



# 天津安阳桥设计关键技术研究

韩振勇 张振学 崔志刚

(天津城建集团有限公司 天津 300050)

**摘要:**天津海河安阳桥桥梁建筑艺术独特,是滨海新区中心商务区的新地标,是桥梁艺术与桥梁结构完美结合的精品。安阳桥为软土地基上大跨度空间钢网拱桥,在安阳桥的设计中遇到了一系列的技术难题,这些技术难题的解决为其他类似桥梁工程提供经验和参考。

**关键词:**空间钢网拱桥 大吨位铸件

## 1 简介

安阳桥位于天津市滨海新区中心商务区,中心商务区是滨海新区的核心区,是天津滨海新区发展国际金融、国际贸易和高端服务业的聚集区,是滨海新区金融改革创新基地和未来城市形象标志区。安阳桥东连于家堡金融区,西接响螺湾商务区,安阳桥的设计将是世界上独一无二的桥梁建筑与桥梁结构完美结合的精品。安阳桥不仅将是中心商务区的新地标,也是中心商务区的点睛之笔。

安阳桥主桥为空间大跨度钢网拱桥,跨径布置为 $20\text{m}+22\text{m}+220\text{m}+22\text{m}+20\text{m}=304\text{m}$ ,矢跨比1/5.5,双向六车道,两侧各2.5m人行道。安阳桥主拱为双轴对称的空间钢网拱结构,拱高40m,主梁为钢主梁,宽32.4~40.5m,高2.3m;在主跨,分左右两幅,为两次梁结构,左右两幅用横隔梁相连,间距8m;在边跨,为整体正交异性钢箱梁。如图1~3所示。

安阳桥为城市景观桥,与常规桥梁有所不同。安阳桥在整体桥梁结构体系布置、空间钢网主拱设计、超大吨位铸钢件设计、复杂关键节点受力分析中遇到了一系列的技术难题。针对桥梁结构的强度、刚度和稳定问题,进行了大量的计算、比选和研讨工作;针对钢结构的加工、运输、安装问题,向钢结构加工厂、施工单位钢结构专家请教,并多次召开专题评审会议、专家讨论会议;针对铸钢的设计、铸造、运输、吊装、焊接,进行的大量的市场调研,并与国内多家著名铸钢厂家进行结合,多次召开铸钢专题评审会议。



图1 滨海新区功能规划图



图2 安阳桥桥位示意图

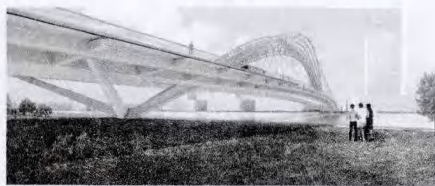


图3 安阳桥效果图

## 2 空间钢网拱桥整体结构关键技术问题

### 2.1 软土地基上大跨度拱桥水平力的处理

安阳桥为空间钢网拱桥,与普通拱桥一样,拱桥的水平推力是设计必须考虑的问题。安阳桥

主跨跨径220m, 矢跨比为1/5.5, 矢跨比较小, 在弹性组合作用下, 主拱的水平分力为9000t。安阳桥场地为软土地基, 在软土地基上抵抗如此巨大水平力, 难以实现。

对于拱桥的水平力问题, 常规的做法是通过加拉杆直接承受水平力。如果在拱脚处直接加拉杆, 拉杆将影响通航净空, 这需抬高拱脚标高, 桥面标高将大幅增高, 增加引桥长度, 河道两岸的路网也难于与本桥相连。如果在主梁内加设拉杆平衡水平推力, 但在活载和整体升降温作用下, 主拱也有4000t的水平力, 不易实现。

为了解决水平力的问题, 安阳桥在拱脚处设置支座, 形成中承式梁拱结构, 一个拱脚墩为固定墩, 其余为顺桥向滑动墩, 释放了桥梁在恒载、活载和整体温度作用下的水平力。然而, 在地震作用下, 拱脚固定墩的反力为6000t, 这对本桥抗震极为不利, 固定墩基础难以实现, 因此, 在安阳桥拱脚墩位采用减隔震支座, 解决了软土地基上大跨度空间拱桥水平力的技术难题, 如图4所示。



图4 拱脚设置减隔震支座

## 2.2 拱梁刚度匹配关键技术问题

安阳桥为空间钢网拱桥, 在安阳桥方案中, 主拱和梁是分离的, 只有反向斜撑与梁是直接连接的, 拱梁之间的连接仅通过吊杆连接。在设计中发现, 由于拱梁之间没有连接, 主拱的跨度为两拱脚的距离, 主梁的跨度为反斜撑顶点之间的距离, 拱梁刚度弱, 整体刚性差, 拱梁之间的“结合度”不足够饱满, 设计不易满足规范要求。如果拱梁之间是铰接, 拱梁构件在连接处只有轴力和剪力突变, 没有弯矩突变, 拱梁的应力相对较小, 计算容易模拟, 但构造难于实现。针对拱梁之间的连接形式, 通过反复计算、对比、总结, 最后确定为拱梁刚接的形式。

常规拱桥主拱为一刚性构件, 拱构件本身具有很强的刚度和良好的整体性, 而安阳桥主拱为空间钢网拱结构, 由14条小拱通过间距8m的拱间横向连梁连接而成, 主拱的整体性和刚度相对较弱。安阳桥主梁为主次梁梁格体系, 其刚度和整

体性较整体正交异性钢箱梁差, 且跨度为220m的大跨径桥梁, 本桥拱梁的刚度匹配是设计面临的一个技术难题。如果增加梁的高度, 梁的刚度增加, 自重的影响有可能较大, 有可能要调整小拱的高度或拱轴线的高度, 调整好主拱后又可能要调整梁的高度。在拱梁刚度匹配设计中, 通过大量的试算、调整, 找到了合理的匹配刚度。最后, 通过吊杆内力调整, 使得整体结构的受力更加合理, 见图5。

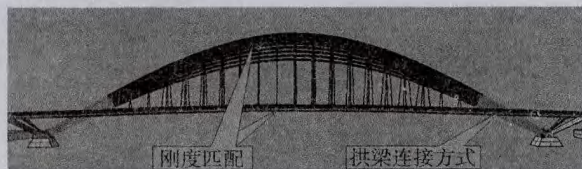


图5 拱梁的连接方式和刚度匹配

## 2.3 空间钢网拱桥面外稳定的问题

在安阳桥桥梁结构中, 空间主拱在拱脚与三道反向斜撑交汇于一点, 并通过铸钢将这四根杆件连接于一点, 铸钢与下部结构的墩柱并不是刚接, 而是支座连接, 形成简支连梁的结构形式。桥梁上部结构在拱脚主墩的支撑为一个点支撑, 因此, 本桥的面外稳定是一个控制性的关键问题。主拱的面外稳定是靠主拱与主梁的拉杆, 即主梁的抗扭刚度, 而主梁的抗扭需要一个强有力的约束。所以, 横桥向布置的四个拉杆是本桥稳定的关键点, 见图6、图7。

另外, 由于主拱拱脚在横桥向仅为一个支撑点, 在活载偏载作用下, 本桥的拱脚墩位和边跨有较大的横桥向水平力, 这也是常规桥梁设计不曾出现的问题, 在设计中应增加适当的构造措施。

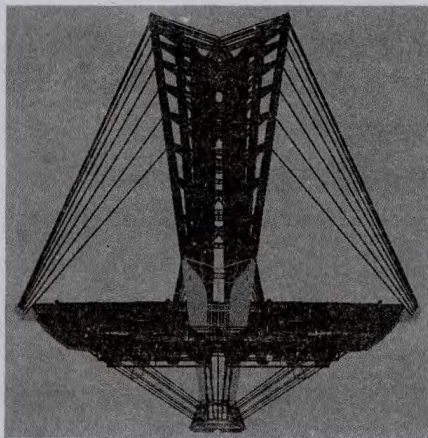


图6 桥梁不设置拉杆

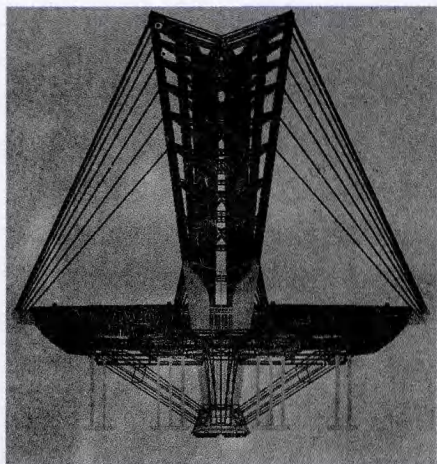


图7 桥下设置4根拉杆

### 3 空间钢网拱桥关键构件的技术问题

#### 3.1 空间主拱设计的关键问题

安阳桥主拱不是常规概念上的主拱，而是一束沿桥纵向布置的钢拱网，它既保证了桥梁良好的通透性，而又在不同的角度呈现出多姿多彩的形态。安阳桥为城市景观桥，安阳桥主拱轴线的线形为艺术独创，与合理拱轴线有一定的差异，主拱的受力特点应引起设计的重视。为了体现建筑创意和主拱的通透性，截面的外形尺寸不得随意更改，在主拱的设计中，为此进行了大量的计算、对比和讨论工作，使得主拱的强度、刚度满足规范要求。

安阳桥主拱空间尺寸较小，空间交汇杆件较多，各杆件相对较短，主拱分段的对接焊缝就有14个箱形截面的56条焊缝。主拱设计不仅是考虑构件的强度、刚度、稳定，更是考虑主拱的加工、分段、运输、吊装、焊接等施工工艺问题。因此，在设计中多次向钢结构加工厂、施工行业的钢结构专家请教，并多次召开专题评审会议。另外，为了减少主拱分段施工的现场焊接量，根据吊装能力，主拱的分段应尽可能长；根据主拱阶段重量和现场吊装高度，主拱的分段并不是每段长度都相等，而是最大限度的减少焊接工作量。

在主拱与桥面相连的附近，14条小拱变成一个钢拱箱，为了实现拱的通透性，建筑设计要求拱箱尽可能的短；为了在施工中能实现，要求其空间应足够大，拱箱尽可能长一些；拱箱位置的确定，也是建筑和结构争论的焦点。另外，在小拱变拱箱处，由于主拱刚度的突变而引起应力集

中，此处的构造处理和措施也是设计与施工反复讨论的问题，如图8，图9所示。

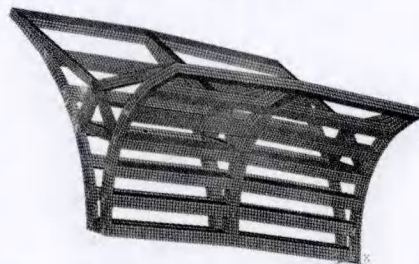


图8 空间拱有限元模型

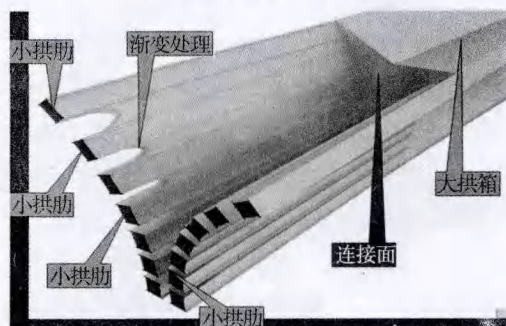


图9 小拱变拱箱连接

#### 3.2 大吨位铸钢件的设计关键技术

在安阳桥主拱拱脚处，主拱与三道反向斜撑通过铸钢件直接相连，铸钢件不仅主拱传来的巨大内力，还承受着三道反斜撑传来的内力，铸钢件是本桥的关键受力点之一。本桥的铸钢设计开创了大吨位铸件在桥梁结构中应用的先河，国内也没有相应的规范和经验可供参考。铸钢的设计不仅是满足强度、刚度的要求，而是有更多的实际问题需要考虑，如超大吨位铸钢构件铸造工艺问题，超大吨位铸钢的运输、现场起吊、安装问题，桥梁用焊接铸钢材质的分析和选择问题，桥梁用铸钢与桥梁用结构钢焊接工艺及质量控制问题，桥梁用铸钢与桥梁用钢焊缝的疲劳问题，铸钢构件的防腐等一系列问题，如图10，图11所示。

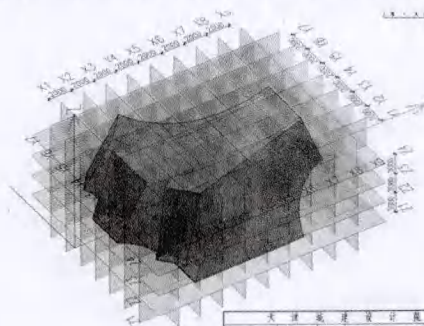


图10 铸钢设计图



图11 铸钢有限元模型

针对铸钢的强度设计,进行了大量的计算、修改再计算工作,使得铸钢件的应力控制在较低的水平(如图12,图13所示),针对铸钢件的材质分析铸造、运输、吊装、焊接等问题,对国内的铸钢市场进行了充分的调研,同时与国内多家著名铸钢厂家进行交流、探讨、合作,并多次召开铸钢专题会议。

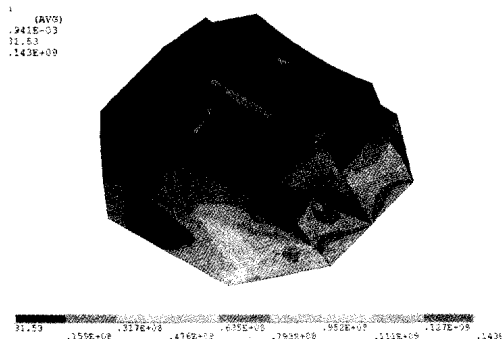


图12 铸钢应力云图

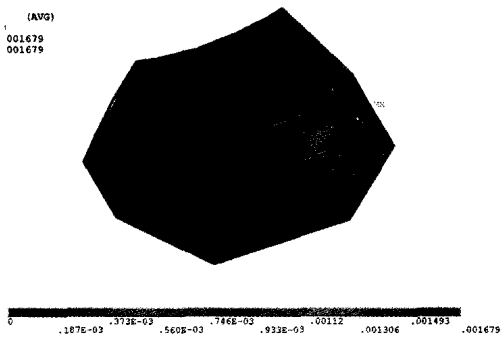


图13 铸钢位移云图

### 3.3 局部关键点问题

安阳桥是一座极具创新性的城市景观桥,这种创新不仅表现在桥梁艺术上,更是表现在桥梁结构、桥梁构造上。在安阳桥的设计中存在较多局部关键点,如:主拱箱与主梁的连接、小拱肋与大拱箱的连接、小拱肋与拱间横连的空间连接、斜撑与主梁的连接、大吨位拉杆与主梁的连

接、铸钢与拱脚的连接。针对这些受力关键点,经过了大量局部模型计算、构造措施的探讨和现场施工工艺的会议论证,如图14,图15所示。

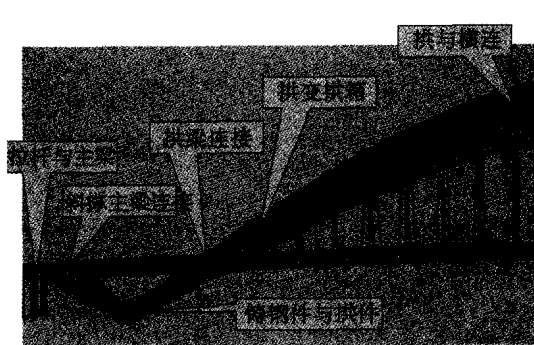


图14 铸钢设计图

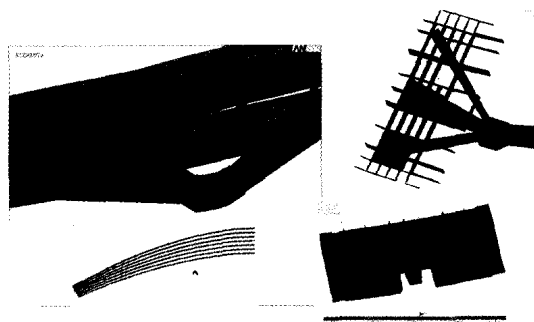


图15 铸钢有限元模型

## 4 空间钢网拱桥抗震抗风科研课题

### 4.1 抗震科研课题

安阳桥为空间钢网拱桥,主跨径为220m,但就按跨径而言,本桥的抗震设计为特殊桥梁抗震设计,且本桥为软土地上空间大跨度拱桥。在安阳桥抗震设计中采用了双球面减隔震支座和阻尼器共同作用的减隔震体系,减隔震支座具有良好的耗能能力,降低桥梁的约束刚度和地震响应,而阻尼器又有良好的滞回性能,降低了桥梁位移,这使得本桥的下部基础设计和构造处理成为现实。

针对安阳桥抗震课题,与同济大学共同合作,采用了MIDAS和SAP两种不同的有限元软件,建立主桥及引桥的空间非线性动力时程模型,详细分析桥梁结构在两种概率水平的地震输入下的地震反应,并考虑结构的几何非线性、边界非线性、结构-基础-土共同作用的影响及主桥与引桥的相互藕联作用的影响。从两种软件计算结果的对比可以看出,计算的反力趋势是一致的,但仍然存在一定的差异,这也是现阶段对软件抗震计算的原理、算法和适用条件的认识不足。如图16~18所示。(下转第25页)

构的抗风性能以及两桥之间的气动干扰效应进行了详细的研究。通过改尖原桥风嘴和在桥面检修道栏杆上增设风障的涡振减振组合气动措施,对既有桥和新建桥的钢箱梁外形进行改良,成功使两桥的涡激共振性能满足规范的要求。确保了该桥的抗风安全性,也提高了行车舒适性。如图5所示。

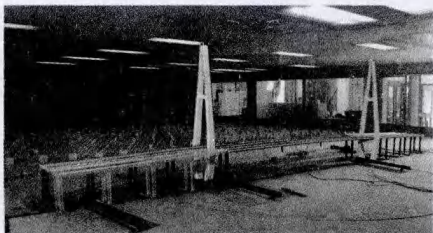


图5 风洞试验全桥模型

#### 4 结语

新建的海河大桥与现状海河大桥呈反对称布置,既满足疏港功能要求,又照顾了景观需要。天津海河大桥斜拉桥是北方地区修建的跨径最大

(上接第13页)

#### 4.2 抗风科研课题

安阳桥是新型的拱桥结构,本桥抗风的设计也是一项崭新的内容。现行通用设计规范、抗风规范静风荷载计算中都没有对应的风载阻力系数,而抗风规范的动风荷载验算主要是针对斜拉桥和悬索桥的,并没有对空间钢网拱这样的桥梁结构。在抗风设计中,不仅要进行基本风速统计分析和桥位风特性参数确定,还有对主梁和主拱做静风三分力系数测试和静风荷载计算,用于研究等效风荷载组合研究和静风稳定性分析。对于安阳桥抗风研究课题,与同济大学共同合作,将进行主拱节段模型试验、主梁节段模型试验和全桥气动弹性模型试验,以此来评价桥梁结构的动风稳定性。

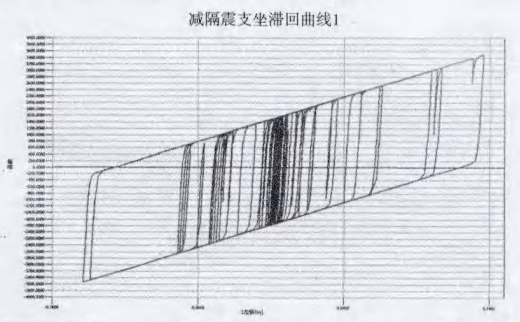


图16 减隔震支坐滞回曲线

的独塔混合梁斜拉桥,该桥于2008年11月开工建设;2010年1月开始主梁钢结构安装施工;2011年11月大桥建成通车,见图6。

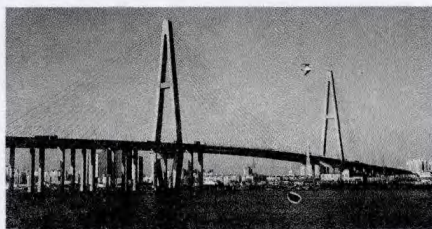


图6 海河大桥实景照片

#### 参考文献

- [1] 天津市市政工程设计研究院. 天津海河大桥斜拉桥施工图设计[D]. 2008, 10.
- [2] 丁雪松, 熊刚, 谢斌. 大跨度钢箱梁斜拉桥索梁锚固结构的发展与应用[J]. 世界桥梁, 2007, 4: 70-73.
- [3] 邓文中, 任国雷, 杨春. 涪陵乌江二桥总体设计[J]. 桥梁建设, 2007, 1: 43-46.
- [4] 郑宗仕, 张强. 泉州晋江大桥主桥总体设计[J]. 桥梁建设, 2006, 4: 24-26.
- [5] 李坤丰, 叶长允, 陈洪涛. 徐州和平路斜拉桥设计[J]. 世界桥梁, 2009, 1: 26-28.

阻尼器滞回曲线1

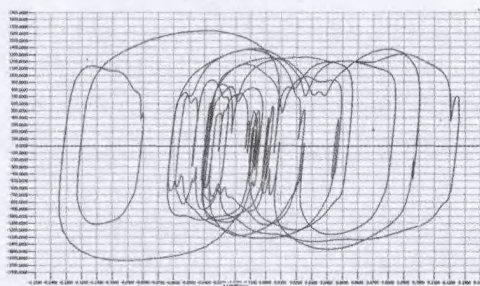


图17 阻尼器滞回曲线

滑动支坐滞回曲线1

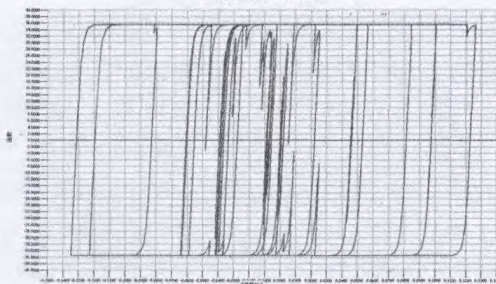


图18 滑动支坐滞回曲线

#### 5 结语

安阳桥为新型的城市景观桥,在本桥设计遇到的一系列问题中,不但要考虑结构设计的强度、刚度和稳定性,而且要考虑结构构件的制作、加工、运输、吊装、焊接等施工可实现性的问题。在将来的安阳桥施工中,铸件、主拱的安装需更加详细的研究。