

大跨柔性高墩刚构桥施工阶段抖振响应及舒适度评估

廖俊文¹, 欧阳和平¹, 朱检²

(1.湖南水利水电职业技术学院, 湖南 长沙 410131; 2.中建五局装饰幕墙有限公司, 湖南 长沙 410004)

摘要:以某大跨薄壁柔性高墩连续刚构桥为工程背景, 针对其最大悬臂阶段开展三维有限元分析, 采用时域分析方法, 研究桥梁阻尼与风攻角对桥梁抖振响应的影响, 并针对桥梁响应结果开展频谱分析, 评估最不利施工悬臂阶段的舒适度。结果表明, 该桥最大双悬臂状态阶段在抖振作用下的舒适度指标值很小, 对施工人员的安全影响不明显。

关键词:桥梁; 刚构桥; 高墩; 抖振响应; 舒适度指标; 时域分析; 频谱分析

中图分类号: U446.3

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2018)06-0142-04

与中小跨度桥梁或低墩桥梁相比, 大跨度预应力砼薄壁柔性墩刚架桥施工中的最大双悬臂阶段为其最不利抗风状态, 在风荷载作用下容易发生变形和振动, 而桥梁抖振将导致桥梁各部位构件疲劳、破坏甚至成桥后行车舒适度与安全性下降。因此, 风致抖振响应分析是桥梁抗风设计中的关键问题之一。陈艾荣等介绍了悬臂施工中大跨连续刚构桥的风荷载计算方法, 探讨了大跨连续刚构桥的气动特性; 王进军等以某刚构桥为工程背景, 探讨了运营阶段桥梁振动对行人舒适度与安全性的影响。但对大跨高墩刚构桥在最大双悬臂阶段的抖振响应及对施工环境舒适度的影响的研究相对较少, 且这方面的研究主要集中在墩高小于 80 m 的连续刚构桥。为此, 该文对大跨连续高墩刚构桥在最大双悬臂状态下的抖振响应进行分析, 采用时域分析与频谱分析法计算桥梁施工环境的舒适度并评估对施工人员和机械舒适度的影响。

1 桥梁有限元模型建立

通过 ANSYS 软件分别建立全桥和最大双悬臂施工状态空间分析模型。桥梁模型中, 主梁、主墩及边墩墩身均采用梁单元 Beam4 模拟, 桥面铺装及桥面附属物采用沿主梁纵向均匀分配的质量单元 Mass21 模拟; 主墩墩顶与主梁刚性连接, 边墩墩顶设 2 个盆式橡胶支座与主梁相连, 仅设置竖向和横向 2 个自由度的约束; 忽略桩土效应, 在边墩墩底、辅助墩墩底、主塔墩墩底采用完全固结形式。主墩最大双悬臂状态模型中, 不考虑主墩与边墩之间的

联系, 也不考虑桥面铺装及桥面附属物。

2 桥梁风力计算

2.1 基准风速

桥梁的设计基准风速定义为桥面高度处 10 min 平均最大风速, 按下式计算:

$$U_d = U_{10} \left(\frac{z}{10} \right)^a \quad (1)$$

式中: U_{10} 为桥面高度处 10 min 的自然风速; z 为相对高程。

在初步设计阶段可采用瞬时阵风风速 U_g 计算风载内力。阵风风速计算如下:

$$U_g = G_v U_d \quad (2)$$

按照上述公式, 参考文献[1], 计算得出该桥在最大双悬臂施工阶段的阵风风速为 38.2 m/s, 设计风速为 27.7 m/s。

2.2 脉动风的模拟

采用改进谐波合成法模拟风速时程样本, 其 Cholesky 分解式为:

$$u_j(t) = \sum_{m=1}^j \sum_{l=1}^N \sqrt{2\Delta\omega S(\omega)} G_{jm}(\omega) \cos(\omega_m t + \phi_{ml}) \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

2.3 抖振力计算

作用在桥梁断面的抖振力为:

$$L(x, t) = 0.5\rho U^2 B \left\{ C_L(\alpha_0) \frac{2u(x, t)}{U} + \left[C'_L(\alpha_0) + \frac{A}{B} C_D(\alpha_0) \right] \frac{w(x, t)}{U} \right\} \quad (4)$$

$$D(x,t)=0.5\rho U^2 A \left[C_D(\alpha_0) \frac{2u(x,t)}{U} + C'_D(\alpha_0) \frac{w(x,t)}{U} \right] \tag{5}$$

$$M(x,t)=0.5\rho U^2 B^2 \left[C_M(\alpha_0) \frac{2u(x,t)}{U} + C'_M(\alpha_0) \frac{w(x,t)}{U} \right] \tag{6}$$

式中: U 、 ρ 分别为平均风速和空气密度; $u(x,t)$ 、 $w(x,t)$ 分别为模拟的脉动横向风速与竖向风速; $C_D(\alpha_0)$ 、 $C_L(\alpha_0)$ 、 $C_M(\alpha_0)$ 、 $C'_D(\alpha_0)$ 、 $C'_L(\alpha_0)$ 、 $C'_M(\alpha_0)$ 分别为主梁体轴各方向的阻力、升力、扭转力矩系数及其对有效攻角的导数。

2.4 风荷载加载方式

考虑各种最不利加载情况,基于风荷载特性,采用对称均匀风荷载加载;在悬臂左右按相同的阵风加载,同时根据桥墩高度变化施加风力,在墩上施加阻力(见图 1)。

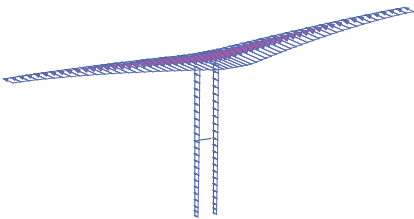


图 1 风力加载模式

2.5 频谱分析

桥梁在风载作用下的时程响应无法呈现出振动特征,可将时程波形转变为频率域的频谱,进而对信号的信息作定量解释,从而求得时程响应的幅值与频率成分,再分析对频域曲线的可获取动力响应的强振频率区段。其中频谱分析表达式为:

$$U(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} u(t) e^{-i\omega t} dt \tag{7}$$

式中: $u(t)$ 为桥梁动力响应的时域函数。

2.6 舒适度分析

施工环境中施工人员的不舒适和不安全感极大地影响着工程进度与人员安全。目前,中国规范还没有统一的舒适度指标对人对桥梁振动的感觉进行评估。研究成果表明,可采用 Diekmann 指标 K 判别人体对结构物振动的感觉, K 的计算及评定标准见表 1 和表 2。

3 算例分析

某大跨度预应力砼薄壁柔性高墩刚构桥主桥采

表 1 Diekmann 指标 K 计算公式

振动方向	工况	K 计算公式
横向振动	$f < 2 \text{ Hz}$	$K = 2Df^2$
	$2 \text{ Hz} \leq f \leq 25 \text{ Hz}$	$K = 4Df$
	$f > 25 \text{ Hz}$	$K = 100D$
竖向振动	$f < 5 \text{ Hz}$	$K = Df^2$
	$5 \text{ Hz} \leq f \leq 40 \text{ Hz}$	$K = Df$
	$f > 40 \text{ Hz}$	$K = 100D$

表 2 Diekmann 指标 K 评定标准

K	人体对振动敏感区域
0.1	能感到振动的下限
1.0	能忍受任意长时间的振动
10.0	能忍受短期振动
100.0	一般人对振动过分疲劳的上限

用(130+3×235+130) m 预应力砼刚构连续组合桥,上部结构为顶宽 12 m、底宽 6.5 m、梁高 4.1~13.4 m 的变截面单室箱梁,下部结构为砼双薄壁墩,全桥立面布置见图 2。主跨与边跨采用 C50 预应力砼箱梁,主墩与辅墩为 C30 预应力砼双肢墩,其中 13# 墩为最高主墩。

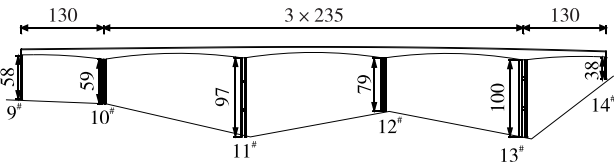


图 2 某大跨刚构桥立面布置(单位:m)

3.1 桥梁自振特性计算

基于上述桥梁背景通过 ANSYS 软件分别建立全桥和最大双悬臂阶段有限元模型,采用子空间迭代法分别计算全桥和最大双悬臂有限元模型的自振频率,各模型的一阶自振频率及振型特征见表 3。

表 3 成桥阶段和最大双悬臂阶段的一阶自振频率 Hz

施工阶段	侧向水平摆动频率	竖向弯曲频率
成桥阶段	0.225	0.607
13# 墩最大双悬臂阶段	0.131	0.262

由表 3 可知:最大双悬臂施工阶段的一阶自振频率比成桥阶段的小,侧向水平摆动频率和竖向弯曲频率偏低,说明两个频率下的模式最容易被激发,连续刚构桥的抗风控制状态为处于侧向水平摆动频率与竖向弯曲频率时的最大双悬臂施工阶段。

3.2 脉动风速时程模拟

采用常用的谐波合成法模拟脉动风,风谱采用 Kaimal 谱,高度 z 处平均风速为 $U(z)$ 时的竖向及水平脉动风功率谱密度函数为:

$$\begin{cases} \frac{nS_u(n)}{u_*^2} = \frac{200f}{(1+50f)^{5/3}} \\ \frac{nS_w(n)}{u_*^2} = \frac{6f}{(1+4f)^2} \end{cases} \quad (8)$$

频率 n 上、下限取为 $0.001 \sim 2$ Hz,模拟时长为 $0 \sim 100$ s,时间间隔为 0.005 s,模拟所得脉动风顺风向 $u(t)$ 和横风向风速时程样本 $w(t)$ 见图 3。

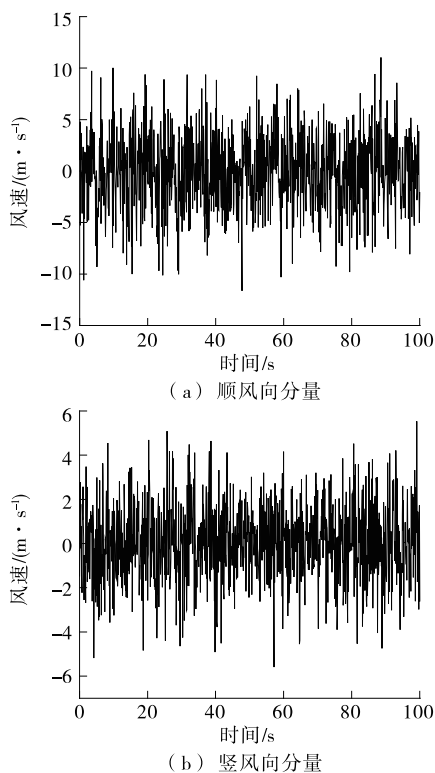


图3 最大悬臂处脉动风风速时程

3.3 桥梁风致时程响应

主要考虑风攻角与桥梁结构阻尼对刚构桥在最大悬臂施工状态风致响应的影响,其中风攻角分别取 -3° 、 0° 、 $+3^\circ$,桥梁结构阻尼分别取 $\zeta_{\text{竖摆}} = 0.01$ 、 $\zeta_{\text{横摆}} = 0.01$ (工况 1), $\zeta_{\text{竖摆}} = 0.02$ 、 $\zeta_{\text{横摆}} = 0.02$ (工况 2)。采用时域分析方法计算脉动风作用下桥梁最大双悬臂和单悬臂的抖振响应,脉动风作用下最大双悬臂端的强振频率和相应振幅见表 4,最大悬臂端在风攻角为 3° 、桥梁结构阻尼工况 1 下的位移时程响应见图 4 和图 5。

由表 4 和图 4 可知:桥梁结构处于最大双悬臂状态时,在不同风攻角与结构阻尼影响下,悬臂端位

表4 脉动风作用下最大双悬臂端的强振频率和相应振幅

阻尼工况	风攻角/ (°)	强振频率/Hz		振幅/mm	
		横向	竖向	横向	竖向
工况 1	-3	0.2	0.51	47	27
	0	0.2	0.51	47	28
	3	0.2	0.51	42	27
工况 2	-3	0.2	0.51	41	22
	0	0.2	0.51	41	29
	3	0.2	0.51	36	28

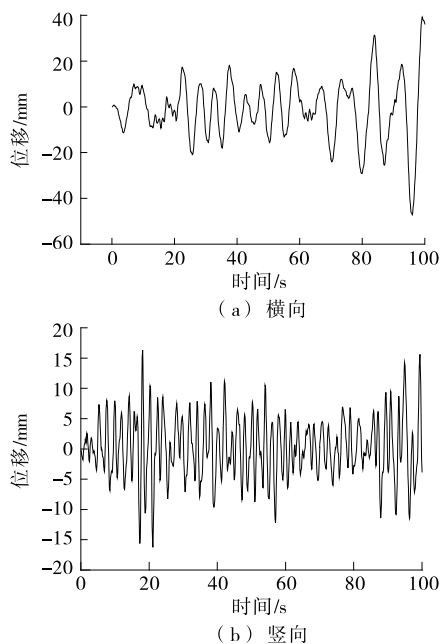


图4 13 m墩处主梁悬臂端位移时程

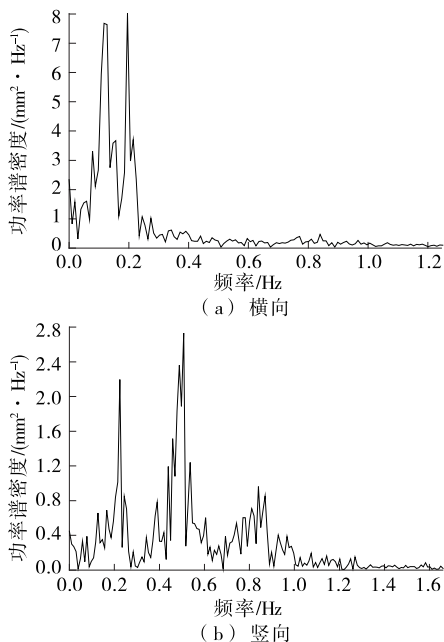


图5 13 m墩处主梁悬臂端抖振频谱

移响应无明显变化规律,桥梁位移响应的强振频率基本没有变化。

由图 5 可知:桥梁抖振的强振频率主要集中在低频区,说明脉动风的频率成分和桥梁结构的自振频率基本处于同样的区域才对结构响应不明显。

3.4 舒适度评估

根据抖振响应计算最大双悬臂施工时抖振对施工人员的影响,Diekemann 指标计算结果见表 5。

表 5 最大悬臂施工状态下悬臂端 K 值

阻尼工况	风攻角/(°)	K	
		横向	竖向
工况 1	-3	1.08	4.27
	0	1.00	2.87
	3	1.04	1.37
工况 2	-3	0.64	4.92
	0	0.72	2.29
	3	0.96	1.28

由表 5 可知:不同工况下,最大双悬臂施工状态横向 K 均在 1 左右,竖向 K 均在 10 以内,最大双悬臂施工状态下横向、竖向舒适度处于能忍受较长时间振动的区域,对施工人员和机械的影响不明显,施工人员和机械可承受较长时间的工作。

4 结论

(1) 刚构桥在成桥阶段与施工阶段的一阶模态分别为侧向水平横摆、竖向弯曲振型,且两者振动频率较低,需将最大双悬臂施工状态作为高墩刚构桥抗风设计重点。

(上接第 115 页)

最大偏差在允许范围内。

5 结论

该文针对主跨为 120 m 的上承式钢筋砼拱桥,运用 MIDAS/Civil 对缆索吊装过程和钢拱架上现浇主拱圈底板砼过程进行仿真模拟,结论如下:

(1) 基于弹性—刚性支撑法,利用 MIDAS/Civil 进行缆索吊装过程分析求得吊装过程的预抬高值,能一次性得到吊装过程中的节段位移量,避免反复迭代过程,同时能满足精度要求。

(2) 将主拱圈底板浇筑过程的设计标高加上底板浇筑的预台量值作为缆索吊装主拱圈过程的设计

(2) 在不同风攻角、不同结构阻尼影响下,高墩刚构桥的抖振响应规律不同,在高墩刚构桥抗风研究中需在风荷载作用下开展多因素工况分析,以进行安全的抗风设计。

(3) 该桥脉动风的分布频率与桥梁抖振的强振频率均处于低频区,舒适度 Diekmann 指标值计算结果较小,在最大双悬臂施工状态下施工环境处于能忍受的长时间振动中,对施工人员的舒适度与安全性影响不大。

参考文献:

- [1] 张永辰,祝建波,张丽芳.高墩大跨连续刚构桥设计控制参数优化研究[J].公路与汽运,2018(2).
- [2] 李莱.风环境下高墩大跨连续刚构桥的行车安全性分析[D].长沙:长沙理工大学,2016.
- [3] 陈艾荣,项海帆.悬臂施工中的刚构桥梁的风荷载计算方法[J].公路,1998(3).
- [4] 陈艾荣,项海帆.大跨刚构桥梁气动弹性试验及分析[J].振动工程学报,1999,12(4).
- [5] 王进军,李杰.桥上行人对车桥振动的可容忍性(或舒适度)的判断[J].铁道建筑,2003(7).
- [6] JTG/T D60—01—2004,公路桥梁抗风设计规范[S].
- [7] 同济大学土木工程防灾国家重点实验室.杭州下沙大桥抗风试验研究[R].上海:同济大学,2000.
- [8] 曹映泓.大跨度桥梁非线性颤振和抖振时程分析[D].上海:同济大学,1999.
- [9] 王文中,刘刚亮,顾金钧.虎门大桥辅航道桥悬臂施工阶段风致抖振的控制[J].桥梁建设,2002(5).

收稿日期:2018—04—10

标高,将该设计标高加上缆索吊装过程中的预抬高值即得到吊装过程的控制标高。

参考文献:

- [1] 张立永,程俊,杨晶晶,等.钢拱架裸拱线形及预抬高值迭代算法研究[J].公路交通技术,2014(3).
- [2] 张玉平,李传习,董创文.“零弯矩法”应用于斜拉扣挂索力确定的讨论[J].长沙交通学院学报,2004,20(1).
- [3] 田仲初.大跨度钢箱拱桥的施工控制关键技术与动力特性研究[D].长沙:中南大学,2007.
- [4] 张静静,张玉平,李传习,等.基于拱架—拱圈联合作用的钢拱架应力分析[J].公路与汽运,2016(5).

收稿日期:2018—02—06