、保证桥梁的耐久性以及实现桥梁施工的工厂化和装配化、缩短桥梁建设周期等方面了一次新的尝试。交通部原总工程师周海涛赞誉:“为桥梁结构基础施工开辟了新思路”。该成果已成功应用于港珠澳大桥桥梁工程,经中国公路建设行业协会科技鉴定,该成果达到国际领先水平。

钢圆筒围堰墩柱干法施工