

## 2. 世界大桥的未来趋势

### ——2011 年伦敦国际桥协会议的启示

项海帆  
(同济大学)

#### 1 引言

在 20 世纪的最后 10 年中建成的法国诺曼底桥(1995 年)、日本多多罗桥(1999 年)以及中国香港青马桥(1997 年)、丹麦大海带桥(1998 年)、日本明石大桥(1998 年)和中国江阴长江大桥(1999 年)是世界斜拉桥和悬索桥在世纪末的冲刺和具有里程碑意义的成就,也标志着现代桥梁工程的发展已进入成熟期。一些在 20 世纪 50~70 年代创造的新材料、新体系、新结构和新工法得到了不断改进、发展,施工装备也不断更新换代,有力地支撑了缆索承重桥梁跨度的拓展。

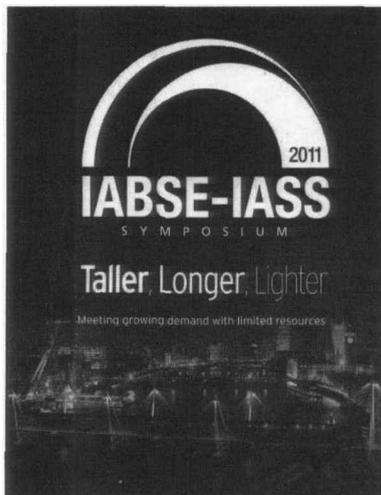


图 1 2011 年国际桥协伦敦会议

2011 年 9 月,国际桥协在伦敦召开了第 35 届年会(图 1)。桥梁的大会主旨报告和各分会场的邀请报告介绍了近年来国际桥梁界的关注热点,具有重要的引领作用和启示意义。本文着重回顾进入新世纪后 10 余年间的桥梁发展动态,并展望未来 10 年世界大桥可能出现的新趋势,希望能引起中国桥梁界的认真思考,以尽快走出盲目追求“第一”和“之最”的概念设计误区,努力发展和建设各类专业化公司,迅速改变中国桥梁施工现场的落后生态,从而解决好长期存在的施工质量问题 and 疏于管养的问题,为今后中国桥梁走向世界奠定坚实的基础,逐步打造技术先进和质量一流的中国桥梁品牌。

#### 2 斜拉桥是当代大跨度桥梁的主流桥型

斜拉桥的跨越能力现已突破了千米,甚至还有增大的潜力,正在建造中的俄罗斯海参崴 Russky 岛大桥,是主跨达到 1 104m 的斜拉桥,计划在 2012 年通车。韩国也计划在东南部的马山市和 Geoje 岛的连岛工程中采用主跨 1 200m,全长  $520+1\ 200+520=2\ 240\text{m}$  的斜拉桥

方案。由于斜拉桥在刚度、抗风性能、拉索可更换、施工简便、无锚碇等方面的优越性,在近年来的国际跨海工程方案竞赛中,斜拉桥方案都优于悬索桥而被采用。如希腊 Rion-Antirion 桥,水深 65m,通航 18 万 t 海轮,又位于强震区,最后采用法国设计的多塔多跨 560m 斜拉桥(图 2)。

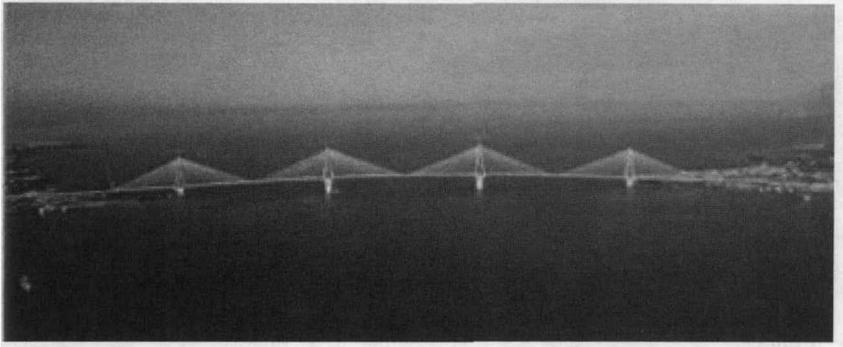


图 2 希腊 Rion-Antirion 桥

在今年伦敦会议上,丹麦 COWI 公司的 L. Hauge 先生所做的关于“大跨度桥梁的发展趋势”的大会主旨报告中谈到了斜拉桥和悬索桥的比较。他认为在 1 200m 以下的跨度斜拉桥占优,超过 1 200m 的跨度,斜拉桥将受到塔高和长索的限制,锚碇条件有利的悬索桥将会占优。

日本 Nagai 教授的报告认为自锚式斜拉桥跨度的极限在 1 200~1 400m 之间。如采用部分地锚斜拉桥,极限跨度还可延伸至 1 600m,当悬索桥的锚碇只能设在水中,则斜拉桥方案仍有竞争力。

根据《桥梁》杂志 2011 年第 2 期所载同济大学肖汝诚等《缆索承重桥梁各种体系比较》一文的结论:当锚碇条件为岸上岩石时,跨度超过 900m 的悬索桥就会占优;对于岸上软土锚碇,则跨度 1 100m 以上才对斜拉桥占优;而对于浅水锚碇,初步估算在 1 600m 以上才会占优(图 3)。可见,三方面的研究结论是基本一致的。

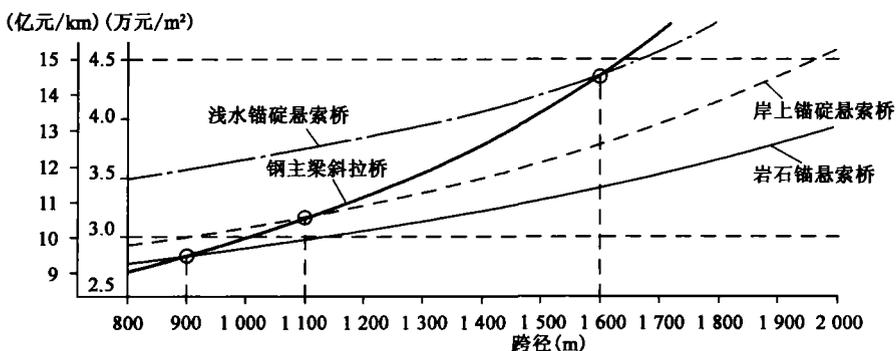


图 3 斜拉桥和悬索桥的经济比较

在国外,除了跨海工程要考虑大跨度悬索桥外,其余的内河航道如欧洲的莱茵河、多瑙河、塞纳河、易北河等,除下游河口段以外,航道等级在 1 000~5 000t 级之间,因而大都采用斜拉桥、拱桥或钢箱梁桥方案。英国的塞佛恩(Severn)桥和福思(Forth)桥都是在 20 世纪 60~70 年代建造的跨越海湾的悬索桥,因为当时斜拉桥的跨度尚不足 500m,还不能满足通航要求,但在以后修建 Severn 二桥和 Forth 二桥时都改用了更经济的分孔通航的三塔斜拉桥。在今年

国际桥协的伦敦会议上,专题介绍了建设中的苏格兰福思二桥。该桥位于 1964 年建成的跨度 1 006m 的福思一桥边上,是一座三塔  $2 \times 650\text{m}$  的斜拉桥(图 4),以替代主缆已腐蚀的原悬索桥(该桥改建为通行轻轨交通、自行车和行人),并满足日益增加的交通需求,而没有再建另一座悬索桥。

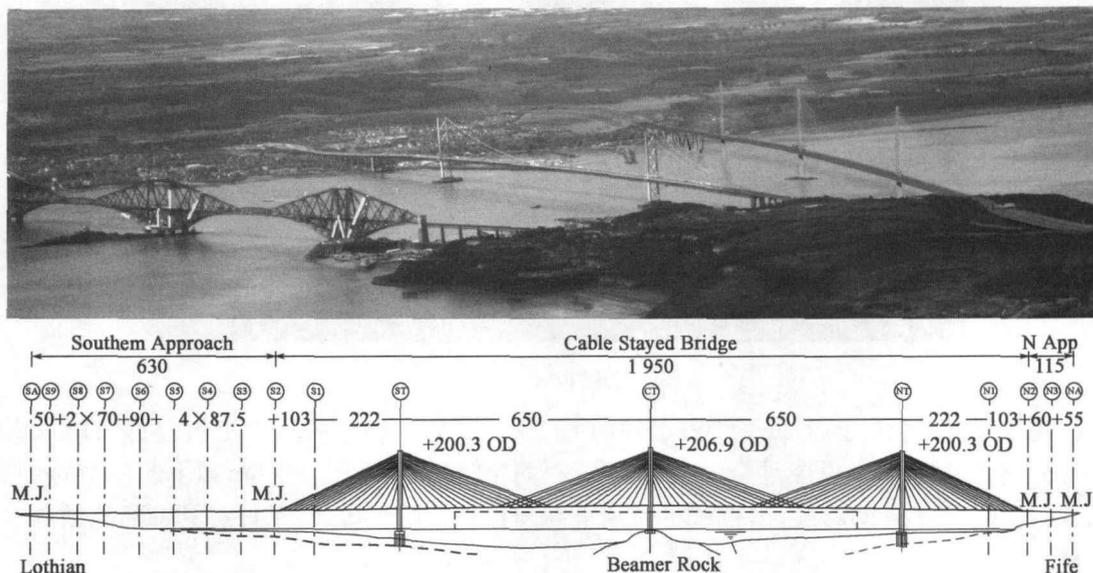


图 4 苏格兰 Forth 二桥(尺寸单位:m)

Hauge 先生在主旨报告中还提到 COWI 公司正在规划中的德国和丹麦之间费曼恩海峡工程的最新优化成果(注:在 2009 年上海国际桥协会议上,COWI 公司的 Ostenfeld 先生介绍的桥梁推荐方案为四塔三跨 780m 的斜拉桥),他认为采用三塔双跨 724m 的斜拉桥方案就能满足 26 万 t 航道的要求(图 5),与 1 600m 跨度的悬索桥方案相比,由于施工期短和对环境影响小,是更有吸引力的选择(more attractive option)。由此可见,即使对于 30 万 t 级的海峡通道,采用分孔通航的跨度 800m 的多塔斜拉桥将比合孔通航的超大跨度(1 600~1 800m)深水锚碇悬索桥更为经济合理,也对隧道方案更有竞争力。这也就是我在《桥梁》杂志 2011 年第 1 期发表的《对台湾海峡工程桥梁方案的初步思考》一文中的观点。

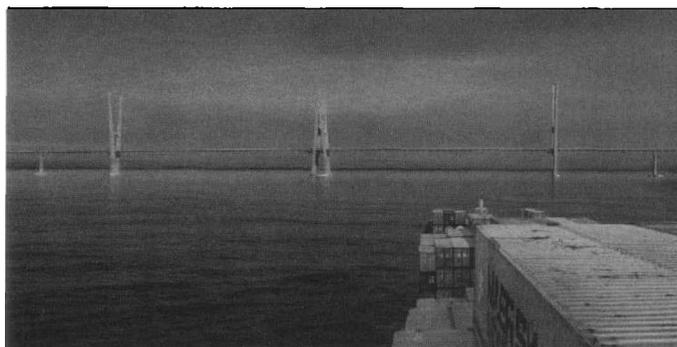


图 5 德国—丹麦费曼恩海峡大桥

可以说,斜拉桥已成为当代大跨度桥梁的主流桥型。据国外杂志报道,泰国湄南河桥、越南湄公河桥和印度孟买的新建大桥都是斜拉桥。美国密西西比河(世界第四大河)在靠近出海

口的路易斯安那州于 2011 年底新建的一座 Audubon 桥也采用主跨 482m 的结合梁桥面斜拉桥,并且是北美洲最大跨度的斜拉桥(图 6)。斜拉桥在 200~1 200m 的跨度范围都有竞争力,而且可灵活采用独塔、双塔和多塔的布置方式以跨越 300m 宽直至几千米长的大江和海峡。多孔斜拉桥采用分孔通航的方式,避免了为设置陆上锚碇而被迫加大悬索桥跨度的传统做法,是更为经济合理的方案。

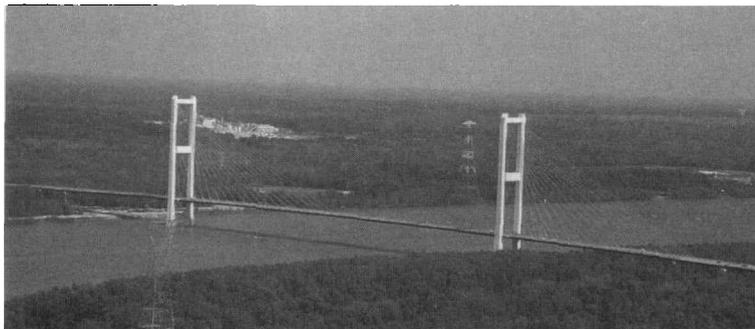


图 6 美国密西西比河 Audubon 桥

### 3 高性能材料的应用

材料的进步一直是工程结构发展和创新的主要动力。以金属材料替代天然的石料和木料为标志的近代桥梁时期和以计算机和信息技术为标志的现代桥梁时期已经历了 350 年(1660 年~2010 年)的发展。钢材和混凝土两种基本材料性能的不断提高推动了桥梁的发展,特别是预应力技术的出现不仅大大提高了混凝土桥梁的跨越能力和质量,而且完全改变了施工方法。

1874 年,美国用钢材代替钢铁建造了第一座钢拱桥,开启了钢桥梁建设的新时代。一百多年来,钢材的屈服强度已从最初的不足 200MP 逐步提高到 S235-345-420,高性能的 HPS460(欧)-480(美)-500(日)-580-690-800-960,甚至达到 1 000MP 以上的超高性能(Super High Performance)钢材。同样,自 1875 年法国工程师建造了第一座跨度 13.8m 的钢筋混凝土人行桥以来,混凝土的强度等级也从不足 10MP 逐步提高到 C15-25-40-50-60,以及高性能的 HPC80-100-130-150-200。应该说,钢材和水泥基混凝土的强度已接近极限,发展的空间不大了。从 20 世纪 40 年代起,各类轻质高强的高性能复合材料(CFRP、GFRP 和 AFRP)陆续登场。虽然在价格、连接方式、锚固技术等方面还有待提高,但可以期待,在不久的将来,复合材料也将逐步进入桥梁工程,并以混合结构为过渡方式,最终成为未来桥梁的主要材料。建筑材料的改变必将促使计算理论、体系、构造、施工和管养等发生划时代的变革,从而使桥梁工程进入“后现代”的新时期。

当前,现代桥梁已进入了成熟期。国外的新桥已大都采用高性能材料,即采用 HPS460-690 和 HPC60-80 作为主要的材料,混凝土结构的配筋也用 HPS460 的主筋。在一些高应力区(如拉索的锚固区)还会少量采用 HPS800-960 的钢材以减少厚度、简化构造、方便焊接,从而减轻每平方米的用钢量指标,有利于整体桥梁的经济性和耐疲劳性能,并提高对隧道的竞争力。

由于国内材料工业的落后,大部分中国钢桥仍以 S345 为主,少数采用 S420;混凝土强度等级也大都 C50 以下,仅少数采用 C60。材料性能低(相差 20%~60%)就要放大构件的尺寸和厚度,造成“肥梁胖柱”现象,不仅影响美观,也是耐久性不足的原因。希望国内桥梁界和

材料工业界能共同努力,改变这种局面,使中国桥梁的耐久性、抗疲劳性能和全寿命经济性能得到改善,同时又能提高桥梁的美学价值。

在 2011 年伦敦会议上发达国家已呼吁提高大桥的寿命期望,即从传统的 100 年提高为 150 年和 200 年。意大利墨西拿海峡大桥已率先采用 200 年的寿命期,并要求钢材的抗疲劳性能从传统的 200 万次( $2 \times 10^6$ )提高到 1000 万次( $1 \times 10^7$ ),即对钢和混凝土的耐久性能提出了更高的寿命要求。我们必须尽快赶上这一发展趋势,不能再故步自封。同时,对 FRP 的研究和应用也要给予关注,为迎接桥梁“后现代”时期的到来作好技术准备。

#### 4 未来跨海长桥的关键技术

进入 21 世纪后,中国开始建造跨海连岛的长桥。2005 年建成的上海东海大桥全长 32km,是第一次尝试。接着,全长 36km 的杭州湾大桥也在 2008 年北京奥运会前通车。2011 年 6 月建成的青岛胶州湾大桥更以全长 42.5km(被西方称为马拉松距离的长桥)位居长桥之最。正在规划中的广东深圳—中山通道和卡塔尔—巴林跨海大桥也有 30~40km 的长度。据说,中国舟山连岛工程正在计划向北延伸,和东海大桥相接,其中岱山到大小洋山将是 30km 的跨海长桥(图 7)。此外,中国琼岛海峡、渤海海峡和台湾海峡通道也在规划之中。东南亚的菲律宾和印尼都是千岛之国,在 21 世纪中也可能开始兴建跨海连岛的长桥。伦敦会议的主旨报告中讨论了未来长桥建设中应当关注的问题,为建设未来的跨海长桥提前研发一些关键技术,做好准备。

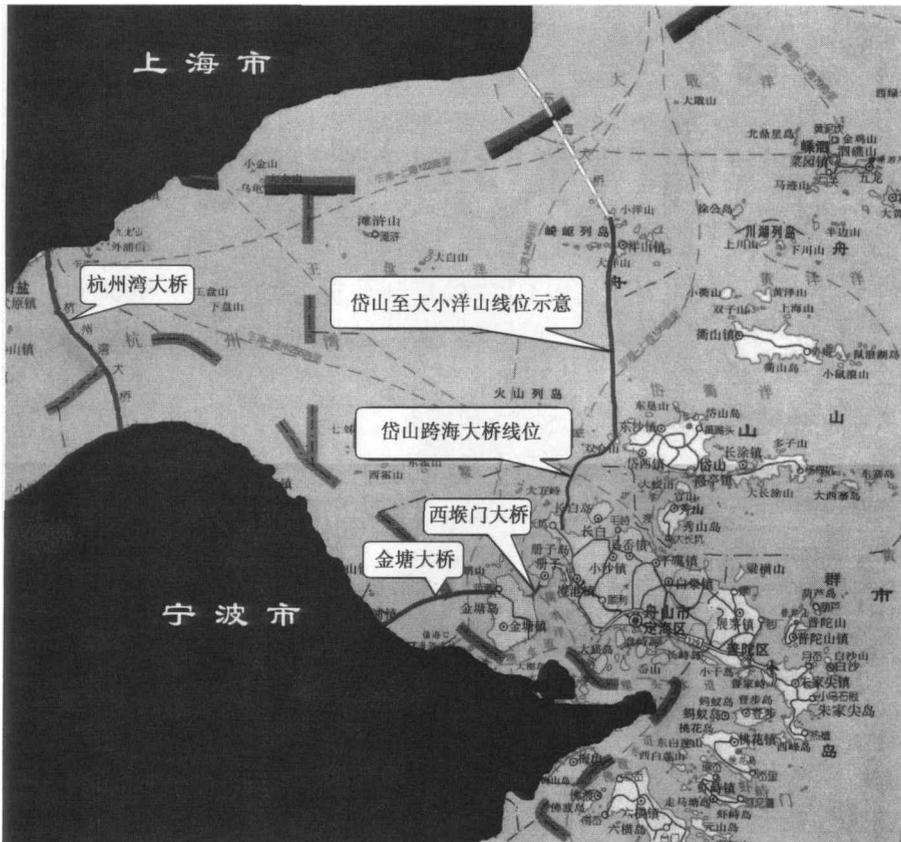


图 7 舟山连岛工程延伸规划图

#### 4.1 超深水基础研究

跨海长桥建设必然会遇到深水基础问题。现有水深最大的桥梁基础是超过 65m 水深的希腊 Rion-Antirion 桥。桥位处于强烈地震区,水面宽 2 500m,基岩埋深超过 500m,法国工程师采用了创新的“加筋土防震基础”和预制装配的桥墩(图 8),使下部结构的造价降低。为满足 18 万 t 约束航行(航速 16 节 $\approx$ 30km/h)要求布置了分孔通航的多孔 560m 斜拉桥,而并没有选用超大跨度悬索桥。

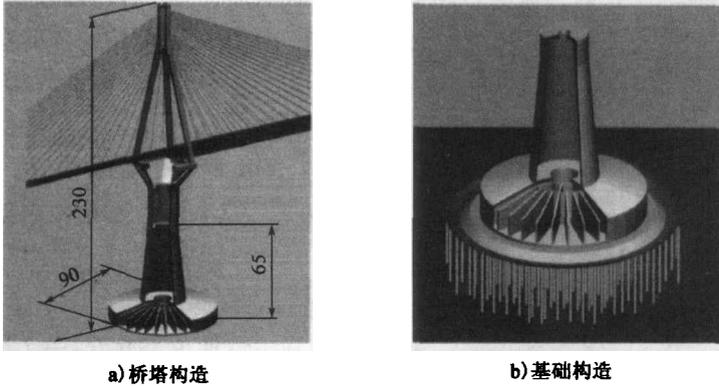


图 8 希腊 Rion-Antirion 桥基础(尺寸单位:m)

韩国于 2010 年建成的 Busan(釜山)-Geoje 跨海连岛工程中一座主跨为 475m 的斜拉桥基础采用巨型浮运混凝土沉井基础。岩盘水深 28~30m,薄壁混凝土沉井高 30m,总重达 9 600t,在船坞中预制后浮运就位。然后,下沉至挖好的基坑上,用水下混凝土填充沉井与岩盘之间的空隙,再在沉井的箱室中灌注混凝土。最后,灌注最上层的箱室形成桥塔的承台(图 9)。

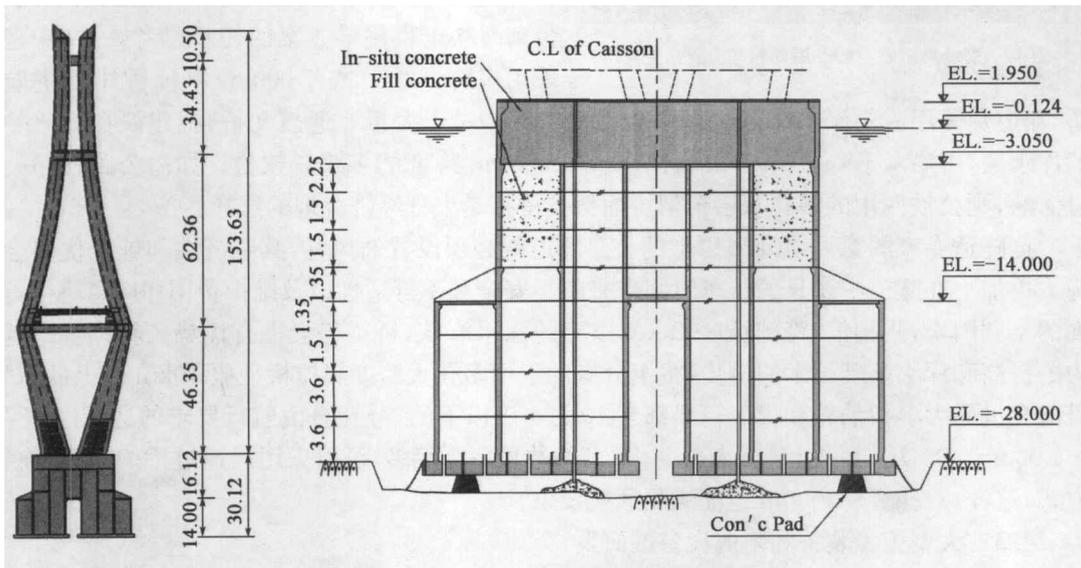


图 9 韩国 Busan-Geoje 斜拉桥桥塔的浮运沉井基础

水深 60~100m 的超深水基础研究对今后跨海长桥的建设具有重要的意义。可以说,在跨海长桥中,桥梁对隧道的竞争优势在很大程度上依赖于深水基础技术的进步。面对隧道施工技术日益经济和高效,我们不能再沿用传统的抗侧力(地震力、船撞力)能力不足的高桩承台

基础,而要开发出一种既便于深水施工,又安全耐久的新型深水基础形式,以避免选用昂贵的超大跨度悬索桥和巨型深水锚碇,从而丧失对隧道的竞争力。

对于水深超过 80m 的海峡长桥,当海峡宽度达到 20km 以上,从行车安全和舒适度考虑并不宜采用过长的公路隧道方案。如不能找到水深较浅的绕行路线,就必须利用海洋平台技术建造超深水基础,此时,下部结构的昂贵造价将迫使上部结构采用超大跨度(2 000~3 000m)的连续多跨悬索桥跨越海峡。据分析,当跨度超过 1 800m 后,由于恒活载比值的增大,中塔主缆在鞍座处的抗滑问题将自动解决,可采用刚性 A 形桥塔以保证大桥的刚度,避免疲劳问题,如直布罗陀海峡和也门—吉布提之间的亚非曼德海峡的桥梁方案。

中国琼州海峡工可研究中推荐在水深 40m 以下的西线绕行方案修建公路跨海大桥是经济合理的选择。渤海海峡全长超过 100km,北段 42km 的海面,平均水深在 40m 以上,最大水深达到 86m,初步建议是南桥北隧方案,以避免多跨连续超大跨度桥梁,如能采用 1 200m 的多跨连续斜拉桥跨越深水区,以避免在公路隧道中过长的行车时间,则可与隧道方案相竞争。

#### 4.2 双层桁架桥面的多跨斜拉桥

在长桥建设中,要考虑养护部门专用的独立通道以及在恶劣天气和发生交通事故时的应急逃生和疏散通道。此外,由于通过时间长,还要考虑使用者半途回程的需要。杭州湾大桥设置了观光平台,也提供了旅客半途回程的可能。前述的丹麦和德国之间的费曼恩海峡大桥的全桥设计中专门考虑了管养部门的专用通道(图 10),同时,在多跨斜拉桥的主通航孔桥的桁架下层还布置了应急逃生通道。



图 10 费曼恩海峡桥的专用管养和应急逃生通道

我在《桥梁》杂志 2011 年第 1 期上发表的《对台湾海峡工程桥梁方案的初步思考》一文中建议采用多跨 800m(或 1 000m)斜拉桥作为主航道

桥,而避免采用需要深水锚碇的多跨悬索桥方案。对于大量非通航孔桥,我建议采用在 60~80m 的深水区,可参考 Rion-Antirion 桥采用 400~600m 跨度的多跨斜拉桥。如需公路铁路一起过海峡,则公铁两用的多孔双层桁架桥面斜拉桥将是十分经济合理的选择。

据隧道专家的意见,10km 以上的公路隧道就必须设置通风井,其经济性和施工优势会下降。再加上在隧道中过长的行车时间带来的不安全和不舒适性以及维护费用和应急逃生等方面的不利因素,我相信,跨越长度 10km 以上的深水海峡,桥梁仍会占有优势。斜拉桥跨越能力的提高和深水基础技术的进步,将十分有助于用多孔大跨度斜拉桥征服 10km 以上的海峡。目前全世界大多数油轮和集装箱船都是 10 万 t 级以下的,分孔自由航行要求的通航净宽为  $2 \times 1\,000\text{m}$ 。30 万 t 巨轮(甚至未来 50 万 t)的数量不会很多,可以采用减速过桥的“约束航行”方式,这样,双孔  $2 \times 1\,000\text{m}$  也能满足通航要求。

#### 4.3 大型施工装备和附属设备的研发

跨海长桥的施工必须采用大型浮吊整体吊装施工以减少海上作业。无论上部结构或下部基础墩身的部件重量都会接近万吨级甚至更重。中国已能自主建造 3 000t 以上的浮吊,发达国家都有 5 000t 级以上的大型装备,最大的是近万吨的瑞典天鹅号浮吊(图 11)。为了满足未来跨海长桥建设的需要,我们也应当开发大型浮吊和巨型造桥机等施工装备。

随着跨度的增大,斜拉索、伸缩缝、抗震缓冲阻尼器、管养检测设备、大型构件预制工厂的

各类装备、海上施工机械以及计算机控制和远程通信设备等,都是必须的技术储备,以便能高质量、高效率地完成海上作业,保证投资巨大的大桥和长桥具有更长的寿命期和耐久性。

施工装备的不断进步将使工地现场的工作日益减少,演变为专业化大型构件的工厂预制和大型自动化施工机械的现场拼装就位。根据发达国家的经验,随着施工装备的进步,工地现场的工人也以每10年减半的速度递减,即从20世纪50年代的数千人到90年代的百人左右。进入21世纪后,发达国家的工地往往只有数十人的规模,巨型施工设备和计算机操作完全改变了桥梁工地的生态面貌,而工程质量

却不断提高。反观中国的大桥工地仍聚集着大量农民工,专业化程度不高,这也是中国桥梁的施工安全、质量和耐久性存在缺陷的主要根源。从这点看,中国桥梁要赶上国际先进水平还有很长的路要走。

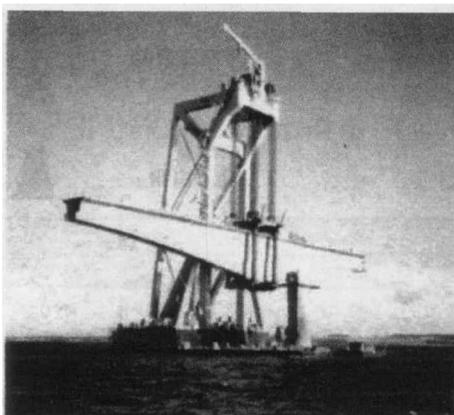


图 11 天鹅号 9 000t 浮吊

## 5 结语

综上所述,世界大桥的未来趋势可归结为以下几点:

(1)采用高性能、高强度材料和高性能复合材料,以延长寿命期,提高耐久性,体现节约资源和环保的可持续发展理念。

(2)慎用悬索桥,优先考虑具有刚度大、抗风性能好、拉索可更换、施工简便快速、避免深水锚碇等优点的斜拉桥。利用斜拉桥的跨越能力解决 10km 以上跨海长桥的难题。

(3)加快深水基础研究,避免被迫放大跨度,以提高对隧道的竞争力。采用多跨双层桁架桥面斜拉桥跨越海峡,并可满足公铁二用、应急逃生、中途回程和专用管养通道的需要。

(4)开发大型施工装备(造桥机、浮吊、塔吊等)、先进监测管养设备以及桥梁附属部件(支座、伸缩缝、阻尼器等),为提高工程质量提供装备保证。

(5)建设现代专业化分包企业,减少工地施工人员,努力赶上发达国家的水平,创建中国桥梁的国际品牌。

## 参 考 文 献

- [1] 国际桥协. IABSE 伦敦会议论文集[C]. 2011,9.
- [2] 项海帆,等. 桥梁概念设计[M]. 北京:人民交通出版社,2010.
- [3] 肖汝诚,等. 缆索承重桥梁各种体系比较[J]. 桥梁,2011(2).
- [4] 项海帆. 对台湾海峡工程桥梁方案的初步思考[J]. 桥梁,2011(1).
- [5] 邓文中. 台湾海峡大桥的构思[J]. 桥梁,2011(6).
- [6] Sangkyoon Jeong, Jechun Kim. The Immersed Tunnel and Bridges of Busan-Geoje Fixed Link[J]. Structural Engineering International, 2012,22(1).
- [7] 楼庄鸿,译. 密西西比河的新干线[J]. 桥梁,2012(1).