

文章编号: 1674-599X(2021)02-0091-07

大跨度组合梁斜拉桥成桥状态参数敏感性分析

张丰^{1,2}, 颜东煌¹, 陈常松¹

(1. 长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 湖南联智科技股份有限公司, 湖南 长沙 410219)

摘要: 为保证大跨度钢-混组合梁斜拉桥成桥后的主梁线形和结构各部位的受力均满足规范要求, 以赤壁长江公路大桥为研究对象, 考虑几何非线性因素建立有限元模型, 对桥梁施工全过程进行仿真模拟。研究了成桥状态的主梁线形、控制截面应力、斜拉索索力对钢主梁的重量和弹性模量、桥面板的重量和弹性模量、拉索的弹性模量及温度误差的敏感程度。研究表明: 钢主梁重量、桥面板重量、拉索弹性模量及温度误差对成桥状态结构行为的影响显著, 而钢主梁弹性模量和桥面板弹性模量误差的影响较小。研究结果可为其施工控制中的误差修正、关键控制量确定等提供依据, 也可为类似桥梁工程施工提供参考。

关键词: 斜拉桥; 钢-混组合梁; 敏感性分析; 施工控制

中图分类号: U448.27

文献标志码: A

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.02.014

Parameter sensitivity analysis of the long-span composite girder cable-stayed bridge in the finished bridge state

ZHANG Feng^{1,2}, YAN Dong-huang¹, CHEN Chang-song¹

(1. School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

2. Hunan Lianzhi Technology Co., Ltd., Changsha 410219, China)

Abstract: In order to ensure the stress of the main girder and structure of long-span steel-concrete composite girder cable-stayed bridge meet the specification requirement, the finite element model was established considering geometric nonlinear factors. The bridge construction process of the Chibi Yangtze River Highway Bridge was simulated. The sensitivity of the weight and elastic modulus of the main beam and bridge deck, elastic modulus of cable and temperature error to the main beam alignment, control section stress and cable force in finished bridge state was investigated. The results show that, the errors of steel main girder weight, bridge deck weight, cable elastic modulus, and temperature have significant effects on the structural behavior of the completed bridge. However, the steel main girder elastic modulus and bridge deck elastic modulus errors have little influence. The research results can provide scientific basis for error correction in construction control, calculating the key control variables, and also provide reference for the construction of the similar types of bridge projects.

Key words: cable-stayed bridge; steel-concrete composite girder; sensitivity analysis; construction control

斜拉桥属于高次超静定复杂时变体系, 一般采用悬臂浇筑法或悬臂拼装法进行施工, 施工过程的影响因素较多, 如: 构件自重和弹性模量等参数的误差、施工临时荷载、混凝土收缩徐变、预应力、

环境温度变化、施工误差及测量误差^[1]等都会影响斜拉桥的结构状态, 导致其实际状态与设计状态之间产生偏差。施工时, 应及时采取合理的纠偏措施, 避免误差进一步积累, 影响成桥结构的线形、应力

收稿日期: 2020-09-20

作者简介: 张丰(1995-), 男, 长沙理工大学硕士生。

及结构安全^[2]。

结构参数误差是斜拉桥施工控制中误差产生的重要来源之一,不同结构参数变化对同一个结构的影响程度也不一样^[3]。目前,已有学者对斜拉桥施工控制中参数误差的影响进行了研究。黄灿^[4]等人基于几何控制法原理,针对特大跨径钢箱梁斜拉桥施工期间的结构力学行为对结构参数的敏感程度做了相关研究。李忠三^[5]等人分析了混合梁斜拉桥设计参数的敏感性,并在施工控制中对这些参数进行识别和修正,取得了良好控制效果。刘旭政^[6]等人研究了独塔混凝土斜拉桥施工控制中参数误差对成桥状态线形和内力的影响。施文彬^[7]等人研究了温度差异对板桁斜拉桥施工过程中控制线形的影响。但这些研究主要集中在钢箱梁和混凝土梁,对组合梁的结构参数误差研究较少,与传统混凝土和钢箱梁斜拉桥相比,影响大跨度钢-混组合梁斜拉桥施工的结构参数更多。作者以赤壁长江公路大桥的施工监控为例,拟对其结构参数进行敏感性分析,研究各参数误差对桥梁结构力学的影响程

度,并确定主要敏感性参数,以期为类似桥梁施工监控提供借鉴。

1 工程概况

赤壁长江公路大桥^[8]是国道 G351 台州至小金跨越长江大桥,其主桥(90 m+240 m+720 m+240 m+90 m)为双塔双索钢-混全组合梁斜拉桥,如图 1 所示。其中,洪湖侧边跨 240 m 跨过北岸长江大堤,赤壁侧边跨 240 m 作为副通航孔,主跨 720 m 为目前世界上跨度最大的钢-混组合梁斜拉桥。采用纵向半漂浮体系,钢主梁横断面采用箱形。全桥宽为 36.5 m,桥面板为存放龄期不少于 180 d 的 C60 钢筋混凝土桥面板,标准段板厚 26 cm,边跨压重段板厚 59 cm。主桥共 116 对高强平行钢丝斜拉索,最大长度达到 387.18 m。主梁上拉索间距有 12 m 和 8 m 2 种形式,按照双索面扇形布置。主塔采用 H 形塔。

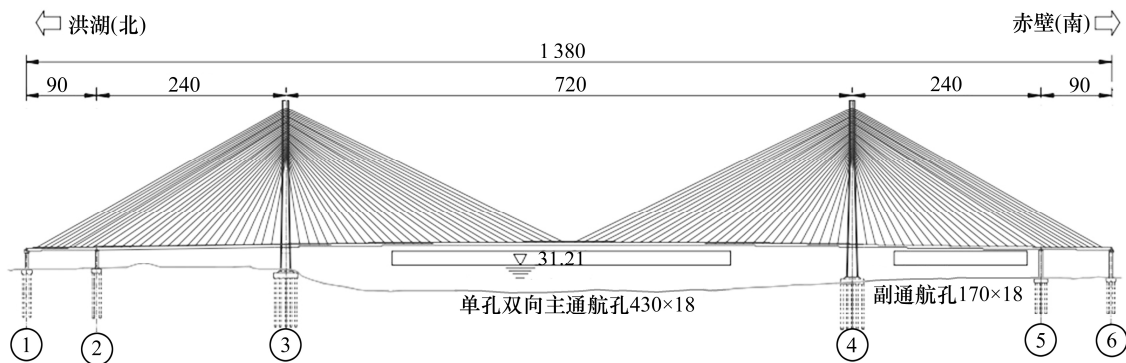


图 1 主桥桥型立面布置(单位: m)

Fig. 1 The vertical layout of main bridge type (unit: m)

2 结构计算模型

采用平面有限元程序 BDCMS(桥梁设计与施工控制分析程序)建立结构模型,考虑材料的几何非线性影响,全桥共划分为 843 个节点,1 682 个单元。其中,斜拉索单元采用两端带刚臂的悬链线索单元模拟,主塔单元和主梁单元采用梁单元模拟,所有梁段的支架单元类型为一般桁架单元。

斜拉索分别选用 PESC7 系列的 139、151、187、211、223、241、253、283、301,共 9 种规格。为方便读取斜拉索索力,建模时,将相同梁段上的一

对斜拉索作为一个拉索单元,弹性模量为 1.95×10^5 MPa,线膨胀系数为 1.20×10^{-5} ,其他材料的参数见表 1。

3 敏感性分析

结合工程实际情况,本研究主要分析钢主梁自重和弹性模量、桥面板自重和弹性模量、斜拉索弹性模量及构件温度误差对成桥结构状态的影响,确定本桥的主要敏感性参数,具体表现:某一结构参数发生一定幅值变化,由此引起成桥状态时主梁线形、控制截面应力以及斜拉索索力的变化情况。本

表 1 材料参数

Table 1 Material parameter

结构部位	材料名	容重/(kN · m ⁻³)	弹性模量/MPa	线膨胀系数	抗压强度设计值/MPa	抗拉强度设计值/MPa
钢主梁	Q420	78.50	2.10×10 ⁵	1.20×10 ⁻⁵	335.0	335.00
钢横梁	Q345	78.50	2.10×10 ⁵	1.20×10 ⁻⁵	275.0	275.00
主塔	C50	26.25	3.45×10 ⁴	1.00×10 ⁻⁵	22.4	1.83
桥面板	C60	26.50	3.60×10 ⁴	1.00×10 ⁻⁵	26.5	1.96
桥墩	C40	26.00	3.25×10 ⁴	1.00×10 ⁻⁵	18.4	1.65

研究仅以钢主梁重量、桥面板重量及构件温度误差为例进行分析。

3.1 钢主梁重量

对大跨度组合梁斜拉桥而言, 钢主梁重量是施工控制的重要参数, 因为钢主梁重量变化直接改变了主梁恒载, 从而导致主梁挠度和应力发生相应变化。另外, 主梁恒载变化也将导致索力变化, 索力变化会影响索长和主梁线形^[9], 如图 2 所示。考虑到钢箱梁工厂制造误差和以往桥梁施工控制的经验, 本研究将钢主梁重量在设计值基础上变化±5%, 其他参数保持不变, 见表 2。

表 2 钢主梁重量变化下的主梁应力变化值

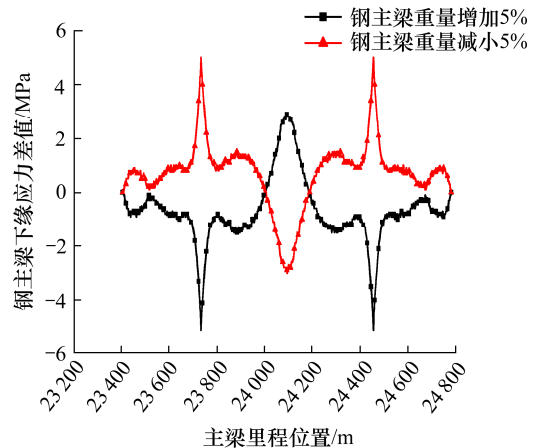
Table 2 The stress change value of the main beam under the weight change of the steel main beam

参数状态	钢主梁应力变化值/MPa		桥面板应力变化值/MPa	
	上缘	下缘	上缘	下缘
钢主梁重量增加 5%	-1.3~0.4	-5.1~2.9	-0.3~0.1	-0.2~0
钢主梁重量减少 5%	-0.4~1.3	-3.0~5.0	-0.1~0.2	0~0.2

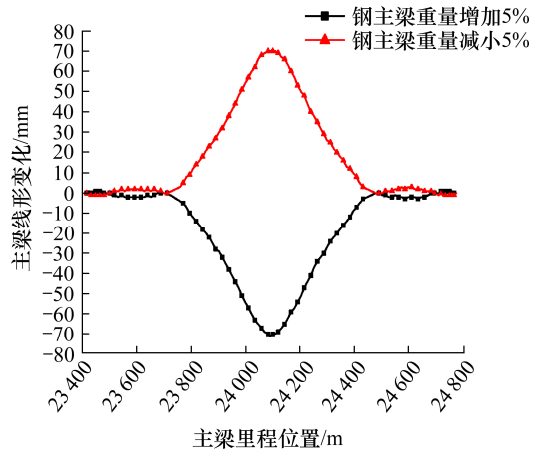
由表 2 和图 2 可知, 钢主梁重量变化±5%时, 主梁线形变化在-71~70 mm 之间(绝对差值=参数变化后终值-基准状态初值, 相对差值=绝对差值/基准状态初值×100%), 合龙段附近影响最明显。钢主梁下缘应力差值在-5.1~5.0 MPa, 塔区梁段影响最明显, 变化幅度为 4.6%。斜拉索索力差值变化在-96.1~96.1 kN 之间, 尾索索力变化较大且跨中合龙段附近的变化最明显, 变化幅度为 1.6%。

3.2 桥面板重量

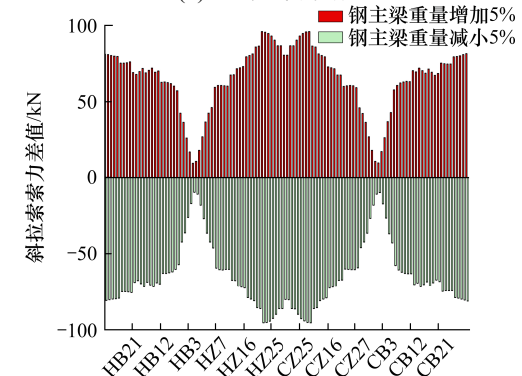
主梁是由钢主梁和混凝土板之间通过剪力钉连接形成的组合结构, 是钢-混组合梁斜拉桥最特殊之处。桥面板重量对主梁结构行为的影响主要表现在湿接缝浇筑完且强度未达到设计强度之前^[10]。此时, 桥面板没有参与结构受力, 仅作为外荷载施加在钢主梁上, 其对结构行为影响机理与钢主梁重量变化的影响相同。基于本桥梁混凝土桥面板现场



(a) 钢主梁下缘应力变化



(b) 主梁线形变化



(c) 成桥索力变化

图 2 钢主梁重量误差的影响

Fig. 2 The influence of the weight error of the steel main beam

实际称重结果可知,桥面板超重最大可达到 7%,超轻最大可达到 4%,普遍重量误差在±3%~4%,所以本研究在设计值的基础上取±5%作为分析桥面板重量误差对桥梁结构成桥状态的影响。

表 3 桥面板重量变化下的主梁应力变化值

Table 3 The change value of the main girder stress caused by the weight change of the bridge deck

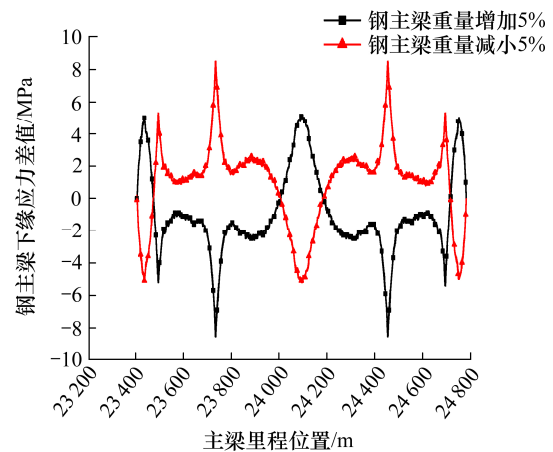
参数状态	钢主梁应力变化值/MPa		桥面板应力变化值/MPa	
	上缘	下缘	上缘	下缘
桥面板重量增加 5%	-2.2~0.8	-8.5~5.1	-0.4~0.2	-0.4~0
桥面板重量减少 5%	-0.7~2.1	-5.2~8.5	-0.2~0.4	0~0.4

由表 3 和图 3 可知,桥面板重量变化为±5%时,对主梁线形影响显著。主梁线形变化在-121~121 mm 之间,对跨中合龙段附近梁段线形影响较大。随着悬臂施工越长,主梁刚度逐渐减小。距离塔区越远,对线形的影响越大。但由于边跨梁段安装有 59 cm 厚的压重桥面板、压重箱及辅助墩支撑,在这三者共同作用下,边跨主梁位置不会发生很大变化;钢主梁下缘应力差值为-8.5~8.5 MPa,塔区梁段影响最明显,变化幅度为 7.6%;成桥拉索索力差值为-168.1~168.3 kN,合龙段附近拉索索力变化最明显,变化幅度为 2.7%。

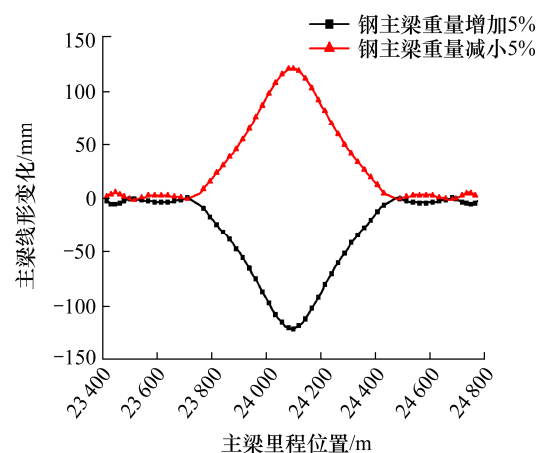
3.3 结构温度

温度变化对大跨度斜拉桥受力与变形影响是复杂的,特别是日照温差。对结构状态进行量测时,野外环境温度往往达不到设计要求,一定程度上影响结构实测数据的真实性,必然也不能保证施工控制的有效性^[11]。施工过程中,结构温度场的变化对桥梁状态变量产生的影响比结构参数误差的大^[12]。为了后续参数识别和预测工作的准确性,有必要对其进行参数敏感性分析,如图 4 所示。本桥所在位置属于华中地区亚热带气候区,经洪湖、赤壁气象站资料分析,项目区年平均气温 12~17 °C,极端最低气温-14.6 °C,极端最高气温 40.7 °C,月平均最低气温 2 °C 左右,月平均最高气温 33.3 °C。本研究在设计值 15 °C 的基础上,分别选取结构整体升温 10 °C、斜拉索升温 10 °C 以及主梁升温 10 °C 进行研究,见表 4。

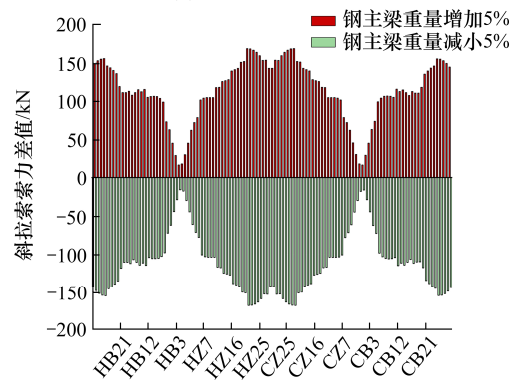
由表 4 和图 4 可知,结构各部位对温度变化的敏感程度存在较大差异,斜拉索升温 10 °C 对主梁线形影响最明显,最大值达到 158 mm。成桥索力



(a) 钢主梁下缘应力变化



(b) 主梁线形变化



(c) 成桥索力变化

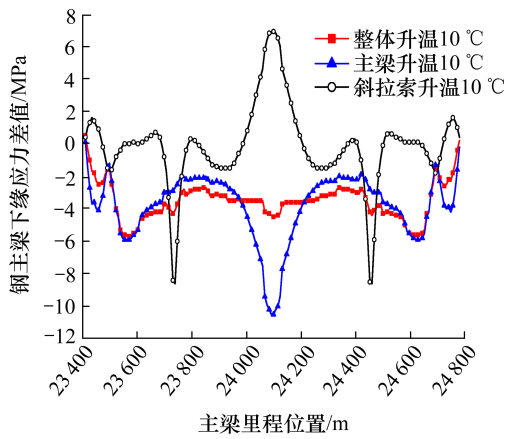
图 3 桥面板重量误差的影响

Fig. 3 The influence of the weight error of the bridge deck

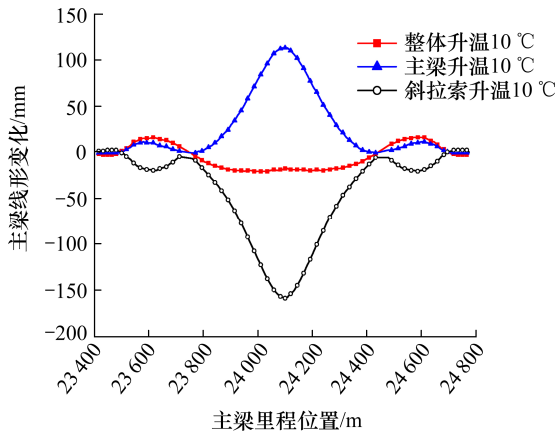
表 4 温度变化下主梁应力变化值

Table 4 Stress changes of the main beam caused by the temperature changes

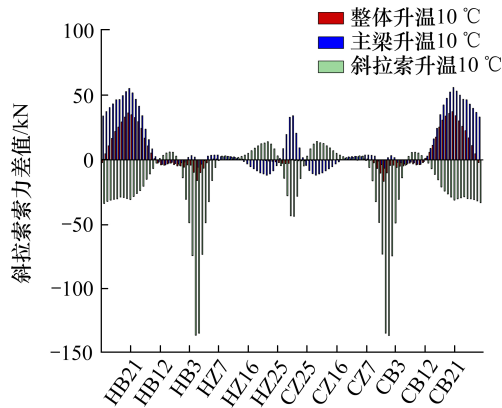
参数状态	钢主梁应力变化值/MPa		桥面板应力变化值/MPa	
	上缘	下缘	上缘	下缘
整体升温 10 °C	-4.9~-2.7	-5.7~-0.5	-0.2~0.4	0~0.4
主梁升温 10 °C	-5.1~-2.7	-10.5~-0.1	-0.2~0.3	0~0.3
斜拉索升温 10 °C	-0.8~3.0	-8.6~-6.9	-0.3~0.6	-0.1~0.5



(a) 钢主梁下缘应力变化



(b) 主梁线形变化



(c) 成桥索力变化

图 4 温度变化的影响

Fig. 4 The effect of temperature changes

也对拉索升温最敏感, 索力差值最大为 136 kN, 变化幅度为 3.6%。主梁和斜拉索温度变化对钢主梁下缘应力都有较大的影响, 应力差值最大为 10.5 MPa, 变化幅度为 12.3%。

3.4 敏感性分析结果

考虑施工全过程, 针对构件重量、弹性模量及温度等结构参数进行系统敏感性分析, 并对各结构

参数的影响程度进行排序, 具体结果见表 5~7。由表 5~7 可知, 钢主梁和桥面板自重、拉索弹性模量以及温度误差对成桥状态结构行为影响显著。

表 5 成桥状态线形敏感性分析

Table 5 Linear sensitivity analysis of finished bridge state		
序号	影响参数	线形变化最大值/mm
1	斜拉索温度+10℃	158
2	桥面板重量±5%	121
3	斜拉索弹模±3%	97
4	钢主梁重量±5%	71
5	钢主梁弹模±5%	16
6	桥面板弹模±5%	11

表 6 成桥状态钢梁下缘应力敏感性分析

Table 6 Stress sensitivity analysis of the lower edge of the steel beam in finished bridge state		
序号	影响参数	应力变化最大值/MPa
1	主梁温度+10℃	10.5
2	桥面板重量±5%	8.5
3	斜拉索弹模±3%	6.9
4	钢主梁重量±5%	5.1
5	钢主梁弹模±5%	3.7
6	桥面板弹模±5%	3.2

表 7 成桥状态索力敏感性分析

Table 7 Analysis of cable force sensitivity for the finished bridge state		
序号	影响参数	索力变化最大值/kN
1	桥面板重量±5%	168.3
2	斜拉索温度+10℃	136.0
3	斜拉索弹模±3%	97.4
4	钢主梁重量±5%	96.1
5	桥面板弹模±5%	11.9
6	钢主梁弹模±5%	4.7

3.5 施工过程中实测值与理论值的对比分析

通过参数敏感性分析, 找出本桥的主要敏感性参数, 将混凝土桥面板实际重量、施工临时荷载(安全施工平台、现浇带模板支架等)等代入有限元模型进行优化, 控制了结构实际状态与理论计算状态之间的偏差。考虑本桥为南北对称结构, 本研究仅选取洪湖侧主梁施工到 6#梁段时控制点高程及对应拉索索力进行对比分析, 结果见表 8、9。

由表 8、9 可知, 赤壁长江公路大桥悬臂施工阶段的主梁线形平顺, 上、下游高程控制点实测数据的平均值与理论值的误差符合设计要求, 斜拉索

表8 施工过程中主梁控制点高程

Table 8 Elevation of main beam control points during

梁段编号	实测值/mm		平均值/ mm	理论值/ mm	差值/ mm
	construction				
	上游	下游			
6 [#] (ZL25H)	56 713	56 710	56 712	56 769	-57
5 [#] (ZL26H)	56 881	56 886	56 884	56 921	-37
4 [#] (ZL27H)	57 085	57 077	57 081	57 096	-15
3 [#] (ZL28H)	57 234	57 247	57 241	57 250	-9
2 [#] (ZL29H)	57 422	57 405	57 414	57 398	16
1 [#] (ZL30H)	58 085	58 084	58 085	58 078	7
1 [#] (ZL32H)	57 739	57 739	57 739	57 733	6
2 [#] (ZL33H)	58 398	58 419	58 409	58 407	2
3 [#] (ZL34H)	—	58 563	58 563	58 587	-24
4 [#] (ZL35H)	58 707	58 709	58 708	58 760	-52
5 [#] (ZL36H)	58 848	58 855	58 852	58 903	-52
6 [#] (ZL37H)	59 020	59 023	59 022	59 066	-44

注：“—”表示此标高控制点被破坏

表9 施工过程中斜拉索索力

Table 9 Stay cable force during construction

拉索 编号	实测值/kN		平均值/ kN	理论值/ kN	差值/ kN	百分差 值/%
	上游	下游				
HB ₆	2 894	2 986	2 940	2 821	119	4
HB ₅	3 045	3 002	3 024	2 932	92	3
HB ₄	2 834	2 823	2 829	2 871	-42	-1
HB ₃	2 712	2 790	2 751	2 733	18	1
HB ₂	3 034	3 092	3 063	3 058	5	0
HB ₁	3 219	3 285	3 252	3 266	14	0
HZ ₁	3 399	3 352	3 376	3 356	20	1
HZ ₂	3 131	3 022	3 076	3 097	21	1
HZ ₃	2 880	2 870	2 875	2 845	30	1
HZ ₄	2 734	2 756	2 745	2 709	36	1
HZ ₅	2 977	2 965	2 971	2 867	104	4
HZ ₆	2 886	2 812	2 849	2 802	47	2

索力状态良好，满足《公路斜拉桥设计规范(JTC3365-01-2020)》允许索力施工误差±5%要求。

4 结论

通过研究各结构参数变化对成桥状态结构行为影响及主要敏感性参数确定，得到结论：

1) 斜拉桥施工过程中，温度场变化非常复杂，而温度变化对成桥状态结构行为影响显著。因此，施工中，应该将重要控制工序安排在一天中温度较稳定的时间段进行，同时也应该在温度变化较小的

时间段进行实测数据采集，最大程度保证实测数据的真实性。

2) 钢主梁重量、桥面板重量及拉索弹模误差对本桥成桥状态结构行为的影响较大，属于敏感性参数。施工中，应该重点关注各参数变化的影响，并且在桥梁模型优化时对其进行修正；钢主梁弹性模量和桥面板弹性模量误差对成桥状态结构行为影响较小。施工控制中，进行模型修正时，可以忽略。

3) 该方法运用到赤壁长江公路大桥的施工控制中取得了良好效果，也为同类型斜拉桥施工提供了借鉴和参考。

参考文献(References):

- [1] 颜东煌,文钰,刘光栋,等.斜拉桥的施工最优控制[J].国外公路,1999,19(3):53-58.(YAN Dong-huang,WEN Yu,LIU Guang-dong,et al. Optimal construction control of cable-stayed bridge[J].Journal of Foreign Highway,1999,19(3):53-58.(in Chinese))
- [2] 向中富.桥梁工程控制[M].北京:人民交通出版社,2011.(XIANG Zhong-fu.Bridge engineering control[M].Beijing:China Communications Press,2011.(in Chinese))
- [3] 秦顺全.桥梁施工控制-无应力状态法理论与实践[M].北京:人民交通出版社,2007.(QIN Shun-quan.The theory and practice of the unstressed state method of bridge construction control[M].Beijing:China Communications Press,2007,(in Chinese))
- [4] 黄灿,赵雷,卜一之.特大跨度斜拉桥几何控制法单参数敏感性分析[J].公路交通科技,2012,29(5):70-75.(HUANG Can, ZHAO Lei, BU Yi-zhi. Sensitivity analysis of single-parameters for super-span cable-stayed bridge based on geometry control method[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2012,29(5):70-75.(in Chinese))
- [5] 李忠三,雷俊卿,颜东煌.大跨度混合梁斜拉桥参数敏感性分析[J].北京交通大学学报,2012,36(1):6-11.(LI Zhong-san, LEI Jun-qing, YAN Dong-huang. Analysis of parameters' sensitiveness of long-span hybrid girder cable-stayed bridge[J]. Journal of Beijing Jiaotong University,2012,36(1):6-11.(in Chinese))
- [6] 刘旭政,黄平明,许汉铮.独塔斜拉桥参数敏感性分析[J].长安大学学报(自然科学版),2007,27(6):63-66.(LIU Xu-zheng, HUANG Ping-ming, XU Han-zheng. Analysis of parameters' sensitiveness of cable-stayed bridges with single tower[J]. Journal of Chang'an University (Natural

- Science Edition), 2007,27(6):63-66.(in Chinese))
- [7] 施文彬,颜东煌,许红胜,等.大跨度板桁结合斜拉桥施工阶段温差效应研究[J].交通科学与工程,2017,33(2):37-42.(SHI Wen-bin, YAN Dong-huang, XU Hong-sheng, et al. Study on temperature difference effect of long-span plate-truss combined cable-stayed bridge during construction[J].Journal of Transport Science and Engineering,2017,33(2):37-42.(in Chinese))
- [8] 张德平,周健鸿,王东晖.赤壁长江公路大桥主桥主梁设计[J].桥梁建设,2019,49(4):81-85.(ZHANG De-ping, ZHOU Jian-hong,WANG Dong-hui.Design of main girder of Chibi Changjiang river highway bridge[J]. Bridge Construction,2019,49(4):81-85.(in Chinese))
- [9] 赵雷,孙才志,陈文元.大跨度组合梁斜拉桥的参数敏感性分析[J].世界桥梁,2011,39(6):38-41.(ZHAO Lei,SUN Cai-zhi,CHEN Wen-yuan.Analysis of parameter sensitivity of long span composite girder cable-stayed bridge[J].World Bridges,2011,39(6):38-41.(in Chinese))
- [10] 黄侨.桥梁钢-混凝土组合结构设计原理[M].北京:人民交通出版社, 2004. (HUANG Qiao. Design principle of bridge steel-concrete composite structure[M]. Beijing: China Communications Press, 2004.(in Chinese))
- [11] 颜东煌.斜拉桥合理设计状态确定与施工控制[D].长沙:湖南大学,2001.(YAN Dong-huang. Determining of reasonable design states and construction controlling of cable-stayed bridges[D]. Changsha: Hunan University, 2001. (in Chinese))
- [12] 颜东煌,陈常松,涂光亚.混凝土斜拉桥施工控制温度影响及其现场修正[J].中国公路学报,2006,19(4):71-76.(YAN Dong-huang, CHEN Chang-song, TU Guang-ya. Temperature influence and its field correction during construction control of concrete cable-stayed bridge[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(4): 71-76.(in Chinese))

(上接第 7 页)

- [11] 张宜洛,陈阳阳,李晨,等.干法掺入煤液化残渣沥青稳定碎石基层材料性能[J].重庆交通大学学报:自然科学版,2018,37(11):47-51.(ZHANG Yi-luo,CHEN Yang-yang, LI Chen, et al. Performance of coal liquefied residue asphalt stabilized gravel base materials with dry mixing method[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science,2018,37(11):47-51.(in Chinese))
- [12] 袁玲,魏汝明,黄兴,等.ATB-25 混合料级配优化设计与路用性能研究[J].公路,2014,59(3):133-139.(YUAN Ling, WEI Ru-ming, HUANG Xing, et al. Optimization design and road performance research on gradation of ATB-25 mixture[J]. Highway, 2014, 59(3): 133-139. (in Chinese))
- [13] 张凌云,金成,贾小龙,等.基于 AC-13 沥青混凝土的贝雷法级配设计研究[J].公路,2018,63(11):105-109. (ZHANG Ling-yun, JIN Cheng, JIA Xiao-long, et al. Study on Bailey method gradation design of AC-13 asphalt concrete[J]. Highway, 2018, 63(11): 105-109.(in Chinese))
- [14] 中华人民共和国交通部. JTG F 40—2004,公路沥青路面施工技术规范[S].北京:人民交通出版社,2004. (Ministry of Transport of the People's Republic of China. JTG F 40—2004,Technical specification for construction of highway asphalt pavements[S]. Beijing: China Communications Press,2004.(in Chinese))
- [15] 韩先瑞,张宝虎,余天航,等.铁尾矿沥青混合料水稳定性试验研究[J].交通科学与工程,2019,35(2):6-10.(HAN Xian-rui, ZHANG Bao-hu, YU Tian-hang, et al. Experimental study on the moisture stability of the asphalt mixture with iron tailings[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2019, 35(2): 6-10.(in Chinese))