

潮白河大桥的结构体系

惠 斌 徐德标

(北京市市政工程设计研究总院 100045)

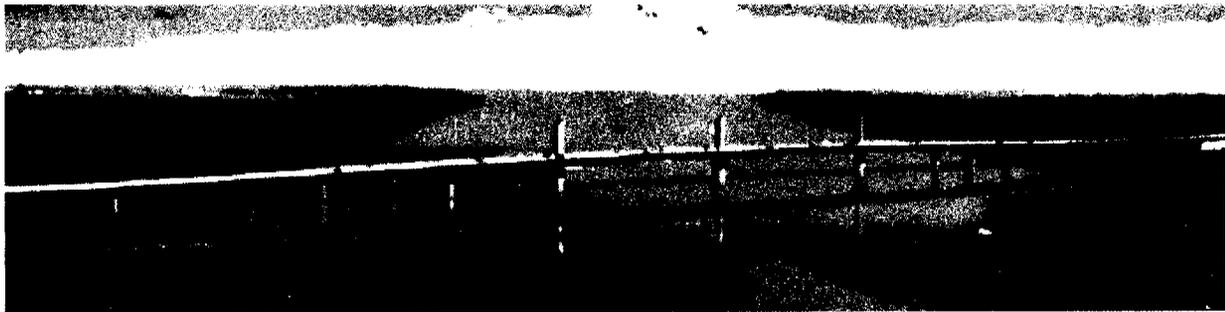
摘 要: 潮白河大桥为三塔单索面预应力混凝土部分斜拉桥。本文主要介绍了该桥的结构体系和结构特点,并结合本桥的特性阐述了部分斜拉桥的结构优势、现状和发展。

关键词: 三塔部分斜拉桥 高塔型的部分斜拉桥 结构体系 配重方案 景观桥梁

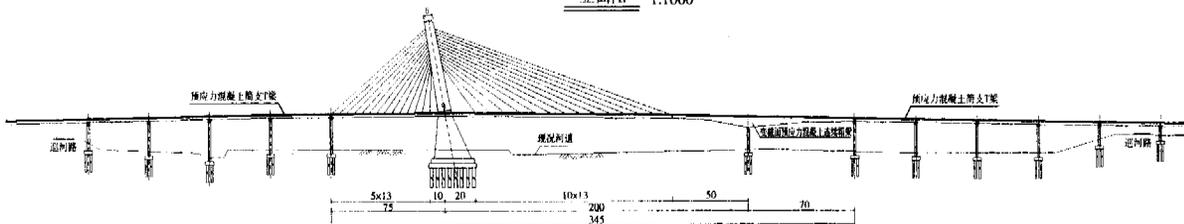
1. 潮白河大桥概况及方案选择

潮白河大桥位于京承高速公路(高丽营至沙峪沟)跨越潮白河段,是京承高速公路桥梁建设的重点项目。为丰富北京市的桥梁结构型式,在安全、适用、经济、美观的前提下,对潮白河大桥进行了多个桥型方案的设计比较,包括推荐方案三塔部分斜拉桥(主跨长 2×120

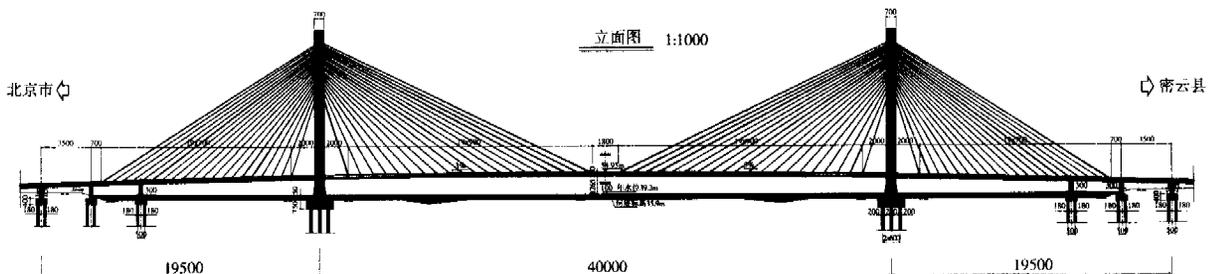
米)和比较方案独塔单索面斜拉-连续梁组合桥(主跨长200米)、双塔双索面的混凝土斜拉桥(主跨长400米)、中承式三孔钢箱桁架提篮拱桥(主跨长360米)、下承式钢管混凝土系杆拱桥(主跨长360米)、五跨变截面连续箱梁桥。主桥比选方案见图1。



立面图 1:1000



立面图 1:1000



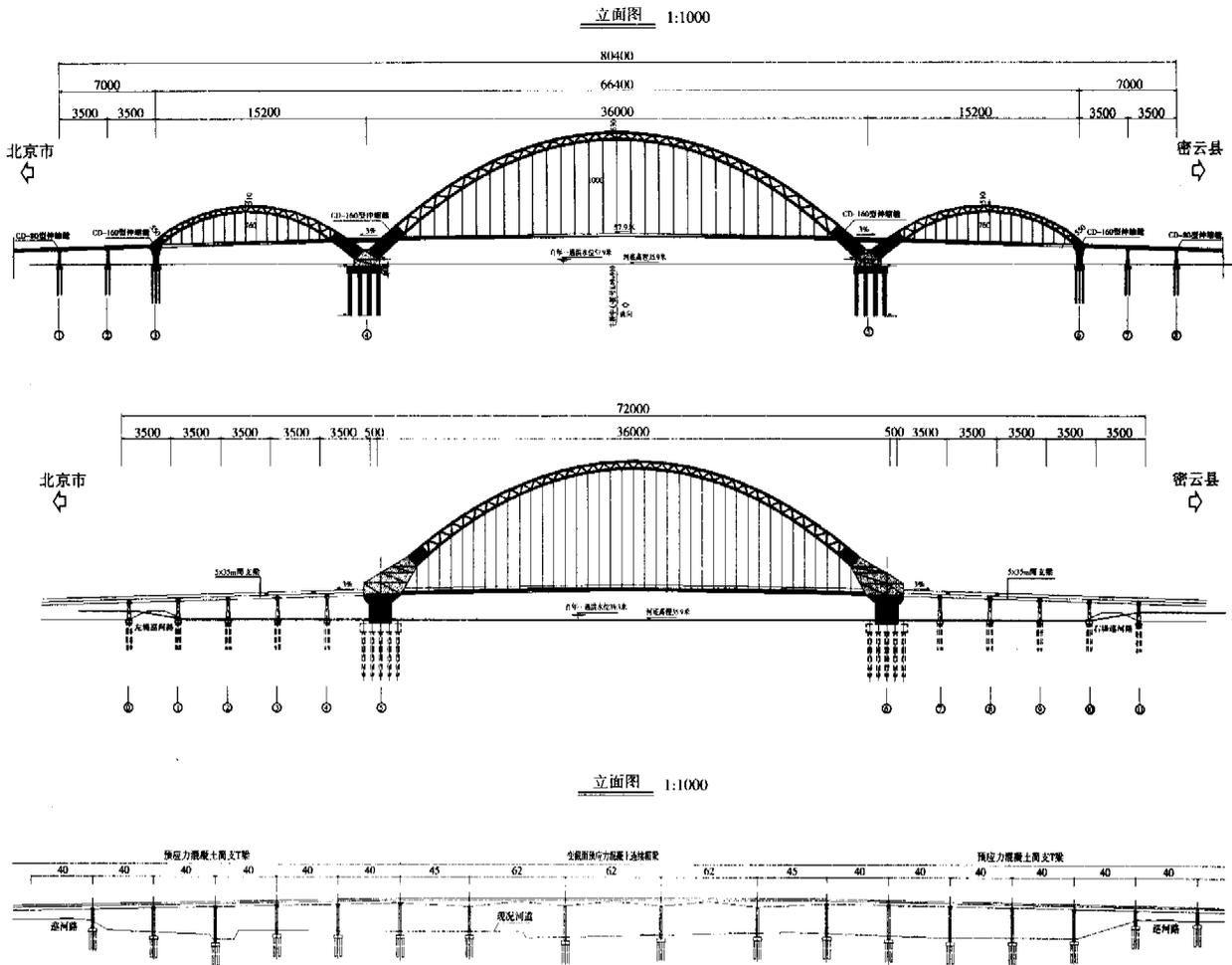


图1 主桥比选方案

从景观考虑，桥型的选择需与潮白河现况特点相适应，潮白河河道宽浅，中间有明显的行水深槽，两侧行洪滩地开阔，虽百年一遇洪水水位为39.3m，但多年来一直处于干枯状态，更无通航要求。综合比选，其桥位处不宜修建特大跨径桥梁，从景观、技术、经济方面综合考虑，最终采用了经济美观、优势突出的推荐方案，三塔部分斜拉桥接预应力连续梁跨越潮

白河的方案，其造型美观同环境协调、桥型新颖又经济合理、技术成熟并有创新意识、施工方便且维护简单。

大桥全长920m，与河道斜交角度为53°，由东引桥、主桥、西引桥三部分组成。主桥为桥长384m（72m+120m+120m+72m）的三塔部分斜拉桥（又称三塔矮塔斜拉桥），其立面布置如图2所示。

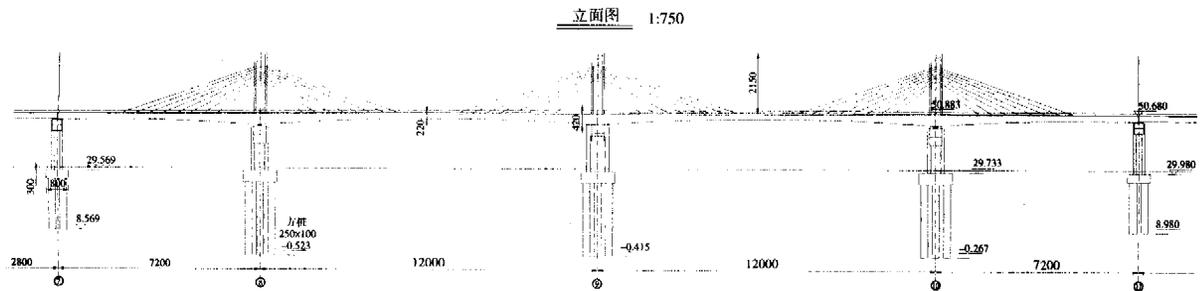


图2 主桥立面布置图

2. 潮白河大桥的结构体系

矮塔式斜拉桥又称部分斜拉桥，是目前国内外的一种新兴桥型，在结构性能上，斜拉索仅分担部分荷载，还有相当一部分荷载由梁的受弯、受剪承受，“部分斜拉”即源于斜拉索的斜拉程度，国内一些文章根据这种桥型塔高较矮的特点，又把它定义为矮塔斜拉桥。

矮塔斜拉桥是介于连续梁和斜拉桥之间的半柔性桥梁，兼有连续梁与斜拉桥的共同优点，其与常规斜拉桥相比有如下优点：塔高较矮，塔身结构简单，施工方便；斜拉索应力变化幅度小，斜拉桥拉索的应力为标准强度的0.4~0.45倍，而部分斜拉桥可用至0.5~0.6倍，从而减少了钢材用量；其主梁抗弯刚度大，可采用梁式桥施工方法，而无需象斜拉桥那样采用大型牵索挂篮，极大地方便了施工；它与连续梁相比，有如下优点：跨越能力较连续梁大，当中支点梁高相同时，部分斜拉桥的跨度可比连续梁大1倍以上，对于大跨度梁而言，相同跨度的部分斜拉桥比连续梁更经济，尤其是近年来大跨径刚构、连续梁普遍出现跨中下挠现象，随着对其更深入的认识和研究，部分斜拉桥整体刚度大，变形小的特点更为业内人士所认可，尤其适用于荷载大、标准高的桥梁，大有取代大跨径连续梁及刚构的趋势。

潮白河大桥主桥采用了高塔型三塔单索面部分斜拉桥的结构型式，跨径组合为：72m+120m+120m+72m。其结构形式确切地说是连续梁、连续刚构和斜拉桥的组合结构，在矮塔式斜拉桥中，属于塔型较高的部分斜拉桥。本桥的主要结构特点：三塔型结构形式、属于高塔型的部分斜拉桥、小角度斜交角为 53° 、方型灌注桩的基础结构、新型索鞍为分丝管式的斜拉索体系以及合理的施工程序等等。通过进行潮白河大桥的设计，我们对部分斜拉桥结构形式做了进一步的研究，下面本文结合潮白河大桥的主要结构特点，针对部分斜拉桥体系进行相应的探讨和分析。

2.1 三塔型的结构形式

在斜拉桥结构中三塔以上的多塔斜拉桥较为少用，其主要原因是多塔斜拉桥结构，中塔因没有边端索约束而减小了塔的变形刚度，并且由于相邻塔的变形产生相互影响，同等条件下使主梁跨中处容易产生较大的挠度。

潮白河大桥是国内首次采用三塔结构的部分斜拉桥，桥下净空较少，其结构采用中墩为塔梁墩固结，与桥两侧边塔为梁塔固结相结合，在侧边桥墩上设置单向滑动球形支座和阻尼器，从结构的边界条件和连接形式上形成连续梁、连续刚构和斜拉桥的组合结构体系；既有效地加强了中墩塔的变形刚度，又形成了边墩塔的连接支承边界条件，合理地避免了矮墩刚构的温度影响，并确立了边塔墩协助中墩抗震的主体结构设计理念。

2.2 高塔型部分斜拉桥

斜拉桥的塔高一般为主跨径的 $1/4 \sim 1/5$ ，随着跨径的加大，塔高不断升高，也不断增加了对塔的施工难度和相关费用。而部分斜拉桥之所以又称矮塔斜拉桥，是由于矮塔式斜拉桥自身的特点，其塔高一般为主跨径的 $1/8 \sim 1/12$ 。

矮塔式斜拉桥的经济跨径一般在300米以内，矮塔斜拉桥塔高的取决因素有很多，首先，从施工方便和经济的角度看，桥面以上塔高控制在25米以内更有优势，也就是300米跨径的矮塔斜拉桥如果塔高控制在25米以内，塔高跨径比即为 $1/12$ 。其次，从受力合理角度，塔高的增加可以有效地改善拉索索力的利用率，因而需要对塔高自身的工程造价与塔高对拉索索力利用率的影响做综合比较，一般拉索索力对结构受力贡献的总体比例控制在30%左右，这样早期的矮塔斜拉桥塔高上限达到了 $1/8$ 。再次，随着材料指标的进步和对部分斜拉桥结构受力认识的提高，高塔型部分斜拉桥因能提高索力度，改善结构承载分配和主梁的应力状态，以及能减少结构后期跨中挠度变形的特点而更为业内人士所认可，高塔型部分斜拉桥

已成为部分斜拉桥发展的新动向,“高塔型部分斜拉桥”也是最近桥梁界提出的新概念、新名词。

潮白河大桥主跨120米,塔的高跨比即使为1/6,塔高也只有20米,既方便施工、美观大方又能保证经济合理性,并且在结构受力上还弥补了连续梁、连续刚构的跨中远期容易下挠的缺点;我们在设计中综合考虑将塔高确定为21.5米,索鞍处高度达17.2米,分别为跨径的1/5.5、1/7左右,目前潮白河大桥的塔高在部分斜拉桥中属于相对较高的,这与近期国外矮塔斜拉桥的最新发展动向不谋而合,在国内尚属少见。由此可以得出结论:高塔型部分斜拉桥通常应用在中小型跨径的部分斜拉桥上,其主要原因是中小型跨径的部分斜拉桥在充分利用索力的前提下,有条件将塔高控制在25米以下,既经济合理又施工便利。

2.3 小角度斜交的处理

公路工程大跨径桥梁结构不同于市政工程的立交桥,从减少桥梁长度、方便施工、节省投资以及减少河道断面压缩等方面综合考虑,应尽量调整道路线形,以避免或减少修建大跨度桥梁结构的可能,桥面宽、交角小、跨径大的斜拉桥尤其少见。

京承高速公路跨越潮白河由于规划用地等重要因素的影响,很难避免小角度斜交的情况,道路选线与潮白河斜交角仅为 53° ,无疑增加了较宽桥面结构的设计与施工的复杂程度。常规的斜桥正做会严重影响河道防洪过水断面,而斜桥斜做对于大跨径的宽幅斜拉桥从结构上存在着极端的不合理,本桥设计中反复权衡,决定在主桥上采用独柱圆形墩加斜交盖梁的变相斜桥正跨结构,既有效减少了对河道断面的削弱,又合理地解决了结构方面的问题,降低了后期设计和施工的难度。

2.4 方型灌注桩基础结构

由于潮白河河道地质情况复杂,河床持力层地质以40~60mm卵石为主,卵石地层质地坚

硬,并夹有大于400mm的漂石,甚至有最大直径达600mm的大型漂石。经过对各种基础受力情况及施工方案与工期的精心分析,我们对下部基础进行了多个方案的比选,其中有钻孔灌注桩、连续墙壁式井基础、圆型或方箱沉井、方型灌注桩等基础形式。

沉井、方桩及连续墙壁式井基础比较

	砼(M ³)	钢筋(Kg)	主字钢板	工期(天)	总结
连续墙壁式井 12.5x12.5x1.2(0.6)	1534	191785	79128	70	造价高、工期长。
方桩12根长24m	1440	139500	刃脚钢板	22	造价较高,受力较圆桩更有效、合理,工期较短。
方桩9根长30m	1476	138240	刃脚钢板	20	
沉井D=14m	1490	87690	2866	63	经济、受力明确、工期较长。

钻孔灌注桩结构:在该地质条件下,现有的各种机械对圆桩结构成孔均十分困难,且地下水位较浅,又不宜人工成孔挖桩,因而圆桩成孔施工难度较大,周期长,不能满足工期要求;连续墙壁式井基础造价高,不经济,工期长;圆或方形沉井结构受力明确,不受河道冲刷的影响,经济合理,但施工工序严格、复杂,受施工场地和工序限制较大,同步施工难度大,工期较长,在确定的期限内完工困难较大。方型灌注桩结构:受力合理,同等断面承载力较大,施工设备先进,成孔速度快,但机械设备台班费用较贵,由此造成工程费用较高。综合比较施工工期、受力合理性和经济性等方面,主要在方桩和沉井之间权衡,本桥最终采用了多排方型灌注桩的基础结构,通过承台基础上接圆形薄壁墩。上表为几种基础形式的比较(圆桩除外)。

2.5 新型索鞍为分丝管式的斜拉索体系

目前斜拉桥拉索主要采用两种体系,即钢绞线体系和平行钢丝体系。如果采用平行钢丝体系,则塔上张拉空间紧张,因而较多采用的是钢绞线体系。在拉索与塔相交处的转向角度容许的条件下,拉索通过预埋在塔里的鞍座转向至主梁体内锚固,并在主梁内进行张拉。这也是近年来矮塔斜拉桥普遍采用的一种斜拉索体系。

国内外工程目前采用的钢绞线体系索,主要是全封闭镀锌或喷涂环氧钢绞线,喷涂环氧钢绞线的强度及耐疲劳性能较全封闭镀锌钢绞线高,因而本桥斜拉索采用环氧涂层标准强度为1860MPa高强低松弛钢绞线(41根和43根两种)以及热挤压PE护套,斜拉索允许应力幅为200MPa,锚具采用可单根张拉、单根换索的新型夹片式群锚的拉索体系锚具。

本桥的拉索成扇形布置,每个索塔设8对斜拉索,在横向分为2排,斜拉索在主梁上间距5m,由于本桥为矮塔斜拉桥,为尽可能利用有效的塔高,导致塔上索间距较小,斜拉索在塔上间距为0.8m,拉索集中在塔顶附近并通过鞍座穿过塔身。国内外在建成的部分斜拉桥中,普遍采用的鞍座构造是由内、外管组成双套管结构,成桥后在内管内灌注环氧砂浆进行封闭锚固。这种型式的鞍座工厂生产容易、现场穿索方便快捷,但也存在以下缺点:1、拉索不能进行单根调整,只能整束张拉;2、由于环氧砂浆将钢绞线与内管粘在一起,给今后换索带来了一定的困难;3、斜拉索存在相互挤压的现象;4、抗滑性能不佳;5、鞍座处的主塔内部劈裂应力较大。为解决以上问题,该桥鞍座采用OVM专利技术一分丝技术索鞍,分丝管为41根或43根内径为22mm、壁厚为3mm的铁管组焊而成(鞍座构造见图3),每根分丝管仅穿一根钢绞线,以便于拉索单根张拉及更换,索鞍的斜拉索出口处设置抗滑锚板,以防止成桥后钢绞线滑动。锚固端设在主梁箱室内,其相应位置设置一道传力横隔梁。

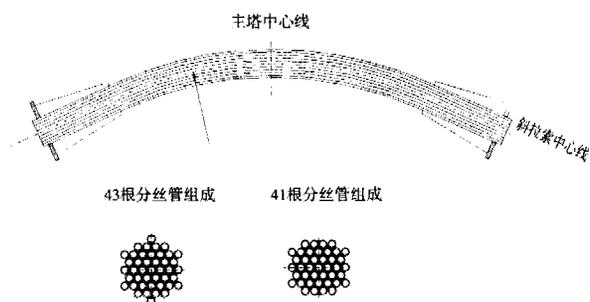


图3 鞍座构造图

2.6 合理的施工工序

由于潮白河河滩宽阔、表面地基承载力高等有利的条件以及施工工期紧迫的原因等,我们经论证决定该桥采用支架法施工,支架法施工既能满足工期要求,又可以保证桥梁的施工质量。但由于是三塔斜拉桥,采用整体满堂支架法施工存在复杂的全桥体系转换的问题,必然要增加施工监控过程索力分析、调整和控制的工作量,也会给施工单位索力张拉操作带来一定的麻烦。因而该桥采用了设置合拢段的支架施工方法,即在支架上先分别形成三个独立的单塔斜拉桥,然后浇筑边、中跨合拢段以完成全桥体系转换。这种施工方案不仅降低了施工监控过程的计算难度,而且为施工组织设计提供了极大便利,对保证桥梁的施工质量起到了一定的作用。

在合拢段的处理中,设计采取了桥梁施工过程中配重的处理,其作用与以往桥梁合拢段的配重有所不同,它的主要特点是:常规桥梁配重处理方式是,在浇筑合拢段混凝土的同时,卸掉同等混凝土重量的配重,以保证合拢段在稳定的挠度下浇筑完成,确保合拢段混凝土的施工质量以及有效地控制施工阶段的挠度变形。由于本桥在支架上合拢,则合拢段混凝土浇筑过程中该处挠度变化较小,能够确保合拢段混凝土的施工质量。但由于合拢后再拆除支架,相应的体系转换会减少桥墩及跨中的应力储备。设计中根据施工期间主梁合拢前后以及桥梁使用过程中,结构受力的控制断面不同,结合本桥边、中跨这样无索区比较长的特点,合拢前采取了在单塔悬臂状态下施加配重,全桥合拢后再卸载,可以充分利用钢材及混凝土的材料特性,对中墩处主梁顶板以及边、中跨处主梁底板的抗拉,筹备了相应的压应力,对调整边、中跨受力以及减少配筋有较大的好处,特别是在施工跨中合拢时间无法回避炎热夏季的条件下,有效地改善了合拢后恒载状态下跨中主梁断面上下缘的应力分布,充分利用断面应力的分布来改善后期徐变的影响,从而达

到合理、有效控制主梁远期挠度的变化。

3. 结束语

1988年法国人Mathivat提出部分斜拉桥这一新的桥梁结构型式,1994年日本建成了世界上第一座部分斜拉桥—小田原港桥,之后,部分斜拉桥在国内外得以迅速发展,据不完全统计,国内外已建成或在建项目不少于50座。由于其经济、美观、施工方便等众多优点,部分斜拉桥已成为许多城市大中桥梁的竞选方案,近期尚有多座部分斜拉桥在建设与筹建之中,其跨径与桥面宽在不断地增大,种类也不断地演变,从原来以单索面为主,又出现了双索面的部分斜拉桥,从单塔、双塔型向多塔型发展,从单一的矮塔型向高塔型部分斜拉桥发展,在今后景观、实用大中跨径的桥梁中均会有更广阔的发展前景。但目前我国关于部分斜拉桥的相关规范,技术规定及检验标准还不完善,还有许多新技术正待迅速发展,许多新理念急急提出,技术上需要试验验证,这些实际情况在一定程度上影响着工程进度,增加了工程造价。本桥设计及施工过程中,将针对一些技术问题通过试验或进行有限元分析以作进一步的确定,来确保工程质量,并积累和总结部分斜拉桥实施的成功经验。

(上接第26页)

如采用普通钢网架来实现该建筑方案,则需三层大空间网架,这样大跨度的网架就其一层结构的高度要达2.5m左右,总结构高度要增加近三层楼高,这样不但大幅度增加造价,而且不能满足设计意图。另外,从城建角度也不允许建筑进一步超高,因此,网架方案不可行。如采用普通钢筋混凝土梁式转换层结构,转换梁高约需4~5m,这既不能满足设计要求,而且浪费建筑空间、增大建筑造价。

该工程采用了下部大空间预应力部分型钢叠层空腹桁架转换结构体系,成功地解决了该工程难题。采用整体转换结构方案在不增加建筑高度的情况下,即实现了31.0m×27.3m的无柱

本文仅结合潮白河大桥的主要结构特点,针对部分斜拉桥体系做了一定的探讨和分析,对于部分斜拉桥设计尚有许多相关问题和理念需要提出、探讨和解决,一些在工作中已得到解决的问题和实践经验还需要加以总结和概括。例如:部分斜拉桥的索力对结构体系总荷载的贡献比例如何加以控制,结构才能更加合理、有效、经济;部分斜拉桥与普通斜拉桥桥面结构体系的区别;部分斜拉桥横梁结构的分析与普通斜拉桥的不同等等。我们将在今后的工作中会进一步分析、研究和总结,特别对高塔型部分斜拉桥仍需做更深一步的研究。

特别感谢参与本桥方案、初部设计及施工图设计的冯燕宁、张宏远等全体同志,感谢我院包琦玮总工的主持,罗玲、沈中治等老总的大力支持,感谢对本桥设计提供帮助的全体同志。

参考文献

- [1] 黄道全,谢邦珠.宜宾中坝金沙江大桥的设计特点.第十五届全国桥梁学术会议论文集,2002.12.同济大学出版社
- [2] 广州大学路顺道桥工程检测中心.中山市歧江大桥主塔鞍座阶段模型试验研究报告.2004.
- [3] 顾安邦,徐君兰.矮塔斜拉桥.中国公路学会桥梁和结构工程学会.2001年桥梁学术讨论会论文集.2001.8.人民交通出版社.
- [4] 陈宝春.部分斜拉桥最新发展.大跨径桥梁创新技术论坛.2005.05

大空间,又保证了大空间上部两层总建筑面积为 $2 \times 31.0 \text{m} \times 27.3 \text{m} = 1692 \text{m}^2$ 的正常建筑使用功能。同时,也使得大空间平面以外的建筑面积的使用功能不受影响。

参考文献

- [1] 戴国亮.预应力型钢筋混凝土迭层空腹桁架转换层结构试验研究与理论分析[D].南京:东南大学土木工程学院,2000
- [2] 傅传国.预应力钢骨高强混凝土叠层空腹桁架转换层结构试验研究[D].南京:东南大学土木工程学院,2000
- [3] 朱伯龙.结构抗震试验[M].北京:地震出版社,1989
- [4] 唐兴荣,蒋永生,孙宝俊等.预应力高强混凝土桁架转换层结构的试验研究[J].东南大学学报,1997,27(增刊):6-11
- [5] 傅学怡.带转换层高层建筑结构设计建议[J].建筑结构学报,1999,20(2):28-41