

索夹对自锚悬索桥成桥状态影响分析

孙永明, 张连振, 李忠龙

(哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090)

摘要: 基于有限单元法(FEM^C)比较分析了索夹对自锚悬索桥成桥状态的影响。索夹能够提高中跨主缆的成桥线形,在维持索长不变的情况下,各吊杆的成桥索力会有所增大,若使各吊杆均达到设计成桥索力值,则需增大各吊杆的无应力长度值。基于计入索夹影响的 FEM^C 模型分别讨论了索夹长度、截面面积和惯性矩等参数对结构成桥状态的影响,并且建立了根据索夹长度比和面积比计算得到的主缆中跨跨中控制点成桥高程提升量和吊杆索力平均增量值的简化计算公式。经工程实例验证,提出的索夹模型计算结果与结构实际变形接近。

关键词: 桥梁工程; 自锚式悬索桥; 索夹; 成桥状态

中图分类号: U448.25; U443.38

文献标志码: A

Impact Analysis of Cable Clamp on Completed State of Self-anchored Suspension Bridge

SUN Yongming, ZHANG Lianzhen, LI Zhonglong

(School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: The impacts of cable clamps on the completed state of a self-anchored suspension bridge were analyzed based on the finite element method (FEM^C). The cable clamp could raise the shape of main cable in a middle span. If the unstressed length of each boom was kept unchanged, the pulling force of each boom would increase. In the same way, if each boom was made to reach the designed force on the completed stage of a bridge, the unstressed length of each boom should be increased. Based on FEM^C, the impacts of parameters, e.g. length, cross-sectional area and moment of inertia on the completed state of a bridge, were studied respectively. Furthermore, the simplified formulas were established, which could calculate the elevation increment of mid-position of main cable in the middle span and the average increment of each boom force by the length ratio and area ratio of cable clamp. It is verified that results from FEM^C are

in good agreement with the measured data.

Key words: bridge engineering; self-anchored suspension bridge; cable clamp; completed state of a bridge

目前,已有关于建立自锚悬索桥整体有限元模型的理论和方法,尤其在分析吊杆成桥索力、主缆成桥线形及在计算吊杆和主缆的无应力长度等结构参数时,均是对吊杆和主缆的连接方式进行了简化处理,直接将主缆和吊杆在其两者中心线交点处相连,而不考虑索夹的影响^[1-5]。

如图1所示,实际工程中的吊杆和主缆是通过索夹相连。吊杆的集中拉力在经过索夹耳板传递后,变为作用在整个索夹长度范围内的分散力。拧紧后的索夹具备一定的刚度,且由于主缆共同变形受力,使得主缆在索夹紧箍范围内的局部刚度得到了加强。这些导致吊杆和主缆直接在其两者中心线交点处相连的简化分析模型的计算值偏离实际结构的真实变形值。目前,已有的关于索夹的文献^[6-7]大多是对索夹自身强度和抗滑性能的研究,而对索夹调整

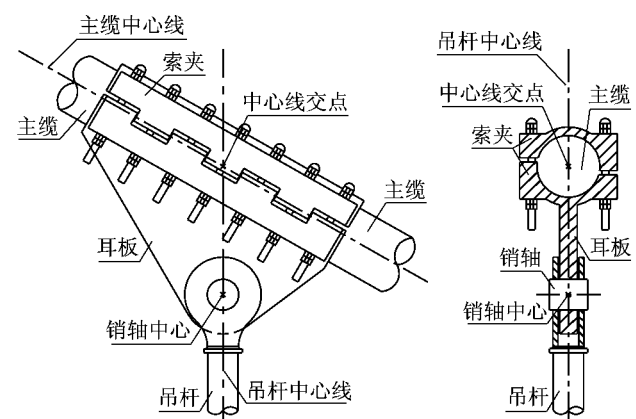


图1 通过索夹连接的主缆和吊杆
Fig.1 Main-cable and boom connected by cable clamp

收稿日期: 2015-01-04

基金项目: 国家自然科学基金(51308156); 中国博士后科学基金(2012M510969); 中央高校基本科研业务费专项资金(HIT, NSRIF, 2014077)

第一作者: 孙永明(1981—),男,工学博士,主要研究方向为混凝土结构安全评定、结构有限元分析原理和桥梁施工控制理论。

E-mail: sunym@hit.edu.cn

吊杆与主缆的传力方式,增强主缆局部刚度,进而影响主缆结构状态的研究文献甚少.鉴于此,本文展开了关于索夹对自锚悬索桥成桥状态影响的深入研究.

1 结构参数和索夹模型

如图2所示,吉林市雾凇自锚悬索桥采用预应力钢筋混凝土主梁,其跨径布置为35 m+68 m+150 m+68 m+35 m=356 m;该桥为钢筋混凝土门字形主塔,桥面以上建筑高度为31 m;2根主缆分布在主梁两侧,每根主缆均由37根索股组成,每根索股由127根 $\phi 5.1$ mm高强钢丝组成,其在成桥状态下的矢跨比为1/5;主索鞍半径为3.5 m;全桥共49对吊杆,吊杆在梁上的间距为5 m.

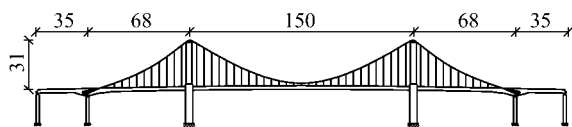


图2 五跨自锚悬索桥立面图(单位:m)

Fig.2 Five-span self-anchored suspension bridge (unit:m)

基于悬索桥分析程序PNAS^[8]建立雾凇大桥平面有限元模型FEM^R和FEM^C.常规模型FEM^R不考虑索夹的影响,其吊杆和主缆直接在两者中心线交点处相连;而细化分析模型FEM^C则考虑索夹的影响,采用独立的234模型对索夹进行模拟.

如图3所示,采用2个梁单元模拟索夹主体,考虑索夹的抗弯刚度和抗拉刚度;采用3个杆单元模拟耳板,将吊杆的集中拉力分散到整个索夹上.其中,4号节点表示吊杆上端销轴中心,2号节点表示主缆与吊杆中心线交点,而1号和3号节点分别为索夹上下口与主缆中心线交点.索夹4号节点直接与吊杆相连,索夹1~3号节点均与主缆采取主从约束的方式相连,主缆为主,索夹为从.

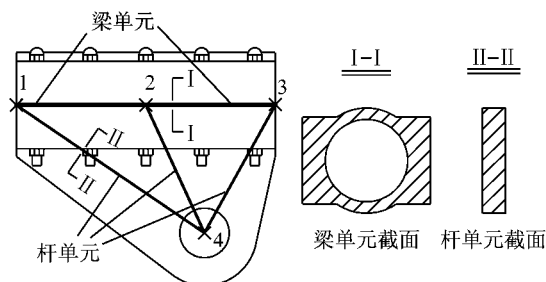


图3 索夹有限元模型

Fig.3 Finite element model of cable clamp

2 索夹对成桥状态影响分析

2.1 考虑索夹影响的成桥状态计算

已知主缆设计成桥线形 $C_C^{(D)}$ 和吊杆设计成桥索力 $F_C^{(D)}$.首先,基于FEM^R模型对结构进行反复正装分析^[9],获得主缆无应力长度 $S_0^{(R)}$ 和吊杆无应力长度 $L_0^{(R)}$.然后,将 $S_0^{(R)}$ 和 $L_0^{(R)}$ 代入FEM^C模型内,分析主缆和吊杆在索夹影响下的成桥线形 $C_C^{(C)}$ 和成桥索力 $F_C^{(C)}$.

在具有相同结构参数 $S_0^{(R)}$ 和 $L_0^{(R)}$ 的条件下,基于模型FEM^R获得的主缆成桥线形和吊杆成桥索力均能够达到设计成桥值,即 $C_C^{(R)}=C_C^{(D)}$ 和 $F_C^{(R)}=F_C^{(D)}$.但是,基于模型FEM^C获得的主缆成桥线形和吊杆成桥索力均会偏离设计成桥值,即 $C_C^{(C)}\neq C_C^{(D)}$ 和 $F_C^{(C)}\neq F_C^{(D)}$.如表1所示,计入索夹影响的主缆中跨跨中控制点成桥高程值 $C_C^{(C)}$ 比设计成桥值 $C_C^{(D)}$ 高48 mm.如图4所示,计入索夹影响的各吊杆成桥索力值 $F_C^{(C)}$ 均大于设计成桥索力值 $F_C^{(D)}=F_C^{(R)}=2100$ kN,位于主塔两侧的长吊杆索力偏差可达168 kN.

表1 索夹对主缆成桥线形影响

Tab.1 Impact of cable clamp on the completed shape of main cable

位置	$C_C^{(R)} (C_C^{(R)}=C_C^{(D)})$		$C_C^{(C)}$		$\Delta C_C^{(C)}=C_C^{(C)}-C_C^{(D)}$	
	X	Y	X	Y	ΔX	ΔY
边跨跨中(左)	77.979	220.149	77.986	220.146	0.007	-0.003
中跨跨中	178.000	209.196	178.000	209.244	0	0.048
边跨跨中(右)	278.021	220.150	278.013	220.146	-0.008	-0.004

注:X、Y表示坐标.

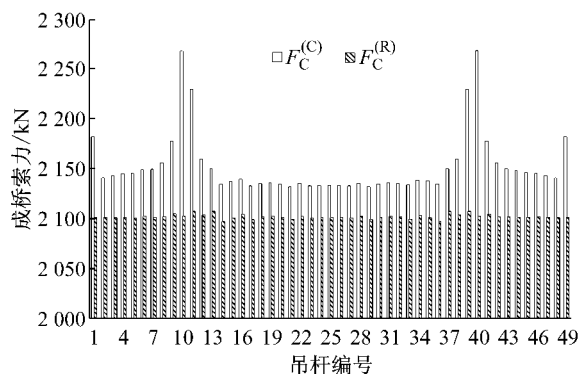


图4 考虑索夹影响的各吊杆成桥索力值

Fig.4 Completed force of boom considering the effect of cable clamp

继续在模型FEM^C中分析.将各吊杆索力 $F_C^{(C)}$ 调整为设计成桥索力 $F_C^{(D)}$,获得各吊杆在索夹影响

下的无应力长度值 $L_0^{(C)}$, 分析索夹对吊杆无应力长度的影响, $\Delta L_0^{(C)} = L_0^{(C)} - L_0^{(R)}$. 如图5所示, 计入索夹影响的各吊杆无应力长度值 $L_0^{(C)}$ 均大于未考虑索夹影响的无应力长度值 $L_0^{(R)}$, 其位于中跨跨中的短吊杆无应力长度偏差可达 41 mm.

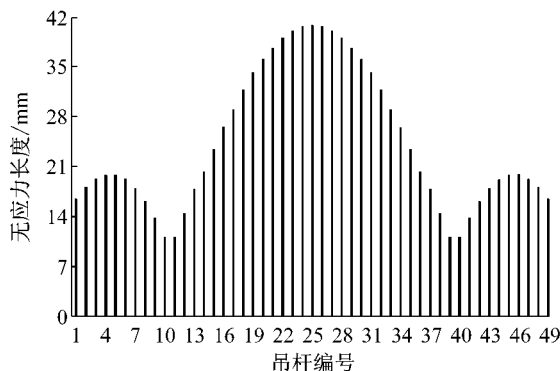


图5 索夹对吊杆无应力长度影响

Fig.5 Impact of cable clamp on the unstressed length of booms

上述分析结果表明, 索夹能够对自锚悬索桥的成桥状态构成影响, 其影响量在实际工程中不容忽视, 建议在自锚悬索桥分析模型中, 尤其在计算吊杆和主缆的无应力长度时, 应考虑索夹的影响.

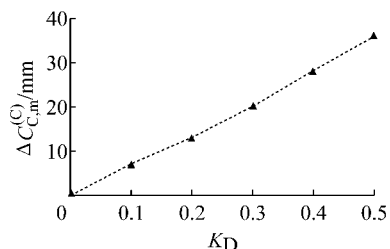
2.2 索夹参数影响分析

基于细化分析模型 FEM^C 分析索夹各参数对主缆成桥线形和吊杆成桥索力的影响, 以主缆中跨跨中控制点成桥高程值 $C_{C,m}^{(C)}$ 与 $C_{C,m}^{(D)}$ 的差值 $\Delta C_{C,m}^{(C)} = C_{C,m}^{(C)} - C_{C,m}^{(D)}$, 来表征索夹对主缆成桥线形的影响. 以各吊杆成桥索力值 $F_{C,i}^{(C)}$ 与 $F_{C,i}^{(D)}$ 的差值平均值 $\overline{\Delta F_C^{(C)}} = \sum_{i=1}^n (F_{C,i}^{(C)} - F_{C,i}^{(D)})/n$, 来表征索夹对吊杆成桥索力的影响.

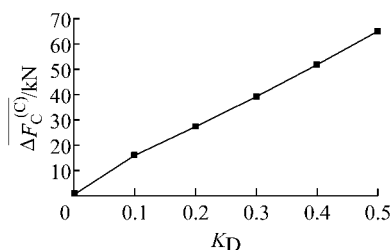
索夹主要包括 3 个计算参数: 抗拉面积 A_C 、抗弯惯性矩 I_C 和水平投影长度 D_C . 设吊杆标准间距 D_B , 主缆半径 R_S , 计算面积 $A_S = \pi R_S^2$, 计算惯性矩 $I_S = \pi R_S^4/4$, 则索夹的抗拉面积比 $K_A = A_C/A_S$ 、索夹的抗弯惯性矩比 $K_I = I_C/I_S$ 和索夹的长度比 $K_D = D_C/D_B$.

如图6所示, 在面积比 $K_A = 0$ 和惯性矩比 $K_I = 0$ 的情况下, 主缆成桥线形 $C_C^{(C)}$ 会随着索夹长度 D_C 的增加而有所提升, 中跨跨中控制点成桥高程的提升量 $\Delta C_{C,m}^{(C)} \approx 60K_D$. 吊杆成桥索力 $F_C^{(C)}$ 会随着索夹长度 D_C 的增加而有所增大, 各吊杆索力增量的平均值 $\overline{\Delta F_C^{(C)}} \approx 130K_D$. 索夹长度影响的实质是将本来集中在销轴中心点处的吊杆拉力, 分散作用在整个具有索夹紧箍区域的主缆上, 其效果类似于简支

梁在跨中承受竖向集中力和具有相同重力的竖向均布荷载, 而后者产生的挠度较小. 所以说, 索夹越长, 吊杆拉力分散范围越大, 主缆成桥线形和吊杆成桥索力所受到的影响就越显著.



a 主缆线形

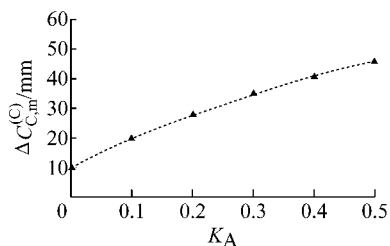


b 吊杆索力

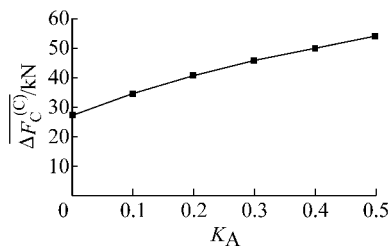
图6 索夹长度比对主缆线形和吊杆索力的影响

Fig.6 Impact of cable-clamp length ratio on main-cable shape and boom force

如图7所示, 在惯性矩比 $K_I = 0$ 和长度比 $K_D = 0.2$ 的情况下, 主缆成桥线形 $C_C^{(C)}$ 会随着索夹抗拉面积 A_C 的增加而有所提升, 中跨跨中控制点成桥高程的提升量 $\Delta C_{C,m}^{(C)} \approx 60K_A$; 吊杆成桥索力 $F_C^{(C)}$ 会随着索夹抗拉面积 A_C 的增加而增大, 各吊杆索力增量



a 主缆线形



b 吊杆索力

图7 索夹面积比对主缆线形和吊杆索力的影响

Fig.7 Impact of cross-section area ratio of cable clamp on main-cable shape and boom force

的平均值 $\overline{\Delta F_C^{(C)}} \approx 40 K_A$ 。索夹抗拉面积影响的实质是增大了具有索夹紧箍区域的主缆抗拉面积,进而改变了主缆成桥线形和吊杆成桥索力。但是,索夹紧箍主缆所产生的摩擦力主要是保证两者不会在吊杆力的作用下发生相对滑动,并不是确保两者在主缆拉伸的情况下仍能保持同步变形,所以在实际工程中,索夹的抗拉面积并不能全部计入主缆的有效抗拉面积。

如图8所示,在面积比 $K_A=0$ 和长度比 $K_D=0.2$ 的情况下,索夹抗弯惯性矩对主缆的成桥线形 $C_C^{(C)}$ 和吊杆的成桥索力 $F_C^{(C)}$ 均影响甚微。但是,由于吊杆拉力最终作用在主缆上的长度范围和分散力大小均受到索夹抗弯惯性矩的影响,所以从分散吊杆集中力的角度分析,索夹抗弯惯性矩对结构成桥状态起着不可忽视的影响。

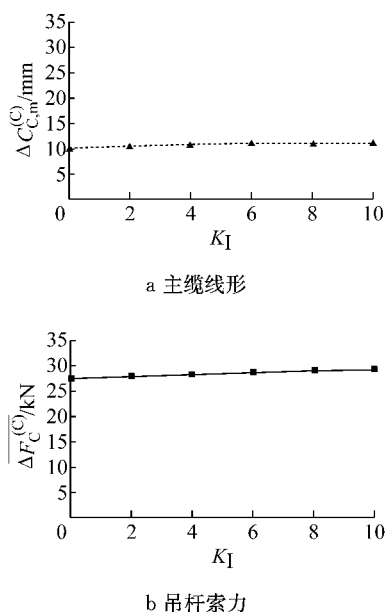


图8 索夹惯性矩比对主缆线形和吊杆索力的影响

Fig.8 Impact of cross-section moment ratio of inertia of cable clamp on main-cable shape and boom force

3 工程实例分析

3.1 计算参数和实测数据

吉林市雾凇大桥的桥跨布置和各结构参数如前文所述,全桥共49对索夹,分为5种型号(SJ1~SJ5),每种型号索夹具有相同的抗拉面积 $A_C=1\,211\text{ cm}^2$ 和抗弯惯性矩 $I_C=438\,594\text{ cm}^4$,以及不同的水平投影长度 $D_C=68\sim 156\text{ cm}$,各种索夹的具体水平投影长度和布置情况如表2所示。

表2 索夹水平投影长度和布置情况

Tab.2 Horizontal projected length and arrangement of cable clamps

项目	SJ1	SJ2	SJ3	SJ4	SJ5
D_C/cm	156	144	128	112	68
		4~6	1~3		
位置	7~13 37~43	14~15 35~36 44~46	16~17 33~34 47~49	18~20 30~32	21~29

注:索夹的布置位置为吊杆编号。

根据实测的主缆空缆线形 $C_0^{(M)}$ 和成桥线形 $C_C^{(M)}$ (见表3),以及各吊杆在成桥状态下的锚杯外露量和频率值(见表4)^[10-11],进而获得各吊杆无应力长度值 $L_0^{(M)}$ 和索力值 $F_C^{(M)}$ 。

表3 实测的主缆空缆线形

Tab.3 Measured unloaded shape of main cable m

项目	边跨跨中(左)		中跨跨中		边跨跨中(右)	
	X	Y	X	Y	X	Y
$C_0^{(M)}$	77.598	220.821	178.000	209.662	278.401	220.885
$C_C^{(M)}$	77.949	220.202	178.000	209.253	278.023	220.181

3.2 吉林市雾凇大桥成桥状态分析

将各索夹的实际参数值、主缆的实测空缆线形值 $C_0^{(M)}$ 和吊杆的实测成桥无应力长度值 $L_0^{(M)}$ 代入模型 FEM^R 和 FEM^C 内,分别计算结构在成桥状态的主缆线形值 $C_C^{(R)}$ 和 $C_C^{(C)}$ 、吊杆索力值 $F_C^{(R)}$ 和 $F_C^{(C)}$,并将其与主缆的实测成桥线形 $C_C^{(M)}$ 和吊杆的实测成桥索力 $F_C^{(M)}$ 进行比较,计算线形偏差 $\Delta C_C^{(R)} = C_C^{(R)} - C_C^{(M)}$ 和 $\Delta C_C^{(C)} = C_C^{(C)} - C_C^{(M)}$,计算索力偏差 $\Delta F_C^{(R)} = F_C^{(R)} - F_C^{(M)}$ 和 $\Delta F_C^{(C)} = F_C^{(C)} - F_C^{(M)}$ 。

如表5所示,基于模型 FEM^R 和 FEM^C 获得的主缆边跨成桥线形基本一致,且均与实测值比较接近。但不考虑索夹影响的主缆中跨跨中控制点成桥高程值与实测高程值相差较大,其计算值比实测值低0.077 m。计入索夹影响后的主缆中跨跨中控制点成桥高程值与实测值吻合较好,其计算值只比实测值高0.014 m。

如图9所示,基于模型 FEM^C 获得的未考虑索夹影响的吊杆成桥索力值 $F_C^{(R)}$ 总体上小于实测成桥索力值 $F_C^{(M)}$,最大索力偏差 $\Delta F_{C,\max}^{(M)} = -200\text{ kN}$;而基于模型 FEM^C 获得的计入索夹影响的吊杆成桥索力 $F_C^{(C)}$ 总体上更接近于吊杆实测成桥索力值 $F_C^{(M)}$,其最大索力偏差 $\Delta F_{C,\max}^{(C)} = -105\text{ kN}$ 。

工程实例分析结果表明,索夹能够使主缆中跨成桥线形提高0.077 m,各吊杆最大成桥索力偏差为-200 kN,该偏差值已超出工程容许范围,应予以调整;而基于模型 FEM^C 获得的主缆成桥线形和吊杆成桥索力计算值均与实测数据吻合得较好,说明

表 4 实测的各吊杆无应力长度值和索力值

Tab.4 Measured unstressed lengths and pulling forces of booms

吊杆 编号	$L_0^{(M)}/\text{m}$	$F_C^{(M)}/\text{kN}$	吊杆 编号	$L_0^{(M)}/\text{m}$	$F_C^{(M)}/\text{kN}$	吊杆 编号	$L_0^{(M)}/\text{m}$	$F_C^{(M)}/\text{kN}$	吊杆 编号	$L_0^{(M)}/\text{m}$	$F_C^{(M)}/\text{kN}$
1	3.541	2 143	14	19.456	2 182	27	3.660	2 122	40	29.379	2 176
2	5.385	2 101	15	16.612	2 190	28	4.327	2 166	41	25.457	2 087
3	7.478	2 082	16	14.054	2 125	29	5.266	2 172	42	21.782	2 069
4	9.822	2 132	17	11.753	2 174	30	6.486	2 067	43	18.387	2 070
5	12.413	2 095	18	9.723	2 105	31	7.966	2 194	44	15.241	2 212
6	15.267	2 079	19	7.963	2 174	32	9.727	2 126	45	12.371	2 089
7	18.391	2 186	20	6.481	2 186	33	11.762	2 105	46	9.760	2 177
8	21.779	2 169	21	5.273	2 117	34	14.062	2 203	47	7.416	2 293
9	25.455	2 115	22	4.329	2 176	35	16.642	2 093	48	5.331	2 058
10	29.377	2 209	23	3.657	2 101	36	19.487	2 098	49	3.499	2 179
11	29.619	2 178	24	3.244	2 162	37	22.593	2 090			
12	25.969	2 069	25	3.104	2 177	38	25.972	2 197			
13	22.571	2 201	26	3.251	2 067	39	29.620	2 176			

表 5 主缆成桥线形汇总

Tab.5 Summary of main-cable shape on the completed stage of bridge

项目	边跨跨中(左)		中跨跨中		边跨跨中(右)	
	X	Y	X	Y	X	Y
$C_C^{(R)}$	77.949	220.205	178.000	209.176	278.023	220.183
$C_C^{(C)}$	77.949	220.200	178.000	209.267	278.023	220.178
$\Delta C_C^{(R)}$	0	0.003	0	-0.077	0	0.002
$\Delta C_C^{(C)}$	0.001	-0.002	0	0.014	0	-0.003

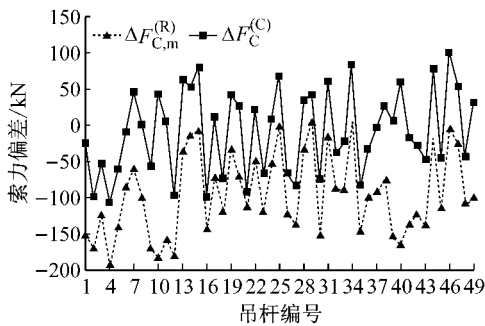


图 9 计算索力与实测索力偏差图

Fig.9 Deviation of boom force between calculated and measured values

本文提出的索夹模型合理,模拟方法正确,能够准确、有效地反映索夹对结构的影响。

4 结论

(1) 索夹能够对自锚悬索桥的成桥状态造成影响,使主缆的成桥线形有所提升.若维持各吊杆无应力长度不变,则吊杆的成桥索力普遍增大.若使各吊杆索力达到成桥索力值,则需加大各吊杆的无应力长度值。

(2) 主缆成桥线形和吊杆成桥索力主要受索夹

的抗拉面积和水平投影长度影响,受索夹抗弯刚度的直接影响甚微;主缆中跨跨中控制点成桥高程提升量 $\Delta C_C^{(C)} \approx 60K_A + 60K_D$,各吊杆成桥索力平均增量 $\Delta F_C^{(C)} \approx 40K_A + 130K_D$ 。

(3) 经工程实例验证,本文所提出的索夹模型合理,模拟方法正确,能够正确、有效地反映索夹对结构的影响,其计算结果与结构的实际变形值更为接近。

在进行自锚式悬索桥设计过程中,尤其在主缆和吊杆无应力长度计算时,应考虑索夹的影响.同时应注意索夹的抗拉面积并不能全部计入主缆的有效抗拉面积,在具体分析时应予以折减。

参考文献:

- [1] 孙永明,张连振,李忠龙.自锚式悬索桥主缆状态影响参数分析[J].计算力学学报,2014,31(6):742.
SUN Yongming, ZHANG Lianzhen, LI Zhonglong. Analysis of the parameters influencing the main-cable state of self-anchored suspension bridge [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2014, 31(6): 742.
- [2] 孙永明,张连振,李忠龙.自锚式悬索桥吊杆目标索力影响参数分析[J].桥梁建设,2015,45(4):69.
SUN Yongming, ZHANG Lianzhen, LI Zhonglong. Affecting-factor study on boom's target force of self-anchored suspension bridge[J]. Bridge Construction, 2015, 45(4):69.
- [3] 沈锐利.悬索桥主缆系统设计与架设算法研究[J].土木工程学报,1996,29(2):3.
SHEN Ruili. Calculation methods for design and erection of cable curve of suspension bridge [J]. China Civil Engineering Journal, 1996, 29(2): 3.
- [4] 陈常松,陈政清,颜东煌.悬索桥主桥初始线形的悬链线方程精细迭代分析法[J].工程力学,2006,23(8):62.

(下转第 166 页)