

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.233



深水大跨桥梁施工技术 2020 年度研究进展

刘俊岭, 杨汉彬, 杨万理, 张育智

(西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031)

摘要:随着我国经济实力的不断增强、科学技术水平的显著提升,桥梁工程正朝着跨度更大、基础更深、桥塔更高的方向快速发展。在此过程中,桥梁建设者遇到了很多新难题,例如:深水基础浮运下沉过程中精准定位、超大型沉井基础防冲刷、大直径钻孔桩施工、大跨度斜拉桥索塔锚固构造优化、超高桥塔大体积混凝土水化热温度控制、超高桥塔新型液爬模系统开发等,已成为影响深水大跨桥梁安全顺利施工、长期可靠运营的关键问题。为促进深水大跨桥梁施工技术的发展,提高深水大跨桥梁施工人员解决问题的能力,为深水大跨桥梁的推广提供技术支持,围绕深水大跨桥梁施工面临的上述关键问题,对 2020 年国内外研究者的相关研究进展及成果进行了分析与汇总。

关键词:深水大跨桥梁;深水基础;超高桥塔;新型机械设备

中图分类号:U445.4 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2022)01-0297-11

State-of-the-art review of the construction technology in deep-water long-span bridges in 2020

LIU Junling, YANG Hanbin, YANG Wanli, ZHANG Yuzhi

(School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China)

Abstract: With the increasement of economic strength and significant improvement in science and technology, bridge engineering is developing rapidly towards larger span, deeper foundation and higher tower. Many new problems appears to bridge builders, such as: accurate positioning of deep water foundation during floating and sinking, anti-erosion of super-large caisson foundation, large diameter drilled pier construction, optimization of anchoring structure in long-span cable-stayed bridge tower, temperature control of hydration heat for mass concrete of ultrahigh bridge tower, development of new hydraulic climbing template system for ultrahigh bridge tower. These are the key problems for safe and smooth construction and long-term reliable operation for deep-water long-span bridges. The development and achievements gained in 2020 related to those key problems are analyzed and summarized to improve the construction technology, the problem-solving capacity of the builders and to give technical support for the promotion of deep-water long-span bridges.

Keywords: deep-water long-span bridge; deep-water foundation; ultrahigh bridge tower; new mechanical equipment

随着我国社会经济水平的提高,交通运输业得到空前发展。桥梁工程作为我国国民经济建设的基础工程,在交通与运输中占有重要地位,对国民经济建设的发展有着不可忽视的重要影响^[1-2]。改革开放以来,在巨大的建设需求驱动下,中国桥梁完成了从“跟随者”向“竞争者”再向“引领者”的转变,实现了量和质的飞跃^[3]。近年来,我国的桥梁建设取得了实质性的成果,建成了世界最高桥——北盘江大桥、世界跨径最大钢拱桥——朝天门大桥、世界最长跨海大桥——港

珠澳大桥等结构新颖、施工难度大的特大型桥梁。同时,未来的桥梁工程也将面临更加恶劣和复杂的建造环境,这将推动着我国的桥梁施工技术不断改革创新与优化升级,朝着更高精度、高水平与智能化的方向发展^[4]。

过去的 2020 年,虽然新冠病毒传播的防控给桥梁建设工作带来了诸多困难,但桥梁工作者在这一年中依旧取得了骄人的成绩,具体见图 1。可见,随着我国经济实力的不断增强,科学技术水平的显著提升,桥梁工程朝着跨度更大、基础

收稿日期:2021-07-08

作者简介:刘俊岭(1996-),男,主要从事海洋环境下深水基础研究,E-mail:1063476766@qq.com。

张育智(通信作者),男,博士,E-mail:zyzswjtu@126.com。

更深、桥塔更高的方向发展,反映出我国的桥梁建造水平在飞速进步的同时,也面临桥梁施工难度的高要求和诸多新的挑战。例如深水基础浮运下沉过程中精准定位、超大型沉井基础防冲刷、大直径钻孔桩施工、大跨度斜拉桥索塔锚固构造优化、超高桥塔大体积混凝土水化热温度控制、超高桥塔新型液压爬模系统开发等关键问题。



图 1 2020 年建设的大跨径桥梁

上述问题已成为桥梁工作者急需攻克的技术难点以及主要研究热点。为解决上述问题,需制定合理的施工方案,选择合适的施工技术和施工流程,以及优化或创新大型施工机械设备,从而提高桥梁的施工质量,加快施工进度,节约施工成本^[5]。

笔者将围绕深水大跨桥梁施工遇到的上述问题对过去一年的主要研究进展进行总结与分析,为相关领域内的同仁提供参考,并展望未来深水大跨桥梁施工的发展方向。

1 深水基础施工技术

在桥梁基础工程中,所谓“浅水”或“深水”,虽没有明确及严格的定量界限,但根据一般传统的土力学地基及基础所介绍的水中围堰概念,可暂将桥梁深水基础定义为:水深在 5~6 m 以上,不能采用一般的土围堰、木板桩围堰等防水技术施工的桥梁基础,称为桥梁深水基础^[6]。依据国内外已建和在建的桥梁深水基础概况,可分为桩基础、管柱基础、沉井基础、特殊基础、组合基础、筑岛基础、扩大基础^[7]。

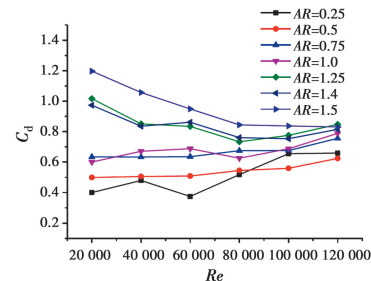
近年来,跨江、跨海特大型桥梁建设的发展使得深水大型基础应用逐渐增多。在特大型桥梁建设中,基础施工技术的应用非常重要,因此,必须明确基础施工的技术要点,结合科学的施工技术和工艺,以保证我国桥梁施工技术的快速稳定发展^[8]。

1.1 大型防水围堰及深水基础浮运下沉定位

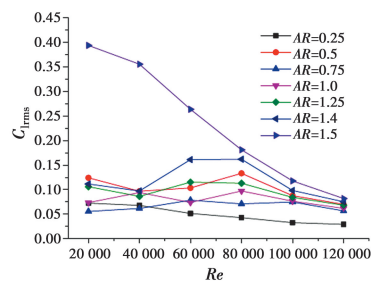
由于桥梁基础向大平面尺寸、深埋方向迅速发展,现有的理论方法及施工技术均无法有效应对,大型防水围堰或深水基础浮运下沉定位技术的发展直接决定了整体桥梁的施工质量。

在理论方法方面,魏凯等^[13]通过数值模拟研究了大型桥梁沉井基础下沉过程中地形、流速及吃水深度对水流量和动水压强的影响;宋朋远^[14]对复杂地质条件下沉井下各阶段

可能发生的偏斜、扭转、位移、超沉、突沉、流砂、管涌等风险进行了分析;Yang 等^[15-16]针对圆形沉井模型下沉过程的水流特性进行了详细的研究(见图 2),并提出了正方形沉井在浮运过程的绕流模式,该绕流模式为解释沉井的受力规律提供了基础(见图 3)。



(a) 阻力系数与雷诺数的关系



(b) 横向力均方根系数与雷诺数的关系

图 2 阻力系数及横向力均方根系数与雷诺数的关系^[15]

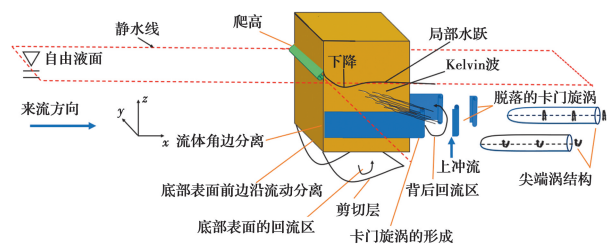


图 3 阻力系数及横向力均方根系数与雷诺数的关系^[16]

在施工技术方面:2020年6月主塔封顶的明月峡长江大桥是中国首座钻石型不对称桥塔钢桁梁斜拉桥。其3#主墩深水基础为大型群桩基础,防水围堰采用长×宽为49.1 m×37.6 m,高度25 m,重约2500 t的双壁钢围堰,施工时浮运距离约120 km,创下中国内陆河流中最长浮运距离。汪跃飞^[17]就钢围堰体积大、质量大、运距远等特点,对其整体下水、长距离浮运及精准定位进行了研究。施工时利用气囊整体下水,再通过拖轮编组浮运,定位系统采用锚定和前后定位船精准定位。2020年7月通车的沪苏通长江公铁两用斜拉桥,并首次实现了1.5万t巨型沉井精准定位施工技术。李军堂^[18-20]、陈开桥^[21-22]、林长青^[23]从技术性、经济性、施工操作性角度分析了锚桩+重力式边锚定位方案在各个方面均优于锚墩定位方案,施工时首次将沉井由工地现场焊接生产改为工厂化生产,采用助浮结构和充气增压系统使得巨型钢沉井不仅可以自浮,还可以调节吃水深度以及浮运过程中的空间姿态,并开创性地采用了“大直径锚桩+混凝土重力锚”方案精准定

位巨型沉井(见图4),解决了千吨级水流力作用下钢沉井精确定位难题。

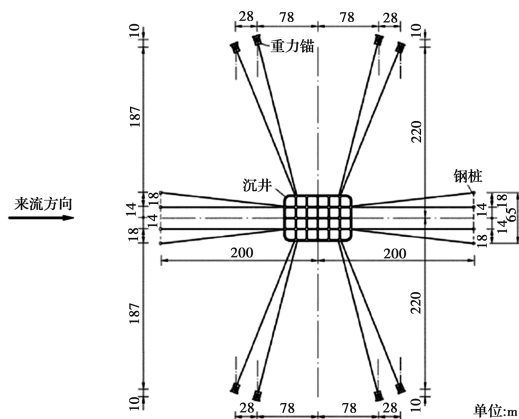


图4 28号主墩锚定系统平面布置^[18]

以上学者从不同角度对大型防水围堰或深水基础在浮运、下沉定位过程中的诸多技术难点进行了研究。明月峡长江大桥双壁钢围堰和沪苏通长江大桥沉井基础浮运下沉定位技术的成功可为今后此类问题的合理解决提供参考和借鉴。

1.2 超大型沉井基础防冲刷技术

桥梁基础局部冲刷是指基础周围泥沙或其它物质因水流作用被带走,导致基础侧向承载力降低,改变了结构固有频率,从而降低了结构安全性。冲刷机理十分复杂,并且在不同的水力、沉积物、基础形式条件下会表现出不同的冲刷机理。如今有关桥梁基础局部冲刷的研究已经从单桩基础发展到沉井基础^[24]。

Xiang等^[25]通过数值模拟和试验验证的方法,对沉井下沉过程中沉井底面与河床之间的距离变化对冲刷深度以及流场的影响进行了研究。在2020年6月世界最大跨度斜拉桥常泰长江大桥主桥主塔基础钢沉井下沉施工中,秦顺全等^[26-27]通过技术经济综合比选钻孔灌注桩、打入钢管桩、沉井基础三种方案后,决定采用沉井基础作为常泰长江大桥主塔基础。针对超大型沉井基础截面尺寸大、自重、入土深等问题,提出了新型台阶型减冲刷沉井基础(Scour-Reducing Stepped Caisson Foundation, SRCF)方案,并通过模型试验及数值分析^[25,28]确定了沉井相关设计参数(见图5)。SRCF解决了传统沉井基础应用于超大跨度桥梁深水基础的适应性问题,沉井通过设置台阶有效减小了冲刷深度,而且减轻了运营期沉井自重,达到大幅度减小沉井施工下沉深度,降低沉井规模和施工风险的目的。

沉井基础具有整体性好、刚度大、承载能力高等优势,是超大跨度桥梁常用的基础形式。但超大型沉井基础在定位着床过程中必须考虑冲刷问题,目前已有研究多集中于基础的局部冲刷机理,但对于监测与防护的研究较少。

1.3 大直径钻孔桩施工关键问题

在深水大跨桥梁建设中,除沉井基础外,群桩基础也是被广泛应用的基础形式。选用直径大于2.5m的大直径钻

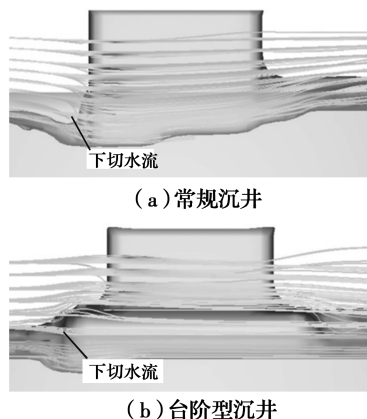


图5 沉井周围水流流场分布^[26]

孔灌注桩,可增大基础水平刚度,同时减少钻孔桩数量,优化桩群布置,并减少承台平面尺寸^[29]。但其施工难度比普通桩大得多,所采用的机具设备、施工方法和施工工艺也不尽相同^[30]。

2020年12月通车的平潭海峡公铁两用大桥是世界上最长的公铁两用大桥,其主跨通航孔斜拉桥基础采用4.5m超大直径钻孔桩。由于海床地质情况复杂,且海面受潮汐影响形成周期性潮差,导致桩基施工时出现漏浆、偏孔及塌孔等问题。纪尊东等^[31]参考已有工程经验,采用旋喷注浆止水帷幕法进行地基加固以解决深水浅覆盖层漏浆及塌孔问题;采用模袋围堰封底混凝土法以解决钢管桩及钢护筒锚固问题;采用回填片石及粘土法以解决钻孔灌注桩漏浆问题;采用回填块石法以解决偏孔、卡钻等问题,及时采取针对性的处理方案,较好地处理了施工中的各类问题。

目前,超大直径桩基础广泛应用于陆地和跨河桥梁,且施工技术相对成熟。但对于深水大跨桥梁来说,自然环境和地质条件更加复杂和严酷,需要考虑船舶碰撞、地震等因素。随着我国海上风电机组发电量的增加,大直径桩基础在海上风电机组中应用越来越普遍,这对深水大跨桥梁大直径桩基础的设计和施工有很大的参考价值,可为其提供创新思路和可行方案^[32]。

通过上述研究的总结不难发现,2020年有很多在建或通车的特大桥梁在深水基础施工过程中遇到许多技术难题,诸如大型防水围堰或深水基础浮运下沉定位、超大型沉井基础防冲刷技术以及大直径钻孔桩施工等关键问题。已有文献通过数值模拟或物理试验对上述问题进行了理论方法的研究,同时也在实际施工过程中采取了合理的解决方案。

但相比桥梁上部结构的发展,我国深水基础的发展略显滞后,原创技术较少,形式较单一,在设计理念、规范标准、施工机械、智能化等方面还有一定差距^[33]。我国桥梁深水基础目前仍存在的问题主要有:1)深水基础设计规范有所欠缺^[34]。深水基础埋深较深、尺寸较大时,会超出规范适用范围,导致计算结果偏差较大。2)深水基础局部冲刷的监测与防护研究较少。在深水基础局部冲刷机理方面有较多研究,但如何对其进行精准监测并做出有效防护方面的研究

还很匮乏。3) 超大直径桩基础计算和施工方法不够完善。虽然超大直径桩基础在深水大跨桥梁工程中应用越来越广泛,但理论和试验研究仍处于起步阶段,还面临许多困难和挑战。

2 超高桥塔施工技术

桥塔在桥梁工程中是非常重要的受力结构,随着新型结构的优化、新型材料的研发以及新型施工工艺的发展,桥梁的跨越能力不断提高,为了满足结构受力的需要,主塔也越来越高,这对施工技术提出了新的要求。本节将从索塔锚固结构优化、大体积混凝土水化热温度控制和新型液压爬模系统研发三方面总结超高桥塔施工技术的研究。

2.1 索塔锚固结构

如今缆索体系桥梁逐步向高塔、大跨径的趋势发展,拉索索力与以往桥梁相比显著变大,索塔锚固区是将强大的拉索力传递至索塔的关键结构。缆索体系桥梁的索塔锚固区通常采用预应力混凝土结构或钢-混组合锚固结构,由于钢-混组合锚固结构能够充分发挥钢结构抗拉强度高和混凝土结构抗压性能较好的特点而得到越来越广泛的应用^[35]。常用的钢-混组合锚固结构的主要形式有钢锚箱锚固结构和钢锚梁锚固结构。

当采用预应力混凝土锚固结构时,通常采用环形预应力以防止锚固结构开裂。环向预应力锚固法利用预应力钢束产生的预应力来抵消塔柱中索力产生的拉应力,具有结构简单、工程造价低、后期维护工作量小的特点,其布束方式通常有 U 形和井字形两种(见图 6)。但由于弯曲区预应力筋的挤压,应力分布复杂,伸长值和摩擦系数的值不明确,试验测

得的数据相当离散。并且当跨度超过 800 m 时,预应力筋吨位很大,塔柱壁厚度和预应力钢绞线数量都会增加。因此,环向预应力锚固不适用于超大跨度桥梁,而是采用钢锚箱或钢锚梁的结构形式^[37]。

对于钢锚箱锚固结构,Wei^[38]通过几何方法推导了拉索与钢锚箱之间的角度关系,建立了钢箱板切线方向方位角与拉索锚固点之间的联系,实现了参数化,为设计和施工带来便利。除数学推导以外,有限元软件对锚固结构的分析也非常有效。逯文茹等^[39]采用 ANSYS 软件分析了多节段内置钢锚箱式索塔锚固结构(钢锚箱置于混凝土塔壁的内部,混凝土索塔是完整的箱形结构),见图 7,分别考虑单节段和多节段索力作用的条件下,对锚固结构节段内各板件间索力的分配、各构件的应力以及栓钉群剪力的分布情况进行了分析(如图 8)。吴峰等^[40]采用 Midas 软件对锚固区各板件间受力进行了分析,探明了钢锚箱的传力途径、各部位应力水平及应力集中部位。在前人研究的基础上,华晓勇^[41]探讨了一种新型双横隔板钢锚箱结构,并采用 ANSYS 对传统钢锚箱和新型钢锚箱结构在不同工况下主要板件和焊缝的应力幅值、应力分布情况、应力集中现象以及索力传递路径等进行了分析,发现新型双横隔板构造钢锚箱方案设计安全合理,应力分布均匀。但钢锚箱锚固结构的缺陷在于完全固接于混凝土塔壁,塔壁与钢锚箱共同分担索力,且塔壁承担的水平分力不小,容易使塔壁混凝土开裂,因此需对塔壁施加足够的预应力来防止塔壁开裂,钢锚梁的结构特点可避免这类问题^[42]。

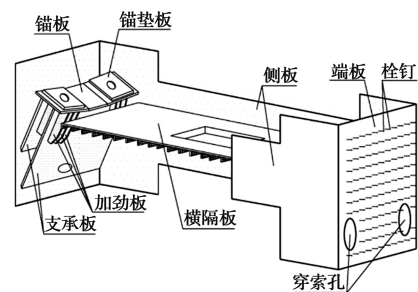


图 7 钢锚箱结构^[39]

对于钢锚梁锚固结构,钢梁安装在塔柱内部,支撑在混凝土塔柱内壁的混凝土或钢牛腿上,是一个独立稳定的构件,主要承受拉索的水平拉力、竖向分力和偏心弯矩,可以有效减小混凝土塔柱中拉索水平分量产生的拉应力。这类锚固结构简单明了,在国内外斜拉桥中已得到广泛应用^[37]。而传统的钢锚梁锚固结构中,钢锚梁腹板均采用等高布置,锚梁腹板下缘水平,为保证塔端拉索张拉空间,需降低锚点与牛腿顶面的高度,导致钢牛腿顶板均有不同程度的切削。为解决这个问题,许多学者对传统锚固结构进行了优化。文望青等^[43]结合泉州湾跨海大桥贝壳分瓣造型的 H 形塔的特点,将钢牛腿壁板设计为变角度的等宽平行四边形以适用曲线塔柱特点(见图 9)。赵金霞等^[44]以武汉青山长江公路大桥为背景,采用有限元软件 ABAQUS 分析了 3 种腹板构造

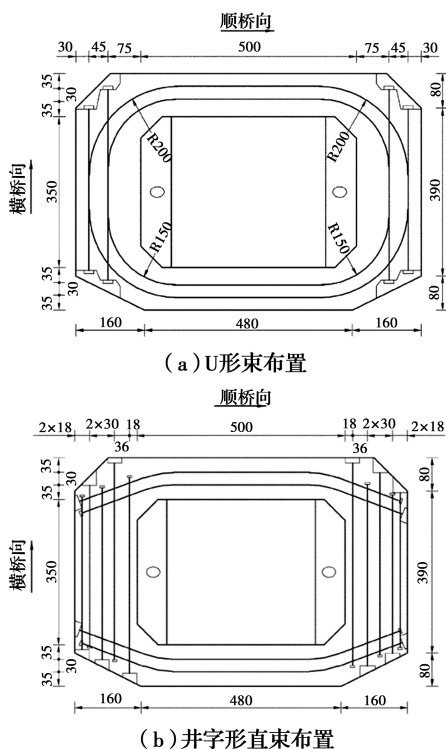
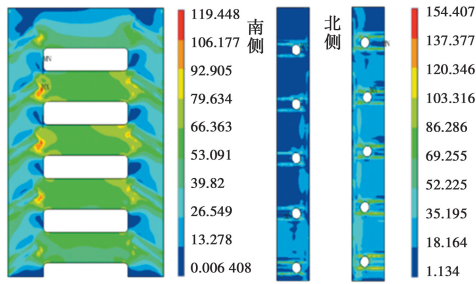
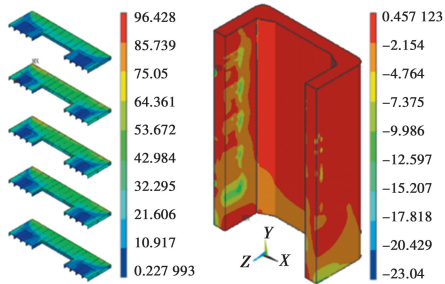


图 6 椒江大桥索塔预应力钢束布置方式^[36]



(a) 钢锚箱侧板和端板VonMises应力



(b) 钢锚箱横隔板VonMises应力及混凝土塔壁主压力

图 8 板件应力分布^[39]

形式(传统钢锚梁腹板构造、高腹板构造、变高腹板构造)下的钢锚梁及钢牛腿力学行为,结果表明,钢锚梁变高腹板构造能更好地适应斜拉索立面倾角大、索力大的情况,结构受力更均匀、传力更顺畅,并加大了塔端斜拉索张拉空间。周捷等^[45]基于温州七都北汉桥的建设,针对其索塔空间小、索力大及空间索面布置的特点,创新性地提出了一种新型三腹板空间索面钢锚梁锚固结构,并分别对新型钢锚梁和传统空间索面钢锚梁方案进行了整体杆系模型受力分析,结果显示新型结构板件应力最大下降 15%,整体用钢量下降 15.5%;结构尺寸也得到了较大改善,适用于施工空间相对狭小的桥塔。另一方面,此锚固结构施工中,传统钢锚梁与钢牛腿常采用整体吊装进行安装,需要使用大型起重设备,在塔上定位安装难度较大,对施工空间也有一定要求。沙垵湾跨海大桥索塔锚固结构施工时,采用钢锚梁与钢牛腿分离式制作安装是一种减小施工难度的尝试^[46]。

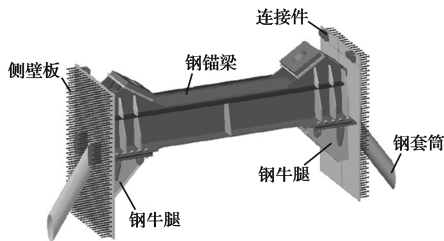


图 9 钢锚梁结构^[43]

除了以上三种常用钢-混组合锚固结构外,秦顺全等^[26]考虑到常泰长江大桥上塔柱断面应力超过 50%来自竖向轴力,兼顾混凝土的开裂控制难题,研究提出“钢箱-核芯混凝土组合(Steel Box-Core Concrete Anchorage System, SCAS)”结构(见图 10)。SCAS 结构降低了工程造价,拉索锚固区最小构造间距降低至 2.2 m,上塔柱拉索锚固区全高由 120 m

减小至 92 m,改善了全桥,特别是公路桥面视角的景观效果。

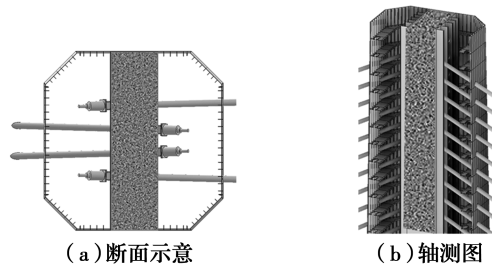


图 10 钢锚箱-核芯混凝土组合结构^[26]

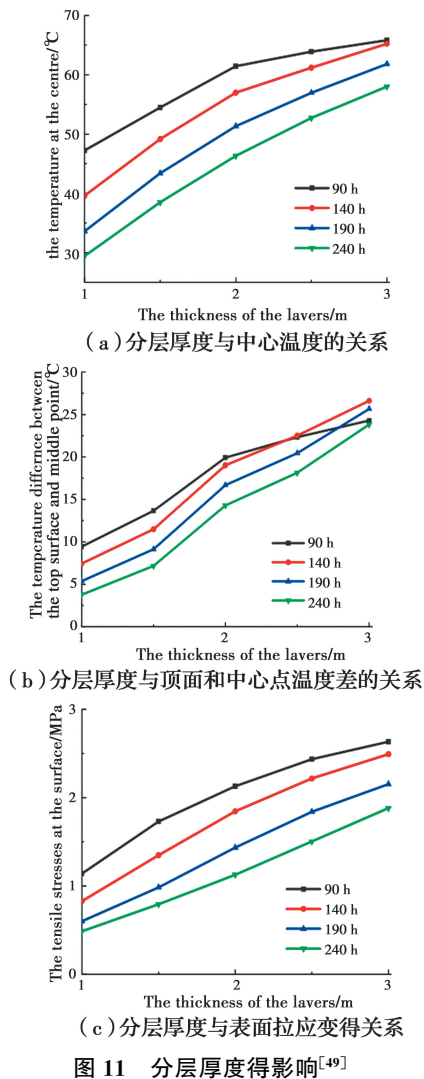
已有诸多研究表明,常用锚固结构(环向预应力混凝土锚固构造、组合钢锚箱、钢锚梁-钢牛腿)均有优劣,传统锚固体系无法适用于超大跨径缆索体系桥梁。因此,结合实际桥梁的特色进行合理优化或提出新型锚固体系,将推动深水大跨桥梁的进一步发展。

2.2 大体积混凝土水化热温度控制

在大跨径桥梁中,随着桥塔几何尺寸的增大,大体积混凝土已被广泛应用。大体积混凝土由于截面尺寸大,其在硬化过程中水泥水化热高导致其内部温度增长速度快,当内外温差产生的温度应力超过混凝土的抗拉强度时,易使混凝土产生温度裂缝,从而影响结构安全和正常使用^[47]。因此,对于大体积混凝土温控及预防开裂方面的研究具有重要意义。

在理论研究方面,大体积混凝土常由于温度应力导致开裂,而影响其温度应力的因素十分复杂。Jin 等^[48]从大体积混凝土力学性能和微观结构角度考察了不同石灰石粉百分比和不同养护温度的影响;Chen^[49]分析了混合料入模温度、分层厚度、环境温度和养护措施对大体积混凝土中心温度、顶面与中点温差和表面拉应力的影响,发现混凝土分层厚度对施工过程影响巨大(见图 11);Cha 等^[50]基于逐步法可良好地预测大体积混凝土结构中的温度应力;Ho 等^[51]采用有限元软件 Midas Civil 模拟不同初始温度下大体积混凝土的最高温度和温差,与实验结果比对,发现二者差异并不明显,从而验证了有限元软件分析的可靠性。除此之外,另一重要问题是如何对其进行温度控制从而预防开裂,贾海艳^[52]对桥梁主塔进行仿真分析,提出了实心段大体积混凝土温控的主要指标和参考指标;谭文鹏等^[53]通过有限元研究和实际温度控制对比,验证了基于温差控制的大体积混凝土智能温控系统方法,开启了智能无人温控模式。

在施工技术方面,以沪苏通长江大桥施工为例,其桥塔高 330 m,塔身采用 C60 混凝土,单塔混凝土方量超过 6 万方(不含塔座)。徐文等^[54]采用等温量热和变温变形试验确定了水泥水化调控材料掺量以及复合膨胀材料配比,通过缩尺模型试验研究了混凝土抗裂性能,并应用于 29#墩桥塔施工中,显著降低了实体结构收缩拉应力与开裂风险。闫志刚等^[55]采用 Midas FEA 进行混凝土早期抗裂性分析,结果表明,复掺沸石砂砾和 SAP 内养护混凝土塔柱在温度与收缩应力共同作用下,其最易开裂部位的拉应力均小于最大容许拉

图 11 分层厚度得影响^[49]

应力,总体开裂风险较低。张士山等^[56]基于“水化-温度-湿度-约束”多场耦合机制的结构混凝土抗裂性评估模型与方法,对混凝土材料、施工环境及结合尺寸等耦合作用下的桥梁索塔大体积强约束结构混凝土抗裂性进行了开裂风险分析。明晰影响开裂风险的因素及其大小,为实际工程的混凝土抗裂性能控制指标及施工控制指标的提出指明了方向。

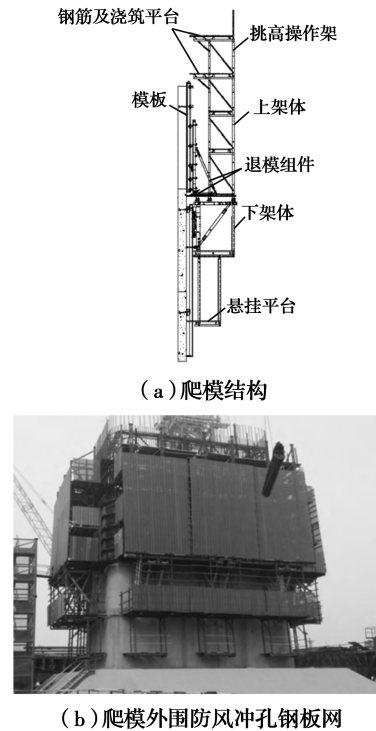
大体积混凝土由于温度应力导致开裂是超高桥塔施工中的热点问题,众多学者分别从试验和数值的角度对大体积混凝土力学性能及其影响因素进行了研究,有效地预测了混凝土的温度应力,并在实际施工过程中尝试了各种温控方法以预防开裂。如何提高温控措施的效率以及开发新的降温技术仍是未来研究的一个热门方向。

2.3 液压爬模系统

超高混凝土桥塔施工时,液压爬模体系是混凝土浇筑的首选模板形式。我国的液压爬模施工是从液压滑模施工演变而来,最初的爬模是滑模和支模相结合的一种工艺,在爬升方法上同滑模工艺一样,以液压千斤顶为动力向上爬升,后来改用升降千斤顶,爬模技术才有了新的发展^[57]。液压爬模自带液压爬升系统,随结构混凝土持续浇筑而升高,可自

动爬升,提高了施工效率,适用于高塔柱施工^[58]。

将液压爬模体系运用到实际工程时,需结合超高桥塔自身特色进行施工。张科^[59]以某悬索桥北索塔施工为例,在液压爬模施工中应用了 HFACS100 型液压自动爬模系统,可精确定位爬升高度、全面监控施工现场以及自动喷淋养护。有效提高了施工过程的安全性和施工效率,降低了设备的损坏率。王东辉等^[60]介绍了平潭海峡公铁两用大桥通航孔桥塔塔施工时,为抵御台风侵袭,采用了全封闭防风液压爬模施工技术(见图 12)。

图 12 平潭海峡公铁两用大桥爬模结构^[60]

倪喜雨等^[61-62]基于中国援柬埔寨项目三维变曲面倾斜混凝土索塔,采用 BIM 模型形体拟合与 CAD 三维模板体系精细化建模的深化设计,创造性地采用以液压系统为动力的“截面递减爬升平台+局部挂架”造塔平台,为定型模板高空组装、钢筋绑扎提供了操作空间。邹威等^[63]介绍了深中通道伶仃洋大桥东塔施工所研发的多功能一体化智能筑塔机专用设备(见图 13)。该设备集钢筋部品调位、混凝土主动浇筑、自动振捣、智能养护等集成控制于一体,提高了钢筋安装精度和施工效率,降低了超高混凝土桥塔混凝土施工劳动力需求量、人工作业强度,实现了超高混凝土桥塔施工的自动化和机械化。

液压爬模在超高桥塔的施工中优势明显,智能化、多功能化的优点使其应用更加广泛。但要注意液压爬模系统在使用过程中的保养与维护,以及拓展此系统的适用范围,在满足超高桥塔要求的基础上适应各类异形高塔的施工。

缆索体系桥梁跨越能力不断提高的同时,桥塔作为主要受力结构随之越来越高。许多学者结合超高桥塔自身特色创新索塔锚固结构,从而更好地实现拉索力传递。此外,

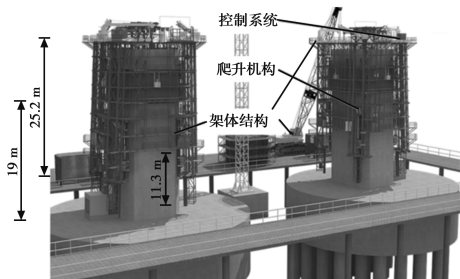


图 13 筑塔机总体结构^[63]

针对大体积混凝土材料的研究对于超高桥塔受力性能有重要意义,通过数值方法准确预测温度应力以预防开裂等病害。而在超高桥塔施工过程中选择并改进合适的模板体系,可适应实际施工环境,提高施工效率。但研究工作仍需精进,超高桥塔的施工质量直接决定了整体桥梁工程的质量,在大体积混凝土温控措施、拓展施工模板的适用范围等方面的研究任重道远。

3 新型机械设备应用技术

近年来我国桥梁设计技术和施工技术飞速发展,桥梁工程正趋于向超大跨度、超大节段工厂工业化制造、超大节段现场拼装施工等方向发展。通过现代化的方式对传统机械设备进行有效改造和创新,促进现代化机械设备的进步已迫在眉睫^[64-65]。过去一年内,大量桥梁建设者研发出新型机械设备或对传统设备进行了优化,在基础施工、主梁架设以及桥面铺装等方面均有许多研究成果。

3.1 桩基施工设备

灌注桩和预制桩施工属于桥梁桩基建设的两种施工方式。其中灌注桩施工建设的重要环节是成孔,徐州徐工基础工程机械有限公司自主研制开发的 XR800E 超大入岩型旋挖钻机^[66]最大钻孔直径达 4.6 m,最大钻孔深度达 150 m,在大型桥梁工程桩基础施工中可替代反循环钻机。其主要应用于超大直径、超深桩、硬质地层的复杂工程,特别是在深水大跨桥梁领域突破了传统的施工禁区。为满足平潭海峡大桥 4.5 m 超大直径桩基础施工的需要,中铁大桥局研发了 KTY5000 型全液压力头回转钻机^[67],该机在平均单轴抗压强度基岩中钻进,最大钻孔直径达 5 m,钻进深度达 180 m,最大扭矩为 450 kN·m。

在预制桩施工中,打桩机是常用设备,李文^[68]在充分研究现有混凝土搅拌机、三轴搅拌机、液压打桩机各自功能的基础上,研发出集搅拌、打桩等功能于一体的多功能打桩机——C800 型多功能打桩机。在软地基施工时,对比一般打桩机预制桩承载能力,其抗压能力可提高 107%,抗拉能力可提高 110%,且施工效率可提升 50% 以上,具有较高的创新性及技术水平。

除此之外,我国相继研制出首台国产化 2 500 kJ 大型双作用全液压打桩锤^[69]、新型全回转式起重打桩机^[70]、大型海洋液压打桩锤用替打环锻件^[71]等新型机械设备,这些机械设

备适用于地质条件更加复杂的深水大跨桥梁桩基础施工。

3.2 主梁架设备

近年来,桥梁建设正朝着超大节段预制拼装的方向发展,机械设备需要优化或创新,以适应更长、更重节段主梁的运输及架设。不同类型主梁或采用不同施工工艺时,对于机械设备的要求也不同。

在国内外高速铁路简支梁建设中,32 m 跨度箱梁及以下主要采用整体预制、梁上运输架设施工,而跨度大于 32 m 时,目前只能采用原位浇筑的方法。陈叔等^[72-73]介绍了新建郑州至济南高速铁路建设中所研制的制运架全套施工设备(见图 14),将原来的 32 m/900 t 级简支箱梁运架设备提升至 40 m/1 000 t 级。该设备不仅能满足 1 000 t 级和 40 m、32 m、24 m 等多类跨径箱梁的布局要求,还可实现通过隧道及隧道口架设,远程监控安全有效。

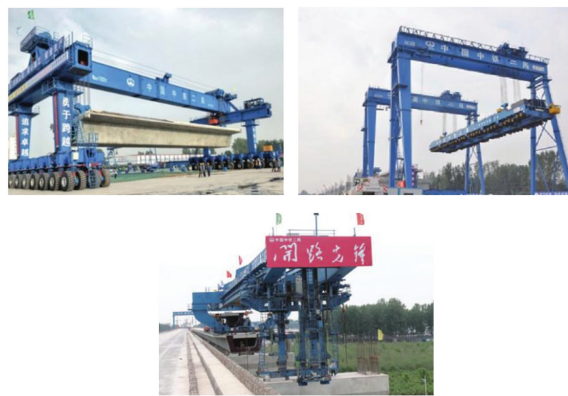


图 14 制运架梁全套施工设备^[73]

对于城市交通网络中的轻轨桥梁,其线路大部分需经过河流、湖泊,就必须修筑便道,有时还需要做地基沉降试验。现有架设轻轨桥梁的设备主要有龙门起重机双机抬吊架设、汽车起重机架设等,但这些设备受环境条件限制严重。韩利军等^[74]设计了一种新型 250 t 级 U 型梁短尾式架桥机,整机宽度窄,降低高度可通过涵洞,且架梁工序简单,自动化程度高,从而减少修筑便道、征地等问题,提高架设效率。

针对小曲线半径桥梁易发生扭转变形、支座脱空等问题,秦洪义^[75]在郑州至西安客运专线项目中,对现有 HZQ550 架桥机的辅助小车和后支腿与行走轮箱连接部分进行了改造,缩短辅助小车横移车轮轮距,更换横移油缸,并将后支腿行走机构的轮箱铰座由固定铰座改造为带立轴式可旋转铰座等,使得架梁作业时其为一跨简支状态,受力明确,过孔作业时利用导梁辅助过孔,属于简支状态,稳定性好,安全性高。

在南京长江五桥主梁架设安装时,为适应其中央双索面索距近、起吊重量大的特点,研制了新型 QMDJ500 型桥面吊机^[76](见图 15),采用主桁架与前、后支点横梁可分离式结构,吊装时支点横梁受力,行走时支点横梁旋转并移动,避开斜拉索。其成功经验是对国内斜拉桥中央双索面组合梁结构设计的积极探索和验证,对类似工程具有一定的指导和借

鉴意义。

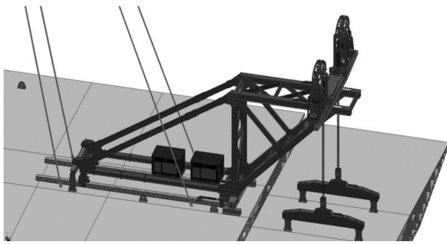


图 15 QMDJ500 型桥面吊机示意图^[76]

3.3 桥面铺装设备

大跨径桥梁建设步伐加速,正交各向异性钢桥面板桥梁具有构件质量轻、运输与架设方便、施工周期短等特点,应用越来越广泛。但沥青混合料直接在正交异性钢桥面板上进行铺装时,铺装层并不具备半刚性基层那样稳定的支撑,在车轮荷载和外界环境的耦合作用下,钢桥面板由于柔度较大导致自身的变形、位移和振动幅度较大,会对铺装层的工作状态产生不利影响^[77]。因此,钢梁桥面的沥青混凝土摊铺一直是跨径桥梁施工的重难点。沪苏通长江大桥主航道钢桥面沥青混凝土铺装时,研发了环氧沥青混凝土和 SMA 改性沥青混凝土分 2 层铺装,不仅能承受重载、抗车辙、不易开裂,而且能够防水,较好地避免钢桥面锈蚀。在铺装过程中,材料的运输和调度、环氧沥青的温度控制和设备效率对最终铺装质量起着至关重要的作用。为实现摊铺精准且高效施工,采用 2 台福格勒摊铺机和 4 台悍马压路机协同作业(见图 16),创造了 12 天顺利完成 1 092 m 环氧沥青提温快速施工的新纪录^[78-79]。



图 16 沪苏通长江大桥桥面铺装^[78]

另一方面,传统桥面铺装高度控制差,表面凹凸不平,混凝土振捣密实度差,遇到赶工期时,劳动力需求大,施工标准化难以得到保障。激光超声波摊铺机(见图 17)^[80-81]是在悬挂式摊铺机基础上安装了激光液压控制系统,能够准确设定双面水坡坡度和标高,同时靠液压系统调整高低,全面提升混凝土铺装的平整度,解决了人为操作施工带来的不确定因素。同时收面采用驾驶性抹光机,针对竖曲线混凝土铺装,

增加了超声波系统,组成激光和超声波系统互换的双控系统,解决了混凝土竖曲线桥面机械化施工的难题。



图 17 激光超声波摊铺机^[81]

从上述研究可见,我国在深水大跨桥梁施工中对大型机械设备进行了优化,甚至研制出各类新型设备,应用于深水基础、大节段梁段、桥面铺装等方面,多项技术站在了世界前列。但还存在如下不足:1)桥梁施工过程中机械化、自动化、智能化设备还有待继续开发;2)大吨位机械设备的动力源还没有取得相应的突破;3)与发达国家制造的机械设备相比,关键部件的可靠性仍需提高,并且使用寿命需要延长。

4 结论与展望

通过检索 2020 年有关桥梁施工方向的研究文献以及近年建成或在建特大型桥梁的施工资料发现,随着我国经济发展的迫切需要,近年建造了各种类型的深水大跨度桥梁,并朝着大跨、重载、高速的方向继续前进^[82]。诸多学者通过数值模拟或物理试验探究了大型防水围堰或深水基础浮运下沉定位、超大型沉井基础防冲刷技术以及大直径钻孔桩施工关键等深水基础施工中的技术难题,同时也在实际施工过程中采取了合理的解决方案。而在桥梁跨度增加的同时,为满足结构受力的需要,主塔也越来越高,因此超高桥塔出现了新型锚固结构、新型材料以及新型施工技术和体系。为此,我国大力发展施工机械设备以推动桥梁工程事业的飞速进步,机械制造能力与世界先进水平的差距已越来越小。在借鉴和学习国外大跨度桥梁施工经验的基础上,我国逐步发展了具有自主创新产权的桥梁施工技术。

随着 21 世纪第三个十年的到来,中国大跨度桥梁建设进入了黄金时代。中国大跨度桥梁建设目前面临巨大的机遇,同时也面临着大跨度桥梁新理论、新材料、新设备、新工艺、新技术的挑战。为完成支撑国家重大发展战略、确保大型桥梁的安全和使用寿命以及实现桥梁强国梦的三大历史任务,中国桥梁工程产业必须抓住机遇,科学规划,以实施“智能桥梁”科技计划并组建“桥梁产业技术创新战略联盟”。将中国桥梁工程升级为以“智能桥梁”为特征的“第三代桥梁工程”,实现桥梁产业发展的又一次飞跃^[3,83]。

深水大跨桥梁建设的脚步从未减缓,桥梁工作者任重道远。笔者认为可从以下方面开展持续性研究:

1)发展复杂条件下超大型深水基础整体化、预制化、机

械化和智能化技术。与施工方法、设备以及施工临时设施紧密结合,改良优化已有基础形式,尝试研究新的基础形式,才可应对复杂环境下近海桥梁深水基础的施工。

2)优化超高桥塔施工技术。缆索体系桥梁的索塔随着跨度的增加而不断升高,对其结构形式、材料性能、施工工艺提出了更高的要求。

3)提高超大型施工设备自主创新能力。目前我国已经能够自主开发大型施工设备,但与发达国家相比,在关键部件的制造、设备使用寿命、智能化和自动化等方面仍然存在差距。

此外,深水大跨施工技术未提及的其它重要领域有待继续深入研究,例如,如何将先进的 BIM 技术科学运用到深水大跨桥梁施工中、桥岛隧一体化工程的建设^[84-85]、深水大跨桥梁施工监测与评估^[86]等。

参考文献:

- [1] 程松. 桥梁工程的发展现状及技术创新[J]. 科技创新与应用, 2018(21): 151-152.
- [2] 赵敏. 桥梁施工技术现状及发展趋势[J]. 黑龙江科技信息, 2017(5): 176.
- [3] ZHOU X H, ZHANG X G. Thoughts on the development of bridge technology in China [J]. Engineering, 2019, 5(6): 1120-1130.
- [4] 黄伟乙. 桥梁工程的发展现状及技术创新[J]. 建材与装饰, 2018(9): 265-266.
- [5] 山明义. 桥梁工程施工技术[J]. 江西建材, 2016(14): 164, 171.
- [6] 刘自明 王邦楣 陈开利. 桥梁深水基础(精)[M]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
- [7] 余进. 深水施工单壁钢围堰的力学特性分析及关键技术研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2018.
- [8] MA H, WANG J. Analysis of key points of road and bridge foundation construction technology [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 638: 012046.
- [9] 新华网. 2021 年主城市民可乘火车上下班[EB/OL]. https://k.sina.cn/article_2810373291_a782e4ab034009nci.html.
- [10] 新浪网. 定了! 沪苏通长江公铁大桥! [EB/OL]. http://k.sina.com.cn/article_1830136671_v6d15ab5f01900ov26.html?from=society.
- [11] 江苏城市论坛. 常泰长江大桥跨江段桥梁工程施工图设计通过审查[EB/OL]. <https://www.163.com/dy/article/FBC8GLPU05199GUB.html>.
- [12] 新华社. 黑科技! 世界最长跨海公路铁路两用大桥装上“安全气囊”[EB/OL]. <https://xhpfmapi.zhongguowangshi.com/vh512/share/9273517>.
- [13] 魏凯, 杨雄欣, 刘强, 等. 大型桥梁沉井下沉过程中的水流力数值模拟[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(11): 62-67.
- [14] 宋朋远. 复杂地质条件下沉井下沉各阶段风险分析及对策[J]. 工程技术研究, 2020, 5(20): 235-236.
- [15] YANG H B, YANG W L, YANG T, et al. Experimental investigation of flow around a square cylinder with very small aspect ratios [J]. Ocean Engineering, 2020, 214: 107732.
- [16] YANG H B, YANG W L, LI Q, et al. Experimental investigation of current forces on floating cylinder during the sinking process [J]. Ocean Engineering, 2019, 178: 134-144.
- [17] 汪跃飞. 明月峡长江大桥超大型双壁钢围堰施工安全风险控制研究[J]. 科技与创新, 2021(1): 73-75, 78.
- [18] 李军堂. 沪通长江大桥主航道桥沉井施工关键技术[J]. 桥梁建设, 2015, 45(6): 12-17.
- [19] 李军堂. 沪通长江大桥主航道桥沉井锚碇系统设计[J]. 桥梁建设, 2017, 47(3): 1-6.
- [20] 李军堂, 潘东发. 沪通长江大桥主航道桥施工关键技术[J]. 桥梁建设, 2019, 49(5): 9-14.
- [21] 陈开桥. 沪通长江大桥主航道桥边墩、辅助墩钢沉井定位施工技术[J]. 世界桥梁, 2016, 44(5): 5-10.
- [22] 陈开桥. 沪通长江大桥主航道桥桥塔墩钢沉井定位施工技术[J]. 世界桥梁, 2017, 45(1): 15-19.
- [23] 林长青. 沪通长江大桥主航道桥超大钢沉井定位方案比选[J]. 铁道建筑, 2020, 60(11): 29-32.
- [24] WANG C, YU X, LIANG F Y. Erosion mechanism of local scour around cushioned caisson on reinforced ground [J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2017, 35(7): 1028-1036.
- [25] XIANG Q Q, WEI K, LI Y D, et al. Experimental and numerical investigation of local scour for suspended square caisson under steady flow [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2020, 24(9): 2682-2693.
- [26] 秦顺全, 徐伟, 陆勤丰, 等. 常泰长江大桥主航道桥总体设计与方案构思[J]. 桥梁建设, 2020, 50(3): 1-10.
- [27] 秦顺全, 谭国宏, 陆勤丰, 等. 超大沉井基础设计及下沉方法研究[J]. 桥梁建设, 2020, 50(5): 1-9.
- [28] WANG S Y, WEI K, SHEN Z H, et al. Experimental investigation of local scour protection for cylindrical bridge piers using anti-scour collars [J]. Water, 2019, 11(7): 1515.
- [29] 王东辉. 平潭海峡公铁两用大桥航道桥基础设计与施工创新技术[J]. 铁道标准设计, 2017, 61(9): 68-75.

- [30] 沈明. 桥梁项目中的大直径灌注桩施工技术[J]. 中国高新科技, 2019(24): 55-57.
- [31] 纪尊众, 刘昌永. 平潭海峡公铁两用跨海大桥钻孔灌注桩成孔关键问题分析及处理措施[J]. 铁道建筑技术, 2018(12): 1-5, 23.
- [32] YE Q D, WANG J J, WANG C J. Application and development of the super-large diameter column foundation of bridge [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 758: 012021.
- [33] 李军堂, 秦顺全, 张瑞霞. 桥梁深水基础的发展和展望[J]. 桥梁建设, 2020, 50(3): 17-24.
- [34] 高宗余, 阮怀圣, 秦顺全, 等. 我国海洋桥梁工程技术发展现状、挑战及对策研究[J]. 中国工程科学, 2019, 21(3): 1-4.
- [35] 牛祥恒, 翟晓亮. 大跨度斜拉桥索塔锚固形式对比分析[J]. 公路, 2021, 66(3): 97-100.
- [36] 牟兆祥, 马广, 张雷. 四线铁路斜拉桥索塔锚固区环向预应力设计研究[J]. 世界桥梁, 2020, 48(3): 17-21.
- [37] LI Q, LV J, YU Z. Innovation and practice of cable- pylon anchorage zone using group aggregated anchor system[C]// Structure Health Monitoring. Materials Research Forum LLC, 2021: 18.
- [38] WEI Q F. Parametric design and application of steel anchor box for main girder of long span cable-stayed bridge [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 392(6): 062007.
- [39] 逯文茹, 赵敏. 多节段内置钢锚箱式索塔锚固结构传力机理[J]. 公路, 2020, 65(11): 159-166.
- [40] 吴峰, 封伟. 空间索面自锚式悬索桥钢锚箱构造和受力分析[J]. 四川建材, 2020, 46(6): 159-160, 162.
- [41] 华晓勇. 钢桥塔索辅梁桥锚固区新型钢锚箱受力分析[J]. 公路, 2020, 65(1): 75-81.
- [42] 戴世宏. 混凝土桥塔拉索锚固系统设计[J]. 北方交通, 2020(4): 6-9.
- [43] 文望青, 严嵩, 曾甲华. 福厦高铁泉州湾跨海大桥桥塔设计[J]. 世界桥梁, 2020, 48(Sup1): 7-11.
- [44] 赵金霞, 常英, 张家元. 武汉青山长江公路大桥索塔锚固区钢锚梁设计研究[J]. 桥梁建设, 2020, 50(Sup1): 82-88.
- [45] 周捷, 陈海兴, 李磊. 一种新型三腹板空间索面钢锚梁锚固结构计算分析[J]. 浙江交通职业技术学院学报, 2020, 21(4): 5-11.
- [46] 曹超, 邓智文. 沙埕湾跨海大桥索塔钢锚梁施工技术探讨[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2020, 16(4): 36-38.
- [47] 钱涛. 大体积混凝土防裂控制[J]. 建筑技术开发, 2020, 47(4): 37-39.
- [48] JIN W Z, JIANG L H, HAN L, et al. Influence of curing temperature on the mechanical properties and microstructure of limestone powder mass concrete [J]. Structural Concrete, 2020, 22(Sup1): E745-E755.
- [49] CHEN X Y. Temperature and stress fields of anchorage mass concrete of a suspension bridge [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 636: 012025.
- [50] CHA S L, JIN S S. Prediction of thermal stresses in mass concrete structures with experimental and analytical results [J]. Construction and Building Materials, 2020, 258: 120367.
- [51] HO N T, NGUYEN T C, BUI A K, et al. Temperature field in mass concrete at early-age: Experimental research and numerical simulation [J]. International Journal on Emerging Technologies, 2020, 11(3): 936-941.
- [51] HO N T, NGUYEN T C, BUI A K, et al. Temperature field in mass concrete at early-age: Experimental research and numerical simulation [J]. International Journal on Emerging Eechnologies, 2020, 11(3): 936-941.
- [52] 贾海艳. 桥梁主塔大体积混凝土的温控指标仿真分析[J]. 黄冈职业技术学院学报, 2020, 22(2): 107-110.
- [53] 谭文鹏, 王荣兴, 赵伟, 等. 基于温差控制的大体积混凝土智能温控系统及方法[J]. 公路, 2020, 65(10): 211-215.
- [54] 徐文, 闫志刚, 张士山, 等. 沪通长江大桥主航道桥桥塔温度场与膨胀调控抗裂技术[J]. 桥梁建设, 2020, 50(1): 44-49.
- [55] 闫志刚, 安明喆, 尹必晶, 等. 超高桥塔高强混凝土性能研究及收缩调控[J]. 铁道工程学报, 2020, 37(3): 40-46.
- [56] 张士山, 徐文, 姚婷, 等. 基于多场耦合作用的索塔混凝土开裂风险研究[J]. 混凝土, 2020(6): 37-40.
- [57] 韩学龙. 空心变截面索塔爬模施工工艺[J]. 交通世界, 2021(Sup2): 143-144.
- [58] 王红力, 段妙珊. 液压爬模在桥梁主塔施工中的应用[J]. 四川水力发电, 2019, 38(5): 71-73.
- [59] 张科. 悬索桥索塔施工技术[J]. 交通世界, 2020(26): 164-166.
- [60] 王东辉, 韩冰. 平潭海峡公铁两用大桥通航孔桥塔施工关键技术[J]. 桥梁建设, 2019, 49(3): 1-5.
- [61] 倪喜雨, 郭亮亮, 魏鹏, 等. 三维变曲面倾斜混凝土索塔模板体系施工技术[J]. 施工技术, 2020, 49(22):

- 87-89.
- [62] 倪喜雨, 潘建国, 郭亮亮, 等. 超高异形索塔结构截面递减爬升造塔平台施工技术[J]. 施工技术, 2020, 49(22): 90-92, 103.
- [63] 邹威, 宋神友, 陈焕勇. 深中通道伶仃洋大桥超高混凝土桥塔施工关键技术[J]. 桥梁建设, 2020, 50(6): 97-103.
- [64] 张阳. 桥梁工程机械设备技术改造要点[J]. 设备管理与维修, 2020(22): 79-80.
- [65] 周衍领. 桥面吊机在我国斜拉桥建设中的应用及发展[J]. 国防交通工程与技术, 2020, 18(6): 9-13.
- [66] 范强生, 张梦慈, 孙余. XR800E 超大入岩型旋挖钻机[J]. 工程机械, 2020, 51(4): 12-15, 6.
- [67] 马晓东. 平潭海峡公铁两用大桥总体施工方案[J]. 桥梁建设, 2017, 47(2): 1-6.
- [68] 李文. C800 型多功能打桩机[J]. 工程机械, 2020, 51(9): 8-12, 6.
- [69] 中机锻压. 国产最大规格海上双作用全液压打桩锤研制成功[J]. 锻压装备与制造技术, 2020, 55(1): 4.
- [70] 上海振华重工. 振华重工研发新型全回转式起重打桩机[J]. 起重运输机械, 2020(6): 13.
- [71] 伊莱特能源. 重 150 t、直径 7 600 mm 异型环锻件研制成功[J]. 锻压装备与制造技术, 2020, 55(6): 4-5.
- [72] 陈叔, 王强, 林国辉, 等. 高铁箱梁技术发展及 40 m/1 000 t 级创新技术装备研究[J]. 建设机械技术与管理, 2020, 33(2): 44-52.
- [73] 陈叔, 王强, 林国辉, 等. 高铁箱梁技术发展及 40 m/1 000 t 创新技术装备研究(续)[J]. 建设机械技术与管理, 2020, 33(3): 25-31.
- [74] 韩利军, 侯杰, 孙振军. JQS30m-250t U 型梁短尾式架桥机的设计与分析[J]. 建筑机械, 2020(12): 45-49.
- [75] 秦洪义. HZQ550 高铁架桥机架设小曲线桥梁的技术改进[J]. 建筑机械化, 2020, 41(3): 21-22, 35.
- [76] 刘勋, 金仓, 刘民胜, 等. 南京长江五桥 QMDJ500 型桥面吊机研制及应用[J]. 筑路机械与施工机械化, 2020, 37(10): 51-56.
- [77] 王体宏, 时敬涛, 李纯, 等. 钢桥面铺装技术现状与发展[J]. 石油沥青, 2020, 34(1): 46-49.
- [78] 福格勒摊铺机+悍马压路机助力沪通长江大桥钢桥面高效摊铺[J]. 交通世界, 2020(13): 4-5.
- [79] 李娇, 夏永. 解决钢桥面铺装世界级难题 福格勒摊铺机+悍马压路机高效铺装沪通长江大桥[J]. 市政技术, 2020, 38(3): 6-7.
- [80] 邱玉兴. 激光超声波双系统摊铺机在混凝土桥面铺装施工中的应用[J]. 工程建设与设计, 2021(3): 193-195.
- [81] 王敬涛, 夏秀超. 激光超声波桁架摊铺机桥面铺装施工技术[J]. 云南水力发电, 2020, 36(7): 50-53.
- [82] 毛伟琦, 胡雄伟. 中国大跨度桥梁最新进展与展望[J]. 桥梁建设, 2020, 50(1): 13-19.
- [83] HUANG W, PEI M S, LIU X D, et al. Design and construction of super-long span bridges in China: Review and future perspectives [J]. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 2020, 14(4): 803-838.
- [84] GE Y J, YUAN Y. State-of-the-art technology in the construction of sea-crossing fixed links with a bridge, island, and tunnel combination [J]. Engineering, 2019, 5(1): 15-21.
- [85] SONG S Y, GUO J, SU Q K, et al. Technical challenges in the construction of bridge-tunnel sea-crossing projects in China [J]. Journal of Zhejiang University-SCIENCE A, 2020, 21(7): 509-513.
- [86] LI Q F, LEI J, ZHANG H. Risk estimation of large complex bridge construction based on factor analysis [J]. E3S Web of Conferences, 2020, 218: 04011.

(编辑 崔守奎)