

# 钢桁梁悬索桥加劲梁节段安装连接方式研究

陈常松, 吴俊杰

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

**摘要:**针对大跨度钢桁梁悬索桥施工过程中主梁的两种连接方式:逐段铰接法和刚铰结合法,以湖北省某长江公路大桥为例,采用桥梁设计与施工控制分析系统BDCMS建立平面全桥计算模型,对钢桁梁悬索桥主梁施工的两种连接方式进行模拟分析,综合比较施工过程中的加劲梁弦杆内力和加劲梁线形,得出项目采用刚铰结合法的施工方法较为合理的结论,并通过模拟计算对刚铰结合法的临时铰开口宽度进行研究,得到合理的铰固转换时机。

**关键词:**桥梁工程;悬索桥;钢桁梁;施工方法;刚铰结合法

中图分类号:U441.5

文献标志码:A

## Installation and Connection Mode of Stiffening Beam Segment of Steel Truss Suspension Bridge

CHEN Changsong, WU Junjie

(College of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China)

**Abstract:** During the construction of long-span steel truss suspension bridges, the main girder can be connected in segment-by-segment articulated connection method and rigid-articulated connection combination method. Taking a Yangtze River Highway Bridge in Hubei Province as an example, this paper established the plane calculation model of the full bridge using the Bridge Design and Construction Monitoring System BDCMS to simulate the above two connection methods of the main girder in construction. From the comprehensive analysis of chord member internal forces and line shape of the stiffening beam, this paper finds that the rigid-articulated connection combination method is more appropriate in the construction. In addition, this paper researched the opening width of the temporary hinge through simulation calculation to obtain the optimal conversion time of articulated and rigid connections.

**Keywords:** bridge engineering; suspension bridge; steel truss; construction method; rigid-articulated connection combination

## 0 引言

在大跨度钢桁梁悬索桥施工过程中,加劲梁的内力与梁段间的连接方式息息相关,施工方案的合理选择是保障设计成桥状态实现和施工过程中结构不出现较大内力与变形的关键<sup>[1]</sup>。谭永高<sup>[2]</sup>以四渡河特大桥为例,对钢桁梁在4种不同连接方式下的受力状态进行了研究,得到了不同连接方案下钢桁梁的应力状态及各相邻节段之间下弦杆开口宽度的变化规律,提出了主梁施工过程中铰固转换的最佳时

机;连飞飞<sup>[3]</sup>以星海湾大桥为例,对逐段铰接法、逐段刚接法、刚铰结合法的施工特点进行了较为系统的研究;张海顺<sup>[4]</sup>以杨泗港长江公路大桥为例,对适时铰接法主梁施工过程中的配重形式进行了研究;朱红明<sup>[5]</sup>以白洋长江大桥为例,基于传统的刚铰结合法提出主梁节段临时连接的窗口铰接法。从加劲梁架设施工的分析研究可以看出,采用何种连接方式进行架设,一直是加劲梁施工中核心的问题<sup>[6-10]</sup>。可见,对于钢桁梁悬索桥加劲梁安装连接方式的研究具有一定的工程意义。因此,本文以某长江公路大

收稿日期:2022-06-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51678070)

作者简介:陈常松,男,博士,教授,博士生导师.E-mail:1343471153@qq.com

桥为实例,并以实际施工方案为基础,对钢桁梁悬索桥加劲梁安装施工进行了模拟分析,为大跨度钢桁梁悬索桥施工方案的制订提供一定的参考。

## 1 工程概况

某长江公路大桥为地锚式钢桁梁悬索桥,主缆跨径组成为(276+1 000+269) m,主桥总体布置如

图1所示,主缆横桥向间距36.0 m,主缆采用预制平行钢丝束股法(PPWS)形成,钢丝标准抗拉强度1 860 MPa,吊索与索夹采用骑跨式连接,相邻吊点标准间距为15 m,桥塔中心线至最近吊点间距为20 m,吊索钢丝公称抗拉强度为1 960 MPa,大桥南北索塔均为门形框架结构,北索塔高142.5 m,南索塔高151 m<sup>[5]</sup>。

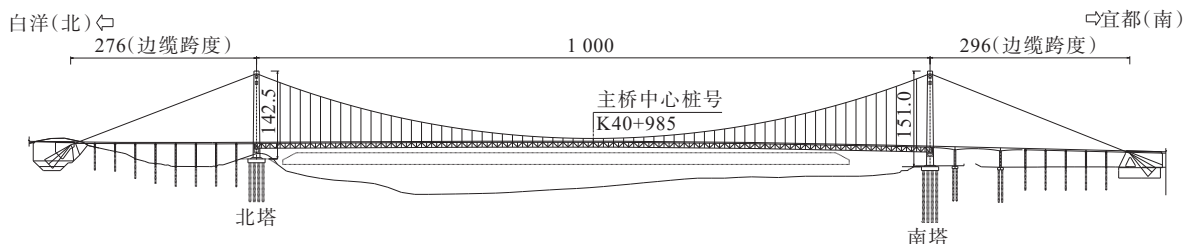


图1 主桥总体布置图(单位:m)

Figure 1 General arrangement of main bridge (unit: m)

## 2 加劲梁连接方案介绍

加劲梁施工顺序为:先进行跨中加劲梁的吊装,再从跨中向桥塔进行加劲梁的对称吊装,最后进行端部加劲梁节段的安装。

以实际施工方案(刚铰结合法)为基础,拟定了3种施工方案。在施工过程中由于逐段刚接法钢桁架内力非常大,构件强度及稳定性难以满足要求,同时吊索力也非常大,安装时吊索需要张拉才能完成连接,在实际施工过程中逐段刚接法难以实现。因此,下列方案采用不同的设铰数量进行对比分析。

方案1:从跨中向桥塔进行主梁吊装施工,对安装梁段采用铰接的连接方法,即梁段间钢桁梁上弦杆铰接连接、下弦杆不连接,在进行桥面系施工并完成等效二期压重后,将所有加劲梁节段间的上、下弦

杆进行刚接。

方案2:即施工场所采用的主梁连接方式(刚铰结合法),从跨中向桥塔进行主梁吊装施工,对安装梁段设置一定数量的临时铰,设铰位置如图2所示(实心黑圈为设铰位置),直至吊装至B10梁段之后,根据模拟计算得到的刚接时机,对施工过程中的临时铰进行刚接。

方案3:从跨中向桥塔进行主梁吊装施工,在跨中设置少量临时铰,设铰位置如表1所示,其余梁段采用上、下弦杆均刚接的连接方法,加劲梁安装完毕后进行桥面系施工。

表1 临时铰设置位置

Table 1 Temporary hinge setting position

设铰序号	设临时铰位置	设临时铰位置
第1对临时铰	B18、B17之间	B18、B17'之间
第2对临时铰	B17、B16之间	B17'、B16'之间

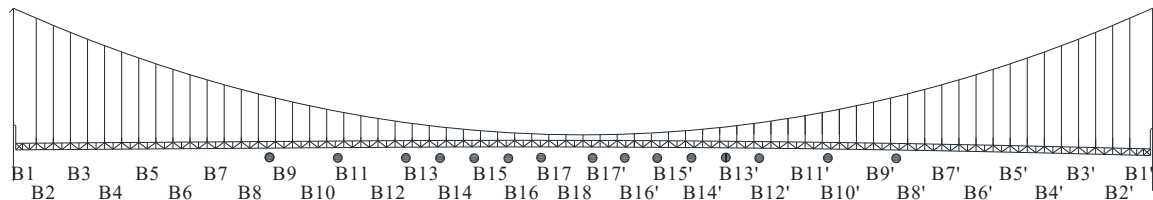


图2 临时铰位置图

Figure 2 Temporary hinge position

对于加劲梁施工过程中梁段连接方案的选取,若采用方案1(逐段铰接法),在后期桥面系施工过程

中有大量的临时铰需要进行刚接,铰固转换会占用大量工期,影响施工进度;若采用方案3,设置较少数

量的临时铰,在后期桥面系施工过程中需要刚接的临时铰数量较少,相对方便高效,但是加劲梁吊装过程中便对大量吊装梁段进行刚接,使得加劲梁具有一定的整体刚度,对施工过程中加劲梁的变形起到了一定的约束作用;若采用方案2,通过设置一定数量的临时施工铰,相对逐段铰接法,减少了临时铰的

数量,并有效地降低了加劲梁之间的约束作用。

3 有限元模型的建立

采用计算程序BDCMS建立平面全桥计算模型,全桥共建立607个节点、1 015单元,计算网格图如图3所示。

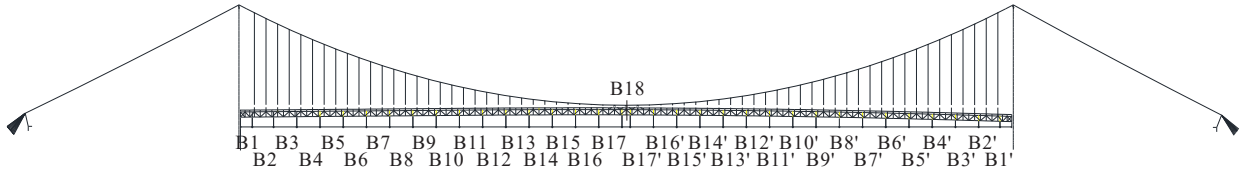


图3 计算网格图

Figure 3 Calculation grid

本文计算以设计合理成桥状态为目标,首先计算出主缆的空缆线形及无应力索长,作为主缆初始构型,然后采用正装分析,并不断更新主梁索塔的初始状态,最终使得计算模型达到设计合理成桥状态。

悬索桥的主要结构构件是主缆、吊杆、索鞍、桥塔和主梁,在本次模拟计算中根据各构件受力情况的不同对单元进行离散。具体离散情况如下:

主缆和吊杆采用索单元模拟,该单元只能承受拉力,受压后自动退出计算;混凝土桥塔采用变截面梁单元模拟;钢桁梁采用平面等效桁架单元模拟,钢桁梁节段内部杆件连接采用共节点实现,节段与节段之间杆件连接采用主从节点模拟,钢桁梁构件截面特性如表2所示。

表2 钢桁梁构件截面特性

Table 2 Section characteristics of steel truss members

构件名称	$A/\text{m}^2$	$I/\text{m}^4$	$W_x/\text{m}^3$	$W_s/\text{m}^3$
上弦杆	0.055 6	0.004 332	0.012 642	0.012 122
下弦杆	0.055 5	0.004 332	0.012 642	0.012 123
ZF1-3-4-5	0.025 1	0.000 256	0.001 163	0.001 163
ZF2	0.022 4	0.000 165	0.000 867	0.004 564
ZF6	0.030 1	0.000 220	0.001 157	0.006 089

注: $A$ 为截面面积; $I$ 为截面抗弯惯性矩; $W_x$ 为截面下缘抗弯模量; $W_s$ 为截面上缘抗弯模量。

4 加劲梁连接方案的模拟分析

在钢桁梁悬索桥主梁施工过程中,主要关注的有加劲梁的内力水平、线形状态和吊杆内力。在本次模拟研究中,选取加劲梁弦杆内力、吊杆内力和不同施工阶段下的加劲梁线形为研究对象。

4.1 连接方案对加劲梁和吊杆内力的影响

在钢桁梁悬索桥施工过程中,加劲梁主桁杆件的内力计算是保证主梁结构安全的重要因素,在钢桁加劲梁吊装施工过程中,整个加劲梁的线形是先向下凸而后上拱的。此时,只有钢桁梁参与受力,钢桁梁的竖向刚度主要取决于弦杆的刚度,导致主桁架弦杆所受轴力较大,其内力通常在施工过程中起控制作用。

本文以主桁架弦杆内力和吊杆内力作为研究对象,选取施工全过程的主桁上、下弦杆轴力和吊杆力,得到施工过程中上、下弦杆的内力包络图和吊杆力包络图,如图4~6所示(弦杆受压为正,受拉为负,吊杆受拉为正)。

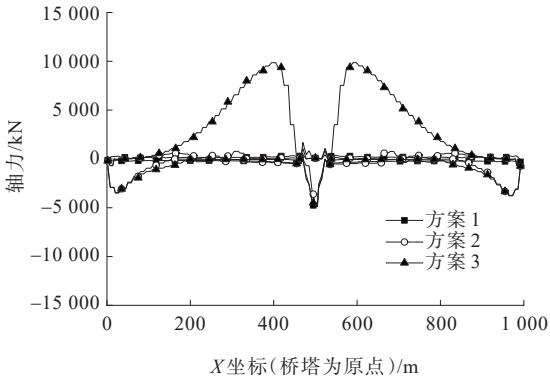


图4 钢桁梁上弦杆内力包络图

Figure 4 Internal force of upper chord of steel truss

从图4可知:对于方案3,在跨中设置两对临时铰,有效地降低了临时铰位置处上弦杆的压力,但跨中上弦杆出现了较大的拉力(4 494 kN),原因在于当下弦杆不连接时,上弦杆承担了施工过程中主缆位

移产生的拉力,由于方案3设铰数量较少,在2/5跨与3/5跨处出现了较大的上弦杆压力(9 855 kN)。对于方案2,由于施工过程中加劲梁设置了15处临时铰,有效地降低了施工过程中加劲梁节段之间的约束作用,从而降低了跨中弦杆的内力水平,且由于靠近桥塔处未设置临时施工铰,桥塔附近弦杆受力状态与方案3相似。对于方案1,采用逐段铰接的连接方式在整个施工过程中产生的上弦杆内力很小,且变化幅度不大,仅在跨中出现了较大的拉力,与方案2和方案3的受力状态类似。

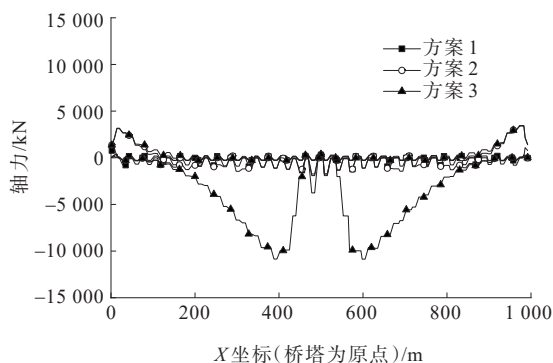
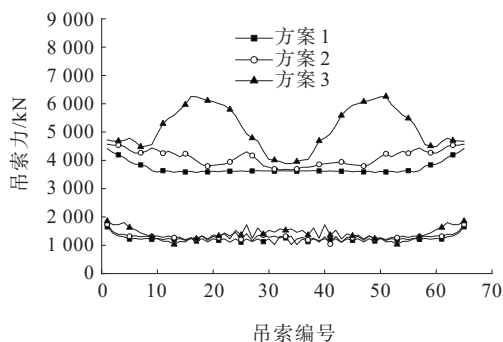


图5 钢桁梁下弦杆内力包络图

Figure 5 Internal force of lower chord of steel truss



注:全桥共65对吊索,文中从南向北分别为1号吊索~65号吊索。

图6 吊索内力包络图

Figure 6 Internal force of sling

从图5可知:对于方案3,由于设铰数量较少,在施工过程中,下弦杆仍产生了较大的拉力(10 866 kN);对于方案2,由于在跨中存在一处梁段刚接(B17和B18之间),位于跨中的下弦杆出现了较大的拉力(3 767 kN);对于方案1,由于梁段间下弦杆在加劲梁吊装施工期间均未连接,在施工过程中下弦杆内力很小且分布均匀。

从图4、5可知:由于采用对称施工,施工过程中3种方案的内力包络图基本呈对称分布,临时铰附近

的弦杆内力值均较小,但当临时铰数量较少时,在施工过程中仍出现了较大的弦杆内力。

从图6可知:方案3由于设铰数量较少,在施工过程中产生了相对较大的吊索力(6 257 kN);方案2与方案1吊索力较为均匀,且由于设置了较多数量的临时铰,施工过程中的吊索力较小。

#### 4.2 连接方案对加劲梁线形的影响

在钢桁梁悬索桥施工过程中,掌握施工过程中加劲梁的线形变化规律,可以有效地识别出加劲梁的受力不利截面,有助于合龙方案与桥面系施工方案的编制,同时也可作为铰固转换时机确定的理论依据。将几个典型工况下加劲梁线形图分别绘出,如图7~9所示。

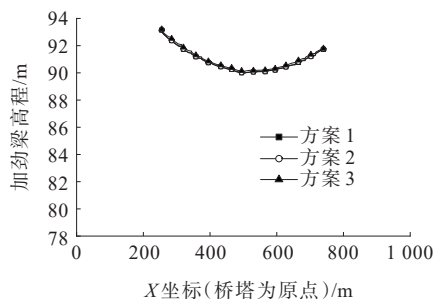


图7 安装B10、B10'梁段

Figure 7 Installation of B10 and B10' sections

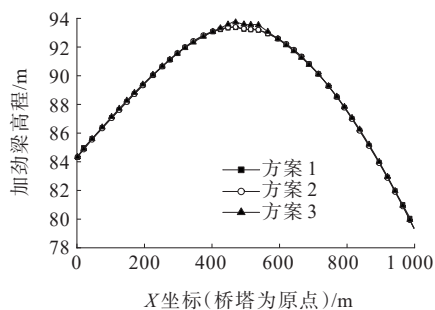


图8 加劲梁安装完毕状态

Figure 8 Completion state of stiffening beam installation

由图7~9可以看出:当吊装至梁段B10时,由于方案3加劲梁中设铰数量较少,相较其他两种施工方案加劲梁线形存在微小的差异,而方案2由于临时铰设置的数目较多,加劲梁之间的约束作用较小,方案2与方案1加劲梁线形几乎一致。当加劲梁合龙时,加劲梁线形由初始吊装阶段的下凸变为合龙阶段的上凸,此时方案1与方案2线形仍然一致,而方案3较其他两种连接方案仅在跨中存在一定的高程差异,但总体差值仍然较小。随着桥面板的铺装,方案3的加



劲梁线形与其他两种方案的加劲梁线形进一步接近,在成桥状态下,3种不同连接方案的加劲梁线形一致。

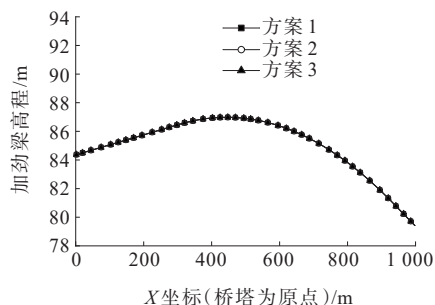


图9 成桥状态

Figure 9 Bridge completion state

从上述分析可知:加劲梁架设的不同连接方式对施工过程中加劲梁的线形影响很小。在大跨度悬索桥中,随着加劲梁的吊装,主缆的重力刚度逐渐增大,加劲梁的弯曲刚度在结构总的刚度中占比减小。可得,大跨度悬索桥加劲梁施工过程中,结构以主缆的刚度为主,即加劲梁之间的约束作用对自身线形影响较小。

## 5 刚铰结合法铰固转换时机研究

从第4节分析可得,在加劲梁位移方面3种连接方式差别不大,因此在施工过程中应以加劲梁内力控制为主,采用刚铰结合法进行主梁安装施工,在弦杆内力方面具有较好的施工状态。如能把握合适的刚接时机,将进一步发挥刚铰结合法在施工过程中的优势。

采用刚铰结合法方案,对施工过程进行模拟,选取8个临时铰的下弦杆开口宽度为研究对象,临时铰位置如表3所示。

表3 临时铰位置

Table 3 Temporary hinge position

临时铰序号	左梁段号	右梁段号	临时铰序号	左梁段号	右梁段号
J01	B8	B9	J05	B14	B15
J02	B10	B11	J06	B15	B16
J03	B12	B13	J07	B16	B17
J04	B13	B14	J08	B18	B17'

图10、11给出了设铰处开口宽度随施工阶段变化的情况,其中,施工阶段1~2为索塔施工阶段;3~5为主缆架设阶段,6~44为钢桁梁安装阶段,45~50为混凝土板铺设阶段,50~53为二期恒载铺设阶段。

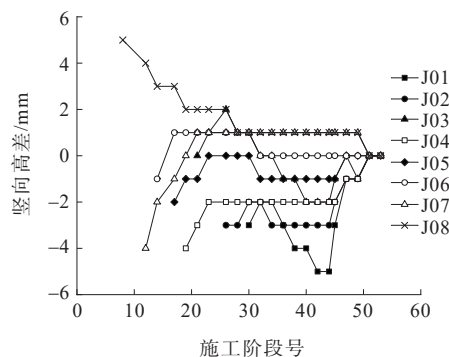


图10 竖向高差变化图

Figure 10 Vertical height difference changes

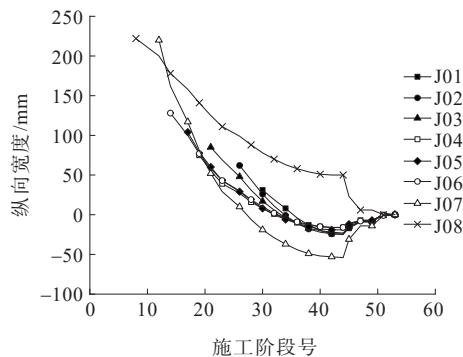


图11 纵向缝宽变化图

Figure 11 Longitudinal joint width changes

从图10可得:下弦杆开口角的竖向高差在施工阶段中最大达到了5 mm,而大多数施工阶段的竖向高差都在2 mm左右,且竖向高差的变化不会引起下弦杆的相互抵触,因而下弦杆竖向高差不成为铰固转换时机的主控因素。

从图11可得:下弦杆开口角的纵向宽度在施工阶段中最大达到了222 mm。因此,可将下弦杆开口角纵向缝宽作为刚接时机的主控因素。在加劲梁设铰初期,是纵向缝宽最大的时期,随着吊装梁段的增加,其纵向缝宽迅速减小,直至纵向缝宽减小为“0”。大部分临时铰的下弦杆开口角纵向宽度为“0”的时机处于不同的施工工况,有利于临时铰进行刚性连接施工,除了J08以外,所有临时铰的下弦杆开口角纵向宽度初次为“0”的工况都在桥面铺装工况(工况45)之前。随着梁段吊装施工的继续,部分临时铰的下弦杆开口角出现了“负夹角”的情形,需及时对临时铰进行刚接,防止下弦杆相互抵触。

从图10、11可得,临时铰下弦杆开口角的纵向宽度远大于竖向高差,且加劲梁临时铰开口宽度的闭合时机大多处于不同的施工阶段,有利于进行加劲

梁的刚性连接。在施工过程中应着重观察开口角纵向宽度的变化规律,根据模拟计算掌握合适的铰固转换时机。

## 6 结论

本文以某大跨度钢桁梁悬索桥为研究对象,基于实际施工方案,对钢桁梁悬索桥施工过程中加劲梁的两种连接方式进行比较分析,得到了不同施工方案下加劲梁弦杆内力状态和加劲梁线形变化情况。最后,对本项目的实际施工方案(刚铰结合法)的铰固转换时机进行了分析。通过研究,得到以下结论:

(1) 在大跨度钢桁梁悬索桥施工过程中,不同的临时铰数量会对加劲梁弦杆内力和吊索内力产生显著的影响,当采用逐段铰接法时,施工过程中弦杆内力水平最低,且变化幅度最小,而当设铰数量较少时,在施工过程中产生了较大的弦杆内力。

(2) 通过理论计算可得,实际施工方案采用的刚铰结合法,通过在跨中设置一定数量的临时铰,有效地降低了跨中弦杆的内力水平,使跨中弦杆受力状态与逐段铰接法相似。

(3) 通过对加劲梁不同连接方案的弦杆内力和加劲梁线形进行比较可得,在实际施工过程中可通过对临时铰的合理设置,使刚铰结合法中构件的受力状态与逐段铰接法相似,验证了实际施工方案(刚铰结合法)的合理性。

(4) 对于采用刚铰结合法施工的大跨度钢桁梁悬索桥,通过理论计算确定合理的刚接时机,可有效地避免刚接时机过于集中,提高施工作业效率,并实现加劲梁施工过程中梁段的无应力刚接,节约人力物力。

### 参考文献:

### References:

- [1] 王忠彬,沈锐利,唐茂林.悬索桥钢桁架加劲梁施工方法分析[J].石家庄铁道学院学报,2006,19(1):117-121.  
WANG Zhongbin, SHEN Ruili, TANG Maolin. Construction methods analysis of the steel truss stiffening girder of suspension bridge[J]. Journal of Shijiazhuang Railway Institute,2006,19(1):117-121.
- [2] 谭永高.大跨径悬索桥桁架加劲梁节段的安装研究[J].公路,2007,52(7):46-50.  
TAN Yonggao. Research on truss stiffening girder segment assembling of long span suspension bridge[J]. Highway, 2007,52(7):46-50.
- [3] 连飞飞.钢桁架悬索桥静力分析及加劲梁吊装方案研究[D].大连:大连理工大学,2013.  
LIAN Feifei. Static analysis of steel truss suspension bridge and study on hoisting scheme of stiffening beam [D]. Dalian: Dalian University of Technology,2013.
- [4] 张海顺.大跨度钢桁梁悬索桥临时连接方式分析研究[J].土木工程学报,2020,53(12): 98-105.  
ZHANG Haishun. Analysis on temporary connection mode of the large-span steel truss girder suspension bridge [J]. China Civil Engineering Journal,2020,53(12): 98-105.
- [5] 朱红明,程海潜,李清,等.大节段钢桁梁悬索桥主梁架设的窗口铰接法研究[J].中外公路,2021,41(6): 120-123.  
ZHU Hongming, CHENG Haiqian, LI Qing, et al. Window hinged method for erecting main girder of long-span steel truss suspension bridge[J]. Journal of China & Foreign Highway,2021,41(6): 120-123.
- [6] 杨胜,樊小伟.山区钢桁架悬索桥设计与施工[J].中外公路,2021,41(6): 141-144.  
YANG Sheng, FAN Xiaowei. Design and constructions of steel truss suspension bridge in mountainous area[J]. Journal of China & Foreign Highway,2021,41(6): 141-144.
- [7] 潘永仁,范立础.大跨度悬索桥加劲梁架设过程的倒拆分析方法[J].同济大学学报(自然科学版),2001,29(5): 510-514.  
PAN Yongren, FAN Lichu. Backward analysis method of long-span suspension bridges for erection of stiffening girders[J]. Journal of Tongji University, 2001, 29(5): 510-514.
- [8] 袁理,黄影,赵宇清.悬索桥浅滩区钢桁梁吊装施工新技术[J].中外公路,2019,39(3): 155-157.  
YUAN Li, HUANG Ying, ZHAO Yuqing. New construction method for hoisting steel truss girders in shoal area of suspension bridges[J]. Journal of China & Foreign Highway,2019,39(3):155-157.
- [9] 刘吉哈.大跨度铁路悬索桥加劲梁施工方法研究[D].成都:西南交通大学,2013.  
LIU Jihan. Study on construction method of stiffening beam of long-span railway suspension bridge[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University,2013.
- [10] 朱立山,才振山,蒋雨霏.洞庭湖大桥两跨连续钢桁架加劲梁合龙方案研究[J].中外公路,2019,39(5): 118-122.  
ZHU Lishan, CAI Zhenshan, JIANG Yuqin. Closure scheme of stiffening girder for two-span continuous steel truss of Dongting Lake Bridge[J]. Journal of China & Foreign Highway,2019,39(5): 118-122.