

上海南浦大桥和杨浦大桥

Nanpu Bridge and Yangpu Bridge in Shanghai

孙羹尧

(上海市黄浦江大桥工程建设指挥部,总工程师 上海 200090)

自上海开埠以来,在黄浦江上建桥,是清末、民国时期数度动议而最终付诸东流的话题。解放以后,也曾就建桥事宜组织讨论,但终因种种原因而未能实现。由于黄浦江的阻隔,浦东和浦西的经济发展呈现巨大的差异:浦西高楼林立,入夜万家灯火;而浦东除了沿岸一些码头、仓库、船厂外,仍然是阡陌纵横,灯火寥落,与隔江的市区形成明显的反差。浦东,长期以来在上海人的心目中,是名副其实的“乡下”。作为90年代的重大决策——开发开放浦东,不仅对恢复上海远东最大金融与工商业中心的地位有着重大的意义,而且对推动长江三角洲、华东,乃至全国经济发展具有深远的战略意义。要使浦东真正成为崭新的现代化新区,而且带动浦西老市区的改造与发展,连结浦东、浦西的越江工程是一项必须先行的基础工程,而目前仅仅依靠已有的两座过江隧道及十五条人渡线,三条车渡线是远远满足不了日益增长的过江运输需要的。据统计,1982~1989年,机动车过江年均以13.2%速率增长。1989年日均流量达23764辆,预测1993年将达5万辆。轮渡过江旅客流量年均以5.1%的速率增长,渡口不堪重负。因此抓紧建设黄浦江越江工程以缓解过江难这一突出矛盾,是开发开放浦东的必要前提条件。

一、南浦大桥和杨浦大桥的前期工作

建设南浦大桥和杨浦大桥,是在对桥、隧方案多次比较讨论的基础上确定的。在南浦大桥的前期工作中,国内有关部门进行了大量的调查工作,经过全国各地专家多次论证,推荐叠合梁斜拉桥作为主桥方案。在桥址选择上,重点在总体上统筹考虑,既要满足新区的需要,使其在总体布局上合理,同时要求尽可能选在对岸线使用影响较小,房屋拆迁量较少和现有建筑质量较差的地段,尽可能与旧城区的改造相结合。对浦西引桥的方案,前后经历了整十年的工作,研究过二十来个线形方案。最后,选

定了主桥为双塔双索面叠合梁斜拉桥,主跨423米,浦西引桥采用螺旋形方案。在杨浦大桥的建设前期,由于有了南浦大桥的建设经验,在桥、隧方案比较后确定建桥的基础上,重点对一跨过江不设江中墩的方案与设岸边墩的方案进行了反复研讨,综合考虑了航道、水运、施工技术、水中墩防撞措施、工期、造价等因素,初步确定为一跨过江,跨径为600米左右的桥梁方案。对具备跨越600米孔径的桥型又推出悬索桥、斜拉桥方案进行比较。经过优化,选用了抗风性能好的钻石型桥塔,空间索面叠合梁斜拉桥,设计主跨为602米。这意味着,杨浦大桥已成为世界上已建成的斜拉中跨度第一的大桥。

二、南浦大桥、杨浦大桥的概况及其特色

南浦大桥全长8346米,其中主桥846米,主跨423米,为双塔双索面的叠合梁结构斜拉桥。在叠合梁斜拉桥中,当时仅次于加拿大的阿娜西斯桥(Annis Bridge,主跨465米),名列第二。南浦大桥设计荷载为汽——超20级;验算荷载:挂——120吨;特种荷载:300吨平板车;地震荷载按7度(0.1g)设防。设计车速:40公里/小时。设计车行道为6车道,两侧各2米人行道,桥宽30.35米,投资8.2亿元,工程费为4.3亿元。

杨浦大桥全长7658米,其中主桥1172米,主跨602米,为双塔双索面的叠合梁结构斜拉桥,是目前已建成的最大跨径的斜拉桥。杨浦大桥设计荷载为汽——20级,局部计算荷载:汽——超20级;验算荷载:挂——120吨;地震按7度设防。设计车速45公里/小时,设计车行道为6车道,两侧各2米人行道,桥宽30.35米,投资13.3亿元,工程费为8.9亿元。

南浦大桥和杨浦大桥使我国斜拉桥的跨度从200米左右一跃而突破了400米,而且紧接着进入600米以上级。在建设周期,节约投资和施工、制造质量方面取得了引人瞩目的成绩。在规划、设计、科

研、新材料和新工艺、新产品、新技术的应用上也有许多具有国际水平的成果。

我国从 1988 年至 1993 年五年间建造了两座具有国际水平的大型斜拉桥,速度之快,是国内外桥梁建设史上罕见的。

南浦大桥和杨浦大桥的总投资分别为 8.2 亿元和 13.3 亿元人民币。工程费约占 52%~67%,都部分利用了亚洲开发银行的贷款。其间接接受了国际桥梁专家的技术咨询并经受了国际专家团严格的审查。主要材料、设备的采购按国际惯例进行招标。根据南浦大桥决算结果,南浦大桥节约投资 528 万元,杨浦大桥估计亦能控制在概算内,这在国内大型建设项目中也是少见的。

作为上海城区的大型越江设施,从桥址、桥型、跨度、通航高度、两岸引桥线型、人车过江方式、坡度等都进行了多方面多层次的反复论证,比较和优化,集中了国内外桥梁、结构、地质、材料、城市规划、交通、环境、港务、航运、水文等领域专家的意见和智慧,涉及面之广、讨论之深、历时之长,对一座桥梁的建设而言是不多见的。凡参观过南浦和杨浦两座大桥的中外人士都无不赞叹其气势雄伟,挺拔刚健和富有韵律美。由于在建设过程中与旧城区的改造相结合,带动和开发了两岸周围地区,大桥与周围环境协调和谐,已成为新上海的一大景观和标志性建筑。同时作为上海内环线的两个越江结点,在沟通老市区与浦东新区的交通,形成上海新的交通网络和格局,将会发挥越来越大的作用。

作为大跨度斜拉桥,施工和运营中的可靠度和主要部件的安全度都列专题研究攻关。如对两桥的空气动力性能都作了节段模型和不同工况的全桥模型试验及严谨的理论分析。对钢结构、焊接、锚箱、接缝微膨胀混凝土、桥面防水及沥青路面、拉索疲劳和抑振、栓钉抗剪器、南浦大桥钢梁锚固、杨浦大桥上塔柱锚固区及预应力索布置 1:1 实体试验、主塔单桩承载力的静动载试验等,都列专题进行了研究。这些科研成果的取得,不仅对两桥的安全性作出了令人信服的评价,确保了大桥的成功,同时也为我国大型斜拉桥的设计与施工积累了经验。

在设计上,针对国外叠合梁斜拉桥混凝土桥面板裂缝问题,采取了“反顶”,桥面板内设纵、横向预应力,改进拉索锚固结构,采取抗裂的施工程序等措施,有效地防止了南浦、杨浦大桥的桥面开裂。南浦大桥根据风动试验结果,增设了导风板,杨浦大桥采用钻石型桥塔,空间索,“U”形钢梁断面,增大了桥梁的整体抗风性能和抗扭刚度。南浦大桥在塔柱内的锚固用与阿娜西斯桥相同的钢锚梁结构。杨浦大桥则在上塔柱内大胆地采用了直接锚固于混凝土塔柱壁上的形式。两桥均采用了全悬浮体系。

为了适应纵向位移,南浦大桥安装了国产和德国毛勒(MAUERER SOHNE)公司的伸缩量为 640 毫米的大位移伸缩缝。杨浦大桥安装了毛勒公司的伸缩缝量为 1 200 毫米的大位移伸缩缝。该装置是目前国内桥梁上安装的伸缩量最大的伸缩缝。

从理论分析和实验、运营的结果来看,主塔塔形、梁断面、拉索的塔梁锚固方式、全悬浮结构的选择,均是成功的。

南浦大桥的钢梁用进口的可焊接细晶粒结构钢 STE355 和 STE490(即标准屈服强度为 355 兆帕和 460 兆帕),用钢量为 6 239 吨,共 673 件,下翼缘板使用了 50,55,60,80 毫米的厚板与对接焊技术。塔内锚固梁垫肩用了厚达 100~135 毫米的钢板。“I”形梁高 2.1 米,标准节段为 18 米,特殊节段 LWB5-1 和 LWB6-1 上翼缘加宽后,展宽达 6 米,重 50 吨,尾段 LWZ8-9,长 39.5 米,宽 2.45 米,重 93 吨。杨浦大桥钢梁用 STE355 进口钢 12 600 吨,共 1 187 件。在工厂焊成高 2.7 米的“U”箱梁,其尾段形状复杂,结构特殊,高 7 米,重达 82 吨。所有焊缝均在工厂经过 100% X 光拍片、超声、磁粉探伤和节段的预拼装。工地用 M22 和 M30 高强度螺栓栓接,其中 M30 高强度螺栓为我国首次采用。南浦大桥近 50 万个栓孔,安装 14 万套高强度螺栓;杨浦大桥 100 万个栓孔,安装 34 万套高强度螺栓,在工地拼接时无一错孔和扩孔,为大型钢梁安装所罕见。在钢梁制造精度和控制变形方面达到了高水平,其切割、焊接、金加工的机具和工艺是一流的。两桥作为抗剪器的直径 22 焊钉(栓钉)采用国产 ML-15 镇静钢经冷拔后冷墩成形。经各项强度和疲劳试验、与混凝土结合后的各项试验表明,采用国际标准制造和焊接的焊钉,已完全达到了国际上同类产品的要求。

杨浦大桥索、梁锚固采用独特的栓焊结合的钢锚箱结构,并进行了光弹模型的实验和空间应力分析。其结构安全可靠。

南浦大桥 488 块,杨浦大桥 969 块, $R_{ss}=60$ 兆帕的高强度混凝土预制桥面板,预制精度达到不大于 2 毫米,侧壁用缓凝剂代替凿毛,接缝用 600 号微膨胀混凝土以直径 22 栓钉与钢梁上翼缘连成整体,是混凝土预制构件中的精品。

两桥采用 NPWS 工艺生产了共计 436 根、4 506 吨斜拉索。其中南浦大桥 180 根,最长达 223 米,最粗由 265 根直径 7 毫米镀锌进口钢丝编绕而成;杨浦大桥 256 根,最长达 328 米,最粗由 301 根直径 7 毫米镀锌钢丝编绕。缆索外包聚脂包布,热挤 PE 和 PU 塑料包皮,两端装配我国较成熟的冷铸锚。为了研制和成批生产两桥成品索,在上海南汇县创建了具备完整生产线的浦江缆索厂,该厂的产品现已可供应国内的斜拉桥、悬索桥使用,并不断

有新的产品问世。

自行设计的高塔“爬模”以每天 1.4 米的速度完成了 150 米高的南浦大桥主塔和 208 米高的杨浦大桥主塔的混凝土浇筑,并在高空不解体完成不同斜率的转换。拼装钢梁和桥面板的桥面吊机,施工时的梁塔临时锚固装置,泵送高度为 150 米和 208 米混凝土的研制与施工,说明我国的施工队伍在机具、工艺上完全能适应大型叠合梁斜拉桥的建造。南浦大桥平均 14~15 天一个节段(18 米),杨浦大桥平均 8 天一个节段(9 米),拼装速度比国外同类桥梁(阿娜西斯桥平均 18 天一个节段,18 米)要高。

南浦大桥浦东引桥四根三跨 95 米和四跨 120.5 米连续曲线预应力箱梁在工地预制,曲率半径 90 米。浦西引桥预应力曲线箱梁共 159 根,长度从 31.725~43.012 米。主引桥的半径由 100 米、110 米、125 米组成,因此每根曲梁的半径各异。在现场预制后,由两台 300 吨吊机抬吊就位,曲梁最大重量 250 吨,最大重心偏距 26 厘米,起重高度 48 米,在狭窄的场地内,全部安全吊装到位,创我国预制、吊装大型曲线箱梁史的新纪录。

南浦大桥和杨浦大桥安装了先进的交通监控系统。除小部分硬件如摄像机等为进口外,设计、制造、安装均由国内科研单位承担,其计算技术、模糊控制技术、图象信息处理技术及系统技术达到了 80 年代后期的国际先进水平。价格—性能比优越,运行可靠,从未因功能不完善和故障而出现事故。两桥的监控系统在内环线通车后将与内环线的监控系统接口,形成完整的交通监控网络。

杨浦大桥主塔承台每个 7 000 立方米大体积混凝土,一次浇筑采取“内散外蓄”法避免了裂缝。主塔采用“天顶法”和“空间坐标法”测量控制其垂直精度,实际施工后,高度为 150 米和 208 米的主塔,实测精度都超过了设计要求的 $H/3000$ 。

南浦大桥和杨浦大桥均以降温待机自然合法实现中孔的顺利合龙。此时所有栓孔无一扩孔,仅用了—个多小时完成了钢梁合龙并立即释放临时固结装置,全桥处于设计的悬浮状态,为大型钢梁拼装十分成功的实例。

三、从南浦、杨浦大桥看我国斜拉桥及大型桥梁工程

桥梁工程本身并不是尖端科学,但是桥梁工程技术往往反映了这个国家的综合科技实力,其风格则体现了民族的文明和传统。我国的桥梁建造历史悠久绵长,在结构形式上和对材料的利用上不乏经济、合理、优美的实例。古代的石拱桥、梁桥、悬索桥等都曾在历史上占有辉煌的地位。而我们的民族,

在将桥梁这一人工构筑物与周围自然环境融为一体,使其相得益彰方面,似乎更有独到的见解,桥梁本身的建筑造型往往带有浓郁东方风情。许多桥梁,不仅成为跨越河、谷障碍的工程建筑物,且是自然景观中的人造艺术品。但是,同其他现代科技一样,我国的桥梁技术曾落后了相当长的时期。然而,当我国的工程技术人员一旦接受了现代科学技术,在桥梁界同样显示出非凡的才华,留下了不少值得骄傲的铁路、公路、公铁两用桥梁建筑,在深水基础的设计施工方面,曾创下了许多成功的工程实例,一度也为世界桥梁界所瞩目,在跨越大江大河的能力上,水中基础已不成为障碍。从事桥梁设计和科研的专家们孜孜以求的是寻求更大的跨度,以满足通航的要求,节约深水基础的费用和缩短工期,求得最佳的经济效果。斜拉桥就以其特有的优点在我国近十年来的造桥高潮中得到了蓬勃的发展。

我国的斜拉桥,自 80 年代以来,已走过了试验、摸索的阶段,进入了全面推广和大规模建设的高潮。在已建成的斜拉桥中以钢筋混凝土结构居多,亦有全钢结构(如东营黄河桥)及钢—钢筋混凝土叠合梁斜拉桥(以南浦大桥、杨浦大桥为代表)和钢筋混凝土、钢—钢筋混凝土叠合梁混合结构斜拉桥(淮阴京杭运河 1 号桥)。修建的跨径从 90 年代以来,已从 300 米以下进入 400~500 米,继而跃入 600 米以上的大跨度,索的布置亦从稀索变为密索,索面大多为平面,也有空间的。据统计,我国从 1991 年到 1993 年修建的斜拉桥为 65 座以上。我国已成为世界上修建斜拉桥最多的国家。其中,杨浦大桥跨度是世界之最。分析近十年来全国各地修建斜拉桥的高潮,原因很多。从桥梁结构而言,斜拉桥是跨越能力仅次于悬索桥型的桥梁结构。据专家估算,按目前的材料及施工能力,斜拉桥跨度可达到 1 000 米,而且没有一种桥型能如斜拉桥那样千姿百态,变化多端。斜拉桥施工时可以无脚手悬拼,具有快速施工的优点。应当指出,斜拉桥的发展是与电子计算机在工程设计上的应用分不开的。斜拉桥,特别是密索型的斜拉桥是高次超静定结构。由于电子计算机软件、硬件的不断开发应用,现在我国除了高等院校和国家一级的科研机关、专业设计院能进行斜拉桥的设计外,省一级的有关设计单位都能设计出风格各异、不同类型的斜拉桥。随着高强度、高性能的材料越来越多地在桥梁设计、施工中应用,使斜拉桥的跨度越来越大,结构也越来越趋于合理,材料的性能也得到了充分的发挥。近年来,我国已生产了用于斜拉索的镀锌和不镀锌的高强度低松弛钢丝($\sigma_b \geq 1\ 860$ 牛/毫米²,应用松弛率 $< 5\%$),用于牵引张拉斜拉索的大吨位千斤顶(6 000~8 000 千牛)和用于预应力钢丝张拉和各种型号的张拉千斤顶及锚具。随着改革开放,国外高性能

的桥梁结构钢材、钢索也越来越多地进入斜拉桥领域。南浦大桥和杨浦大桥的成功,标志着我国在斜拉桥的科研、设计、施工方面已经接近或达到世界先进水平。

目前,我国正在建造的跨越长江的大桥就有重庆长江二桥、武汉长江二桥、黄石长江大桥、铜陵长江大桥、江阴长江大桥等,跨越海峡、海湾的大桥有汕头海湾大桥、广州虎门大桥等。至于在筹划之中的大型桥梁就更多了,这些大桥有许多是各种形式的斜拉桥,也有的是我国方兴未艾的大跨度悬索桥。

面对规模空前的修路造桥高潮,对土木工程界是一次大挑战,也是极为难得的机遇。对于大跨度桥梁的理论和实践,笔者认为在许多方面需进一步探索。例如:

1. 关于公路桥涵规范中荷载标准的研究

我国现行的公路桥涵规范对大跨径桥梁的荷载标准偏高。对照欧、美、日桥梁规范,我国的公路桥涵车辆荷载偏保守。根据竣工荷载试验和施工中的实测,桥梁主要构件的应力水平偏低。据国外桥梁专家称,在低于我国桥梁荷载标准的欧洲某国进行全桥设计荷载的试验,所测得的内力也未超过设计标准的40%。但另一方面,对大跨度桥梁的整体稳定性、可靠性的验算又缺乏有效、实用的理论和方法。因此目前我国大量斜拉桥设计所采用的荷载标准一般沿用适用于普通桥涵的规范,或参考国外有关标准的偏安全部分。这样,就使得桥梁各部件的设计截面尺寸偏大,材料的强度未得到充分的利用。从整体而言,经济性偏低。虽然,国内已有高校学者或一些桥梁结构专家从事这方面的工作,但由于需进行大量的调研与测算,应组织力量集中研究解决。其实国内已具备条件来修订桥涵规范,制定斜拉桥和悬索桥的设计,施工规范。

2. 关于设计、科研、施工经验和成果的交流 and 知识产权的保护

我国已具备大跨度桥梁的设计、科研、施工能力。但由于长期计划经济所形成的条块分割的弊端,现又面临建筑市场的竞争,一方面许多桥梁的科研和设计,施工经验和成果没有有效的知识产权保护,另一方面又存在着严重的部门封锁和单位所有。虽然也有一些交流,但许多有价值的科研成果和优秀的设计不能为全社会所共享,以致许多设计工作者在做着重复性的工作,耗费无谓的人力和物力。

3. 关于大跨度斜拉桥的施工控制的研究

由于斜拉桥的施工控制直接关系到施工安全、施工速度和成桥最终状态的质量。目前各地对斜拉桥的控制一般分阶段以线型控制和索力控制相结合,在某阶段以其中一种控制为主,也有些斜拉桥开始进行线型、索力同时双控以减少调索工作量的尝试。但在大型斜拉桥的施工控制方面尚没有十分有效的软件。特别是大跨度斜拉桥的非线性影响(徐变、温度)是不可忽略的因素。这就为斜拉桥施工控制的程序设计和具体结构设计带来了许多新的课题。

4. 关于斜拉桥的风振机理与抑振措施的研究

南浦大桥和杨浦大桥对斜拉索采用了两端装置简单阻尼器的办法来抑制拉索的风振,收到了明显的效果。但是拉索的振动,尤其是大质量、大拉力的长索风振机理和有效的抑振措施尚在探讨、研究中,而这一问题处理不好,轻则影响桥梁通行的舒适度和造成部件的疲劳损伤,重则会导致拉索及相关构件的疲劳破坏,甚至会危及桥梁的整体安全。这一课题需进一步进行理论和实践的探索。

5. 适应大跨度斜拉桥、悬索桥所需高强、轻质材料的研制和合理结构形式的探求

国外已研究采用高强轻质的碳纤维(作大跨度斜拉桥的拉索和悬索桥的主缆)及性能更好的,强度更高(包括高Z向抗撕裂性能)的钢材,探索以三角形和复合箱形等断面形式作为主梁和加劲梁来达到桥梁的更大跨度。有些桥梁已尝试以悬索桥和斜拉桥相结合的结构形式以发挥两者的优点,求得更大的刚度和跨度。

6. 在设有桥梁专业或建筑学专业的高等院校、有条件的可增设“桥梁美学”专业课程

桥梁美学是建筑美学的一部分,但大跨度桥梁因其体量大,跨越及影响的区域也大,其美学效果往往对整座城市或周围地区产生重大的正面或负面作用。在大型桥梁的规划与论证中,通常由建筑专家来评价桥梁的美学规划、桥梁造型和附属建筑物的设计,而桥梁结构专家常较多着眼于结构本身而易忽略桥梁的美学效果。所以有必要培养兼备桥梁和建筑学专业知识的专家。

黄浦江上南浦大桥和杨浦大桥是上海市区两座具有国际水平的姐妹桥。除此之外,松江县境内的黄浦江上已建有公路铁路两用的松浦大桥,奉贤县境内黄浦江上在建的有奉浦大桥,筹建中的有外环线上的港口—三林塘黄浦江大桥。随着浦东的进一步开发开放,会有更多具先进水平的桥梁出现在黄浦江上。

(责任编辑 蔡德诚)