



同济大学土木工程防灾国家重点实验室

SLDRCE

桥梁工程新进展

斜风作用下大跨度桥梁风振研究

(一)

颤振性能

朱乐东

二〇〇八年十二月





# 内容

1. 研究背景
2. 斜风颤振节段模型试验方法
3. 扁平箱梁断面斜风颤振性能
4. 扁平开口薄壁断面斜风颤振性能
5. 带挑臂双主肋开口断面斜风颤振性能
6. 研究总结



# 研究背景

## ➤ 风的作用

### ✦ 静力作用

- 静风荷载
- 静风稳定问题

### ✦ 动力作用

- 颤振
- 驰振
- 涡激共振
- 抖振



# 研究背景 (续)

✦ 颤振是一种气动失稳现象

● 能引起桥梁毁灭性破坏



● 一种最危险的风致振动形式

● 必须通过抗风设计加以避免



# 研究背景 (续)

## ➤ 桥梁颤振的研究方法

### ✦ 风洞试验方法

- 节段模型试验
- 拉条模型试验
- 全桥气弹模型试验

### ✦ 基于试验气动导数的理论分析法

- 二维分析
- 三维有限元分析

### ✦ CFD方法 - 还不成熟

— 认为：法向风最不利



# 研究背景 (续)

## ➤ 直观考察开口断面

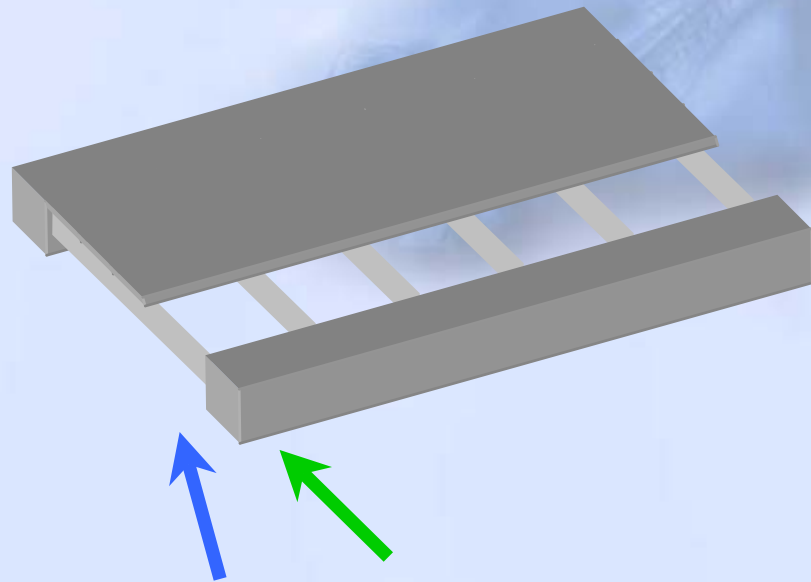
✦ 一般具有外露的横梁

✦ 对于法向风:

- 外露横梁与风向一致
- 对绕流的干扰可忽略

✦ 对于斜风:

- 外露横梁与风向存在一个夹角
- 对绕流有阻挡、扰动等干扰作用
- 气动性能可能变差
- 斜风颤振临界风速可能低于风向风

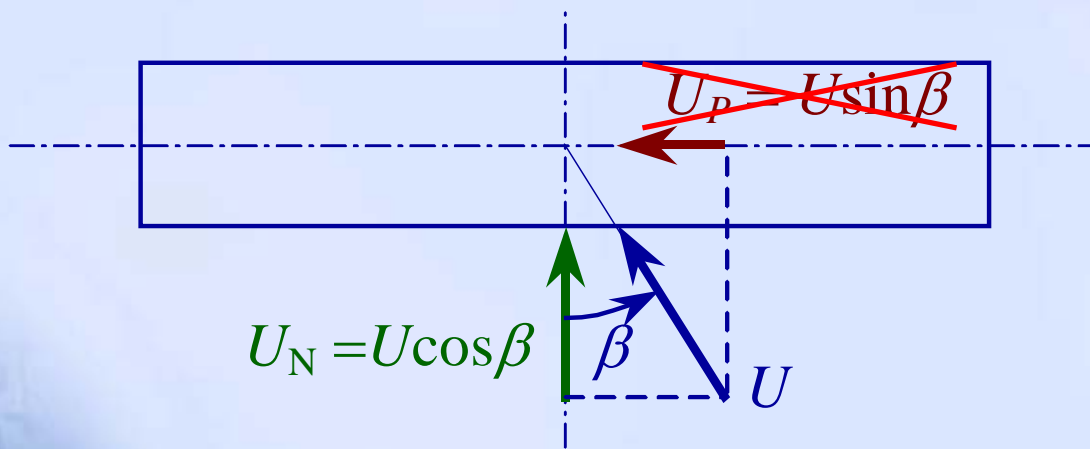




# 研究背景 (续)

## ➤ 斜风作用下颤振分析

### ✦ 平均风分解法



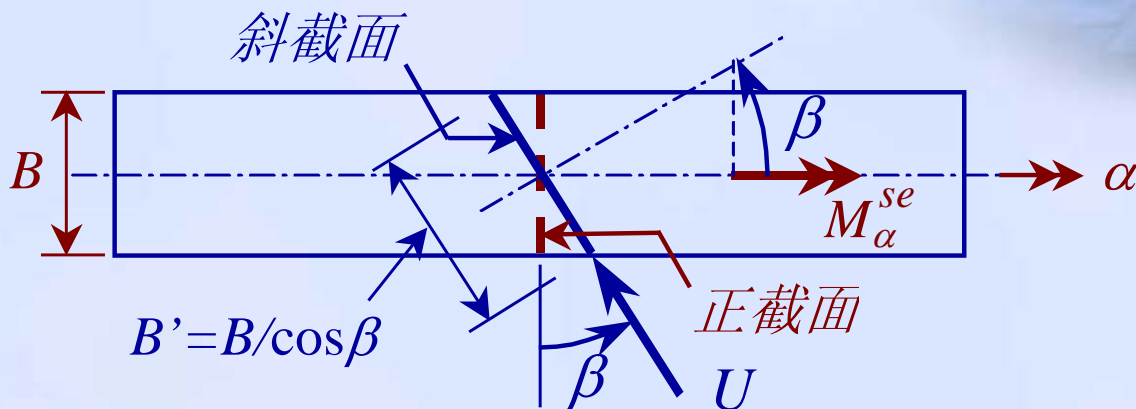
$$U_{cr}(\theta, \beta) = U_{cr}(\theta, 0^\circ) / \cos \beta$$

● 法向风最不利



# 研究背景 (续)

## ✦ Scanlan单自由度扭转近似斜风颤振理论



● 假设：法向风情况的气动片条理论仍适用于斜风的情况

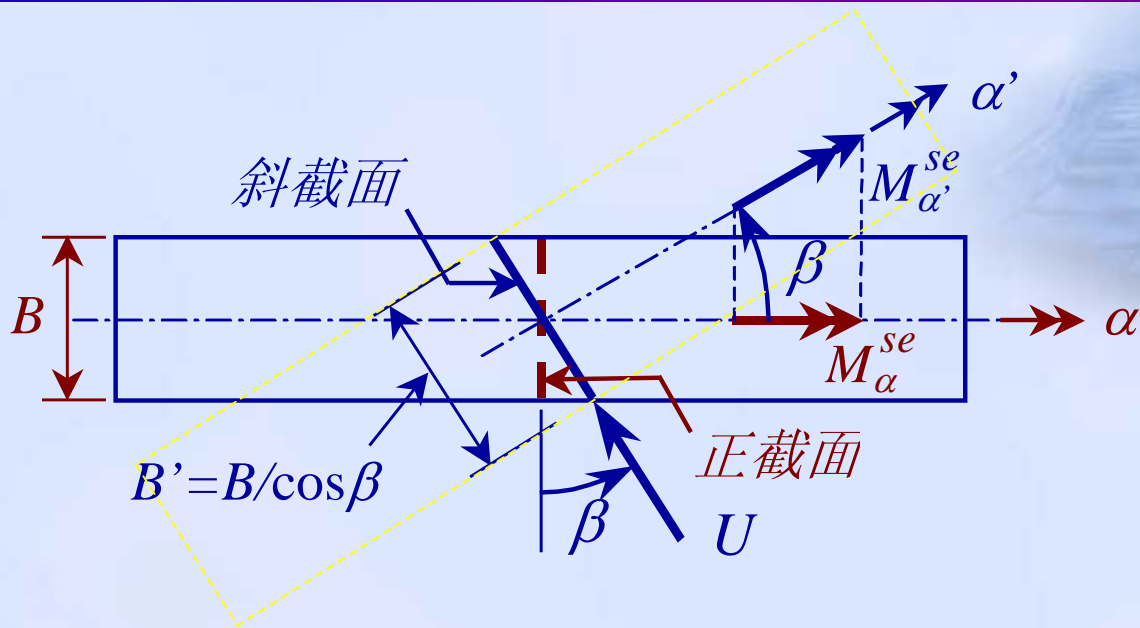
● 斜风气动导数定义为：

$$M_{\alpha}^{se}(\beta, \theta, K) = \frac{1}{2} \rho U^2 B^2 \left[ KA_2^*(\beta, \theta, K) \frac{B\dot{\alpha}}{U} \right]$$

$$K = \frac{\omega B}{U}$$



# 研究背景 (续)



● 假设：斜截面为整截面的简单加长，气动性能相似

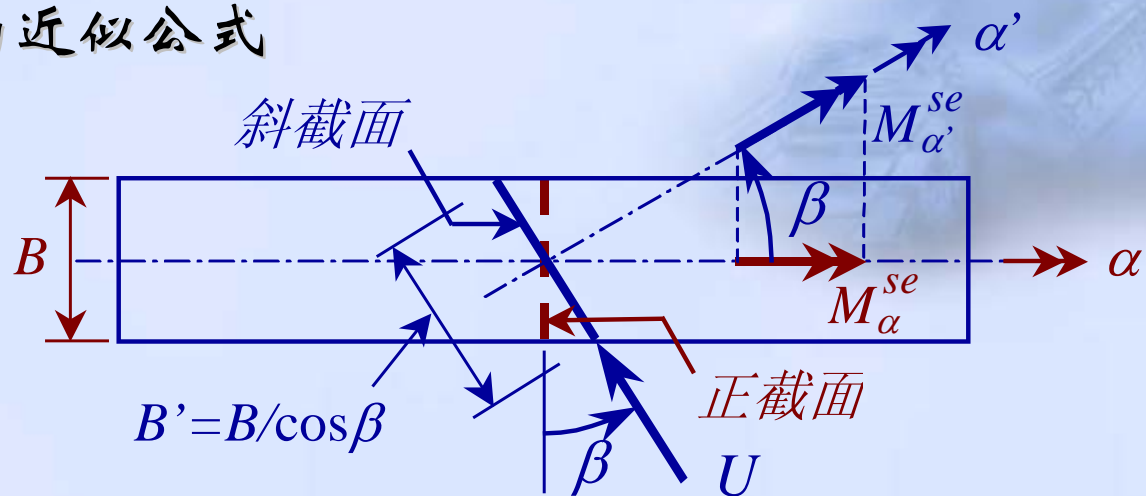
$$M_{\alpha'}^{se}(\beta, \theta, K) = \frac{1}{2} \rho U^2 B'^2 \left[ K' A_2^*(\theta, K') \frac{B' \alpha'}{U} \right]$$
$$\approx \frac{1}{2} \rho U^2 B'^2 \left[ K' A_2^*(0^\circ, \theta, K') \frac{B' \alpha'}{U} \right]$$

$$K' = \frac{\omega B'}{U} = \frac{\omega B}{U \cos \beta} = \frac{K}{\cos \beta}$$



# 研究背景 (续)

## 斜风气动导数的近似公式



$$\alpha' \approx \alpha \cos \beta$$

$$M_{\alpha}^{se}(\beta, \theta, K) = M_{\alpha'}^{se}(\beta, \theta, K) \cos \beta \approx \frac{1}{2} \rho U^2 B^2 \left[ K \left( \frac{A_2^*(0^\circ, \theta, K')}{\cos^2 \beta} \right) \frac{B \dot{\alpha}}{U} \right]$$

$$= \frac{1}{2} \rho U^2 B^2 \left[ K A_2^*(\beta, \theta, K) \frac{B \dot{\alpha}}{U} \right]$$

$$\approx \frac{1}{2} \rho B^4 \omega A_2^*(\beta, \theta, K) \dot{\alpha}$$

$$A_2^*(\beta, \theta, K) \approx \frac{A_2^*(0^\circ, \theta, K / \cos \beta)}{\cos^2 \beta} \geq \frac{4 \xi_{st} I_m^e}{\rho B^4}$$



# 研究背景 (续)

## ✦ Scanlan近似理论的缺陷

- 单自由度扭转颤振理论，不适用于流线性断面的耦合颤振问题
- 对于非流线性断面，如：带横梁的开口断面，虽为单自由度扭转颤振，但一般情况下：

$$A_2^*(\theta, K') \neq A_2^*(0^\circ, \theta, K')$$

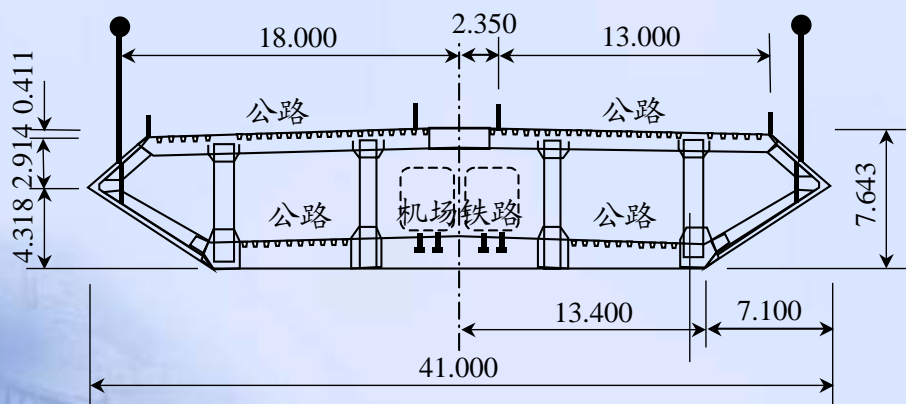
- 斜风颤振临界风速估计结果的精度较差
- 没有通过试验方法直接研究桥梁斜风颤振稳定性

## ✦ Scanlan的近似理论的几个算例显示法向风下的颤振临界风速接近最低值



# 研究背景 (续)

➤ 前期研究发现：青马桥的最低临界风速可能发生在斜风情况



➤ 其它典型桥梁断面的斜风颤振性能又如何？

- ✦ 扁平箱形断面
- ✦ 扁平开口薄壁断面
- ✦ 带挑臂双主肋开口断面



# 斜风颤振节段模型试验方法

## ➤ 模型安装



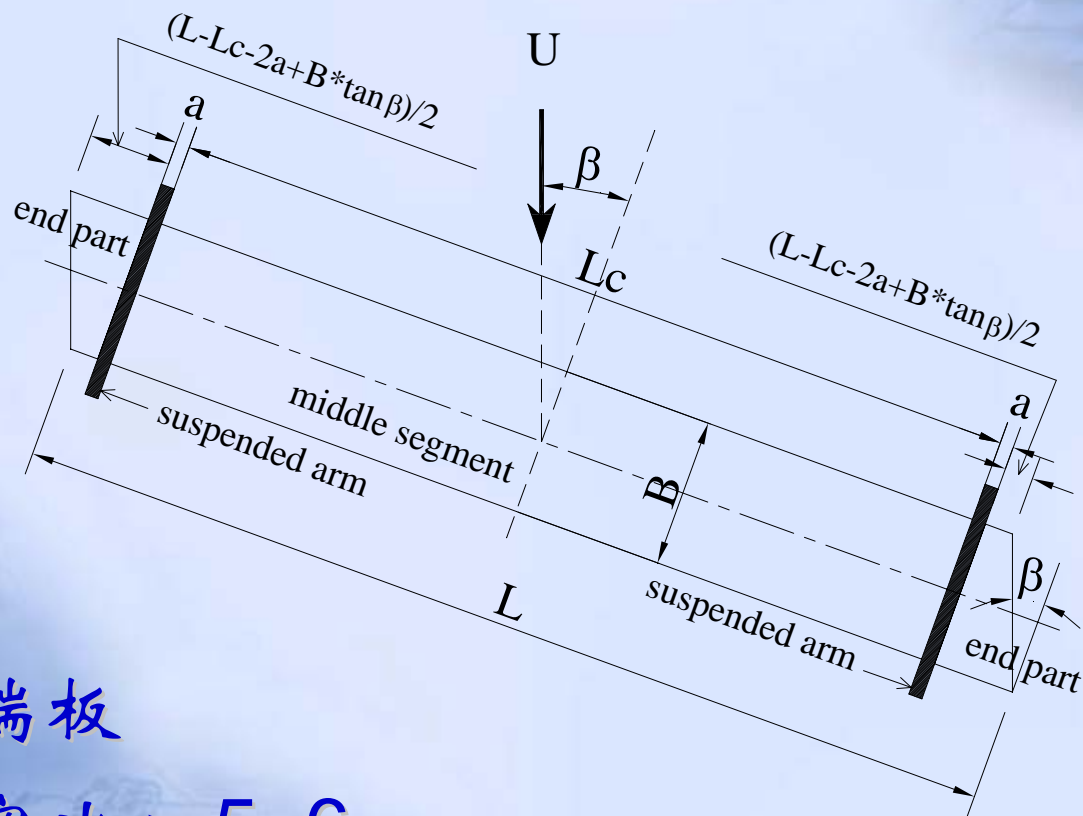
✦ 内支架式弹簧悬挂

✦ 串有小弹簧的水平钢丝，限制侧向位移



# 斜风颤振节段模型试验方法 (续)

## 斜节段模型构造



✦ 无端板

✦ 长宽比 > 5~6



# 斜风颤振节段模型试验方法 (续)

## ➤ 风偏角调节

移动弹簧固定端

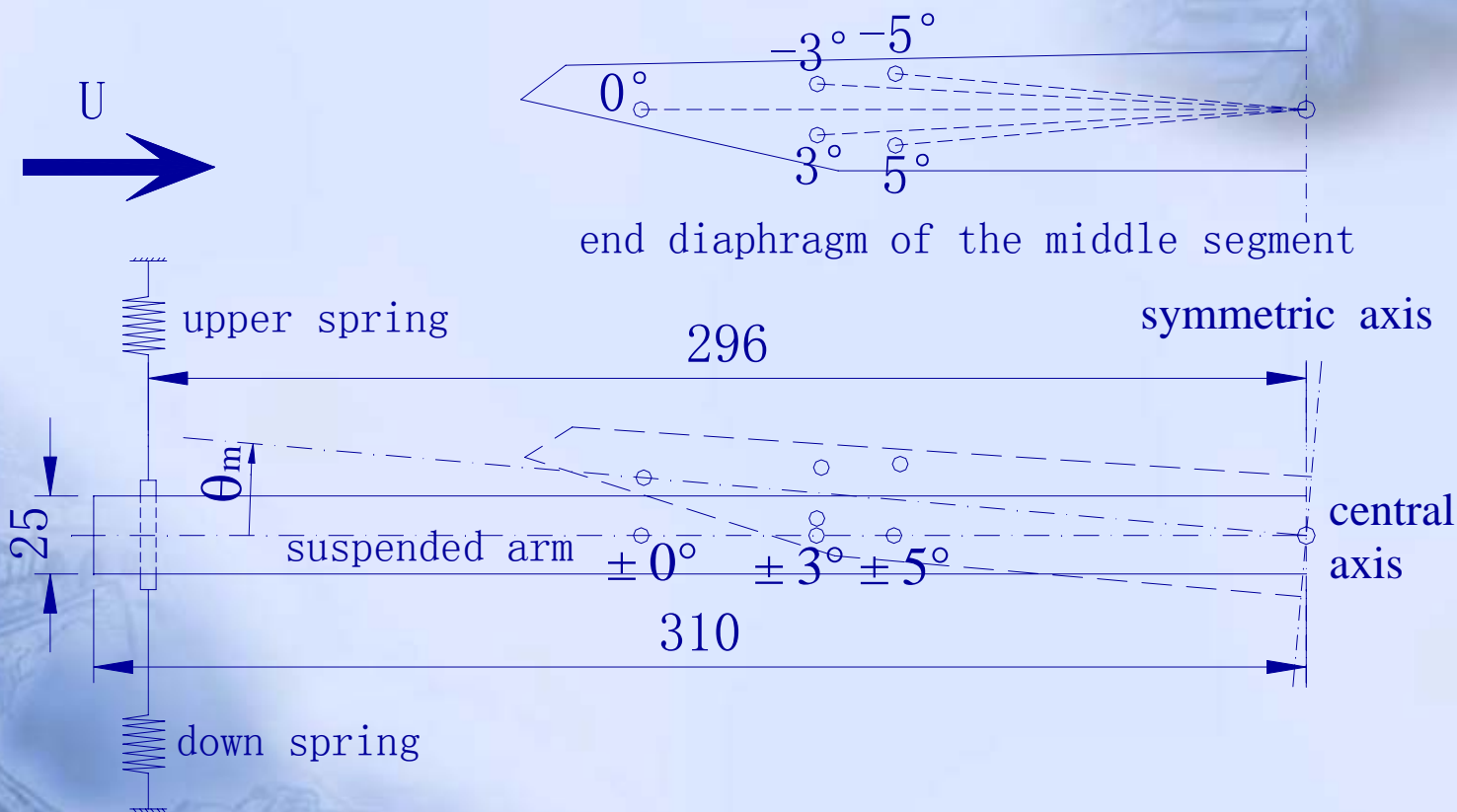


更改模型异形端块



# 斜风颤振节段模型试验方法 (续)

## 风攻角调节



$$\theta = \theta_m \cos \beta$$



# 斜风颤振节段模型试验方法 (续)

- 气动导数和颤振临界风速
  - ✦ 初激励自由耦合振动试验
  - ✦ 丁泉顺-修正最小二乘法
  - ✦ 各级风速下的系统频率和阻尼比
  - ✦ 气动导数-折减风速变化曲线
  - ✦ 阻尼比风速变化曲线
  - ✦ 初始阻尼修正 → 颤振临界风速



# 扁平箱梁断面斜风颤振性能

## ➤ 南京长江三桥

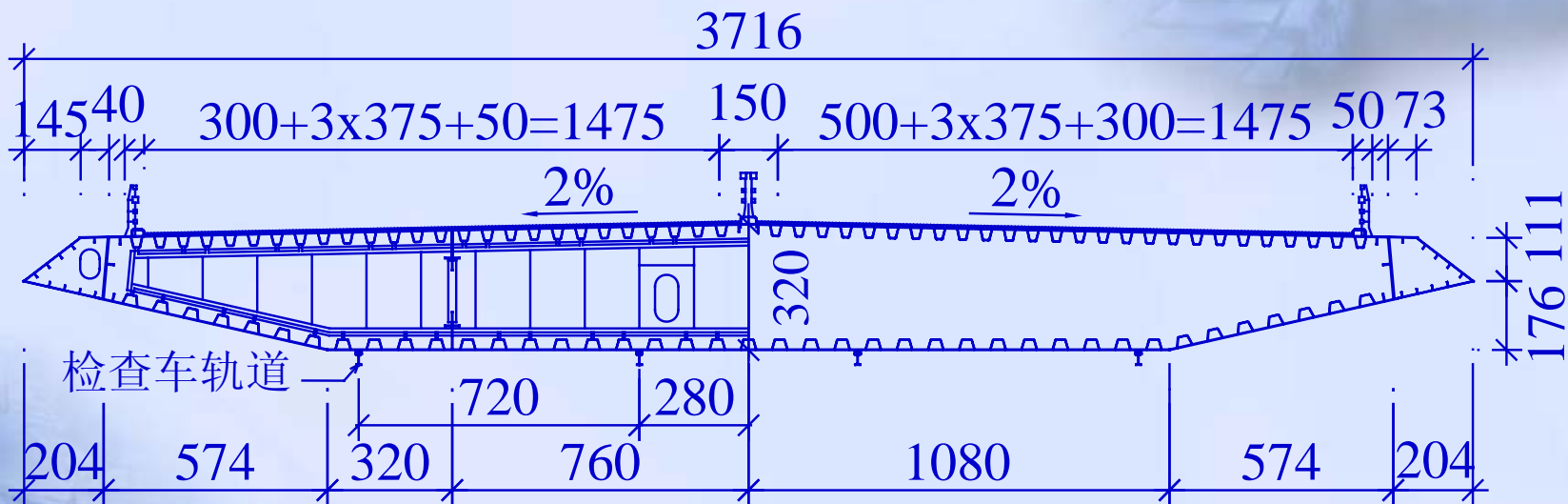


- ◎ 五跨斜拉桥:  
63+257+648+257+63m
- ◎ 混合式桥塔:  
主梁以上 179.25m 为钢箱结构  
主梁以下 35.75m 为预应力混凝土箱结构



# 扁平箱梁断面斜风颤振性能

## 南京长江三桥 (续)



✦  $B/H=11.6$

✦ 基频:  $f_v=0.2348\text{Hz}$ ,  $f_t=0.6205\text{Hz}$



# 扁平箱梁断面斜风颤振性能 (续)

➤ 施工状态 - 无栏杆

✦ 试验风向角

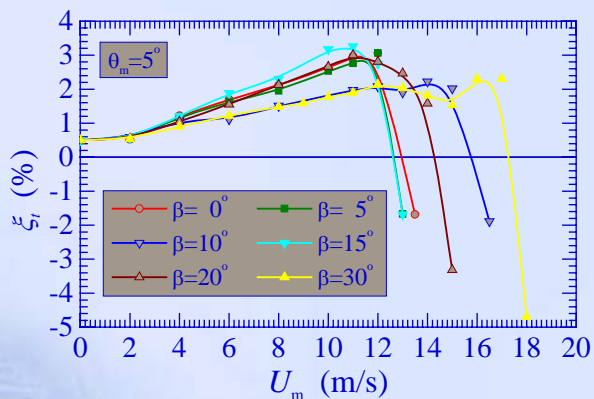
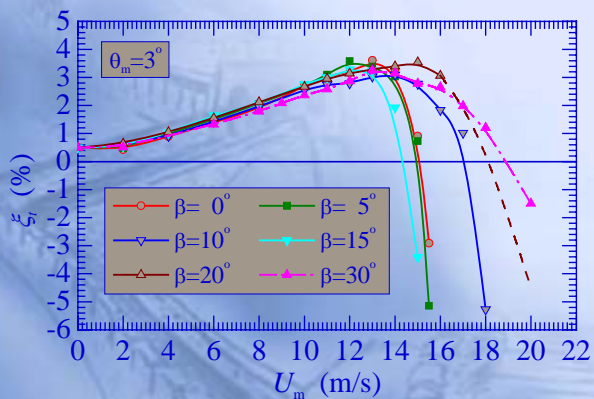
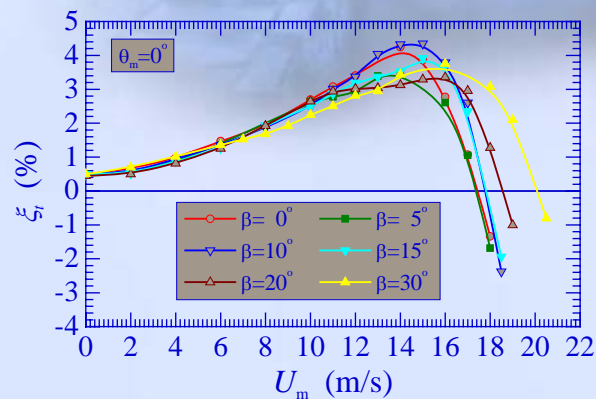
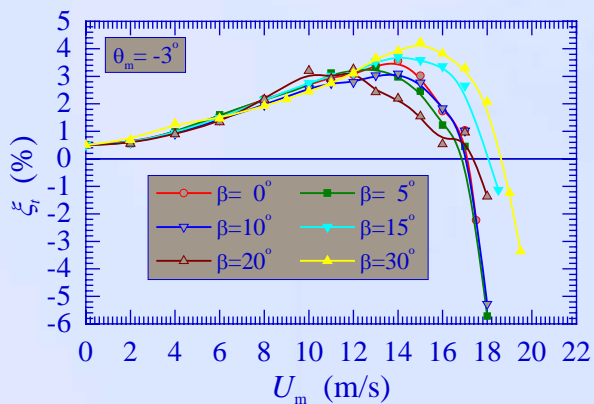
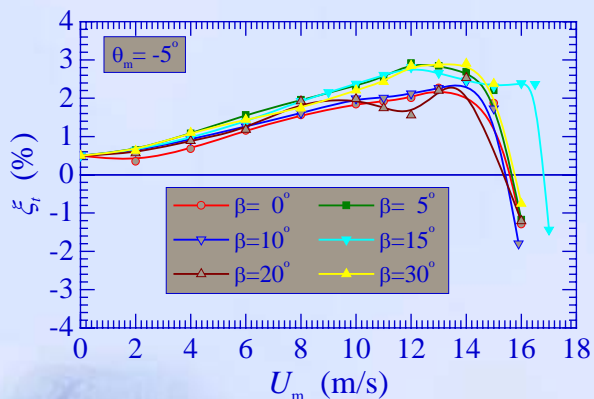
风攻角  $\theta$

$\beta \backslash \theta_m$	$-5^\circ$	$-3^\circ$	$0^\circ$	$3^\circ$	$5^\circ$
$0^\circ$	$-5^\circ$	$-3^\circ$	$0^\circ$	$3^\circ$	$5^\circ$
$5^\circ$	$-4.98^\circ$	$-2.99^\circ$	$0^\circ$	$2.99^\circ$	$4.98^\circ$
$10^\circ$	$-4.92^\circ$	$-2.95^\circ$	$0^\circ$	$2.95^\circ$	$4.92^\circ$
$15^\circ$	$-4.83^\circ$	$-2.90^\circ$	$0^\circ$	$2.90^\circ$	$4.83^\circ$
$20^\circ$	$-4.70^\circ$	$-2.82^\circ$	$0^\circ$	$2.82^\circ$	$4.70^\circ$
$30^\circ$	$-4.33^\circ$	$-2.60^\circ$	$0^\circ$	$2.60^\circ$	$4.33^\circ$



# 扁平箱梁断面斜风颤振性能 (续)

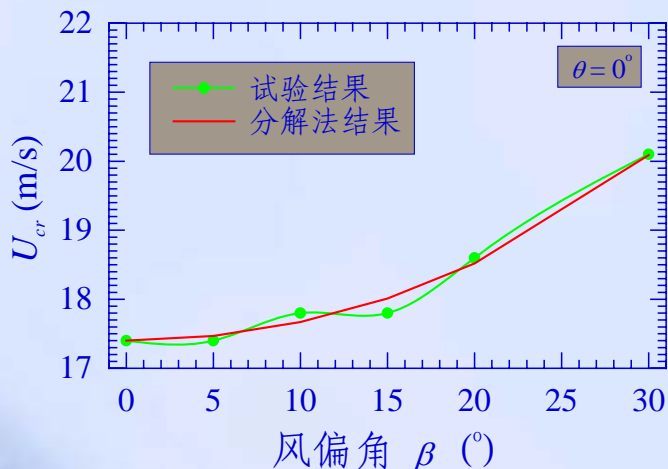
## ✦ 扭转阻尼比 - 风速曲线





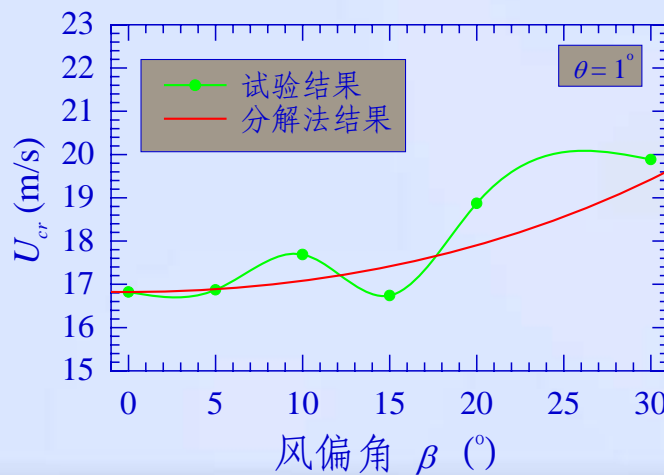
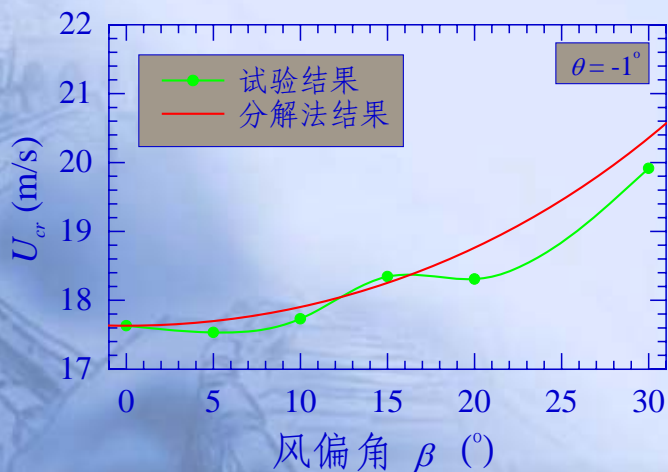
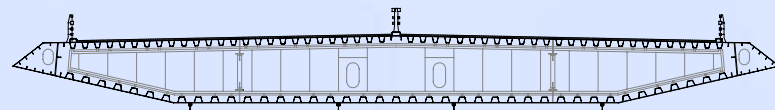
# 扁平箱梁断面斜风颤振性能 (续)

## ✦ 颤振临界风速 - 风偏角曲线



Cosine rule:

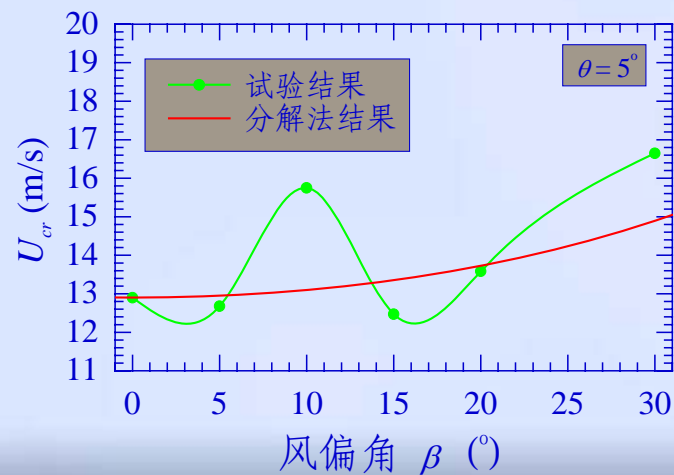
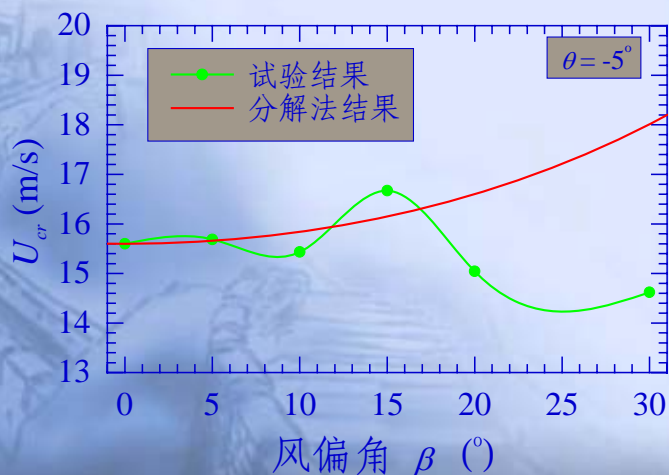
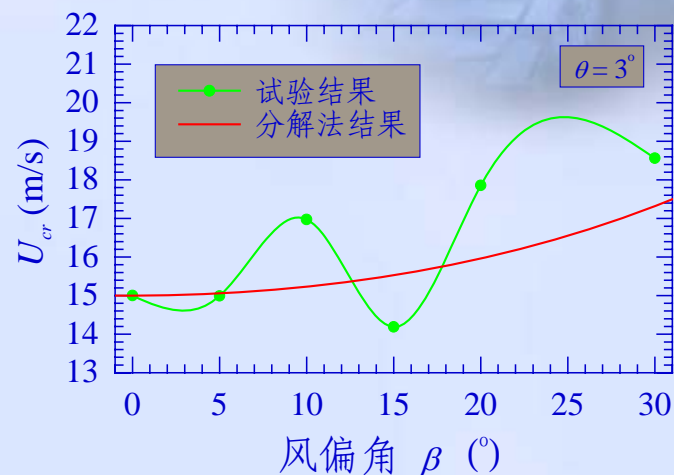
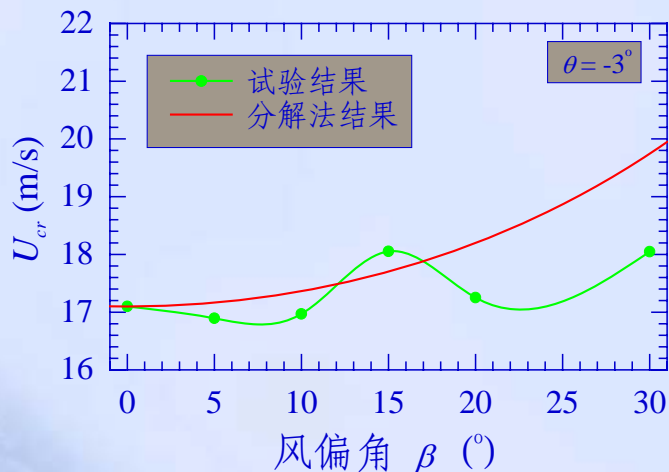
$$U_{cr}(\theta, \beta) = U_{cr}(\theta, 0^{\circ}) / \cos \beta$$





# 扁平箱梁断面斜风颤振性能 (续)

## ✦ 颤振临界风速 - 风偏角曲线 (续)





# 扁平箱梁断面斜风颤振性能 (续)

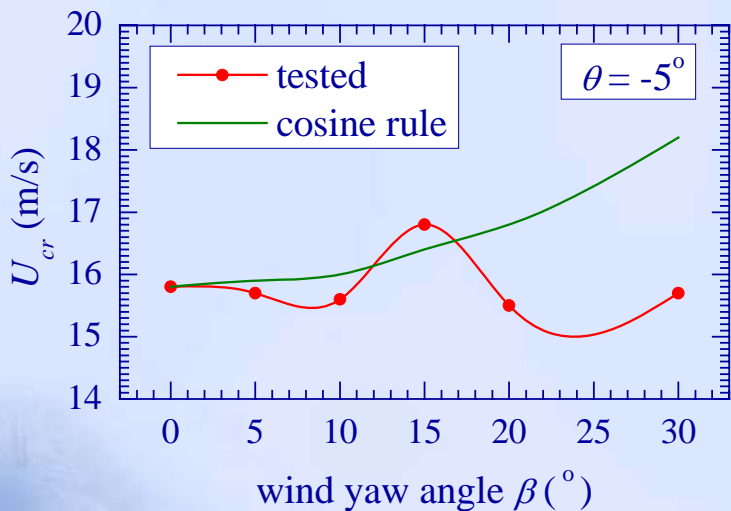
✦ 斜风临界风速相对于法向风临界风速的增量 (%)

$\theta \backslash \beta$	-5°	-3°	-1°	0°	1°	3°	5°
5°	0.6	-1.2	-0.6	0.0	0.6	0.0	-1.6
10°	-1.3	-0.6	0.6	2.3	5.4	13.3	21.7
15°	7.1	5.8	4.0	2.3	-0.6	-5.3	-3.1
20°	-3.8	1.2	4.0	6.9	12.5	19.3	5.4
30°	-6.4	5.3	13.1	15.5	18.5	24.0	28.7



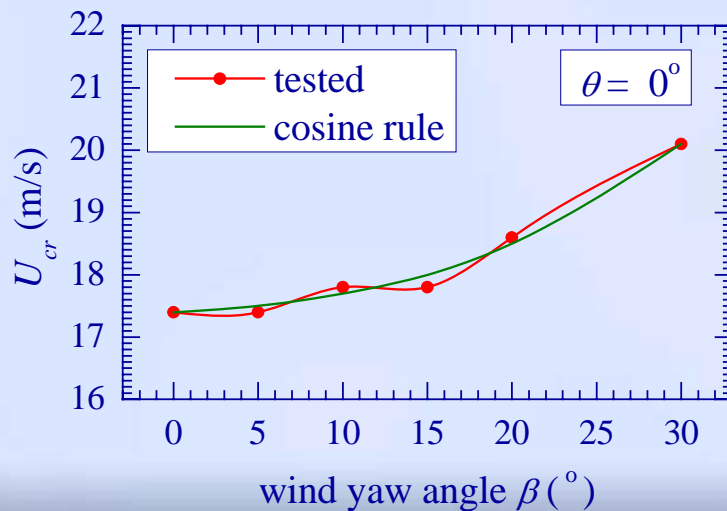
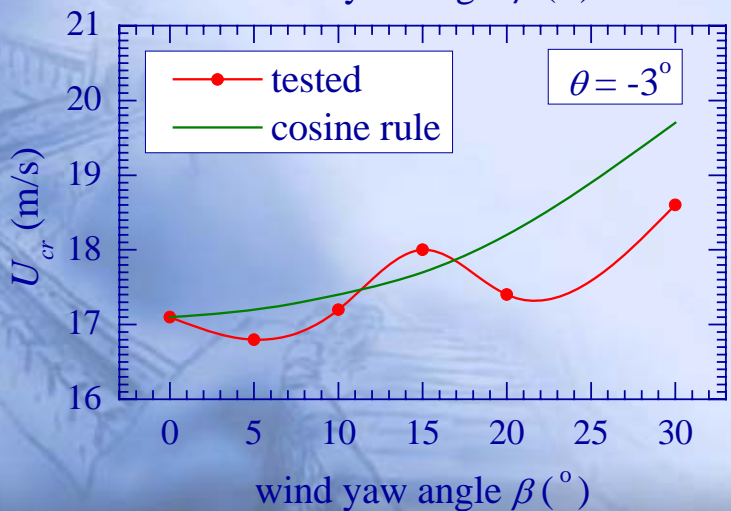
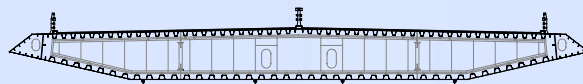
# 扁平箱梁断面斜风颤振性能 (续)

## 成桥状态：颤振临界风速-风偏角曲线



Cosine rule:

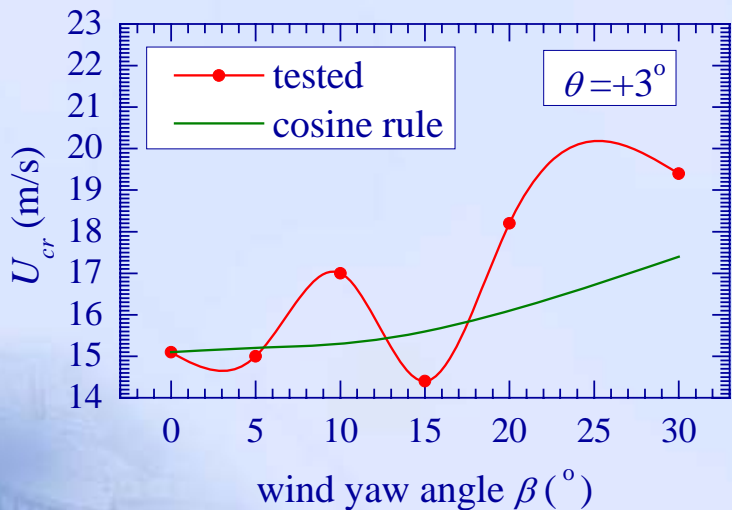
$$U_{cr}(\theta, \beta) = U_{cr}(\theta, 0^\circ) / \cos \beta$$





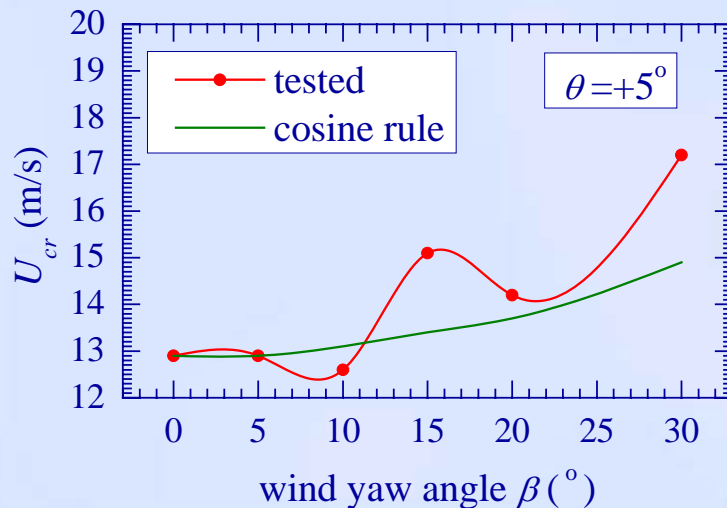
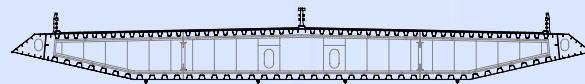
# 扁平箱梁断面斜风颤振性能 (续)

## 成桥状态: 颤振临界风速-风偏角曲线 (续)



Cosine rule:

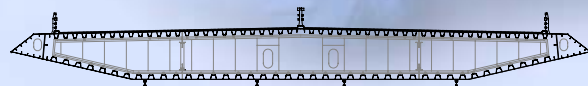
$$U_{cr}(\theta, \beta) = U_{cr}(\theta, 0^\circ) / \cos\beta$$





# 扁平箱梁断面斜风颤振性能 (续)

✦ 斜风临界风速相对于法向风临界风速的增量 (%)



$\beta \backslash \theta$	$-5^\circ$	$-3^\circ$	$0^\circ$	$3^\circ$	$5^\circ$
$0^\circ$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$5^\circ$	-0.6	-1.8	0.0	-0.7	0.0
$10^\circ$	-1.3	0.6	2.3	12.6	-2.3
$15^\circ$	6.3	5.3	2.3	-4.6	17.1
$20^\circ$	-1.9	1.8	6.9	20.5	10.1
$30^\circ$	-0.6	8.8	15.5	28.5	33.3



# 扁平π形薄壁开口断面斜风颤振性能

## ➤ 柳州红光桥成桥状态

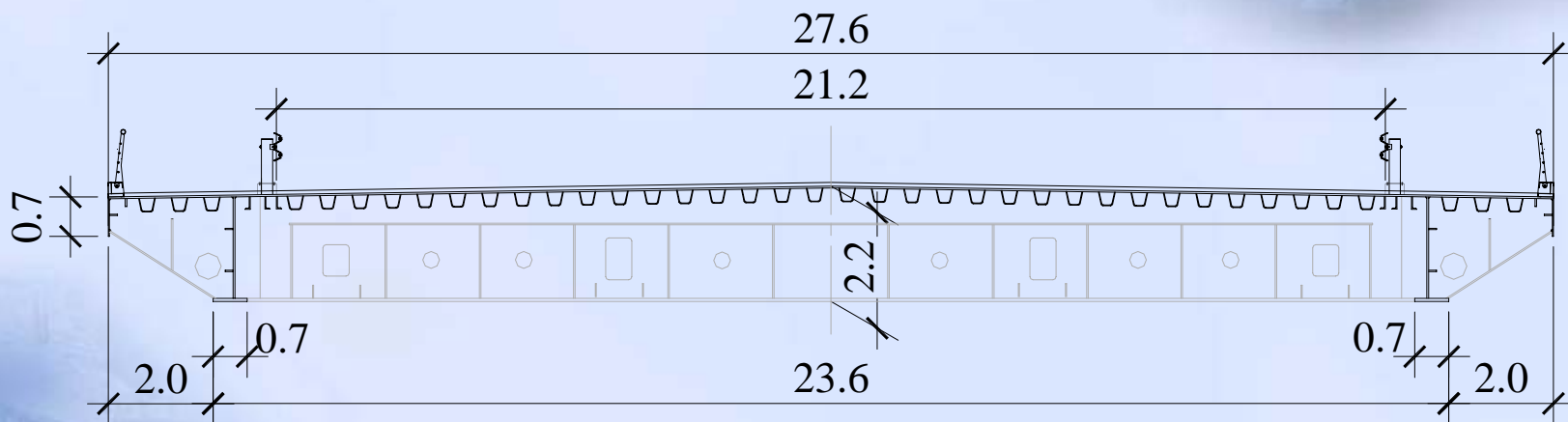


- ⊙ 单跨悬索桥: 380m
- ⊙ 矢跨比:  $f/L=1/9.87$
- ⊙ 桥塔:  
高: 72.7m/71.2m  
桥面以上41.4m 为RC  
拱式门架



# 扁平薄壁开口断面斜风颤振性能 (续)

## 柳州红光桥成桥状态 (续)



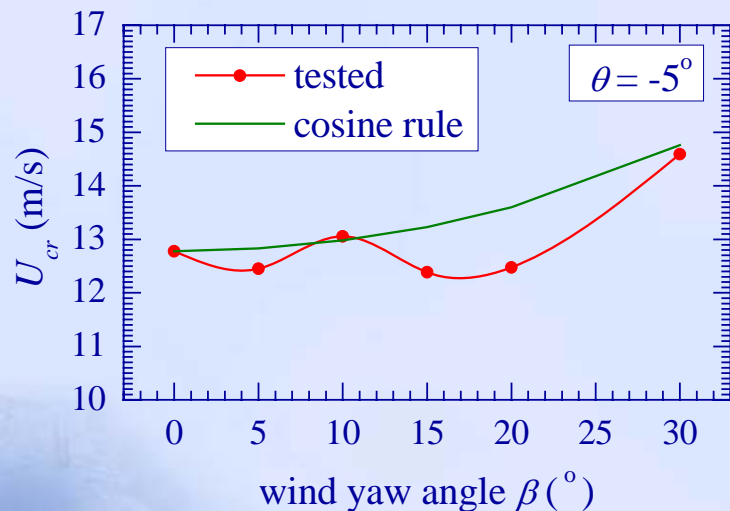
✦  $B/H=27.6\text{m}/2.2\text{m}=12.5$

✦ 基频:  $f_v=0.2768\text{Hz}$ ,  $f_t=0.3744\text{Hz}$



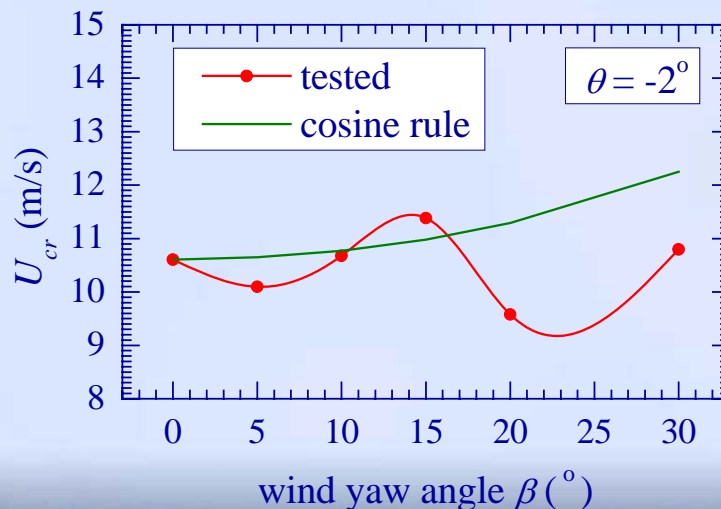
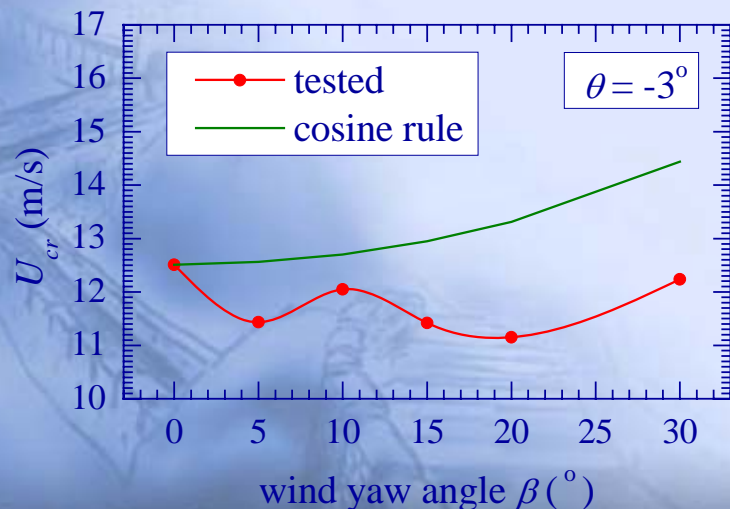
# 扁平薄壁开口断面斜风颤振性能 (续)

## 试验结果 - 颤振临界风速 - 风偏角曲线



Cosine rule:

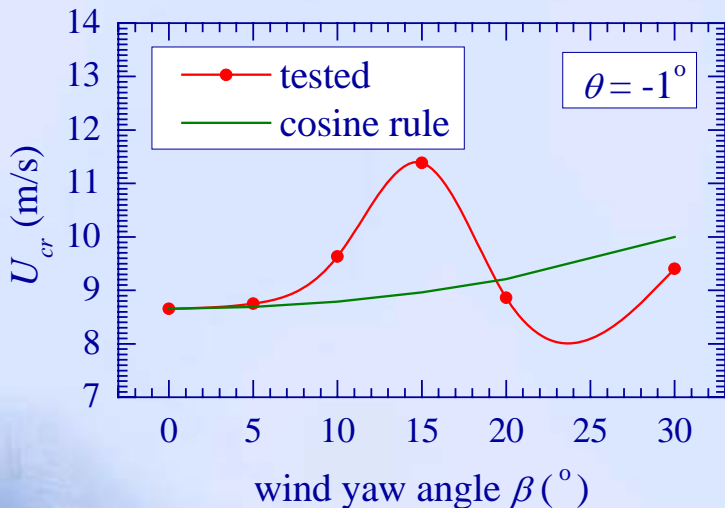
$$U_{cr}(\theta, \beta) = U_{cr}(\theta, 0^{\circ}) / \cos \beta$$





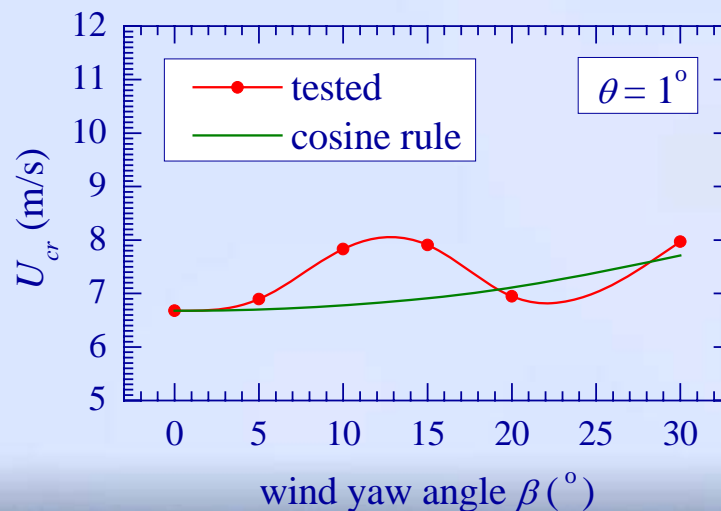
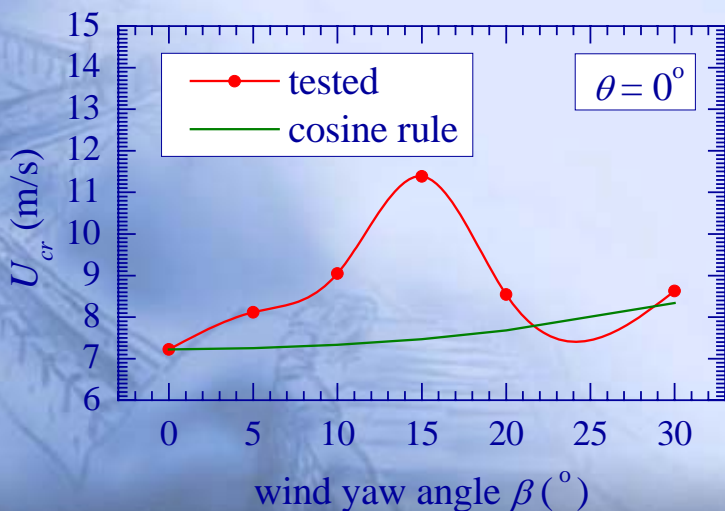
# 扁平薄壁开口断面斜风颤振性能 (续)

## 试验结果 - 颤振临界风速 - 风偏角曲线 (续)



Cosine rule:

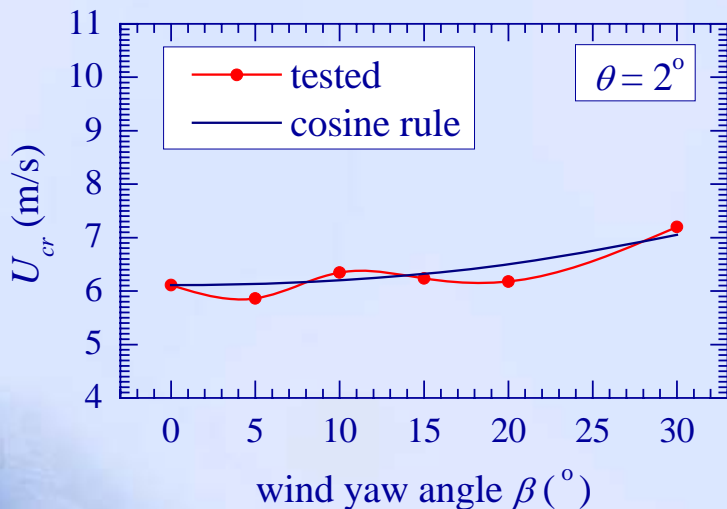
$$U_{cr}(\theta, \beta) = U_{cr}(\theta, 0^\circ) / \cos \beta$$





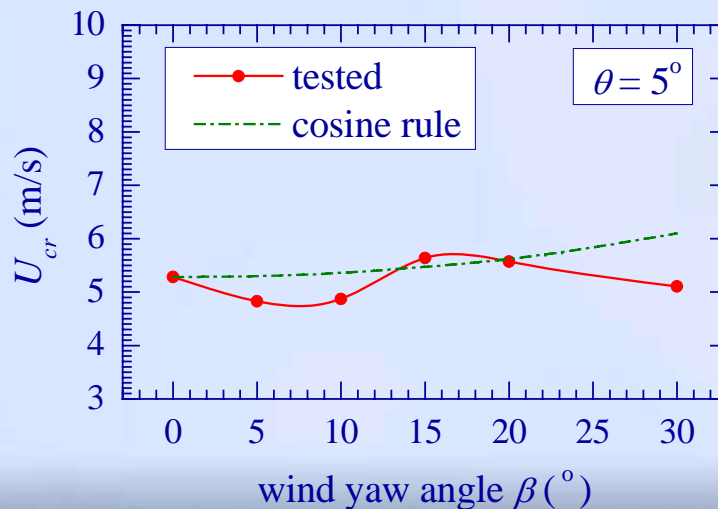
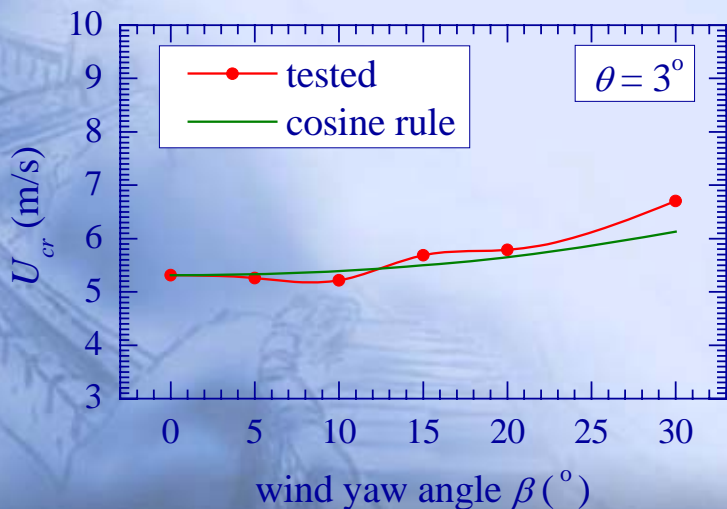
# 扁平薄壁开口断面斜风颤振性能 (续)

## ★ 试验结果 - 颤振临界风速 - 风偏角曲线 (续)



*Cosine rule:*

$$U_{cr}(\theta, \beta) = U_{cr}(\theta, 0^{\circ}) / \cos \beta$$





# 扁平薄壁开口断面斜风颤振性能 (续)

✦ 斜风临界风速相对于法向风临界风速的增量 (%)



$\theta \backslash \beta$	-5°	-4°	-3°	-2°	-1°	0°	1°	2°	3°	4°	5°
0°	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5°	-3.1	-5.6	-8.8	-4.7	1.1	12.5	3.0	-3.3	0.0	-7.5	-9.4
10°	2.3	0.0	-3.2	0.9	10.3	25.0	16.4	3.3	-1.9	-5.7	-7.5
15°	-3.1	-5.6	-8.8	7.5	31.0	58.3	17.9	1.6	7.5	7.5	5.7
20°	-2.3	-7.1	-10.4	-9.4	2.3	18.1	3.0	1.6	9.4	7.5	5.7
30°	14.1	4.8	-2.4	1.9	8.0	19.4	19.4	18.0	26.4	13.2	-3.8



# 带挑臂双主肋开口断面斜风颤振性能

## ➤ 重庆长江二桥

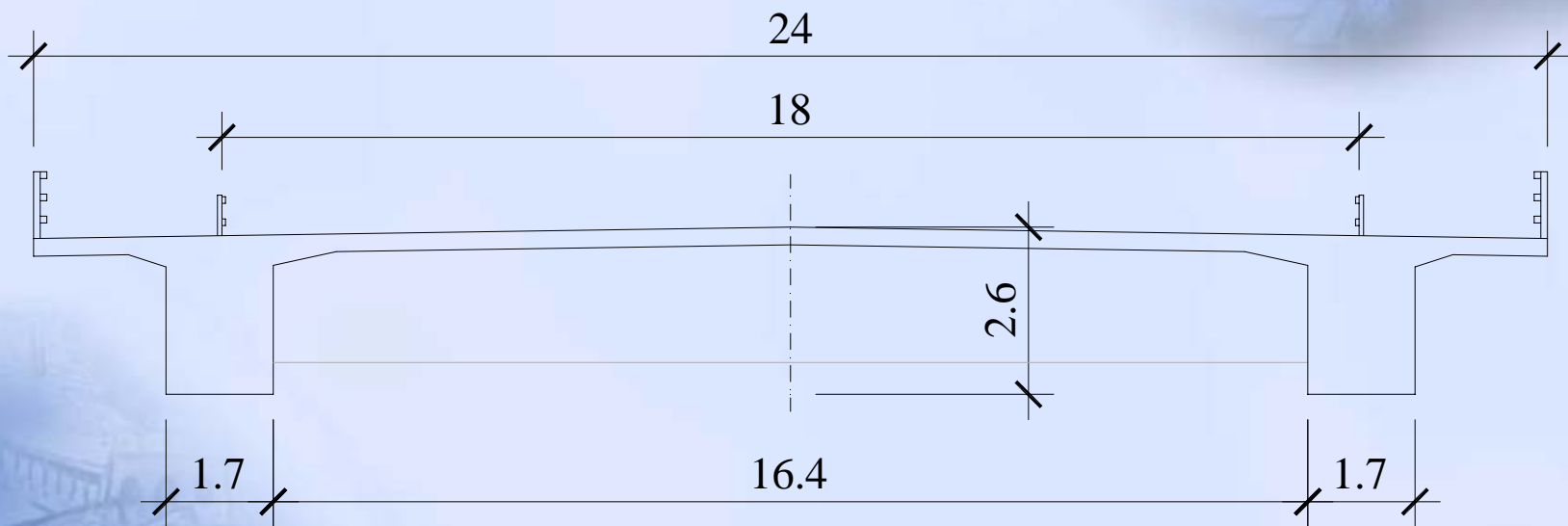


- ◎ 三跨斜拉桥:  
169+444+169m
- ◎ RC H形桥塔:  
总高137m  
桥面以上111m



# 带挑臂双主肋开口断面斜风颤振性能 (续)

## 重庆长江二桥 (续)



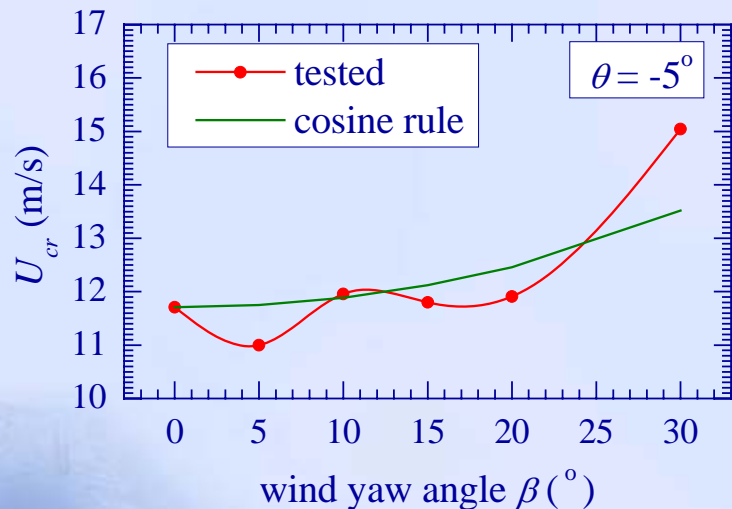
✦  $B/H=24\text{m}/2.5\text{m}=9.6$

✦ 基频:  $f_v=0.2872\text{Hz}$ ,  $f_t=0.4619\text{Hz}$



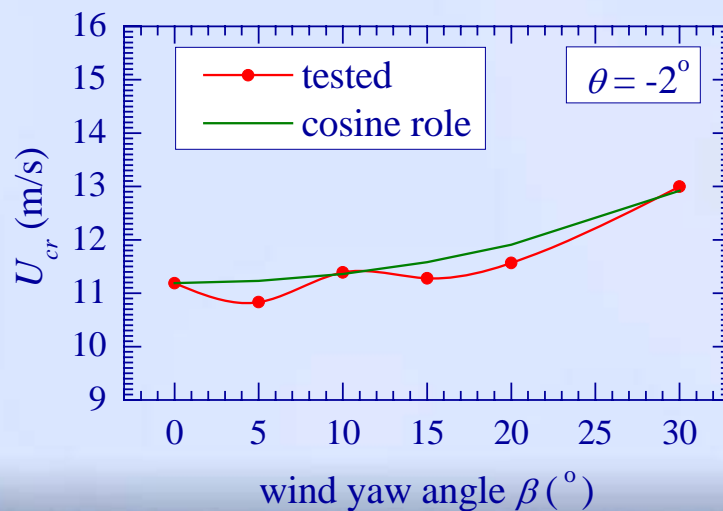
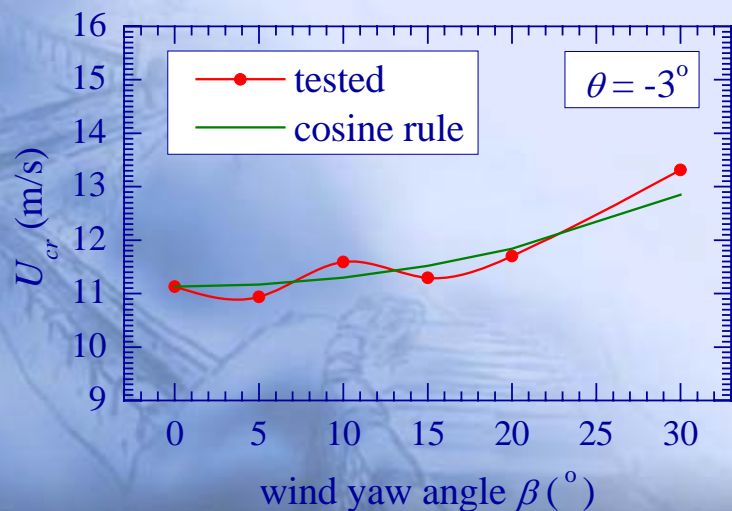
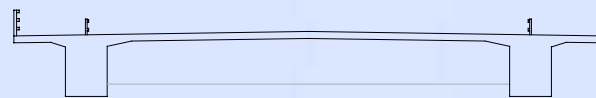
# 带挑臂双主肋开口断面斜风颤振性能 (续)

## 试验结果: 颤振临界风速 - 风偏角曲线



*Cosine rule:*

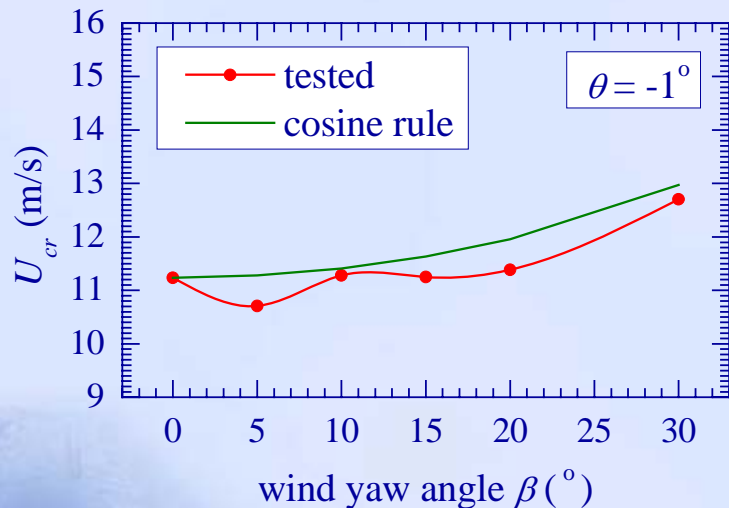
$$U_{cr}(\theta, \beta) = U_{cr}(\theta, 0^\circ) / \cos\beta$$





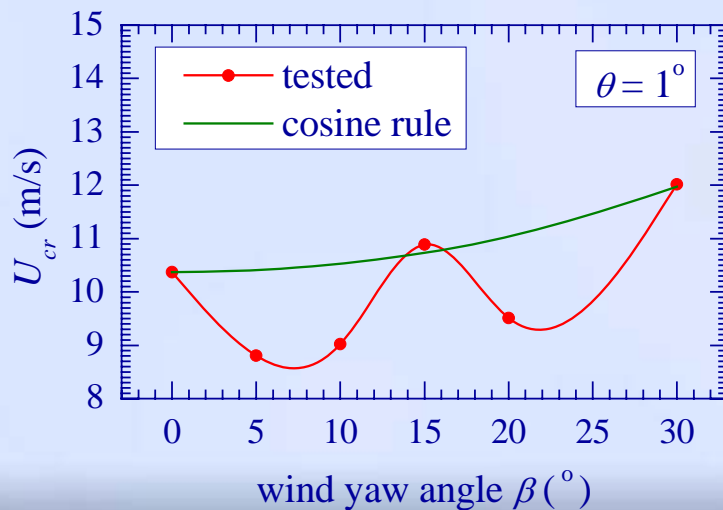
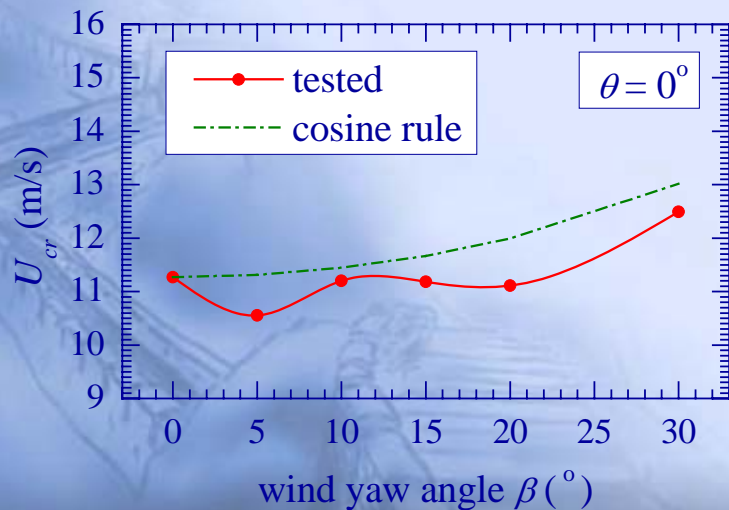
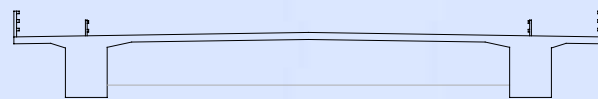
# 带挑臂双主肋开口断面斜风颤振性能 (续)

## 试验结果: 颤振临界风速 - 风偏角曲线 (续)



Cosine rule:

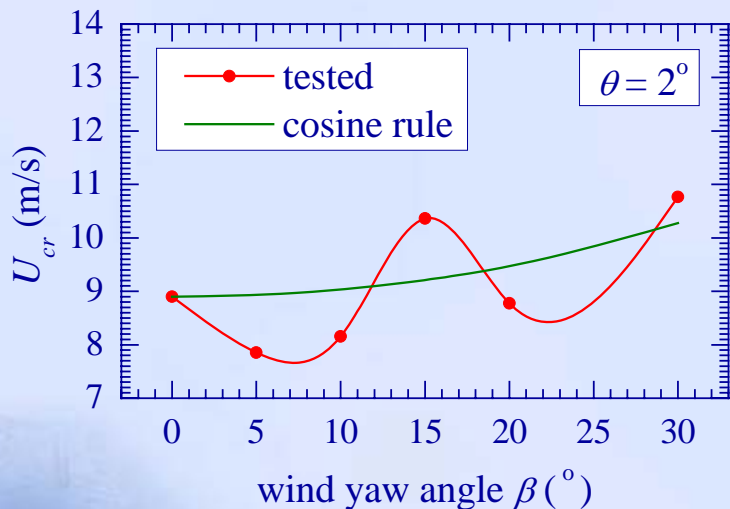
$$U_{cr}(\theta, \beta) = U_{cr}(\theta, 0^\circ) / \cos\beta$$





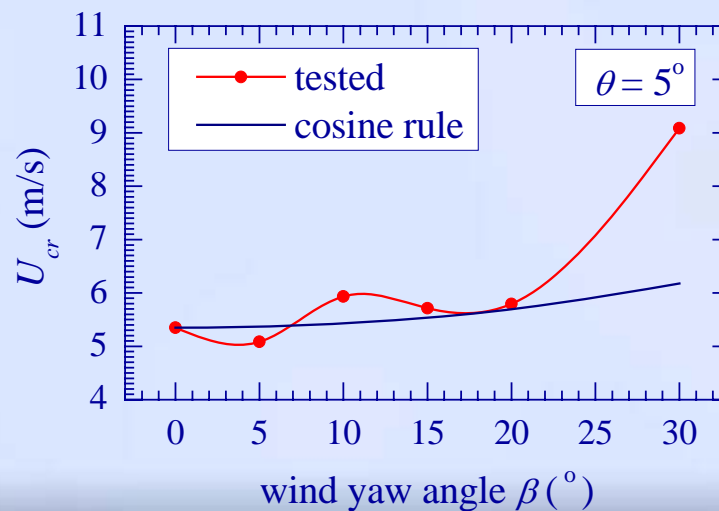
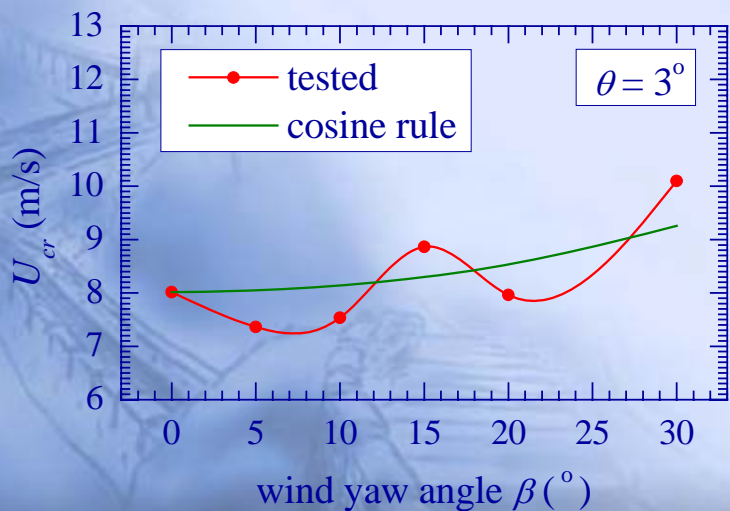
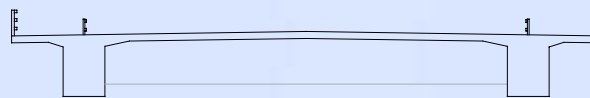
# 带挑臂双主肋开口断面斜风颤振性能 (续)

## 试验结果: 颤振临界风速 - 风偏角曲线 (续)



Cosine rule:

$$U_{cr}(\theta, \beta) = U_{cr}(\theta, 0^{\circ}) / \cos\beta$$





# 带挑臂双主肋开口断面斜风颤振性能 (续)

✦ 斜风临界风速相对于法向风临界风速的增量 (%)



$\theta \backslash \beta$	-5°	-4°	-3°	-2°	-1°	0°	1°	2°	3°	4°	5°
0°	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5°	-6.1	-3.8	-1.7	-3.2	-4.7	-6.4	-15.1	-11.8	-8.2	-18.0	-5.0
10°	2.1	3.6	4.1	1.8	0.4	-0.6	-13.0	-8.3	-6.0	-10.0	10.8
15°	0.8	1.1	1.5	0.8	0.1	-0.8	5.0	16.4	10.5	1.1	6.7
20°	1.7	3.6	5.1	3.4	1.3	-1.4	-8.3	-1.5	-0.7	-1.1	8.4
30°	28.4	23.5	19.6	16.2	13.0	10.8	15.9	21.0	25.9	32.3	69.9



# 研究总结

## ➤ 新发现

- ✦ 目前被普遍采用的只考虑法向风的大跨度桥梁颤振稳定性研究方法可能会导致不安全的结果，认为法向风为颤振最不利的传统观念需要更新
- ✦ 桥梁的最低临界风速一般在斜风作用下发生，在 $\pm 3^\circ$ 风攻角的范围内，斜风效应有可能使颤振临界风速折减5%~15%。
  - 扁平闭口箱梁：5%
  - 扁平 $\pi$ -形开口薄壁梁：10%
  - 扁平双边肋主梁：15%



## 研究总结 (续)

### ➤ 新发现

- ✦ 开口断面的外露横梁使其颤振临界风速的斜风效应折减幅度比外形较光滑的扁平闭口箱形断面要大，可达一倍或以上
- ✦ 桥梁的颤振临界风速随风偏角呈波动状变化，而且这种波动的程度与风攻角有较大关系
- ✦ 估算斜风颤振临界风速的传统平均风分解方法一般会  
导致偏不安全的结果



# 研究总结 (续)

## ➤ 新建议

- ✦ 对于颤振稳定性富余度不充足的大跨度桥梁，如：建于台风频袭地区的大跨度桥梁，宜考虑斜风效应
- ✦ 桥梁斜风颤振稳定性一般需要通过斜风下斜节段模型风洞试验确定
- ✦ 根据不同的主梁断面形状，桥梁初步设计阶段的颤振临界风速的斜风效应折减幅度可取10~20%。