瓯江北口大桥钢桁梁悬吊方案及结构体系研究

马碧波[1]　李　恒[2]　廖刘算[1]
（1. 浙江数智交院科技股份有限公司　杭州　310030；2. 中铁大桥勘测设计院有限公司　武汉　430056）

［摘　要］瓯江北口大桥采用主跨2×800mA型混凝土中塔钢桁梁悬索桥，为世界上首次采用。为了使其设计安全合理、造价经济、结构耐久，需要对不同结构体系进行深入比选研究。通过研究对比四跨吊和两跨吊2种方案，择优选择了三塔四跨悬吊方案；通过对加劲梁7种不同约束体系下的力学行为进行分析计算，确定了加劲梁的合理约束体系方案：首先加劲梁采用四跨连续体系，在中塔下横梁之间设置纵向系梁，其上设置单排竖向支座，边塔处类同；其次加劲梁纵向采用全飘体系，仅在边塔的横梁上设有纵向液压阻尼装置；最后在边塔柱及中塔柱侧壁钢桁梁上、下弦处同时设置横向抗风支座。

［关键词］悬索桥；钢桁梁；刚性中塔；悬吊方案；结构体系；三塔四跨；双层桥梁

1　概述

多塔悬索桥受整体刚度与主缆抗滑移问题限制，制约了其应用与发展。但若能通过提高主缆与鞍座间抗滑能力的同时对结构体系进行合理的设计，可以从根本上解决“中塔效应”对多塔连跨悬索桥方案的设计制约[1-2]。目前国内已经建成的三塔大跨度悬索桥分别在结构体系上进行了一些尝试和创新，如泰州长江大桥在中塔处加劲梁上设置纵向弹性索、马鞍山长江大桥在中塔处采用塔梁固结体系、鹦鹉洲长江大桥采用四跨简支体系等[3-4]。

瓯江北口大桥跨江主桥采用三塔四跨双层钢桁梁悬索桥，为世界上首次采用，与国内已建成的三座三塔悬索桥相比，在中塔和加劲梁结构形式等方面存在较大区别[5-7]，使得该桥的结构静动力性能与国内已经建成的三座三塔悬索桥有所不同。为了使瓯江北口大桥主桥设计安全合理、造价经济、结构耐久，需要对不同结构体系进行深入比选研究，彻底弄清不同结构体系对其结构行为特性的影响，得出合理的结构体系方案。

2　钢桁梁悬吊方案研究

2.1　四跨吊与两跨吊桥跨布置

四跨吊方案[8]：主缆跨度布置为（230+800+800+348）m，悬吊部分加劲梁的跨度为（213.6+800+800+273.6）m，主桥加劲梁全长2087.2m（图1）。

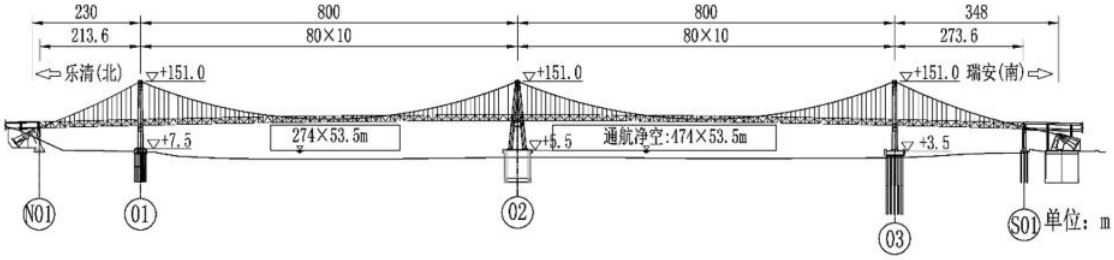

图1　四跨吊桥式布置总图

收稿日期：2021-11-15
作者简介：马碧波（1983-　），男，高级工程师，主要从事桥梁结构设计工作。

两跨吊方案：主缆跨度布置与四跨吊方案相同，仅两个主跨的加劲梁悬吊在主缆上，加劲梁全长 1600.0m。北岸边跨引桥采用 4×68.75m 的钢混组合连续梁，顶推施工；南岸边跨引桥为 4×68.75m 的预应力混凝土梁桥，采用预制节段拼装施工（图 2）。

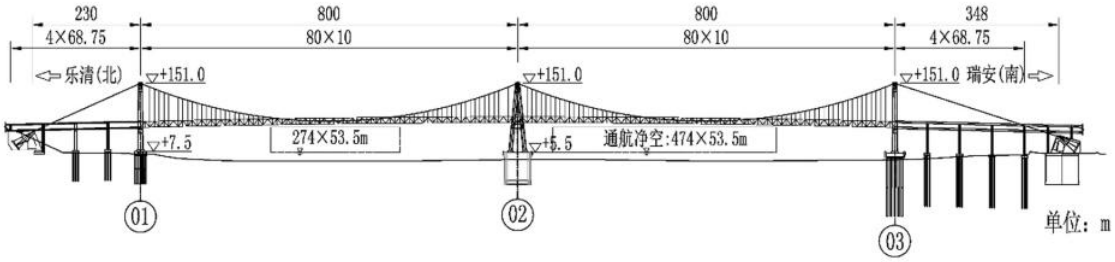

图 2　两跨吊桥式布置总图

2.2　四跨吊方案与两跨吊方案比选

利用非线性有限元分析程序 BNLAS 建立结构整体空间模型，从主缆受力、索塔受力、整体刚度、锚碇规模、主缆抗滑移等各项主要受力指标进行综合对比分析后发现（表 1）：

1）四跨吊方案主缆拉力增大，主缆索股需加大。四跨吊主跨及南边跨通长索主缆规格为 169-127Φ5.54mm，两跨吊主跨及南边跨通长索主缆规格为 169-127Φ5.46mm。

2）四跨吊与两跨吊方案北塔及中塔应力变化不大，四跨吊方案南塔应力较两跨吊方案有所增加。

3）两种方案主梁竖向刚度及梁端位移变化不大，但四跨吊方案梁端转角大幅减小约 47%，由于钢桁梁梁高较高，转角减少后伸缩缝的反复开合会得到改善，对行车有利。

4）四跨吊与两跨吊方案，主缆入射角变化较大，主缆水平力基本不变，但四跨吊方案竖向力减小后可以减少锚碇的规模，以北锚为例，可以减少约 4300m^{3}混凝土。

5）四跨吊方案对中塔处主缆抗滑移安全系数小幅提高约 3.6%，这主要是恒载缆力增大所致。

表 1　四跨吊与两跨吊方案计算结果汇总表

	方案	四跨吊方案	两跨吊方案
主缆受力	主缆最大轴力（恒+活+温）（kN）	374593	361928
	主缆最大应力（恒+活+温）（MPa）	702	703
索塔受力	北塔最大应力（恒+活+温）（MPa）	16.61 / 3.13	16.34 /2.93
	中塔最大应力（恒+活+温）（MPa）	17.23 /-2.68	17.40 / -2.99
	南塔最大应力（恒+活+温）（MPa）	17.53 / 1.10	16.38 /0.95
	中塔顶最大位移（恒+活+温）（m）	0.154	0.159
整体刚度	主跨加劲梁挠度（活载）（m）	-1.316	-1.284
	梁端最大纵向位移（恒+活+温）（m）	0.522	0.545
	边跨梁端转角（活载）（rad）	0.0037	0.0069
锚碇受力	北锚碇处最大缆力（恒+活+温）（kN）	347593	357421
	北锚碇处主缆切线角度（°）	19.2517°	24.0607°
	南锚碇处最大缆力（恒+活+温）（kN）	334553	339426
	南锚碇处主缆切线角度（°）	-11.5114°	-16.0920°
钢丝与鞍槽间抗滑移	鞍槽与钢丝间摩擦系数	0.3	0.3
	中塔主缆抗滑移安全系数	2.01	1.94

综上所述，四跨吊方案比两跨吊方案受力性能更合理，同时结合引桥施工风险、船撞风险、景观效果等因素，考虑工程量及造价增加很少[8]，瓯江北口大桥最终采用钢桁梁四跨吊方案。

3 约束体系研究

三塔悬索桥约束体系的研究，主要包括中塔处主梁与中塔间纵向和竖向连接，边塔处主梁与边塔间纵向和竖向连接，跨中主梁与主缆的连接[9-11]；由于主梁与边塔间纵向连接除须结合中塔综合考虑外，竖向连接与中塔处没有明显区别，故竖向连接可以以中塔研究成果作为参考。

3.1 竖向支承体系

加劲梁在中塔处的竖向约束体系可分为两大类[12]：第一类为多跨简支体系，即主梁在中塔处断开，如下图方案一；第二类为多跨连续体系，即主梁连续通过中塔，根据吊索及支座的布置形式，可分为另外 6 种方案，如下图方案二~方案七。

方案二：离中塔中心线 20m 设置第一对吊索（吊索 2#），悬吊于主缆上；

方案三：离中塔中心线 10m 设置第一对吊索（吊索 1#），悬吊于主塔上塔柱上，离中塔中心线 20m 设置第二对吊索（吊索 2#），悬吊于主缆上；

方案四：在主塔中心处设置一对 0#吊索（吊索 0#），悬吊于中塔横梁上，离中塔中心线 10m 设置第一对吊索（吊索 1#），悬吊于主塔塔柱上，离中塔中心线 20m 设置第二对吊索（吊索 2#），悬吊于主缆上；

方案五：在主塔中心处设置一对 0#吊索（吊索 0#），悬吊于主塔横梁上，离中塔中心线 20m 设置第二对吊索（吊索 2#），悬吊于主缆上。

方案六：离中塔中心线 20m 设置第一对吊索（吊索 2#），悬吊于主缆上，在两主塔柱中横梁所对应的钢桁梁下弦节点处沿纵向设置两排竖向支座。

方案七：离中塔中心线 20m 设置第一对吊索（吊索 2#），悬吊于主缆上，在两主塔柱中横梁之间设置系梁，在塔柱中心线对应的钢桁梁下弦节点处设置一排竖向支座。

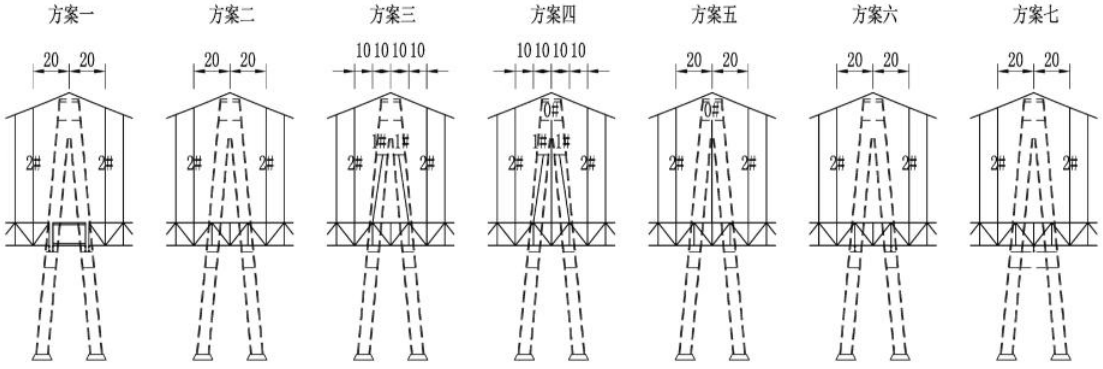

图 3 七种方案中塔竖向约束体系布置图（单位：m）

针对上述 7 个竖向支撑方案建立有限元总体模型，分别研究主梁与中塔间不同的竖向连接方式对主缆、吊索、钢桁梁、支座的影响后发现：

1）各竖向约束体系方案主缆抗滑安全系数相差不大，均在 2.0 左右，方案六主缆抗滑移安全系数最大为 2.16；

2）方案一、方案六吊索力与普通吊索基本相当；方案七吊索力是普通吊索力的 1.5 倍左右；方案二、方案三吊索力非常大，单侧吊索力达到 12000kN 以上，索夹的设计较为困难；方案四、方案五的 0#索有卸载现象，且吊索力

及应力幅值均很大（表2）。

3）各竖向约束体系方案，除方案五钢桁梁竖杆应力较大之外，其他方案主梁的应力通过适当调整截面基本能满足设计要求，其中方案一的主梁应力水平较低（表3）。

4）方案一支座负反力较小仅为3084kN，方案六支座负反力高达20915kN，负反力过大对支座以及支座锚栓附近混凝土的局部受力提出了非常高的要求，方案七负反力6838kN，处于可控范围，采用局部少量压重即可消除该处负反力。

表2　七种方案吊索内力

单位：kN

方案	2#吊索		1#吊索		0#吊索	
	最大	最小	最大	最小	最大	最小
一	2884	1860	—	—	—	—
二	12483	2767	—	—	—	—
三	2751	2251	13349	−1674	—	—
四	2769	2268	8264	−848	9419	−1272
五	4499	3346	—	—	22044	−4301
六	2808	2113	—	—	—	—
七	4147	3259	—	—	—	—

表3　七种方案中塔处钢桁梁应力

单位：MPa

方案	上弦杆		下弦杆		竖杆		斜杆	
	最大	最小	最大	最小	最大	最小	最大	最小
一	60.5	−132.6	91.4	−42.7	166.3	−202.0	143.3	−150.6
二	55.3	−142.3	123.3	−91.5	163.1	−237.8	154.2	−144.9
三	80.8	−138.7	115.9	−114.3	164.9	−195.6	161.3	−188.2
四	82.7	−140.9	116.5	−113.6	158.3	−186.1	161.5	−188.2
五	85.8	−140.8	117.4	−149.8	206.8	−383.8	158.1	−184.2
六	148.8	−209.3	119.6	−122.6	160.7	−188.9	195.7	−227.1
七	88.5	−148.7	125.3	−121.9	158.4	−189.7	160.9	−186.4

综合主缆抗滑移、吊索受力、主梁受力、支座受力以及运营舒适性等各方面因素考虑，瓯江北口大桥中塔处的竖向约束体系最终采用方案七。为降低支座设计难度、支座及锚固区混凝土受力的运营风险，对中塔塔根附近梁段进行适当的压重，以彻底消除支座负反力。

3.2　纵向支承体系

纵向支承体系主要包括塔梁连接形式和缆梁连接形式[13-15]。针对塔梁连接形式分别研究了主梁与中主塔间纵向不约束、弹性索约束、刚性限位挡块约束三种情况，分析对中塔受力、主缆抗滑移安全、主梁受力、支座参数等因素的影响。针对缆梁连接形式分别研究了主跨跨中不设中央扣、设1对柔性中央扣、设3对柔性中央扣三种情况，分析跨中主梁与主缆间的连接对中塔受力、主缆抗滑移安全、主梁受力、支座参数以及动力性能方面的影响。根据计算结果发现：

1）加劲梁与中塔间是否设置纵向约束，对主缆与中主鞍座间抗滑移安全以及中塔受力影响不大；弹性索、刚性约束方案的加劲梁纵向活载梁端位移基本相当，全飘体系位移稍大（表4），加劲梁竖向刚度三种方式也基本一致；弹性索方案索力幅值较大，刚性约束方案支座往复作用力较大。由于全飘体系构造简单，经济实用，功能与其他约束方式差别不大，因此，瓯江北口大桥加劲梁与中塔间纵向采用全飘体系，通过在边塔处设置纵向阻尼器以遏制加劲梁在日常行车条件下梁端纵移的速度。

2）设置中央扣后，中央扣内力非常大，且应力幅非常高，设置中央扣可减小结构纵向位移，提高结构竖向刚度，但数值十分有限，约10%左右，基于中央扣内力及应力幅均较大的情况下，结构构造设计困难，疲劳应力幅高。

表4　活载作用下梁端位移

单位：m

约束形式	梁端位移（南）		主梁竖向位移	
	最大	最小	最大	最小
全飘	0.113	−0.120	0.383	−1.319
弹性索	0.049	−0.044	0.372	−1.318
刚性约束	0.053	−0.048	0.371	−1.318
中央扣	0.102	−0.108	0.356	−1.288

3.3　横向支承体系

对于主塔处加劲梁的横向约束方式，分别研究了在加劲梁下弦、上弦、以及上弦和下弦

同时设置横向抗风支座等三种情况，其中中塔纵向设置两排横向抗风支座，分别支撑在A型中塔纵向两塔柱上。

根据计算分析可知：加劲梁仅在上弦或仅在下弦设置抗风支座时，腹杆面外弯矩较大，单项风荷载作用下其应力水平较高，弦杆应力也较高（表5）；在上、下弦同时设置抗风支座时，弦杆及腹杆受力大有改善，且抗风支座规模较小，对主梁和索塔局部受力均较为有利。因此，瓯江北口大桥最终在上、下弦同时设置抗风支座。

表5　极限风荷载作用下主梁应力

单位：MPa

约束形式	弦杆		竖杆		斜杆	
	最大	最小	最大	最小	最大	最小
下弦设置抗风支座	129.8	−218.5	76.3	−70.0	14.3	−15.3
上弦设置抗风支座	130.1	−208.4	119.0	−99.5	78.9	−75.3
上、下弦均设置抗风支座	121.1	−168.4	6.6	−11.4	24.9	−24.9

4　结论

多通道合建的多塔连跨大跨度桥梁是我国未来在海峡、海湾、江口等深水条件下设计长大桥梁需要重点研究的桥梁方案，瓯江北口大桥首次采用三塔四跨主梁连续结构，在对其悬吊方案和结构体系进行系统研究后整理成果如下：

1）四跨吊与两跨吊方案相比主梁竖向刚度及梁端位移变化不大，但四跨吊方案梁端转角大幅减小，对行车有利。

2）加劲梁竖向支撑体系对支撑位置附近的吊杆及主梁局部受力有很大的影响，在采用混凝土中塔的情况下，支撑体系的选择取决于支撑位置附近的吊杆受力及主梁局部受力。

3）中塔处设置两排竖向支撑会形成很大的支座负反力，这是由于两排支座受结构尺寸限制距离太近，在其中一跨加载时，空载跨会上翘；中塔或边塔处设置0#或1#吊索，均会产生卸载现象，其吊索应力幅很大；设单排竖向支座后，会产生支座负反力，但反力值不大，可以采用主梁局部压重的方式解决。

4）设置中央扣后，可减小主梁纵向位移，提高桥梁整体刚度约10%左右，但由于中央扣自身及其布置范围内吊索的内力幅很大，在解决由此导致的疲劳、锚固及索夹滑移等问题之前，不宜应用在大跨度多塔悬索桥中。

参考文献

[1] 沈锐利，侯康，王路，等．三塔悬索桥结构竖向刚度及主缆抗滑需求［J］．东南大学学报（自然科学版），2019，49（3）：474-480.
[2] 沈锐利，侯康，张新，等．三塔四跨悬索桥合理结构布置形式研究［J］．中外公路，2019，39（3）：101-106.
[3] 侯康．多塔悬索桥合理结构体系及结构适用性研究[D]．成都：西南交通大学，2018.
[4] 唐贺强．减小三塔悬索桥中塔顶主缆不平衡力的设计思路［J］．桥梁建设，2015，45（5）：83-86.
[5] 高宗余，史方华，等．温州瓯江北口大桥主桥设计关键技术［J］．桥梁建设，2017，47（1）：1-5.
[6] 罗扣，舒思利，万田保，等．温州瓯江北口大桥中塔结构形式比选［J］．桥梁建设，2018（1）：88-93.
[7] 马碧波，叶雨清，白雨东，等．瓯江北口大桥中塔设计及索鞍施工预偏量影响研究［J］．桥梁建设，2018（6）：41-46.
[8] 戴显荣，王昌将，王晓阳，等．瓯江北口大桥总体设计及结构选型［J］．桥梁建设，2019，49（3）：80-85.
[9] 李万恒，王元丰，李鹏飞，等．三塔悬索桥桥塔适宜刚度体系研究［J］．土木工程学报，2017，50（1）：75-81.
[10] 鲜荣，徐源庆，刘得运，等．黄茅海超大跨三塔斜拉桥结构体系研究［J］．桥梁建设，2021，51（6）：9-15.
[11] 魏乐永，熊文，崔冰，等．南京长江五桥结构竖向刚度分析与优化［J］．公路，2019，64（5）：149-153.
[12] 马秀君，马碧波，等．三塔四跨悬索桥支撑体系方案比选［J］．世界桥梁，2016，44（3）：16-20.
[13] 孙军举，苏剑南，甘露，等．郭家沱长江大桥索夹设计及受力分析［J］．公路交通技术，2016，32（6）：61-64.
[14] 李林，陈奉民，郑升宝，等．重庆笋溪河大桥钢桁梁悬索桥设计［J］．公路交通技术，2021，37（3）：64-70.
[15] 王志诚．棋盘洲长江公路大桥主桥约束体系研究［J］．中外公路，2018，38（1）：176-179.