

# 斜張橋の耐風設計の照査方法

— Mersey Gateway Bridgeを例として —

**紙と鉛筆のみで照査してみよう！**

2019.11.13

**(株) 吉田組 田中 洋 技術顧問**



(C) is reserved to CVV

# 目次

1. SAMSUNGの依頼事項
2. 有害振動の照査
3. 桁の振動照査結果
4. ケーブルの振動
5. 塔の振動
6. 架設時の安定性

# 1. SAMSUNGの依頼事項

**Mercy Gate Bridgeの耐風性を評価してほしい。**

<http://www.merseygateway.co.uk/>

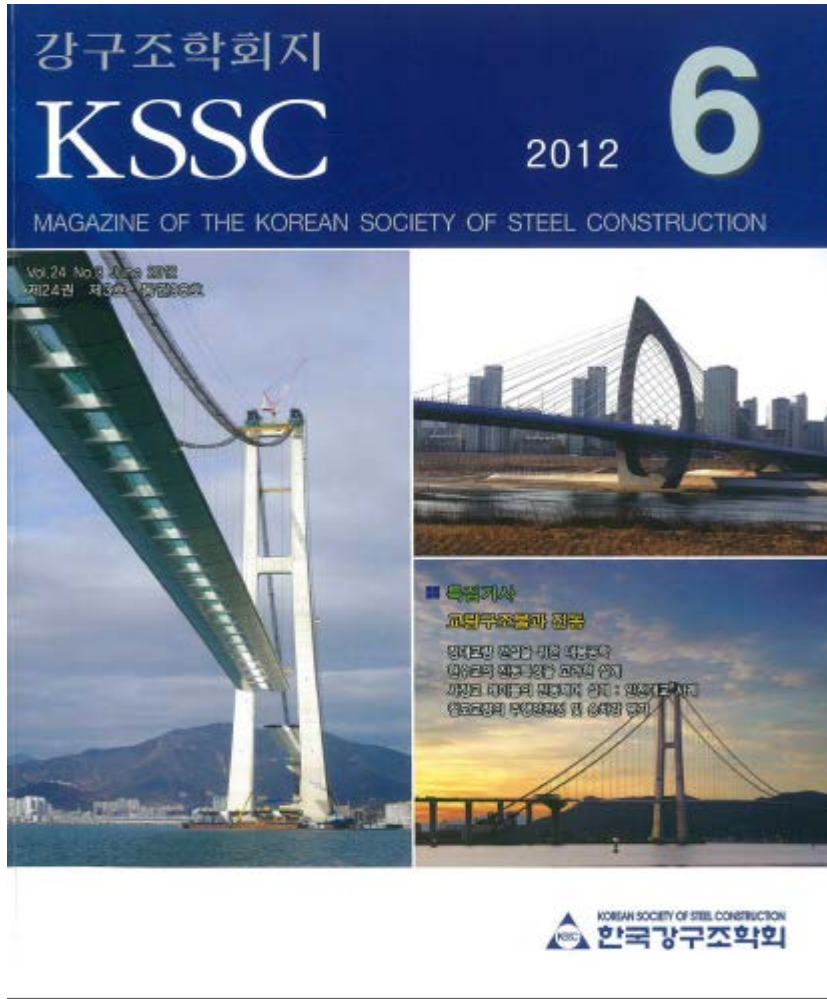
**但し、Mercy Gate Bridgeの耐風性の資料は皆無です。**

一般図と簡単な諸元のみで評価してください。

**紙とペンのみで照査してみよう！**

# 韓国鋼構造学会誌への投稿

## --道路橋耐風設計便覧の紹介--



### 장대교량 건설을 위한 내풍공학 (Wind Engineering for Long-Span Bridge Construction)

다나카 히로시 (Tanaka Hiroshi), 원성윤신 기술고문, [fk.h@kssm.or.kr](mailto:fk.h@kssm.or.kr)

#### 1. 서론

한수교 및 사장교 설계에는 많은 기술이 필요한데, 특히 내풍공학이 가장 중요한 분야이다. 그러나 일본의 대학 등에서 이를 정리한 장치가 제공되는 기회는 적고 취적 후 경험을 통해 배우는 경우가 대부분이다. 내풍공학 강좌가 있는 대학이 있기는 하나, 내풍공학이라고 이름을 붙인 강좌는 별로 없다. 연구에서도 비슷한 상황이라고 한다.

이는 내풍공학의 내용이 다양하게 나누어져 있고 교과서도 적어 가르치기 어려운 것이 원인이라 할 수 있다. 필자는 일본의 모 중앙원에서 근무하였고 장대교 내풍설계에 풍동실험을 이용하여 풍동실험을 해 본 경험이 있으므로 실무자의 입장에서 필요한 항목을 언급하고자 한다. 또한 인천대교 임무와 한국 국내 임무를 맡아 한국의 내풍공학에 대한 기준도 이해하고 있다. 이러한 경험을 살려 본고를 작성하였다. 한국의 젊은 기술자가 장대교 등의 설계를 할 때, 난해하다고 알려져 있는 내풍공학을 적극적으로 임무에 임할 수 있었으면 하는 마음으로 본고를 작성하였다.

#### 2. 내풍공학의 정의

내풍공학은 교량 설계에 있어서 풍장이 교량에 작용했을 때, 교량이 견뎌낼 강도를 유지하여 위험한 진동현상이 생기지 않도록 교량을 설계하는 것이다. 물론, 가설 중에도 불안정한 상태가 발생해서는 안 된다. 내풍공학은 이상의 기술을 제공하는 학문이다. 구체적으로 살펴보면, 진동해석, 불규칙 진동론, 유체역학, 공력 탄성학, 기상학, 신뢰성 이론 등 다양한 분야로 나누어진 학문체제로 다소 난해하지만 매력 있는 학문이다. 그러나 시면의 제약으로 학문 전모를 소개하기는 어렵다. 따라서 한국의 교량기술자가 한수교와 사장교 설계 시 참고로 하는 것이 될 길고양 설계지침<sup>1)</sup> 제8장(이하, 제8장)을 한국 내풍

편람이라 함)과 마찬가지로 일본 교량기술자가 참고하는 도로교 내풍 설계 편람<sup>2)</sup>(이하, 일본 내풍 편람이라 함)을 비교하여 한국의 기술자에게 도움이 될 만한 사항을 기술하고자 한다. 또한 「도로교 설계 기준」(2010)<sup>3)</sup>의 장하중 항(2.1.11)도 한국 내풍 편람과 함께 논의하고자 한다.

#### 3. 한국 내풍 편람과 일본 내풍 편람의 차이점<sup>1),2),3)</sup>

한국과 일본의 내풍 편람의 내용 항목은 거의 동일하나, 한국 내풍 편람은 문량이 20페이지가 못 되기 때문에 도로가 적고 대부분 문장으로 구성되어 있다. 한편, 일본 내풍 편람은 약 330페이지로 구성되어 있어 각 태마를 상세한 도로로 해설하고 있다. 일본 내풍 편람의 가장 큰 특징은 가능한 한 풍동 실험을 하지 않고 간단한 계산으로 Flutter공속과 와이민 발생 풍속 및 그 진폭을 구하도록 되어 있다. 지간치가 200m이 하인 도로교를 대상으로 하고 있다(200m 이상은 혼수 시코쿠(本州四国) 연막로 내풍설계기준(2001) 해설을 참조). 그러나 200m를 넘는 도로교에 대해서도 일본 내풍 편람 사상 풍과 공동현상이 많이 적용 조건을 검토한 뒤 참고할 수 있다. 풍동실험을 하지 않게 막상 계산으로 풍랑의 계산을 할 수 있도록 표현한 내용 편람은 일본 내풍 편람 이외에는 찾을 수 없었다. 한수교와 사장교 이외의 기교교 및 기본원지단에서 각종 기본안을 검토할 때, 내풍 성능을 판단하는 핵심적으로 이용되면 실제 미용 절감으로 이어질 수 있으리라 생각한다.

#### 4. 내풍공학의 기초지식<sup>1),2),3)</sup>

##### 4.1 풍특성

바람은 공기의 흐름이고 그 흐름은 거의 수평이라 볼 수 있다. 그러나 기복이 있는 지형에서는 경사각이 불기 때문에 주파가 필요하다(보통 3도 이하). 지표 부근에서는 지형, 식물,

## 2. 有害振動の照査

- (1) 簡易固有振動計算
- (2) フラッターの照査
- (3) ギャロッピングの照査
- (4) 渦励振の照査

# 解析に用いた基準（土木学会）

構造工学シリーズ **12**

## 橋梁の耐風設計

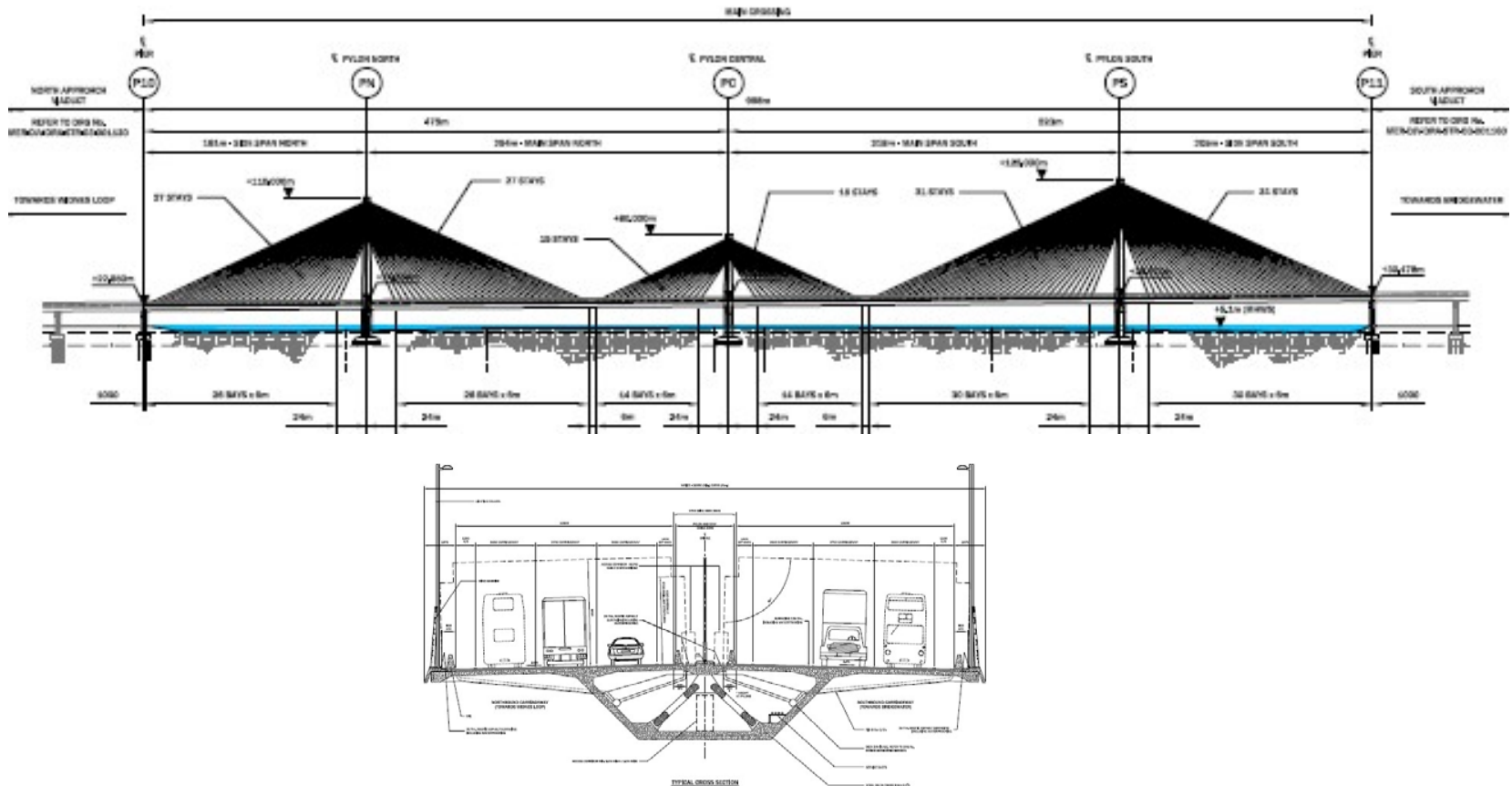
—基準と最近の進歩—

または、**道路橋耐風設計便覧**

(C) is reserved to CVV



# 解析モデル



- 三本主塔斜張橋(鋼・コンクリート合成床版)
- 最大支間 (L) : 318m
- 主桁: 箱桁タイプ 橋幅(B) 33.95 m , 桁高 (d) 4.5 m

(C) is reserved to CVV



# Mersey Gate Way Bridge (英国)

SAMSUNG リバプールで架設

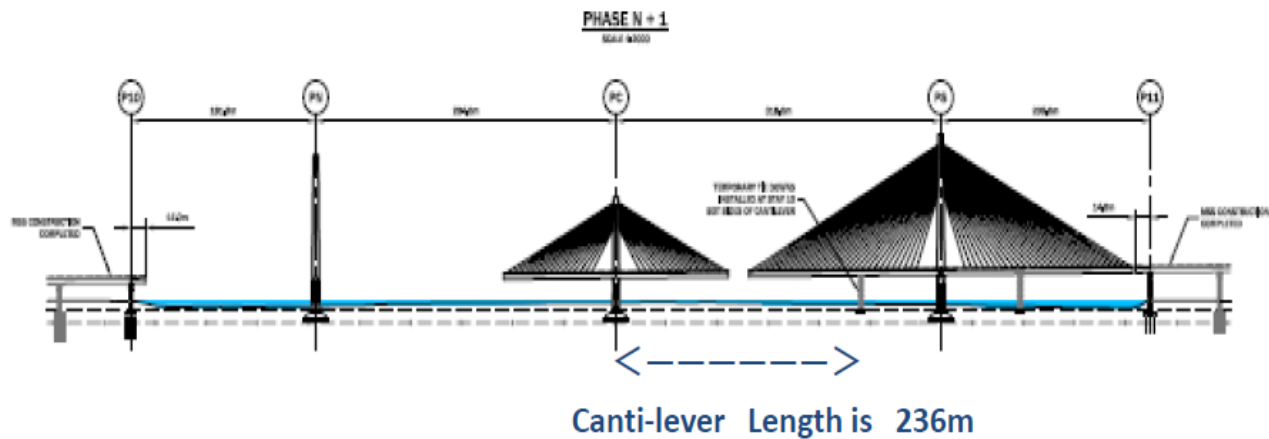


完成写真 (2017.10.10)

(C) is reserved to CVV



# Balancing Erection (Mersey Gateway Bridge)



# Erection Information by Inter-Net



(C) is reserved to CVV

## Opening Ceremony

# 簡易固有値解析

- (1) 曲げ1次振動数 :  $f_h$
- $f_h = 100 / L$  : 支間長(m) ...(5.4)
- $= 100/318 = 0.31\text{Hz}$

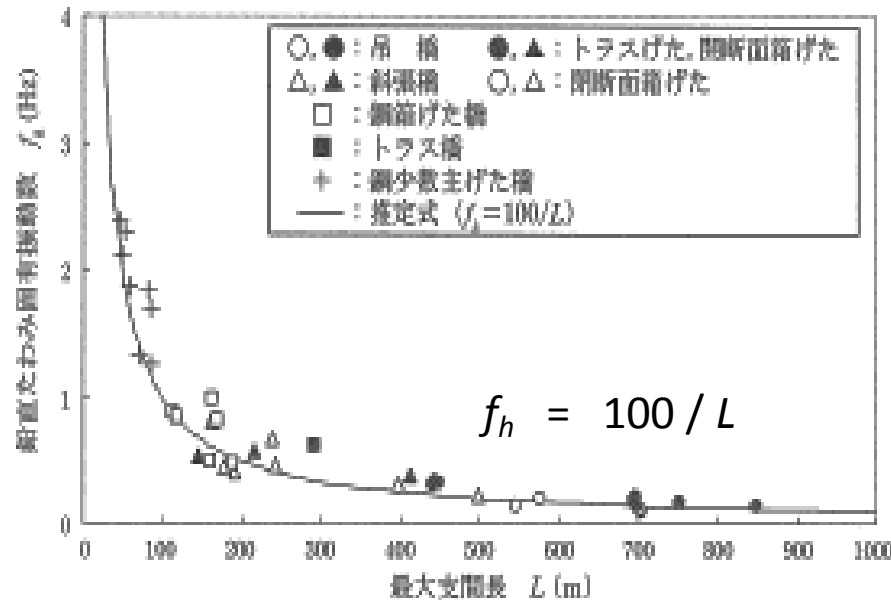


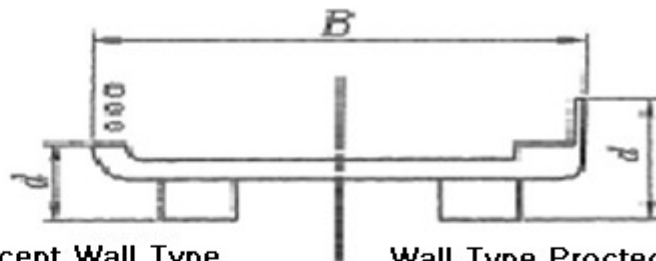
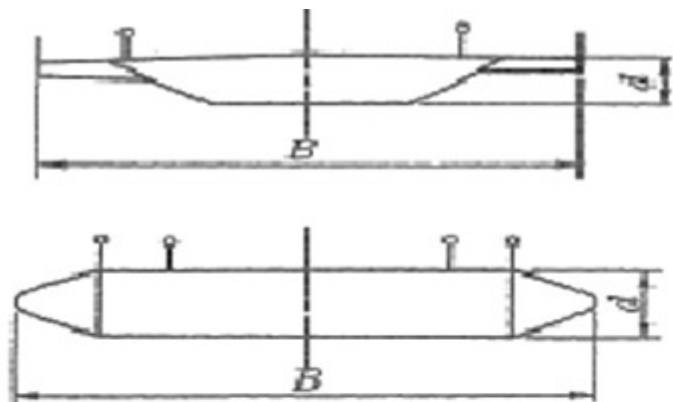
図-5.18 鉛直たわみ固有振動数と最大支間長の関係

## (2) ねじれ1次振動数 ( $f_g$ )

- $f_g = 3 f_h$  (箱桁) ..... (5.6)

- $= 3 \times 0.31 = 0.93\text{Hz}$

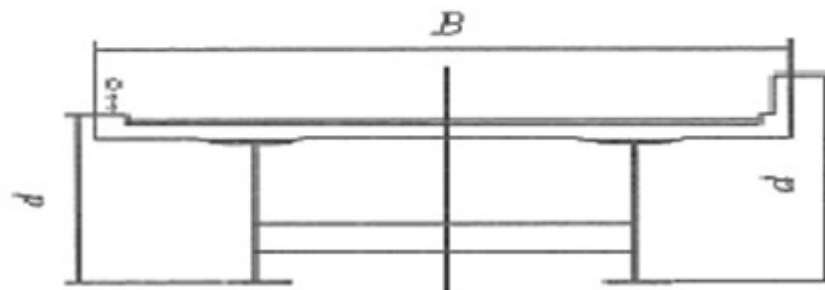
- **注記. 式番号はKSSCに投稿した田中論文の番号を使用した**



Except Wall Type Protective Barrier

Wall Type Protective Barrier and Noise Barrier

(b) Box Type Section



Except Wall Type Protective Barrier

Wall Type Protective Barrier and Noise Barrier

(c) I Type Section

注1) 有効高さ(d)は、壁タイプの手すりなどを含む。また、鋼製手すりなどは、上端までの高さとする。

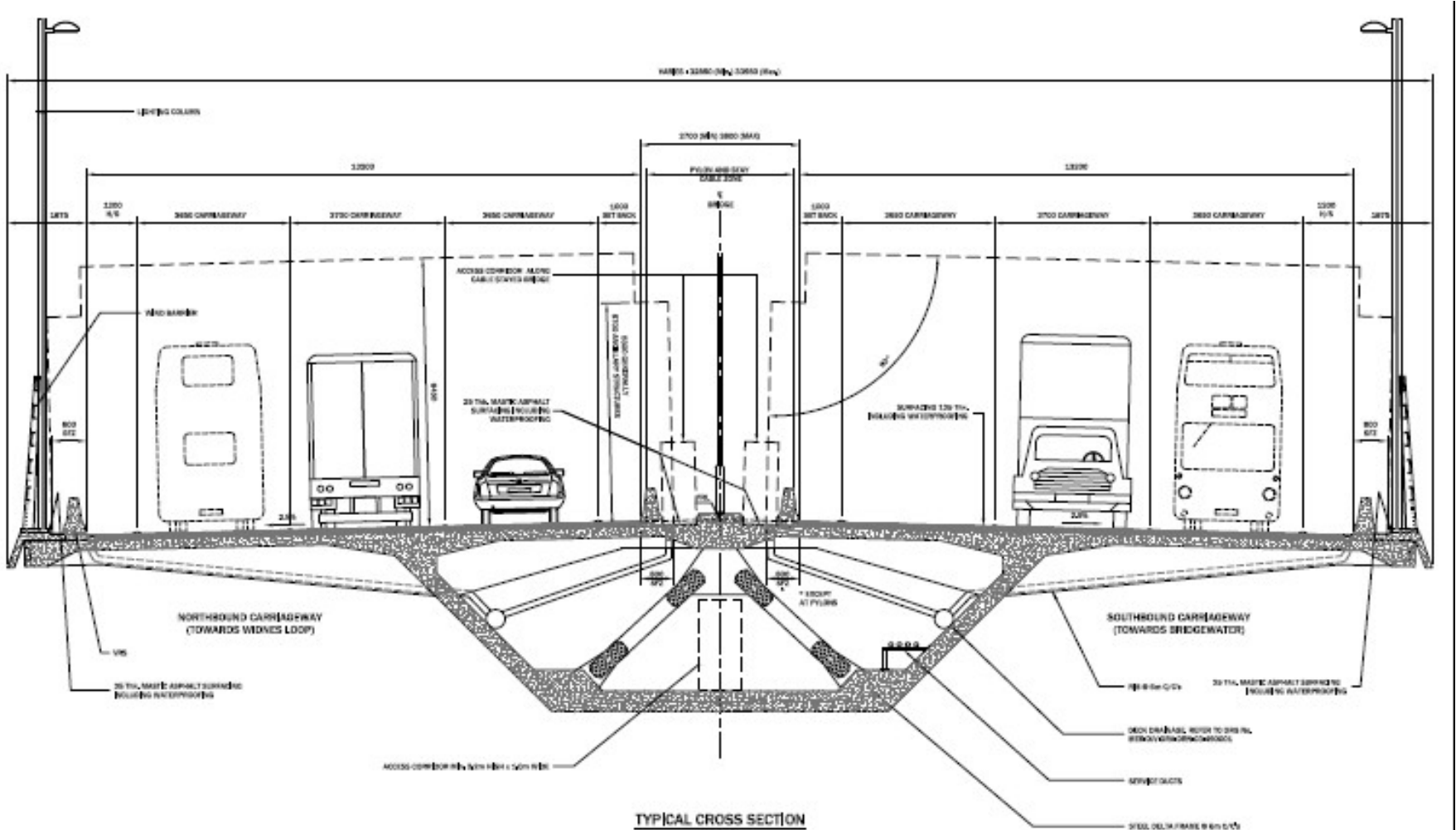
注2) 床舗装の傾斜は無視する。

Fig.-3 桁幅  $B$  & 桁高  $d$

(C) is reserved to CVV

B (桁幅) = 33.95m

d (桁高) = 4.5m



(C) is reserved to CVV

# フラッター発現風速 ( $U_{cf}$ )

- フラッター発現風速  $U_{cf}$  :
- $U_{cf} = 2.5 f_{\vartheta} \cdot B$  ..... (5.8)
- $= 2.5 \times 0.93 \times 33.95$
- $= 79\text{m/s}$
  
- B: (桁幅) = 33.95m (本橋)



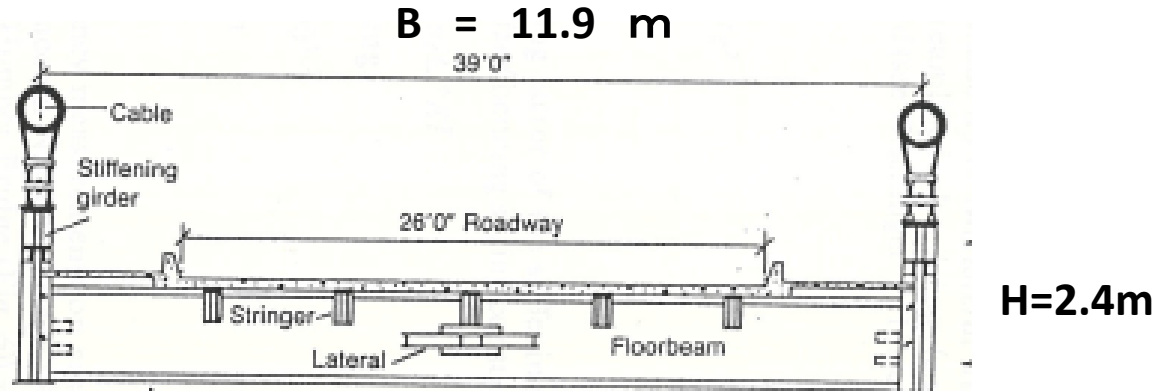
# フラッターによる Tacoma 橋落橋



(C) is reserved to CVV

Tacoma Narrows Bridge 7<sup>th</sup> November 1940

# タコマ橋のフラッター発現風速： $U_{cf}$



橋幅： $B = 11.9 \text{ m}$

橋桁： $H = 2.4 \text{ m}$

$$f_h = 100/853.4 = 0.117 \text{ c/s}$$

$$f_g = 2 \times 0.117 = 0.234 \text{ c/s}$$

$$U_{cf} = 2 \times 0.234 \times 11.9 = 6.96 \text{ m/s (安全側?)}$$

(C) is reserved to CVV

# 地表組度区分 I



(b) 地表粗度区分 I  
(C) is reserved to CVV

# 地表組度区分Ⅱ



(c) 地表粗度区分Ⅱ  
(C) is reserved to CVV

# 地表組度区分Ⅲ



(d) 地表粗度区分Ⅲ

(C) is reserved to CVV

# 地表組度区分IV



(e) 地表粗度区分IV  
(C) is reserved to CVV

# 地表組度区分 V



(C) is reserved to CVV



# Mersey Gateway Bridge

## (地表組度区分Ⅱと評価)



(C) is reserved to CVV

# 補正係数 E1

表-4.3 補正係数 E1

地表粗度区分 高度 (m)	0	I	II	III	IV
0 < z ≤ 5	1.24	1.11	1.00	0.83	0.77
5 < z ≤ 10	1.29	1.16	1.00	0.83	0.77
10 < z ≤ 15	1.36	1.24	1.04	0.83	0.77
15 < z ≤ 20	1.41	1.29	1.09	0.86	0.77
20 < z ≤ 25	1.46	1.33	1.14	0.90	0.77
25 < z ≤ 30	1.49	1.36	1.18	0.94	0.77
30 < z ≤ 35	1.51	1.39	1.21	0.96	0.79
35 < z ≤ 40	1.53	1.41	1.24	1.01	0.82
40 < z ≤ 45	1.55	1.43	1.26	1.04	0.85
45 < z ≤ 50	1.56	1.45	1.28	1.07	0.88
50 < z ≤ 60	1.59	1.47	1.31	1.11	0.92
60 < z ≤ 70	1.62	1.50	1.35	1.15	0.96
70 < z ≤ 80	1.64	1.53	1.38	1.18	1.00
80 < z ≤ 90	1.66	1.55	1.41	1.22	1.04
90 < z ≤ 100	1.68	1.57	1.43	1.25	1.08
100 < z ≤ 110	1.69	1.59	1.46	1.27	1.11
110 < z ≤ 120	1.71	1.61	1.48	1.30	1.14
120 < z ≤ 130	1.72	1.62	1.50	1.32	1.16
130 < z ≤ 140	1.73	1.64	1.52	1.35	1.19
140 < z ≤ 150	1.75	1.65	1.53	1.37	1.22
150 < z ≤ 160	1.76	1.67	1.55	1.39	1.24
160 < z ≤ 170	1.77	1.68	1.57	1.41	1.26
170 < z ≤ 180	1.78	1.69	1.58	1.43	1.28
180 < z ≤ 190	1.79	1.70	1.60	1.44	1.31
190 < z ≤ 200	1.80	1.71	1.61	1.46	1.33

(C) is reserved to CVV

# ① 設計基本風速 $U_d$

- ここで、 $B = 33.95\text{m}$ (橋幅)
- Mersey Gateway Bridge の架橋地点は、リバプール郊外. 地表組度区分 = II と評価
- $U_{10} = 23.2\text{m/s}$  (与えられた値)
- 補正係数 ( $E_1$ ) is 1.18 (桁高は、地面から29m)
- $U_d = U_{10} \times E_1 = 23.2 \times 1.18 = 27.4 \text{ m/s}$

Table-2 自然風の変動値による補間係数 ( $E_{r1}$ )

地表組度 区分	0	I	II	III	IV
$E_{r1}$	1.10	1.10	1.15	1.20	1.25

## ② フラッター照査風速 ( $U_{rf}$ )

- $U_{rf} = 1.2E_{r1} \times U_d \dots\dots\dots (5.2)$
- Mersey Gateway Bridge の地表組度係数は、  
II と仮定しているので、 $E_{r1} = 1.15$
- $U_{rf} = 1.2 \times 1.15 \times 27.4 = 38 \text{ m/s}$
- 依って、
- $U_{cf} = 79 \text{ m/s} > U_{rf} = 38 \text{ m/s}$
- **フラッターは問題ない。**

# ギャロッピングの照査

## (1) ギャロッピング発現風速 ( $U_{cg}$ )

- $U_{cg} = 8 f_h \cdot B$  (ここで、鋼製沓使用) (5.13)
- $= 8 \times 0.31 \times 33.95$
- $= 84 \text{ m/s}$

## (2) ギャロッピング設計風速 ( $U_{rg}$ )

- $U_{rg} = 1.2 \times U_d$  ..... (5.12)
- $= 1.2 \times 27.4$
- $= 33 \text{ m/s}$
- $U_{cg} = 84 \text{ m/s} > U_{rg}$
- $= 33 \text{ m/s} \rightarrow$  問題ない



## (4) 渦励振の照査

- [1] 曲げ渦励振

- ① 渦励振発現風速  $(U_{cvh})$

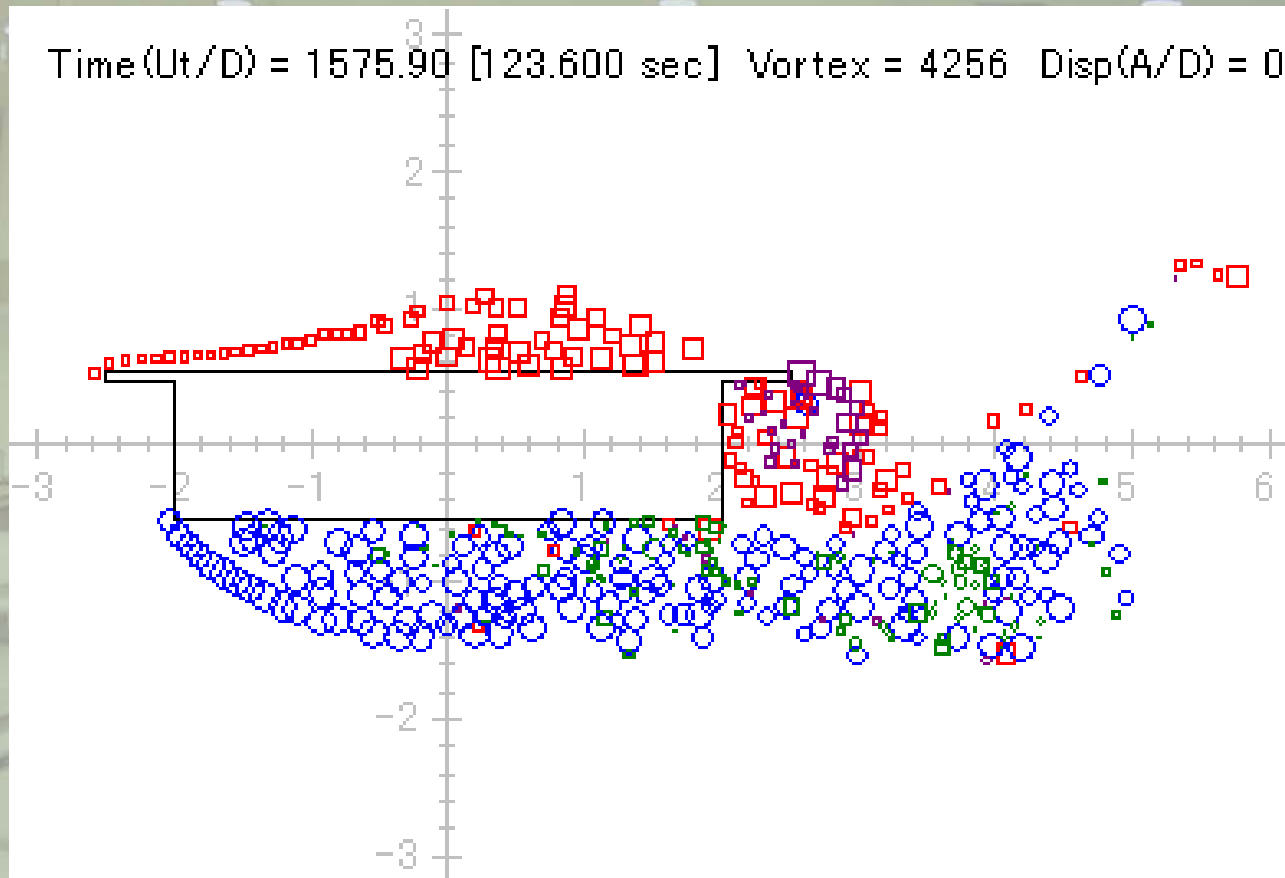
- $U_{cvh} = 2.0 f_h \cdot B$  ..... (5.19)

- $= 2.0 \times 0.31 \times 33.95$

- $= 21 \text{ m/s}$

# 渦励振とは何か？

f : Frequency of Vortex    V: Wind Velocity



## ② 振幅の計算

( $h_c$ )

- $h_c = h_e \cdot E_{ms} \cdot E_{th}$  ..... (5.21)  
( $E_{th}$  : 低減係数/後述)
- $h_e = \beta_h \cdot B / (m_r \cdot \delta_h)$  ..... (5.22)
- $E_{ms} = 1.3$  (慣用値使用)
- $\beta_h = 0.05 (B/d)^{-1} \cdot \beta_{ds} =$  ..... (5.2)
- $(B/d)^{-1} = (33.95/4.5)^{-1} = 0.133$
- $\beta_{ds} = 1$  ( $b_b > d/4$ )
- Then、 $\beta_h = 0.05 \times 0.133 \times 1 = 0.0067$

# 六角偏平断面桁

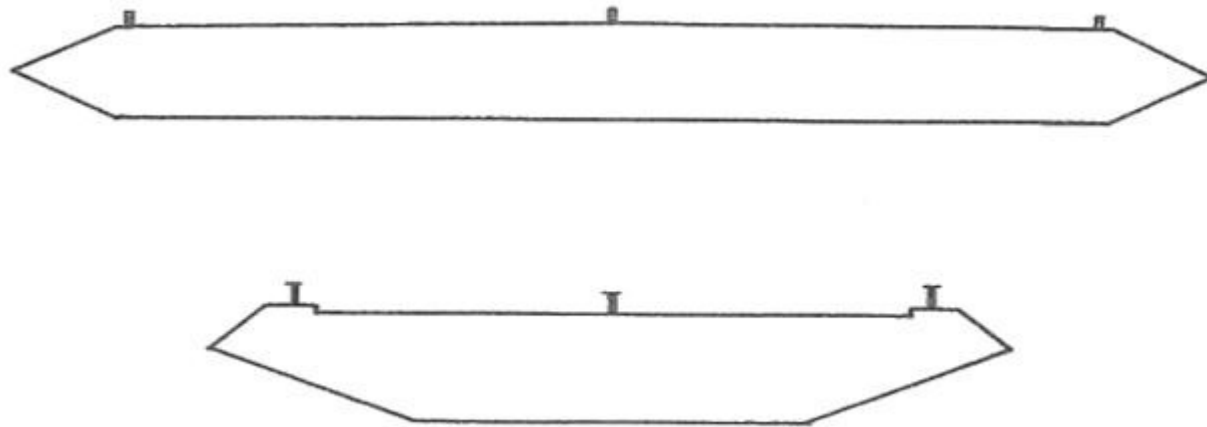
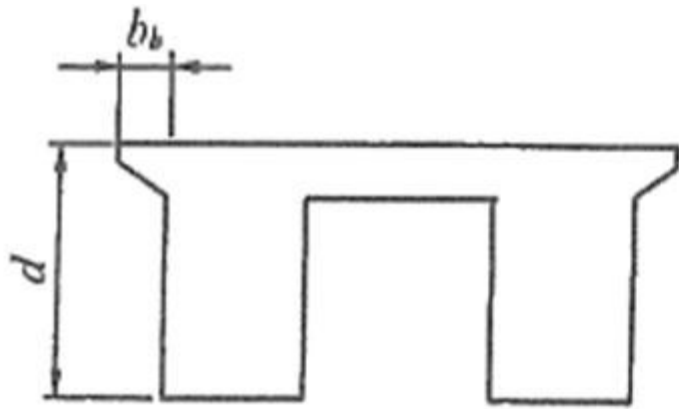


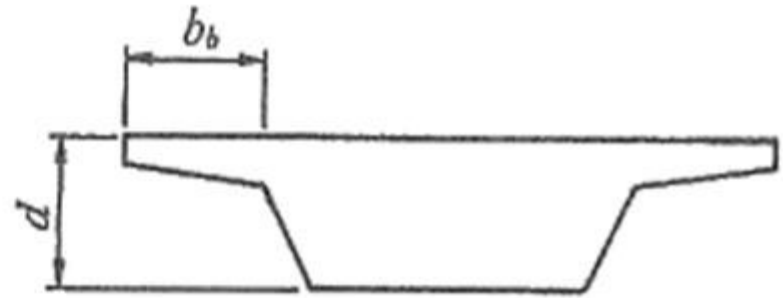
Fig.-5 六角偏平断面桁の例

(C) is reserved to CVV

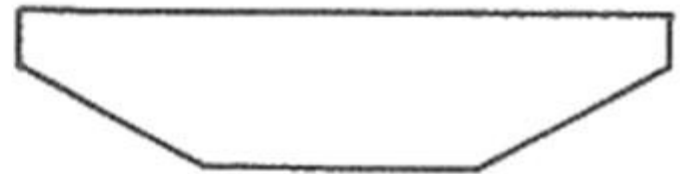


$b_b \leq \frac{d}{4}$  & Web is vertical

(a)  $\beta_{ds} = 2$



$b_b > \frac{d}{4}$



$b_b = 0$  & Web is oblique

(b)  $\beta_{ds} = 1$

Fig.-4 桁形状による補正係数

(C) is reserved to CVV

# Table-2 構造減衰

(Euro-Code)欧州コード

Table F.2 — Approximate values of logarithmic decrement of structural damping in the fundamental mode,  $\delta$

Structural type	structural damping, $\delta$	
reinforced concrete buildings	0,10	
steel buildings	0,05	
mixed structures concrete + steel	0,08	
reinforced concrete towers and chimneys	0,03	
unlined welded steel stacks without external thermal insulation	0,012	
unlined welded steel stack with external thermal insulation	0,020	
steel stack with one liner with external thermal insulation <sup>a</sup>	$h/b < 18$	0,020
	$20 \leq h/b < 24$	0,040
	$h/b \geq 26$	0,014
steel stack with two or more liners with external thermal insulation <sup>a</sup>	$h/b < 18$	0,020
	$20 \leq h/b < 24$	0,040
	$h/b \geq 26$	0,025
steel stack with internal brick liner	0,070	
steel stack with internal gunite	0,030	
coupled stacks without liner	0,015	
guyed steel stack without liner	0,04	
steel bridges + lattice steel towers	welded	0,02
	high resistance bolts	0,03
	ordinary bolts	0,05
composite bridges	0,04	
concrete bridges	prestressed without cracks	0,04
	with cracks	0,10
Timber bridges	0,08 - 0,12	
Bridges, aluminium alloys	0,02	
Bridges, glass or fibre reinforced plastic	0,04 - 0,08	
cables	parallel cables	0,005
	spiral cables	0,020
NOTE 1 The values for timber and plastic composites are indicative only. In cases where aerodynamic effects are found to be significant in the design, more refined figures are needed through specialist advice (agreed if appropriate with the competent Authority).		
NOTE 2 For cable supported bridges the values given in Table F.2 need to be factored by 0,75		
<sup>a</sup> For intermediate values of $h/b$ , linear interpolation may be used		

←  $\delta = 0.04$  (コンクリート橋)

(C) is reserved to CVV

Table-3 曲げ渦励振の低減指数.( $E_{th}$ )

$B/d$	$I_u$	Except Hexagonal Deck										Hexagonal Deck
		0.11	0.12	0.13	0.14	0.15	0.16	0.17	0.18	0.19	0.20	
$2 < B/d \leq 3$	0.7					0.5	0.4	0.3	0.2	0.1		1
$3 < B/d \leq 4$		0.6		0.5	0.4	0.3	0.2	0.1				
$4 < B/d \leq 5$							0.1					
$5 < B/d \leq 6$				0.4	0.3	0.2						
$6 < B/d \leq 7$		0.5				0.2	0.1					
$7 < B/d \leq 8$			0.4	0.3					0			
$8 < B/d \leq 9$						0.1						
$9 < B/d \leq 10$		0.4		0.3	0.2							
$10 < B/d \leq 11$			0.2	0.1								

(C) is reserved to CVV

Table-4 ねじれ渦励振の低減指数( $E_{te}$ )

$B/d$	$I_u$	Except Hexagonal Deck										Hexagonal Deck	
		0.11	0.12	0.13	0.14	0.15	0.16	0.17	0.18	0.19	0.20		
$2 < B/d \leq 3$		0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1					1
$3 < B/d \leq 4$		0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1						
$4 < B/d \leq 5$		0.5	0.4	0.3	0.2	0.1							
$5 < B/d \leq 6$					0.1								
$6 < B/d \leq 7$		0.4	0.3	0.2				0					
$7 < B/d \leq 8$				0.1									
$8 < B/d \leq 9$			0.2										
$9 < B/d \leq 10$													
$10 < B/d \leq 11$		0.3	0.1										

(C) is reserved to CVV



- リバプール：乱れ強度

$l_u = 0.11$  (仮定値),  $B/d = 7.54$

- Table-3 より  $E_{th} = 0.3$
- $m_r$  : 無次元質量 ( $=m/(\rho B^2)$ )
- コンクリート桁
- $B/d = 33.95/4.5 = 7.5$

- ( i ) 箱桁の振幅

仮定: 図面からの値 48.8 t/m 少し重い! ?

- $m = 48.8$  (桁) t/m

- $m_r = 48.8 \times 10^3 / (1.23 \times 33.95^2) = 34.4$

- $\delta = 0.04$

- $h_e = 0.0067 \times 33.95 / (34.4 \times 0.04) = 0.17$  m

$$h_c = h_e \cdot E_{ms} \cdot E_{th} = 0.17 \times 1.3 \times 0.5$$

- = 0.11 m < L / 400 = 0.80m (L=318m)

この値は、活荷重による撓み値よりかなり小さいので OK!

### ③ まとめ

- 次のような可能性があるので注意すべきである ;
- 風速 21m/s において
- 箱桁は振幅 11 cmではあるが曲げ振動発現
- おそらく、20 m/s になれば、橋は閉鎖されるので、振幅も小さく安全であると判断される。

## [2] ねじれ渦励振

- ① ねじれ渦励振発現風速 ( $U_{cv\vartheta}$  )

- $U_{cv\vartheta} = 1.33 \cdot f_{\vartheta} \cdot B$  ..... (5.29)

$$= 1.33 \times 0.93 \times 33.95$$

$$= 42 \text{ m/s}$$

- ② 振動振幅の計算 ( $h_c$ )

- $\vartheta_c = \vartheta_e \cdot E_{ms} \cdot E_{t\vartheta}$  ..... (5.32)

- $\vartheta_e = \theta_{\vartheta} / (I_{pr} \cdot \delta_{\vartheta})$  ..... (5.33)

- $E_{ms} = 1.3$  (慣用値)
- $\theta_y = 13.2 (B/d)^{-3} \cdot \theta_{ds}$  ..... (5.24)
- $(B/d)^{-3} = (33.95/4.5)^{-3} = 0.0023$
- $\theta_{ds} = 1$  (断面  $b_b > d/4$ )
- 以上より
- $\theta_y = 13.2 \times 0.0023 \times 1 = 0.030$

$$E_{ms} = \frac{\int_D \phi^2 dx}{\int_D |\phi| \phi^2 dx} \dots\dots\dots (5.40)$$

ただし,  $\int_D dx$  : 桁に関する積分

$\phi$  : 曲げまたはねじれモード

注記. もし、風洞試験と同じ振動モードを適用しているなら、 $E_{ms}=1$  としてよい。

- リバプール：自然風の乱れ強度は、  
 $I_u = 0.11$  (仮定値)
- よって  $E_{t\theta} = 0.4$  (Table-4)
- $I_{pr}$  : 無次元慣性モーメント  
 $(= I_p / (\rho B^4))$
- ここに、 $I_p = (0.3B)^2 \cdot m$  ..... (5.37)

# 箱桁の振動振幅

- $I_p = (0.3B)^2 \cdot m = (0.3 \times 33.95)^2 \times 48.8$
- $= 5062 \text{ tm}^4/\text{m}$
- $I_{pr} = 5062 \times 10^3 / (1.23 \times 33.95^4) = 3.10$
- $\vartheta_e = 0.030 / (3.10 \times 0.04) = 0.24 \text{ 度}$
- Then  $h_c = \vartheta_e \cdot E_{ms} \cdot E_{t\vartheta} = 0.24 \times 1.3 \times 0.4$   
 **$= 0.12 \text{ 度}$**



### ③ 渦励振のまとめ

- ねじれ渦励振は、42m/s で発現。
- 箱桁: 0.12 度で揺れる
- ねじれ振動振幅は小さい。
- よって、バス・トラックなどに対して、危険性はない。加えて、風速 42m/sでは、橋は閉鎖される。

# 3. 桁の振動照査結果

照査結果は以下のようにまとめられる:

- フラッターは問題ない
- ギャロッピング は鋼製沓を使用している場合、問題はない。
- 渦励振:
  - 曲げ渦励振は約 21 m/sで発現するが、振幅が小さく問題はない。
  - ねじれ渦励振も、同様に問題はない。

## 4. ケーブル振動

- \* ヘリカルストレークを有するケーブルの使用 (次々ページ参照).
- \* ケーブルの対数減衰率は  $\delta=0.5\%$  以上 (Euro-code)。よって、摩擦ダンパー (Friction Damper) ようなダンパーが必要。

注) 最長ケーブル (Mersey Gateway Bridge):

$$L = \sqrt{204^2 + (125-3-28.911)^2}$$

$$\doteq 224\text{m}$$

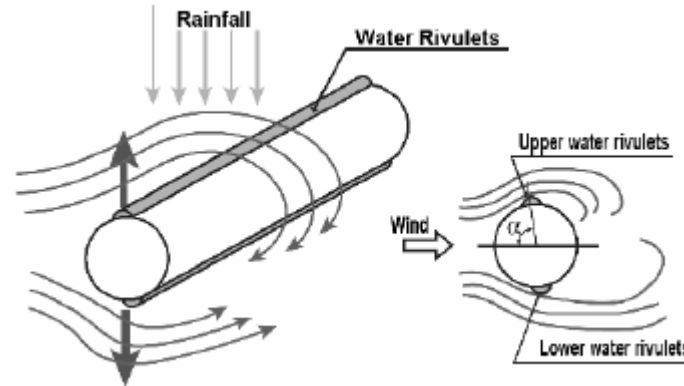
注) 仁川大橋では、長さ130m以上のケーブルには、摩擦ダンパーを設置した。

# レインバイブレーションとは何か？



(C) is reserved to CVV

# ケーブル減衰必要量



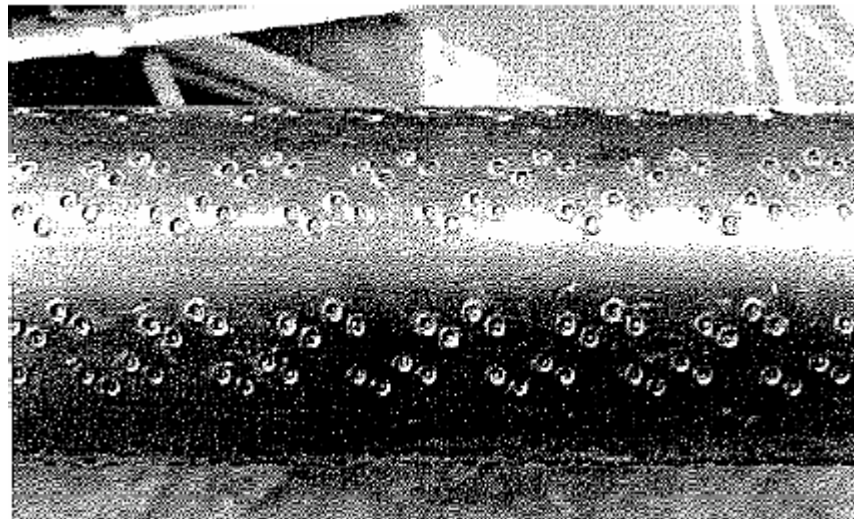
$$[ Sc = 2m\delta/\rho D^2 ]$$

	Euro Code	France	CEB-FIP	PTI	FHWA	
Surface Treatment	Use	Use	Use	None	None	Use
Minimum Requirement	$\xi = 0.5\%$	$\xi = 0.478\%$	$\xi = 0.5\%$	$Sc > 10$ ( $\xi : 0.5$ to 1.0%)	$Sc > 10$	$Sc > 5$

(C) is reserved to CVV

# ケーブル制振方法

- ケーブル表面処理による
  - 新日本製鉄特許



# ヘリカルストレーク (欧米方式) Helical Strake



(C) is reserved to CVV

# ケーブル張力 (推定法)

- 最長ケーブルの張力 (推定)
- $T_d = W_d * LCD / \sin \theta$
- ここで、 $T_d$  は死荷重張力,  $\theta$  は、ケーブル角度  
LCD は、死荷重幅 (dx: See Fig.)

$T_d$  は、最長ケーブル :  $\theta$  は、 $24^\circ$

$W_d$  : 桁の分布重量 (t/m)

$$\begin{aligned} T_d &= 48.8 \text{ t/m} \times 6 \text{ m} / \sin 24^\circ \\ &= 719 \text{ t} \end{aligned}$$

$$T_{\max} = T_d + T_{PS} + T_L \doteq 2 \times T_d = 1438 \text{ t}$$

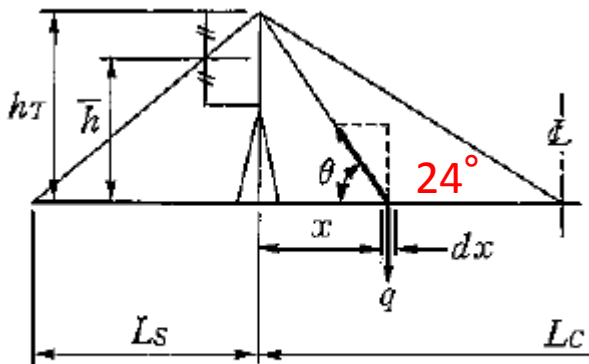


Fig. 外力とケーブル張力の関係



# ケーブル振動 / 周波数(推定値)

- $T_{\max} = 1438 \text{ t}$
- $A_{\text{req}} = 1438/64000 \text{ t/m}^2$
- $= 0.0225 \text{ m}^2$
- 空隙率 5%
- $3.14 * R^2 = 0.0225 * 1.05$
- $R = 8.7 \text{ cm}$
- Diameter of cable =  $D = 2 * R = 17.4 \text{ cm}$

- $m = 0.0225 \text{ (m}^2) \times 7.85 \text{ (t/m}^3) \times 1.05$   
 $= 0.185 \text{ t/m}$   
 $L = 224 \text{ m}$   
 $f = 1/(2 L) \sqrt{T_{\max} / m}$   
 $= \mathbf{0.62 \text{ Hz}}$

# 渦励振

- ケーブルのストロハル数 0.20 (=St)

- $$\begin{aligned} St &= f * D / V \\ &= 0.62 * 0.174 / V_c \\ &= 0.2 \end{aligned}$$

よって  $V_c = 0.5 \text{ m/s}$

この風速は最小値で、実際は、その整数倍

$$0.5 \times 6 \sim 8 \doteq 4.0 \text{ m/s}$$

# レインバイブレーション

$$\begin{aligned}\text{スクルーション数} &= Sc = 2m\delta/(\rho D^2) \\ &\doteq 60\end{aligned}$$

但し、  $m: 0.185\text{t/m}$ ,  $\delta : 0.006$  (Euro code)

$D: 17.4 \text{ cm}$   $\rho: 1.23\text{kg/m}^3$

\* スクルーション数から見ると, FHWA(米国連邦道路局)の最低基準は満たしている。

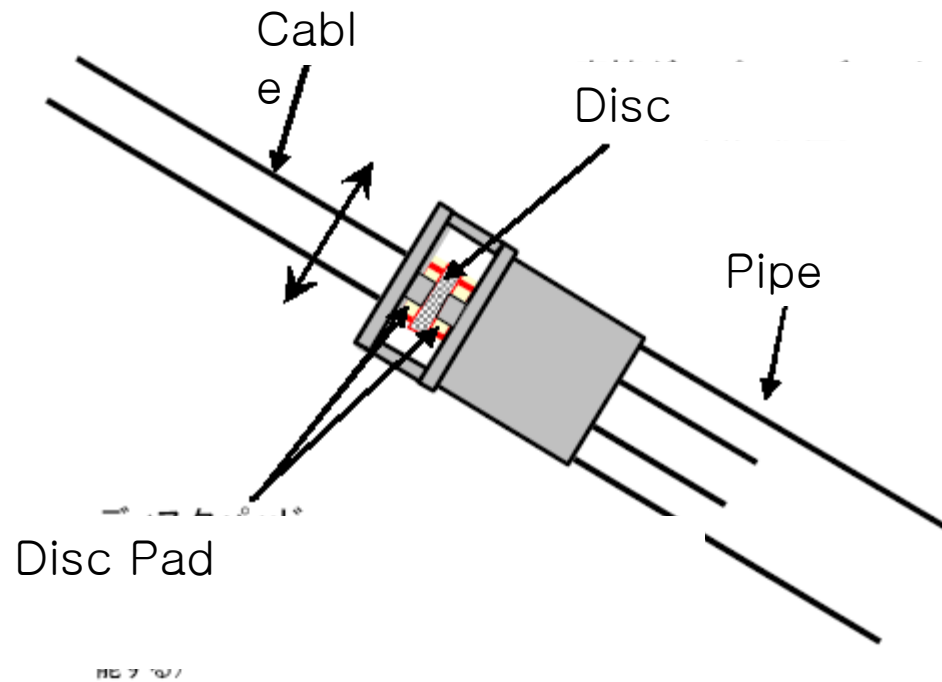
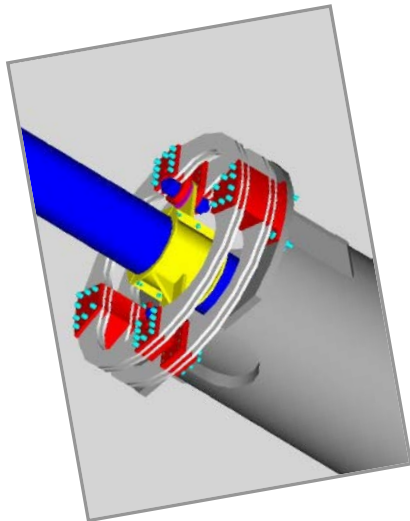
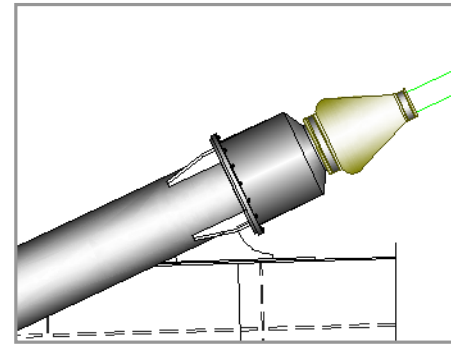
しかし、この基準は、レインバイブレーションの数値基準が明確でないので、安全とは言い切れない。

# 仁川大橋の摩擦ダンパー

仁川大橋には、写真のような摩擦ダンパーを設置したので、開橋依頼  
レインバイブレーションは起こっていない。



# ■ 摩擦ダンパー



(C) is reserved to CVV

# 5. 塔の振動

## - 名港西大橋の例 -

- ・ 主塔は、図のような独立直立時に振動すると危惧された
- ・ 図のようなTie-down cables を設置して制振した。
- ・ 本章では、このような有害振動対策の計算をおこなう。

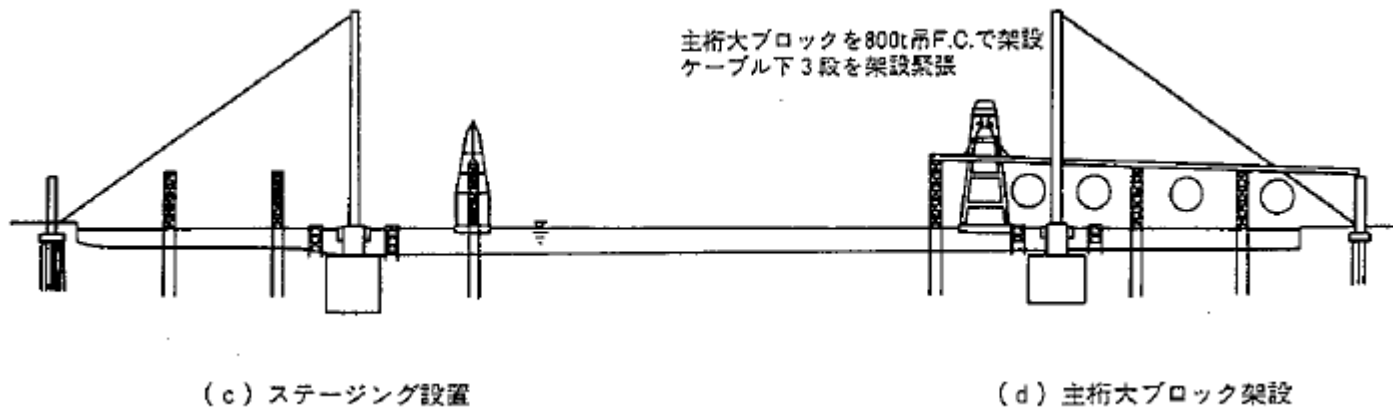
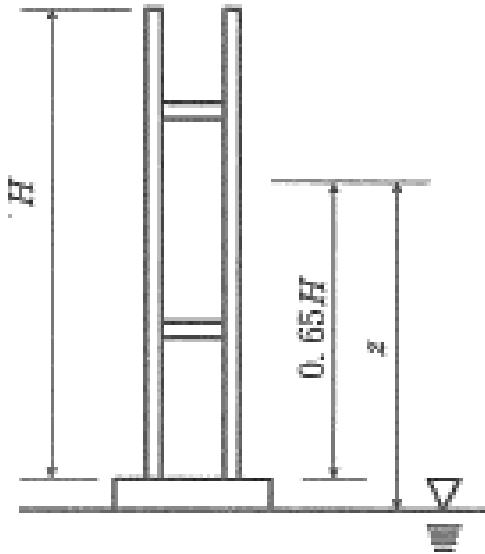


Fig. (C) is reserved to C/V  
名港西大橋の例

# 塔の設計風速 ( $V_{DP}$ )

- 設計風速は、図のような  $0.65H$  の高さの風速を適用する。

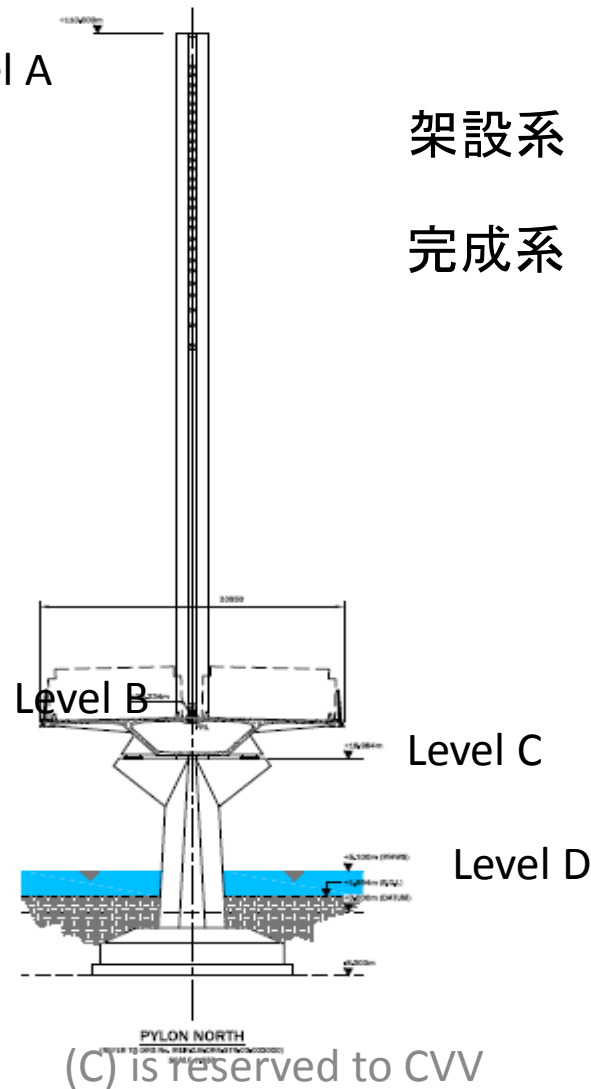
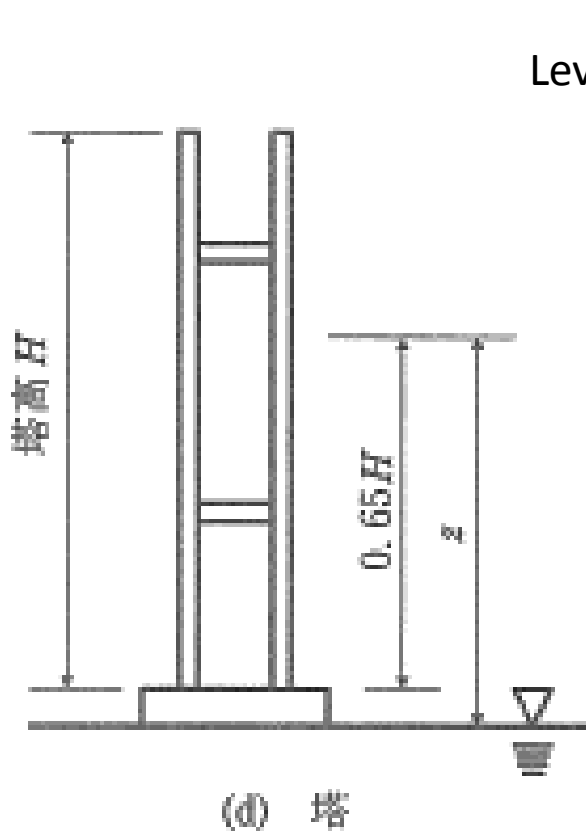


塔

(C) is reserved to CVV



# 塔高さの定義: H



架設系 :  $H = \text{Level A} - \text{B}$

完成系 :  $H = \text{Level A} - \text{C}$

# 照査風速の計算：V<sub>DP</sub>

Calculation of V <sub>DP</sub>		Pylon North	Pylon Central	Pylon South
Elevation "A"	A : Top of Pylon	110.000	80.000	25.000
Elevation "B"	B : Top of Deck	24.234	26.480	28.911
Elevation "C"	C : Top of Pier	18.984	21.855	23.661
Elevation "D"	D : Elevation of MHWS	5.100	5.100	5.100
H: Height (m) 塔高	Completion (A-B)	85.766	53.520	96.089
0.65*H: Height (m)	0.65*(A-B)	55.748	34.788	62.458
Z (m)	B-D+0.65*(A-B)	74.882	56.168	86.269
E1 (Coefficient for Z)	Terrain II Table-4.3	1.38	1.31	1.41
V <sub>10</sub>	Design basic wind speed	27.40	27.40	27.40
VDP (Completion)	= E1 x V <sub>10</sub>	37.8	35.9	38.6
H: Height (m) 塔高	Election (A-C)	91.016	58.145	101.339
0.65*H: Height (m)	0.65*(A-C)	59.160	37.794	65.870
Z (m)	C-D+0.65*(A-C)	73.044	54.549	84.431
E1 (for Z)	Terrain II Table (C) is reserved to CVI	1.38	1.31	1.41
VDP (Election)	= E1 x V <sub>10</sub>	37.8	35.9	38.6

# 塔の渦励振の照査

## - 渦励振の照査方法 -

- $U_{cv}$  : 渦励振の発現風速 (m/s)
- $U_{rv}$  : 渦励振の許容風速 (m/s)
- $U_{rv} < U_{cv}$  **安全 OK!**
- 渦励振の振幅の計算 (m)
- 架設再現期間の計算 ( $C_p$ ) ;

北塔 (1.5-年), 中央 & 南塔 (0.6-年)

$$U_{DP(\text{Erection})} = U_{DP} * (0.61 - 0.10 \times \ln(\ln(R/(R-1)))) / 1.07$$

Eq.(4.20)

ここで、 $R (= 2 \times C_p)$  は再現期間  
 $U_{DP}$  塔の設計風速 (m/s).

		Pylon North (Trans.-Wind)	Pylon North (Long.-Wind.)	Pylon Central (Trans.-Wind)	Pylon Central (Long.-Wind.)	Pylon South (Trans.-Wind)	Pylon South (Long.-Wind.)
H: Height	Erection	91.02	91.02	58.15	58.15	101.34	101.34
(m)	Completion	85.77	85.77	53.52	53.52	96.09	96.09
DT: Pylon Top (m)		5.00	3.50	5.00	3.50	5.00	3.50
Frequency (Hz)	Erection	0.38	0.38	0.60	0.60	0.35	0.35
	Completion	0.41	0.41	0.65	0.65	0.36	0.36
h 65% (m): Depth of longitudinal at 65% height. (m): (Erection)							
		5.80	5.80	5.51	5.51	5.89	5.89
h 65% (m): Depth of longitudinal at 65% height (m): (Completion)							
		5.75	5.75	5.47	5.47	5.84	5.84
Section-Squre at 65% height : (Erection)							
		14.29	14.29	13.28	13.28	14.60	14.60
Section-Squre at 65% height : (Completeion)							
		14.13	14.13	13.14	13.14	14.44	14.44
meq (t/m)	Erection	35.74	35.74	33.23	33.23	36.53	36.53
	Completion	35.34	35.34	32.87	32.87	36.13	36.13
Erection Period	(Year)	1.50	1.50	0.60	0.60	0.60	0.60
Return Period	R	3.00	3.00	1.20	1.20	1.20	1.20
Factor of Period (Fp)	Eq. (4.20)	0.65	0.65	0.52	0.52	0.52	0.52
Urv = Fp*V <sub>D</sub>	Erection	24.74	24.74	18.51	18.51	19.90	19.90
Urv = V <sub>D</sub>	Completion	37.80	37.80	35.90	35.90	38.60	38.60
Ucv: Vortex shedding(m/s)	Erection	15.38	10.77	24.08	16.85	13.82	9.67
	Completion	16.32	11.43	26.16	18.31	14.57	10.20
Check of Urv:	Erection	NG	NG	OK	NG	NG but OK	NG
Ucv > Urv ?	Completion	NG	NG	NG but OK	NG	NG but OK	NG
Damping (δ:concrete) : Eurocode	Erection	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030
	Completion	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030
Amplitude of Vortex shedding (m)	Erection Eq.(6.6)	0.22	0.07	0.23	0.08	0.21	0.07
	Completion Eq.(6.13)	0.22	0.07	0.23	0.08	0.21	0.07

**NB. meq は、65% 高さの断面の質量**

(C) is reserved to CVV



# 塔の渦励振照査結果

- 北塔は、完成系・架設系共に N.G  
中央・南塔はOK！

しかし、下記の理由で全てOK！と判断される。

- 1) 計算された振幅が小さい。
- 2) コーナーカットが次ページの論文のように乱流中では振幅が更に小さくなることが期待される。

# 乱流と塔のテーパー効果

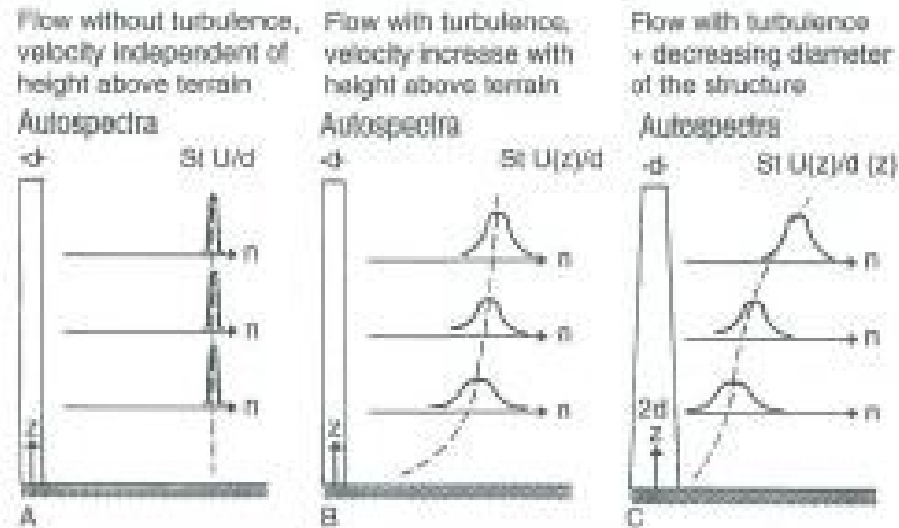


Fig. 7.7 Principal sketch indicating how height above terrain, turbulence and a decreasing diameter of the structure affects the autospectrum of the crosswind load.

A. When both the wind velocity and the diameter of the structure are independent of the height above ground, then the frequency of the vortex shedding is also constant. Due to the lack of turbulence the bandwidth of the spectrum is narrow.

B. When the diameter is constant and when the wind velocity increases with the height, then the frequency of the vortex shedding increases with the height. Due to the turbulence the bandwidth is broader than in case A (smooth flow).

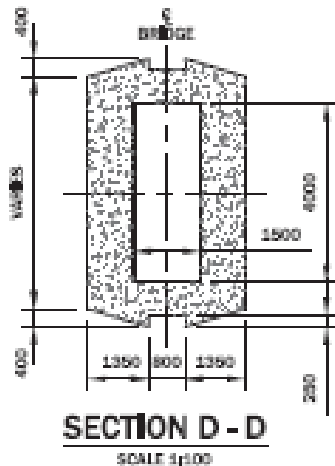
C. When diameter decreases and wind velocity increases with height, then again the frequency of the vortex shedding increases with height, but in another and more pronounced way than in the case of constant diameter (case B). (Reproduced by permission of Danish Building Research Institute).

(C) is reserved to CVV

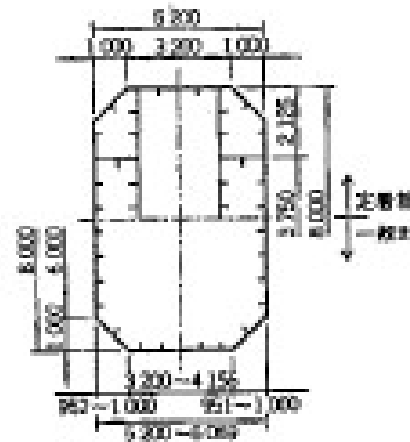
# コーナーカットの影響とは？

## 1) コーナーカットの例

名港中央橋は塔にコーナーカットを設け、ギャロピング & 渦励振の低減に成功した



Mersey Gateway Br.



名港中央橋の断面.

# ギャロッピングの照査

		Pylon North (Trans.-Wind)	Pylon North (Long.-Wind.)	Pylon Central (Trans.-Wind)	Pylon Central (Long.-Wind.)	Pylon South (Trans.-Wind)	Pylon South (Long.-Wind.)
H: Height (m)	Erection	91.02	91.02	58.15	58.15	101.34	101.34
	Completion	85.77	85.77	53.52	53.52	96.09	96.09
DT: Pylon Top (m)		5.00	3.50	5.00	3.50	5.00	3.50
Frequency (Hz)	Erection	0.38	0.38	0.60	0.60	0.35	0.35
	Completion	0.41	0.41	0.65	0.65	0.36	0.36
h 65% (m): Width of longitudinal at 65% height. (m):Erection		5.80	5.80	5.51	5.51	5.89	5.89
h 65% (m): Width of longitudinal at 65% height (m):Completion		5.75	5.75	5.47	5.47	5.84	5.84
A: Section-Squre at 65% height : erection		14.29	14.29	13.28	13.28	14.60	14.60
A: Section-Squre at 65% height : completeion		14.13	14.13	13.14	13.14	14.44	14.44
meq (t/m)	Erection	35.74	35.74	33.23	33.23	36.53	36.53
	Completion	35.34	35.34	32.87	32.87	36.13	36.13
VDP	Completion	37.80	37.80	35.90	35.90	38.60	38.60
Urv: = 0.65*V <sub>DP</sub> *1.2	Erection & Election	29.48	29.48	28.00	28.00	30.11	30.11
Urv: = V <sub>DP</sub> *1.2	Completion	45.36	45.36	43.08	43.08	46.32	46.32
Ucg: Galloping (m/s) Eq (6.15) Cg=1	Erection	67.05	95.79	97.56	139.37	61.55	87.93
	Completion	70.35	100.51	104.86	149.80	64.20	91.72
Check of Ug:	Erection	OK	OK	OK	OK	OK	OK
Ucg > Urg ?	Completion	OK	OK	OK	OK	OK	OK
Damping (=δ: concrete)	Erection	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030
	Completion	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030
Eurocode							

(C) is reserved to CVV



# 塔の照査

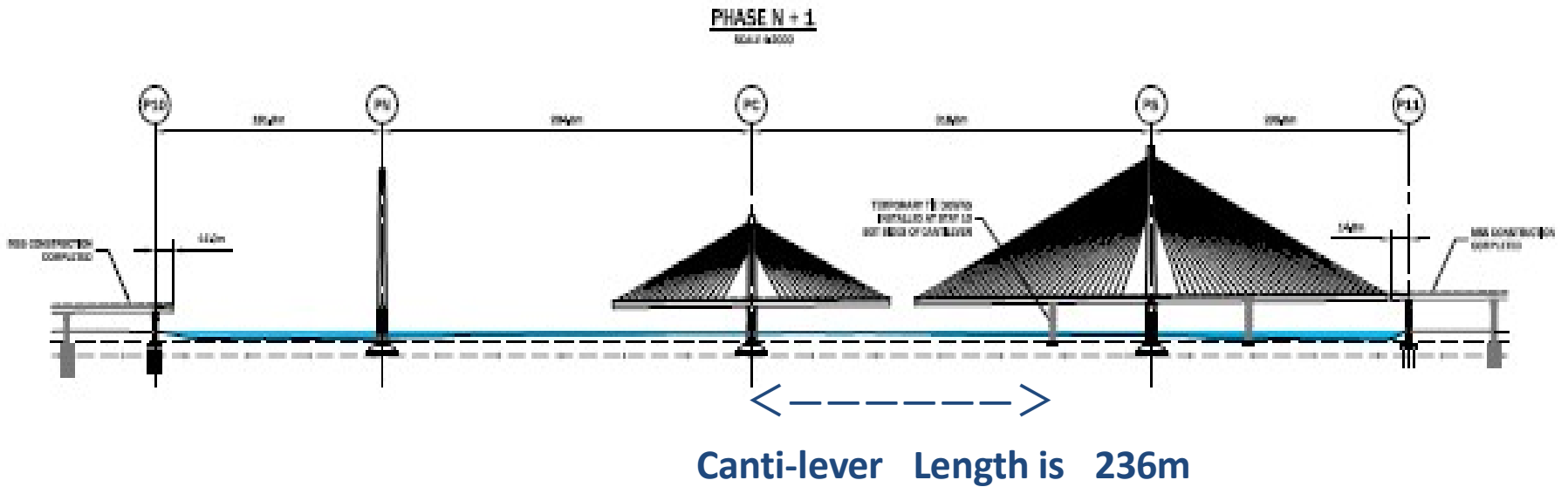
●簡便な計算から、北塔は問題あるが、他はOKである。

コーナーカットを塔に採用すると安定は増し、渦励振、ギャロッピング、ガスト応答に効果がある。この採用により、北塔も問題はなくなるであろう。

# 6. 架設時の安定性

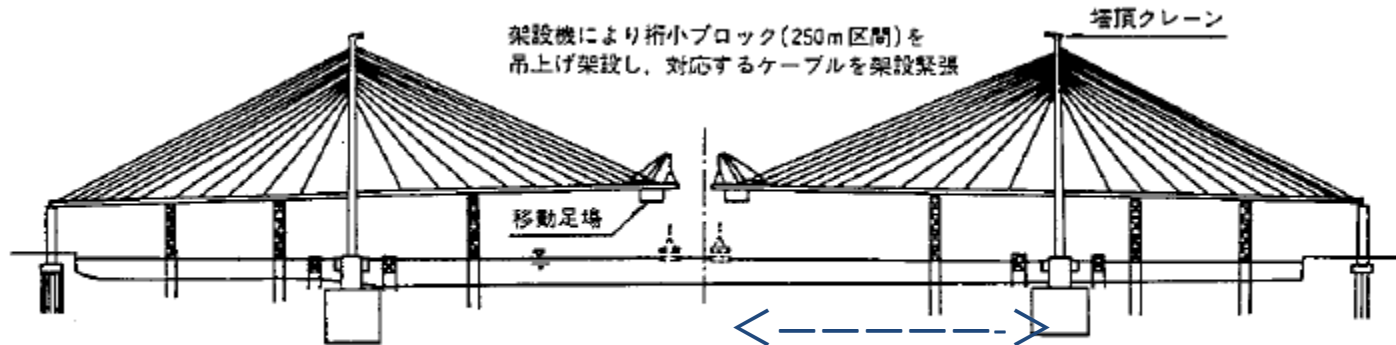
- 張り出し架設は、耐風安定性は厳しい。
- 安全性の照査には、三次元風洞試験が必要である。
- ここに、試験した情報がないので日本の例で考察する。
- 本橋と名港西大橋とはよく似ている。三次元試験も実施されており参考になる。
- 架設ベントの配置位置は正しい。(次ページ参照).
- コンサルタントが風洞試験することを勧める。
- Mersey Gateway bridge の耐風性の情報が誠に少ないが、机上計算では、そう悪くはないと判断できる。

# バラシング工法 (Mersey Gateway Bridge)



(C) is reserved to CVV

# バラnsing工法 (名港西大橋 鋼橋)



(e) 主桁小ブロックおよびケーブル架設

250mを超える張り出し長

# 3次元全橋モデル試験



(C) is reserved to CVV

3-D Wind Tunnel of University Tokyo

Model: Meiko Nishi Bridge

# ケーブルと塔、ならびに架設の 照査結果

**/ケーブル/** ① ヘリカルスロレークは必要。

② 長さ 100 ~ 224m のケーブルにはダンパー必要

**/塔/** ① 多分、渦励振もギャロッピングも有害でない。

② 塔のフリー独立状態でTie-down ケーブルは不要であろう。

**/架設系/** ① 日本の鋼製斜張橋の架設に比べ安定である。何故なら、鋼・コンクリート合成桁なので、鋼製に比べ質量が重く耐風的に安定している。

# 耐震解析と耐風解析の違い！

- 1) 外力の違い……地震は地面が上下に揺れ加速度が問題  
耐風は地面はほぼ静止、地上から高さ方向に分布する外力。  
風の速度が問題
- 2) 減衰の違い……地震は構造物の減衰。  
耐風は、構造物の減衰＋空力減衰の合計  
空力減衰は、構造物の形状および固有振動数によって変わる  
(風洞試験が必要)

# 耐風性の照査

END

ご清聴を感謝いたします。

(C) is reserved to CVV

