

2. 風が橋に及ぼす影響

構造物は風的作用によって時間平均的な荷重や、不規則変動荷重・周期的荷重といった振動や疲労の要因となる荷重を受ける。

第2章では、これら風的作用によって構造物に発生する振動等を分類し、順に概説する。説明の切り口としては、発生する振動を力学的に分類した場合の括り方として、2.1で「風による振動現象の概説」と題し風に起因する振動の一般論を紹介する。次に、設計側の切り口として、2.2で「部位別風による振動現象の概説」と題し、設計部位別に振動現象の概説を行う。さらに2.3では実際に風による振動が発生した事例を取りまとめた。2.4では、その他の影響として、走行車両に及ぼす風の影響の調査結果について取りまとめた。

2.1 風により発生する現象の概説

風が構造物に及ぼす影響は風圧による飛散,転倒,変形等及び変動空気力による構造物全体或いは部材の振動がある。被害の程度としても部材溶接部の破損から旧タコマ橋のような構造物全体の崩壊といった甚大なものまでである。また,構造上の問題の他に,気流の収斂などによる車両走行性への影響や風切り音などの音の作用も風により発生する現象の1つである。

本節では,風による作用を現象面から分類し,順に概説する。風による振動現象を発生機構に着目すると図 2.1-1 のように分類できる。

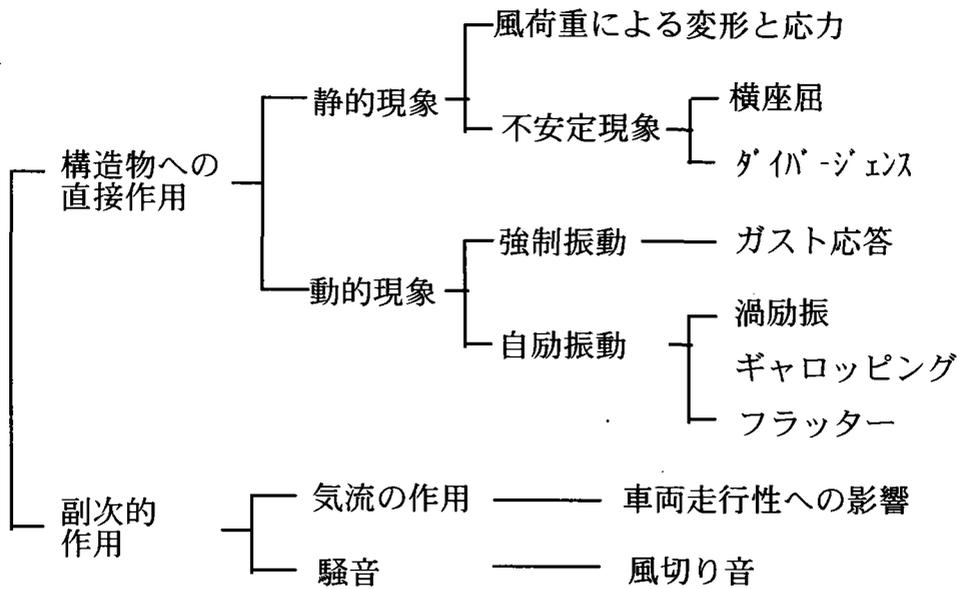


図 2.1-1 風による作用の分類

1) 静的作用

a) 風荷重により生じる静的な変形

構造物は,風荷重を受け変形し,部材にはこれによる応力が発生する。時間平均風速による静的な変形を風荷重による静的な変形と呼ぶ。静的空気力は風向方向の力である抗力,風向と直角で鉛直方向の揚力,そしてトルクに対応する空力モーメントの三成分で評価される。

静的空気力は,空気力を受ける側の形状や風との相対角度により大きさが変化するため,風荷重が支配的な荷重となる構造物では注意が必要である。

耐風設計では,後述のガスト応答を含め風荷重として扱っている。

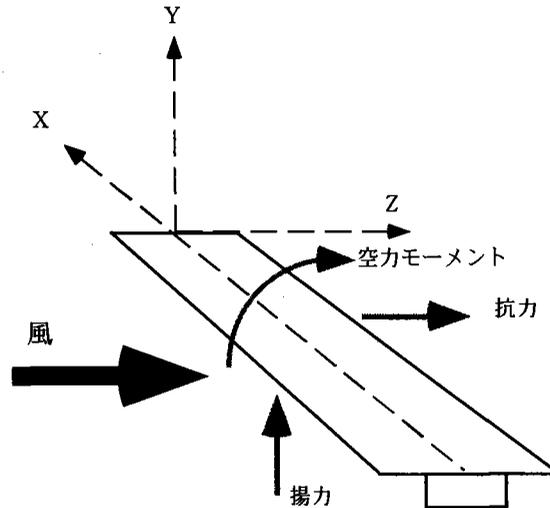


図 2.1-2 風により構造物に作用する空気力

b) 静的空気力による不安定現象 (横座屈, ガバ-ジエス)

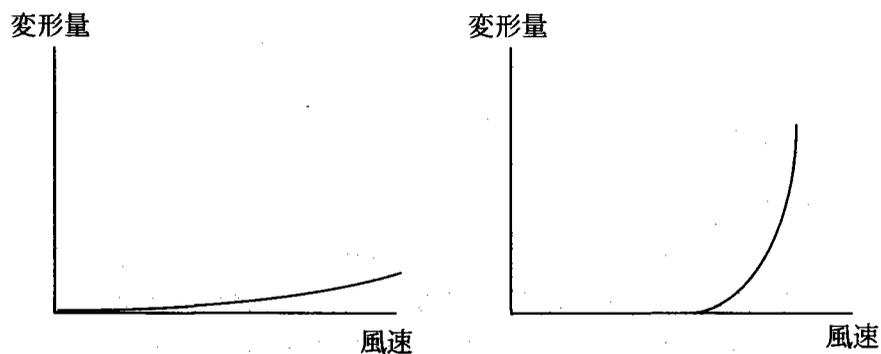
以下に上記2つの不安定現象の概略を示すが,両者ともに,通常的设计上の配慮をした場合には発生する可能性は低い。

・横座屈

2軸非対称の構造が強軸まわりの曲げを受ける場合,曲げモーメントが小さい間はその面内で撓んでいくが,曲げモーメントがある限界値に達すると急激に弱軸まわりの曲げと中心軸まわりのねじれが連成して変形が大きくなる。この現象を横座屈と呼ぶが,ある特定の構造特性と空気力との組み合わせにより発生する場合がある。

・ガバ-ジエス

風荷重によるねじれ変形が循環的に風荷重を増加させる場合,構造物はある風速を超えると急激に変形が大きくなる。これがガバ-ジエスである。



a) 静的な変形

b) 不安定現象

図 2.1-3 風による静的作用の概念図

2) 動的作用

a) ガスト応答

作用する風の乱れにより強制的に誘起される不規則な振動である。振動の大きさはほぼ風速の2乗に比例して発達する。また、気流の乱れ強さの影響は、応答振幅が増大することである。橋桁の場合はごく例外的に振動現象として初通過破壊、疲労照査が必要な例があるが、ガスト応答のうち支配的な水平たわみガスト応答の効果は、静的に作用する平均的な空気力の効果と併せてガスト応答係数として風荷重の一部に取り込まれている。鉛直たわみやねじれのガスト応答の寄与は水平たわみガスト応答や他の荷重の寄与に比べ通常は小さく、考慮する必要は無いことが多い。

b) 渦励振

桁の上下面や下流側縁端部で剥離した流れが桁の振動と同調して振動することにより発生する振動である。橋桁の渦励振についての共通した応答特性は、比較的低風速時の限られた風速範囲で鉛直たわみ或いはねじれ振動として発生し、ある振幅以上には発達しないことである。一般には、渦励振についての照査として、初通過破壊、使用性の問題、疲労破壊の有無といった照査項目が挙げられている。

c) 発散振動（ギャロッピング、フラッター）

ある限界風速を超えて一度発生すると、風速のわずかな増加により急激に振動応答が大きくなる発散的な振動である。詳細にはそれぞれ微妙に異なるものの、これらの現象を特徴づける空気力は、共通して、物体の振動変位と速度と風速により表現される自励的なものである。

発散振動が発生すると直ちに破壊が起こる危険性が高いため、これらの現象が設計風速内で発生しないことの確認がなされる。

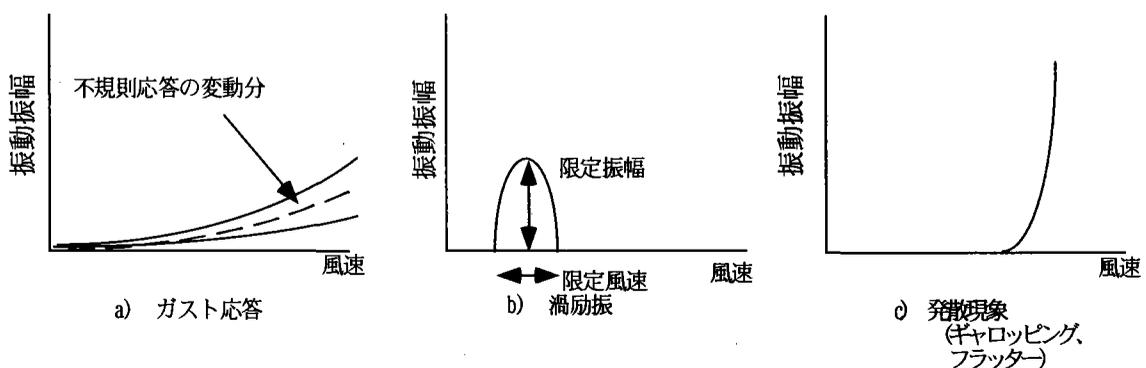


図 2.1-4 風による動的作用の概念図

2.2 橋梁部位別風による振動現象の概要

前述のように、風的作用により、橋梁は静的あるいは動的に様々な挙動を示す。ここでは、この作用を橋梁の部位別に取り上げ、それぞれの現象について、現象の概要を説明すると共に、構造物への影響を示した。さらに、制振対策を実施する際の基本的な考え方及び具体的な対策例を示す。

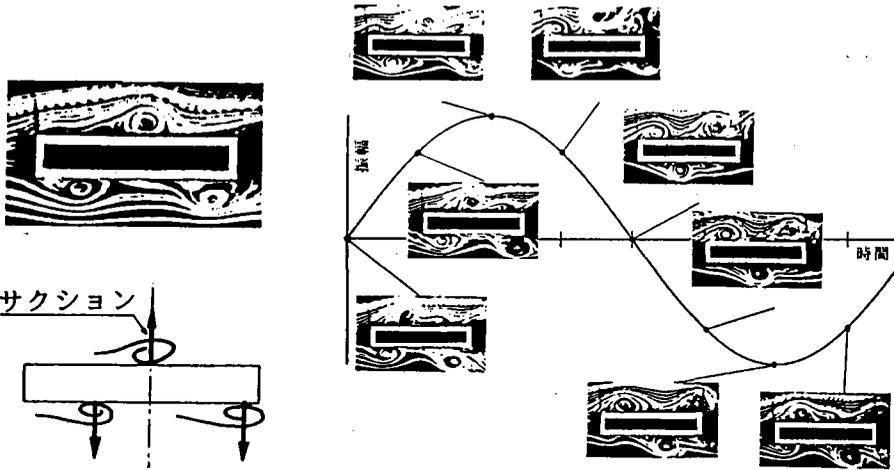
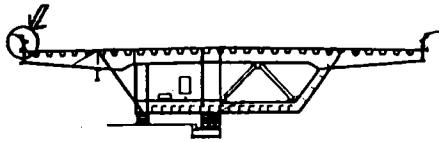
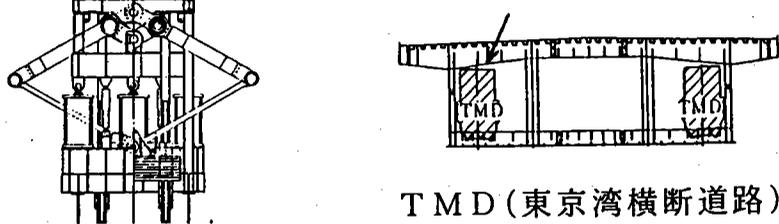
表 2.2-1 概説表一覧

| 番号 | 対象部分 | 風により発生する現象 |
|-----|------|-------------|
| A | 全体 | 風荷重 |
| B-1 | 桁 | 渦励振 |
| B-2 | 桁 | ギャロッピング |
| B-3 | 桁 | フラッター |
| B-4 | 桁 | バフティング |
| C-1 | 塔 | 渦励振 |
| C-2 | 塔 | ギャロッピング |
| D-1 | ケーブル | 渦励振 |
| D-2 | ケーブル | レインバイブレーション |
| D-3 | ケーブル | ウェークギャロッピング |
| E-1 | 吊材 | 渦励振 |
| E-2 | 付属物 | 渦励振 |

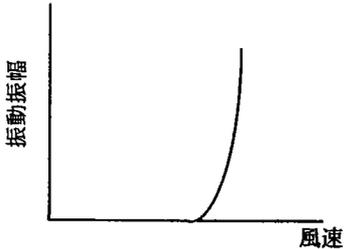
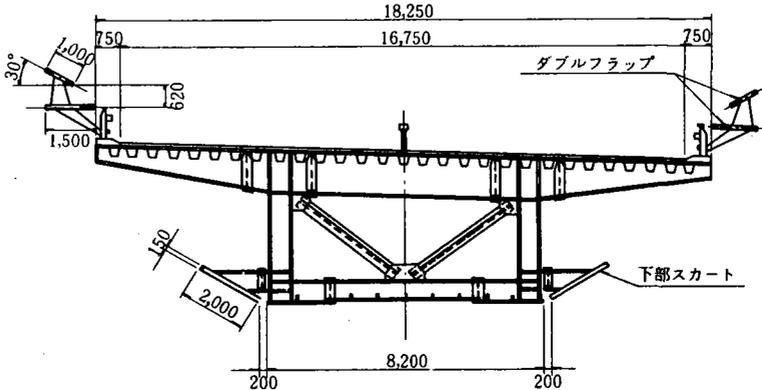
風による現象の分類と対策 (A)

| 対象箇所 | 全体 | |
|---------|--|--|
| 現象の名称 | 風荷重 | |
| 現象の説明 | <p>桁に作用する空気力は抗力，揚力，空気力（空力）モーメントからなり，それぞれ次式で定まる。</p> $P_D = (1/2) \cdot \rho \cdot U^2 \cdot C_D \cdot A$ $P_L = (1/2) \cdot \rho \cdot U^2 \cdot C_L \cdot B$ $M_T = (1/2) \cdot \rho \cdot U^2 \cdot C_M \cdot B^2$ <p> ρ : 空気密度 U : 風速 A : 物体の空気流直角面に対する投影面積 B : 物体の空気流方向の外郭幅 C_D : 抗力係数 C_L : 揚力係数 C_M : 空力モーメント係数 </p> <p>風荷重を考える時は，上記PDにガスト応答係数を乗じた値を用いるが，対象橋梁の設置位置の環境に応じてガスト応答係数が変わる他，抗力係数CDを橋梁形式に応じて変化させる必要がある。斜張橋，吊橋の塔についても同様であるが，風速の鉛直（高度）分布を考慮する場合もある。</p> | |
| 構造物への影響 | 静的な荷重として扱い，構造物の解析時にそのモデルに載荷する。 | |
| 対策 | 考え方 | 構造物本体に風荷重に耐え得る強度をもたせる。 |
| | 対策例 | <ol style="list-style-type: none"> 1) 風荷重に対する構造物の抵抗・強度の増加 2) 風荷重の低減 <ul style="list-style-type: none"> ・ 受風面積の低減 (但し受風面積と風荷重は線形には対応しない) ・ 空気力係数の小さな断面形状を選択する。 (空気流の剥離をコントロールする) |
| 参考文献 | <ol style="list-style-type: none"> 1) 日本道路協会，道路橋示方書・同解説（共通編），平成8年12月 2) 日本道路協会，道路橋耐風設計便覧，平成3年7月 3) 本州四国連絡橋公団，耐風設計基準 | |

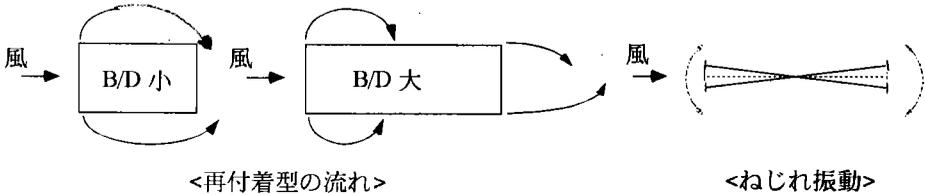
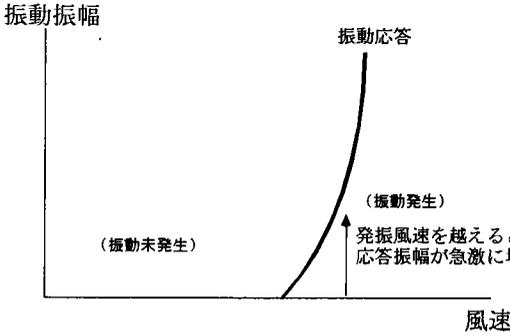
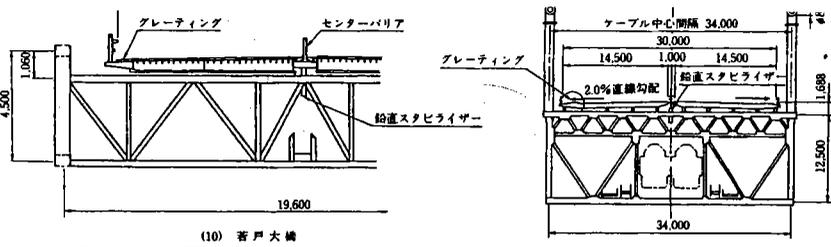
風による現象の分類と対策 (B-1)

| 対象箇所 | 桁 | |
|------------------|---|--|
| 現象の名称 | 渦振動 (桁部分) | |
| 現象の説明 | <p>桁の断面を考えた場合、その風上側で剥がれた空気流が桁に再付着し風下側に流される。これによって桁に周期的な外力が発生し、渦励振と呼ばれる限定振動が発生する。</p>  | |
| 振動の特徴 構造物への影響 | <ol style="list-style-type: none"> 1) 限定された風速領域で発生する振幅の限定された振動。 2) 発生頻度が高く構造物の疲労や施工性、使用性の点で問題となる。 | |
| 対策 | 考え方 | <ol style="list-style-type: none"> 1) 渦の生成を出来るだけ抑制する。 →空力的対策 2) 構造減衰や質量、剛性などを付加する。 →構造力学的対策 |
| | 対策例 | <ol style="list-style-type: none"> 1) 空力的対策 フラップ、フェアリング、デфлекター等の構造を橋梁本体に追加し、空気流の剥離を和らげ、渦の生成を抑制する。 (横浜ベイブリッジ、名港西大橋)  <p style="text-align: center;">フラップ(末広大橋)</p> <ol style="list-style-type: none"> 2) 構造力学的対策 TMD(Tuned Mass Damper)等の制振装置を設置し桁の見かけの減衰を大きくする。(梅沢橋、大師橋)  <p style="text-align: center;">TMD(東京湾横断道路)</p> |
| 参考文献 | <ol style="list-style-type: none"> 1) 『風と橋』編集グループ、風と橋、平成2年8月 2) 日本道路協会、道路橋耐風設計便覧、平成3年7月 3) 梅沢橋関連 | |

風による現象の分類と対策 (B-2)

| | | |
|------------------|--|--|
| 対象箇所 現象の名称 | 桁 ギャロッピング | |
| 現象の説明 | <p>ギャロッピングは流れと直角方向に大きな振動が発生する発散振動であり、完全剥離型の断面 ($0.7 < (\text{桁幅}/\text{桁高}) < 3.0$) に発生する。</p>  <p style="text-align: center;">発散現象 (ギャロッピング、 フラッター)</p> | |
| 振動の特徴 構造物への影響 | <p>振動は発散的であり、ある風速を超えると急激に振幅が大きくなり構造物に与える損傷も大きい。</p> | |
| 対策 | 考え方 | <p>ギャロッピングは、一般に振動が発散的であるために、減衰付加による制振は行われず、空気力を変化させる形状変更がおこなわれる。基本的には周辺の流れを、完全剥離型から再付着型へと（流れを表面に沿うように）変化させることにより振動を制御する。</p> |
| | 対策例 | <p><空気力学的対策> 具体的には、桁高欄部へのフラップ適用例、箱桁下面にスカートやプレートを設けた例がある。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・門崎高架橋（ダブルフラップ、下部スカート）  |
| 参考文献 | 1) 本四公団, 大鳴門橋工事誌, 昭和62年 | |

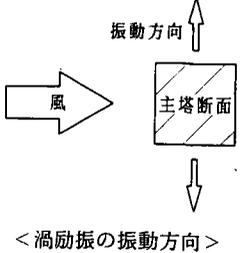
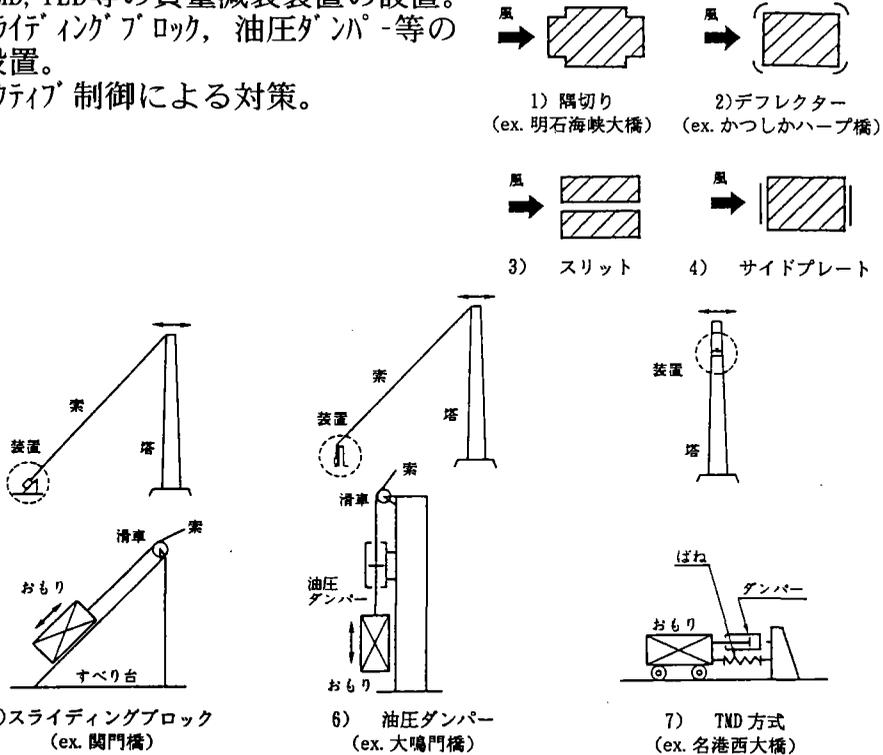
風による現象の分類と対策 (B-3)

| 対象箇所 現象の名称 | 桁 フラッター |
|--------------------------|---|
| <p>現象の説明</p> | <p>風速がある限界になる値を超えた場合に発生し、風速の増加に伴って応答が急激に増大していく発散型の振動現象である。ねじれフラッターは、中心軸周りに回転（ねじれ）振動する状態で生じる風による自励振動であり、再付着型の物体で発生する。</p>  <p style="text-align: center;"><再付着型の流れ> <ねじれ振動></p>  <p style="text-align: center;"><フラッターのイメージ図></p> |
| <p>振動の特徴 構造物への影響</p> | <p>振動は発散的であるために、ある風速を超えると急激に振幅が大きくなり、構造物に与える損傷も大きい（瞬時に構造物崩壊の可能性あり）。</p> |
| <p>対策</p> | <p>考え方</p> <p>振動が発散的であるために、減衰付加による制振は行われず、空気力を変化させるための形状変更が行われる。</p> <p>＜空気力学的対策＞</p> <p>風の再付着型の流れが振動に対して時間遅れをもって作用することが原因であるため、物体側面上の流れを制御することにより制振を図る。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・大鳴門橋（グレーチング および 鉛直スタビライザ -） ・若戸大橋（グレーチング、鉛直スタビライザ - および センターバリア）  <p style="text-align: center;">(10) 若戸大橋 (9) 大鳴門橋</p> |
| <p>参考文献</p> | <p>1) 日本道路協会 道路橋耐風設計便覧 平成3年7月 2) 久保, 長大橋梁の桁および塔の風による振動とその制御 第2回 振動制御コロキウム PART A(1993. 8)</p> |

風による現象の分類と対策 (B-4)

| 対象箇所 | | 桁 |
|---------|-----|--|
| 現象の名称 | | バフェティング |
| 現象の説明 | | <p>風の乱れ (突風: ガスト) による物体に作用する変動空気力によって引き起こされる強制振動。自然風のように、構造物への接近流に乱れが含まれる場合の不規則振動応答をガスト応答と呼ぶ。風の乱れが風上側の (構造) 物等によって引き起こされる場合の強制振動はバフェティングと呼ばれる。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 不規則な振動 ・ 風速とともに応答変位標準偏差が増加 ・ 正弦波なら振幅の最大値は変位標準偏差の$\sqrt{2}$倍 ・ 通常のガスト応答では、振幅の最大値は標準偏差の3倍程度 |
| 構造物への影響 | | <p>時間的変動の大きい風が吹いた時に起こる応答。物体形状の如何を問わず発生する。振幅は風速とともに増加する。</p> |
| 対策 | 考え方 | <p>発散的な振動でもなく、ある風速域で限定的振幅をもつ振動を起すこともない。振動振幅が大きく問題となる場合、制振の方法としてどのような考え方がある。</p> <p>1) 構造的対策</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 剛性を高くして振動を発生させる強制力に抵抗できるようにする ・ 桁の振動を抑える。 <p>2) 空気力学的対策</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ バフェティングの場合、風上側の物体から発生する有害な後流を発生させない。 |
| | 対策例 | <p>1) 構造的対策</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 桁本体の断面の改善 (剛性の増強 etc) ・ 減衰装置の設置 <p>2) 空気力学的対策</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 揚力傾斜の改善 … スポイラーの設置など |
| 参考文献 | | <p>1) 岡内功, 伊藤學, 宮田利雄「耐風構造」丸善 昭和52年5月 2) 日本道路協会 道路橋耐風設計便覧 平成3年7月</p> |

風による現象の分類と対策 (C-1)

| 対象箇所 現象の名称 | 塔 渦励振 | |
|------------------|---|---|
| 現象の説明 | <p>風により塔の周辺に形成される渦により起きる振動で、限られた風速域で発生する。完成後の橋梁の塔は、橋軸方向にはケーブルなどにより固定されており、2面吊の主塔は互いに連結されており剛性が高いので、1面吊の主塔(単柱)の橋軸直角方向や、架設途中の塔などの片持ち状態では、問題となることが多い。</p>  <p style="text-align: right;"><渦励振の振動方向></p> | |
| 振動の特徴 構造物への影響 | <p>限られた風速域で発生し、振幅もある一定の幅で起きる。振動の方向は風向き直角方向がほとんどである。この振動により構造物が直接破壊に至ることはないが、小振幅でも疲労等の照査が必要となる。</p> | |
| 対策 | 考え方 | <p>架設時の風洞試験において塔の振動が顕著であった場合や、構造が特殊なために塔の振動数が著しく低いことが予想される場合に対策を要し、空気力学的対策や構造力学的対策などが施される。</p> |
| | 対策例 | <p>1) 空気力学的対策</p> <ul style="list-style-type: none"> ・隅角部の隅切り，スリット形状等の基本断面形状の変更。 ・デフレクター，サイドプレート等の空力ダンパの付設。 <p>2) 構造力学的対策</p> <ul style="list-style-type: none"> ・TMD, TLD等の質量減衰装置の設置。 ・スライディングブロック，油圧ダンパ等の設置。 ・アクティブ制御による対策。  |
| 参考文献 | <p>1) 津村編，制振事例，振動制御コキム 構造物の振動制御PART A, 1991年7月</p> <p>2) 勝地，米田，吊形式橋梁主塔の耐風設計－最適システム選定のためのガイドライン－振動制御コキム 構造物の振動制御(3)PART A, 1995年8月</p> <p>3) 谷田，吊形式主塔の架設時制振対策－アクティブ制振装置の設計ガイドライン－振動制御コキム 構造物の振動制御(3)PART A, 1995年8月</p> | |

風による現象の分類と対策 (D-1)

| | | |
|------------------|-----|--|
| 対象箇所 | | ケーブル |
| 現象の名称 | | 渦励振 |
| 現象の説明 | | <p>ケーブル後流に生じる交番渦（カルマン渦）に起因し、渦の発生周波数とケーブルの固有振動数が一致することにより生じる振動である。</p>  |
| 振動の特徴 構造物への影響 | | <p>1) 比較的風速の限られた風速領域で発現する規則性の強い限定振動である。 2) 一般的にケーブル長が長くなるほど渦励振の出現率は増す傾向にある。</p> |
| 対策 | 考え方 | <p>1) ケーブル連結方式 : ワイヤ-設置による減衰付加, 振動数の上昇効果およびケーブル連結による質量効果によって制振対策をなす。 2) ダンパ-方式 : オイルダンパ-方式, 粘性体のせん断抵抗を利用した粘性せん断型ダンパ-方式, 内部摩擦を利用した高減衰ゴム方式がある。</p> |
| | 対策例 | <p><減衰付加></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ワイヤ-連結方式 : 櫃石島橋, 岩黒橋, 名港西大橋など ・オイルダンパ- : 荒津大橋, プロトコ橋など ・粘性せん断型ダンパ- : 羽田スカイアーチ, 豊海大橋など ・高減衰ゴム : 弓削大橋, 名港東大橋, 名港西大橋など ・ストックリッジダンパ- : Severn橋, Humber橋など |
| 参考文献 | | <p>1) 横山, 日下部, 斜張橋ケーブルの風による振動と対策, 橋梁と基礎 Vol. 23, No8. 1989 2) 日本道路協会 道路橋耐風設計便覧 平成3年7月</p> |

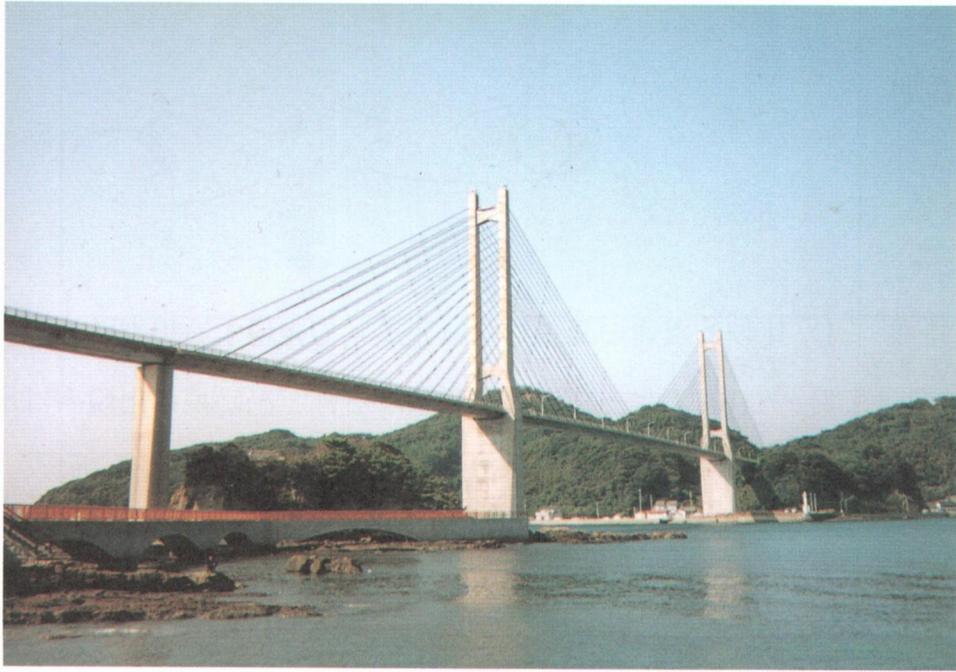


写真 呼子大橋



写真 呼子大橋 ケーブル連結

風による現象の分類と対策 (D-2)

| 対象箇所 現象の名称 | ケーブル レインバイブレーション | |
|------------------|---|--|
| 現象の説明 | <p>1) ポリエチレン管で被膜された斜張橋のケーブルで、雨天及び風時に発生しやすい。</p> <p>2) ケーブルに付着した雨滴が流れ、これが水路を形成する。これによる形状変化がケーブル断面を空力的に不安定にする効果を持つ。</p> <p>3) ケーブルの背後にはその軸線方向に流れが発生し、これが水路形成とともに振動発現の要因となる。</p> <p>4) ケーブル自身の構造減衰があまりないため、振動が起きやすい。</p> <div data-bbox="580 560 964 784" style="text-align: center;"> <p>上面水路 下面水路</p> </div> | |
| 振動の特徴 構造物への影響 | <p>1) 広い風速範囲で振動が発生する。</p> <p>2) ケーブルに構造減衰を付加することによって振動を抑制出来る。</p> | |
| 対策 | 考え方 | <p>1) 水路の形成を妨げる。</p> <p>2) ケーブル軸線方向の流れを制御する。</p> <p>3) ケーブルに構造減衰を付加する。</p> |
| | 対策例 | <p>1) 空力的対策 (東神戸大橋, 弓削大橋, 梅沢橋, 多々羅大橋) 円形断面のケーブル表面に突起をつける。これによりケーブル表面における水路の形成を妨げる。</p> <div data-bbox="431 1142 1324 1355" style="text-align: center;"> <p>Uストライプ</p> </div> <p>2) 構造力学的対策 ケーブル自身の構造減衰を増加させる。ダンパーの設置。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・オイルダンパー (鶴見つばさ橋, 荒津大橋) <div data-bbox="603 1545 1042 1668" style="text-align: center;"> <p>ケーブル ダンパー デッキ</p> </div> <ul style="list-style-type: none"> ・高減衰ゴムダンパー (湘南新道橋, 大師橋) <div data-bbox="556 1780 1074 1915" style="text-align: center;"> <p>高減衰ゴム ケーブル 定着管</p> </div> |
| 参考文献 | <p>1) 横山, 日下部, 斜張橋ケーブルの風による振動と対策, 橋梁と基礎 Vol. 23, No8. 1989</p> | |



写真 東神戸大橋



写真 東神戸大橋 制振突起付き（平行突起）ケーブル

風による現象の分類と対策 (D-2つづき)

| | |
|-------|--|
| 対象箇所 | ケーブル |
| 現象の名称 | レインバイブレーション |
| 対策 | <p>2) 構造力学的対策 (つづき)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・粘性せん断型ダンパー (幸魂橋, 東名足柄橋, etc) <div data-bbox="561 488 1163 918" data-label="Diagram"> </div> <p style="text-align: center;">粘性せん断型ダンパーの構造図</p> <p>[特徴] 本体の隙間に充填された粘性体のせん断抵抗によってケーブルの振動エネルギーを吸収する.</p> <div data-bbox="655 1146 1163 1892" data-label="Image"> </div> <p style="text-align: center;">ダンパーの設置状況 (サンマリブリッジ)</p> |
| 参考文献 | |



写真 多々羅大橋

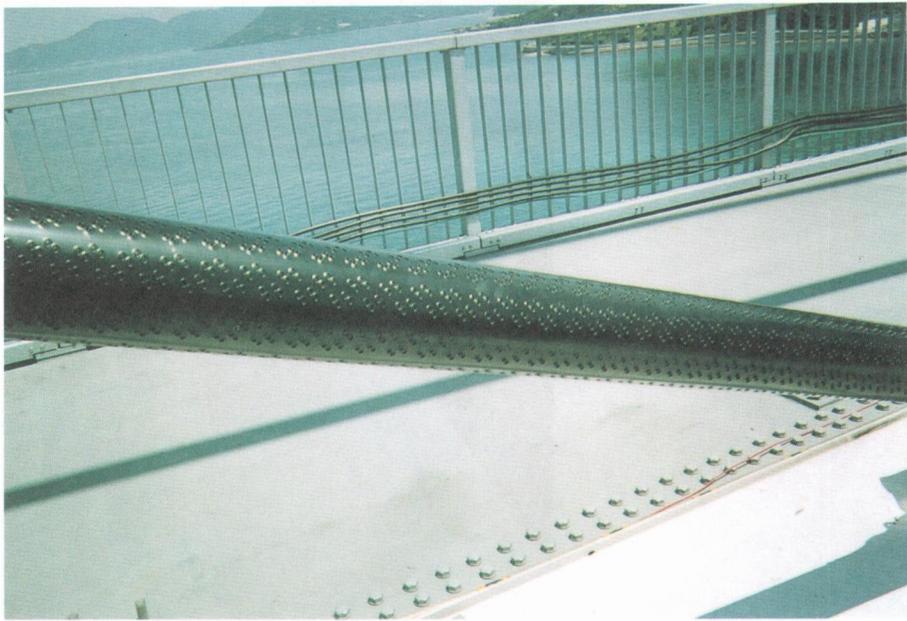


写真 多々羅大橋 制振突起付き（インデント）ケーブル



写真 弓削大橋

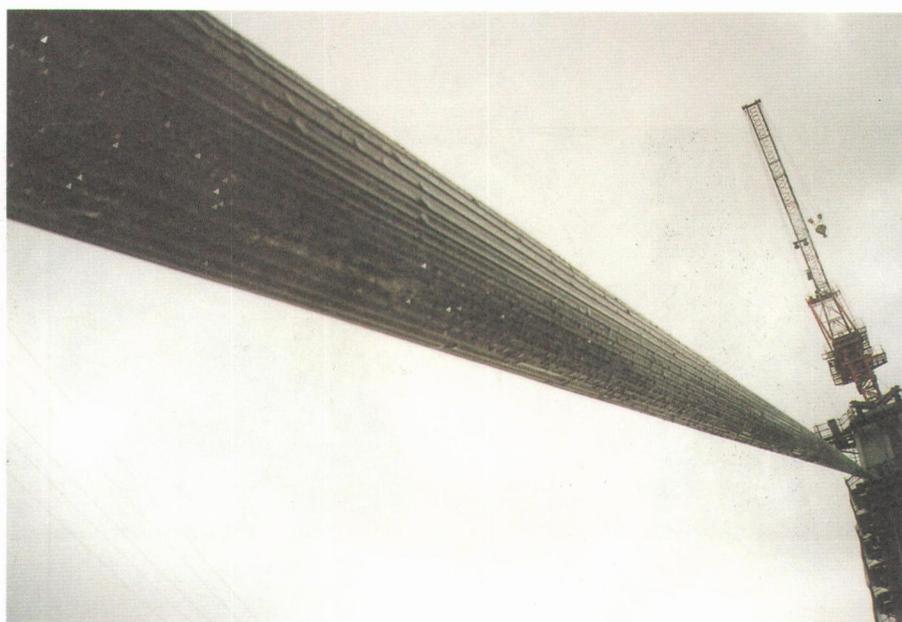


写真 弓削大橋 制振溝付き (U ストライプ) ケーブル

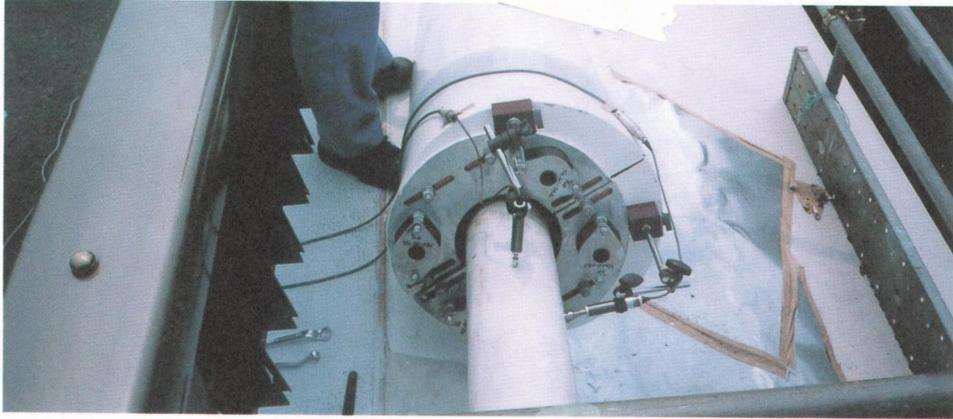


写真 大師橋 ケーブル制振装置（制振ゴム）



写真 大師橋 ケーブル制振装置（ケーブル側固定部）



写真 ふれ愛橋（北海道滝川市）

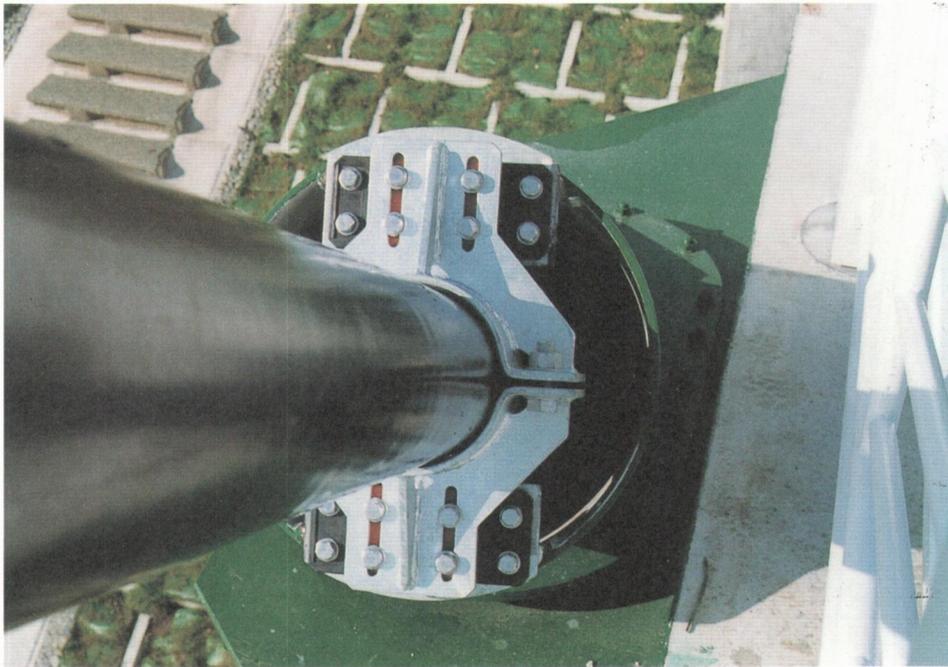


写真 ふれ愛橋 ケーブル制振装置

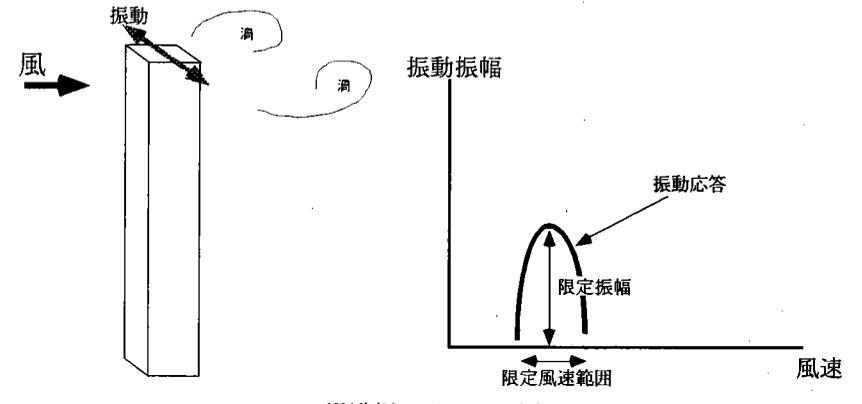
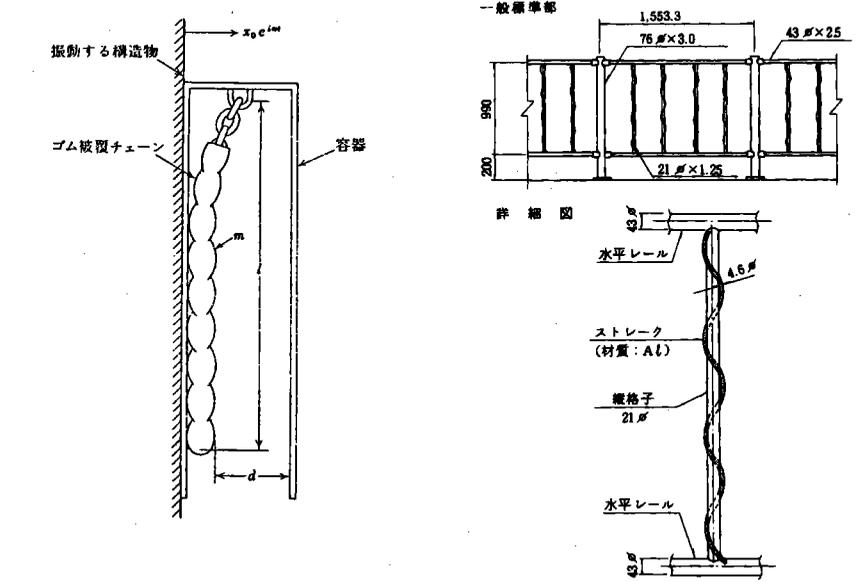
風による現象の分類と対策 (D-3)

| | | |
|------------------|-----|---|
| 対象箇所 | | 斜張橋並列ケーブル |
| 現象の名称 | | ウェークギャロッピング |
| 現象の説明 | | 並列されるケーブルの、特に下流側のケーブルに発生する振動で、上流側のケーブルの後流(ウェーク)がその原因であるため、ウェークギャロッピングと呼ばれている。 |
| 振動の特徴 構造物への影響 | | これまで観測されたウェークギャロッピングの特徴は 1) 1~2次の比較的低い振動モードで発現する。 2) 比較的low風速から発現し、かなり高風速まで幅広い風速範囲で振動が継続する。 |
| 対策 | 考え方 | 空気力学的対策はケーブルの表面を加工して、加振力そのものをなくそうとするものであるが、実験的にもまだ可能性を判断する十分な資料が得られていない。また、構造的対策のうち、減衰付加は現段階では必要付加減衰率が明らかでないため、原則として他の制振対策によることが望ましい。 |
| | 対策例 | ケーブル間連結は制振効果が得られない場合が多く、最近では用いられる例は少ない。 1) スペーサー 並列ケーブルの間をスペーサーで連結し、相対的な振動を抑制しようとするもので、スペーサーに減衰機構を持たせているものもある。 2) ケーブル間隔の調整 ウェークギャロッピングの発生には、その間隔の強い影響が見られ、ケーブル中心間隔がケーブル直径Dの5倍以上であればウェークギャロッピングが発生していない場合が多い。 |
| 参考文献 | | 1) 建設省他、斜張橋並列ケーブルのウェークギャロッピング制振対策検討マニュアル(案)、平成7年9月 |

風による現象の分類と対策 (E-1)

| 対象箇所 | 吊材 | |
|------------------|--|--|
| 現象の名称 | 渦励振 | |
| 現象の説明 | <p>限られた風速範囲においてのみ振動を生じ、振幅は発散でなく限定的である。また、振動は風向に直角方向が顕著である。 振幅が小さい場合でも、発生頻度が多くなることもあり、その場合には疲労に対する検討が必要となる。 (この場合、吊材周辺に形成される風の渦により起こる振動)</p> | |
| 振動の特徴 構造物への影響 | <ol style="list-style-type: none"> 1) 限定的な振幅である。 2) 発生頻度が多い場合は、吊材取り付け部において疲労により亀裂・破断が生じる。 3) 比較的曲げ剛性が小さい部材（吊材）の場合に低風速で渦励振を起こすことがある。 4) 瞬時に崩壊する恐れはない。 | |
| 対策 | 考え方 | <ol style="list-style-type: none"> 1) 吊材（H形鋼等）の腹板に風穴を開けたり、吊材（鋼管）に螺旋状にワイヤー（鉄筋）を巻き付けて、風の流れを乱す。 2) 吊材取り付け部の剛性を増加する。 |
| | 対策例 | <ol style="list-style-type: none"> 1) 吊材取り付け部（ガセット部）の構造を変更し、吊材（鋼管）にトリップワイヤーを取り付けた。（四徳大橋、鋼管径φ32） 2) 吊材（H形鋼）端部の剛性付加 および 構造変更をした。（馬下橋） <p>注：黒塗、斜線部材を現地添接</p> <p>四徳大橋の端部補強</p> <p>トリップワイヤー</p> |
| 参考文献 | 1) 日本道路協会 道路橋耐風設計便覧 平成3年7月 | |

風による現象の分類と対策 (E-2)

| | | |
|------------------|---|---|
| 対象箇所 | 付属物等：照明柱，道路標識柱，検査路手すり | |
| 現象の名称 | 渦励振 | |
| 現象の説明 | <p>渦励振は比較的限られた風速範囲で発生する規則性の強い振動である。風により，物体の後方にできる渦生成に起因する周期的な外力によって，主に風と直角方向に振動が発生する。</p>  <p style="text-align: center;"><渦励振のイメージ図></p> | |
| 振動の特徴 構造物への影響 | <p>振動振幅，発生風速範囲が限られていることから，直接部材の損傷が発生する事にはならない場合が多いが，発生頻度が多い場合には，継手部等の疲労問題として十分な検討が必要である。</p> | |
| 対策 | 考え方 | <p>空気力が比較的小さいことから減衰付加による制限と空気力自体を低減させる空気力学的対策（形状変更）が行われる。</p> |
| | 対策例 | <p>1) 構造的対策：減衰付加</p> <ul style="list-style-type: none"> ・鋼球を用いた衝撃減衰器の付加（横浜ベイブリッジ照明柱） ・鋼を用いた衝撃減衰器の付加（大鳴門橋照明柱） <p>2) 空気力学的対策</p> <ul style="list-style-type: none"> ・螺旋状の突起物(helical strake system)を外面にとりつける。  |
| 参考文献 | <p>1) 和田，恵谷，東田，高野，横浜ベイブリッジの耐風対策，橋梁と基礎 Vol. 23, No. 8, 1989.</p> <p>2) 山田，秋元，大鳴門橋照明用柱の耐風検討，本四技報，Vol19, No. 36, 1985.</p> <p>3) 本四公団，大鳴門橋工事誌，pp. 92, 昭和62年</p> | |

2. 3 風による振動事例

風による橋梁の事故例・振動事例は、イギリス、スコットランドのTay橋(全長3 km : 85 径間の錬鉄製ラティストラス)やアメリカのTacoma Narrows 橋(中央径間 853 m : 吊橋)の落橋など歴史に残る事例から照明柱の振動等の部材振動に至るまで、多岐に渡っている。ここでは既に整理された振動事例 [1~9] を取りまとめ、過去の振動事例を概観する。

<参考文献>

- [1] 岡内, 伊藤, 宮田: 耐風構造, p.13~19, 丸善株式会社, 1977. (表 2.3-1)
- [2] 日本道路協会: 道路橋耐風設計便覧, p.36~42, 1991-7.
- [3] 橋と風編集グループ: 橋と風, p.57~61, 1990. (表 2.3-2)
- [4] 土木研究センター: 斜張橋ケーブルの耐風性検討報告書, p.13~14, 1993-3.
(表 2.3-3)
- [5] 武内: 塔, 桁の振動事例, 「橋は揺れているか -予測と現実-」, 土木学会構造工学委員会 (風洞実験相似則検討小委員会), p.40~43, 1996-7.12.
(表 2.3-4)
- [6] 松野: 斜張橋ケーブルの振動事例, 「橋は揺れているか -予測と現実-」, 土木学会構造工学委員会 (風洞実験相似則検討小委員会), p.44~47, 1996-7.12.
(表 2.3-5)
- [7] 白土, 木村: 海外の事例, 「橋は揺れているか -予測と現実-」, 土木学会構造工学委員会 (風洞実験相似則検討小委員会), p.52~58, 1996-7.12.
(表 2.3-6)
- [8] 日経コンストラクション: (フラッシュ) 秒速 16 m の風が橋桁を揺らす -渦励振の抑制にTMDを設置, p.38~39, 1995-4.28. (表 2.3-7)
- [9] H. KATSUURA, H. MAKUTA, H. SATO, Y. YOSHIDA, A. HONDA, Y. FUJINO: Vortex-induced Oscillation of Trans-Tokyo Bay Highway Bridge, Proc. of the 8th US National Conference on Wind Engineering, 1997-6.5~7.
(表 2.3-7)

表2.3-1 近年の吊橋の風による振動例

| 橋名 | 振動状況 | 支間 (m) | | ケーブル ルサグ (m) | ケーブル ル間隔 (m) | 死荷重 (t/m) | 補剛桁 | | |
|------------------------------------|---|--------|-----|--------------------|--------------------|--------------|--------------|-----------|---------------------------------|
| | | 主径間 | 側径間 | | | | 形式 | 高さ (m) | 断面二次モー メント (m ⁴) |
| Tacoma Narrows (タ コ マ) | 比較的低風速で数種の撓み振動, 14 m/s 以上で崩壊を導いたねじれ振動を起こす. 1940年11月7日落橋. | 853 | 335 | 70.7 | 11.9 | 8.5 | プレート ガーダー | 2.4 | 0.154 |
| Thousand Islands (カ ナ ダ) | ステイ取付け以前には倍振幅最大 61 cm の撓み振動が見られたが, センターステイの取付けにより主径間の 1/4 点で 38 cm, 側径間中央で 30 cm となる. | 244 | 107 | — | 9.3 | 4.8 | プレート ガーダー | 1.8 | — |
| Deer Isle (メ ー ン) | 初期に 15~25 cm の撓み振動がありステイを取り付けたが, 1942年12月2日, 32 m/s の風で片振幅約 3.8 m の一次対称撓み振動を生じた. 以後, より完全なステイを取り付けた. | 329 | 148 | 32.9 | 7.2 | 3.6 | プレート ガーダー | 2.0 | 0.050 |
| Bronx-Whitestone (ニ ュ ー ヨ ー ク) | 最大倍振幅約 75 cm の一次逆対称撓み振動が生じていたので補強した. 橋軸方向に風を受けるときよく振動が生じた. | 701 | 224 | 61.0 | 22.6 | 16.3 | プレート ガーダー | 3.4 | 0.318 |
| Fykesund (ノ ル ウ ェ ー) | 一,二,三次の撓み振動が見られ, その最大倍振幅は約 1.6 m であった. 1945年にステイを取り付けてから振動は見られなくなった. ねじれ振動なし. | 230 | — | 29.1 | 7.2 | 4.6 | I形梁 | 0.45 | — |
| Beauharnois (ケ ベ ッ ク) | 橋軸方向に風が吹くとき, 対称撓み振動が生じ, その最大倍振幅は 33 cm, 橋軸直角方向の風のとときには振動せず. | 177 | — | 17.7 | 9.1 | 5.1 | プレート ガーダー | 2.3 | 0.108 |
| Golden Gate (サンフランシスコ) | 橋軸直角方向に 13 m/s 以上の風が吹くと対称ねじれ振動を生じ, その最大倍振幅約 1.2 m であった. 1951年12月1日約 31 m/s の風のととき一次逆対称のねじれと撓みの混合振動が生じ, その片振幅は 1.2~1.8 m であった. | 1 280 | 343 | 143.3 | 27.4 | 31.7 | トラス | 7.6 | 5.275 |
| George Washington (ニ ュ ー ヨ ー ク) | おだやかな撓み振動とわずかなねじれ振動が見られている. | 1 067 | 186 | 96.3 | 32.3 | 47.0 | 無補剛 | — | — |
| Lions Gates (バンクーバー) | 風速 22~27 m/s のとき振幅約 8 cm の一次対称振動が見られる. | 472 | 187 | 45.7 | 12.2 | 6.8 | トラス | 4.6 | 0.629 |
| Peace River (アラスカ) | 微風でわずかの振動が見られる. 18~22 m/s の風のととき倍振幅約 10 度の対称ねじり振動が生じた. | 283 | 142 | 28.3 | 9.1 | 6.7 | トラス | 4.0 | 0.623 |
| Liard River (アラスカ) | 微風のととき小振動する. 16~18 m/s の風によって木舗装板相互の運動が目立つほどのねじれ振動が生じる. | 165 | 71 | 16.5 | 9.1 | 4.5 | トラス | 2.4 | 0.120 |

(出典: ASCE 吊橋研究委員会, 1952)

表2.3-2 風による橋梁の事故例

| 橋名 | 所在地 | 形式(主径間長) | 建設年 | 特記 |
|------------------------|-------------------------|------------------|------------------|--|
| • Brighton Chain Pier橋 | イギリス Sussex | 吊橋(チェーン) 68m | 1823 | 1833年, 部分的損傷 1836年, わじれ振動により破壊 |
| • Menai Straits橋 | イギリス Carnarvon | 吊橋(チェーン) 177m | 1826 | 3度にわたり, 風により破損, 最後は, 床組等, 修復 |
| • Nassau橋 | ドイッ ライン川 | 吊橋(チェーン) 75m | 1830 | 1834年, チェーン破損 |
| Niagara - Lewiston橋 | アメリカ, カナダ Niagara川 | 吊橋 318m | 1850 | 1864年, 強風により破壊 |
| Tacoma Narrows橋 | アメリカ ワシントン州 タコマ海峡 | 吊橋 853m | 1940 | たわみ限定振動(風速1.3~1.8m/sec), 1940年11月, 19m/secの風でわじれ振動をおこし, 破壊 |
| Fykesund橋 | ノルウェー | 吊橋 228m | 1937 | たわみ振動をおこしたため, スティにより補強 |
| Golden Gate橋 | アメリカ | 吊橋 1,280m | 1937 | 25~30m/secの風により振動, 部分的破損 下機構を設け, トラスを補強 |
| Thousand Islands橋 | カナダ | 吊橋 244m | 1938 | たわみ振動をおこす |
| Deer Isle橋 | アメリカ メイン州 | 吊橋 329m | 1939 | 1942年, 12月 32m/secの風にて, 1次対称たわみ振動をおこす。より完全なスティを取り付ける |
| Bronx - Whitestone橋 | アメリカ ニューヨーク | 吊橋 701m | 1939 | 振動をおこし, 桁をトラスにより補強 |
| Tay橋 | イギリス スコットランド Tay川 | 連続トラス 75m | 1878 | 通過中の列車ごと, 崩壊, 75名の死者を出す。風圧による(1979年12月) |
| Chester橋 | アメリカ イリノイ州 ミシシッピ川 | ゲルバートラス | - | たつまきにより, 1944年, 破壊 |
| 木曾川橋 (名神高速道路) | 日本 | トラス | - | 1962年8月, 台風により, 架設中の1連落橋 |
| Beauharnois橋 | カナダ ケベック | 吊橋 177m | - | たわみ振動(橋軸方向より風の吹くとき) |
| George Washington橋 | アメリカ ニューヨーク | 吊橋 1,067m | 1931 1960(下路) | おだやかなたわみ振動, 微小わじれ振動 |
| Lions Gates橋 | カナダ バンクーバー | 吊橋 472m | - | たわみ振動(風速22~27m/sec) |
| Peace River橋 | アラスカ | 吊橋 283m | - | 微風にて小振動, 28~22m/secの風にてわじれ振動 |
| Liard River橋 | アラスカ | 吊橋 165m | - | 微風にて小振動, 26~18m/secの風にてわじれ振動 |
| 四徳大橋 | 日本 長野県 | ランガー 150m | 1967 | 5~6m/secの風で鋼管吊材が振動, 端部の補強, 等行う |
| Forth Road橋 | イギリス スコットランド | 吊橋 1,006m | 1964 | 主塔が, 独立時, 振動, スライディングブロックによる制振 |
| 石狩河口橋 | 日本 北海道 | 斜張橋 160m | 1971 | 架設中たわみの限定振動, 断面を若干変更する |
| Severn橋 | イギリス イングランド | 吊橋 987m | 1966 | 斜めハンガーが振動, 制振装置を取り付ける |
| • 六甲大橋 | 日本 神戸 | 斜張橋 220m | 1977 | ケーブルの振動, ケーブル間にワイヤを張って制振 |

表2.3-3 ケーブル振動の見られた橋梁および制振対策を行っている橋梁

| 橋梁名 | ケーブル振動の発生時期 | ケーブル振動現象 | ケーブル制振対策(対策時期) |
|----------|-----------------|----------|---------------------------------------|
| 尾道大橋 | 施工時～完成後 | WG | 中間止め金具(施工時～現在) |
| 勇橋 | 凍結水解時 気候の急変時 | RV | ケーブル被覆調整(1983年3月) |
| かもめ大橋 | 完成後 | WG | 無 |
| 六甲大橋 | 施工後制振対策前 | ギャロッピング | 相互連結方式(完成後) |
| 小本川橋梁 | 施工後 | 渦励振 | 無 |
| 勝本ダム大橋 | | 無 | ゴム・ダンパ方式 (施工時～完成後) |
| 豊後橋 | 施工時制振対策前 | 渦励振 | ステンレス管被覆 (施工時～完成後) |
| 高梨大橋 | 施工時制振対策前 | 渦励振 | アルミ管被覆 (施工時～完成後) 弾性シール材ダンパ(施工後) |
| 名港西大橋 | 施工時制振対策前 | 渦励振, RV | 相互連結方式(施工時～完成後) |
| 新綾部橋梁 | 斜材緊張時一時的 | 渦励振 | 無(施工時に有) |
| 櫃石島橋 | 施工時制振対策前 | WG, RV | 相互連結方式 スペーサー (施工時～完成後) |
| 岩黒島橋 | 施工時制振対策前 | WG, RV | 相互連結方式 スペーサー (施工時～完成後) |
| 荒津大橋 | 施工時, 完成後 | 渦励振, RV | オイルダンパ(完成後) |
| 布施田浦橋 | 施工時制振対策前 | WG | 3本相互固定(施工時～完成後) |
| 呼子大橋 | 施工時制振対策前 | WG | 相互連結方式 斜材クランプ (施工時～完成後) |
| 天保山大橋 | 施工時制振対策前 | 渦励振, RV | オイルダンパ(施工時～完成後) |
| 横浜ベイブリッジ | 施工時制振対策前 | 渦励振 | スペーサーダンパ (施工時～完成後) |
| 白屋橋 | 施工時, 完成後 | ガスト振動 | 相互連結方式(施工時) オイルダンパ(完成後) |

RV: レインバイブレーション
WG: ウェイクギャロッピング

| 橋梁名 | ケーブル振動の発生時期 | ケーブル振動現象 | ケーブル制振対策(対策時期) |
|----------|---------------------|------------|---------------------------------|
| 幸魂大橋 | 施工時制振対策前 | WG | 粘性せん断型ダンパ (施工時～完成後) |
| 東神戸大橋 | 施工時ケーブルカバ 充填材施工前 | 渦励振 | RV対策に平行突起付きケーブル |
| 東名足柄橋 | | 無 | 粘性せん断型ダンパ (施工時～完成後) |
| 生口橋 | 施工時制振対策前 | 渦励振 | ケーブル角折れ緩衝材 (桁閉合後, 舗装前) |
| 青森ベイブリッジ | 施工時制振対策前 | 渦励振, RV | 粘性せん断型ダンパ (施工時～完成後) |
| とよみ大橋 | 施工時制振対策前 | 渦励振, RV | オイル式ダンパ (施工時～完成後) |
| 周防大橋 | 施工時 | 渦励振 | 減衰ゴム, 弾性シール材 (施工時～完成後) |
| 毛見1号橋梁 | | 無 | 粘性せん断型ダンパ 高減衰ゴム (施工時～完成後) |
| 碓氷橋 | 施工時制振対策前 | ガスト振動 | 粘性せん断型ダンパ(桁完成後) |
| 松川浦大橋 | 施工時, 完成後 | WG | 粘性せん断型ダンパ(完成後) |
| 秩父公園橋 | 施工時 | WG | 検討中 |
| 甕大明神橋 | 施工時 | 微小振動(完成後無) | 無 |
| 新渡橋 | 施工時制振対策前 | WG | 相互連結方式(施工時～) |
| 戸田公園大橋 | 完成後 | 桁の鉛直振動に伴い | 相互連結方式(振動発生後) |

RV: レインバイブレーション
WG: ウェイクギャロッピング

表2.3-4(1/2) 国内橋梁の実機(動態)観測の事例一覧(土木学会年次講演会概要集より)

| | 橋 梁 名 | 対象系 | 所在地 | 実機動態観測の実施 | | 振動の有無 | | 構造系と振動種別 桁 / 主塔 / ケーブル / 部材 | 制 振 対 策 | 年 講 回 数 |
|----|---------------------------|----------------|------|-------------------|-------------|-------|------------|--|--|---------------------|
| | | | | 機 関 | 期 間 | 無対策 | 対策後 | | | |
| 1 | 白鳥大橋 | ワイヤロープ 完成時 | 北海道 | 北海道開発局 IHI、NKK | '93.11~12 | ○ | 微少 | 主塔:面外振動2cm程度 風速10~15m/s | ストームロープ使用 $\delta=0.025\sim0.035$ | 49回(94) p.992-3 |
| 2 | 関西国際空港連絡橋 | 完成系 | 大阪府 | 関西国際空港(株) 三菱重工 | '93年末~ | ○ | 殆ど 発生なし | 箱桁:鉛直1cm以下 風速22m/s以下 | TMD(渦励振鉛直振動用) | 49回(94) p.996-7 |
| 3 | 唄げんかP C斜張橋 | 完成系 | 大分県 | 建設省、九大 九州共立大 | '93.8~9 | ○ | 小さい | 桁:最大20gal $v=20m/s$ ケーブル:1300gal $v=24m/s$ (台風時) | | 49回(94) p.998-9 |
| 4 | 生口橋 | 完成系 | 広島県 | 本四公団、日立造船 | - | △ | 殆どなし | 渦励振(部位不明) | ケーブル角折れ緩衝材設置により、 設置前渦励振頻発が、発生無くなる。 | 49回(94) p.1092-3 |
| 5 | 明石海峡大橋 | 架設時 | 兵庫県 | 本四公団 主塔工事JV | '92.9~ | ○ | 微少 | 2P(本土側)主塔(ほぼ独立状態) 塔頂振幅 $\geq 15cm$ (at7~20m/s) | 主塔断面に隅切り断面使用 主塔タワークレーンへのTMD設置 | 48回(93) p.706-7 |
| 6 | 明石海峡大橋 | 架設時 | 兵庫県 | 本四公団 主塔工事JV | '92.9~ | ○ | 微少 | 主塔固有振動数(曲げ1次、2次、 捩れ1次)把握、対数減衰率 $\delta=0.05$ | 但し、 $\delta=0.02$; TMD非作動時 $\delta=0.05$; TMD作動時 | 48回(93) p.708-9 |
| 7 | 白鳥大橋 | 架設時 | 北海道 | 北海道開発局 NKK | - | - | - | 独立状態主塔、対数減衰率(曲げ1次 2次、捩れ1次)、 $\delta=0.18\sim0.21$ | 主塔断面隅切り、及びTMD設置 非制振時 $\delta=0.005$ 制振時 $\delta=0.2$ | 48回(93) p.724-5 |
| 8 | 鶴見航路橋 | 架設時 | 神奈川県 | 首都公団 住友重機城 | '92.9~'93.2 | ○ | 微少 | 大黒側(2P)主塔のほぼ独立状態、面外 渦励振振幅=50mm非作動時、20mm作動時 | 主塔断面台形、及びA TMD設置 非作動時 $\delta=0.013$ 作動時 $\delta=0.3$ | 48回(93) p.764-5 |
| 9 | 白鳥大橋 | 架設時 | 北海道 | 北海道開発局 NKK、IHI | '92.9~'93.1 | ○ | 微少 | 独立状態主塔、面外渦励振 陣屋側(3P)曲げ30gal程度 捩れ0.17deg程度 祝津側(4P)曲げ10cm/s(主塔速度) | 主塔断面隅切り アクティブ制振装置 (非作動時左記の応答が発現) | 48回(93) p.854-7 |
| 10 | 東神戸大橋 | 架設時 ケーブル架設後 | 兵庫県 | 阪神公団、三菱重工 | '91.3~'93.3 | ○ | 殆ど 発生なし | ケーブル(架設後) 渦励振面外振幅3cm以下 | ケーブル断面に並行突起ケーブル採用 シール材施工(左記の値は施工前) | 48回(93) p.872-3 |
| 11 | 首都高速12号線吊橋 (レインボーブリッジ) | 架設時 | 東京都 | 首都公団、新日鉄 IHI | '91.4~7 | ○ | 殆ど 発生なし | 主塔、独立状態、面外渦励振 Max片振幅=6cm(アクティブ作動時) キャットウォーク架設以降 渦励振発現なし | アクティブ制振装置:面外曲げ1次 パッシング制振装置:捩れ1次及び 面外曲げ1次 | 47回(92) p.514-5 |
| 12 | 綾波川橋 | 架設時 | 沖縄県 | 沖縄開発庁、横河 | - | - | - | 塔独立時渦励振などの振幅は 認められず | 架設足場の防護ネット、及び、ロープ +重錘($\delta=0.012\sim0.04$ 稼動時) | 47回(92) p.702-3 |
| 13 | 東神戸大橋 | 架設時 ケーブル架設後 | 兵庫県 | 阪神公団、川崎重工 | '90.9~11 | ○ | 微少 | 塔独立時:面外渦励振 片振幅=5~18.6cm(TMD作動時) | 防護ネット、ケーブルと塔頂梁の減衰 並びにTMD TMD効果 片振幅25.9cm \rightarrow 5.3cm 片振幅28.0cm \rightarrow 18.6cm | 46回(91) p.558-9 |
| 14 | 海田大橋 | 完成状態 | 広島県 | 広島県、三菱重工 | '90.2 | - | - | 3径間連続箱桁橋 振動数及び減衰計測 | 曲げ $\delta \geq 0.046$ (1次)、 $\delta \geq 0.072$ (2次) $\delta \geq 0.051$ (3次)、 $\delta \geq 0.051$ (4次) 捩れ $\delta \geq 0.142$ (1次)、 $\delta \geq 0.097$ (2次) | 45回(90) p.758-9 |

注. ○印振動有り, △印発注部位等確定できず

表2.3-4(2/2) 国内橋梁の実機(動態)観測の事例一覧(土木学会年次講演会概要集より)

| 橋梁名 | 対象系 | 所在地 | 実機動態観測の実施 | | 振動の有無 | | 構造系と振動種別 | 制振対策 | 年購回数 |
|-------------------------|-----|------------|----------------|-------------|-----------|------------------|--|---|----------------------|
| | | | 機関 | 期間 | 無対策 | 対策後 | | | |
| 15 横浜港横断橋 (横浜ベイブリッジ) | 完成系 | 神奈川県 | 首都公団、NKK | - | - | - | 斜張橋全体系 振動特性計測 | 塔頂にTMD設置 ex. 面内たわみ対称 1次 $\delta=0.07$ | 45回(90) p. 772-3 |
| 16 菅原城北大橋 | 完成系 | 大阪府 | 大阪市、建設JV | '89.5 | - | - | 斜張橋全体系 振動特性計測 | 桁鉛直たわみ $\delta \geq 0.042$ 塔 $\delta \geq 0.022$ | 45回(90) p. 776-7 |
| 17 天保山大橋 (旧 安治川橋梁) | 架設系 | 大阪府 | 阪神公団、日立造船 | '87.5~'89.3 | ○ ケーブル | RainVib. 殆どなし | マルチケーブル斜張橋ケーブルの Rain Vib. 倍振幅20~237cm | Rain Vibrationと考えられる現象が数回 観測された(無対策時)。後オイルダンパ | 45回(90) p. 918-9 |
| 18 横浜港横断橋 (横浜ベイブリッジ) | 架設系 | 神奈川県 | 首都公団 | - | - | - | 斜張橋主塔の架設系(H=123m)から 独立時(H=172m)の振動特性 | 塔にTMDを設置 $\delta=0.008$ 程度 $\rightarrow \delta=0.04$ (稼働時) | 44回(89) p. 754-5 |
| 19 荒津大橋 | 架設時 | 福岡県 | 福北公社、九産大 三菱 | - | ○ ケーブル | RainVib. 殆どなし | 斜張橋のケーブル 小雨時V=10~18m/s 最大倍振幅=60cm(無対策時) | 架設後ケーブルにオイルダンパーを 設置した。以後振動発生せず。 | 44回(89) p. 798-9 |
| 20 かつしかハープ橋 | 完成系 | 東京都 | 首都公団、建設JV | - | - | - | マルチケーブル曲線斜張橋全体系 振動特性計測 | 空力制振対策: 桁にはフェアリング、塔には デフレクター、 δ (桁) ≥ 0.019 δ (ケーブル) ≥ 0.01 | 43回(88) p. 26-7 |
| 21 撫養橋 | 暫定系 | 徳島県 | 本四公団、日立造船 | '86.2~'6 | ○ | 微少 | 四径間連続箱桁のバッフェティング 振動50gal(Max. V=18m/s)程度 | 箱桁への空力制振プレート取付け。 ギャロッピング抑制 | 42回(87) p. 696-7 |
| 22 秩父橋 | 完成系 | 埼玉県 | 埼玉県、日本鋼管 | '85.9~'86.2 | ○ | 微少 | 斜張橋全体系として、桁部鉛直 たわみ1次モードの腹で振幅=12mm | フェアリング、フラップ準備(渦励振に 対し)を考えたが、対策せず。 | 41回(86) p. 619-20 |
| 23 名港西大橋 | 架設系 | 愛知県 | 日本道路公団 日本鋼管 | '83.8~'11 | ○ | 微少 | 斜張橋主塔独立状態(PD方式) 面外渦励振 変位±5cm V=13m/s | PD方式: 振り子式動吸振器を採用し、 $\delta=0.0078 \rightarrow \delta=0.017$ にUP | 39回(84) p. 523-4 |
| 24 因島大橋 | 架設時 | 広島県 | 本四公団、建設JV | - | - | - | 吊橋架設時の耐風性検討のための 振動特性調査 | 閉合前の架設step9において $\delta=0.039$ (鉛直逆対1次)、 $\delta=0.026$ (鉛直対称1次)、 $\delta=0.011$ (揺れ逆対1次)、 $\delta=0.012$ (揺れ対称1次) | 38回(83) p. 613-4 |
| 25 大鳴門橋 | 架設系 | 兵庫県 徳島県 | 本四公団、三菱重工 | '81.3~'11 | ○ | 微少 | 吊橋主塔架設時、主塔面外1次振幅 30~40cm(V=17m/s) | ロープ油圧ダンパ方式により $\delta=0.055$ | 37回(82) p. 447-8 |
| 26 大鳴門橋 | 架設系 | 兵庫県 徳島県 | 本四公団、川崎重工 | '81.2~'3 | ○ | 微少 | 吊橋主塔架設時、主塔面外1次振幅 振幅 ≤ 6 cm(V=13~14m/s) | ロープ油圧ダンパ方式により $\delta=0.01+0.025=0.035$ | 37回(82) p. 449-50 |

注. ○印振動有り、△印発注部位等確定できず

表2.3-5(1/2) 国内斜張橋のケーブル振動発生事例一覧

| 番号 | 橋梁名 | 完成年 | 所在地 | 振動の種類 | | | | 振動の発生時期及び発生状況 | 制振対策 | 観測の 実施 | 機関 | 期間 |
|----|------------|------|------|-------|----|----|-----------------|--|-------------------------------|-----------|-----------------|-----------------------------------|
| | | | | 渦励振 | RV | WG | 他 | | | | | |
| 1 | 尾道大橋 | 1968 | 広島県 | | | ○ | | 施工時～完成後 | 中間止め金具 (施工時～現在) | ○ | 本四公団 | 1968～ |
| 2 | 勇橋 | 1974 | 奈良県 | | ○ | | | 凍結解氷時 気候の急変時 | ケーブル被覆調整 (1983年3月) | | | |
| 3 | かもめ大橋 | 1975 | 大阪府 | | | ○ | | 完成後 | スペーサー (完成後) | | | |
| 4 | 六甲大橋 | 1977 | 兵庫県 | | | | ギヤロッピング | 施工後制振対策前 | 相互連結方式 (完成後) | ○ | | |
| 5 | 小本川橋梁 | 1979 | 岩手県 | ○ | | | | 施工後 | なし | ○ | | 1979.2～.3 |
| 6 | 豊後橋 | 1983 | 福岡県 | ○ | | | | 施工時制振対策前 | スプレッド管被覆 (施工時～完成後) | | | |
| 7 | 高梨大橋 | 1985 | 島根県 | ○ | | | | 施工時制振対策前 | 施工時スプレッド管被覆、施工後弾性ケーブル ダンパー | ○ | | 1983.8～.3 |
| 8 | 名港西大橋 | 1985 | 愛知県 | ○ | ○ | | | 施工時制振対策前、最大振幅50-250mm、風速5-17 m/s | 相互連結方式 (施工時～完成後) | ○ | NKK | 動態:1984.7～11 風:1980.3～ |
| 9 | 櫃石島橋 | 1988 | 香川県 | | ○ | ○ | | 施工時制振対策前、風速15-20m/sでWC、最大振幅 70-350mm | 相互連結方式、スプレッド (施工時～完成 後) | ○ | | 1986～1987 |
| 10 | 荒津大橋 | 1988 | 福岡県 | ○ | ○ | | | 施工時、完成後、最大振幅500mm | オイルダンパー (完成後) | ○ | | 1983.11～86.7 |
| 11 | 岩黒島橋 | 1988 | 香川県 | | ○ | ○ | | 施工時制振対策前、風速15-20m/sでWC、最大振幅 70-350mm | 相互連結方式、スプレッド (施工時～完成 後) | ○ | | 1986～1987 |
| 12 | 新綾部大橋 | 1988 | 京都府 | ○ | | | | 斜材緊張時一時的 | (施工時に有) | | | |
| 13 | 戸田公園大橋 | 1988 | 埼玉県 | | | | 桁の鉛直振動 に伴い発生 | 完成後歩行者満杯時に桁振動 | 相互連結方式 (振動発生後)、桁内 部にTLD設置 | | | |
| 14 | 横浜ベイブリッジ | 1989 | 神奈川県 | ○ | | | | 施工時制振対策前、最大振幅4-20mm | スペーサーダンパー (施工時～完成 後) | ○ | | 動態:1988.9～89.1 |
| 15 | 呼子大橋 | 1989 | 佐賀県 | | | ○ | | 施工時制振対策前 | 相互連結方式、斜材クランプ (施工時～ 完成後) | ○ | | 風:1987.7～ |
| 16 | 志摩丸山橋 | 1989 | 三重県 | | | ○ | | 施工時制振対策前、風速5m/s、振幅10-30mm | 3本相互固定 (施工時～完成後)+ス プレッド付 | ○ | | 動態:1988.3～9 風:1987.11～88.12 |
| 17 | 天保山大橋 | 1989 | 大阪府 | ○ | | | | 施工時制振対策前、振幅1-100mm | オイルダンパー (施工時～完成後) | ○ | | 動態:1987.5～1988.9 |
| 18 | 白屋橋 | 1991 | 奈良県 | | | | ガスト振動 | 施工時、完成後 | 施工時相互連結、完成時オイルダン パー | ○ | 建設省 | 動態:1989.8～91.12 風:1987.10～89.4 |
| 19 | 幸魂大橋 | 1991 | 埼玉県 | | | ○ | | 施工時制振対策前、風速10m/s以上の時、風下側 のケーブルが振動、振幅100-300mm | 粘性セシ断型ダンパー (施工時～完成 後) | | | 風:1989.12～90.3 |
| 20 | 生口橋 | 1991 | 広島県 | ○ | | | | 施工時制振対策前、振幅1-25mm | ケーブル角折れ緩衝材 (桁閉合後、組 立前) | ○ | 動態、風:JV | 動態:1991.3～5 風:不明 |
| 21 | 碓氷橋 | 1992 | 群馬県 | | | | ガスト振動 | 施工時制振対策前、14.6m/s最大瞬間風速で振動、 振幅13-24mm | 粘性セシ断型ダンパー (桁完成後) | ○ | | 動態、風:1991.12～92. 10 |
| 22 | 青森ベイブリッジ | 1992 | 青森県 | ○ | ○ | | | 施工時制振対策前、橋面で8-15m/sの風速、塔風 上下両側のケーブルが振動、振幅50-500mm | 粘性セシ断型ダンパー (桁完成後) | | | |
| 23 | 周防大橋 | 1992 | 山口県 | ○ | | | | 施工時、風速5-10m/sで振動 | 減衰ゴム、弾性ケーブル (施工時～完成 後) | ○ | | 風:1991.12～92.3 |
| 24 | 吹上浜セットブリッジ | 1993 | 鹿児島県 | ○ | ○ | | | 完成後、風向橋軸から45°、風速7-10m/s | 粘性セシ断型ダンパー | | | |
| 25 | 瓶大明神橋 | 1993 | 鹿児島県 | | ○ | | | 塔風下側ケーブルが振動、風速10-20m/s、 振幅100-300mm | 粘性セシ断型ダンパー | ○ | 鹿児島県 | 動態:1992.9～92.12 風:1983.8～87.8 |
| 26 | 洲浜橋 | 1993 | 兵庫県 | | ○ | | | 完成後、風向橋軸から70°、風速10-20m/s、かなり 大きな振幅 | 粘性セシ断型ダンパー | | | |
| 27 | 東神戸大橋 | 1993 | 兵庫県 | ○ | | | ギヤロッピング | 渦励振:施工時ケーブル埋め-充填材施工前 ギヤロッピング:完成後、風速40m/s、振幅1D | RV対策に平行突起付きケーブル | ○ | 動態:JV 風:阪神公団 | 動態:1992～ |

表2.3-5(2/2) 国内斜張橋のケーブル振動発生事例一覧

| 番号 | 橋梁名 | 完成年 | 所在地 | 振動の種類 | | | | 振動の発生時期及び発生状況 | 制振対策 | 観測の 実施 | 機関 | 期間 |
|----|--------|------|-----|-------|----|----|---|--|--------------------|-----------|----|----------------|
| | | | | 渦動振 | RV | WG | 他 | | | | | |
| 28 | 羽田スカイツ | 1993 | 東京都 | ○ | | | | 不明 | 粘性切断型ダンパー | | | |
| 29 | とよみ大橋 | 1994 | 沖縄県 | ○ | ○ | | | 施工時制振対策前 | 粘性切断ダンパー (施工時～完成後) | | | 風:不明 |
| 30 | 秩父公園橋 | 1994 | 埼玉県 | | | ○ | | 施工時, 風速7m/s以上, 振幅1D以下 | 制振ワイヤー | | | |
| 31 | 松川蒲大橋 | 1995 | 福島県 | | | ○ | | 施工時, 完成後, 数~10数m/s, 振幅 -20mm程度 | 粘性切断型ダンパー (完成後) | ○ | ○ | ○ |
| 32 | 新渡橋 | 1995 | 佐賀県 | | | ○ | | 施工時制振対策前, 橋軸直角方向風速10m/sで最外縁の下流側風下ケーブルが振動, 振幅50mm | 相互連結方式 (施工時～) | ○ | | 風:1992.12~93.8 |

RV: レインバイブレーション、WG: ウェイクギャロッピング

出典

24, 26, 28を除き “斜張橋ケーブルの耐風性検討 報告書”, (財) 土木研究センター, 平成5年3月

24 “PC斜張橋(サンセットブリッジ)の動特性とレインバイブレーション”, 麻生益彦 鳥野清 北川正一 船迫隼雄 村岡公範, 構造工学論文集Vol. 41A, 1995年3月

表2.3-6(1/4) 国外橋梁の実機(動態)観測および振動事例, 制振対策事例一覧

| 橋梁名 | 対象系 | 所在地 | 実機動態観測の実施 | | 振動の有無 | 構造系と振動種別 | 制振対策 | 出典 |
|----------------------------|------------|--------|-----------|----|-------|---|--|-------------------|
| | | | 機関 | 期間 | | | | |
| 1 Alex Frazer (斜張橋) | 完成系 | Canada | | | 振動発生 | ケーブル: 振動発生. 架設時には振動発生せず | ケーブル上下端にネオプレンゴム設置 | 5) |
| 2 Beauharnois (吊橋) | 完成系 | Canada | | | 振動発生 | 桁: 橋軸方向の風によりたわみ振動 | | 11) |
| 3 Ben Sawyer (可動トラス橋) | 完成系 | USA | | | (回転) | トラス桁: ハリケーンヒューゴによる強風. 固定部破損後2~3回転. | | 10) |
| 4 Birton (トラスアーチ橋) | 架設系 | Canada | | | 振動発生 | ハブ: H型断面(221×455), 穴開きウェブ(開口率20%), 部材長10~22m. 100年風速再現期待値22.8m/s. ハブ-張力設計値の1/7の時に風速8.9m/sより弱軸回りの曲げ渦励振発生. 最大振幅20mm. ハブ-下端でクラック発生. 完成後は振動発生せず. 風洞実験実施. 強軸回りにギャロッピングが風速17.8m/sより発生し, 26.7m/sで振幅50mm, 弱軸回りの渦励振が9.2m/sより発生し, 最大振幅24mmであることを確認. | 5.9m高さに水平材, 6.7mと18.6mに平行テンションケーブル, 13.4mに斜めテンションケーブル ギャロッピング発生せず. 渦励振最大振幅は9.2m/sで0.3mmに低下. | 13) 16) |
| 5 Bras d'or (トラスアーチ橋) | 完成系 | Canada | | | 振動発生 | ハブ: I型断面(16×9.5), 部材長最長26m. 風速8.9m/sより渦励振発生. 最大振幅127mm. 部分模型による風洞実験実施. 実機の渦励振を確認すると共に, 42.5m/sからギャロッピング発生. 穴開きウェブの制振効果調査. 渦励振に対して制振効果あり. ギャロッピング限界風速は | 制振用水平材設置. しかし疲労により破損. 振動アブソーバ, マスダンパー設置. | 13) 16) |
| 6 Brighton Chain Pier (吊橋) | 完成系 | UK | | | 振動発生 | 桁: 1833年(完成後10年)に部分的損傷. 1836年(完成後13年)にねじれ振動により破壊. | | 11) |
| 7 Bronx-Whitestone (吊橋) | 完成系 | USA | | | 振動発生 | 桁: | トラスにより桁を補剛 | 11) |
| 8 Brotonne (斜張橋) | 完成系 | France | | | 振動発生 | | ケーブル制振用油圧ダンパー設置 | 3) 20) 21) |
| 9 Chester (ゲルバートラス橋) | 完成系 | USA | | | | 竜巻により破壊 | | 11) |
| 10 Coatzacoalcos II (斜張橋) | 架設系 | Mexico | | | 振動発生 | ケーブル: 事前の風洞実験で安全性確認. しかし振動発生. | ケーブル下部にショックアブソーバ設置 | 5) |
| 11 Commodore Barry (トラス橋) | 完成系 架設系 | USA | | | 振動発生 | ハブ: I型断面(810×710), 部材最長34m. 鉛直材および斜材が14~18m/sの風速で渦励振. 15部材でクラック発生. 架設中片持状態の部材でねじれ振動発生. 部分模型および弾性模型による風洞実験実施. | TMD設置 | 13) 16) 19) |

表2.3-6(2/4) 国外橋梁の実機(動態)観測および振動事例, 制振対策事例一覧

| | 橋 梁 名 | 対象系 | 所在地 | 実機動態観測の実施 | | 振動の有無 | 構造系と振動種別 | 制 振 対 策 | 出典 |
|----|-------------------------|------------|------------|---|----------------------------------|-----------------|--|------------------------------|---------------------------------|
| | | | | 機 関 | 期 間 | | | | |
| 12 | Dame Point (斜張橋) | 架設系 完成系 | USA | | | 振動発生 | ケーブル振動発生, レインバイブレーションか | ケーブル制振ロープ設置 | 5) 16) |
| 13 | Deer Isle-Sedgwick (吊橋) | 完成系 | Maine, USA | | 83.3.31 ~ 83.4.25 | ガスト応答 渦励振を観測 | 桁:風速32m/sで対称1次たわみ振動 風速9.11m/sで渦励振, 11.6m/s, 13.5m/s, 15.9m/sでガスト応答 | ステイにより補強 | 11) 2) |
| 14 | Dirtford (斜張橋) | | UK | | | | | ケーブル定着部にネオプレンゴム設置 | 4) |
| 15 | Dongying (斜張橋) | | China | | | | | ケーブル相互連結 | 20) |
| 16 | Emscherschnellweg (斜張橋) | | Germany | | | | | ネオプレンゴム設置, ケーブル相互連結 | 4) |
| 17 | Faroe (斜張橋) | 架設系 完成系 | Denmark | | | 風雨時の 振動 | ケーブル:架設時, 完成時共に, NNW, 風速 10~15m/sで振動発生, 振幅50~100mm 簡易振動測定装置設置 | ケーブル制振ロープ, ヘリカルストレーク 設置 | 3) 16) 6) 20) 21) |
| 18 | Flehe (斜張橋) | | Germany | | | | | ケーブル相互連結 | 4) |
| 19 | Forth Road (吊橋) | 架設系 | UK | | | 振動発生 | 塔:橋軸直角方向の風, 塔頂風速約13m/s で渦励振発生. 最大振幅1200mm. | スライディングブロックにより制振 | 11) 16) 17) |
| 20 | Fykesund (吊橋) | 完成系 | Norway | | | 振動発生 | 桁:たわみ振動 | ステイにより補強 | 11) |
| 21 | George Washington (吊橋) | 完成系 | USA | | | 振動発生 | 桁:おだやかなたわみ振動, 微小ねじ れ振動 | | 11) |
| 22 | Golden Gate (吊橋) | 完成系 | USA | | 1942~1952 | 振動発生 | 桁:9~11m/s以上の風で振動. 振幅は 風速と共に増大. 1951年12月, 25~30 m/sの風によりねじれ-たわみ連成振 動発生. 最大倍振幅3.3m. 風洞実験と 対応. | 部分的トラス補強 | 11) 30) 31) |
| 23 | Helgeland (斜張橋) | 完成系 | Norway | | | 振動発生? | ケーブル | | 16) |
| 24 | Humber (吊橋) | 完成系 | UK | | | 振動発生 | ハンガー:レインバイブレーション | stock bridge damper | 22) |
| 25 | Jinjiang (トラスアーチ橋) | 完成系 | China | | | 振動発生 | ハンガー:H型断面, 最長部材長32m. 風速8.6~13.2m/sで渦励振発生. 振幅 70mm. | TMD設置 | 16) |
| 26 | Kessock (斜張橋) | 架設系 完成系 | UK | Scottish Development Department, Cleveland Bridge, Redpath Dorman Long, Dr.Homberg, Crouch and Hogg with Ove Arup and Partners | 1988~, 1991 Oct. ~1992 May | 振動発生 | 桁, ケーブル:架設時桁閉合直前に風速12 m/sで鉛直曲げ渦励振発生. 振幅50mm 風洞実験値(再実験)とほぼ一致. 22m/sで鉛直曲げ渦励振. 振幅90~200 mm. 最長ケーブルスパン中央で振幅250mm TMD設置後, 風速20~22m/sで大振 幅振動発生. 最大振幅110mm(曲げ渦励 振). ねじれ振動も同じ風速域で発生(原因特定できず). | TMD設置 ほとんどのTMDよりオイル抜け | 16) 26) 27) 28) 29) |

表2.3-6(3/4) 国外橋梁の実機(動態)観測および振動事例, 制振対策事例一覧

| | 橋 梁 名 | 対象系 | 所在地 | 実機動態観測の実施 | | 振動の有無 | 構造系と振動種別 桁 / 主塔 / ケーブル / 部材 | 制 振 対 策 | 出典 |
|----|--|------------|-------------|-----------|-----|----------|--|---|--------------------------|
| | | | | 機 関 | 期 間 | | | | |
| 27 | Kohlbrand (斜張橋) | | Germany | | | 振動発生 | ケーブル:橋軸に対して50°前後の風で振動しやすく, 振幅は50cm程度 | 2方向に90°角度を変え, ショックアブソーバを設置. | 6) 20) 21) 23) |
| 28 | Lande (斜張橋) | 完成系 | Portugal | | | 振動することあり | ケーブル:冬場の方がよく振動する. 問題となる振動ではない. | ケーブル定着部前面にネオプレンゴム使用 | 3) |
| 29 | Liard River (吊橋) | 完成系 | USA | | | 振動発生 | 桁:微風にて小振動, 18~26m/sでねじれ振動 | | 11) |
| 30 | Lions Gate (吊橋) | 完成系 | Canada | | | 振動発生 | 桁:風速22~27m/sでたわみ振動発生 | | 11) |
| 31 | Lodemann (斜張橋) | 完成系 | Germany | | | 振動発生 | 塔:ケーブル取り付け位置より上部(30.5m)が風速およそ40m/sでギャロッピングにより破壊. 事前にクラック発生風洞実験実施. 風向橋軸直角方向ではnegative slope. | 破断位置より上部は再架設せず | 14) 16) |
| 32 | Longs Creek (斜張橋) | 完成系 | Canada | | | 振動発生 | 桁:π型断面(B=10.1m, D=2.4m). 風速9~13m/sで振動発生. 最大振幅30cm 部分模型による風洞実験実施. 実験値と実際の応答は良く一致. ケーブル:wake instability | 桁より水中に箱を吊り下げ, 減衰増加を期待. 恒久的対策としてsofit plate+edge fairingを設置. ただし, 最適形状のfairingは桁下空間の大きさに敏感. スペーサ設置 | 13) 16) 18) 20) |
| 33 | Main 11 (斜張橋) | | Germany | | | | | ケーブルにスペーサ設置 | 24) |
| 34 | Menai Straits (吊橋) | 完成系 | UK | | | | 桁:3度にわたり, 風により破損. 最後は床組等修復 | | 11) |
| 35 | Nassau (吊橋) | 完成系 | Germany | | | | 桁:破損 | | 11) |
| 36 | Neuenkamp (斜張橋) | | Germany | | | 振動発生 | ケーブル:上段ケーブル倍振幅2mの振動発生 | ケーブル-ケーブル相互連結 | 4) |
| 37 | Niagara-Lewiston (吊橋) | 完成系 | USA, Canada | | | | 全体系:破壊 | | 11) |
| 38 | Normandy (斜張橋) | 架設系 完成系 | France | | | - | | ケーブル制振ロープ設置 | 3) |
| 39 | Papineau (斜張橋) | 完成系 | Canada | | | 振動発生 | ケーブル:ウェイクギャロッピング発生 | スペーサ設置 | 16) 20) |
| 40 | Pasco-Kennewick (斜張橋) | | USA | | | | | ケーブルにダンパー設置 | 24) |
| 41 | Peace River (吊橋) | 完成系 | USA | | | 振動発生 | 桁:微風にて小振動, 22~28m/sでねじれ振動 | | 11) |
| 42 | Rhein Brücke Köln Rodenkirchen (斜張橋) | 架設系 | Germany | | | 振動発生 | 桁:ねじれ振動発生. 振幅50mm程度(桁端?) | spring-dashpot-damper設置 | 16) |
| 43 | Saint Nazaire (斜張橋) | 完成系 | France | | | - | ケーブル:振動現象を見た報告が2~3例. いずれも降雨なし. ケーブル振動観測予定. | オイルダンパー設置 | 3) 20) |

表2.3-6(4/4) 国外橋梁の実機(動態)観測および振動事例,制振対策事例一覧

| No. | 橋梁名 | 対象系 | 所在地 | 実機動態観測の実施 | | 振動の有無 | 構造系と振動種別 | 制振対策 | 出典 |
|-----|---|----------------|-------------------|-----------|------------------------|--------------|--|--|-----------------|
| | | | | 機関 | 期間 | | | | |
| 44 | Severn (吊橋) | 架設系 完成系 | UK | | | 振動発生 | ハブカ-:渦励振, 風速5m/sで振幅12mm. 完成後まもなく, 長さハブカ-が1m程 度の振幅で振動 | ハブカ-ローフにストップリジダンク設置 ストップリジダンク設置, 風向により回 転 | 16) 4) 6) |
| 45 | Sky (斜張橋) | 架設系 完成系 | Canada | | | 微小 | ケーブル:微小な振動発生 | ケーブル両端に弾性ダンパ設置 | 5) |
| 46 | Sunshine Skyway (斜張橋) | 架設系 | USA | | | 振動発生 | ケーブル:グラウト注入前に振動発生 | ケーブル制振用油圧ダンパー設置 (設計時にすでに計画) | 5) 20) |
| 47 | Tacoma Narrows (吊橋) | 完成系 | USA | | | 振動発生 | 桁:たわみ限定振動(風速13~18m/s) 風速19m/sでねじれ振動を起こし崩壊 | | 11) |
| 48 | Tay (連続トラス橋) | 完成系 | UK | | | | 桁:強風により通過中の列車とともに 崩壊. | | 11) |
| 49 | Thousand Islands (吊橋) | 完成系 | Canada | | | 振動発生 | 桁:たわみ振動 パフエーティングまたはフラッター | 斜ケーブル設置 | 11) 16) |
| 50 | Tjorn (斜張橋) | | Sweden | | | 振動発生 | ケーブル | ショックアブソーバ設置 | 25) |
| 51 | West Gate (斜張橋) | 完成系 架設系 | Australia | | | 振動発生 | 桁:ガスト応答. 接近流の乱れの強さ $lu=10\sim 20\%$. 全径間弾性模型による風洞実験実施. 実観測と応答振幅一致. ケーブル:ウェイクキャロッピング. 振幅 約100mm | | 15) 16) |
| 52 | Wheeling (アーチ橋) | | USA | | | 振動発生 | ハブカ-:渦励振およびwake instability 発生 | スベーサ設置 | 20) |
| 53 | Wye (斜張橋) | 完成系 | UK | | '77.12.19 ~'78.5.19 | まれに有為 な振動 | 桁:風速6.5~8m/sで最大倍振幅37mm 風洞実験による渦励振発生風速域と対 応. ただし振幅実測値は実験値の1/4 程度. ガスト応答観測されず. | ケーブル制振用スベーサ設置 | 1) 4) |
| 54 | across Vltava (アーチ橋) | 完成系 | Czecho | | | 振動発生 | 鉛直材:直径1mの円柱. 最長部材(部材 長42m)で, 風速7, 8, 11m/sで11, 13, 5.3cmの振幅観測(1/2点). 渦励振と推定. | 円柱内部に小石を充填. (部材長の3/4) 減衰変わらず. しかし固有振動数低下 し, 最大振幅低下. | 12) |
| 55 | carrying intersec- tion of state high way 119 and 157 (桁橋) | 架設系 | Boulder, USA | | | (飛散) | PC桁:架設中ハリケーンの襲来による 風速80~100mphと推定. | | 9) |
| 56 | over Ohio River (Interstate 470) (アーチ橋) | 架設系 | Wheeling, USA | | | 振動発生 | ハブカ-ケーブル:損傷. 工期に影響. | ハブカ-定着部に木製シム取り付け | 7) |
| 57 | over Ohio River (Interstate 79) (アーチ橋) | 完成系 | Pittsburgh USA | | | 振動発生 | バックスハブカ-:振動によりクラック発生 | | 8) |

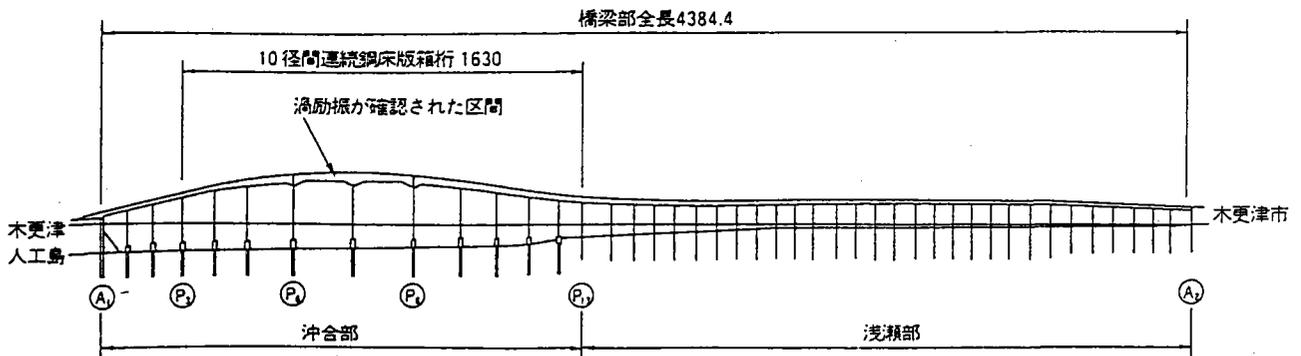
(表2.3-6における出典一覧)

- 1) J. Smith, "Wind Induced Dynamic Response of the Wye Bridge", Eng.Struct., vol.2, Oct.1980, pp.202-208
- 2) T.Kumarasena, R.H.Scanlan, "Wind-Induced Motions of Deer Isle Bridge", J.Struct.Eng., vol.117, No.11, 1991, pp.3356-3374
- 3) "橋と景観ヨーロッパ編Ⅰ", (財)海洋架橋調査会, 1989年2月
- 4) "橋と景観ヨーロッパ編Ⅱ", (財)海洋架橋調査会, 1991年12月
- 5) "橋と景観北アメリカ編", (財)海洋架橋調査会, 1990年12月
- 6) "欧米各国における斜張橋・吊橋の設計及び維持管理技術の調査研究報告書", 昭和61年3月
- 7) Engineering News Record, Sept.10, 1981
- 8) Engineering News Record, Nov.17, 1983
- 9) Engineering News Record, Feb.4, 1988
- 10) Engineering News Record, Sept.28, 1989
- 11) 橋梁と基礎・海外文献研究グループ, "落橋とその原因", 橋梁と基礎, 78-11
- 12) M.Pirner, "Several Examples of Wind-Induced Vibrations", Practical Experiences with Flow-Induced Vibrations, 1979, pp.753-759
- 13) R.L.Wardlaw, "Approaches to the Suppression of Wind-Induced Vibrations of Structures", Practical Experiences with Flow-Induced Vibrations, 1979, pp.650-661
- 14) O.Mahrenholts, H.Bardowics, "Wind-Induced Oscillations of Some Steel Structures", Practical Experiences with Flow-Induced Vibrations, 1979, pp.643-649
- 15) W.H.Melbourne, "Model and Full Scale Response to Wind Action of the Cable-Stayed Box Girder West Gate Bridge", Practical Experiences with Flow-Induced Vibrations, 1979, pp.625-632
- 16) 風洞実験相似則検討小委員会(第2期)海外アンケート
- 17) Proc. of ICE, paper No.6890
- 18) NRCC NAE report LTR-LA-8, 1968
- 19) NRCC NAE report LTR-LA-194, 1976
- 20) Cable-Stayed Bridges, M.Ito, Y.Fujino, T.Miyata, N.Narita (Eds.), Elsevier, 1991
- 21) 横山, 日下部, "斜張橋ケーブルの風による振動と対策", 橋梁と基礎, 89-8
- 22) A.Zasso, M.Bocciolone, J.Brownjohn, "Rain-Wind Aeroelastic Instability of the Inclined Hanger of a Suspension Bridge", Proc. of Inaugural Conf. of the Wind Engineering Society, Sept., 1992
- 23) 鋼斜張橋-技術とその変遷-, (社)土木学会, 1990
- 24) 橋梁と基礎, 85-8
- 25) 橋梁と基礎, 85-3
- 26) A.A.C.Wallace, "Wind Influence on Kessock Bridge", Design against Wind-Induced Failure, Bristol, 1984
- 27) A.A.C.Wallace, "Wind Influence on Kessock Bridge", Eng.Struct., vol.7 1985, pp.18-22
- 28) J.S.Owen, et.al., "The Prototype Testing of Kessock Bridge: Response to Vortex Shedding", Proc. of 2nd UK Conf. on Wind Eng., Warwick, 1994
- 29) A.M.Vann, et.al., "The Prototype Testing of Kessock Bridge: Long Term Monitoring of Response to Wind", Proc. of 2nd UK Conf. on Wind Eng., Warwick, 1994
- 30) G.S.Vincent, "Golden Gate Bridge Vibration Studies", J. Structural Div., ASCE, Vol.84, ST6, Paper 1817, 1958
- 31) University of Washington, Bulletin 116, Part IV, Chapter VII

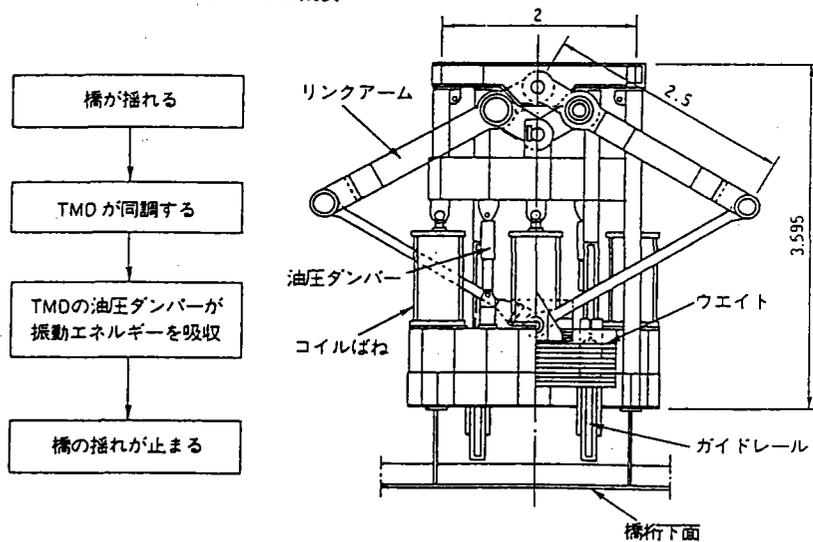
表2.3-7 東京湾横断道路(東京湾アクアライン)の風による振動

| 対象系 | 振動現象概要 | 制振対策 |
|--------------|---|--|
| 施工後 (完成系) | <ul style="list-style-type: none"> ・振動種別 : 渦励振 ・周期 : 約 3 秒 ・最大振動振幅 : 約 50 cm ・10径間連続箱桁橋(P3~P13)のうち, P6~P8の2径間(橋梁部で最大の240 mの支間長)で発生. ・橋軸に対して直角の南西方向から吹く15~16 (m/S) 前後の風で発生. | <ul style="list-style-type: none"> ・TMDの設置を行い, 制振効果を得た. |

●渦励振の発生位置



●TMDの制振メカニズムとTMDの概要



2. 4 その他の影響

1) その他の影響

橋梁構造物におけるその他の風の影響としては、横風を受ける車両の走行性に関する問題や高欄の風切り音、構造物が周辺の風環境に与える影響の問題等が挙げられる。このうち、後者の問題は高欄に吹き付ける風による異常音発生であり、騒音として周辺生活環境に与える影響が大きい場合、高欄形状の変更等の対策を行うことになる。

ここでは、橋梁の耐風設計を行う際に初期の設計段階から、十分に配慮が必要な車両走行性に関する問題を中心に述べる。

2) 車両の走行性に関する問題

走行時の車両に作用する外乱のひとつに空気力学的外乱があり、その中には大きく分けて気象的・地形的条件に基づく自然風と人為的原因による横風変動がある。横風変動による車両の「横滑り」や「転倒」、ハンドルをとられることによる走行不安などの問題は必ずしも橋梁に限った問題ではない、しかしながら、橋梁設計においては架設地点が河川や海上、渓谷部など、風環境が厳しい場合が多いことから、橋梁本来の目的である交通物を安全に輸送・通行させる機能を満足させるため、強風時の車両走行の安全性の問題にも配慮する必要がある。

既往の横風安定の研究によると、走行車両の横方向安定に大きく影響を与えるものには、横風をうけることによって車両に作用する横力、ヨーイングモーメント、揚力などが挙げられる。風などによって振動する橋梁上においては、さらに、橋梁振動による慣性力を考慮する必要があるだろう。しかしながら、このような車両の走行安定性は、走行速度、路面の状態、車両形状および重量に関係することから、一般には事故防止の点より強風時の速度制限や通行止めなどの通行規制がなされることが多い。

3) 積極的な横風外乱防止対策

強風の発生が特に予想される地点に橋梁を建設する場合、積極的な走行安全対策がとられる場合がある。ここでは、突風または、主塔などの構造まわりの風速変化による影響を軽減する方策（横風対策工）を検討・設置した事例を紹介する。

前述したとおり、これらの対策は、風荷重の増加や桁断面の空力特性の劣化を生ずることもあるため、構造物の安全性の点から初期の設計段階から十分な検討が必要である。

① 番の州高架橋

＜暴風の頻度＞

10 分間平均風速が 25m/s 以上を「風による通行止め基準値」として、1988 年 4 月から 5 年間で、通行止め 5 回。

＜遮風壁の形状・寸法＞

遮風壁の構造を下図に示す。設置初年度に高さ 1m の壁高欄上に、高さ 1m で充実率 50%、67%、100% の 3 タイプについて検討した結果、67% タイプが逆流域が最も少なく、かつ風速低減効果が 100% タイプと大差ないことが判明したため、以後はこのタイプで遮風効果の大きい、高さ 2m の遮風壁を設置している。

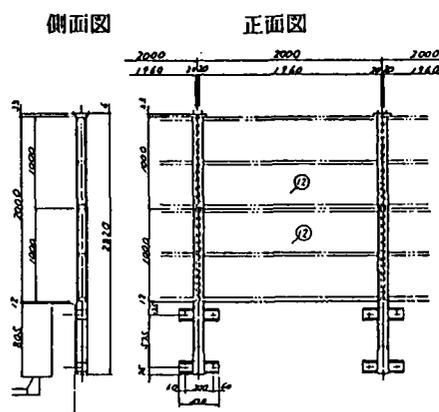


図-1 遮風壁の構造

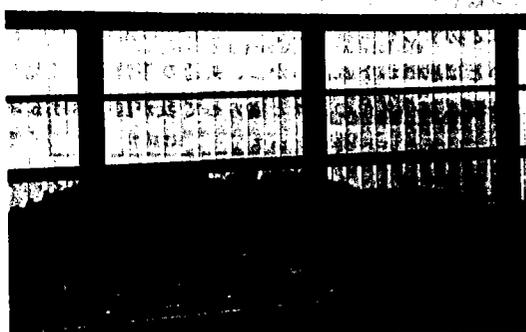


写真-1 遮風壁設置状況

＜遮風効果の検証＞

超音波風速計（路面上 2m、3m）を設置した自動車を時速 50 km/h で定速走行させ、瞬間風速を連続測定した。計測結果を下図に示す。

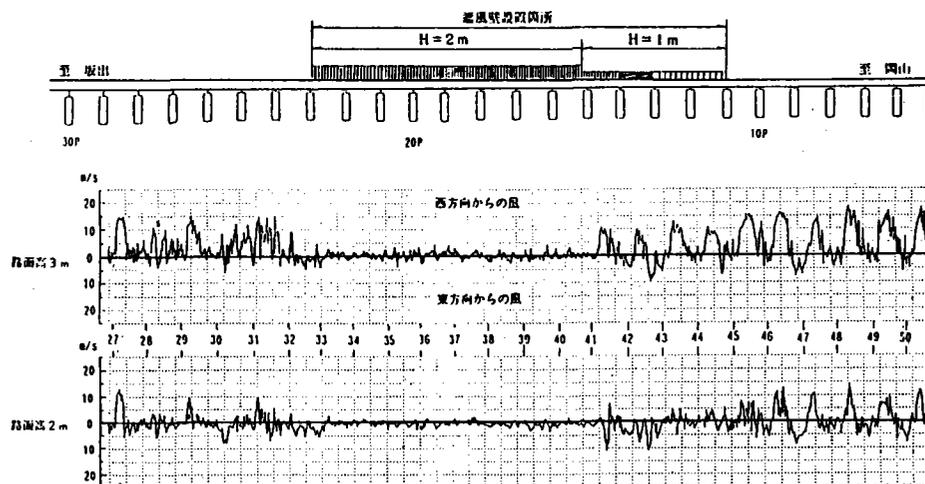


図-2 番の州高架橋付近の風の観測結果（上り走行車線）

＜参考文献＞

中村守、長野節夫、「瀬戸中央自動車道における横風対策について」、第 20 回日本道路会議論文集、1040、pp1330-1331、平成 5 年、(社) 日本道路協会