

## 論文・報告

# 走行路面部にオープングレーチング化を施した 3 000m級超長大補剛トラス吊橋の耐風安定性について

On Aerodynamic Stability of a 3 000 m Class Truss-stiffened Suspension Bridge  
with Open Grating in Traffic Lanes

中 崎 俊 三\*  
Shunzo NAKAZAKI

片 山 哲 夫\*\*  
Tetsuo KATAYAMA

米 田 昌 弘\*\*\*  
Masahiro YONEDA

宮 地 真 一\*\*\*\*  
Shin-ichi MIYACHI

大 野 克 紀\*\*\*\*\*  
Katsunori OHNO

杉 山 幸 一\*\*\*\*\*  
Koichi SUGIYAMA

This paper deals with aerodynamic stability of a 3 000m class truss-stiffened suspension bridge with open grating in traffic lanes. The spring-mounted sectional model tests were carried out in the wind tunnel in order to investigate the effect of open grating in traffic lanes on the aerodynamic behavior by wind. It was shown from wind tunnel experiments that critical wind speed of flutter for the truss-stiffened types with open grating in traffic lanes could be increased as much as significant in aerodynamic design.

Key words : suspension bridge, aerodynamic stability, open grating

## 1. ま え が き

完成すれば世界最大となる中央支間長1 990 mの明石海峡大橋はその建設が現在急ピッチで進められているが、一方で、紀淡海峡大橋やイタリアのメッシナ海峡大橋など明石海峡大橋を上回る規模の超長大吊橋案がすでに国内外において計画されつつある。このような超長大吊橋の設計にあたっては、風荷重による静的変形特性はもちろんのこと、耐フラッター性がきわめて重要な検討項目となる。周知のように、吊橋は中央支間長の増加とともに固有振動数が低下する。したがって、明石海峡大橋を上回る2 500 m級や3 000 m級の超長大吊橋を実現させるためには、フラッターの発現風速を照査風速以上に高めるための工夫がきわめて重要なこととなる。

ところで、吊橋は吊構造部の形式によって補剛トラス形式と流線形箱桁形式に分類され、明石海峡大橋では両者に対する一連の風洞試験結果の比較から、最終的に補剛トラス形式を採用するに至っている<sup>1)~3)</sup>。すなわち、2 500 m級や3 000 m級の超長大吊橋を既往の技術을適用して実現させようとする場合、補剛トラス形式を採用した方が流線形箱桁形式に比べ解決すべき問題点が少ないと現時点では考えられている。また、実際、山下ら<sup>4)</sup>は、中央支間長が2 000~3 500 mまでの超長大補剛トラス吊

橋の試設計を行い、3 000 m以上の超長大吊橋では、200キロ級ケーブルや太径ケーブルの架設法などに関する開発は必要であるものの、主構高や主構幅を増加させて大きなねじれ剛性を付与すれば所定の耐風安定性を確保できる可能性を示唆している。ただし、主構高や主構幅を大きくすればねじれ剛性ととも鋼重も増加することから、空力的対策の採用によって所要の主構高や主構幅を極力小さく設定することが経済性の観点から強く望まれる。

補剛トラス吊橋の空力的対策としてはオープングレーチングの採用が良く知られている。また、鉛直スタビライザーやセンターバリアなども開発され、明石海峡大橋に対してもその有効性がすでに検証されている。このうち、橋床部のオープングレーチング化は1 000 m級程度の補剛トラス吊橋においても必ず採用される最も一般的な空力的対策であるものの、わが国では一般に橋床の最外側部と中央部付近に設ける場合が多く、走行路面部に設置した実橋例は報告されていない。これに対し、たとえば、アメリカのマキナックストレ橋やポルトガルの4月25日橋（サラザール橋）など諸外国の吊橋では、走行路面の一部をオープングレーチング化する耐風安定化対策が採用されるに至っている。走行路面部をオープングレーチング化する手法では、車両走行性や落下物に対する検討などが必要になる。しかしながら、明石海峡大橋

\*川田工業(株)技術本部長大橋部部長 \*\*川田工業(株)技術本部長大橋部技術開発課課長 \*\*\*川田工業(株)技術本部 振動研究室室長

\*\*\*\*川田工業(株)技術本部振動研究室係長 \*\*\*\*\*川田工業(株)技術本部長大橋部技術開発課

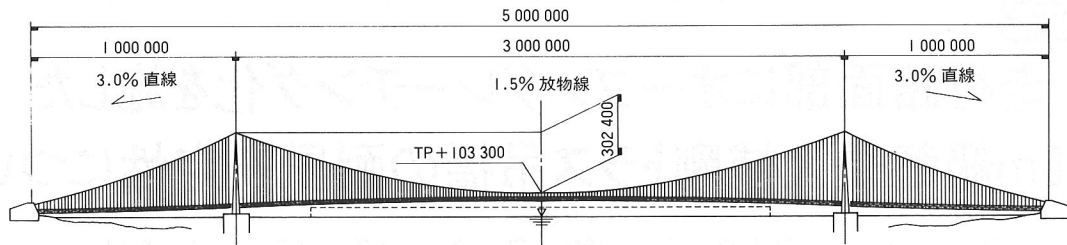


図-1 対象とした橋梁

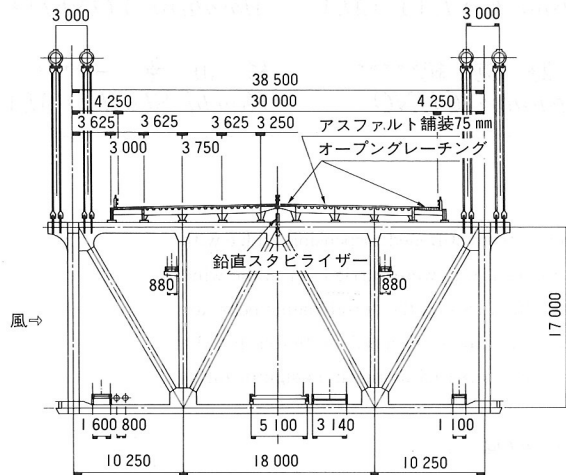


図-2 補剛桁断面図

表-1 構造諸元

| 項 目            | 対象橋梁(CASE-1) | 明石海峡大橋 <sup>4)</sup>         |
|----------------|--------------|------------------------------|
| 中 央 支 間 長      | 3 000 m      | 1 990 m                      |
| 側 支 間 長        | 1 000 m      | 960 m                        |
| ケ ー ブ ル サ グ    | 297.6 m      | 201.0 m                      |
| 主 構 高          | 17.0 m       | 14.0 m                       |
| 主 構 幅          | 38.5 m       | 35.5 m                       |
| 断 面 定 数        | 曲 げ (鉛 直)    | 54.3 m <sup>4</sup>          |
|                | ね じ れ        | 60.1 m <sup>4</sup>          |
| 死 荷 重          | 補 剛 桁        | 38.19 tf/m                   |
|                | ケ ー ブ ル      | 27.03 tf/m                   |
|                | 合 計          | 65.22 tf/m                   |
| 極 慣 性<br>モーメント | 補 剛 桁        | 993 tf・s <sup>2</sup> ・m/m   |
|                | ケ ー ブ ル      | 1 022 tf・s <sup>2</sup> ・m/m |
|                | 合 計          | 2 015 tf・s <sup>2</sup> ・m/m |
| 固有振動数          | たわみ対称1次      | 0.0684 Hz                    |
|                | ねじれ対称1次      | 0.1280 Hz                    |

に対する風洞試験でも種々のオープングレーチング化が検討されており、採用には至らなかったが各車線中央部に500 mm幅のオープングレーチングを設置した場合にきわめて良好な耐風安定性を示す結果が報告されている<sup>5)</sup>。超長大補剛トラス吊橋の実現にあたっては建設費用の抑制が最重要課題と認識されており、それゆえ、種々の解決すべき問題点は残されているものの、走行路面部をオープングレーチング化する手法も検討に値する空力安定化対策の一つに分類できよう。

このような観点から、著者らは中央支間長が3 000 mの補剛トラスを有する超長大吊橋を対象に、文献5)では検討されていないその他のオープングレーチング化に着目し、部分模型風洞試験を実施して走行路面部をオープングレーチング化した場合の耐風安定性について検討することとした。その結果、超長大吊橋の耐風設計を実施するうえできわめて有用な知見が得られたことから、ここにその結果を報告する。

## 2. 対象とした超長大吊橋

対象とした橋梁は、図-1に示すように中央支間長が3 000 m、側支間長が1 000 mの3径間2ヒンジ補剛トラス吊橋である。図-2に補剛桁断面を示す。また、対象橋梁(明石海峡大橋と同じ床組構造を有する基本検討ケース)の構造諸元を明石海峡大橋の諸元と比較して表-1に

示す。

表-1からわかるように、明石海峡大橋の主構幅 $B$ と主構高 $D$ は、それぞれ $B=35.5$  m、 $D=14.0$  mであるのに対し、対象橋梁では $B=38.5$  m、 $D=17.0$  mとなっている。これらの諸元は、フラッターの照査風速 $V_{cr}$ を明石海峡大橋での値と同じく $V_{cr}=78$  m/sに設定し、Selberg式によるフラッター限界風速を $V_s$ とした場合に $V_{cr}=1.3V_s$ を満足するねじれ剛性から設定されたものである。したがって、検討対象とした中央支間長が3 000 mの吊橋モデルでは、明石海峡大橋の諸元を単純平均した値と比較し、ねじれ剛性が4.17倍、合計死荷重が1.52倍となっている。なお、明石海峡大橋の風洞試験結果<sup>1)~3)</sup>によれば、フラッター特性が補剛桁内側に格納される種々の添架物の存在によって微妙に変化することが知られている。それゆえ、対象橋梁では、公共添架物や管理路ならびに鉛直スタビライザーなどは明石海峡大橋の最終設計断面と同じものを同じ位置に配置するものとしている。また、床組構造についても明石海峡大橋と同じく橋床部の最外側部と中央部付近にオープングレーチングを配し、これを後述するように、基本検討ケース(CASE-1)とすることとした。

### 3. 風洞試験の概要

風洞試験にあたっては、当社所有の多目的風洞施設を利用した。この風洞施設は開放型と閉鎖型の2つの測定洞を備えた水平回流式ゲッチング型であるが、本実験では、幅2.0 m × 高さ2.5 m × 全長15.0 mなる閉鎖型測定洞を使用するものとした。風洞試験では縮尺1/79の2次元剛体部分模型（模型長 = 1 620 mm）を用いて、一連のばね支持模型風洞試験を実施した。写真-1に、今回の実験で使用した模型を示す。なお、ばね支持模型試験にあたっては模型をたわみとねじれの2自由度系で支持し、模型の回転中心を実橋想定断面の重心とせん断中心の1/2点に設定している。

ばね支持模型試験で対象とした実験ケース（オープングレーチング化する走行路面の位置）を図-3に、また各実験ケースに対応する模型を写真-2に示す。ここに、CASE-AとCASE-Cは、それぞれ明石海峡大橋の風洞試験で検討されたオープングレーチング案である<sup>5)</sup>。なお、各車線中央部に500 mm幅のオープングレーチングを設置したCASE-Aは $-3^{\circ} \leq \alpha \leq +3^{\circ}$ なる迎角において100 m/s以下の風速ではフラッターが発現しなかったのに対し、最外側車線をオープングレーチング化したCASE-C

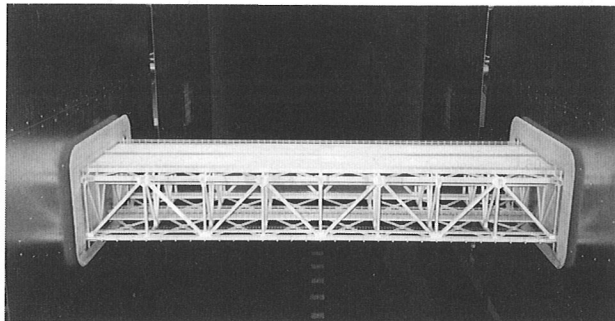


写真-1 風洞模型

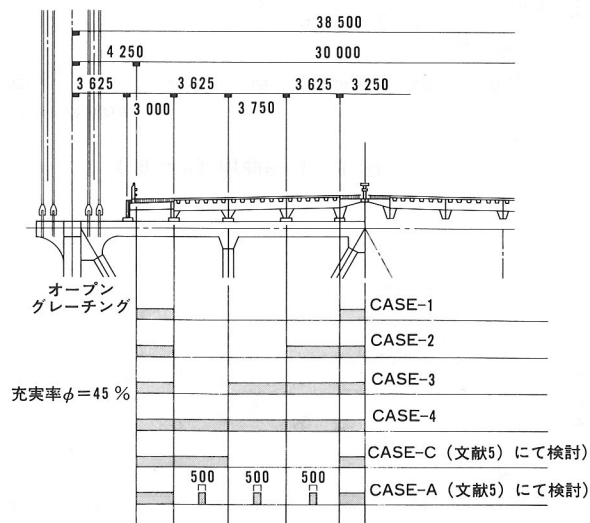


図-3 実験ケース  
(オープングレーチング化する走行路面の位置)

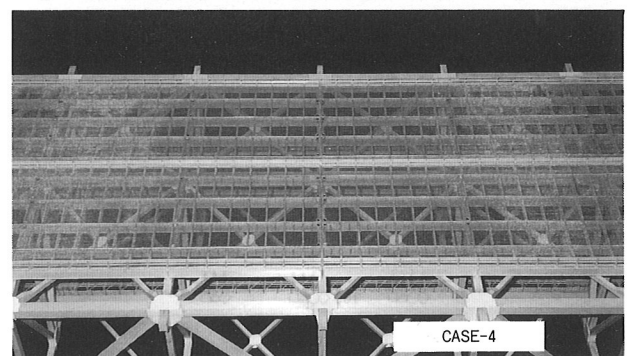
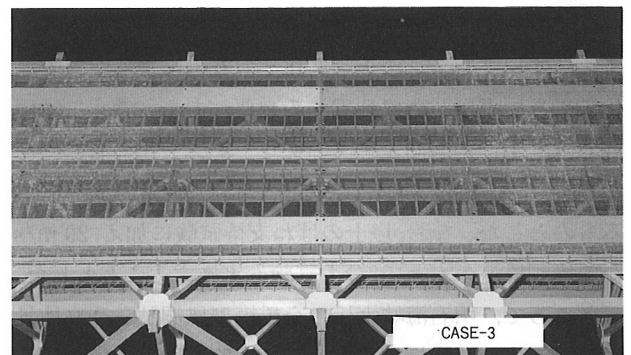
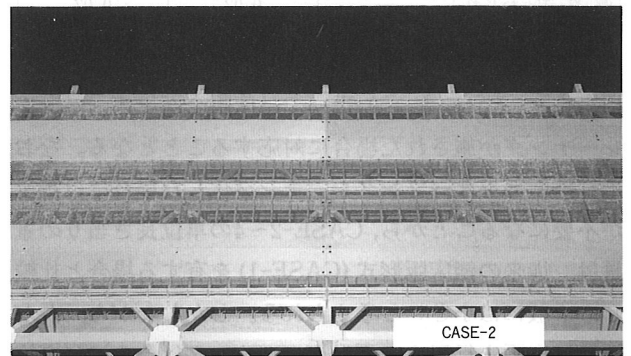
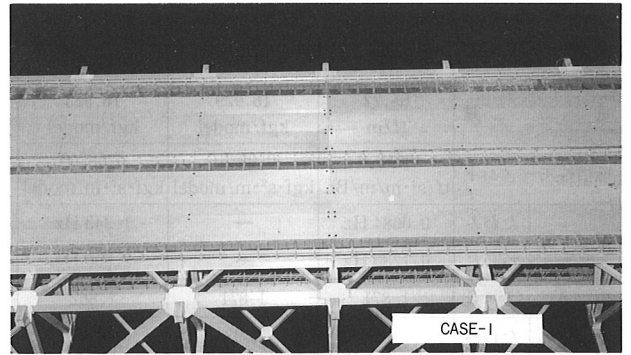


写真-2 各実験ケースに対応する風洞模型

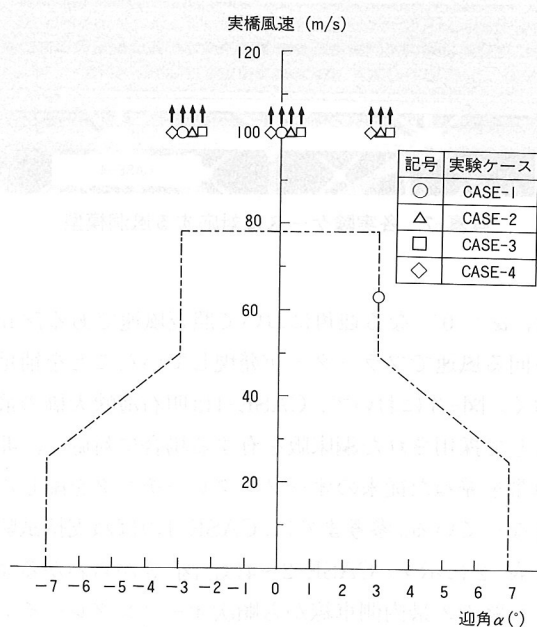
では、 $\alpha = 0^{\circ}$ なる迎角において照査風速である78 m/sを下回る風速でフラッターが発現していたことを補足しておく。図-3において、CASE-1は明石海峡大橋の最終案として採用された鋼床版を有する場合に対応し、非常駐車帯を兼ねた従来のオープングレーチングを配した構造となっている。参考までに、CASE-1のばね支持試験条件を表-2に示す。CASE-2~4は、図-3からわかるように走行路面の最内側車線から順次オープングレーチング化（オープングレーチングの充実率は45%）した場合に

表-2 CASE-1のばね支持試験条件 (縮尺1/79)

|           |     | 実橋諸元                       | 模型所要値                       | 実験値                         |
|-----------|-----|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 重 量       |     | 65.22                      | 16.929                      | 16.925                      |
|           |     | tf/m                       | kgf/model                   | kgf/model                   |
| 極慣性モーメント  |     | 2015.0                     | 0.08381                     | 0.08369                     |
|           |     | tf・s <sup>2</sup> ・m/m/Br. | kgf・s <sup>2</sup> ・m/model | kgf・s <sup>2</sup> ・m/model |
| 振 動 数     | たわみ | 0.0684 Hz                  | —                           | 1.343 Hz                    |
|           | ねじれ | 0.1280 Hz                  | —                           | 2.500 Hz                    |
| 振 動 数 比   |     | 1.871                      | 1.871                       | 1.862                       |
| 構造対数減 衰 率 | たわみ | —                          | 0.03                        | 0.03                        |
|           | ねじれ | —                          | 0.02                        | 0.02                        |

相当する。それゆえ、CASE-4では床版全面にオープングレーチングが施された場合に対応することとなる。なお、走行路面部をオープングレーチング化した場合には舗装が不要になることから、CASE-2～4の単位長さ当りの重量は、従来の鋼床版形式 (CASE-1) を有する場合と比較し、一般には小さいと考えられる。しかしながら、わが国では車両走行用オープングレーチングは今までに実施されておらず、正確な重量は現時点では不明であること、また、オープングレーチング化そのものによる空力安定化効果をまずはじめに把握する必要があると考え、本研究では、走行路面部オープングレーチング化の有無にかかわらず、CASE-2～4はCASE-1と同じ構造諸元を有するものとした。なお、以上のばね支持試験に加え、20 m/sなる風洞風速のもとで3分力試験も実施することとした。

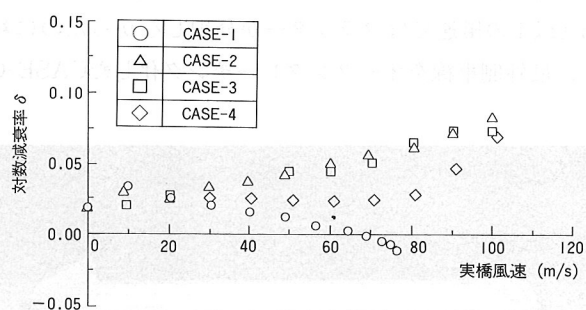
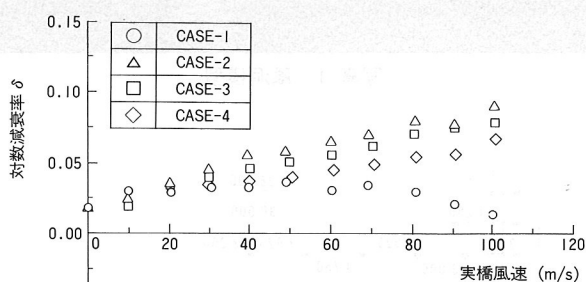
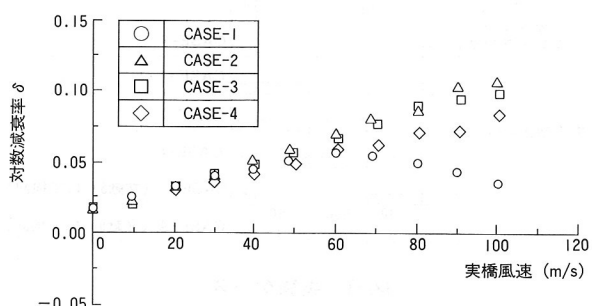
ところで、明石海峡大橋の全橋模型風洞試験や立体骨組みフラッター解析結果によれば、明石海峡大橋の連成フラッター振動波形は、曲げとねじれの対称1次モードだけでなく、曲げの2次以降の低次対称モードも含んだ

図-4  $V_{cr}$ - $\alpha$  曲線

多自由度モード波形となっていることが報告されている。したがって、対象橋梁を支配するフラッター現象が連成フラッターとなる場合、部分模型風洞試験ではフラッター発現風速やフラッターモードについて十分に検証できないが、本研究で対象とする空力的対策 (走行路面部オープングレーチング化) の相対的な有効性を議論するうえで一般性を失うものではないことを述べておきたい。

#### 4. 試験結果と考察

対象橋梁では補剛桁内側に格納された種々の添架物の関係から、主構断面は左右非対称となっている。しかしながら、明石海峡大橋の風洞試験結果によれば、いずれの風向においてもフラッターの発現風速はあまり変化しないことから、本実験では図-2の矢印の方向から風を作用させるものとした。迎角 $\alpha$ が $\alpha = +3^\circ, 0^\circ, -3^\circ$ なる一様流状態のばね支持模型試験で得られた $V_{cr}$ - $\alpha$ 曲線 (フラッターの発現風速と迎角の関係) を図-4にまとめる。また、 $\alpha = +3^\circ, 0^\circ, -3^\circ$ なる迎角について、基準

図-5  $V$ - $\delta$  曲線 ( $\alpha = +3^\circ$ )図-6  $V$ - $\delta$  曲線 ( $\alpha = 0^\circ$ )図-7  $V$ - $\delta$  曲線 ( $\alpha = -3^\circ$ )

片振幅を  $1^\circ$  に設定した場合に得られた  $V$ - $\delta$  曲線 (風速と対数減衰率の関係) を図-5~7 に示す。

図-4 からわかるように, CASE-1 では, 迎角を  $\alpha = -3^\circ$  と  $\alpha = 0^\circ$  に設定した場合には  $100 \text{ m/s}$  以下の風速でフラッターは出現しなかったのに対し,  $\alpha = +3^\circ$  なる場合には  $V = 63.4 \text{ m/s}$  なる風速でフラッターが発現

する結果となっている。

一方, CASE-2~4 では,  $\alpha = -3^\circ, 0^\circ, +3^\circ$  なる迎角のもと  $100 \text{ m/s}$  以下の風速でフラッターは発現せず, 走行路面部のオープングレーチング化は有効な空力的対策の一つになり得ることが判明した。ただし, 図-5~7 に示した  $V$ - $\delta$  曲線からわかるように, 走行路面部をオーブ

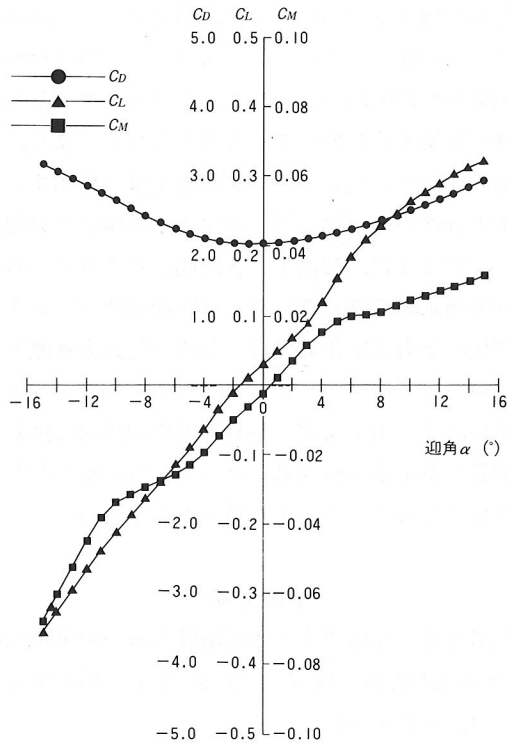


図-8 3 分力曲線 (CASE-1)

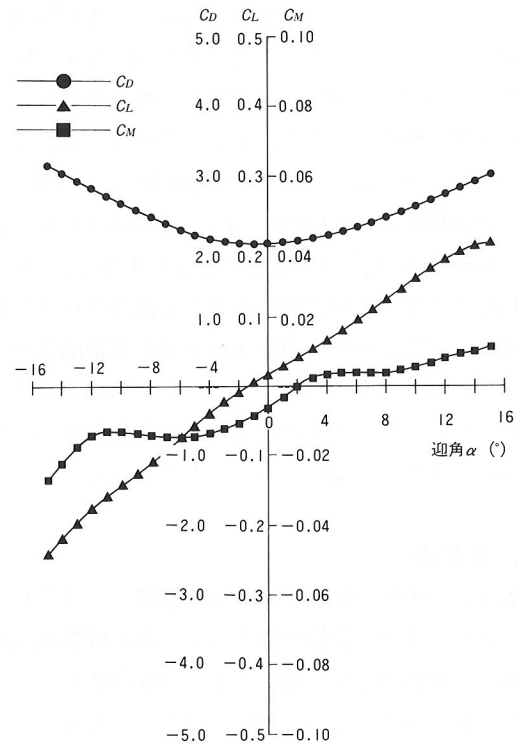


図-9 3 分力曲線 (CASE-2)

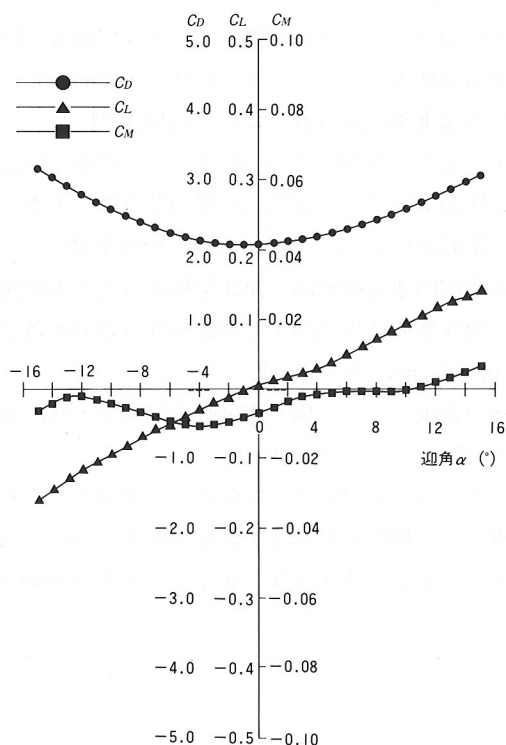


図-10 3 分力曲線 (CASE-3)

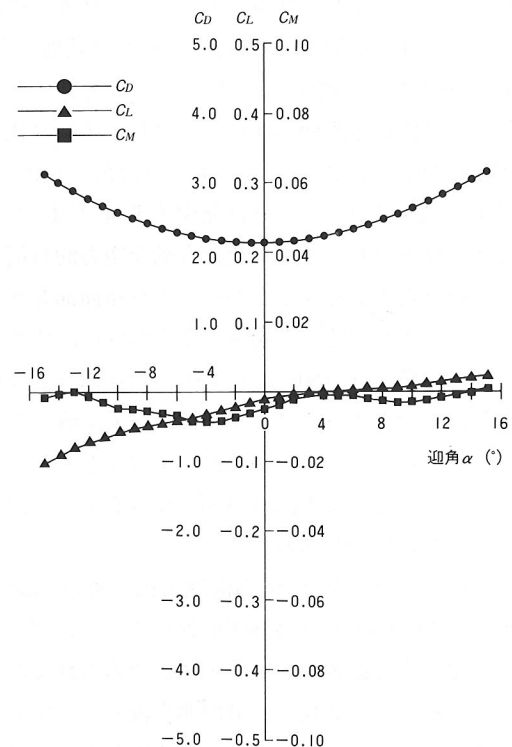


図-11 3 分力曲線 (CASE-4)

ングレーチング化した場合の空力特性は、いずれの迎角においてもCASE-2, CASE-3, CASE-4の順に微少なながらも良好な結果を与えるものであった。本知見はマキナックストレー橋に対する風洞試験結果<sup>6)</sup>と一致するものであるが、今後はより詳細な実験を実施して走行路面部の中央部から1/3なる範囲のオープングレーチング化が最も良好な空力特性を示した理由について検討する必要がある。しかしながら、本風洞試験から、走行路面部の一部をオープングレーチング化する手法は従来の床組構造を有する形式(CASE-1)と比較し、耐風設計から決定される所要主構断面をさらに小さくできると思われる。また、図-8~11に示した3分力特性から、CASE-2~4では、揚力係数 $C_L$ や空力モーメント係数 $C_M$ ならびにそれらの勾配は、CASE-1の値よりかなり小さく、鉛直たわみとねじれのカスト応答特性も著しく改善されると推察される。よって、2500~3000m級の超長大補剛トラス吊橋をより経済的に実現するうえで、走行路面部をオープングレーチング化する手法はきわめて有効な空力的対策の一つになり得る可能性が高いと考えられる。

## 5. まとめ

本論文は、中央支間長が3000mの補剛トラスを有する超長大吊橋の実現可能性を探るべく、部分模型風洞試験を実施して耐風安定性に及ぼす走行路面部オープングレーチング化の影響について検討したものである。得られた主要な知見を以下にまとめる。

- ① 一様流中のばね支持模型風洞試験を $\alpha = +3^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $-3^\circ$ なる迎角で実施したところ、従来の床組構造に対応するCASE-1では $\alpha = +3^\circ$ の状態では $V = 63.4 \text{ m/s}$ なる風速からフラッターが発現したのに対し、最内側車線からオープングレーチング化を順次施したCASE-2~4ではいずれの迎角でも100 m/s以下の風速でフラッターは発現せず、CASE-2~4なるオープングレーチング化は有効な空力的対策の一つになり得る。しかしながら、走行路面部をオープングレーチング化した場合の空力特性は、微少なながらもCASE-2, CASE-3, CASE-4の順に良好な結果を与え、マキナックストレー橋の風洞試験でも示唆されているように走行路面部のすべてをオープングレーチング化する手法(CASE-4)は必ずしも得策な方法でない場合がある。
- ② 上述の知見に加え、明石海峡大橋の風洞試験で対象としたCASE-C(最外側車線のオープングレーチング化)では顕著な耐風安定性が認められなかった事実を考え合わせれば、最内側車線のオープングレーチング化が耐風安定性に大きく寄与すると思われる。

- ③ 一様流中の3分力試験を実施したところ、CASE-4, CASE-3, CASE-2, CASE-1の順で揚力係数 $C_L$ や空力モーメント係数 $C_M$ ならびにそれらの勾配は小さくなり、走行路面部のオープングレーチング化により鉛直たわみとねじれのカスト応答特性も著しく改善されると推察された。

既往の風洞試験から、補剛トラス桁断面の耐風安定性は主構部と橋床部の相対的な位置関係によって微妙に変化することが知られている<sup>7)</sup>。それゆえ、今後は補剛トラスの主構高や橋床部の高さなどもパラメータとした詳細な実験を実施する必要があると考えられる。また、走行路面部のオープングレーチング化を実橋で採用する際には車両走行性や落下物などに対する事前検討も必要となろう。このように、解決すべき問題は残されているものの、本風洞試験で確認された走行路面部オープングレーチング化の空力安定化効果は、今後の超長大補剛トラス吊橋の耐風設計にあたりきわめて有用な知見を与えていると思われる。本論文が、超長大吊橋の検討に携わる実務技術者や風工学の研究者にとって示唆に富んだ有益な技術資料になることを心より願う次第である。

## 参考文献

- 1) 宮田利雄・保田雅彦：明石海峡大橋の耐風性に関する大型風洞試験，構造工学論文集，Vol.39A，pp.861~874，1993年3月。
- 2) 保田雅彦・鈴木周一・勝地 弘：明石海峡大橋大型風洞試験（一様流試験結果），本四技報，Vol.17，No.67，pp.2~9，1993年7月。
- 3) 金崎智樹・宮田利雄・横山功一・保田雅彦・鈴木周一：明石海峡大橋のフラッター特性，第12回風工学シンポジウム論文集，pp.339~344，1992年12月。
- 4) 山下義之・新田篤志・石井 孝・川畑篤敬：構造的耐風安定性向上策による超長大吊橋の試設計，土木学会論文集，第453号/VI-17，pp.59~68，1992年9月。
- 5) 本州四国連絡橋公団・海洋架橋調査会：本州四国連絡橋の海洋架橋技術に関する調査研究（耐風委員会報告書），pp.57~68，1990年3月。
- 6) 神戸市編：マキノ橋の空気動学的安定性，調査月報，pp.47~53，1964年10月。
- 7) たとえば，成田信之・佐藤弘史：補剛トラスを有する吊構造の耐風性におよぼす橋床の影響について，第6回風工学シンポジウム論文集，pp.381~386，1980年11月。