

海河综合开发工程新建桥梁结构技术特点

井润胜, 张振学, 韩振勇, 张显杰, 汤洪雁

(天津城建设计院有限公司, 天津 300070)

摘 要: 该文主要介绍海河综合开发工程 3 座新建桥梁(大沽桥、奉化桥、蚌埠桥)的结构形式特点, 并分别描述这些桥梁的设计难点以及特殊构造处理措施。

关键词: 非对称倾斜拱; “叶片”构造; 斜撑杆; 拉杆; 网状拱结构

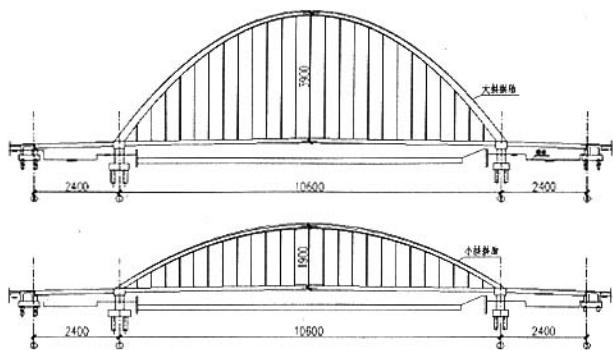
中图分类号: U443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-7716(2006)04-0105-06

0 前言

大力发展海河经济, 对海河两岸进行综合开发, 是天津市一项全局性、战略性、历史性工程, 对于发挥海河优势, 形成海河效应, 带动全市经济和社会发展具有重大的意义和作用。海河开发必将使海河成为世界名河, 带动天津成为世界名城。当前, 海河开发正在如火如荼展开, 其巨大的带动作用正日益显现出来。作为世界名河, 海河上的桥梁工程又是必然的亮点, 桥梁景观效果要求更凸现了, 尤其是代表新技术、新科技、新理念的新建桥梁建设更显重要了。海河新建桥梁结构形式多样, 景观效果新颖、独特。下面就对海河开发的几座新建桥梁进行分别描述。

1 大沽桥

天津市大沽桥为三跨连续倾斜式四索面钢箱系杆拱桥。主跨 106 m, 两边跨各 24 m, 桥梁总跨径 154 m, 车行道全宽 24 m。大拱侧人行道由桥头位置宽 3.0 m 按曲线渐变到主跨跨中位置宽 11.5 m, 小拱侧人行道由桥头位置宽 3.0 m 按曲线渐变到主跨跨中位置宽 8.5 m。桥梁主跨车行道与人行道之间设计有宽 5.5 m 的镂空梁。桥梁为顺桥向对称, 横桥向不对称结构(见图 1)。



收稿日期: 2006-01-10

作者简介: 井润胜(1965-), 男, 天津人, 高级工程师, 副院长, 桥梁总工程师, 主要从事桥梁工程设计工作。

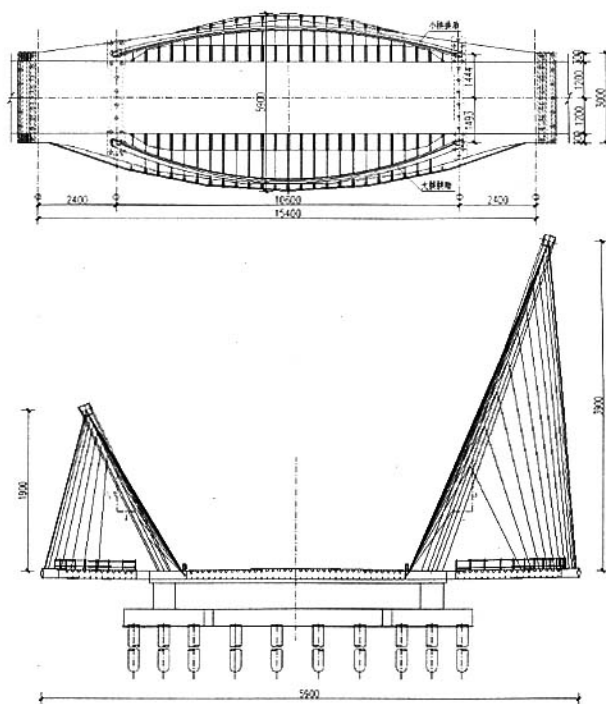


图 1 大沽桥桥型布置图

大、小拱肋均为倾斜的钢箱结构。大拱平面向外倾斜比例 1:3, 拱圈在竖直平面内的投影高度为 39 m, 横截面为梯形变截面, 上底宽自拱顶至拱脚由 1.3 m 至 2.2 m 线性变化, 梯形高度与上底宽相等。小拱平面向外倾斜比例 1:2.5, 拱圈在竖直平面内的投影高度为 19 m, 横截面为梯形等截面, 上底宽 1.5 m, 梯形高度与上底宽相等。大拱拱脚距离道路中心线 14.93 m, 小拱拱脚距离道路中心线 14.44 m。拱脚底与钢箱梁顶面齐平并由高强螺栓连接在中横系梁上。大拱侧系杆与大拱脚距离 3.423 m, 预加力 6000 kN; 小拱侧系杆与小拱脚距离 2.933 m, 总预加力 10500 kN。大拱外侧有 23 根吊杆, 小拱外侧有 15 根吊杆, 大、小拱内侧各有 25 根吊杆。车行道桥面结构为 24 m 宽正交异性板钢箱梁, 钢箱顶板为带 U 肋的正交异性板, 钢箱底板为带板肋的正交异性板, 梁高由道路中心线处的 1.3 m 按 1.5% 的横坡变到 1.06 m。

大沽桥的特殊构造如下:

1.1 非对称倾斜拱结构

以往与该桥相类似结构的拱结构均为直立对称形式,而该桥采用了倾斜拱的形式。

对拱自身受力来说,直立拱受力是合理的,拱的面外不存在弯矩、剪力,调整吊杆力时也不需考虑这方面的影响,相对来说结构更容易实现,施工及控制过程更安全、可靠。但为了实现该桥的特色,并考虑到景观步道吊杆对拱结构的影响,需要车行道侧的吊杆与拱平面存在偏心,来平衡景观步道侧吊杆对拱的倾覆力矩,拱的倾斜布置又显得有其合理性。

该桥为实现方案设计中日月同辉的构思,两道拱又必须不对称布置,产生错落有致的效果。

1.2 景观步道的设计

该桥在功能上既要满足车辆通行,还要满足人行通过。对于人行方案设计既考虑了通行要求,又提供了游览功能,这方面的考虑是以往单纯功能桥梁所没有的,结合大、小拱平面投影区域大小的不同,景观平台的尺寸又有所不同,这一点是该桥设计的独到之处。

景观步道与车行道间有一 5.5 m 段,方案设计中,考虑为镂空梁,可为人、车之间分离,提供安全保障、减小车辆对行人观景的影响,同时游人可以直接通过镂空梁观看到海河的水面。若将该位置满铺人行道面板,会增加人行的行走空间,而目前的人行空间已经足够大,是没有多大必要的。若在该空间上容许上人,给结构受力又会增加不少的负担。

1.3 横桥向三跨连续梁

主桥的两道拱为了承担车行桥及两侧景观步道的荷载,每道拱上设置了两排吊杆,分别吊在车行道外侧和景观步道外侧。吊杆的设置是比较合理的,由于拱外倾的缘故车行道外侧的吊杆也外倾,对行车净空没有任何影响,景观步道外侧的吊杆设置在外侧的挑梁上,对于净空要求较低的人行基本也没有影响。

众所周知此类结构桥面系的受力控制是横桥

向控制,所以横桥向跨度的匹配是十分重要的。对于该桥横向每个断面有 4 根吊杆,结构受力上可以看作三跨连续梁,三跨的跨径布置由吊杆间距控制,尤其在桥跨中心跨径匀称 (18.5 m+24 m+15.5 m),三跨连续梁的效果明显,这也是该桥采用较小梁高 (1.06 ~ 1.3 m) 的一个有利因素。

1.4 顺桥向三跨连续梁

该桥顺桥向为三跨连续结构,除主桥外两侧各有一跨钢箱梁结构,三跨为一整体,跨径布置为 24 m+106 m+24 m。本来主桥一跨结构已经是成立的了,但为了增加结构尤其拱脚位置的结构刚度,减小拱脚位置的转动角度,将两侧边跨连续起来就显得必要了,并且对边跨的结构受力也有一定的益处。

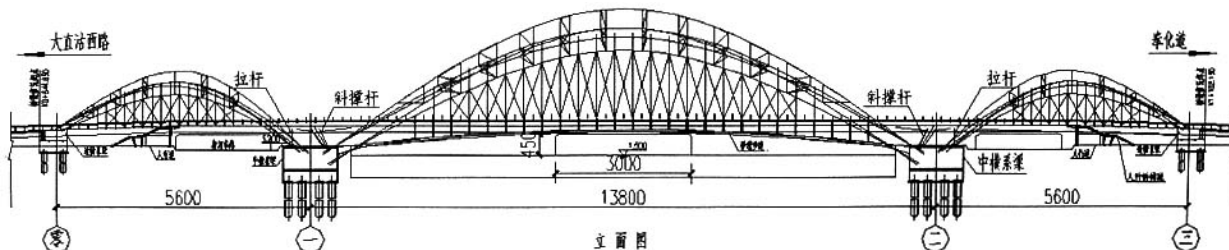
2 奉化桥

奉化桥位于天津市中心地段的海河上,上部结构为三跨连续中承式无推力拱结构,桥梁跨径布置为 56 m+138 m+56 m,全长 250 m,中跨 138 m 一跨跨越海河,河道内不设墩。每跨由空间布置的各 3 组拱肋组成空腹拱结构,每组空腹拱有 3 条拱肋组成,它们之间用三角形“叶片”连接。仅从结构形式本身看似并不特殊,而实际上上该桥还是有相对多的新颖独特之处的。

桥梁车行道横向总宽度为 34.26 m。横向布置为:0.23 m(栏杆)+0.5 m(路缘带)+14.25 m(3×3.5 m+3.75 m=14.25 m 车行道)+0.25 m(路缘带)+0.23 m(栏杆)+3.34 m(上、下行桥中间带)+0.23 m(栏杆)+0.25 m(路缘带)+14.25 m(3.75 m+3×3.5 m=14.25 m 车行道)+0.5 m(路缘带)+0.23 m(栏杆)。

人行桥正常段全宽为 4.0 m,景观步道净宽度为 4.5 m,见图 2。

该桥设计尽量避免纯交通功能的桥梁造型,而是从城市桥梁的高标准来考虑桥型方案。对于双向的车辆和行人交通给予了同等的重视,而且还考虑到沿河岸的散步游人,桥上采用了不同的行人通道。该桥有以下部分组成车辆将在三跨拱



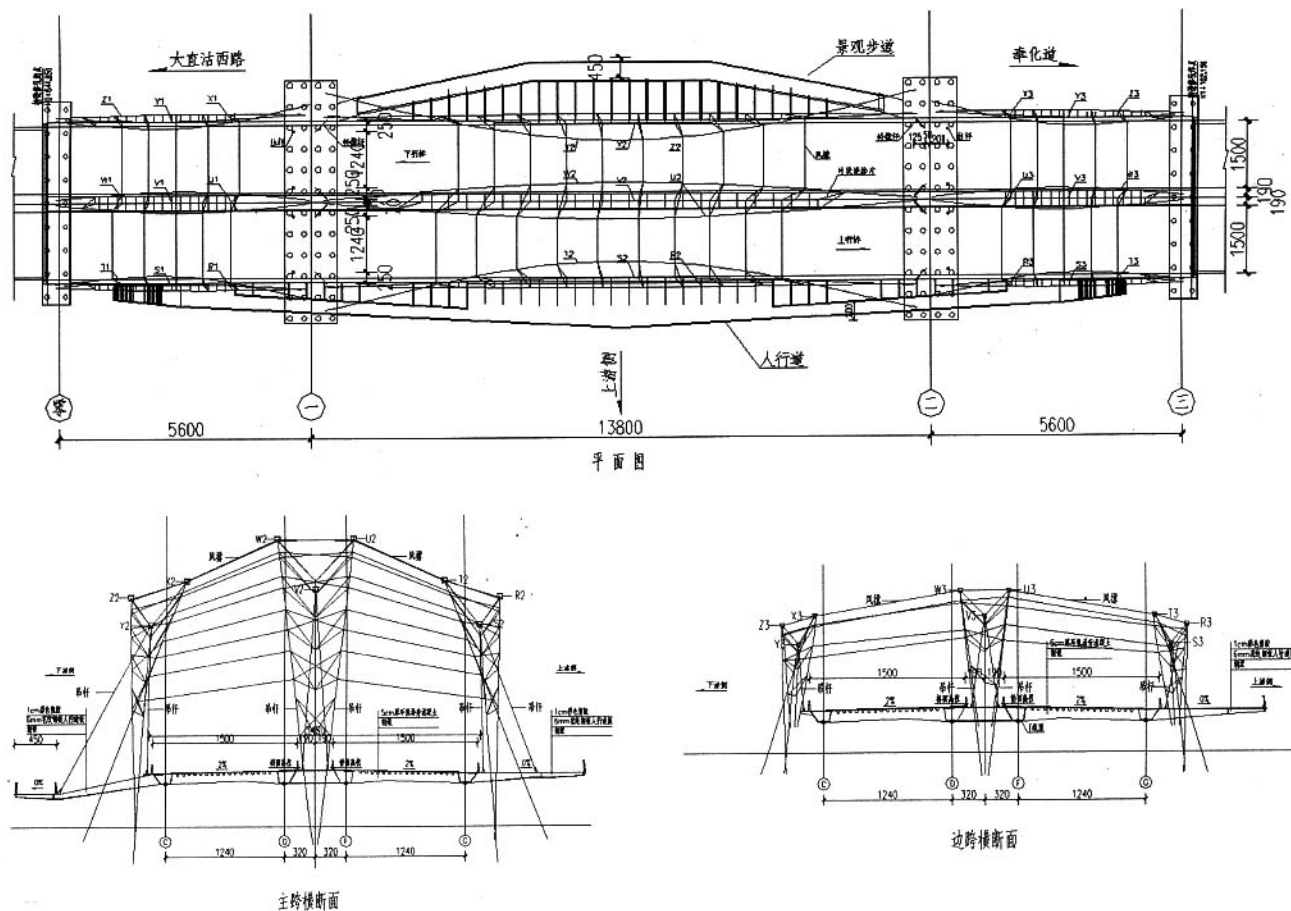


图2 奉化桥桥型布置图

中穿行:第一跨拱(副跨)连接道路引路,跨越沿河岸的主干道;第二跨拱(主跨)为主要部分,一跨飞跃海河,两端牢固地落在两侧河岸,它不是简单的拱形结构,而是多组交叉的轻型拱肋结构,给人一种轻巧通透的感觉;主跨桥面由中间的主拱分为上下行车道,主跨侧拱把车行道与人行道(桥)分开。第三组拱(副跨)是进入中心市区的标志。

每跨拱由三组独立的拱组成,主跨和副跨的中间拱位于两侧行车道之间;主跨与副跨的侧拱位于行车道与景观步道和人行桥之间。每组独立的拱又由三条箱形钢拱组成,箱形钢拱为三维曲线造型,而且箱顶板又呈弧形;箱钢形梁之间由几何形状各异的金属叶状连接片连接,同时可以限制局部翘曲。同一跨中的三道拱之间有风撑连接,以确保拱结构的侧向稳定。主跨中拱及主跨边拱外侧索距4 m,其它部分索距均为2 m。桥面系由横纵梁和桥面钢板组成;侧面人行桥由钢梁与混凝土桥面板组成。为限制作用在基础上的水平力,桥面板在拱端与拱连接以产生“弓弦效果”。

行人可以选择不同的路径达到不同目的地,上游桥侧设置行人便道,而且在河中央部位扩大,以便行人休息和观赏,下游桥侧设置人行桥,与河

岸相连,从而形成从此岸到彼岸,从一侧花园到另一侧花园的连系带。行人可以非常悠闲地漫步于远离行车道的人行桥上,观赏城市风光。

奉化桥的特殊构造如下:

2.1 “叶片”构造

设计采用了独特“叶片”构造,薄壁钢拱肋通过钢杆件连接为一体,连接杆件由曲面金属叶状连接片包裹。白天这些金属叶状连接片可以折射多彩的阳光,夜间可以形成跨越海河的亮丽拱形;而且叶状连接片的布置使反射的光线位于桥外,不会对行车造成影响。夜间奉化桥将变成城市中一座发光的雕塑。

为了实现奉化桥的景观效果,构造处理要适应景观要求,因此在设计中采用了许多独特新颖的构造处理方法。

首先,组成每组拱的三条拱肋都是十分纤细的,而每条拱肋又呈空间扭转线形,必须以三条拱共同受力才可能满足桥梁受力的要求,而三条拱间并不是桁架式组合拱连接形式,而是从景观效果出发,以“叶片”形式进行连接,连接拱的结构构件必须隐藏在景观装饰的花瓣里面,构件尺寸也受到“叶片”尺寸限制,如何实现将每一组拱中

的三条拱肋内力合理的分配,设计合理的连接构造是至关重要的。

拱间“叶片”构造是使每组拱中三条拱肋共同受力的纽带。由于三条拱间的联系构造非桁架形式,拱间存在顺桥向错动位移。如果将三条拱以纯刚性的“叶片”连接,在三条拱的错动作用下,拱与连接构件间必然产生较大的弯曲应力,通过计算对比,证明推断是正确的。而且如果增大“叶片”构件自身的刚度,弯曲应力值也会同样增加,无法通过调整截面尺寸彻底改变该受力特性。并且通过多种刚接形式进行对比分析(见图3),虽然有些方式弯曲应力相对较小,但从总体受力形式和受力效果上没有太大的变化。最后认为,“叶片”构造刚接无法满足结构受力的要求。最终采用的结构与图3的连接形式一基本相同,只是将倒三角形的下面两个构件改为桁架构件,既满足了将吊杆连接的下拱肋(图中为V2)的力传递给上拱肋(W2、U2),又不会因拱肋间的纵向错动产生弯矩。上拱肋间采用刚接杆件,可以保证上拱肋的横桥向共同作用。

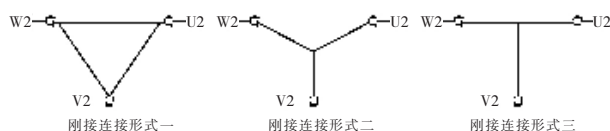


图3 拱间“叶片”构造

2.2 斜撑杆和拉杆构造

斜撑杆和拉杆也是该桥特殊设计的重点之一,也是受力最为复杂的部分。这两个构件均布置在主、边跨拱脚之间。斜撑杆上端与箱形纵梁固接,下端与混凝土横梁为可动铰连接,拉杆布置在斜撑杆外侧,上端与箱形纵梁铰接,下端与混凝土横梁铰接。

在恒载及活载作用下,主跨拱结构的水平力大于边跨拱,连接主、边跨拱的混凝土横梁结构有沿桥梁纵轴向外侧平动的趋势,由于斜撑杆下端也与混凝土横梁连接,斜撑杆与混凝土横梁有接近 60° 夹角,斜撑杆的水平分力平衡了拱的不平衡水平向作用,这个力传递到斜撑杆顶端,水平力传递给了桥面钢箱纵梁,同时又会斜撑杆上端钢箱纵梁产生一个较大的弯矩使纵箱梁扭转,为了避免箱梁扭转角度过大,在斜撑杆外侧又布置了拉杆构造。通过斜撑杆和拉杆构造解决了拱脚不平衡水平力问题。

常规拱桥的纵梁主要承受桥面荷载产生的弯矩作用,尤其对于系杆拱结构更是如此。该桥纵梁

为T型钢箱截面,上、下行桥道路两侧各有一根,两钢箱间以横梁连接,上铺带U肋正交异性桥面板。该桥的纵梁受力特性是不完全一致的,首先纵梁要承受巨大的纵向水平力,起到系杆的效果,第二纵梁要满足桥面荷载的弯矩作用,第三,在斜撑杆与栏杆构造位置,纵梁要承受该构造造成的巨大弯矩作用,所以该桥的纵梁在构造上是比较强调的,并且需要不同位置进行必要的构造处理。

2.3 混凝土横系梁

混凝土中墩横系梁是该桥实现的下部结构关键部位。该横梁连接两跨拱拱脚、斜撑杆和拉杆构造的刚性梁,起到水平力的刚性传递作用,是保证斜撑杆拉杆构造起作用的根本。中墩横梁还是将上部结构巨大竖向力传递给承台、桩基结构的中间构件。中墩横梁与承台间以可滑动支座连接,保障了中跨拱的水平位移,继而将水平力传递给斜撑杆,实现水平力的转移。

由于奉化桥结构形式新颖、构件设置复杂、空间受力特性明显,为了能够全面、细致地分析结构的受力特点,必须采用空间有限元程序进行全面的静、动力计算分析。

3 蚌埠桥

蚌埠桥西侧至解放南路,桥东侧至六纬路。桥梁的纵向共设置8排墩(上、下行各为7排墩,其中上下行桥6排墩位置对应),墩位中线间距依次布置为:27 m+12.63 m+35.37 m+42 m+35.37 m+12.63 m+27 m。蚌埠桥规划为机非混行桥,机动车双向4车道。整体上桥梁横向可依次划分为:人行辅桥、纵横拱构造、主桥、纵横拱构造、人行辅桥。主桥的横向布置为:0.50 m(栏杆带)+1.75 m(人行道)+2 m(非机动车道)+2×3.5 m(机动车道)+0.25 m(路缘带)+0.5 m(中央分隔带)+0.25 m(路缘带)+2×3.5 m(机动车道)+2 m(非机动车道)+1.75 m(人行道)+0.50 m(栏杆带),总宽23.5 m。辅桥横向净宽度3.0 m。见图4。

3.1 三维空间网状结构

桥梁的平面设计成反对称结构,主桥结构和两侧行人辅桥结构由空间纵、横拱网状构造支撑并提供连接。该桥最为独特的是采用了网状结构作为主桥承重结构。主桥为单箱多室钢箱梁结构,辅桥为悬臂挑梁结构。桥梁的主要承重由设置在主桥和辅桥之间的两组(主桥两侧各有一组)三维空间网状结构实现。每组三维空间网状结构均包括:连接主桥和辅桥的挑梁及3道纵拱、17道横拱。纵拱不是简单的平面内拱形构造,而是扭曲的

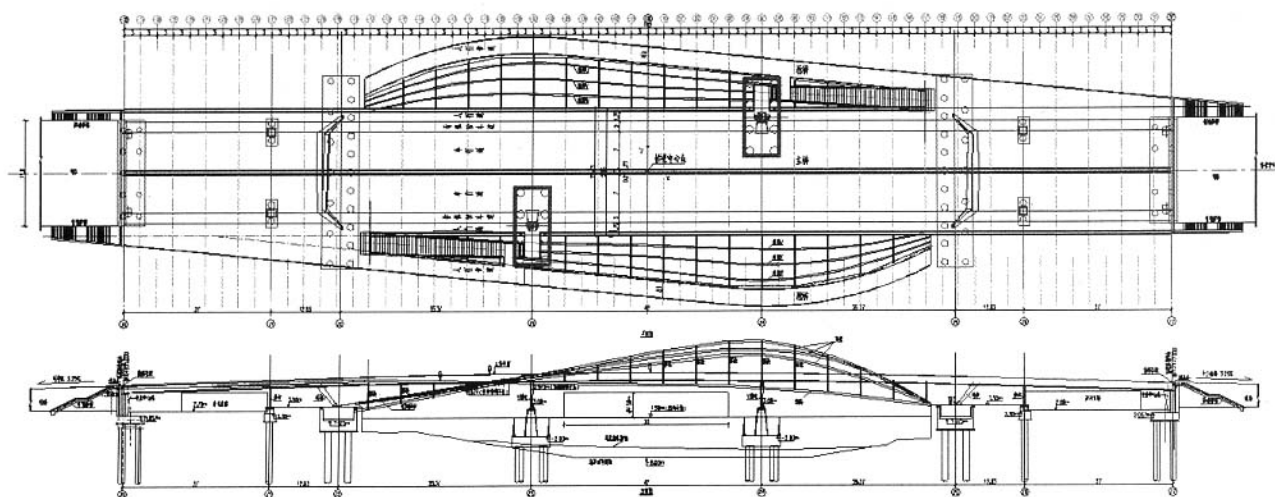


图 4 蚌埠桥桥型布置图

空间构造,以适应桥梁不同部位的受力及构造连接要求。横拱既是重要的承重结构,又起到了连接主桥和辅桥使它们能共同受力的作用。纵、横拱的受力又不是简单孤立的,与连接主桥和辅桥的 6 m 一道的挑梁共同组成了三维空间网状结构,来共同承担结构负荷(见图 5、图 6)。

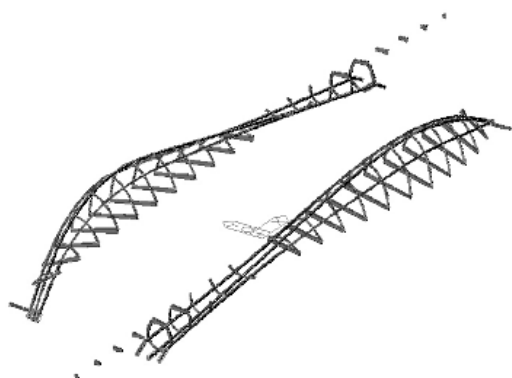


图 5 三维空间网状结构

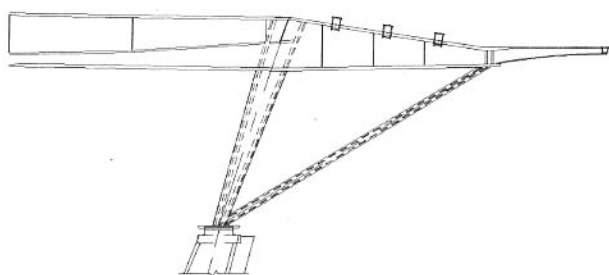


图 6 水中 V 型墩构造

桥梁的另一主要承重构造是主纵梁,它与三维空间网状结构共同起作用。纵梁高度为 0.75 ~ 1.35 m 的单箱 6 室钢箱梁,顶面有 2% 横向坡,底面为鱼腹线形;两侧封口部位为箱形截面边纵梁,宽度约 0.7 m,高度约 0.75 m。在钢箱梁顶、底板内腔侧分别设置纵向 U 肋及工肋。横梁间距 3 m,高度约为 0.75 ~ 1.35 m。

3.2 水中 V 型墩构造

3# 及 4# 墩均在水中,每墩位仅有一墩柱支撑,该墩柱由两根杆件组成,杆件在横桥向布置如“V”字样,故称为 V 形墩。V 形墩横桥向偏布于一侧的车行道与景观步道间的网状结构下,顺桥向位于横拱线形凹凸变化处。V 墩内杆(靠近桥梁中心线)及特殊横梁的强弱直接影响内力在该区域的分配,调整其与整体结构及其内部之间合理的刚度分配才能控制其结构组合应力水平在容许范围内。经过多次的试算比较最终确定 V 墩内侧杆采用上大下小的钢箱截面,V 墩外侧杆由于受力方面不十分敏感且主要承受拉力,最终采用较小的箱型截面。

3.3 斜撑杆构造

2#、5# 墩位均设置斜撑杆,横桥向每墩位设有两个,均设置在车行道梁下外侧,斜撑杆在顺桥向及横桥向均倾斜设置,其主要作用是平衡该墩位混凝土系梁受到的纵拱推力作用,并提供钢箱梁以竖直支撑。根据其受力特点,每墩位的两斜撑杆受力差异明显,最终采用了不同尺寸的钢箱截面。撑杆的设置将减小相应部位钢箱跨径并改善主梁内力。

3.4 撑杆构造

1#、6# 墩采用特殊撑杆构造处理,上部连接节点与主梁钢箱连接为整体,与基础的下部连接节点只传递轴向拉压荷载,而不承受弯曲及扭转荷载。每墩位各设置撑杆两根。

4 结语

由以上的介绍可明显看到,这些桥的结构形式新颖、构件设置复杂、空间受力特性明显,为了能够全面、细致的分析结构的受力特点,并根据计

算结构对构件设计进行优化、调整,必须采用空间有限元程序进行全面的静、动力计算分析。

空间有限元程序与平面有限元程序相比,特点在于能比平面有限元更贴切地反应结构的实际受力特性,这一点不仅仅反应在静力计算方面的结构各位置内力、应力、变形的结果更准确,还表现在其它许多方面。

对于车辆荷载最不利布置位置的选择,平面程序需要考虑按两步布置车辆,这两步分别考虑横桥向和顺桥向的车辆荷载最不利位置,最后将两步结果进行叠加组合,得到最终的结果。对于简单结构,这样计算是可以的,而对于空间受力特性明显的结构是不可以的。

动力特性方面,空间计算和平面计算的差异就更明显了。动力特性最基本的就是结构的自振特性,自振特性对于结构而言完全是一个空间的特征,而且对于空间特性突出结构会出现横、纵桥方向耦合现象,这是平面程序根本不可能考虑的,也是无法简化处理得到的,必须通过空间程序进行模拟考虑。

屈曲分析方面,与动力特性一样,也是多方向的问题,对于一些特殊结构,尤其是平面计算所不

能考虑的横桥向屈曲更为突出,而且横桥向一些主要构造甚至辅助构造,又能在一定程度上影响到顺桥向的构件屈曲,同样是平面计算结果与实际出入较大的主要原因。

鉴于以上原因,对于这些结构特异的桥,我们均采用两个以上的不同空间程序进行了全面的分析、对比,以保证桥梁的安全。

通过对大沽桥、奉化桥、蚌埠桥结构详细的构造设计和计算分析,可以认为这些桥梁造型独特、结构合理,在满足严格的景观和使用要求的同时,保证了结构优良的静力和动力性能。在桥梁设计中运用的新颖的构造设计措施,实现了景观桥梁的新思路,所进行的大量工作对今后开拓桥梁设计新思路有较高的参考价值。其中较为突出的如大沽桥的敞开式无风撑拱构造、奉化桥用于转移水平力的斜撑杆和拉杆构造、蚌埠桥的空间网状构造均是首次尝试,从理论计算和实践证明是成功的。说明该设计构思基本正确,构造措施切实可行。当然,因为是首次尝试,还有许多不足之处需要进一步改进和完善。这些桥设计中的一些特殊构造运用于其它桥梁上还需要进一步的探索和实践,以期获得更成熟经验。

上海南站交通枢纽“节约”效应显现

上海南站交通枢纽工程已基本建成,7月1日上海铁路南站将正式开通运营。而先前启用的上海长途客运站已经在节约道路资源、减轻交通压力、减少运营成本方面发挥了优势。

2005年底,上海长途客运站启用,对缓解市区交通拥堵起到十分明显的作用。班车从长途客运站始发,走老沪闵路、桂林南路上沪闵高架只需4 min,就可连通内中外环线与沪杭、沪宁高速公路。据统计,目前所有发往南方如浙江、江苏、福建等地的班线,从长途客运站始发,每趟可减少穿行市区的10 km路程,至少节约半小时左右的时间。以每公里耗油0.35 L计,每辆车每次减少能耗3.5 L。以长途客运站现有的400班次、800余个日接发班次来计,每天约可节约2 800 L汽柴油。

辽宁建世界上最长的隧道

一条长85.3 km的隧道正伸展于中国东北的辽宁山区。这条直径8 m的引水隧道建成后,将会超过57.6 km的瑞士戈特哈尔德隧道,成为世界上最长的隧道。

这条高差36 m、完全靠自流引水的隧道东起辽宁省桓仁满族自治县,西至辽宁省新宾满族自治县。隧道将穿越50余座山峰,50多条河谷,29条断层。地表到隧道顶端距离最大为630 m,最小60 m。

这项名为“大伙房水库输水工程”的引水隧道,旨在引用优质充沛的辽东山区水源,供给辽宁省老工业基地的中部城市群。解决该地区百年内用水问题,受益人口近1000万。

辽宁省是一个水资源短缺的省份,特别是辽宁中部地区,属于联合国规定的严重贫水区,人均水资源量在700 m³以下。

目前,这条隧道已经建设了40余公里,计划2008年底建成通水,概算总投资52亿元。