

長大吊橋トラス補剛桁の空力振動の制振メカニズム

Mechanism of Aerodynamic Stabilization for Long-Span Suspension Bridge
with Stiffening Truss-Girder

植田利夫* 中垣亮二**

By Toshio UEDA and Ryoji NAKAGAKI

In the preceding paper, the aerodynamic response of stiffening truss-girder of a long span suspension bridge and the suppression effects of a so-called vertical stabilizer were described. Referring to those results, the mechanism of the aerodynamic stabilization is investigated using flow visualization and pressure measurement. From these test results, it is confirmed that the torsional oscillation of the original stiffening truss-girder is due to the lag of the separated flow from the leading edge relative to the body motion. When the vertical stabilizer is installed, the resulting re-separation from the bottom edge of vertical stabilizer and the air stream blowing through the center grating of the deck lead to the suppression of the torsional oscillation.

1. まえがき

前論文(構造工学論文集 Vol. 34 A)⁽¹⁾において長大吊橋トラス補剛桁の空力振動を抑制する対策のひとつとして鉛直スタビライザー(図1)をとりあげ、動的応答実験結果からその制振効果を示した。本論文はその制振メカニズムを断面回りのフローパターン及び圧力分布をもとに検討したものである。

前論文で対象とした長大吊橋のトラス補剛桁の一例では小さな構造減衰を想定すると、一般的にはねじれフラッターとみなされる発散的振動が発生するが、構造減衰を大きくしたり、乱流を作用させると、ねじれの限定振動に変化する場合があることがわかった。これに対して、適当な鉛直スタビライザー(図1)を設置すると、限定振動は消滅し、フラッター発生風速を十分に高くすることができた。

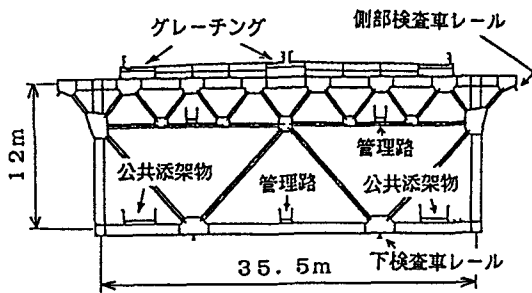
鉛直スタビライザーを設置していない原断面と鉛直スタビライザー付断面についてフローパターンや圧力分布及び動的応答実験結果を総合的に比較することにより、上記振動の発生メカニズム及び制振メカニズムを追究できるものと考えられる。

さて、構造基本断面として矩形断面に関して、中村・溝田⁽²⁾、白石・松本等⁽³⁾、吉村・中村⁽⁴⁾、また、偏平H形断面について、白石・松本等⁽⁵⁾、久保・加藤等⁽⁶⁾のねじれフラッターに関する実験的研究があるが、それらの結果によれば、ねじれフラッターは前縁から剝離した流れの側面への再付着と再剝離に関連した振動と理解される。本論文では、まず、上記のような振動現象の解釈に関して実用的なトラス補剛桁断面において検討する。

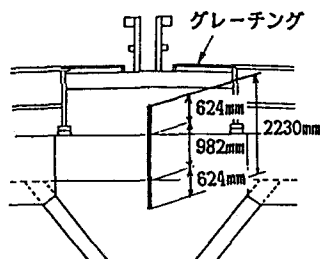
つぎに、耐風対策を施したときの制振メカニズムに関して、白石・松本等⁽⁵⁾、藤沢・武田⁽⁷⁾は偏平H形断面で、吉村・中村⁽⁸⁾は偏平箱桁矩形断面で断面中央部にセンターバリアを設置した場合について検討している。また、榎波・北川⁽⁹⁾はトラス補剛桁断面にセンターバリアを設置したときの圧力分布につ

* (株)ニチゾウテック 技術本部 (〒554 大阪市此花区桜島1丁目2番23号)

** 日立造船(株)鉄構環境事業本部 (〒554 大阪市此花区桜島1丁目3番40号)



(a) トラス補剛桁想定断面



(b) 鉛直スタビライザー

図 1 トラス補剛桁想定断面と鉛直スタビライザー

いて考察している。一般にセンターバリアをトラス補剛桁へ適用する場合は床版中央の上面に設置することが想定されている^{(9)~(11)}。一方、著者等が提案している鉛直スタビライザーはセンターバリアに発想の原点をおいてはいるが、床版下面に設置し、あくまでも断面中央のグレーチング構造等の開口との併用により制振効果を発揮することができるものと考えており、本論文でその制振メカニズムを検討する。

2. 流れの可視化及び圧力分布測定要領

2.1 対象断面

対象断面は、図1(a)に示すように前論文⁽¹⁾で取上げた主構幅 35.5m、主構高 12m のトラス補剛桁断面で、管理路、公共添架物、維持管理のための検査車用レールを設置した実用的な断面である。鉛直スタビライザーは動的応答実験の結果、制振効果が良好と判断されたもので、幅 2.23m の帯板で中央部床版下に配置されている。

2.2 流れの可視化要領

模型の上流側にセットしたニクロム線に流動パラフィン塗付し、両端に直流電圧を負荷して発熱により発煙した流線を利用してストロボ撮影によりフローパターンを可視化した。模型は前論文で記述した動的応答実験と同様、その縮尺は 1/78 である。風洞設定風速は静止時及び強制振動時とも 0.78m/s である。加振振動数は 0.33Hz で実橋換算で 40m/s に相当する風速で可視化した。図2に示すように、構造減衰を小さくした動的応答実験の結果、この風速では鉛直スタビライザーなしの原断面ではねじれ振動が発生するが、鉛直スタビライザー付断面では十分高風速に至るまでねじれ振動は発生しない⁽¹⁾。

2.3 圧力分布測定

図3に示すように床版上下面に内径 0.5mm の圧力測定孔を22点設け、その先端よりビニールチューブにて風路外に設置した微差圧計（セトラシステム社製モデル 239、0~±7mmH₂O）に導き、各測点に作用する圧力を検出した。模型は前論文の動的応答実験⁽¹⁾で使用したものと全く同

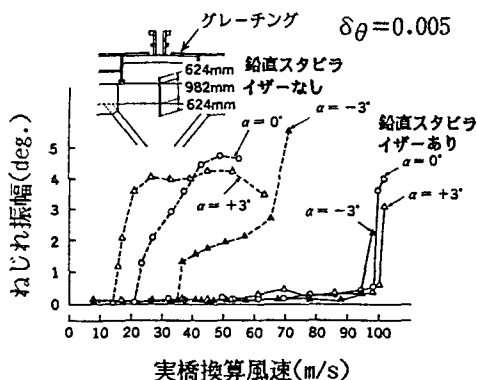


図 2 トラス補剛桁の応答特性

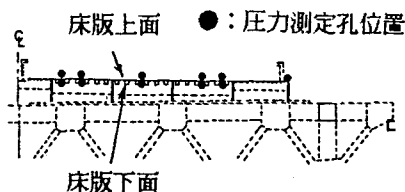


図 3 圧力測定孔位置

じである。測定風速は、静止時模型については風洞風速 15m/s、振動模型については実橋換算風速 10～60m/s である。振動時の圧力測定は動的応答実験（自由振動法）と同時に測定した。また、気流は一様流と格子乱流（乱れの強さは10%，前論文で用いた乱流と同じ）である。

3. 静止時フローパターン及び圧力分布による鉛直スタビライザーの効果の検討

一様流中の静止時断面のフローパターンを迎角 $\alpha = 0^\circ$ ， $\pm 3^\circ$ ， $\pm 5^\circ$ について求めた。

この中、 $\alpha = +3^\circ$ の可視化写真を図4に示す。気流は図の右から左に吹いている。図4より床版周辺部と下弦材部分の流れはほとんど影響を及ぼしあっていないと言える。他の迎角についてもほぼ同様であった。

トラス補剛桁の対風応答には床版部が関与している割合が大きいと考えられる。したがって以後、床版周辺のフローパターン及び圧力分布に注目して考察する。原断面（鉛直スタビライザーなし）と鉛直スタビライザー付断面の可視化写真をトレースしたものを $\alpha = 0^\circ$ ， $\pm 3^\circ$ ， $\pm 5^\circ$ について図5に示す。

また、平均圧力係数 $\overline{C_p}$ ($= \overline{P(t)} / (1/2 \rho \bar{V}^2)$ ， $\overline{P(t)}$ ：圧力の時間平均， $\bar{V}$ ：平均風速， ρ ：空気密度)を図6に示す。

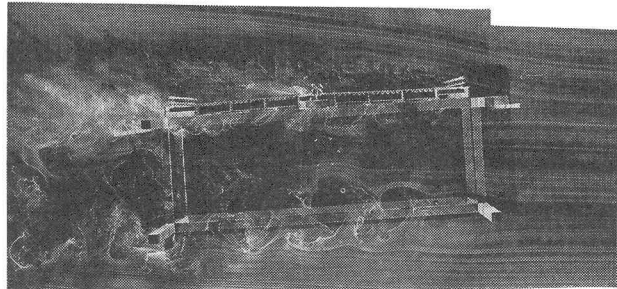
まず、原断面についてフローパターンと圧力分布を対比しながら考察する。

$\alpha = -5^\circ$ ， -3° のように吹き下ろしの風が作用するとき、図5(a)に示すように床版上面では前縁高欄から剝離した流れはほぼ床版に沿って流下し、中央高欄にて再剝離している。このため、図6(a)に示すように中央開口部の上・下流で負の圧力に差がある。床版下面では側部検査車レール及び上弦材から剝離した流れは中央部で床版下面にわずかに接近し、図6(a)に示すように圧力回復の傾向がみられる。

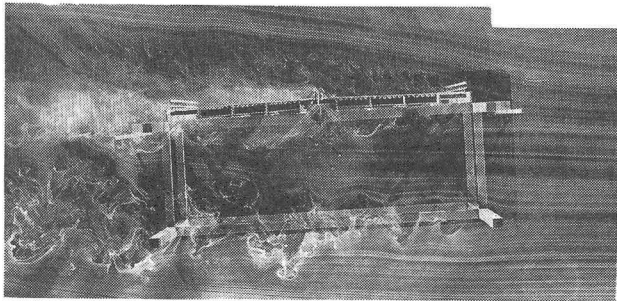
$\alpha = 0^\circ$ すなわち水平の風が作用するとき、床版上面では前縁高欄から剝離した流れは中央部で床版上面にわずかに接近し、中央高欄にて再剝離している。床版下面では負の迎角より床版へ接近しており、中央開口部（グレーチング構造）で床版上面へわずかに吹き抜けがあり、図6(a)に示すように中央部で圧力回復がみられる。

$\alpha = +3^\circ$ ， $+5^\circ$ のように吹き上げの風が作用するとき、床版上面では前縁高欄からの剝離流れは中央開口部から吹き抜けた流れにより床版に接近することなく流下している。床版下面では側部検査車レール及び上弦材から剝離した流れは床版に沿って流下し、中央開口部への吹き抜けにより開口部直後で正圧になっている。この吹き抜けは吹き上げ角度が大きいほど顕著である。

つぎに、鉛直スタビライザーを設置すると、図5(b)に示すように $\alpha = +3^\circ$ ， $+5^\circ$ では、床版下面の流れは鉛直スタビライザーの下端で再剝離しており、図6(b)に示すように開口部直後で負の圧力に変化している。中央開口部の気流の吹き抜けが鉛直スタビライザーにより促進されており、この吹き抜けた気流

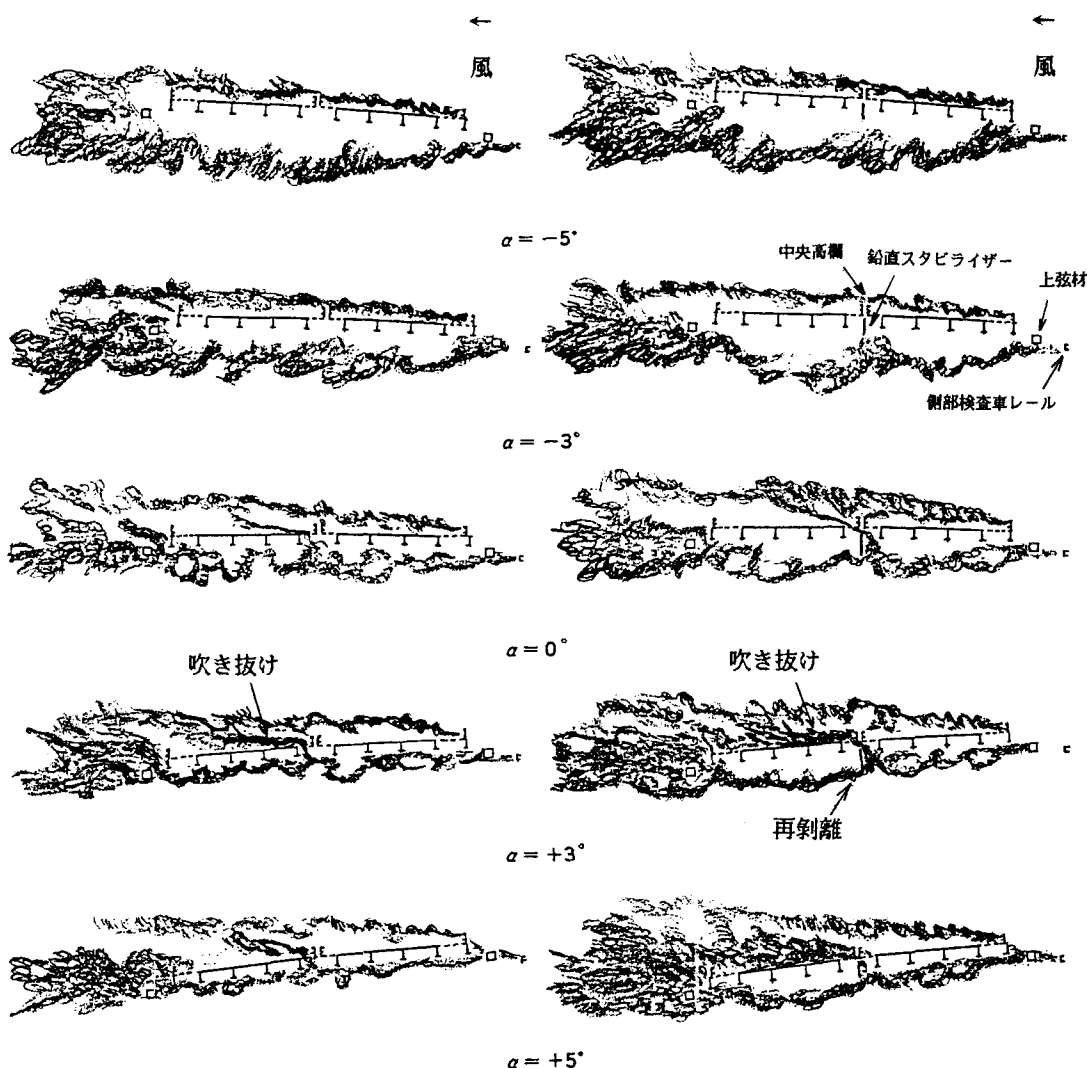


(a) 鉛直スタビライザーなし



(b) 鉛直スタビライザーあり

図 4 静止時フローパターン ($\alpha = +3^\circ$)



(a) 鉛直スタビライザーなし

(b) 鉛直スタビライザーあり

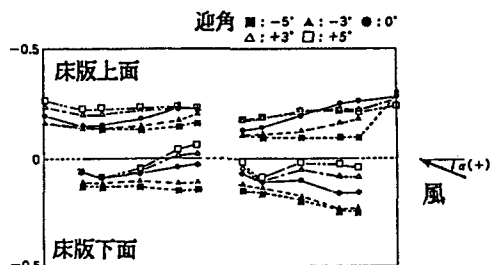
図 5 静止時床版周辺部フローパターン

は下流側の床版上面に沿って流下するため、わずかに圧力の回復がみられる。

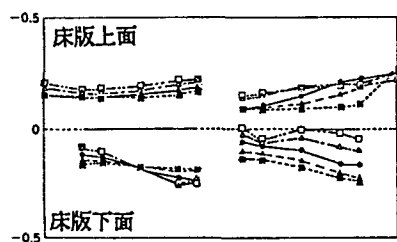
$\alpha = 0^\circ$ でも、図5(b)に示すように鉛直スタビライザーの下端で再剥離しており、図6(b)に示すとおり負の圧力の絶対値が大きくなっている。

また、 $\alpha = -3^\circ, -5^\circ$ でも鉛直スタビライザーの存在により負の圧力の絶対値がわずかに大きくなっている。

以上のように、鉛直スタビライザーを設置すると下流側の床版下面で負の圧力の絶対値が大きくなり、上面の負の圧力の絶対値とほぼ同じ大きさになる。このため、図7の三分力係数曲線に示すように 0° あるいは正の迎角の揚力係数は原断面のそれより減少している。



(a) 鉛直スタビライザーなし



(b) 鉛直スタビライザーあり

図 6 静止時平均圧力係数 $\overline{C_p}$ (一様流中)

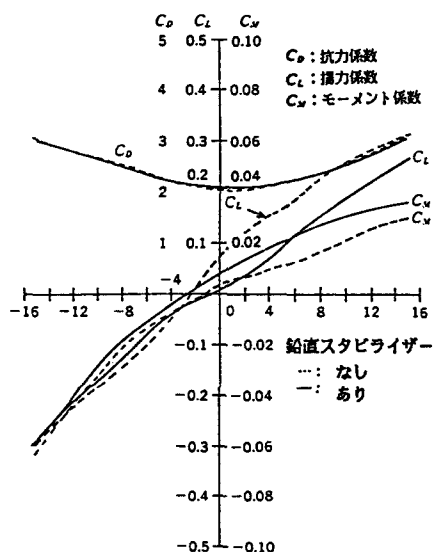
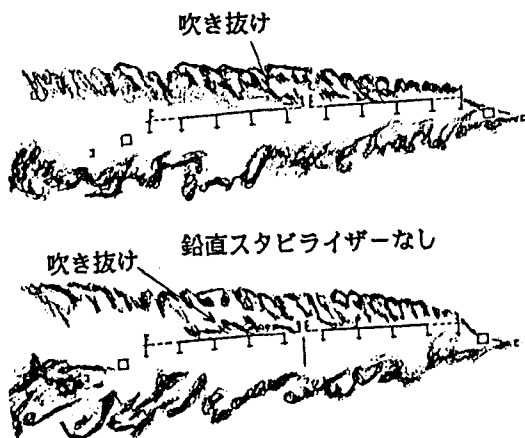
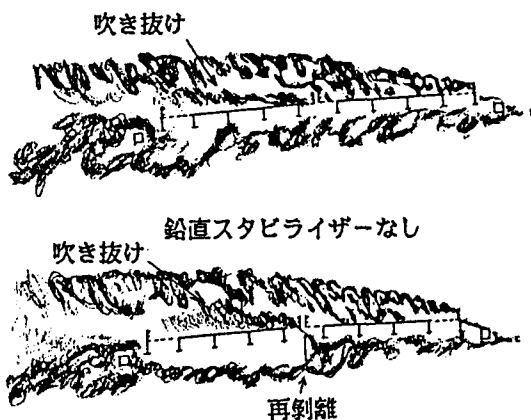


図 7 三分力係数 (一様流中)



鉛直スタビライザーあり

(a) 頭上げ方向時 (②)



鉛直スタビライザーあり

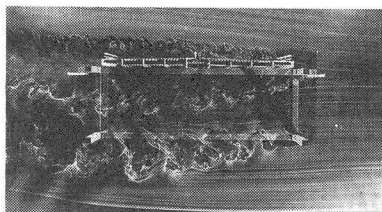
(b) 頭下げ方向時 (④)

図 9 振動時床版周辺部フローパターン ($\alpha = 0^\circ$, $\theta = +3.5^\circ$)

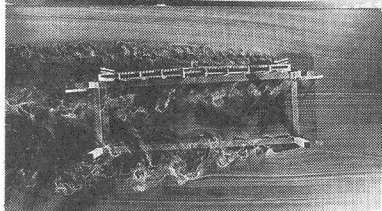
4. 振動時フローパターン及び圧力分布による制振メカニズムの検討

迎角 $\alpha = 0^\circ$ における実橋換算風速 40m/s, ねじれ振幅 $\theta = 5^\circ$ の振動 1 サイクルの 1/8 周期毎のフローパターンを可視化した。そのうち、振動変位 $\theta = 0^\circ \pm 3.5^\circ$ のフローパターンを図 8 に示す。図中、①～⑥は振動 1 サイクルにおける各変位状態を表し、それぞれ、気流に対する姿勢が $0^\circ, +3.5^\circ, +5^\circ, +3.5^\circ, 0^\circ, -3.5^\circ, -5^\circ, -3.5^\circ, 0^\circ$ に相当する。①と⑤, ②と④, 及び、③と⑥の振動変位 θ はそれぞれ、 $0^\circ, +3.5^\circ, -3.5^\circ$ であるが、①, ②, ③ は頭上げ方向に運動するとき、また、④, ⑤, ⑥ は

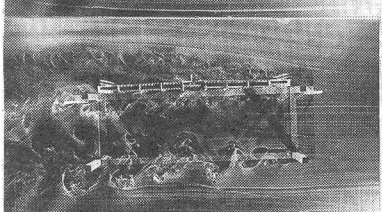
①



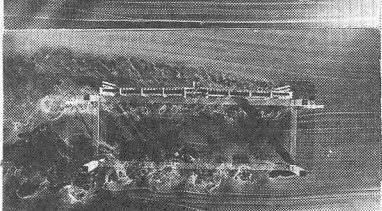
②



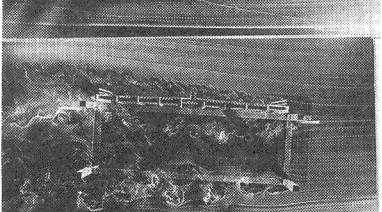
④



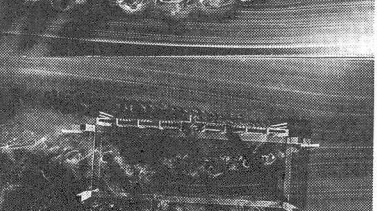
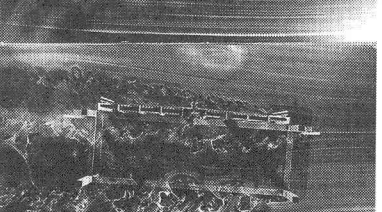
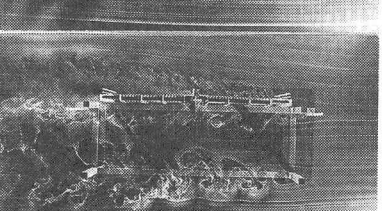
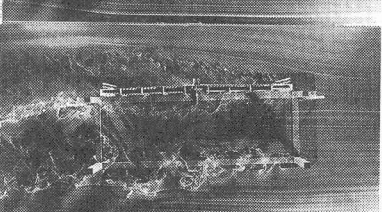
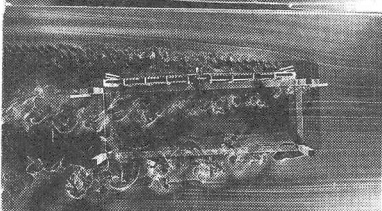
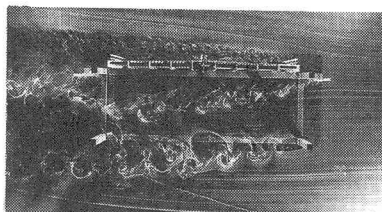
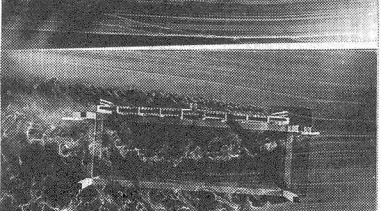
⑤



⑥

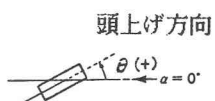
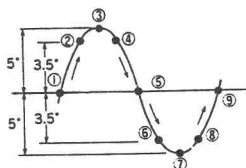


⑧



(a) 鉛直スタビライザーなし

(b) 鉛直スタビライザーあり

図 8 振動時フローパターン ($\alpha = 0^\circ$)

頭下げ方向に運動するときのフローパターンである。いま、振動変位が $+3.5^\circ$ である ②と④の床版周辺のフローパターンを拡大トレースして示すと図9のとおりである。

まず、鉛直スタビライザーのない場合についてのフローパターンを見よう。図9(a)に示した模型とほぼ同じ姿勢である $\alpha=+3^\circ$ の静止時フローパターン（図5(a)）と比較してみると、②のように頭上げ方向に運動するときには床版下面の流れは、これより少し前の時刻の姿勢、すなわち、 $\alpha=-5^\circ$ 前後の姿勢の静止時フローパターンに近い。逆に、④のように頭下げ方向に運動するときには床版上面の流れは、同様に、 $\alpha=+5^\circ$ 前後の姿勢のフローパターンに近い。このような回転運動に伴う流れの遅れについては、矩形断面について中村・溝田⁽²⁾が指摘している有効迎角運動に伴う流れの遅れと同じ現象であると考えられる。この流れの遅れは、後述する変動圧力結果から推察すると、下流側でより顕著であると考えられ、②の状態では、下流側の床版下面で負の圧力の絶対値が大きく、頭上げとなる空力モーメントが作用し、また、④の状態では、下流側の床版上面で負の圧力の絶対値が大きく、頭下げとなる空力モーメントが作用することになり、それぞれ運動を助長することになると考えられる。

一方、鉛直スタビライザー付断面では、図9(b)から明らかなように、②のように頭上げ方向のときには床版下面の流れの遅れのため、鉛直スタビライザーはウエイクゾーンに入っていて、その下端で剝離はなく、原断面と同様の流れのパターンである。ところが、④のように頭下げ方向のときには床版下面の流れは鉛直スタビライザー下端で再剝離が生じ、また、中央開口部の気流の吹き抜けが促進され、床版上面の下流側に圧力回復をもたらし、いずれも振動を抑制する空力モーメントが作用することになる。

つぎに、振動模型で測定された圧力について考察する。圧力変動のうち模型の振動と同じ周波数成分を取り出す。圧力測点における正圧の作用方向への変位に対する圧力の位相差（遅れる場合を正とする）を β とすると、 $C_{pi} = |C_p| \sin \beta$ は振動速度比例成分となる（ $|C_p|$ ：変動圧力係数の振幅）。したがって、 C_{pi} が正の場合、この圧力は励振力となる。 C_{pi} が負の場合、この圧力は減衰力となる。それぞれの測点について C_{pi} を求め、図10に示している。いま、ねじれ振動を対象としているので、回転中心に関する空力モーメントを考える必要があるが、ここでは簡単のため各点の回転中心からの腕の長さを念頭におきながら圧力分布により考察する。図10は風速が 40m/s、振動変位 $\theta = 5^\circ$ に関する迎角 $0^\circ, \pm 3^\circ$ の C_{pi} である。

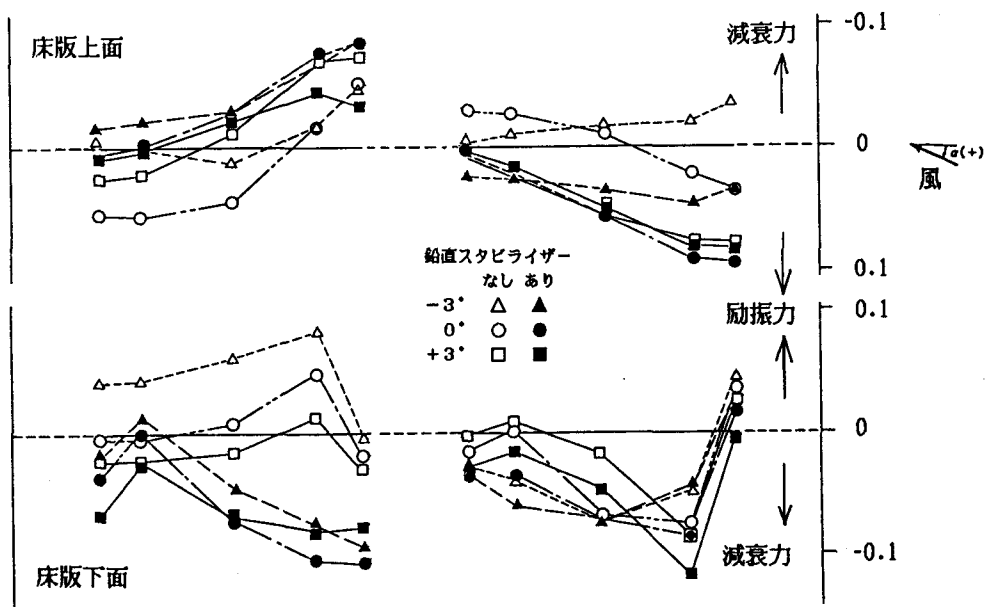


図10 振動圧力係数 C_{pi} (一様流中, 40 m/s)

図2から、原断面ではねじれの構造減衰 $\delta\theta = 0.005$ のとき、40m/sの風速では、 $\alpha = 0^\circ$ のとき 4.5° 、 $\alpha = +3^\circ$ のとき 4° 、 $\alpha = -3^\circ$ のとき 1.5° のねじれ振動が発生しているので、振動変位 $\theta = 5^\circ$ に関する圧力を考えた場合、鉛直スタビライザー付断面の圧力と比較すれば、原断面の圧力分布には励振力となる部分が多いと考えられる。その点から考察してみる。

図10から原断面の励振力を示す領域は迎角によって変化しているが、主として床版上面の前縁部近傍及び中央開口部より下流側の床版上・下面にあると言える。

一方、鉛直スタビライザーを設置した場合、床版上面については、 $\alpha = 0^\circ$ 、 -3° のように前縁部が減衰力から励振力に変化する反面、後縁部で逆の傾向があり、床版上面全体の空力モーメントの改善はみられないが、 $\alpha = +3^\circ$ のように前縁部での励振力は変わらないが後縁部で減衰力に変化しており、床版上面全体の空力モーメントが改善されている。そして、 $\alpha = 0^\circ$ 、 $\pm 3^\circ$ のいずれの迎角でも、床版下面の鉛直スタビライザーより下流側で減衰力に変化しており、これが振動抑制の役割を果たしていると考えられる。

以上、フローパターン及び圧力分布から検討した結果、鉛直スタビライザー下端での再剝離、及び、中央開口部での気流の吹き抜けが制振の主要因と考えられる。ちなみに、鉛直スタビライザー付断面の中央開口部を閉塞した場合、前論文⁽¹⁾から図11に示すように、迎角 0° 、 $+3^\circ$ では鉛直スタビライザー設置の効果がなく、また、迎角 -3° では振動の発生風速は高くなるものの、制振効果はそれほど顕著ではない。

5. 乱れの空力特性に及ぼす影響

$\alpha = 0^\circ$ の場合の乱流中（格子乱流⁽¹⁾、乱れの強さ10%）での静止模型の床版の圧力分布を求め、一様流中の圧力と比較して図12に示す。図に認められるように、原断面において床版下面の中央部で付着が促進されている他は大差がない。他の迎角についても同様であった。

図13は一様流中と上記乱流中における C_{pi} の分布を比較したものである。この図は迎角 0° 、振幅 5° 、風速40m/sの結果である。鉛直スタビライザーのないとき、床版上下面とも大差がない。鉛直スタビライザーがあるとき、乱流中では、床版上面の上流側で減衰力へ、下流側で逆に励振力へ変化する傾向で、床版上面全体の空力モーメントにあまり大きな変化はない。床版下面では上・下流側とも C_{pi} の絶対値が小さくなる傾向であるが、分布のパターンはほとんど変化していない。他の迎角についても同様であった。

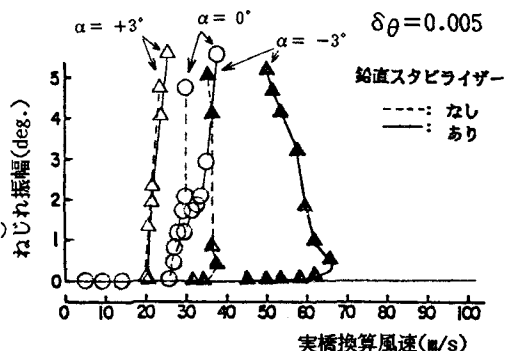


図 11 トラス補剛桁の応答特性
(中央開口部閉塞)

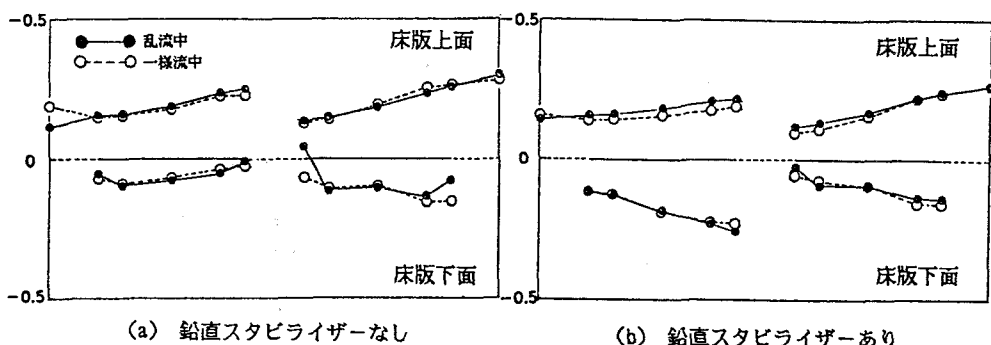


図 12 静止時平均圧力係数 $\overline{C_p}$ (乱流中, $\alpha = 0^\circ$)

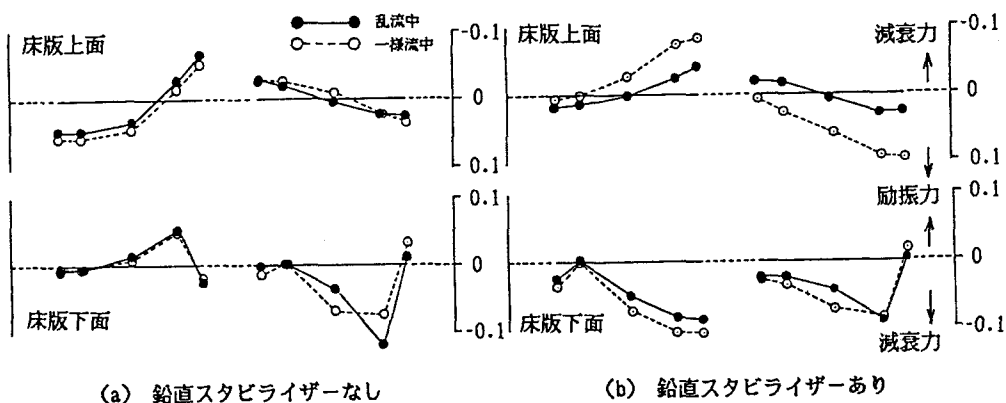


図13 振動圧力係数 C_{pi} (乱流中, $\alpha = 0^\circ$, 40 m/s)

以上のように、乱流中でも鉛直スタビライザーの効果は一樣流中とほとんど変わらず、図14に示すように動的応答実験結果(格子乱流、乱れの強さ 5%, 10%)⁽¹⁾で確認された制振効果と一致している。

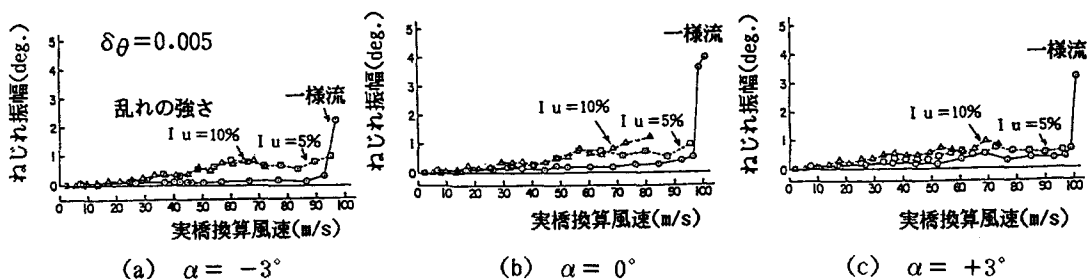


図 14 トラス補剛桁の応答特性 (乱れの影響)

6. 結論

前論文で示した動的応答実験結果などを参照し、流れの可視化及び圧力測定結果を中心に実用的な長大吊橋のトラス補剛桁で発生するねじれ振動の発生メカニズムを検討するとともに、その耐風対策の1つである鉛直スタビライザーの制振メカニズムを追究した。その結果、以下のようなことが明らかになった。

- (1) 原断面では、前縁で剝離した流れは断面の回転運動により流れの遅れを生じ、振動を助長する圧力が床版の下流側の上下面に作用することがねじれ振動の発生原因である。
- (2) 鉛直スタビライザー付断面では、床版下面における前縁からの剝離流は鉛直スタビライザーの下端で再剝離し、しかも、中央グレーチング開口部において床版下面から上面への吹き抜けを促進し、それぞれ、床版下面下流側で負の圧力を、床版上面下流側で圧力回復をもたらす、振動を抑制する効果をもたらしている。
- (3) (2)の効果は、主として頭下げ方向の運動の間に現れる。
- (4) (2)に述べたことから、鉛直スタビライザーは中央開口部との併用により制振効果が大きくなる。
- (5) 乱れの強さ 5%, 10%の格子乱流中の結果では、鉛直スタビライザーの制振効果は気流の乱れに左右されていない。

謝辞

本論文をまとめるにあたり、立命館大学理工学部土木工学科の小林紘士教授から有益な助言を頂いた。また、大阪大学工学部土木工学科の西村宣男助教授から御支援を頂いた。ここに記して、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 植田利夫：長大吊橋トラス補剛桁の空力応答特性と制振対策，構造工学論文集，Vol. 34A，1988年3月
- 2) 中村泰治，溝田武人：矩形断面柱のねじれフラッターについて，土木学会論文報告集，No. 216，1973年8月
- 3) 白石成人，松本 勝，白土博通，北川雅章，平出純一：各種矩形断面のフラッタ時圧力分布特性，第8回風工学シンポジウム論文集，1984年12月
- 4) 吉村 健，中村泰治：橋梁断面のインディシャル運動時の流れの観察と圧力分布の測定，第32回土木学会年次学術講演会概要集，昭和52年10月
- 5) 白石成人，松本 勝，小島治久，小林修二：H型断面のフラッター特性に関する実験的研究，構造物の耐風性に関する第4回シンポジウム，1976年12月
- 6) 久保喜延，加藤九州男，宮地真一：偏平H型断面柱の非定常表面圧力分布特性，第8回風工学シンポジウム論文集，1984年12月
- 7) 藤沢伸光，武田勝昭：H型断面の非定常圧力の特性について，第34回土木学会年次学術講演会概要集，昭和54年10月
- 8) 吉村 健，中村泰治：中央分離帯による橋桁のねじりフラッターの防振について，第33回土木学会年次学術講演会概要集，昭和53年9月
- 9) 榎波義幸，北川貴一：鋼床版合成トラス吊橋に発生するフラッターと圧力分布，第32回土木学会年次学術講演会概要集，昭和52年10月
- 10) Hedefine, A. and Silano, L.G.: Newport Bridge Superstructure, Proc. ASCE, St11, 1971
- 11) 多田安夫，田村周平，植田利夫：鋼床版を合成した補剛トラスを有する吊橋の耐風性（その1），第30回土木学会年次学術講演会概要集，昭和50年10月
- 12) 宮田利雄，山田 均：橋桁のフラッターと風の乱れ，橋梁と基礎，82-11，1982年11月

(1988年10月12日受付)