

文章编号: 1002-0268 (2005) 08-0040-04

武汉阳逻长江大桥施工猫道抗风稳定性分析

乐云祥¹, 常 英², 胡晓伦¹

(1. 同济大学桥梁工程系, 上海 200092; 2. 湖北省交通规划设计院, 湖北 武汉 430051)

摘要: 研究了武汉阳逻长江大桥施工猫道在极限风荷载下的稳定性及动力稳定性。采用悬索桥的静风稳定公式计算了猫道静风失稳临界风速, 设计超松弛迭代法进行了猫道静风失稳的非线性有限元分析验算, 并估算了该猫道颤振临界风速。计算分析表明, 该猫道的静、动力抗风稳定性满足要求, 并据此提出了三种工程抑振措施。

关键词: 悬索桥; 猫道; 抗风; 稳定

中图分类号: U448.25

文献标识码: A

Analysis of Wind-resistant Stability on the Catwalk of Wuhan Yangluo Yangtze River Bridge

YUE Yun-xiang¹, CHANG Ying², HU Xiao-lun¹

(1. Department of Bridge Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Hubei Communication Planning and Design Institute, Hubei Wuhan 430051, China)

Abstract: This paper studied the static and dynamical wind stability of the catwalk of Wuhan Yangluo Yangtze River Bridge under ultimate wind speed. The minimum static divergence speed of the catwalk in the construction phase was calculated by using the static wind stability formula of suspension bridges. Nonlinear finite element checking computation on the critical divergence speed of the catwalk was performed by developing super-slack iteration method. The critical flutter velocity of the catwalk was appraised. It indicated that both its static and dynamical wind-resistant stability could meet the specified requirement via analyzing the catwalk's design by means of theoretical method and nonlinear finite element numerical analysis method, respectively. Three kinds of reasonable wind-resistant measures were proposed.

Key words: Suspension bridge; Catwalk; Wind-resistant; Stability

1 工程概况

武汉阳逻长江大桥位于武汉关下游 30km 处, 桥址北岸是新洲区阳逻镇观音阁, 南岸是洪山区向家尾。一般水位时江面宽度约 1 000m, 南北岸大堤间距离 1 500m。主桥采用单跨 1 280m 的双铰悬索体系, 加劲梁采用 3.0m 高、28m 宽的扁平流线形钢箱梁; 索塔为预应力混凝土箱形断面的门式塔, 北索塔高

149.8m, 南索塔高 156.2m。

本桥主缆确定采用 PPWS 法在猫道上进行施工操作。猫道是悬索桥上部结构施工所需的重要高空作业通道和施工场地, 平行于主缆线形布置。在整个上部结构施工期间, 索股牵引、索股调整、主缆紧缆、索夹及吊索安装、钢箱梁吊装、主缆缠丝防护、以及除湿系统等, 均利用猫道进行施工作业。其抗风稳定性是整个上构施工成败的关键。

收稿日期: 2004-05-15

作者简介: 乐云祥 (1974—), 男, 湖北仙桃人, 博士, 主要从事大跨度桥梁结构体系理论研究、大跨度桥梁结构极限承载能力分析与健康状态评估, 以及大跨度桥梁的设计与施工控制。(yuleyue@yahoo.com)

2 桥址场地风速计算与静三分力系数

2.1 风速的计算

根据桥址处风速资料推算得知, 该桥桥址处 10m 高度处的基本风速为 $V_{10}=27.9\text{ m/s}$, 重现期取为 10a。设计基准风速对应于猫道跨中点, 其值为

$$V_d=V_{10}\left(\frac{Z}{10}\right)^{0.16}=V_{10}\left(\frac{60}{10}\right)^{0.16}=37.2\text{ m/s}$$

猫道中间标高处的设计基准风速为 41.6 m/s 。场地地表粗糙度按 II 类计, 则该桥猫道不同高度处的设计计算风速为

$$V_d=V_{10}\left(\frac{Z}{10}\right)^{0.16}$$

式中, Z 为设计水面以上高度。

等效静阵风风速取 $V_g=1.21V_{DH}=50.4\text{ m/s}$, 对应于猫道中间标高处。

2.2 静三分力系数

静三分力系数是风载和静风稳定计算的依据, 鉴于本桥猫道尚未进行风洞试验, 故参考宜昌长江公路大桥施工猫道取值, 如表 1 示。

表 1 猫道静力三分力系数

攻角/ $^\circ$	C_M	C_D	C_L
-12	-0.0205	0.9033	-0.0958
-10	-0.0174	0.8215	-0.0649
-8	-0.0155	0.7827	-0.0913
-6	-0.0126	0.7321	-0.0986
-4	-0.0104	0.6735	-0.0482
-2	-0.0091	0.6206	-0.0756
0	-0.0080	0.5862	-0.0227
2	-0.0036	0.5871	-0.0187
4	-0.0089	0.6121	-0.0044
6	-0.0110	0.6544	0.0157
8	-0.0151	0.7241	0.0048
10	-0.0183	0.7785	0.0163
12	-0.0222	0.7932	-0.0003

3 极限风荷载下的稳定分析

3.1 用理论方法计算静风失稳临界风速

猫道结构是一种柔性索桁结构, 与悬索桥相似, 故在此采用悬索桥的静风稳定计算公式来求解猫道静风失稳临界风速。

单跨简支悬索桥对应于横向屈曲临界荷载的临界风速可按式计算

$$V_b=K_b f_t B$$
$$K_b=\frac{\pi^3\left(\frac{B}{H}\right)\mu\left(\frac{r}{b}\right)}{C_D\epsilon\sqrt{K}\sqrt{K+1+\frac{dC_L}{d\alpha}\cdot\frac{1}{C_D}\frac{B_c}{H}}}$$

式中, B_c 为主缆间距, m; C_D 为主梁横向力系数; $\mu=\frac{m}{\pi B^2}$; $b=\frac{B}{2}$; $\frac{r}{b}=\frac{1}{b}\sqrt{\frac{I_m}{m}}$; $K=\frac{1}{4}\left(\frac{4\pi^2}{3}+1\right)=3.54$; m 为单位桥长质量 kg/m ; I_m 为单位桥长质量惯矩, $\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{m}$; f_t 一般取 1 阶对称扭转频率, Hz; ϵ 为扭弯频率比; $\frac{dC_L}{d\alpha}$ 为攻角 $\alpha=0$ 时主梁的升力系数 C_L 的斜率, 一般通过风洞试验得到。

横向屈曲临界风速必须满足以下准则

$$V_b\geq 1.8V_d$$

悬索桥的静力扭转发散临界风速可按式计算

$$V_{td}=K_{td}\cdot f_t\cdot B$$

$$K_{td}=\sqrt{\frac{\pi^3}{2}\mu\left(\frac{r}{b}\right)^2\cdot\frac{1}{C_{M0}}}$$

式中, C'_{M0} 为当风攻角 $\alpha=0^\circ$ 时, 扭转力矩系数 C_M 的斜率, 一般应通过风洞试验得到。

静力扭转发散的临界风速必须满足以下准则

$$V_{td}\geq 1.8V_d$$

该准则是对成桥等永久性结构而言的, 作为施工中的临时结构, 猫道的风速限值要低许多, 上式可表达为

$$V_{td}\geq 1.25V_d$$

本桥猫道计算参数如下: $B=39.3\text{ m}$, $B_c=35.0\text{ m}$,

$H=1.20\text{ m}$, $m=2\times 388.53\text{ kg/m}$, $\frac{r}{b}=0.72$, $K=3.54$,

$C_D=0.5862$, $C'_{L0}=0.7730$, $C'_{M0}=0.5764$, $\epsilon=1.023$, $f_t=0.1028\text{ Hz}$ 。

计算结果为: $V_{td}=70.5\text{ m/s}$; $V_b=73.3\text{ m/s}$; $1.25V_d=46.5\text{ m/s}$, 满足 $V_{td}\geq 1.25V_d$ 的要求。可见, 该猫道的横向屈曲临界风速和静力扭转发散的临界风速均超出要求值, 在常遇风速情况下, 结构不会发生静风失稳现象, 静风稳定性能有保证。

3.2 用有限元方法计算静风失稳临界风速

由于猫道这一索桁结构具有独特的力学特性: 在无预应力情况下结构是不稳定的, 结构的刚度依靠预应力予以保证, 并随着荷载的作用, 结构的刚度不断变化, 它的变形往往包含机构位移和弹性变形。故采用具二次开发能力的大型商用软件 ANSYS[®] 进行有限元分析, 以适应反复试算、迭代与优化之需。建立 ANSYS[®] 平台下有限元模型如图 1 所示。

对于静风荷载的处理, 通过 ANSYS[®] 中的参量分析法将静力三分力沿桥纵向按实际扭转角的变化做出调整从而实现结构内外增量的结合, 在此基础上, 设



图1 有限元模型

计超松弛迭代法的计算流程以加速收敛。具体计算时,按以下步骤实现内外增量的迭代:

(1) 求给定风速下全桥静力三分力分布。

(2) 形成初始风荷载加载面扭转角向量

$$\{\theta\}_0 = \{\theta_1 \quad \theta_2 \quad \dots \quad \theta_n\}^T = \{\theta_0 \quad \theta_0 \quad \dots \quad \theta_0\}^T$$

扭转角增量向量

$$\{\Delta\theta\}_0 = \{\Delta\theta_1 \quad \Delta\theta_2 \quad \dots \quad \Delta\theta_n\}^T = \{0 \quad 0 \quad \dots \quad 0\}^T$$

(3) 采用全 Newton-Raphson 方法(Full Newton-Raphson Method)进行非线性求解。

(4) 求转角向量 $\{\theta\}_1 = \{\theta_{11} \quad \theta_{21} \quad \dots \quad \theta_{n1}\}^T$,由本级与上级转角向量的差值可求出扭转角增量向量

$$\{\Delta\theta\}_1 = \{\Delta\theta_{11} \quad \Delta\theta_{21} \quad \dots \quad \Delta\theta_{n1}\}^T$$

其中, $\Delta\theta_{mi} = \theta_{mi} - \theta_{m(i-1)} - \Psi\Delta\theta_{m(i-1)}$ 。

(5) 检查最大扭转角增量是否小于收敛范数(本文取 0.002°)。

(6) 如果不满足(5),则根据结构新的状态修正三分力重复以上步骤(1)~(5),进行三分力修正的扭转角向量按下式取值

$$\{\theta\}_n = \{\theta\}_n + \Psi\{\Delta\theta\}_n$$

式中, Ψ 为松弛因子,可根据具体情况取值,通常在0到1之间。

(7) 如果满足步骤(5),则本级风速收敛,调整风速进入下一级计算。

超松弛迭代法的引入,大幅缩短了迭代收敛时间,对于大型有限元结构的静风稳定计算有重要的实用价值。

由上述方法计算,得 $V_{td} = 59.9 \text{ m/s}$, $V_b = 61.6 \text{ m/s}$, $1.25V_d = 46.5 \text{ m/s}$ 。

可见,该猫道的横向屈曲临界风速和静力扭转发散的临界风速均超出要求值,在常遇风速情况下,结构不会发生静风失稳现象,稳定性能有保证。

3.3 两种方法的比较

由3.1与3.2的结果可以看出,理论计算结果与有限元分析结论相吻合。同时,ANSYS[®]计算值是考虑了几何大变形、有效攻角随风速变化且猫道结构姿态做相应调整的影响,计算结果更为真实。对比两种算法,可知用理论公式计算静风失稳临界风速,是基

于线性弹性范畴的估算,没有考虑有效攻角的变化,较乐观的估计了静风失稳临界风速,偏于不安全。实际上,临界风速较估算值低,从ANSYS[®]计算结果来看,真实值是估算值的0.80~0.85倍。

4 动力特性分析

本桥猫道的动力特性计算结果见表2。

表2 动力特性计算结果

序号	振型	公式计算频率值
1	1阶对称侧弯	0.0514
2	1阶反对称侧弯	0.1028
3	1阶对称竖弯	0.0514
4	1阶反对称竖弯	0.1005
5	1阶对称扭转	/
6	1阶反对称扭转	0.1028

5 动力稳定分析

桥梁的颤振检验风速按下式确定

$$[V_{cr}] = K \cdot \mu_f \cdot V_d = 1.2 \times 1.24 \times 37.2 = 55.4 \text{ m/s}$$

式中, $[V_{cr}]$ 为颤振检验风速,m/s; V_d 为设计基准风速,m/s; μ_f 为考虑风速脉动影响及水平相关特性的无量纲修正系数,根据不同的地表粗糙类别,按《公路抗风设计指南》取用; K 为考虑风洞试验误差及设计、施工中不确定因素的综合安全系数,一般可取 $K=1.2$ 。

可按下式估算其颤振临界风速

$$V_{cr} = \eta_s \cdot \eta_a \cdot V_{\omega}$$

$$V_{\omega} = 2.5 \sqrt{\mu \cdot \left(\frac{r}{b} \right) \cdot f_t \cdot B}$$

式中, μ 为桥梁与空气的密度比, $\mu = \frac{m}{\pi \rho b}$,对悬索桥应包含缆索的质量; $b = B/2$ 为半桥宽; η_s 为形状系数,按《公路抗风设计指南》取用; η_a 为攻角效应系数,按《公路抗风设计指南》取用; f_t 为1阶扭转频率,Hz; B 为桥面全宽,m。

按上述公式,算得本桥猫道的颤振临界风速 $V_{cr} = 55.70 \text{ m/s}$,略高于其检验风速 55.40 m/s 。这说明该猫道颤振稳定性满足要求,但富余量不大。事实上,猫道是一种带有预张力的索桁架结构可变体系,它在极限风荷载作用下,结构姿态发生自适应性调整,以抵抗风荷载的作用。因此,猫道一般不会发生破坏性的颤振失稳问题。宜昌长江大桥和虎门大桥的猫道风洞试验证实了这一判断。本桥猫道参阅同类型结构设计,其动力稳定性有保证。

6 抗风稳定措施

在本桥猫道的设计中,参考目前国内外猫道抗风

设计的成熟经验,提出了如下猫道抑制风振措施:两条猫道间的横向通道、设置阻尼装置、竖向及水平抑振索、主塔两边的猫道承重索变位刚架、主塔中跨侧的猫道承重索下压装置等。

6.1 猫道承重索的预拉力

由于构造和制造工艺的原因,国产多股缠绕式钢丝绳存在一些缺陷:如非弹性变形大(一般为 $0.10\% \sim 0.16\%$)、弹性模量小等,使得主缆架设期间的猫道线形会发生较大变化,对悬索桥上构施工造成不良影响。为确保猫道线形满足设计要求并方便施工,参照既成桥梁成熟经验,承重索的钢丝绳应在下料前进行预张拉,以消除非弹性变形。

6.2 中跨侧下压装置的下压力和施加范围

本桥所在场地类型属于II类,设计基准风速 37.2 m/s ,鲜见飓风等不良气候,风速风况状态均优于同类型同跨度的悬索桥。猫道设计中承重索的选型和数量均偏于安全。计算表明:设计基准风速下,中跨猫道承重索侧向位移为 21.557 m , $U_z/L_m = 21.557/1280 = 1.68\%$;在使用荷载和6级风共同作用下,中跨猫道承重索的侧向位移为 2.647 m , $U_z/L_m = 0.21\%$ 。变形与挠度很小,对于索桁架体系而言是安全的。加之索结构本身是可变体系,其姿态随风荷载自动调整,能自适应地抵抗风荷载。该猫道设计上采用中跨设置7道横向天桥,相对同等跨度的猫道结构而言,足够保证它的横向及扭转抗风稳定性。参考同类型桥的设计经验,建议该猫道不设置下压装置。

6.3 抑振机构的预拉力

在横向天桥左右侧设置有水平拉索,用于保持天桥周边区域的稳定性,有利于抗风。设计中未明确给定该索的规格,本文计算中暂时取用 $\Phi 36\text{ mm}$ 的钢丝绳,猫道成形状态其内部存有初应变 0.0028 (暂定),换算为索力即 11.85 t 。在等效阵风作用下,观察猫道结构的变形图2和图3,可见,水平抑振索仅能保持横向天桥局部区域的稳定性,使猫道承重索不至于发生局部扭转而导致门架和横向天桥的倾斜和扭转,对整体结构而言,并无大的帮助。

建议不必考虑水平拉索对整体猫道结构抗风稳定性的贡献,仅将其视为确保横向天桥局部区域稳定性的调节工具与安全储备。水平拉索的初应变可取值于 $0.0025 \sim 0.0035$ 之间,换算成初始索力为 $10.58 \sim 14.81\text{ t}$ 。建议设置索力调整机构,根据风力大小,适当调整水平拉索的索力,低风速时对应较小索力;高风速时对应较大索力。

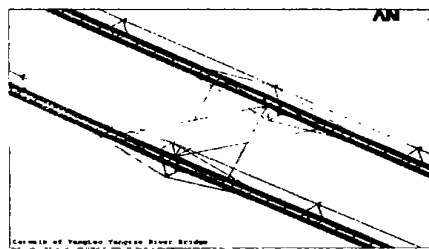


图2 等效阵风下的猫道变形图(跨中)

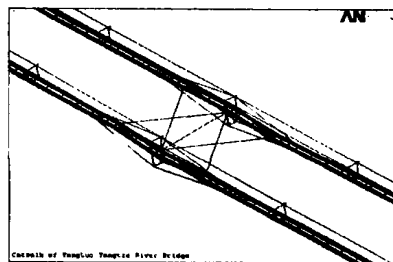


图3 等效阵风下的猫道变形图(1/4跨)

7 结论和建议

(1) 中跨设置7道横向天桥有助于提高结构整体的静力和动力稳定性。现有的工程实践证明,只要设置适当数目的横向天桥,猫道就会有足够的抗风稳定性,也就可以免去抗风体系。该桥猫道设置的位置和数量较合理,偏于安全。

(2) 风速取值:基本风速为 $V_{10} = 27.9\text{ m/s}$;6级大风对应的风速范围为 $10.8 \sim 13.8\text{ m/s}$;设计基准风速在猫道跨中点 $V_d = 37.2\text{ m/s}$,在猫道中间标高处为 41.6 m/s ,在不同高度处按公式 $V_d = V_{10} \left(\frac{Z}{10} \right)^{0.16}$ 计算;等效静阵风风速 $V_g = 50.4\text{ m/s}$,对应于猫道中间标高处。

(3) 本文计算了等效静阵风 50.4 m/s 、设计基准风速 41.6 m/s 和6级大风 13.8 m/s 三种情况,并与降温进行了组合。几种情况下的结果表明猫道的强度与稳定均是足够安全的。

(4) 静三分力系数参考宜昌长江公路大桥施工猫道的试验结果进行取值。

(5) 静力分析表明,在使用荷载和6级风共同作用下,猫道结构不会发生侧倾失稳和扭转失稳。

(6) 理论计算表明静力扭转发散的临界风速 $V_d = 59.9\text{ m/s}$,横向屈曲临界荷载的临界风速 $V_b = 61.6\text{ m/s}$,均大于要求值 $1.25V_d = 46.5\text{ m/s}$ 。这说明,在常遇风速情况下,结构不会发生静风失稳现象,抗风稳定性能有保证。

(下转第60页)

用下基本闭合, 结构刚度损失不大。

5 结束语

(1) 正常使用荷载内, 实测结构的荷载-位移曲线、荷载-应变曲线基本上都是线性的, 此外, 结构预应力能有效的提高结构线性反应历程, 正常荷载下结构完全处于弹性工作状态。

(2) 从模型试验结果分析, 湿接缝段仍是结构的薄弱环节, 试验表明, 其抗裂安全系数较理论值偏小, 实梁设计应适当提高湿接缝段的抗裂安全系数。

(3) 模型梁的实测强度安全系数高于按桥规计算的理论值, 表明模型梁与实梁具有足够的极限承载力。

(4) 为避免结构在简支和连续状态下出现过大的偏心和扭转, 实梁施工中, 应严格控制支座横向位置

精度及支座不平整度。

(5) 动力测试结果表明模型梁动力特性的一般规律是正确的, 模型梁具有足够的刚度。

参考文献:

- [1] 郭继业, 盛兴旺. 高速铁路 PC 先简支后连续梁技术应用初探 [J]. 铁道学报, 2002
- [2] 黄棠, 王效通. 结构设计原理 (上) [M]. 中国铁道出版社, 1997.
- [3] 苏卫. 乌龙江特大桥引桥先简支后连续结构形式的试验研究 [J]. 华东公路, 2000 (5).
- [4] 何旭辉, 盛兴旺, 陈政清. 高速铁路 PC 斜交箱梁桥振动特性模型试验研究 [J]. 铁道学报, 2002 (1).
- [5] 陈政清. 双肢薄壁连续刚构铁路桥静载的实验研究 [J]. 长沙交通学院学报, 1999 (4).
- [6] 李国豪. 桥梁结构稳定与振动 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1996.

(上接第 43 页)

(7) 本文给出了猫道结构振型和相应频率的计算值, 可作为进一步分析的基础。

(8) 猫道结构的风致振动效应主要为颤振和抖振两种形式。该猫道颤振临界风速 $V_{cr} = 55.70\text{m/s}$, 略高于其检验风速 55.40m/s 。由于猫道是可变体系, 它在极限风荷载作用下, 结构姿态发生自适应性调整, 以抵抗风荷载的作用, 一般不会发生破坏性的颤振失稳问题。抖振是常见的振动现象, 表现为不规则的乱振, 不可避免, 但不具有破坏性。对于柔性索桁体系而言, 抖振可不作为控制因素。

(9) 根据本文计算结果并参考同类型桥的设计经验, 建议该猫道不设置下压装置。该猫道中跨设置 7 道横向天桥, 相对同等跨度的猫道结构而言, 足够保证它的横向和扭转抗风稳定性。

(10) 不必考虑水平拉索对整体猫道结构抗风稳定性的贡献, 仅将其视为确保横向天桥局部区域稳定性的调节工具。对 $\Phi 36\text{mm}$ 的钢丝绳而言, 初始索力可设为 $10.58 \sim 14.8\text{t}$ 。建议设计索力调整机构, 根据风力大小, 适当调整水平拉索的索力。

参考文献:

- [1] 陈正洪, 杨宏青, 向玉春, 陈波. 武汉阳逻长江公路大桥设计风速值的研究 [J]. 自然灾害学报, 2003, 12 (4).
- [2] 毛鸿银, 项海帆. 悬索桥施工猫道的动力特性分析 [J]. 同济大学学报, 1998 (4).
- [3] 郑史雄, 周述华, 廖海黎. 悬索桥施工猫道的非线性抗风静力稳定性分析 [J]. 西南交通大学学报, 2000, 35 (4).
- [4] 《公路桥梁抗风设计指南》编写组. 公路桥梁抗风设计指南 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1996.
- [5] Ansys 使用手册 [M]. 美国 Ansys 公司驻京办事处.