

長大橋の耐風設計法



1. 風環境
2. 振動応答の推定
3. 風洞試験方法
4. 制振方法

Hiroshi TANAKA

Yoshida-Gumi Co.Ltd

1. 風環境

- 日本の「道路橋耐風設計便覧」に以下準拠して説明

1.1 設計基準風速 U_d (m/sec)

U_d (m/sec)は、基本風速 U_{10} に高度と地表粗度に関する補正係数 E_1 を乗じて求める

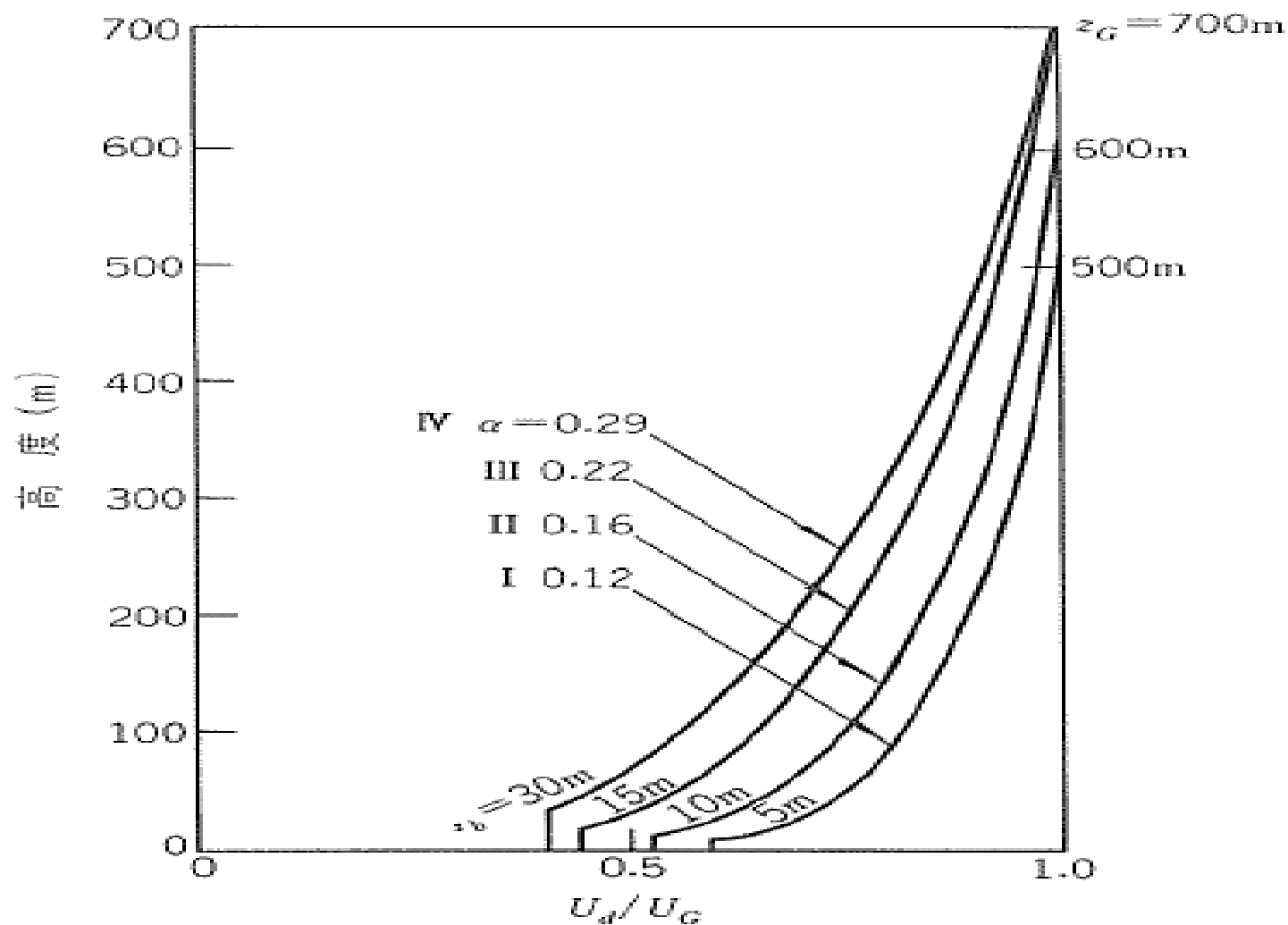
$$U_d = E_1 \times U_{10}$$

- 設計基本風速(U_{10})とは、地上10高さにおける設計に用いる風速の大きさをいう

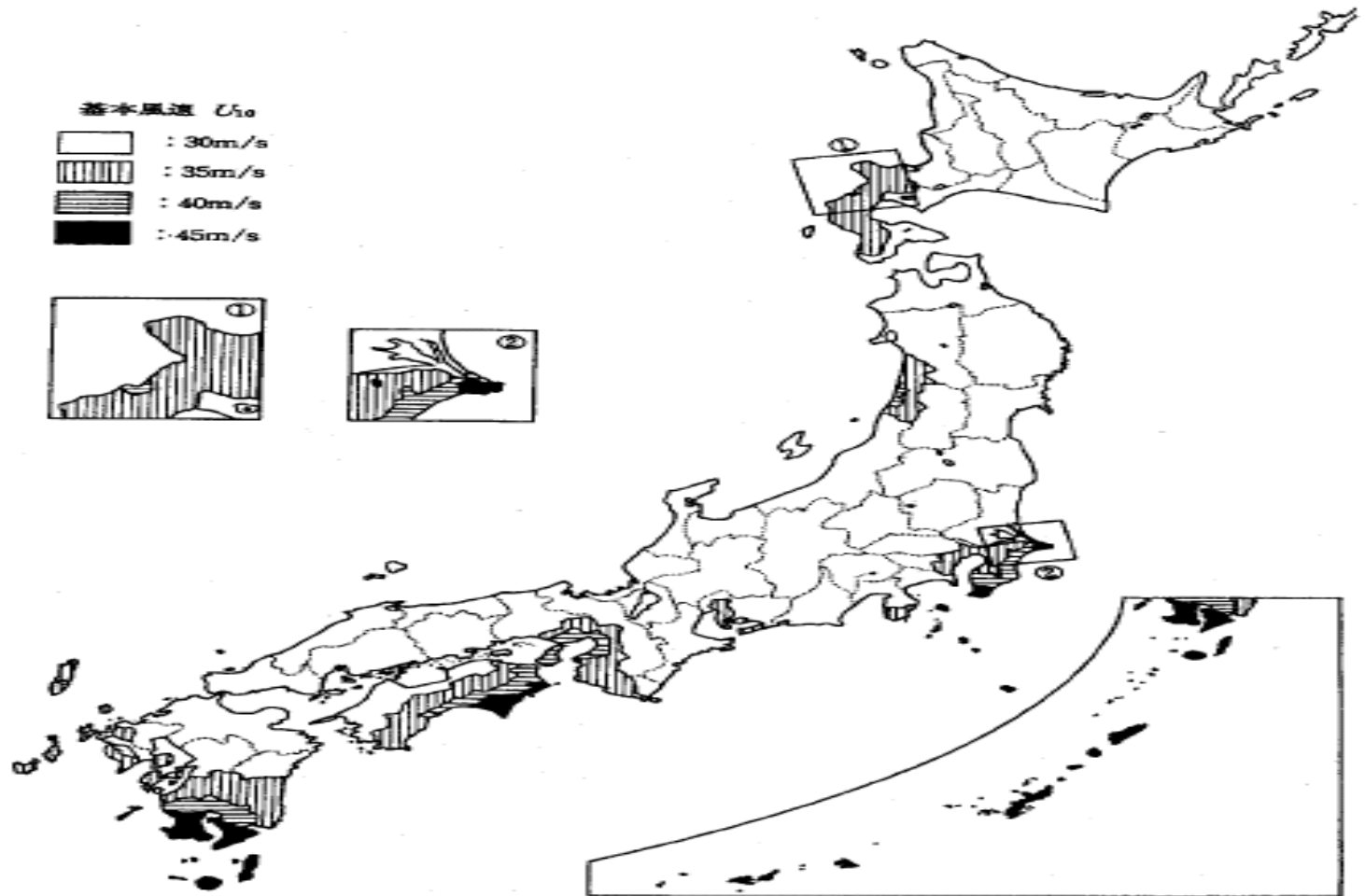
E1: 地表粗度区分

地表粗度区分	地表状態	粗 度
I	海上, 海岸	粗度が小さい
II	農地, 田園, 開けた土地 樹木や低層建築物が散在している地域	↑
III	樹木や低層建築物が密集している地域 中高層建築物が散在している地域 なだらかな丘陵地	↓
IV	中高層建築物が散在している地域 起伏の大きい丘陵地	粗度が大きい

高度による風速変化の様子



基本風速の地域区分



本四プロジェクトでの事例

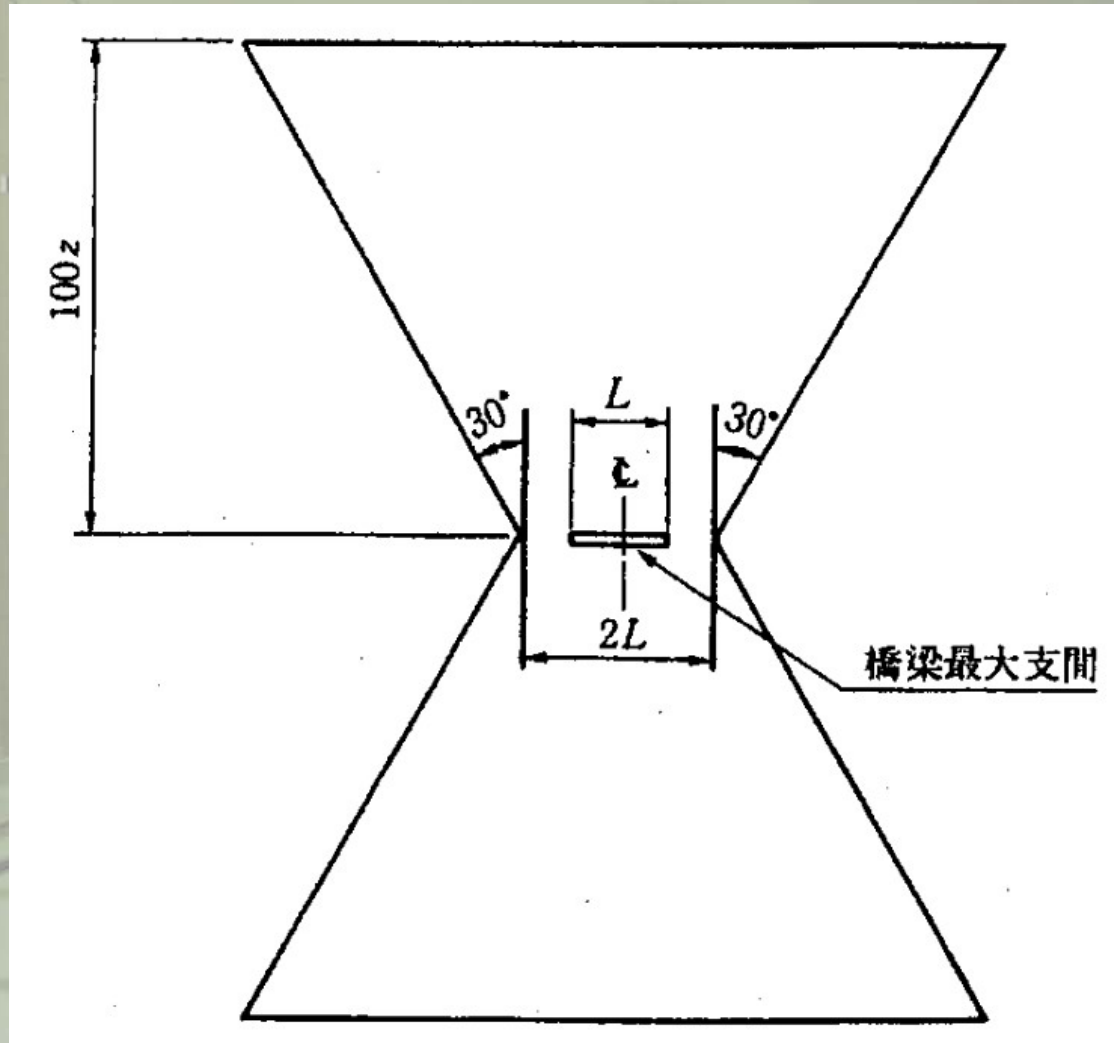
表 4.4 基本風速などの比較

ルート	神戸－鳴門		児島－坂出	尾道－今治			
	明石海峡大橋* ²	大鳴門橋* ¹		全橋* ¹	新尾道橋* ³	多々羅大橋* ³	来島大橋* ³
基本風速	46m/s	50m/s	43m/s	30 m/s	37 m/s	40 m/s	37 m/s
べき指数	1/8	1/7	1/7	1/5.5	1/7	1/7	1/7

*1:耐風設計基準(1976), *2:明石海峡大橋耐風設計要領(1990),

*3:尾道・今治ルート耐風設計基準・同解説(1994)

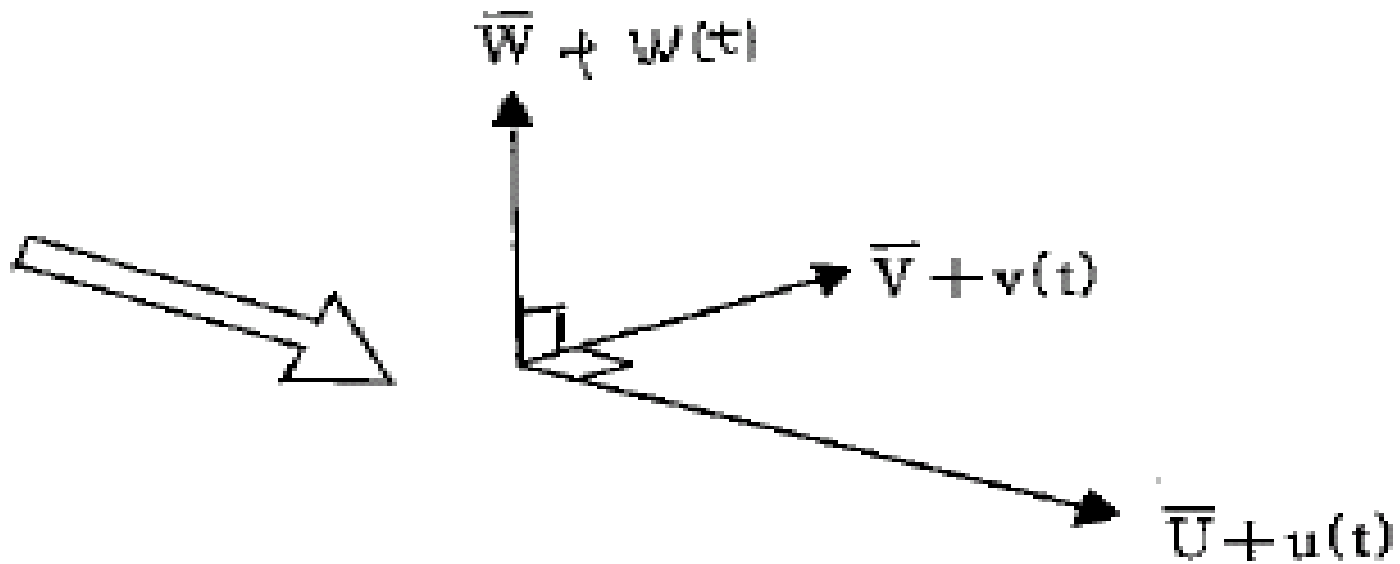
地表粗度区分決定のための参照区域



補正粗度係数 E_1

地表粗度区分 高度 (m)	I	II	III	IV
$z \leq 5$	1.11	1.00	0.83	0.77
$5 < z \leq 10$	1.16	1.00	0.83	0.77
$10 < z \leq 15$	1.24	1.04	0.83	0.77
$15 < z \leq 20$	1.29	1.09	0.85	0.77
$20 < z \leq 25$	1.33	1.14	0.90	0.77
$25 < z \leq 30$	1.36	1.18	0.94	0.77
$30 < z \leq 35$	1.39	1.21	0.98	0.79
$35 < z \leq 40$	1.41	1.24	1.01	0.82
$40 < z \leq 45$	1.43	1.26	1.04	0.85
$45 < z \leq 50$	1.45	1.28	1.07	0.88
$50 < z \leq 60$	1.47	1.31	1.11	0.92
$60 < z \leq 70$	1.50	1.35	1.15	0.96
$70 < z \leq 80$	1.53	1.38	1.18	1.00
$80 < z \leq 90$	1.55	1.41	1.22	1.04
$90 < z \leq 100$	1.57	1.43	1.25	1.08

乱れ強さ(Iu)



上図で \bar{U} が主流方向のとき $\bar{V} = \bar{W} = 0$

乱流の研究によれば $\sqrt{\bar{u}^2}$, $\sqrt{\bar{v}^2}$, $\sqrt{\bar{w}^2}$ は、高さに一定で

$$\sqrt{\bar{w}^2} = 1.3 U_* \quad \left(U_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \right)$$

である。Lumley, Panofsky⁶⁾によれば,

$$\sqrt{\bar{u}^2} : \sqrt{\bar{v}^2} : \sqrt{\bar{w}^2} = (2.9 \sim 2.2) : (2.6 \sim 1.3) : 1.3$$

乱れ強度

$$I_u \equiv \frac{\sigma_u}{\bar{U}} \quad I_v \equiv \frac{\sigma_v}{\bar{U}} \quad I_w \equiv \frac{\sigma_w}{\bar{U}}$$

ここに、 σ_u 、 σ_v 、 σ_w はそれぞれ風速 U 、 V 、 W の標準偏差である。

$$I_u = \begin{cases} \frac{1}{\log_e (30/z_0)} \cdot \left(\frac{30}{z}\right)^\alpha & z_b < z < 100\text{m} \\ \frac{1}{\log_e (30/z_0)} \cdot \left(\frac{30}{z_b}\right)^\alpha & z \leq z_b \end{cases}$$

ここで、 z_b 、 α 、 z_0 は図-3.5の値を用いる。

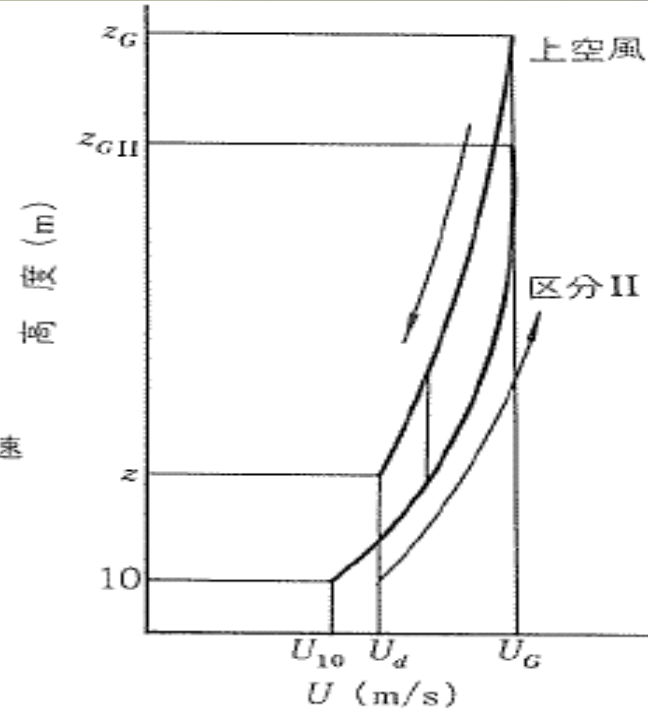
$$I_v = 0.88 I_u$$

$$I_w = 0.50 I_u$$

上空風を介してある高度での風速の変換

$$\frac{U_d}{U_G} = \begin{cases} \left(\frac{z_b}{z_G}\right)^\alpha, & z \leq z_b \\ \left(\frac{z}{z_G}\right)^\alpha, & z_b < z \leq z_G \\ 1, & z_G < z \end{cases}$$

ここに、 U_G ：上空風速（高度 z_G ）
 U_d ：設計基準風速
 またはある高度 z での風速



地表粗度区分	I	II	III	IV
z_b (m)	5	10	15	30
α	0.12	0.16	0.22	0.29
z_G (m)	500	600	700	700
z_0 (m)	0.01	0.05	0.3	1.0

図-3.5 上空風を介してある高度への風速の変換

乱れ強さ(I_u)は、以下に分類される

地表粗度分 高度 (m)	I	II	III	IV
$z \leq 10$	0.15	0.19	0.25	0.29
$10 < z \leq 20$	0.14	0.17	0.25	0.29
$20 < z \leq 30$	0.13	0.16	0.23	0.29
$30 < z \leq 40$	0.12	0.15	0.21	0.28
$40 < z \leq 50$	0.12	0.15	0.20	0.26
$50 < z \leq 70$	0.11	0.14	0.18	0.24
$70 < z \leq 100$	0.11	0.13	0.17	0.22

動的耐風設計の必要性の判定

橋 種		動的耐風設計が必要な条件	発現の可能性のある現象	
吊橋・斜張橋	トラス	$L \times U_d / B > 350$	ねじれ発散振動	
	充腹げた	開断面	$L \times U_d / B > 350$	ねじれ発散振動
			$L \times U_d / B > 330$ かつ $B/d < 5$ かつ $I_u < 0.15$ かつ 鋼橋	たわみ発散振動
			$L \times U_d / B > 200$ かつ $I_u < 0.20$	渦励振
		閉断面	$L \times U_d / B > 520$	ねじれ発散振動
			$L \times U_d / B > 330$ かつ $B/d < 5$ かつ $I_u < 0.15$ かつ 鋼橋	たわみ発散振動
			$L \times U_d / B > 200$ かつ $I_u < 0.20$	渦励振
鋼けた橋	プレートガーター箱げた	$L \times U_d / B > 330$ かつ $B/d < 5$ かつ $I_u < 0.15$	たわみ発散振動	
		$L \times U_d / B > 200$ かつ $I_u < 0.20$	たわみ渦励振	

照査風速 U_{rf}

1) ねじれ発散振動の照査風速 U_{rf}

$$U_{rf} = 1.2 E_{rl} \times U_d \quad (2.1)$$

ここに、係数 E_{rl} は表2.10に示すものとする。

表 2.10 係数 E_{rl}

粗度区分	I	II	III	IV
E_{rl}	1.10	1.15	1.20	1.25

照査風速 U_{rg}

ii) たわみ発散振動の照査風速 U_{rg}

$$U_{rg} = 1.2 U_d \quad (2.2)$$

構造減衰 δ

橋の種類	構造減衰 δ
吊橋	
トラス補剛げたを有する吊橋	0.03
充腹断面補剛げたを有する吊橋	0.02
斜張橋	
トラスげたを有する斜張橋	0.03
充腹断面げたを有する斜張橋	0.02
鋼けた橋	$\frac{0.75}{\sqrt{L}}$, ただし, $\delta \geq 0.04$

固有振動数簡易計算 f_h (Hz)

i) 最低次たわみ振動数 f_h

活荷重変位が求められている場合

$$f_h = \begin{cases} 0.56 \sqrt{\frac{W_L}{\eta_L W_D}} & \text{最長支間が1つの場合} \\ 0.47 \sqrt{\frac{W_L}{\eta_L W_D}} & \text{最長支間が2つの場合, および最長支間に次ぐ長さの支間長が } 0.9L \text{ 以上の場合} \end{cases} \quad (2.3)$$

ここに, W_L : 換算等分布活荷重 $W_L = q \left(1 + \frac{8P}{5qL} \right)$

ここに, q : 等分布荷重 (tf/m), P : 線荷重 (tf)

η_L : 最大活荷重たわみ (m), ただし衝撃および温度変化の影響は含まない.

W_D : 主径間の死荷重強度 (tf/m)

活荷重変位が求められていない場合

$$f_h = \frac{100}{L} \quad (2.4)$$

ii) 最低次ねじれ振動数 f_{θ}

$$f_{\theta} = \begin{cases} 2 f_h & \text{トラスげた, 開断面充腹げた} \\ 3 f_h & \text{閉断面充腹げた} \end{cases}$$

(2.5)

単位長さあたりけた質量 m (kg/m)
及びけた極慣性モーメント I_p (kgm)

単位長さあたりにけた質量 m 及び極慣性モーメント I_p は設計案を
基に精度よく算出するのが望ましいが、極慣性モーメント I_p に
関しては次式を用いてもよい。

$$I_p = (0.3B)^2 m \quad (2.6)$$

2. 振動応答の推定

a) 発散振動 (ねじれ)

$$\text{振動発現風速 } U_{cf} > \text{照査風速 } U_{rf} \quad (2.7)$$

$$\text{ここに, } U_{cf} = 2.5 f_{\theta} \cdot B$$

b) 発散振動 (たわみ)

$$\text{振動発現風速 } U_{cg} > \text{照査風速 } U_{rg} \quad (2.8)$$

$$\text{ここに, } U_{cg} = \begin{cases} 8 f_h \cdot B & \text{海上のように周辺地形が平坦でほぼ水平の風が吹く場合} \\ 4 f_h \cdot B & \text{橋梁の背後に半島, 岬などがあり, 吹き上げの風が吹く場合} \end{cases}$$

渦励振（たわみ）

振動発現風速 $U_{cvh} >$ 設計基準風速 U_d あるいは

最大振幅 $h_c <$ 許容振幅 h_a (2.9)

ここに、 $U_{cvh} = 2.0 f_h \cdot B$

$$h_c = \frac{E_h \cdot E_{th}}{m \cdot \delta} \rho B^3$$

$$h_a = 0.04 / f_h$$

ここで、 ρ : 空気密度 (1.23 kg/m³)

補正係数 E_h , E_{th} : それぞれ (2.10) 式および表 2.12 による。

$$E_h = \frac{0.065\beta_{ds}}{(B/d)} \quad (2.10)$$

β_{ds} は橋げたの形状に関する補正係数であり、以下の値を用いる。

$$\beta_{ds} = \begin{cases} 2 & (\text{ブラケット長が有効幅 } d \text{ の } 1/4 \text{ 以下でウェブが垂直な場合)} \\ 1 & (\text{上記以外の場合}) \end{cases} \quad (2.11)$$

補正係数 E_{th}

I_u B/d	六角形断面以外の場合										六角形 断面
	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	1.0
$3 < B/d \leq 4$		0.6		0.5	0.4	0.3	0.2	0.1			
$4 < B/d \leq 5$							0.1				
$5 < B/d \leq 6$		0.5		0.4	0.3	0.2					
$6 < B/d \leq 7$			0.4	0.3	0.2	0.1					
$7 < B/d \leq 8$					0.1						
$8 < B/d \leq 9$			0.3	0.2							
$9 < B/d \leq 10$		0.4			0.1			0.0			
$10 < B/d \leq 11$			0.2	0.1							

渦励振（ねじれ）

$$\begin{aligned} & \text{振動発現風速 } U_{c\theta} > \text{設計基準風速 } U_d \quad \text{あるいは} \\ & \text{最大振幅 } \theta_c < \text{許容振幅 } \theta_a \end{aligned} \quad (2.12)$$

$$\text{ここに, } U_{c\theta} = 1.33 f_{\theta} \cdot B$$

$$\theta_c = \frac{E_{\theta} \cdot E_{i\theta}}{I_p \cdot \delta} \rho B^4$$

$$\theta_a = 2.28 / (b \cdot f_{\theta})$$

ここに, ρ : 空気密度 (1.23 kg/m³)

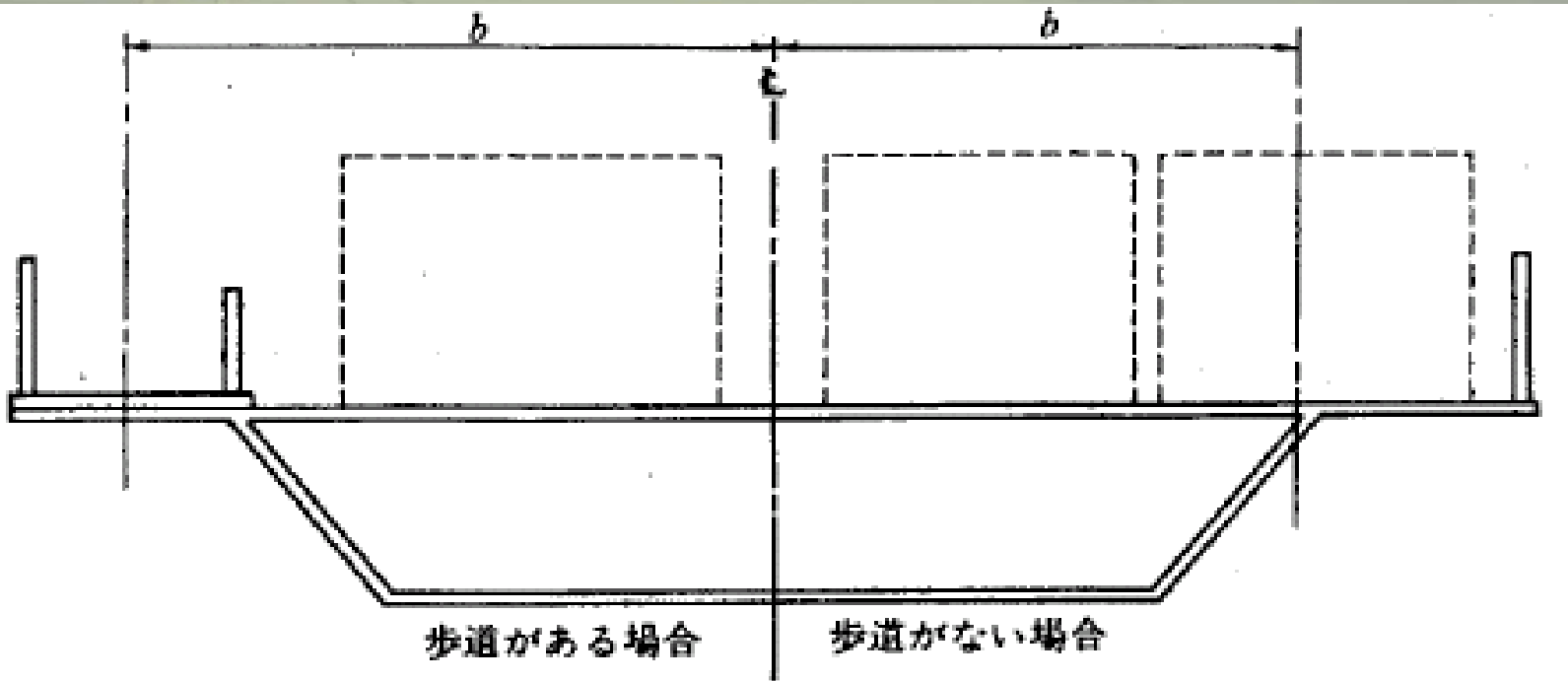
補正係数 E_{θ} , $E_{i\theta}$: それぞれ (2.13) 式および表 2.13 による.

b : けた外側に最も近い歩道部あるいは車線の中央までの距離 (図 2.3 参照)

$$E_{\theta} = \frac{17.16 \beta_{ds}}{(B/d)^3} \quad (2.13)$$

β_{ds} は (2.11) で定義されたものである.

bの定義



b : 橋梁中心から歩道中心までの距離

b : 橋梁中心から外側車道中心までの距離

補正係数 $E_{t\theta}$

I_u B/d	六角形断面以外の場合										六角形 断面	
	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					1.0
$3 < B/d \leq 4$	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									
$7 < B/d \leq 8$			0.1									
$8 < B/d \leq 9$			0.2									
$9 < B/d \leq 10$	0.3							0.0				
$10 < B/d \leq 11$		0.1										

耐風安定性が証明されない場合

- 同じような形をした橋梁の耐風性を参考にする
- 橋梁の設計緒元を見直して、必要な式を満たすようにする
- 以上でも、不明な場合は風洞実験をおこなう

細長比の大きい部材

次に示す部材などは風による振動が発生することがあるため、動的耐風設計の必要性を検討することとする。

- 斜張橋及び吊橋の塔
- 斜張橋のケーブル
- アーチ橋やトラス部材などのうち細長費の大きいもの
- 照明柱など細長費の特に大きい橋梁付属物

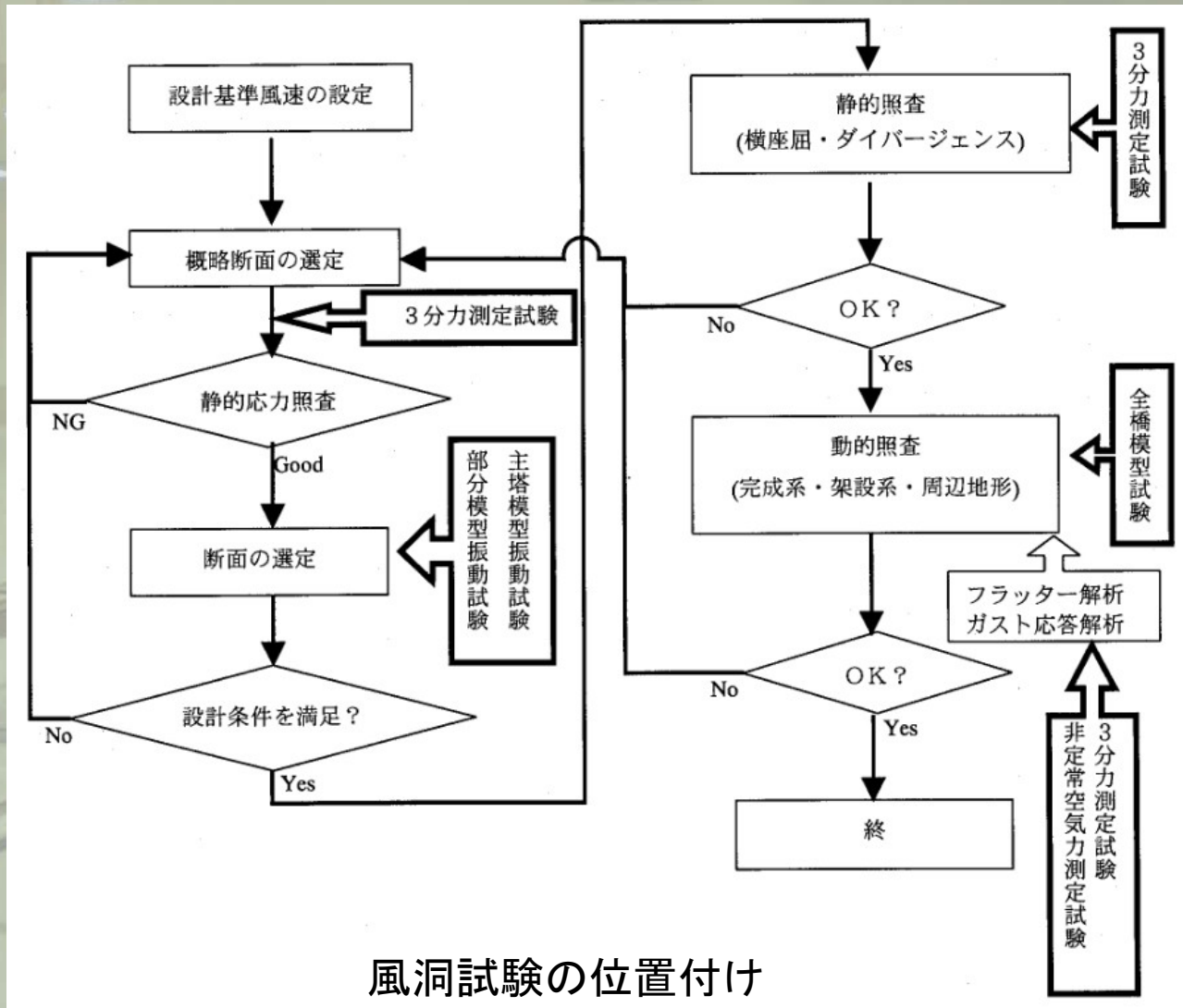
架設時の動的耐風設計

橋梁の架設時においては、主に次に示すような場合に完成時とは異なる条件で動的耐風設計を行う必要がある。

- 吊橋や斜張橋の塔が架設時に独立する場合
- 吊橋や斜張橋が、支間中央などで閉合される直前
- 橋げたの断面形状が架設手順の都合などにより完成時と異なる場合

なお、架設期間は共用期間に比べるとかなり短期間であり、設計基準風速を低減してよい。

3. 風洞試験方法



風洞試験の位置付け

風洞実験の種類

- 1) 二次元剛体バネ支持試験(部分模型)
- 2) 三次元弾性模型試験(全体模型)
- 3) 三分力試験
- 4) 非定常空気力計測試験
- 5) 地形模型風環境試験
- 6) ケーブル振動試験
- 7) その他

風洞試験の理論的分類

応答を求める試験

実構造をそのまま模型化する

全橋模型試験

架設時主塔模型振動試験

実構造をモデル化して模型化

部分模型振動試験

完成時主塔模型振動試験

タウトストリップ模型試験

空気力を求める試験

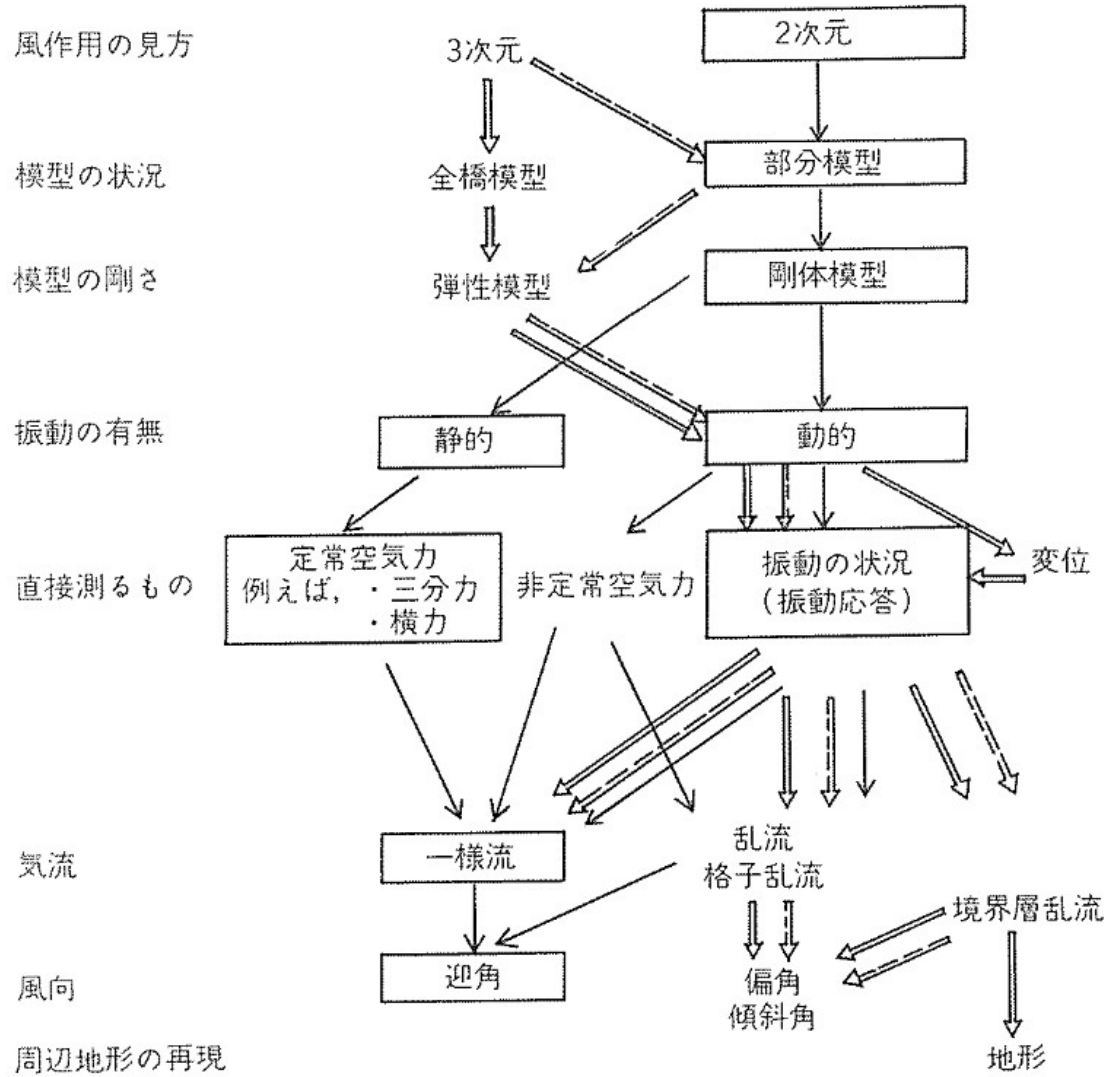
3分力測定試験

非定常空気力測定試験

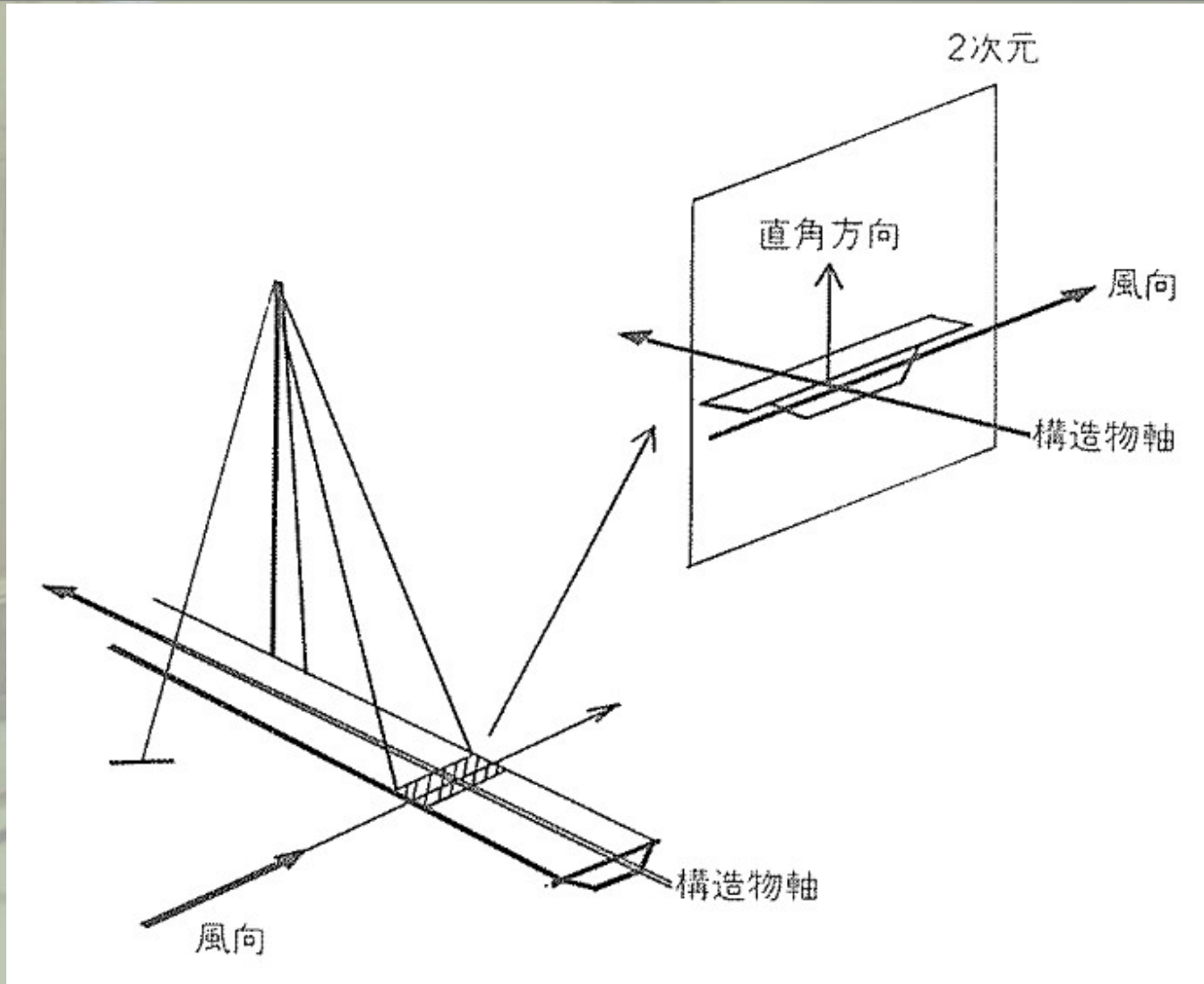
風の特性を求める試験

地形模型試験（風速測定）

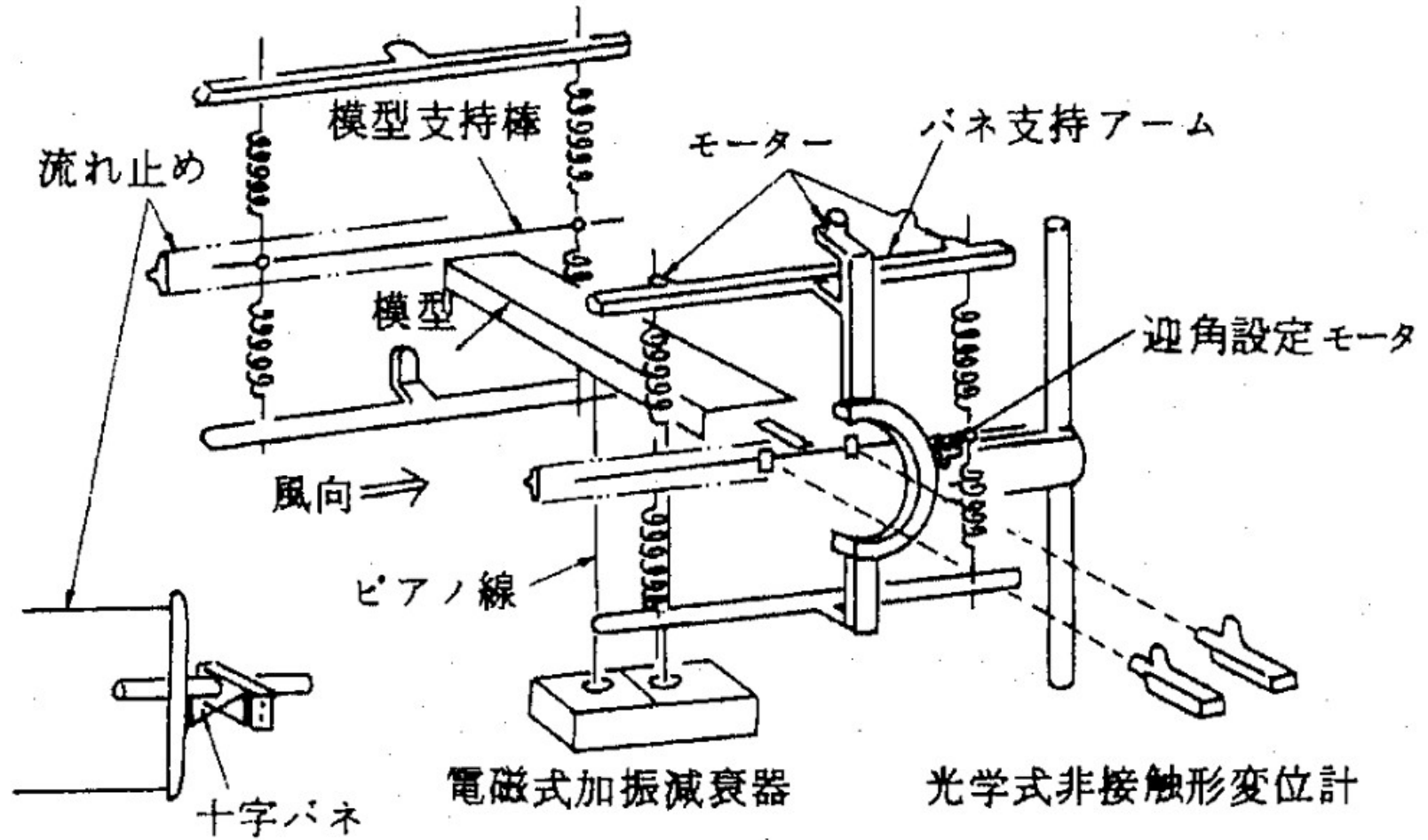
風洞実験の種類



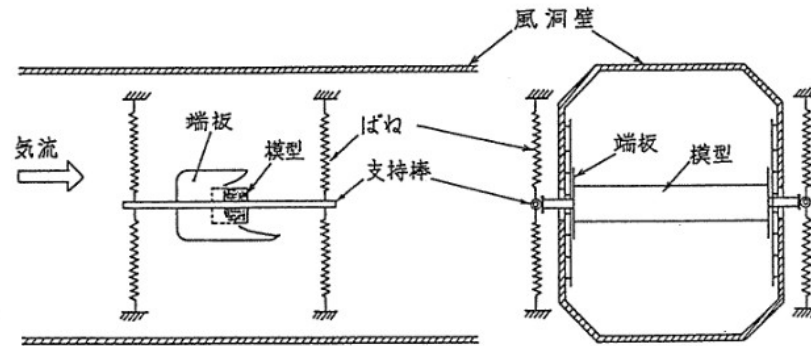
2次元部分模型試験の概念



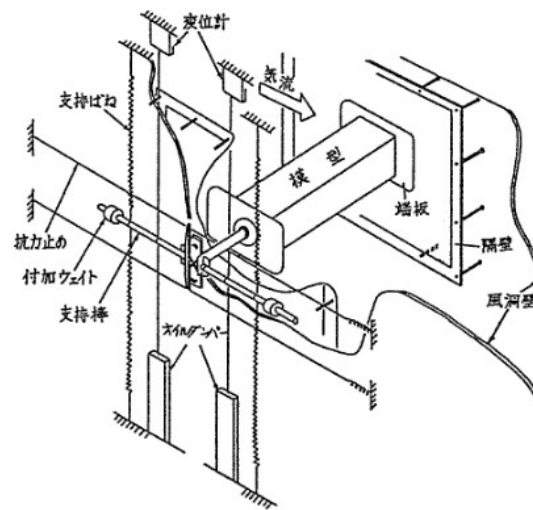
2次元部分模型試験装置



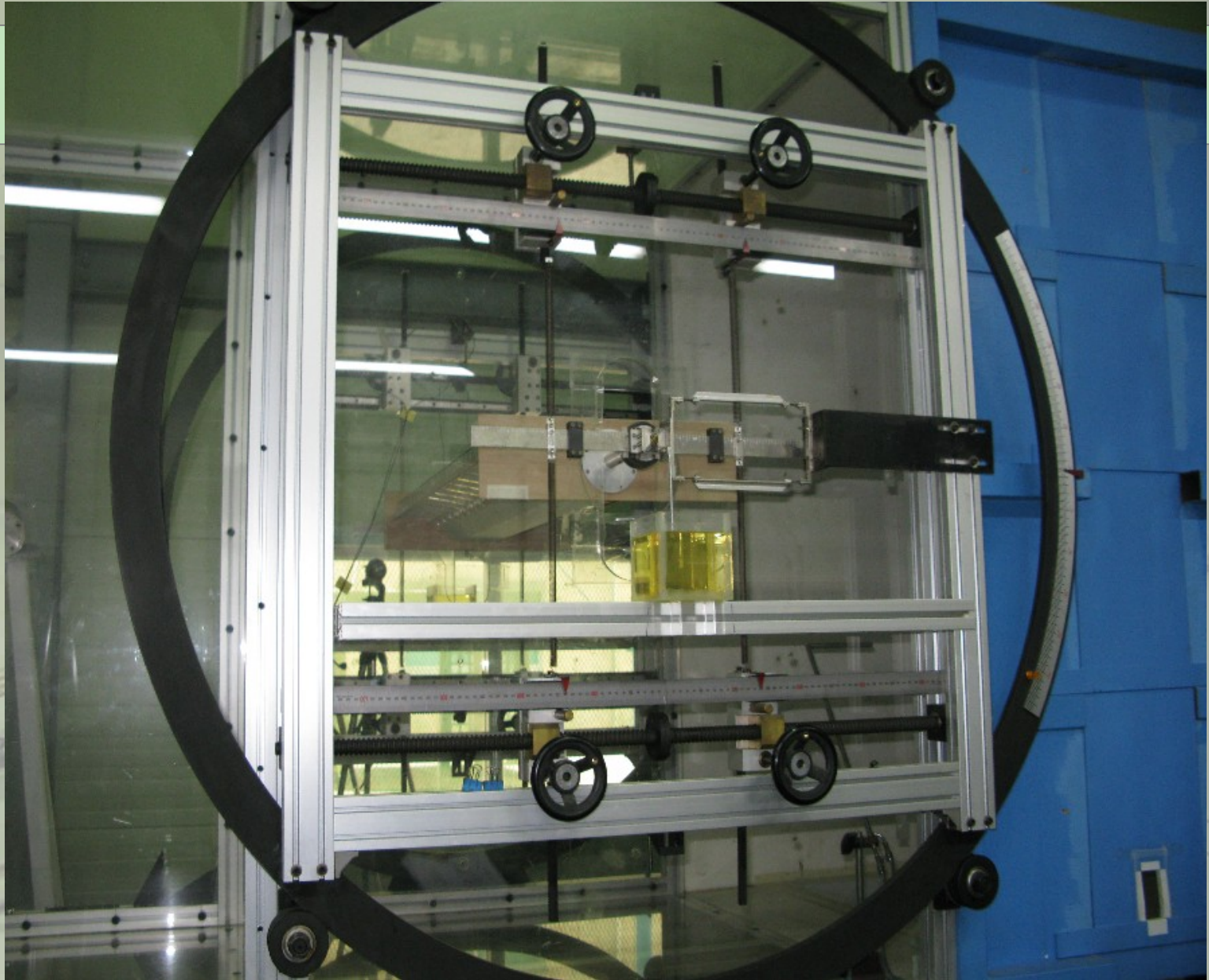
ばね支持模型風洞実験装置の概略

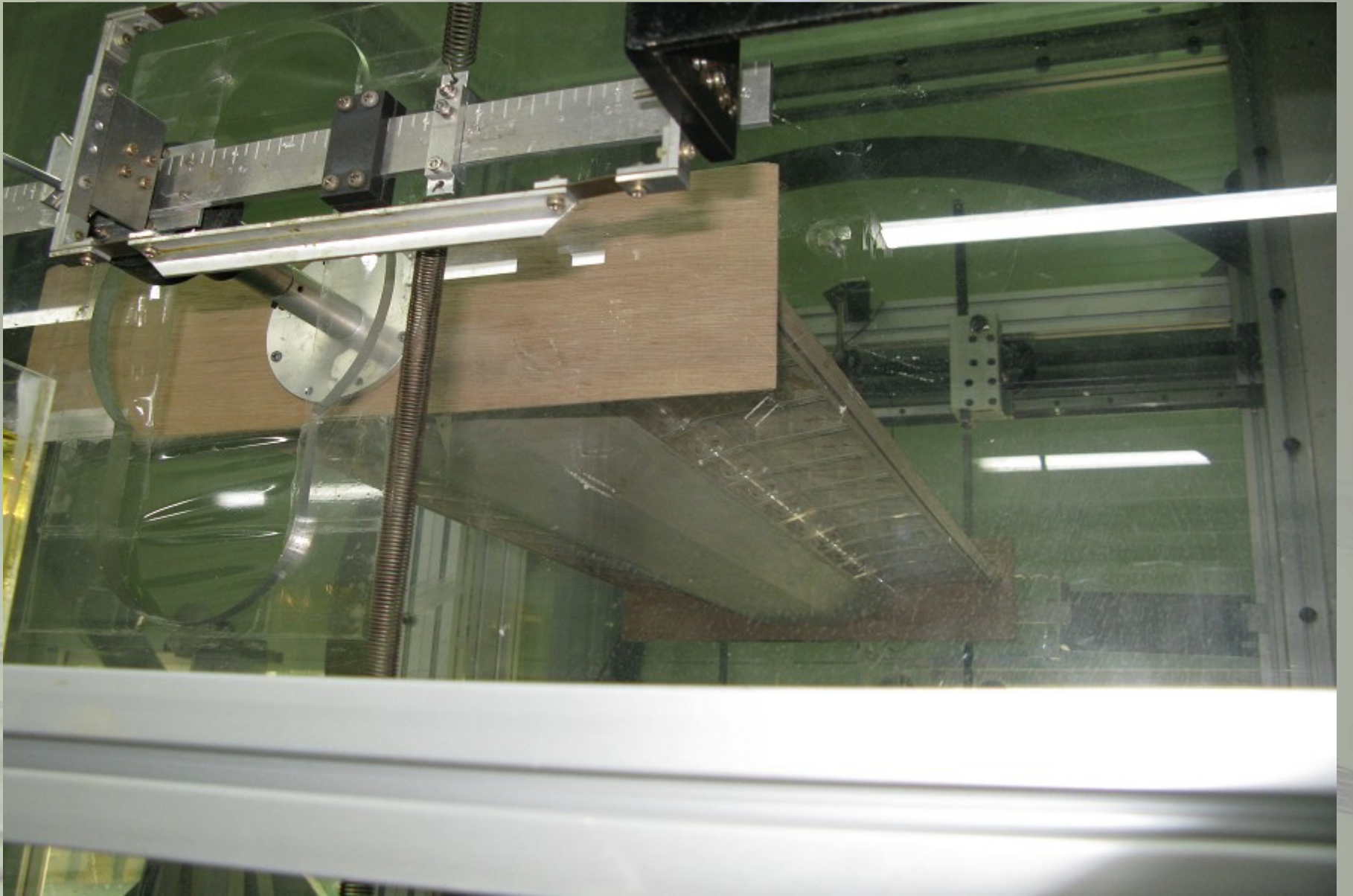


(a) ばね支持実験の概念図

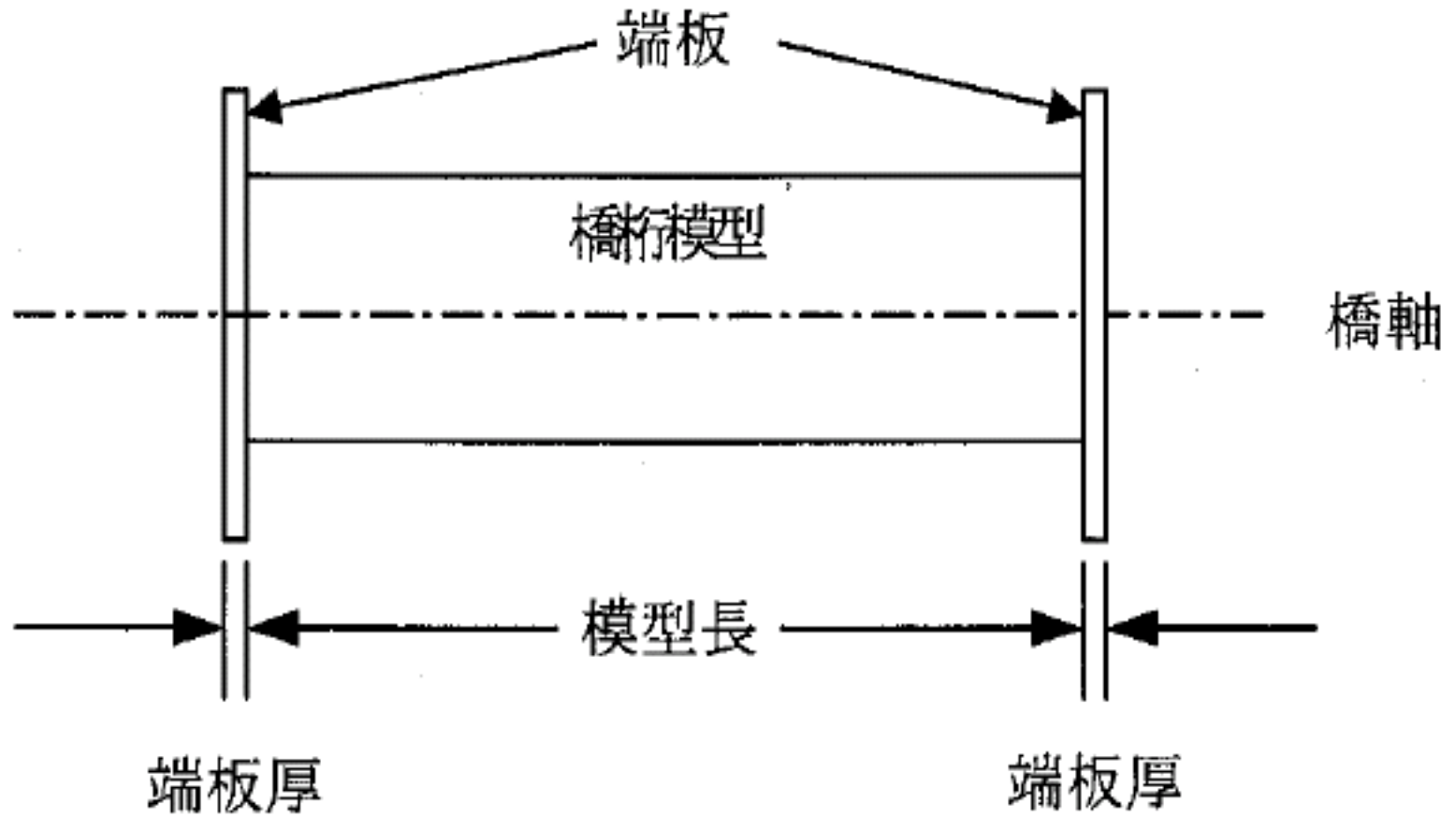


(b) ばね支持機構の概要





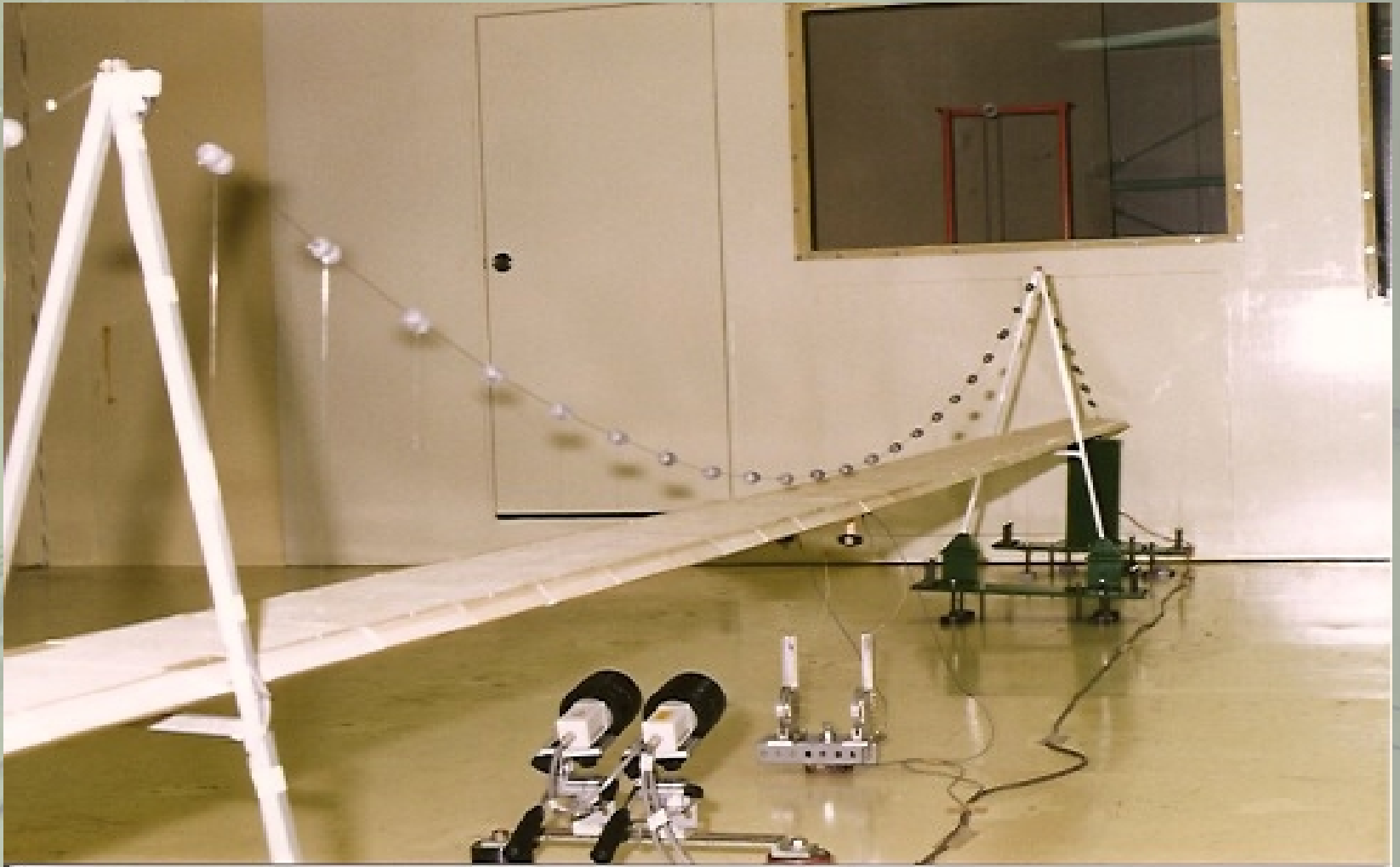
部分模型とは？



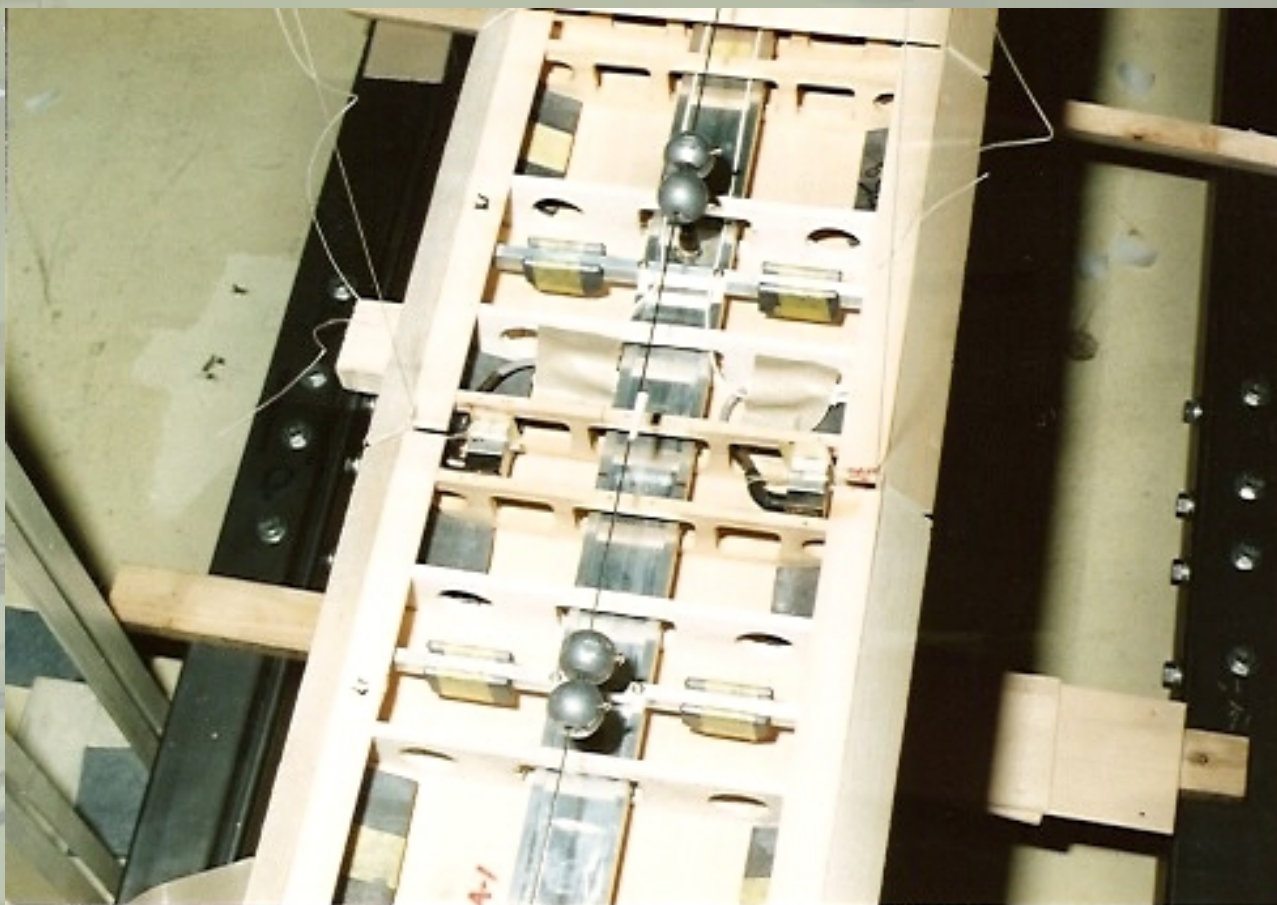
二次元部分模型試験



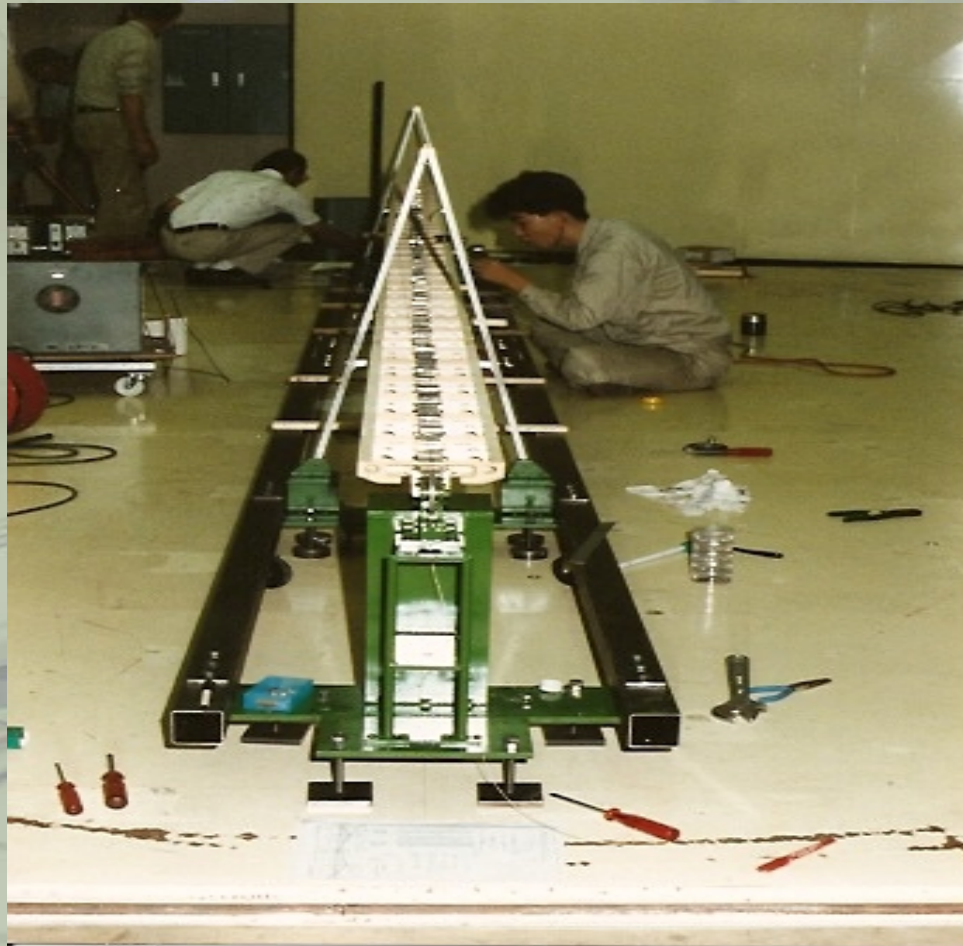
三次元全橋模型（田中博士論文研究対象）



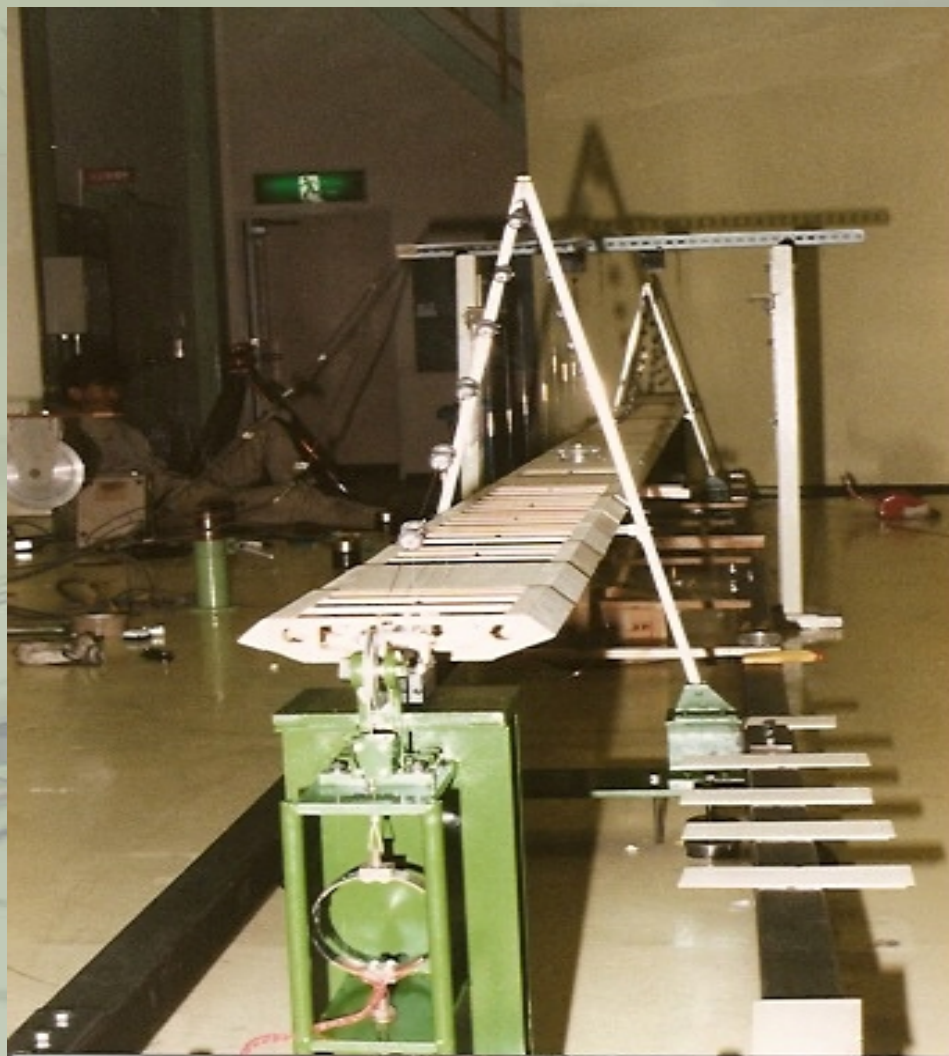
三次元全橋模型 桁の内部



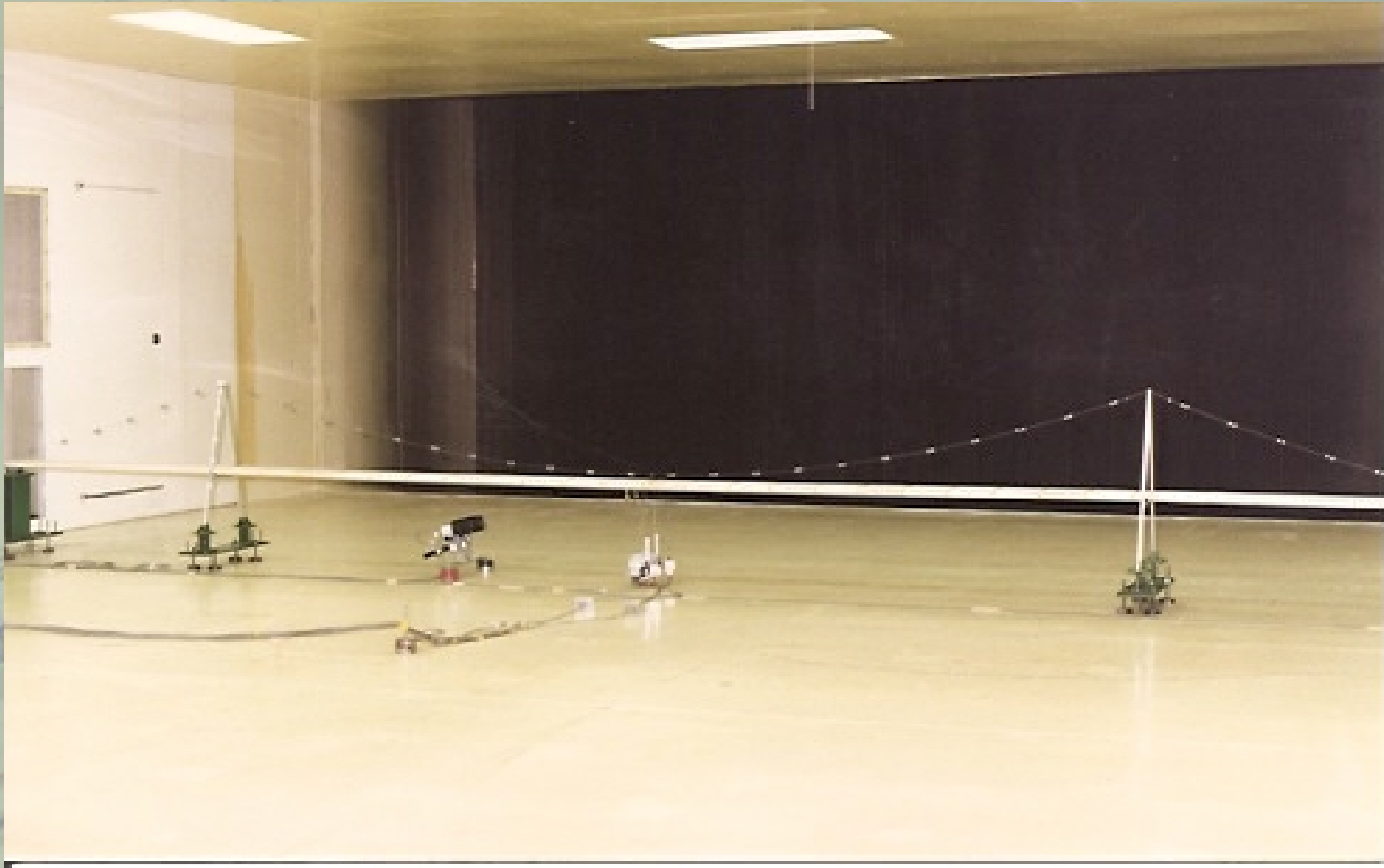
三次元全橋模型 組立作業



三次元全橋模型 仕上計測



三次元全橋模型



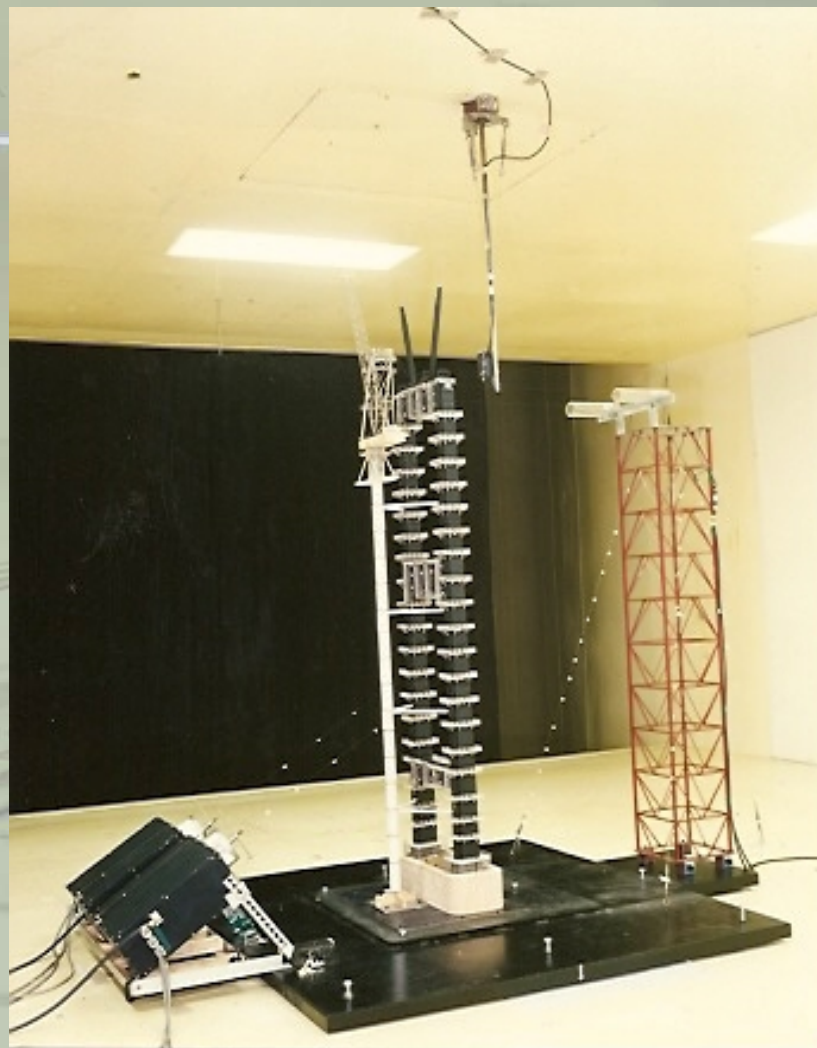
三次元全橋模型（浮体橋の水槽付試験）



三次元全橋模型（水槽の造波機）



三次元全橋模型(主塔架設系)



三分力空気力係数

空気力係数は次式で定義する。

$$C_D = \frac{P_D}{\frac{1}{2}\rho V^2 A_n}, \quad C_L = \frac{P_L}{\frac{1}{2}\rho V^2 B}, \quad C_M = \frac{M}{\frac{1}{2}\rho V^2 B^2}, \quad C_S = \frac{P_S}{\frac{1}{2}\rho V^2 A_n}$$

(3.11), (3.12), (3.13), (3.14)

三分力空気力の計測



ストローハル数

vii) ストローハル数

ストローハル数(S_t)は次式で定義する。

$$S_t = f D / V \quad (3.15)$$

ただし, f : 物体後方に発生する渦の振動数(Hz)

D : 物体の代表長さ(m)

V : 風速 (m/s)

減衰率

	たわみ振動		ねじれ振動	
	対数 減衰率	基準振幅 (アウトストリップ 模型)	対数 減衰率	基準振幅 (アウトストリップ 模型)
トラス補剛桁を有する場合	0.03	総幅の 1/200	0.02	代表点で 0.5 度
充腹補剛桁を有する場合	0.02		0.02	
完成時塔	0.02	完成時塔高の 1/500	0.02	
独立塔	0.01		0.01	

風洞試験設定条件

a) 風速分布

風速分布は平均風速に対する偏差が $\pm 1\%$ 以内であるものとする。

b) 風速の時間変動

風の乱れ強さは 1% 以内であるものとする。

c) 静圧分布

測定部風洞中心軸線上における動圧に対する静圧の偏差は 5% を超えないものとする。

模型条件(1) 縮尺

② 縮尺

模型の縮尺は橋梁の詳細部分を十分の精度で模型化できるように定めるものとする。特に、充腹断面橋桁の模型で渦励振やギャロッピング現象を試験する場合には現象を十分な精度で確認できる縮尺を選定するものとする。縮尺は1/100を下回ってはならない。

模型条件(2) 寸法

- 模型の寸法は風洞測定部形式・特性に応じて表3.15を満たすように定めるものとする。

表3.15 模型の寸法

	<u>弦長</u> 有効な測定部の高さ	<u>模型長</u> 弦長	閉塞率
閉塞型	0.4 以下	2 以上	5% 以下
開放型	0.2 以下	3 以上	5% 以下

三分力試験方法

a) 迎角と水平偏角の範囲

三分力模型試験は -15° ~ $+15^{\circ}$ の迎角範囲で 1° ごとに行うものとする。

b) 試験風速

三分力・横量試験は異なった2つの風速 10m/s 及び 20m/s について行うことを標準とする。

c) 測定精度

i) 設計精度

迎角及び水平偏角の設定精度はそれぞれ $\pm 0.1^{\circ}$, $\pm 0.5^{\circ}$ とする。

相似側

- 橋げた模型振動試験では、幾何学的相似のほかに次の無次元量を実橋の対象モードに関する値と模型の値とで相似させることを原則とする。

$$\frac{\Theta_{\theta}}{\rho B^4}, \quad \frac{m_{\eta}}{\rho B^2}, \quad \frac{V}{N_{\theta} B}, \quad \frac{V}{N_{\eta} B}, \quad \delta_{\theta}, \quad \delta_{\eta}$$

試験条件の許容偏差

- 橋桁模型試験における諸量の相似条件からの所要値に対する偏差の許容値は表3.18のとおりとする。

表3.18 偏差の許容値

諸量	質量	極慣性モーメント	振動数比	対数減衰率
偏差の許容値	± 2%	± 2%	± 5%	± 0.005

測定方法(1)

a) 迎角の範囲

橋桁模型振動試験は原則として $\pm 3^\circ$ の範囲の迎角の 1° ごとについて実施するものとする。試験中の気流の影響による変化は必要に応じて修正するものとする。

b) 風速の範囲

橋桁模型振動試験は原則として設計風速の1.2倍までの風速範囲について実施するものとし、試験風速の刻みは現象に応じて適宜選択するものとする。

c) 振幅の範囲

橋桁模型振動試験は原則としてねじれ振動では $0.5^\circ \sim 5^\circ$ 、鉛直たわみ振動では弦長の $1/200$ から $1/20$ の振幅範囲の振動特性を明らかにするものとする。

測定方法(2)

d) 計測精度

橋桁模型振動試験における計測の精度は表3.19のとおりとする。

表3.19 計測精度

諸量	ねじれ変位	たわみ変位
計測精度	$\pm 0.05^\circ$	弦長 $\times 1/2000$

試験結果の整理

① ねじれ振動

- a) 風速とねじれ振幅と減衰率の関係 ($V \sim \theta \sim \delta$)
- b) 風速と減衰率 (振幅 1°) の関係 ($V \sim \delta$)
- c) 風速と定常振幅の関係 ($V \sim \theta$)
- d) 自励振動の限界風速と迎角 ($V_{cr} - \alpha$)

② たわみ振動

- a) 風速とたわみ振幅と減衰率の関係 ($V \sim \eta \sim \delta$)
- b) 風速と減衰率の関係 ($V \sim \delta$)
- c) 風速と定常振幅の関係 ($V \sim \eta$)



Thank You Very Much !!