遒劲科技助力时代跨越

——山东高速青岛海湾大桥“水下无封底混凝土套箱技术”研制纪实

□崔峰　商晨　王晓昆

编者按

跨海大桥连接起海岸两端，让时空距离大幅缩短。

一桥飞架四地相连，山东高速青岛海湾大桥工程的全线贯通成了一座海上的纽带，青岛、黄岛、红岛三岛的空间隔阂被正式打破，百余年的梦想在一朝得以实现。以山东高速青岛海湾大桥为依托的“水下无封底混凝土套箱关键技术研究”项目，解决了6大关键问题，开发出3项核心技术，集成了2大成套技术，获得5项技术成果，更将科技成果的应用推广到港珠澳大桥、海阳至即墨跨海大桥等重大跨海大桥的建设之中，在改进升级中完成跨越与建筑美的结合。

在中国960万平方公里的土地上，奔腾着世界上著名的黄河、长江、珠江……自涓涓细流到浩浩巨浸，蜿蜒曲折，奔流入海。密如蛛网的河道孕育着桥梁建设发展的历史。《诗经·大雅》记录，周文王娶妻，曾在渭河上“造舟为梁”，这便是中国桥梁历史在殷商到西周的创始期。自此，中国桥梁历史走过了战国到秦汉的发展期，走过了南北朝到宋朝的鼎盛期，走过了元、明、清的延续期，走到了现代的发展期。中国的桥梁发展在14世纪以前便处于领先地位，今天，她依然是世界上举足轻重的桥梁大国。

“窥一斑而知全豹”，中国桥梁史是中国的发展史，是科技的发展史。千变万化的桥梁中唯一不变的就是科学技术在不断创新。当国力式微、科技滞后，如何走路、如何建桥都只能是仁人志士的空壳梦想。如今，集合众人之智，让科技打开通道，中国人民征服了一个又一个科技难关，创造出一个又一个生命驿站。

当今世界，是一个智力角逐的战场，是一个科技争春的时节。在创新科技日益升级转化中，原始创新成为各国竞争的杀手锏。原始创新是最根本的创新，是最能体现智慧的创新。它在原始积累、核心人物的战略选择等激发因子的作用下产生，在符合原创特点的核心人物、创新文化、激励机制、原创技巧、科研兴趣、团队协作等强动力的支撑下运作。

原始创新，颠覆传统，亦重塑传统。打造世界科技新主场，原始创新则是最重要的一环。在现代开放的社会，中国的桥梁建造技术取得了举世瞩目的成就，经济实力、技术发展和人才储备为我国科技腾飞打下坚实的基础。走在“十二五”的开局之年，大批越江跨海工程等待建设，中国桥梁将会创造更辉煌的成就，中国更需要“水下无封底混凝土套箱技术”这样的原创科技。从桥梁大国转变为桥梁强国，原始创新将带领国人引领世界桥梁的未来。

放置混凝土套箱。

混凝土套箱下放。

中共中央政治局委员、中央书记处书记、中央宣传部部长刘云山(前排左二)视察工程。

山东省委书记姜异康视察工程。

中国工程院院士郑皆连(左二)、项海帆(右三)、侯保荣(右二),交通部原总工程师凤懋润(右四)出席“青岛海湾大桥国际桥梁论坛”。

交通部总工程师周海涛视察工程。

“长桥卧波,未云何龙?复道行空,不雾何虹?”唐代诗人杜牧《阿房宫赋》中的诗句仿佛是今天跨江、跨海大桥的真实注脚。你看,一架彩虹桥横卧大海,犹如蛟龙出水,飞腾于浩渺烟波之上,在无尽的海域中演绎着当代科技的跨越之梦。

人类发展的每一个阶段都有桥梁建设前行的足迹,可以说,桥梁的历史见证着人类存在的历史。跨越,是桥梁工程的天职;超越,是桥梁技术发展的主题;创新,是工程技术持续发展的原动力,以最新技术实现更大的跨越则是桥梁工程的不懈追求。2009年度中国公路学会科学技术奖特等奖项目“水下无封底混凝土套箱关键技术研究”则为现代桥梁的“跨越”奠定了坚实的基础,它凝结着中国科研人的自主创新精神,推动着我国向桥梁强国前进的步伐。

创新源于工程需求

古体的象形会意字“橋”,很能说明我国在古代桥建设上的美学意义,在一桥一栋中用智慧雕琢着美的精髓。2000多年前,罗马建筑理论家维特鲁威提出:“所有的建筑需要坚固、实用和美丽。”梁桥、拱桥、斜拉桥、悬索桥……桥梁艺术是一种实用的造型艺术,桥梁建筑者用创新科技为世人打造别致的艺术。这些横亘于烟波之上的艺术杰作,背后助力的却是坚实而又与时俱进的创新科技,数不尽的跨海大桥则见证着中国桥梁建筑科技的创新与飞跃。

桥梁是路的延续,是跨空的实用建筑。众所周知,跨海大桥施工、防护难度最大的分项工程就是承台。承台是为承受、分布由墩身传递的荷载,把几根甚至十几根桩联系在一起形成桩基础,在基桩顶部设置的联结各桩顶的钢筋混凝土平台。承台的数量多,且大多都在浪溅区和水位变化区,腐蚀环境特别严重,加上海上风大浪高,自然条件恶劣,承台施工、防护受水环境影响很大。

如何避免施工风险?如何缩短海上作业周期?如何解决承台水下部分防腐涂装问题?过去提高承台标高一度成为各跨海大桥设计的首选方案。诚然,这些措施在一定程度上改善了施工条件,然而,倘若遇到低潮、外露的基桩势必增加了桩基防腐蚀的困难,也不美观;在极端情况下更有小船撞桩的风险,除此之外,这种应对措施越来越不符合人们对桥梁建筑之美的追求。

“工欲善其事,必先利其器”,每一项浩大工程的成就都有创新科技作为夯实的基础。“水下无封底混凝土套箱建造技术”最先成就了山东高速青岛海湾大桥,实现跨越之梦又承载着桥梁之美。

出于景观考虑,山东高速青岛海湾大桥在施工中将承台底面置于低潮位以下,但是按常规方法施工和进行防腐处理,又面临着工序多、周期长、投入大的问题。

针对山东高速青岛海湾大桥的情况,9家单位的100多名技术人员联合攻关,开展了“水下无封底混凝土套箱建造技术”的理论分析和实验研究,并应用于工程实践。

国内先期建设的几座跨海大桥,均设置高桩承台,山东高速青岛海湾大桥水区中所有的引桥承台底面,均置于平均低潮位以下,按常规方案施工,围堰需要进行水下混凝土封底,水封方案工序多、投入大、周期长,对承台进行防腐处理困难。为综合解决承台施工、防腐蚀和防撞等方面存在的问题,研发了“水下无封底混凝土套箱建造成套技术”,采用预制有底混凝土套箱、用胶囊止水、用剪力键传递浮力和重力,取代传统的围堰水下封底方案。“水下无封底混凝土套箱建造成套技术”成功破解了海上水下承台施工、防腐蚀、防撞等诸多难题。它采用预制混凝土套箱、充气胶囊止水和用剪力键传递浮力和重力,成功实现了套箱无封底施工,创造了水下干燥无水的施工环境,极大地提高了工效;在套箱内壁设置弹性应力吸收层,成功解决了混凝土套箱开裂的老大难问题;通过设置遇水膨胀胶条、控制套箱钢筋保护层厚度和采取诸多减少 Cl^{-1} 渗透的措施,使混凝土套箱不仅作为防水围堰和承台模板,还避免了早龄期混凝土与海水接触,极大改善了承台混凝土养护条件,并作为承台的永久保护结构,极大地提高了结构的耐久性和防撞能力。

新发明突破传统桎梏

每每提及承台施工,“水下无封底混凝土套箱建造技术”的第一完成人山东高速青岛公路有限公司法人代表、总经理姜言泉都感慨万分:“我做工程这么多年,每次海上施工都会遇到这个问题,可是一直以来都找不到有效的解决办法,这一次,我们终于实现了这个多年来的心愿,这对于今后的桥梁施工来说可谓解决了一个很大的难题。”

山东高速青岛公路有限公司总工程师邵新鹏介绍这一创新成果时,脸上写满了骄傲:“水下无封底混凝土套箱建造技术是我们在解决实际问题中获得的一项创新。可以说,为了解决具体难题,我们意外地解决了一个桥梁建造长久以来的大难题。”

为了山东高速青岛海湾大桥“水下无封底混凝土套箱关键技术研究”,姜言泉带领科研团队夜以继日地工作着,从构思到论证,从咨询到调研……姜言泉已数不清自己画了多少张图纸,做了多少次结构演算。“对于这项技术,起初大部分人都很反对,都怕风险大、怕失误,而施工单位则怕功效慢、有风险。做好后,我给大家做了个试验,很成功。最终,这项新技术终于战胜了传统技术,被施工单位采纳。现在大桥施工接近尾声,这项技术更安全、省钱,所有的施工单位都提前完成了任务”。

在业界专家看来,“水下无封底混凝土套箱建造技术”至少实现了四大核心技术发明创新。

首先,发明充气胶囊水下无封底技术。传统承台围堰采用水下混凝土封底,止水效果差,海上作业时间长,安全风险大,施工质量难以保证,使混凝土过早接触海水,不能满足承台100年寿命要求。施工完成后,大量封底混凝土变成废物,影响结构受力、景观和环保,造成资源浪费。本技术发明利用充气胶囊实现桩和套箱底板绝对密封,创造水下干燥施工环境,用剪力键将套箱锚固在桩基上,完成体系转换,实现了十几米水深下的无封底新工法,节省了工期、提高了质量、保证了安全,将大量封底混凝土变成承台永久保护装置,节省了成本,保护了环境。该项新技术具有简便、可靠、生产周期短等突出优点,可推广性强,是我国围堰施工技术的重大突破。

第二,发明弹性应力吸收层防套箱开裂技术。根据理论分析和试验检测,通过在混凝土套箱内壁与承台之间加设10毫米~20毫米厚弹性应力吸收层,成功解决了长期存在的新浇承台混凝土与套箱变形不协调引起的套箱开裂老、大、难问题,提高了套箱耐久性。

第三,发明利用套箱提高承台耐久性新技术。开展长期荷载与盐冻耦合作用下混凝土结构寿命预测方法研究,通过研发高抗渗、抗盐冻耐腐蚀混凝土和透水模板布综合利用技术用于套箱预制、合理设置套箱钢筋保护层厚度,保证了套箱耐久性;通过在套箱内壁与承台上口设置抗老化遇水膨胀止水条,避免早龄期混凝土与海水接触,改善了承台混凝土养护条件,提高了混凝土的使用品质;通过切断承台钢筋与海水 Cl^{-1} 连通途径等措施,改善承台服役环境,将承台使用寿命延长50年以上,大幅度提高了桥梁结构的耐久性。

第四,发明套箱提高承台防撞能力新技术。跨海大桥引桥长度一般超过总长的90%,由于桥墩数量多,难于防范,防撞问题突出。项目开展利用混凝土套箱改善桥墩抵抗船舶撞击力研究,分别研究了高、低水位情况下船舶正撞、斜撞和侧撞撞击工况,首次提出利用混凝土套箱提高引桥承台抗船舶撞击能力的新理念。研究表明:不同工况下,混凝土套箱能够将桥墩抗撞击能力提高20%至70%,对引桥防撞具有重大意义。

“这些技术看起来简单,实际带来的价值却非常大。”邵新鹏说,“比如拿防腐耐久性来说,这对一个工程意义重大,关系到一个工程的寿命。把工程做精、做细很重要。我们做的这种套箱由于不用封底和模板,每个套箱可节省工期七八天,十几个套箱就能节省几十天。以前一个桥墩要两三个月完成,现在只要半个月,整体工期缺能提前七八个月。这可以说是一个间接效益。最直接的效益还要数经济效益。过去的套箱由于封底,空箱时浮力很大,形成风险。现在我们利用胶囊解决了封底止水问题,这对施工单位的效益十分明显,突破了长久以来的技术瓶颈。”

比肩海外谁与争锋

山东高速青岛海湾大桥“水下无封底混凝土套箱关键技术研究”的开发应用取得了桥梁基础建造技术的重大突破,不但一举克服了桥梁基础施工封水、防腐蚀、防撞、施工风险大、质量进度难以控制、环境保护等一系列难题,更为桥梁设计和防腐蚀技术带来全新的理念和思路。

这一项目针对跨海长桥水下承台建设存在的质量、安全、进度、耐久性、防撞等关键技术问题开展系统研究,取得了重大技术发明和突破,核心发明成果填补了国内外空白。在与当前国内外同类技术主要参数、效益、市场竞争力的比较中,项目成果中的水下无封底混凝土套箱的应用、胶囊止水技术的开发、通过设置弹性应力吸收层预防混凝土套箱开裂技术、长期荷载与盐冻耦合作用下混凝土结构寿命预测方法研究、混凝土套箱改善桥墩抵抗船舶撞击力研究等5项成果均为首次提出,具有实质性创新,较国内外同类成果均有明显提高,效益巨大。核心技术成果以及编制的施工、设计指南、标准图和获得的两项专利与著作权,适应国内外水下承台设计、施工、管养建设需求,实用性强,在国内技术市场中占据绝对主导地位,同时在国际相关技术领域的市场竞争力优势明显,具有广阔的推广应用价值。

交通部科技信息研究所《科技查新报告》在评价“水下无封底混凝土套箱建造技术”时称,这个关于混凝土套箱技术的研究项目,在水下桥梁承台施工中混凝土套箱的应用、胶囊止水技术的开发、预防混凝土套箱开裂的技术研究、混凝土套箱改善桥墩抵抗船舶撞击能力的研究等六大方面都具有显著新颖性。

“水下无封底混凝土套箱建造技术”一举摘获公路交通行业最重要的科技奖项——中国公路学会科学技术奖特等奖,中国公路学会鉴定委员会这样评价:该课题依托山东高速青岛海湾大桥工程,开展了水下无封底混凝土套箱技术的研究,构思新颖,技术路线正确,方法合理,有效解决了海湾大桥承台施工的关键技术。该课题成果具有较强的创新性及推广应用价值,总体达到国际领先水平。

中国创新助力桥梁强国

科技成果的推广应用是科技转化为生产力的关键环节。山东高速青岛海湾大桥、港珠澳大桥,这两座国内知名的跨海大桥中都运用了“水下无封底混凝土套箱关键技术”。

截至目前,“水下无封底混凝土套箱技术”主要用于解决水下桥梁承台施工封水、提高承台耐久性、提高结构防撞能力、提高施工安全、降低原材料和能源消耗,减少废物排放,保护海洋生态环境等技术难题。更重要的是,它降低了桥梁施工、管养期间安全风险,将“以人为本”的思想体现得淋漓尽致。这项科技成果取得了重大的社会、经济和环境效益。2006年到2009年,由于该技术发明比传统工艺提高工效50%,工期加快30%以上,目前已大规模应用于我国海上桥梁基础设计和施工中,节省直接费用1.6亿元,而且砼套箱可延长承台寿命约50年,在桥梁服役期间可减少三次水中防腐蚀涂装施工,其间接经济效益远远大于直接效益。

“水下无封底混凝土套箱建造技术”有力地推动了大型桥梁承台设计、施工、管养行业技术进步,这项成果改变了基础设计传统思路,为跨海长桥基础设计和施工提供了新的思路和方案,完善了桥梁基础施工技术体系,已被国内大型设计单位借鉴为桥梁基础设计参考性文件。成果提出的《水下无封底混凝土套箱设计指南》、《标准图》、《施工工艺指南》以及编制的《水下无封底混凝土套箱建设技术》专著,为大型水上桥梁基础设计、施工、管养提供了较为全面的技术指导。

在科研人员数年的攻关中,山东高速青岛海湾大桥“水下无封底混凝土套箱关键技术”这项发明成果获得国家发明专利1项,实用新型专利1项、国家级工法1项,出版专著1部,发表论文多篇。每一项重大工程都是一个人才孵化器,依托科技攻关,这个项目培养出近百名技术人才,其中包括16名博士、硕士。

“外国专家现在都感叹中国了不起,中国的桥不但工程大而且完成速度快。”姜言泉坦言,“中国桥梁的发展速度确实已经达到了桥梁大国的程度,但不容否认我们还存在着许多缺点,我希望能够看到中国成为桥梁强国的那一天。”

毋庸置疑,山东高速青岛海湾大桥水下无封底混凝土套箱成套技术代表了当前跨海长桥基础施工的前沿技术,然而在“十二五”的开局之年,在建设创新型国家的进程中,我国桥梁建设从跨越江河湖泊逐步向外海延伸,港珠澳大桥、琼州海峡大桥、渤海湾跨海大桥、台湾海峡大桥……这些世界级重大项目的建设都急需更多前沿科技的支撑,中国的桥梁强国之梦也期待更多的桥梁建筑师的智慧与创新。

资料卡

跨海大桥彰显科技魅力

随着“水下无封底混凝土套箱关键技术”让山东高速青岛海湾大桥在原创科技中一跨成名,跨海大桥雄壮之美亦备受世人称赞。国内外有很多知名的跨海大桥,它们像山东高速青岛海湾大桥一样承载着当地民众的梦想,成为著名景观。

■杭州湾跨海大桥:大桥平面为优美S形曲线

杭州湾跨海大桥是一座横跨中国杭州湾海域的跨海大桥,全长36公里。大桥按双向六车道高速公路设计,设计时速100公里,设计使用年限100年,2008年5月1日正式通车,北京奥运火炬传递中穿越了杭州湾跨海大桥。该桥在设计时考虑到了两个安全因素:一是高速公路车辆通行安全因素,通常直段不能太长;二是桥下船舶航行安全因素,减少建桥对水流的影响,保证桥梁各段的桥轴线与涨潮和落潮的主流垂直。在设计中首次引入了景观设计的概念,整座大桥平面为S形曲线,总体上看线形优美、生动活泼。

■美国金门大桥:世界第一座跨海大桥

金门大桥是世界第一座跨海大桥,位于美国西部加利福尼亚州旧金山市的大西洋东岸,横跨旧金山湾的南北两岸,全长10余里,高百余米,始建于1937年。它不是利用桥墩支撑桥身,而是利用桥两侧的弧形吊带产生的巨大拉力,把沉重的桥身高高吊起。移步桥上,你会明显地感到桥身的抖动。金门大桥的造型绝美,以纯钢索打造,桥墩有65层楼高,外观却轻灵飘逸,丝毫不显笨重。它无论在什么季节都有独特的美感,被国际桥梁工程界广泛认为是美的典范,被美国建筑工程师协会评为现代世界奇迹之一,它也是最上镜的大桥之一。

■奥克兰海湾大桥:隧道连接东西两桥

旧金山—奥克兰海湾大桥位于美国旧金山湾区,连接旧金山、耶尔巴布埃纳岛以及奥克兰。1936年11月12日完工通车。每天约有27万辆次汽车从这座大桥的双层桥面通过。该海湾大桥是世界上跨度最大的桥梁之一。奥克兰海湾大桥由东西两部分组成,分别连接耶尔巴布埃纳岛的东西岸、旧金山市和奥克兰市。西桥是一座由四座索塔组成的悬索桥,拥有六个桥跨,连接芳草岛和旧金山市。

■加拿大联邦大桥:3个转折弯抗潮水和风

跨越诺森伯兰海峡,连接着爱德华王子岛与加拿大的新布伦兹维克。建于1993年~1997年,全长约13000米。为了让船只通过,水面与桥面的距离特别拉高到61公尺,为减少潮水和风的冲击力,还设计了3个转折弯道,因此联邦大桥并非笔直地横跨在海上。联邦大桥仅有双线车道,无分隔带,车道宽3.75米,并禁止超车,每侧有路肩,宽度1.75米。通常限速是80公里每小时,所以以此速率行驶,过桥需10分钟。

■日本濑户大桥:铁路公路两用大桥

它横跨日本濑户内海、连接本州的冈山县和四国的香川县。1988年4月10日通车,耗资11000多亿日元。银色的濑户大桥全长37.3公里,海面部分13.1公里,由三座悬索桥、两座斜拉桥和一座桁架桥组成。为了不影响船只航行和景观,桥墩基本上建在海中的5个小岛上,形成6座相连的大桥。它的两座桥塔高194米,跨度1100米,使用的钢缆直径达1.07米,长约1780米,可承受9万吨的拉力。桥梁高出水面65米,50万吨巨轮在桥下可畅通无阻。