

(論文)

ジャイロダンパを用いた超長大吊橋の耐風安定性の向上

Aerodynamic Stability Improvements in Super-long-span Suspension Bridge through the Use of Gyroscopic Dampers



岡田 徹*(工博)
Dr. Toru Okada



本家浩一*(工博)
Dr. Koichi Honke



杉井謙一**(工博)
Dr. Kenichi Sugii



島田 諭***
Satoru Shimada

This paper deals with a gyroscopic dampers (GD) used to reduce bridge deck flutter. Analytical and experimental GD studies are also described. Flutter analysis and wind tunnel testing verified that GD are very effective in suppressing flutter. In addition, it is shown that GD efficiency can be greatly improved by increasing the rotor speed. Furthermore, analysis showed that an increased GD inertia moment can reduce the GD's oscillation that causes control performance deterioration.

まえがき = 現在、世界最大の明石海峡大橋（中央支間長 1 991m）を上回る規模の吊橋となるといわれている東京湾口、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、これら超長大橋の実現に向けては解決すべき課題は多く、とくに強風により生じる連成フラッタに対する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、ある風速を超えると突然発現し、ひとたび発生すると橋梁に壊滅的なダメージを与える振動で、橋梁のたわみ振動とねじれ振動とが空気力を介して連成することにより生じる。橋梁は支間長が長くなるほど固有振動数が下がり、連成フラッタの発現風速はそれに依りて低下する。このことにより、超長大橋では特に連成フラッタが問題となり、その発現風速を十分に高めるための対策が必要となる。

このような背景のもと、本研究ではジャイロダンパ (GD) による方法に着目し、実験及び解析によりその効果を検証した。ジャイロダンパは、「こま」のようにロータを高速回転させることにより生じるジャイロモーメントを利用した安定化装置の一つである。従来の研究から、長大橋梁に対しても非常に優れた耐風安定化効果を有するといわれている^{1)~4)}。ロータを回転させるためのエネルギーを必要とするため、電力の安定供給や長期使用の信頼性などが懸念されるが、動吸振器などのパッシブな制振装置に比べて、飛躍的に軽い重量の構造になるのが大きな利点である。しかし、超長大橋を対象とした連成フラッタに対して実験による検討が行われた例はなく、詳細な設計パラメータの影響などは明らかにされていない。連成フラッタに対するジャイロダンパの効果を実験により検証することは、解析理論の妥当性を検証する上でも有意義である。

本論文では、まずジャイロダンパを含む橋梁のフラッ

タ運動方程式、及びねじれ振動系に対するジャイロの制振理論を説明する。ここでは、フラッタ抑制効果の指標となる等価極慣性モーメント比を定義し、その特性を明らかにする。次に、2自由度ばね支持橋桁断面モデルを用いた実験により、その有効性を示すとともに解析との比較を行う。最後に中央支間長 2 500m の超長大吊橋を想定したジャイロダンパの設計例を示し、実用化に向けた考察を加える。

1. 理論解析

1.1 橋梁のフラッタ方程式

図1に示す箱桁内にジャイロダンパを設置した場合について考える。ジャイロダンパは、ロータとそれを1自由度回転支持で支えるジンバルから構成され、橋梁のねじれ振動に対して制振効果がある。ジンバル軸の回転をバネとダンパで支え、ジンバルの固有振動数と減衰比を適切にチューニングすることにより制振効果を持たせる。

図1に示す橋梁の運動を、たわみとねじれの2自由度

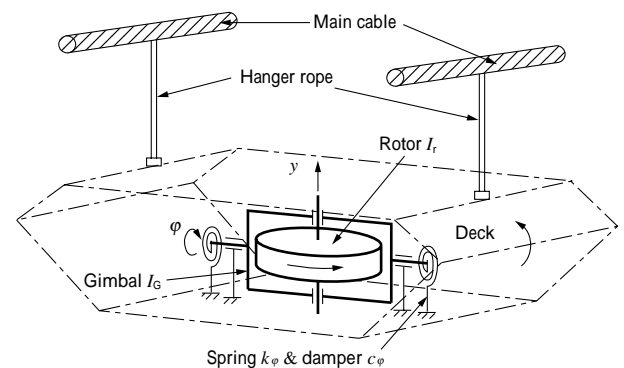


図1 橋桁内に設置したジャイロダンパ⁵⁾

Fig. 1 Gyroscopic damper (GD) installed inside deck box⁵⁾

*技術開発本部 機械研究所 **都市環境・エンジニアリングカンパニー 構造技術部 ***磯コベルコ科研 エンジニアリングメカニクス事業部

で表現し、たわみ変位を y 、ねじれ変位を φ とおく。ジャイロダンパについては、ロータの y 軸回りの極慣性モーメント及び回転角速度をそれぞれ I_r 、 $\dot{\varphi}$ とおく。また、ロータを含めたジンバルの極慣性モーメントを I_G で表し、その回転変位を φ とおく。このとき、橋桁とジンバルに作用するジャイロモーメントをそれぞれ F 、 F_φ とすると、次式で表される。

$$F = I_r \dot{\varphi} \cos \varphi, F_\varphi = I_r \dot{\varphi} \sin \varphi \dots\dots\dots(1)$$

ここで、ジンバルの回転変位 φ は十分に小さいと仮定して $\cos \varphi$ を 1 とおいて線形化すると、ジャイロダンパを含めたフラッタ振動系の運動方程式は、たわみ自由度 y を桁幅 B で無次元化して \ddot{y} で表すと、次のようになる²⁾。

$$\begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & I_G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{y} \\ \ddot{\varphi} \\ \ddot{\varphi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c & 0 & 0 \\ 0 & c & I_r \\ 0 & I_r & c_\varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{y} \\ \dot{\varphi} \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k & 0 & 0 \\ 0 & k & 0 \\ 0 & 0 & k_\varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y \\ \varphi \\ \varphi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L(\dots) \\ M(\dots) \\ 0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2)$$

ここで k 、 c 及び k_φ 、 c_φ はそれぞれ橋梁のたわみ及びねじれ自由度に対する剛性と減衰である。 m 、 I は、ジャイロダンパの装置を含めた橋梁の等価質量及び等価極慣性モーメントである。ジャイロダンパの I_r と I_G についても同様に、その設置位置及び台数に応じて換算した等価慣性モーメントとする⁶⁾。 L 、 M は非常空気の揚力成分及び空力モーメント成分で、換算風速 $U_c (= U/fB)$ 、 U : 風速、 f : 振動数) の関数で表される。

本研究では、実橋を対象としたフラッタ解析には、平板翼の理論値⁷⁾を用い、実験で用いた橋桁断面模型に対する解析には、後述する対象模型において測定して得られた空気力係数⁵⁾を用いて表現する。

1.2 等価極慣性モーメント比

連成フラッタの発生に関しては、通常ねじれ振動が支配的となるので、まず、ジャイロダンパの橋桁のねじれ振動に対する振動抑制効果を検証する。式(2)からたわみ自由度を除いた次の運動方程式で説明する。

$$\begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & I_G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\varphi} \\ \ddot{\varphi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -I_r \\ I_r & c_\varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\varphi} \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k & 0 \\ 0 & k_\varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi \\ \varphi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M \\ 0 \end{bmatrix} \dots\dots(3)$$

このとき、橋梁の減衰 c は十分に小さく無視できるものとする。右辺の M は、 $M = M e^{j\omega t}$ (ここに $j = -1$ 、 ω は外力の周波数) で表される周期的外力とする。無次元化のために次の記号

$$\left. \begin{aligned} \mu &= \frac{k}{I}, \quad \mu_\varphi = \frac{k_\varphi}{I_G}, \quad \mu_\varphi = \frac{c_\varphi}{2I_G \omega} \\ f &= \frac{\omega}{\omega_n}, \quad h = \frac{U_c}{\omega_n B}, \quad st = \frac{M'}{k} \end{aligned} \right\} \dots\dots(4)$$

を導入すると、桁のねじれ変位 φ の伝達関数は次式で表される。

$$\frac{\varphi}{st} = \frac{f^2 - h^2 + 2j_\varphi fh}{h^4 + f^2 - \left[f^2 + 1 + \frac{I_r^2}{I_G I} \left(\frac{f}{\omega_n} \right)^2 \right] h^2 + 2j_\varphi fh(1 - h^2)} \dots(5)$$

この伝達関数からジャイロダンパの性能を表す等価極慣性モーメント比 μ_e が求められる。制振原理の近い動吸振器では、一般に固有振動数は主系の振動数近傍に設定され、共振点近傍での応答が評価されることから、それに

ならぬ振動数比 f 、 h をそれぞれ $f=1$ 、 $h=1$ とおくと、 μ_e が次式で与えられる

$$\mu_e = \frac{I_r}{I_G} \frac{I_r}{I} \left(\frac{f}{\omega_n} \right)^2 \dots\dots\dots(6)$$

ロータの極慣性モーメント I_r が大きいほど μ_e は大きくなるが、橋桁のねじれの固有振動数に対するロータ回転数の比に対してもその二乗に比例して μ_e は増大する。振動数の低い超長大橋に対しては回転数比が大きくなり特に有利となる。

式(2)のジャイロダンパを含む運動方程式は、この等価極慣性モーメント比 μ_e を用いると、ジャイロダンパの構造諸元である I_r 、 I_G 及び c_φ を消去することができる。すなわち、ジャイロダンパの特性を μ_e に代表させられることを意味する。ただし、実際にはジンバルの振幅が大きくなると、ジンバルの可動範囲の問題や式(1)のジャイロモーメントの非線形性による制御性能の低下などの問題が現れる⁶⁾⁸⁾。自励振動であるフラッタのみを考えた場合、理論的にはフラッタ発現風速まで系は安定でジンバルは振動しないが、実際の風には乱れがあるために、橋桁は強制的に加振され、それに反応してジンバルが振動する。橋桁のねじれ振動に対するジンバルの振動倍率 (μ) は、ジンバルの橋梁に対する極慣性モーメント比 $\mu (= I_G/I)$ を用いて、次式で表される。

$$\mu = \frac{\sqrt{\mu_e}}{\mu} \frac{-jh}{f^2 - h^2 + 2j_\varphi fh} \dots\dots\dots(7)$$

この式から、 μ_e が等しくてもジンバルの極慣性モーメントが小さいと、ジンバルの応答が大きくなることが分かる。

2. 模型による風洞実験及び解析との比較

2.1 実験装置

図2に示す2自由度ばね支持剛体模型を用いた風洞実験を実施した。模型断面は扁平六角形で、桁幅 $B = 0.352\text{m}$ 、質量 $m = 4.05\text{kg}$ 、極慣性モーメント $I = 4.51 \times 10^{-2} \text{kg} \cdot \text{m}^2$ とした。模型のたわみとねじれの振動数は、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。この模型の非制御時における連成フラッタ発現風速は 7.2m/s で、そのときの振動数は 1.95Hz であった。

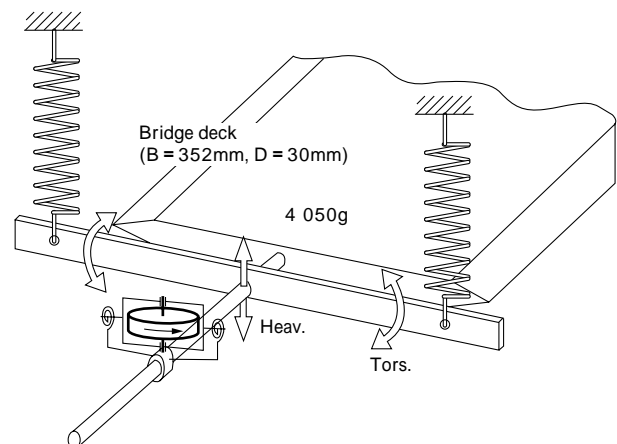


図2 ジャイロダンパを搭載したばね支持模型⁵⁾
Fig. 2 Spring supported bridge deck model with GD unit⁵⁾

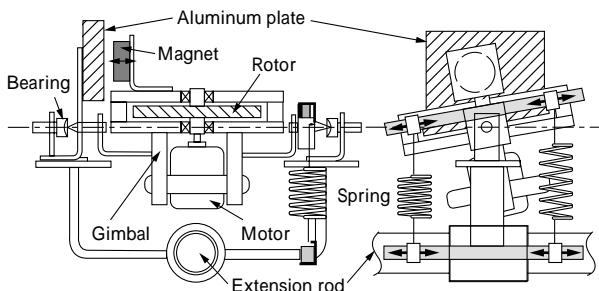
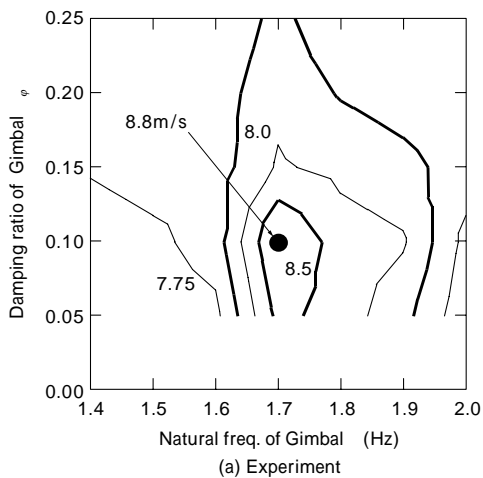


図3 実験用ジャイロダンパの概略図⁵⁾
Fig. 3 Schematic view of GD unit for bridge deck model⁵⁾

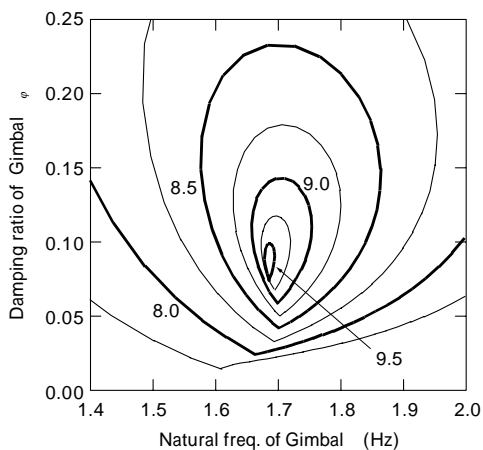
図3にジャイロダンパの基本構造を示す。その諸元は、ロータ慣性モーメント $I_r = 2 \times 10^{-5} \text{kg} \cdot \text{m}^2$ 、ジンバル慣性モーメント $I_G = 4.5 \times 10^{-5} \text{kg} \cdot \text{m}^2$ である。また本装置におけるジンバルの可動範囲は倍振幅 20° である。ジンバル回転方向のバネを天秤形式とし、その間隔を変えることにより固有振動数を調整した。減衰は、永久磁石とアルミ板を利用した電磁ダンパとした。なお、ジャイロダンパユニットは図2に示すように、模型橋軸方向の片側だけの模型軸に取付け、反対側にはバランスウェイトを設けた。

2.2 実験結果

まず、ロータ回転数を 1800rpm に調整してフラッタ実験を実施した。ジンバルの振動数を $1.4 \sim 2.0 \text{Hz}$ の範囲で 0.1Hz ごとに、減衰比を $0.05 \sim 0.25$ の範囲で 0.05 ごとに与え、それらのパラメータとフラッタ発現風速の関



(a) Experiment



(b) Analysis

図4 橋桁模型のフラッタ発現風速（ロータ回転数 30Hz ）⁵⁾
Fig. 4 Flutter speed for bridge deck model with GD (rotor speed: 30Hz)⁵⁾

係を調べた。図4にその実験結果と式(2)による解析結果を等値線で表す。なお、本実験におけるフラッタ発現風速の定義は、基本的に橋桁のねじれ振動の倍振幅が 2° 以上としたが、本ジャイロダンパの性能上、ジンバルの回転角が可動限界である倍振幅 20° に達したときもフラッタと判断して実験を中止した。実際に、ジンバルの回転角がその角度を上回ると、装置が正常に動作できずに急激にフラッタが発生した。

図4から、解析と同様に実験でもパラメータの調整に応じてフラッタ発現風速が変化する様子が分かる。最適パラメータ ($F_\phi = 1.7 \text{Hz}$, $\phi = 0.1$) では、対策前の 7.2m/s から 8.8m/s にまで達し、フラッタに対するジャイロダンパの有効性を確認できる。等価極慣性モーメント比 μ_e は、 1.7Hz を基準とすると $\mu_e = 6.1\%$ となる。ただし、解析と比べて最適パラメータの値はほぼ一致しているが、フラッタ発現風速は全体的に下回る結果となった。この理由は後述する。

次に、等価極慣性モーメント比 μ_e の大きいジャイロダンパとして、ロータ回転数を 3000rpm 及び 6000rpm に調整して実験を行った。 μ_e は、 3000rpm で 17.1% 、 6000rpm では 68% に増大する。図5に各回転数の最適パラメータ設定時の風速-応答図を示す。図中の破線が各ロータ回転数におけるフラッタ発現風速である。回転数 6000rpm では、フラッタ発現風速以下の風速 10.5m/s でダイバージェンス（静的不安定）が発現し、実験を中止した。図から回転数を増せば、フラッタ制御性能が大幅に向上するとともに、特に高風速域で橋桁のねじれ振動が抑制されることが分かる。しかし、ロータ回転数が 1800rpm 及び 3000rpm のとき、橋桁のねじれ倍振幅が 2° に達する前に、ジンバル振動の倍振幅が装置の可動範囲である 20° に達するのが確認できる。このことが、ジャイロダンパの性能が解析を下回った理由である。すなわち、橋桁の振幅が急激に増加する橋桁のフラッタが発現する前に、ジンバルの振幅がその可動制限に達している。このようにジンバルの振動が大きくなるのは、式(7)の橋桁のねじれ振動に対するジンバルの振動倍率が大きく、橋桁のわずかな振動に対してジンバルが大きく反応するためである。乱れた風の作用する自然界においては、このジンバルの過大な応答が問題になると予想され、ジャイロダンパの設計には注意が必要であることが明らかとなった。

3. 実橋適用時の検討

最後に、中央支間 2500m 、側径間 1250m の超長大吊橋に対するジャイロダンパの設計例を示す。吊橋の諸元は、桁幅 41m 、桁とケーブルの単位長さあたりの質量は 41ton/m とする。鉛直及びねじれの対称1次モードの等価質量 m 及び極慣性モーメント I は、それぞれ 41.4ton/m 、 $10353 \text{ton} \cdot \text{m}^2/\text{m}$ 、鉛直及びねじれモードの各固有振動数は、それぞれ 0.056Hz 、 0.16Hz とする。対数減衰率は両モードとも 0.02 とする。フラッタ解析は、平板空気力を用いた2次元解析により実施した。対策前のフラッタ風速は 64m/s で、フラッタ発現風速の目標値を

80m/s に設定する。

ジャイロダンパの基本諸元は、ロータを半径2m、厚さ65cm程度の鋼製円盤とし、その慣性モーメントを128ton・m²とした。ジンバルの慣性モーメントもこれに

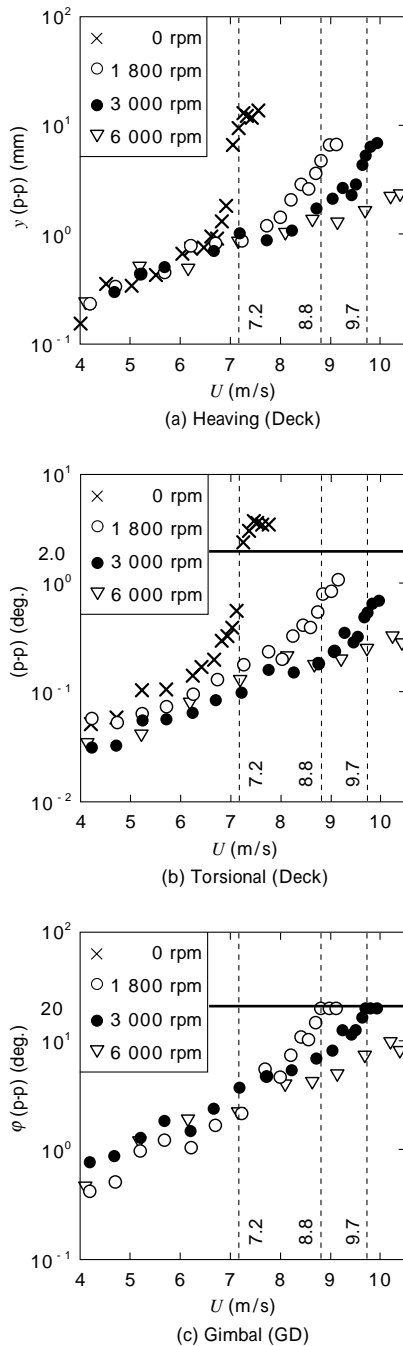


図5 各ロータ回転数における橋桁模型の応答⁵⁾
Fig. 5 Response of bridge deck model with GD at various rotor speeds⁵⁾

等しくおいた²⁾。まず、この装置を橋梁中央部750mの区間で等間隔に7台設置した場合を考える。一体のジャイロダンパ装置をそのロータ質量から約80tonと概算すれば、合計は560tonでタワーを除いた橋梁全体の重量(41ton/m × 5000m = 205000ton)のわずか0.27%となる。また、ロータ及びジンバルの慣性モーメント I_r と I_G は、橋梁の振動モード形状を考慮した等価な値として0.62ton・m²/mとなる。

図6に、ロータ回転数を600rpmとしたときの、ジャイロダンパのチューニングパラメータとフラッタ風速の関係を示す。ロータ回転数の設定は、実験により得られた知見をもとに、 μ_e が大きくなるように設定している。回転数を600rpmまで上げることで、等価極慣性モーメント比 μ_e は74% (基準振動数 = 0.09Hz)にもなり、広いパラメータ範囲で風速80m/sを満足する。なお、橋桁のねじれ振動に対するジンバルの振動倍率は約300倍となる。この倍率が問題になるかどうかは、乱れた風により生じる橋桁の捩れ振幅より決まるが、できる限り小さくなるように設計することが望まれる。

次に、上記のジャイロダンパと等価極慣性モーメント比 μ_e が等しくなる装置の設計例を表1に示す。装置単体の各諸元は相似条件を満足すると仮定して、ロータの半径及び橋梁への設置個数を変えたときの、必要ロータ回転数及びジンバルの振動倍率を示している。装置の設置位置は、橋梁中央部750mの区間で等間隔とした。表から、設置個数の増加やロータ径を大きくするほどロータ回転数が下がり、ジンバルの振動倍率が低下することが分かる。どの組み合わせを採用するかは、乱れた風が作用する中での制振された橋桁のねじれ振幅と、ジンバルの

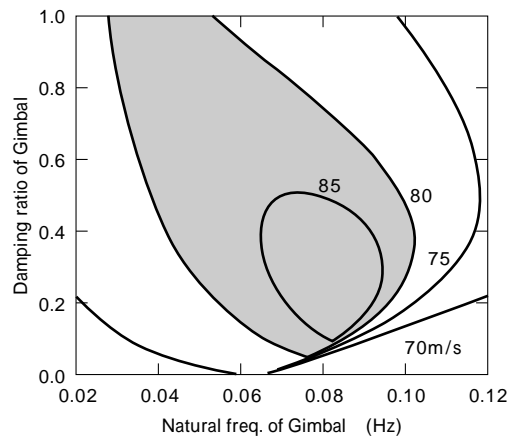


図6 ジャイロダンパ設置時の吊橋のフラッタ風速⁵⁾
Fig. 6 Flutter speed for bridge deck with GD⁵⁾

表1 μ_e の等しいジャイロダンパの設計例 ($\mu_e = 74\%$)
Table 1 Design examples of GD with identical μ_e ($\mu_e = 74\%$)

Type	Properties of GD unit			Installation situation		Rotor Speed (Hz)	Amplitude magnification /
	Rotor radius (m)	Mass (ton)	Inertia (ton・m ²)	Unit number	Mass ratio of whole unit (%)		
A	2	80	128	7	0.27	10.1	300
A'	2	80	128	14	0.55	7.2	212
B	1	10	4	28	0.14	28.6	849
B'	1	10	4	56	0.27	20.2	600
C	3	270	972	3	0.40	5.8	172
C'	3	270	972	7	0.92	3.7	109

振動倍率から決まり、目標風速におけるジャイロダンパの挙動の推定が必要となる⁹⁾。

従来の研究では、具体的な設計パラメータが明らかにされないまま、ジャイロダンパは軽量で高い制振効果を発揮するといわれてきた。しかし、実際の設計においては、ジンバルの過大な応答を抑えることも重要となる。ジンバルの応答を抑えるために、装置の設置台数を増やすことやロータ径を大きくすることにより、ジンバルの等価極慣性モーメントを高める設計が必要になると考えられる。

むすび=本研究は、橋梁の連成フラッタに対するジャイロダンパの制御効果を、数値解析と風洞実験とにより検証したものである。得られた主要な結果を以下にまとめる。

- (1) ジャイロダンパの性能評価指標として、等価極慣性モーメント比 μ_0 というパラメータを定義した。ジャイロダンパの慣性モーメントやロータ回転数などの複数の諸元を、このパラメータ一つに代表させることができる。
- (2) 実際の橋梁は乱れた風により強制的に加振され、それに応じてジンバルが反応する。その応答が大きくなると、装置の可動範囲や非線形特性から十分な性能を発揮できない。応答を抑えるためには、ジンバルの極慣性モーメントを大きくする必要がある。
- (3) 2次元ばね支持模型を用いた風洞実験により、ジャイロダンパの高いフラッタ抑制効果を確認した。ジンバルの可動範囲の制限により、フラッタ発現風速は解析を若干下回ったものの、ジャイロダンパの最適チューニングパラメータや、ロータ回転数の増加により

制御性能が向上する特性は解析と良く一致した。

- (4) 中央支間長 2 500m の超長大吊橋の連成フラッタを対象としてジャイロダンパの設計例を示した。半径 2m、回転数 600rpm のロータを有する装置を橋梁中央部 750m の区間に 7 基設置することにより、広いチューニングパラメータ範囲で目標風速 80m/s を満足する。ただし、実際の設計では、目標風速におけるジンバルの振動振幅を可動範囲以内に抑える必要があり、応答が大きくなる場合は、装置台数の増加や、装置のロータの大径化が有効な手段となる。

最後に、本研究に際し、立命館大学土木工学科の小林紘士教授、京都大学精密機械工学科の松久寛教授にご教示を賜り、ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 村田正信ほか：土木学会年次学術講演会，第 26 回（1971）p.353.
- 2) 藤澤伸光：土木学会年次学術講演会，第 50 回（1995）p.1508.
- 3) 飯野和洋ほか：土木学会年次学術講演会，第 50 回（1995）p.328.
- 4) 藤澤伸光：土木学会論文集，No.543/I-36（1996）p.229.
- 5) 岡田 徹ほか：構造工学論文集，Vol.46A（2000）p.1105.
- 6) 岡田 徹ほか：日本機械学会論文集 C 編 67-660（2001）p.2513.
- 7) 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.148.
- 8) 岡田 徹ほか：風工学シンポジウム論文集，Vol.16th（2000）p.341.
- 9) 岡田 徹ほか：構造工学論文集，Vol.48A（2002）p.919.