



Research  
Bridge Engineering—Article

## 斜拉索表面处理后的气动性能的风洞实验研究

Hiroshi Katsuchi<sup>a,\*</sup>, Hitoshi Yamada<sup>a</sup>, Ippei Sakaki<sup>b</sup>, Eiichi Okado<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Yokohama National University, Yokohama 240-8501, Japan

<sup>b</sup> Shinko Wire Company, Ltd., Amagasaki 660-0091, Japan

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 11 May 2017

Revised 25 June 2017

Accepted 28 June 2017

Available online 29 September 2017

#### 关键词

风雨激振

干索驰振

斜拉索

风洞实验

### 摘要

学界对包括风雨激振 (RWIV) 和干索驰振 (DG) 在内的斜拉桥拉索的风致振动等的研究已经有相当长的时间。一般来说, 我们会应用机械阻尼器或表面处理来抑制振动。特别是已开发出几种表面处理拉索, 包括压痕、纵向平行突起、螺旋角和 U 形开槽。最近又开发了一种带螺旋突起的新型空气动力学稳定拉索, 这种拉索已被证明具有与锯齿状拉索相似的低阻力系数, 并且可以防止拉索表面形成水线。在本研究中, 应用风洞实验对这种拉索在各种来流角度和突起尺寸下的 RWIV 稳定性进行了研究。发现对于所有测试风角, 螺旋突起拉索对于 RWIV 和 DG 在空气动力学基础上都能保持稳定, 突起尺寸的影响也得到了确认。

© 2017 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of the Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## 1. 引言

斜拉桥的斜拉索由于其对风的倾斜姿态而受到气动激励力的作用, 它们有时会出现大振幅振动, 不仅在降雨条件下, 而且在干燥 (无雨) 条件下也会如此。前者被称为风雨激振 (RWIV) [1], 后者被称为干索驰振 (DG)。关于它们的机理有很多研究[2,3]。据了解, 这两种振动都与斜拉索固有的气动失稳特性有关, 特别是RWIV是由水线沿着拉索表面引起的, 而DG是由临界雷诺数范围内卡门涡旋的抑制以及拉索后面的轴向流动引起的。考虑到它们的振动机理, 一些使用了包括螺旋突起[4]、纵向平行突起[5]和压痕[6]等技术的表面处理拉索被开发出来。为了进一步提高拉索性能, 最近开发了一种新型带有预制螺旋突起的表面处理拉索[7]。对于表面处理, 必须要注意增加阻力系数( $C_D$ )。

对新开发的螺旋突起拉索进行了阻力系数的独立测试, 证实新拉索的阻力系数与压痕拉索的阻力系数同样低[7]。在本研究中, 运用带有雨水模拟系统的改进风洞, 验证了两种表面处理拉索 (包括螺旋突起和压痕拉索) 的性能。

## 2. 实验设施

RWIV在横滨国立大学的带有雨水模拟器的风洞设施中再现, 如图1所示, 旧风洞进行了更换工作段并配备喷水喷嘴。带有水模拟器的工作段恰好放置在风洞出口处, 宽1.3 m, 高1.3 m, 水从工作段顶端上的喷水喷嘴喷出, 如图2所示, 最大风速约为 $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

如图3所示, 使用管架将有效长度为1.5 m的拉索模型放置在工作段中。该模型由具有一个垂直自由度的螺

\* Corresponding author.

E-mail address: [katsuchi@ynu.ac.jp](mailto:katsuchi@ynu.ac.jp) (H. Katsuchi).

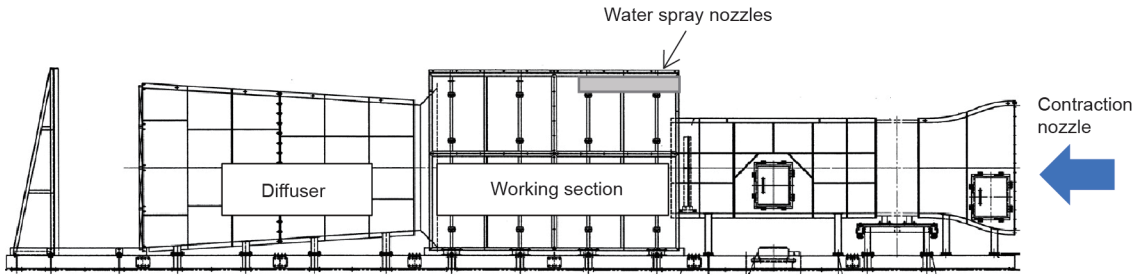


图1. 雨风模拟器。



图2. 工作段和雨水模拟器。

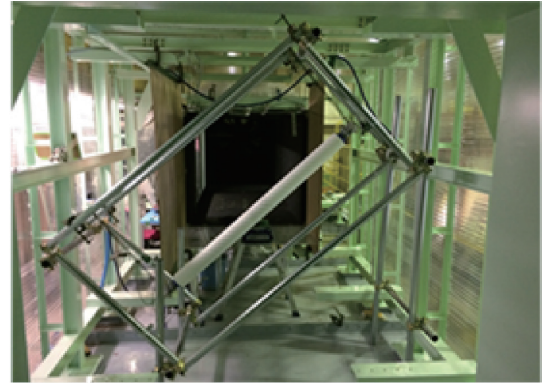


图3. 放置拉索模型。

旋弹簧支撑。螺旋弹簧以垂直于拉索轴线的方向连接。分别通过旋转和升降管架的一侧可以调节流量的偏角和垂直角。关于拉索模型的“末端效应”有一些争论。在本研究中，没有经过末端效应处理的整个拉索模型暴露在风流中。这是为了避免由于末端效应而产生的未知影响，因为本研究的主要目的是不同工况之间的比较。

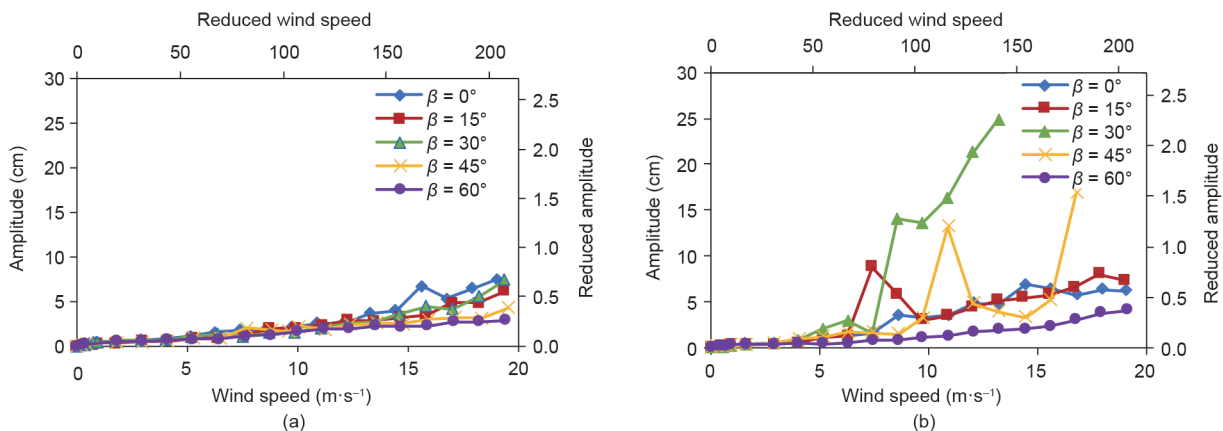
模型的响应通过放置在模型两端的加速度计测量。模型的振动以100 Hz的采样频率测量。根据测试情况，模型的固有频率为0.8 ~ 1.0 Hz。

### 3. RWIV 的再现

为了检查风洞和雨水模拟器的性能，使用1.5 m长的聚乙烯管的圆截面拉索模型进行了测试以再现RWIV。分别测试了110 mm (D110 mm) 和158 mm (D158 mm) 两种不同直径的型号。图4和图5分别显示了D110 mm 和D158 mm情况下的响应幅度与风速的关系。Scruton数 ( $S_c$ ) 被设置为3 ~ 11之间的较小值，以便容易生成RWIV，如图题中所述。在本研究中， $S_c$ 定义如下：

$$S_c = \frac{2m\delta}{\rho D^2} \quad (1)$$

式中， $m$ 为单位长度的质量； $\delta$ 为对数递减的结构阻尼；

图4. 圆截面拉索模型的响应幅度与降雨条件下的风速 (D110 mm) 的关系。(a)  $\alpha = 40^\circ$  ( $S_c = 10 \sim 11$ )；(b)  $\alpha = 25^\circ$  ( $S_c = 9 \sim 11$ )。

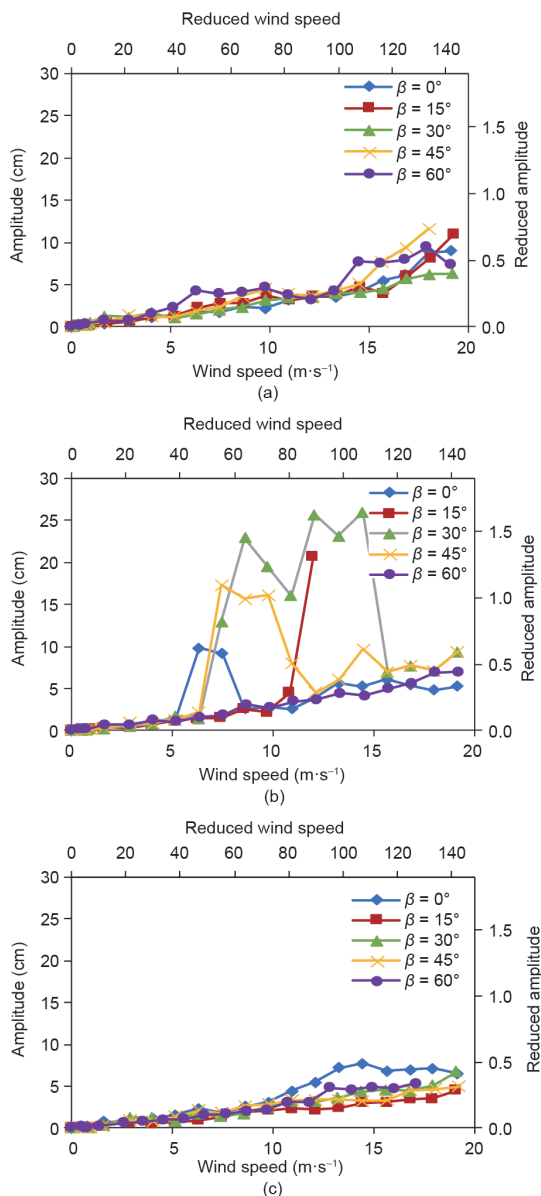


图5. 在降雨条件下 (D158 mm), 圆截面拉索模型的响应幅度与风速的关系。(a)  $\alpha = 40^\circ$  ( $S_c = 7 \sim 9$ ); (b)  $\alpha = 25^\circ$  ( $S_c = 6 \sim 9$ ); (c)  $\alpha = 9^\circ$  ( $S_c = 3 \sim 4$ )。

$\rho$ 为空气密度;  $D$ 为模型直径。由于模型的支持机理, 小垂直角度情况下的阻尼往往很小, 因此, 在这些情况下,  $S_c$ 相对较小。D110 mm工况的垂直角度 ( $\alpha$ ) 变为 $40^\circ$ 和 $25^\circ$ , D158 mm工况的垂直角度变为 $40^\circ$ 、 $25^\circ$ 和 $9^\circ$ 。气流偏角 ( $\beta$ ) 变为 $0^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 和 $60^\circ$ 。

如图4和图5所示, 大振幅RWIV仅在 $\alpha = 25^\circ$ ,  $\beta = 15^\circ$ 、 $30^\circ$ 和 $45^\circ$ 时发生, 而不在 $\alpha = 40^\circ$ 和 $9^\circ$ 发生。为了防止支撑系统失效, 当振动幅度达到25 cm左右时停止测量。在 $\beta = 30^\circ$ 、 $\alpha = 25^\circ$ 的情况下观察到这种大振幅的振动。另外, 在 $16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的风速下振动幅度显著增大, 在D110 mm的情况下 $11 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 下的第一个峰值后甚至更大, 此时 $\alpha = 25^\circ$ ,  $\beta = 45^\circ$ 。第一个峰值是RWIV, 第二个大的振动是由DG

的机理引起的, 因为拉索表面没有形成水流。

RWIV期间, 在拉索表面上形成了薄膜状的水线。水线在拉索振动的同时沿圆周方向振动。RWIV和水线的特征与以往研究中观察到的特征十分相似[8]。RWIV期间的降雨强度较大, 为 $40 \sim 60 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 。调整降水强度以使RWIV在本研究中发生。尽管降雨强度的影响还必须取决于拉索的长度, 但在此不做详细讨论。

#### 4. 降雨条件下表面处理拉索的响应

如前所述, 为应对RWIV开发了多种表面处理拉索。在本研究中, 对螺旋突起[7]和压痕[6]两种类型的表面处理拉索进行了RWIV测试, 如图6所示。

压痕的几何形状遵循多多罗大桥所采用的原型[图6(c)], 多多罗大桥是第一个使用压痕拉索的大桥。8个凹痕图案均匀地分布在表面上, 压痕深度为1 mm。

此外, 还对螺旋突起拉索的一些参数进行了测试。模型的支持方式与圆截面模型的情况相同,  $S_c$ 条件也与圆截面模型情况几乎相同, 如图7所示, 每种情况下都是如此。

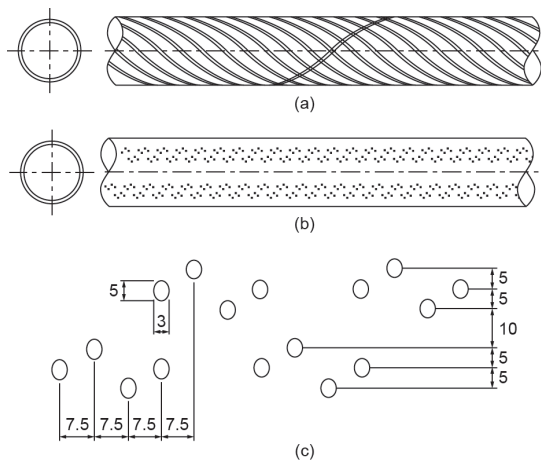


图6. 表面处理拉索。(a)螺旋突起拉索;(b)压痕拉索;(c)压痕尺寸(单位: mm)。

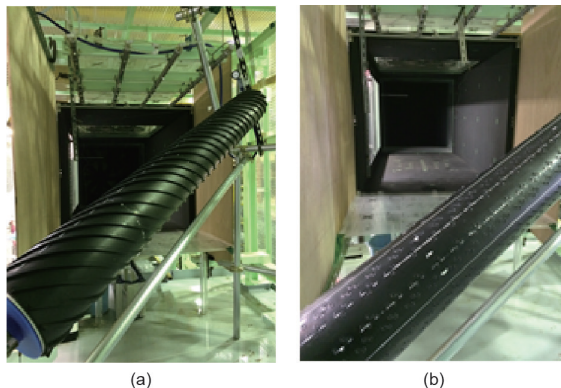


图7. 表面处理拉索模型实验设置。(a)螺旋突起拉索;(b)压痕拉索。

#### 4.1. 螺旋突起和压痕拉索的响应特性

图8和图9分别显示了在降雨条件下，螺旋突起和直径为158 mm的压痕拉索的响应幅度。某些角度时RWIV在压痕拉索的情况下会发生。根据实验的观察结果，在RWIV期间，一些水线会经过压痕。然而，据了解，在本研究中观察到的RWIV是因为 $S_c$ 远小于全尺寸条件而造成的。另外，螺旋突起拉索在其他情况下都没有表现出RWIV，仅在小幅度随机振动的情况下才会出现。

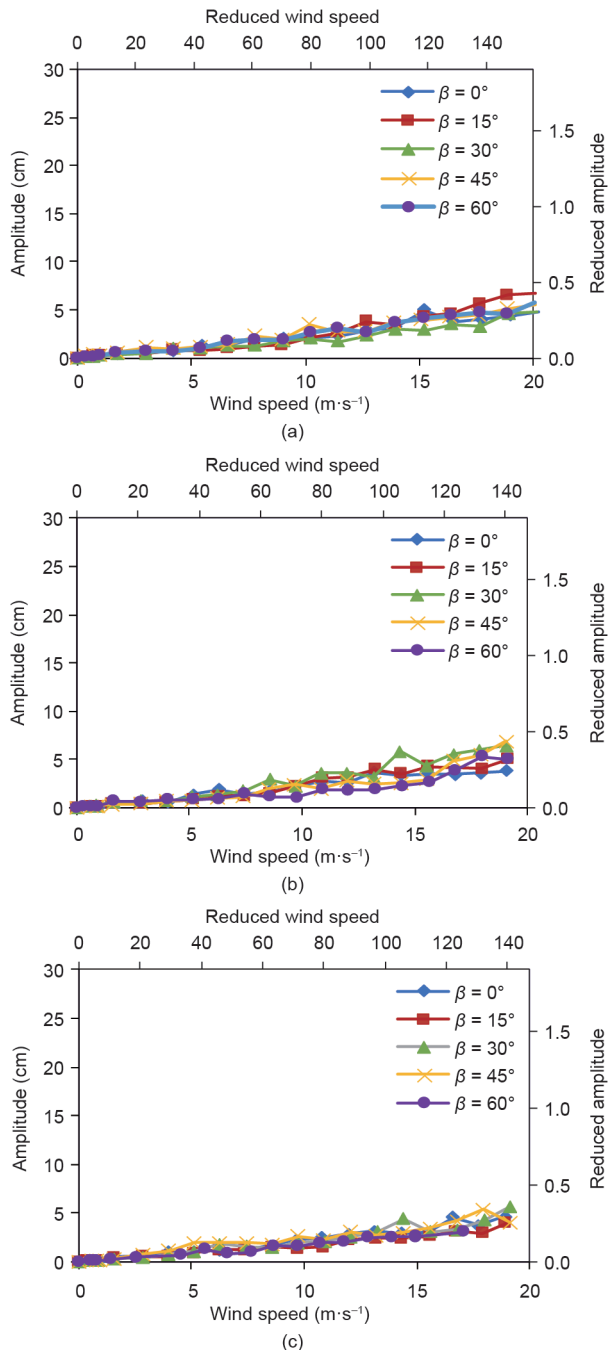


图8. 降雨条件下螺旋突起拉索模型的响应幅度与风速的关系(D158 mm)。 (a)  $\alpha=40^\circ$  ( $S_c=9$ )；(b)  $\alpha=25^\circ$  ( $S_c=5 \sim 12$ )；(c)  $\alpha=9^\circ$  ( $S_c=4$ )。

#### 4.2. 螺旋突起尺寸对响应的影响

螺旋突起的尺寸是根据过去的研究决定的[7]。我们对原始尺寸进行了优化，以保证在 $C_0$ 较低的同时防止水流形成。其基本尺寸为：12个高度为5 mm、宽度为7.5 mm、螺旋角为 $27^\circ$ 的圆形突起。然而，螺旋突起尺寸的影响仅在干燥（无雨）条件下的风洞中通过DG得到证实。因此，需要确定在降雨条件下螺旋突起尺寸对RWIV产生的影响。

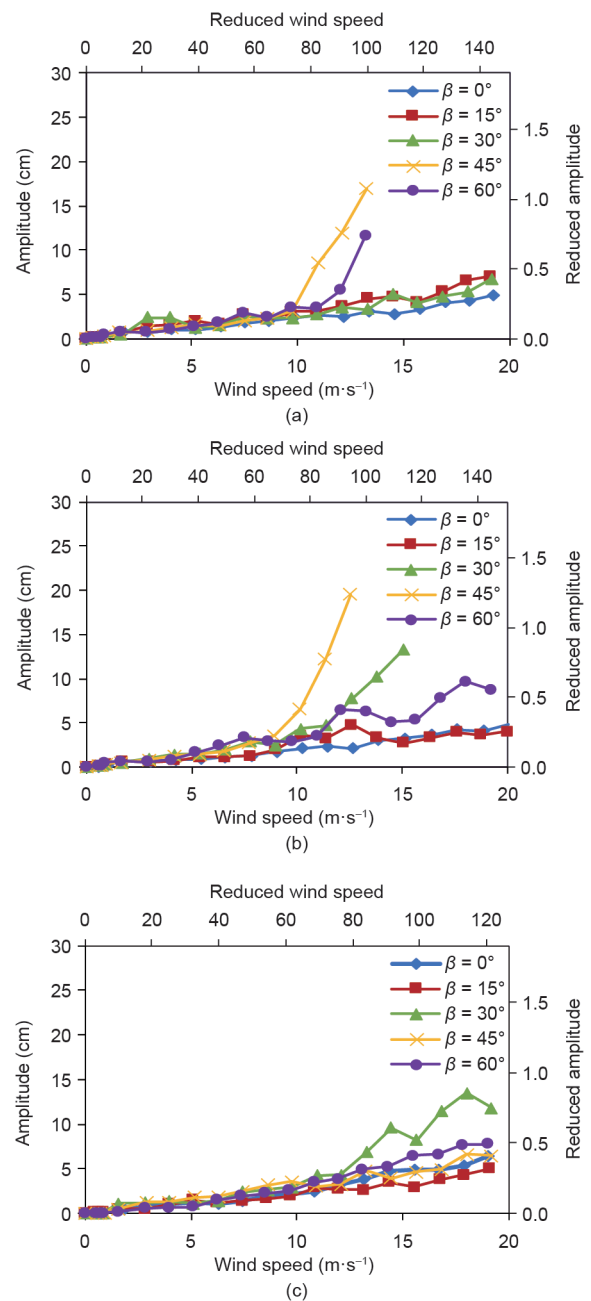


图9. 在降雨条件下 (D158 mm)，压痕拉索模型的响应幅度与风速的关系。(a)  $\alpha=40^\circ$  ( $S_c=8 \sim 9$ )；(b)  $\alpha=25^\circ$  ( $S_c=5 \sim 8$ )；(c)  $\alpha=9^\circ$  ( $S_c=3 \sim 4$ )。



如图10(a)所示,只要保持5 mm的高度,螺旋突起数量就不会显著。然而,在两个突起的情况下,振幅略微增加。为了研究螺旋突起的最小高度,在实验中分别测试了2 mm和3 mm的螺旋突起高度,同时保持12个7.5 mm宽度的突起数量。实验发现2 mm高度的螺旋突起显著增加了振幅,如图10(b)所示。

进一步研究螺旋突起的高度和数量的影响,如图10(c)所示,即使有12个突起,2 mm高度RWIV对提高的振幅也比在5 mm高度的情况下更大。如图10(d)所示,对于3 mm高度,螺旋突起数量的减少会影响振动幅度。12个突起的情况只能防止RWIV幅度的增加。因此,如果螺旋突起的数量保持在原始数量12个,则突起高度为5 mm是理想的。

## 5. 表面处理拉索的 DG

除了RWIV之外,还进行了表面改性拉索模型的DG测试。图11显示了与圆截面拉索模型相比,干燥(无雨)

条件下螺旋突起拉索模型的响应幅度。主要根据临界雷诺数流动状态和倾斜拉索后侧的轴向流动来解释DG的原因[3]。然而,在全尺寸桥梁的斜拉索的亚临界范围的干燥(无雨)条件下也观察到了大振幅振动[2]。因此,本研究也涉及广义上的干燥(无雨)条件即DG下产生的大振幅振动。

圆截面拉索模型表现出大振幅的DG,特别是在流动角度 $\beta=30^\circ$ 和 $45^\circ$ 的情况下。然而,这些振动发生在 $S_c$ 低至10的情况下,这比全尺寸拉索的 $S_c$ 要低。已经证实,大幅度的DG被抑制到低于0.5的幅度,而 $S_c$ 则增加到大约60。另外,螺旋突起拉索模型是完全稳定的,在实验中仅显示出小振幅的随机振动。

## 6. 结论

在本研究中,使用带有雨水模拟系统的翻新风洞对两种表面处理拉索的性能进行了研究,获得了以下结果:

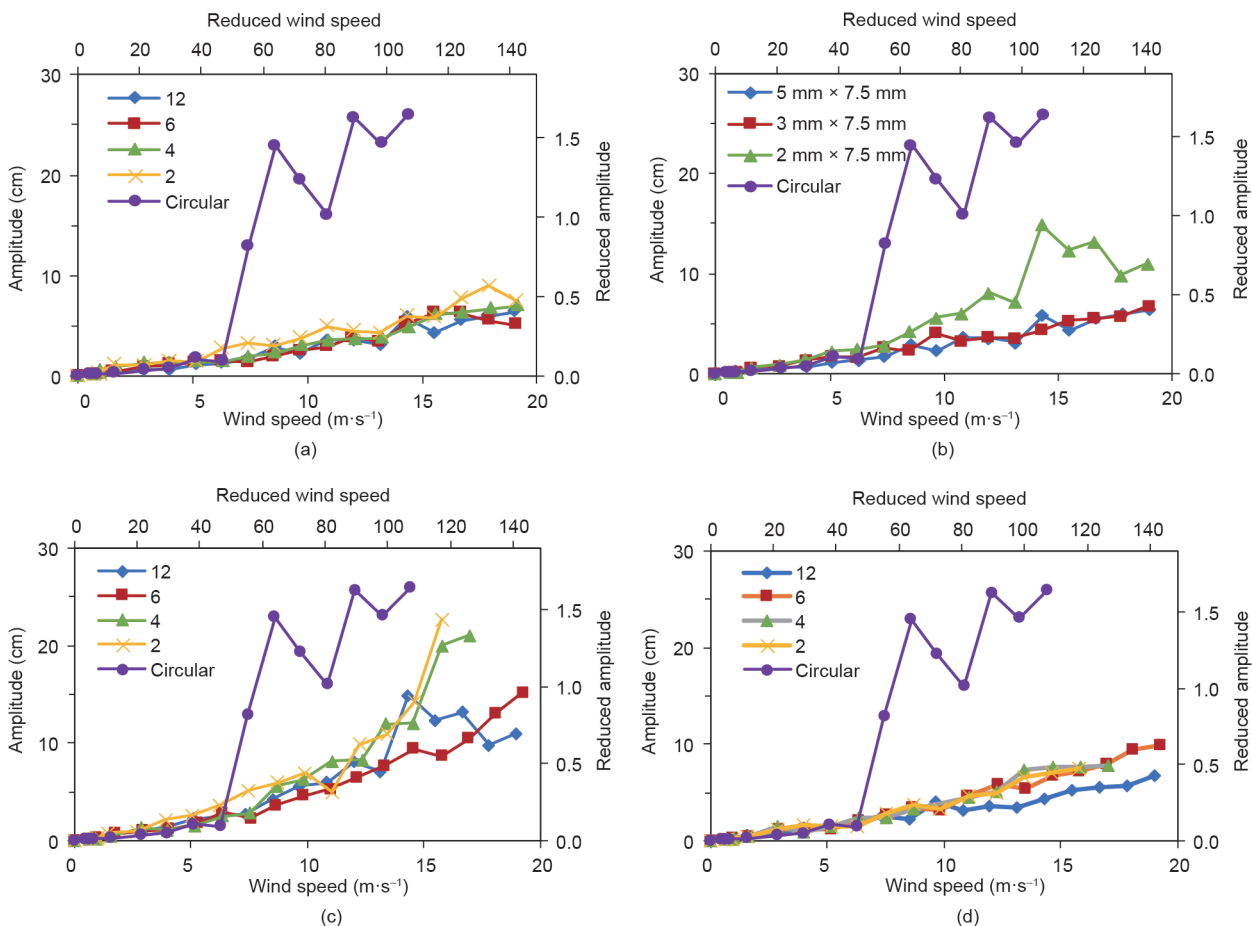


图10. 在降雨条件下( $D158\text{ mm}$ ,  $\alpha=25^\circ$ ,  $\beta=30^\circ$ ),不同螺旋突起尺寸下螺旋突起拉索模型的响应幅值与风速的关系。(a)螺旋突起的数量(5 mm高);(b)螺旋突起的尺寸(高度 $\times$ 宽度)(12个突起);(c)多个螺旋突起(2 mm高);(d)螺旋突起的数量(3 mm高)。

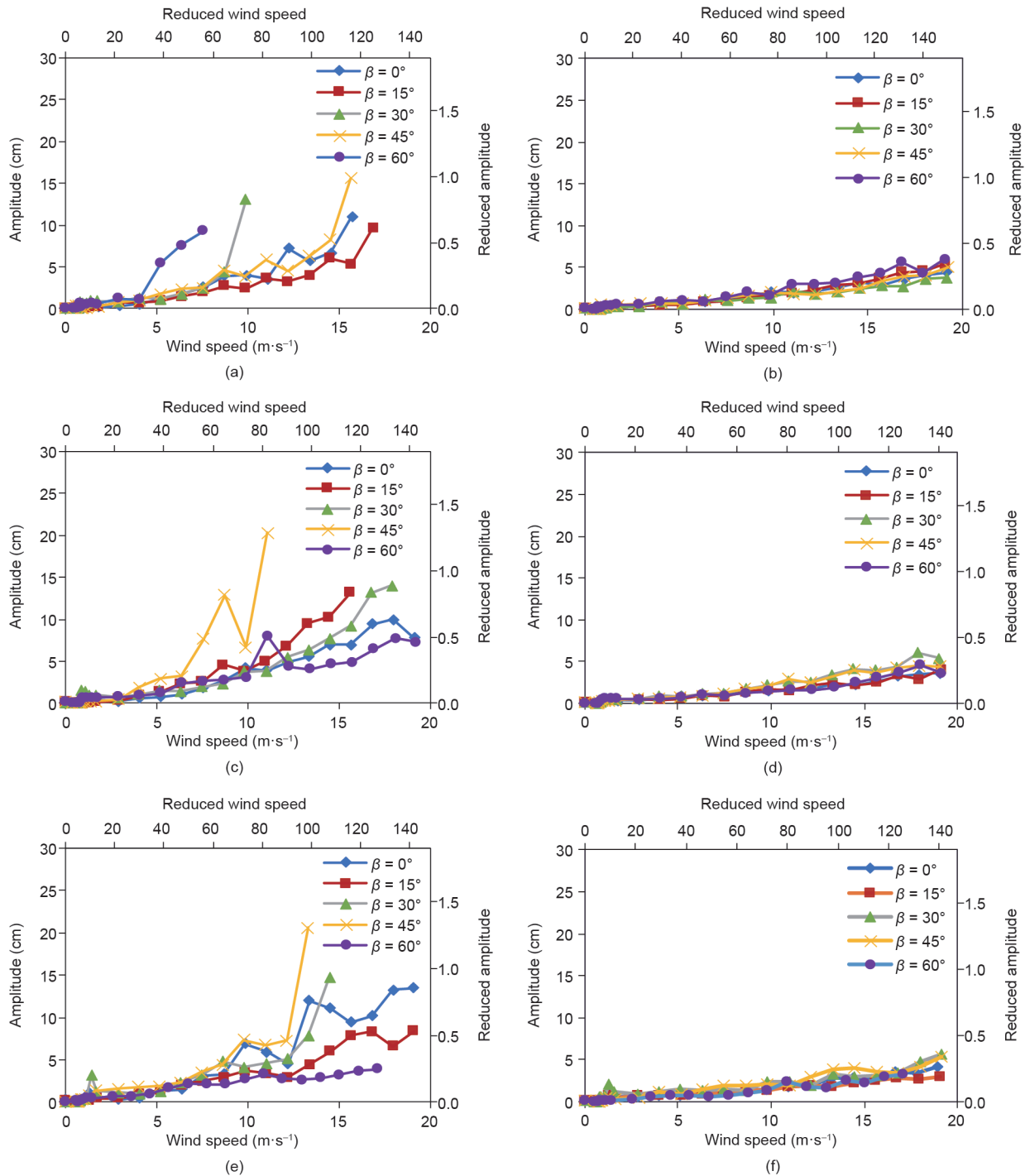


图11. 在干燥(无雨)条件下(D158 mm)响应幅度与风速的关系。(a)圆截面,  $\alpha = 40^\circ$  ( $S_c = 7 \sim 9$ ); (b)螺旋突起,  $\alpha = 40^\circ$  ( $S_c = 9$ ); (c)圆截面,  $\alpha = 25^\circ$  ( $S_c = 6 \sim 9$ ); (d)螺旋突起,  $\alpha = 25^\circ$  ( $S_c = 5 \sim 12$ ); (e)圆截面,  $\alpha = 9^\circ$  ( $S_c = 3 \sim 4$ ); (f)螺旋突起,  $\alpha = 9^\circ$  ( $S_c = 4$ )。

(1) RWIV在风洞中成功再现。同时还观察到, 拉索表面上的水流在拉索振动的同时沿圆周方向振动, 这些特征与过去的研究成果高度吻合。

(2) 除了在某些特定条件下, 对于RWIV和DG, 表面处理拉索都表现出了良好的性能。但是,  $S_c$ 的增加可以抑制振动。对于RWIV和DG而言, 螺旋突起拉索都表现出非常好的性能。

(3) 螺旋突起尺寸的影响得以验证。为了抑制RWIV, 在诸如高度和突起数量等参数方面有一定的限制是很有必要的。

## Compliance with ethics guidelines

Hiroshi Katsuchi, Hitoshi Yamada, Ippei Sakaki, and

Eiichi Okado declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

## References

- [1] Hikami Y, Shiraishi N. Rain-wind induced vibrations of cables stayed bridges. *J Wind Eng Ind Aerod* 1988;29(1-3):409-18.
- [2] Zuo D, Jones NP. Interpretation of field observations of wind- and rain-windinduced stay cable vibrations. *J Wind Eng Ind Aerod* 2010;98(2):73-87.
- [3] Matsumoto M. On generation mechanism of "rain vibration" and "dry galloping" of inclined stayed cables of cable-stayed bridges, basing on their flow fields. In: *Proceedings of the 9th International Symposium on Cable Dynamics*; 2011 Oct 18-20; Shanghai, China. p. 207-14.
- [4] Flamand O. Rain-wind induced vibration of cables. *J Wind Eng Ind Aerod* 1995;57(2-3):353-62.
- [5] Saito T, Matsumoto M, Kitazawa M. Rain-wind excitation of cables on cablestayed Higashi-Kobe Bridge and cable vibration control. In: *Proceedings of the International Conference on Cable-Stayed and Suspension Bridges*; 1994 Oct 12-15; Deauville, France. p. 507-14.
- [6] Miyata T, Yamada H, Hojo T. Aerodynamic response of PE stay cables with patternindented surface. In: *Proceedings of the International Conference on Cable-Stayed and Suspension Bridges*; 1994 Oct 12-15; Deauville, France. p. 515-32.
- [7] Yagi T, Okamoto K, Sakaki I, Koroyasu H, Liang Z, Narita S, et al. Modification of surface configurations of stay cables for drag force reduction and aerodynamic stabilization. In: *Proceedings of the 13th International Conference on Wind Engineering*; 2011 July 10-15; Amsterdam, The Netherlands.
- [8] Gu M, Du X. Experimental investigation of rain-wind-induced vibration of cables in cable-stayed bridges and its mitigation. *J Wind Eng Ind Aerod* 2005; 93(1):79-95.