

泰州大桥悬索主桥钢箱梁吊装施工顺序的确定

王峻¹, 梁进达²

(1. 江苏省长江公路大桥建设指挥部, 江苏泰州 225321; 2. 中交第二公路工程局第二工程有限公司, 西安 710119)

[摘要] 泰州大桥是世界上首座超千米的三塔两跨悬索桥, 主跨为 $2 \times 1\ 080\text{ m}$, 中塔采用纵向“人”字形、横向门式框架型钢塔, 边塔采用门式框架型混凝土塔, 加劲梁为扁平流线型钢箱梁结构, 全桥共 136 片钢箱梁, 总重约 33 426 t。通过分析钢箱梁吊装顺序对结构体系和施工难度的影响, 确定了三塔悬索桥合适的钢箱梁吊装顺序。

[关键词] 三塔两跨悬索桥; 钢箱梁; 吊装顺序

[中图分类号] U445 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2012)05-0041-05

1 前言

泰州长江公路大桥主桥为 $390\text{ m} + 1080\text{ m} + 1080\text{ m} + 390\text{ m}$ 的三塔两跨悬索桥, 主桥净宽

33 m, 两根主缆横向间距为 34.8 m, 吊索顺桥向标准间距为 16 m, 加劲梁为扁平钢箱梁结构。泰州大桥主桥总体布置见图 1。

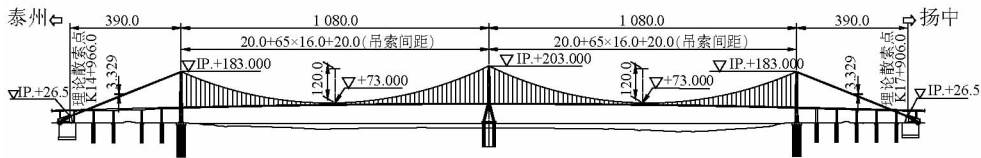


图 1 泰州大桥主桥总体布置图(单位:m)

Fig. 1 General layout of main bridge of Taizhou Bridge (unit: m)

钢箱梁横断面采用单箱三室构造, 两侧边室为风嘴兼检修道, 宽 1.75 m, 钢箱梁全宽为 39.1 m (含风嘴), 梁高 3.5 m。全桥共划分 136 个梁段, 标准

梁段长 16 m、重 249.94 t, 最大吊装梁段重量为 308.82 t, 全桥钢箱梁总重量约 33 426 t。钢箱梁节段参数见表 1, 钢箱梁标准横断面见图 2。

表 1 钢箱梁节段参数表

Table 1 Parameters of steel box girader's sections

梁段类型	A	A'	B	C	C'	D	E	F
梁段长度/m	16	16	16	16	16	9.6	16.6	9.73
梁段重量/t	249.94	253.93	273.63	304.74	306.55	164.26	308.82	199.09
梁段数量/个	126	2	2	1	1	1	1	2
备注	有吊索梁段, A、A'、B、C、C' 为标准梁段					中塔区无吊索梁段		边塔区无吊索梁段

[收稿日期] 2012-03-15

[基金项目] 交通行业联合科技攻关项目(2008-353-332-170); 江苏省“333 高层次人才培养工程”专项资助

[作者简介] 王峻(1973—), 男, 江苏姜堰市人, 高级工程师, 主要从事桥梁工程建设管理工作; E-mail: junwang9370@sina.com

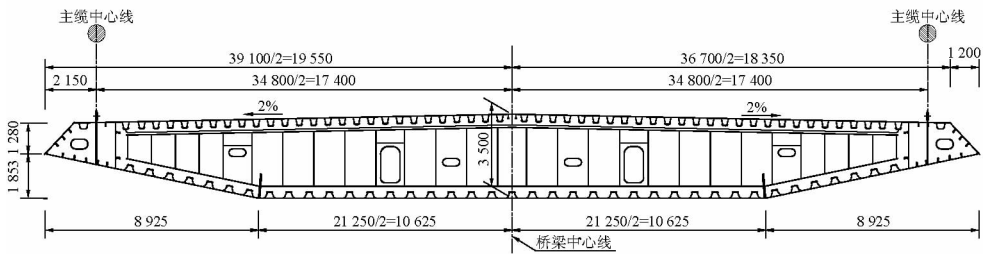


图2 钢箱梁标准横断面图(单位:mm)

Fig. 2 Standard sectional view of a steel box girder (unit: mm)

泰州长江公路大桥基于中塔结构选型,实现主缆与中主鞍座间抗滑移稳定、中塔受力、桥跨结构刚度的综合效果,中塔选用“人”字形钢结构主塔,与其他已建成两塔悬索桥均不同^[1]。加劲梁吊装是对悬吊索的一个加载过程,对于泰州大桥三塔悬索桥难点如下:

1) 传统两塔悬索桥加劲梁施工时,引起的主缆不平衡力,通过顶推索鞍可以很容易实现平衡。三塔两跨悬索桥,中塔索鞍不设预偏,边塔预偏量大,两主跨加劲梁不平衡吊装需考虑中塔主缆与鞍座的抗滑移和中塔弯曲应力安全。

2) 和常规两塔三跨悬索桥相比,三塔悬索桥的结构柔性较大,加劲梁荷载在吊装的初期主缆的变形影响敏感。

3) 双主跨连续钢箱梁,使得中塔无索区钢箱梁体系转换、钢箱梁合龙段安装等施工工艺复杂。

2 钢箱梁可能采取的吊装顺序

泰州大桥为三塔两跨悬索桥,由于中塔采用“人”字形钢塔结构,中塔顶鞍座不设预偏,为保证索塔的应力和主缆在鞍槽内的抗滑安全系数不超过

允许值,钢箱梁吊装遵循两跨跨中对称加载的原则。可采取的钢箱梁吊装顺序主要有索塔向跨中吊装和跨中向索塔吊装两种方案。

方案一:两主跨由索塔向跨中方向对称吊装,合龙段设在跨中略靠近边塔侧,全桥共2个合龙段。

方案二:两主跨由跨中向索塔方向对称吊装,合龙段设在边塔和中塔附近,全桥共4个合龙段^[2]。

3 钢箱梁吊装顺序可行性分析

3.1 基于主缆线形变化的分析

按照泰州大桥施工图设计文件,主缆在空缆状态时的主要数据如下:

1) 边塔顶鞍座的预偏量为2.365 m。

2) 空缆状态与成桥状态主缆线形最大高差主跨为8.927 m、边跨为10.130 m。

3) 边塔顶鞍座处边跨侧的主缆切线角为 29.3035° 、中跨侧为 21.5291° ,中塔顶鞍座处两侧的主缆切线角为 23.4243° 。

经过对钢箱梁吊装过程中,边塔、中塔主缆在塔顶鞍座处切线角变化趋势计算的分析,切角与吊装进度具体关系见图3。

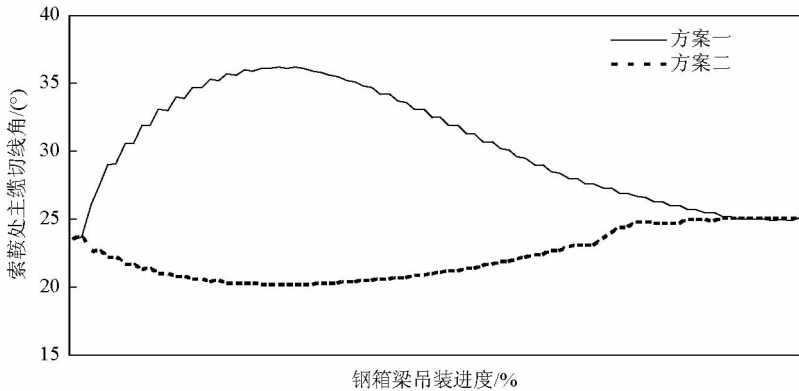


图3 中塔塔顶鞍座处主缆切线角变化趋势与钢箱梁吊装顺序关系示意图

Fig. 3 Schematic diagram of relationship varying trend of main cable contingency angle at middle pylon top saddle and steel box girder lifting sequence

从图3可看出,对于方案一,在钢箱梁吊装前期,主缆在塔顶鞍座处的切线角会随着梁段吊装数量的增加而增大;在钢箱梁吊装后期,主缆在塔顶鞍座处的切线角逐渐减小接近成桥状态;对于方案二,主缆在塔顶鞍座处的切线角变化趋势则与方案一相反,切线角会随着梁段吊装数量的增加而先减小后逐渐增大接近成桥状态。

从主索鞍的构造图可知,当“主缆倾角”等于 28.105° 时,主缆在索鞍处的切点刚好在索鞍边缘。当“主缆倾角”大于 28.105° 时,主缆在此处形成弯折。采用方案一吊装钢箱梁时,开始阶段塔顶鞍座处主缆切线角随着钢箱梁吊装数量的增加而增大,中塔顶主缆出鞍座处出现折角现象;对于边塔顶鞍座,由于空缆状态的预偏量较大,边塔靠主跨侧主缆下缘与塔顶距离较小,出现主缆与塔顶碰撞。主缆出现折角或与塔顶碰撞,均可能造成主缆丝股损伤,因此钢箱梁吊装顺序如采用方案一时,需要深入计算研究才能确定施工方案的可行性。

对于方案二,钢箱梁吊装作业过程中,主缆与鞍座处的切角始终小于成桥切线角,不会发生主缆的折弯,从钢箱梁吊装对主缆线形的变化影响趋势分析,钢箱梁适合从跨中开始吊装。

3.2 基于钢箱梁临时连接件受力的分析

钢箱梁吊装就位后,梁段间采用临时连接件连接,其临时连接件在钢箱梁吊装过程中主要承受剪力、轴力的作用。钢箱梁吊装过程中,梁段间临时连接件的受力均会因为主缆线形的变化而发生变化,在钢箱梁线形基本形成之前,钢箱梁处于顶板顶紧、底板张开的状态,其连接状态接近于铰接。由此可发现,主缆倾角相对于成桥状态相差越大,梁段间的临时连接件受力越不利,受力越不均匀。

靠近索塔梁段先吊装时,由于主缆倾角增大,使得吊索水平距离减小,比从跨中开始吊装时要明显,容易使梁段间产生较大的轴向挤压力,钢箱梁线形与成桥状态相差更大。因此,在临时连接件安全储备不大的情况下,钢箱梁从跨中开始吊装比从塔端开始吊装对临时连接件更为有利,宜采用对主缆倾角变化影响较小的吊装顺序方案,即方案二。

3.3 基于中塔无索区梁段施工的分析

中塔区D、E梁段为无吊索梁段,其重量在成桥状态由相邻梁段的吊索承担,因此该梁段在吊装后需要进行体系转换。

从施工质量方面来讲,D、E梁段在钢箱梁吊装基本完成、梁段线形基本形成后再进行体系转换更有利于保证梁段焊接线形的准确性。钢箱梁吊装采用方案一,从塔端开始的顺序时,由于中塔无索区梁段先安装,随着吊装梁段数量的增加,梁段线形逐步接近于合龙线形,从前面主缆线形变化的分析中可知,在钢箱梁线形逐步形成过程中,中塔无索区梁段间存在纵向压力,竖向位移也变化比较大,中塔无索区梁段临时支承系统需要适应后续梁段吊装时无索区梁段竖向位置的变化,施工难度比较大,也不利于梁段间临时连接的结构受力。钢箱梁吊装采用方案二,从跨中开始的顺序时,D、E梁段是在梁段吊装基本完毕、安装合龙段之前吊装,此时的梁段线形与合龙线形已基本一致,从塔端开始中塔无索区梁段先安装出现的不利情况可基本忽略。

3.4 基于合龙段施工的分析

悬索桥合龙段施工,合龙空间一般可采用的措施有预偏合龙和温差合龙两种措施的其中一种或两者相结合,由于泰州大桥合龙段施工在夏季,低于设计基准温度 20°C 的可能性非常小。通常需要考虑预偏合龙措施。预偏合龙是采用牵引设备将合龙段两侧或一侧的已吊装梁段向外牵引预偏,使合龙空间大于合龙段长度(一般要大于 20 cm)的一种方法。

采用方案一从塔端开始吊装时,合龙段位于跨中附近,全桥共2个合龙段。为便于预偏合龙,合龙段可设在跨中略靠近边塔侧,尽可能避开短吊索梁段,预偏合龙需要牵引约 500 m 的梁段。

采用方案二从跨中开始吊装时,合龙段位于中塔和边塔附近,全桥共4个合龙段。边塔合龙段和中塔第一个合龙段由于需要牵引预偏的梁段长度较短,且均为长吊索梁段,预偏合龙很容易就可以实施,而中塔第二个合龙段则需要牵引约 $1\ 000\text{ m}$ 的梁段,且牵引的梁段包括跨中短吊索梁段。

牵引的梁段长度越短、吊索长度越长,需要的牵引力越小,预偏合龙越容易实施,反之亦然。考虑梁段件匹配件连接后,在牵引过程中梁间存在非弹性变形(间隙)等因素影响,实际需要的牵引力一般会比模拟计算的大。因此,预偏合龙是希望牵引梁段长度越短越好。

3.5 基于吊装设备的分析

泰州大桥钢箱梁采用国内现有的设备——跨缆

吊机进行吊装,该设备额定吊重 370 t,适应主缆最大水平倾角 30° ^[3]。现有跨缆吊机吊装能力不存在问题,但要计算分析主缆倾角能否满足。在前述分析中,钢箱梁吊装处主缆倾角最大为 25° ,并未超出跨缆吊机允许作业倾角,但从跨缆吊机使用的安全性考虑,钢箱梁吊装应尽可能减小主缆的倾角,钢箱梁吊装采用方案二,从跨中开始更为有利。

4 钢箱梁吊装顺序的确定

从前面的分析可以知道,采用吊装方案一时,对于吊装过程中出现的主缆在塔顶鞍座处有折角、主缆与塔顶边缘碰撞的问题,解决办法为在边塔顶预留缺口、鞍座提前顶推,需要详细的分析和控制。综合来看,方案二除合龙段施工需要较大的预偏牵引力外,其他方面均优于方案一,因此,泰州大桥三塔两跨悬索桥钢箱梁吊装顺序优先考虑方案二,即从跨中对称加载的吊装顺序,一方面施工组织安排上有优势,另一方面也是一般悬索桥的吊装施工顺序。

泰州大桥钢箱梁采用小节段吊装方案,根据桥型结构及桥位处地形水位情况,钢箱梁安装的总体吊装顺序是从南北两主跨跨中 33、34 号吊索梁段开始,同时向索塔方向分 4 个工作面对称进行吊装施工,合龙段选择两个主跨的 3 号、62 号吊索对应梁段,全桥共设 4 个合龙段,合龙段的安装顺序是先安装中塔附近合龙段,后安装边塔附近合龙段。

全桥钢箱梁总体安装流程如下:

4 台跨缆吊机分别在跨中 33、34 号索夹处固定,两主跨先后将 34、33 号吊索对应梁段吊装到位,并连接好吊索、梁段间顶板临时连接件(见图 4)。

4 台跨缆吊机在两主跨分别从跨中 32、35 号吊索对应梁段开始向索塔方向逐段垂直吊装 4~61 号吊索对应梁段(见图 5)。

边塔侧跨缆吊机从边塔开始向中塔方向荡移吊装 F 梁段和 63~66 号吊索对应梁段;中塔侧跨缆吊机按 E→D→C→C'→南侧 B→北侧 B 的顺序荡移吊装中塔附近特殊梁段(见图 6)。

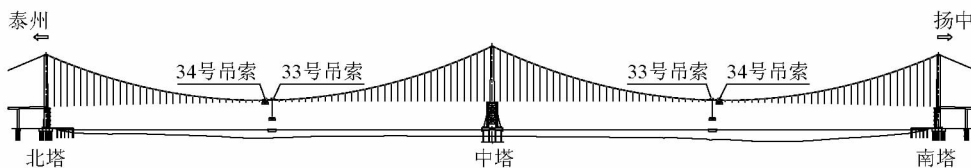


图 4 跨中起始梁段吊装

Fig. 4 Lifting of the start girder section in the middle of span

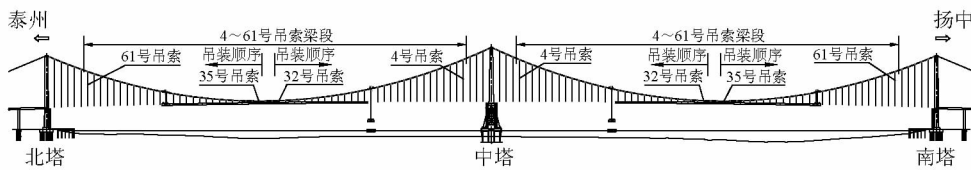


图 5 跨中一般梁段垂直吊装

Fig. 5 Lifting of ordinary girder sections in the middle of span

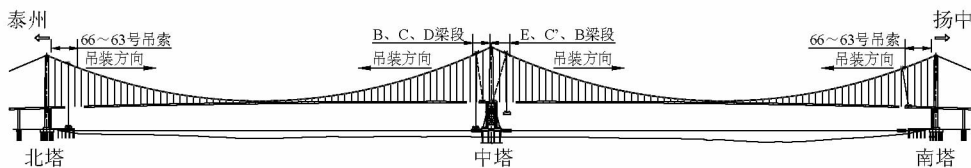


图 6 索塔附近梁段荡移吊装

Fig. 6 Swinging lifting of girder close to pylons

采用牵引预偏措施,跨缆吊机在3号、63号索夹位 置按图7中④→①→③→②的顺序垂直起吊合龙段。

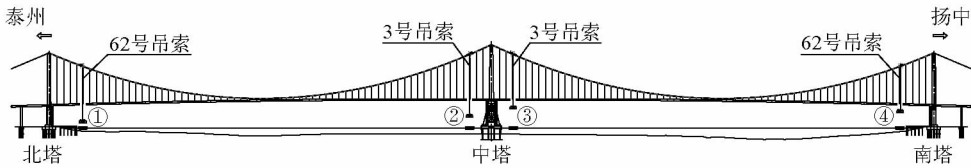


图7 合龙段吊装

Fig.7 Lifting of closing section

5 结语

泰州大桥为三塔两跨悬索桥,由于中塔采用“人”字形钢塔,中塔顶鞍座不设预偏,与其他已建成的悬索桥均不同,钢箱梁吊装过程中,主缆线形的变化、梁段间临时连接件的受力、以及中塔无索区钢箱梁体系转换以及合龙段施工工艺较双塔悬索桥复杂,施工难度也更大。文章通过分析主缆线形变化、钢箱梁临时连接件受力、中塔无索区梁段施工、合龙段施工、吊装设备等方面对钢箱梁吊装顺序的影响,

确定了三塔悬索桥合适的钢箱梁吊装顺序方案,为今后类似工程悬索桥钢箱梁吊装顺序的确定提供参考和借鉴。

参考文献

- [1] 杨进. 泰州长江公路大桥主桥三塔悬索桥方案设计的技术理念[J]. 桥梁建设, 2007(3): 33-35.
- [2] 韦世国, 吴建强, 文武, 等. 润扬大桥悬索桥钢箱梁吊装技术[J]. 桥梁建设, 2004(4): 40-43.
- [3] 闫友联, 赵有明, 金仓, 等. 特大跨径悬索桥全液跨缆吊机设计研究[J]. 桥梁建设, 2004(4): 13-16.

Determination of lifting sequence of steel box girders of suspension main bridge of Taizhou Bridge

Wang Jun¹, Liang Jinda²

(1. Jiangsu Provincial Yangtze River Highway Bridge Construction Commanding Department, Taizhou, Jiangsu 225321, China; 2. CCC-SHB Second Engineering Co. Ltd., Xi'an 710119, China)

[Abstract] Taizhou Bridge is the first three-tower two-span suspension bridge with spans over 1 000 m in the world. Its main spans are $2 \times 1\,080$ m; the middle tower is a steel frame with longitudinal herringbone shape and lateral gate shape; the side towers are gate shaped concrete frames; the stiff girder consists of flat streamline steel box girders, with a total of 136 steel box girders of about 33 426 t for the whole bridge. This article determines the proper lifting sequence of steel box girders of this three-tower suspension bridge by analyzing the effect of steel box girders lifting sequence on structural system and difficulty in construction.

[Key words] three-tower two-span suspension bridge; steel box girder; lifting sequence