

# K型圆管相贯节点的滞回性能分析及试验

王秀丽<sup>1</sup>, 康露<sup>1</sup>, 杨文伟<sup>1,2</sup>

(1. 兰州理工大学 土木工程学院, 兰州 730050; 2. 宁夏大学 土木与水利工程学院, 银川 750021)

**摘要:**节点作为空间结构最重要的组成部分,其在反复荷载作用下的荷载—变形曲线(滞回曲线)是对其延性、耗能能力、强度、刚度等力学性能的综合反映。对K型搭接相贯节点内隐藏焊缝焊与不焊两种模型在弦杆轴向往复荷载作用下进行试验研究和有限元模拟计算,对比分析得到节点试件的破坏模式和滞回曲线,同时有限元模拟分析所得结果和试验所得结果较为吻合。结果表明:隐藏焊缝焊接节点破坏时是局部的,最终是搭接管在焊缝处被拉断;不焊节点的破坏模式是焊缝整体破坏,隐藏焊缝不焊对节点承载力的影响不能忽视。通过有限元模拟分析来代替相贯节点滞回性能试验是可行的。

**关键词:**K型搭接节点;滞回曲线;破坏特征;试验研究;有限元分析

**中图分类号:**TU392.3

**文献标志码:**A

**文章编号:**1674-4764(2012)S1-0094-05

## The Hysteretic Performance Analysis and Experiment on K-type Overlap Joints of Circular Steel-tubes

WANG Xiuli<sup>1</sup>, KANG lu<sup>1</sup>, YANG Wenwei<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

**Abstract:** Joints are the most important parts of the space structure, the load-deformation curve (hysteretic curve) under repeated loading is the comprehensive reflection of their mechanical properties such as ductility, energy dissipation capacity, strength, stiffness and so on. By the simulation experiment analysis and the finite element simulation between the two models of hidden welding and no-welding hidden in K-type node in the chord axial reciprocating load resulted in the failure modes and hysteretic curve, the result of comparative analysis about finite elements is consistent with that of experiment study. The results show that the destruction at hidden welding seam node is partly, the take-over is broken down at the welds finally. The welding line is destroyed overall when facing the destruction of no-welding node. The carrying capacity of the hidden welding is obvious. Through the finite element simulation analysis instead of phase through node hysteretic performance test is feasible.

**Key words:** K-type overlap joints, hysteretic curve, destruction features, experimental study, finite element analysis

钢管结构因其良好的力学性能、优美的外观和相对低廉的造价,已在建筑工程中得到了越来越广泛的应用。它将结构和建筑协调统一,因此,近年来,该结构形式普遍应用于我国大跨度空间结构。在众多的大跨度空间结构形式中,钢管直接相贯连接的钢管桁架结构越来越受到设计师的青睐。平面K型圆钢管搭接相贯节点以其耗钢量低、受力性能好、承载力大、工艺专业化等诸多优点,日趋成为钢管结构中最主要的节点形式之一。节点作为结构的关键部位,其静力承载力及滞回性能的研究具有重要的现实意义。本文以节点滞回性能试验研究为基础,结合ANSYS有限元分析计算,研究平面K型圆钢管搭接相贯节点内部隐藏焊缝的施焊与不焊两种情况对节点承载力及滞回性能的影响,同时验证了有限元模拟方法的可靠性。

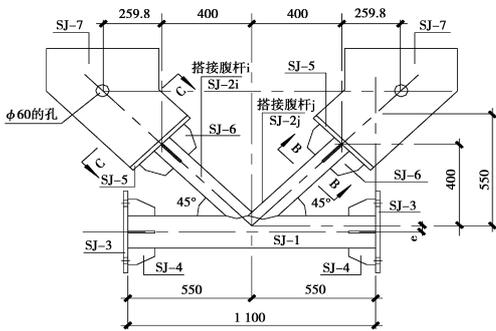
### 1 试验方案

#### 1.1 试件设计

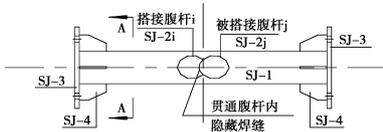
平面K型圆钢管搭接相贯节点试验试件的几何形式及尺寸规格如图1所示,现场试验加载图如图2所示,试验试件外观模式如图3所示。

#### 1.2 试验加载方式

为配合试验研究,结合有限元程序功能建立了图4所示边界条件,主管两端均采用滑动固定支座,可沿轴向移动,两支管端部均采用铰接,仅可在铰接平面内转动,其余均约束。试验加载机制为:①空载→②加载至控制荷载步→③持荷15 min后→④卸载完成→⑤卸载后15 min→⑥开始反向加载,依次往复循环。有限元模型的约束加载方式同于试验。



K-YH(YN)搭接节点主视图 1:50



K-YH(YN)搭接节点俯视图 1:50

试件编号	加工数量	D × T	d × t	e	h <sub>r</sub>	无量纲参数				
						$\theta$	$\beta$	$\gamma$	$\tau$	0 <sub>v</sub> %
K-YH01	1	159 × 6	94 × 5	-30	8	45°	0.59	13.25	0.83	25.5%
K-YN01	1	159 × 6	94 × 5	-30	8	45°	0.59	13.25	0.83	25.5%
K-YH02	1	159 × 6	89 × 4	-35	8	45°	0.56	13.25	0.67	29.3%
K-YN02	1	159 × 6	89 × 4	-35	8	45°	0.56	13.25	0.67	29.3%

注:腹杆在弦杆上相贯焊接,其相贯线焊缝示意如图。  
 对于YH试件,加工时现在主管上焊管,然后再焊管;  
 对于YN试件,先将j、i试件组装就位后整体进行焊接;

图 1 节点试验试件几何形式及规格尺寸

说明:1.图中尺寸均以 mm 计;2.材料:Q235 钢管,E43 焊条,全熔透焊接,焊缝高度 8 mm;3.试件加工成后,焊缝及周边打磨,不刷漆,并在试件上表明隐藏焊接不焊接字样。



图 2 现场试验加载图



图 3 试验试件

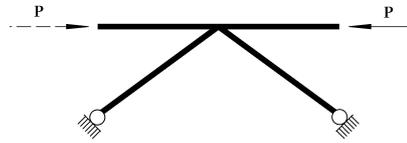


图 4 约束加载方式

## 2 有限元分析

### 2.1 模型建立及网格划分

ANSYS 有限元模型分析中所用钢材的材料性能参数与试验试件的材料性能参数相一致,腹杆在弦杆上相贯焊接。其中,对于 YH 试件先将支管焊在主管上然后再焊接搭接支管;对于 YN 试件,先将两支管焊接,然后再焊接到主管上。节点有限元模型如图 5~9 所示。

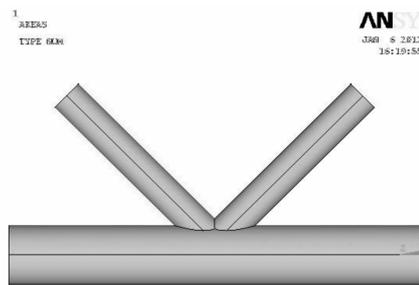


图 5 平面 K 型节点的有限元模型

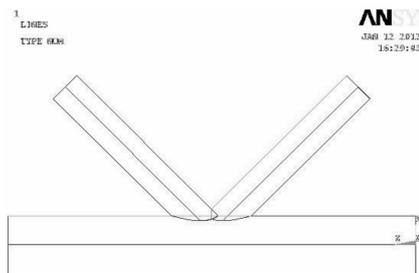


图 6 平面 K 型 YHK 节点的主视图

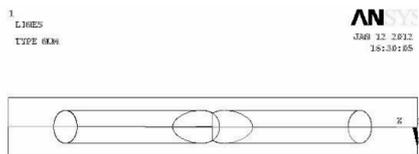


图 7 平面 K 型节点 YHK 的俯视图

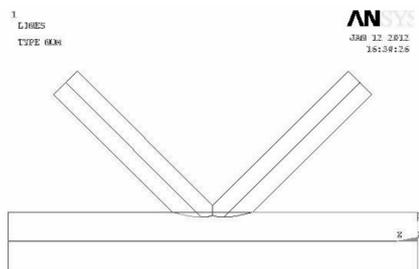


图 8 平面 K 型节点 YNK 的主视图

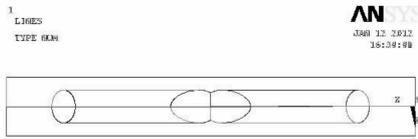


图 9 平面 K 型节点 YNK 的俯视图

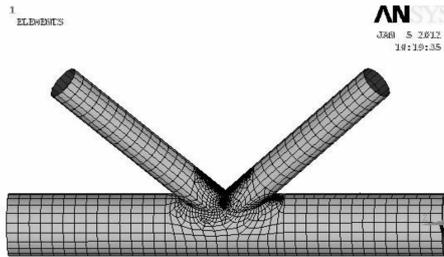


图 10 平面 K 型节点的网格图

## 2.2 单元类型及网格划分

对 K 形搭接节点计算模型均采用 ANSYS 单元库中的四节点、弹塑性 SHELL181 单元, 该单元每个节点有 6 个自由度(三个线自由度和三个转动自由度)。单元数在 15 000~30 000 之间, 网格划分时, 采用智能网格划分和人工调整相结合, 根据圣维南原理距离相贯线较远的弦杆、腹杆管壁采用较粗一些的人工映射网格, 而相贯线附近的管壁采用自由网格划分, 节点模型的网格划分见图 10。

## 2.3 求解设置

选用 Q235 钢, 材料的弹性模量取 206 GPa, 泊松比取 0.3, 屈服强度为 235 MPa。材料塑性按双线性等向强化考虑, 材料的屈服遵循 Von Mises 屈服准则及相关的流动法则, 求解时使用非线性求解器, 同时考虑几何非线性和材料非线性, 将牛顿拉菲逊方法(Newton-Raphson)和线性搜索技术(Line Search), 应用预测(Predictor)、自适应下降(Adaptive Descent)等加速收敛的技术有机结合, 对非线性平衡方程进行求解。为简化计算过程, 本文没有考虑节点区残余应力对钢管节点极限承载力的影响。

# 3 计算结果及分析

## 3.1 Von Mises 应力

对于 K 型节点而言, 破坏主要发生在主管与支管连接焊缝处, 节点根部弦杆管壁局部屈曲破坏, 但是内隐藏焊缝焊与不焊两者的塑性区域与应力发展程度有所不同, 当达到破坏时, 两者弦杆的塑性扩展及应力发展有一定差别。图 11~18 显示了 YHK 和 YNK 在钢管屈服和节点破坏时的应力云图, 图中黑色区域为进入屈服时的区域。

通过应力云图对比, 可以看出 K 型搭接相贯节点在内隐藏焊缝焊与不焊时屈服和破坏都是从焊缝的根部开始的, YHK 最早的屈服点出现在搭接支管的根部, 而且随着荷载的增大, 搭接支管的屈服面积逐渐增加直到整个节点破坏, 屈服点过后随着荷载的增加直到破坏这个过程搭接支管的变形比较大, 被搭接支管变形不是很明显, 最后是搭接支管大面积变形使整个节点失效。试验中 YHK 破坏时的状态是搭接支管直接从焊缝根部断裂, 被搭接支管和主管的变形相对来说不是很大。YNK 的屈服点出现在焊缝中间, 而且随着

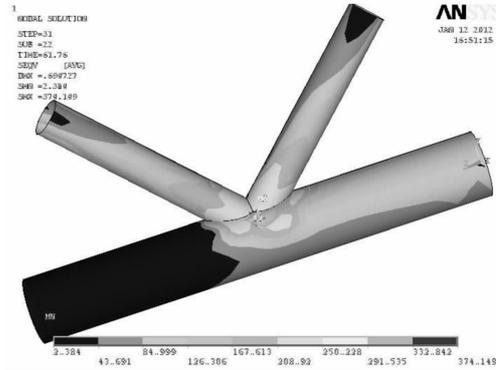


图 11 YHK 屈服应力云图

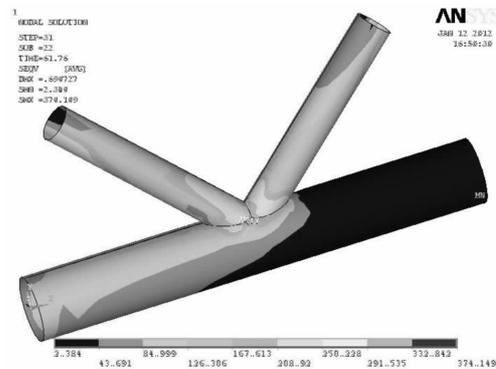


图 12 YHK 屈服应力云图(绕 X 轴旋转 180°)

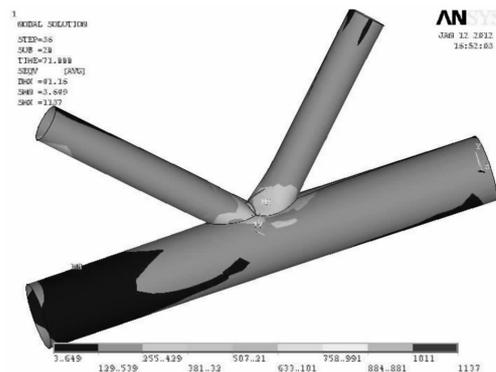


图 13 YHK 破坏应力云图

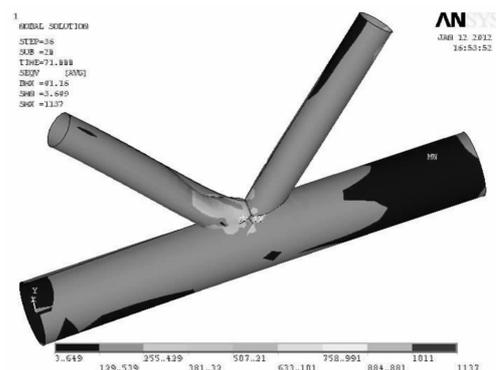


图 14 YHK 破坏应力云图(绕 X 轴旋转 180°)

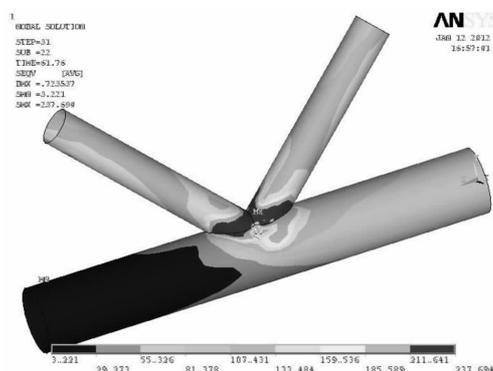


图 15 YNK 屈服应力云图

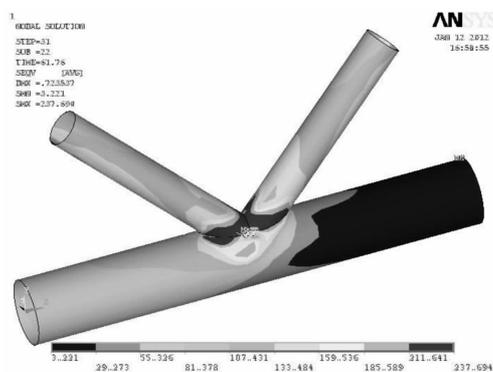


图 16 YNK 屈服应力云图(绕 X 轴旋转 180°)

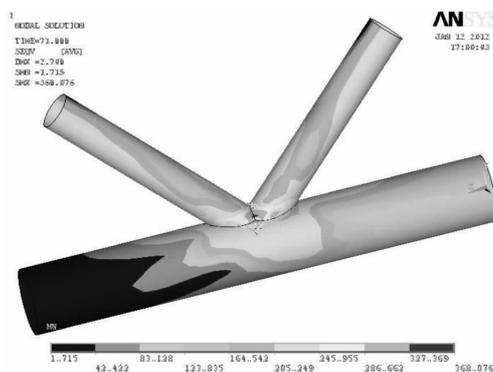


图 17 YNK 破坏应力云图

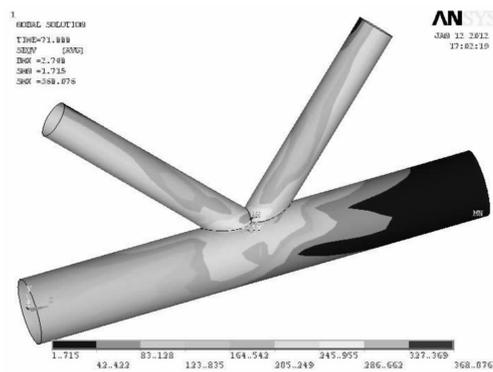


图 18 YNK 破坏应力云图(绕 X 轴旋转 180°)

的破坏。从应力云图直观的看到 YHK 的延性显然比 YNK 的延性好。

### 3.2 滞回性能及承载力

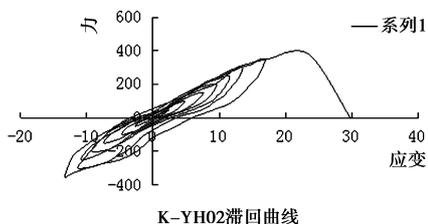


图 19 试验 YHK 节点滞回曲线图

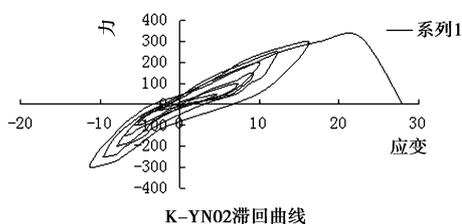


图 20 试验 YNK 节点滞回曲线图

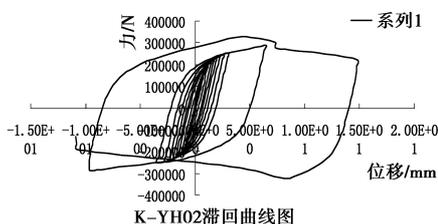


图 21 有限元模拟分析 YHK 节点滞回曲线图

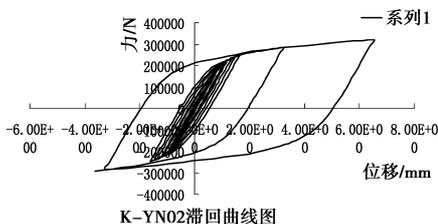


图 22 有限元模拟分析 YNK 节点滞回曲线图

通过有限元滞回曲线的对比可知 YHK 的极限承载力比 YNK 的极限承载力高, YHK 破坏时的极限承载力是 326 KN, YNK 破坏时的极限承载力是 318 KN, 这和试验所得结果相吻合, 试验中 YHK 的极限承载力是 340 KN, YNK 的极限承载力是 330 KN。通过对比分析可以清晰的看到, 试验构件的内隐藏焊缝不焊时承载力明显下降, 有限元模型计算分析也有同样的结果。从滞回曲线可以看到 YHK 的曲线比 YNK 的曲线饱满, 因此 YHK 的耗能能力也相对强。

### 3.3 节点延性

从位移对比表里可以看到随着荷载的增加, YHK 的位移增加的速度比 YNK 的位移增加的速度越来越快, 到屈服点时 YHK 的位移大约是 YNK 的位移的两倍, 这更进一步说明了 YHK 的延性比 YNK 的延性好。

荷载的增加慢慢扩展, 两支管屈服面积扩大程度基本一致, 直到整个焊缝整体破坏, 试验中试件破坏模式也是整体焊缝

表 1 主管杆端轴向位移

时间/点	6.00	10.00	14.00	20.00	26.00	30.00	38.00	40.00	46.00	50.00	60.00
YHK	0.248	0.331	0.417	-0.501	0.687	0.803	1.199	-1.188	1.719	1.9526	-2.766
YNK	0.230	0.307	0.385	-0.463	0.634	0.720	0.902	-0.928	1.147	1.2089	-1.466

## 4 结论

本文在试验的基础上采用 ANSYS 有限元软件,对直接焊接平面 K 型圆钢管搭接节点隐藏焊缝焊与不焊在往复荷载下的滞回性能进行分析,发现隐藏焊缝焊与不焊对节点承载力有比较明显的影响:

1)在同等加载受力条件下,YHK 节点破坏时节点的极限承载力高于 YNK 节点的极限承载力,试验数据得出 YHK 的极限承载力比 YNK 极限承载力高出 3%左右,有限元模拟分析得出该数据 2.52%。

2)同等条件下 YHK 的延性相对好一些。随着承载力的增大,变形速度的增大程度也不一样,到最后 YHK 的位移大约是 YNK 位移的两倍左右,从滞回曲线的饱满度可以看到 YHK 节点在耗能方面也比 YNK 节点的好。

3)ANSYS 模拟计算结果和试验实测结果吻合较好,说明相贯节点的滞回性能的试验通过有限元模拟试验分析是可行的,同时验证了本次试验的有效性。进一步说明 ANAYS 软件的精确性和广泛的可应用性。

## 参考文献:

- [1] 陈绍蕃. 钢结构设计原理[M]. 北京:科学出版社,2002.
- [2] European Committee for Standardization. BSEN1993-1-8 design of Steel Structure[S]. Englang: Civil Engineering Corp,2005.
- [3] 刘建平. 钢管相贯节点的研究现状和动向[J]. 钢结构,2003,18(4): 13-15,28.  
LIU Jianping. The status and trend of research on steel tubular intersecting joints[J]. Steel Construction, 2003, 18(4): 13-15,28.
- [4] 詹琛. 空间直接焊接圆钢管节点足尺试验研究[D]. 上海: 同济大学,2000.

(上接第 91 页)

## 6 结论

通过风洞试验获得斜风下不同风向角覆冰导线的三分力系数变化曲线,通过斜风分解法得到的三分力系数比,再利用 Fluent 进行数值模拟。得到以下结论:

1)用传统的斜风分解法得到的三分力系数进行斜风下覆冰导线风荷载计算是不适用的,必须通过风洞试验实测斜风下覆冰导线的三分力系数。

2)使用 Fluent 进行数值模拟,数值模拟的结果和风洞试验测得的结果吻合的较好,可以在一定范围内使用 Fluent 数值模拟来取代风洞试验。

3)斜拉索的空气动力特性和覆冰导线的差别很大。

## 参考文献:

- [1] S CHITRA GANAPATHI, P HARIKRISHNA, S ARUNACHALAM, et al. Numerical investigations on aerodynamic characteristics of 2-D channel section using two-equation turbulence models[EB/OL]. [2012-01-01]. http://www.ntnu.no.
- [2] 李万平,杨新详,张立志. 覆冰导线群的静气动力特性[J]. 空气动力学学报,1995, 13(4):427-434.
- [3] 李万平,黄河,何程. 特大覆冰导线气动力特性测试[J]. 华中科

[5] 陈以一,沈祖炎,翟红,等. 圆钢管相贯节点滞回特性的试验研究[J]. 建筑结构学报,2003,24(6): 58-63.

CHEN Yiyi, SHEN Zuyan, ZHAI Hong, et al. Experimental research on hysteretic property of unstiffened space tubular joints[J]. Journal of Building Structures,2003, 24(6): 58-63.

[6] GB 50017—2003 钢结构设计规范[S](GB 50017—2003 Code for the design of steel structures[S](in Chinese))

[7] 丁芸孙. 圆管结构相贯节点几个设计问题的探讨[J]. 空间结构,2002, 8(2): 56-64.

DING Yunsun. Discussion on some design problems in circular tubular joints[J]. Spatial Structures, 2002, 8(2): 56-64.

[8] 王秀丽,李强,殷占忠. 圆管相贯节点的承载力性能研究[J]. 甘肃科学学报,2006,18(2): 97-90.

WANG Xiuli, LI Qiang, YIN Zhanzhong. A research for strength performance of ring-stiffened circular tubular Y-joints[J]. Journal of Gansu Sciences, 2006,18(2): 97-90.

[9] American welding society (AWS). AWS D1. 1-90 Structural Welding Code-Steel[S]. 12th ed. Miami, FL: American Welding Society,1990.

[10] 武振宇,陈鹏,王渊阳. T 型方管节点滞回性能的试验研究[J]. 土木工程学报. 2008,41(12).

[11] 吴捷. 圆钢管结构 K 形搭接节点受力性能及设计方法研究[D]. 南京:东南大学土木工程学院,2006.

[12] Gazzola F, Lee M M K, Dexter E M. Design equation for overlap tubular K-joints under axial loading[J]. Journal of Structural Engineering,2000,126(7):798-803.

[13] Dexter E M, Lee M M K. Static strength of axially loaded tubular K-joints (II): Ultimate capacity[J]. Journal of Strural Engineering,1999,125(2):194-201.

(编辑 彭建国)

技大学学报,2001,29(8):84-86.

[4] 顾明,杜晓庆. 不同风向角下斜拉桥拉索模型测压试验研究[J]. 振动与冲击,2005,24(6):5-9.

[5] ZHU L D, XU Y L, ZHANG F, et al. Tsing Ma Bridge deck under skew winds-Part I: aerodynamic coefficients[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2002, 90(7): 781-805.

[6] ZHU L D, XU Y L, ZHANG F, et al. Tsing Ma Bridge deck under skew winds-Part II: flutter derivatives[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2002, 90(7): 807-837.

[7] ALI VAKIL, SHELDON I GREEN. Drag and lift coefficients of inclined finite circular cylinders at moderate Reynolds Numbers[J]. Computers & Fluids 2009,38(9) 1771-1781.

[8] 腾二甫,段忠东,张秀华. 新月形覆冰导线气动特性的数值模拟[J]. 低温建筑技术,2008(1):86-88.

[9] 王福军. 计算流体力学分析[M]. 清华大学出版社,2004.

[10] 刘小兵. 斜风下大跨度桥梁主梁三分力系数试验研究[J]. 湖南大学学报:自然科学版,2008,35(9):10-14.

(编辑 詹燕平)