

# 三塔部分斜拉桥结构体系的分析研究

张宏远

(北京市市政工程设计研究总院,北京市 100045)

**摘要:**该文以京承高速公路潮白河大桥为工程背景,介绍了三塔部分斜拉桥结构体系的选择过程,并通过数值分析比较了不同结构体系在外部作用下的反应,以及采用阻尼器降低结构地震效应的措施。

**关键词:**部分斜拉桥;结构体系;外部作用;动力特性;阻尼器

**中图分类号:**U448.27 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-7716(2006)06-0044-04

## 0 引言

部分斜拉桥是近年来新出现的一种桥型,介于常规的斜拉桥与传统的梁式桥之间,是斜拉桥和梁式桥的组合结构体系。与常规的斜拉桥相比,部分斜拉桥的桥塔较矮,因此也被称为矮塔斜拉桥。由于部分斜拉桥兼有斜拉桥与梁式桥的优点,在国内外得到迅速发展<sup>[1]</sup>。世界上第一座部分斜拉桥是日本于1994年建成的的小田原港桥,我国近几年也建成了漳州战备大桥、兰州小溪湖大桥等部分斜拉桥。部分斜拉桥的出现,填补了梁式桥和斜拉桥之间的空白,为桥梁结构的发展提供了更广阔的空间。

本文以京承高速公路潮白河大桥为工程背景,结合部分斜拉桥的特点,介绍了三塔部分斜拉桥结构体系的选择过程,并通过数值分析比较了不同结构体系在外部作用下的反应,以及采用阻尼器降低结构地震效应的措施。

## 1 工程概况

京承高速公路潮白河大桥位于北京市密云县内,全长919.18 m,宽29.5 m,是京承高速公路中规模最大的桥梁,桥位处河道宽浅,地质条件较好,无通航要求。在初步设计阶段,曾对潮白河大

桥提出多个桥型方案进行比较,综合考虑河道现况、工程造价、工期等因素,最后确定潮白河大桥主桥采用三塔部分斜拉桥,引桥采用预应力混凝土连续梁桥。

由于用地条件的限制,潮白河大桥桥梁中线与河道中线的交角为 $53^\circ$ 。为了减少桥墩对水流的影响,主桥采用独柱单索面斜拉桥方案,索塔和斜拉索都布置在中央分隔带上,引桥按上下行分为两个半桥,上下行桥的墩柱平行于水流方向错开布置。

潮白河大桥主桥长384 m,中跨120 m,边跨72 m,桥面以上索塔高21 m,每个索塔上挂8对斜拉索,斜拉索与水平线最大夹角 $37^\circ$ ,最小夹角 $19^\circ$ ,桥型布置见图1。斜拉索采用环氧涂层高强低松弛钢绞线,锚固于主梁内,并通过分丝管穿过塔身,分丝管出口处设有抗滑锚板,防止钢绞线滑动。

主梁为变截面单箱三室预应力混凝土结构,索塔处梁高4.2 m,梁端和中跨跨中处梁高2.2 m,按二次抛物线形式变化。主梁结构宽29.24 m,单侧悬臂宽4.5 m;边室顶板厚26 cm,中室顶板厚50 cm,底板厚24 cm;腹板铅直,边腹板厚80 cm,中腹板厚60 cm。桥塔处上部结构横断面如图2所示。纵向和横向预应力材料为高强低松弛钢绞线,竖向预应力材料为高强精轧螺纹粗钢筋。

主桥墩柱高度16 m~18 m,均采用圆形空心截面,中塔墩直径8 m,壁厚1.5 m;边塔墩直径6

收稿日期:2006-08-16

作者简介:张宏远(1965-),男,北京人,高级工程师,从事桥梁结构设计和研究工作。

研究与开发。

总之,提篮式拱用网状吊杆来代替竖直吊杆,从构造上来看,网状吊杆与拱肋和系杆的联结稍显复杂,但从内力分配和整体刚度上来看,优于吊杆竖直布置的系杆拱,是一种具有良好发展前景的大跨度桥梁形式。

## 参考文献

- [1]顾安邦等.拱桥(下册)[M].北京:人民交通出版社,1994.
- [2]顾安邦.桥梁工程(下册)[M].北京:人民交通出版社,1999.
- [3]项海帆等.拱结构的稳定与振动[M].北京:人民交通出版社,1991.
- [4]刘钊,吕志涛.竖吊杆与斜吊杆系杆拱结构的桥式研究[J].土木工程学报,2000,(5):63-67.
- [5]夏旻,刘浩.不同吊杆布置形式下简支梁拱组合体系拱桥的影响线特性分析[J].交通科技与经济,2004,(2):1-3.



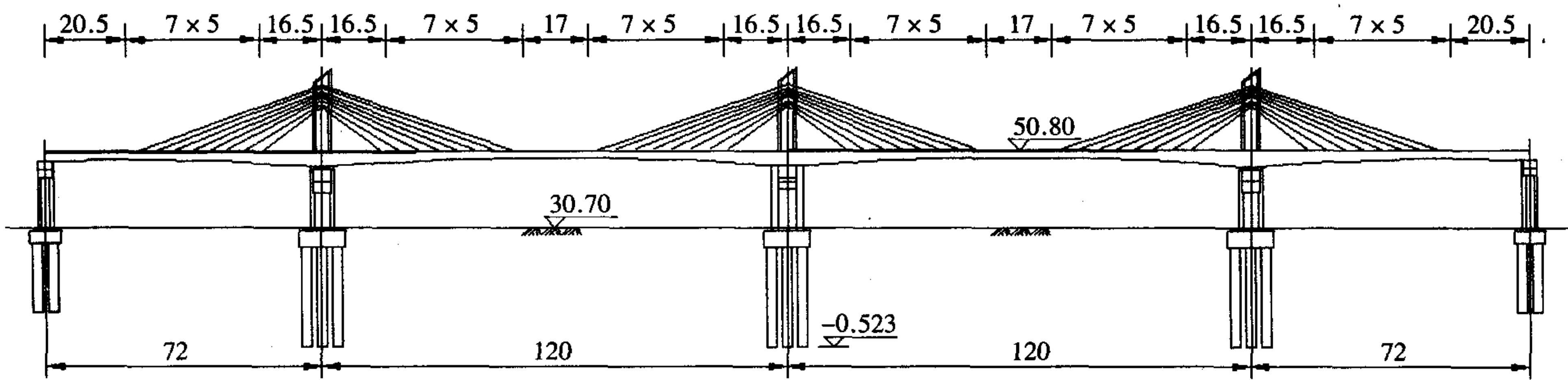


图 1 潮白河大桥主桥桥型布置图(单位:m)

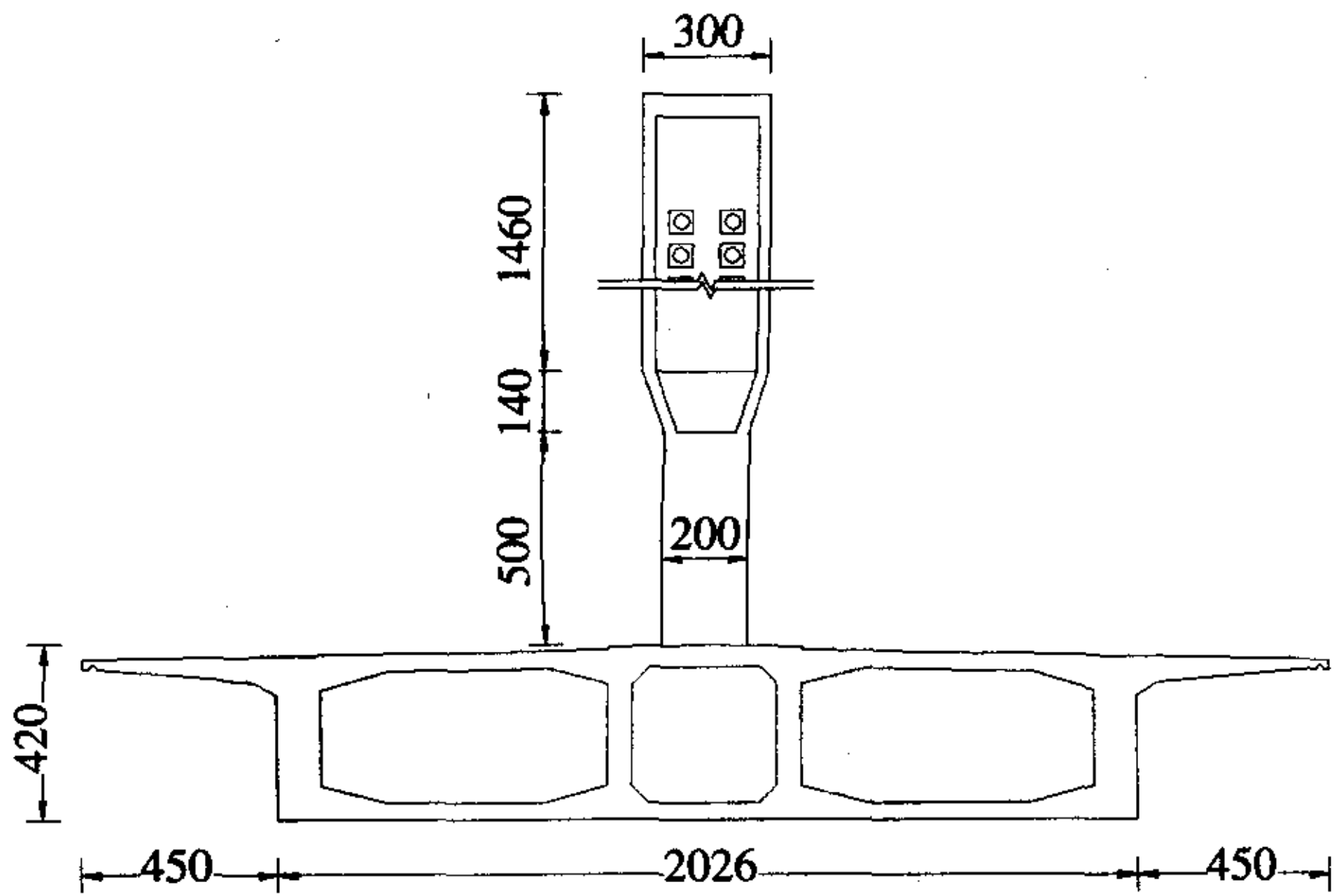


图 2 桥塔处上部结构横断面图(单位:cm)

m,壁厚 1.2 m;边墩直径 4 m,壁厚 1 m。墩下设承台和钻孔灌注桩。

2 纵向结构体系

2.1 选择纵向结构体系的基本思路

斜拉桥的纵向结构体系可分为漂浮体系和支承体系两大类<sup>[2]</sup>。在常规的斜拉桥中,最常用的纵向结构体系是漂浮体系,这主要是由于常规斜拉桥的拉索对主梁提供了足够的竖向弹性支承,主梁在塔墩处的支承并无必要。而且,采用纵向漂浮体系,可以避免主梁在塔墩处产生较大的负弯矩,同时降低了结构的纵向刚度,减少了外部作用引起的结构内力。但是,部分斜拉桥与常规斜拉桥不同。部分斜拉桥由于塔高较矮,斜拉索的水平倾角较小,不能对主梁提供足够的竖向支撑,主梁自重和移动荷载主要仍由主梁承担,斜拉索仅起辅助作用,结构的整体受力性能更接近于梁式桥。因此,部分斜拉桥不能采用纵向漂浮体系,主梁必须直接支承在塔墩上。

主梁与墩柱的连接方式有两种:墩梁固接和支座连接。在选择潮白河大桥的纵向结构体系时,首先要考虑中塔处塔梁墩的连接方式,因为在多塔斜拉桥中,往往由于缺乏有效的措施提高中间塔的刚度,导致结构变形过大<sup>[2]</sup>。墩梁固接可以提高结构刚度,减少结构位移,因此,潮白河大桥中

塔处采取塔梁墩固接的连接方式。另一方面,潮白河大桥是一个对称结构,中塔墩为对称中心,即所谓温度零点,温度变化时主梁在中塔处不产生位移,中塔处采取塔梁墩固接方式,温度作用不会引起结构内力。而边塔处墩梁之间的连接方式,可以采取墩梁固接,也可以采取支座连接。至于边墩处主梁的支承条件,与常规的斜拉桥相同,采用纵向活动支座。

2.2 不同纵向结构体系的比较分析

基于上述理由,潮白河大桥的纵向结构体系可以采取三个方案:(1)中边塔处均为塔梁墩固接,边墩处墩梁间滑动支座支承(体系 1);(2)中塔处塔梁墩固接,边塔处塔梁固接、墩梁间固定支座支承,边墩处墩梁间滑动支座支承(体系 2);(3)中塔处塔梁墩固接,边塔处塔梁固接、墩梁间滑动支座支承,边墩处墩梁间滑动支座支承(体系 3)。通过数值模型对这三种结构体系的动力特性以及在外部作用下的内力和位移进行比较分析。

数值模型为单主梁有限单元模型,主梁、桥塔、墩柱均采用梁单元模拟,斜拉索采用杆单元模拟,全桥共 310 个节点,345 个单元(其中杆单元 48 个),所有单元的截面尺寸和材料特性均按潮白河大桥的实际构造取值。数值模型不考虑桩的刚度以及桩-土-结构的相互作用,墩底固定。

表 1 是上述三种结构体系的自振特性,由于篇幅所限,表中仅列出各种结构体系前 3 阶振型的周期和振型特征。可以看到,三种结构体系低阶振型的特征基本相同,边塔处墩梁之间的连接方式对振型形状影响较小,但对自振周期影响较大。边塔处塔梁墩固接时,结构刚度较大,第一振型的自振周期仅为 0.98 s;边塔处墩梁之间为支座连接时,结构刚度明显降低,第一振型的自振周期在 1.5 s 以上。由于潮白河大桥墩柱刚度较大,相比之下主梁的刚度较弱,三种结构体系的第一振型和第二振型均为主梁的变形,第三振型以上才出现塔墩的变形。



表 1 不同结构体系的自振特性

振型	体系 1		体系 2		体系 3	
	周期	振型特征	周期	振型特征	周期	振型特征
1	0.98s	主梁竖向反对称	1.52s	主梁竖向反对称	1.58s	主梁竖向反对称
2	0.90s	主梁竖向正对称	1.34s	主梁竖向正对称	1.35s	主梁竖向正对称
3	0.77s	塔墩纵向,主梁竖向反对称	0.75s	塔墩纵向,主梁竖向反对称	0.87s	塔墩纵向,主梁竖向反对称

表 2 是三种结构体系在整体温度变化、纵向地震作用下的墩底反力和墩塔顶位移。限于篇幅,整体温度变化仅列出升温 25° C 的计算结果,纵向地震作用按反应谱理论计算,场地土为 II 类,基本烈度 8 度,反应谱曲线等计算参数按《公路工程抗震设计规范》(JTJ004-89)取值。从表 2 可以看到,体系 1 和体系 2 在边塔处墩梁间为固接或固定支座连接,温度变化时主梁纵向伸缩引起边塔墩变形,边塔墩底产生较大的弯矩,但由于上部结构的纵向刚度由三个塔墩共同提供,地震作用由三个塔墩共同承担,地震时中塔墩和边塔墩底弯矩分布相对比较均匀;体系 3 在边塔处墩梁间可以自由滑动,温度变化时主梁纵向伸缩对边塔墩内力没有影响,但由于上部结构的纵向刚度仅由中塔墩提供,地震作用主要由中塔墩承担,地震时中塔墩底弯矩远大于边塔墩。体系 1 由于边塔处塔梁墩固接,主梁对墩顶的转角有约束作用,温度变化和地震作用下墩顶位移和转角小于体系 2,但主梁和索塔与墩柱同步转动,边塔顶位移大于体系 2。

表 2 不同结构体系的墩底反力和墩塔顶位移

	体系 1		体系 2		体系 3	
	升温	地震	升温	地震	升温	地震
中塔墩底弯矩(kN·m)	-	226454	-	254748	-	323378
中塔墩顶位移(cm)	-	0.4	-	0.5	-	0.6
中塔墩顶转角(rad)	-	0.00032	-	0.00037	-	0.00048
中塔处主梁转角(rad)	-	0.00032	-	0.00037	-	0.00048
中塔顶位移(cm)	-	1.2	-	1.2	-	1.6
边塔墩底弯矩(kN·m)	409062	101800	452384	112898	-	57286
边塔墩顶位移(cm)	-2.0	0.45	-2.3	0.6	-	0.3
边塔墩顶转角(rad)	-0.00152	0.00034	-0.00185	0.00046	-	0.00023
边塔处主梁转角(rad)	-0.00152	0.00034	-0.00030	0.00030	-	0.00053
边塔顶位移(cm)	-5.2	1.1	-2.2	0.9	-3.0	1.6

从以上计算结果看,温度变化引起的墩底最大弯矩为 452384 kN·m,地震作用引起的墩底最大弯矩为 323378 kN·m,温度变化对结构的影响大于地震作用,因此,潮白河大桥应该优先考虑温度效应较小的纵向结构体系。体系 3 由于仅在温度零点中塔处塔梁墩固接,边塔和边墩处墩梁间均为纵向滑动支座,温度变化对结构的影响最小,作为潮白河大桥的纵向结构体系是一个较好的方案。但是,体系 3 主要由中塔墩抵抗地震作用,地震时结构受力比较集中,中塔墩底弯矩较大。

2.3 采用阻尼器降低结构的地震效应

潮白河大桥采用中塔处塔梁墩固接、边塔和边墩处墩梁间滑动支座支承的纵向结构体系,虽然可以有效消除温度变化对结构的不利影响,但由于上部结构与墩柱仅在中塔处有水平连接,地震作用时结构受力比较集中,中塔墩底的弯矩较大。为了确保潮白河大桥在地震时的安全性,考虑在大桥上设置阻尼器,降低结构的地震效应,提高结构的安全度。

阻尼器是大跨径桥梁结构常用的减震装置之一。一般大跨径桥梁结构自身的阻尼比较小,在结构上设置阻尼器,可以耗散地震能量,减小结构的地震反应<sup>[3]</sup>。潮白河大桥采用上海材料研究所的粘滞阻尼器 NZ-200,最大阻尼力 2000 kN,在边塔处主梁与墩柱之间各设 2 个阻尼器。

为了验证阻尼器的减震效果,对潮白河大桥有无阻尼器两种情况进行时程反应计算和对比。时程反应计算的输入地面加速度采用 EL-Centro 地震波,峰值 0.36 g。由于地震时程分析的影响因素较多,其计算结果不便直接与反应谱计算结果进行比较,仅给出有无阻尼器两种情况时程反应计算结果的比值,如表 3 所示。

表 3 EL-Centro 波作用下有无阻尼器结构反应比较

	中塔墩底弯矩	中塔顶位移	边塔墩底弯矩	边塔顶位移
有阻尼器 / 无阻尼器	0.55	0.46	0.38	0.43

从表 3 可以看出,设置阻尼器后,中塔墩底弯矩降低 45%,中塔顶位移降低 54%,阻尼器的减震效果比较显著,地震时结构的内力和位移明显减小,安全度得到提高。

3 横向结构体系

在桥梁结构中,由于移动荷载横桥向分布的不均匀性,必然会对主梁产生扭转作用,因此,桥梁的横向结构体系应具有抗扭支承抵抗主梁的扭转。如果在主梁的某一断面处设置两个或两个以



上竖向支承,即可在该断面处形成抗扭支承,抗扭约束刚度与竖向支承的刚度和间距有关;若墩梁固接,由于墩柱本身具有横桥向抗弯刚度,对主梁的扭转有约束作用,抗扭约束刚度就是墩柱的横桥向抗弯刚度<sup>[4]</sup>。

在双索面斜拉桥中,斜拉索对称布置于主梁两侧,形成对主梁的多点抗扭支承,桥塔处可以不设竖向支座约束主梁扭转。潮白河大桥为独柱单索面部分斜拉桥,斜拉索布置在中央分隔带上,对主梁的扭转没有约束作用,只能依靠墩柱与主梁的连接约束主梁的扭转。在对潮白河大桥纵向结构体系的分析中,已经确定中塔处为塔梁墩固接,边塔墩和边墩处墩梁间为纵向滑动支座连接,则中塔处对主梁扭转的约束由中塔墩的横向抗弯刚度提供,而边塔墩和边墩顶横桥向需设两个或两个以上竖向支承。潮白河大桥边塔墩和边墩直径分别为 6 m 和 4 m,尺寸有限,不利于横向布置多个支座,为了实现对主梁的有效抗扭支承,潮白河大桥在边塔墩和边墩顶均设置盖梁,盖梁上布置四个支座支承主梁,约束主梁的扭转,如图 3 所示。边塔墩和边墩顶的支座均为横向固定支座,以保证在横向地震作用下各墩柱共同受力。

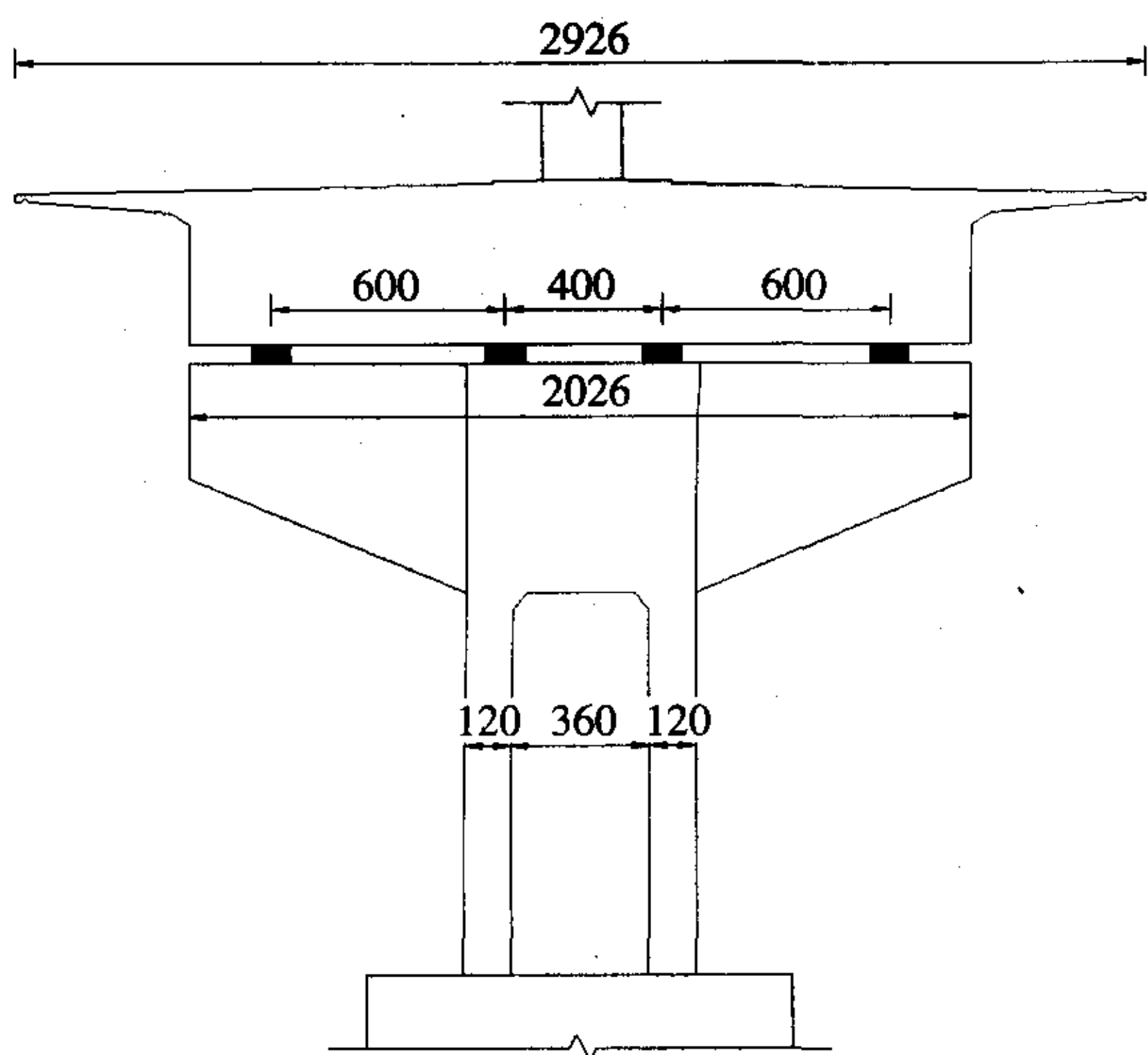


图 3 边塔处主梁抗扭支承布置图(单位:cm)

这里特别要提到约束主梁扭转时墩柱截面的

选择问题。一般来说,利用墩柱的横向抗弯刚度约束主梁的扭转时,应尽量采用矩形墩,因为矩形截面的抗弯刚度较大,对主梁扭转的约束效果优于圆形截面;当墩梁间为支座连接时,矩形截面也便于多个支座的横向布置。潮白河大桥由于河道水流条件的限制,所有墩柱均采用圆形截面,但对于横向结构体系来说,并不是最理想的方案。

4 结语

对于中小跨径的桥梁结构,一般情况下依靠构件本身的抗力就能够保证结构的安全性,采用不同的结构体系对改善结构受力状况并无明显效果。但是,大跨度桥梁结构受温度变化、地震作用的影响很大,这些作用可能会成为控制结构设计的主要因素,产生的内力和变形也根据结构体系的不同而有很大差异,有时结构体系选择不当,仅仅依靠增加构件尺寸根本无法满足结构的安全性要求。为了取得经济合理的设计结果,对于大跨度桥梁结构,应该对不同结构体系的受力性能进行分析研究,从中选择最佳设计方案。

潮白河大桥为国内首座三塔部分斜拉桥。本文针对部分斜拉桥的特点,对潮白河大桥不同结构体系的受力性能进行了比较研究,结合计算分析结果,确定潮白河大桥的结构体系为中塔处塔梁墩固接,边塔处塔梁固接,边塔和边墩处墩梁间采用多个纵向活动、横向固定支座,并在边塔处墩梁间设置纵向阻尼器。所选择的结构体系既消除了温度变化对结构的不利影响,又减少了地震作用下的结构内力,并形成了对主梁的有效抗扭支承,在满足安全性和使用功能的前提下达到优化设计的目的。

参考文献

[1]陈宝春等.部分斜拉桥发展综述[C].2004 年全国桥梁学术会议论文集,人民交通出版社.  
[2]陈明宪.斜拉桥建造技术[M].人民交通出版社,2004.  
[3]范立础等.大跨度桥梁抗震设计[M].人民交通出版社,2001.  
[4]邵容光等.混凝土弯梁桥[M].人民交通出版社,1994.

广州新增污水处理能力 40 万吨 / 日

近日,比广州市现有污水处理厂更为先进的猎德污水处理厂三期、大沙地污水处理厂首期正式通水试运行,广州市城市污水处理能力将新增 40 万 t/d,中心城区将达到 185.3 万 t/d。其中,大沙地污水处理厂填补了黄埔区没有污水厂的空白,大大减少了排向珠江的污染物。广州市还将继续提升城市污水处理能力,兴建猎德厂四期以及沥滘厂二期。