

# 振子型動吸振器をもちいた長大吊橋の耐風安定性の向上

岡田 徹\*・本家浩一(工博)\*・杉井謙一(工博)\*\*・濱崎義弘\*\*

\*技術開発本部・機械研究所 \*\*都市環境カンパニー・構造技術部

## Improvement of Aerodynamic Stability of a Suspension Bridge by Tuned Pendulum Damper

Toru Okada・Dr. Koichi Honke・Dr. Kenichi Sugii・Yoshihiro Hamazaki

Aerodynamic stability is one of the most important concepts in the design of super long-span bridges. This paper deals with the effect of a tuned pendulum damper (TPD) on bridge deck flutter and describes analytical and experimental studies related to TPD effectiveness. Flutter analysis and a wind tunnel test for a two-dimensional bridge deck model was performed. The flutter speed increased by 20~30% when a TPD with 5% mass and with optimal frequency and damping was used as compared with a bridge deck without TPD.

まえがき = 現在、明石海峡大橋を上回る規模となる東京湾口、伊勢湾口、紀淡海峡などの海峡横断プロジェクトが計画されている。しかし、橋梁の長大化にともない、強風により生じる破壊的振動(連成フラッタ)の発現風速が低下するといわれ、橋梁の耐風安定性の確保が最重要課題となっている。この連成フラッタは、橋梁のたわみ振動とねじれ振動が連成した自励振動で、その発現風速を高めるために、各種検討がおこなわれている。

その代表的なものとしては、補剛桁の断面形状の工夫や二箱桁化、ケーブルシステムの改良などの構造的な対策とともに、動吸振器<sup>1)2)</sup>やジャイロダンパ<sup>3)</sup>、アクティブフラップ<sup>4)</sup>などの制振装置による対策があげられる。これらの方法のうち、ジャイロダンパやアクティブフラップなどのエネルギー供給型の制振装置については、高い耐風安定化効果を有することが解析および実験により確認されている。しかし、これらエネルギー供給型の制振機構は、電力の安定供給や長期使用の信頼性などが懸念され、エネルギーを必要としないパッシブな制振装置が望まれているのが現状である。

本研究では、パッシブな制振装置として、松久ら<sup>5)</sup>によってゴンドラリフトなどに適用されつつある振子型動吸振器(TPD: Tuned Pendulum Damper)の適用を試みた。ここでは、まず、ねじれ振動に対する振子型動吸振器の性能を明らかにし、次に、橋梁の2自由度モデルを対象として平板翼の空気力を利用した数値解析、および2自由度ばね支持模型をもちいた風洞実験を通じて、連成フラッタに対する動吸振器の有効性を検討した。

### 1. 理論解析

#### 1.1 振子型動吸振器<sup>5)</sup>

本研究では、第1図a)に示すように補剛桁内部に設置された円軌道上を台車が走行するタイプの動吸振器を想定している。この円軌道型動吸振器は、等しい曲率半径を有する振子型動吸振器と力学的に等価であるため、第1図b)に示す振子モデルで検討する。振子型動吸振器は、橋梁のねじれ振動に対して振動抑制効果を有しているため、まずはその性能について説明する。

第1図b)は、橋梁をねじり1自由度系のモデルで表現し、ねじれ中心をGとする補剛桁に高さ $l_1$ の支柱GPを立て、P点に長さ $l_2$ 、質量 $m_d$ の振子を取付けたものとする。 $I$ は補剛桁の極慣性モーメント、 $k$ はねじれ方向の等価ばね定数、 $c_d$ は動吸振器に付加する減衰係数である。重力加速度を $g$ とする。このとき、補剛桁のねじれ角を $\theta$ 、動吸振器の相対回転角を $\phi$ とすると、運動方程式は式(1)で表すことができる。

$$\begin{bmatrix} I + m_d(l_2 - l_1)^2 & m_d l_2(l_2 - l_1) \\ m_d l_2(l_2 - l_1) & m_d l_2^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & c_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k + m_d g(l_2 - l_1) & m_d l_2 g \\ m_d l_2 g & m_d l_2 g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M \\ 0 \end{bmatrix} \dots\dots (1)$$

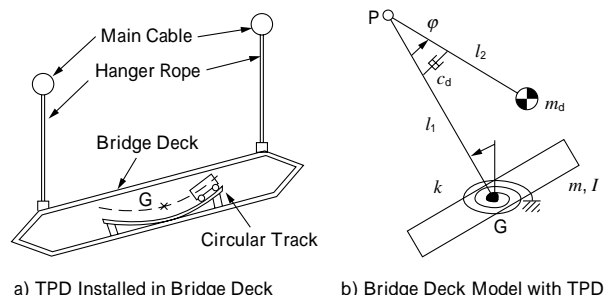
ここで、右辺の $M$ は $M = M^j e^{j\omega t}$ で表される周期的外力とする。松久らの式<sup>5)</sup>にしたがって、無次元化のために次の式、すなわち、

$$\left. \begin{aligned} \mu_r &= \frac{m_d l_2^2}{I}, & \mu_l &= \frac{l_2 - l_1}{l_2}, & \mu_2 &= \frac{k}{I}, & \mu_a &= \frac{g}{l_2} \\ &= \frac{c_d}{2m_d l_2^2}, & f &= \frac{\omega}{\omega_n}, & h &= \frac{M}{k}, & s &= \frac{M}{k} \end{aligned} \right\} \dots\dots (2)$$

を導入すると、補剛桁のねじれ角についての伝達関数は式(3)で示される。

$$\frac{\theta}{s} = \frac{h^2 - f^2 + 2j h}{\mu_r f^2 (1 - \mu_l)(f^2 - h^2) \cdot (h^2 - 1)(h^2 - f^2) + 2j h \{h^2 - 1 + \mu_r (h^2 - f^2)\}} \dots\dots (3)$$

ここで、動吸振器の性能を表す等価慣性モーメント比を式(3)より求める。一般に、動吸振器の固有振動数は主系の固有振動数近傍に設定され、共振点近傍での



第1図 振子型動吸振器(TPD)  
Fig. 1 Tuned pendulum damper (TPD)

応答が評価されることから、式(2)の振動数比 $f, h$ はそれぞれ $f=1, h=1$ とおくことができる。このとき、式(3)の伝達関数から、ばね質量系で構成される動吸振器の性能を表す質量比 $\mu$  ( $\mu = m_d/m$ )に相当する等価極慣性モーメント比 $\mu_e$ が、松久らの誘導と同様にして次式で与えられる。

$$\mu_e = \mu_r(1 - \dots)^2 = \frac{m_d l_1^2}{I} \dots \dots \dots (4)$$

式(4)から、等価極慣性モーメント比は、PG間の距離 $l_1$ の2乗に比例して大きくなる事が確認できる。また、円軌道型動吸振器の円軌道を補剛桁の上方 $l$ の位置に取付けた場合、式(4)の $l_1$ は $l+l_2$ で与えられるため、動吸振器を高い位置に取付けるほど、動吸振器の等価極慣性モーメント比 $\mu_e$ は増加し、制振性能は向上することがわかる。

1.2 振子型動吸振器を含む吊橋のフラッタ解析

本節では、橋桁振動をたわみとねじれの2自由度系で表現し、この系に振子型動吸振器を取付けた場合について述べる。解析モデルは、第1図のモデルに橋梁のたわみの自由度 $y$ を加え、その自由度に対する剛性 $k$ と、たわみおよびねじり方向にそれぞれ構造減衰 $c, c_r$ を付与したものとし、合わせて3自由度の運動方程式で記述できる。このとき、鉛直変位 $y$ を桁幅 $B$ で無次元化して $\phi$ で表し、 $\theta$ および $\varphi$ の各変位を微小と仮定すると、最終的に運動方程式は式(5)で表すことができる。

$$\begin{bmatrix} m + m_d & 0 & 0 \\ 0 & I + m_d(l_2 - l_1)^2 & m_d l_2(l_2 - l_1) \\ 0 & m_d l_2(l_2 - l_1) & m_d l_2^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\phi} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\varphi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c & 0 & 0 \\ 0 & c & 0 \\ 0 & 0 & c_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k & 0 & 0 \\ 0 & k + m_d g(l_2 - l_1) & m_d l_2 g \\ 0 & m_d l_2 g & m_d l_2 g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi \\ \theta \\ \varphi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L(\dots) \\ M(\dots) \\ 0 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (5)$$

運動方程式の右辺の $L, M$ は非定常空気力と呼ばれ、ここでは、換算振動数( $B/U$ ; :振動数,  $U$ :風速)の関数である平板翼の理論値<sup>6)</sup>で与えている。ここで、連成フラッタの発現風速は、複素固有値解析の繰返し計算により求める。

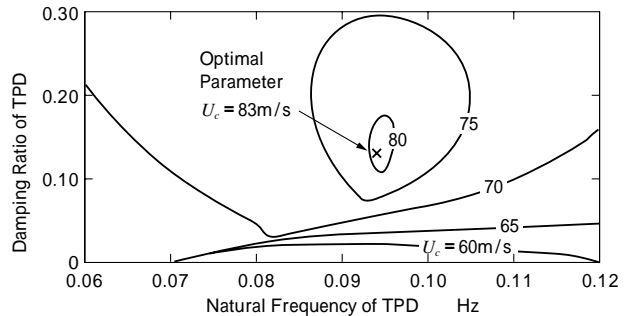
2. 振子型動吸振器の数値的検討

ここでは、中央支間長が2500mの長大吊橋を想定し、1.2節で説明した二次元モデルをもちいて動吸振器による耐風安定化の効果を調べる。吊橋の諸元は、桁幅 $B$ を38.5m、単位長さあたりの全死荷重 $m$ を46700kg/m、極慣性モーメント $I$ を $1.215 \times 10^7 \text{kgm}^2/\text{m}$ とする。たわみとねじれの1次固有振動数は、それぞれ0.065Hz、0.15Hzとする。対数減衰率はそれぞれの振動モードに対し0.02とする。この想定モデルでは、耐風対策を施さないときのフラッタ発生風速は65m/sでそのときの振動数は0.118Hzである。

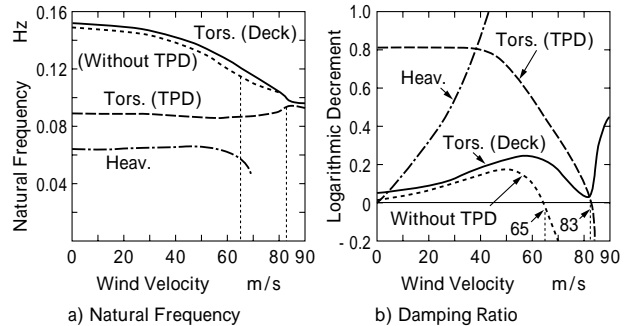
ここで、質量比5%(2335kg/m)の円軌道型動吸振器を第1図a)に示すように補剛桁の内部に取付けたときの結果を示す。このとき、円軌道は補剛桁の重心を通るものとし(すなわち、 $l_1=l_2$ )、その曲率半径は動吸振器の固有振動数から逆算される値となる。動吸振器の固有振動数、減衰比を与え、そのときのフラッタ風速を求

めた。その結果を第2図に示す。図中の実線は連成フラッタ発生風速の等値線を、 $\times$ 印はフラッタ風速が最大値をとる位置である。すなわち、動吸振器の最適パラメータは固有振動数0.094Hz、減衰比0.13となることがわかる。このとき、動吸振器の固有振動数から決まる振子長さ $l_2$ を式(4)に代入すると等価極慣性モーメント比 $\mu_e$ 値は15%になる。

ここで、振子型動吸振器のパラメータを最適値に設定



第2図 動吸振器パラメータとフラッタ風速の関係  
Fig. 2 Flutter speed for bridge deck with TPD



第3図 有風時の橋桁の振動特性  
Fig. 3 Response property of bridge deck with TPD in wind

したときの各風速における橋梁の振動特性を第3図に示す。第3図a), b)は、それぞれ風速と固有振動数および対数減衰率の関係を表している。なお、図中の点線は、動吸振器がない場合の橋桁ねじれモードの固有振動数および対数減衰率である。動吸振器を取付けることにより、橋梁のねじれ振動モードは、動吸振器の振動が支配的になるモードと、桁の振動が支配的になるモードの2種類となる。

風速が低いときには、それらのねじれモードは、互いの固有振動数が離れているため、ほとんど連成せずに独立している。しかし、風速が上がるにつれて、桁の振動が支配的となるねじれのモードは振動数が下がり、動吸振器の振動数に近づくとともに減衰比が増加する。その後、二つのねじれモードの振動数が近づき、その中の一つのモードが不安定になる。このとき、どちらのモードが不安定になるかは、橋梁と動吸振器の振動特性の関係により変化するが、いずれの場合も、桁のたわみとねじれ振動に加えて動吸振器も大きく振れる連成フラッタが生じる。そのフラッタ風速約83m/sは、対策前のフラッタ風速よりも28%増加し、動吸振器の有効性を確認することができる。

同様にして、動吸振器の質量比やタイプを変えて、そ

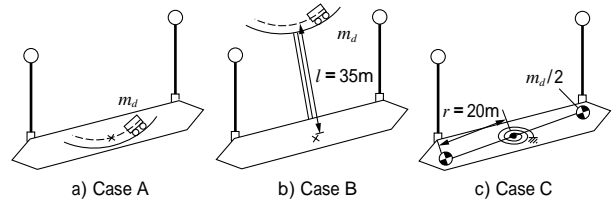
これらの耐風安定化の効果について検証をおこなった。検証した動吸振器のタイプを第4図に示す。Case Aは前節と同様に桁の中に動吸振器がある場合で、Case Bは動吸振器を桁の上方に取付けた場合とした。このCase Bでは動吸振器の重量比 $\mu$ を1%とし、式(5)から求まる等価極慣性モーメント比 $\mu_e$ がCase Aの重量比5%の場合とほぼ等しくなるように、取付高さ $l$ を35mに設定した。また、Case Cの動吸振器は振り型に代えて慣性モーメントを直接付加する方法とした<sup>7)</sup>。Case Cの天秤形状は同一質量でもっとも慣性モーメントが大きくなる形状で、質量体を回転中心から離すほど慣性モーメントは大きくなる。ここでは、両側の質量の距離を桁の幅とほぼ等しくなるように設定し、質量はそれぞれ $m_d/2$ とした。このときの動吸振器の極慣性モーメント比は $\mu_i = m_d r^2 / I$ で表わされる。なお各動吸振器とも質量 $m_d$ 以外の部材の重量は無視している。

第1表に各動吸振器を最適パラメータに設定したときのフラッタ風速および動吸振器の特性を示す。質量比5%のCase A1に対して、質量比を10%と大きくしたCase A2では、フラッタ風速は対策前にくらべ46%と大幅に増加することが確認できる。これは、質量比 $\mu$ の増加の影響だけでなく、動吸振器の設定固有振動数が下がり円軌道の曲率半径 $l_2$ が長くなることにより、等価極慣性モーメント比 $\mu_e$ が質量比の増大以上に増加するためである。また、Case Bでは、質量比が1%と小さくても、質量比5%のCase A1と等価極慣性モーメント比 $\mu_e$ がほぼ等しくなるように桁の上方35mに設置することにより、Case A1とほぼ同様の効果がえられることがわかる。最後に直接慣性モーメントを付加したCase Cについては、Case C2のように質量比を10%と大きくした場合でも、質量比5%のCase A1と同程度の効果しか示さない。この結果も、両動吸振器の等価極慣性モーメント比がほぼ等しいためである。この結果から、振り型動吸振器が直接慣性モーメントを付加した場合よりも有利であることが確認できる。

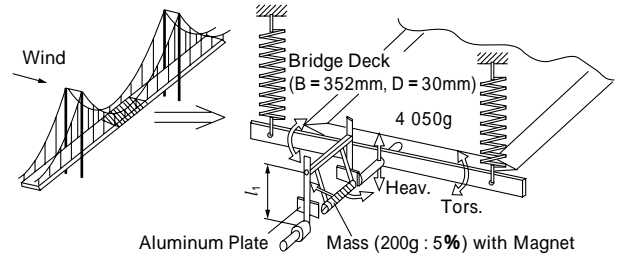
### 3. 実験結果および理論値との比較

#### 3.1 実験装置

2自由度ばね支持模型をもちいた風洞実験を実施して、本振り型動吸振器の有効性を検証する。本実験で使用した橋桁断面模型は縮尺1/109とし、その諸元は桁幅 $B = 0.352\text{m}$ 、質量 $m = 4.05\text{kg}$ 、極慣性モーメント $I = 4.51 \times 10^{-2} \text{kgm}^2/\text{m}$ とする。たわみおよびねじれの振動数は、それぞれ1.34Hz、2.39Hz、対数減衰率はそれぞれ0.024、0.015とした。動吸振器および模型の概観を図



第4図 各種動吸振器  
Fig. 4 Various types of TMD

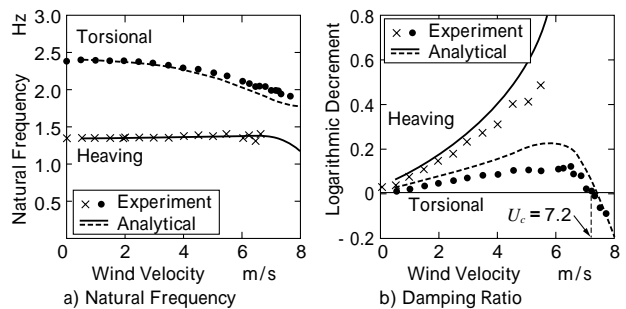


第5図 橋桁実験模型と振り型動吸振器  
Fig. 5 Schematic of the TPD unit and bridge deck model

第5図に示す。動吸振器の質量 $m_d$ は200g(質量比5%)で、橋桁中心と質量部の重心との距離 $l$ を30mmに設定した。その固有振動数は振子の吊長さで調整し、減衰は、質量部に取付けた磁石によりフレーム上のアルミ板に発生する渦電流による減衰力を利用して与えた。

#### 3.2 実験結果

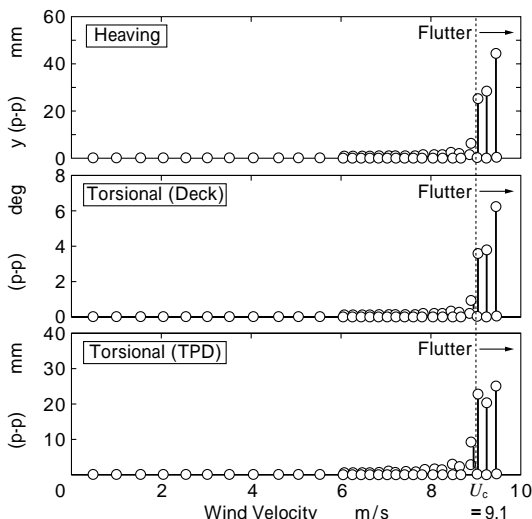
まず、動吸振器を取付ける前の桁単体の振動特性の実験結果と解析結果を第6図に示す。第6図(a)、(b)はそれぞれ風速と固有振動数および対数減衰率の関係を表している。第6図(b)から連成フラッタの発生風速は7.2 m/s (1.95Hz)となることが確認でき、この値は平板翼の空気力をもちいた複素固有値解析により算出した結果7.4m/sと良く一致した結果となった。またフラッタ風速だけでなく、固有振動数や減衰比についても、全風速にわたって実験と解析は比較的一致していることが確認できる。



第6図 対策前の橋桁の振動特性  
Fig. 6 Response properties of bridge deck without TPD in wind

第1表 フラッタ解析結果  
Table 1 Result of Flutter Analysis

Case	Properties of TPD		Properties of Flutter			Optimal Parameters			
	$\mu$ %	$l$ m	Wind Speed m/s	Increase Ratio %	Frequency Hz	$f_{TMD}$ Hz	$l_2$ m		$\mu_e$ %
No TMD	-	0	65	-	0.115	-	-	-	-
A 1	5	0	83	28	0.094	0.094	28.1	0.13	15
A 2	10	0	95	46	0.083	0.087	32.8	0.16	41
B	1	35	84	29	0.098	0.093	28.7	0.12	16
C 1	5	( $r=20$ )	79	21	0.094	0.096	( $r=20$ )	0.08	( $\mu_i=8$ )
C 2	10	( $r=20$ )	84	29	0.088	0.089	( $r=20$ )	0.10	( $\mu_i=16$ )



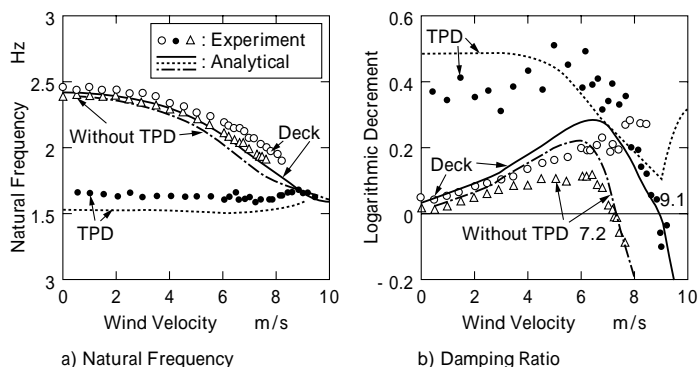
第7図 動吸振器取付時の風速と応答の関係  
Fig. 7 Response of bridge deck with TPD

次に、質量 200g (質量比 5%) の動吸振器を取付けて実験を実施した。動吸振器の最適パラメータは、実験により  $f = 1.7\text{Hz}$ ,  $\zeta = 0.1$  を選定した。フラッタ試験の結果を第7図に示す。なお動吸振器の応答は水平振幅  $x$  で表示している。フラッタ風速は動吸振器を取付ける前の 7.2m/s に比べ 9.1m/s まで約 25% 増加しており、振子型動吸振器の有効性を確認することができる。また、フラッタ風速に達し連成フラッタが発生するまでは、振子の変位は小さく、このことから振子の可動範囲は大して必要としない。

第8図には風速 - 固有振動数と風速 - 減衰図を解析結果と合わせて示している。このとき、解析の動吸振器パラメータは、解析により算出された最適値 ( $f = 1.58\text{Hz}$ ,  $\zeta = 0.08$ ) としている。各振動モードの固有振動数や減衰比とフラッタ風速は、実験と解析とではおおむね一致しており、解析による動吸振器の性能評価は妥当であるといえる。なお、実験結果では、TPD 分岐が不安定になっているが、この理由は、動吸振器のパラメータおよび非定常空力自体が解析と若干異なるためと考えられる。

むすび = 本研究は、連成フラッタの抑制に対する振子型動吸振器の効果を数値解析と風洞実験を実施して検討したものである。えられた主要な結果を以下にまとめる。

(1) 中央支間長が 2 500m 程度の長大吊橋を想定し、振



第8図 動吸振器設置時の橋桁の振動特性

Fig. 8 Response properties of bridge deck with TPD in wind

子型動吸振器の効果を解析により検証した結果、5% 質量比の動吸振器により、フラッタ風速は対策前の 65m/s から 84m/s まで向上することを確認した。

(2) 振子型動吸振器は直接慣性モーメントを付加する動吸振器よりも少ない重量で高い耐風安定性能がえられ、また動吸振器を高所に取付けることにより、さらに軽量化が可能となる。

(3) 二次元模型をもちいた風洞実験を実施し、約 5% 質量比の振子型動吸振器によりフラッタ風速は約 26% 増加することを確認した。この結果は動特性も含めて解析と良く一致し、解析理論についてもその妥当性を確認した。

最後に、本研究に際し、橋梁技術については立命館大学小林紘士教授に、振子型動吸振器については京都大学松久寛教授に、それぞれご教示を賜りましたことをここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 延藤 達ほか：土木学会論文集, 398 号, I-10(1988), p.413.
- 2) N.N.DUNG et al.: 土木学会年次学術講演会, 第 52 回 (1997), p.166.
- 3) 藤澤伸光：土木学会第 50 回年次学術講演会(1995), p.1508.
- 4) H.Kobayashi et al.: Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 41-44 (1992), p.143.
- 5) 松久 寛ほか：日本機械学会論文集 C, 59-562(1993), p.1717.
- 6) 日本鋼構造協会(編)：構造物の耐風工学, (1997), 東京電機大学出版, p.151.
- 7) 川島孝幸ほか：構造強度に関する講演集, 第 18 回 (1979), p.126.