

普立特悬索桥抖振响应时域分析

黄文锋¹, 邹孔庆^{1,2}, 孙建鹏³, 王美芹¹

(1 合肥工业大学, 安徽 合肥 230009; 2 中铁四局集团钢结构有限公司, 安徽 合肥 230022; 3 西安建筑科技大学, 陕西 西安 710055)

摘要: 普立特大桥是一座山区大跨悬索桥, 为高柔的风敏感结构。在分析抗风性能时, 利用 ANSYS 软件, 建立了普立特悬索桥的三维有限元模型, 分析了该模型的动力特性, 根据 Deodatis 的谐波合成法模拟了桥梁的随机脉动风场并进行了检验, 然后基于准定常理论计算了作用于模型上的抖振力时程, 自激力以单元气动刚度及阻尼矩阵的形式在 ANSYS 中以 Matrix27 矩阵输入, 最后由时程分析求得桥梁在考虑与不考虑自激力作用时的抖振响应。计算结果表明考虑自激力后主要改变了桥梁振动的平衡位置和在部分方向振动中起到正阻尼作用, 为同类桥梁的抗风设计计算提供参考。

关键词: 大跨度悬索桥; 风场模拟; 自激力; 抖振; 时域分析

中图分类号: TU352.2

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2015)03-0371-05

Buffeting response analysis of the suspension bridge in time domain

HUANG Wenfeng¹; ZOU Kongqing^{1,2}; SUN Jianpeng³; WANG Meiqin¹

(1. Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Steel Structure Co., Ltd., China Railway Siju Civil Engineering Group, Hefei 230022, China; 3. Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: PLT Bridge is a long-span suspension bridge in the hills which is a high-rise flexible and wind sensitive structure. Thus, the wind-resistant capacity must be considered for the bridge. The 3D finite element model of bridge was established by using ANSYS software, and its dynamic characteristics were then obtained. With spectral representation method proposed by Deodatis, fluctuating wind fields for the bridge were generated and validated. Then, the time-history of buffeting force was calculated by using the quasi-steady theory. The self-excited forces are considered in form of the element aerodynamic damping matrix and aerodynamic stiffness matrix with Matrix 27 in ANSYS. Finally, buffeting analysis with and without considering self-excited forces in time domain were calculated by using time history analysis. The results show that, when considering self-excited forces, it mainly changes the equilibrium position of bridge vibration and the positive damping effect can be found in some directions of the bridge. This study can provide reference for the wind-resistant design of similar bridges.

Key words: long span suspension bridge; wind field simulation; self-excited forces; buffeting; time domain analysis

普立特悬索桥位于云南省宣威市境内, 横跨深度近 400m 的普立大沟, 是普宣公路全线关键控制性工程之一。设计采用主桥 960 m 的双塔单跨悬索桥, 主桥跨径布置为 166+628+166 m。主缆横向布置两根, 主缆横桥向中心间距为 26 m。上部结构主桥采用 628 m 单跨简支箱钢加劲梁悬索桥, 普立岸主墩塔高 154.3 m, 宣威岸主塔高 162.2 m, 主缆边跨均为 166 m, 索塔采用直塔柱门式框架结构, 基础采用群桩基础, 普立岸采用隧道锚, 宣威岸采用重力锚。下部结构采用等截面钢筋混凝土矩形墩、群桩基础, 普立岸采用重力式桥台, 宣威岸采用肋板式桥台, 桥型布置如图 1 所示。



图 1 普立特悬索桥桥型布置图

Fig.1 PLT suspension bridge

大跨度桥梁属于轻柔结构。其风致振动会给过往车辆及行人安全带来很大影响, 容易引起桥梁结构局部构件的疲劳问题^[1], 有必要对其风致抖振问题进行研究。桥梁在随机风荷载作用下的响应计算主要包括频域法和时域法两类。频域分析方法较为简单, 但其需要计入一定数量的模态, 得到的响应值为数字特征, 并且只能进行线性分析。而时域法一般将结构进行有限元法离散后进行时程分析, 可以得到其各种响应的时程, 计算结果较为清晰简单, 同时可以深入理解各种非线性因素对大跨度桥梁空气动力特性的影响。国内外一些学者对大跨度桥梁结构非线性抖振时域分析都进行了较为深入的研究^[2]。但时域分析的不足之处在于公式分析求解难度较大, 采用数值分析需要较高的计算机内存, 耗时。但随着计算机技术的发展, 这些问题基本上都可以解决, 抖振响应时域分析法已经成为桥梁抗风设计研究的重要课题^[3]。

收稿日期: 2014-10-31

修改稿日期: 2015-05-31

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51408174);安徽省自然科学基金(1408085QE95);中国博士后科学基金第 54 批面上项目(2013M54051中央高校基本科研业务费专项基金(JZ2014HGBZ0049))

作者简介: 黄文锋(1982-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为风特性、结构抗风。E-mail: wfhuang@163.com

进行时域分析的核心是得到荷载时程,因而抖振力的随机模拟成为首先要解决的问题,目前采用的方法通常是根据已知的脉动风功率谱模拟得到对应的风速时程,再由准定常理论将风速转化抖振力时程,编写相应的循环加载抖振力数据的程序,并在 ANSYS 的 MATRIX27 单元加入气动刚度矩阵和气动阻尼矩阵考虑自激力作用^[4],最后利用 ANSYS 软件循环读入相应数据到桥梁结构节点上,求解动力方程,获取桥梁时域内的抖振响应分析结果.本文对云南普立特大桥的抖振响应的时域分析采用了与上述相同的分析方法.

1 脉动风模拟

本研究借鉴 George Deodatis 的谐波合成法模拟了云南普立特大桥处的空间脉动风场^[5,6].在该桥梁有限元模型上共设置 n 个风荷载施加点,对应的形成 n 维零均值平稳高斯随机过程向量 $f(t)$,如下所示:

$$f(t) = \{f_1^0(t), f_2^0(t), \dots, f_n^0(t)\}^T \quad (1)$$

其中第 j 条模拟脉动风速随机过程 $f_j^0(t)$ ($j=1,2,\dots,n$) 可用下式模拟 (当 N 趋于无穷大时):

$$f_j^0(t) = 2 \sum_{m=1}^j \sum_{l=1}^N |H_{jm}(\omega_{ml})| \sqrt{\Delta\omega} \cos[\omega_{ml}t - \theta_{jm}(\omega_{ml}) + \Phi_{ml}] \quad (2)$$

其中, N 为充分大的正整数; $\Delta\omega$ 为频率增量, 等于 ω_{up}/N , ω_{up} 为截止圆频率, 当 $\omega > \omega_{up}$ 时, $S^0(\omega)=0$; Φ_{ml} 为均匀分布于 $[0, 2\pi]$ 区间的随机相位角; $H_{jm}(\omega_{ml})$ 为矩阵 $H(\omega)$ 正的元素, $H(\omega)$ 是 $S^0(\omega)$ 的 Cholesky 分解, 其中 $S^0(\omega)$ 、 $H(\omega)$ 如下式 (3) 及 (4) 所示; $\theta_{jm}(\omega_{ml})$ 为 $H_{jm}(\omega_{ml})$ 的复角.

$$S^0(\omega) = \begin{pmatrix} S_{11}^0(\omega) & S_{12}^0(\omega) & \dots & S_{1n}^0(\omega) \\ S_{21}^0(\omega) & S_{22}^0(\omega) & \dots & S_{2n}^0(\omega) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{n1}^0(\omega) & S_{n2}^0(\omega) & \dots & S_{nn}^0(\omega) \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$H(\omega) = \begin{pmatrix} H_{11}(\omega) & 0 & \dots & 0 \\ H_{21}(\omega) & H_{22}(\omega) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{n1}(\omega) & H_{n2}(\omega) & \dots & H_{nn}(\omega) \end{pmatrix} \quad (4)$$

综上所述, 已知 $S^0(\omega)$, 适当选择 N 、 ω_{up} 、 Δt 就可以获得好的随机过程样本; 同时采用 FFT (傅里叶变换技术) 技术, 大大提高了该类方法的计算效率.

针对大跨度桥梁而言, 整个主梁基本处于同一高度, 可近似认为沿主梁布置的 n 个模拟点具有相同的平均风速和水平脉动功率谱.

$$S_{11}^0(\omega) = S_{22}^0(\omega) = \dots = S_{nn}^0(\omega) = S(\omega) \quad (5)$$

$$S_{jm}^0(\omega) = S(\omega) \text{Coh}(\Delta_{jm}, \omega) \quad (6)$$

$$(j, m = 1, 2, \dots, n, j \neq m)$$

其中: Δ_{jm} 为 j 、 m 两点间距离; $\text{Coh}(\Delta_{jm}, \omega)$ 为相干函数.

考虑到桥面上模拟点为等间距布置 (除主梁离桥墩较近的点, 但距离相差不大), 间距为 Δ , 则有 $\Delta_{jm} = \Delta |j - m|$. $\text{Coh}(\Delta_{jm}, \omega)$ 采用 Davenport 相干函数.

对主塔而言自然风的风速正交谱很弱, 一般可忽略, 故沿主塔高度上各点的互功率谱表达式为 ($j \neq m$):

$$S_{jm}^0(\omega) = \sqrt{S_{jj}^0(\omega) S_{mm}^0(\omega)} \text{Coh}(\Delta_{jm}, \omega) \quad (7)$$

$$(j, m = 1, 2, \dots, n, j \neq m)$$

2 抖振力计算

模拟得到脉动风速时程后, 就可将其转化为作用于结构上的风荷载时程. 通常将风致风荷载分为三部分: 平均风引起的静风力、脉动风引起的抖振力和气动耦合产生的自激力, 其中静风力计算公式可参见文献 [7], 自激力计算公式见下文, 抖振力的计算公式参见文献 [8], 具体来说脉动风作用下桥梁单位展长的抖振力计算公式如下所示:

$$L_b(t) = \frac{1}{2} \rho U^2 B [2C_L \frac{u(t)}{U} + (C'_L + C_D) \frac{w(t)}{U}] \quad (8)$$

$$D_b(t) = \frac{1}{2} \rho U^2 B [2C_D \frac{u(t)}{U} + (C'_D - C_L) \frac{w(t)}{U}] \quad (9)$$

$$M_b(t) = \frac{1}{2} \rho U^2 B^2 [2C_M \frac{u(t)}{U} + C'_M \frac{w(t)}{U}] \quad (10)$$

其中: $L_b(t)$ 、 $D_b(t)$ 、 $M_b(t)$ 分别为在初始风轴坐标系下的气动升力、阻力及扭矩; ρ 为空气密度; U 为设计基准风速; B 为桥梁主梁的计算宽度; $u(t)$ 、 $w(t)$ 分别为顺风向及垂直向脉动风速; C_D 、 C_L 、 C_M 和 C'_D 、 C'_L 、 C'_M 分别为主梁初始风攻角方向上的气动阻力、升力和扭矩系数及其导数. 为便于在有限元中实现, 常将抖振力转换为节点坐标系下的节点集中力, 采用集中法, 将单元上的三分力堆积到节点上, 以集中力的形式施加到有限元模型上, 其风轴坐标系的抖振力的转换节点坐标系关系如下所示:

$$F_y = D_b(t) \sin(\alpha_0) + L_b(t) \cos(\alpha_0) \quad (11)$$

$$F_z = D_b(t) \cos(\alpha_0) - L_b(t) \sin(\alpha_0) \quad (12)$$

$$F_M = M \quad (13)$$

其中: F_y 、 F_z 、 F_M 分别为节点坐标系下的抖振力项, α_0 为初始风攻角.

对于主塔和桥墩, 仅考虑其抖振阻力的作用, 单位长度上的主塔抖振阻力的表达式为

$$F_{z,b}(t) = \rho U u(t) B_z C_D \quad (14)$$

其中, B_z 为桥塔和桥墩在迎风面的投影面积; C_D 为主塔的阻力系数.

为便于计算, 通常将实际非线性的抖振力进行准定常假设下的线性化处理, 忽略其中小量的耦合作用, 虽然对结构计算精度有所影响, 但对一般桥梁而言计算精度是满足要求的.

3 自激力计算

自激力是风场和弹性体之间的相互作用. 为方便在 ANSYS 中实现, 此处采用曾宪武等人在 Miyat^[9] 准定常气动模型基础上, 通过进行双泰勒级数展开导出的 12 阶气动刚度矩阵和气动阻尼矩阵来表达自激力^[10].

$$\begin{aligned} F_y(t) = & \frac{1}{2} \rho U^2 H C_D + \frac{1}{2} \rho U^2 H B \\ & \left\{ 2 \frac{H}{B} \cdot C_D \frac{u(t)}{U} + \frac{w(t)}{U} \cdot \left[\frac{H}{B} \cdot C_D' - C_L \right] \right\} \\ & - \frac{1}{2} \rho U B \left\{ 2 \frac{H}{B} C_D \dot{y}(t) + \left[\frac{H}{B} C_D' - C_L \right] \dot{z}(t) \right. \\ & \left. + U \frac{H}{B} \theta C_D' - m_l \dot{\theta} \left[\frac{H}{B} C_D' - C_L \right] \right\} \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} F_z(t) = & \frac{1}{2} \rho U^2 H C_L + \frac{1}{2} \rho U^2 B \\ & \left\{ 2 C_L \frac{u(t)}{U} + \frac{w(t)}{U} \left[\frac{H}{B} C_D + C_L' \right] \right\} - \frac{1}{2} \rho U B \\ & \left\{ 2 C_L \dot{y}(t) + \left[\frac{H}{B} C_D + C_L \right] \dot{z}(t) \right. \\ & \left. + U \theta C_L' - m_l \dot{\theta} \left[\frac{H}{B} C_D - C_L' \right] \right\} \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} M_x(t) = & \frac{1}{2} \rho U^2 B^2 C_M + \frac{1}{2} \rho U^2 B \\ & \left(2 B C_M \frac{u(t)}{U} + \frac{w(t)}{U} B C_M' \right) - \frac{1}{2} \rho U B \\ & \left\{ 2 B C_M \dot{y}(t) + B C_M' \dot{z}(t) + U B \theta C_M' - m_l \dot{\theta} B C_M' \right\} \end{aligned} \quad (17)$$

其中: $\dot{y}(t)$ 、 $\dot{z}(t)$ 、 $\dot{\theta}$ 分别为主梁截面处的速度和

角速度; m_l 为主梁的特性长度.

从而, 单位展长主梁截面上的自激力表示为

$$F_{ae}(t) = -K^0 \delta(t) - C^0 \dot{\delta}(t) \quad (18)$$

式中: K^0 、 C^0 为单位展长气动刚度、阻尼矩阵, 其具体表达式见曾宪武等人的研究^[11]; $\delta(t)$ 、 $\dot{\delta}(t)$ 为单元位移向量以及速度向量.

利用 ANSYS 的自定义单元 Matrix27^[4], 可以直接定义质量、刚度、阻尼矩阵, 各矩阵的参数作为实常数来输入, 气动自激力属于非保守力, 采用的是非对称矩阵. 气动刚度矩阵和阻尼矩阵要分别建立单元, 不能共用一个 Matrix27 单元. 主梁跨中区域施加各参数值为端部四个单元 (分别为两个气动刚度矩阵和气动阻尼矩阵) 的两倍.

4 抖振响应分析

4.1 建模及风荷载

对结构进行有限元离散, 有主缆、吊索、主塔、加劲主梁、桥墩等组成. 主缆和吊索采用 Link8 单元模拟, 主塔和桥墩采用 Beam4 单元模拟, 加劲主梁采用 Beam4 单元模拟, 主梁与主塔连接采用弹簧-阻尼单元 Combin14 和 Mass21. 利用 ANSYS 软件建立了其三维有限元模型, 全桥模型共有 908 个节点, 869 个单元, 其中主缆单元 164 个, 吊索单元 102 个, 主塔和桥墩单元 336 个, 主梁单元 152 个, 其它的均为质量元. 主梁采用空间鱼刺模型, 刚性鱼骨刺横梁和主塔通过主缆连接横梁. 此全桥空间有限元模型如图 2 所示. 在悬索桥结构的仿真模拟中, 主梁节点和吊索吊点采用刚性连接模拟, 桥塔与主缆间采用刚性连接, 主梁与桥塔采用弹性连接. 顺桥向采用有阻尼约束方式模拟, 全桥结构的边界条件为两个桥塔的底部完全固结, 主缆在两侧锚定固结, 在塔顶固结对于大跨度悬索桥而言, 以恒载下的非线性静力分析为基础, 动力响应是以恒载变形后的状态下分析的, 目的是验证结构处于平衡状态时的几何位置是否合理.

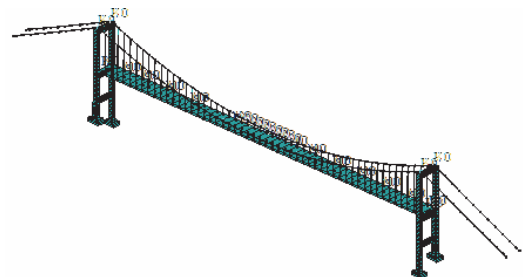


图2 全桥有限元模型

Fig.2 Finite element model of PLT suspension bridge

对大跨度悬索桥进行动力特性分析得到其前十阶振型如表 1 所示. 由表可知, 普立特悬索桥的

基本周期为 8 s 左右,表现为主梁侧向漂移和反对称竖弯,频率主要分布在 0.12~1 Hz 内,其分布较为密集,同时桥塔振动为主的振型出现较晚如桥塔反对称侧弯在 31 阶发生,频率约为 0.84 Hz,故桥梁的动力特性主要表现为前几阶振型.

表 1 桥梁的自振频率及振型
Table 1 Frequencies and modes of bridge

| 模态 | 频率f/Hz | 振型特性 | 模态 | 频率f/Hz | 振型特性 |
|----|--------|------------|----|--------|----------|
| 1 | 0.121 | B-A-VB+M-1 | 6 | 0.394 | B-A-VB-2 |
| 2 | 0.137 | B-S-TB-1 | 7 | 0.399 | B-S-T-1 |
| 3 | 0.174 | B-A-VB-1 | 8 | 0.409 | C-S-TB-1 |
| 4 | 0.226 | B-S-VB-1 | 9 | 0.424 | C-A-TB-1 |
| 5 | 0.306 | B-S-VB-2 | 10 | 0.428 | C-S-TB-2 |

注: B=主梁; C=主缆; S=对称; A=反对称; VB=竖弯; TB=横弯; T=扭转; M=漂移;

利用前述介绍的脉动风速的谐波合成法,采用 Matlab 编制相应脉动风模拟程序,对本桥主要的模拟参数如表 2 所示. 相干函数 $Coh_{ij}(\omega)$ 如图 3 所示. 从图中可以看出,相关函数对其频率的敏感度较强,当空间间距一定时,频率越小,其相关函数越大.

表 2 脉动风场模拟主要参数
Table 2 Main parameters for fluctuating wind simulation

| | | | |
|---------------|--|---------|-------------|
| 跨度 | 628 m | 主梁离地高度 | 73.6~83.6 m |
| 塔高 (左右) | 154.3 m 162.2 m | 地表粗糙高度 | 0.05 |
| 场地类型 | IV | 风剖面指数 | 0.16 |
| 基准风速 U_{10} | 28.57 m/s | 孔间模拟点数 | 74 |
| 截止频率 | 2π | 频率等分数 | 1 024 |
| 时距时间 | 0.5s 1 000s | FFT变换点数 | 2 048 |
| 目标谱和 相干函数 | 顺风向、垂直向脉动风均采用Kaimal谱 ^[7] , 采用Davenport相干系数 | | |

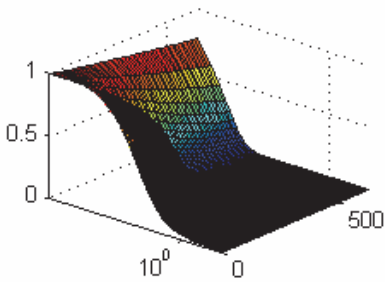


图 3 空间相干函数 $Coh_{ij}(\omega)$
Fig.3 Spatial coherence function $Coh_{ij}(\omega)$

模拟得到的主梁顺风向及垂直向脉动风速时程结果如图 4 所示. 模拟得到的垂直向脉动风速功率谱与目标谱的对比如图 5 所示. 通过对比可知,数值模拟得到的风场与目标吻合较好,验证了模拟方法和所编写模拟程序的可靠性及有效性.

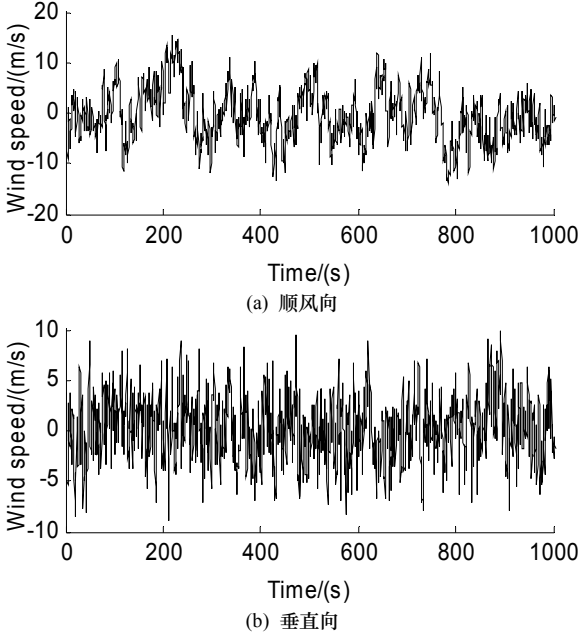


图 4 主梁跨中点模拟得到的顺风向、垂直向脉动风速时程
Fig.4 Time history of simulated longitudinal and vertical fluctuating wind speeds at middle point of the main span

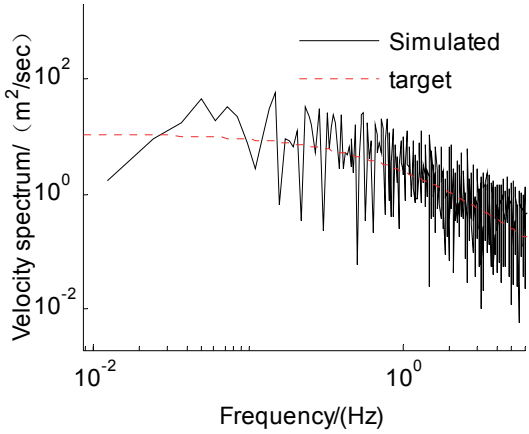


图 5 主梁跨中点垂直向脉动风速功率谱对比
Fig.5 Comparison of fluctuating wind spectrum at the middle point of main span

4.2 计算结果分析

脉动风速时程模拟完成后,采用基于准定常理论的抖振力计算公式,就可以将风速时程转化为作用于桥梁的等效抖振力时程,此过程通过在 Matlab 软件中生成数据文本并考虑节点的等效迎风面积,并利用 ANSYS 中的 APDL 进行二次开发即可实现,其中主梁在风轴坐标系下的气动三分力系数如图 6 所示. 结构的自激力分析采用 ANSYS 自带的 MATRIX27 单元输入其气动刚度矩阵和气动阻尼矩阵的参数完成. 计算中分别考虑了-12°~12°共 25 种工况,此处仅以 0°工况为例进行结果分析. 将得到的抖振力时程施加于该桥的有限元模型,编写相应的循环加载批量数据和后处理程序,计算时间取 1000s,分别计算了考虑与不考虑自激力作用时该桥的抖振响应,结果如图 7 所示. 计算中考虑结构的

几何非线性的因素,对此桥而言,几何非线性主要来源于缆索的垂度效应、结构初应力和结构大变形三个因素的影响,采取措施是在 ANSYS 中打开几何大变形开关 (Nlgeon, on)、应力刚化 (Stress stiffening)、更变坐标 (upcoord, 1, on), 并采用的 Newmark- β 方法计算桥梁的抖振响应。

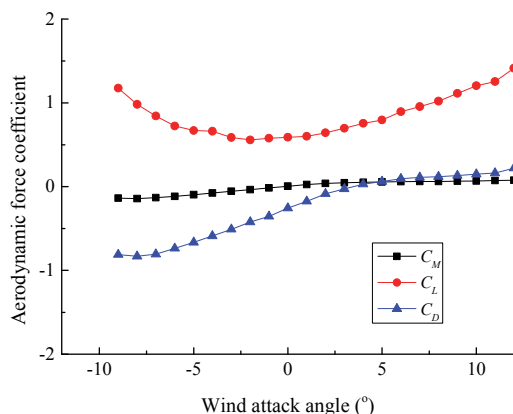
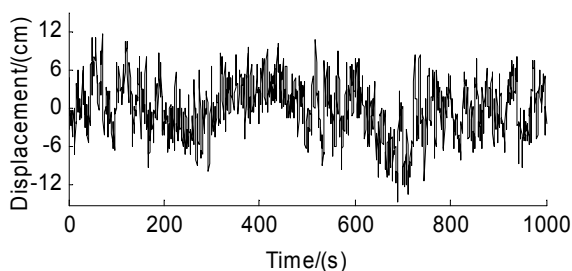
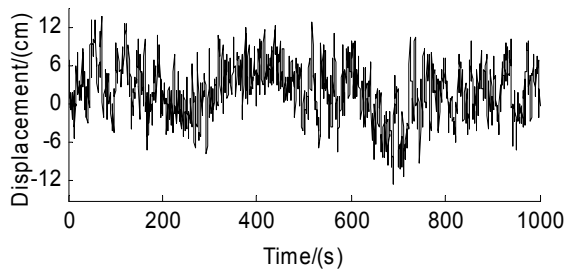


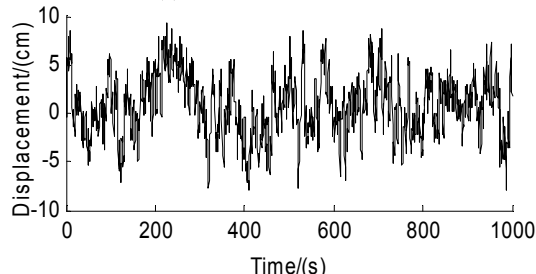
图6 普立特悬索桥气动三分力系数
Fig.6 Aerodynamic coefficients of Pu Li Te bridge



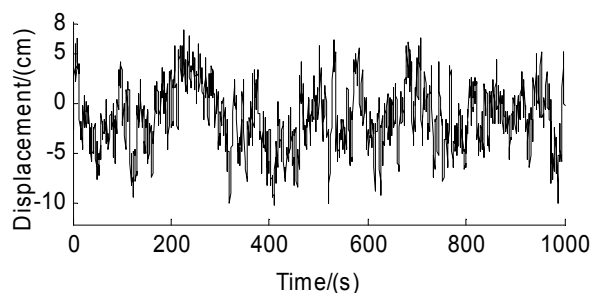
(a) 垂直向 (未考虑自激力)



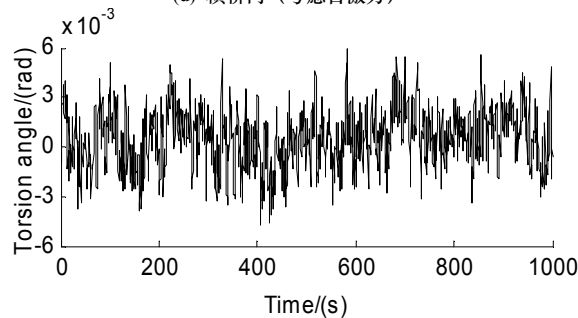
(b) 垂直向 (考虑自激力)



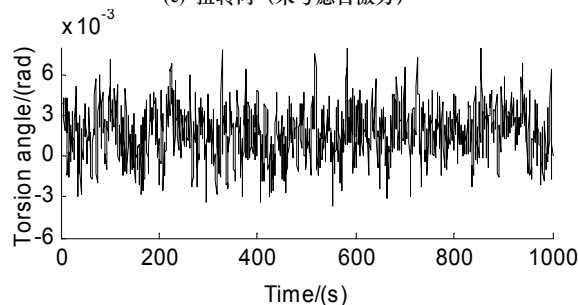
(c) 横桥向 (未考虑自激力)



(d) 横桥向 (考虑自激力)



(e) 扭转向 (未考虑自激力)



(f) 扭转向 (考虑自激力)

图7 考虑和不考虑自激力作用下主梁跨中点的抖振响应
Fig.7 Buffeting responses at the middle point of main span with and without considering self-excited forces

由图可知,不考虑自激力作用时,主梁跨中节点处的垂直向、横桥向及扭转向抖振位移均以零为均值上下波动.通过对计算结果进行统计可知横桥向位移响应的均方差为 6.12 cm 比垂直向位移响应的均方差 5.08 cm 大 20% 左右.考虑自激力作用时,垂直向位移响应均值有下降的趋势,振动幅度也略有下降,此时自激力起到微弱的正阻尼作用.横桥向及扭转向位移响应均值均略有上升的趋势,但整体振动幅度变化不是很明显.总之,对本桥考虑了自激力作用后,较为明显的作用是改变了桥梁振动的平衡位置,但自激力所起到的正阻尼作用效果不明显。

6 结论

本文根据普立特大跨度悬索桥的结构形式特点,结合脉动风相关特性,利用 Deodatis 的谐波合成法,很方便的对普立特大跨度悬索桥的脉动风场进行了模拟,并对模拟效果进行了检验,验证了所采用模拟方法和所编模拟程序的可靠性及有效性。

(2) 试件整体侧移角可达 $1/42$; 结构整体的延性系数约为 3.8, 表明该种结构具有良好的塑性变形能力; 试件具有较好的初始抗侧刚度, 但刚度退化较为严重, 弹性阶段损失约 40%, 破坏时损失约 80%~90%。

(3) 试件破坏顺序为内嵌钢板屈曲、屈服, 边缘构件屈服, 内嵌钢板撕裂, 边缘构件屈曲, 节点

转动, 边缘构件弯扭失稳, 节点塑性破坏。节点转动对结构的承载力影响很小, 同时避免了刚性节点在强震下的脆性破坏, 采用半刚性节点合理。

(4) 半刚性节点框架-钢板剪力墙结构的阻尼比在弹性阶段为 0.023, 弹塑性极限状态为 0.085, 高于 CB 50011-2010 对高层钢结构的要求。

参考文献

- [1] EN1993 Eurocode3 Design of Steel Structures Part 1-8: Design of joints[S]. Bruxelles: European Convention for Constructional Steelwork, 1993.
- [2] ANSI/AISC 360-05 Specification for structural steel buildings[S]. Chicago: American institute of Steel Construction, INC, 2005.
- [3] GB50017-2003 钢结构设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2010.
GB50017-2003 Code for design of steel structures[S]. Beijing: China Planning Press, 2010.
- [4] 解琦, 郝际平, 于金光. 半刚性框架-钢板剪力墙体系性能研究[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(S1), 12-17.
XIE Qi, HAO Jiping, YU Jinguang. Behavior of semi-rigid frame with steel plate shear wall[J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(S1), 12-17.
- [5] 于金光, 郝际平. 腹板双角钢连接框架-非加劲薄钢板剪力墙抗震性能试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2011, 31(1): 84-90.
YU Jinguang, HAO Jiping. Experimental study on seismic behavior of double web-angle connected steel frame-unstiffened steel plate shear wall structure[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration 2011, 31(1), 84-90.
- [6] GB/T228.1-2010 金属材料室温拉伸试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
GB/T228.1-2010 Metallic materials Tensile testing at ambient temperature[S]. Beijing: China Standard Press, 2010.
- [7] GB/T2975-1998 钢及钢产品力学性能试验取样位置及试样制备[S]. 北京: 中国标准出版社, 1998.
GB/T2975-1998 Steel and Steel Products-Location and Preparation of Test Pieces for Mechanical Testing[S]. Beijing: China Standard Press, 1998.
- [8] JGJ101-1996 建筑试验抗震方法规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
JGJ101-1996 Specification of Testing Methods for Earthquake Resistant Building[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1997.
- [9] JGJ99-2012 高层民用建筑钢结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
JGJ99-2012 Technical Specification for Steel Structure of Tall Building[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [10] GB50011-2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
GB50011-2010 Code for seismic design of buildings[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.

(编辑 桂智刚)

(上接第 375 页)

通过利用 ANSYS 软件完成了脉动风作用下普立特大跨度悬索桥桥梁考虑与不考虑自激力作用时的抖振响应计算。通过研究发现, 考虑与不考虑自激力时计算得到的该桥抖振响应的振动幅度变化不大, 主要作用在于改变了桥梁振动响应的平衡位置, 自激力在局部方向(垂直向)的响应起到正阻尼的作用, 另外, 横向向桥梁抖振位移响应的均方差比垂直向大 20%左右。整体来看, 从桥梁抖振位移响应时程可以获取比较全面的结构抖振力变形信息, 为类似桥梁的抗风设计提供参考。

参考文献

- [1] 李小珍, 蔡倩, 强士中. 芜湖长江大桥主跨斜拉桥列车走行安全性与舒适性[J]. 交通运输工程学报, 2002, 2(3): 34-40.
LI Xiaozhen, CAI Jing, QIANG Shizhong. Train running safety and comfort analysis of the cable-stayed bridge on Wuhu Yangtze-river Bridge [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2002, 2(3): 34-40.
- [2] DING Quanshun. Computer simulation of buffeting actions of suspension bridges under turbulent wind [J]. Computers and Structures, 2000, 76(6): 787-797.
- [3] 项海帆, 陈艾荣. 特大跨度桥梁抗风研究的新进展[J]. 土木工程学报, 2003, 36(4): 1-8.
XIANG Haifan, CHEN Airong. Recent advances in research on aerodynamics of extra long span bridges [J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(4): 1-8.
- [4] ANSYS Inc. Theory reference and ANSYS APDL programmer's guide [M]. <http://www.ansys.com.cn>
- [5] ROSSI R, LAZZARI M, VITALIANI R. Wind field simulation for structural engineering purposes [J]. Numerical Methods in Engineering, 2004, 61(5): 738-763.
- [6] DEODATIS G. Simulation of ergodic multivariate stochastic processes[J]. Engineering Mechanics, 1996, 122(8): 778-787.
- [7] HOLMES J D. Wind Loading of Structures[M]. 2nd ed. Taylor & Francis, Abingdon, 2007.
- [8] SARKAR P P, JONES N P, SCANLAN R H. Identification of aeroelastic parameters of flexible bridge [J]. Engineering Mechanics, 1994, 120 (8):1718-1741.
- [9] MIYATA T, YAMADA H, BOONYAPINYO V, et al. Analytical investigation on the response of a very long suspension bridge under gusty wind, Proc., 9th Int. Conf. on Wind Engineering, New Delhi, India, 1995, 1006-1017.
- [10] 曾宪武, 韩大建. 大跨度桥梁风致抖振时域分析及在 ANSYS 中的实现[J]. 桥梁建设, 2004(1): 9-12.
ZENG Xianwu, HAN Dajian. Time-domain analysis of wind-induced buffet on long-span bridges and implementation of analysis in ANSYS [J]. Bridge Construction, 2004(1): 9-12.

(编辑 吴海西)