

芜湖长江大桥的技术创新

中国工程院院士 方秦汉



方秦汉,桥梁工程专家,中国工程院院士。1950年毕业于清华大学。现任中铁大桥工程局集团及中铁大桥勘测设计院副总工程师、华中科技大学土木工程与力学学院名誉院长。曾参加武汉长江大桥、南京长江大桥、九江长江大桥、芜湖长江大桥等大型桥梁的钢梁设计与科研。在上述大型桥梁工程中,研究、开发、创新、推广新材料、新结构、新工艺,为推动我国铁路桥梁“高强、轻型、整体、大跨度、新结构”技术政策的实现作出了重大贡献,先后获得4项国家科学技术进步奖(特等、一等、二等、三等奖各1项),铁道部科学技术进步奖6项及第三届詹天佑大奖。

摘 要 芜湖长江大桥是一座公路铁路两用桥,在我国第一次采用的新技术有三大类,即矮塔公铁两用斜拉桥,以及斜拉桥加劲桁梁采用14锰铌钢厚板焊接整体节点和钢筋混凝土板与钢桁梁结合的结合桁梁。该桥的建成,将我国建桥技术水平推上一个新的台阶。

关键词 矮塔斜拉桥 公铁两用桥 厚板焊接 结合桁梁

1 概况

上世纪末建成通车的芜湖长江大桥是一座公路铁路两用桥,铁路双线、公路4车道。在正桥部分,公路铁路上下分层布置,铁路在下层,公路在上层,公路面行车道净宽18 m,两侧各设1.5 m宽的人行道。

铁路桥总长10 511.3 m,公路桥总长5 681.2 m,其中正桥钢梁14孔,总长2 193.7 m,其中,第一联为120 m+2×144 m连续钢桁梁,第二、三联为2×3×144 m连续钢桁梁,第四联为180 m+312 m+180 m矮塔斜拉桥,第五联为2×120 m连续钢桁梁。全桥总布置如图1所示。

2 矮塔斜拉桥

主航道梁底高程受通航净空控制,铁路桥面轨底高程受既有编组站接线高程控制,桥梁上空受附

近机场飞行净空控制,而桥梁的跨径受制于通航净宽的要求(主航道通航净宽160 m,副航道通航净宽120 m)。在这种极其苛刻的条件下,斜拉桥的孔径布置为180 m+312 m+180 m,塔高在公路面以上仅32.27 m,塔高与主跨之比为0.11,约为正常斜拉桥的一半,在铁路重载条件下,加大跨径是有困难的。边跨与主跨之比为0.577,这一比值远大于常规值,削弱了梁的刚度。

2.1 斜拉桥的刚度

铁路动荷载与公路动荷载是完全不同性质的荷载,一线铁路荷载约相当于15线汽车设计荷载,列车的动力作用更非汽车所能比拟,由于列车动力作用大,对列车的运行平稳性和司乘人员、旅客的舒适度等均有严格要求,桥梁的刚度是至关重要的,铁路桥适宜用刚性体系的桥梁。公路汽车荷载轻、灵活、动力作用小,可以用柔性体系的桥梁。将柔性体系的斜拉桥改造成刚性体系的斜拉桥,在技术上有一定难度。

提高该斜拉桥的刚度主要有3条措施:

收稿日期:2002-04-27

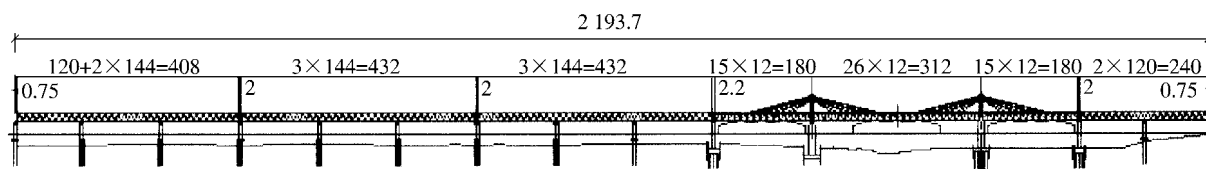


图1 芜湖长江大桥(单位:m)

(1) 加劲梁采用钢桁梁。

(2) 公路行车道钢筋混凝土板与钢桁梁(上弦杆)结合共同受力(以下简称结合桁梁),除增加梁的竖向刚度外,横向刚度的增加尤其显著。

(3) 塔矮,斜拉索的倾角小,水平分力大,在这种情况下,公路桥,可设计成体外预应力体系的桥梁,即斜拉索不锚固在塔顶上,索在塔顶的鞍座上通过,塔不承受索的水平力,仅起到支承作用。若锚固在塔顶,塔对梁的竖直变位有约束作用,塔的刚度越大,约束作用亦越大。为了提高梁的刚度,采用了将斜拉索锚固在塔顶的斜拉桥体系。

2.2 总体布置

主塔采用外形简洁的直塔结构,双塔双索面,每塔设8对钢丝绳,每索2根并列式的平行钢丝绳,上下游索距23.4m,最外索的倾角约 15.08° 。加劲钢桁梁的桁高13.5m,两主桁中心距12.5m,是主跨的 $1/25$,桁架为N形体系,主桁两侧设托架,用于锚固拉索。加劲钢桁梁的断面如图2所示。

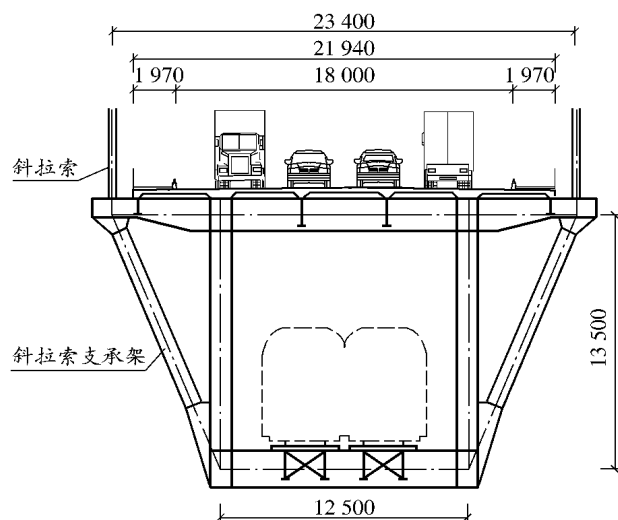


图2 加劲钢桁梁断面(单位:mm)

公路斜拉桥可采用飘浮体系,这种体系能否适用铁路桥,尚待研究。经研究,梁的纵向水平支承,可在两塔处设置约束水平位移的水平弹性索。

两主塔基础高差较大(12m),所以两塔的刚度不同,因此设计的弹性索水平约束的刚度也不同。

2.3 主塔的构造

两主塔位于

主航道上,主航道水深15~32m,河床覆盖层较薄,故采用低承台基础——双壁钢围堰钻孔基础。双壁钢围堰外径30.5m,壁厚1.4m,围堰高分别为52m和43m,井内外抽水水头差42m,是目前长江上抽水最深的围堰。左塔布置19根 $\phi 3.0$ m钻孔桩,右塔布置17根 $\phi 3.0$ m钻孔桩。左塔基础布置如图3所示。

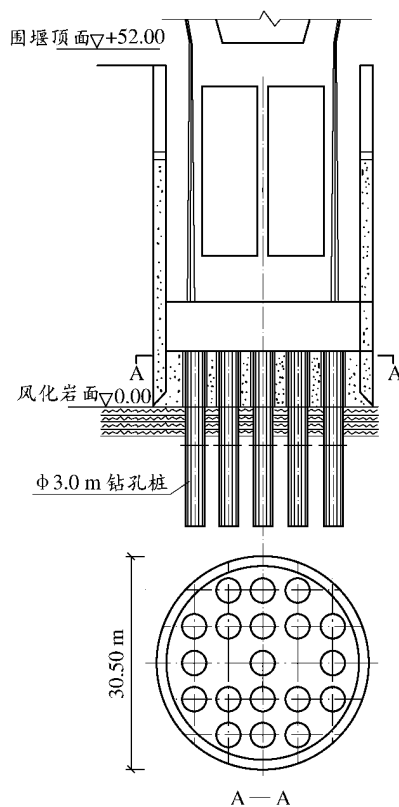


图3 左塔基础布置

塔是空心的矩形截面,8对钢丝绳锚固在塔顶,上、下索的间距1.2m,为了留出张拉钢丝绳的空间,左右索之间不设置抵消索的水平力的附属设施,索直接锚固在塔壁上(图4),此区段采用了预应力结构。

2.4 斜拉索

斜拉索的倾角较小,最小倾角为 15.08° ,最大倾角为 33.61° ,最大索力17400kN,由2根并列索分担,每根索的钢丝数,按索力大小确定由283丝至337丝。

钢丝的极限强度 = 1780 MPa,低松弛,直径7

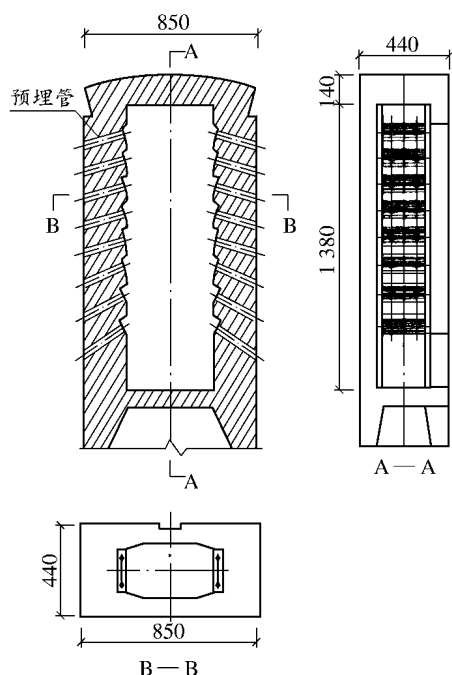


图4 塔顶锚固构造(单位:cm)

mm。设计容许应力 $[\sigma] = 0.4$ ，安装容许应力 $[\sigma] = 0.45$ 。

铁路动荷载大，应力变程也大，原设计要求斜拉索应力循环 2×10^6 次后，应力变程达到250 MPa。

成品索标准：

(1) 静载破断荷载不小于拉索标准破断荷载的95%；

(2) 静载破断延伸率不小于2%；

(3) 抗拉弹性模量不小于 1.95×10^5 MPa；

(4) 锚具冷铸填料加热至70℃高温时，应满足锚固性能要求；

(5) 出厂前应进行预张拉。

2.5 钢筋混凝土结合板

结合钢桁梁是近年来发展起来的。芜湖长江大桥正桥钢梁总长2193.7 m，全部采用钢桁结合梁，除了增加梁的刚度外，公路行车道板无缝，有利于公路行车及桥梁养护，亦可节约钢材。

(1) 混凝土板与钢板梁结合，其结合面剪切力是由弯剪产生的。剪力钉的布置随着剪力的大小而分布。

混凝土板与钢桁梁结合时，节点处的不平衡水平力由混凝土与钢的结合杆件换算面积大小按比例分配，其连结剪力钉集中布置在节点范围内。杆件

范围内仍按弯剪原理求得的剪力布钉。

(2) 结合连续板梁的受拉区，近似于三角形，而结合桁梁的受拉区是一平面。

(3) 内力分析中，引进弹模比 n ， $n = E_s / E_c$ ； E_s 为钢的弹性模量，变异较小， E_c 为混凝土的弹性模量，其变异较大，故 n 为较难掌握的系数。

在结合钢板梁中， n 改变，梁的中心轴也跟着改变，对梁的应力影响较小。

在结合钢桁梁中，节点的不平衡水平力在结合杆件中是根据换算面积大小按比例分配的， n 改变，内力分配随之改变。

(4) 公路桥梁，恒载是主要的，动载所占比重较小，尤其是大跨度桥梁。铁路桥梁却相反，动载所占比重较大。

公路、铁路2种桥梁，静、动荷载比值相差悬殊。而结合梁多用于公路桥，在强大铁路动荷载作用下，对结合梁的影响尚缺乏研究。

2.5.1 结合板试验研究

(1) 进行了 $\varnothing 2$ 及 $\varnothing 5$ 焊钉的动、静载对比试验，决定采用 $\varnothing 2$ 焊钉并确定其动、静载容许力。

(2) 进行了80个群钉的静载试验。

(3) 对板桁结合梁受拉区做了大量的动、静载对比试验研究，包括：混凝土板裂纹的分布、扩展和控制；混凝土板出现微裂纹后剪力连接件的受力行为和传力性能；结合梁的刚度变化，应力分布变化和极限承载力等；预制板横向工地接缝处，连接接头形式的对比试验。

(4) 动荷载下，C50混凝土的弹性模量试验。

(5) 1/5大比例尺结合板节段模型试验(图5)。



图5 结合板节段模型试验

结合上述一系列试验，并参照结合梁的有关规定，制订了“芜湖长江大桥结合钢桁梁设计条文”。

2.5.2 结合板结构设计

公路混凝土桥面板支承在钢梁上弦杆、公路纵

梁及公路横梁组成的梁格体系上。桥面板全宽 21.94 m,在主桁一个节间 12 m 范围内横向分为 5 块,桥面板厚 26 cm,混凝土强度等级 C50。

桥面板通过布设在钢梁主桁上弦杆上的剪力钉与钢梁杆件结合,剪力钉为 $\varnothing 2$ 圆头焊钉(图 6),桥面板顺桥向内力主要由钢梁节点传入,所以剪力钉集中布置在节点范围内,节间处则按梁的受力条件布钉。

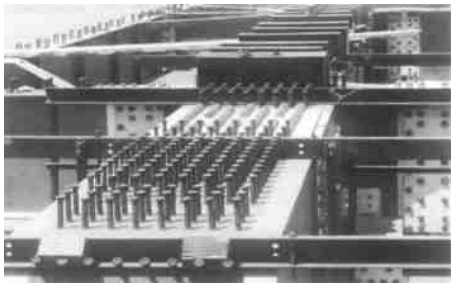


图 6 钢梁上的焊钉

桥面板是预制的,要求至少存放半年后上桥安装。预制桥面板安装后,工地湿接缝用微膨胀混凝土填充。为提高现浇纵缝新老混凝土间抗剪能力,此处预制板边缝开有齿块,并要求凿毛处理。

3 钢桁梁

钢桁梁杆件是厚板焊接带肋箱形截面,全封闭整体节点,节点处所有附连件(如隔板、平联节点板、横梁端头等)都在节点处焊连,这里焊缝密集,受力复杂。根据国内外经验,焊接结构出现焊接裂纹屡见不鲜,断裂事故时有报导,因而防裂、防断是关键。

3.1 开发了高性能的 14 锰铌桥梁钢(14MnNbq)

对高性能钢的基本要求: 综合性能优良; 板厚效应不明显; 塑韧性优异; 可焊性好; 其它。

冶金部、铁道部共同立项,大桥局(负责应用研究)与武钢合作共同开发出 14MnNbq 钢,在京九线京杭运河上建成一座 $L = 64$ m 双线铁路试验桥后,推广到芜湖长江大桥上应用。

武钢提供芜湖长江大桥 14MnNbq 钢 45 000 t,孙口桥用进口 SM490C 钢,两者性能对比见表 1、表 2。

表 1 14MnNbq 与 SM490C 化学成分对照

钢种	C	Si	Mn	P	S	Nb	Ceq
14MnNbq	0.145	0.259	1.450	0.015	0.007	0.026	0.397
SM490C	0.121	0.307	1.453	0.011	0.003		0.377

表 2 14MnNbq 与 SM490C 力学性能对照

钢种	板厚 / mm	s / MPa	b / MPa	s/b	s / %	C_v - 40 / J	时效 / J
14MnNbq	6 ~ 16	415	551	0.754	29.94	192	185
	17 ~ 25	386	528	0.731	30.70	214	194
	26 ~ 36	404	539	0.750	30.18	219	200
	37 ~ 60	381	535	0.712	30.83	192	197
SM490C	6 ~ 25	476	563	0.845	24.51	229	241

表 3 14MnNbq 钢板的分级

钢板级别	C	D	E
试验温度/	- 20	- 40	- 60
冲击吸收功/J	40	40	40

从表 2 看出,14MnNbq 钢性能与 SM490C 钢接近,而防裂塑性(延性) s/b 及 s 比 SM490C 优。

通过大量试验,选定了与 14MnNbq 钢相匹配的焊接材料,对接焊焊丝为 H08Mn2E,焊剂为 SJ101q; 坡口角接焊焊丝为 H08MnE,焊剂为 SJ101q。H08Mn2E 及 H08MnE 系芜湖长江大桥为 14MnNbq 钢焊接选配的专用焊接材料,并制定了线能量、预热温度等焊接工艺要点及质量标准。

(1) 对接接头性能标准

焊缝强度 焊缝屈服强度 (s)、极限强度 (b) 不低于基材标准。焊缝超强内控标准不超过基材标准值 100 MPa,但不超过基材实际值 100 MPa 时亦可以验收。

焊缝接头韧度(包括焊缝、熔合线、热影响区)

接头各部位 - 30 的却贝 V 冲击功不低于 48J; 时效冲击不低于母材标准;冷弯 180 不裂;焊缝延伸率:当 $t = 6 \sim 16$ mm 时, $s = 20\%$,当 $t = 17 \sim 50$ mm 时, $s = 19\%$ 。

(2) 角接接头性能标准

角接接头的焊缝屈服强度 (s)、极限强度 (b) 不低于基材标准。焊缝内控标准不超过基材标准 120 MPa,但不超过基材实际值 120 MPa 时亦可以验收(不同板厚接头、基材实际值取证件较高值)。

角接及棱角焊缝各部位 - 30 时的却贝 冲击功不低于 34J。

角接焊冷弯 150 不裂。

焊缝延伸率 当 $t = 6 \sim 16$ mm 时, $s = 20\%$;

当 $t = 17 \sim 50 \text{ mm}$ 时, $\delta_5 = 19\%$ 。

(3)对接焊和角焊缝(包括棱角焊)的点固焊均不得开裂。

3.2 焊接钢桥的断裂控制

自从焊接技术引入桥梁钢结构后,脆性破坏事故时有发生,不得不引起我们的关注。

世界各国中将防断设计引入设计规范的只有英国规范 BS5400 和美国规范 AASHTO(公路)、AREA(铁路),日本《国铁建造物设计标准解说》中有所规定但不系统。

我国将断裂力学引入铁路桥梁焊接钢结构始于九江长江大桥的建设,并进行了试探性的研究,为本工程的研究打下了坚实的基础。

该专题所依据的理论为断裂力学,以大板深缺口试验为基础, C_v 冲击韧性为依据,落锤试验为校核。

首先将钢板进行分级,见表 3。

与钢板级别配套的焊缝韧性要求见表 4。

表 4 与钢板级别配套的焊缝韧性

钢板级别	C	D	E
焊缝的试验温度/	- 10	- 30	- 50
焊缝的冲击吸收功/J	48	48	48

制定了 14MnNbq 钢板的最大使用厚度,见表 5。

表 5 14MnNbq 钢用于焊接桥梁的最大厚度

构件类别	钢级	设计温度/											
		0	- 5	- 10	- 15	- 20	- 25	- 30	- 35	- 40	- 45	- 50	
		允许使用的钢板最大厚度/ mm											
	C	50	50	50	50	50	50	50	50	50	46	36	
	D	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	
	E	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	
	C	50	50	50	50	50	50	50	40	32	24	18	
	D	50	50	50	50	50	50	50	50	46	38	30	
	E	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	44	
	C	50	50	50	48	40	34	26	20	16			
	D	50	50	50	50	50	48	40	32	26	20		
	E	50	50	50	50	50	50	50	46	38	32	24	
	C	48	42	34	28	22	18						
	D	50	50	50	44	36	28	24	18				
	E	50	50	50	50	50	42	36	30	24	18		

注: 类为一般构件, $\sigma_s = 0.3 \sigma_s$; 类为次重要构件, $\sigma_s = 0.4 \sigma_s$; 类为重要构件, $\sigma_s = 0.5 \sigma_s$; 类为关键构件, $\sigma_s = 0.6 \sigma_s$ 。 σ_s 为钢材的名义屈服强度(MPa)

美国 AREA 规范有广泛的内容,对设计者、制造者、电焊检查员、无损检查员等资质均有要求,对焊接材料及焊接工艺、无损检查等均有严格要求,也制定了关键杆件的断裂控制方法,其冲击韧性只是该控制方法中的一个要素。我国目前全面制订断裂控制方法,尚有困难,争取逐步实现。虽然如此,我们毕竟对冲击韧性有了科学的、操作性强的具体规定,应该说是一大进步。

3.3 应力变程曲线

芜湖长江大桥钢梁结构复杂,构造细节多样,焊缝各不相同,不可能对各种类型的构造细节全面地进行试验,仅择其主要者予以安排,计有以下内容:

- (1) 钢梁弦杆棱角焊缝(5 组);
- (2) 主桁、副桁连接(3 组);
- (3) 弦杆与平联节点板焊接(3 组);
- (4) 箱形杆件与横隔板交叉焊缝(1 组);
- (5) 厚板对疲劳寿命的影响(1.5 组);
- (6) 精密焰切工艺对钢材疲劳的影响(3.5 组);
- (7) 主桁焊接栓钉连接的疲劳强度(1 组)。

以上共计 18 组试件,此外还进行了桁梁节段模型疲劳试验(图 7),以期全面地进行综合考核。



图 7 桁梁节段模型疲劳试验节点

通过上述试验,制订了芜湖长江大桥 12 个特殊构造细节的疲劳曲线方程。结合本桥具体情况制定“芜湖长江大桥栓焊钢梁疲劳验算规则”。

3.4 焊接杆件整体节点的设计

焊接杆件整体节点见图 8。为了防裂、防断,设计上严格执行“14MnNbq 钢用于焊接桥梁的最大厚度使用的规定”和“芜湖长江大桥栓焊钢梁疲劳验算规则”外,在细节处理上,还作了如下规定:

- (1) 箱形杆件的隔板焊缝是隐蔽工程,除减少焊缝长度外,所有焊缝端部的弧坑必须打磨匀顺。
- (2) 封头隔板,厚板拘束较大,更易发生裂纹,故不用焊封,改用胶封。
- (3) 受拉熔透角焊缝,在细节上作了减少拉力的处理。

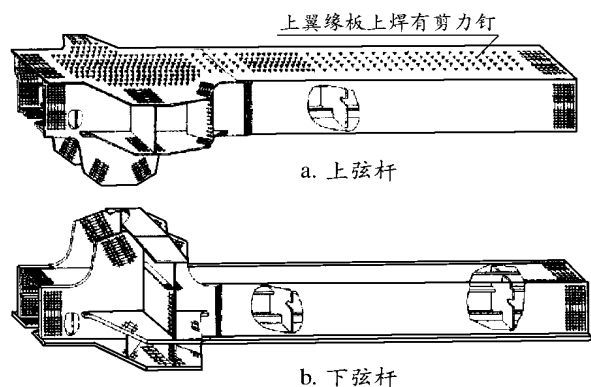


图 8 焊接杆件整体节点构造

(4) 受剪熔透角焊缝,与被连接件相交处加大圆弧半径,打磨并锤击。

(5) 厚薄板对接,按 1:10 坡度过渡(焊缝过渡亦同此)。

(6) 高难度的受拉单侧熔透角焊缝,当细节上不能减少拉应力及集中应力时,不宜采用,改为栓接。

(7) 要求工厂通过试制后,正式投产。

4 钢梁安装

4.1 副航道 144 m 钢梁采用吊索架全伸臂安装(图 9)



图 9 采用吊索架全伸臂安装 144 m 钢梁

4.2 主跨矮塔斜拉桥安装

(1) 双伸臂安装(图 10)

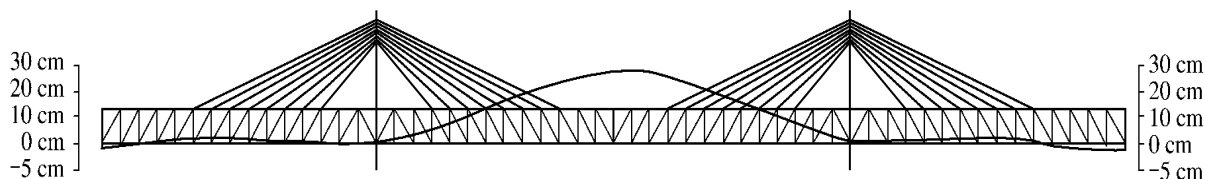


图 12 钢梁上拱度(上拱度值单位:cm)

(2) 312 m 主孔采用跨中合龙,实现了高精度合龙,如图 11 所示。



图 10 双伸臂安装 312 m 主孔



图 11 跨中合龙

如果加劲梁是柔性的,其合龙无需进行体系转换,仅进行索的体系转换即可。

如果加劲桁是刚性的,合龙中加劲桁必需进行体系转换。

合龙处杆件及栓孔,由工厂制造完成,在合龙时不准投孔和扩孔。

(3) 首创双铰合龙法。合龙步骤:先合龙长圆孔($\varnothing 80$ mm),穿 $\varnothing 79$ mm 铰轴;再合龙圆孔($\varnothing 120$ mm),穿 $\varnothing 119$ mm 铰轴;第 3 步打入冲钉, $\varnothing 3$ mm 孔,冲钉 $\varnothing 2.85$ mm。

图 12 为合龙后的钢梁上拱度,是一条非常理想的匀顺曲线。