

“分合之间”的智力博弈

——大型墩柱干接缝竖向匹配预制及立式出运技术

李冬梅 李丽军

五公司第九项目部负责港珠澳大桥桥梁工程 CB03 标 72 座桥墩的预制任务,整个项目的实施几乎都是创造性工作,没有经验可以借鉴。其中,28 座超高桥墩采用分节预制拼装工艺,更是难度超前。分段预制,虽然可以使单件墩台预制的体积变小,但分段后还需要再“合”上。看似简单的一分一合,却使技术难度成倍增长。

零点起步

“港珠澳大桥最高达 49.89 米的桥墩超出了大型起重船机的安装能力,必须分节预制再进行拼接。”时任项目总工孙业发介绍,预制单件桥墩已不易,何况还要让这样的庞然大物实现整个水平面、剪力键槽匹配及 75 毫米预应力粗钢筋匹配对接,所有部位的预制精度要达到 0.3 毫米内,难度可想而知。“传统工艺采用分节预制对接后现浇湿接头。但湿接头部分与预制墩柱混凝土龄期差长,裂缝问题严重,为此项目部引进了国内首例的墩柱干接缝匹配对接结构。”

事实上,在投标阶段,墩柱干接缝匹配工艺的研发已经开始。2012 年 3 月,根据港珠澳大桥国际一流标准的要求,五公司负责完成了桥墩接缝翻模试验,试验成果成为港珠澳大桥标书的精彩一笔。自 2012 年 6 月 9 日工程中标开始,新工艺的研发全面铺开。

而这,注定是一个艰难的过程。每项方案的提出和确定都要经历几次、几十次的会议研讨,再进行优化,组织工艺试验,再研讨再优化,来来回回,反反复复,直到在施工实践中得到验证实施。作为实施层面的核心,无数个夜晚,孙业发把自己关在房里,在苦苦冥想中干接缝工艺有了最初的雏形。

曙光初露

要实现分节式桥墩的干接缝匹配,有两个关键点:一是要形成一个高精度、超水平、完全匹配的干接缝平面及剪力键槽,二是要实现直径达 75 毫米的预应力粗钢筋与干接缝相对精度,保证上下节段顺利对接。项目部决定研发一种专用模具。

最先尝试的,是混凝土翻模工艺。但经试验发现,上下节接缝处混凝土存在收缩变形,且剪力键与剪力槽无间隙,无法调整垂直度等问题,该工艺最终被放弃。

技术团队把目光转向了机加工钢模具工艺。“土建施工中也有采用机加工模具的情形,但通常构件尺寸较小,用在这么大的尺寸上且结构如此复杂,能否成功有很大疑问。”孙业发说。技术团队与厂家反复探讨加工方案,并进行了大量试验,结果证明:工艺可行。将模具按照国内机加工设备的最大加工能力分解加工组装,并将剪力键槽、预应力系统固定件机加工后组装,可以保证模具精度。

时任技术员王海波介绍:“施工时下节墩身浇筑振捣后,立即安装顶模。顶模利用自重压入混凝土,剪力键自动充填成型。为保证顶模顺利精确安入内外模之间,混凝土浇筑前要进行顶模试安装。将外模垂直度调整到位后,通过干接缝顶模侧面精调装置调平。中节或上节施工前,先安装并精调底模。混凝土浇筑后,形成下部剪力槽。通过上下节干接缝水平面、剪力键槽和粗钢筋,完成匹配对接。”

为保证预应力体系和干接缝竖向对接精度,项目部还同步研发了大直径预应力粗钢筋及波纹管定位成套技术。“单件墩柱预应力粗钢筋最多达 64 根,每根都要毫米级的精度控制。粗钢筋与环氧钢筋、劲性骨架、预埋件交织在一起。”主办技术员隋新义介绍,“精度控制最关键的环节是‘三次定位一次校核’”。所谓“三次定位”,即对粗钢筋进行底部、顶部和中间部位定位;“一次校核”,是在混凝土浇筑前,试安装干接缝顶模,利用顶模预留的精确孔洞及组装件,校正粗钢筋位置,校核精确后进行加固,再浇筑混凝土。采用这项技术,预应力粗钢筋系统精度能够满足上下对接要求。

精益求精

关键技术突破后,钢底模的研究让大家伙颇费了些脑筋。由于单件桥墩高达 21.4 米,底模需竖向承重,虽然钢模具具有一定刚度,但为了防止变形,还需将模具先翻转后再往空腔内灌入混凝土,以使其具备足够的刚度。之后再次翻转,放在施工平台上调平,调平后在钢模具与施工平台间隙内捣入混凝土,才能进行桥墩施工。

重达 40 吨的底模来回翻转,并不是容易的事。为降低翻转难度,项目部进行了第一次改进——将充填到空腔的混凝土改为陶粒混凝土。陶粒混凝土能保证承重,又非常轻,这样明显降低了难度。但出于工效考虑,技术人员又进行了二次改进——不翻转,不充填混凝土,直接优化底模承重结构,加大肋板,减少翻转这一工序。可考虑到经济性,项目部又进行了第三次改进——将模具做成钢结构混凝土相结合的形式,周边、键、槽和定位预应力系统固定件采用机加工钢结构,其他部分则采用混凝土结构,巧妙利用机加工的高精度全钢顶模作为胎具预制钢砧结合底模。这一改进,既满足精度要求,又降低了成本。“这是个循序渐进的过程,在成功方案基础上进行改进,避免冒进。对于港珠澳大桥这样的超级工程来不得半点闪失。”孙业发说。

历时三年的墩台预制技术整体研发,技术创新成果丰硕,外海桥梁埋置式承台与墩柱预制成套技术已获得 20 多项国家专利,三项部级工法。桥墩干接缝竖向匹配预制技术达到国际领先水平。

桥墩出运

墩台分段预制完成后,面临的下一个难题,就是海上运输。以 65 号墩台上节墩帽为例,没有底部承台,帽宽 5 米,低端仅 3.5 米,重心高度达 13 米。这种典型的头重脚轻的细长构件,是所有墩台中稳定性最差的,国内尚无此类墩台运输的先例,海上运输危险系数更大。这个墩台,主办技术员高伟形象地称之为“大头娃娃”。

为了让“大头娃娃”站稳,技术人员先设计了重达 500 吨的钢平台“鞋子”。科研人员后用 16 根高强度钢拉杆对钢平台进行内加固,为“鞋子”系紧“鞋带”。为防止倾覆和滑移,专家组还设计出巨型三角支架固定墩台最窄的两侧,安装锚固板,底座和楔子予以固定低端,给“大头娃娃”穿好衣服。墩台、钢平台、潜驳三位一体,整体重心大为降低。

2014 年 8 月 3 日,16 小时奋战后,首座分段式桥墩上下节墩身成功对接,“竖向干接缝匹配预制工艺”和“大直径预应力粗钢筋及波纹管定位成套技术”在国内被首次成功应用。



墩柱预制施工

2015 年 10 月 30 日,随着第 68 榀钢箱梁成功架设,港珠澳大桥 CB03 标非通航孔桥所有大型吊装施工全部告竣。当现场指挥宣布吊装成功的那一刹那,所有人心灵百感交集。历经三年的不懈奋战,项目部最终攻克了大型预制构件吊装难题,创造了一项项骄人纪录。

史无前例的大型吊装

CB03 合同段墩台、钢箱梁等构件均从预制场中完成制造,然后转运至现场由大型起重船进行安装,港珠澳大桥从一开始就开启了一条不同寻常的建设道路。

标段内最大混凝土整体埋置式预制墩台以及钢箱梁自重双双超过 3500 吨,即使是体积相对较小的起吊构件平均也达到了千吨级,这种重量级别的混凝土构件吊装此前国内建筑史上还未有先例。“我们没有可以借鉴的案例,只能一点点摸索。为了满足墩台倾斜度不大于 H/3000,轴线中心位置偏差误差不大于 20 毫米的施工标准,诸如起吊后‘如何保证水平位置不发生晃动,安装时如何保证达到设计标准’都是我们需要探索的问题。”时任项目经理张连江说。

除此之外,巨型构件的吊装也理所当然地涉及到了大型起重设备的使用。公司为了完成合同段内的安装任务特意引进了 4000 吨级起重船“一航津泰”与 2600 吨外租起重船“东海工 7 号”等一系列船机设备,“不只是机械设备的投入,为了驾驭好这些设备,我们的职工也耗费了大量的时间、精力来进行磨合。这样一次性的大手笔投入在以往工程中并不多见。”船机经理任宝发介绍道。

前所未有的施工方案

复杂、多变的吊装方案是 CB03 合同段预制构件吊装的一个重要特点。作为桥梁主体工程三个标段中施工难度最大的标段,CB03 合同段的吊装构件类型在三个标段之中无疑也是最多的。所需安装的混凝土构件分为整体埋置式墩台、下节埋置式墩台、中节墩身、上节墩身等 4 种不同类型,其中预制中上节墩身的截面尺寸还包括三种类型,而钢箱梁的规格更是从最短 64 米到最长 152.6 米不等。吊装构件的多样性注定了项目部必须采用变化、复杂的起吊方案。

“我们通过研究施工组织设计发现,标段内的预制墩台除了后浇孔外,连续的混凝土面积其实非常小,非常不利于吊点的布置和设计,而且这种情况在中、上节墩身的施工中则表现得更为严重。”时任技术部长史虎彬这样说道。针对这种情况,项目部通过积极与设计代表沟通,在项目部拟定的 3 种吊装备选方案中进行筛选,最终设计建议采用外部托架结构作为吊具。“为了确保施工的安全性,同时满足设计要求,对于不同类型的混凝土构件,我们采用了不



港珠澳大桥最长钢箱梁

大块头需要有大智慧

——大型构件吊装技术

纪子尧

同的吊点设计方案。”史虎彬继续讲道,“对于下节与整体式墩台,项目在墩台底座顶部以三角形分布选取 3 个点位,每个点位安装了荷载 2000 吨的反压梁,并在反压梁顶部设置吊点;对于中、上节墩身,我们则提前与预制场联系,在墩身预先留好吊装孔与预埋件,并根据应力计算结果在吊装孔周边布置加强钢筋。在进行吊装施工的时候将预埋件用吊索连接起来,以此来减轻吊具所承受的压力,提升起吊时的安全系数。”

这一方案通过计算验证,完全满足施工要求,并在随后的施工中发挥了至关重要的作用。2014 年 6 月,桥梁项目部以 3900 吨的起重成绩完成了标段内最重整体埋置式墩台吊装,一举刷新了局单件设备吊装纪录,这也极大地鼓舞了全体参建人员的信心,为接下来的施工打下了扎实的基础。随着施工组织的不断完善,生产进度实现了跨越式推进,项目部最频繁的时候甚至每三天就会完成一件构件的吊装。正在工程如火如荼地推进之时,项目部迎来了一项新的挑战。

绝无仅有的吊装难度

2015 年 6 月 30 日,项目部圆满完成了标段内施工风险最高、吊装难度最大的一次施工。

桥梁主体工程全合同段最长节段的钢箱梁 Y1 全长 152.6 米,比标准联的每联首跨钢箱梁都长了近 20 米,其自重达 3500 余吨。如果算上吊具,起重总重达到了 4200 吨以上,甚至超过了 4000 吨“一航津泰”起重船的额定吊重,加之 Y1 钢箱梁本身为变截面钢箱梁,重心不居中,吊装时空中姿态很难控制。也正是因为这个原因,经过项目技术团队多次研讨并组织召开了专家评审会,最终在非通航孔桥大节段钢箱梁吊装施工方案的基础上,编制了由 4000 吨浮吊“一航津泰”号和 2600 吨浮吊“东海工 7”号双船抬吊施工方案。

由于 Y1 钢箱梁位于 51 号墩位与 52 号墩位之上,位于中华白海豚保护区内,并且为香港提供了四分之一发电所需天然气的崖 13-1 气田管线恰好穿过这一区域。只要在吊装过程中稍有偏差,对管线造成任何损伤引发爆炸,不仅施工现场会产生严重的伤亡,还会造成恶劣的社会影响、生态影响,出于保护管线安全的需要,施工设计要求管线两侧 250 米范围内任何船舶不得抛锚。

根据施工方案,4000 吨浮吊“一航津泰”与 2600 吨浮吊“东海工 7”以及一艘 18000 吨的运梁船需要抛下将近 20 口锚,两艘浮吊分别平行驻位在 52 号墩位两侧,距离墩台仅十米左右,而两船之间的距离也仅有 28.7 米。在如此狭窄的空间内进行船舶的移动,相对于体型庞大的浮吊船来说,简直就是在“走钢丝”。如何在有限的空间内确保“一航津泰”号与“东海工 7”号两艘浮吊船的同步性便成为了保障抬吊施工顺利完成的关键因素。

技术团队经过反复研究,在精确测量两船之间的距离后,巧妙地在两船的船头和船尾平行以及两船之间对角线方向连接尼龙绳,通过对绳的实时监测,实现对两条浮吊船相对位置的有效控制。“我们的测量与监控团队负责观测吊架的平面位置高差和两端高差,并将数据及时向总指挥报告。根据我们提供的测量数据,总指挥进一步进行沟通微调,保证两船之间前后左右的相对距离不大于 2 米、钢箱梁两端高差不大于 2 米,这在原设计要求的相对距离 4 米、梁端高差 5.1 米安全值基础上,进一步提高了作业的安全系数。”

大吨位预制墩台、钢箱梁整体吊装技术的应用,改变了中国近 20 年来劳动密集型的生产组织方式,其安装精度超过了现行国内相关标准的要求。在交通基础设施建设乃至于工程建设中,采用“四化”理念或者工业化的建设模式,将是一场深刻的革命。

“素面朝天”的最美颜值

——清水混凝土施工技术

董永贺 乔晓辰



美丽的挡浪墙

“很漂亮,仿佛白玉一般!”来到港珠澳大桥岛隧工程西人工岛参观的人很多,看到干净漂亮的敞开区中墙时,无不给予高度评价。清水混凝土“素颜朝天”,不需要二次修饰,在阳光照射下,有着大理石般的光泽,显得十分天然庄重。

众智试验定标准

与传统混凝土相比,清水混凝土质量要求更高,具有裂缝控制难度大、控裂设施安装难度大、施工操作复杂的特点,“在满足混凝土其他性能的前提下,考虑最多的就是混凝土的观感度。”项目部副总工杨润来介绍到。

“我们要把人工岛打造成世界最大的清水混凝土群。”2014 年,岛隧工程项目总部落林鸣总经理提出,岛上现浇敞开区、挡浪墙、主体结构全部采用清水混凝土工艺。

想要“吃螃蟹”,必须做好准备。得到设计方案之初,项目部针对清水混凝土性能特点,进行了有限元模型分析、温度场和温度应力仿真分析、性能控制等一系列理论计算。为得到这些数据,总工办和试验监测中心的办公室几乎天天着灯到深夜。

由于白天工作紧张,主任工程师孔令磊几乎每天晚上都会召集技术人员召开技术研讨会,并常常持续到深夜。大大小小的专家研讨会不知召开了多少次,各路人马出谋划策,集思广益。

和方案讨论同步进行的还有现场清水混凝土试验,这个任务落在了杨润来及其团队身上。2014 年 11 月 2 日,首次清水混凝土试验在西人工岛展开。“试验一共进行了 6 次,分批次从不同层面检测清水混凝土敏感性,”杨润来介绍。“进行到第三个阶段时,清水混凝土性能稳定,色泽非常均匀,当时大家就有了底气。”通过后来的一次次试验,形成了清水混凝土施工标准,方案得到了初步验证。

中西合璧利其器

清水混凝土追求的不单是美观,而是质量。120 年的使用寿命对港珠澳大桥的建设者提出了前所未有的要求。

清水混凝土施工全部采用德国进口模板,内侧为清水饰面的双层板,与混凝土接触面设有钉眼,外侧为单层板。与国产模板相比,这套模板具有更耐磨损、安装拆卸更便利以及周转次数高等特点。“模板制作需要精确到 1 毫米”,主责模板安装的技术员孟令月每次现场巡查都会重点强调。

“我的英语口语现在估计都能过专八了!”孟令月调侃道。来自 PERI(派瑞)公司的外籍技术顾问在现场模板拼接实时监督指导。最初双方交流连比划带猜,有时候还借助翻译工具。但随着合作深入,双方沟通顺畅了很多,有时候说一个单词双方就能互相理解。

除了模板,脱模剂、振捣棒甚至电钻工具等均为德国进口。早在试验阶段,项目部就细分了成员职责,陆续展开专项教育培训。为确保施工质量,这班人马从培训到试验再到典型施工基本没换过,在近乎“手把手”的教导下,他们从规范到操作都烂熟于心,工作中也是一板一眼。

“以前用的国产家伙劲大,刚开始用这振捣棒不习惯,总感觉劲小,好不容易才调整过来。”由于振动幅度和频率不同,用惯了国产设备的工人刚接触新设备时仿佛从开“拖拉机”换成开“潜水艇”。

做足保护勤周转

岛上的模板加工区域,总可见一群工人在“擦玻璃”。他们在模板喷涂脱模剂后采用干净的棉纱或布料进行整体均匀涂抹。“木板上不得有一丝尘土、一丝刮痕,不然将会影响清水混凝土质量。一般面板可重复使用 30 次。”木工班长李永红说道。

“要像爱护自己的眼睛一样爱护模板!”施工中无论管理人员还是作业人员都始终记着这样一句话,模板的保护程度直接关系到混凝土的观感质量。

为确保模板安装进度,技术及质检人员定期检查、巡视,对木梁间距、止浆措施、板材切割尺寸、防水涂刷等工作进行严格把关,同时加强对模板表面保护,防止损坏模板表面,对存料区半成品及成品及时苫盖、防止暴雨淋雨,所有模板切缝全部采用防水漆进行封边,模板及台车配件吊装过程中采用吊带等等措施。

模板需要反复周转,除平日作业或吊运时大家分外小心外,浇筑过程中也想了一大堆法子,如在泵管下料附近模板内侧安装悬挂式可拆卸木板,防止泵管出料中对模板表面造成刮磨磨损,控制下料高度,在浇筑砂浆时为防止溅脏底部模板加裹土工布等,模板完好率在屡次周转中得到保障。

严格过程保品质

控温是混凝土浇筑的重点,也是控裂的关键。为控制骨料温度,由陆地运到岛上的砂石料等原材,为避免阳光直射,在料场顶部设置遮阳棚。在是拌合站粉料罐上加设了类似花洒的水管进行降温;在混凝土搅拌时,向搅拌罐中加入碎冰、冰水进行降温;混凝土运输时,罐车上覆盖的土工布都要进行不间断的水湿降温处理。

敞开区隧道墙体清水混凝土浇筑时,新老混凝土龄期差最长达 9 个月,混凝土控裂难度大。项目部与监测单位密切配合,采取了二次投料工艺。加入碎冰絮搅拌混凝土,结构内部布设循环冷却水管、严格控制原材料温度等一系列温控措施,有效控制了裂缝产生。恶劣天气也要防范。但凡接到阴天或多云预告,大家都小心谨慎地用防雨布苫盖好浇筑区域,只留下泵管下料空间。

混凝土浇筑太快模板可能承受不了压力发生变形,浇筑太慢新老混凝土间的色差可能更加明显。项目部调整浇筑速率,在振捣中,操作人员严格按时间和点位作业,并且进行二次振捣,现场管理人员带着秒表进行巡视抽查,可以说是“精确到秒,就跟参加奥林匹克运动会一样!清水混凝土浇筑完成后,为防止水污染,采用双层土工布对成品进行密封覆盖保温保湿的方法,以免成品产生明显色差。

清水混凝土是混凝土材料中最高级的表达形式,看起来坚实厚重却又素雅大方,仿佛工地上的一道风景线。