

高温下大跨悬索桥锚跨张拉力的合理控制

周伟¹, 李修坤², 罗明³

(1.湖北交投智能检测股份有限公司, 湖北 武汉 430050; 2.湖北交通投资集团, 湖北 武汉 430074; 3.四川公路桥梁建设集团有限公司, 四川 成都 610041)

摘要: 悬索桥索股架设在散索鞍自立之前, 温度变化导致的锚跨和边跨张拉力的变化幅度不一致, 易使索股在散索鞍的固定变得困难。文中以棋盘洲长江公路大桥为背景, 分析温度变化对锚跨和边跨张拉力的影响, 计算索股在散索鞍压力下产生的摩擦力及在温差下需要的最小摩擦力。结果表明, 在锚跨张拉时, 不仅需要超张拉以满足温度升高对锚跨力的损失, 还需通过增加张拉力验证防滑措施能否清除温度荷载的影响。

关键词: 桥梁; 悬索桥; 张拉力; 锚跨; 高温; 施工控制

中图分类号: U441

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2021)05-0100-03

主缆锚跨索股张拉力是以基准温度下以边跨和锚跨在散索鞍切点处的张力对摆轴中心的合力矩为零为条件进行计算。但在实际施工中, 由于环境温度的变化, 各跨的张力随着温度发生变化。由于边跨和锚跨的长度不一样, 温度对索股张拉的影响也不一样。在散索鞍自立之前, 若温差足够大, 将导致边跨和锚跨的索股张力的差值超过索股压力产生的摩擦力, 出现索股在散索鞍内滑动的现象, 对悬索桥线形调整不利。在悬索桥主缆索股架设时, 中、边跨

一般根据线形进行控制, 锚跨则按张拉力控制, 锚跨张力控制是悬索桥线形监控的重要组成部分。

1 工程概况

棋盘洲长江公路大桥位于湖北黄石市和黄冈市境内, 主桥采用双塔单跨钢箱梁悬索桥方案, 主跨为 1 038 m, 悬索桥桥跨布置为 (340+1 038+305) m, 锚碇 I.P. 点之间距离为 1 683 m, 矢跨比为 1/9, 总体布置见图 1。

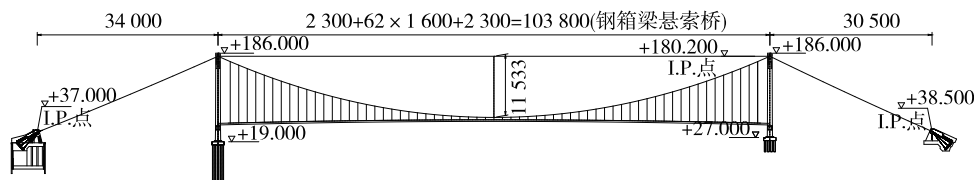


图 1 棋盘洲长江公路大桥主桥总体布置(单位: 标高为 m, 其他为 cm)

主缆架设时间为 8 月, 桥梁所在地 8 月的温度为 23~38 ℃, 分析中温度范围取 20~40 ℃。桥梁设计的基准温度为 20 ℃。

2 温度对锚跨和边跨索股张拉力的影响

在散索鞍自立之前, 架设索股在散索鞍内没有滑动, 可认为锚跨索股是两端固定的直杆。温度引起的锚跨索股张拉力见式(1)。计算得温度升高 1 ℃, 锚跨张拉力减小 6.657 kN。

$$\Delta T = EA \alpha_t \Delta t \quad (1)$$

式中: ΔT 为索股张拉力变化量; E 为索股的弹性模量, 取 198 000 N/mm²; A 为索股的截面面积, 取 2 801.85 mm²; α_t 为温度线膨胀系数, 取 0.000 012;

Δt 为温度变化量。

锚跨以两端固定的直杆模拟具有一定精度, 但对于跨度增加的边跨, 这种模拟易失真。索股在自重作用下产生垂度, 在温度变化下索长变化将引起索股垂度变化, 而不会像两端固结的弹性直杆那样直接产生温度力。垂度变化对索力的影响与初始垂跨比有关。索长变化与垂度的关系式为:

$$\Delta f = \frac{3l}{16f} \Delta S = \frac{3l}{16f} \alpha_t \Delta t S \quad (2)$$

式中: Δf 为垂度改变量; l 为跨度; f 为矢高; ΔS 为索长改变量; S 为索长, 可近似假定温度变化前后保持常数。

假设索的自重沿跨度均匀分布, 均布荷载为 q ,

根据索力水平分力 H 与跨度和垂度的关系,代入式(2),得:

$$\frac{\Delta H}{\Delta t} = -\frac{3ql^3}{128f^3}\alpha_t S \quad (3)$$

在悬索桥中,锚跨的 f/l 远小于边跨的 f/l 。

以棋盘洲长江公路大桥为例,南边跨 $\Delta T/\Delta t = 0.855 \text{ kN/}^\circ\text{C}$,北边跨 $\Delta T/\Delta t = 1.054 \text{ kN/}^\circ\text{C}$ (见表1),而锚跨为 $6.657 \text{ kN/}^\circ\text{C}$ 。可见,温度变化对锚跨张力和边跨张力的影响不一样,在散索鞍自立之前,温度荷载对锚跨的影响远大于边跨。

表 1 温度荷载作用下边跨张拉力的变化

边跨位置	线荷载 $q/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	跨度 l/m	矢高 f/m	膨胀系数 α_t	索长 S/m	温度变化 $\Delta t/^\circ\text{C}$	水平分力变化量 $\Delta H/\text{kN}$	角度/ $(^\circ)$	索股张力变化量 $\Delta T/\text{kN}$
南边跨	0.216	340	10.209	0.000 012	366.584 6	1	0.821	16.144 0	0.855
北边跨	0.216	305	8.322	0.000 012	334.047 8	1	0.998	18.911 2	1.054

在散索鞍自立之前,温度升高,锚跨和边跨的索股张力减小,锚跨减小幅度远大于边跨;温度降低,锚跨和边跨的索股张力增大,锚跨增大幅度远大于边跨。棋盘洲长江公路大桥主缆架设在温度较高的8月进行,如果以桥梁基准温度(20°C)控制锚跨张拉力,在温度升高一定程度后,可能由于锚跨索股张拉力过小而使索股由锚跨向边跨滑动;如果提前把锚跨的张拉力增加过大,在晚上温度较低时,可能使索股向锚跨滑动。因此,需确定锚跨张力的合理控制范围。

3 索股在鞍槽中的摩擦力

如果摩擦力足够大,锚跨索股张拉力采用温度修正的一次张拉到位的施工方法。但实际情况是摩擦力有限,不能采用一次张拉到位的方法张拉索股,张拉力大小需在极限温度下确保两侧的索力差小于摩擦力,以确保索股在鞍槽内不发生丝股滑动。

根据 JTG/T D65—05—2015《公路悬索桥设计规范》,鞍槽内主缆抗滑安全系数 k 应满足式(4)的

要求。图 2 为主缆抗滑验算图式。

$$k = \frac{\mu \alpha_s}{\ln(F_{ct}/F_{cl})} \geq 2 \quad (4)$$

式中: μ 为主缆与槽底或隔板间的摩擦系数, $\mu = 0.15$; α_s 为主缆在鞍槽上的包角(rad); F_{ct} 为主缆紧边拉力,按作用标准值计算(N); F_{cl} 为主缆松边拉力,按作用标准值计算(N)。

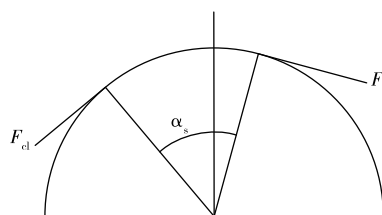


图 2 主缆抗滑验算图式

由式(4)推出最大摩擦力为:

$$F_{\mu\max} = F_{ct}(1 - e^{-\mu \alpha_s / k}) \quad (5)$$

由于棋盘洲长江公路大桥索股在温度较高的8月($23 \sim 38^\circ\text{C}$)架设,紧边出现在边跨。20 和 40°C 时摩擦力计算结果见表 2。

表 2 棋盘洲长江公路大桥南边散索鞍在 20 和 40°C 时的最大摩擦力

索股位置	温度/ $^\circ\text{C}$	紧边拉力 F_{ct}/kN	摩擦系数 μ	主缆包角 α_s/rad	抗滑安全系数 k	最大摩擦力 $F_{\mu\max}/\text{kN}$
黄石(南)	20	298.424	0.19	0.4212	1	22.953
黄石(南)	40	281.324	0.19	0.4212	1	21.637
黄冈(北)	20	297.128	0.19	0.4077	1	22.148
黄冈(北)	40	276.048	0.19	0.4077	1	20.577

由表 2 可知:黄石侧索股在散索鞍压力下产生的摩擦力为 $21.637 \sim 22.953 \text{ kN}$;黄冈侧索股在散索鞍压力下产生的摩擦力为 $20.577 \sim 22.148 \text{ kN}$ 。

4 锚跨张拉力控制方法

若要低温时棋盘洲长江公路大桥索股在散索鞍内不向锚跨滑动,需保证在 20°C 时锚跨的张拉力不

大于边跨的张拉力与最大摩擦力之和。表 3 为棋盘洲长江公路大桥锚跨最大张拉力,基准温度下南、北锚跨最大张拉力分别为 321.377 、 319.276 kN 。

表 3 棋盘洲长江公路大桥锚跨最大张拉力

锚跨位置	温度/ $^\circ\text{C}$	紧边拉力 F_{ct}/kN	最大摩擦力 $F_{\mu\max}/\text{kN}$	$T_{m\max 20}/\text{kN}$
黄石(南)	20	298.424	22.953	321.377
黄冈(北)	20	297.128	22.148	319.276

若要高温时棋盘洲长江公路大桥索股在散索鞍内不向边跨滑动,需保证在 40℃时锚跨的张拉力不小于边跨的张拉力与最大摩擦力之差。基准温度下南、北锚跨最小张拉力分别为 392.827、388.611 kN(见表 4)。

表 4 棋盘洲长江公路大桥锚跨最小张拉力

锚跨位置	温度/℃	紧边拉力 F_{ct} /kN	最大摩擦力 $F_{\mu max}$ /kN	$T_{m \min 40}$ /kN	$T_{m \min 20}$ /kN
黄石(南)	40	281.324	21.637	259.687	392.827
黄冈(北)	40	276.048	20.577	255.471	388.611

索股竖向压力产生的摩擦力不足以满足 20℃温差所产生的不平衡张拉力,单纯的摩擦力只能满足 6~7℃温差所带来的不平衡张拉力,实际工程中需采用各种临时措施增加摩擦力。假设该项目工作

环境温度为 20~40℃,则黄石侧、黄冈侧散索需提供索股的最小摩擦力分别为 58.02、56.02 kN(见表 5)。

表 5 索股需要的最小摩擦力

索股位置	F_{ct20} /kN	T_{m20} /kN	F_{ct40} /kN	T_{m40} /kN	需要的小摩擦力/kN
黄石(南)	298.424	298.424	281.324	414.464	58.02
黄冈(北)	297.128	297.128	276.048	409.188	56.03

锚跨张拉力不仅要考虑温度升高的影响,还需验证增加摩擦力的措施是否满足验证摩擦力。验证摩擦力张拉力是当前温度下边跨张拉力与所需最小摩擦力之和,锚跨张拉力是锚跨在当前温度下锚跨张拉力与所需最小摩擦力之和,其值见表 6。

表 6 不同温度下棋盘洲长江公路大桥的验证摩擦力张拉力和锚跨张拉力

锚跨位置	张拉温度/℃	张拉力 $T_{边跨}$ /kN	所需最小摩擦力/kN	验证摩擦力张拉力/kN	张抗力 $T_{锚跨}$ /kN	锚跨张拉力/kN
黄石侧	20	298.42	58.02	356.44	303.94	361.96
	21	297.57	58.02	355.59	297.27	355.29
	22	296.71	58.02	354.73	290.59	348.61
	23	295.86	58.02	353.88	283.92	341.94
	24	295.00	58.02	353.02	277.24	335.26
	25	294.15	58.02	352.17	270.57	328.59
	26	293.29	58.02	351.31	263.89	321.91
	27	292.44	58.02	350.46	257.22	315.24
	28	291.59	58.02	349.61	250.54	308.56
	29	290.75	58.02	348.77	243.87	301.89
黄冈侧	30	289.90	58.02	347.92	237.19	295.21
	20	297.13	56.03	353.16	302.01	358.04
	21	296.28	56.03	352.31	295.35	351.38
	22	295.44	56.03	351.47	288.68	344.71
	23	294.59	56.03	350.62	282.02	338.05
	24	293.75	56.03	349.78	275.35	331.38
	25	292.90	56.03	348.93	268.69	324.72
	26	292.06	56.03	348.09	262.02	318.05
	27	291.21	56.03	347.24	255.35	311.38
	28	290.37	56.03	346.40	248.69	304.72
	29	289.52	56.03	345.55	242.02	298.05
	30	288.68	56.03	344.71	235.36	291.39

5 结论

(1) 温度对边跨张拉力的影响远小于锚跨张拉力的影响,对于棋盘洲长江公路大桥,南边跨 $\Delta T/\Delta t = 0.855$ kN/℃,北边跨 $\Delta T/\Delta t = 1.054$ kN/℃,

而锚跨为 6.657 kN/℃。温度升高,锚跨索股张拉力损失过大会使索股由锚跨向边跨滑动;温度较低时,可能由于锚跨索股张拉力损失过大使索股由锚跨向边跨滑动。

(下转第 110 页)

适应度函数可正确对索力目标进行优化。

(3) 索力优化后其值小幅增加,主梁线形、主梁弯矩、索塔偏位相较于优化前在峰值上均有不同程度减小,且分布更均匀合理,优化方法可行。该方法也适用于双塔斜拉桥、多塔斜拉桥等的索力优化。

参考文献:

- [1] 田源,杨海霞.斜拉桥成桥索力优化理论及方法的最新进展[J].三峡大学学报(自然科学版),2013,35(2):47—52.
- [2] 颜东煌,李学文,刘光栋,等.用应力平衡法确定斜拉桥主梁的合理成桥状态[J].中国公路学报,2000,13(3):49—52.
- [3] 谢剑,王绪续,谢宝来.独塔混合梁转体斜拉桥合理成桥状态确定方法研究[J].特种结构,2018,35(5):51—56+62.
- [4] 张峻峰,丁志威,罗学成.基于影响矩阵法的斜拉桥成桥索力优化[J].交通科技,2011(3):4—6.
- [5] 朱敏,刘荣桂,谢桂华,等.基于多种群遗传算法的大跨度斜拉桥索力优化[J].世界桥梁,2016,44(3):38—42.

- [6] 陈志军,刘洋,杨立飞,等.基于粒子群优化算法的独塔斜拉桥成桥索力优化[J].桥梁建设,2016,46(3):40—44.
- [7] 戴杰,秦凤江,狄谨,等.斜拉桥成桥索力优化方法研究综述[J].中国公路学报,2019,32(5):17—37.
- [8] SHI Y H, EBERHART R C. A modified particle swarm optimizer[C]//Proceedings of IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC 1998). Piscataway: IEEE, 1998:69—73.
- [9] 高岳林,任子晖.带有变异算子的自适应粒子群优化算法[J].计算机应用,2008,28(25):28—30.
- [10] 李宁,孙德宝,岑翼刚,等.带变异算子的粒子群优化算法[J].计算机工程与应用,2004(17):12—14+35.
- [11] SHI Y, EBERHART R. Empirical study of particle swarm optimization[C]//International Conference on Evolutionary Computation, Washington, USA: IEEE, 1999: 1945—1950.
- [12] 董宇航,张谢东,郭子会,等.异形拱塔斜拉桥桥塔结合部受力研究[J].公路与汽运,2018(6):88—91.

收稿日期:2020—11—16

(上接第102页)

(2) 环境温度为20~40℃时,黄石侧索股在散索鞍压力下产生的摩擦力为21.637~22.953 kN,黄冈侧索股在散索鞍压力下产生的摩擦力为20.577~22.148 kN。

(3) 设棋盘洲长江公路大桥的工作环境温度为20~40℃,则黄石侧、黄冈侧散索需提供给索股的最小摩擦力分别为58.02、56.02 kN。索股的竖向压力产生的摩擦力不足以满足20℃温差所产生的不平衡张拉力,单纯的摩擦力只能满足6~7℃温差所带来的不平衡张拉力,需采用各种措施增加摩擦力。

(4) 施工期白天温度较高,为保证索股在散索鞍槽内不滑动,施工单位应采取有效措施防止索股在散索鞍中产生滑动。锚跨索股不仅需要超张拉,还需通过张拉验证增加摩擦力的措施是否能消除温度荷载的影响。锚跨的超张拉力为当前温度下锚跨的力与所需最小摩擦力之和,验证摩擦力张拉力是当前温度下边跨的张拉力与所需最小摩擦力之和。

参考文献:

- [1] 沈锐利,薛光雄.悬索桥主缆丝股锚固力的计算方法探讨[J].桥梁建设,2003,33(6):25—29.
- [2] 罗喜恒,肖汝诚,项海帆.悬索桥锚跨索股分析研究[J].公路交通科技,2004,21(12):45—49.
- [3] 许汉铮.大跨悬索桥主缆锚跨张力控制[J].长安大学学报(自然科学版),2002,22(5):32—34.
- [4] 黄浩.风荷载作用下悬索桥受力分析与静风稳定性研究[J].公路工程,2019,44(4):98—102+148.
- [5] 沈良成,文武,沈锐利,等.高温下悬索桥主缆丝股锚跨张力的合理控制研究[J].桥梁建设,2004,34(4):7—9.
- [6] 周伟,夏雪莲,胡铁山,等.悬索桥索股架设参数敏感性分析[J].公路与汽运,2020(3):104—105.
- [7] 中交公路规划设计院有限公司.公路悬索桥设计规范:JTG/T D65—05—2015[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.

收稿日期:2021—01—04

(上接第105页)

用研究[J].建筑技术开发,2019(14):1—3.

- [8] 葛素娟,李静斌.小箱梁桥虚拟横梁建模法中虚横梁间距选取研究[J].河南科学,2009,27(10):1289—1291.

- [9] 梁峰,陈栋宇.斜交转正交梯形装配式桥梁设计[J].现代交通技术,2011,8(4):26—28.

收稿日期:2021—01—11