

港珠澳大桥

十大关键技术

写在前面的话：

每一个超级工程，既是顶尖技艺的集成，又蕴含着历史的传承与积淀。

港珠澳大桥，为公司提供了一个广阔的平台。在这精彩的背后，是一航人追逐大桥之梦的聚变。

早在1995年，时任公司总工程师的范期锦就组织人员系统学习翻译日本等国家有关沉埋隧道的先进经验，了解世界跨海通道施

工技术。

2002年起，公司相继参建了东海大桥、杭州湾大桥、长江隧桥、金塘大桥等，施工范围也逐步由桩基、承台到墩柱，公司敏感意识到，随着国家经济技术进步，跨海大桥、跨海通道将迎来一个爆发期，提出要抢抓机遇，实现一航多年的大桥梦。

2005年，受时任董事长武永涛委托，李一勇组织各单位总工

程师，赴日本东京湾跨海通道、明石海峡大桥参观学习，了解海底隧道盾构技术、挤密砂桩技术、大型构件预制技术等。这次考察，形成了《一航局赴日技术考察报告汇编》，其中提到的许多关键技术都应用到了后来的港珠澳大桥施工中。

2009年，以二公司为主的考察团到韩国釜山——巨济跨海通道项目沉管隧道施工考察，为日后承

揽和实施隧道工程打下了坚实的基础。

正是因为这种积淀，当一航局真正承揽到岛隧桥施工任务时，才以一种惊人之姿展示在世人面前。

如今，港珠澳大桥主体工程桥梁已贯通，海底隧道最终接头成功安装，东西人工岛建筑拔地而起，一航局终于圆了自己的大桥梦！正是因为港珠澳大桥的成功，公司又相继承揽了深中通道、大连湾跨海通

道、三亚机场等重大工程！

创新是港珠澳大桥成功的关键。尤其是参战人员对方案的超前谋划、刻苦钻研的精神和持续不断的改进，使我们摘取了水工技术领域一项又一项桂冠。本期我们将集中介绍公司在港珠澳大桥建设中探索、掌握的十大关键技术，展示在实现大桥梦的过程中，一航人锲而不舍、勇挑重担、勇于创新、追求卓越的优良传统和时代精神。

君子藏器于身，待时而动。——题记

重锤一响天下知

——大直径钢圆筒振沉快速筑岛技术

亦 萧

港珠澳大桥施工，为公司赢得了声誉。尤其是2011年西人工岛的一声巨响，使中国交建和一航局以一种敢为人先、不辱使命的姿态展现在世人面前。

长期的储备

毕其功于一役的背后，是一种先人的判断和长期的准备。

1983年，港珠澳大桥的前身——伶仃洋大桥构想提出。2004年，公司参与其方案竞赛。2005年10月，公司组织各单位总工程师赴日学习，特意参观日本东京湾跨海通道、明石海峡大桥，了解到了人工筑岛和隧道施工技术。

2007年，公规院受交通部委托作工可报告，港院参与其中，重点就是人工岛的方案设计，也充分证明了公司在水工和筑岛领域的实力。此后，无论是大桥《专用施工规程指南》编制还是初步设计、投标前准备阶段，公司在中国交建领导下，一直参与人工岛的方案编制。2010年，中国交建中标岛隧工程设计施工总承包项目，经严格比选，将西人工岛土建工程、东人工岛岛壁钢圆筒工程交由公司施工。

人工岛岛身填筑，最早采用填石斜坡堤方案，先采用挤密砂桩技术加固地基，然后抛石、浇注斜坡堤筑岛。然而，这种技术，至少要三年才能成岛，而整个大桥的工期才六年！

有没有一种更快的筑岛方案？总牵头人中国交建总工程师、岛隧项目总部总经理林鸣陷入了沉思，在和专家一次次交流中，产生了用钢圆筒筑岛的想法。经过四航院和公司的长时间联合论证，最终确定

了超大直径钢圆筒、液压振动锤联动振沉的优化方案。

这是一次全新的挑战！

反复的试验

大直径钢圆筒结构上世纪80年代引入我国，其振沉施工，先前有过两次。

第一次是2002年，在长江口深水航道整治二期工程中，公司采用4台美国APE400液压锤振沉了4个直径12米的圆筒，只不过当时是钢筋混凝土结构。

第二次也是2002年，在广州番禺南沙，一公司在护岸施工中，采用相同的四锤联动技术，振沉了40个钢圆筒，直径13.5米。

这次，数量更大、体积更大，而且是外海深水作业！

施工的关键，第一要解决锤的问题，第二要解决沉的问题，第三要解决运输船驻位问题。

钢圆筒直径22米，最高50.5米，每个500多吨重。要振沉这个“世界第一筒”，就需要有“世界第一锤”。仅仅选锤一事，就“折腾”了四五个多月。公司先后组织召开四次专家会，审查包括美国和荷兰等振动锤巨头在内的四家企业提交的方案，经综合考量，决定采用美国APE液压锤。岛隧项目总部再次组织相关院士、专家召开讨论会，最终同意公司的方案。

8台APE600液压锤联动，这在美国APE公司也是第一次。其关键问题就是解决电气、液压锤和机械的同步。公司专题组从最初的方案设计到严密的技术论证，付出了大量心血。APE公司按照技术要求解决了包括各锤主油路等压力、偏

心齿轮组精度、同步轴加工及安装精度等多项难题。

真正的较量当属锤组组装调试。2011年4月12日，从美国发出的21个集装箱陆续到达上海振华重工现场，振沉系统的关键部件——共振梁也由振华制造完成。此时，距5·15振沉首个钢圆筒节点仅有1个月。一公司港航安装公司和振华重工人员进入紧张工作状态。从卸船到组装，仅用19天。美国技术人员直竖大拇指：“任何一个国家的工人都拼不了这么快！”

4月23日，振沉系统空载试振。5月8日，世界最大振动锤系统抵达珠海，并对振沉系统实施总装对接。

与此同时，在珠海施工现场，从运输船驻位到钢圆筒振沉技术难题也正在被攻克。巨型运输船在大浪里航行没有问题，让其停在海里不动却很少见。课题组绞尽脑汁，想了很多种方案。“最后我们根据水流、风向等条件，确定了运输船驻位位置，但船自带锚根本无法驻位，我们就放置了四块200吨左右的混凝土方块作为锚，每次运输船来就停在那个位置。”时任一公司西岛项目部总工程师孔令磊如今谈起，依然能感觉到他当年的头痛。

运输船成功驻位了，起吊钢圆筒也不是什么难题，但如何保证它被精准地打入深海中呢？项目部和港研院合作，由定位研发专家邵蔚——曾在东海大桥施工中研发了公司首个GPS打桩定位系统——研制了“钢圆筒振沉管理系统”，对钢圆筒的高程、平面位置、转角和垂直度进行实时监控，并通过多次电脑模拟振沉试验获取了



钢圆筒缓缓吊运

变形资料。项目部将一艘一万吨的方驳改成工作船，指挥和控制室就设置在这个驳子上。控制室配有2台全自动跟踪全站仪，实时跟踪振动锤液位计上的棱镜，实时推算筒心坐标，通过与设计坐标对比来调整筒位，以保证钢圆筒施工中的偏位和垂直度。

集众人之智，采众家之长，此时已是万事俱备！

完美的结局

5月15日5:30，第一个钢圆筒被成功吊起。由于风力较大，钢圆筒入水后一直晃动，几小时都无法定位。最后，起重班班长胡钢凭借多年起重指挥经验，选准位置将钢圆筒沉入泥中再进行调整。完成入泥沉后，随着现场总指挥孟凡利“开始振沉”指令的发出，中控计算机同时启动8台动力站和8台振动锤，世界最大的振沉系统第一次负载运转。振沉仅持续了10分钟，钢圆筒就达到了入泥深度21米的设计标高，垂直精度控制在千分之一以上，“5·15”钢圆筒振沉宣告顺利完成！

首个钢圆筒成功振沉也为项目部积累了经验。此后的振沉，项目部都先将钢圆筒入泥半米左右，先保证其稳定，然后再精调，最后振沉。

钢圆筒回填和副格打设随后进行。钢副格主要用于两个钢圆筒之间的弧形连接，实现筒与筒之间的

止水，西岛共需制作振沉124片。

早在2010年底和2011年初，一公司就在天津港航公司基地进行副格振沉试验，通过实验来确定用多大锤型，如何止水等。刚开始，锤的振动问题解决不好，副格打不进去。“当时以为成功不了了。”孔令磊说。后来经过不断调试解决了共振问题。2011年5月31日，副格振沉典型施工成功，该项技术的可行性得到验证。

由于准备充分，钢圆筒施工进度十分顺利，9月11日，西岛最后一个钢圆筒振沉，所有的忐忑和怀疑都变成了赞叹！

12月7日，东西人工岛120个钢圆筒全部振沉。21日，242片副格安装完成，钢圆筒振沉完美收官，顺利实现了双岛“当年动工当年成岛”的目标。成岛同时，项目部又在岛体外围通过打设挤密砂桩、抛石斜坡堤形成岛壁。如今，两个岛早已成型，岛上建筑正在如火如荼地展开。

“大型钢圆筒振沉的成功实施，将会使这种工艺更多地应用到大型外海防波堤、码头结构和人工岛成岛施工中，而且，我们正在研究和即将应用更大直径、更多锤组的钢圆筒打设方法。”总工程师李一勇介绍说。

2017年5月1日，公司在另一个超级工程——深中通道西人工岛成功打下第一个钢圆筒，这个钢圆筒直径28米，采用12锤联动吊打工艺，也验证了李一勇所言。

为何软土硬如砥

——外海深水块石基床抛石夯平技术

刘志温

前所未有的设想

传统抛石夯平多采用重锤夯实或爆夯工艺，且多用在近岸工程，适用水深通常在20多米。“珠江口一带繁忙的海上交通与严苛的环保限制，使爆夯工艺断不可行；若使用重锤夯平，每锤夯平面积不足1平方米，且在40多米的海底，效率难以保证。”刘亚平介绍，创新成为项目部面临的唯一选择。

“讨论中，公司总工程师李一勇提出使用液压振动锤夯平的设想。”一公司西岛项目部副经理张怡戈介绍，这一前所未有的工艺若能成功，施工效率将成倍提高。

采用液压振动锤工艺，首先要对照重锤夯确定工艺参数。2011年12月，在细雨绵绵的西人工岛上，技术人员展开了液压振动锤夯平实验。“当时模拟了两米厚的块石基床，用两种设备比夯效果。结果发现，液压振动锤每次夯实面积可达20平方米，是传统重锤施工效率的几十倍，完全达到预期效果。”时任项目总工程师孔令磊回忆道，成功的那一刻，试验人员十分激动。

但在夯平过程中，振动锤受石块反冲击力冲击，出现了跑锤现象。李一勇提出，在锤组的夯板上焊接8个钢齿，嵌入石头缝隙，保证了锤组的相对稳定。“试验的成功，让项目部对液压锤的使用有了信心。”为准确模拟施工环境，项目部随后又在西岛钢圆筒内进行了水下夯平模拟试验，进一步验证了液压振动锤夯平运行的平稳性，试验达到了30厘米内的精度要求，得出了肯定结论。

一波三折的设备改造

解决了夯平效率，还有关键的抛石问题需要解决。“难度在如何抛匀，确保抛石精准就位是技术难点。”刘亚平介绍，之前国内抛石工艺最大水深在22.23米左右，而伶仃洋水深近乎翻倍，还有大水流，对精度要求高。李一勇提出使用溜管，进行定点定量抛石的想法。如此一来，溜管可对石块起到引导作用，位置有了保证。

十几年前的浙江北仑港建设中，曾在20米左右的水深使用过水下焊钢管抛石工艺。后来，在辽宁鲅鱼圈港区也进行过初步尝试。港珠澳大桥施工水域水深在16至40米，反复研讨后，项目都确定了改进溜管，采用抛夯一体船、抛完直接转弯的方案。

“溜管改造的核心之一，是解决溜管的伸缩与安放问题。”张怡戈介绍，溜管要达到一定长度才能满足水深要求，顺利下料。但数十米长也为防台拖带来一定难度。施工完成后，要具备从水下收起。经大量实验，用卷扬系统实现溜管收起过程。

各路技术专家召开了大量专题会，在烟雾缭绕的办公室中讨论了无数次。最终，溜管抛石小车、液压锤、轨道行走系统及测量装备等核心环节一一确定。2012年1月，

船机设计方案终于敲定；当年2月，抛石夯平船改造工作在广东新会紧锣密鼓地展开。

2012年5月，改造后的船机在人工岛周围进行了夯平效果调试。7月14日，抛石夯平船正式进驻E10管节海域开始典型施工。块石夯平技术迎来实际应用的终极考验！

30厘米的精度

“首次正式施工，我和同事足足用了23分钟，下了8次料才达到标高！”技术员冀晋仍记忆犹新。由于对施工过程不熟悉，再加上有些紧张，冀晋无法精确估算石块下落分度程度。之后，人员、设备等环节进入磨合阶段。

作业中，曾出现溜管线缆被卡、下放石块堵管、抛石小车卷扬机接触器故障等各种问题。经常24小时外海连续作业，设备出现问题不能及时维修，后果将不堪设想。“说来也巧，当时很多问题都出现在后半夜，经常半夜要进行修理。”测量员刘明回忆道，最让他难忘的，是2014年中秋的一次故障。当天下午2点多，施工任务即将完

成之际，测深仪的显示数据突然消失。一检查，是小车拖链脱轨扯断了线缆。“当时一下懵了，线缆内有18芯，有几千种组装排列方式。没办法，只能更换新线，可100米长的线缆和很多线缠在拖链里，根本拽不出。我和工友只能用撬棍一点一点撬，干完已是夜里11点。”

在与困难的较量中，抛石夯平技术日趋完美；抛石过程从起初一次抛改进为先粗抛后精抛一点点找平，抛石精度大幅提高。通过自行研发的抛石夯平定位系统与多通道测深仪，在国内首次实现实时监测标高，实现了对石堆间距、抛石精度的精准控制。操作熟练后，“抛石夯平一个沉管基础，我们从最初用三四十天缩短到15天，效率几乎翻了一番。”冀晋得意地说。

2016年1月25日，历时五年的港珠澳大桥抛石夯平圆满结束，软土隧道沉降难题有效解决。抛石夯平团队被总部授予“铁打的团队”荣誉称号。



抛石夯平班

俗话说，基础不牢，地动山摇。珠江入海处的伶仃洋海域，常年受泥沙淤积，软土层厚达几十米。这种并不牢固的地基上，重达几万吨的沉管隧道沉稳安放，并安全度过120年，是一个世界级难题。港珠澳大桥岛隧项目部用五年的探索实现了水工基础施工的一次技术革命，在世界上首次使水下基床夯平技术，使施工效率得到了根本提升。

主动增加的工序

软土地基上的沉管隧道安装，克服沉降问题是关键。珠江口岸水位深、海流大、淤沙多，恶劣的地质条件虎视眈眈地“迎候”这片海域的犁荒者。

“最初的沉管地基设计方案，与国外类似的海底隧道处理方法类似，即先在海床上开挖基槽，然后铺设碎石进行整平后，直接安装沉管。”公司副总刘亚平介绍，但由于珠江海域回淤大，沉管安装前，开挖形成的基槽内势必造成大

量泥沙淤积。如此一来，沉管基础的地基刚度依然难以保证。

一定要让沉管在软体地基上的沉降得到控制！难题面前，港珠澳大桥岛隧项目部总经理林鸣创新性地提出了在海底基槽中增加块石基床工序的设想。

“这是设计与建造方要求之外，项目部主动提出的变更建议。研讨会上，很多专家对这种从未有过的工艺持否定态度。”刘亚平说，在20多万平方米的海底基床铺设块石，最直接的影响就是材料、人力、设备等方面的投入增加。除了成本加大，即便这一构想落地也面临着不小挑战。沉管隧道不均匀沉降与沉管间受力刚度等问题，便是其中之一。项目部经过不断研究论证，坚定了这一设想，并于2011年10月专家会获得了业内专家的认可。

块石基床方案确定后，如何保证施工效果，成为项目部面临的一大课题。