

3,000m級超長大トラス補剛吊橋の耐風安定性に関する実験的研究
 -走行路面部をオープングレーチング化した場合および中央分離帯部を開口した場合のフラッター特性-

On Aerodynamic Stability of a 3,000m class Truss-stiffened Suspension Bridge with Open Gratings in Traffic Lanes and Open Spaces in Center Part

米田昌弘*, 中崎俊三**, 片山哲夫***, 大野克紀****, 杉山幸一*****

Masahiro YONEDA, Shunzo NAKAZAKI, Tetsuo KATAYAMA, Katsunori OHNO and Koh-ichi SUGIYAMA

- * 工博 川田工業(株)技術本部研究室, 室長 (〒114 東京都北区滝野川 1-3-11)
 **工修 川田工業(株)技術本部長大橋部, 部長 (同上)
 *** 川田工業(株)技術本部長大橋部, 課長 (同上)
 **** 川田工業(株)技術本部長大橋部 (同上)
 ***** 川田工業(株)技術本部長大橋部 (同上)

This paper deals with aerodynamic stability of a 3,000m class truss-stiffened suspension bridge. Two dimensional wind tunnel experiments were carried out in a uniform flow in order to investigate the effects of both open gratings in traffic lanes and open spaces in center part 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 gratings or center open spaces could be increased significantly in aerodynamic design.

Key Words : Suspension bridge, Aerodynamic stability, Open grating, Center open space,
 Wind tunnel experiment

1. まえがき

完成すれば世界最大となる中央支間長 1,990m 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。周知の如く、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 2,500m 級や 3,000m 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トラス補剛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実験結果の比較から、最終的にトラス補剛形式を採用するに至っている^{1)~3)}。一方、流線形箱桁形式はトラス形式と比較して完成後の維持管理がきわめて容易であることから、今後の超長大吊橋においてはきわめて有望な補剛形式になると思われるが、本形式の採用にあたってはフラッター発現風速の向上を目指した、より一層の研究開発が必要である。すなわち、2,500m 級や 3,000m 級の超長大吊橋を既往の技術を適用して実現

させようとする場合、トラス補剛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⁴⁾は、中央支間長が 2,000m~3,500m までの超長大トラス補剛吊橋の試設計を行い、3,000m 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に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。

トラス補剛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ーなども開発され、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 1,000m 級程度のトラス補剛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(路肩)と中央部付近(中央帯)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ート橋やポルトガルの 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すでに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となる。しかしながら、明石海峡大橋に対する風洞実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500mm 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⁵⁾。

超長大トラス補剛吊橋の実現にあたっては、建設費用の抑制が最重要課題であろう。これに対し、走行路面部をオープングレーチング化する手法は、グレーチング化した車線の舗装が不要になることから補剛桁部の重量が減少し、さらにはケーブル重量の減少も期待できることとなる。周知の如く、2,500m 級や3,000m 級の超長大吊橋は明石海峡大橋で開発された技術を単純に適用しても実現が困難であり、研究開発にあたっては柔軟な姿勢が望まれる。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、トラス補剛吊橋では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ると言えよう。

このような観点から、著者らは補剛トラスを有する中央支間長が3,000m の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て部分模型風洞実験を実施し、トラス補剛吊橋では走行路面部のオープングレーチング化がきわめて有効な空力安定化対策の一つになり得ることを報告している⁶⁾。しかしながら、先の論文では、風上側と風下側のそれぞれ同じ車線にオープングレーチングを対称となるように配置（以下、両側配置と記す）していたことから、風上側と風下側のオープングレーチングがそれぞれ耐風安定性にどの程度寄与しているかは不明であった。そこで、新たに、風上側あるいは風下側のみにオープングレーチングを配置（以下、片側配置と記す）した場合についても風洞実験を実施し、オープングレーチングの配置とその空力安定化効果に関する詳細な特性を把握することとした。また、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配慮が必要であることから、これらの問題点を解決すべく、床組構造を中央で2分割して中央分離帯部に開口を設けた方式についても部分模型風洞実験を実施することとした。その結果、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用な知見が得られたことから、ここに検討結果を報告する。

なお、オープングレーチングを両側配置した場合の風洞実験結果についてはすでに一部を文献⁶⁾に報告しているが、本論文は、オープングレーチングを片側配置した場合や中央分離帯部を開口とした場合の耐風安定性などその後に行われた新たな研究成果を踏まえ、超長大トラス補剛吊橋の耐風安定性に関する著者らの研究を総括したものであることを、はじめに述べておきたい。

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3,000m、側支間長が1,000m の3径間2ヒンジトラス補剛吊橋である。なお、図-1には、明石海峡大橋と同じく橋床部の最外側部（路肩）と中央部付近（中央帯）をオープングレーチング化した場合の床組構造を示しているが、これは次章に述べる基本検討ケース（CASE-O）に対応する。

対象橋梁（CASE-O なる基本検討ケース）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=35.5m、D=14.0mであるのに対し、対象橋梁ではB=38.5m、D=17.0mとなっている。これらの諸元は、フラッターの照査風速Vcrを明石海峡大橋での値と同じくVcr=78m/sに設定し、文献⁴⁾を参考にしてSelberg式によるフラッター限界風速をVsとした場合にVcr=1.3Vs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3,000m 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。

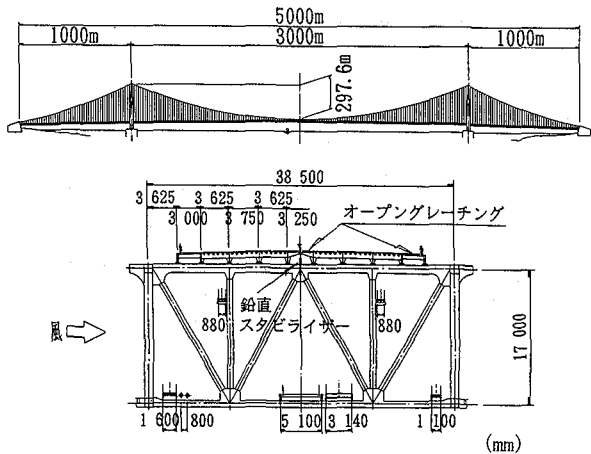


図-1 対象とした橋梁

表-1 構造諸元

項 目	対象橋梁 (CASE-O)	明石海峡大橋 ⁴⁾
中央支間長	3000 m	1990 m
側支間長	1000 m	960 m
ケーブルサグ	297.6 m	201.0 m
主構高	17.0 m	14.0 m
主構高	38.5 m	35.5 m
断面定数	曲げ (鉛直)	54.3 m ⁴
	ねじれ	60.1 m ⁴
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 モーメント	補 剛 桁	993 tf・s ² ・m/m
	ケ ー ブ ル	1022 tf・s ² ・m/m
	合 計	2015 tf・s ² ・m/m
固有振動数	たわみ対称1次	0.068 Hz
	ねじれ対称1次	0.128 Hz

なお、明石海峡大橋の風洞実験結果^{1)~3)}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で採用されたものと同じ寸法のもを同じ位置に配置するものとしている。

3. 風洞実験の概要

風洞実験にあたっては、川田工業(株)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ン型であるが、本実験では幅2.0m×高さ2.5m×全長15.0mなる閉鎖型測定洞を使用するものとした。

風洞実験では縮尺1/79の2次元剛体部分模型(模型長=1,620mm)を用いて、一連のばね支持模型風洞実験を実施した。なお、ばね支持模型実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。参考までに、基本検討ケースであるCASE-O(図-1に示した床組構造を有する場合に対応し、明石海峡大橋と同じく路肩と中央帯にオープングレーチングを配した構造)のばね支持実験条件を表-2に示す。

走行路面部をオープングレーチング化する手法では、グレーチング化した車線の舗装が不要になることから、この方式の単位長さ当りの重量は、基本検討ケースであるCASE-Oと比較して一般には小さくなる。また、橋床を2分割して中央分離帯部に開口を設けた場合の単位長さ当りの重量も当然のことながらCASE-Oと幾分相違することとなる。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や中央分離帯部の開口化に起因した空力安定化効果のみをまずはじめに把握することが第一であると考え、次章以降のばね支持模型風洞実験では、走行路面部のオープングレーチング化や中央分離帯部の開口化の程度にかかわらず、CASE-Oと同じ構造諸元を有するものとして実施することとした。なお、図-1に示したように、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実験結果によれば、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、本研究における一連の風洞実験では図-1の矢印の方向から風を作用させるものとした。また、以上のばね支持実験に加え、一部のケースについては20m/sなる風洞風速のもとで静的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⁷⁾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、部分模型風洞実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(走行路面部のオープングレーチング化や中央分離帯部の開口化)の相対的な有効性を議論する上で一般性を失うものではないことを述べておきたい。

4. 走行路面部の風上側と風下側をオープングレーチング化した場合の耐風安定性

明石海峡大橋に対する風洞実験では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500mm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⁵⁾。そこで、本章では、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、部分模型風洞実験を実施して走行路面部の風上側と風下側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報告する。

(1) 実験ケース

ばね支持模型実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-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実験で検討されたオープングレーチング案である。なお、各車線中央部に500mm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100m/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では $\alpha = 0^{\circ}$ なる迎角において照査風速である78m/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。また、CASE-Oは基本検討ケース(明石海峡大橋と同じく、路肩と中央帯にオープングレーチングを配した構造)であり、CASE-1S~CASE-3Sは、図-2からわかるように走行路面の最内側車線(以下、最内側車線から順次、1/3車線、2/3車線、3/3車線と記す)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%)した場合に相当する。それゆえ、CASE-3S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。

表-2 ばね支持実験条件(CASE-O, 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 ² ・m/m/Br.	kgf・s ² ・m/model	kgf・s ² ・m/model
振 動 数	たわみ	0.068 Hz	—	1.343 Hz
	ねじれ	0.128 Hz	—	2.500 Hz
振 動 数 比		1.882	1.882	1.862
構造対数減衰率	たわみ	—	0.03	0.03
	ねじれ	—	0.02	0.02

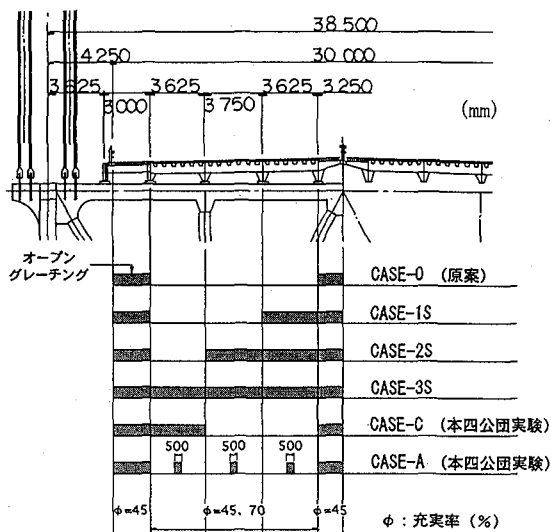


図-2 オープングレーチングを
両側配置した場合の実験ケース

(2) 実験結果と考察

迎角 α が $\alpha = +3^\circ$, 0° , -3° なる一様流状態のばね支持模型実験で得られた $V_{cr}-\alpha$ 曲線（フラッターの発現風速と迎角の関係）を図-3にまとめる。また、 $\alpha = +3^\circ$, 0° , -3° なる迎角について、基準片振幅を 1° 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-4に示す。

図-3 からわかるように、基本検討ケースである CASE-O では、迎角を $\alpha = -3^\circ$ と $\alpha = 0^\circ$ に設定した場合に 100m/s 以下の風速でフラッターは発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。これに対し、CASE-1S ~ CASE-3S では、 $\alpha = -3^\circ$, 0° , $+3^\circ$ なる迎角のもと 100m/s 以下の風速でフラッターが発現していないことがわかる。したがって、走行路面部をオープングレーチング化する手法を実際の設計に適用するにあたっては、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こととなる。また、図-5に示した3分力特性から、CASE-1S ~ CASE-3S 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-O 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。それゆえ、超長大トラス補剛吊橋をより経済的に実現する上で、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言えよう。ただし、図-4に示した $V-\delta$ 曲線からわかるように、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は、いずれの迎角においても CASE-1S, CASE-2S, CASE-3S の順に微少なながらも良好な結果を与えており、マキナックストレート橋の風洞実験結果⁹⁾でも示唆されているように、走行路面部をすべてオープングレーチング化する手法（CASE-3S）は必ずしも得策でない場合があることに留意しなければならない。

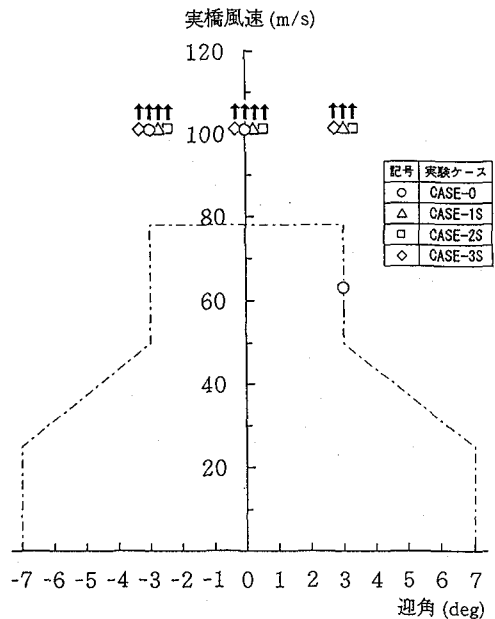


図-3 $V_{cr}-\alpha$ 曲線（オープングレーチングを
両側配置した場合）

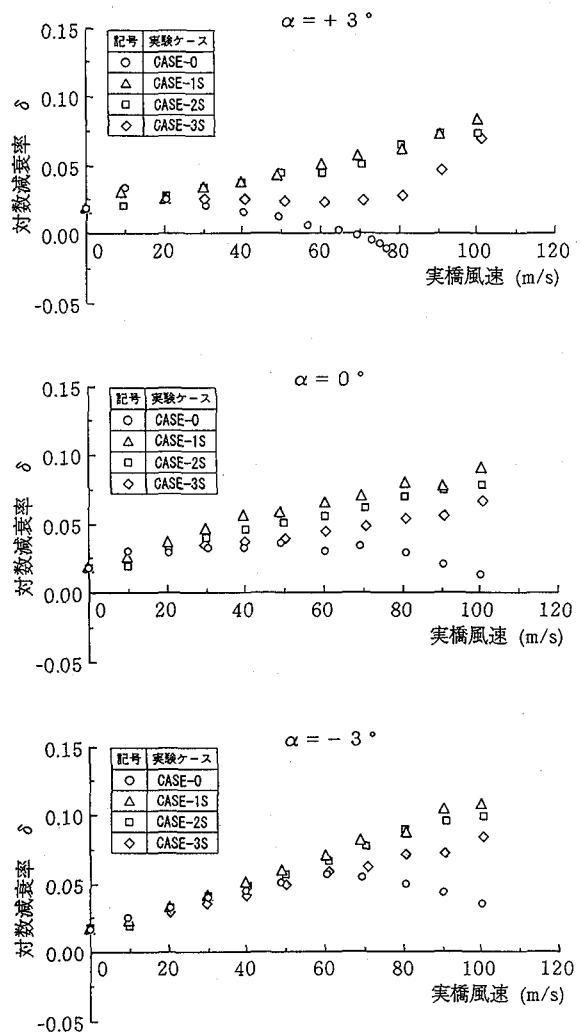


図-4 $V-\delta$ 曲線（オープングレーチングを
両側配置した場合）

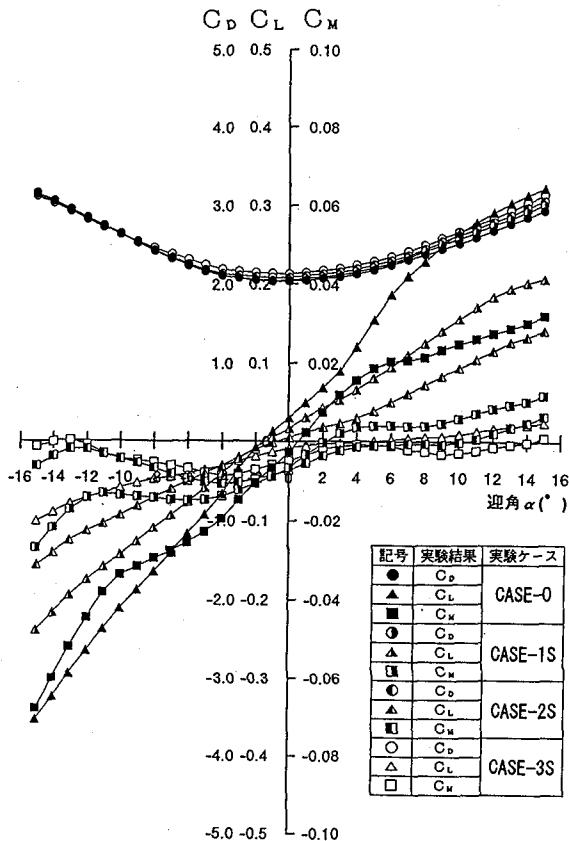


図-5 3分力係数曲線（オープングレーチングを両側配置した場合）

5. 走行路面部の風上側あるいは風下側のみをオープングレーチング化した場合の耐風安定性

前章に示した実験では風上側と風下側の両側にそれぞれオープングレーチングを配置していたことから、風上側と風下側のオープングレーチングがそれぞれ耐風安定性にどの程度寄与しているか不明であった。そこで、新たに、風上側あるいは風下側のみオープングレーチングを片側配置した場合についても風洞実験を実施し、オープングレーチングの配置とその空力制振効果に関する詳細な特性を把握することとした。

(1) 実験ケース

ばね支持模型実験で対象とした実験ケースを図-6に示す。ここに、CASE-0は、前章の実験と同じく路肩と中央帯にオープングレーチングを配した基本検討ケースである。これに対し、CASE-1WとCASE-1Lは、CASE-0で設置されている路肩と中央帯のグレーチングに加え、風上側と風下側の1/3車線にオープングレーチングをそれぞれ片側配置した場合に対応する。同様に、CASE-2WとCASE-2Lは風上側と風下側の2/3車線を、CASE-3WとCASE-3Lは風上側と風下側の3/3車線を、それぞれ片側オープングレーチング化した場合に対応する。

なお、オープングレーチング化によって各ケースの構造

諸元は幾分相違することとなるが、本検討においては、3章で述べたようにオープングレーチングの片側配置による影響のみを把握できるように考えて、全てのケースの構造諸元はCASE-0と同じ値を有するものとした。

(2) 実験結果と考察

迎角 $\alpha = +3^\circ$ なる一様流状態で得られた $V-\delta$ 曲線（基準片振幅は 1° に設定）を図-7に示す。また、各ケースのフラッター発現風速を表-3にまとめる。

表-3から、基本検討ケースであるCASE-0のフラッター発現風速が 63.4m/s （ $\alpha = +3^\circ$ ）であるのに対し、風上側のみにオープングレーチングを施したCASE-1W, 2W, 3Wではそれぞれ 100m/s 以下の風速でフラッターが発現していないことがわかる。これに対し、CASE-1L, 2L, 3Lのフラッター発現風速はそれぞれ 93.6m/s , 64.0m/s , 40.9m/s

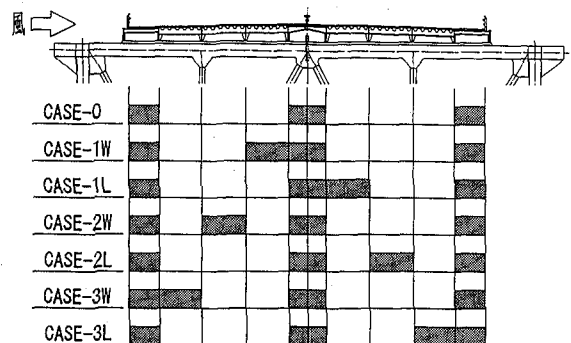


図-6 実験ケース（オープングレーチングを片側配置した場合）

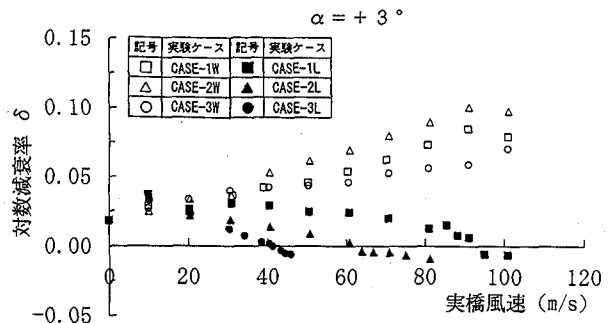


図-7 $V-\delta$ 曲線（オープングレーチングを片側配置した場合）

表-3 各ケースのフラッター発現風速

ケース	フラッター発現風速
CASE-0	63.4m/s
CASE-1W	100m/s以下では発生せず
CASE-1L	93.6m/s
CASE-2W	100m/s以下では発生せず
CASE-2L	64.0m/s
CASE-3W	100m/s以下では発生せず
CASE-3L	40.9m/s

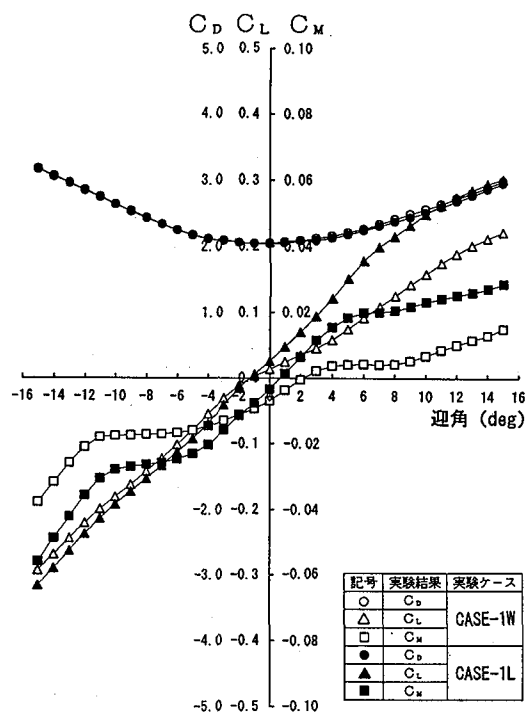


図-8 3分力係数曲線（オープングレーチングを片側配置した場合）

となっており、風下側の外側車線にオープングレーチング化を施すにしたがってより低い風速でフラッターが発現する結果となっている。すなわち、風上側のオープングレーチング化は耐フラッター性を向上させるのに対し、風下側のオープングレーチング化は耐フラッター性を低下させるという、従来知られていなかったきわめて興味ある結果が得られた。

ところで、図-7からわかるように、本実験では風上側の2/3車線にオープングレーチング化を施したCASE-2Wが最も良好な耐風安定性を与えているのに対し、オープングレーチングを両側配置した前章の実験では風上側と風下側の1/3車線をそれぞれオープングレーチング化したCASE-1Sが最も良好な耐風安定性を示す結果となっていた。これについては、図-7を参照して耐風性に及ぼす各オープングレーチングの寄与を考えれば、風上側と風下側の1/3車線にオープングレーチングを配する組み合わせが最も良好な耐風安定性を与えることが容易に理解されよう。なお、図-8はCASE-1WとCASE-1Lの静的3分力試験結果を示したものであるが、この図からわかるように、CASE-1Wの揚力係数と空力モーメント係数は、正迎角の範囲においてCASE-1Lよりも小さな値を示していた。また、この傾向はCASE-3WとCASE-3Lを比較した場合にも同様であったことから、揚力係数と空力モーメント係数の小さいオープングレーチング配置が良好なフラッター特性を示すものと推察される。これについては、今後、詳細な実験を実施し検証したいと考えている。

従来の認識では、風上側と風下側の両側にオープングレーチングを配置するのが一般的であると言える。しかしな

がら、風上側のみにオープングレーチングを配置すれば上述したように耐フラッター特性がきわめて向上することから、台風の進路情報の利用などより柔軟で斬新な設計思想を導入すれば、風上側のみをオープングレーチング化する手法（たとえば、超大型台風が来襲する1～2日前から作業を開始して風下側のオープングレーチングを塞ぎ、風上側のみがオープングレーチング化された状態とする手法）を実橋に適用することも不可能でないと思われる。すなわち、台風時に風上側のみをオープングレーチング化する手法は、フラッター特性が向上する理由についてさらに詳細な検討を実施する必要があるものの、超長大トラス補剛吊橋の耐風対策として一考の価値があるものと考えられる。

6. 中央分離帯部を開口した場合の耐風安定性

オープングレーチングを両側配置する方式では、3章に示したように風上側と風下側の1/3車線をそれぞれオープングレーチング化する手法が最適であると言えるが、一方で、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対応など解決すべき問題点も残されている。そこで、これらの問題点を解決すべく、本研究では床組構造を中央で2分割して中央分離帯部を開口とする方式についても風洞実験を実施し、本方式の空力安定化効果について検討することとした。

(1) 実験ケース

ばね支持実験で対象とした実験ケースを図-9に示す。ここに、CASE-0は4章と5章で対象とした基本検討ケースと同じものである。また、CASE-1C、2C、3Cは、それぞれ中央分離帯部での開口幅が1,000mm、2,000mm、3,000mmなる場合に対応する。なお、2分割した床組構造のそれぞれには中央部付近に3,250mm/2なるグレーチング（充実率は45%）が側帯として設置されているが、45%なる充実率を無視してこの部分も開口部と考えれば、CASE-1C、2C、3Cの全中央開口幅はそれぞれ4,250mm、5,250mm、6,250mmになることを付記しておく。

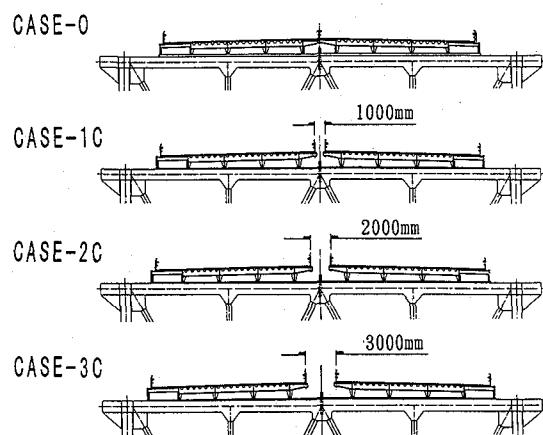


図-9 実験ケース（中央分離帯部を開口した場合）

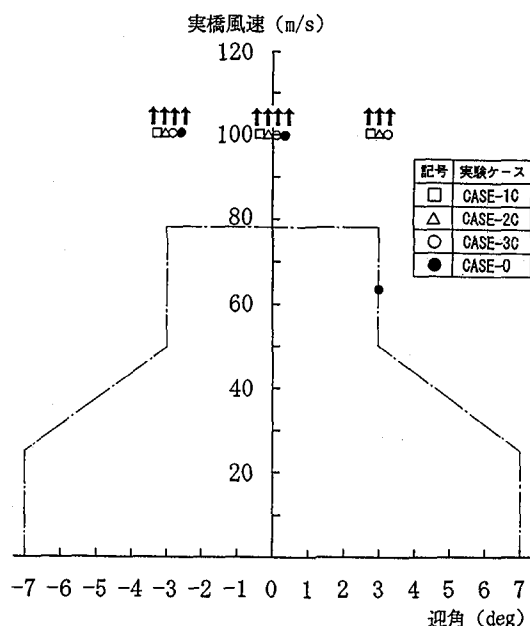


図-10 Vcr- α 曲線（中央分離帯部を開口した場合）

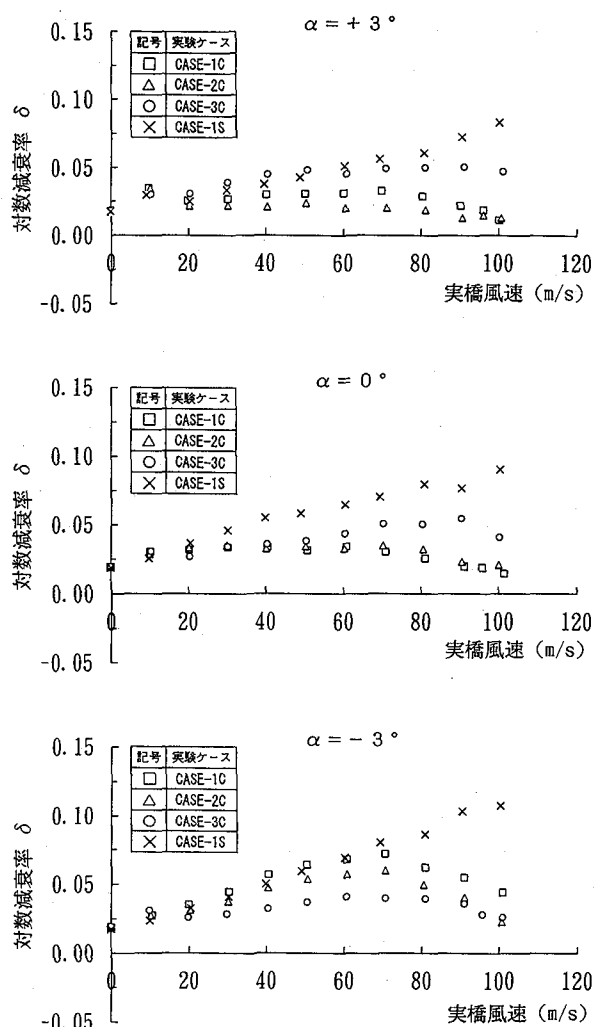


図-11 V- δ 曲線（中央分離帯部を開口した場合）

(2) 実験結果と考察

迎角 $\alpha = +3^\circ, 0^\circ, -3^\circ$ なる一様流状態のばね支持実験で得られた $V_{cr}-\alpha$ 曲線（フラッターの発現風速と迎角の関係）と $V-\delta$ 曲線（基準振幅を 1° に設定）をそれぞれ図-10、図-11に示す。なお、図-11には3章に示した実験で最も良好なフラッター特性が得られた CASE-1S（風上側と風下側の $1/3$ 車線をそれぞれオープングレーチング化したケースで、グレーチングの充実率を無視すれば全中央開口幅は $10,500\text{mm}$ となる）の結果も併記している。

図-10から、CASE-1C、2C、3C はいずれの迎角においても 100m/s 以下の風速でフラッターが発現していないことがわかる。これに対し、基本検討ケースである CASE-O では迎角 $\alpha = +3^\circ$ において 63.4m/s なる風速でフラッターが発現していたことから、橋床部に $1,000\text{mm}$ 程度の中央開口幅を設置することでフラッター特性が著しく改善されるものと言えよう。ところで、図-11からわかるように、迎角が $\alpha = +3^\circ, 0^\circ$ なる場合には CASE-3C が最も良好な耐風性を有しているものの、迎角が $\alpha = -3^\circ$ なる場合には CASE-1C が最も良好な耐風性を示すものとなっている。すなわち、中央部の開口幅を拡大しても耐風安定性は単純に向上しない結果となっている。これは床組を外側に移動して中央開口幅を拡大した場合、主構上弦材と床組外側部の開口幅は逆に小さくなることに起因するものと考えられる。

7. まとめ

本論文は、中央支間長が $3,000\text{m}$ 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、部分模型風洞実験を実施してトラス補剛吊橋の耐風安定性に及ぼす走行路面部のオープングレーチング化と中央分離帯部の開口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) オープングレーチングを走行路面部の風上側と風下側の両側に配置した場合について、 $\alpha = -3^\circ, 0^\circ, +3^\circ$ なる迎角のもと一様流中でばね支持模型風洞実験を実施した。その結果、路肩と中央帯にグレーチングを配した基本検討ケースである CASE-O では、 $\alpha = +3^\circ$ の状態で $V = 63.4\text{m/s}$ なる風速からフラッターが発現したのに対し、 $1/3$ 車線（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-1S、2S、3S ではいずれの迎角でも 100m/s 以下の風速でフラッターは発現せず、走行路面部の両側をオープングレーチング化する手法は有効な空力的対策の一つになり得ることがわかった。

(2) 走行路面部の両側をオープングレーチング化した場合の空力特性は、風上側と風下側の $1/3$ 車線をそれぞれオープングレーチング化した CASE-1S が若干ながらも最も良好な結果を与え、マキナクストレート橋の風洞実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-3S）は必ずしも得策でない

場合がある。

(3) 風速が 20m/s なる一様流中で 3 分力試験を実施したところ、CASE-O、CASE-1S、CASE-2S、CASE-3S 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大きく、走行路面部をオープングレーチング化すれば鉛直たわみとねじれのガスト応答特性も著しく改善される。

(4) 風上側の 1/3 車線（最内側車線）、2/3 車線、3/3 車線（最外側車線）のみをオープングレーチング化した CASE-1W、2W、3W および風下側の 1/3 車線、2/3 車線、3/3 車線のみをオープングレーチング化した CASE-1L、2L、3L についても、 $\alpha=+3^\circ$ なる迎角のもと一様流中でばね支持模型風洞実験を実施した。その結果、風上側の 2/3 車線のみをオープングレーチング化した CASE-2W が最も良好な耐風安定性を与えるものの、風上側の 1/3 車線と 3/3 車線をオープングレーチング化した CASE-1W、3W でもそれぞれ 100m/s 以下の風速でフラッターは発現しないという結果が得られた。これに対し、CASE-1L、2L、3L のフラッター発現風速はそれぞれ 93.6m/s、64.0m/s、40.9m/s となっており、風下側の外側車線にオープングレーチング化を施すにしたがって、より低い風速でフラッターが発現していた。すなわち、風上側のオープングレーチング化は耐フラッター性を向上させるのに対し、風下側のオープングレーチング化は耐フラッター性を低下させるという、従来知られていなかったきわめて興味ある結果が得られた。

(5) 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対応など解決すべき問題点も残されている。そこで、これらの問題点を解決すべく、床組構造を中央で 2 分割して中央分離帯部を開口とする方式についても $\alpha=-3^\circ$ 、 0° 、 $+3^\circ$ なる迎角のもと、一様流中でばね支持模型風洞実験を実施した。その結果、中央分離帯部での開口幅がそれぞれ 1,000mm、2,000mm、3,000mm なる CASE-1C、2C、3C ではいずれの迎角においても 100m/s 以下の風速でフラッターが発現せず、1,000 mm 程度の開口幅を橋床部中央に設置すればフラッター特性は著しく改善されることがわかった。

既往の風洞試験から、トラス補剛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^{9),10)}。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ー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。また、風上側のみをオープングレーチング化する手法では、フラッター特性が向上する理由についてさらに詳細な検討が必要があろう。このように、解決すべき問題は残されているものの、本風洞実験で確認された走行路面部のオープングレーチング化や中央分離帯部の開口化による空力安定化効果は、今後の超長大トラス補剛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) 米田昌弘・中崎俊三・大野克紀・杉山幸一：走行路面部にオープングレーチング化を施した 3,000m 級超長大トラス補剛吊橋の耐風安定性について，第 13 回風工学シンポジウム論文集，pp.407～412，1994 年 12 月。
- 7) 宮田利雄・山田 均・太田博文：立体骨組み解析法による横たわみしたトラス補剛吊橋の曲げねじれフラッター解析，土木学会論文集，第 404 号/II-11，pp.267～275，1989 年 4 月。
- 8) 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。
- 9) 久保喜延・加藤九州男・重広正治・宮田利雄・伊藤 学：吊橋補合桁の部材配置による耐風特性について，第 5 回風工学シンポジウム論文集，pp.237～242，1978 年 12 月。
- 10) 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。

(1995 年 9 月 18 日受付)