

文章编号: 0451-0712(2004)07-0001-11

中图分类号: U442.5

文献标识码: B

苏通大桥总体设计

张喜刚

(中交公路规划设计院 北京市 100010)

摘 要: 简要介绍苏通大桥的项目概况、主要技术标准、项目技术特点和难点、总体设计概况、关键技术问题研究和科研工作等有关情况。

关键词: 苏通大桥; 设计; 科研

1 项目概况

1.1 项目地理位置及主要功能

苏通长江公路大桥(简称“苏通大桥”)位于江苏省东南部长江口南通河段,连接苏州、南通两市,北岸接线始于江苏省公路主骨架“横三”线—宁(南京)通(南通)启(启东)高速公路,与连(连云港)盐(盐

城)通(南通)高速公路相接;南岸接线终于江苏省公路主骨架“连三”线—沿江高速公路太仓至江阴段,与苏(苏州)嘉(嘉兴)杭(杭州)高速公路相接。上游距江阴长江公路大桥约 82 km,下游离长江入海口约 108 km。具体位置见图 1。

苏通大桥是交通部规划的黑龙江嘉荫至福建南

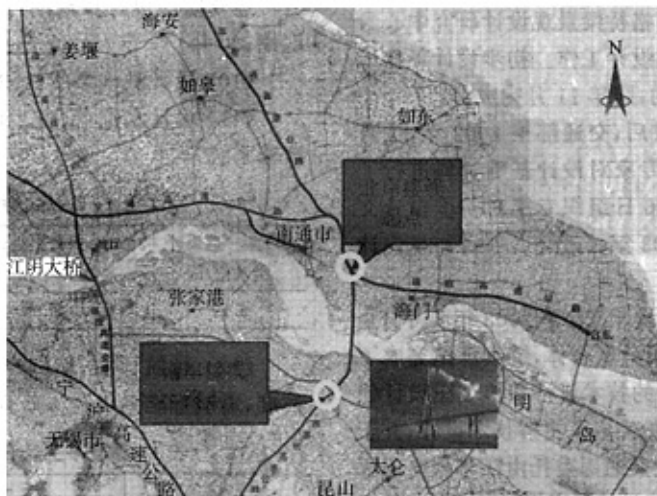


图 1 桥位示意

平国家重点干线公路跨越长江的重要通道,也是江苏省公路主骨架之一赣榆至吴江高速公路的重要组成部分,对于长江两岸干线公路网的形成和连通发挥着重要的作用,在国家及江苏省公路运输网中均占有重要地位。

1.2 前期工作及设计工作概况

苏通大桥前期工作始于 1991 年,并于 1997 年 12 月由中交公路规划设计院、上海市隧道工程轨道交通设计研究院在前期研究成果的基础上正式编制完成了《南通长江公路通道预可行性研究报告》。2001 年 6 月,国家发展计划委员会下达了经国务院批准的项目建议书,苏通大桥项目正式立项。

苏通大桥的工程可行性研究工作始于 1999 年 7 月,2001 年 8 月,经江苏省组织预审后编制完成了工程可行性研究报告并上报。鉴于工可报告推荐主桥方案为主跨超千米的斜拉桥,技术难度较大,编制单位对工程方案又做了进一步深化研究,交通部和江苏省也于 2001 年 12 月邀请国、内外著名桥梁专家在南京召开了“苏通长江公路大桥技术研讨会”,随后通过了交通部行业审查。中国国际工程咨询公司也于 2002 年 2 月初组织专家进行了评估。在国家计委对本项目工程可行性研究报告的审批过程中,设计单位又对主桥桥型方案进行了进一步比较、论证,形成了专题报告。在上述工作基础上,国家发展计划委员会批复了苏通大桥工程可行性研究报告。

2001 年 9~12 月江苏省交通厅组织开展了苏通大桥设计招标、评标工作。以中交公路规划设计院为主体设计单位、江苏省交通规划设计院和同济大学建筑设计研究院为合作参加单位的设计联合体中标,承担苏通大桥的初步设计任务。同时,设计联合体聘请丹麦 COWI 公司承担有关设计咨询审查工作。受设计单位邀请,高格桥梁景观设计研究中心参加了跨江大桥工程景观设计工作。初步设计工作于 2002 年 2 月底全面启动,同年 11 月完成。

初步设计成果完成后,交通部于 2002 年 11 月 27 日~12 月 7 日组织专家对设计基础资料进行了审查,同年 12 月 24~26 日组织专家对初步设计文件进行了全面审查,2003 年 3 月交通部对初步设计进行了批复。

技术设计和施工图设计工作于 2003 年 2 月份全面启动,以初步设计的设计联合体,继续承担完成了苏通大桥跨江大桥部分的技术设计和施工图设计任务。其中,2004 年 1 月份完成了主桥技术设计,并于 2004 年 2 月份通过了受交通部委托由江苏省交通厅组织的专家审查。根据建设计划安排,2003 年 6 月~2004 年 6 月分期分批完成了全部施工图设计工作。

2 主要技术标准

- (1) 公路等级:平原微丘区全封闭双向六车道高速公路。
- (2) 计算行车速度:100 km/h。
- (3) 桥梁结构设计基准期:主桥 100 年,辅桥和引桥 60 年。
- (4) 车辆荷载等级:汽车—超 20 级,挂车—120。
- (5) 桥面净空及标准横断面:桥梁标准宽度

34 m。

- (6) 纵坡:≤3%。
- (7) 横坡:2%。

(8) 抗震设防标准:桥位区地震基本烈度为 VI 度,抗震设防标准见表 1。

表 1 跨江大桥抗震设防标准

桥梁	设防地震概率水平	结构性能要求	结构校核目标
主桥	P1:100 年 10% (重现期 950 年)	主要结构处于正常使用极限状态	主要结构校核应力
	P2: 100 年 4% (重现期 2 450 年)	主要结构处于承载能力极限状态,控制位移或变形	主要结构校核极限承载力或考虑延性校核极限承载力,校核位移和变形
辅桥和引桥	P1:50 年 10% (重现期 475 年)	结构利用延性抗震	主要结构校核极限承载力
	P2: 50 年 2% (重现期 2 475 年)	控制位移或变形	校核位移或变形

(9) 抗风设计标准。

运营阶段设计重现期:100 年;施工阶段设计重现期:30 年。

(10) 设计洪水频率:1/300。

(11) 设计水位:见表 2 (表中高程为 1985 国家高程系统)。

表 2 跨江大桥设计水位

300 年一遇设计 洪水位/m	20 年一遇最高设计 通航水位/m	98%保证率最低设计 通航水位/m
5.29	4.30	-1.46

(12) 通航标准:根据专题研究成果,经交通部批准,通航标准采用表 3 所列值。

表 3 通航净空尺度和通航孔数量

通航孔 名称	航道类型	代表船型	通航净空 尺度/m		通航孔 数量
			净宽	净高	
主通航孔	单孔双 航道	5 万吨级集装箱船 (3 800TEU)	891	62	1
		4.8 万吨级远期大型散货船驳船队			
辅助通航孔	单孔 单航道	9 000 吨级散货船驳船队	220	24	2
专用通航孔	单孔 双航道	7 000 吨级散杂船	220	39	1
洪季上行孔	单孔单 航道	1 000 吨级江轮	70	15	1

(13) 船舶撞击力标准：经船舶撞击力标准专题研究，采用船桥撞损年概率水平为 10^{-4} ，主桥、辅桥（连续刚构桥）、引桥采用的船舶撞击力标准如表 4~表 6。

表 4 主桥船舶撞击力标准

通航孔	桥墩	船撞力/MN	
		横桥向	顺桥向
主桥南边跨	近塔辅助墩	40.60	20.30
	远塔辅助墩	13.30	6.65
	过渡墩	12.00	6.00
主通航孔	南塔墩	126.70	63.35
	北塔墩	130.60	65.30
主桥北边跨	近塔辅助墩	40.60	20.30
	远塔辅助墩	13.19	6.60
	过渡墩	11.91	5.96

表 5 辅桥连续刚构桥船舶撞击力标准

通航孔	桥墩	船撞力/MN	
		横桥向	纵桥向
专用通航孔	南主墩	49.81	24.91
	北主墩	40.93	20.47

表 6 引桥船舶撞击力标准

通航孔	桥墩	船撞力/MN	
		横桥向	纵桥向
北引桥、辅桥 (中引桥)、南引桥	可通航孔墩	2.33	1.165

3 项目技术特点和难点

苏通大桥位于长江口，是江苏省规划建设

江最下游跨江大桥。鉴于长江口特殊的建设条件，苏通大桥采用主跨 1 088 m 的双塔斜拉桥方案，超过了主跨 1 018 m 的香港昂船洲大桥，成为当今世界上在建的最大跨度的斜拉桥。因此，苏通大桥是国内外具有重大影响的一项重要工程，该桥的建设将代表着我国 21 世纪的建桥水平。

苏通大桥的技术特点和难点主要表现在建设条件较为复杂、设计施工技术难度大等方面，在设计、施工中应予以足够重视。

3.1 建设条件的特点和难点

苏通大桥建设条件有 4 大特点和难点，即：气象条件较差、水文条件复杂、基岩埋藏深、通航标准高。

3.2 设计与施工技术特点和难点

苏通大桥设计与施工方面的技术特点和难点主要表现在：

- (1) 主桥超大规模深水基础的设计与施工；
- (2) 主桥超高索塔的设计与施工；
- (3) 主桥长跨和长索的设计与施工。

4 总体设计概况

4.1 初步设计概况

初步设计阶段结合跨径选择与布置，对桥型方案及结构方案均进行了深入研究和比较。

(1) 桥型方案研究与比选。

结合跨径选择与布置，其中主桥重点对斜拉桥方案进行了研究，辅桥专用航道桥重点对梁桥进行了研究，桥型方案的研究与比选情况见表 7。

表 7 桥型方案研究与比选情况

位置	控制条件和因素	桥型方案	推荐方案
主桥	1. 通航要求 2. 技术经济合理性 3. 水文、地质条件 4. 兼顾景观协调	1. $2 \times 100 \text{ m} + 300 \text{ m} + 1\,088 \text{ m} + 300 \text{ m} + 2 \times 100 \text{ m}$ 七跨连续钢箱梁 2. $157 \text{ m} + 312 \text{ m} + 1\,088 \text{ m} + 312 \text{ m} + 157 \text{ m}$ 五跨连续钢箱梁 3. $2 \times 100 \text{ m} + 300 \text{ m} + 1\,088 \text{ m} + 300 \text{ m} + 2 \times 100 \text{ m}$ 七跨连续部分叠合梁 4. $110 \text{ m} + 300 \text{ m} + 1\,088 \text{ m} + 300 \text{ m} + 110 \text{ m}$ 五跨连续混合梁 5. $2 \times 100 \text{ m} + 300 \text{ m} + 1\,088 \text{ m} + 300 \text{ m} + 2 \times 100 \text{ m}$ 七跨连续混合梁	七跨连续钢箱梁
辅桥专用 航道桥	1. 通航要求 2. 技术经济合理性 3. 全桥景观协调	1. $140 \text{ m} + 268 \text{ m} + 140 \text{ m}$ 三跨预应力混凝土连续刚构 2. $140 \text{ m} + 268 \text{ m} + 140 \text{ m}$ 三跨连续钢箱梁	三跨连续钢箱梁
引桥	1. 技术经济合理性 2. 全桥景观协调	1. 深水区采用 75 m 或 100 m 跨径预应力混凝土连续箱梁 2. 陆域和浅水区采用 30 m 和 50 m 跨径预应力混凝土连续箱梁	30 m、50 m、75 m 跨径预应力混凝土连续箱梁

(2) 主桥结构方案研究与比选。

主桥结构方案研究与比选情况见表 8。

4.2 技术设计概况

技术设计认真执行了初步设计批复意见，对关键技术问题通过结构详细设计、计算分析和必要的试验，进行了重点研究。包括：结构体系研究、索塔锚

表 8 主桥结构方案研究与比选情况

结构部位		结构方案	推荐方案
结构体系		纵向全漂浮、纵向设阻尼或弹性约束的半漂浮、塔梁固接、索塔处设竖向支座	纵向设阻尼或弹性约束的半漂浮
主梁	断面外形	不同底板宽度的扁平钢箱梁	底板水平宽度较大的流线型箱梁
	高度	3.5 m、4.0 m、4.5 m、	4.0 m
	顶板 U 肋高度、厚度	高度:280 mm、300 mm,厚度:8 mm、10 mm	高度 300 mm, 厚度 8 mm,局部 10 mm
	纵、横隔板形式	实腹式和桁架式	纵向桁架式(局部实腹式) 横向实腹式
	索梁锚固方式	拉板式、锚管式和锚箱式	锚箱式
	钢箱梁工地连接方式	全焊、全栓和栓焊结合	栓焊结合
索塔	塔形	倒 Y 形、钻石形和 A 形	倒 Y 形
	有无下横梁	有下横梁、无下横梁	有下横梁
	塔柱横断面形式	不同倒角和外形的四种形式	风阻系数和气动性能最好的形式
	材料	钢筋混凝土、全钢、钢混结合	钢筋混凝土
	索塔锚固方式	钢锚箱锚固和预应力锚固	钢锚箱,对预应力再作比较
斜拉索	类型	平行钢丝和平行钢绞线	按平行钢绞线控制设计
	索距	16 m、18 m、16 m 和 20 m 及 14.4 m 和 18 m 组合	标准索距 16 m
	减振措施	气动措施、阻尼减振器、辅助索	气动措施、阻尼减振器
基础		沉井基础;钢沉井和钢筋混凝土沉井 桩基础;钻孔灌注桩、钢管打入桩 围堰形式;双壁钢围堰、锁口钢管桩围堰、钢套箱	钢沉井基础
防撞		VTS 主动防护系统+缓冲消能防撞设施 防撞设施;独立防撞墩、群桩防撞墩、浮体系泊系统、浮式缓冲消能	VTS 主动防护系统+浮式缓冲消能防撞设施

固区构造研究、抗风性能和措施研究、结构合理设计及计算分析、索塔和上部结构施工方案研究、防撞方案研究等。

4.3 施工图设计概况

施工图设计认真执行了初步设计和技术设计批复意见。

4.3.1 总体布置、采用的桥型及结构方案

苏通大桥总体布置为: $[(12 \times 30) + 3 \times (11 \times 50) + (50 + 9 \times 75) + (10 \times 75)]$ m 预应力混凝土连续梁桥 + $(2 \times 100 + 300 + 1\,088 + 300 + 2 \times 100)$ m 钢箱梁斜拉桥 + (5×75) m 预应力混凝土连续梁桥 + $(140 + 268 + 140)$ m 预应力混凝土连续刚构桥 + $3 \times (11 \times 50)$ m 预应力混凝土连续梁桥。不含桥台全长 8 146 m。

苏通大桥各部分采用桥型、结构方案及施工方案见表 9。

4.3.2 结构设计要点

(1) 主桥。

① 总体布置。

主桥为主跨 1 088 m 的双塔双索面斜拉桥,边跨各设置 3 个桥墩,其跨径布置为: $100\text{ m} + 100\text{ m} + 300\text{ m} + 1\,088\text{ m} + 300\text{ m} + 100\text{ m} + 100\text{ m} = 2\,088\text{ m}$ 。

② 结构体系。

索塔与主梁之间仅设置横向抗风支座和纵向具有限位功能的粘滞阻尼器,不设竖向支座。粘滞阻尼器对脉动风、刹车和地震引起的动荷载具有阻尼耗能作用,不约束温度和汽车引起的缓慢位移;当静

表 9 全桥各部分采用的桥型、结构方案及施工方案

项 目			桥型及结构方案	施工方案
主 桥	桥型		七跨连续钢箱梁斜拉桥	
	结构体系		纵向带限位功能阻尼约束	
	基础	主塔	钻孔灌注桩(桩底注浆)	利用钢护筒搭设施工平台钻孔成桩, 并采用套筒浇筑承台
		近塔辅助墩		
		远塔辅助墩及过渡墩		
	主梁		扁平封闭钢箱梁	边跨、索塔区梁段利用大型浮吊吊装, 其余梁段采用桥面吊机垂直起吊, 边跨设置临时墩
	索塔		倒 Y 形塔, RC 结构, 索塔锚固区采用钢锚箱	塔柱用爬模现浇, 钢锚箱采用预制吊装
辅 桥 连续刚构桥	斜拉索		平行钢丝斜拉索	整束吊装、张拉、调整
	桥型		预应力混凝土连续刚构	
	基础	主墩	钻孔灌注桩(桩底注浆)	搭设施工平台钻孔成桩, 并采用套筒浇筑承台
		过渡墩	钻孔灌注桩	搭设施工平台钻孔成桩, 并采用套筒浇筑承台
	墩身		矩形空心墩, RC 结构	爬模现浇
引 桥	主梁		变截面预应力混凝土箱梁	挂篮悬浇
	桥型		预应力混凝土连续梁桥	
	30 m 跨径	基础	钻孔灌注桩	开挖式浇筑承台
		墩身	矩形空心墩, RC 结构	爬模现浇
		主梁	预应力混凝土箱梁	移动支架现浇
	50 m 跨径	基础	钻孔灌注桩	搭设施工平台钻桩, 并采用套筒浇筑承台
		墩身	矩形空心墩, RC 结构	爬模现浇
		主梁	预应力混凝土箱梁	滑模现浇
	75 m 跨径	基础	钻孔灌注桩	搭设施工平台钻桩, 并采用套筒浇筑承台
		墩身	矩形空心墩, RC 结构	爬模现浇
		主梁	预应力混凝土箱梁	采用架桥机预制节段悬拼, 部分体外预应力

风、温度和汽车引起的塔梁相对纵向位移在阻尼器设计行程以内时, 不约束主梁运动, 超出行程时, 对主梁运动产生固定作用。粘滞阻尼器设置于塔、梁之间, 每个索塔处设置 4 个, 全桥共 8 个。

主梁与过渡墩及辅助墩之间设置纵向滑动支座, 并限制横向相对位移。

③主梁。

主梁采用扁平流线形钢箱梁。钢箱梁含风嘴全宽 4 100 cm, 不含风嘴顶板宽 3 540 cm, 底板宽为 900 cm+2 300 cm+900 cm; 中心线处高为 400 cm; 节段标准长度为 1 600 cm, 边跨尾索区节段标准长度为 1 200 cm。

根据受力需要, 顶板在顺桥向不同区段采用了 14~24 mm 不同的厚度, 横桥向靠近外腹板

2 550 mm 范围内采用了 20 mm 及 24 mm 两种厚度, 顶板设置了 8~10 mm 厚的 U 型加劲肋; 底板在顺桥向不同区段采用了 12~24 mm 不同的厚度, 底板设置了 6~8 mm 厚的 U 型加劲肋。

钢箱梁内设置了横隔板, 其标准间距为 400 cm, 根据受力需要, 竖向支承、索塔附近梁段适当加密; 横隔板采用整体式, 由上、下两块板组成, 上、下板熔透对接; 非吊点处横隔板一般为 10 mm 厚, 拉索吊点处横隔板采用变厚度, 即外腹板附近为 16 mm 厚、中间为 12 mm 厚。

钢箱梁内设置两道纵隔板, 除竖向支承区、压重区和索塔附近梁段采用实腹板式外, 余均为桁架式。斜拉索在主梁上的锚固采用锚箱式, 锚箱安装在主梁腹板外侧, 并与其焊成整体。

针对不同结构部位设计提出了不同的防腐涂装要求,并分别提出了不同的防腐设计方案供业主选择。

④斜拉索。

采用 1 770 MPa 平行钢丝斜拉索,最大规格为 PES7-313,单根最大重量为 59 t。斜拉索在钢箱梁上锚固点的标准间距为 1 600 cm,边跨尾索区为 1 200 cm;在塔上锚固点间距为 230~270 cm。斜拉索设计寿命为 50 年,并考虑其可更换性。

斜拉索减振措施的目标是将拉索的最大侧向振幅控制在其长度的 1/1 700 以内,根据对拉索减振的有关专题研究结论,苏通大桥将采用阻尼器、气动措施并用的减振方案。

⑤索塔。

索塔采用倒 Y 形,并在主梁下方设置 1 道下横梁。索塔总高 300.40 m,在桥面以上高度为 230.41 m,高跨比为 0.212。塔柱采用空心箱形断面,上塔柱为对称单箱单室,外型尺寸由 900 cm×800 cm 变化到 1 080 cm×1 740 cm,壁厚在斜拉索锚固面为 100 cm,非锚固面为 120 cm;中、下塔柱为不对称单箱单室断面,外型尺寸由 1 082 cm×650 cm 变化到 1 500 cm×800 cm,壁厚 120 cm、150 cm。

斜拉索在索塔上的锚固,第 1~3 对直接锚固在上塔柱的混凝土底座上,其他用钢锚箱锚固。钢锚箱包裹在上塔柱混凝土中。钢锚箱采用节段制作,节段长 711.8~851.7 cm,宽 240 cm,高 230~355 cm,节段间用高强螺栓连接;钢锚箱与索塔之间侧向接触面用剪力钉连接,最下端支撑于锚固在混凝土顶面的钢底座上。

⑥墩身。

辅助墩与过渡墩均采用普通钢筋混凝土分离式矩形薄壁墩,墩高约 60 m;单幅桥墩平面尺寸为 850 cm×500 cm,标准壁厚为 50 cm;过渡墩顶由于支座布置等构造需要,距墩顶 450 cm 范围内顺桥向两侧各加宽 150 cm,墩顶平面尺寸为 850 cm×800 cm。

⑦基础。

索塔基础有 131 根(另设 4 个备用桩位) D280 cm/D250 cm 钻孔灌注桩(钢护筒内径 280 cm,下同),梅花形布置,主 4 号墩桩长 117 m,主 5 号墩桩长 114 m。承台为哑铃型,在每个塔柱下承台平面尺寸为 5 135 cm×4 810 cm,其厚度由边缘的 500 cm 变化到最厚处的 1 332.4 cm;其顶部与下塔柱中心线垂直,两承台之间用 1 105 cm×

2 810 cm 系梁连接,厚度为 600 cm。

近塔辅助墩基础为 36 根 D280 cm/D250 cm 钻孔灌注桩,行列式布置,主 3 号墩桩长 98 m,主 6 号墩桩长 101 m。承台平面尺寸 5 200 cm×3 250 cm,厚度由边缘的 400 cm 变化到最厚处的 1 030 cm。

远塔辅助墩和过渡墩基础均为 19 根 D280 cm/D250 cm 钻孔灌注桩,梅花形布置;主 1、主 2、主 8 号墩桩长为 108 m,主 7 号墩桩长为 110 m。承台平面尺寸均为 4 320 cm×1 930 cm,厚度由边缘的 400 cm 变化到最厚处的 830 cm。

所有钻孔灌注桩均按摩擦桩设计,并考虑钢护筒与桩基础共同受力。

考虑到苏通大桥的重要性和群桩基础受力不均匀性,为保证基础结构安全可靠,主桥所有桩基础均要求进行桩底注浆,以提高其承载能力、减小和控制沉降、保证结构安全。注浆后的单桩极限承载力值应比压浆前的设计极限承载力值提高 40% 以上,压浆工艺、压浆方法和压浆量等具体实施方案经试桩确定。

⑧防撞措施。

根据有关专题研究成果,主桥基础整体防撞能力满足设防标准要求,不设置以消能为目的的防撞消能设施。为保证高水位时塔柱和墩身能够承受船舶局部撞击力,根据结构自身特点,对可能受撞击区域进行了局部加强。

为保证在低水位条件下钻孔桩不被船舶直接撞击,采取局部加厚封底混凝土并用钢桁架加强其整体性、利用承台施工用钢套筒中浇筑一定高度的仓壁混凝土等措施予以解决。

根据苏通大桥桥位处的航道特点,应在桥位区域设置主动防撞系统,进一步降低大桥受船舶撞击风险,确保大桥和航行安全。

⑨桥面铺装。

行车道桥面铺装为厚度 5.5 cm 的环氧沥青混凝土,检修道铺设厚度 3.0 cm 的塑胶类材料或沥青砂。桥面铺装的材料及施工工艺经专题研究确定。

(2) 辅桥连续刚构桥。

①总体布置。

跨径布置为:140 m+268 m+140 m=548 m,上部结构上下行分幅布置,主墩顶部两幅桥箱梁用横隔梁连接;两主墩与主梁固结,两过渡墩顶设置活动支座(横向靠中央分隔带一侧的支座横向固定,纵桥向活动,远离中央分隔带一侧为多向活动支座)。

②主梁。

主梁采用单箱单室直腹板混凝土结构;箱梁顶宽 1 640 cm,底宽 750 cm;根部梁高 1 500 cm,高跨比为 1/17.9,跨中梁高 450 cm,高跨比为 1/60,梁高按 1.6 次抛物线变化;箱内顶板最小厚度为 32 cm,腹板厚度采用 70 cm、60 cm、50 cm、45 cm 四级变化,底板厚度由 170~32 cm 渐变。

主梁在顶底板纵向、顶板横向、腹板竖向布置了预应力索。顶板纵向预应力束采用在顶板锚固和下弯到腹板下部锚固相结合的方法布置。考虑收缩徐变影响,中跨底板留有部分合拢束在中跨合拢 1 年后或正式竣工验收前的适当时间进行张拉,同时,设置了一定数量的体外预应力钢束作为备用钢束。

为保证腹板竖向预应力的可靠性,设计时用进口精轧螺纹粗钢筋及相应的预应力锚固体系,如果条件允许,可采用在日本已应用成熟的预应力空心钢棒。

③墩身。

主墩墩身采用空心双薄壁混凝土墩,双薄壁墩柱中心线纵桥向间距为 950 cm,高度约 3 500 cm;墩柱平面尺寸 250 cm×750 cm,长边壁厚 60 cm,短边壁厚 80 cm,墩底 200 cm 范围为实心段。过渡墩墩身采用空心混凝土墩,高度 5 000 cm 左右,平面尺寸 400 cm×750 cm,长边壁厚 70 cm,短边壁厚 100 cm,其墩顶及墩底一定范围为实心段。

④基础。

主墩为整体式基础,采用 42 根 D280 cm/D250 cm 钻孔灌注桩基础,梅花形布置;北主墩桩长为 104.3 m,南主墩桩长为 115.3 m。承台平面尺寸 4 960 cm×3 320 cm,厚度为 700 cm。

过渡墩为分离式基础,采用 9 根(一幅桥) D180 cm 钻孔灌注桩基础,行列式布置。桩长 110 m,承台平面尺寸 1 400 cm×1 400 cm,厚度 400 cm。

所有钻孔灌注桩均按摩擦桩设计,主墩钻孔桩基础应进行桩底注浆以改善受力性能,提高桩基承载能力和基础的整体刚度。

(3) 引桥。

①30 m 跨径连续梁桥。

采用 12 孔一联跨径 30 m 预应力混凝土等截面连续箱梁,上下行分幅布置,单箱单室斜腹板断面;箱梁顶宽 16.4 m,底宽 7.5 m;梁高 1.8 m;箱内顶板最小厚度 0.25 m,腹板标准厚度 0.4 m,底板标准厚度 0.25 m;箱梁在墩顶截面设 1.2 m 厚中横梁,梁端设 1.0 m 厚端横梁。

箱梁为双向预应力混凝土结构,除布置纵向预应力束外,在桥面板内设置了横向预应力束。

下部结构上下行分幅布置,采用矩形薄壁墩身,并设置装饰性凹槽,截面尺寸除 12 号过渡墩为 750 cm×290 cm 外,其他均为 750 cm×140 cm;采用矩形分离式承台,顶面位于地面以下 10 cm,平面尺寸为 850 cm×520 cm,厚度除 12 号过渡墩为 250 cm 外,其他均为 200 cm;基础采用 4D120 cm 钻孔灌注桩,按摩擦桩设计,桩长 66.3~71.5 m;采用埋置式桥台,单幅桥设置 3D150 cm 钻孔灌注桩,按摩擦桩设计,桩长约 56 m。

②50 m 跨径连续梁桥。

北引桥和南引桥 50 m 跨径预应力混凝土等截面连续箱梁各有 33 孔,分成 3 联,每联 11 孔,上下行分幅布置,单箱单室斜腹板断面;箱梁顶宽 16.4 m,底宽 6.5 m;梁高 2.8 m;箱内顶板最小厚度 0.25 m,腹板标准厚度 0.5 m,底板标准厚度 0.25 m;箱梁在墩顶截面设 1.2 m 厚中横梁,梁端设 1.0 m 厚端横梁。

箱梁为双向预应力混凝土结构,除布置纵向预应力束外,在桥面板内设置了横向预应力束。

下部结构上下行分幅布置。采用矩形薄壁墩身,横桥向宽为 650 cm,纵桥向厚根据墩受力不同分别为 250 cm、290 cm、320 cm、340 cm,离岸较近的墩设置了装饰性凹槽;采用矩形分离式承台,岸上承台顶面位于地面以下 10 cm,水中承台顶面标高确定原则为:最低通航设计水位时,桩头不露出水面。根据不同受力,采用 5D150 cm 或 6D150 cm 钻孔灌注桩基础,按摩擦桩设计,桩长约 70 m。

③75 m 跨径连续梁桥。

北引桥 75 m 跨分两联,跨径布置为:50 m+9×75 m 和 10×75 m;辅桥 75 m 跨共 1 联,跨径布置为:5×75 m,为预应力混凝土等截面连续箱梁,采用上下行分幅布置,单箱单室斜腹板断面;箱梁顶板宽 16.4 m,底板宽 6.5 m;腹板厚度从 90 cm 变化至 40 cm;顶底板厚度均为 25 cm;翼缘长 3.95 m;梁高 4 m;在墩顶设 3 m 厚中横梁,梁端设端横梁,其余部位均不设横隔梁。

箱梁为双向预应力混凝土结构,除布置纵向预应力束外,在桥面板内设置了横向预应力束。纵向预应力采用体内体外相结合的方式布置。上部结构采用节段预制、架桥机悬拼工法进行施工,箱梁为预制结构,采用密齿型剪力键,环氧树脂接缝,转向块采

用横梁式。

下部结构上下行分幅布置。采用矩形薄壁墩身,横桥向宽为 650 cm,纵桥向厚根据墩受力不同分别为 420 cm、450 cm;采用矩形分离式承台,平面尺寸为 1 100 cm×1 200 cm 和 1 200 cm×1 200 cm 两种,顶面标高确定原则为:最低通航设计水位时,桩头不露出水面。根据不同受力,采用 8D180 cm 或 9D180 cm 钻孔灌注桩基础,按摩擦桩设计,桩长约 90 m。

(4) 桥面系及附属工程。

① 护栏。

主桥外侧和中央护栏均采用金属梁柱式护栏。其他部分桥面外侧防撞护栏采用组合式护栏,中央护栏采用金属梁柱式护栏。防撞等级为 PL3 级。

② 桥面铺装。

主桥行车道桥面铺装为厚度 5.5 cm 的环氧沥青混凝土,检修道铺设厚度 3.0 cm 的塑胶类材料或沥青砂。桥面铺装的材料及施工工艺应通过专题研究确定。其他部分桥面铺装由 8 cm 厚 SMA-13 沥青混凝土和 5 cm 厚防水混凝土调平层组成,沥青混凝土和防水混凝土所用的原材料、配合比、性能、工艺等应进行全面试验研究后择优选用。

③ 伸缩缝。

均采用模数式伸缩缝,规格为 D160、D480、D560、D640。主桥南北两端各设伸缩缝一道,其不受约束的伸缩量为 ± 1.3 m。

④ 支座。

支座采用带剪力销的减震型球形钢支座。在海洋大气腐蚀环境下正常使用寿命不小于 50 年,支座应设置内置式调高结构便于维护和更换,同时具有可靠的密封装置。

⑤ 检查车。

主桥共设 8 台检查车,除主跨设 2 台外,其他每跨各设 1 台。根据主梁结构形式,采用悬挂式吊车方案,轨道设在钢箱梁底板上。桥梁检查车主要由桁架和驱动机构所组成。

⑥ 塔内爬梯和电梯。

索塔上、下游塔柱内侧自标高 15.6 m 至中横梁 225.9 m 设置了检修爬梯及检修平台,上塔柱在钢锚箱两侧设置了不同形式的爬梯直接通向塔顶,便于对塔身内壁结构和钢锚箱进行监测、检查、维护等工作。此外,索塔上、下塔柱内设置了检修电梯。

⑦ 检修平台。

为便于支座、伸缩缝及箱梁维护检查方便,在每

联之间过渡墩顶均设置了钢制检修平台。

⑧ 其他。

主桥钢箱梁内和索塔上塔柱钢锚箱区段,均设置了除湿系统。除较完善的交通工程及附属设施外,大桥还考虑了景观照明和桥梁健康监测系统。

5 关键技术问题研究

针对苏通大桥建设条件、设计与施工方面的特点和难点,开展了大量的关键技术问题研究。

5.1 关于建设条件

针对苏通大桥建设条件的特点和难点,通过大量的资料调查和建设条件方面的专题研究,摸清其特点,掌握可靠的数据,为设计、施工提供准确的资料。几年来组织进行了近 30 项专题研究,取得了大量成果。设计、施工中,注意认真分析、理解建设条件,进行结构设计、优化和比较,以保证设计与施工方案安全、可靠、合理。

5.2 关于设计与施工

(1) 主桥超大规模深水基础的设计与施工。

① 软弱土层条件下超长桩的承载力和提高承载力的有效措施研究。

结合地质详勘工作、试桩工作和有关资料调研分析,对有关设计参数合理分析和确定,结合试桩和理论分析,合理确定桩基承载力和提高承载力的有效措施,进行桩底注浆工艺研究、试验和设计等。

② 大规模超长群桩基础的受力特性研究。

采用考虑桩土共同作用的数值模拟计算分析方法和离心物理模型试验方法进行研究,为设计提供参考依据。

③ 超长钻孔灌注桩施工工艺研究。

结合地质详勘工作、试桩工作和有关资料调研分析,合理确定和验证超长钻孔灌注桩施工工艺,制定专门的工艺规定,保证施工质量和承载力要求。

④ 基础防冲刷研究。

结合设计和施工,进行桥墩局部冲刷防护工程试验研究,进行专门的防护工程设计并组织实施,减少和控制冲刷影响。

(2) 主桥超高索塔的设计与施工。

① 钢锚箱设计及制造、安装。

苏通大桥索塔锚固方式采用钢锚箱结构,经研究技术上是可行的,但由于国内首次采用,设计施工经验尚显不足。为此,除进一步加强结构设计、计算分析及工艺研究外,尚需配合开展模型试验研究,同时和

丹麦 COWI 公司加强技术交流和开展咨询审查。

②超高索塔施工阶段抗风问题。

随着索塔高度的增加,其抗风稳定性问题越来越突出,主要表现在索塔独立阶段存在风致振动问题和施工阶段的稳定性问题。

在风致振动方面,苏通大桥索塔采用钢筋混凝土结构,自重较大,空气动力稳定性要好于钢塔,通过风洞试验进行了专题研究和检验。在桥面架设阶段,通过计算分析进行对比,在适当位置设置临时墩,减少主梁架设时的双悬臂长度,确保索塔施工期安全。

③超高索塔的施工。

目前国内斜拉桥最高混凝土塔的施工经验是南京二桥,高度接近 200 m。国外斜拉桥最高混凝土塔有法国的 Normandy 桥,索塔高度为 203 m,悬索桥最高混凝土塔有丹麦的大带桥东桥,索塔高度为 254 m。苏通大桥混凝土塔高 300 m,施工难度相对较大,其主要施工技术难点有:索塔的施工控制、索塔施工的模板系统和支架结构形式、主塔混凝土施工工艺、关键施工设备的技术要求等,经过研究技术上均是可行的,并提出了指导性解决方案。

(3) 主桥上部结构的设计与施工。

①主桥结构体系研究。

对纵向全飘浮、索塔处设竖向支座、索塔处设纵向弹性约束和塔梁固结等不同结构体系进行了分析比较,经过调研、分析、比较,苏通大桥采用的结构体系为:索塔与主梁之间仅设置横向抗风支座和纵向带限位功能的粘滞阻尼器($F=CV^2$),不设竖向支座。粘滞阻尼器对脉动风、刹车和地震引起的动荷载具有阻尼耗能作用,而对温度和汽车引起的缓慢位移无约束。当由静风、温度和汽车引起的塔梁相对纵向位移在阻尼器设计行程以内时,不约束主梁运动;超出行程时,对主梁运动产生约束作用。

主梁与过渡墩及辅助墩之间设置纵向滑动支座,并限制横向相对运动。

②主桥千米级斜拉桥非线性问题。

进行了专题分析研究,结果表明苏通大桥综合效应下非线性对结构应力的影响程度在 10~15% 左右,这表明千米级斜拉桥设计利用现有设计手段控制结构安全度是可行的,结构设计完全可以控制在安全范围之内。但在施工阶段非线性因素对结构变形和索力的影响仍应引起充分重视,应按照非线性理论进行详细分析和施工控制。

为保证设计结果的可靠性和施工控制的准确

性,设计中一方面引进了专门的计算分析程序进行计算(如奥地利 TDV 公司的 RM2000 软件和韩国 MIDAS 的 MIDAS 软件等),并采用不同程序相互校核;另一方面也委托国外有类似工程经验的设计咨询审查单位如丹麦 COWI 公司等,采用不同的程序和方法进行复核算。

③主桥施工和运营阶段抗风稳定性问题。

苏通大桥抗风稳定性问题是决定苏通大桥安全的关键因素之一,设计中通过采用国际上最先进的数值风洞模拟计算方法,对索塔、斜拉索和钢箱梁断面进行选型比较,尽量降低结构的风阻系数,减小风荷载,并通过数值风洞进行详细模拟计算分析,建立节段模型(包括大比例高雷诺数节段模型)和全桥模型进行风洞试验,验证施工和成桥阶段各种不利工况下的静力、动力稳定性和风荷载参数。

结构上还采取构造措施提高抗风稳定性,如在主梁上安装导流板,施工过程中设置临时墩等,这些措施都已在国内外大跨径斜拉桥上应用,被证明是行之有效的方法。根据研究和分析,苏通大桥主桥的抗风稳定性均能保证,抗风性能很好,具有较高的安全度。

④主桥上部结构架设问题。

苏通大桥主桥桥面高度在水面 70 m 以上,单块重量达 420 t,对施工设备有较高要求。施工周期长,尤其是最大单悬臂长度达 540 m,施工风险相对较大。由于存在一定的非线性影响,主梁架设过程中索力与线形控制也是需要重点研究的问题。

设计中充分调研了国内外已有的设备,研究了多种施工方案,提出了合理可行的指导性施工方案和施工设备技术要求。对于主桥长悬臂主梁施工架设,首先在工期安排上应避免在大风季节进行施工;还可通过改进钢箱梁连接方式、采用双悬臂吊机、提前合拢边跨、改进上部结构安装工艺等方法,加快钢箱梁安装速度,并用设置临时墩、桥面阻尼器等方法来降低长悬臂施工难度和风险。通过上述几种措施,可保证在台风季节来临前或避开台风季节影响完成主桥钢箱梁的合拢,规避施工风险。

对于主梁安装过程的施工控制问题,应将设计与施工控制紧密结合,采用非线性分析专用程序,并采用多种程序进行校核,保证结果的可靠性。通过反复分析,摸清施工过程中的内力和变形特点,并进行有效的适时施工监控。

⑤主桥施工和运营阶段斜拉索的减振问题。

斜拉索振动直接影响到桥梁的使用性和安全

性,在国内外已经受到普遍重视,并已研制开发了多种行之有效的减振方法和产品,如对拉索外套管进行表面处理、安装各种类型外置和内置阻尼器、安装辅助索等。设计阶段结合理论分析研究和风洞试验对斜拉索的减振措施进行了研究,苏通大桥采用综合的减振方案,即索端阻尼器、气动措施并用的方案,并通过国内外有关产品的性能试验、参数分析等,提出了设计方案和技术参数要求。苏通大桥力争利用世界上最先进的技术,通过采取国内研究和国外引进相结合等措施,使本桥斜拉索减振问题解决

方案能够达到国际先进水平。

6 科研工作

依据确定的桥型及结构方案,考虑到苏通大桥的技术难度,为保证设计质量和深度要求,并超前考虑施工等需要,按照“内容满足要求、时间适当超前、技术必须领先”的原则,在初步设计阶段开展 10 项科研工作的基础上,技术设计和施工图设计阶段继续开展了 21 项科研工作,与设计有关的主要科研项目见表 10 所示。

表 10 与设计有关的主要科研项目

序号	分类	项目名称	主要工作内容	承担单位
1	结构抗风稳定性分析及试验研究	结构抗风性能分析与试验研究	1. 主桥成桥和施工状态的抗风稳定性和抗风安全措施研究,各种气动参数的识别,涡振和风荷载研究; 2. 专用航道桥最大悬臂状态的抗风安全; 3. 进行风洞试验。	同济大学
2		主桥主梁断面高雷诺数下三分力及涡激共振风洞试验研究	1. 进行主梁断面大比例、高雷诺数下风洞试验,研究涡激共振问题; 2. 测量高雷诺数下主梁断面三分力系数,提供准确可靠的风荷载系数。	同济大学 中国空气动力研究与发展中心低速所
3		主桥斜拉索风/雨激振、测力和阻尼器实索减振优化试验研究	1. 无气动措施斜拉索风/雨激振的机理研究; 2. 表面凹坑和螺旋线气动措施减振效果的比较; 3. 对各种直径斜拉索的螺旋线气动措施设计参数优化; 4. 斜拉索顺桥向风荷载计算方法研究。	同济大学
4		主桥超长斜拉索的振动和减振研究	1. 研究斜拉索的振动机理; 2. 提出减振措施。	同济大学
5		主桥风环境对行车安全的影响	1. 汽车行驶安全性分析和桥面安全临界风速; 2. 桥梁结构对桥面风环境影响; 3. 安全措施研究。	同济大学
6	结构抗震性能研究	设计地震动参数研究	各种地震重现期下地震动参数的分析研究	江苏省地震工程研究院
7		结构抗震性能分析研究	研究结构抗震性能,提出结构地震反应和抗震对策,进行抗震安全性评价。	同济大学
8	塔、梁关键构造模型试验研究	主桥索梁锚固区静载和疲劳试验研究	1. 静载试验:研究锚固区在静力荷载作用下受力状况、承载能力及安全储备; 2. 疲劳试验:研究锚固区在疲劳荷载作用下受力状况、承载能力及安全储备。	西南交通大学
9		索塔锚固区受力机理分析研究	1. 研究钢锚箱结构的受力特点,通过数值模拟分析计算研究结构受力状况和安全度; 2. 通过构件试验,研究剪力钉的受力变形性能和机理。	同济大学

续表

序号	分类	项目名称	主要工作内容	承担单位
10	塔、梁关键构造模型试验研究	主桥索塔锚固区足尺模型试验研究	1. 研究锚固区受力状况、承载能力及安全储备; 2. 研究有关施工工艺等。	同济大学 东南大学
11		主桥扁平钢箱梁局部模型试验	1. 研究钢箱梁 U 肋加劲桥面板的极限承载力; 2. 研究钢梁外腹板的极限承载力; 3. 研究钢箱梁横隔板的极限承载力。	同济大学
12	主桥结构受力特性分析研究	主桥静力稳定性分析研究	结构静力稳定性分析与评价	同济大学 西南交通大学
13		主桥非线性影响分析研究	结构非线性影响分析研究	同济大学
14		主桥钢箱梁合理结构及受力特性研究	研究主梁及钢箱面板结构受力特性及安全度,提出构造优化建议	同济大学
15	辅桥连续刚构桥设计计算分析及试验研究	辅桥连续刚构桥箱梁截面抗剪设计方法和空间受力特性研究	1. 抗剪配筋设计方法研究; 2. 箱梁结构应力分布研究、箱梁零号块和预应力锚固区局部空间应力分析	同济大学
16		辅桥连续刚构桥全桥仿真计算分析	1. 分析施工阶段及运行阶段各不利荷载工况下主梁截面三维应力状态分布及效应; 2. 对预应力混凝土连续刚构桥受力性能进行评价。	浙江大学
17		辅桥连续刚构桥混凝土收缩徐变规律参数试验研究	1. 研究混凝土收缩徐变参数和收缩徐变规律; 2. 研究收缩徐变计算方法。	东南大学
18	引桥设计方法的研究	引桥体外预应力技术应用研究	1. 研究体外预应力设计方法; 2. 研究体外预应力体系应用、构造设计等。	同济大学
19	基础防撞	基础防撞研究	1. 基础防撞方案比选; 2. 浮式缓冲消能防撞设施设计; 3. 船舶撞击效应分析。	上海船研所 同济大学
20	基础与土体共同作用受力特性的研究	主桥索塔群桩基础与土体共同作用数值模拟分析研究	通过数值模拟分析,研究基础与土体共同作用的受力特性	河海大学 同济大学
21		主桥索塔群桩基础与土体共同作用离心模型试验研究	通过离心模型试验,研究基础与土体共同作用的受力特性	南京水利科学研究院

为提高科研成果质量,在业主的组织领导下,在设计策划阶段就对科研工作进行了全面规划、提出了研究内容和技术要求。在项目实施阶段设计项目组对各项目进行全过程的质量管理,包括:通过招标或议标确定项目承担单位;直接参与项目管理、指导与配合;对重要的项目专门委托监控和监理单位对研究过程进行质量控制;实行对实施大纲、实施细则、外业工作、中间成果、正式成果进行严格的审查验收制度等。通过上述措施,对提高科研成果质量起到较好的控制作用和效果。其中如“主桥主梁断面高雷诺数下三分力及涡激共振风洞试验研究”和“主桥斜拉索风/雨激振、测力试验研究”,业主还另行委托丹麦 COWI 公司进行了对比试验研究。

7 结语

苏通大桥建设条件复杂、技术难度大、设计工作涉及方面多、协调任务重、周期短、任务艰巨。为完成好设计任务,设计联合体专门成立了“苏通长江公路大桥设计项目组”。设计项目组于 2002 年 1 月份组建并启动工作,2002 年 1 月~2004 年 7 月设计项目组现场集中办公,历时两年半,先后顺利地完成了初步设计、技术设计和全桥施工图设计工作,并在各个完成的设计成果审查阶段受到了交通部、江苏省交通厅、业主和国内外专家的好评。总体上来看,苏通大桥设计阶段的工作取得了圆满成功。