

## 为沉管铺一个安稳的家

海外深水碎石基床铺设平整技术

刘志温

2017年3月7日,港珠澳大桥海底隧道最后一节巨型沉管成功安装。至此,33节世界最大体量沉管全部安装完毕,已建隧道总长达到5652米。随着各项近乎完美的检测数据出炉,负责碎石整平的张建军长长地舒了一口气。

“碎石基床平整是沉管安装的先决条件,沉管管节高程与纵横坡的误差基本取决于碎石垫层的误差,只有高精度的基床才有高精度的沉管对接。”作为港珠澳大桥岛隧工程V区生产副经理,张建军说,每次沉管安装不到最后一刻,他的心就不能完全放下来。

## 全新的未知

港珠澳大桥所在的伶仃洋海域面临着复杂的条件:航道交错,每天来往船舶达4500多艘;年均61天伴有六级以上大风,至少两次台风袭击……在几十米不可见的海底,要将碎石整平精度控制在4厘米内,是张建军和施工团队面临的挑战。

根据沉降量、工程质量差异,目前世界上的沉管整平施工分为先铺法和后填法两种。“先铺法,即先进行碎石整平,控制好密实度、平整度,后进行沉管铺设。这种工艺对基础垫层的精度要求高,需要依靠大型高精度机械设备,但成本也较高,适用于沉管较多的情况。”V区项目总工程师岳远征介绍,后填法即先安放沉管后进行填砂作业,但对沉管安装的效果较难保障,“伶仃洋海域的地质条件,更适宜采用先铺法施工。”

港珠澳大桥,是国内首条外海深埋沉管隧道。这在国内是一次没有经验可循的全新探索。“最关键的环节是设备、技术与操作团队”,岳远征说,碎石整平是精密复杂的过程。整平团队有四五十人乃至七八十人同时工作,需要高度精细和默契;深水整平属外海孤船作业,定位的精准性、设备的运转状态必须随时保障。要实现预定目标,每个环节都不能掉以轻心。

## 欲善其事,先利其器

外海深水作业,装备是最为倚重的利器。引进设备也曾纳入项目部考虑方案,但经考察,国外两艘能担当此任的施工船工作水深分别是25米、40米,而港珠澳大桥最深处水深近50米,都无法满足港珠澳大桥施工要求。自行投资建造一艘新的碎石整平船被提上日程。

“当时只有一张韩国整平船照片可参照,我们只能依据施工要求,一遍遍摸索试验。”为突破国外技术垄断,项目部不断提出参数设计构想,汇集了国内前造造船工艺,联合振华重工设计建造。无数次的试验后,世界最大、国内首艘外海自升平台式深水抛石整平船“津平1”问世,并于2012年10月19日到达施工海域。

“津平1”相当于一个固定的海上钻井平台,不受风浪影响。“津平1”船舶设计、电控系统、抬升系统等均为自主研发,整平功能、施工工艺和精度均达世界先进水平。四条桩腿每条长90米,抛石管上布满声呐、整平头和测控仪器,碎石通过导管抵达基槽,可满足水深10至50米所有沉管管节的碎石垫层铺设。设备到位后,整平控制成为全力应对的环节。“‘津平1’引进了日本系统,整平作业时,有三套操控系统,但仅有一套系统是中文。”张建军说,刚开始,另外两套日文韩文系统就像天书一样,代表什么意思都不清楚。只能在国外专家帮助下,对着屏幕显示一点点摸索。从2012年10月19日整平船到现场,到2013年5月首个沉管安装,设备和操控系统磨合演练就花了大半年时间。

## 直面大海的挑战

为掌握整平船插拔桩的步骤做法,“单是大型试验就有四次,我们选择了原状土、抛石夯土、挤密砂桩土等不同地质进行整平试验。”张建军介绍,单就插桩来说,桩腿要保持稳定,要求土质不能太软。

“伶仃洋海域有地质夹层现象,最开始,我们根本不知道这些情况。第一次试验时,桩腿下沉遇到硬地质层时,以为地质承载力够了,就停止下桩。可没过一会儿,船体突然下沉。”船长陈耀金说,由于当时对这种地质穿刺现象不熟悉,一下子就慌了神。“操作系统只有概括的操作规程,但具体的操作方案,当时一无所知。”这次试验后,项目部认识到分析地质资料的重要性。以后每次施工前,都会详细了解地质层,勘测地质条件,终于在不断探索中掌握了不同地质条件下的插桩工艺。

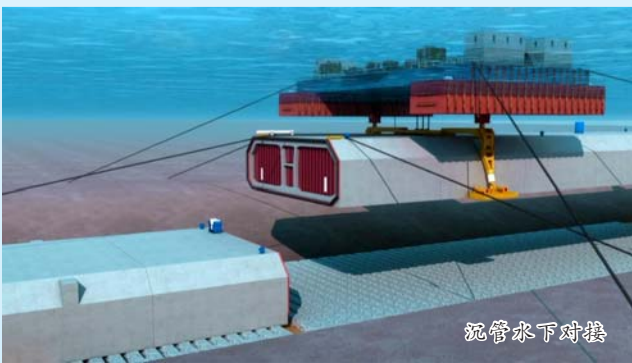
“首节沉管安装前两天,整平顺利结束,准备拔桩移位,可西北角的桩腿却无论如何也拔不出来。”在不断探索中,张建军和团队逐渐总结出成套的碎石整平施工工艺。

碎石整平,需要将精度控制在4厘米内。由于每条垄高不一,需根据高差随时调整。“‘津平1’就像世界最大的3D打印机,依靠抛石管上的声呐可实现精度调整,它让抛石作业变得智能。”公司副总工刘亚平介绍,水下探头可以灵敏感知抛石管底部高度,灵活控制下料时间。移动中,随着船体晃动,底部标高也会相应调整至底部标高标准。

为实现1.3米的碎石整平标高精度,项目部总结出分层施工规律,第一层1米,第二层0.3米。为保证石料均匀,还会将石料筛一遍,确保直径保持在5-6厘米;能见度几乎为零的海底,为判断整平程度,潜水员每天都会在水下用手探摸,并结合多波束扫测,多方验证整平精度。

设备的完好,是施工推进的重要环节。施工期间,设备24小时不断进行插桩拔桩作业。设备一旦出现问题,是最考验技术人员的时候。在深海中施工,GPS有时会发出无信号现象。“就怕他不响”,张建军说,最害怕这种现象出现。还有一次,一个月安装两节沉管的工期非常紧张,皮带机却接二连三损坏,关键部件经历海陆空三种交通方式的联运。

几年来,每节沉管安装时,张建军的心都随着沉管沉放起伏起浮。虽然每一次都是第一次,“但在操作上,我们现在比专家还熟悉,甚至提前预判可能出现的问题。”经过两年多的摸索实践,项目团队实现了从无到有、从零到世界领先的跨越。



沉管水下对接



沉管隧道机床下水载荷试验

早晨8:30,往来通勤的接驳船只陆续停靠在港珠澳大桥西人工岛救援码头旁,这个只有半个足球场大的码头,是大桥建设者每天进入施工现场的“门户”,也是我国兴建的第一座外海深水重力式码头。

## 5.4米的由来

时间追溯到2011年9月,西人工岛刚刚成岛。受I工区委托,港研院港珠澳大桥项目组要对人工岛外圈的挤密砂桩复合地基进行水下载荷试验。140万立方米的挤密砂桩用量,置换率高达62%,在国际上也是一个项目里应用最多的。要确保地基稳定,这项试验势在必行。

然而,一个问题很快摆在负责试验设计的技术员胥新伟面前:“在外海深水环境下进行水下载荷试验,是一个‘前无古人’的领域,没有可

## 挑战看不见的难题

——外海深埋大型沉管基础防淤与清淤技术

尹晓伟

谈到“清淤”,人们首先想到的可能会是河道疏浚、治理之类的施工。而在港珠澳大桥沉管隧道的安装施工中,建设者却遇到了一项史无前例的清淤难题——基槽回淤。

## 困境

E15沉管第一次浮运安装时,遭遇基床异常回淤的突发情况,淤泥出现板结现象,现场已不具备安装条件。为了沉管120年的质量,顶着巨大的社会压力,沉管安装团队慎重下达了回拖返航指令。

项目部邀请权威专家,成立攻关组,进行了连续一个多月的定点含沙量监测与巡测,还搜集了近几年大量的珠江流域卫星云图,最终确定了泥沙来源——施工海域上游的采砂作业。”

看着监测数据,项目经理宿发强忧心忡忡,唯一的清淤专用船舶“捷龙”轮已开足马力,但在日回淤量很大的情况下,清淤效果仍无法满足施工需要。

基床清淤难题不解决,沉管就随时面临回淤超限而无法安装的风险。2015年2月,基槽边坡意外滑塌,近2000平方米的基床遭到污染,E15沉管第二次浮运安装再次中途折返。

沉管安装进入了强回淤的困境。

## 攻关

接下来的日子里,技术人员几乎每天都要熬到后半夜,查阅大量资料研究清淤防淤知识,分析淤沉沉降速率、基槽地形条件、水下施工可行性……逐条逐项比对研究,提出了覆盖法、截淤槽、吹气扰动法、帷幕法等8项防淤措施。

经专家咨询会讨论分析,专家一致认为分块刚性盖板覆盖方案应属最佳防淤方案。试验结果表明,覆盖防淤方案有效,但盖板安装、拆除需增加7到10天,还要投入数亿资金增加一个船组。

工期本来就紧张,工程师只能另寻他法。“从潜水探摸情况来看,淤泥在初期是处于悬浮状态的,我们可以尝试扰动淤泥不使其快速沉淀板结。”一次研讨会上,宿发强提出了设想。

顺着这条思路,技术人员详细分析了潜水员在海底作业的可能性,试着研制一种可以用来扰动淤泥的工具。连续2天加班加点的论证分析,最终给出了空气压缩机和橡胶耙两个方案。

工区连夜安排制作了专用橡胶耙和简易水下清淤架,第二天送到现场试验。经过几天的观察,人工水下扰动的方法能够有效防止淤泥快速板结,还能避免对基床造成破坏。然而,人工扰动只能在回淤强度较小的情况下起到一定作用,基

## 破解深海地基承重之谜

——深水载荷试验技术

陈聪

参照的标准和适用的检测设备,如何做这个试验?”他想了很久,草图更是画了改,改了涂。

现行的国家载荷试验检测规范规定,首先要确定应用到检测中的载荷板,尺寸不小于1米。可此处一根挤密砂桩的直径就达到1.6米,只采集单桩的载荷样本显然毫无意义。“前期设计是最熬人的,更别提我们现在遇到的情况。”大桥建设之初便来到这里项目组负责人高潮说。

“从试验可操作性上讲,载荷板要尽可能小,而在技术角度看,载荷板只有尽可能大,才能提高检测精确度。”3米、5米、7米,高潮和胥新伟硬是被这个“小”和“大”的选择拖了后腿。这个难题尚未解决,新的问题又出现了,要进行如此大尺寸的载荷板试验,注定了试验平台也是个“大家伙”。

做多?既然载荷板尺寸进入了“死胡同”,他们决定另辟蹊径,先着手平台设计。胥新伟把能找来的最大反力梁、基准桩和锚桩拼在一起,再将所有的受力点调到极限,尽可能给位于中间的载荷板留足空间。之后他再通过模拟反算出平台各桩位与载荷板间的安全半径。终于,5.4米x5.4米的国内最大载荷板被确定。

## 15米的初探

经3个月精心准备,2012年1月1日,水下载荷试验,在即将兴建的西人工岛救援码头正式开始,水深15米。

尽管高潮和胥新伟是做足了思想准备,但当平台搭起开始在上面安装试验设备时,还让他们有些始料未及。

1月的伶仃洋,风卷着浪,一个浪头打来,平台就会摇晃着发出吱呀的响声,“人都站不稳当,悬在基准梁上的百分表怕是有危险,读取检测数据不能只靠传统的百分表了,要有个备用方案!”除了胥新伟,其他同事也急在心里。

“加装一套静力水准仪对比检测吧,固定起来比较方便,虽是用来测定位移沉降的,用在这里倒也相得益彰。”高潮很快想到了解决办法。

但水准仪的安装位置分歧很大。“水上!保证有效最重要!”“水下!检测的精度高!”技术组一时争执不下。当时刚刚分配到项目组的吕宁,头一次见此场景,“最后局里出面协调,水上水下各装了一套。”事实也证明,这种做法非常必要。

各项设备调装完成,并不意味着万事大吉。因为数据需要定时读数,初期甚至5到10分钟就要记录一组,必须有人在平台上进行24小时监控。胥新伟带着吕宁挤在一个4平方米的集装箱里,冬天的海风从四面八方灌进来,“冷不算什么,受不了的是潮湿,呆的时间久真有些扛不住。”住在上面的60天,胥新伟是掰着指头过来

的。“还有晃,尤其是晚上!浪最大的时候足有4米,和平台一边高,我们整宿都不敢进屋了,要随时观察设备,也是怕平台受不住会塌,好随时往海里跳。”回忆起那段日子,吕宁仍有些后怕。

桩土应力比;地基变形模量;载荷量达到十级,地基沉降稳定,满足重力式码头的承载需要……当胥新伟代表项目组向工区做着最终的试验汇报时,也预示着国际首个外海深水水下载荷试验顺利完成。他不知道,6个月后他们又将迎来一项更为艰难的“挑战”。

## 44米的较量

2012年8月,休假的胥新伟突然接到高潮电话:“集团指挥部刚下了命令,要对沉管隧道的基床进行水下载荷试验,有个思想准备,方案务必尽早定下来。”

放下电话,胥新伟有点发“懵”,“沉管基床,水下最深处超过44米,现有设备没有一个能满足这个深度,怎么做?”胥新伟以最快的速度赶往珠海,推开项目组的门,紧张的气氛已然跃跃欲试。

“我们是否可以改用载荷块直接加载重量检测,这样既可以解决水深的限制,又不会影响其他工序正常施工。”自接到命令,高潮第一时间进入了角色。

用起重船直接吊装载荷块进行水下载荷试验,以前尚无先例,因为不单要保证载荷块接触基床时的单位重量精确,还要有可用来进行水下检测的设备。

参照基床下碎石垫层垄沟的设计尺寸,他们决定以三条垄沟的宽度为基准,将载荷块的尺寸定为4.5米x9米,再计算出沉管这个单位面积里竣工与半回淤状态下的重量,436吨和714吨,以此制作两个相同重量的载荷块。

至于检测设备,幸好有了静力水准仪水上水下的应用对比数据,具有可行性,检测设备的初步选定也有了眉目。不过大家不是没有顾虑,到了水下44米,设备的防水性能和精确度可不好说了。果不其然,生产仪器的厂家一听设备要在44米的水下工作,只勉强同意了定做满足防锈、采集单元及量程的要求,至于防水密封是万万做不得的。

一筹莫展之际,胥新伟却像变魔术一般拿来一堆零件。第一个密封箱在他“鼓捣”下很快面世,虽有些“其貌不扬”,却是量身定做、性能卓越。原来,早在上次试验成功后,胥新伟就再没放弃过对仪器密封性能的改良,他想到做到最好。

2013年3月,沉管基床的水下载荷试验较原定计划提前11天完成。技术组做了16组水下载荷试验,数据全部有效。如今,高潮和胥新伟依旧坚守在岛隧项目施工一线。



津平1号

床清淤的难题依然需要进一步探索。

## 突破

“既然整平船‘津平1’能够把碎石铺设控制在4厘米内,如果把清淤装置安装到整平船上,会不会有意想不到的效果?”岛隧项目总经理林鸣的一句话提醒了宿发强,但这必是颇具挑战的攻坚战。

宿发强随即邀请负责建造整平船的上海振华技术团队来到营地。“高精度清淤的关键就是清淤头高程和抽吸功率的控制。”设备副总工程师王明祥一针见血地指出了技改的关键与最难点。

二十多人的技改小组开始了单调枯燥的集中办公,每天面对的就是那一摞摞的设计图纸和一份份设备清单,一天至少要开上三四次碰头会。“整平船集成化和自动化程度非常高,稍有不慎便有可能影响到整平作业的精度。”每个人都如履薄冰地对待每一个细节,每一件设备的选择,包括型号、生产厂家、供货周期等各种信息他们都要考虑到位,每一处设计的确定、变动都要讨论再三。

“在清淤装置桁架吸头的连接处设置一个油缸来精确控制吸头高度,并安装一个声呐测控设备,确保能够通过远程系统控制吸头与碎石面的距离。”在会议室里,王明祥介绍着攻关成果。近一个月的废寝忘食,他们的整体设计方案敲定了。

2015年3月,经过两个多月的筹备,“津平1”技改项目正式启动。“考虑到要分阶段进行技改,我们采用了边设计边施工的方法,只是每项工作都要做得更细致谨慎,不能返工。”王明祥回忆道。

2015年7月中旬,“津平1”清淤系统加装任务基本完成,团队马不停蹄地开始系统调试和清淤试验。“要么吸不出淤泥,要么就把基床碎石一起吸出来。”生产副经理张建军带队进行了几次尝试,却没有达到预期效果。“我们不能着急,把高程的调整幅度精确到厘米。”张建军给大家鼓劲。一点点摸索中,经过十天二十多次的调整,团队终于探寻到一个合适的高程。

至此,整平船“津平1”清淤技术改造初步完成。

## 壮举

时至10月中旬,受厄尔尼诺影响,天气瞬息万变。台风“巨爵”侵袭,已完成两个船位的E22沉管基床铺设作业只得暂停施工10多天,静待下一个窗口。10月31日,E22沉管碎石基床完成铺设,基床多波束扫测显示:E22沉管基床第一、二船位的淤泥厚度达到20厘米左右。

“距离安装窗口仅剩3天时间,清除淤泥几乎不可能。”有人提议放弃这个窗口,将基床挖掉重铺。“整平船清淤技改已经完成,试验效果也不错,到该发挥作用的时候了!”宿发强提议。经过近两个小时的研究,项目总部决定使用整平船清淤。

指令下达后,现场立即启动清淤施工的各项准备。11月1日凌晨2点,操作人员按下启动开关,抽泥泵的马达轰鸣起来,海水从不断排淤口喷出。“清淤头下降四厘米!”随着清淤头的寸动下放,浑浊的泥水开始排出。“停止下放!”张建军走出操作室认真聆听,没有听到碎石敲击管壁的声音,也就意味着吸泥泵没有破坏碎石面层,大家悬着的心慢慢落了地。

第一遍清淤后,作业人员立刻进行多波束扫测。所有人看着清晰的碎石垄,布满红色血丝的眼睛里都有些湿润了,忙活了10个月的整平船清淤技术改造,终于收获硕果。

随后,现场施工团队操作着这艘海上巨无霸,连续抢抓作业三天两夜,在水深40多米的海底完成了2000多平方米的碎石垫层清淤。整平船就像“超级吸尘器”一样,把碎石面上的泥沙统统清除干净,实际清淤仅用28小时,精度之准,效率之高,让人惊叹。

“这是一次行业的跨越!高精度清淤是中国人对世界水工史的又一项重要贡献,是值得我们所有人自豪的事情!”清淤总结会上,林鸣激动地说。