

風による橋梁の振動と対策

住友重機械工業(株)

風間 浩二

【風によって橋梁に発生する振動】 ～どのようなことが起きるのか～

タコマ橋の落橋(1940)は風による振動の顕著な例であるが、風外力への応答は橋全体の振動から高欄部材の振動に至るまで対象構造物毎に種々の形態で顕在化する。ここでは、風によって橋梁に発生する主な現象の分類と概略を表1に示す。

表1 風により構造物の生ずる現象の種類(「橋と風」より)

静的現象 (風から受ける 力の問題)	風荷重による応答	定常(静的)空気力の作用に伴う静的な変形 や転倒・滑動
	ダイバージェンス、座屈	定常空気力の作用に伴う静的不安定
動的現象 (風による 振動の問題)	渦励振	物体からの渦生成に伴う非定常空気力の作用 によりもたらされる振動
	パフティング	接近流の乱れに伴う変動空気力の作用により もたらされる強制振動
	曲げ捻れフラッタ (連成フラッタ)	物体の運動の流体系へのフィードバックに よって生ずる。非定常空気力の作用に伴う自己 励起型の振動
	捻れフラッタ (捻れ1自由度フラッタ)	
	キャロピング (曲げ1自由度フラッタ)	
	その他の 振動	レイン バイレーション
ウエイク中の振動		物体の後流の影響により生ずる種々の振動

【振動発生 の 推定】 ～橋の諸元から振動発生 の可能性を推定する～

どのような規模・形式の橋梁にどのような耐風問題が発生するかについての予測が重要である。現行の道路橋耐風設計便覧による判定基準を表2に示す。

表2 動的耐風設計の必要性の判定(道路橋耐風設計便覧より)

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	
	充腹桁	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 $Iu < 0.15$ かつ 鋼橋	たわみ発散振動
		閉断面	$L \times U_d / B > 200$ かつ $Iu < 0.20$	渦励振
			$L \times U_d / B > 520$	ねじれ発散振動
	鋼桁橋	プレートガーダー 箱桁	$L \times U_d / B > 330$ かつ $B/d < 5$ かつ $Iu < 0.15$	たわみ発散振動
$L \times U_d / B > 200$ かつ $Iu < 0.20$			たわみ渦励振	

L : 支間長 (m), B : 桁幅 (m), d : 桁高さ (m), U_d : 設計風速 (m/s), Iu : 気流の乱れ強さ

【制振対策】 ～具体的な制振方法～

風による有意な振動が予見された場合、何らかの対策によって振動を低減し、設計上問題の無い範囲に制振することが必要となる。表3に制振対策の例を示す。

表3 橋桁の制振対策例

空気力学的対策	フラッター	グレーチング、フェアリング、鉛直スタビライザー、センターバリア等の設置
	ギャロッピング	スカート、水平板の設置
	渦励振	フェアリング、フラップ、デフレクター、スポイラーの設置
構造的力学的対策	質量増加	桁内へのコンクリート充填等
	剛性増加	部分的に剛性の高い桁を組み合わせる 側径間にベントを設置
	減衰増加	チューンドマスダンパー (TMD) の設置

【耐風設計の基本的な流れ】

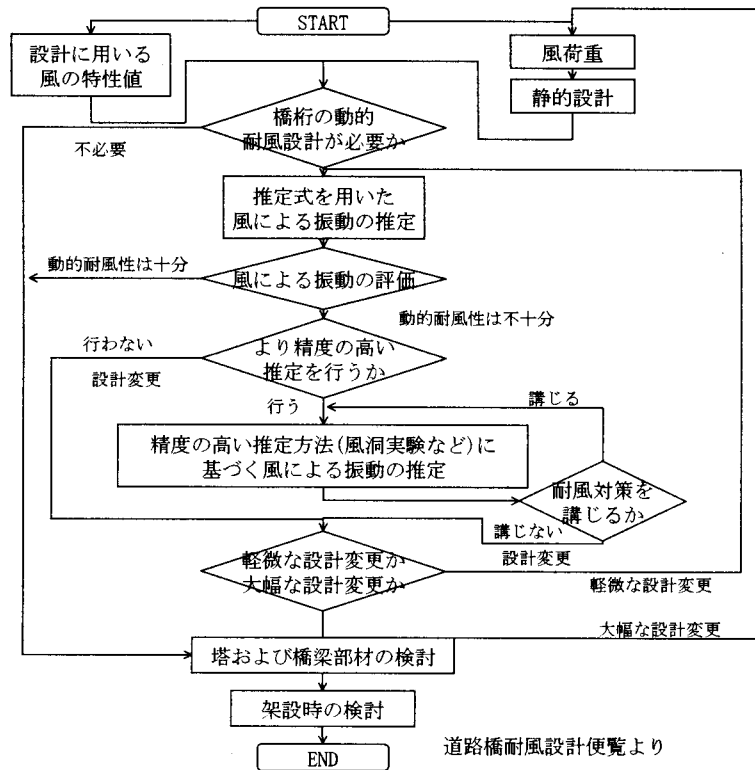


図1 耐風設計の流れ

【参考文献】

- ・土木学会：橋梁の耐風設計～基準と最近の進歩～，丸善（2003）
- ・土木学会・本四技術調査委員会：耐風設計指針(1967)および同解説
- ・岡内，伊藤，宮田：耐風構造，丸善（1977）
- ・日本鋼構造協会編：構造物の耐風工学，東京電機大学出版局（1997）
- ・日本鋼構造協会：テクニカルレポート N0.59 構造物の耐風設計の現状と展望(2004)
- ・日本道路協会：道路橋示方書同解説，丸善（2002）
- ・日本道路協会：道路橋耐風設計便覧，丸善（1991）
- ・山田 均：耐風工学アプローチ，建設図書（1995）
- ・「風と橋」編集グループ：風と橋，コスミック（1990）
- ・橋梁と基礎特集号「風と橋」，建設図書（1989.8）
- ・本州四国連絡橋公団：本州四国連絡橋耐風設計基準(1976)・同解説
- ・本州四国連絡橋公団：本州四国連絡橋風洞試験要領(1980)・同解説

土木学会構造工学委員会「耐風工学連絡小委員会」
土木学会鋼構造委員会「継続教育推進小委員会」

土木学会「実務者のための耐風設計入門」

風による橋梁の振動と対策(1)

住友重機械工業(株)
風間 浩二

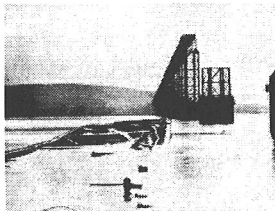
<概要>

何が起こるのか・・・
何故、揺れるのか・・・
振動の推定方法・・・
どうやって抑えるのか・・・
大切なポイント

「風による橋梁の振動と対策」の前半部として、
風による振動の基本的な考え方を示します。

耐風検討の必要性

～風による被害～

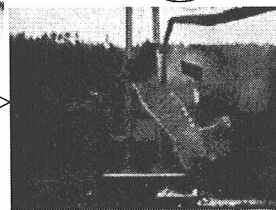


1879年 スコットランド
Tay 橋の落橋

静的風荷重の
重要性の認識

1940年 米国ワシントン州
Tacoma橋の落橋

風の動的作用
の重要性認識



風により構造物に発生する現象

静的現象 (風から受ける 力の問題)	風荷重による応答	定常(静的)空気力の作用に伴う静的な変形 や転倒・滑動
	ダイバージェンス、座屈	定常空気力の作用に伴う静的不安定
動的現象 (風による 振動の問題)	渦励振	物体からの渦生成に伴う非定常空気力の作用 によりもたらされる振動
	ハフティング	接近流の乱れに伴う変動空気力の作用により もたらされる強制振動
	曲げ捻れフラッタ (連成フラッタ)	物体の運動の流体系へのフィードバックによっ て生ずる。非定常空気力の作用に伴う自己励 起型の振動
	捻れフラッタ (捻れ1自由度フラッタ)	
	キャロピング (曲げ1自由度フラッタ)	
その他の 振動	レイン ハイレゾジョン ウエイク中の振動	斜張橋ケーブルなど傾斜円柱に発生する振動 物体の後流の影響により生ずる種々の振動

静的作用

風による作用で真に「静的」なものはない
(空気力は常に変動している, aerodynamic)
→ 「静的」(時間平均) 荷重として扱っても
現象を正しく扱えるものを便宜上「静的作用」と
呼んでいる

- 風荷重による変形と応力
 - 不安定現象
横座屈
ダイバージェンス
- ←すべての構造物で
考慮する必要あり
←スパン1,000m超級の
長大橋梁のみ

風荷重の評価

<道路橋示方書> プレート・ガーターの単位長さあたりの風荷重 w (kN/m)

$$1 \leq B/D \leq 8 \text{ の場合} \\ W = [4.0 - 0.2(B/D)] D \geq 6.0$$

$$8 \leq B/D \text{ の場合} \\ W = 2.4D \geq 6.0$$

ここに、 B : 橋の総幅(m)、 D : 橋の総高(m)

<本四基準> 橋桁の単位長さあたりの風荷重 P

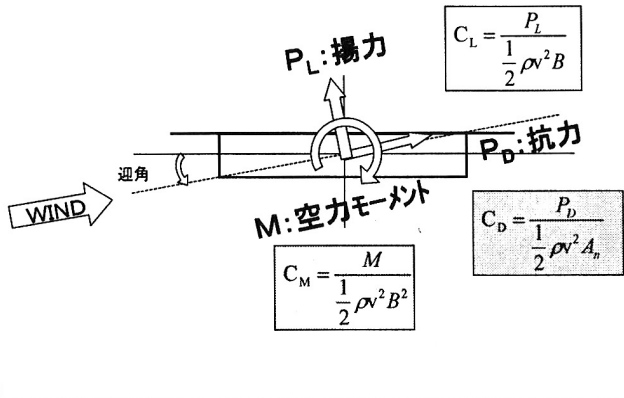
$$P = \mu_2 (1/2) \rho U_z^2 C_D A$$

$$U_z = \mu_1 U_{10}$$

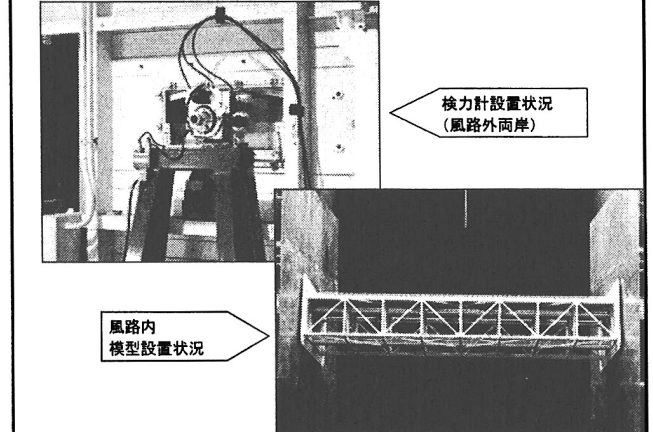
μ_1 : 高度補正係数 U_z : 設計基準風速

μ_2 : 風速変動及び構造特性による増幅効果に関する補正係数

風荷重計測(三分力)試験



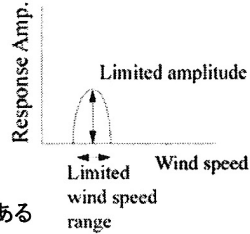
三分力試験(例)



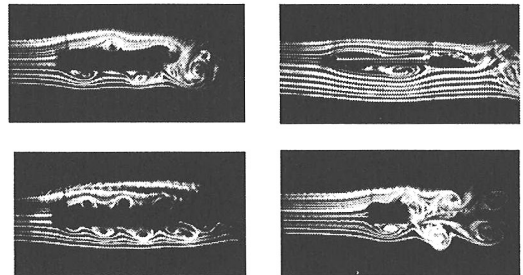
渦励振

風が構造物に作用
 ↓
 構造物周辺に周期的な渦が発生
 ↓
 渦の発生に伴う周期的な力と共振 = 渦励振
 (実際のメカニズムは複雑)

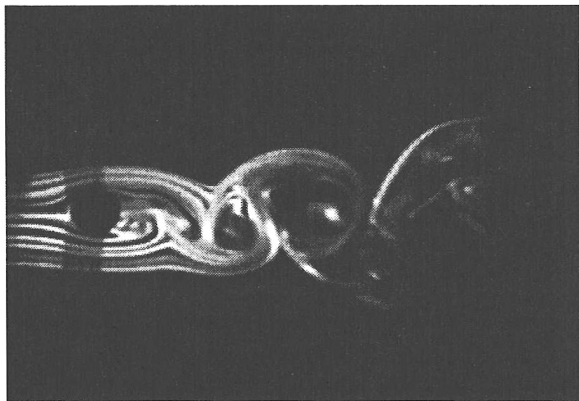
- ・限定振幅
 - ・限定風速域
 - ・比較的 low 風速で発生
 - ・減衰の増加や気流の乱れで低減
- ↓
小振幅であれば発現を許す設計もある



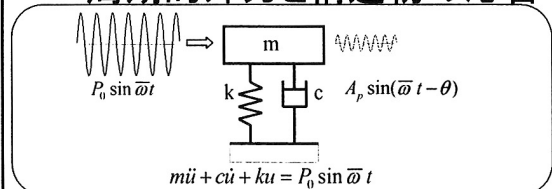
物体まわりに発生する渦の例



物体まわりに発生する渦の例



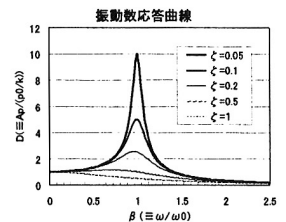
周期的外力と構造物の応答



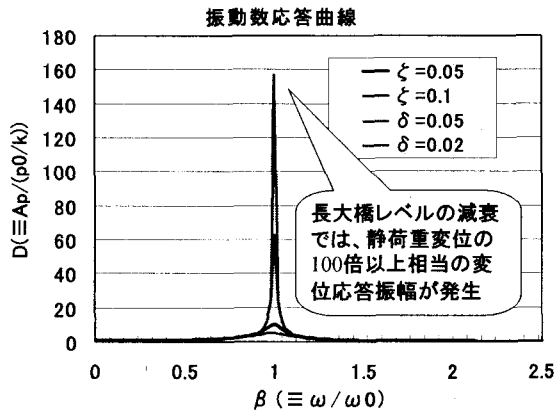
$$\ddot{u} + 2\xi\omega u + \omega^2 u = \frac{P_0}{m} \sin \omega t$$

$$\beta = \frac{\bar{\omega}}{\omega}$$

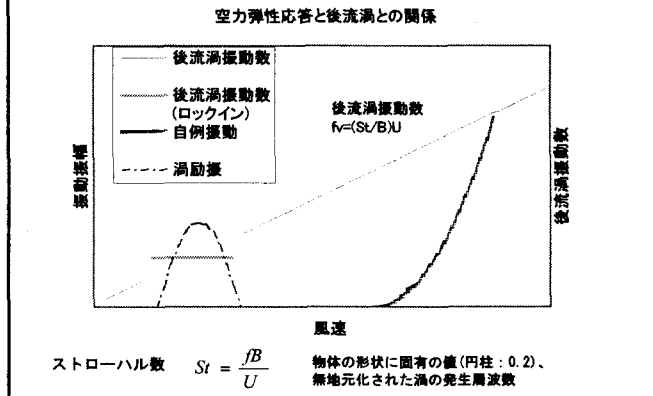
$$D = \frac{A_r}{p_0/k} = \frac{1}{\sqrt{(1-\beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2}}$$



構造減衰の低い構造物の振動応答



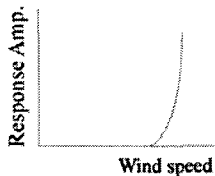
ストローハル数と渦励振



発散振動

構造物が風の中で振動
 ↓
 振動に同期した周期的な空気力が作用
 ↓
 ある風速(=発現風速)以上で、空気力が振動をさらに増大させるように作用=自励振動

- ・ギャロッピング: たわみ
- ・フラッター: ねじれ
- ・連成フラッター: たわみとねじれ (と水平)

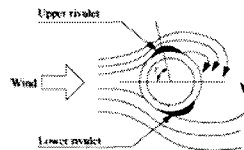


発現風速を超えると振幅が急増して危険
 → 発現風速が設計風速以下にならないようにする

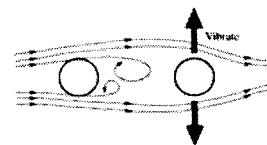
ケーブルの振動

ケーブル: 非常にフレキシブルで低減衰
 ↓
 振動しやすい

レインバイブレーション
 (雨による断面形状変化)



ウェイクギャロッピング
 (複数ケーブル)



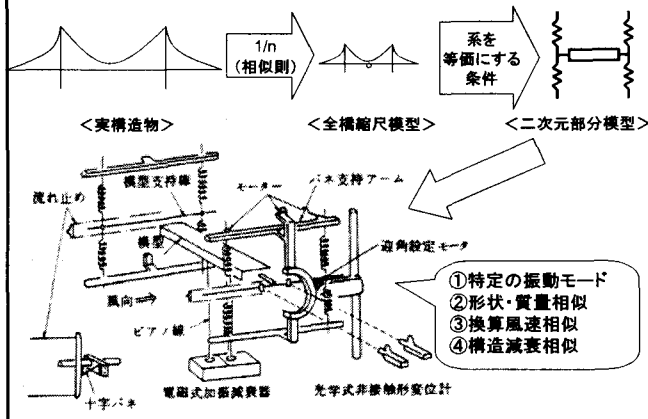
動的耐風設計の必要性の判定

(現行道路橋耐風設計便覧より)

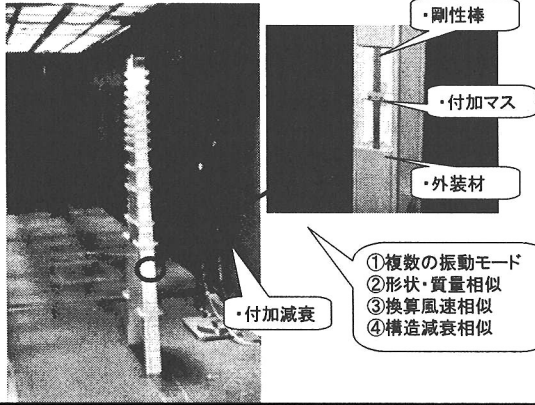
構種	動的耐風設計が必要な条件	発現の可能性のある現象	
吊橋・斜張橋	トラス	$L \times Ud/B > 350$	ねじれ発散振動
	開放面	$L \times Ud/B > 350$	ねじれ発散振動
		$L \times Ud/B > 330$ かつ $B/d < 5$ かつ $Iu < 0.15$ かつ 鋼橋	たわみ発散振動
	閉断面	$L \times Ud/B > 200$ かつ $Iu < 0.20$	渦励振
$L \times Ud/B > 520$		ねじれ発散振動	
鋼桁橋	プレートガーダー箱桁	$L \times Ud/B > 330$ かつ $B/d < 5$ かつ $Iu < 0.15$	たわみ発散振動
		$L \times Ud/B > 200$ かつ $Iu < 0.20$	渦励振
	プレートガーダー箱桁	$L \times Ud/B > 330$ かつ $B/d < 5$ かつ $Iu < 0.15$	たわみ発散振動
		$L \times Ud/B > 200$ かつ $Iu < 0.20$	たわみ渦励振

L : 支間長 (m)、 B : 桁幅 (m)、 d : 桁高さ (m)、
 Ud : 設計風速 (m/s)、 Iu : 気流の乱れ強さ

部分模型振動試験(ばね吊り試験)



3次元弾性模型による風洞試験



換算風速と風速倍率

$$\text{換算風速 } U_r = \frac{U}{fB}$$

物体が1周期振動する間に流体が物体の何倍進むかを表す



相似則: 「換算風速」を実機と模型(実験室)で一致させる

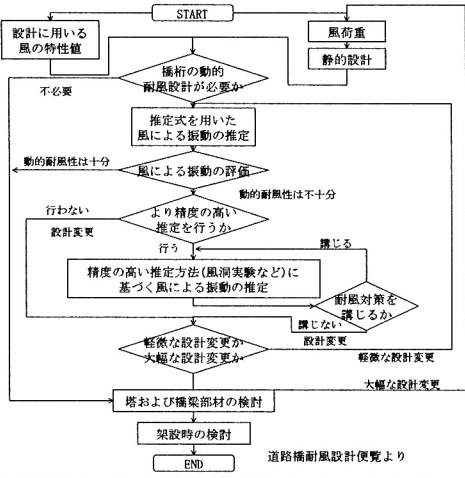
$$\frac{U_p}{f_p B_p} = \frac{U_m}{f_m B_m}$$

風速の換算(実機 ⇔ 実験室)

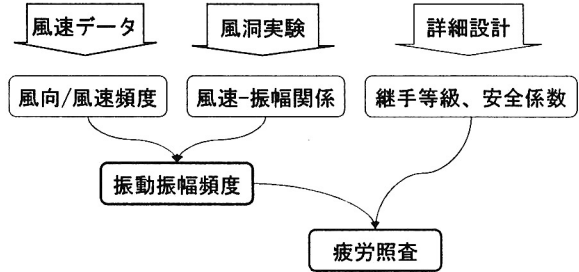
$$\frac{U_p}{U_m} = \frac{f_p B_p}{f_m B_m} = \frac{f_p}{f_m} n$$

実機振動数 (Hz)	模型振動数 (Hz)	縮尺 (1/n)	風速倍率 (=換算風速/実機風速)
2	10	0.05	4

耐風設計の流れ



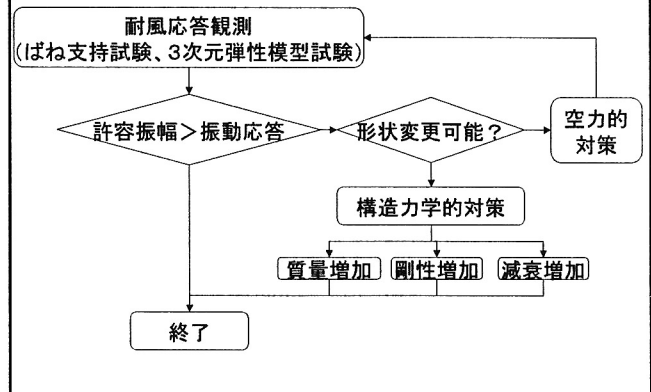
疲労照査



具体的な制振対策例

空気力学的対策	フラッター	グレイチング、フェアリング、鉛直スタビライザー、センターハブリヤ等の設置
	ギャロピング	スカート、水平板の設置
	渦励振	フェアリング、フラップ、テールカッター、スロイターの設置
構造力学的対策	質量増加	桁内へのコンクリート充填等
	剛性増加	部分的に剛性の高い桁を組み合わせる側径間にベントを設置
	減衰増加	チューンドマスダンパー (TMD) の設置

振動応答の計測と振動への対応



空気力学的制振対策の例

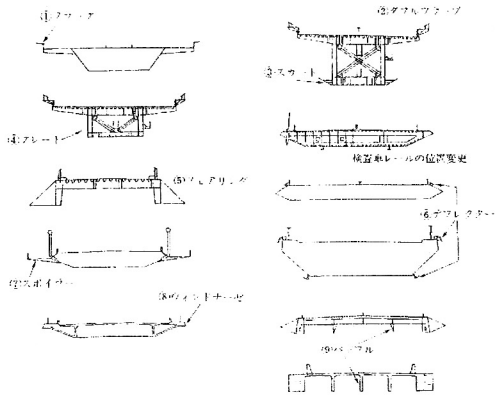
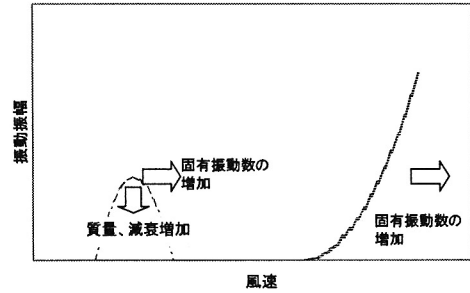


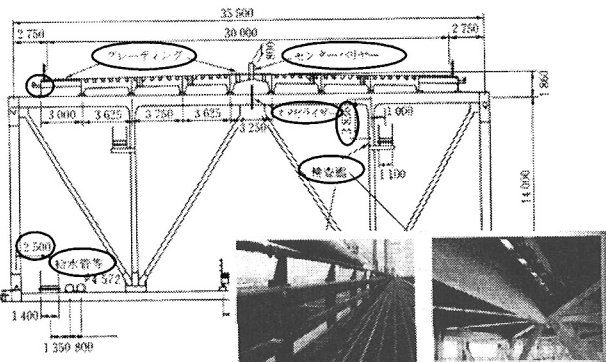
図1-30 渦脱落の発生した箱桁断面の例

制振対策効果の基本

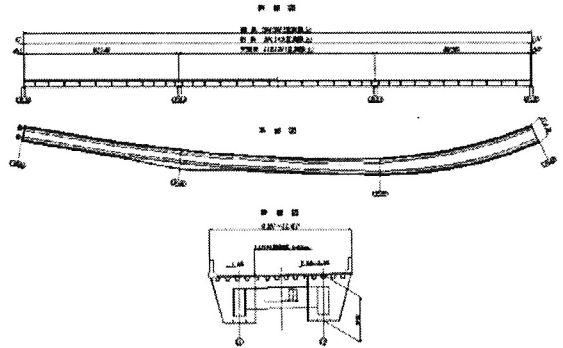
空力弾性応答と構造対策の効果



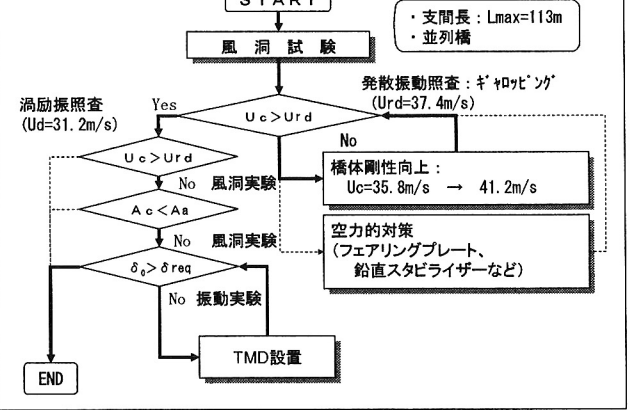
耐風安定化対策事例 (明石海峡大橋トラス桁)



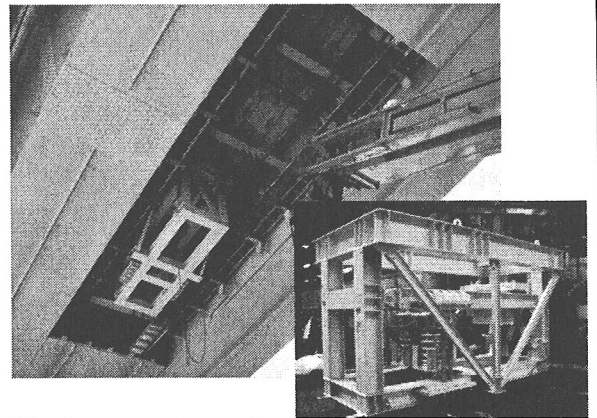
耐風設計の事例：B高架橋



B橋 耐風設計フロー



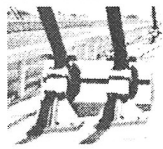
TMDの設置例



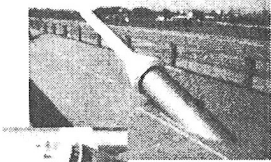
ケーブルの振動対策



オイルギャップ(荒津大橋)



粘性剪断ギャップ(幸魂大橋)



高減衰ゴムギャップ
(銀河大橋)



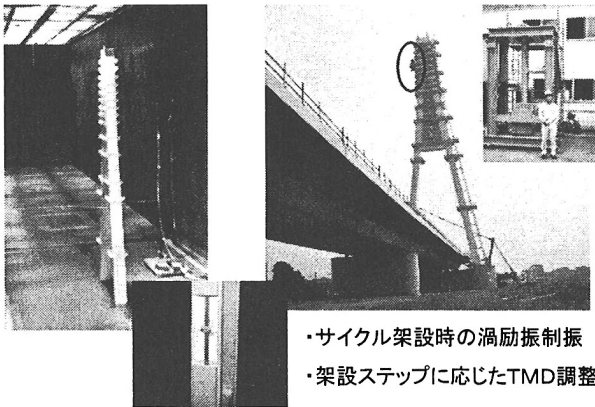
高減衰ゴムとオイルギャップの併用
(鶴見つばさ橋)

架設時の耐風検討

- 不安定な構造系
- 架設ステップ毎に構造系が変化
(架設ステップ毎に発生する現象/対策も変化)
- 架設機材の存在で空気力変化
(架設機材の最適化も必要)

架設計画の中で、
検討対象とする架設ステップの選定が重要

架設時の耐風検討



- ・サイクル架設時の渦励振制振
- ・架設ステップに応じたTMD調整

大切なポイント

参考文献

土木学会：橋梁の耐風設計～基準と最近の進歩～、丸善（2003）
 土木学会・本四技術調査委員会：耐風設計指針（1967）および同解説
 岡内、伊藤、宮田：耐風構造、丸善（1977）
 日本鋼構造協会編：構造物の耐風工学、東京電機大学出版局（1997）
 日本鋼構造協会：チカカルボト-HNO.59 構造物の耐風設計の現状と展望（2004）
 日本道路協会：道路橋示方書同解説、丸善（2002）
 日本道路協会：道路橋耐風設計便覧、丸善（1991）
 山田 均：耐風工学アプローチ、建設図書（1995）
 「風と橋」編集グループ：風と橋、コスミック（1990）
 橋梁と基礎特集号「風と橋」、建設図書（1989.8）
 本州四国連絡橋公団：本州四国連絡橋耐風設計基準（1976）・同解説
 本州四国連絡橋公団：本州四国連絡橋風洞試験要領（1980）・同解説