

オープングレーチング床版パイプトラス補剛吊橋の耐風安定性の検討

Aerodynamic investigation of a suspension bridge having a pipe-truss girder and grid deck

岡田 徹*, 埴 洋二**, 広沢 正雄***, 市川 靖生***, 島田 諭****, 小林 紘士*****

Toru OKADA, Yoji HANAWA, Masao HIROSAWA, Yasuo ICHIKAWA, Satoru SHIMADA and Hiroshi KOBAYASHI

*	(株)神戸製鋼所 機械研究所 振動音響研究室	(〒651-2271 神戸市西区高塚台1-5-5)
**	(株)神戸製鋼所 機械研究所 構造強度研究室	(〒651-2271 神戸市西区高塚台1-5-5)
***	(株)神戸製鋼所 都市環境カンパニー 構造技術部	(〒657-0845 神戸市灘区岩屋中町4-2-15)
****	(株)コベルコ科研 尼崎事業所 振音流動技術室	(〒660-0083 兵庫県尼崎市道意町6-32)
*****	工博 立命館大学 理工学部 土木工学科 教授	(〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Aerodynamic investigation of a suspension bridge of 2,500m class having a pipe-truss girder and grid deck with considerably reduced weight as compared with conventional suspension bridges was carried out using a wind tunnel. The test models were two-dimensional rigid body as follows ; one having only a pipe-truss girder without floor systems, one having solid floor systems, one in which the half of the floor systems was grid deck, and one in which all the floor system was grid deck. It was found that the aerodynamic characteristics of a suspension bridge having pipe-truss girder, though it is the lightweight structure, could be considerably improved by constructing all the floor system with grid deck.

Key Words: grid deck, pipe-truss girder, aerodynamic stability

キーワード: オープングレーチング, パイプトラス桁, 空力安定性

1. 緒言

東京湾口、伊勢湾口、紀淡海峡などを連絡する超長大橋プロジェクトが構想されている。主径間が2,000mを超す超長大吊橋の設計においては、耐風安定性に対する検討が重要であるとともに、大幅なコスト削減が要求されている。長径間吊橋の耐風安定性の確保とコストの削減の要求を満たす幾つかの橋梁構造が提案されているが、その一つに、吊橋補剛桁構造として相対的に抗力係数を小さくできる鋼管を用いたパイプトラス構造が提案されている¹⁾。長大吊橋では、トラス補剛桁断面は活荷重や死荷重で決定されず、主に風による横荷重で決まる為に、抗力係数が小さくなれば補剛桁断面の剛性を下げることが可能となり部材重量を減らすことができる。さらに、鋼管は座屈強度が大きいとともに、製作の際に溶接延長が短いなどの利点も挙げられる。

また、オープングレーチングを全面的に床版に採用し、吊橋補剛桁の軽量化と耐風安定性を満足させ、従来の長大吊橋に比べ大幅な経済化を図る考えもある²⁾。オープングレーチングは、トラス補剛桁の一般的な空力対策とされているが、国内での実施例は橋床の路肩や中央帯に設けられている場合が多く、走行路面部に設置された例は

無い³⁾。しかし、海外に目を向けると、アメリカのマキノ橋や、ポルトガルの4月25日橋などの吊橋において、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^{4)~6)}。

このオープングレーチング床版は、車両走行性等に対する検討の必要性があるものの⁴⁾⁵⁾、今後の超長大橋プロジェクトに向けて、その耐風効果について詳細に研究が行われている²⁾⁷⁾。これらの研究によると、オープングレーチングの採用により耐風安定性能は大幅に向上するが、その設置箇所や開口率によって性能が変化することが報告されている。

以上の背景から、従来提案されてきたトラス橋梁に対して大幅に重量が軽減されたパイプトラス補剛桁の吊橋に、オープングレーチングを採用した場合の耐風安定特性を把握しデータを蓄積することを目的として、風洞実験を実施する。

本論文は、このパイプトラス橋梁の主桁部の部分模型を用い、その静的三分力特性、および動的応答特性を明らかにする。対象とした橋梁は、中央支間長 2,500m の超長大吊橋である。床版全体をオープングレーチング化したオールグレーチングと、床版の一部をグレーチング化したハーフグレーチングについて検討を行う。また、床

版全体をソリッドとした場合と床版を設置しない場合についての検討も合わせて実施し、オープングレーチング化の耐風安定化効果について考察する。

表-1 構造諸元

項目		対象橋梁	
主径間		2,500 m	
主構幅		26 m	
主構高		7 m	
重量	ケーブル	17.16 tonf/m	
	桁	10.01 tonf/m	
極慣性モーメント		2,529 tonf・m	
振動数	撓み	0.053Hz	振動数比 2.55倍
	捩れ	0.135Hz	

2. 対象橋梁と風洞実験の概要

対象とする橋梁は、表-1 の構造諸元を有する中央支間長 2,500m の 3 径間吊橋で、補剛桁として図-1 に示す逆台形断面構成のパイプトラス構造を想定している。橋梁の固有振動特性は、文献 8) に示されている各種橋梁の中央支間長と振動数の関係(図-2)から推定した。文献値を用いたのは、これまでに無い形式であり、構造解析値を用いるには不確定な要因が多いためである。また、床版にはオープングレーチングの採用を検討しているが、後述の模型実験の際にはこの床版様式を変えて検討を実施する。

風洞実験にあたっては、コベルコ科研(株)所有の風洞施設を利用した。この風洞施設は吹き出し式エッフェル型風洞で、測定部の寸法は高さ 1.2m×幅 1.2m×長さ 2.0 m である。風洞実験は図-3 に示す縮尺 1/85.5 の 2 次元模

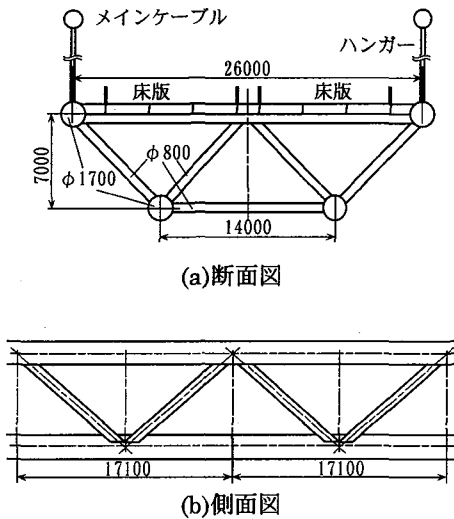


図-1 パイプトラス補剛桁 (unit:mm)

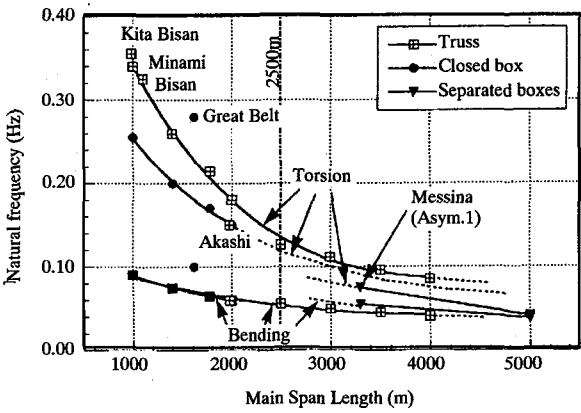


図-2 吊橋のスパン長と固有振動数の関係(文献8から転載)

型を用いて実施した。ばね支持模型実験にあたっては、模型を撓みと捩れの 2 自由度系で支持し、模型の回転中心はトラス高の中央の位置とした。ばね支持実験の条件を表-2 に示す。

パイプトラスは木材にニス仕上げしたものを用い、床版に関してはアスファルト舗装を想定した場合は厚さ 10mm の木板を、オープングレーチングに対しては非鉄金網(JIS SWG)を用いた⁹⁾。実橋においては、床版のオープングレーチング化により橋梁重量の低減を計ることができるが、本検討では、オープングレーチング化による耐風安定化の効果の検証を行うことを目的としている為、床版の種類によらず重量等の条件を等しくして実験を実

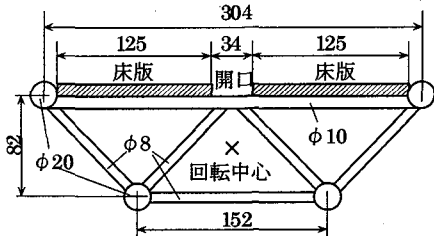


図-3 実験模型 (模型長1m) (unit:mm)

表-2 ばね支持実験条件 (縮尺1/85.5)

		実橋諸元	実験値
桁幅		26 m	304mm
桁高		7 m	82mm
重量		27.17 tonf/m	3.714 kgf
極慣性モーメント		2,529 tonf・m	0.04726 kgf・m ²
振動数	たわみ	0.053 Hz	0.736 Hz
	ねじれ	0.135 Hz	1.915 Hz
振動倍率		2.55	2.60
構造減衰	たわみ	—	0.02~0.03
	ねじれ	—	0.02
風速倍率		—	6.1

施した。また、幅員中央部に幅 34mm の開口部を設けている。ここには、グレーチングは装着せずに、完全な開口部としている。また、先述したように、パイプトラス補剛桁の吊橋にオープングレーチングを採用した場合の基本的な耐風安定特性を把握し、データを蓄積することを目的としているため、本研究では検査路や欄干などの添加物は考えていない。尚、トラス部材として利用している円柱部材については、その円柱の表面粗さに応じて流力特性がレイノルズ数に大きく依存することが指摘されているが、本実験では特に表面工夫は実施しなかった。これについては、次章に考察を加える。

3. 風洞実験結果と考察

3. 1 円形断面の抗力係数

円形断面の抗力係数は、レイノルズ数の影響を顕著に受けることが知られている。文献 10)から引用した図-4 に示すように、円柱の抗力係数は表面が滑らかになる程レイノルズ数の影響を強く受ける。ここで、図中の D は円柱の直径で、 k は円柱の平均表面粗さを表す。そこで、実験模型で使した部材の流力特性の概略を把握する為、まず円柱部材単体の抗力係数を確認した。

抗力係数の測定は模型に用いられている $\phi 8$ 、 $\phi 20$ と、同一材質の $\phi 15$ 、 $\phi 27$ を合わせた計 4 種類の円柱について実施した。このとき、各円柱において風洞風速を 10, 15, 20m/s と変化させて測定を行った。結果を図-4 に重ね合わせてプロットする。実際のパイプトラス橋の使用部材でのレイノルズ数は $2 \sim 3 \times 10^6$ で臨界レイノルズ数以上であるが、本論文では最大でも約 3×10^4 程度のかかなり低いレイノルズ数域で実験することとなる。高レイノルズ数域の検討に関しては今後の課題である。

パイプトラス補剛桁の動的応答特性に与えるレイノル

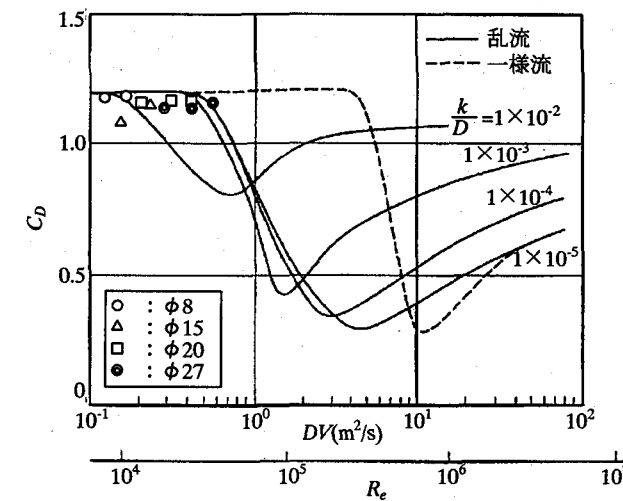


図-4 円形断面の抗力係数に及ぼすレイノルズ数の影響 (文献10)から転載)

ズ数の影響については不明であるが、フラッターに対しては、円柱部材よりも床版部分に作用する空気力の影響が大であると考え、上述のような静特性のパイプ部材を用いて以降の実験を行う。

3. 2 静的三分力試験結果

床版様式の違いによる静的特性を把握することを目的とし、静的三分力試験を実施した。検討した床版タイプを表-3 および図-5 に示す。金網の充実率は 40% に統一し、線径を変えたものを用意した。表中に示すメッシュ数とは 25.4mm (1 インチ) 角の範囲の開口数を意味する。また、Case2 は床版の一部をグレーチング化したハーフグレーチングとしたが、従来の研究 23)において内側の車線のみをグレーチング化するのが耐風安定性上好ましいという結果が得られていることから、図-5(b)に示す通り床版の内側半分に金網を配置した場合についてのみ実験を実施した。

静的三分力係数は、次式の通り定義した。

$$C_D = \frac{D}{0.5\rho V^2 A_0} \quad C_L = \frac{L}{0.5\rho V^2 B l} \quad C_M = \frac{M}{0.5\rho V^2 B^2 l} \quad (1)$$

D:抗力, L:揚力, M:モーメント力
 ρ :空気密度(1.205kg/m³), V:風洞風速(m/s)
B:模型幅(0.324m), l:模型長(1m)
A₀:迎角 0° の投影面積(0.0503m²)

表-3 実験に使用した床版タイプ

case	床版タイプ	床版部材	図-5との対応
1	全面ソリッド	木板	(a)
2	ハーフグレーチング	金網1+木板	(b)
3	オールグレーチング	金網1(線径0.254mm-メッシュ数24)	(c)
4	オールグレーチング	金網2(線径0.213mm-メッシュ数30)	
5	オールグレーチング	金網3(線径0.152mm-メッシュ数40)	
6	床版無し		(d)

まず、オープングレーチングを模擬した金網の線径の

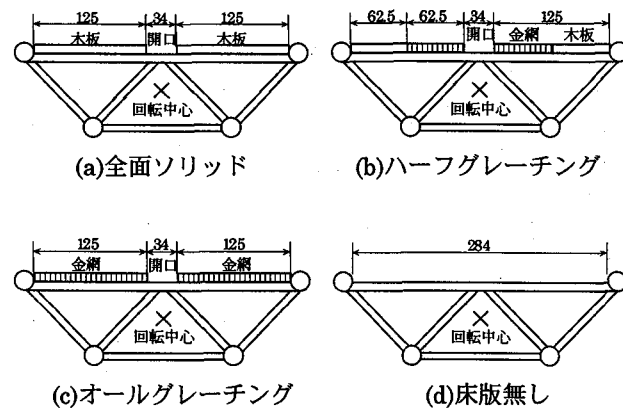


図-5 実験で使した床版タイプ

影響を調べた。表-3 の Case3~5 の静的三分力係数を図-6 に示す。風洞風速は 15m/s とした。図から金網の種類による各空気力係数の差は少ないことが確認できる。よって、以降の実験では、動的試験も含めて全て Case3 の金網タイプ1を利用した。

次に、床版タイプと静的三分力係数の関係を調べた。その結果を図-7 に示す。この結果も、風洞風速は 15m/s とした。床版タイプは Case1~3 の、全面ソリッド、ハーフグレーチング、オールグレーチング、参考として Case6 の床版を設置しない場合の結果も合わせて示す。三分力の分布形状は、特にオールグレーチングが床版無しの特性にかかなり近づいている。このことから、橋梁の耐風対策として、オープングレーチングの採用が有効であることが伺える。また、揚力係数・モーメント係数は、金網による開口部が大きくなる程迎角 0° における空気力係数は小さくなるが、抗力係数については逆の傾向を示す。

このように抗力係数が逆の傾向を示すのは、床版の存在により上弦材に作用する抗力が減少するが、オープングレーチング化によりその効果が少なくなっていくからである。グレーチングによるオープン化はここで用いた床版配置の場合には、抗力の面で多少の犠牲が要求される。

また、モーメント係数について 4 断面を比較する。ソリッド断面は正迎角の $+3^\circ$ 以上において負勾配となるが、グレーチングを設けると大きく傾向が変化し、ハーフグレーチングでは迎角 -12° から 0° にかけて負勾配となり、他の 2 断面は勾配が小さく $\pm 5^\circ$ の範囲でほぼ水平となる。

モーメント係数が負勾配となる迎角域では、振れフラッターが低風速から発現する可能性があるが、ソリッド断面とハーフグレーチング断面の上述の迎角域で振れフラッターの発現が予想される。他の 2 断面については、勾配及び絶対値が小さく、ダイバージェンスに対して有利であると言える。

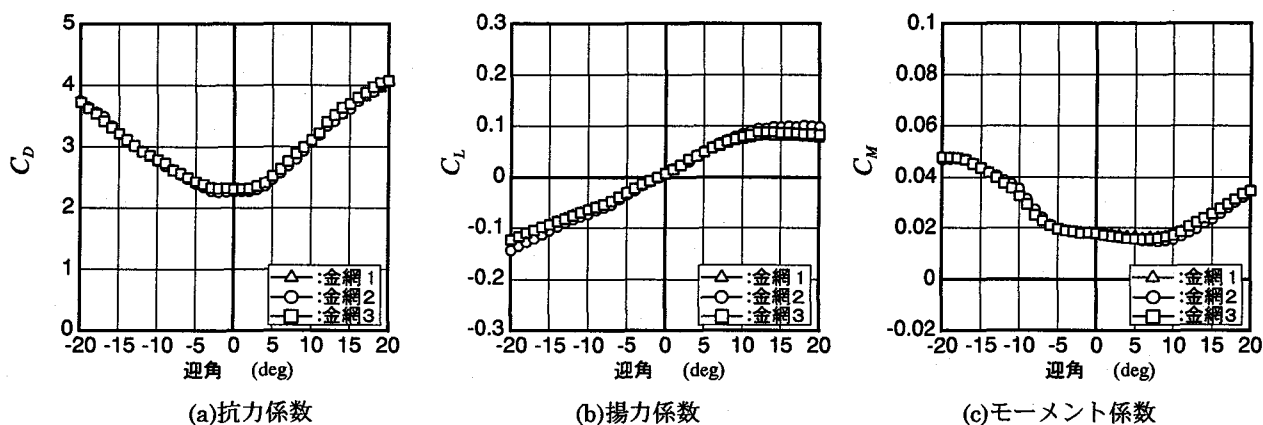


図-6 金網のメッシュ形状と三分力係数の関係

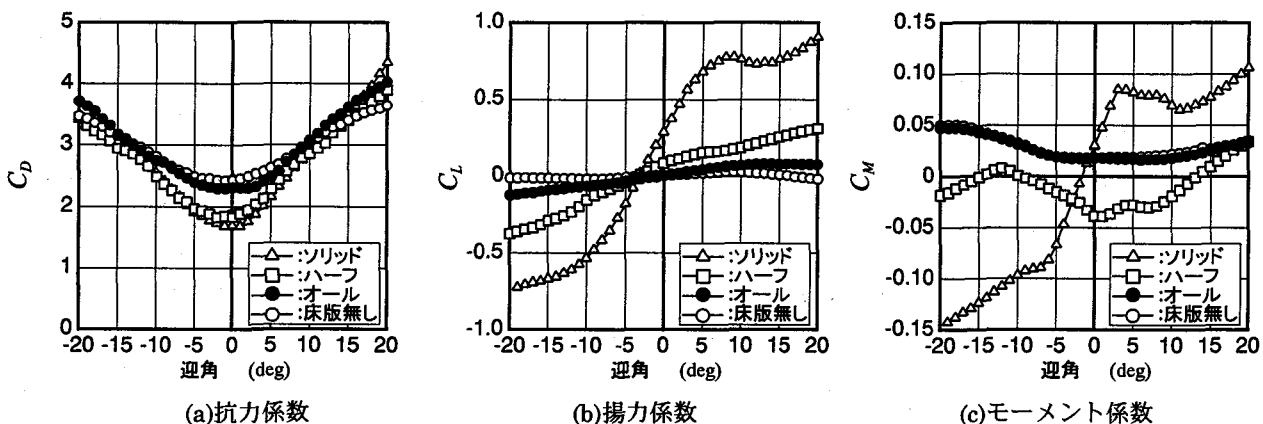


図-7 床版タイプと三分力係数の関係

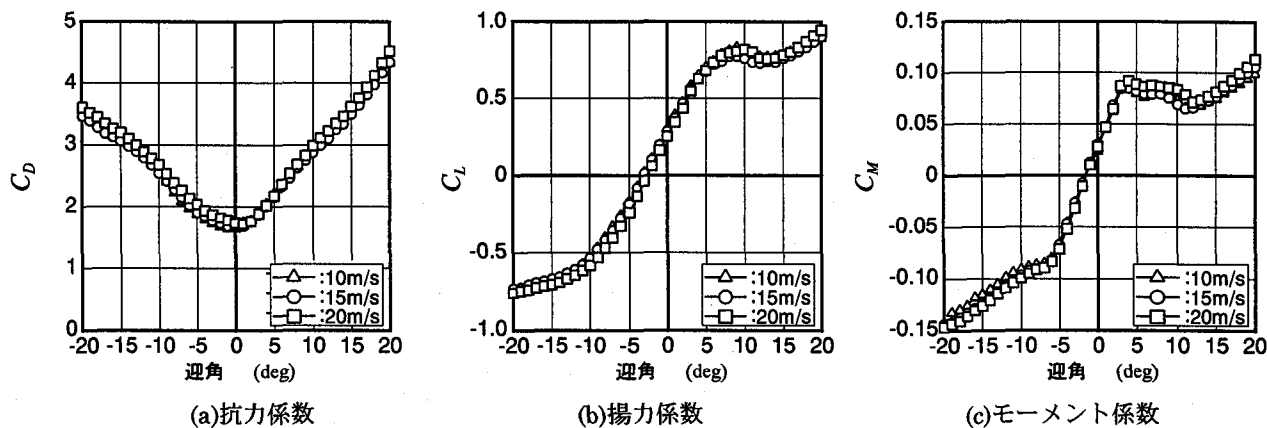


図-8 全面ソリッド床版の三分力係数の風速依存性

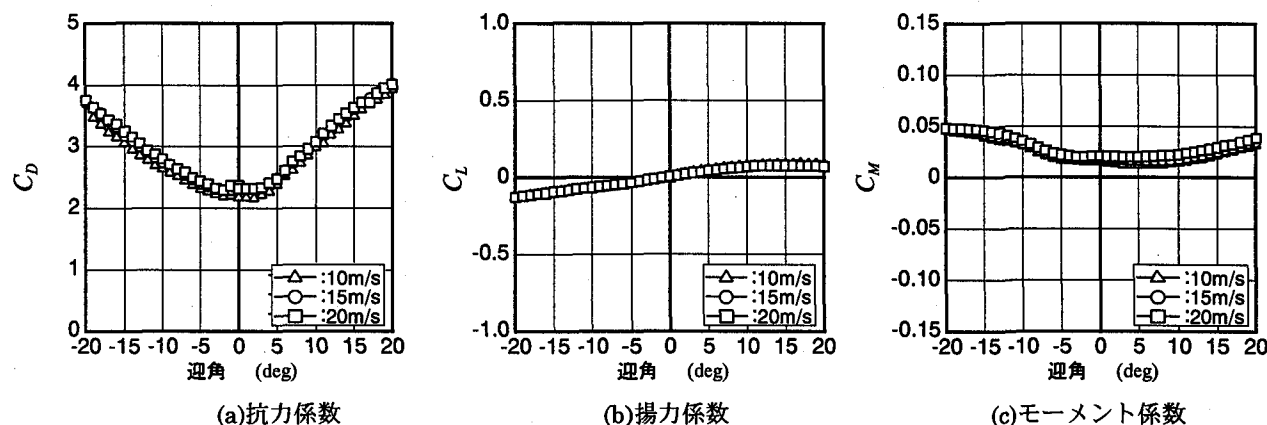


図-9 オールグレーチング床版の三分力係数の風速依存性

また、空気力係数の風速依存性について調べた結果を図-8、9に示す。図-8はCase1の全面ソリッド、図-9はCase3のオールグレーチングの結果で、両ケースとも風洞風速は10m/s、15m/s、20m/sの3種類としている。いずれの床版の場合も実験した風速範囲では三分力係数の差は小さいことがわかる。

3.3 振動試験

静的空気力測定で用いた橋桁断面模型を撓みと振れの2自由度でばね支持し、表-3に示した各床版タイプでの風速と応答の関係を調べた。床版タイプは、表-3のCase1～3の全面ソリッド、ハーフグレーチング、オールグレーチング、およびCase6の床版を設置しない場合とし、橋桁の迎角 α を -3° （頭下げ）、 0° 、 $+3^\circ$ （頭上げ）と3種類変えて実験を行った。高迎角に関しての検討も必要かと思われるが、ここでは基礎的な特性を調べるため、この3迎角のみで実験を実施した。また同様の理由で、風速を高めた時の迎角については特に修正を行わずに実験を行った。

それぞれのケースの応答振幅と平均変位を図-10～図-13に示す。各図の振動振幅は、約40秒間の記録時間に

おける最大振幅と最小振幅の平均値を示す。横軸に関しては、一つは風洞風速の値で実橋における風速はその6.1倍となる。もう一つの横軸は無次元風速で、撓み振れそれぞれの固有振動数で無次元化している。また、振りの倍振幅が 2° 以上となる風速をフラッター風速と定義する。

まず、図-10の全面ソリッドの結果について考察を行う。迎角 -3° の場合、風洞風速8.5m/sで連成フラッターが発生した。この風洞風速を実橋での風速値に換算すると51.9m/sとなる。また、迎角 0° の場合は風洞風速8.0m/s（実橋風速48.8m/s）、迎角 $+3^\circ$ の場合は風洞風速4.3m/s（実橋風速26.2m/s）で振れフラッターが発生した。一般に、将来の長大橋プロジェクトにおいて、フラッター発生の目標風速は約80m/sとされているが、その目標風速を満足するには程遠く、大幅な耐風対策が必要になることが確認できる。なお、他の文献値などに比べて、本パイプトラス構造の橋梁の耐風安定性能が著しく劣るのは、橋梁重量を大幅に軽減していることが一つの要因であると考えられる。参考として、3,000m級超長大トラス補剛吊橋を想定した文献2)と比べると、単位長さあたりの橋梁重量が65.22tonf/mに対して27.17tonf/mとなっている。

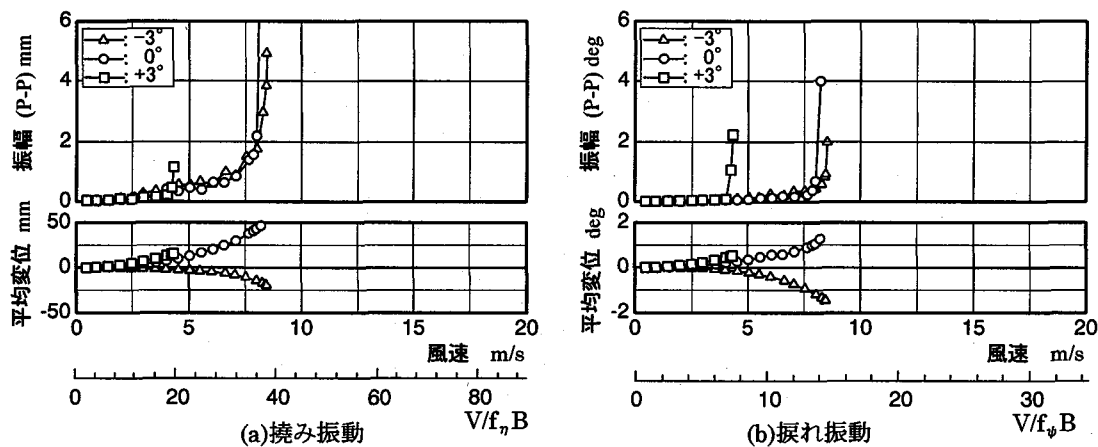


図-10 風速と応答の関係 (全面ソリッド)

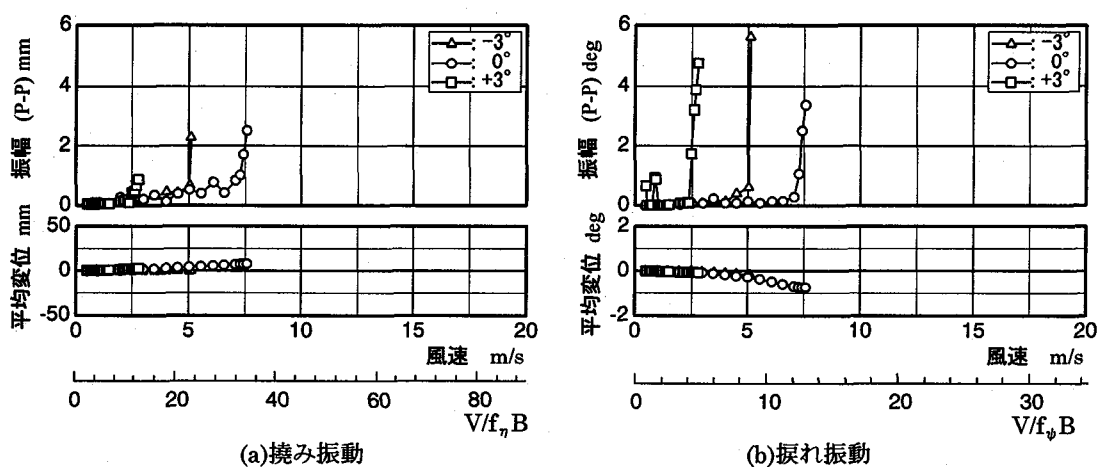


図-11 風速と応答の関係 (ハーフグレーチング)

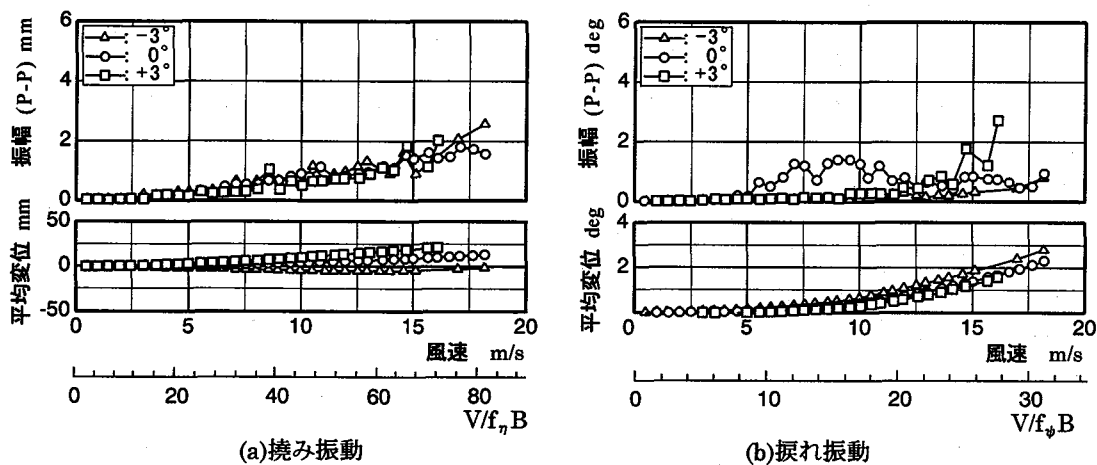
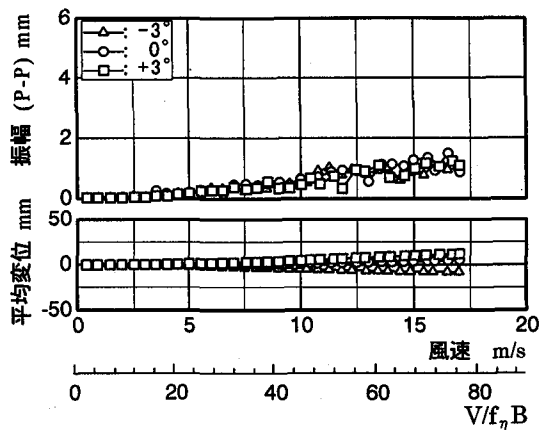
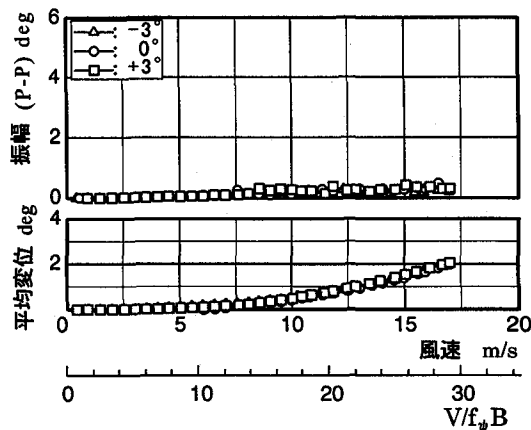


図-12 風速と応答の関係 (オールグレーチング)



(a) 撓み振動



(b) 捩れ振動

図-13 風速と応答の関係 (床版無し)

次に、床版の一部グレーチング化（ハーフグレーチング）による対策を施した図-11の結果について説明する。この場合、 $\alpha = -3^\circ, 0^\circ, +3^\circ$ の迎角において、それぞれ風洞風速 5m/s, 7.3m/s, 2.5m/s と低い風速でいずれも捩れフラッターが発生した。実橋風速に換算すると、それぞれ、30.5m/s, 44.5m/s, 15m/s となり、耐風対策を施さない全面ソリッドの場合よりもさらに安定性能が悪いという結果になる。

続いて、図-12のオールグレーチングの耐風安定性能の結果について説明する。この場合、迎角 $+3^\circ$ の時にのみ風洞風速 16m/s で捩れフラッターの発生が確認された。実橋風速に換算すると風速 97.6m/s にもなり、本研究で目標としている風速 80m/s を十分に満足できる。なお、迎角 0° の場合には、フラッター振動こそ発生していないが、風洞風速 3m/s（実橋風速 18.3m/s）以上の風速で捩れの限定振動の発生が確認された。この限定振動は風洞風速 9m/s（実橋風速 54.9m/s）の時に倍振幅 1.4° の振動になる。捩れの限定振動は、ハーフグレーチングの迎角

$+3^\circ$ のときの低風速時にも発生しているが、図-13の床版無しのケース、図-10の全面ソリッドの場合には発生していない。このことから、グレーチングの存在が振動発生に寄与していると言えるが、この現象の発生メカニズムに関しては不明であり、今後の課題である。

一方、図13に示す床版なしの場合は、実験風速範囲ではフラッターは発生せず高風速で不規則な撓み振動が生じるのみである。

最後に、以上の風洞実験で得られた $V_{cr}-\alpha$ 曲線（フラッターの発現風速と迎角の関係）を図-14にまとめる。図から次のことがわかる。床版の全幅をオープングレーチング化することによりフラッターの発現は抑えられ、ソリッド床版に比べて、耐風安定性が大幅に改善される。しかし、中央部のみにグレーチングを設けたハーフグレーチングの場合では、逆にソリッド床版よりも耐風安定性が低下する。従来の研究では、床版の一部グレーチング化により、耐風安定性能は大幅に改善されるケース^{2),3)}や、逆に耐風安定性が悪化するケース¹⁾が紹介されており、走行面の一部グレーチング化などの対策により耐風安定性能を確保する場合、橋梁構造に応じて適切な配置を行う必要があると言える。今後、一部グレーチング化する時の適切な配置についての検討を行っていく予定である。

4. 結論

本論文は、トラス補剛部材に鋼管を用いたパイプトラス構造にオープングレーチング床版を採用した場合の耐風安定特性を把握することを目的として、中央支間長 2,500m の超長大吊橋を想定した部分模型風洞実験により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) 静的三分力試験の結果、抗力係数以外はグレーチング

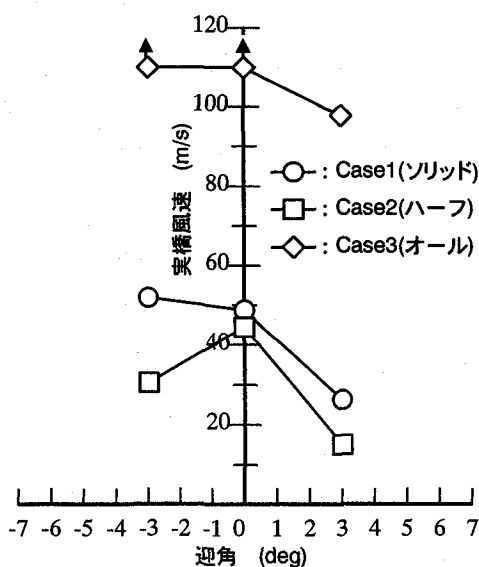


図-14 各床版タイプにおける $V_{cr}-\alpha$ 曲線

による開口部が大きくなる程、空気力係数の値は小さくなる。しかし、抗力係数に関してはその逆の傾向を示し、グレーチングによるオープン化はここで用いた床版配置の場合には、抗力の面で多少の犠牲が要求されることが分かった。

(2) 撓みと振れの 2 自由度ばね支持模型による振動試験の結果、床版全面をソリッドとした場合、 $\alpha = -3^\circ, 0^\circ, +3^\circ$ の迎角において、実橋換算風速でそれぞれ 51.9m/s, 48.8m/s, 26.2m/s でフラッターが発生した。設定目標風速 80m/s に対して本パイプトラス構造の橋梁の耐風安定性能が著しく劣るのは、従来提案されている橋梁に比べて橋梁重量が大幅に軽減されているのが主な原因と考えられ、目標風速を満足するには大幅な耐風対策が必要になる。

(3) 床版の内側のみをグレーチング化したハーフグレーチングでは、各迎角においてソリッドに比べ、フラッター特性が悪化するという結果になった。従来の研究例では、床版の内側車線のみをグレーチング化するのが耐風安定性上、最も効果的であるとされているが、本形式の橋梁では十分な効果が得られず、走行面の一部をグレーチング化する場合、橋梁構造に応じた適切な配置を行う必要がある。

(4) 床版全面をグレーチング化したオールグレーチングの場合は、迎角 $+3^\circ$ の時にのみ風速 98m/s で振りフラッターが発生し、各迎角において目標風速 80m/s を十分に満足できることを確認した。ただし、迎角 0° の時に、風速 18m/s の低風速から広い風速範囲で振れの限定振動の発生も確認された。床版無しのケースや全面ソリッドの場合には発生していないことから、グレーチングの存在が振動発生に寄与していると言える。

以上の検討結果から、2,500m 級超長大吊橋の補剛桁にパイプトラスを採用した軽量構造であっても、床版全面をオープングレーチング化することにより、フラッター特性を大幅に改善できることを示した。また、この様な超長大橋のケースだけでなく支間長 1,000m 程度の中規模吊橋の経済設計もこれからの大きな課題であり、この床

版全面をオープングレーチング化したパイプトラス構造の橋梁は有望な選択技の一つになるものと思われる。ただし、パイプ部材やグレーチングのレイノルズ特性が振動特性に与える影響や、低風速で発生する振り限定振動の発生メカニズムの解明が今後の課題になると思われる。

参考文献

- 1) 山岸, 佐々木, 福井: オープングレーチング床版超長大吊橋の設計検討, 海峡横断, Vol.12, p47-52, 1998
- 2) 米田, 中崎, 片山, 大野, 杉山: 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), 構造工学論文集, Vol.42A, p833-840, 1996
- 3) 神戸市編: マキノ橋の空気動力学的安定性, 調査月報, pp47~53, 1964
- 4) 富岡: オープングレーチングの構造と特性に関する調査報告, 海峡横断, Vol.12, p30-35, 1998
- 5) 山岸, 今野: 長大吊橋の耐風安定性に関するグレーチングの効果とその使用実績, 海峡横断, Vol.8, p13-16, 1997
- 6) 中崎, 片山, 大村, 大野: マキノ吊橋のオープングレーチング, 橋梁と基礎, 98-1, p31-p34, 1998
- 7) 米田, 大野, 田巻, 木村, 宮地: 走行路面部にオープングレーチング化を施した超長大箱桁形式吊橋の耐風安定性に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.44A, p917-928, 1998
- 8) T. Miyata: Comprehensive Discussions on Aero-elastic-coupled Flutter Control for Very Long Span Suspension Bridges, Long-Span Bridges and Aerodynamics, pp181-200, 1998
- 9) 本州四国連絡橋公団編: 本州四国連絡橋・風洞実験要領, 1980
- 10) 岡内, 伊藤, 宮田: 耐風構造, 丸善株式会社, p126, 1977
- 11) 松本, 大東, 陳, 市川, 平川, 武内: 長大斜張橋端 2 主桁基本断面の空力特性, 第 15 回風工学シンポジウム論文集, p395-400, 1998

(1999年9月17日受付)