

西堍门大桥北边跨锚侧钢箱梁安装技术

卢伟¹, 邓亨长¹, 张胜利², 杨明¹,
虞业强¹, 李平利³, 李润哲¹, 肖安斌¹

(1. 四川公路桥梁建设集团有限公司, 成都 610041; 2. 浙江省舟山连岛工程建设指挥部, 浙江舟山 316000;
3. 中国市政工程西南设计研究院, 成都 610081)

[摘要] 西堍门大桥为国内最长的两跨连续跨海钢箱梁悬索桥, 桥址处恶劣的自然环境, 使得大桥北边跨锚侧钢箱梁安装面临诸多难题, 文中介绍了该位置钢箱梁安装与线形调整关键技术与施工工艺。

[关键词] 悬索桥; 钢箱梁; 西堍门大桥; 北边跨锚侧; 安装与线形调整; 关键技术

[中图分类号] U448.25 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2010)07-0047-06

1 前言

1.1 设计特点

西堍门大桥地处浙江省舟山地区, 是舟山大陆连岛工程的第4座大桥, 主桥为主跨1 650 m的两

跨(北边跨+中跨)连续漂浮体系的钢箱梁悬索桥, 跨径布置为(578+1 650+485) m, 矢跨比1/10; 主缆横桥向中心间距为31.4 m, 吊索顺桥向标准间距为18 m, 大桥主跨跨径居世界第二、中国第一(见图1)。

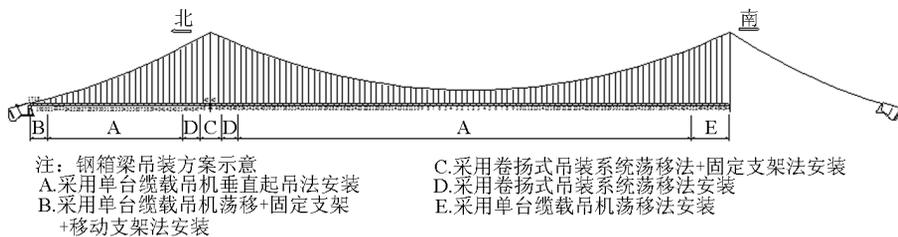


图1 西堍门大桥钢箱梁安装总体布置图

Fig. 1 Layout for box girder erection of Xihoumen Bridge

大桥钢箱加劲梁为扁平流线型分离式双箱断面形式, 以提高抗风稳定性, 两个封闭钢箱横桥向拉开距离为6 m, 用横向连接箱和横向连接工字梁加以连接。钢箱梁梁宽36.0 m, 梁高3.51 m, 钢箱梁总长2 224.0 m。钢箱梁制造以节段为单元, 标准梁段长18 m, 全桥共计15种、126个梁段, 其中位于北边跨锚区与浅滩区共计6种、9个梁段。梁段标准吊

装重量约为260 t, 最大吊装重量约为360 t, 而北边跨20#梁吊装重量约325 t。

1.2 北边跨锚侧钢箱梁安装特点

大桥北边跨桥位施工位置海域潮差大、波浪高、水流急且水深(最大约为70 m)、有强烈旋涡, 海上作业困难, 西堍门与册子水道海床覆盖层极浅, 多数地方无覆盖层, 运梁船定位实施难度大, 特别是钢箱

[收稿日期] 2010-05-05

[基金项目] 国家科技支撑计划项目(2008BAG07B04)

[作者简介] 卢伟(1971-), 男, 四川泸州市人, 博士, 高级工程师, 主要研究领域为桥梁工程与施工技术; E-mail: lw_pda@163.com

梁浮吊安装因定位问题难以解决而无法实施。北边跨所在涨落潮流速高(最大涨落潮漂流流速达 $2.66 \sim 3.65 \text{ m/s}$)、水道内存在裸露的孤丘和水下暗礁、水中基础施工难度极大。即使在近岸处搭设临时支架设施,由于岸侧坡陡,其基础处理也有相当大的难度。

在钢箱梁悬索桥建设中,钢箱梁架设一般通过横跨主缆的缆载吊机进行垂直起吊提升。但西堍门大桥北边跨无索区及锚区浅水区梁段(编号17#~25#,共计9个梁段)运梁驳船不能到达梁段安装投影位置,无法采用传统的垂直起吊工艺,需考虑特殊技术完成安装。

考虑上述因素,作为国内规模最大的跨海两跨连续钢箱梁悬索桥,西堍门大桥北边跨锚侧位置的钢箱梁架设是大桥施工关键技术难题之一,需解决运梁船定位问题、缆载吊机大角度长距离荡移问题、无吊索梁段安装与临时存放问题,难度为国内其他同类型桥梁所罕见,为此上部结构施工单位联合科研院校对北边跨特殊位置钢箱梁架设工艺进行了深入研究,确定了一套安全有效的安装与线形调整技术方案,保证该位置钢箱梁架设安全、稳妥地实现。

2 安装方案比选

国内外钢箱梁悬索桥主梁架设一般采用如下方法^[1-5]:

1) 缆载吊机起吊作业:这是大多数钢箱梁悬索桥架梁方式,根据提升设备又分为卷扬机式缆载吊机安装以及液压缆载吊机安装;

2) 大型浮吊安装:在地形环境与设备允许的条件,可采用大型浮吊安装方案,如瑞典滨海高桥(High Coast Bridge);

3) 缆索天线安装:受地形及安装设备限制,可采用缆索天线完成钢箱梁安装,该方法在我国的重庆鹅公岩大桥、四渡河大桥等工程中曾运用;

4) 液压提升设备连续荡移:美国的 Carquinez Bridge,则借助连续提升千斤顶等特种设备,通过多次荡移,将钢箱梁从卸船位置提升至安装位置。

国内已有的三跨连续钢箱梁悬索桥,分别采用卷扬式缆载吊机(海沧大桥)与缆索天线(鹅公岩大桥)安装,而国外跨海三跨连续钢箱梁悬索桥,则多采用大型浮吊(如丹麦大带东桥和瑞典滨海高桥)安装边跨锚区附近梁段。对于近岸环境的钢箱梁,多采用缆载吊机并使用荡移法安装,同时借助支架

辅助钢箱梁安装,这类方法多用于塔区附近梁段安装,对于边跨短(无)吊索区域梁段,从长吊索区向短吊索区纵移,荡移角度大,主缆与梁间距小,实施难度大。

西堍门大桥经造价、技术难易、进度安排、安全等因素综合考虑,针对西堍门大桥北边跨锚侧特殊位置梁段安装,选择缆载吊机吊装作为该位置梁段安装的方法,并提出以下3套比选方案:

1) 单吊机多次荡梁方案:运梁船行至26#梁段位置,17#~19#梁采用单吊机连续荡移结合移动与固定支架安装,20#~25#梁采用单吊机连续荡移法安装。

2) 海中长支架方案:搭设海中长栈桥,运梁船行至26#梁段位置,17#~19#梁采用单次荡移,栈桥上纵移,垂直起吊并结合移动支架安装,20#~25#梁采用单次荡移,栈桥纵移,垂直起吊安装。

3) 航道拓宽结合单吊机荡移方案:爆破门头山山嘴进行航道拓宽,运梁船可行至21#梁下方,21#~25#梁段垂直起吊,20#梁段采用吊机两次荡移安装,无索区17#~19#共3个梁段两次荡移并采用移动支架结合固定支架辅助纵移至设计位置实施安装。

为确保北边跨特殊位置钢箱梁安装过程准确安全,采用悬索桥专用有限元分析程序BNLAS(非线性分析系统)对钢箱梁连续荡移过程进行仿真分析计算(计算模型见图2)。



图2 西堍门大桥结构离散模型

Fig.2 Structure discrete model of Xihoumen Bridge

经计算分析得到如下结论:

1) 北边跨特殊位置钢箱梁安装过程中,北边跨主缆缆力最大值为 $99\,485.919 \text{ kN}$,张力安全系数为 8.56 ,满足设计规范2.5的取值要求。

2) 梁段单吊机连续荡移施工中,北塔最大水平位移从 34.11 cm 变化至 14.08 cm ,超出设计与监控 $\pm 30 \text{ cm}$ 的限值要求,此时可根据监控指令,适时进行北塔顶的主索鞍顶推,确保北索塔安全。

综合计算结果,荡移过程中,包括钢箱梁、施工机具与临时设施在内的大桥结构是安全的,北边跨

锚侧位置钢箱梁安装采用缆载吊机荡移作业是可行的。同时通过对安全风险、造价、技术难易、环境影响程度、工期等因素的综合分析比选,确定采用航道拓宽结合单吊机荡移方案作为实施性安装方案。

3 钢箱梁安装技术

北锚碇前端为门头山山嘴,该山嘴阻断了钢箱梁段的海上运输线路,为减小施工风险,提高工作效率,采用航道拓宽方案,即用预裂控制爆破方式拓宽拓深钢箱梁海运通道,运梁驳船可运梁至21#梁段安装位置,通过单台缆载吊机,只需至多两次荡移,即可将梁段安装到位。其中无索区17#~19#三段梁需通过固定支架结合移动支架荡移施工安装。

上述航道拓宽方案结合单吊机荡移技术,通过航道拓宽解决了缆载吊机长距离荡移与运梁船定位问题,利用固定支架解决了无索区梁段平移与存梁问题,通过移动支架与吊机配合解决了无索区梁段的大角度荡移问题。

3.1 航道拓宽

根据门头山的地形及运梁船需要的尺寸,确定施工开挖线。考虑该位置的地质条件并结合锚碇开挖的施工经验,边坡的坡度取1:0.3。

根据运梁船的运输方案确定开挖的尺寸及开挖深度,保证运梁船能够顺利地进入指定水域,根据运梁船的设计,其长60 m,宽20 m,设计吃水深2.2 m。为保证通航水深为2.5 m,确定开挖底标高为平均高潮位(+1.14 m)以下3 m,即-1.86 m,实际施工按-2.0 m控制,因船轴线与桥轴线垂直,开挖边缘接近桥轴线,开挖宽度按半船长度控制。按前述布置要求,拓宽航道长约90 m,宽约30 m。

北跨钢箱梁架设施工航道拓宽工程属于临水介质的石方爆破开挖,采用水下复杂环境深孔爆破施工工艺。

3.2 运输船舶与主要施工机具

完成北边跨锚侧钢箱梁安装需采用的主要施工机具如下。

3.2.1 运梁船

箱梁运输船本身自带动力(双机双螺旋桨),钢箱梁运输驳船长60 m,宽20 m,满载吃水2 300 t。不需抛锚可采用动力定位方式完成水平定位作业。因航道拓宽后泊船位置可靠近海岸,同时还可利用岸上预设的锚桩辅助船舶定位。

钢箱梁安装实践证明,在上述位置,运梁船仅需

30 min左右即可完成定位作业,完全能满足架梁需要。

3.2.2 液压式缆载吊机与吊具

1)缆载吊机为液压式缆载吊机,主要由液压起吊提升系统、缆上支撑及行走系统、钢结构桁梁、控制室、动力系统、辅助系统以及安全防护系统等组成。吊机提升能力为370 t,提升速度 ≤ 36 m/h,行走速度 ≤ 10 m/h。

2)吊具。西堍门大桥钢箱梁采用单吊机提升安装,吊具系统除设置横向扁担梁解决吊机吊点与钢梁临时吊耳横向位置的不一致外,特别添加纵向分配梁保证吊装过程梁段平衡,针对不同梁段重心改变,专门设计重心调整装置与之适应。北边跨锚区3片无吊索梁段,其位置因地形限制,难以通过一次荡移至支架上滑移就位,另在横向扁担梁上对应主缆投影位置加设吊耳以满足两次以上荡移施工中吊点转换需要(见图3)。

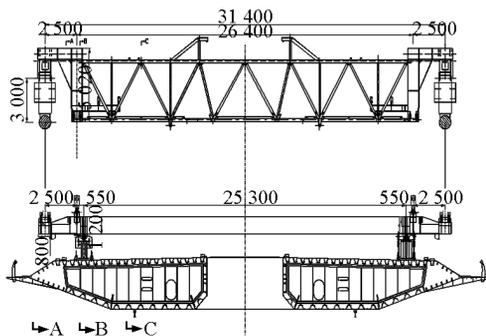


图3 缆载吊机与吊具布置图(带转换吊耳的钢箱扁担梁)(单位:mm)

Fig.3 Elevation layout of gantry and lift beam (steel lift beam with jack bracket for load exchange) (unit:mm)

吊具由纵向扁担梁(含双吊耳间横向小扁担分配梁、连接销耳与连接钢绳等构造)、横向扁担梁、重心纵向调节装置等组成。

3.2.3 临时吊索与牵引系统

1)临时吊索与索夹。受锚区附近短吊索与缆载吊机荡移角度限制,北边跨梁段荡移时,还需借助临时索夹与吊索辅助荡移,以保证一次荡移角度在吊机允许范围之内。临时索夹借用SJ2N型永久索夹,临时吊索与永久吊索结构相似,均为骑跨式钢丝绳吊索结构。

2)牵引系统。钢箱梁荡移时,还需由岸侧提供水平牵引力以保证荡移作业顺利进行。

水平牵引力由牵引系统提供,牵引系统共两套,左右侧各一套。牵引系统位于北锚碇散索鞍支墩位置,平面位置与钢箱梁临时吊耳中心在同一纵轴线上。牵引钢绳一端通过锚固于北散索鞍支墩上预埋连接件、转向滑车与位于北锚前端的卷扬机联系,另一端通过动滑车与纵扁担梁上的荡移连接耳板销接。

3.2.4 支架系统

北锚区搭设无索区固定存梁支架,该位置三段无索区箱梁采用荡移法将梁段安放到支架轨道上,通过牵引支垫滑块沿桥轴线平移箱梁临时安装存放,待所有钢箱梁吊装完成后在支架上完成无索区梁线形调整、现场焊接与体系转换作业。

采用荡移法安装时,由于受操作高度和缆载吊机允许偏转角度的限制,仅靠荡移方式无法将梁段搁置于支架上。为此,结合梁段尺寸、具体地形和潮水情况,在固定支架的前端(20#梁段投影位置)搭建一个可移动支架,配合固定支架法安装就位此3个梁段。

无索区支架作为塔区与锚区位置无索区钢箱梁支承、安装、运输平台,同时也是钢箱梁线型调节承力构造。支架结构包括:支架基础、支架平台、钢箱梁平移系统和钢箱梁线型调节装置等4部分构造(见图4)。

3.3 钢箱梁安装

为实现荡移过程中吊点转换并保证过程中吊机吊索垂直夹角不大于 8.5° ,需要在N1与N2吊索间安装临时吊索与索夹,编号T1。

无索区3个梁段尚需搭设支架搁置并利用移动支架辅助安装就位。17#~19#梁段安装与20#梁略有不同:由于没有永久吊索,需用横扁担分配梁上吊耳作荡移中转接力装置,同时还需借助移动支架辅助实施钢箱梁纵移临时就位。

由于20#梁较17#梁重约90 t,若采用与17#~19#梁安装相同的施工工艺,则横扁担联结件承载力不足,为安全计,以钢箱梁上永久吊耳作荡移中转接力构造。为保持20#梁安装吊点转换过程平衡,在靠近N3吊索位置设置平衡索。平衡索为带滑车组的钢丝绳,动滑车与吊具销耳连接,定滑车悬挂在临时索夹上,以北锚碇上10 t卷扬机为动力实现收放作业,以适应荡移过程中角度与长度的不断变化。

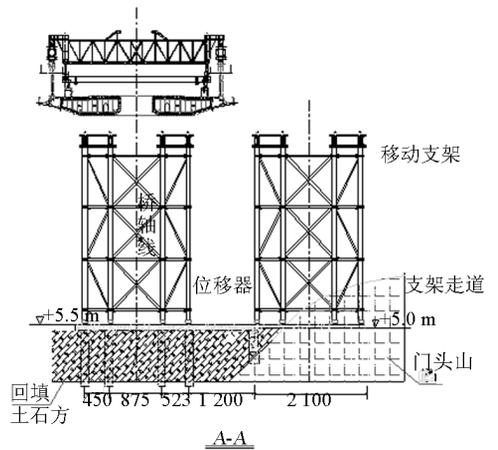
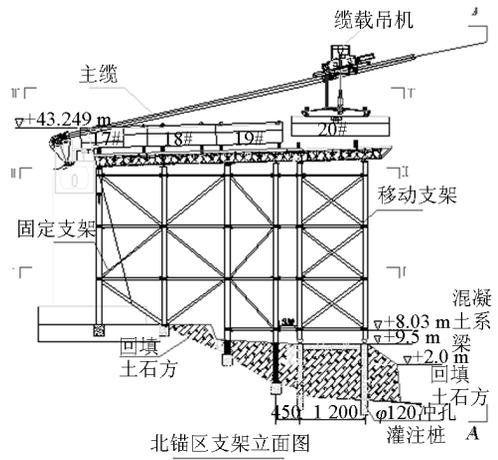


图4 北锚无索区支架布置图

Fig.4 Layout of truss for box girder without hanger at north anchor - side

平衡索同时也是钢箱梁安装过程的抗风稳定措施之一(梁段荡移施工见图5)。

该位置梁段安装流程为:缆载吊机行走至N2吊索(21#梁)位置,下放吊具,吊具与牵引系统连接,吊机钢箱梁运输至21#梁并动力定位→吊具与钢箱梁临时吊点连接,吊机垂直提升钢箱梁至安全高度→启动水平牵引系统,钢箱梁第一次荡移→将临时吊索与钢箱梁连接(对无索梁段连接吊具),通过吊机与牵引系统将钢箱梁荷载转至临时吊索→吊机行走至20#梁位置,提升吊机吊索,通过水平牵引系统配合,将钢箱梁荷载转至吊机并完成第二次荡移→解除牵引系统,临时吊索与钢箱梁连接,垂直提升钢箱梁并高过支架高程→(以下为无索梁段安装,有索梁段直接与吊索连接)水平横移移动支架并与固定支架连接→吊机下放钢箱梁至移动支架,

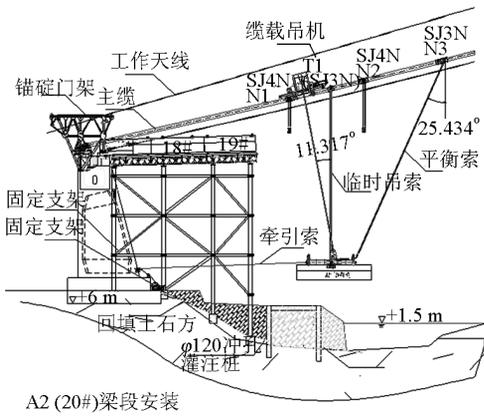


图5 钢箱梁连续荡移安装

Fig. 5 Continuous swing erection for box girder

与高程满足监控给定目标值,通过梁间剪力调整工装与相邻有吊索梁段相联,用调整工装上的手动葫芦调整 20#梁纵坡并进行线形复测,打码焊接有吊索梁段与无索区梁(即 19~20#梁)间焊缝,焊接完成并待探伤合格后,选择气温较低时通过千斤顶进行无索区梁段的卸架作业,完成体系转换,相应地还需通过剪力调整工装用手动葫芦将 20#,21#梁间临时连接与匹配件连接复原,至此完成北边跨侧无索区梁段的线形调整。

线形调节装置见图 6。

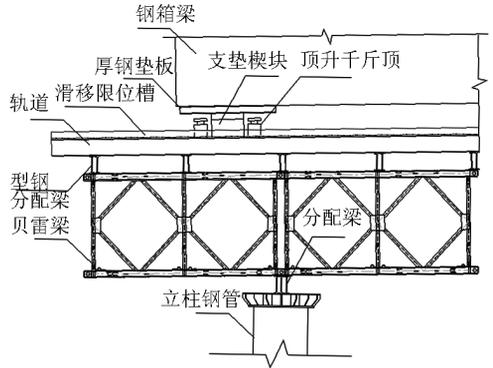


图6 钢箱梁支垫及标高调节装置

Fig. 6 Device of supporting and altitude adjustment for box girder

解除吊具与钢箱梁连接,支架牵引系统与钢箱梁连接→沿桥轴线水平牵引钢箱梁至安装位置,水平定位,千斤顶卸架并临时约束,至此完成梁段安装。

北锚附近浅滩 21#~25#梁段由于航道拓宽,该区域梁段安装方法与一般梁段无异,均采用垂直起吊就位方案。

3.4 无索区钢箱梁线形调整

3.4.1 线形调整方法与流程^[6]

全桥钢箱梁架设完成后,需对无索区及相邻梁段进行线形调整,以保证主梁成桥线形满足设计要求。

北边跨侧无索区线形调整分两步进行:a. 逐段顶升无索区梁段,使其纵坡与高程满足监控给定目标值,进行线形复测,打马焊接支架上三段梁;b. 解开第 1,2 有吊索位置梁(即 20#,21#梁)间临时连接与匹配件,根据测量的 19#~20#梁间错台值计算千斤顶调整量,整体顶升三段无索区梁段,使其纵坡

3.4.2 无索区钢箱梁线形调整成果^[7]

表 1 为体系转换完成后北边跨侧无索区梁段线形成果,从中可以看出:测量状态的标高与计算标高相比略低,这是因二者温度差异所致。根据计算,温度变化对加劲梁纵坡的影响很小,所以实测纵坡与计算纵坡更有可比性,实测纵坡与理论纵坡的差值不到 0.1%,表明无索区线形平顺流畅,钢箱梁线形调整相当成功。

表 1 体系转换完成后的北边跨侧无索区梁段线形成果

Table 1 Result of linetype of girder at anchor - side of north side span after the system transformation

梁段编号	测点高程/m		计算高程/m		差值/m		平均纵坡		
	左幅	右幅	左幅	右幅	左幅	右幅	实测/%	理论计算/%	差值/%
17#	43.413 9	43.414 9	43.439 0	43.439 0	-0.025 1	-0.024 1			
18#	43.7423	43.743 5	43.766 4	43.766 5	-0.024 1	-0.023 0	2.60	2.59	0.01
19#	44.063 8	44.063 6	44.091 6	44.091 8	-0.027 8	-0.028 2	2.55	2.58	-0.03
20#	44.421 0	44.421 9	44.461 8	44.462 5	-0.040 8	-0.040 6	2.48	2.57	-0.09
21#	44.879 1	44.881 9	44.924 6	44.925 2	-0.045 4	-0.043 3	2.55	2.57	-0.02

4 结语

作为国内规模最大的两跨连续钢箱梁悬索桥,

西埃门大桥地处沿海地区,因桥址处复杂的海况与地形,加之恶劣的风环境,使得大桥钢箱梁安装遇到国内其他钢箱梁悬索桥所未见的一系列难题。

其中北边跨锚侧9段钢箱梁的安装被部省联合专家组列为大桥安装的关键技术问题之一。经多方比选,最终采用的航道拓宽安装方案工期短、风险小,实施效果好,为大桥钢箱梁如期于2007年12月16日完成安装奠定了基础,大桥已于2009年11月通车。相关的施工成套技术,可供沿海地区类似桥梁建设借鉴参考。

参考文献

- [1] 钱冬生,陈仁福.大跨悬索桥的设计与施工(修订版)[M].成都:西南交通大学出版社,1999
- [2] 牛和恩.虎门大桥工程第二册·悬索桥[M].北京:人民交通

出版社,1988

- [3] 潘世建,杨盛福.东航道悬索桥·海沧大桥建设技术第四册[M].北京:人民交通出版社,2001
- [4] 吴胜东.润扬长江公路大桥建设第三册·悬索桥[M].北京:人民交通出版社,2005
- [5] Niels J. Gimsing 编,西南交大土木学院桥梁系与中铁大桥局桥研院译,钱东生校.大贝耳特海峡:东桥[M].成都:西南交通大学出版社,2008
- [6] 卢伟,邓亨长,龙勇,等.西堠门大桥钢箱梁安装[J].公路,2009,1:59-65
- [7] 唐茂林,许宏亮,沈锐利,等.西堠门大桥无索区梁段线形调整与控制[J].公路,2009,1:43-47

Erection technique of steel box-girder at anchor-side of north side span in Xihoumen suspension bridge

Lu Wei¹, Deng Hengchang¹, Zhang Shengli², Yang Ming¹,
Yu Yeqiang¹, Li Pingli³, Li Runzhe¹, Xiao Anbin¹

(1. Sichuan Road & Bridge Construction Group Co. Ltd., Chengdu 610041, China;

2. Zhejiang Provincial Construction Headquarters of Zhoushan Islands Link Project,

Zhoushan, Zhejiang 316000, China; 3. Southwest Municipal Engineering

Design & Research Institute of China, Chengdu 610081, China)

[Abstract] Xihoumen Bridge is the longest two-span continuous steel box girder suspension bridge in China. Several problems have been encountered due to severe natural environment during the erection of steel box girder at anchor-side of north side span of the bridge. The key technique and construction process of erection and line-type adjustment for the steel box girder are introduced.

[Key words] suspension bridge; steel box-girder; Xihoumen Bridge; anchor-side of north side span; erection and adjustment of linetype; key technique