

上海市黄浦江卢浦大桥设计

林元培¹ 章曾焕¹ 马磊¹ 周良²

(1 上海市政工程设计研究院 上海 200092 2 上海市城市建设设计研究院 上海 200125)

摘要:正在建设中的卢浦大桥为主跨550m的中承式拱梁组合体系钢拱桥。桥下通航净空46×340米。桥面使用宽度29.8米(双向6车道)。该桥建成后成为世界上跨径最大的拱桥。本文介绍此桥设计的有关内容。

关键词:钢拱桥 设计

1 工程概况

鲁班路越江工程位于上海市区的南面,是市区穿越南北快速干道的重要节点,也是市区建设的黄浦江第七座越江设施。工程按规划走向,北起南北高架鲁班路立交北端高架预留接口,向南经江南造船厂过黄浦江后穿越上海浦东钢铁(集团)有限公司(原上钢三厂)与济阳路接顺后,沿规划济阳路至外环线(环南一大道),接沿浦公路。主线基本为南北走向,工程范围全长8.7公里,全线红线宽度40~50米。其中包括跨越黄浦江大桥一座,鲁班路上、下匝道一对,左转定向匝道一条,耀华路上下匝道一对,跨越川杨河桥一座,济阳路—外环线立交扩建,以及沿线的道路排水、照明、交通监控设施、综合管理楼等。主桥桥位距下游南浦大桥3公里,距上游徐浦大桥约7公里。

建设鲁班路越江工程是解决本地区越江设施和运送能力不能满足日益增长的过江交通的需求,特别是解决周围路网难以疏解的南北干道和该地区大流量交通经南浦大桥和打浦路隧道过江问题的需要。工程完工后将进一步完善南北高架道路,沟通上海市南北交通干线,并改善浦东国际机场与市中心区的交通。

2 工程总体设计方案

本工程的设计是在最新的规划路线上展开的。南北高架道路在规划、建设时就考虑了今后越江工程的实施,南北高架主线与鲁班路立交匝道均预留了接口,而且为便于今后施工还预留了部分桩基。

因此大桥的浦西引桥直接从南北高架主线预

留口接出(双向四车道)向南,鲁班路匝道也直接从该立交圆环南侧匝道预留口接出,这两根匝道实现了大桥与内环线高架的沟通。浦西引桥与鲁班路匝道沿鲁班路西侧向南延伸,在纵向高程接顺后两者合并,形成双向六车道的主桥,在江南造船厂雪龙港东侧过江。路线于浦东上海浦东钢铁(集团)有限公司(原上钢三厂)油料码头处登岸后,主引桥沿厂区三号路东侧向南,出厂区后转向西南走规划雪野路走向,至济阳路—耀华路交叉口北侧再折向南,然后大桥分别与济阳路、耀华路相接。耀华路匝道分出后,大桥主线为双向四车道,跨越耀华路后沿济阳路向南落坡接地,然后主线沿规划济阳路(新建“六快二慢”断面)跨越川杨河后向南至环南一大道,并设互通式立交。工程南端终点设在立交南侧与沿浦公路(已按规划实施)相接。大桥与耀华路的连接设置一对左、右转定向匝道转向济阳路以东沿耀华路向东落坡接地,工程终点设在距济阳路以东约650m的耀华路—西营路口东侧。越江工程地理位置详见图1。

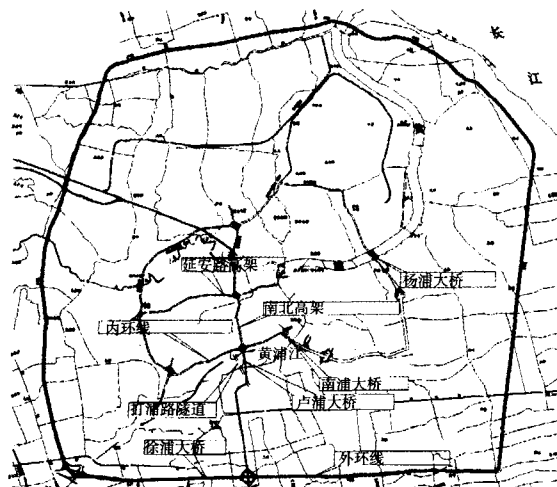


图1 鲁班路越江工程位置

注:《上海卢浦大桥工程(水平拉索)》项目获第二届欧维姆预应力技术奖二等奖。

3 主要设计技术标准

- 道路等级：城市主干道。
- 设计车速：60km/h。
- 最大纵坡：主线5%，匝道6.4%。
- 主桥桥宽：双向六车道，车行道总宽24.50m；每侧观光人行道宽2.0m。
- 航道净空：净高46m（含2m富裕高度），净宽340m。
- 计算荷载：汽车—20级，验算荷载：挂车—100。人群荷载：4kN/m²，全桥均布人群荷载：2.4kN/m²。
- 抗震：地震基本烈度7度。

4 卢浦大桥方案设计征集及前期设计工作

1999年8月建设单位组织工程设计方案征集，并于当年12月8日至10日邀请了国内有关桥梁、结构、规划、道路、建筑、施工、经济等十五名专家对设计方案进行了评选。四家设计单位（联合体）的推荐方案分别为下承式系杆拱桥、单索面斜拉桥、悬索桥、斜拉自锚悬索体系桥。专家组评选结果：上海市工程设计研究院和上海市城市建设设计研究院合作设计的下承式系杆拱桥方案评为一等奖。根据评审专家和有关部门领导的意见，设计院又对主桥设计方案进行了多次优化和深化，桥型方案最终采用中承式系杆拱桥，并于2000年5月和2000年8月先后编制完成了工程可行性研究报告和工程初步设计。

5 主桥总体设计

5.1 建筑造型和主桥结构体系（设计构思）

目前世界上已建成的大跨径拱桥如美国新河谷桥（跨径518m）和澳大利亚悉尼桥（跨径503m）均为桁架拱桥，从建筑造型角度看，箱型拱桥方案具有杆件数量少，构造简洁、美观等优点。施工图设计阶段，根据初设评审专家和国内著名建筑专家的意见，设计院又对卢浦大桥主桥的设计方案进行了数次优化、细化和深化。最终卢浦大桥主桥采用变高度钢箱型拱桥方案。优化后的卢浦大桥建筑造型更显美观、简洁、流畅。

主桥桥型结构采用适合上海软土地基的中承式系杆拱桥。主桥两边跨端横梁之间布置强大的水平拉索，以平衡中跨拱肋的水平推力。加劲梁通过吊杆或立柱支承于拱肋之上。边跨加劲梁分别在中跨和边跨的拱梁交汇处与拱肋固结。中跨加劲梁的两端支承于中跨拱梁交汇处的横梁上，端支承为纵向滑动支座，横向和纵向设置阻尼限位装置。其结构体系见图2所示。

5.2 主桥跨径组合与纵向线形设计

桥位处黄浦江规划岸线宽度为480m。主桥一跨过江、江中不设墩。主桥中孔跨径550m、矢高100m（矢跨比 $f/L=1/5.5$ ），跨径组合： $100m+550m+100m=750m$ 。

主桥桥面竖曲线半径： $R=9000m$ 。桥面最大纵坡：2.5%，横坡：2%。（见图2）

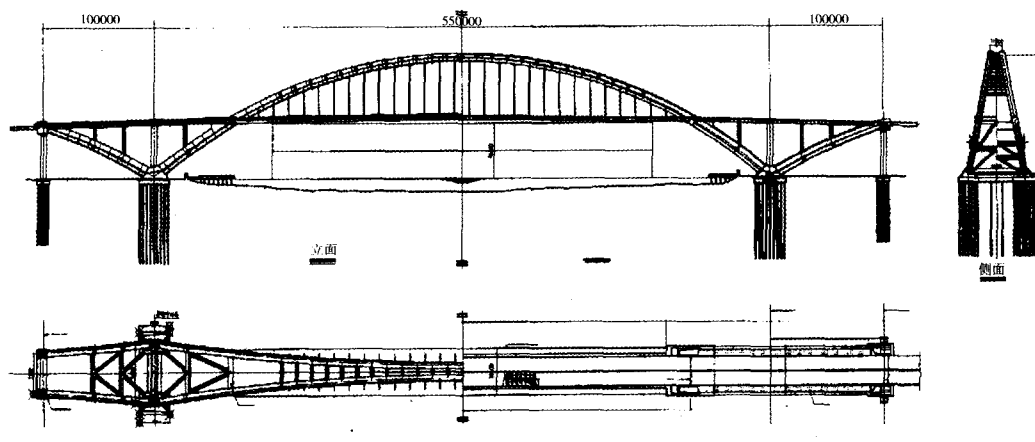


图2 主桥结构体系示意图

5.3 上部结构设计

5.3.1 拱肋

拱肋截面形状为陀螺形，其截面见图3所示。中拱总高度9.0~6.0m，边拱总高9.0~7.0m。拱肋上半箱为矩形截面：宽5.0m，中跨部分从拱脚6.0m高渐变至拱顶的3.0m高，边跨部分则为6.0~4.0m高；下半箱为倒梯形截面：顶宽5.0m，底宽3.0m，高3.0m。中拱顶板30~32mm，拱梁结合段加厚至65mm；底板42~45mm，拱梁结合段65mm；腹板22mm，拱梁结合段32mm；中板20mm，拱梁结合段30mm；边拱顶板30mm，底板40mm，腹板20mm，中板20mm。拱肋加劲采用T型加劲（见图3）。

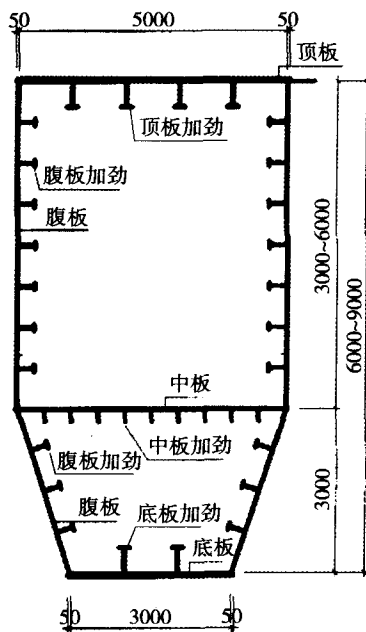


图3 拱肋截面

5.3.2 系梁及横梁:

边跨三角区系梁截面为闭口钢箱梁，其截面见图4所示。箱梁宽41.0m，高2.7m。顶板13mm，U形加劲6mm，底板10mm，横梁间距3.375m。边跨系梁与拱肋、立柱、边拱末端横梁、中跨拱梁结合段横梁固结。边拱末端横梁、中跨拱梁结合段横梁是联系拱肋之间以及拱梁之间的重要构件，其构造设计分别见图5、图6。

中跨系梁为开口钢箱梁，即双主梁（箱梁）+横梁结构体系，其截面见图7所示。箱梁宽39.5m，高2.7m。顶板14mm，U形加劲8mm，横梁间距为3.375m。中跨系梁通过吊杆支撑于拱肋之上。中跨系梁两端则通过支座与中跨拱梁结合段横梁相连接。

5.3.3 风撑:

桥面以上全桥共设27道风撑，水平间距13.5m，风撑为变高度矩形截面，顶底板分别与拱肋的顶板、中板对齐。桥面以上第一道风撑高约4.3m。宽4.1m，其它风撑高4.115~2.942m，宽2.1m，桥面以下每侧边拱、中拱分别设2道K撑。K撑亦为矩形截面，高约2.6m，宽2.6~3.1m。

风撑截面形式详见图8。

5.3.4 立柱:

一侧边跨三角区系梁下共设4×2根立柱。立柱为矩形截面，其中主墩顶大立柱断面为5m×5m，其它小立柱断面为5m×2.5m。立柱截面详见图9。

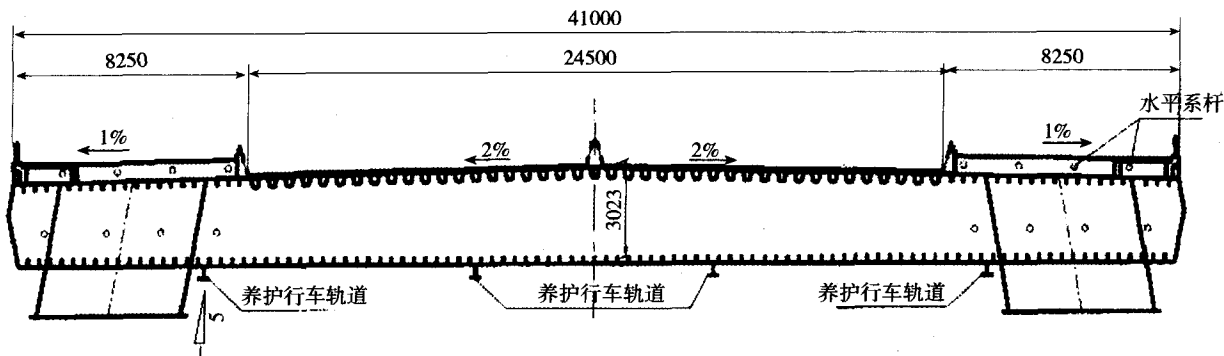


图4 边跨系梁断面

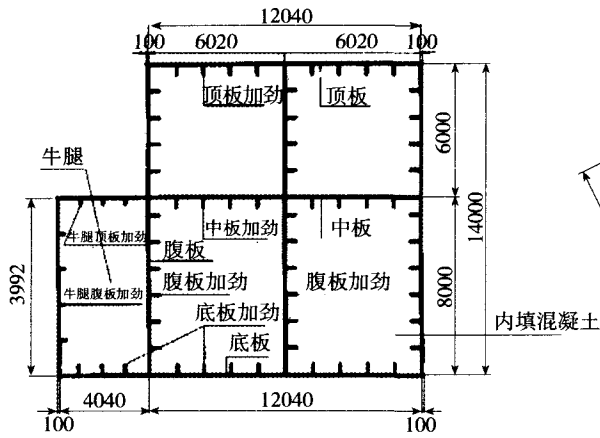


图5 尾端横梁截面

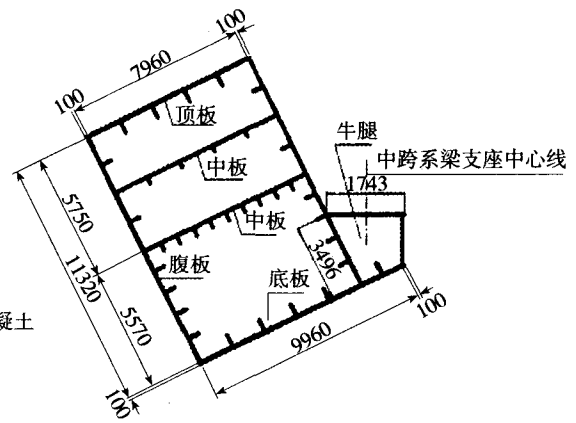


图6 中跨横梁截面

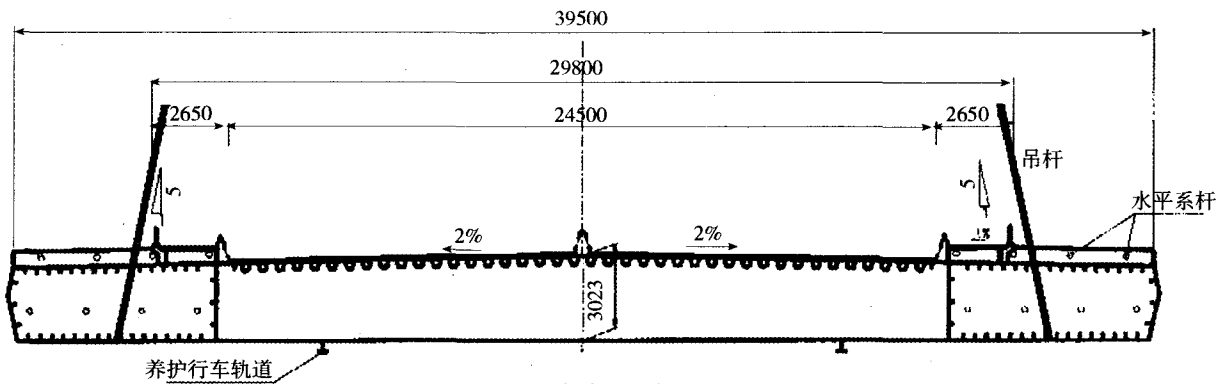


图7 中跨系梁断面

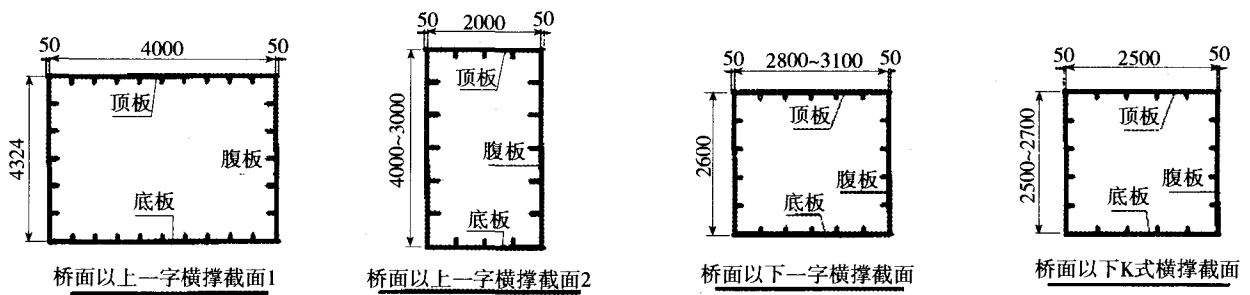


图8 风撑截面形式

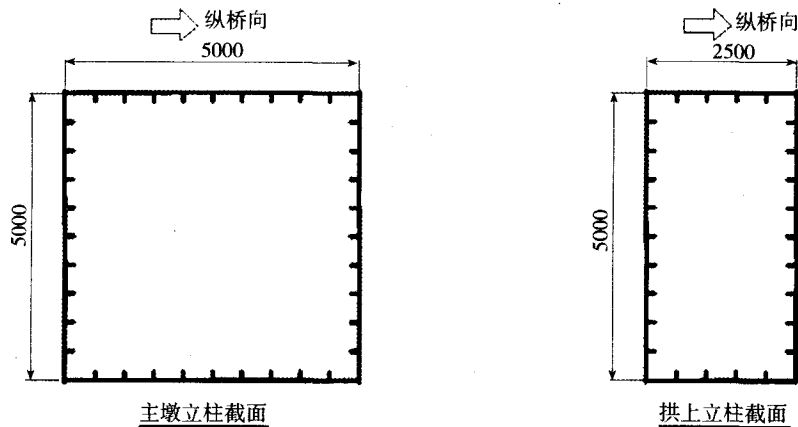


图9 立柱截面形式

5.3.5 吊杆与水平拉索:

中跨吊杆顺桥向间距13.5m,共28对,为双吊杆。吊杆横桥向与拱肋在一个平面内(对倾1:5)。

全桥共有二组水平拉索,布置在两片边拱拱端。每组由8根拉索组成,拉索采用预制平行钢丝索、冷铸锚具。水平拉索的总索力约1.7~1.8万吨,用以平衡中跨拱肋的恒载水平推力。

5.4 基础设计:

5.4.1 主墩:

主墩基础采用 $\phi 900\text{mm}$ 钢管桩,桩尖标高-63.0~-67.0m。钢管桩数量:浦东主墩基础共计118根,浦西主墩基础考虑雪龙港局部加强共计128根。

主墩承台高3.5m。单个承台平面尺寸27.2m(纵桥向) \times 18.4~21.5m(横桥向)。承台横桥向中心距为51m,承台之间通过系梁连结。

5.4.2 地基加固:

为加强主墩基础对上部结构水平力的抵抗能力,并限制主墩在水平力作用下的变形,需对主墩基础的相当范围进行土体加固。

土体加固采用格栅状布置的 $\phi 700$ 水泥土搅拌桩,河向侧采用1000旋喷桩方案,桩桩相连形成整体。

5.4.3 拱座设计:

拱座是中跨、边跨拱肋及大立柱的连接节点,同时又是上部钢结构与下部砗承台的连接节点。拱肋通过拱座传递的垂直分力和水平分力达2~3万吨。施工时拱座还传递大立柱的巨大垂直力。为克服1/5倾斜拱轴线产生的横桥向水平分力而施加的水平预应力也作用在拱座上,作为这些力系交汇点的拱座受力复杂,是设计的关键节点。

拱座设计采用钢砗混合拱座,分上部钢拱座和下部砗拱座,即拱肋中板以上的矩形部分采用钢拱座将中跨与边跨连接,拱肋中板以下的梯形部分通过端板直接作用在砗拱座上。

拱肋的大部分顺桥向水平分力直接通过钢拱座传递相互平衡,垂直分力及不平衡的顺桥向水平分力、弯矩则由钢拱座底板、中跨、边跨拱肋

端板共同作用传递至砗拱座。横桥向水平分力通过承台系梁中的水平拉索平衡锚固在砗拱座上。大立柱的垂直力通过钢拱座传递给砗拱座及承台。

6 卢浦大桥和世界上已建成的大跨径钢拱桥的用钢量指标比较

表1 卢浦大桥与世界部分大跨径钢拱桥用钢量指标比较

	跨度 (m)	桥长 (m)	主拱间距 (m)	钢重 (t)	用钢指标 (t/m^2)
New River Gorge	518.1	923.6	桥宽21.0	15503 (Arch)	1.425
Sydney Harbor	502.9	502.9	48.8	37000	1.508
卢浦大桥	550	756	32.0 (使用桥宽29.8)	34499	1.426 (1.531)

从表1中可以看出,卢浦大桥与世界上已建成的大跨径拱桥相比,用钢量基本相近。这里需要特别说明二点:(1)国外已建成的大跨径拱桥都是建造在岩石地基上的,而卢浦大桥则建造在软土地基上,因此为了平衡拱的水平推力,需额外增加强大的水平拉索锚固和支承构造等的用钢量。(2)随着跨径的增大,即使荷载保持不变,拱的受力(轴力为主)也将同步增大,因而用钢量指标也将呈上升趋势。

7 主桥施工概述

卢浦大桥主桥为全焊钢拱桥,除钢拱合龙段拱肋端口采用一端栓接、一端焊接外,其余拱肋、立柱和桥面加劲梁的现场连接均采用焊接连接。主桥施工方法可以归纳为以下三种不同施工方法的组合。

(1)主桥三角区结构施工主要可以分成以下几个部分:

1)钢拱座和大立柱采用300t履带吊机分段吊装,现场拼装焊接。

2)钢拱肋按不同的安装位置采用了两种施工工艺。a)岸上部分拱肋采用支架法,分别用350t或300t履带吊机分段吊装。b)水上部分拱肋采用扣索法悬臂拼装,用1000吨浮吊大分段吊装。

3)桥面加劲梁根据不同条件用了三种安装方法。a)部分岸上桥面加劲梁用两台300t履带吊

机双机抬吊,并带载行走安装到预设支架上。
b)部分节段桥面加劲梁用浮吊1000t浮吊吊装并利用滑移小车纵向滑移就位。c)其余节段桥面加劲梁则直接用1000吨吊装到位。

4)锚箱及端横梁采用支架法,用350t履带吊机分段吊装,现场拼装焊接。

(2)中跨主拱采用斜拉扣索法施工。通过临时索塔体系,用拱上吊机将拱肋预制节段吊装就位,然后进行拱肋节段连接的现场焊接、安装临时斜拉索,随后拱上吊机前移进行下一节段拱肋的安装。主拱合龙采用自然降温与少量外力顶推相结合的方法成功完成了主拱合龙段的连接。

(3)中跨桥面加劲梁和水平拉索的安装施工借鉴了悬索桥的施工工艺,采用辅助猫道架设超长、超重的水平拉索,并用托架悬挂体系作为施工过程中桥面加劲梁尚未安装到位时水平拉索的临时支承点。中跨桥面加劲梁采用改造后的拱上桥面吊机逐段进行吊装直至桥面加劲梁合龙。在对水平拉索的索力和中跨桥面加劲梁的安装标高进行全面调整后,通过现场焊接完成中跨桥面加劲梁节段的连接。

8 主桥设计施工的关键技术研究

由于本桥的特点和设计施工的需要,有关设计、科研、施工等单位对以下内容进行了科学研究和试验,它对设计和施工起到了指导、验证和保证作用,对确保大桥安全可靠、优质、快速地建成和长期正常运营都具有重要意义。

(1)卢浦大桥拱肋为闭口薄壁钢箱构件。超大跨径拱桥的结构分析需考虑其闭口薄壁结构的特性和几何非线性。“非线性闭口薄壁空间杆件稳定有限元法研究”推导了考虑闭口薄壁结构有轴向力作用的几何非线性分析的微分方程精确解和相应的空间杆件单元刚度矩阵(14*14),为国际首创。其创新点是:1)计算应变时,考虑了正应变、剪应变的线性部分以及正应变的非线性部分,而忽略了计算量大而实际影响并不大的剪应变非线性部分(这点已在后评估中证实)2)在整个结构体系中假定在结点上乌曼斯基意义的 β' 在各杆件连续且相等。据此编制的分析

软件,具有应用的普遍性(当 $\lambda=0$ 与一般经典有限元法结果完全一致,当 $\lambda<0$ 时,可计算悬索桥的非线性内力及自振频率)和很高的非线性收敛速度(一般0.1%精度的非线性迭代3~4次即可到位)。该软件已运用到卢浦大桥的设计中,保证了大桥的总体稳定,是卢浦大桥安全可靠和技术先进的理论基础。

(2)“超大跨径拱桥设计与施工重要节点构造结构计算分析及试验研究”主要内容包括:中跨、边跨钢拱与钢梁连接节点构造。钢拱与拱座连接节点构造等,均在国内外钢拱桥中首次采用。除进行有限元分析外,还进行了规模大、难度高的箱拱节段缩尺模型(1:4)局部稳定加载试验,验证了卢浦大桥箱拱局部稳定失稳的机理和综合安全度,并为今后规范的修订提供了依据。此外,卢浦大桥创新的施工临时斜拉索塔的设计,索塔与大立柱的连接构造,背索连接器的设计与足尺破坏试验,斜拉索与箱拱锚固吊耳的设计与模型的破坏试验等为大桥的施工、安全提供了依据,该设计技术在国内外均属首次,有独创性。

(3)卢浦大桥采用综合三种不同桥型施工工艺的组合施工技术。“超大跨径拱桥施工过程中结构分析及施工控制技术研究”有如下特点:大桥施工过程中结构体系转换多,与一般斜拉桥或悬索桥不同,施工控制需对多项目进行监控。通过该课题的研究,提出了切实可行的优化施工安装顺序和明确合理的安装控制标准。通过施工过程中的监测—反馈—调整控制,大桥中跨拱肋悬臂拼装时采用按预低的拱轴线进行安装、控制,合龙前进行集中调索的方法高精度地实现了理论设计的主拱线型(合龙前实际线型与理论线型相差 $\leq 2\text{cm}$),确保了拱肋的安全合龙,成功地实现超大跨度结构由斜拉体系转换成拱桥体系,大桥成桥状态的受力合理、线型流畅。

(4)卢浦大桥采用全焊箱形钢拱桥,为世界首例。设计制定的全焊钢拱桥的材料、加工、安装、焊接的技术标准和工艺要求等技术文件,

(下转第33页)

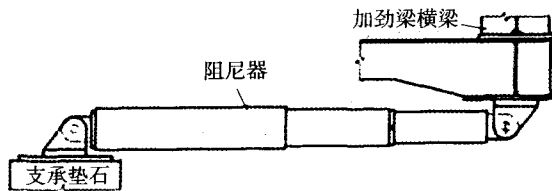


图5 阻尼器安装

5 抗风试验研究及设计验证

本桥在方案设计阶段,根据有关抗风设计规范,按主跨380m,100年重现期理论分析求得颤振检验风速仅为39.1m/s。正因为跨度不大、检验风速不高,设计者认为选开口加劲梁截面是可行的,再辅以气动选型并采用合理的加劲梁支承体系,悬索桥桥跨的抗风安全应有充足保障。

初步设计阶段,又进行了节段模型试验,重点比较了不同的气动外型对颤振临界风速的影响,最终确认加劲梁底不设外凸检查车轨道并改用内置检查走道和梁顶不抬高人行道的结构措施对抗风是有利的,同时定量确定了在加劲梁两侧翼缘设置高度为0.75m的导风裙板并验证了设中央扣(缆结)的必要性。最终,采取上述工程设计对策后,本桥的颤振临界风速达45.4m/s,满足《公

路桥梁抗风设计指南》的结构抗风安全性要求。

6 结语

本桥因采用钢板式加劲梁而有别于目前众多的悬索桥,独具技术特色。对其抗风稳定性能,设计者认真研究和总结了塔科玛大桥事故的经验教训,采取了多项工程设计对策,并经理论计算和风洞模型试验验证其安全性。工程项目的顺利实施表明,采用板式加劲梁结构达到了设计预期的诸多工程优势,取得了较好的工程效益。加劲梁架设见图6,全桥于2004年上半年完工。

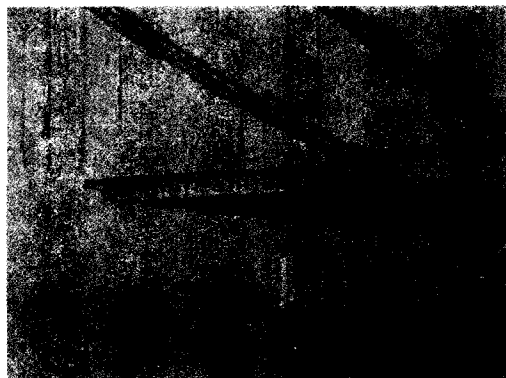


图6 红光桥钢板梁架设

(上接第21页)

填补了空白。水平拉索索长达761m,16根拉索的总索力近2万吨。该水平拉索的设计、构造、加工、安装、张拉等解决了在软土地基中建造超大跨度拱桥的处理方法。

(5) 超大跨径拱桥等效风荷载及抗风稳定研究。上海位于东南沿海地区,夏季受台风直接和间接影响很大,研究主拱结构和钢桥桥面体系在施工阶段和成桥状态的静风稳定问题和风振受力问题是本桥抗风性能研究的关键。

(6) 超大跨径拱桥抗震性能及减震装置研究。主跨达550米的钢拱桥,其抗震设计在我国根本无规范可循。为此对主桥(大跨度系杆拱桥)在地震作用下的性能、薄弱环节的位置及破坏机理等方面的研究是十分必要的。

(7) 虽然国内外已建成的拱桥为我们提供了许多可供借鉴的经验,但本桥在截面形式、构件重量、设备性能、工期要求等方面都与之存在

着较大的差别。主桥钢结构加工和安装施工单位针对本桥构件重量大;安装精度要求高;钢结构现场焊接的工作量大、工期紧、高空焊接条件差;施工过程中体系转换步骤多;长达760米的大吨位超长水平拉索的制作、安装均无先例可查等特点分别进行了大量的专题研究。确保了主桥施工的安全、可靠、顺利。

9 结语

卢浦大桥主桥于2000年10月开始主墩基础的打桩施工;2001年4月开始上部钢结构安装施工;2002年10月主桥中跨主拱顺利合龙。2003年6月28日主桥全面建成通车。卢浦大桥由于采用一系列创新技术,使我国超大跨径拱桥的设计施工水平上了一个新台阶。这些创新技术的研制和成功运用,不仅在本桥的建设过程中体现出巨大的社会和经济效益,还将对今后的超大跨径拱桥建设起到推动和示范作用,为我国跻身世界建桥先进行列作出重要贡献。