

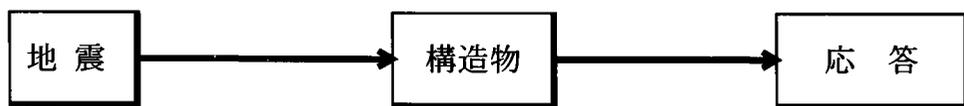
### 3. 風に対する制振設計

#### 3. 1 制振設計の考え方

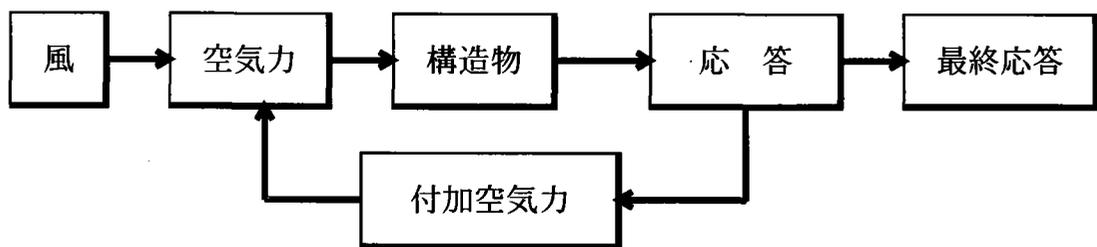
橋梁のような構造物が外乱をうけて揺れ始めたとき、振動エネルギーを吸収し許容範囲内に振動をコントロールするのが「制振」である。これを概念的に示すと次のようになる。

【入 力】 → 【構造物】 → 【応 答】 < 【許容値】

構造物の振動の仕方は外力（供給されるエネルギー）により差があるが、風による振動は、地震等に比べて継続時間が長くエネルギーの入力が緩慢であるという特徴がある。また、図3. 1に示すように、地震による構造物の応答は、強制振動としての応答であるが、風による構造物の応答は、構造物の応答によって新たな空気力が発生し、さらに構造物の振動を増幅させるといったフィードバック回路を繰り返しながら、空気力と構造系との力学バランスが生じたところで最終応答となるといった違いがある。また、地震の場合、入力される地震力は、構造物の種類に無関係であるが、風の場合は断面形状を含む構造ごとに空気力が変化することが挙げられる。



(a) 地震による構造物の振動の概念図



(b) 風による構造物の振動の概念図

図3. 1-1 風による構造物の振動と地震による構造物の振動の概念図

このように、風による振動の制振を考える場合、空気力に関して理論的な展開が困難であることもあって、風洞実験による実験・試験を行わざるを得ない状況にあり、制振設計の基本的な流れは図3. 2のようになる。

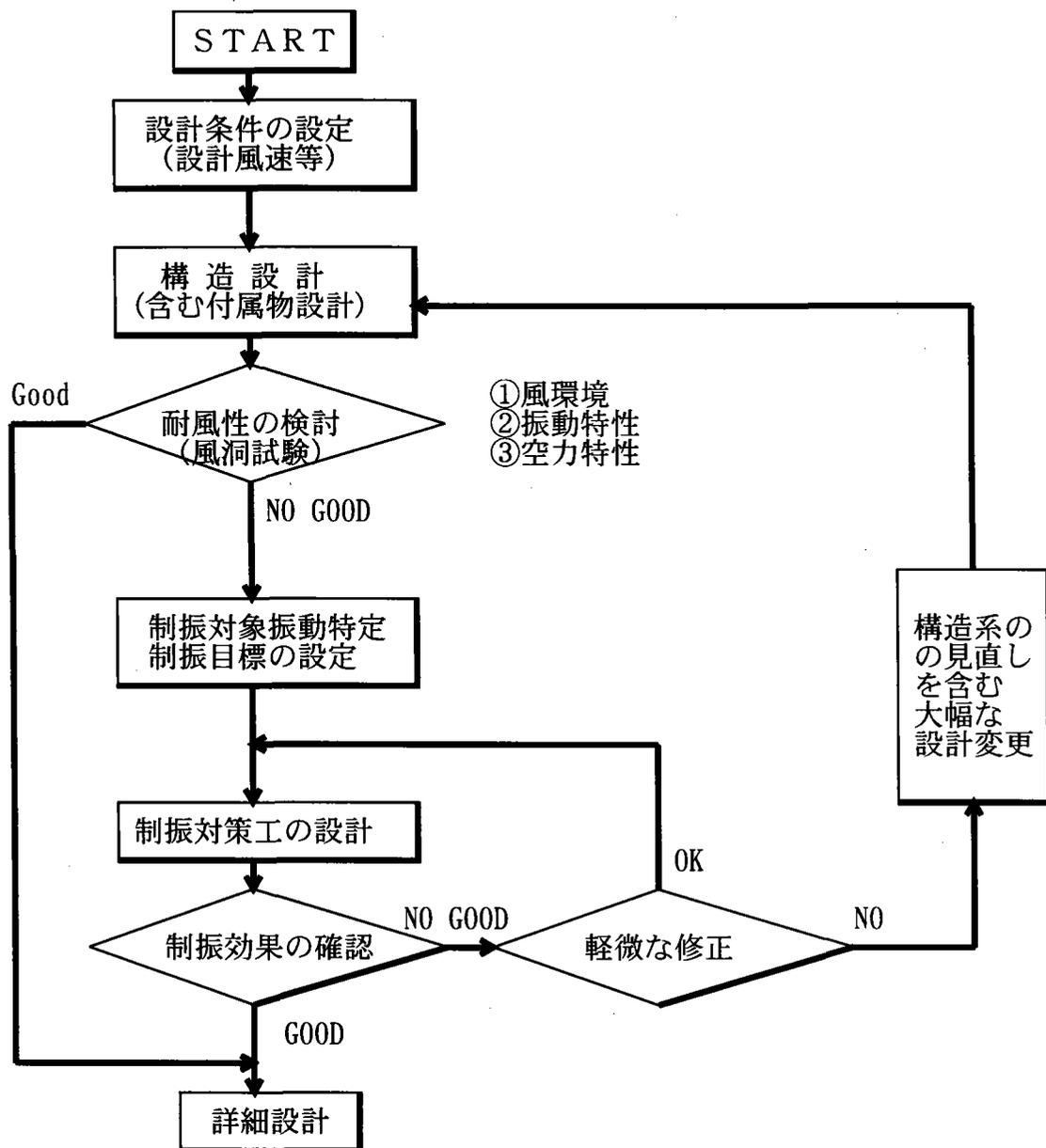


図3. 1-2 制振設計の基本的な流れ

フローの中で構造特性の風洞試験への反映等、計画初期に留意すべき点を次に述べる。

### 1) 風環境の把握と適切な設計風速の設定

特定の地点（架橋地点）において次の項目で風環境を知ることが合理的かつ信頼性のある耐風設計が実現できる可能性があり、設計風速を適切に設定することが重要である。

- ①長い再現期間に対する最大風速（風向別）の推定
- ②地形の影響を考慮した水平および鉛直方向の風速分布の推定
- ③風の乱れといった風速変動特性を表現する諸パラメータの評価

## 2) 構造物設計・構造形状寸法の設定

橋梁の主桁や塔の断面は、一般に角ばった'bluff' (にぶい) 断面が用いられることが多い。このような断面では、特に前縁がわの角部から流れの剥離が各種の空力振動と密接なつながりを持つ場合が多い。

橋梁断面の空力特性を決定するパラメーター (例えば箱桁などの充腹桁)

主構造 … 幅員 (B)、桁高 (D)

床版の張出し長、主桁本数、桁形状 (傾斜ウェブなど)

片勾配や片側歩道などの非対称性

付属物 … 橋面の高欄 (ガードレールor壁高欄)

” 防音壁

” 防雪板

” 遮風板 (事例参照。)

桁下・側面の検査路、管体

付属物もその形状・位置の僅かな違いによって空力特性に大きな影響を及ぼすことがあるため、十分な注意が必要である。

また、特に留意すべき点は主構造部材と付属物では、一般に設計荷重が異なるため、照査すべき振動現象の風速域において考慮すべきかどうか慎重な検討が必要である。

また、設置が予想される付属物の配置・荷重等は過不足がないよう留意する必要がある。

## 3) 制振目標と制振対策工の選定

制振目標は構造物の安全性と機能の充足からの使用性から設定される。したがって、制振対象とする空力振動によって制振目標の設定は異なるものとなる。

- ・ 構造物の安全性-----初通過破壊、疲労破壊
- ・ 使用性の問題----- (全身振動の振動限度、走行安定性)

制振対策工は大きく空力的対策工と構造力学的対策工に大別される。表3. 1に制振対象とする空力振動と制振対策を示す。

比較的低い風速で発生する渦励振の場合は、外力 (エネルギー) のオーダーが、構造物の対数構造減衰係数程度と小さいことが多いため、空力的対策のほか、振動を減衰させる原理として機械的な制振装置を構造内部に内蔵させ減衰を付加することでエネルギー吸収能力を高める方法が考えられ実用化されている。

一方、比較的高い風速域で発生するフラッターのような自励振動の場合は、振動し始めると振動の成長とともに供給されるエネルギーは渦励振とは比較にならないほど大きくなっていくため、一般には設計風速内では発生させないように断面を空力的に改善する方法が採られることが多い。

表-3. 1 空力振動と制振対策

対策の方針	対策のねらい	具 体 策	限定振動		発散振動	実効性	実現性
			発現風速	応答振幅	発現風速		
入力の低減	基本断面の最適化	ex断面の変更。	—	↓	↑	△	○
	剥離流のコントロール	空力アタッチメント付加	—	↓	↑	○	○
	アクティブな "	" 姿勢の制御		↓	↑	○	△
応答の低減	質量の増 (M)	桁内部のコンクリート充填	↓	↓	↓	△	△
	高減衰化 (C)	TMDの設置	—	↓	—	○	○
	制振力付加 (F)	AMDの設置	—	↓	—	○	△
構造系変更	剛性の増 (K)	ex. 部分的な桁補剛	↑	↓	↑	○	△
		ex. 短径間化	↑	↓	↑	○	△
		ex. ラーメン構造	↑	↓	↑	○	○

### 3. 2 制振設計のシナリオ

橋梁の耐風設計においては「道路橋耐風設計便覧」等各種文献があり、具体的な検討内容方法についても「道路橋の動的耐風設計要領」記入用紙等が用意され動的耐風設計が実施できるようになっているが、実際の橋梁設計との関係が不明確な点があり、一般的な橋梁設計技術者のとまどいとなっている可能性がある。

そこで、橋梁の計画、検討、設計の各段階における制振設計との関係を明確にするとともに各段階における具体的な制振設計（耐風検討）の内容について述べることを目的に制振設計のシナリオとして設計検討フローを作成した。

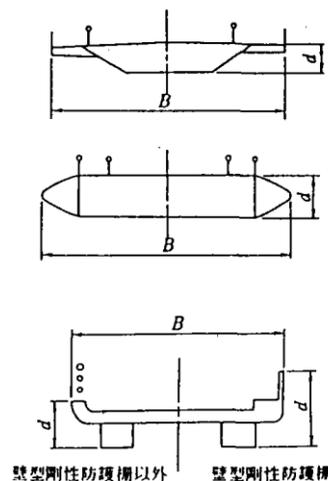
制振設計を行う手順は、橋梁の主要な諸元が決定した段階で「振動の予測」を行い、予測された振動に対して「評価基準」その振動が橋梁の安全性あるいは使用性の面で問題がないかどうかの評価を行うことになる。しかし、橋種及び対象部位、部材により上記の「照査の段階」、「振動の予測」、「評価基準」等が異なる。

- ・照査の段階――設計のどの段階で制振照査を実施するか
- ・振動の予測――どのような振動が生じ、どのような照査を行うか
- ・評価基準――構造物としての安定状態（限界状態、破壊状態）とはどのような状態であるか

例えば、静的設計で断面を決定し、耐風照査を実施するもの、概略断面決定の段階より耐風設計を実施する必要があるものなど、以上橋梁の耐風設計は対象とする橋梁の規模、橋種および対象部材によって異なるため、主として橋種と部位を主体とする下記の分類で整理し、各分類で検討フローを作成した。

- 1) 桁橋
- 2) 充腹断面の吊り橋、斜張橋
- 3) トラス断面の吊り橋、斜張橋
- 4) ケーブル構造
- 5) 主塔
- 6) アーチ吊り材
- 7) 付属物その他

総幅  $B$  および有効高さ  $d$  のとり方



動的耐風設計の必要条件  
(耐風便覧 第2章)

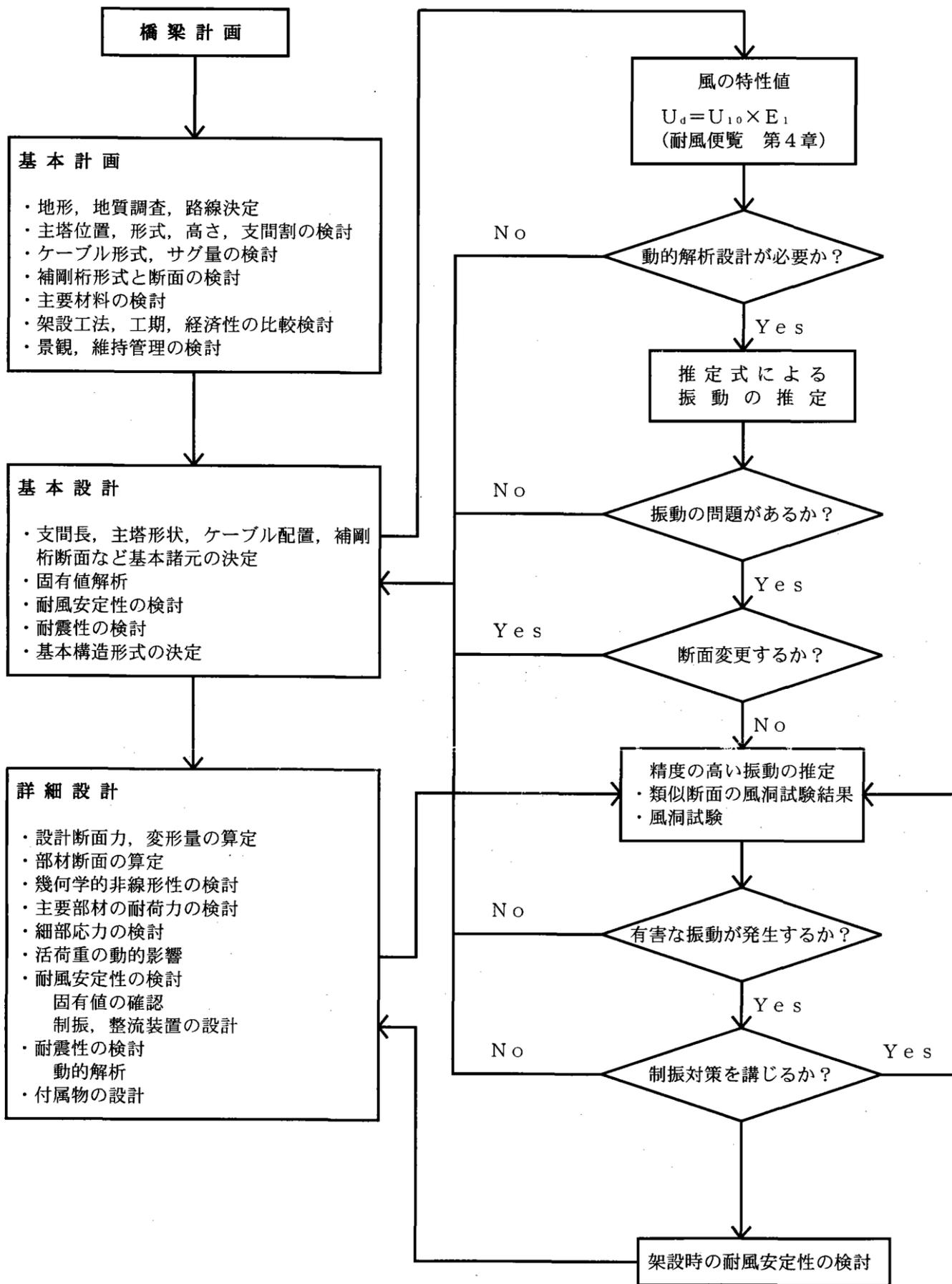
- 【開断面】  
ねじれ発散振動  
 $L \times U_d / B > 350$   
たわみ発散振動（鋼橋のみ）  
 $L \times U_d / B > 330$  かつ  $I_u < 0.15$   
渦励振  
 $L \times U_d / B > 200$  かつ  $I_u < 0.20$
- 【閉断面】  
ねじれ発散振動  
 $L \times U_d / B > 520$   
たわみ発散振動（鋼橋のみ）  
 $L \times U_d / B > 330$  かつ  $I_u < 0.15$   
かつ  $B/d < 5$   
渦励振  
 $L \times U_d / B > 200$  かつ  $I_u < 0.20$

推定式による振動の推定  
(耐風便覧 第5章)

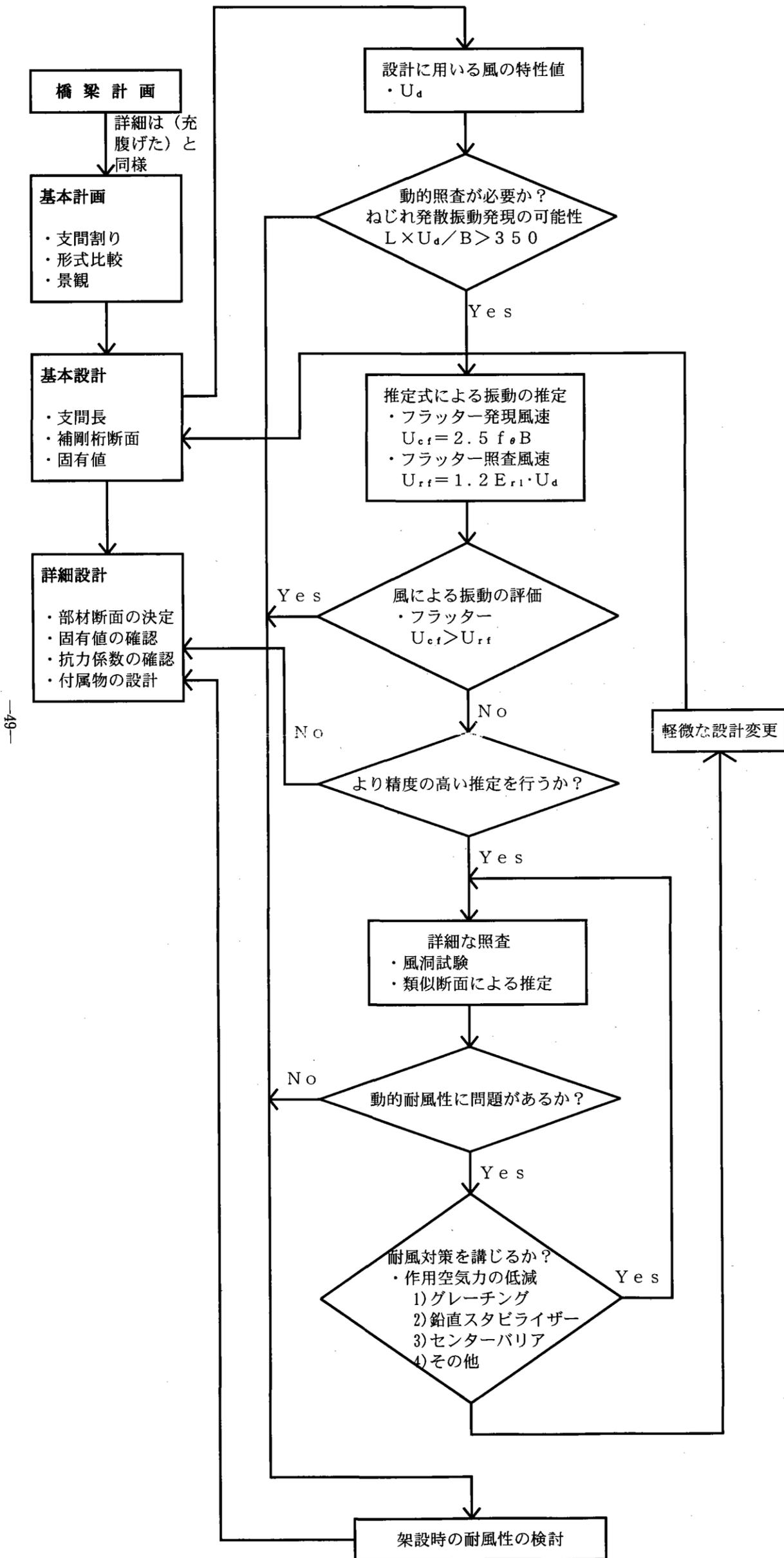
- 【発散振動（ねじれ）】  
 $U_{cr} = 2.5 f_{th} \cdot B > U_{cr}$
- 【発散振動（たわみ）】  
ねじれ発散振動  
 $U_{cg} = 8 f_{th} \cdot B > U_{cg}$   
たわみ発散振動（鋼橋のみ）  
 $U_{cg} = 4 f_{th} \cdot B > U_{cg}$
- 【渦励振（たわみ）】  
 $U_{cvh} = 2.0 f_{th} \cdot B > U_d$   
あるいは  
 $E_h \cdot E_{th} / (m \cdot \delta) \rho B^3 < 0.04 / f_h$
- 【渦励振（ねじれ）】  
 $U_{cv\theta} = 1.33 f_{\theta} \cdot B > U_d$   
あるいは  
 $E_{\theta} \cdot E_{t\theta} / (I_p \cdot \delta) \rho B^4 < 2.28 / (b \cdot f_{\theta})$

制振対策の例  
(耐風便覧 第5章)

- 【けた重量を増やす】  
けた内部に重量物をつめ込む
- 【けたの剛性を増す】  
部分的に剛性の高いけたを組み合わせる  
側径間にベントをたてる
- 【構造減衰を増す】  
TMD, TLD等の減衰機を搭載する
- 【作用空気力の性質を変える】  
渦励振対策  
フェアリング  
スポイラー  
デфлекター  
フラップ
- 発散振動対策  
スカート  
プレート



# 吊橋・斜張橋（トラス桁）の耐風設計の流れ



## 支間割りの分類

- B : 橋桁の総幅 [m]
- d : 橋桁の有効高 [m]
- L : 橋桁の最大支間長 [m]
- U<sub>d</sub> : 設計基準風速 [m/s]
- U<sub>c,f</sub> : フラッターの発現風速 [m/s]
- U<sub>r,f</sub> : フラッターの照査風速 [m/s]
- E<sub>r,i</sub> : 自然風の変動に基づく補正值

粗度区分	I	II	III	IV
E <sub>r,i</sub>	1.10	1.15	1.20	1.25

- I : 海上, 海岸
- 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 : 中高層建築物が密集している地域, 起伏の大きい丘陵地

f<sub>θ</sub> : ねじれの一次固有振動数 [Hz]

近似式 f<sub>θ</sub> = 2 f<sub>n</sub>

f<sub>n</sub> : 鉛直たわみ一次固有振動数 [Hz]

近似式

(1) 活荷重変位が求められている場合

1) 最長支間が2つの場合

$$f_n = 0.56 \frac{W_L}{\eta_L \cdot W_D}$$

2) 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以上の場合

$$f_n = 0.47 \frac{W_L}{\eta_L \cdot W_D}$$

(2) 活荷重変位が求められていない場合

$$f_n = 100/L$$

ここに

W<sub>L</sub> = 換算等分布活荷重

$$W_L = q \left( 1 + \frac{8p}{5qL} \right)$$

q : 等分布活荷重 [tf/m]

p : 線荷重 [tf]

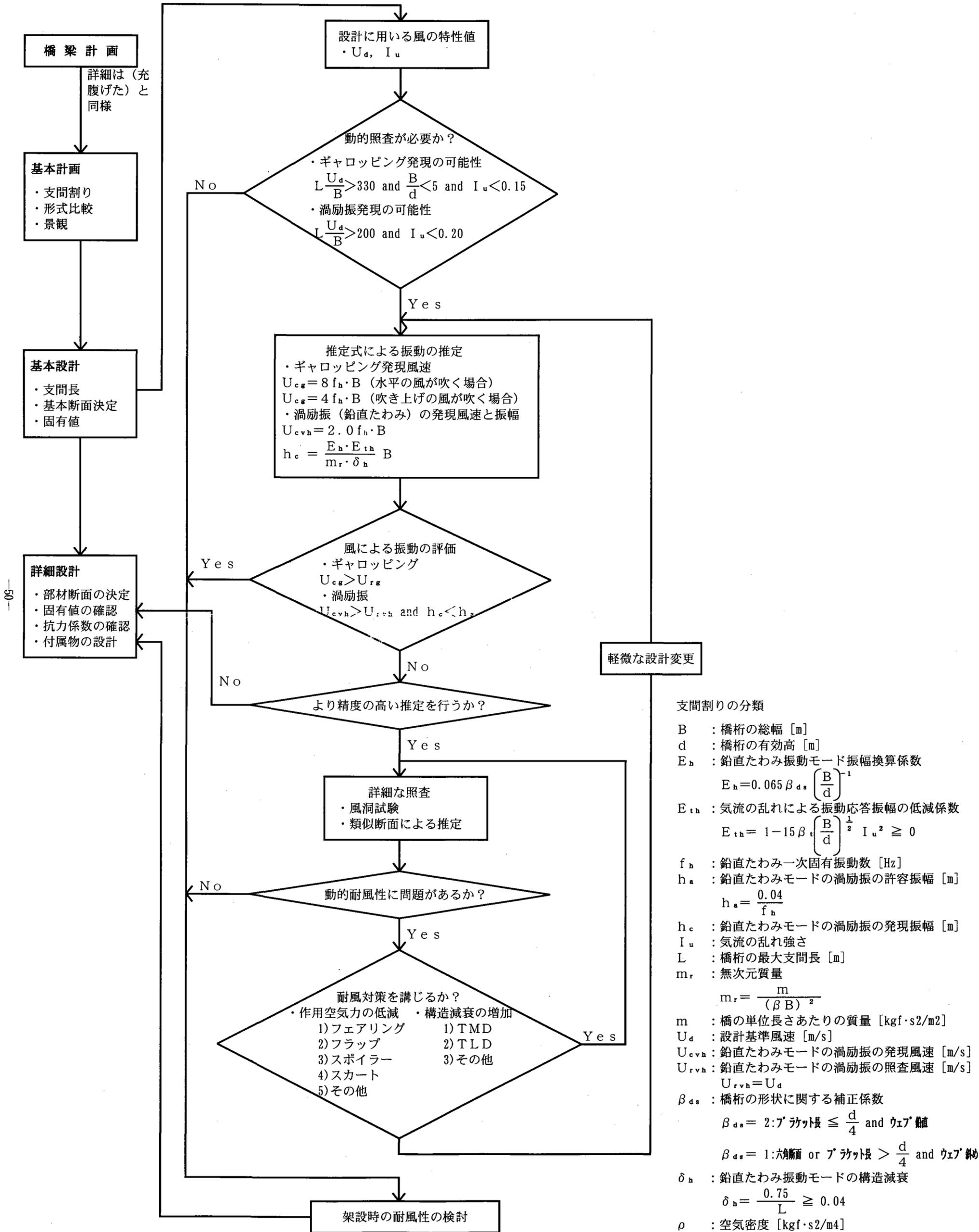
η<sub>L</sub> : 最大活荷重たわみ [m]

ただし衝撃および温度変化の影響は含まない

W<sub>D</sub> : 主径間の死荷重強度 [tf/m]

# 鋼桁橋の耐風設計の流れ

風による振動の動的照査開始



支間割りの分類

- B : 橋桁の総幅 [m]
- d : 橋桁の有効高 [m]
- E<sub>h</sub> : 鉛直たわみ振動モード振幅換算係数  

$$E_h = 0.065 \beta_{ds} \left(\frac{B}{d}\right)^{-1}$$
- E<sub>th</sub> : 気流の乱れによる振動応答振幅の低減係数  

$$E_{th} = 1 - 15 \beta_{ds} \left(\frac{B}{d}\right)^{\frac{1}{2}} I_u^2 \geq 0$$
- f<sub>h</sub> : 鉛直たわみ一次固有振動数 [Hz]
- h<sub>a</sub> : 鉛直たわみモードの渦励振の許容振幅 [m]  

$$h_a = \frac{0.04}{f_h}$$
- h<sub>c</sub> : 鉛直たわみモードの渦励振の発現振幅 [m]
- I<sub>u</sub> : 気流の乱れ強さ
- L : 橋桁の最大支間長 [m]
- m<sub>r</sub> : 無次元質量  

$$m_r = \frac{m}{(\beta B)^2}$$
- m : 橋の単位長さあたりの質量 [kgf·s<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>]
- U<sub>d</sub> : 設計基準風速 [m/s]
- U<sub>cvh</sub> : 鉛直たわみモードの渦励振の発現風速 [m/s]
- U<sub>rvh</sub> : 鉛直たわみモードの渦励振の照査風速 [m/s]  

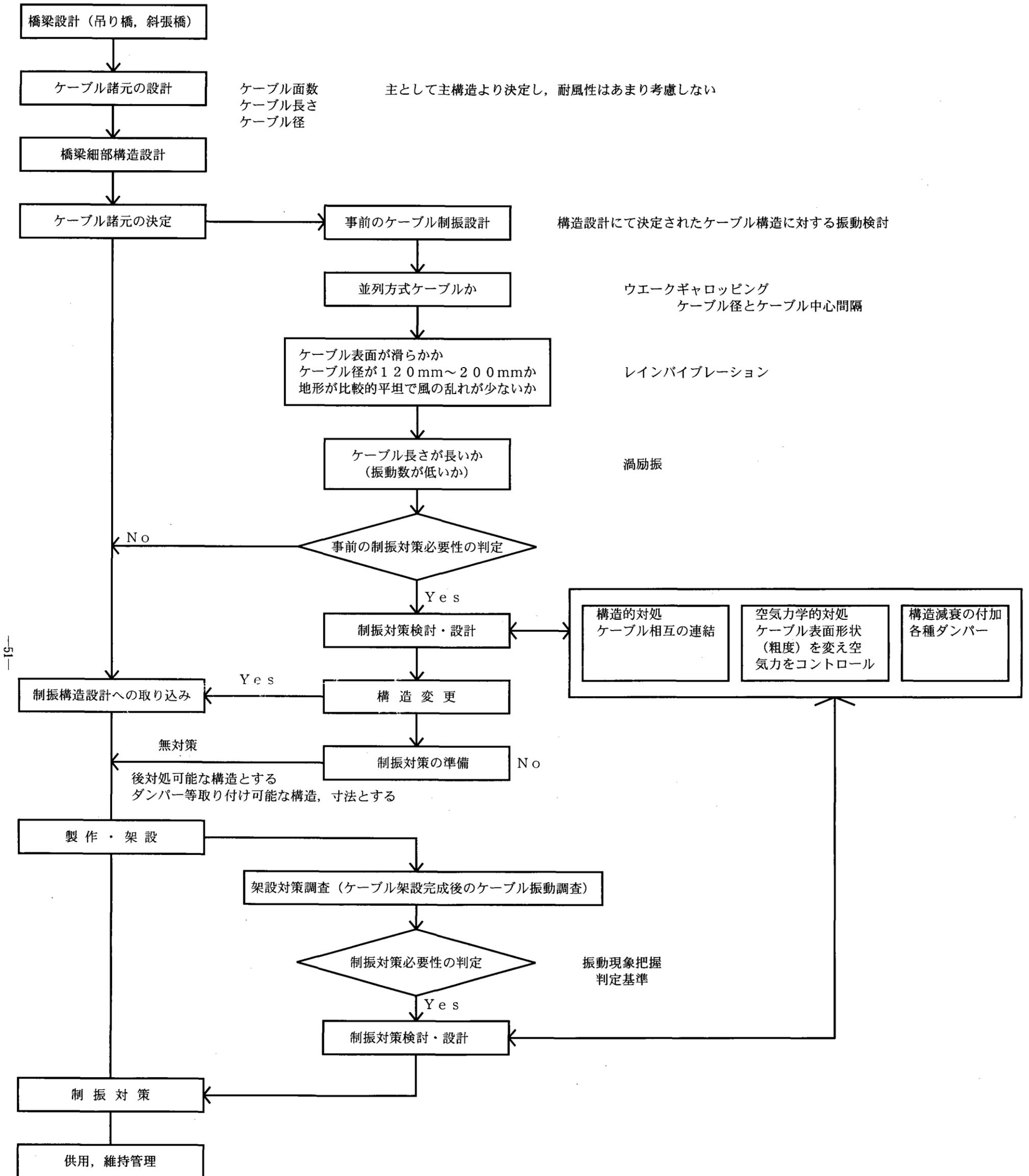
$$U_{rvh} = U_d$$
- β<sub>ds</sub> : 橋桁の形状に関する補正係数  

$$\beta_{ds} = 2: \text{ブランチ長} \leq \frac{d}{4} \text{ and } U_{I'} \text{ 値}$$

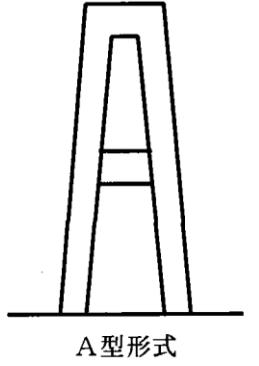
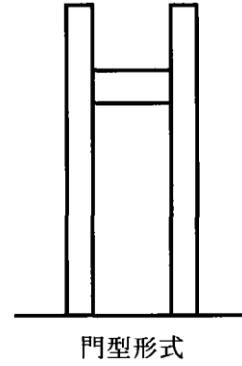
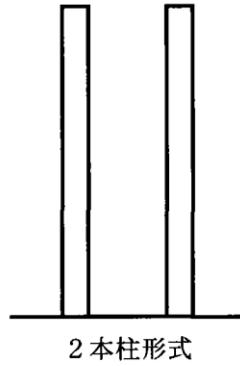
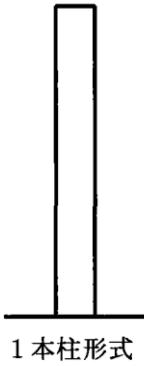
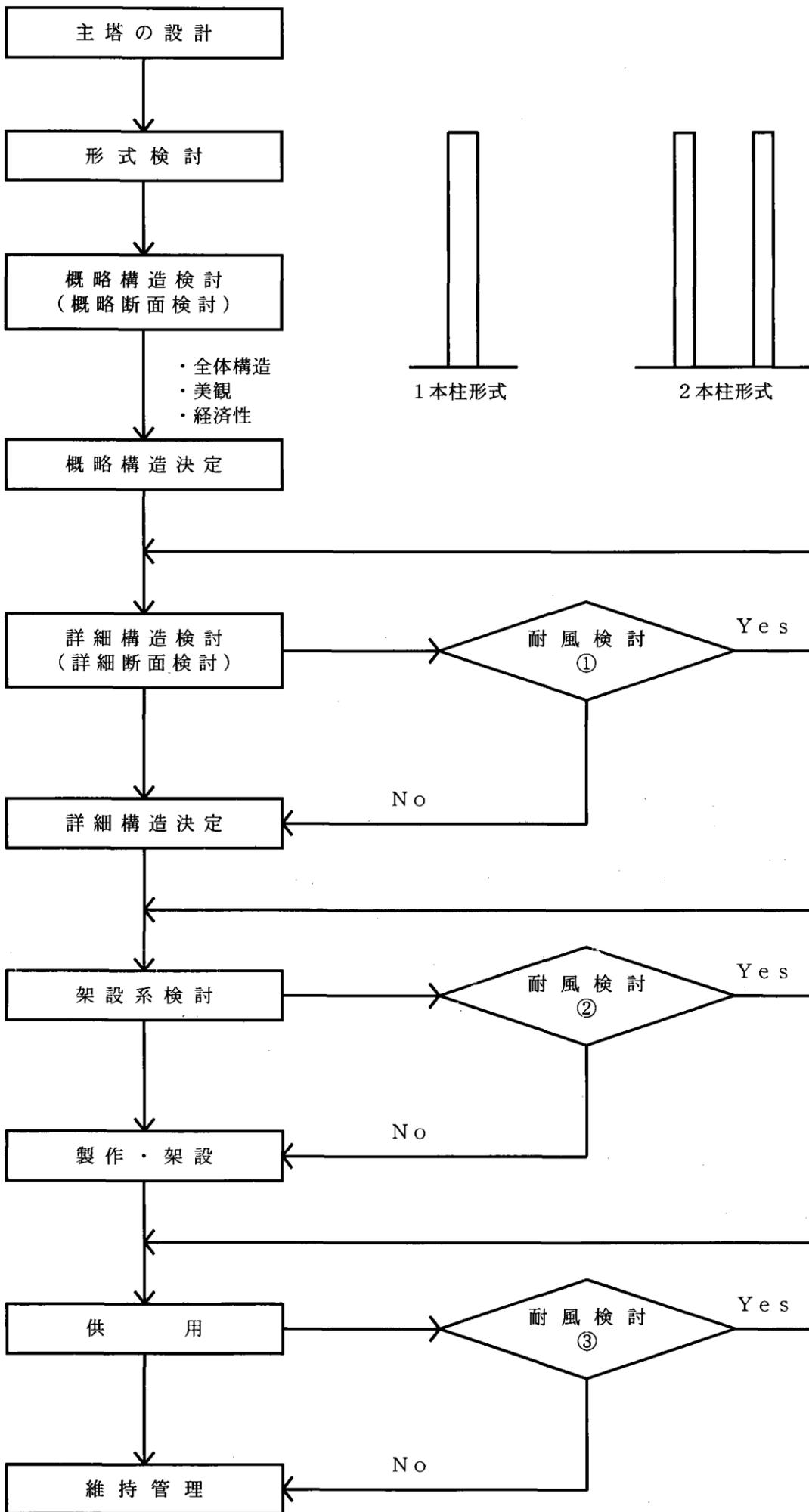
$$\beta_{ds} = 1: \text{六角形 or ブランチ長} > \frac{d}{4} \text{ and } U_{I'} \text{ 値}$$
- δ<sub>h</sub> : 鉛直たわみ振動モードの構造減衰  

$$\delta_h = \frac{0.75}{L} \geq 0.04$$
- ρ : 空気密度 [kgf·s<sup>2</sup>/m<sup>4</sup>]

# ケーブルの耐風設計の流れ



# 主塔の耐風設計の流れ



- ・全体構造
- ・美観
- ・経済性

## 耐風検討 ①

### 検討方法

- ・固有振動数
- ・細長比
- ・風洞試験

### 判断基準

- ・固有振動数 小：ギャロッピング  
渦励振
- ・細長比 大：パフェッティング
- ・風洞試験 振動発生

### 対策

- ・整流装置
- ・細部形状変更
- ・制振装置

## 耐風検討 ②

### 検討方法

- ・固有振動数
- ・細長比
- ・風洞試験

### 判断基準

- ・固有振動数 小：ギャロッピング  
渦励振
- ・細長比 大：パフェッティング
- ・風洞試験 振動発生

### 対策

- ・整流装置
- ・細部形状変更
- ・制振装置

## 耐風検討 ③

### 検討方法

- ・実測による振動現象の確認
- ・風洞試験

### 判断基準

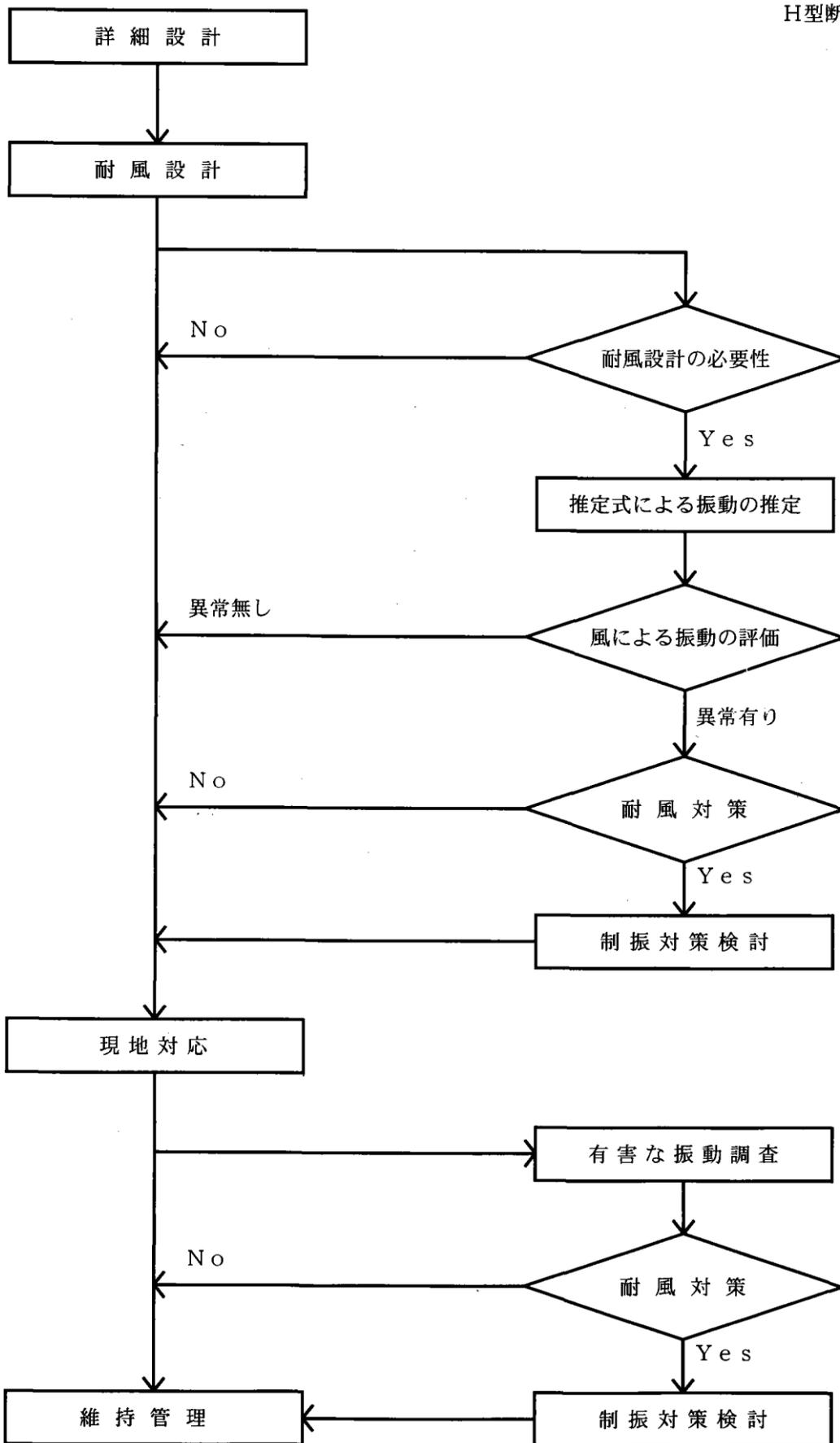
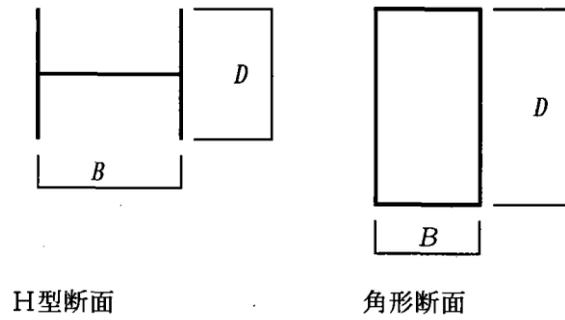
- ・パフェッティング
- ・渦励振
- ・ギャロッピング  
等の振動現象が確認される
- ・風洞試験 振動発生

### 対策

- ・整流装置
- ・細部形状変更
- ・制振装置

# アーチ吊材の耐風設計の流れ

吊り材の断面形状



断面は軸力より決定

細長比の大きな部材

断面形状および固有振動数より推定

応力照査

$$\alpha 1 + \alpha 2 < \alpha 3$$

$\alpha 1$  = 渦励振応力  
 $\alpha 2$  = 死荷重応力  
 $\alpha 3$  = 許容応力

ギャロッピング発現風速

$$U_{cr} = f \cdot D / S$$

f : 固有振動数

D : 部材の気流直角方向の幅

S : ストローハル数

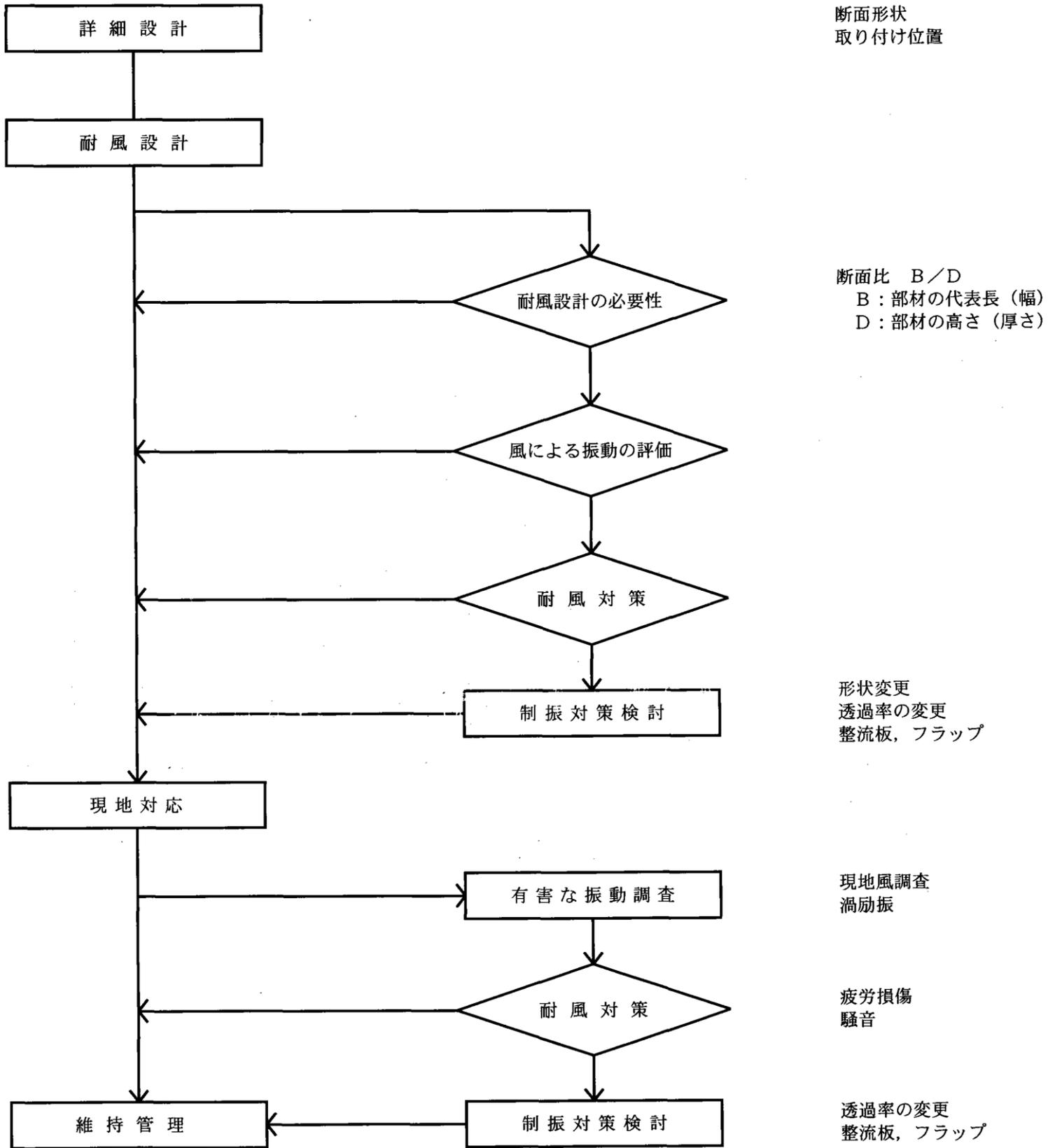
断面変更

現地調査  
渦励振 (風琴振動)

疲労損傷

取り付け部材補強  
風穴, ワイヤー巻き  
部材連結

付属物（高欄，防音壁）の耐風設計の流れ



### 3. 3 制振設計事例

制振設計の参考のために、現在までの主な制振設計事例のリストと代表的な事例について、その諸元と概略形状とを取りまとめた。

振動制御事例総括表

橋種	対象部位	形式	振動現象	制振対策	事例番号	事例		特徴	
						橋名	文献		
桁橋	主桁	箱桁橋	渦励振	フラップ	3	門崎高架橋	門崎高架橋の耐風安定性（橋梁と基礎84/02）	下部スカート併用	
					5	末広大橋	末広大橋上部工の設計と施工（橋梁と基礎75/09）		
				TMD		8	なみはや大橋	松尾橋梁技報96/04	
				10	東京湾横断道	東京湾横断道上部工の設計・施工（橋梁と基礎95/03）	実橋の動態観測後に実施		
				12	関西国際空港連絡橋	橋は揺れているか 予測と現実（土木学会）			
			ギョロッキンク	下部スカート	3	門崎高架橋	門崎高架橋の耐風安定性（橋梁と基礎84/02）		
					9	有明西運河橋	有明西運河橋の設計・施工（橋梁と基礎94/12）		
				プレート	4	泊大橋	泊大橋建設工事の概要と風に対する検討（土木学会論文集86/09）	万一有害な振動が発生した場合更に必要な対策を追設	
					6	琵琶湖大橋	琵琶湖大橋（並列橋の耐風安定性）（土木学会第49回年講）	南風の制振対策として旧橋の高欄にフラッグ取付け	
					7	撫養橋	並列箱桁橋（撫養橋）の耐風応答特性（土木学会第51回年講）、撫養橋上部工の設計と施工（橋梁と基礎86/07）	管理路を兼ねた制御プレートを設置	
		8			なみはや橋	松尾橋梁技報96/04			
		2			海田大橋	海田大橋（上部工）の設計、施工（橋梁89/02）			
					臨海工区（春木川橋）	佐藤鉄工技報 1993 Vol.6			
		フラップ			6	琵琶湖大橋	琵琶湖大橋（並列橋の耐風安定性）（土木学会第49回年講）	南風の制振対策として旧橋の高欄にフラッグ取付け	
				11	牛深ハイヤ橋	牛深ハイヤ橋（日経インストラクション96/07）			
				11	牛深ハイヤ橋	牛深ハイヤ橋（日経インストラクション96/07）			
				12	関西国際空港連絡橋	橋は揺れているか 予測と現実（土木学会）			
		フラッター		スタビライザ-	12	関西国際空港連絡橋	橋は揺れているか 予測と現実（土木学会）		
		鋼桁橋	ギョロッキンク	フェアリング	1	木津川新橋	4径間連続鋼桁の耐風安定性（阪大工学部「風洞」1986）	フラップ併用	
				フラップ	1	木津川新橋	4径間連続鋼桁の耐風安定性（阪大工学部「風洞」1986）	フェアリング併用	
			渦励振	フェアリング	1	木津川新橋	4径間連続鋼桁の耐風安定性（阪大工学部「風洞」1986）	フラップ併用	
				フラップ	1	木津川新橋	4径間連続鋼桁の耐風安定性（阪大工学部「風洞」1986）	フェアリング併用	
		ア-チリブ補剛桁	ア-チ橋	渦励振	プレート	13	舞州～夢州連絡橋（仮称）	舞州～夢州連絡橋の風荷重に対する検討（土木学会第50回年講）	
フェアリング	13				舞州～夢州連絡橋（仮称）	舞州～夢州連絡橋の風荷重に対する検討（土木学会第50回年講）			

振動制御事例総括表

橋種	対象部位	形式	振動現象	制振対策	事例番号	事例		特徴	
						橋名	文献		
斜張橋	主桁補剛桁	充腹たけ	フラッター	フェアリング	20	天保山大橋	安治川橋梁(斜張橋)の構造(橋梁と基礎80/03)	ｽﾌﾟﾗ-併用、偏平六角形箱桁	
						鶴見つばさ橋	鶴見航路橋の設計概要(上)(下)(橋梁と基礎93/01, 02)		
				18	鳥飼仁和寺大橋	橋梁と基礎84/10、淀川橋梁の耐風性に関する実験的研究(土木学会第39回年講)	吊径間部に設置		
					尾道大橋	橋梁86/06、尾道大橋の耐風性に関する二、三の実験について(土木学会第23回年講)			
			ギョロッキン	フェアリング		奥野エコブリッジ		プレート併用	
						岩津橋			
				フラップ	永歳橋	永歳橋の耐風安定性に関する実験報告(土木学会論文集81/02)	ﾃﾞﾌﾙｸﾀ-併用、歩車道境界通風孔		
				ﾃﾞﾌﾙｸﾀ-	永歳橋	永歳橋の耐風安定性に関する実験報告(土木学会論文集81/02)	フラップ併用、歩車道境界通風孔		
				プレート	奥野エコブリッジ		フェアリング併用		
				グレｰチﾝｸﾞ	尾道大橋	橋梁86/06			
				渦励振	フェアリング		石狩河口橋	石狩河口橋の耐風性について(土木学会第24回年講)	耐風安定性より主桁断面決定
						川崎橋	川崎橋の設計と施工(上)(下)(橋梁と基礎78/11, 12)	ﾃﾞﾌﾙｸﾀ-併用	
			21			折鶴橋	南港歩行者専用道路の設計(橋梁と基礎81/01)		
						名港西大橋	名港西大橋(上部工)の設計(橋梁と基礎83/12)	フラップ併用	
						かつしかハープ橋	S字曲線斜張橋上部工の設計(上)(下)(橋梁と基礎85/04, 05)		
			19			戸田公園大橋	戸田公園大橋(斜張橋)の設計(橋梁と基礎87/10)		
						秩父橋	秩父橋の設計、架設計画(橋梁85/04)		
			フラップ			5	末広大橋	末広大橋上部工の設計と施工(橋梁と基礎75/09)	
							かもめ大橋	南港南埠頭連絡橋(斜張橋)の風洞実験について(土木学会第30回年講)	
							永歳橋	永歳橋の耐風安定性に関する実験報告(土木学会論文集81/02)	ﾃﾞﾌﾙｸﾀ-併用、歩車道境界通風孔
17	藤戸橋・日の浦橋	共通ｱﾝｶ-を持つ地盤定着式斜張橋(橋梁と基礎82/06)							
	名港西大橋	名港西大橋(上部工)の設計(橋梁と基礎83/12)				フェアリング併用			
18	鳥飼仁和寺大橋	橋梁と基礎84/10							

振動制御事例総括表

橋種	対象部位	形式	振動現象	制振対策	事例番号	事例		特徴
						橋名	文献	
斜張橋	主桁補剛桁	充腹た	渦励振	フラップ		荒津大橋	荒津大橋上部工の設計 (土木構造・材料論文集86/01)	フラップ、スカート共未施工
						北港連絡橋		フラップ、スプイラ共未施工
						大和川橋梁	大和川橋梁の耐風性 (阪神公団技術論文集78/02)	フラップ 未施工
						水郷大橋	水郷大橋の耐風性調査 (土木技術資料78/08, 09)	
					フラップ (未施工)	秩父橋	秩父橋の設計、架設計画 (橋梁85/04)	
					フラップ (高欄)	弥栄大橋	弥栄大橋 (5径間連続鋼斜張橋) の設計と施工 (橋梁85/10)	二矩形箱桁
				幸魂橋		幸魂大橋の計画と現状 (橋梁88/02)	未施工	
				デフレクター	永歳橋	土木学会論文集81/02	フラップ併用、歩車道境界通風孔	
					川崎橋	川崎橋の設計と施工(上)(下) (橋梁と基礎78/11, 12)	フェアリング併用	
					でんでん大橋	通信専用斜張橋の設計と施工 (NKK技法81/01)		
					Saint-Nazaire橋		耐風安定性より主桁断面決定	
				カープレート	高速小松川橋	荒川大橋 (斜張橋) の設計、施工 (橋梁と基礎71/01)		
				歩車道境界通風孔	永歳橋	土木学会論文集81/02	デフレクター併用、フラップ併用	
				ファッシャプレート地覆部通風孔	1 4	高梨大橋	高梨橋の動的風洞実験 (土木学会第38回年講) 橋梁と基礎84/11, 85/01	
	上スカート		荒津大橋	荒津大橋上部工の設計 (土木構造・材料論文集86/01)	フラップ、スカート共未施工			
	スプイラ		北港連絡橋		フラップ、スプイラ共未施工			
	トラス	フラッター	上弦材にフェアリング		櫃石島橋	櫃石島橋、岩黒島橋の設計 (本四技法81/07)		
					岩黒島橋	櫃石島橋、岩黒島橋の設計 (本四技法81/07)		
		渦励振	フェアリング	2 2	横浜ベイブリッジ	横浜ベイブリッジの耐風対策 (橋梁と基礎89/08)	塔にTMD	
	塔	渦励振	TMD	6 1	名港西大橋	第8回風工学シンポジウム論文集84/12	架設時	
6 9				櫃石島橋	本四技報87/01			
5 9				花畔大橋	構造工学論文集90/03			
7 0				横浜ベイブリッジ	橋梁と基礎89/08			
TSD			6 0	生口橋	第11回風工学シンポジウム論文集90/12	架設時		
アクティブコントロール			6 5	鶴見つばさ橋	第2回振動制御コキウム			
		6 2	名港中央大橋					

振動制御事例総括表

橋種	対象部位	形式	振動現象	制振対策	事例番号	事例		特徴	
						橋名	文献		
斜張橋	塔		渦励振	八角形断面		名港中央大橋			
				ギョロツヒンク	円弧道流板	57	かつしかハープ橋	土木学会第39回年講	
					プレート	58	浦上川歩道橋	土木学会第47回年講	
					スリット	55	菅原城北大橋	橋梁と基礎90/07	
					TMD	56	荒津大橋	三菱重工技術報87/06	
						54	東神戸大橋	土木学会第46回年講	
					TLD	53	幸魂大橋	風工学会誌89/10	架設時
						54	東神戸大橋	土木学会第46回年講	
	隅切り	54	東神戸大橋	土木学会第46回年講					
吊橋	補剛桁	I桁	渦励振	フェアリング	23	聖紫花の橋	沖縄県バシ公園吊橋（聖紫花の橋）の耐風対策（土木学会第41回年講）		
				デフレクター	23	聖紫花の橋	沖縄県バシ公園吊橋（聖紫花の橋）の耐風対策（土木学会第41回年講）		
				鉛直スチライザ	23	聖紫花の橋	沖縄県バシ公園吊橋（聖紫花の橋）の耐風対策（土木学会第41回年講）		
				ギョロツヒンク	フェアリング	23	聖紫花の橋	沖縄県バシ公園吊橋（聖紫花の橋）の耐風対策（土木学会第41回年講）	
					デフレクター	23	聖紫花の橋	沖縄県バシ公園吊橋（聖紫花の橋）の耐風対策（土木学会第41回年講）	
					鉛直スチライザ	23	聖紫花の橋	沖縄県バシ公園吊橋（聖紫花の橋）の耐風対策（土木学会第41回年講）	
		トラス	フラッター	床版連続開口	24	竜神大吊橋			
				鉛直スチライザ	25	若戸大橋	若戸大橋の拡張工事（橋梁と基礎89/12、90/01）		
					29	大鳴門橋	大鳴門橋工事誌（本州四国連絡橋公団87/03）		
				センターバリア	25	若戸大橋	若戸大橋の拡張工事（橋梁と基礎89/12、90/01）		
				地覆鉛直板	28	因島大橋	二次元風洞試験による因島大橋の架設及び完成時の耐風安定性（日立造船技報81/12）		
				開口部（中央部）	38	Tsing Ma	香港・青馬大橋の建設について（月刊建設95/01）		
				フェアリング	38	Tsing Ma	香港・青馬大橋の建設について（月刊建設95/01）		
	グレチング	31	レインボブリッジ						

振動制御事例総括表

橋種	対象部位	形式	振動現象	制振対策	事例番号	事例		特徴
						橋名	文献	
吊橋	補剛桁	トラス		オープンングレチング	35	Tacoma Narrows (new)	長大橋梁に対する耐風設計の変換 (橋梁と基礎89/08)	
			連成フラッター	鉛直スビライザ	33	明石海峡大橋	明石海峡大橋大型風洞試験での連成フラッター特性に関する考察 (第13回風工学シンポジウム論文集94/12)	
				オープンングレチング	33	明石海峡大橋	明石海峡大橋大型風洞試験での連成フラッター特性に関する考察 (第13回風工学シンポジウム論文集94/12)	
			ねじれフラッター	グレチング	30	南北備讃瀬戸大橋	南北備讃瀬戸大橋の耐風性 (本四技報86/01, 04)	
				水平トラス	30	南北備讃瀬戸大橋	南北備讃瀬戸大橋の耐風性 (本四技報86/01, 04)	
		箱桁	ギョロッキン	デフレクター	27	信喜橋	信喜橋の振動特性について (三井造船技報80/10)	
			曲げねじれフラッター	フェアリング	32	白鳥大橋	白鳥大橋補剛桁の設計・製作 (橋梁と基礎96/05)	
			フラッター	フェアリング	34	来島大橋	来島大橋補剛桁の耐風性 (本四技報93/01)	
				六角形断面	36	Severn	長大橋梁に対する耐風設計の変換 (橋梁と基礎89/08)	
			ウインドノーズ	37	Great Belt			
	塔	渦励振	アクティブコントロール		63	レインボブリッジ	JSSC NO.12 1994 特集 制振システム	架設時
					66	明石海峡大橋	JSSC NO.12 1994 特集 制振システム	架設時
					67	白鳥大橋	構造工学論文集94/03	架設時
					34	来島大橋	第3回振動制御ロキム講演論文集95/08	架設時
			隅切り		66	明石海峡大橋	JSSC NO.12 1994 特集 制振システム	架設時
					67	白鳥大橋	構造工学論文集94/03	架設時
					34	来島大橋	第3回振動制御ロキム講演論文集95/08	架設時
TMD			66	明石海峡大橋	JSSC NO.12 1994 特集 制振システム	架設時		
スライディングブロック				51	関門橋	日立造船技報71/09	架設時	
				52	因島大橋 (3P)	土木学会論文集83/11	架設時	
				29	大鳴門橋	本四技報81/04, 82/07	架設時	
オイルパ			29	大鳴門橋	本四技報81/04, 82/07	架設時		
塔板増厚			34	来島大橋	第3回振動制御ロキム講演論文集95/08	架設時		
ケーブル			渦励振	ストックブリッジダンパー	36	Severn 橋脚ハカ		カマン渦の発生を防止する
	スパーダンパー	22		横浜ベイブリッジ	横浜ベイブリッジの耐風対策 (橋梁と基礎89/08)	施工時		

振動制御事例総括表

橋種	対象部位	形式	振動現象	制振対策	事例番号	事例		特徴
						橋名	文献	
ケーブル			渦励振	粘性せん断型ダンパ		青森ベイブリッジ	P C斜張橋・青森大橋（仮称）の設計（橋梁1987vol.23）	施工時
						松川浦大橋	松川浦大橋の計画・設計概要（橋梁1990vol.26）	施工時
						吹上浜サセットブリッジ		
						羽田スカイブリッジ	東京国際空港中央連絡橋の設計と施工（橋梁と基礎93/1）	
						とよみ大橋		
				40	東神戸大橋	東神戸大橋の耐風設計（橋梁と基礎91/05）	比較検討の結果美観上の問題、ケーブル長が長い場合の設置位置の問題等により空力対策を採用	
					豊後橋		施工時～完成時	
				41	高梨大橋			
				42	名港西大橋			
				43	荒津大橋	東神戸大橋ケーブルの耐風安定性に関する調査研究（京都大学工学部88/03）	ケーブルの構造減衰を0.06～0.12の範囲まで高める	
				生口橋				
			レインバイブレーション	42	名港西大橋	斜張橋ケーブルのRain Vibration（風工学会誌86/03）	ケーブルの構造減衰を高める	
				46	櫃石島橋 岩黒島橋	斜張橋ケーブルのRain Vibration（風工学会誌86/03）		
				43	荒津大橋	東神戸大橋ケーブルの耐風安定性に関する調査研究（京都大学工学部88/03）	ケーブルの構造減衰を0.06～0.12の範囲まで高める	
					44	天保山大橋	天保山大橋のケーブル振動とその対策（橋梁と基礎92/04）	
					青森ベイブリッジ	P C斜張橋・青森大橋（仮称）の設計（橋梁1987vol.23）	施工時	
					勇橋		凍結解氷時、気候の急変時	
				粘性せん断型ダンパ		松川浦大橋	松川浦大橋の計画・設計概要（橋梁1990vol.26）	施工時
						吹上浜サセットブリッジ		
						洲浜橋		
	とよみ大橋							

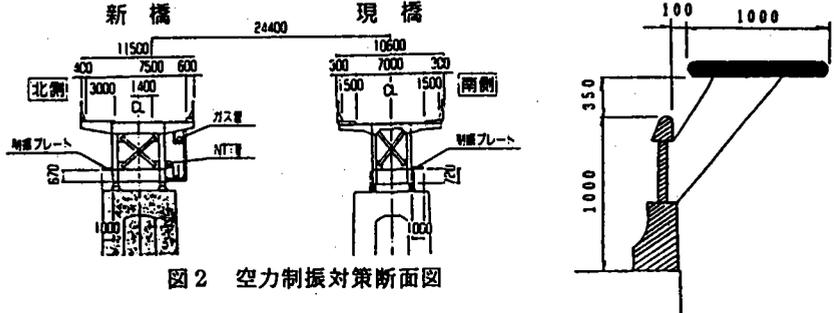
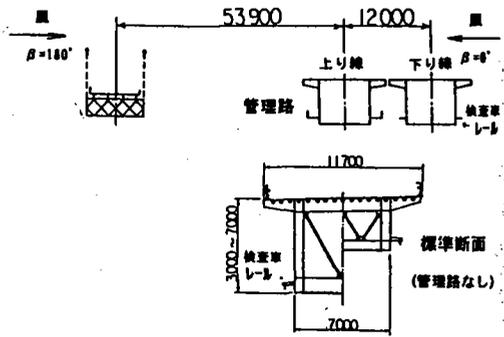
振動制御事例総括表

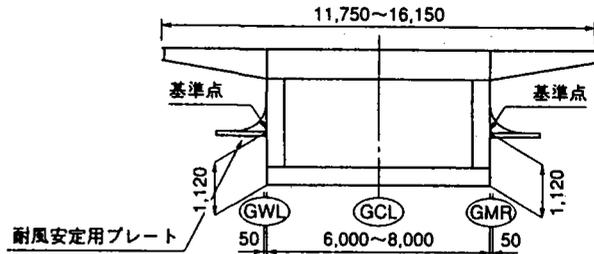
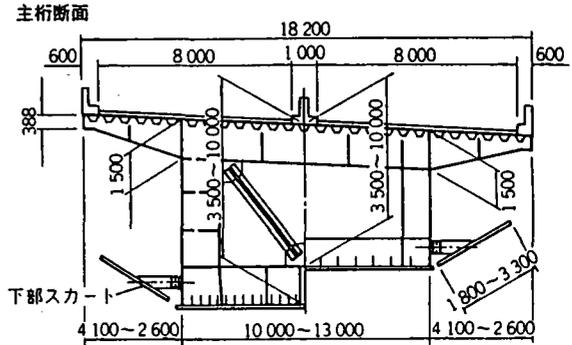
橋種	対象部位	形式	振動現象	制振対策	事例番号	事例		特徴	
						橋名	文献		
ケーブル			ウェイクギョウヒンク	ス <sup>π</sup> -サ-型制振装置ワイヤ-によるケーブル相互連結	46	檀石島橋 石黒島橋 呼子大橋	本州四国連絡橋耐風研究小委員会：本州四国連絡橋の耐風に関する調査研究報告書（土木学会88/03）		
				相互連結（制振ワイヤ-）		秩父公園橋	秩父公園橋の設計（橋梁と基礎91/10）	施工時	
				3本相互固定+ステンスワイヤ-		志摩丸山橋	布施田浦橋（仮称）の計画と設計（橋梁と基礎88/06）		
				4本相互固定（ス <sup>π</sup> -サ-）		尾道大橋	尾道大橋の設計について（橋梁68vo14） 尾道大橋の架設について（橋梁68vo14）	施工時	
				ス <sup>π</sup> -サ-		かもめ大橋			
				オイルダンパ-方式		プロトコ橋（仏）			
				粘性せん断型ダンパ-方式	48	幸魂橋	幸魂橋の施工と制振対策（橋梁と基礎92/04）	構造減衰を高める 1つのダンパ-で面内、面外の2方向に対処できる	
					松川浦大橋	松川浦大橋の計画・設計概要（橋梁90vo126）	施工時		
				ギョウヒンク	ワイヤ-ケーブルによる相互連結		六甲大橋		ケーブル断面が六角形
			並行突起付ケーブル		40	東神戸大橋	東神戸大橋の耐風設計（橋梁と基礎91/05）	比較検討の結果美観上の問題、ケーブル長が長いためダンパ-の設置位置の問題等により空力対策を採用	
				ガスト応答	粘性せん断型ダンパ-方式		碓氷橋	碓氷橋（PC斜張橋）上部工の設計（上）（橋梁と基礎92/04）	施工時
					相互連結（施工時） オイルダンパ-（完成時）		白屋橋		
			付属物	照明柱及び灯機収納箱	渦励振	チェンダンパ-	29	大鳴門橋	大鳴門橋照明柱の耐風検討（本四技法85/12）
鋼球方式	49	横浜ベイブリッジ				横浜ベイブリッジの耐風対策（橋梁と基礎89/08）			
整流板（+補強…疲労対策のため）		本四					丸型テ <sup>π</sup> -柱		
防護柵		フラット <sup>π</sup> -にて手摺り及び横棧を連結		29	大鳴門橋				

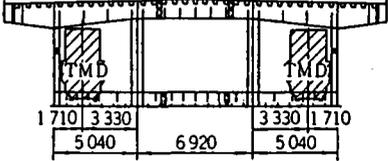
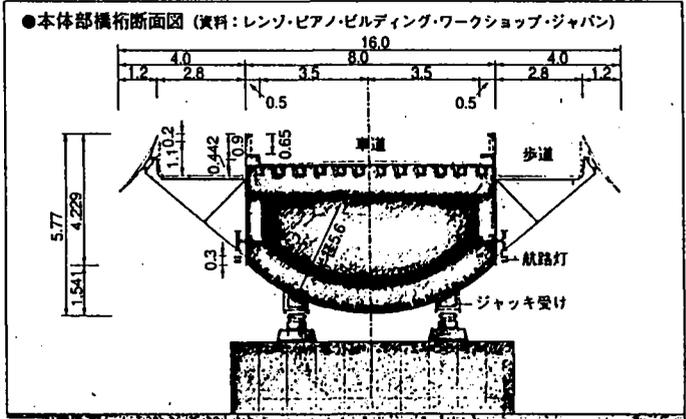
No. 1	橋名: 木津川新橋	図表・写真
制振対策 構造、特徴、形式、制振効果等	橋梁諸元 構造諸元、振動特性	<p>Side elevation showing a 4-span continuous steel girder bridge with spans of 97.9m, 107.5m, 107.5m, and 106.8m. Cross-section shows a 2-span continuous steel girder with a stiffener (S.I.w.d. D13x150) and 2-Rib PL 90x6. Detail shows dimensions for the stiffener and plate.</p>
<p>[構造] フラップ、フェアリング</p> <p>[特徴] 日本唯一の耐風安定材を有する鈹桁 (1993年3月時点)</p> <p>[制振効果] 資料なし</p>	<p>[橋長] 421.0m</p> <p>[形式] 4径間連続鋼床鈹桁(2主桁)</p> <p>[支間割] 97.9m+107.5m+107.5m+106.8m</p> <p>[振動特性] ギャロッピング 渦励振</p>	
No. 2	橋名: 海田大橋	図表・写真
制振対策 構造、特徴、形式、制振効果等	橋梁諸元 構造諸元、振動特性	<p>Side elevation showing a 3-span continuous steel girder bridge with spans of 148.5m, 250m, and 148.5m. Cross-section at intermediate pier (P<sub>11</sub>) and intermediate diaphragm are shown with dimensions and reinforcement details.</p>
<p>[構造] プレート</p> <p>[特徴] 制振対策は風洞試験(一様流試験、乱流試験)の結果に基づいて1種類に選定。</p> <p>[制振効果] 架設後実橋での振動実験により確認。</p>	<p>[橋長] 550.0m</p> <p>[形式] 3径間連続鋼床箱桁(1主桁)</p> <p>[支間割] 148.5m+250m+148.5m</p> <p>[振動特性] ギャロッピング</p>	

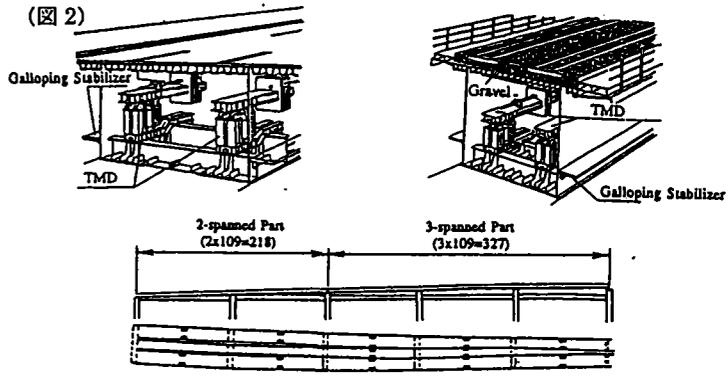
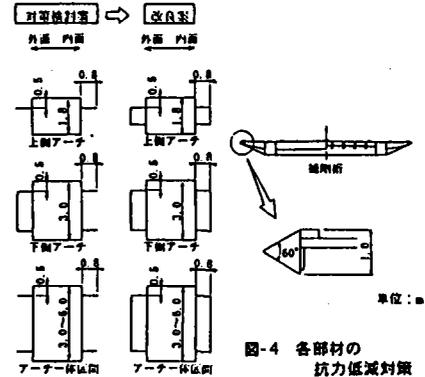
No.3	橋名: 門崎高架橋	図表・写真
制振対策 構造、特徴、形式、制振効果等	橋梁諸元 構造諸元、振動特性	
<p>[構造] ダブルフラップ 下部スカート</p> <p>[制振効果] 部分模型と全径間風洞実験を実施して検討。</p>	<p>[橋長] 682.75m</p> <p>[形式] 連続鋼床版箱桁</p> <p>[支間割] 149.6m+190.4m+190.4m+149.6m</p> <p>[振動特性] 渦励振 ギャロッピング</p>	
No.4	橋名: 泊大橋	図表・写真
制振対策 構造、特徴、形式、制振効果等	橋梁諸元 構造諸元、振動特性	
<p>[構造] プレート</p> <p>[制振効果] 発散振動に効果的。限定振動対策は架設後の観測結果より追加する。</p>	<p>[橋長] 682.6m</p> <p>[形式] 連続鋼床版箱桁</p> <p>[支間割] 91.2m+170.0m+91.2m</p> <p>[振動特性] ギャロッピング</p>	

No.5	橋名: 末広大橋	図表・写真
<p><b>制振対策</b>  <b>構造、特徴、形式、制振効果等</b></p> <p>[構造]  フラップ</p> <p>[特徴]  高欄と併用</p> <p>[制振効果]  桁断面は、ねじりフラッターと渦励振対策として逆梯形箱桁断面を採用。本体策はそれを補足するかたちで設置された。</p>	<p><b>橋梁諸元</b>  <b>構造諸元、振動特性</b></p> <p>[橋長]  470m</p> <p>[形式]  3径間連続斜張橋</p> <p>[支間割]  110m+250m+110m</p> <p>[振動特性]  渦励振</p>	<p>The technical drawings include:  - <b>側面図 (Side View):</b> Shows the bridge's profile with spans of 110,000, 250,000, and 110,000 mm. It details the tower height (470,000 mm), deck width (7,500 mm), and various structural components like the air damper (航空障害灯) and lighting (航路標識灯).  - <b>標準断面図 (Standard Section View):</b> Illustrates the cross-section of the truss, showing the inverted trapezoidal box girder and the internal bracing system. It includes dimensions for the deck width (7,500 mm), height (11,600 mm), and various internal components.  - <b>高欄 (Tower Detail):</b> Provides a detailed view of the tower structure, showing its height (1,210 mm) and the arrangement of cables and structural members.</p>

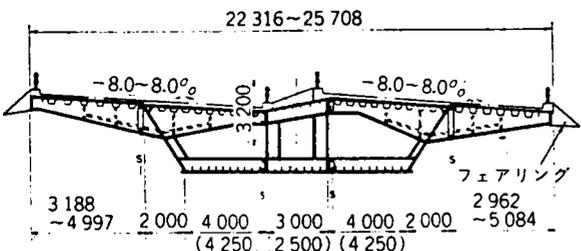
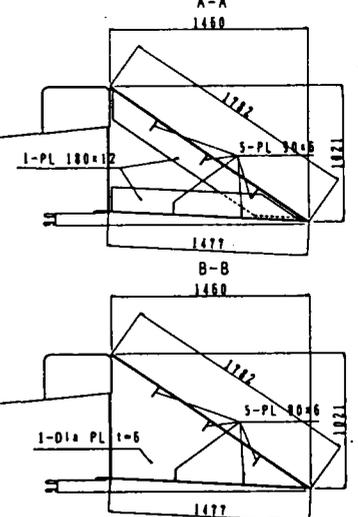
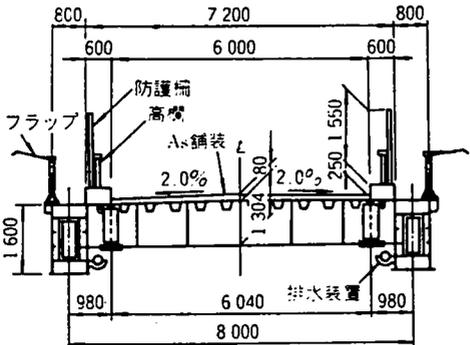
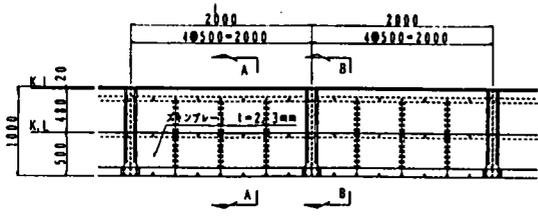
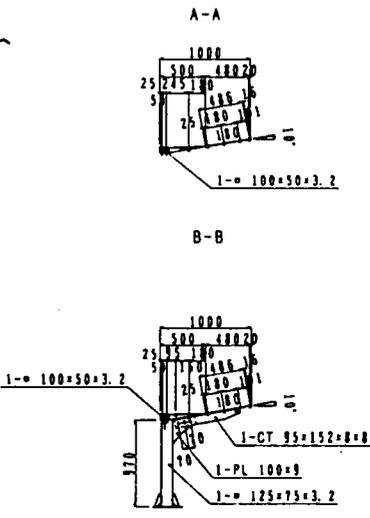
No. 6	橋名：琵琶湖大橋（現橋、新橋）	図表・写真
制振対策 構造、特徴、形式、制振効果等	橋梁諸元 構造諸元、振動特性	<p>琵琶湖大橋（並列橋）の耐風安定性 土木学会第49回年次学術講演会</p>  <p>図2 空力制振対策断面図</p>
構造  プレート（現橋、新橋）  フラップ（現橋）	構造  連続箱桁（並列橋）  振動特性  渦励振 ギャロッピング	
No. 7	橋名：撫養橋	図表・写真
制振対策 構造、特徴、形式、制振効果等	橋梁諸元 構造諸元、振動特性	<p>並列箱桁橋（撫養橋）の耐風応答特性 土木学会第51回年次学術講演会</p> 
構造  プレート  管理路を兼ねた制御プレートを設置	構造  4径間連続箱桁（並列橋）  振動特性  ギャロッピング	

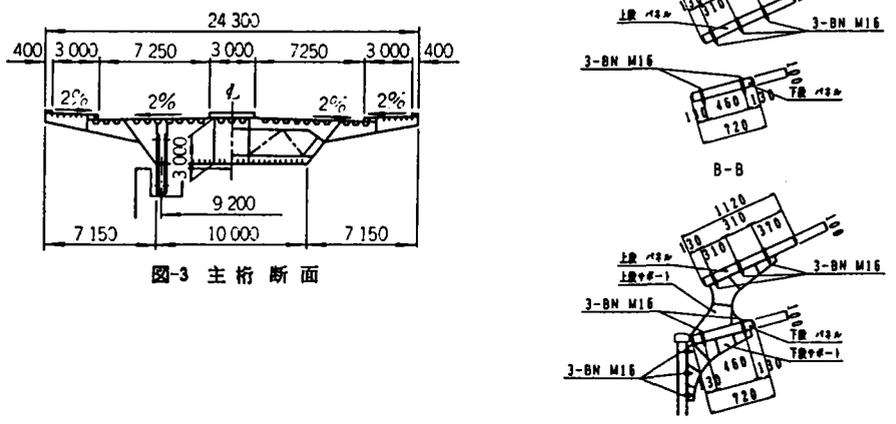
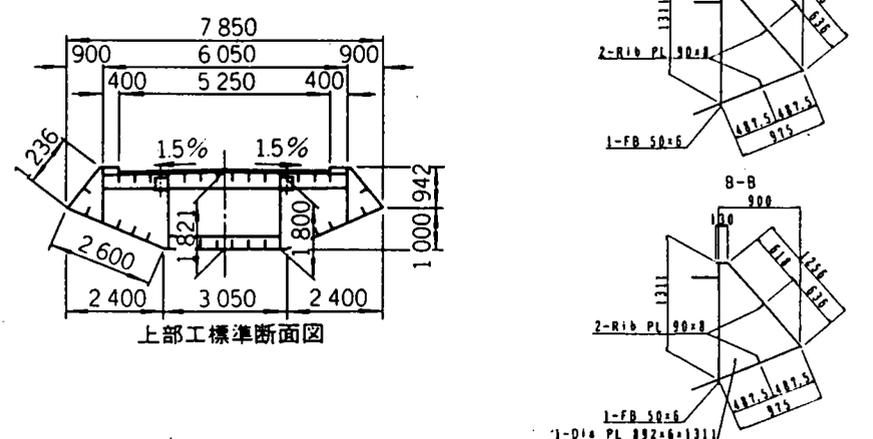
No. 8	橋名： なみはや大橋	図表・写真
制振対策 構造, 特徴, 形式, 制振効果等	橋梁諸元 構造諸元, 振動特性	<p data-bbox="1288 236 1691 268">松尾橋梁技報 96/04</p> 
構造  プレート  TMD	構造  3径間連続鋼床版箱桁  振動特性  渦励振 ギャロッピング	
No. 9	橋名： 有明西運河橋	図表・写真
制振対策 構造, 特徴, 形式, 制振効果等	橋梁諸元 構造諸元, 振動特性	<p data-bbox="1276 885 1792 972">有明西運河橋の設計・施工 橋梁と基礎 94/12</p> 
構造  下部スカート	構造  4径間連続鋼床版箱桁  振動特性  ギャロッピング	

No. 10	橋名：東京湾横断道	図表・写真
制振対策 構造、特徴、形式、制振効果等	橋梁諸元 構造諸元、振動特性	<p>東京湾横断道上部工の設計・施工 橋梁と基礎 95/03</p>  <p>図-11 減衰機 (TMD)</p>
構造  TMD  実橋の動態観測後に実施	構造  10径間連続鋼床版箱桁  振動特性  渦励振	
No. 11	橋名：牛深ハイヤ橋	図表・写真
制振対策 構造、特徴、形式、制振効果等	橋梁諸元 構造諸元、振動特性	<p>牛深ハイヤ橋 日経コンストラクション 96/07</p>  <p>●本体部橋桁断面図 (資料：レンゾ・ピアノ・ビルディング・ワークショップ・ジャパン)</p>
構造  フラップ  曲面フランジ	構造  7径間連続鋼床版箱桁  振動特性  ギャロッピング	

No. 1 2	橋 名 : 関西国際空港連絡橋	図表・写真	
制 振 対 策 構造, 特徴, 形式, 制振効果等	橋 梁 諸 元 構造諸元, 振動特性	橋は揺れているか 予測と現実 土木学会	
構 造  スタブライザー  制御プレート  TMD	構 造  3 径間連続鋼床版箱桁  振動特性  フラッター  ギャロッピング  渦励振	(図2) 	
No. 1 3	橋 名 : 舞洲～夢洲連絡橋 (仮称)	図表・写真	
制 振 対 策 構造, 特徴, 形式, 制振効果等	橋 梁 諸 元 構造諸元, 振動特性	舞 州 ～ 夢 州 連 絡 橋 の 風 荷 重 に 対 す る 検 討 土木学会第50回年次学術講演会	
構 造  フェアリング  プレート	構 造  アーチ橋 (浮体橋梁)  振動特性  渦励振	 図-4 各部材の 抗力低減対策	



No. 16	橋名： かつしかハーブ橋	図表・写真	対策 フェアリング 断面図
制振対策 構造, 特徴, 形式, 制振効果等	橋梁諸元 構造諸元, 振動特性	 <p>●ブロック長:12m Sは現場塔手 ●最大ブロック重量:39t(中セル) ( )内数値は子塔方を示す。</p> <p>図-4 主桁断面形状</p>	
渦励振対策 扁平逆台形箱形断面 フェアリング	橋梁の等級：1等橋 道路構造規格：第2種第2級 型式：4径間連続曲線斜張橋 橋長：455m 径間長：40+134+220+60m=454m 幅員：標準幅員 23.5m (4車線) 縦断勾配：0.3~1.1% 横断勾配：-8.0~8.0%		
No. 17	橋名： 藤戸橋・日の浦橋	図表・写真	対策 フラップ 断面図
制振対策 構造, 特徴, 形式, 制振効果等	橋梁諸元 構造諸元, 振動特性	 <p>標準断面図</p> 	
渦励振対策 フラップ	藤戸橋 橋梁の等級：1等橋 支間長：120+30m=150m 幅員：6m 型式：2径間連続斜張橋  日の浦橋 橋梁の等級：1等橋 支間長：31.25+127.5+31.25m=190m 幅員：6m 型式：3径間連続斜張橋		

No. 18	橋名：鳥飼仁和寺大橋	図表・写真
制振対策 構造，特徴，形式，制振効果等	橋梁諸元 構造諸元，振動特性	
渦励振、フラッター対策  扁平逆台形箱形断面 フラップ（吊り径間部に設置）	橋梁の等級：1等橋 道路構造規格：第2種第1級 型式：3径間連続斜張橋 径間長：124+200+63.5m=387.5m 幅員：標準総幅員 24.3m 有効幅員 23.5m 両側歩道 3.0m 縦断勾配：0.3%（放物線） 横断勾配：2.0%（直線）	
No. 19	橋名：戸田公園大橋	図表・写真
制振対策 構造，特徴，形式，制振効果等	橋梁諸元 構造諸元，振動特性	
渦励振対策  フェアリング	橋梁の等級：歩道橋 橋長：179m 支間長：44.34+133.35m 幅員：有効幅員5.25m 型式：2径間連続斜張橋 縦断勾配：3.0%放物線 横断勾配：1.5%直線山形	



No. 22

橋名： 横浜ベイブリッジ

図表・写真

制振対策  
構造, 特徴, 形式, 制振効果等

橋梁諸元  
構造諸元, 振動特性

フェアリング  
フェアリング先端角度 60°  
迎角の小さな領域で渦励振抑止

道路規格 上層 2種1級 下層 3種1級  
橋格 1等橋 TL-20, TT-43  
形式 3径間連続ダブルデッキ斜張橋  
橋長 860m  
支間 200+460+200m  
幅員 上層 2@(2.25+10.5+0.5) m  
下層 2@(2.25+10.5+0.25) m  
線形 平面  $R = \infty$   
横断勾配 2%  
縦断勾配 3.3%

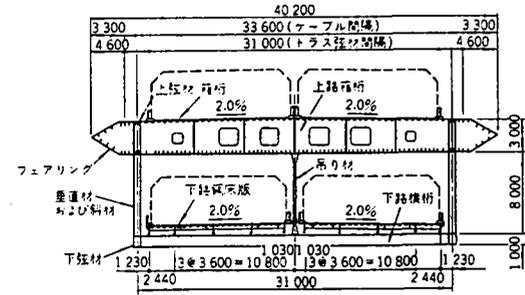


図-4 主断面図

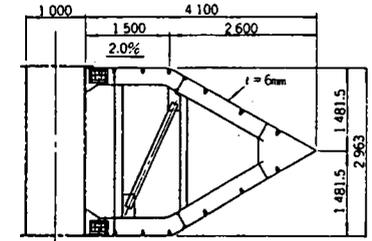
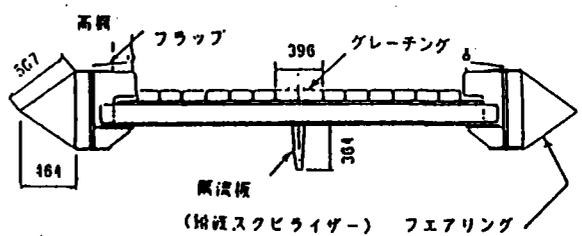
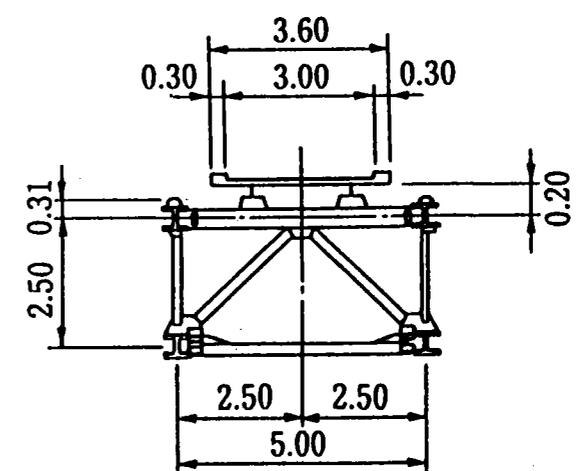
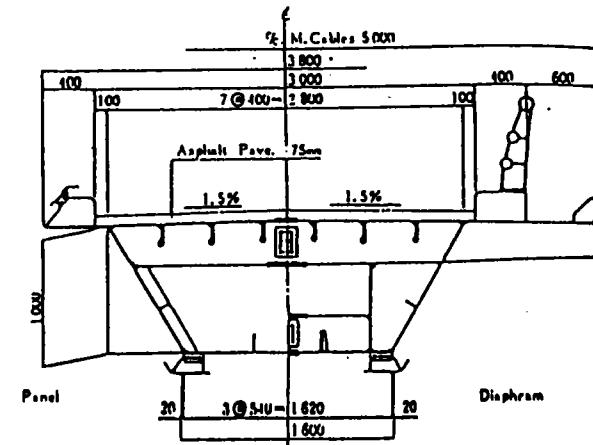


図-5 フェアリングの構造

No.23	橋名: 聖紫花の橋	図表・写真
制振対策 構造、特徴、形式、制振効果	橋梁諸元 構造諸元、振動特性	
フェアリング、デフラクター、鉛直スタビライザー	歩行者専用吊橋 橋長: 101.6m 全幅: 3.7m	
No.24	橋名: 竜神大吊橋	図表・写真
制振対策 構造、特徴、形式、制振効果	橋梁諸元 構造諸元、振動特性	
床版連続開口	形式: 単径間2ヒンジ補剛トラス吊橋 歩道橋 橋長: 446m(中央支間375m) 幅員: 3.0m	

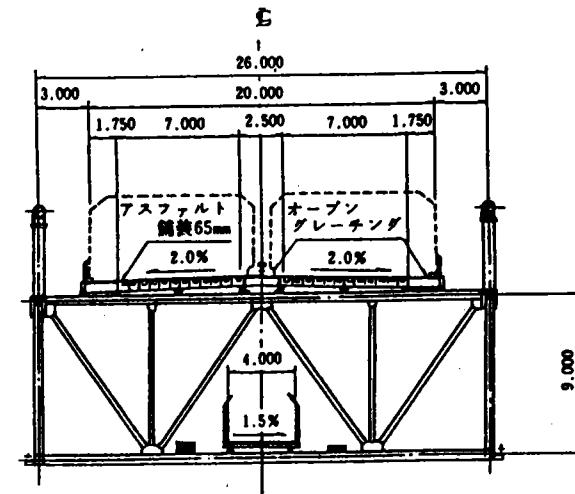
No.25	橋名: 若戸大橋	図表・写真
制振対策 構造、特徴、形式、制振効果	橋梁諸元 構造諸元、振動特性	
鉛直スタビライザー、センターバリア	形式: 3径間2ヒンジ補剛吊橋 橋長: 545.0m スパン割: 89.0+367.0+89.0m 幅員: 15.0m	<p>標準断面</p>
No.26	橋名: 関門橋	図表・写真
制振対策 構造、特徴、形式、制振効果	橋梁諸元 構造諸元、振動特性	
オープングレーチング (路肩及び中央分離帯部)	形式: 3径間2ヒンジ吊橋 橋長: 1068m スパン割: 178.0+712.0+178.0m	<p>断面図</p> <p>側径間 中央径間</p> <p>29.00</p> <p>オープングレーチング</p> <p>オープングレーチング</p>

No.27	橋名: 信喜橋	図表・写真
制振対策 構造、特徴、形式、制振効果	橋梁諸元 構造諸元、振動特性	
デフラクター	形式: 単径間鋼床版箱桁補剛吊橋 歩道橋 橋長: 173.35m(中央支間: 152.3m)	



Structural Details of Cross Section  
(加剛桁断面)

No.28	橋名: 因島大橋	図表・写真
制振対策 構造、特徴、形式、制振効果	橋梁諸元 構造諸元、振動特性	
地覆鉛直板、 オープングレーチング (路肩及び中央分離帯)	形式: 3径間2ヒンジ吊橋 橋長: 1339.0m スパン割: 250.0+770.0+250.0m 幅員: 1.75+7.0+(2.5)+7.0+1.25=20.0m	





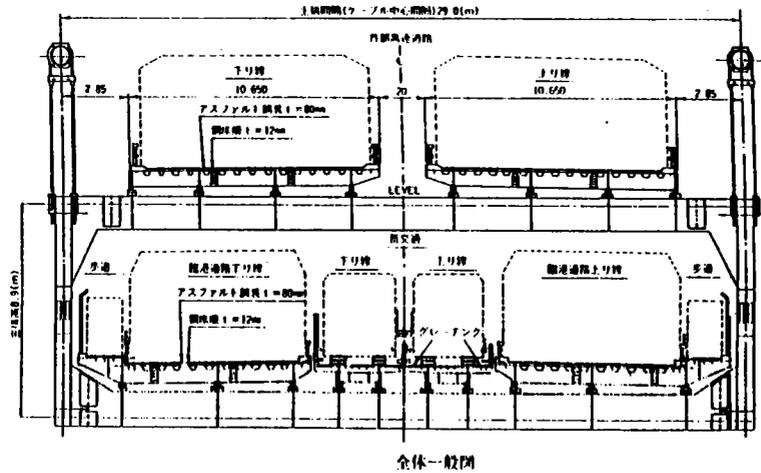
No.31

橋名: レインボーブリッジ

図表・写真

制振対策  
構造、特徴、形式、制振効果橋梁諸元  
構造諸元、振動特性

グレーチング

形式: 3径間2ヒンジ補剛吊橋  
橋長: 798m  
スパン割: 114.0+570.0+114.0m  
幅員: 23.5m  
上路: 首都高速道路  
下路: 臨海道路+新交通(複線)+歩道

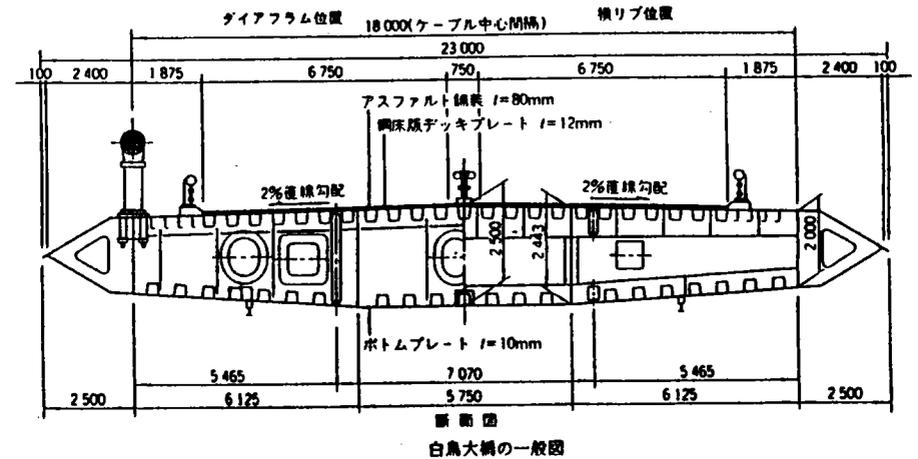
No.32

橋名: 白鳥大橋

図表・写真

制振対策  
構造、特徴、形式、制振効果橋梁諸元  
構造諸元、振動特性

フェアリング

形式: 3径間2ヒンジ補剛吊橋  
橋長: 1380m  
スパン割: (80.0)+330.3+720.0+330.0+(80.0)m  
幅員: 2.5+3.5+(2.25)+3.5+2.5=14.25m

No.33 橋名: 明石海峡大橋

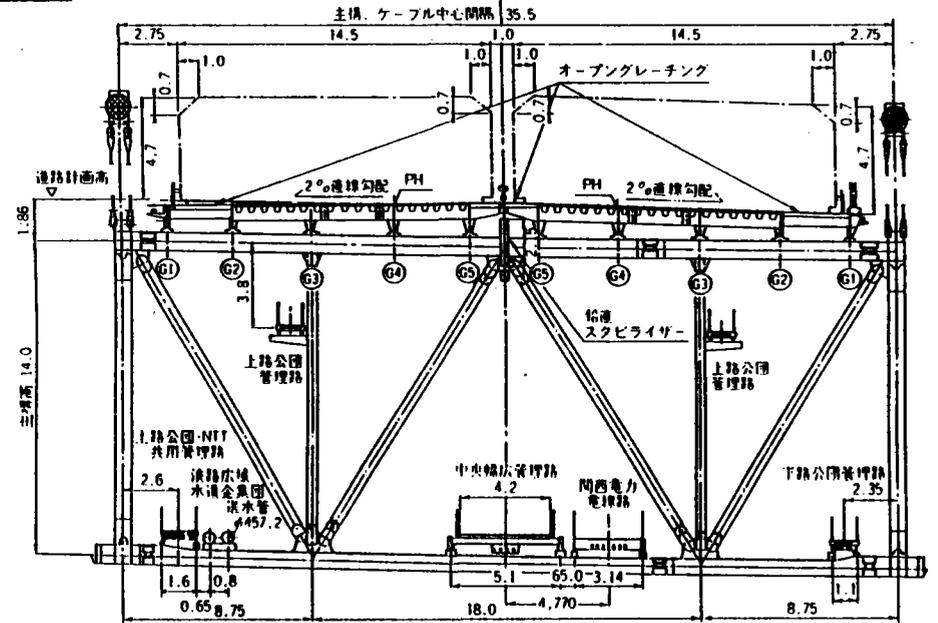
制振対策  
構造、特徴、形式、制振効果

オープングレーチング  
(路肩及び中央分離帯)  
鉛直スタビライザー

橋梁諸元  
構造諸元、振動特性

形式: 3径間2ヒンジ補剛トラス吊橋  
橋長: 3910.0m  
スパン割: 960.0+1990.0+960.0m  
幅員: 30.0m

図表・写真



No.34 橋名: 来島第2(第3)大橋

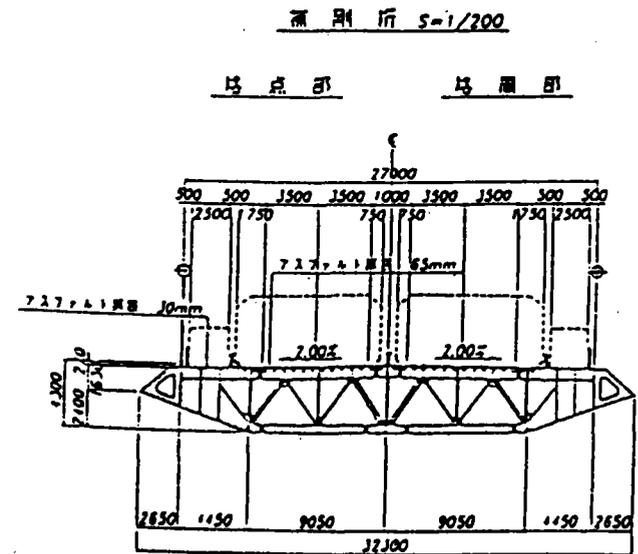
制振対策  
構造、特徴、形式、制振効果

フェアリング

橋梁諸元  
構造諸元、振動特性

形式: 2径間(単径間)2ヒンジ補剛箱桁吊橋  
橋長: 1515.0(1570.0)m  
スパン割: 250.0+1020.0+245.0m  
(260.0+1030.0+280.0)m  
幅員: 3.5+9.5+(1.0)+9.5+3.5=27.0m

図表・写真



No. 35

橋名: New Tacoma Narrows アメリカ

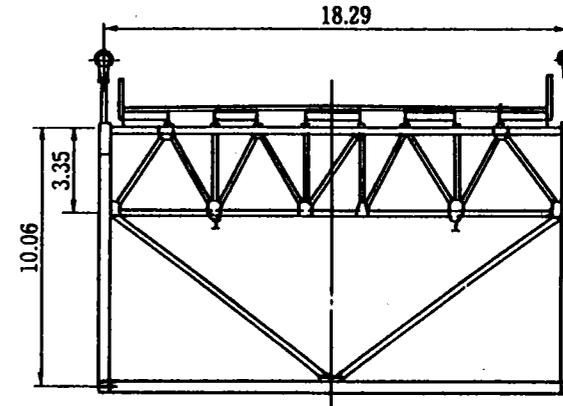
図表・写真

制振対策  
構造、特徴、形式、制振効果

橋梁諸元  
構造諸元、振動特性

オープングレーチング

形式: 3径間2ヒンジ補剛吊橋  
橋長: 1524. 0m  
スパン割: 335.28+853.44+335.28m  
幅員: 16. 96m



No. 36

橋名: Severn イギリス

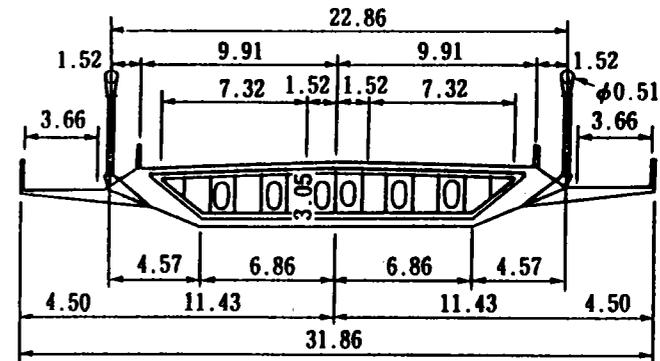
図表・写真

制振対策  
構造、特徴、形式、制振効果

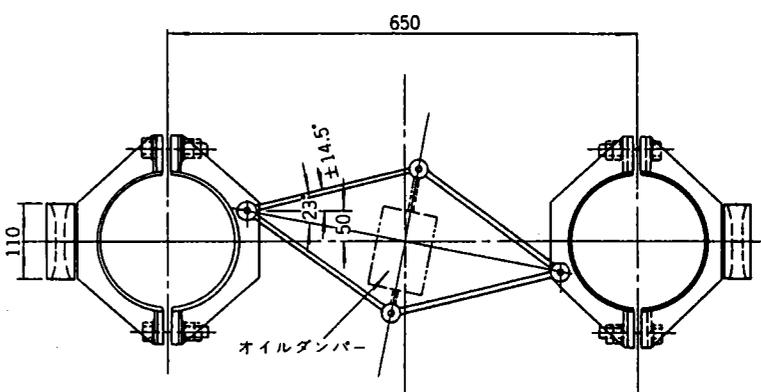
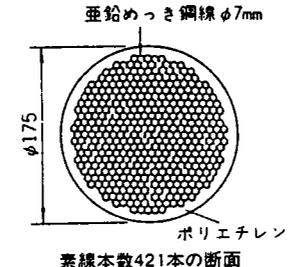
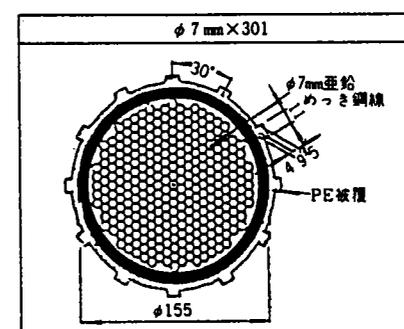
橋梁諸元  
構造諸元、振動特性

六角形箱断面

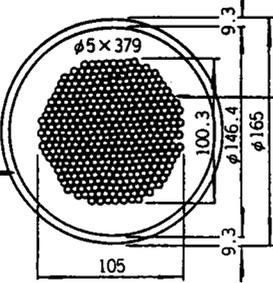
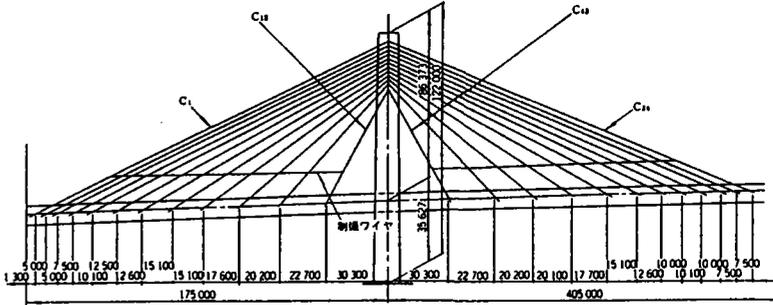
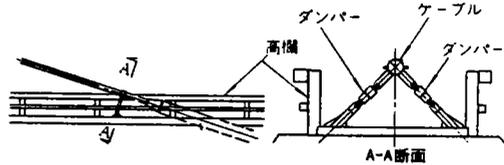
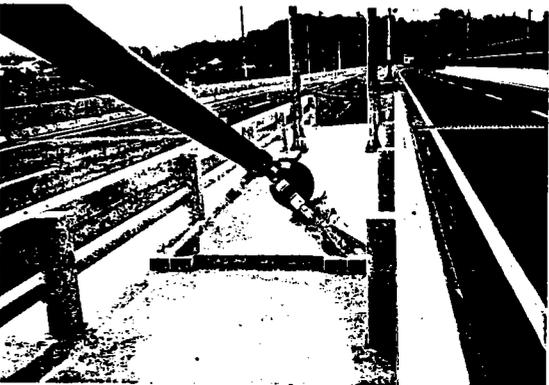
形式: 3径間2ヒンジ補剛箱桁吊橋  
橋長: 1597. 2m  
スパン割: 304.3+987.6+304.3m  
幅員: 27. 14m

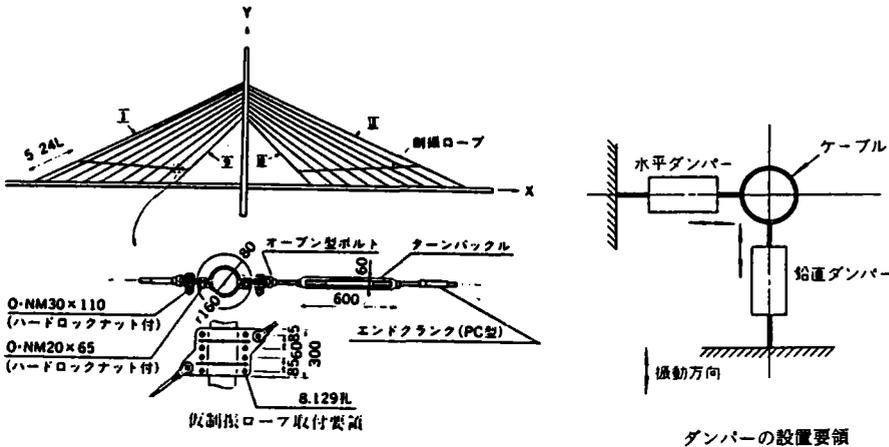
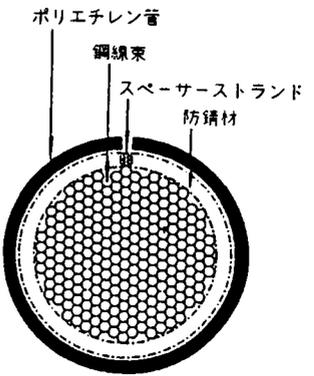
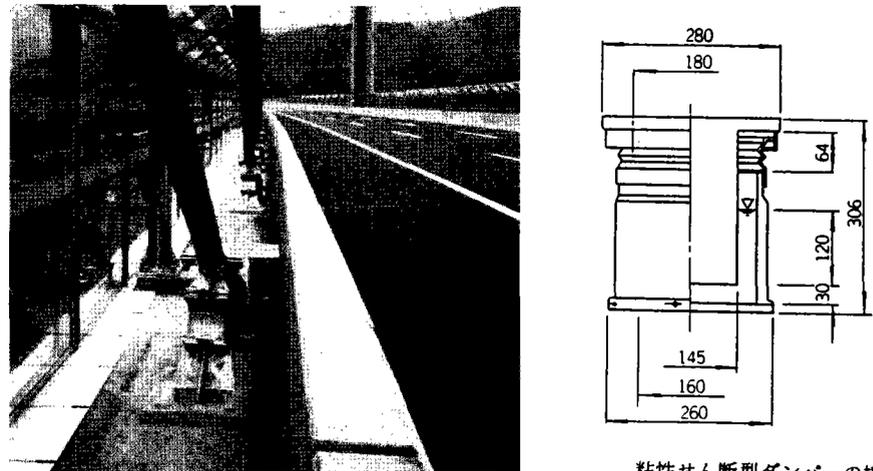


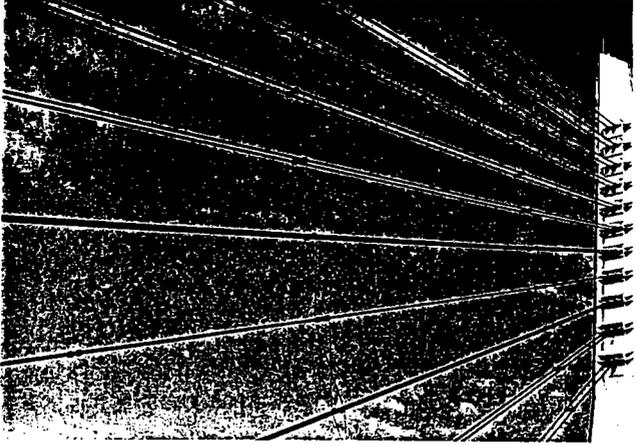
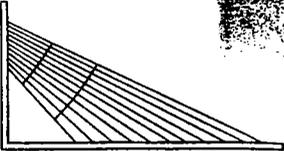
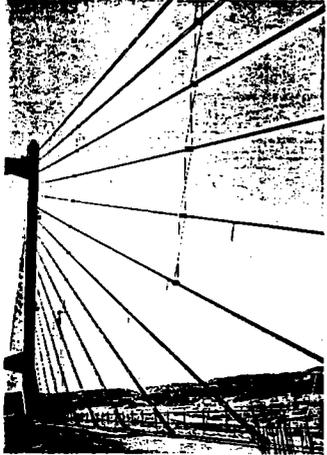
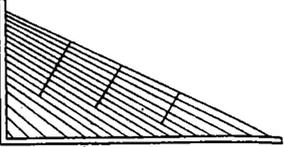
No. 37	橋名: Great Belt East デンマーク	図表・写真
制振対策 構造、特徴、形式、制振効果	橋梁諸元 構造諸元、振動特性	
六角形箱断面	形式: 3径間連続補剛箱桁吊橋 橋長: 2694.0m スパン割: 535.0+1624.0+535.0m 幅員: 31.0m	
No. 38	橋名: Tsing Ma 香港	図表・写真
制振対策 構造、特徴、形式、制振効果	橋梁諸元 構造諸元、振動特性	
中央部グレーチング フェアリング	形式: 3径間2ヒンジ補剛トラス吊橋 橋長: 2167m スパン割: 460.0+1377.0+300.0m 幅員: 30.7m 上路: 道路6車線 下路: 道路2車線+鉄道(複線)	

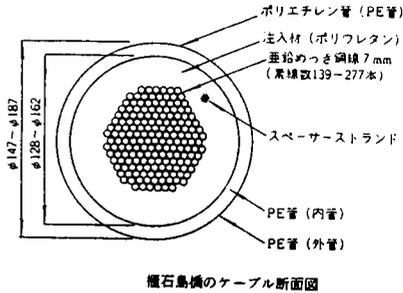
NO. 3	橋名: 横浜ベイブリッジ	図表・写真
制振対策 構造、特徴、形式、制振効果等	橋梁諸元 構造諸元、振動特性	
<p>○平行配置されたケーブル間に装置を設置。</p> <p>○微小振動を拡大する機構と取付け角度を設けた。</p> <p>○耐久性、取付け上の制約から装置内の減衰機構にオイルダンパを採用。</p>	<p>ケーブル形式:ファン形マルチケーブル 配置:11段2面ケーブル(各段2本/面) 振動現象:渦励振</p> 	
NO. 40	橋名: 東神戸大橋	図表・写真
制振対策 構造、特徴、形式、制振効果等	橋梁諸元 構造諸元、振動特性	
<p>○空力ダンパとして機能する平行突起付ケーブル</p>	<p>ハープ形マルチタイプ 長期防食性を考慮した、ハンクラウトタイプのポリエチレン被覆HiAmケーブル 振動現象:レインハイブレーション 渦励振、キャロッピング</p>	



NO. 42	橋名：名港西大橋	図表・写真
制振対策 構造、特徴、形式、制振効果等	橋梁諸元 構造諸元、振動特性	
<p>○ケーブル間をワイヤで連結する</p>	<p>マルチケーブル斜張橋 振動現象：レインバイブレーション 振動は風向に対して下り勾配を持ったケーブルに発生 面内振動のみ発生 ケーブル固有振動数が1～3Hzの時発生</p>  <p>ポリエチレン</p> <p>亜鉛メッキ鋼線</p>	 <p>名港西大橋の制振対策</p>  <p>ステンレスワイヤ 7×φ1.914</p> <p>制振ワイヤの詳細</p> <p>注) ( )内7.2は中央値間隔を示す。</p>
NO. 43	橋名：荒津大橋	図表・写真
制振対策 構造、特徴、形式、制振効果等	橋梁諸元 構造諸元、振動特性	
<p>○中央分離帯を利用したオイルダンパ</p> <p>○耐久性、維持管理、及び景観に配慮が必要</p>	<p>1面吊りケーブル 振動現象：レインバイブレーション</p>	 <p>A-A断面</p>  <p>荒津大橋の制振装置(オイルダンパー)</p>

<p>NO.44 橋名：天保山大橋</p>	<p>図表・写真</p>
<p>制振対策 構造、特徴、形式、制振効果等</p> <p>○ケーブルを相互に連結する仮制振対策後、オイルダンパを設置 ○仮制振対策時は2次振動モードと3次振動モードの各腹位置の中間点を連結 ○景観上の配慮からオイルダンパはフェアリング内部に設置 ○鉛直及び水平方向に各1台設置</p>	<p>橋梁諸元 構造諸元、振動特性</p> <p>振動現象：レインハイブレーション ケーブルの大振幅振動は降雨を伴った平均10m/sec前後の風速条件で発生</p> 
<p>NO.45 橋名：東名足柄橋</p>	<p>図表・写真</p>
<p>制振対策 構造、特徴、形式、制振効果等</p> <p>○粘性せん断型ダンパ ○面内・面外の2方向に対処できる。 ○ケーブル張力の変動などによる、ダンパ取り付け点のケーブル方向の動きに追従可能 ○構造が簡単で維持管理が容易</p> 	<p>橋梁諸元 構造諸元、振動特性</p> <p>振動現象：レインハイブレーション HiAmアンカーケーブル使用</p>  <p>▲ダンパーの設置状況</p> <p>粘性せん断型ダンパーの構造</p>

NO. 46 橋名：櫃石島橋・岩黒島橋		図表・写真
制振対策 構造、特徴、形式、制振効果等	橋梁諸元 構造諸元、振動特性	 <p>櫃石島橋・岩黒島橋のケーブル制振</p> 
○ケーブルをワイヤで連結する ○高次の振動モードを考慮し、連結段数を2段とする ○面外振動に対処するためワイヤをクロスさせ、面外方向の剛性を持たせる	振動現象：ウェイクギャロッピング レインバイブレーション 片主構当たり2面のケーブルを配置	
NO. 47 橋名：呼子大橋		図表・写真
制振対策 構造、特徴、形式、制振効果等	橋梁諸元 構造諸元、振動特性	 <p>斜材の制振用ワイヤ</p> 
○ケーブルをワイヤで連結する	PC斜張橋 振動現象：ウェイクギャロッピング	



櫃石島橋・岩黒島橋のケーブル制振

斜材の制振用ワイヤ

NO. 48

橋名：幸魂橋

図表・写真

制振対策  
構造、特徴、形式、制振効果等

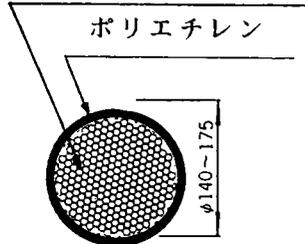
橋梁諸元  
構造諸元、振動特性

- 粘性せん断型ダンパ
- 面内・面外の2方向に対処できる。
- ケーブル張力の変動などによる、ダンパ  
取り付け点のケーブル方向の動きに  
追随可能
- 構造が簡単で維持管理が容易

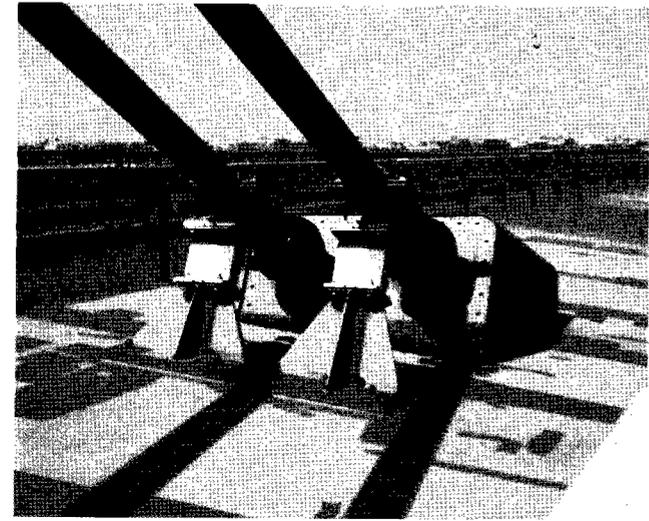
1本柱1面吊りマルチファン型ケーブル  
(柱2本で構成)  
振動現象：ウェイクキャロッピング

亜鉛メッキピアノ線

ポリエチレン



ケーブル断面図



▲ダンパーの設置状況

NO. 49	橋名: 横浜ベイブリッジ	図表・写真
<p>制振対策 構造、特徴、形式、制振効果等</p> <p>○広範囲な風速への対応、美観上の問題、設置場所の制約を考慮 ○ポール断面を空気力学上有利な円形断面とする ○ポール内部に鋼球を封入した2層の制振室を設けた衝撃減衰器 ○作動時の防音対策として容器内面に防音処理を施す。</p>	<p>橋梁諸元 構造諸元、振動特性</p> <p>振動現象: 大型車両の通行による路面振動や強風によるカルマン渦励振</p>	

No. 50 橋名：大鳴門橋橋

図表・写真

制振対策  
構造、特徴、形式、制振対策等

橋梁諸元  
構造諸元、振動特性

- ・スライディングブロック  
オイルダンパー

- 塔高 125.93 m
- ・振動現象 渦励振

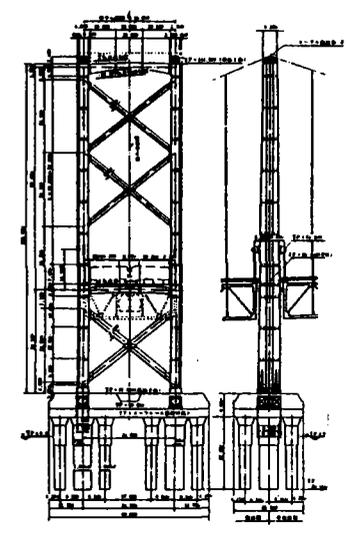
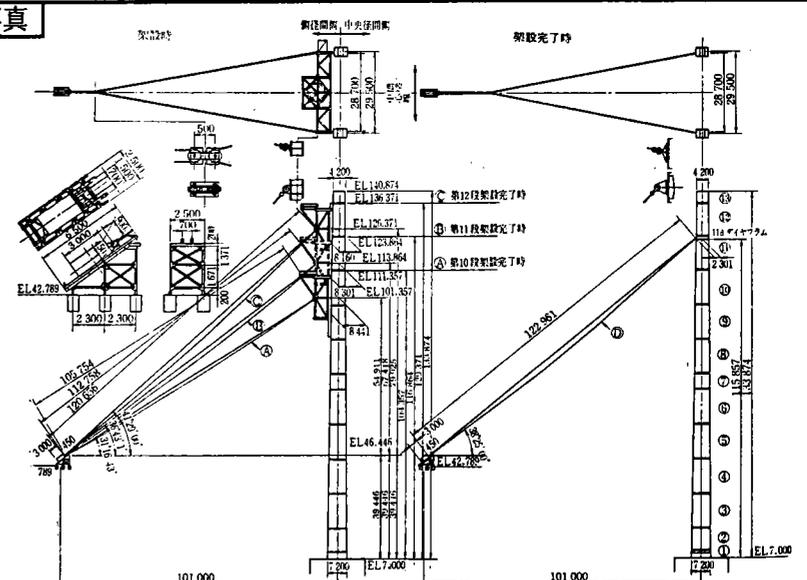
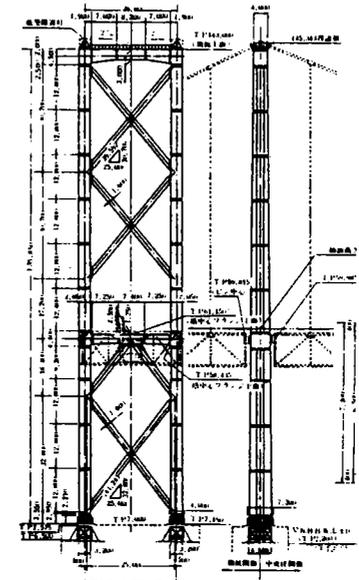


図-1 主塔一輪図

No. 51   橋名：関門橋		図表・写真
制振対策 構造、特徴、形式、制振対策等	橋梁諸元 構造諸元、振動特性	 <p>図 3.3.13 制振装置（下側側）</p>
・スライディングブロック	・振動現象 渦励振	
No. 52   橋名：因島大橋（3P）		図表・写真
制振対策 構造、特徴、形式、制振対策等	橋梁諸元 構造諸元、振動特性	
・スライディングブロック	塔高 135 m ・振動現象 渦励振	

No.53 橋名：幸魂大橋

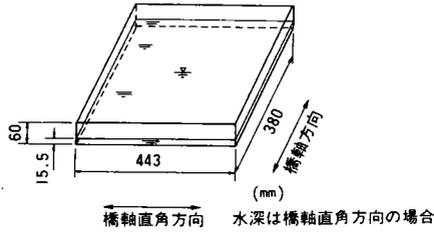
図表・写真

制振対策  
構造、特徴、形式、制振対策等

橋梁諸元  
構造諸元、振動特性

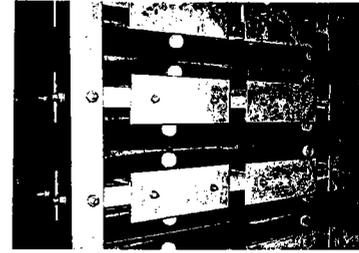
TLD

水の重量=2.61kg/個

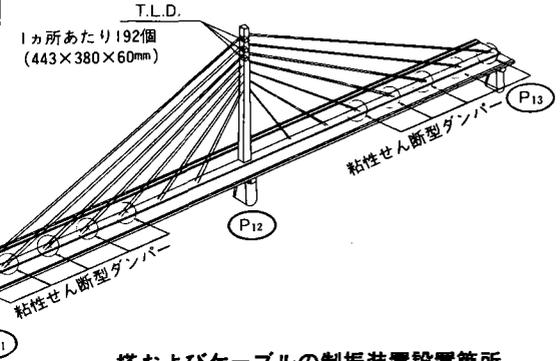


T.L.D.の寸法

・振動現象 ギャロッピング



T.L.D.設置状況



塔およびケーブルの制振装置設置箇所

No.54 橋名：東神戸大橋

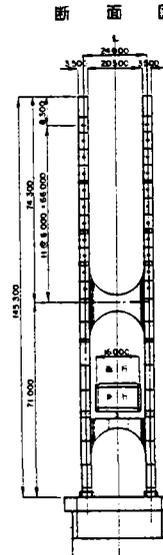
図表・写真

制振対策  
構造、特徴、形式、制振対策等

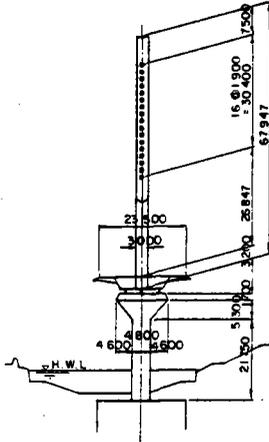
橋梁諸元  
構造諸元、振動特性

隅切り、TMD、TLCD

・ラーメン構造  
塔高 145.3 m  
・振動現象 ギャロッピング





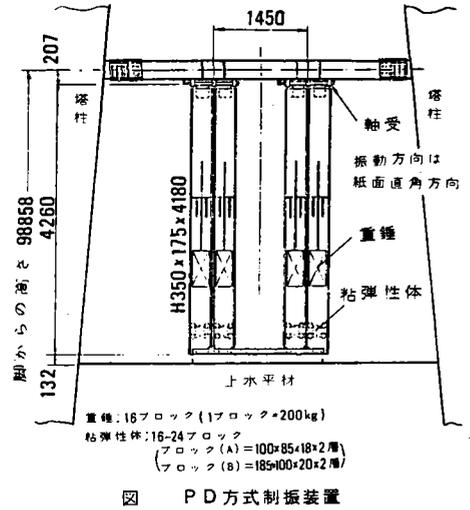
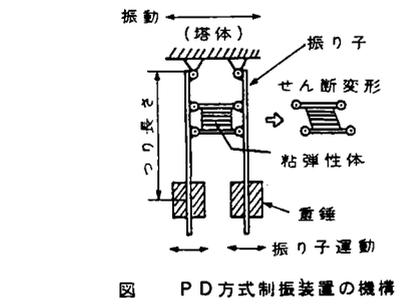
No 57	橋名：かつしかハープ橋	図表・写真
制振対策 構造、特徴、形式、制振対策等	橋梁諸元 構造諸元、振動特性	
<ul style="list-style-type: none"> <li>・円弧道流板</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・塔高 67.9 m</li> <li>・振動現象 ギャロッピング</li> </ul>	
No 58	橋名：浦上川歩道橋	図表・写真
制振対策 構造、特徴、形式、制振対策等	橋梁諸元 構造諸元、振動特性	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>・振動現象 ギャロッピング</li> </ul>	

Na 59   橋名：花畔大橋		図表・写真																	
制振対策 構造、特徴、形式、制振対策等	橋梁諸元 構造諸元、振動特性	<p style="text-align: right;">                     図 8 TMD構造概要図                      Fig. 8 General view of TMD                 </p>																	
・ TMD  <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th colspan="3">TMD 構造諸元</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>型式</td> <td colspan="2">バネ付き振り子</td> </tr> <tr> <td>重錘</td> <td colspan="2">1.8tf</td> </tr> <tr> <td>バネ</td> <td colspan="2">k=23.7tf/m×2</td> </tr> <tr> <td>オイルダンパー</td> <td colspan="2">C=1.87tf.s/m×2</td> </tr> <tr> <td>油圧緩衝器</td> <td colspan="2">最大吸収エネルギー 302kg.m</td> </tr> </tbody> </table> <p>                     装置の特長                      ○オイルダンパー：寒冷地仕用                      ○軸受け：無給油タイプ                 </p>	TMD 構造諸元			型式	バネ付き振り子		重錘	1.8tf		バネ	k=23.7tf/m×2		オイルダンパー	C=1.87tf.s/m×2		油圧緩衝器	最大吸収エネルギー 302kg.m		・ 振動現象 渦励振
TMD 構造諸元																			
型式	バネ付き振り子																		
重錘	1.8tf																		
バネ	k=23.7tf/m×2																		
オイルダンパー	C=1.87tf.s/m×2																		
油圧緩衝器	最大吸収エネルギー 302kg.m																		
Na 60   橋名：生口橋		図表・写真																	
制振対策 構造、特徴、形式、制振対策等	橋梁諸元 構造諸元、振動特性	<p style="text-align: center;">(d) 塔一般図</p>																	
・ TSD	・ A形下絞り鋼製塔 塔高 126.75 m  ・ 振動現象 渦励振																		

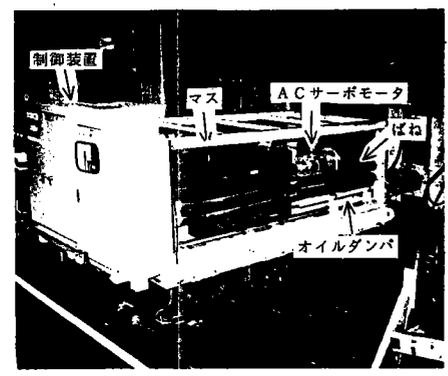
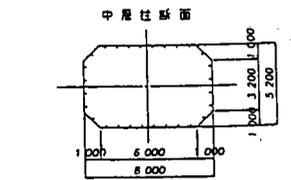
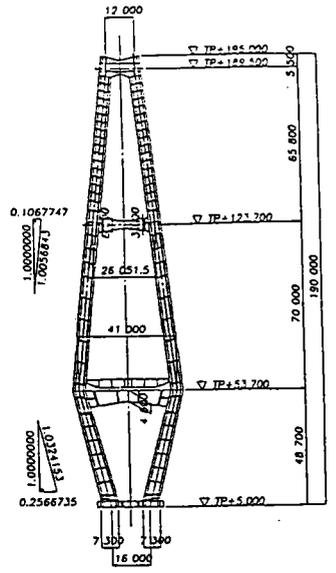
No. 61   橋名：名港西大橋	図表・写真
制振対策 構造、特徴、形式、制振対策等  ・ TMD	橋梁諸元 構造諸元、振動特性  ・ 振動現象 渦励振

表 制振装置の基本諸元

項目	数値
装置の全重量	5.8 t
重錘の重量 $W_d$	3.2 t
振り子部の重量 $W_p$	4.88 t
振り子部の回転慣性 $I_d$	3.745 $t \cdot m^2$
重錘の吊り長さ $l_d$	$2.9 \pm 0.5$ m
塔への取り付け高さ $H_d$	99m ( $\phi = 0.725$ )
高さ	$H_t$ 122 m
重量	$W_t$ 1814 t
固有振動数	$\Omega_t$ 0.327 Hz



No. 62   橋名：名港中央大橋	図表・写真
制振対策 構造、特徴、形式、制振対策等  ・ アクティブコントロール 八角形断面	橋梁諸元 構造諸元、振動特性  ・ 振動現象 渦励振



<p>Na 63   橋名：レインボーブリッジ（芝浦側）</p>		<p>図表・写真</p>
<p>制振対策 構造、特徴、形式、制振対策等</p> <p>・AMD 2台</p>	<p>橋梁諸元 構造諸元、振動特性</p> <p>・ラーメン形式 塔高 119.0 m</p> <p>・振動現象 渦励振</p>	
<p>Na 64   橋名：レインボーブリッジ（台場側）</p>		<p>図表・写真</p>
<p>制振対策 構造、特徴、形式、制振対策等</p> <p>・HMD 1台</p>	<p>橋梁諸元 構造諸元、振動特性</p> <p>・ラーメン形式 塔高 117.4 m</p> <p>・振動現象 渦励振</p>	

<p>No. 65 橋名：鶴見航路橋（2P）</p>	<p>図表・写真</p>
<p>制振対策 構造、特徴、形式、制振対策等</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ AMD 2台</li> </ul>	<p>橋梁諸元 構造諸元、振動特性</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 逆Y字型コンクリート複合構造 塔高 183 m</li> <li>・ 振動現象 渦励振</li> </ul>
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div data-bbox="1232 266 1478 721"> <p>【制御系の構成】</p> </div> <div data-bbox="1568 297 1993 736"> <p>【制振装置の構成】</p> </div> </div>	
<p>No. 66 橋名：明石海峡大橋（2P、3P）</p>	<p>図表・写真</p>
<p>制振対策 構造、特徴、形式、制振対策等</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ AMD 2台</li> </ul>	<p>橋梁諸元 構造諸元、振動特性</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ トラス形式 塔高 293 m</li> <li>・ 振動現象 渦励振</li> </ul>
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div data-bbox="1164 909 1635 1285"> <p>【制振装置の配置】</p> </div> <div data-bbox="1657 1003 2016 1270"> <p>【制振装置の構成】</p> </div> </div>	

<p>No. 67 橋名：白鳥大橋（3P）</p>	<p>図表・写真</p>
<p>制振対策 構造、特徴、形式、制振対策等</p> <p>・AMD 1台</p>	<p>橋梁諸元 構造諸元、振動特性</p> <p>・ラーメン形式 塔高 127.9 m</p> <p>・振動現象 渦励振</p>
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div data-bbox="1205 321 1534 509"> <p>【制御系の構成】</p> </div> <div data-bbox="1545 321 1971 682"> <p>①おもり } 可動マス ②レール } ③パフファ ④ローラ ⑤ピニオン ⑥ラック ⑦減速機 ⑧電動モータ</p> <p>【制振装置の構造】</p> <p>単位：mm</p> </div> </div>	
<p>No. 68 橋名：白鳥大橋（4P）</p>	<p>図表・写真</p>
<p>制振対策 構造、特徴、形式、制振対策等</p> <p>・AMD 2台</p>	<p>橋梁諸元 構造諸元、振動特性</p> <p>・ラーメン形式 塔高 144.75 m</p> <p>・振動現象 渦励振</p>
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div data-bbox="1153 831 1344 1176"> <p>制振装置</p> <p>風向風速計 サーボ型 加速度計</p> <p>【配置】</p> </div> <div data-bbox="1321 1074 2060 1411"> <p>【制振装置】</p> <p>重錘重量 4.0 t ストローク ±35 cm 減速機 0.13~0.6 t 電動機 ACサーボモータ 減速機重量 約6 t 設置台数 2台</p> <p>単位：mm</p> </div> </div>	

No. 69   橋名：櫃石島橋		図表・写真
制振対策 構造、特徴、形式、制振対策等	橋梁諸元 構造諸元、振動特性	
<ul style="list-style-type: none"> <li>・ AMD 2台</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ ラーメン構造 塔高 139.3 m</li> <li>・ 振動現象 渦励振</li> </ul>	
No. 70   橋名：横浜ベイブリッジ		図表・写真
制振対策 構造、特徴、形式、制振対策等	橋梁諸元 構造諸元、振動特性	
<ul style="list-style-type: none"> <li>・ TMD 6台</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ ラーメン構造 塔高 172 m</li> <li>・ 振動現象 渦励振</li> </ul>	

振動制御事例総括表

橋種	対象部位	形式	振動現象	制振対策	制御機構	事例		特徴
						橋名	文献	
桁橋	主桁	箱桁橋	渦励振	フラップ		門崎高架橋	門崎高架橋の耐風安定性（橋梁と基礎84/02）	下部スカート併用
						末広大橋	末広大橋上部工の設計と施工（橋梁と基礎75/09）	
				TMD		なみはや大橋	松尾橋梁技報96/04	
						東京湾横断道	東京湾横断道上部工の設計・施工（橋梁と基礎95/03）	実橋の動態観測後に実施
						関西国際空港連絡橋	橋は揺れているか 予測と現実（土木学会）	
			ギョロツヒンク	下部スカート		門崎高架橋	門崎高架橋の耐風安定性（橋梁と基礎84/02）	
						有明西運河橋	有明西運河橋の設計・施工（橋梁と基礎94/12）	
				プレート		泊大橋	泊大橋建設工事の概要と風に対する検討（土木学会論文集86/09）	万一有害な振動が発生した場合更に必要な対策を追設
						琵琶湖大橋	琵琶湖大橋（並列橋の耐風安定性）（土木学会第49回年講）	南風の制振対策として旧橋の高欄にフラップ取付け
						撫養橋	並列箱桁橋（撫養橋）の耐風応答特性（土木学会第51回年講）、撫養橋上部工の設計と施工（橋梁と基礎86/07）	管理路を兼ねた制御プレートを設置
					なみはや橋	松尾橋梁技報96/04		
					海田大橋	海田大橋（上部工）の設計、施工（橋梁89/02）		
					臨海工区	なし		
		フラップ			琵琶湖大橋	琵琶湖大橋（並列橋の耐風安定性）（土木学会第49回年講）	南風の制振対策として旧橋の高欄にフラップ取付け	
					牛深ハイヤ橋	牛深ハイヤ橋（日経コンストラクション96/07）		
		曲面フランジ			牛深ハイヤ橋	牛深ハイヤ橋（日経コンストラクション96/07）		
		制振プレート			関西国際空港連絡橋	橋は揺れているか 予測と現実（土木学会）		
		フラッター		スタビライザ		関西国際空港連絡橋	橋は揺れているか 予測と現実（土木学会）	
		鋼桁橋	ギョロツヒンク	フェアリング		木津川新橋	4 径間連続鋼桁の耐風安定性（阪大工学部「風洞」1986）	フラップ併用
						木津川新橋	4 径間連続鋼桁の耐風安定性（阪大工学部「風洞」1986）	フェアリング併用
			渦励振	フェアリング		木津川新橋	4 径間連続鋼桁の耐風安定性（阪大工学部「風洞」1986）	フラップ併用
						木津川新橋	4 径間連続鋼桁の耐風安定性（阪大工学部「風洞」1986）	フェアリング併用
		ア-リブ補剛桁	ア-チ橋	渦励振	プレート		舞州～夢州連絡橋（仮称）	舞州～夢州連絡橋の風荷重に対する検討（土木学会第50回年講）
	舞州～夢州連絡橋（仮称）					舞州～夢州連絡橋の風荷重に対する検討（土木学会第50回年講）		

振動制御事例総括表

橋種	対象部位	形式	振動現象	制振対策	制御機構	事例		特徴				
						橋名	文献					
ケーブル			渦励振	粘性せん断型ダンパ		青森ベイブリッジ	P.C斜張橋・青森大橋（仮称）の設計（橋梁1987vol.23）	施工時				
						松川浦大橋	松川浦大橋の計画・設計概要（橋梁1990vol.26）	施工時				
						吹上浜サネットブリッジ						
						羽田スカイ-チ	東京国際空港中央連絡橋の設計と施工（橋梁と基礎93/1）					
						とよみ大橋						
					並行突起付ケーブルシール材	東神戸大橋	東神戸大橋の耐風設計（橋梁と基礎91/05）	比較検討の結果美観上の問題、ケーブル長が長いためダンパの設置位置の問題等により空力対策を採用				
					ステンパイプ被覆	豊後橋		施工時～完成時				
					アルミ管被覆（施工時） 弾性シール材ダンパ（施工時）	高梨大橋						
					ワイヤによる相互連結	名港西大橋						
					オイルダンパ-の設置	荒津大橋	東神戸大橋ケーブルの耐風安定性に関する調査研究（京都大学工学部88/03）	ケーブルの構造減衰を0.06～0.12の範囲まで高める				
				ケーブル角折れ緩衝装置	生口橋							
			レインバイブレーション				ワイヤによる相互連結		名港西大橋	斜張橋ケーブルのRain Vibration（風工学会誌86/03）	ケーブルの構造減衰を高める	
									榎石島橋 若黒島橋	斜張橋ケーブルのRain Vibration（風工学会誌86/03）		
								オイルダンパ-の設置		荒津大橋	東神戸大橋ケーブルの耐風安定性に関する調査研究（京都大学工学部88/03）	ケーブルの構造減衰を0.06～0.12の範囲まで高める
										天保山大橋	天保山大橋のケーブル振動とその対策（橋梁と基礎92/04）	
								粘性せん断型ダンパ		青森ベイブリッジ	P.C斜張橋・青森大橋（仮称）の設計（橋梁1987vol.23）	施工時
							ケーブル被覆		勇橋		凍結解氷時、気候の急変時	
								粘性せん断型ダンパ		松川浦大橋	松川浦大橋の計画・設計概要（橋梁1990vol.26）	施工時
										吹上浜サネットブリッジ		
										洲浜橋		
	とよみ大橋											

振動制御事例総括表

橋種	対象部位	形式	振動現象	制振対策	制御機構	事例		特徴
						橋名	文献	
斜張橋	主桁補剛桁	充腹た	フラッター	フェアリング		天保山大橋	安治川橋梁(斜張橋)の構造(橋梁と基礎80/03)	ス <sup>ホ</sup> イラ-併用、偏平六角形箱桁
						鶴見つばさ橋	鶴見航路橋の設計概要(上)(下)(橋梁と基礎93/01, 02)	
					鳥飼仁和寺大橋	橋梁と基礎84/10、淀川橋梁の耐風性に関する実験的研究(土木学会第39回年講)	吊径間部に設置	
				フラップ	鳥飼仁和寺大橋	橋梁と基礎84/10、淀川橋梁の耐風性に関する実験的研究(土木学会第39回年講)	吊径間部に設置	
				グレチング	尾道大橋	橋梁86/06、尾道大橋の耐風性に関する二、三の実験について(土木学会第23回年講)		
			ギヤロップ ヒング	フェアリング		奥野エコブリッジ		プレート併用
						岩津橋		
				フラップ		永歳橋	永歳橋の耐風安定性に関する実験報告(土木学会論文集81/02)	デフレクタ-併用、歩車道境界通風孔
				デフレクタ-		永歳橋	永歳橋の耐風安定性に関する実験報告(土木学会論文集81/02)	フラップ併用、歩車道境界通風孔
				プレート		奥野エコブリッジ		フェアリング併用
		グレチング			尾道大橋	橋梁86/06		
		渦励振	フェアリング		石狩河口橋	石狩河口橋の耐風性について(土木学会第24回年講)	耐風安定性より主桁断面決定	
					川崎橋	川崎橋の設計と施工(上)(下)(橋梁と基礎78/11, 12)	デフレクタ-併用	
					折鶴橋	南港歩行者専用道路の設計(橋梁と基礎81/01)		
					名港西大橋	名港西大橋(上部工)の設計(橋梁と基礎83/12)	フラップ併用	
					かつしかハープ橋	S字曲線斜張橋上部工の設計(上)(下)(橋梁と基礎85/04, 05)		
					戸田公園大橋	戸田公園大橋(斜張橋)の設計(橋梁と基礎87/10)		
					秩父橋	秩父橋の設計、架設計画(橋梁85/04)		
				フラップ		末広大橋	末広大橋上部工の設計と施工(橋梁と基礎75/09)	
						かもめ大橋	南港南埠頭連絡橋(斜張橋)の風洞実験について(土木学会第30回年講)	
						永歳橋	永歳橋の耐風安定性に関する実験報告(土木学会論文集81/02)	デフレクタ-併用、歩車道境界通風孔
	藤戸橋・日の浦橋				共通ア <sup>カ</sup> -を持つ地盤定着式斜張橋(橋梁と基礎82/06)			
	名港西大橋	名港西大橋(上部工)の設計(橋梁と基礎83/12)	フェアリング併用					
		鳥飼仁和寺大橋	橋梁と基礎84/10					

振動制御事例総括表

橋種	対象部位	形式	振動現象	制振対策	制御機構	事例		特徴	
						橋名	文献		
斜張橋	塔		渦励振	八角形断面		名港中央大橋			
				ギョロツヒンク	円弧道流板		かつしかハープ橋	土木学会第39回年講	
					プレート		浦上川歩道橋	土木学会第47回年講	
					スリット		菅原城北大橋	橋梁と基礎90/07	
				TMD		荒津大橋	三菱重工技術報87/06		
						東神戸大橋	土木学会第46回年講		
				TLD		幸魂大橋	風工学会誌89/10	架設時	
						東神戸大橋	土木学会第46回年講		
					隅切り	東神戸大橋	土木学会第46回年講		
吊橋	補剛桁	I桁	渦励振	フェアリング		聖紫花の橋	沖縄県バシ公園吊橋（聖紫花の橋）の耐風対策（土木学会第41回年講）		
				デフレクター		聖紫花の橋	沖縄県バシ公園吊橋（聖紫花の橋）の耐風対策（土木学会第41回年講）		
				鉛直スタビライザ		聖紫花の橋	沖縄県バシ公園吊橋（聖紫花の橋）の耐風対策（土木学会第41回年講）		
			ギョロツヒンク	フェアリング		聖紫花の橋	沖縄県バシ公園吊橋（聖紫花の橋）の耐風対策（土木学会第41回年講）		
				デフレクター		聖紫花の橋	沖縄県バシ公園吊橋（聖紫花の橋）の耐風対策（土木学会第41回年講）		
				鉛直スタビライザ		聖紫花の橋	沖縄県バシ公園吊橋（聖紫花の橋）の耐風対策（土木学会第41回年講）		
		トラス	フラッター	床版連続開口		竜神大吊橋			
				鉛直スタビライザ		若戸大橋	若戸大橋の拡張工事（橋梁と基礎89/12, 90/01）		
						大鳴門橋	大鳴門橋工事誌（本州四国連絡橋公団87/03）		
				セントパリア		若戸大橋	若戸大橋の拡張工事（橋梁と基礎89/12, 90/01）		
				地覆鉛直板		因島大橋	二次元風洞試験による因島大橋の架設及び完成時の耐風安定性（日立造船技報81/12）		
				開口部（中央部）		Tsing Ma	香港・青馬大橋の建設について（月刊建設95/01）		
				フェアリング		Tsing Ma	香港・青馬大橋の建設について（月刊建設95/01）		
	グレチング		レインボブリッジ						

振動制御事例総括表

橋種	対象部位	形式	振動現象	制振対策	制御機構	事例		特徴
						橋名	文献	
斜張橋	主桁補剛桁	充腹た	渦励振	フリップ		荒津大橋	荒津大橋上部工の設計（土木構造・材料論文集86/01）	フリップ、スカート共未施工
						北港連絡橋		フリップ、スプイラ-共未施工
						大和川橋梁	大和川橋梁の耐風性（阪神公団技術論文集78/02）	フリップ未施工
						水郷大橋	水郷大橋の耐風性調査（土木技術資料78/08, 09）	
					フリップ（未施工）	秩父橋	秩父橋の設計、架設計画（橋梁85/04）	
					フリップ（高欄）	弥栄大橋	弥栄大橋（5径間連続鋼斜張橋）の設計と施工（橋梁85/10）	二矩形箱桁
				幸魂橋		幸魂大橋の計画と現状（橋梁88/02）	未施工	
				デフレクタ-	永歳橋	土木学会論文集81/02	フリップ併用、歩車道境界通風孔	
					川崎橋	川崎橋の設計と施工(上)(下)（橋梁と基礎78/11, 12）	フェアリング併用	
					でんでん大橋	通信専用斜張橋の設計と施工（NKK技法81/01）		
					Saint-Nazaire橋		耐風安定性より主桁断面決定	
				か-プレート	高速小松川橋	荒川大橋（斜張橋）の設計、施工（橋梁と基礎71/01）		
				歩車道境界通風孔	永歳橋	土木学会論文集81/02	デフレクタ-併用、フリップ併用	
				ファッションプレート地覆部通風孔	高梨大橋	高梨橋の動的風洞実験（土木学会第38回年講） 橋梁と基礎84/11, 85/01		
	上スカート	荒津大橋	荒津大橋上部工の設計（土木構造・材料論文集86/01）	フリップ、スカート共未施工				
	スプイラ-	北港連絡橋		フリップ、スプイラ-共未施工				
	トラス	フラック-	上弦材にフェアリング	櫃石島橋	櫃石島橋、岩黒島橋の設計（本四技法81/07）			
				岩黒島橋	櫃石島橋、岩黒島橋の設計（本四技法81/07）			
		渦励振	フェアリング	横浜ベイブリッジ	横浜ベイブリッジの耐風対策（橋梁と基礎89/08）	塔にTMD		
		塔	渦励振	TMD	名港西大橋	第8回風工学シンポジウム論文集84/12	架設時	
櫃石島橋	本四技報87/01							
花畔大橋	構造工学論文集90/03							
横浜ベイブリッジ	橋梁と基礎89/08							
TSD	生口橋			第11回風工学シンポジウム論文集90/12	架設時			
アクティブコントロール	鶴見つばさ橋			第2回振動制御コロキウム				
		名港中央大橋						

振動制御事例総括表

橋種	対象部位	形式	振動現象	制振対策	制御機構	事例		特徴	
						橋名	文献		
吊橋	補剛桁	トラス		オープンングレチング		Tacoma Narrows (new)	長大橋梁に対する耐風設計の変換 (橋梁と基礎89/08)		
			連成フラッター	鉛直スビライザ		明石海峡大橋	明石海峡大橋大型風洞試験での連成フラッター特性に関する考察 (第13回風工学シンポジウム論文集94/12)		
				オープンングレチング		明石海峡大橋	明石海峡大橋大型風洞試験での連成フラッター特性に関する考察 (第13回風工学シンポジウム論文集94/12)		
		ねじれフラッター	グレチング		南北備讃瀬戸大橋	南北備讃瀬戸大橋の耐風性 (本四技報86/01, 04)			
			水平トラス		南北備讃瀬戸大橋	南北備讃瀬戸大橋の耐風性 (本四技報86/01, 04)			
		箱桁	ギョロツピング	デフレクター		信喜橋	信喜橋の振動特性について (三井造船技報80/10)		
			曲げねじれフラッター	フェアリング		白鳥大橋	白鳥大橋補剛桁の設計・製作 (橋梁と基礎96/05)		
			フラッター	フェアリング		来島大橋	来島大橋補剛桁の耐風性 (本四技報93/01)		
				六角形断面		Severn	長大橋梁に対する耐風設計の変換 (橋梁と基礎89/08)		
				ウインドノーズ		Great Belt			
	塔	渦励振	隅切り	アクティブコントロール			レインボ-ブリッジ	JSSC NO.12 1994 特集 制振システム	架設時
							明石海峡大橋	JSSC NO.12 1994 特集 制振システム	架設時
							白鳥大橋	構造工学論文集94/03	架設時
							来島大橋	第3回振動制御ロキウム講演論文集95/08	架設時
						明石海峡大橋	JSSC NO.12 1994 特集 制振システム	架設時	
					白鳥大橋	構造工学論文集94/03	架設時		
					来島大橋	第3回振動制御ロキウム講演論文集95/08	架設時		
TMD					明石海峡大橋	JSSC NO.12 1994 特集 制振システム	架設時		
スライディングブロック					関門橋	日立造船技報71/09	架設時		
					因島大橋 (3P)	土木学会論文集83/11	架設時		
				大鳴門橋	本四技報81/04, 82/07	架設時			
オイルハンパ				大鳴門橋	本四技報81/04, 82/07	架設時			
塔板増厚				来島大橋	第3回振動制御ロキウム講演論文集95/08	架設時			
ケーブル	渦励振	ダイクミックハンパ		Severn 吊橋脚ハンパ		カマン渦の発生を防止する			
		スパ-サーダンパ		横浜バイブリッジ	横浜バイブリッジの耐風対策 (橋梁と基礎89/08)	施工時			

振動制御事例総括表

橋種	対象部位	形式	振動現象	制振対策	制御機構	事例		特徴			
						橋名	文献				
ケーブル			ワイヤロッキング	ス <sup>パ</sup> -サ <sup>-</sup> 型制振装置 ワイヤ <sup>-</sup> によるケーブル相互連結		櫃石島橋 岩墨島橋 呼子大橋	本州四国連絡橋耐風研究小委員会：本州四国連絡橋の耐風に関する調査研究報告書（土木学会88/03）				
				相互連結（制振ワイヤ <sup>-</sup> ）		秩父公園橋	秩父公園橋の設計（橋梁と基礎91/10）	施工時			
				3本相互固定+ステンスワイヤ <sup>-</sup>		志摩丸山橋	布施田浦橋（仮称）の計画と設計（橋梁と基礎88/06）				
				4本相互固定（ス <sup>パ</sup> -サ <sup>-</sup> ）		尾道大橋	尾道大橋の設計について（橋梁68vol4） 尾道大橋の架設について（橋梁68vol4）	施工時			
				ス <sup>パ</sup> -サ <sup>-</sup>		かもめ大橋					
				オイルダンパ <sup>-</sup> 方式		ブ <sup>ラ</sup> ト <sup>ン</sup> 橋（仏）					
				粘性せん断型ダンパ <sup>-</sup> 方式		幸魂橋	幸魂橋の施工と制振対策（橋梁と基礎92/04）	構造減衰を高める 1つのダンパ <sup>-</sup> で面内、面外の2方向に対処できる			
						松川浦大橋	松川浦大橋の計画・設計概要（橋梁90vol26）	施工時			
				ギョロッキング	ワイヤケーブルによる相互連結		六甲大橋		ケーブル断面が六角形		
					並行突起付ケーブル		東神戸大橋	東神戸大橋の耐風設計（橋梁と基礎91/05）	比較検討の結果美観上の問題、ケーブル長が長いためダンパ <sup>-</sup> の設置位置の問題等により空力対策を採用		
				ガスト応答	粘性せん断型ダンパ <sup>-</sup> 方式		碓氷橋	碓氷橋（PC斜張橋）上部工の設計（上）（橋梁と基礎92/04）	施工時		
					相互連結（施工時） オイルダンパ <sup>-</sup> （完成時）		白屋橋				
				付属物	照明柱及び灯収納箱	渦励振	チェーンダンパ <sup>-</sup>		大鳴門橋	大鳴門橋照明柱の耐風検討（本四技法85/12）	八角柱、テ <sup>パ</sup> -柱
							鋼球方式		横浜ベイブリッジ	横浜ベイブリッジの耐風対策（橋梁と基礎89/08）	
整流板（+補強…疲労対策のため）		本四					丸型テ <sup>パ</sup> -柱				
防護柵		フラット <sup>パ</sup> -にて手摺り及び横棧を連結			大鳴門橋						

### 3. 4 TMD

#### 1) TMDの考え方[1]

TMD (Tuned Mass Damper) は1つの大きな振動系である構造物の振動を、もう1つの小さな1自由度の振動系を付加することで制御しようとするものである。ダンパー単体と比較した場合、支点を必要としないことからより自由な設計ができるだけでなく、構造物の振動エネルギーを利用して付加振動系の共振を起こさせるため、ダンパーでの散逸エネルギーをより大きくできる点で効果的である。このため、パッシブタイプの振動制御法として建設系構造物に採用されることが多く、吊橋や斜張橋の主塔の風による振動の制振対策として実績がある。

TMDは質量 $m_T$ 、減衰器(減衰係数 $C_T$ )、バネ(バネ定数 $k_T$ )の3要素からなり、解析上は1自由度系でモデル化する。これら各構成要素の特性係数をどのように決めるかがTMDの理論であり、それぞれを無次元化し、質量比 $\mu$ (構造物の質量に対するTMDの質量比)、減衰比 $\xi_T$ (ダッシュポットの減衰定数)、同調比 $\gamma$ (構造物の固有振動数に対するTMDの固有振動数の比)をパラメータとする。

TMDによる振動制御は、TMDの構成要素であるダッシュポットにおいて構造物の振動エネルギーを散逸させることを基本とする。この散逸エネルギー $(1/2)C_T\dot{u}_T^2$ ( $\dot{u}_T$ は構造物に対するTMDの相対速度)を大きくすることが効果の増大をもたらすことになる。散逸エネルギー増大のためには以下の2つが必要となる。

- ① 構造物の振動に伴うTMDの振動応答 $u_T$ を大きくする。
- ② TMDのダッシュポットの減衰 $C_T$ を大きくする。

①のTMDの振動応答を大きくするためには、構造物の振動と共振するようにTMDの固有振動数を設定すること、つまりTMDを構造物に同調(tuning)させることが必要となり、TMDにおいて最も重要な考え方となる。従って、TMDの同調比 $\gamma$ には、最適値が存在する。

②はTMDの減衰比 $\xi_T$ を大きく設定することに対応するが、減衰を大きくすることは、TMD自身の応答をも抑えることとなり、①と相反する。つまりTMDの減衰比 $\xi_T$ については①と②は相反する、つまりトレードオフの関係にあり両者の要求を同時に満たすような最適値が存在する。

質量比 $\mu$ については、TMDの質量を大きくすればするほどTMDの応答が大きくなり、制振効果が上がる。しかし、TMDは二次的システムと考えるのが普通であり、TMDの設置によって一次システムである構造物の質量、剛性を大幅に変えるべきではない。従って、質量比 $\mu$ は数%程度に抑えるのが一般的である。

TMDによる振動制御は、適当に選んだ質量比に対して、制振効果が最大となる最適

な同調比および減衰比を選定することが基本となる。言い換えれば、構造物の振動とともにTMDを適度に大きく振動させることにより、構造物の振動エネルギーを効率よく散逸させて振動制御することがTMDの基本原理であり、最適同調比と最適減衰とからなる最適TMDが存在する。

図3.4-1は調和外力振動について、TMDの同調比および減衰比に対する有効減衰（制振効果）の変化を示したものである。これは同調比と減衰比の種々の組み合わせに対して、構造物の最大応答を与える同調比を求めた上で、有効減衰比を決定して、等値線として示したものである。図では、TMDの減衰および有効減衰をともに対数減衰率で示しているが、図より明らかなように、制振効果である有効減衰 $\delta_{eff}$ の値は同調比、減衰比の両パラメータの変動に非常に敏感である。

図3.4-2には、TMDの構造物に対する応答振幅比の等値線を図3.4-1に対応させて示したものである。図よりわかるように、有効減衰比が最大となるように最適パラメータを設定した最適TMDの場合、TMDの応答振幅比は10近くと非常に大きい。TMDが大きく応答することでダッシュポットの散逸エネルギーが大きくなり、制振効果が大きくなっているといえるが、TMDを取り付けるためのスペースの確保等、種々の制約条件からTMDの応答をある程度まで抑えなければならないこともあり、TMDの減衰比を最適値より大きくとることも実際の設計ではおこなわれている。

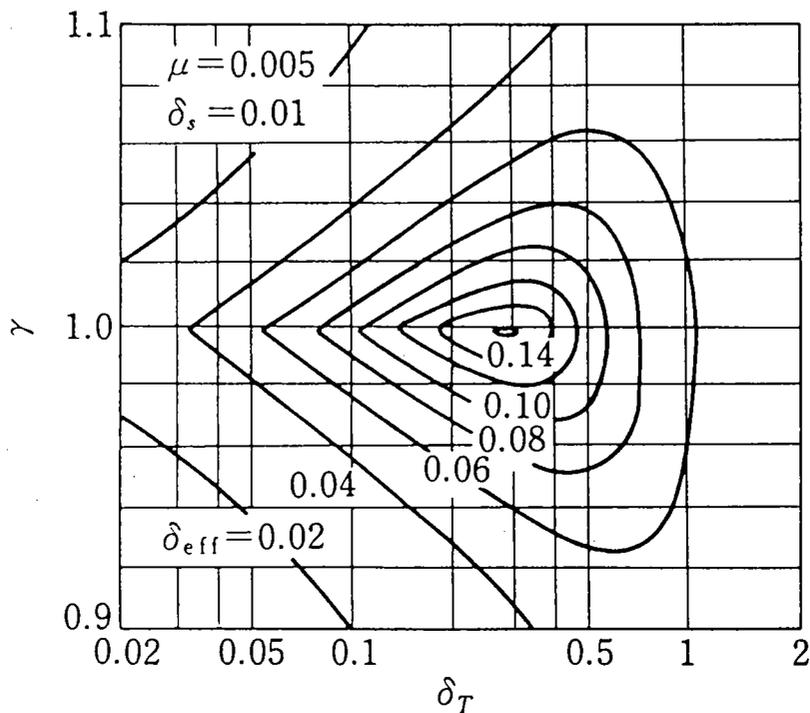


図3.4-1 TMDのロバスト性

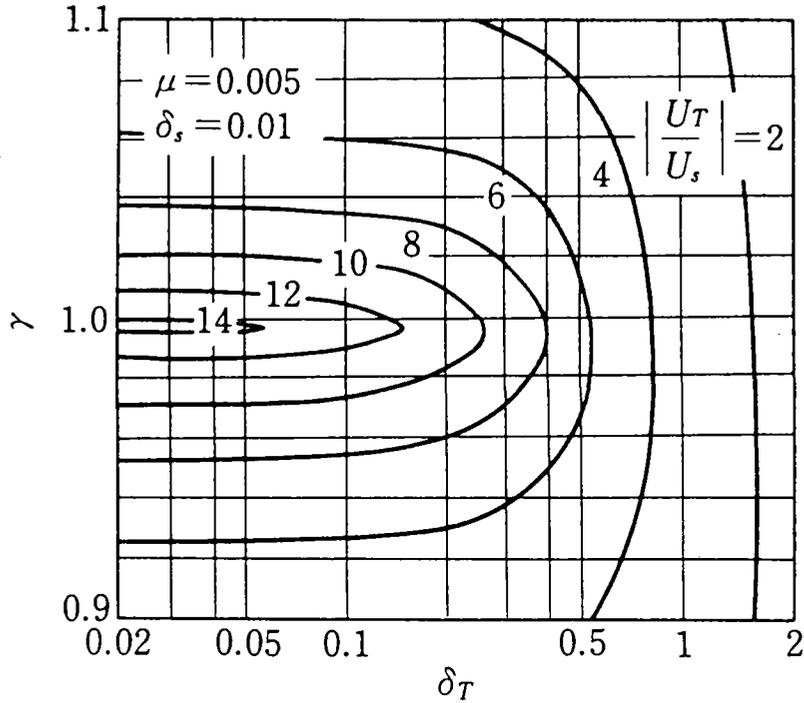


図 3.4-2 TMDの応答振幅比

このように、同調比および減衰比に対するTMDの制振効果の非敏感性つまりロバスト性はきわめて重要な問題であり、TMDの設計においてはロバスト性をも同時に考える必要がある。つまり、構造物の振動数  $f$  には推定誤差がある。同調比、減衰比の変動に対して「鈍く」設計しておき、同調比、減衰比の変動に対してある程度の範囲で減衰を確保する設計が重要である。

今、図 3.4-3 に示すように、曲げ剛性  $E I$  が一定でスパン  $L$  の梁の中央にTMDを設置する場合について考えてみる。

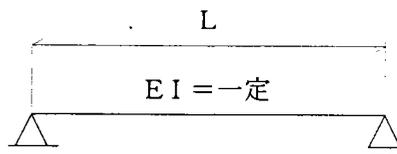


図 3.4-3 解析対象構造

モード解析法（系の減衰が小さく、各次の固有振動数が十分離れている場合には一般化座標を導入して連成を解除し、各モードごとの振動を 1 自由度系として扱うことができる）を利用して、多自由度系の  $i$  次モードを TMD によって制振する方法を示す。

今、図 3.4-3 に示した構造系の制振対象モードを等価な 1 質点系（主振動系）に置換し、これに TMD の振動系（副振動系）を付加した 2 質点のモデルを設定する。（図 3.4-4）この 2 質点モデルに、調和外力振動が作用するものとする。

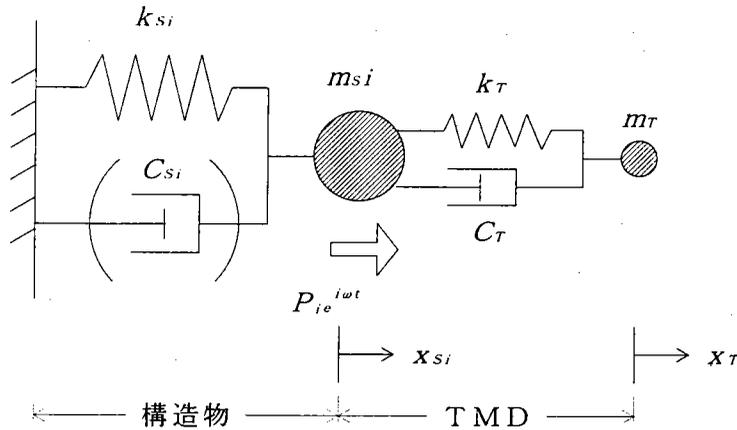


図3.4-4 解析モデル

$i$  次の振動モードを制振するために TMD を取り付けた構造物の運動方程式は次のようになる。

$$\begin{cases} m_{si} \ddot{x}_{si} + C_{si} \dot{x}_{si} + C_T (\dot{x}_{si} - \dot{x}_T) + k_{si} x_{si} + k_T (x_{si} - x_T) = P_i e^{i\omega t} \\ m_T \ddot{x}_T + C_T (\dot{x}_T - \dot{x}_{si}) + k_T (x_T - x_{si}) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

ここで、

$m_{si}$ : 等価重量 ( $= \frac{\sum \phi_{ij} m_j}{\phi_{iT}}$ ,  $m_j$ :  $j$  点の質量,  $\phi_{ij}$ :  $j$  点の振動モード)

$x_{si}$ : 構造物の変位

$C_{si}$ : 等価減衰係数 ( $= 2h_{si} \omega_{si} m_{si}$ ,  $h_{si}$ :  $i$  次のモード減衰)

$k_{si}$ : 等価剛性 ( $= \omega_{si}^2 \cdot m_{si}$ )

$P_i$ : 等価外力 ( $= \frac{\sum \phi_{ij} P_j}{\phi_{iT}}$ ,  $P_j$ : 外力の最大振幅)

$m_T$ : TMD の質量

$x_T$ : TMD の変位

$C_T$ : TMD の減衰係数

$\phi_{iT}$ : TMD 取付け位置の振動モード

$k_T$ : TMD のばね定数

式(1)より、動的応答倍率(変位)が次の様に得られる。

$$x_{si}/x_{ssti} = \sqrt{\frac{(\gamma^2 - \beta^2)^2 + 4\xi_T^2 \gamma^2 \beta^2}{\Delta}} \quad (2)$$

ここで、

$$\begin{aligned} \gamma &= \omega_T / \omega_{si}, & \omega_T^2 &= k_T / m_T \\ \beta &= \omega / \omega_{si} \\ x_{si} &: \text{構造物の変位振幅} \\ x_{ssti} &: \text{構造物の静的変位}(= P_i / k_{si}) \\ \xi_T &= C_T / 2m_T \omega_T \\ \Delta &= \left\{ (1 - \beta^2)(\gamma^2 - \beta^2) - \gamma^2 \beta^2 \mu \right\}^2 \\ &\quad + 4(\xi_T \gamma \beta)^2 \left\{ 1 - (1 + \mu) \beta^2 \right\}^2 \\ \mu &= m_T / m_{si} \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、

$\mu$  : 質量比

式(2)に、TMDの最適設計法を適用すると、最適同調比と最適減衰比が得られる。種々の振動に対する最適同調比、最適減衰比は、表3.4-1に示されている。表3.4-1より調和外力振動に対する、最適同調比、最適減衰比が得られる。

$$\text{最適同調比} \quad \gamma = \omega_T / \omega_{si} = \frac{1}{1 + \mu} \quad (4)$$

$$\text{最適減衰比} \quad \xi_T = \sqrt{\frac{3 \cdot \mu}{8(1 + \mu)}} \quad (5)$$

表 3.4-1 各種振動に対する最適TMDと制振効果(付加減衰)

	調和外力振動	調和地盤振動	自由振動	自励振動	定常不規則強制振動
最適化基準	応答曲線の固定点を等しく最大点にする	増幅率曲線の固定点を等しく最大点にする	2つのモード減衰を等しく最大にする	2つのモードがともに安定でありうる負減衰を最大にする	構造物の2乗平均応答を最小にする
$\gamma_{opt}$	$\frac{1}{1 + \mu}$	$\frac{1}{\sqrt{1 + \mu}}$	$\frac{1}{1 + \mu}$	$\frac{1}{\sqrt{1 + \mu}}$	$\frac{\sqrt{1 + \mu/2}}{1 + \mu}$
$(\xi_T)_{opt}$	$\sqrt{\frac{3 \cdot \mu}{8(1 + \mu)}}$	$\sqrt{\frac{3 \cdot \mu}{8(1 + \mu/2)}}$	$\sqrt{\frac{\mu}{1 + \mu}}$	$\frac{1}{2} \sqrt{\frac{\mu}{1 + \mu/2}}$	$\frac{1}{2} \sqrt{\frac{\mu(1 + 3\mu/4)}{1 + 3\mu/2}}$
$\xi_{eff}$	$\frac{1}{2} \sqrt{\frac{\mu/2}{1 + \mu/2}}$	$\frac{1}{2} \sqrt{\frac{\mu(1 + \mu)}{2}}$	$\frac{1}{2} \sqrt{\frac{\mu}{1 - \mu/4}}$	$\frac{1}{2} \sqrt{\frac{\mu(1 + \mu)}{1 + \mu/2}}$	$\frac{1}{4} \sqrt{\frac{\mu(1 + \mu)}{1 + 3\mu/4}}$

式 (4), (5) によって最適な状態に調整された TMD の最大動的応答倍率は、

$$(x_{si}/x_{ssti})_{\max} = \sqrt{\frac{2}{1+\mu}} \quad (6)$$

となる。TMD による付加減衰は

$$\delta_T = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\mu}{2+\mu}} \quad (7)$$

となる。式 (3), (4), (5) より所要の TMD の諸元は、以下の通りとなる。

$$\begin{aligned} \text{質量} & \quad m_T = \mu m_{si} \\ \text{ばね定数} & \quad k_T = \frac{m_T \omega_{si}^2}{(1+\mu)^2} \\ \text{減衰係数} & \quad C_T = 2h_T \omega_T m_d \end{aligned} \quad (8)$$

図 3.4-5 は TMD の質量比および同調比を一定値 ( $\mu=0.01$ ,  $\gamma=1$ ) に選び、TMD の減衰比  $\xi_T$  をパラメータに振動数応答曲線の変化を示したものである。特徴的なことは、減衰比によらず、応答曲線が必ず通る点が 2 点あることであり、この点は固定点と呼ばれる。ここで、 $\beta$  は外力振動数比、 $x_{si}/x_{ssti}$  は応答倍率を表す。

この 2 つの固定点を与える外力振動数比  $\beta$  は (2) 式の分母と分子で  $\xi_T^2$  の係数と、 $\xi_T^2$  とは独立な項との比が等しくなる条件から求められ、(9) 式を得る。

$$\left(1 + \frac{\mu}{2}\right) \beta^4 - (1 + \gamma^2 + \gamma^2 \mu) \beta^2 + \gamma^2 = 0 \quad (9)$$

また、このときの固定点での応答は、 $\xi_T = \infty$  の場合を考えれば (10) 式のように求められる。

$$x_{si}/x_{ssti} = \left| \frac{1}{1 - (1+\mu)\beta^2} \right| \quad (10)$$

図 3.4-6 は TMD の質量比および減衰比を一定値 ( $\mu=0.01$ ,  $\xi_T=0.0603$ ) に選び、同調比  $\gamma$  をパラメータに振動曲線をプロットしたものである。応答曲線のピーク値が同調比によって変化し、同調比を適切に選ぶことで共振応答を小さくできることがわかる。

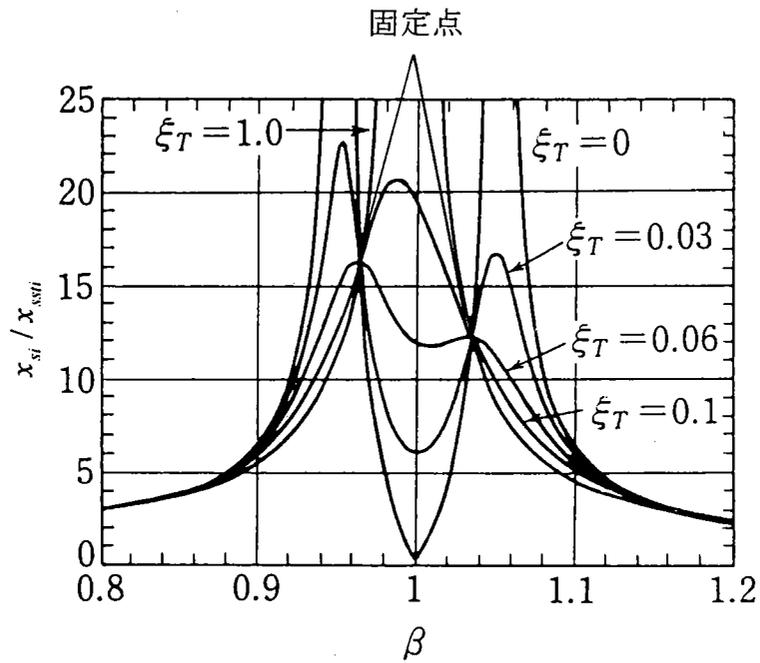


図 3.4-5 TMD付き構造物の振動応答曲線 (減衰比の影響)

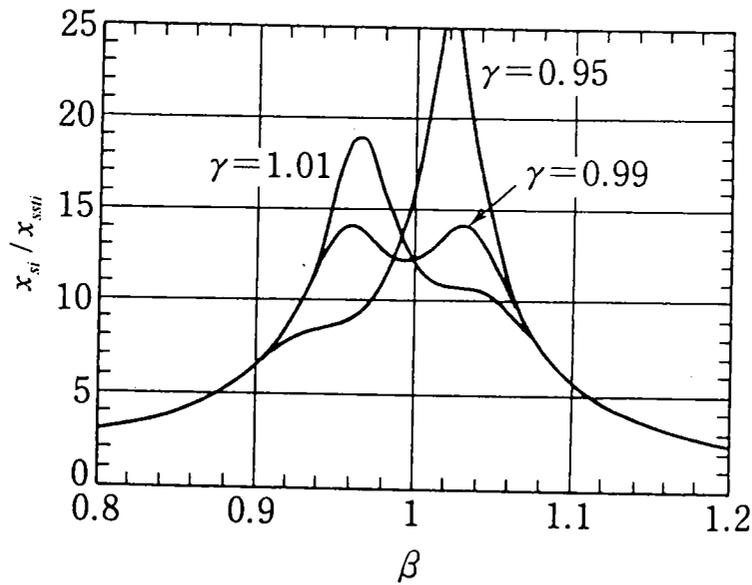


図 3.4-6 TMD付き構造物の振動応答曲線 (同調比の影響)

TMDの設計法としては、図 3.4-4 で示した固定点の高さが等しく極大になることを最適化の条件として設計する。

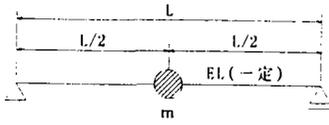
橋梁等の実際に用いられているTMDの設計では、TMDの質量、ばね、ダンパーを以下のように設定している。

質量：TMDの質量を大きくすれば、大きな制振効果が期待できるが、死荷重も増加することから、一般的には質量比 $\mu$ として1～5%程度が採用されている。

ばね：TMDを支持するばねは、TMDの固有振動数が最適になるように設定している。但し、質量比 $\mu$ が小さければ、主振動系の固有振動数に同調させても大差無いと考えられる。

減衰比：TMDの減衰は、TMD自体の振幅を抑えることと、応答倍率曲線を滑らかにすることにより、TMDと主振動系の同調誤差が生じても著しく制振効果が低下しないようにするために、最適減衰よりも大きめに設定することが多い。

## 2) TMDの計算例



左図に示すように、曲げ剛性 $EI$ が一定で、スパン $L$ の単純梁の中央に質量 $m$ の質点がある場合に、梁中央にTMDを設置したとする。梁の1次モード質量に対するTMDの質量比を1%として最適TMDを設計する。ただし、梁そのものの減衰は小さいものとして無視する。

バネ定数 $k$ は外力 $P$ が梁の中央に作用したときのたわみ $u$ から求められる。すなわち、

$$u = \frac{PL^3}{48EI} \quad \text{の関係から、} \quad k = \frac{P}{u} = \frac{48EI}{L^3} \quad \text{となる}$$

従って、運動の方程式は、

$$m\ddot{u} + \frac{48EI}{L^3}u = 0$$

となる。また、 $\ddot{u} + \omega_0^2 u = 0$ とおくと、以下のように固有円振動数 $\omega$ 、固有振動数 $f$ が得られる。

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{48EI}{mL^3}} \quad , \quad f = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{48EI}{mL^3}}$$

調和外力振動に対するTMDの最適同調比、および最適減衰比は、表3.4-2(表3.4-1を再掲)に与えられており[1]、これに質量比 $\mu = 0.01$ を代入すれば、

$$\gamma_{opt} = \frac{1}{1+\mu} = \frac{1}{1+0.01} = 0.9901$$

$$(\xi_T)_{opt} = \sqrt{\frac{3}{8} \cdot \frac{\mu}{1+\mu}} = \sqrt{\frac{3}{8} \times \frac{1}{1+0.01}} = 0.06093$$

これらの無次元最適パラメータからTMDの質量 $m_T$ 、バネ定数 $k_T$ 、減衰係数 $c_T$ は以下のように決定される。

$$m_T = \mu M = 0.01 \times m = 0.01m$$

$$k_T = (\gamma_{opt} \omega_0)^2 m_T = \left(0.9901 \times \sqrt{\frac{k}{m}}\right)^2 \times 0.01m = 0.009901k$$

$$\begin{aligned} c_T &= 2m_T \omega_T (\xi_T)_{opt} = 2m_T \sqrt{\frac{k_T}{m_T}} m_T = 2m_T (\gamma_{opt} \omega_0) m_T \\ &= 2 \times 0.01m \times 0.9901 \times \sqrt{\frac{k}{m}} \times 0.06093 = 0.001207 \sqrt{mk} \end{aligned}$$

なお、この最適TMDがもたらす有効付加減衰比は表3.4-2より、

$$\xi_{eff} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\mu/2}{1+\mu/2}} = \frac{1}{2} \times \sqrt{\frac{0.01/2}{1.005}} = 0.0353$$

表 3.4-2 各種振動に対する最適TMDと制振効果 (付加減衰)

	調和外力振動	調和地盤振動	自由振動	自励振動	定常不規則強制振動
最適化基準	応答曲線の固定点を等しく最大点にする	増幅率曲線の固定点を等しく最大点にする	2つのモード減衰を等しく最大にする	2つのモードがともに安定でありうる負減衰を最大にする	構造物の2乗平均応答を最小にする
$\gamma_{opt}$	$\frac{1}{1+\mu}$	$\frac{1}{\sqrt{1+\mu}}$	$\frac{1}{1+\mu}$	$\frac{1}{\sqrt{1+\mu}}$	$\frac{\sqrt{1+\mu/2}}{1+\mu}$
$(\xi_T)_{opt}$	$\sqrt{\frac{3}{8} \cdot \frac{\mu}{1+\mu}}$	$\sqrt{\frac{3}{8} \cdot \frac{\mu}{1+\mu/2}}$	$\sqrt{\frac{\mu}{1+\mu}}$	$\frac{1}{2} \sqrt{\frac{\mu}{1+\mu/2}}$	$\frac{1}{2} \sqrt{\frac{\mu(1+3\mu/4)}{1+3\mu/2}}$
$\xi_{eff}$	$\frac{1}{2} \sqrt{\frac{\mu/2}{1+\mu/2}}$	$\frac{1}{2} \sqrt{\frac{\mu(1+\mu)}{2}}$	$\frac{1}{2} \sqrt{\frac{\mu}{1-\mu/4}}$	$\frac{1}{2} \sqrt{\frac{\mu(1+\mu)}{1+\mu/2}}$	$\frac{1}{4} \sqrt{\frac{\mu(1+\mu)}{1+3\mu/4}}$

風による振動で問題となる渦励振およびガスト応答はそれぞれ次の振動に分類される。

渦励振：自励振動

ガスト応答：定常不規則強制振動

### 3) TMDの設置実績

TMDの国内における橋梁に対する設置実績を調べ、一覧表としてまとめた。調査は以下の項目に対して行った。

- ・橋梁名
- ・適用部位
- ・適用期間
- ・対象とした振動の種類
- ・振幅
- ・構造減衰
- ・振動系の工夫等

橋梁名	構造諸元			適用部位	適用期間	対象とした振動の種類			振 幅		対数減衰率		振動系の工夫・備考
	橋種	支間長	塔高			振動現象	モード次数	振動数	無制振時	制振時	無制振時	制振時	
岩黒島橋	斜張橋		152.30m	主塔	架設時	渦励振	面外曲げ1次	0.20Hz			0.05	0.23	重錘を半径Rのレール上で振り子の原理により水平振動させるため、パネ吊り機構が不要。重錘が揺動する際の軸回転により、羽がドラム内の粘性体を攪拌することにより減衰を得る。
							面外ねじれ1次	0.56Hz			0.05	0.12	
							面内曲げ1次	0.62Hz			0.05	0.1	
櫃石島橋	斜張橋		143.46m	主塔	架設時	渦励振	面外曲げ1次	0.199Hz			0.014	0.021	
							面外ねじれ1次	0.495Hz			~	~	
							面内曲げ1次	0.641Hz			0.098	0.153	
東神戸大橋	斜張橋		145.30m	主塔	架設時	渦励振	面外曲げ1次	0.25Hz	±150mm	±50mm	0.02~0.04	0.09	振り子式TMDであり、重錘の変位量を抑えるため、質量、減衰の設定を大きめに設計している。
							面外曲げ2次	0.52Hz	±292mm				
							ねじれ1次	0.58Hz	±232mm				
来島大橋	吊橋		159.95m	主塔(SP)	架設時	渦励振	面外曲げ2次	1.45Hz	±293mm			0.081	振り子式TMD、AMD(面外曲げ1次用)との併用
鶴見つばさ橋	斜張橋		180.00m	主塔	架設時	渦励振	面外曲げ1次	0.985Hz			0.02	0.091	
関西空港取付橋(鉄道)	3径間連続鋼箱桁橋	109m		桁	架設時完成系	渦励振	鉛直1次	1.283Hz			0.12	0.26	キャンチレバー方式で支点部、キャンチレバー、オイルダンパー、コイルパネ及びウェイト(振動体)で構成され支点部を中心に上下に振動する。振動数はウェイトを移動させることで無段階に調節が可能。1次、2次用のダンパーが側径間に、3次用のダンパーが中央径間に設置されている。振動数および対数減衰率は架設時の値である。
							鉛直2次	1.507Hz			0.02	0.12	
							鉛直3次	2.216Hz			0.06	0.12	
関西空港取付橋(東行道路)	3径間連続鋼箱桁橋	109m		桁	架設時完成時	渦励振	鉛直1次	0.977Hz			0.02	0.36	
							鉛直2次	1.255Hz			0.04	0.16	
							鉛直3次	1.701Hz			0.05	0.19	
関西空港取付橋(西行道路)	3径間連続鋼箱桁橋	109m		桁	架設時完成時	渦励振	鉛直1次	0.976Hz			0.01	0.27	
							鉛直2次	1.213Hz			0.03	0.21	
							鉛直3次	1.708Hz			0.05	0.15	
秩父橋	斜張橋	153m		桁	架設中	渦励振	鉛直1次	0.47Hz			0.016	0.19	片持ち梁ねじりパネ式
横浜ベイブリッジ	斜張橋		127m	塔	架設中	ギャロッピング		0.6Hz	10.9mm	10.9mm	0.004	0.066	塔高109m以降に対して、その架設高さに応じて3段階に移設して使用する。振動数は、0.799Hz~0.399Hzまで調節が可能である。表中の数値は、塔高127mと172mでの実橋試験での結果である
			172m					0.45Hz	30.0mm	18.8mm	0.01	0.05	
荒津大橋	斜張橋		60m	塔	完成系	渦励振 ギャロッピング	面外1次	0.44Hz			0.009	0.12	

橋梁名	構造諸元			適用部位	適用期間	対象とした振動の種類			振 幅		対数減衰率		振動系の工夫・備考	
	橋種	支間長	塔高			振動現象	モード次数	振動数	無制振時	制振時	無制振時	制振時		
花畔大橋	斜張橋		45.00m	主塔	完成時	渦励振	面内曲げ1次	0.99Hz	±350mm	±20mm	0.013	0.17	バネ付き振り子。オイルダンパーは、寒冷地仕様となっている。	
梅沢橋				桁	完成時	渦励振								
明石海峡大橋	吊橋			主塔	架設時 ~ 完成時									
ふなで橋			34.00m	主塔	完成時	渦励振	面外曲げ1次	0.835Hz			0.046	0.28		
名港西大橋	斜張橋		122.00m	主塔	架設時	渦励振	面外曲げ1次	0.326Hz			0.0078	0.17	粘弾性体のせん断変形による。減衰量は積層する粘弾性体の個数によって調節する。粘弾性体は温度依存性がある。	
東京湾横断道	3径間連続鋼箱桁			桁	完成時	渦励振								

## 参考文献

- [1] 山口宏樹：構造振動・制御 共立出版