

## S 字型曲線複合斜張橋の予備設計段階における渦励振応答の推定

Prediction of vortex excitation response for a hybrid cable-stayed bridge at preliminary design stage

吉村 健\*, 水田洋司\*, 篠原輝之\*\*, 町田信彦\*\*\*, 田中孝久\*\*\*

Takeshi Yoshimura, Yoji Mizuta, Teruyuki Shinohara, Nobuhiko Machida, Takahisa Tanaka

\*工博, 九州産業大学教授, 工学部土木工学科 (〒813-8503 福岡市東区松香台 2-3-1)

\*\*工修, 新構造技術株式会社技術本部 (〒136-0071 東京都江東区亀戸 1-42-20)

\*\*\*九州産業大学大学院工学研究科 (〒813-8503 福岡市東区松香台 2-3-1)

There are cases where it is not possible to predict the amplitude of vortex excitation with high accuracy by 2D wind tunnel model tests at a preliminary design stage. A good example is the proposed hybrid cable-stayed bridge with greatly varying cross-sectional shapes of the girder along the bridge axis treated in this study. Firstly, wind tunnel tests were conducted for four 2D models. Secondly, a linearized method for 3D numerical analysis was prepared and then applied to examine the response to this bridge.  $V-A-\delta_{3D}$  (wind speed - amplitude - structural damping) contour graphs obtained by the analyses showed that one of the triangular fairings that were examined was effective for a decrease in the maximum amplitude of response below the allowable value. Based on this result, it was decided that the bridge girder with the fairing should be included in the detailed design.

*Key Words : vortex excitation, 2D wind tunnel model test, 3D numerical analysis, preliminary design, hybrid cable-stayed bridge*

## 1. まえがき

中径間橋梁の耐風設計では、渦励振、ギャロッピングおよびねじれフラッタの3種の空力不安定振動現象に対する検討が必要であり、予備設計の段階では、道路橋耐風設計便覧<sup>1)</sup>に基づく机上検討のみが通常行われる。しかし、3次元性が強い橋梁の場合、予備設計を含む初期の設計段階で2次元模型による風洞実験を行い、耐風安定化対策の方針を定める方が効率の良い場合がある。例えば、桁の幅と横断勾配が橋軸方向に大きく変化する曲線桁橋<sup>2)</sup>、桁高が大きく変化する変断面桁橋<sup>3)</sup>、全く異質の断面で構成されるハイブリッド吊床版橋<sup>4)</sup>、単弦ローゼ橋の変断面アーチリブ<sup>5)</sup>などがこれに当たる。この場合、代表的一断面を選定して2次元模型実験を実施しても、3次元性の強い構造であるが由に、実機の対風挙動をうまく推定し難いものと思われる。したがって、この段階で利用できる経済的で平易な推定手法の整備が望まれる。

最近著者らは、S字型の平面線形を有する複合斜張橋の予備設計段階で、主桁の耐風安定化対策の方針決定の業務を行なう機会を得た。そこではまず、複数の2次元模型による風洞実験を行い、自由振動法によって

非定常空気を測定した。次に、線形化された数値解析法を整備し<sup>6)</sup>、実験結果を用いた3次元応答解析を行って実機の渦励振応答特性を推定した。その概要を以下に記す。

## 2. 予備設計における対象橋梁の概要

予備設計段階で提案された橋梁を図-1に示す。190mの主径間と53+47=100mの側径間は、鋼3室箱桁とPC3室箱桁でそれぞれ構成されている。この主桁は、鋼製の塔から一面吊形式のケーブルによって吊られている。平面線形は、曲率半径280mを有するS字型を成している。そのため、主桁の横断勾配と総幅は、それぞれ $i=-9\sim+9\%$ および $B=20.2\sim25.6m$ のように大きく変化する。 $i=+9, +6, +3$ および0%の箇所における鋼主桁の断面図は、図-2(a)~(d)に示すとおりであり、 $i=-9, -6, -3\%$ の箇所におけるそれらは、図-2(a)~(c)を左右逆向きにしたものである。図-2(e)はPC桁の断面図であり、上部工の主な諸元は表-1に記されている。

本橋の平面線形と主桁断面は、かつしかハーブ橋<sup>2)</sup>とよく似ている。したがって、主桁の耐風安定化対策

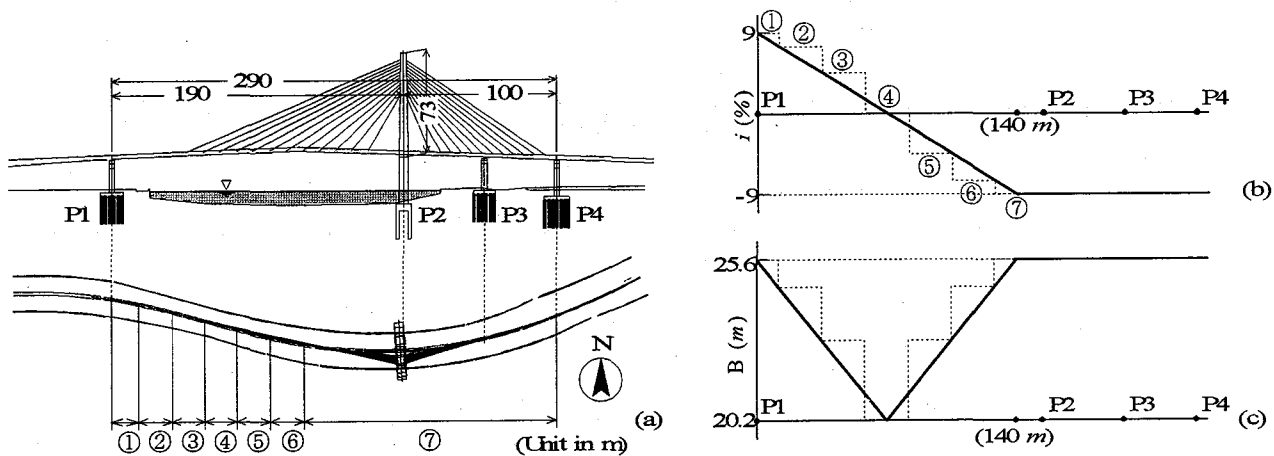


図-1 本橋の側面図と平面図(a), および主桁の横断勾配(b)と幅(c)

表-1 主桁の主な諸元

| $i$ (%) | 鋼/PC | $B$ (m) | $w$ (tf/m) | $m^2/m$ |
|---------|------|---------|------------|---------|
| 0       | 鋼    | 20.2    | 14.44      | 430.6   |
| 3       | 鋼    | 22.0    | 15.44      | 558.3   |
| 6       | 鋼    | 23.8    | 16.43      | 700.1   |
| 9       | 鋼    | 25.6    | 17.39      | 828.1   |
| 9       | PC   | 25.6    | 51.93      | 899.6   |

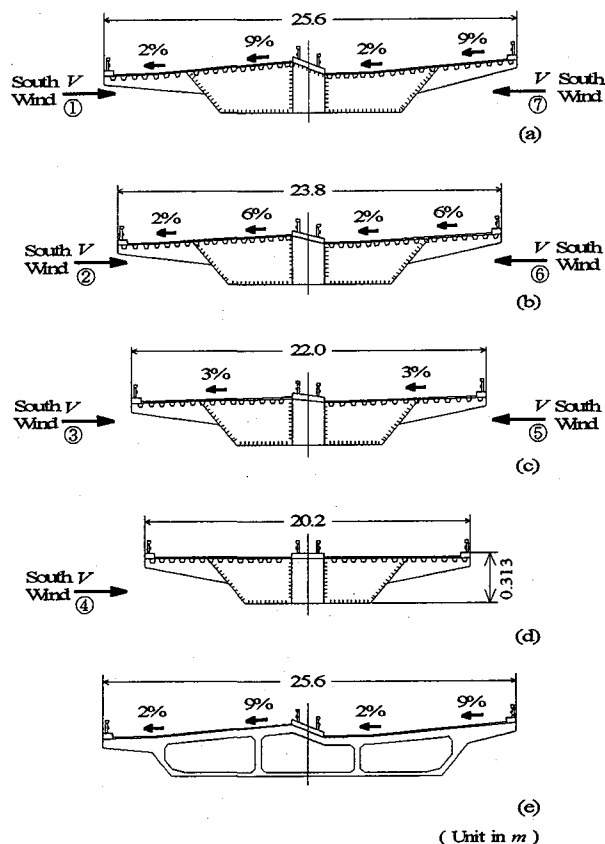


図-2 横断勾配  $i = +9, +6, +3, 0\%$  の箇所における主桁の断面形状

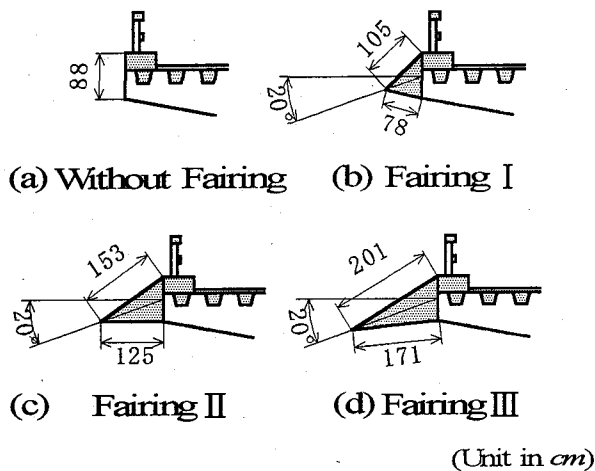


図-3 3種の三角形フェアリングの形状

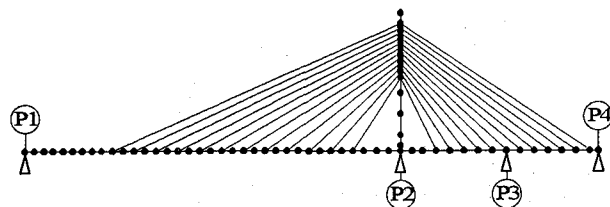


図-4 数値解析モデル

についても同橋で検討されたものを参考にして、図-3に示すタイプⅠ～Ⅲの3種の三角形フェアリングを検討対象にした。

### 3. 検討手順

机上検討の結果、約  $20\text{m/s}$  の風速で、許容振幅を越える鉛直曲げ1次モードの渦励振を生じることが推定された。そこでまず、鉛直曲げ1自由度系の2次元ばね支持模型を用いた風洞実験を実施した。使用した模型は、図-2(a)～(d)に示した断面形状を有する4種類であり、 $1/40$  縮尺とした。図中①～④は、図-1の  $i = +9, +6, +3, 0\%$  の箇所が受ける南風を、また⑦～⑤は、 $i = -9,$

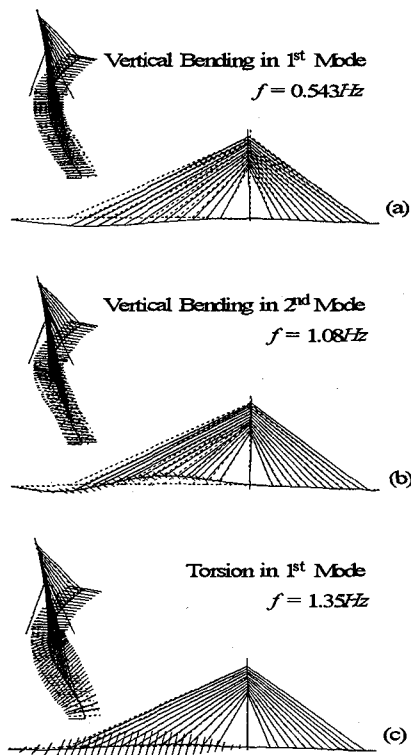


図-5 低次の固有振動モードと固有振動数

—6, —3%のそれをそれぞれ意味する。これらの模型に対し、自由振動法による空力ダンピングを一樣気流中で計測した。S字型平面線形による斜風の影響は無視した。

次に、図-4に示す3次元骨組解析モデルを用いて固有値解析を行った。得られた結果のうち、低次モードのみを図-5に示す。側径間是不動であるので、図-2(e)に示したPC桁断面に関する模型実験は省略した。以上の実験値と解析値を用い、次節に記す解析法で実機の渦励振応答を推定した。

#### 4. 3次元解析による渦励振応答解析法

本節に記す解析法は、渦励振のほか、ギャロッピングとねじれフラッタにおける定常振動解、つまり風速・変位応答振幅の近似解の推定に適用できるが、ここでは、鉛直曲げモードの渦励振に関するもののみを取りまとめることにする。まず、図-6に示すような、一樣気流にさらされた鉛直曲げ1自由度系のばね支持模型を考えると、系の運動方程式は、

$$M_{2D} \cdot \ddot{z}(t) + C_{2D} \cdot \dot{z}(t) + K_{2D} \cdot z(t) = L_{2D}(t) \cdots (1)$$

で与えられる。Scanlanの表記法<sup>6,7)</sup>で式(1)右辺の非定常空気を書き改めると、次のようになる<sup>8)</sup>。

注) 通常、 $z(t)$ は下向きを正に取り、式(1)の右辺を「 $-L_{2D}(t)$ 」と書くが、ここでは前者を逆向きに定義し、後者を「 $+L_{2D}(t)$ 」と書いた。

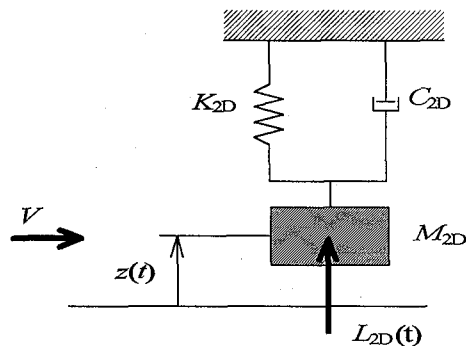


図-6 2次元模型による風洞実験のモデル

$$L_{2D}(t) = \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot V^2 \cdot 2B \left[ k \cdot H_1^* \cdot \frac{\dot{z}(t)}{V} \right] L$$

$$= (\rho_a \cdot B^2 \cdot L \cdot \omega \cdot H_1^*) \dot{z}(t) \cdots (2)$$

ここに、 $\rho_a$ は空気密度、 $V$ は風速、 $k = \omega B/V$ は無次元振動数、 $\omega$ は円振動数、 $H_1^*$ は無次元非定常空力ダンピング係数、 $L$ はスパン長をそれぞれ表す。式(2)では aerodynamic stiffness が省かれているので、気流中における $\omega$ は固有円振動数に等しい。気流中における系の発散率もしくは減衰率が $|\delta_{2D}| \ll 1$ の場合、 $H_1^*$ は次式で精度良く近似される。

$$H_1^* = -\frac{1}{\pi} \cdot \mu \cdot \delta_{a2D}, \quad \delta_{a2D} = \delta_{2D} - \delta_{s2D} \cdots (3)$$

ここに、 $\delta_{s2D}$ は無風時における系の対数減衰率、 $\delta_{a2D}$ は空力減衰率、 $\mu = M_{2D} / (\rho_a \cdot B^2 \cdot L)$ は無次元質量をそれぞれ表す。

この自由振動法で得られた $H_1^*$ の一例は図-7(a)に示すとおりであり、変位 $z(t)$ の振幅 $z$ に依存する。具体的には、 $H_1^*$ は $z$ の多項式で書き表される非線形関数であるので、以下では $H_1^*(z)$ と書くことにする。ただし、正の $H_1^*$ が負減衰空気力に対応する。前節に述べたように、一つの風速に対し、 $i = +9, +6, \dots, -6, -9\%$ の箇所における都合7種の $H_1^*(z)$ がある。図-1(b), (c)に示したように、主桁の横断勾配と総幅は連続的に変化するが、図中に点線で示すように、ここでは①～⑦の各区間におけるこれらの値が一定であるものとして系を単純化した。この場合、 $V = 24 \text{ m/s}$ における7つの区間の $H_1^*(z)$ を図示すると図-7(b)のようになる。

3次元応答解析に用いた骨組モデルは、固有値解析に用いたもの(図-4)と同じである。ここでは、主桁に作用する非定常空気力のみを考慮し、塔とケーブルのそれは無視することにする。ところで、節点変位 $z(t)$ の振幅 $z$ の多項式で書き表された $H_1^*(z)$ をそのままの形で用い、非線形応答解析を行うことは容易でない。そこで本解析では、次の線形化を行って近似解を求めるこ

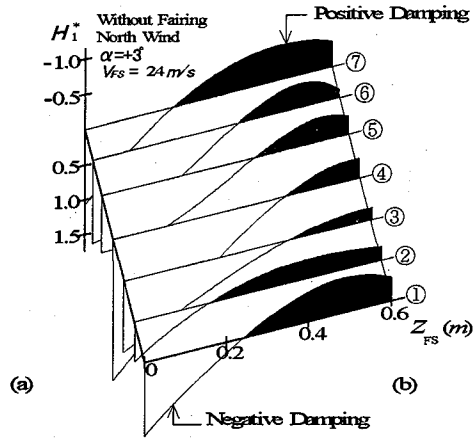
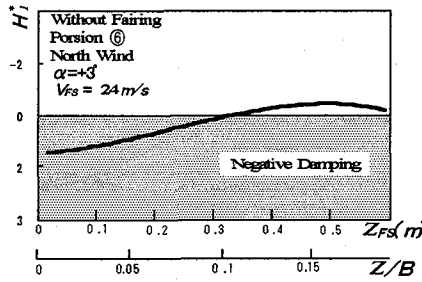


図-7 非定常空力ダンピング係数曲線  $H_1^*(z)$  と、 $i = -9, \dots, +9\%$  の 7 箇所における  $H_1^*(z)$  の例

とにする。つまり、振幅が  $H_1^*(z) \cdot \dot{z}_j$  ( $\dot{z}_j$  は  $\dot{z}_j(t)$  の振幅) に比例した調和外力を節点力として入力し、定常振動に近い運動をしている系を考える。この場合、有限要素長  $\Delta s_j$  の第  $j$  節点に入力されるものは次式で与えられる。

$$L_{3Dj}(t) = (\rho_a \cdot B_j^2 \cdot \omega \cdot H_1^*(z_j) \cdot \Delta s_j) \dot{z}_j(t) \quad \dots(4)$$

この線形化された系ではモーダルアナリシスが適用されよう。図-1(a)に示した鉛直曲げ対称一次モードの渦励振を対象にする場合、2 次以上の高次モードおよび水平曲げとねじれの全モードの寄与は無視して良いので(本質的に 1 自由度フラッタなので)、系の運動方程式と変位ベクトル  $\{u(t)\}$  は、それぞれ次式で与えられる。

$$\ddot{q}(t) + 2 \cdot h_{3D} \cdot \omega \cdot \dot{q}(t) + \omega^2 \cdot q(t) = \frac{L_{3D}(t)}{M_{3D}} \quad \dots(5)$$

$$\{u(t)\} = [\phi] \{q(t)\} = \{\phi\} q(t) \quad \dots(6)$$

ここに、 $q(t)$  はモード座標、 $\{\phi\}$  はモードマトリックス  $[\phi]$  における鉛直曲げ 1 次のモードベクトルをそれぞれ表す。式(5)において、

モード質量：

$$M_{3D} = \{\phi\}^T [M] \{\phi\} = \sum_i \sum_j M_{ij} \cdot \phi_i \cdot \phi_j \quad \dots(7)$$

モード減衰定数：

$$h_{s3D} = \frac{\{\phi\}^T [C] \{\phi\}}{2 \cdot \omega \cdot M_{3D}} = \frac{\delta_{s3D}}{2\pi} \quad \dots(8)$$

モード外力： $L_{3D}(t) = \{\phi\}^T \{L_{3D}(t)\}$

$$= \left( \rho_a \cdot \omega \sum_j B_j^2 \cdot H_1^*(z_j) \cdot \phi_j^2 \cdot \Delta s_j \right) \dot{q}(t) \quad \dots(9)$$

であり、 $[M]$  と  $[C]$  はそれぞれ質量マトリックスと減衰マトリックスである。ここで、式(5)右辺を次のように書き改める。

$$\frac{L_{3D}(t)}{M_{3D}} = \{\phi\}^T \{L_{3D}(t)\} / M_{3D} = 2 \cdot h_{a3D} \cdot \omega \cdot \dot{q}(t) \quad \dots(10)$$

ここに、

$$h_{a3D} = \frac{\frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot \sum_j B_j^2 H_1^*(z_j) \cdot \phi_j^2 \cdot \Delta s_j}{\sum_i \sum_j M_{ij} \cdot \phi_i \cdot \phi_j} = -\frac{\delta_{a3D}}{2\pi} \quad \dots(11)$$

式(10)を用いると、式(5)は次のように書き改められる。

$$\ddot{q}(t) + 2(h_{s3D} - h_{a3D}) \omega \cdot \dot{q}(t) + \omega^2 \cdot q(t) = 0 \quad \dots(12)$$

気流中における系の対数減衰率は次式で与えられる。

$$\delta_{3D} = \delta_{s3D} + \delta_{a3D} \quad \dots(13)$$

解析にあたっては、風速と変位応答振幅(モードの腹)を図-8に示すように格子状に区切る。そして、 $(V_h, Y_k)$  における  $h_{a3D}$  を求め、得られた値を式(13)に代入して  $\delta_{3D} = 0$  となる  $\delta_{s3D}$  (定常振動解) を求める。以上の計算を繰り返すと、 $V \cdot A \cdot \delta_{s3D}$  のコンター図、つまり種々の構造減衰を有する系の風速・変位応答曲線が得られる。

## 5. 解析結果と考察

図-9,10に、それぞれフェアリングなし断面とタイプ II のフェアリング付断面に対する 3 次元応答解析の途中結果の例を示す。これらの図は、 $(V_h, Y_k) = (24 \text{ m/s}, 7.4 \text{ cm})$  (7.4 cm は許容振幅  $Y_d$ ) に関するものであり、節点  $j$  における式(11)の分子の計算値を各節点の位置に

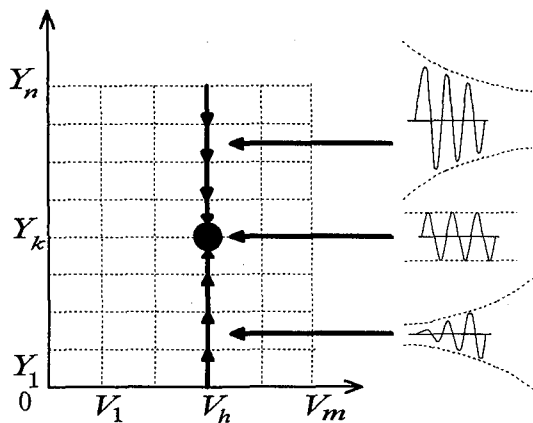


図-8 数値解析における風速と変位振幅  
(モードの腹)のメッシュ分割

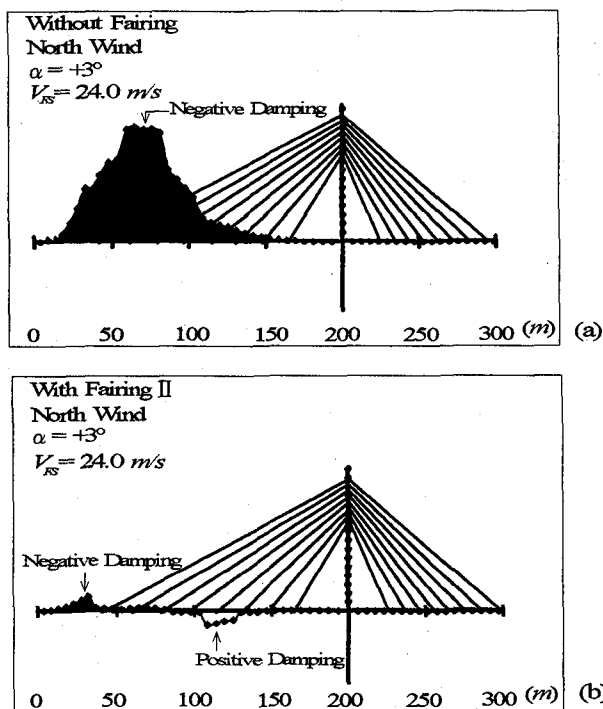


図-9 空力ダンピング分布の解析例

分散してプロットしたものである。図中、網掛け部分が励振力、網掛けなし部分が減衰力を表す。これらの図は、モード外力表示の空力ダンピングの分布を示しており、この分布図を積分してモード質量で除し(式(11))、式(13)がゼロとなる構造減衰を求めた。以上の計算をすべての( $V_h$ ,  $Y_h$ )について実行して、例えば図-10に示す  $V \cdot A \cdot \delta_{s3D}$  のコンター図を得た。そして、すべてのケースについて得られた許容振幅での  $\delta_{s3D}$  の値を取りまとめて図-11を得た。この図は、渦励振振幅を許容値におさえるために必要な構造減衰の値を示すものであり、 $\delta_{s3D} < 0$  は、もともと正減衰の空気力であることを意味する。図-9～11より、実機の渦励振応答について次のことが推定される。

①  $\delta_{s3D} = 0.02$  と仮定すると、図-10に太い実線で示すものが実機の応答曲線である。図示していない

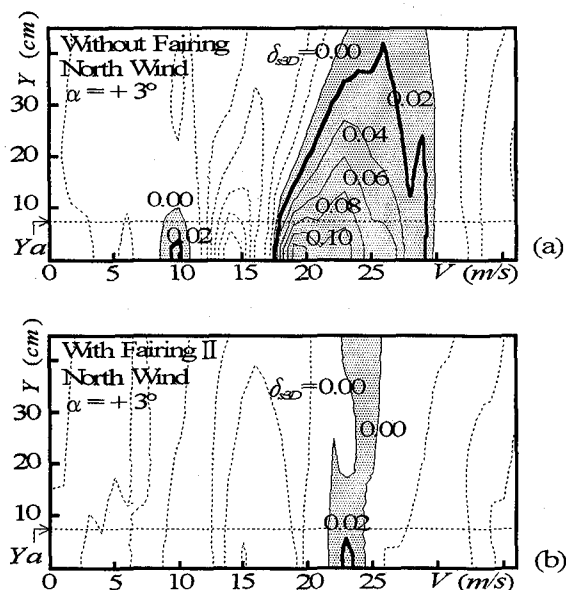


図-10  $V \cdot A \cdot \delta_{s3D}$  の解析例

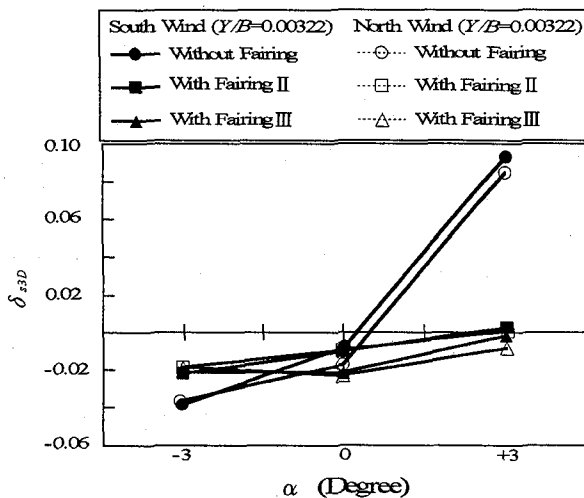


図-11 許容振幅に抑えるために必要な  
 $\delta_{s3D}$  の解析値

が、逆向きの南風に対する応答も図の結果とほとんど同一であった。よって、風向きに依らず、フェアリングなし断面の  $\alpha = +3^\circ$  の場合、最大変位振幅約 40cm の渦励振が生じる。この励振は、 $\delta_{s3D} = 0.09$  以上にしないと許容振幅を上まわるものである。

- ② 上記①の励振は、タイプⅢに依るまでもなく、より短いタイプⅡのフェアリングで十分に抑制できる。
- ③ 上記①以外のケースについては、 $\delta_{s3D} = 0$  でも許容振幅以下の励振しか生じない。
- ④ 図-9(b)に見るように、タイプⅡのフェアリング付断面では空気力そのものが小さくなっているばかりでなく、横断勾配が正と負の部分で分布空気力の符号が反転しており、相互にキャンセルし合って良好な耐風安定性がもたらされている。

- ⑤ 図-5(a)のモード図に見たように、側径間は不動である。このため、応答に与える側径間の寄与はない。なお、図-11(a)に太線で示す応答に、 $V=28\text{m/s}$ 付近で異常が見られる。この異常は、7種の断面に対する  $H_1^*$  特性の差異に起因するものである。

## 6. 今後の検討課題

予備設計段階で検討した結果を以上に述べた。ごく最近開始された詳細設計では、主桁の断面形状が多少変更されている。このことを踏まえ、今後検討しなければならない課題は以下に記すとおりである。

- ① 実施断面について、少なくとも本文と同様の検討が必要である。
- ② 一様気流中で実施した予備実験の結果によれば、タイプⅠのフェアリングの効果はほとんど認められなかったため、これを検討項目から除外した。しかし、乱流中における検討は行っており、タイプⅠとⅡについてより詳細な検討を行い、いずれを採用するか決めなければならない。
- ③ 図-1(b),(c)に点線で示したように、主桁の横断勾配と総幅が①～⑦の7つの区間で一定であるものとして解析した。これについては、各風速における7種の  $H_1^*$  曲線を補間し、各節点毎に異なる節点外力を用いて現在解析中である。
- ④ より少ない模型による次の事柄について現在検討中である。つまり、模型1つ：-9%と+9%；同2つ：-9%、0%および+9%；同2つ：-9%、-3%、+3%および+9%の各種組み合わせで解析し、本解析結果との比較検討を行っている。
- ⑤ 本解析法で得られた数値解の精度が不明である。このことについて検討するため、3次元模型による風洞実験を実施する予定である。更に、非線形3次元応答解析を行い、本法で得られる近似解の精度を検討する必要がある。

## 7. まとめ

S字型の平面線形を有する複合斜張橋について、予備設計段階で鉛直曲げモードの渦励振に対する検討を行った。まず、4種の2次元模型を用いた風洞実験を実施し、自由振動法で空力ダンピングを測定した。次に、これら振幅依存性のある空気力を用い、線形化された3次元応答解析法によって  $V \cdot A \cdot \delta_{ssD}$  のコンター図を求めた。長さの異なる3種の三角形フェアリングによる耐風安定化効果について検討した結果、実機の応答について次のことが推定された。

- 1). フェアリングなし断面は、迎角  $\alpha = +3^\circ$  で最大変位振幅約  $40\text{cm}$  の渦励振を生じる。この励振は、構

造対数減衰率( $\delta_{ssD}$ )を0.09以上にしないと許容振幅を越すものである。

- 2). 上記の渦励振は、中間の長さのフェアリングで安定化される。

以上の結果に基づき、耐風安定化対策法として三角形フェアリングを用いる方針で詳細設計を行うことになった。本解析法については、検討しなければならない事柄が多数残されているものの、予備設計段階で用いるための経済的で平易な手法として位置付けられるものと思われる。

## 謝辞

本研究を行うにあたり、建設省土木研究所の佐藤弘史氏と大儀健一氏に貴重な助言を頂戴した。また、実験と資料整理は九州産業大学空力弾性学研究室の阿部孝行氏と卒研究生によって行われた。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋耐風設計便覧，丸善，pp.112-127，1991。
- 2) 戸田 透 ほか：S字型曲線斜張橋の耐風安定性とその防振対策(その1 完成系)，土木学会第40回年次学術講演会講演概要集第Ⅰ部，pp.487-488，1985。
- 3) 成田 信之，山本 邦夫，佐藤 弘史：長大連続桁の耐風応答特性について，第7回風工学シンポジウム論文集，pp.259-264，1982。
- 4) T. Yoshimura et al.：Proposal of a hybrid stress-ribbon pedestrian bridge for its application to roadway bridges, Proc. fib Symp., Prague, 1999, to be published.
- 5) 伊藤 弘一郎 ほか：新北九州空港連絡橋のアーチリブの耐風性，土木学会第52回年次学術講演会講演概要集第Ⅰ部B，pp.188-189，1997。
- 6) R. H. Scanlan：The action of flexible bridges under wind - (I) Flutter theory -, J. Sound and Vibration, pp.201-211，1978。
- 7) E. Simiu and R. H. Scanlan：Wind effects on structures, John Wiley, 1996。

(1999年9月17日受付)