# 走进"多塔连跨"新时代

□ 钱民峰

#### 引言

2012年8月14日,泰州大桥建设工地,一派火热

一位戴着安全帽的外籍人士竖起了大拇指, 对旁边的中国人说道:"我们那儿也正计划建设 一座这种桥型的跨海大桥,希望中方能够前往参 与投标。"

这位外籍人士是智利公共工程部部长劳润斯· 金波。当天,他率团实地考察了大桥的建设情况,听 完介绍后,向中方发出了投标邀请。他口中的跨海 大桥名为查考大桥,连接智利大陆和奇洛埃岛,项目 全长2.6公里。此前,智利驻中国大使已考察过泰州 大桥建设现场。

不妨再把时针拨到2013年8月30日。江苏泰州

经过两个小时的汇报、答辩,"十一五"国家科技 支撑计划"多塔连跨悬索结构及工程示范"项目顺利 通过了科技部验收,标志着世界上首次诞生了千米 级的多塔连跨悬索桥成套技术,这破解了国际桥梁 界的难题,也是中国对世界桥梁技术的贡献。

"多塔连跨"何以成为困扰国际桥梁界的难 题?一座桥梁的建成何以称得上是对世界桥梁技 术的贡献?

#### 背景篇

#### 时代的呼唤

在全球经济一体化的推动下,本土之间、国家乃 至洲际之间的交通需求与日俱增,桥梁工程的建设 需求逐步由跨越大江大河、河口宽阔水域,向近海连 岛工程、跨越海峡等更广阔的水域发展,这对桥梁跨 越能力提出了要求。

"以往主要通过增大跨径的方式来实现桥梁的 超长跨越,但现在已越来越多地受到来自结构材料、 施工技术、安全风险等方面的严峻挑战,难以满足不 断增长的桥梁超长超大跨越能力的需求,必须寻求 新的适应桥型。"交通运输部公路科学研究院副院长 张劲泉分析说,"当桥要实现超长跨越时,通常有两 种方式可以实现:一是仅采用长桥的方式;二是采用 一座大跨度主桥(悬索桥或斜拉桥)和一系列长桥相 结合的方式。'

在这两种方式中,由于长桥段每跨的跨度较 小,所以其桥墩和基础的数目较多,相应的造价也 较高;如果水域较深且又环境恶劣,那么下部结构 的施工可能会遇到很大的甚至是不可克服的困 难,这时需要的是桥梁连续大跨度布置的形式。

"目前,悬索桥的单一成熟跨度已经达到1500 米以上,而斜拉桥的经济跨度一般不超过1000米。" 据了解,当跨度超过1200米时,悬索桥是公认的最 有竞争力的一种桥型,所以桥梁工程师就采用两三 座传统悬索桥并列在一起,通过共用锚碇而前后相 连的办法来完成跨越。

全世界已有三座著名的大桥采用了这种方式: 一是1936年美国建成的旧金山奥克兰西海湾大桥, 由两座孪生悬索桥相连;二是1988年日本建成的南 北备赞濑户大桥,由南备赞大桥与北备赞大桥相连; 三是1998年日本建成的来岛海峡大桥,由3座不同 悬吊形式的悬索桥相连。

但是,这种看似很美的结构形式却有着"致命" 缺陷:至少增加了一个中部锚碇,这不仅施工困难和 造价高昂,而且对水域航道强制划分和占用,对航运 要道造成不利影响。

能否去掉共用锚碇,直接建造三塔甚至多塔的 连跨悬索桥呢? 自上个世纪以来,全球桥梁界向这 个目标发起了冲击。

# 梦寐以求的桥型

上个世纪上半叶以来,全球对多塔连跨悬索桥 进行了小跨度的尝试,国外已有相关工程实例,但仅 限于中小跨度,最大跨度仅为210米。

在欧洲,已有多座小跨度多塔连跨悬索桥,以位 于法国中部的两座桥梁最为典型:一座是1937年建 成的 Chateauneuf 桥(四塔五跨悬索桥),桥跨布置为 (49.15+3×59.50+49.15)米。另一座是1951年建成 的 Chatillon 桥(三塔四跨悬索桥),桥跨布置为(92+ 2×76+92)米。

在日本,1961年建成的小鸣门桥(三塔四跨悬索

#### ■短评

### 中国梦 桥梁情

多年前,科技部原部长徐冠华在考察建设中的苏通大桥时 激动地说,中国桥梁建设是我国自主创新的一面旗帜,并号召

今天,随着国家"十一五"科技支撑计划"多塔连跨悬索结 构及工程示范"的顺利验收,我国桥梁的自主创新再次向前迈 出了坚实一步。中国桥梁这张"创新名片"也越擦越亮。

多塔连跨悬索桥是公认的实现较长跨越的最佳方式,也是 全球桥梁界梦寐以求的桥型。可以预计,在泰州长江公路大桥 打响"第一枪"后,"多塔连跨"这种桥型必定会在国内外越来越 多地涌现;"多塔连跨悬索结构及工程示范"科技支撑计划所作

改革开放三十多年的实践证明,作为基础性、先导性行业, 交通基础设施的不断发展为人们出行提供了便利条件,更为经 济腾飞铺就了跑道。桥梁作为架起来的路,横跨江河、飞越峡 谷,打通了基础设施网络的各个"关节",功不可没。

同样是改革开放以来的三十多年,伴随着路网的不断延 伸,桥梁工程一步步向艰难险阻区域"挺进",一座座千米级大 跨径桥梁崛起在大江、大河、大峡谷之上。可以说,经过这些年 的大规模建设,"剩下的都是难啃的硬骨头"。

今天,实现"中国梦"的时代号角已吹响。在东部沿海, "区域经济一体化"呼唤着更多跨海连岛工程的出现;在西 部地区,"西部大开发"战略的实施,要求桥梁工程向更深、 更宽阔的峡谷挺进……面对国强民富的发展主题、面对大 跨径的现实需要、面对复杂地质的艰难险阻,可以说,实现 跨越是桥梁界的天然使命,而依靠科技创新则是桥梁发展 的唯一路径。

桥),桥跨布置为(70.6+2×160+50.8)米;此外,1965 年,在莫桑比克独立前由其宗主国葡萄牙设计并建 造的Save桥是第一座四塔五跨悬索桥,桥跨布置为 (110+3×210+110)米。

上述小跨径的桥梁无法真正发挥多塔连跨桥型 的优势,桥梁界一直希望向千米级的多塔连跨悬索 桥"挺进"。自上个世纪六七十年代以来,一些大桥 在设计阶段,屡屡闪现过多塔连跨悬索桥的"背影"。

在美国,旧金山奥克兰西海湾大桥的初步设计 阶段,就有人提出过三塔四跨悬索桥方案,桥跨布置 为(393+2×1036+393)米,缘于工程师对传统悬索桥 的熟悉而最终选择了共用锚碇的形式。

墨西拿海峡是地中海的一个海峡,位于意大利 与西西里岛之间,海峡宽3.3千米,水深120米,海峡 底有断层,属于强烈地震带。虽然困难重重,但是建 造一座联系亚平宁半岛与西西里岛的跨海大桥,一 直都是意大利人的梦想,有人就提出了公铁两用三 塔两跨悬索桥方案。

直布罗陀海峡是隔断欧非大陆的天堑,位于西 班牙与摩洛哥之间,连接地中海和大西洋,在三条可 能的架桥路线中,有一条长仅14千米,但水深超过 800米。早在1984年,就有人针对这一路线提出了 三塔四跨悬索桥方案,桥跨布置为(2500+2×5000+ 2500)米,但也未能付诸实施。

"表面上看,相比于传统的两塔悬索桥,多塔悬 索桥只是塔数、跨数增多。事实上,这一变化是桥梁 结构形式的彻底'颠覆'。"交通运输部公路科学研究 院副院长张劲泉介绍说,多塔悬索桥在结构上存在 的最大困难是,如何合理设计整体结构的纵向抗弯 刚度。不深刻认识这一核心问题,悬索结构应有的 跨越能力就无法发挥出来。

# 技术篇

# 揭示多塔连跨悬索桥的"性格"

与传统两塔悬索桥相比,由于多塔连跨悬索桥 增加了中间塔,其结构特点与受力情况发生"颠覆 式"变化。项目首先需要揭示多塔连跨悬索桥的结

在项目课题一"多塔连跨悬索桥结构体系与结 构性能研究"的支撑下,交通运输部公路科学研究院 副院长张劲泉带领团队成功破解了这一难题,并形 成了成套理论。

张劲泉说,分析多塔连跨悬索桥结构体系,可分 为两个层次:一个是最基础的三塔两跨悬索桥,只有 分析清楚了"三塔两跨"桥型,才能递增中间塔数量; 另一个是四塔及以上的悬索桥结构体系,随着中间 塔的增多,由于塔与塔之间的相互作用,中塔效应会

呈现减弱趋势,结构体系会越来越趋同。 "关键是要确定什么时候中塔效应最强烈。"张 劲泉解释道。在大量仿真模拟的基础上,课题组发 现,四塔悬索桥的"双中塔效应"最强,而设置三个及 三个以上中间塔时,与双中塔几乎无异,之后进行的

缩尺模型试验也证实了这一结论。 这一发现意义重大。据此,课题组把"多塔连 跨"体系研究"化简"为三种体系的研究,即"三塔两 跨"、"四塔三跨"和"五塔四跨"。

那么整个桥梁体系与哪些参数有关呢? 课题组

发现,千米级多塔连跨悬索桥的结构体系与跨度比、 垂跨比、塔顶高差、中间塔刚度等参数相关。针对这 些参数,课题组分别给出了合理的取值范围。

为保证安全性,泰州大桥必须进行抗风和抗震 设计。课题组得出了多塔连跨悬索桥主梁在中间塔 位置设置弹性索约束体系更有利于结构抗震的结 论;提出了"连续体系(漂浮结构)+弹性索"的抗震适 宜体系,并研发了防落梁抗震装置;提出了基于性能 的多塔连跨悬索桥抗风设计方法、流程和评价指标。

此外,课题组还编制了《三塔两跨悬索桥设计指 南》、《三塔两跨悬索桥设计示例》等,建立了跨径 1000米以上的三塔两跨悬索桥设计规范体系,包括 材料、作用、总体设计、总体计算、桥塔、缆索系统、抗 风设计和抗震设计等内容。

#### 踏准中塔"刚柔平衡点"

桥梁的整个体系确定了,接下来要攻克的是中 间塔的设计与施工难题。在项目课题二"多塔连跨 悬索桥中间塔关键技术研究"的支撑下,泰州大桥建 设指挥部总工程师吉林带领团队解决了这一难题。

"中间塔既不能太刚,也不能太柔,如何踏准刚 与柔的平衡点,是难点所在。"吉林解释说,中间塔必 须具有一定的柔度,即当悬索桥的主梁受力不均衡 时,中塔能随之进行适当的左右摇摆。当中间塔过 于"刚硬"不能摆动时,主梁一边受力过大,主缆可能 与中间塔产生相对滑移。

当然,中间塔也不能太柔,否则不利于大桥系统 的稳定性、车辆行驶的舒适性。

经过复杂的数学建模和模型试验后,课题组最终 找到了"刚柔相济"的平衡点。当车行驶在泰州大桥 上时,主梁的上下位移幅度不超过跨径的千分之四。

平衡点找到了,该如何建这个中塔呢?在以往 的工程案例中,如果要保证塔的柔度,需要建"1"字 形塔,如果要保证塔的刚度,需要建"A"字形塔。为 满足泰州大桥的特殊需求,建设者们提出了两者相 结合的思路,即"人"字形塔。通过不断变化塔身的 分叉点高度和塔底的分叉量,课题组在大量计算和 模型试验的基础上,最终确定了中塔的设计参数。 据了解,纵向"人"字形塔在国内尚属首创。

"主缆与鞍座的固定主要依靠静摩擦力。"吉林 说,中间塔的难题还体现在主缆与中塔鞍座的抗滑 设计上。目前,国内外针对主缆与鞍座抗滑的研究 基本都基于单索股,或者是多索股但钢丝直径较小 的情况。为准确评估中间钢塔鞍座与大直径主缆的 抗滑安全,课题组在大量试验的基础上,提出了多索 股主缆与鞍座间名义摩擦系数的计算方法。

"我们提出的新计算方法,除了考虑竖向压力与 束股拉力外,还兼顾索力对鞍座侧向挤压的影响,这 一创新已不局限于桥梁,而是对整个土木工程学科 抗滑设计的贡献。"吉林说。

# 钢桥面上铺"可伸缩"沥青层

桥梁的结构体系确定了,在钢桥面板上如何铺 装沥青层呢?

较为常见的是在道路上铺设沥青,不仅有路基 层的支撑,而且路面本身不容易发生弯曲。但对泰 州大桥进行沥青铺装时,情况发生了很大变化:一是 泰州大桥主梁上是钢板支撑,不是路基层支撑;二是

三塔两跨悬索桥更具有柔度,当桥梁受非均匀分布 的荷载时,主梁本身会发生位移与弯曲,铺筑在其上 的沥青层必须具备一定的伸缩性能;三是钢桥面更 容易受温度影响,室外温度达到40摄氏度时,钢箱 梁的温度将达到70摄氏度,钢桥面上沥青的耐热性 要求远远大于路面。

在项目课题三"超大跨连续大柔度桥道系结构行 为特性及其铺装关键技术研究"的支撑下,这一难题 被东南大学院士黄卫、教授钱振东领衔的团队克服。

钱振东说,目前国内钢桥面铺装的两大主流材 料:一是以欧洲为代表的"浇筑式沥青混凝土",其 优势是密水性强,能阻止雨水渗透到钢板;追从性 能好,随钢板发生更从变形能力强。二是以美国为 代表的"环氧沥青混凝土",其优势是强度高、抗疲

由于泰州大桥是千米级的三塔两跨悬索桥,柔 度大大超过一般的桥梁,加上中国的交通荷载量大 于国外。泰州大桥简单采用上述两种材料,均不是 理想的选择。能否将两种材料进行组合,各取优势?

经过大量改良和比选后,课题组研发了"下层浇 注+上层环氧"的铺装结构。这一创新,对我国长大 跨越钢箱梁桥设计颇具参考价值。"前前后后,我们 总共进行了近十种组合方案的复合结构试验,持续 了两年时间。"钱振东说。

"这一工艺在国内尚属首次应用。"钱振东补充 道。由于这个铺装结构是首次采用,有了设计方案, 还必须拥有混合料生产工艺和铺装工艺。东南大学 桥面铺装科研团队联合施工方中交二公局三公司对 混合料的制备方法、大批量生产工序进行了优化,提 高了沥青混合料生产质量。

# ■链接ー

# "跨国之约"

在8月30日召开的项目验收会上,验收专家组 组长、交通运输部原总工程师凤懋润动情地回忆了 木世纪之初的一次"跨国之约"

2001年,时任国务院总理的朱镕基访问印尼,在

会谈桌上,印尼总统梅加瓦蒂提出了一个高官会谈 时没有提到过的议题——希望中国帮助印尼修建连 接苏门答腊岛和爪哇岛中间的巽他海峡的通道工 程。巽他海峡宽35公里,中间有一个小岛把海峡分 成两个航道,水深80米到100米,而且距桥位4公里 的地方有水下活火山。日本工程公司曾为这一工程 做过多年的前期工作研究,拟定的跨越方案之一便 是修建2座三塔两主跨(2×2500米)的悬索桥。

朱镕基回国后一个星期,中国交通部技术代表团 即赴印尼现场考察。中国与印尼双方达成的共识是: "巽他海峡工程是21世纪对全球土木工程界的挑战。 像这样的超级海峡工程做10年、20年、30年、40年的 前期工作都不为过,现在中国和印尼两国工程技术人 员携手工作。"双方于次年签署了相关协议。

十多年过去了。今天,全球首座千米级多塔连 跨悬索桥在中华大地诞生,为巽他海峡工程的修建 进一步奠定了技术基础。

#### ■链接二

#### 三塔两跨优势:安全、经济、生态

据了解,采用'三塔两跨'悬索桥方案,在安全 性、生态性、经济性三个方面均产生了深远意义。

就安全性而言,三塔悬索桥江中只设有一个主 墩,采用沉井基础,其自身防撞能力很强,并且将中 塔沉井下沉时临时设置的上下游定位锚墩改造成永 久性防撞墩,进一步提高了中塔防撞能力。

就生态性而言,当水中有大型人工构造物后,水 流的流向和速度都会发生变化,影响自身原有的平 衡。泰州大桥桥位处河床断面形态呈典型的"W' 形,大桥的中塔正好设置在"W"的中间顶点,大幅减 少了资源占用,确保了中华鲟、白鲟等水生野生动物 有生存繁衍的良好场所,做到了对大自然的影响和

就经济性而言,与传统的两塔单主跨悬索桥相 比,多塔连跨方案可大幅降低主缆和锚碇受力,减小 构件绝对尺寸,实现软弱地基上的特大跨径桥梁建 设,并节省工程费用。根据测算,与两塔单主跨悬索 桥相比,泰州大桥节省投资约1.5亿元。目前泰州大 桥通航净空高度达50米,可满足5万吨级巴拿马散 装货轮的通航需求。

# 产学研的牵手合作

项目研究涉及3个课题、13个子课题,研究范围 广、涉及学科多、攻坚难度大。为有效开展科研,项 目集合产学研各个方面的力量,包括了11家单位:

- ●江苏省长江公路大桥建设指挥部 ●交通运输部公路科学研究院
- ●江苏省交通规划设计院股份有限公司
- ●同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司 ●中交第二航务工程局有限公司
- ●中交公路规划设计院有限公司
- ●中铁宝桥集团有限公司
- ●江苏省交通科学研究院有限公司
- ●东南大学 ●同济大学
- ●河海大学





图片由江苏省长江公路大桥建设指挥部供图

本报社址:北京市复兴路15号

查询电话:58884031