

大跨径钢桁梁悬索桥加劲梁吊装施工 节段连接方式研究

邵广森,潘权,颜东煌*,许红胜

(长沙理工大学 土木工程学院,湖南 长沙 410114)

摘要:针对在大跨径钢桁梁悬索桥加劲梁施工过程中,加劲梁节段间的不同连接方式会直接影响施工过程中结构的内力、线形和成桥状态等问题。该文以某桥加劲梁施工为研究背景,建立全桥全过程有限元模型,对比分析逐段铰接法、分段刚接法的优缺点,提出采用两两分段刚接方案。在此基础上,根据加劲梁吊装过程中钢桁梁段线形和下弦杆开口量变化规律,提出“小段刚接+大段刚接”同步作业的构思,制定加劲梁节段间体系转换工序方案并实施。实桥测试结果验证了该文分析方法正确可行,在保证结构受力安全、成桥状态合理的前提下,可缩短施工工期、降低建设成本。

关键词:悬索桥;主梁架设;加劲梁连接方式;临时连接;“小段刚接+大段刚接”同步作业

中图分类号:U448.25

文献标志码:A

Segment Connection Mode for Stiffening Girder Hoisting Construction of Long-Span Steel Truss Girder Suspension Bridge

SHAO Guangmiao,PAN Quan,YAN Donghuang*,XU Hongsheng

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

Abstract: In the process of stiffening girder construction of a long-span steel truss girder suspension bridge, different connection modes of stiffening girder segments will directly affect the internal force, alignment, and bridge state of the structure during construction. By taking the construction of the stiffening girder of a bridge as the research background, the finite element model of the whole process of the bridge was established. The advantages and disadvantages of the segmented hinge method and the segmented rigid connection method were compared, and the two-two segmented rigid connection scheme was proposed. On this basis, according to the changing law of steel truss section alignment and lower chord opening in the process of stiffening girder hoisting, the idea of synchronous operation of “rigid connection for small segments + rigid connection for large segments” was put forward. In addition, the system conversion process scheme between stiffening girders was developed and implemented. The test results of the real bridge verified the correctness and feasibility of the analysis method in this paper. On the premise of ensuring the safety of the structure and the reasonable state of the bridge, it could save the construction period and reduce the construction cost.

Keywords: suspension bridge; main beam erection; stiffening girder connection; temporary connection; synchronous operation of “rigid connection for small segments + rigid connection for large segments”

0 引言

加劲梁节段安装是大跨径悬索桥施工过程中的

重点和难点,适宜的施工方法可以高质量地完成建设任务,保证内力和线形可控,而且还能节约工期,降低施工成本^[1-7]。近年来,国内外许多学者对加劲

收稿日期:2023-03-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51878073);湖南省自然科学基金资助项目(编号:2022JJ30612)

作者简介:邵广森,男,硕士研究生.E-mail:1697174374@qq.com

*通信作者:颜东煌,男,博士,教授.E-mail:yandonghuang@126.com

梁的施工进行了多角度的研究^[8-11],研究表明:加劲梁节段采用不同的连接方式时,施工过程中的结构稳定性、构件内力、线形、工期及成桥状态有较大差别。钢桁梁节段连接方式主要有逐段铰接法、逐段刚接法及刚铰混合法3种方法。逐段铰接法为在加劲梁节段施工全过程中,节段间均设立临时铰或自由悬挂状态,二恒压重后全桥一次性刚接完成体系转换。该方法钢桁梁节段在架设过程中,节间可以相对自由转动,施工过程拼装应力小,成桥线形易控制,但是节间整体稳定性较差、临时结构较多、施工工期相对较长。逐段刚接法为新架设梁段与已安装梁段进行刚性连接直接形成体系。吊装过程中采用此方法结构整体刚度大,抗风稳定性较好,工期较短,临时结构较少,但是该方法会导致施工过程中拼装应力不能释放,存储在杆件内部,在某个阶段部分杆件有可能超过容许应力,造成不可逆转的结构损伤现象,实际施工中须慎重使用。刚铰混合法为逐段刚接法和逐段铰接法的结合,该工序相对复杂,需要提前进行大量仿真分析,若设铰数过多,同样需要进行等效压重,以满足成桥状态和结构内力要求。从使用情况看,这3种连接方式都存在一定的不足之处^[12-17]。

在保证加劲梁受力安全和成桥线形合理的前提下,架设一定梁段后是否存在一个合适时机进行梁

段的部分刚接,以增强结构的整体刚度和稳定性,缩短工期,减少施工过程临时措施。在综合3种节段连接方式的基础上,本文提出在钢桁梁两两刚接过程中寻找合适大段刚接时机、减少设铰数量的方案。

1 工程概况

以某桥加劲梁施工为背景,研究节段连接方式。该桥为主跨650 m的单跨钢桁梁悬索桥,桥型布置见图1,矢跨比约为1/9.5。吊索共53对,间距为12 m,每处吊点设2根平行钢丝吊索,钢丝标准抗拉强度1 860 MPa,吊索与索夹、钢桁梁均为销轴式连接。加劲梁采用板桁组合结构的钢桁加劲梁,见图2,由主桁、横桁、桥面板、下平联等组成。主桁为带竖杆的华伦式桁架,桁高5.8 m,端部两个吊装节段长10.2 m、跨中一个吊装节段长5.4 m,其他吊装节段均长12.0 m,两片主桁中心横向间距为36.0 m,钢桁梁主体结构除下弦杆采用Q420钢材制作外,其余均采用Q345钢材制作。桥面系采用正交异形桥面,桥面板厚16 mm,下设U形加劲肋和板加劲肋,其中嵌补段后吊板长4.6 m。全桥共55个吊装节段,分为A~I共9种类型,其中跨中节段为J0,端部节段分别为J27、J27'。钢桁加劲梁节段、钢桥面板均采用缆索吊装工艺施工,从跨中向两侧对称安装。

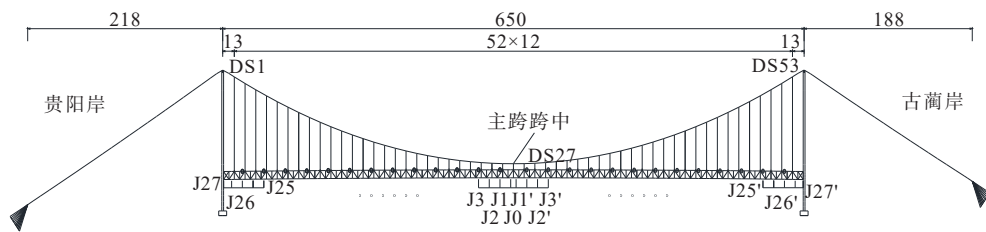


图1 桥型布置图(单位:m)

Figure 1 Bridge layout(unit:m)

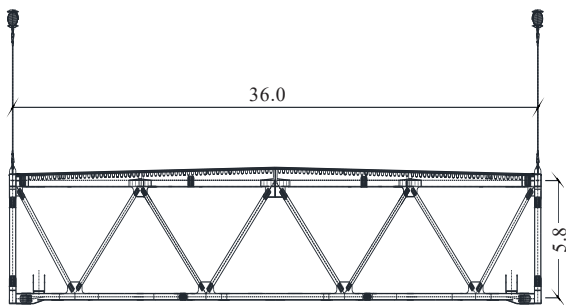


图2 板桁组合结构主梁断面图(单位:m)

Figure 2 Section view of main beam of plate-truss composite structure(unit:m)

2 有限元模型的建立

根据缆索实测弹模及加劲梁纵桥向等效荷载采用Midas/Civil建立加劲梁节段吊装整体分析模型如图3所示,全桥共划分为5 396个节点、11 510个单元。其中主缆和吊索采用索单元进行模拟;钢桁梁主桁、横桁、下平联、散索鞍及索塔均采用空间梁单元模拟,桥面板采用板单元模拟。悬索桥边界条件约束为:主缆与塔顶采用刚臂单元连接,释放纵桥向位移模拟主索鞍的顶推,主缆锚跨端部及主塔底部固结约

束。在模型计算分析时,采用Newton-Raphson法进行迭代计算,以位移控制为收敛准则,精度为0.001,即在施工阶段计算结果达到要求时停止计算分析^[18-19]。

在钢桁梁节段吊装施工过程中相邻节段上弦杆设计临时铰接,装置如图4所示,保证相邻节段间不仅能转动,还能传递轴力。在有限元模型中,通过释放上弦杆梁端约束的方式实现临时铰的模拟,钢桁梁节段间下部杆件处于自由状态;通过钝化微小单元的方式模拟,在加劲梁吊装施工过程中,相邻节段间下弦杆可能会出现“负夹角”相抵接的情况,通过在两节点间建立弹性变形-内力函数弹性连接模拟。根据悬索桥实际施工工序,考虑荷载作用情况,如猫

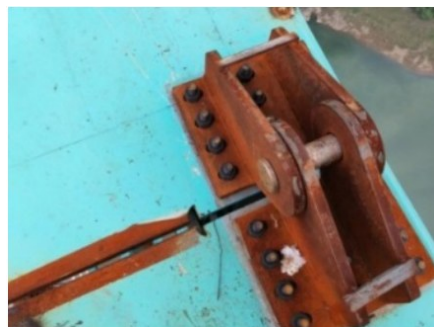


图4 现场施工上弦杆临时连接

Figure 4 Temporary connection of upper chord during site construction

道改吊后,将猫道荷载等效作用于主缆上。

3 节段间连接方式分析

钢桁梁节间合理的连接方式影响着整个施工进度,通过有限元模型分析施工过程中分别采用逐段铰接法、分段刚接法对结构的影响。其中,分段刚接法提出两两刚接法及三三刚接法两种方案,在钢桁梁节段吊装过程中组合节段内节段之间进行刚接处理,组合节段之间进行临时铰接处理,临时铰分布如图5所示。

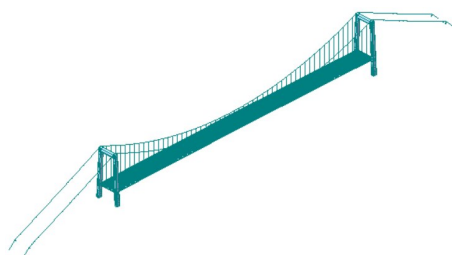


图3 全桥有限元模型

Figure 3 Finite element model of whole bridge

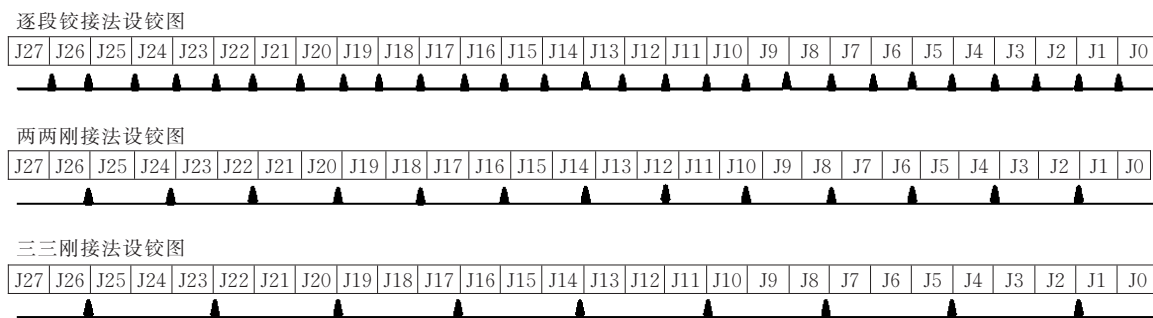


图5 临时铰分布图

Figure 5 Temporary hinge distribution

3.1 施工过程中吊索力及桁架内力分析

在钢桁梁节段吊装过程中,主缆和主梁线形变化较为显著,结构体系受力复杂,取吊索索力、钢桁梁上下弦杆最大应力峰值进行比较分析,定义拉力为正、压力为负。不同连接方式吊索包络图见图6,杆件应力最值见表1。

从图6可以看出:在钢桁梁吊装过程中,逐段铰接法全桥吊索力较为均匀,最大吊索力出现在靠近主塔处吊索,为1330.0 kN。本桥单根吊索破断力为3980 kN,安全系数为5.98。两两刚接法及三三刚接

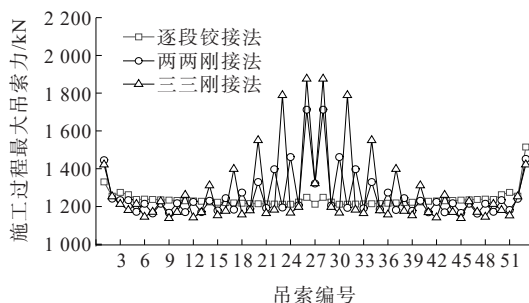


图6 不同连接方式吊索内力包络图

Figure 6 Internal force envelope diagram of slings with different connection modes

表 1 3种连接方式杆件应力最大值

Table 1 Extreme stress of members with three connection modes								MPa
连接方式	上弦杆		下弦杆		竖腹杆		斜腹杆	
	最大	最小	最大	最小	最大	最小	最大	最小
逐段铰接法	79.1	−72.5	12.2	−9.1	5.6	3.3	31.3	−0.04
两两刚接法	111.7	−102.9	13.2	−12.8	69.6	−34.6	53.6	−15.90
三三刚接法	180.2	−173.6	15.5	−14.9	115.4	−40.3	64.4	−33.50

法最大吊索力均出现在接近跨中的 DS26、DS28,随着吊索接近主塔,吊索力呈下降趋势,其最大吊索力分别为 1 712.0 kN、1 876.2 kN,安全系数分别为 4.65、4.24。对比发现,节段组内节段数量的增加,不会引起吊索力太大幅度的变化。从吊索力来讲,3种方案都是安全可靠的。

由表 1 可以发现:在钢桁梁节段吊装过程中,逐段铰接法最大拉应力为 79.1 MPa,出现在吊装至 J1、J1'节段时上弦杆下截面处。分段刚接法由于节段组内节段上下弦之间均进行刚性连接,节段之间产生互相制约作用抑制主梁的变形,在跨中处上下弦杆会产生较大的应力。两两刚接法最大拉应力为 111.7 MPa,出现在吊装至 J3、J3'节段。三三刚接法最大拉应力为 180.2 MPa,出现在吊装至 J4、J4'节段,分段刚接法两种方案最大应力出现位置均为 J1 与 J2 节段间上弦杆处。逐段铰接法可以看作是将一个节段作为节段组,节段组内节段数由一个增加为 3 个,其应力值分别增加 32.6 MPa、68.5 MPa,由此可知,随着节段组内节段数量的增加,弦杆应力会显著增加,通过增加节段组内节段数量来减少全桥合龙后的临时铰数量的方式不可取。相比三三刚接法,采用两两刚接法具有更多的应力储备。

3.2 工期及经济性分析

通过表 2 及图 7 可以发现:逐段铰接法在全桥合龙后需通过全桥二恒等代压重的方式进行临时铰的体系转换,嵌补段桥面板需在压重后进行吊装,刚接后拆除配重增加工期。分段刚接法节段组内节段之间采用刚性连接,在钢桁梁节段吊装期间,可进行嵌补段桥面板的临时放置,在全桥合龙时就可完成部分嵌补段桥面板的吊装和刚铰体系转换,随着节段组内节段数量的增加,吊装的嵌补段桥面板数量越多,与后续刚接体系转换中所需的配重相比逐段铰接法有所减少。从经济及工期的角度上讲,分段刚接法具有明显的优势。

经过对 3 种方案的结构体系受力安全储备、经济效益及工期分析,选取两两刚接法为钢桁梁节段吊装连接方式较为适宜。

表 2 3种连接方式合龙状态对比

Table 2 Comparison of closure status of three connection modes

方案	临时铰数量/对	嵌补段桥面板吊装数量/块	等效压重	施工效率
逐段铰接法	52	0	全桥压重	低
两两刚接法	26	26	局部压重	较高
三三刚接法	18	34	局部压重	高

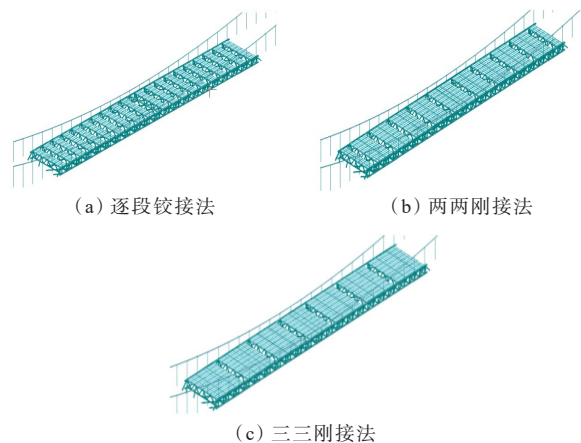


图 7 不同连接方式桥面板吊装示意图

Figure 7 Hoisting of bridge decks with different connections

4 钢桁梁节段大段刚接时机分析

4.1 大段刚接时机的选择

在加劲梁吊装初期,梁段呈下凹形态;加劲梁吊装中期,梁段处于接近水平形态;加劲梁吊装末期,梁段呈现上凸形态,此时跨中标高高于成桥阶段,之后在桥面附属结构和桥面铺装完成后达到成桥线形。在加劲梁吊装后期,必然有某个(些)阶段某些梁段的线形与成桥线形比较相同或相近,利用有限元分析法,尽可能地考虑实际施工荷载作用情况,通

过模拟试算和现场观测,寻求吊装过程中加劲梁线形与成桥线形一致的状态,此时可进行部分铰刚性连接,同时设适当数量的临时铰来适应主梁的线形变化,具体设铰数由计算分析确定。

在加劲梁吊装施工中后期,采用“两两小段刚接+大段刚接”的方式进行节段连接,在保证施工过程中结构受力安全的前提下,减少临时铰的数量。

在加劲梁吊装后期,梁段线形由下凹形态逐渐转变为上凸形态,加劲梁施工过程中线形变化见图8,当吊装至J22、J22'节段时,此时加劲梁桥面线形与成桥状态较为接近吻合。选取下弦杆开口作为验证,下弦杆开口大小见图9,图中K1表示J1节段与J2节段间下弦杆开口,K2表示J2节段与J3节段间下弦杆开口,以此类推。吊装至J22、J22'节段时,已有部分铰下弦杆开口在此施工阶段达到近似闭合状态,随着节段的吊装,节段间下弦杆开口闭合数增加,此施工阶段则判定为开始部分节段刚接转换时机。

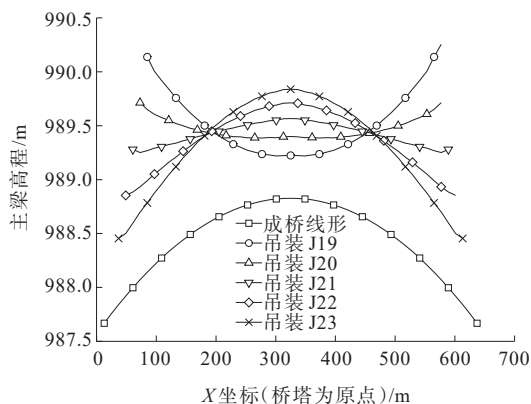


图8 加劲梁施工过程中线形变化

Figure 8 Alignment variation of stiffening girder during construction

4.2 合理设铰位置及设铰数量的判定

在加劲梁架设过程中,一方面,实际施工过程中存在误差;另一方面,下弦杆开口处于“似开似闭”的临界状态,梁段之间一旦进行多段刚接处理,会导致加劲梁杆件内力增大,产生拼装应力,若应力过大内部杆件会出现损伤的情况。在施工过程中,应合理选择设铰位置及设铰数量,从而保证施工过程中结构受力安全。下弦杆刚接及不同设铰位置上弦杆最大应力如图10、11所示。

从图10可以看出:在大段刚接体系转换时,若采用从跨中向两岸依次进行刚接的方式,刚接下弦杆

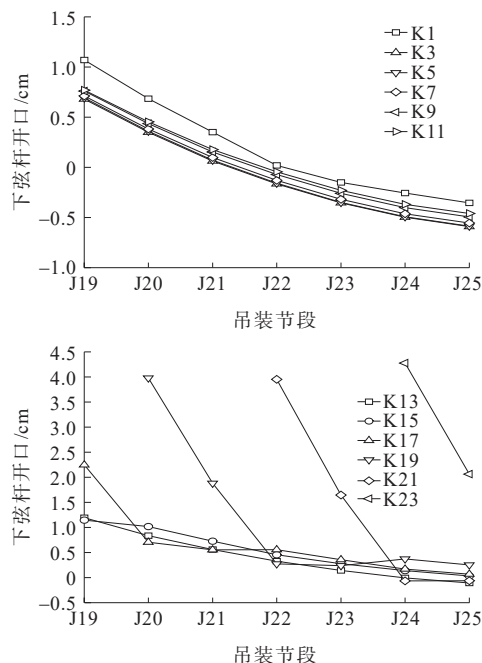


图9 下弦杆开口宽度变化图

Figure 9 Variation of lower chord opening width

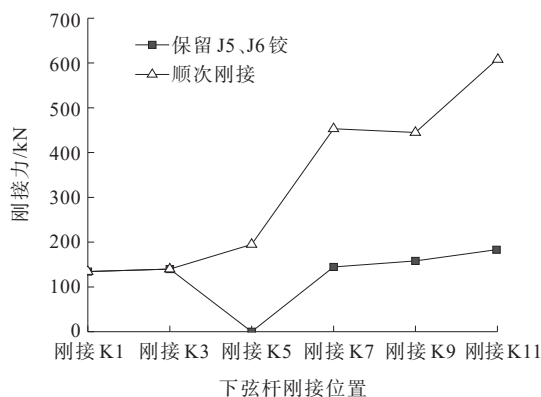


图10 下弦杆刚接力

Figure 10 Rigid connection force of lower chord

所需的外力会逐渐增加,在刚接K7时,刚接达到453.3 kN,通过小吨位手拉葫芦较难完成,通过保留J5、J6之间的临时铰,不对K5进行刚接,可大大降低刚接下弦杆K7、K9、K11所需的外界力。同时加劲梁节段吊装完后全部临时铰接一次转换为刚性连接,再从跨中依次释放一个临时铰。从图11可看出:保留J5、J6之间的临时铰可减少施工应力,最大值为31.4 MPa。在保证施工有序性的同时,采用同样的原理进行第2个临时铰的释放,以此类推,最终全桥保留6个临时铰,半侧分别为J5与J6铰、J15与J16铰及J25与J26铰,全桥共分为5大段。

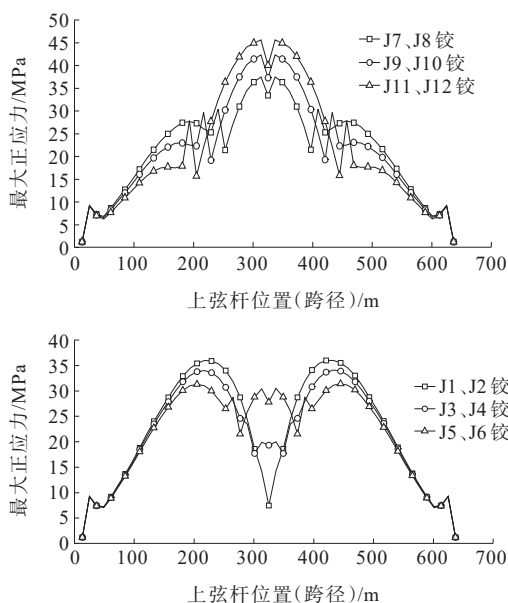


图 11 不同设铰位置上弦杆最大应力图

Figure 11 Maximum stress of upper chord at different hinge positions

4.3 大段刚接关键实施步骤

在加劲梁施工过程中以两两刚接法为基础进行节段间连接,在吊装后期提前进行节段的大段刚接,由小段刚性连接体系转换为大段刚性连接体系,采用节段吊装、刚铰转换、桥面系施工立体空间同步作业。本桥的具体刚铰体系转换时机的推荐工序如下:

(1) 全桥共设 26 对临时铰,采用缆索吊机进行钢桁梁的吊装,起重设备吊装能力和结构内力均满足要求。

(2) 在加劲梁节段吊装过程中有序进行 20 对临时铰的体系转换。

(3) 嵌补段桥面板吊装及桥面系附属结构吊装阶段完成 6 对临时铰体系转换。

(4) 在二期铺装前完成所有临时铰的体系转换。

采用对称吊装的方式,加劲梁半跨架设推荐顺序如表 3 所示。

在此过程中,只有主桁架参与受力,主桁竖向刚度主要取决于上、下弦杆的刚度,弦杆所受内力较大,在施工过程中起到控制性作用。选取距离吊索水平距离 1 m 处位置上下弦杆进行吊装施工过程中的应力分析,结果如图 12 所示。

从图 12 可看出:钢桁梁施工过程中,上弦杆最大拉应力为 78.4 MPa,最大压应力为 55.7 MPa,出现在跨中位置附近。由于梁段间下弦杆在吊装前期未做

任何连接,下弦杆应力整体水平较低,图中应力出现锯齿状是因为采用两两刚接法为基础连接方式,刚接段内杆件应力大于设铰处杆件应力,弦杆受力均在安全范围以内并具有充足的应力储备。

表 3 架梁顺序推荐表

Table 3 Recommendation of beam erection sequence

工序	操作内容	工序	操作内容
1~2	吊装 J0、J1	27	刚接 K16
3	刚接 K0	28~29	吊装 J18、J19
4~5	吊装 J2、J3	30	刚接 K18
6	刚接 K2	31~32	吊装 J20、J21
7~8	吊装 J4、J5	33	刚接 K20
9	刚接 K4	34~35	吊装 J22、J23
10~11	吊装 J6、J7	36~40	刚接 K22、K1、K3、K7、K9
12	刚接 K6	41	吊装 J24
13~14	吊装 J8、J9	42~43	K11、K13
15	刚接 K8	44~45	吊装 J26、J27
16~17	吊装 J10、J11	46~50	刚接 K26、K17、K19、K21、K23
18	刚接 K10		
19~20	吊装 J12、J13	51	吊装 J25 合龙
21	刚接 K12	52	刚接 K24
22~23	吊装 J14、J15	53	吊装桥面设施
24	刚接 K14	54	刚接 K5、K15、K25
25~26	吊装 J16、J17	55	二期恒载成桥

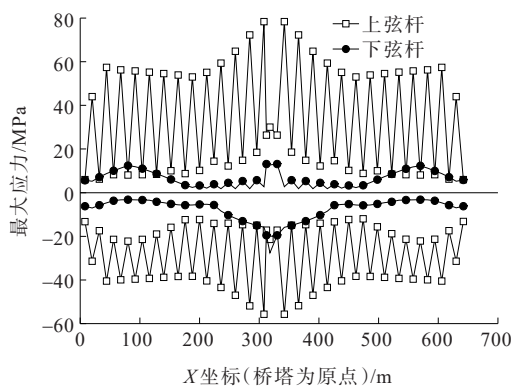


图 12 弦杆应力包络图

Figure 12 Stress envelope diagram of chord

5 工程验证

为验证本文分析结果,在实桥钢桁梁 1/8、1/4、1/2、3/4、7/8 跨 5 个断面布置应力传感器,用于施工过程中应力-应变的监测,传感器主要布置在弦杆及腹杆处。实测数据显示:在吊装过程中,跨中上弦杆最大压应力 52.7 MPa,最大拉应力 61.3 MPa,出现在吊装

至J9、J9'节段时跨中上弦杆处,小于理论值78.4 MPa,在整个架梁施工监控过程中,测试断面的实测值均小于理论值。

在全桥刚铰体系工作全部完成以后,对桥面线形进行复测,考虑温度及实际塔偏的影响,对有限元分析模型进行修正,与实测线形对比如图13所示。

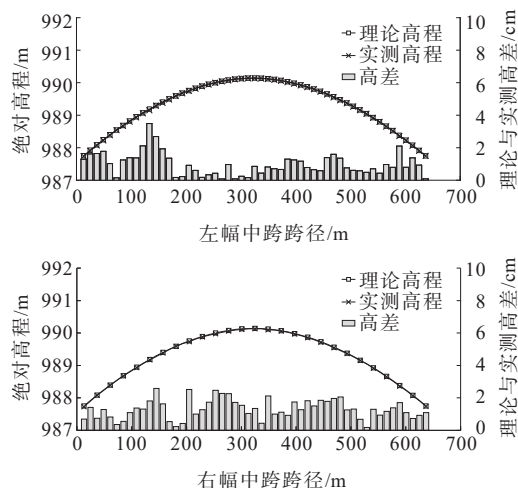


图13 线形对比与差值图

Figure 13 Alignment comparison and difference

由图13可知:最大差值为3.48 cm,实测线形与理论线形吻合较好。同时下弦杆开口变化规律与理论相近,在实际体系转换施工过程中,均未出现不可控情况。全桥在不进行二恒等效压重的条件下完成所有临时铰的体系转换工作,减少了压重措施费用,并将施工工期提前了近一个月。

6 结论

在大跨径悬索桥钢桁梁施工过程中,钢桁架单元的内力和线形与节段间的连接方式有很大关联,合理的施工方案是保证施工过程中结构构件不出现较大内力与变形的关键。依托实际工程,对不同连接方式进行对比分析,得出以下结论:

(1) 分析比较逐段铰接法、两两刚接法、三三刚接法3种连接方式对加劲梁构件应力、吊索力及施工工期的影响,发现两两刚接法具有较好的适用性。

(2) 根据钢桁梁段线形及下弦杆开口量变化规律,在加劲梁吊装后期,提前进行部分节段的刚铰体系转换,同时保留少数铰用于释放施工应力及线形调整,施工过程弦杆应力均在可控范围以内,成桥线形满足规范要求。工程实测数据验证了本文分析方

法可行,具有较好的安全性、适用性及经济性,可为同类桥梁施工提供参考。

参考文献:

References:

- [1] 邓明超.山区峡谷悬索桥主梁安设工艺[J].中国公路,2019(3):114-115.
DENG Mingchao. Installation technology of main girder of suspension bridge in mountainous canyon[J]. China Highway,2019(3):114-115.
- [2] 陈明宪,潘权,龙跃海,等.山区特大跨度悬索桥主梁架设新工艺整体模型试验研究[J].中外公路,2011,31(6):23-26.
CHEN Mingxian, PAN Quan, LONG Yuehai, et al. Overall model test study on new erection technology of main girder of super-long suspension bridge in mountainous area[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2011, 31(6): 23-26.
- [3] 纪为详,陶路.山区大跨度悬索桥钢桁梁施工技术[J].桥梁建设,2012,42(3):107-113.
JI Weixiang, TAO Lu. Construction techniques for steel truss girder of long span suspension bridge in mountainous region[J]. Bridge Construction, 2012, 42(3): 107-113.
- [4] 彭强,王奇锐.大跨径钢桁梁悬索桥加劲梁吊装过程的关键技术研究[J].公路,2020,65(12):1-5.
PENG Qiang, WANG Qirui. Research on key techniques in hoisting process of stiffening girder for the long-span suspension bridge with steel truss[J]. Highway, 2020, 65(12):1-5.
- [5] 廖文涛.大跨径悬索桥大节段钢桁梁整体架设施工控制关键技术研究[D].武汉:武汉大学,2020.
LIAO Wentao. Research on key technologies of construction control for integral erection of large-span steel truss girder of long-span suspension bridge[D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2020.
- [6] 栗金营,陈淮,李杰.哪吒大桥钢桁加劲梁架设方案研究[J].施工技术,2011,40(9):35-38.
LI Jinying, CHEN Huai, LI Jie. Study on erection methods of steel stiffening truss girder for Nazha Bridge[J]. Construction Technology, 2011, 40(9): 35-38.
- [7] 吴胜东,冯兆祥,蒋波.特大跨径悬索桥上部结构施工关键技术研究[J].土木工程学报,2007,40(4):32-37.
WU Shengdong, FENG Zhaoxiang, JIANG Bo. Key

- technology in superstructure construction for suspension bridges[J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(4): 32-37.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 黄峰. 杨泗港长江大桥主桥全焊结构钢桁梁安装施工技术[J]. 世界桥梁, 2019, 47(2): 11-16.
HUANG Feng. Installation techniques for fully-welded steel truss girder of main bridge of Yangsigang Changjiang River Bridge[J]. World Bridges, 2019, 47(2): 11-16.
- [11] 李林. 大跨度钢桁梁悬索桥施工控制关键技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
LI Lin. Research on key technology of construction control of long-span steel truss suspension bridge[D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [12] 王碧波, 易伦雄. 镇胜公路北盘江大桥钢桁梁架设方案研究[J]. 桥梁建设, 2009, 39(3): 48-50.
WANG Bibo, YI Lunxiong. Research of erection scheme for steel truss girder of Beipan River Bridge on Zhenning-Shengjingguan Expressway[J]. Bridge Construction, 2009, 39(3): 48-50.
- [13] 周杜, 刘武, 石柱. 悬索桥钢桁加劲梁架设施工关键技术研究[J]. 中外公路, 2019, 39(3): 129-134.
ZHOU Du, LIU Wu, SHI Zhu. Research on key technologies of steel truss stiffening girder erection of suspension bridge[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2019, 39(3): 129-134.
- [14] 徐欣, 刘琪, 彭元诚. 白洋长江公路大桥钢桁加劲梁设计[J]. 中外公路, 2020, 40(1): 152-154.
XU Xin, LIU Qi, PENG Yuancheng. Design of steel truss stiffening girders of baiyang Yangtze River Highway Bridge[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40(1): 152-154.
- [15] 代百华, 朱金柱. 三塔空间缆自锚式悬索桥体系转换研究[J]. 中外公路, 2021, 41(4): 204-209.
DAI Baihua, ZHU Jinzhu. Study on system transformation schemes for a self-anchored suspension bridge with three towers and spatial cables[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(4): 204-209.
- [16] 杨博, 郭瑞, 张伟. 山区大跨径悬索桥加劲梁安装方案比选[J]. 公路, 2022, 67(3): 118-123.
YANG Bo, GUO Rui, ZHANG Wei. Comparison and selection of installation schemes for stiffening beams of long-span suspension bridges in mountainous areas[J]. Highway, 2022, 67(3): 118-123.
- [17] 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.
- [18] 罗喜恒, 肖汝诚, 项海帆. 悬索桥施工过程精细化分析研究[J]. 土木工程学报, 2005, 38(10): 76-80.
LUO Xiheng, XIAO Rucheng, XIANG Haifan. Detailed analysis of construction process of suspension bridges[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(10): 76-80.
- [19] 郑玉国, 袁万城, 屈本宁. 基于综合非线性优化方法的倒张型悬索桥非线性优化设计[J]. 计算力学学报, 2008, 25(增刊 1): 58-62.
ZHENG Yuguo, YUAN Wancheng, QU Benning. Nonlinear optimal design of under-tension suspension bridge based on synthesized nonlinear optimization method[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2008, 25(sup 1): 58-62.