

水平偏角をつけたマルチストランドケーブルの 空力特性およびヘリカルストランドの効果

田中英之¹・久保喜延²・木村吉郎³・山口栄輝³・及川孝一⁴

¹学生会員 工修 九州工業大学大学院 工学研究科設計生産工学専攻 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町 1-1)

²正会員 工博 九州工業大学教授 工学部建設社会工学科 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町 1-1)

³正会員 Ph.D. 九州工業大学助教授 工学部建設社会工学科 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町 1-1)

⁴正会員 株式会社エスイー 技術営業第一部 (〒160-0023 東京都新宿区西新宿 6-3-1)

斜張橋用ケーブルとして、軸直角方向の風に対しては振動が発生しにくく、経済性に優れているマルチストランドケーブルが提案されている。実際の斜張橋ケーブルには、偏角を持つ風が作用するため、本論文では、そうした状態におけるマルチストランドケーブルの空力特性を明らかにすることを目的としている。風洞実験の結果、水平偏角をつけた場合、円断面ケーブルに比べ、マルチストランドケーブルの方が不安定となることがわかった。ヘリカルストランドを設置した場合には、円断面ケーブルでは変動揚力が小さくなることと模型変位に対する位相が変化することによって制振されるのに対し、マルチストランドケーブルでは、スパンの広い範囲にわたって位相が逆転して減衰力が作用し、より制振力が高いことがわかった。また、こうした空力特性と軸方向流の関連の可能性について考察した。

Key Words: multi-strand cable, helical strand, horizontal skew angle, aerodynamic stabilization, wind tunnel test

1. はじめに

近年の斜張橋では、耐久性向上のため、束ねられたケーブル素線の外側をポリエチレンなどで被覆した、滑らかな円形断面を持つケーブルが用いられることが多い。しかし、円形断面の斜張橋用ケーブルでは、大振幅の渦励振やレインバイブレーションなどの空力弾性振動が発生することが報告されており^{1), 2)}、その制振対策が検討されている。

著者らは耐風制振効果が高く、さらに同一径のストランドを多用しているために経済性を見込めるマルチストランドケーブルを提案し、直交する流れに対する風洞実験を行って、その空力特性を明らかにした³⁾。

実際の斜張橋用ケーブルではケーブルに対して偏角をもった流れが作用するため、その影響から、降雨時のレインバイブレーションの他、降雨を伴わない場合でも特定の風速域において振動の発生が確認されている。降雨を伴わない場合に水平偏角をもった風が作用して発生する風速限定型振動の原因としては、模型背面の軸方向流の影響⁴⁾などが挙げられている。しかし著者らが文献³⁾で提案したマルチストランドケーブルについては、偏角

を持った風に対する空力特性は今まで検討されていない。

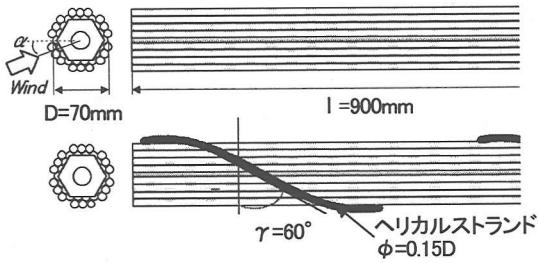
そこで本研究では、マルチストランドケーブル模型(以下、ストランド模型)に水平偏角を与えた状態で風洞実験を行い、その応答特性を明らかにすることを目的とした。ケーブルに対して直交する風の下では、螺旋状に巻き付けられたヘリカルストランドがマルチストランドケーブルの制振に有効に作用することが明らかにされている⁵⁾。そこで、ケーブルに対して偏角をもった風の場合でも、ケーブルの制振にヘリカルストランドが有効であるかどうかを検討した。

さらに、空力弾性振動のメカニズムの把握を目的とし、円柱模型を比較対象としながら、マルチストランドケーブル表面の圧力分布から、作用する励振力もしくは減衰力と応答特性との関連について検討した。また、ヘリカルストランドが流れ場に及ぼす影響についても考察した。

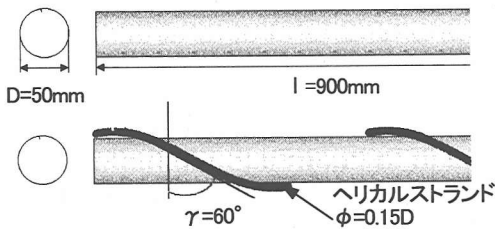
2. 風洞実験概要

(1) 上下1自由度応答実験

実験は九州工業大学所有の空力弾性試験用風洞(ゲッ



(a) スtrand模型(スtrand径:10mm)



(b) 円柱模型
図-1 模型形状

チンゲン型：測定断面 1780mm×910mm) を使用し、一様流中で行った。

供試模型には、既往の研究³⁾において、水平偏角 $\beta=0^\circ$ での空力特性が比較的良好であった断面を用いた。この断面は図-1(a)に示すように六角形の頂点にあたるスrandを取り除いた形状をしたもので、外周に螺旋状にヘリカルスrandを巻きつける場合には、その設置角度 γ を図-1 のように $\gamma=60^\circ$ とした。模型は上下1自由度運動をするように水平面に支持し、図-2 のように、風向に対して水平偏角 β をつけ、 $\beta=10^\circ \sim 35^\circ$ の状態で設置した。模型が貫通するために端板に窓を設けたが、その大きさは模型の自由振動の妨げにならない程度とした。また比較のため、同様の条件で図-1(b)の円柱模型についても上下1自由度応答実験を行った。各模型諸元を表-1に示す。なお、スクルートン数は実ケーブルよりも1桁小さい値とし、模型が振動しやすい状態で実験を行った。

(2) 表面圧力測定実験

実験は、境界層型風洞縮流部(測定断面：1800×1100)を用いて、一様流中で行った。実験は静止時および強制加振時において模型表面に設けた圧力孔に作用する変動圧力を測定した。強制加振時の加振振幅は $2A/D=0.2$ 、加振振動数 $f=3.0\text{Hz}$ の上下1自由度振動状態で行った。模型が貫通する端板の窓は上下1自由度振動実験と同様と

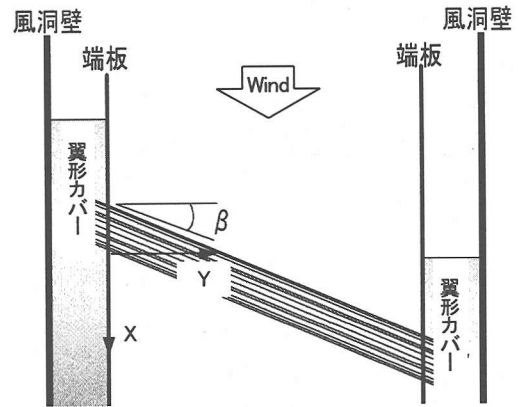


図-2 模型設置状態(平面図)

表-1 模型諸元

	スrand	円柱
代表長:D(m)	0.07	0.05
長さ:l(m)	0.90	0.90
質量:m(kg/m)	0.42~0.45	0.50~0.52
固有振動数:f(Hz)	3.5~3.6	3.0
構造減衰率: δ_s	0.0026~0.0030	0.0015
スクルートン数: S_c	3.9~4.4	4.9~5.1

した。

図-3(a), (b)に実験に用いた圧力模型の諸元を示す。圧力模型は、いずれもスrand方向に直径 1mm の圧力孔が 20mm ピッチで計 33 点配置されており、模型を回転させて測定を繰り返すことにより、模型の周方向の圧力分布を求めた。また、模型の周方向の圧力を同時に測定するため、模型中央部断面には図-3(a), (b)の上部に示すように圧力孔を配置した。これらの圧力測定孔は、模型内に埋め込まれた導圧チューブを介して、差圧センサ(Scanivalve社製 ZOC 17/8Px)に接続されている。圧力測定装置の周波数伝達特性を図-4に示す。圧力データの測定値は、この特性曲線を用いて補正した。また測定を行ったレイノルズ数範囲は応答実験において振動が発生していた $4.0 \times 10^4 \leq \text{Re} \leq 9.0 \times 10^4$ とした。

(3) 可視化実験

ケーブル模型に偏角を与えた際に発生する軸方向流の確認のため、流動パラフィンを用いたスモークワイヤ一法で可視化実験を行なった。実験には可視化実験用小型風洞(測定断面 400mm×400mm)を使用した。風洞風速は $V=1.0\text{m/s}$ で一定とし、模型は静止させた状態とした。供試模型は応答実験で用いたものの1/5のサイズとし、光源からの光が通過するようにアクリル製のものを使用した。

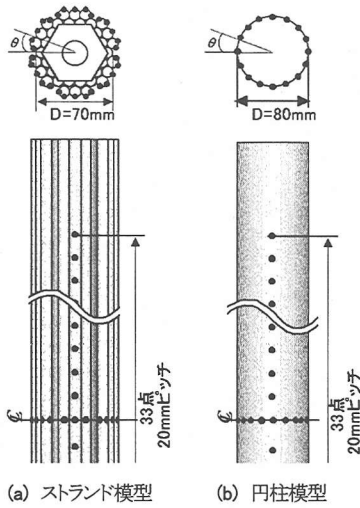


図-3 圧力模型概要

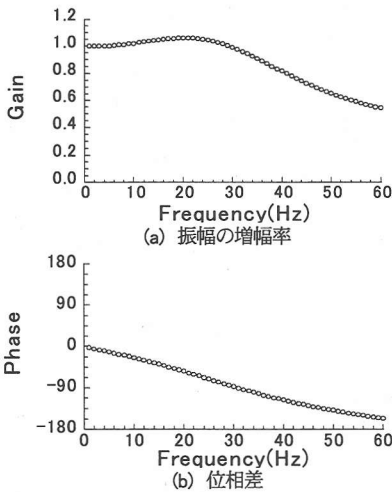


図-4 圧力測定装置の周波数伝達特性

3. 実験結果

(1) 応答特性

図-5に迎角 $\alpha=0^\circ$ について、ストランド模型にヘリカルストランドを設置していない場合と $\gamma=60^\circ$ で設置した場合の応答図をそれぞれ示す。なお、他の $\alpha=10^\circ \sim 30^\circ$ の迎角の応答は迎角 $\alpha=0^\circ$ の場合と同様の傾向を示していたため、本論文では $\alpha=0^\circ$ の場合について示すこととする。

図-5(a)に示すように、ヘリカルストランドを設置していない場合、偏角 $\beta=0^\circ$ では換算風速 $V_r=8$ 付近で無次元倍振幅 $2A/D=0.6$ 程度の渦励振が発生しているが、偏角 $\beta=10^\circ \sim 20^\circ$ では渦励振は発生していない。しかし、偏角が $\beta=25^\circ \sim 35^\circ$ とさらに大きくなった場合には、渦励振が発生している。また偏角 $\beta=20^\circ \sim 35^\circ$ の範囲

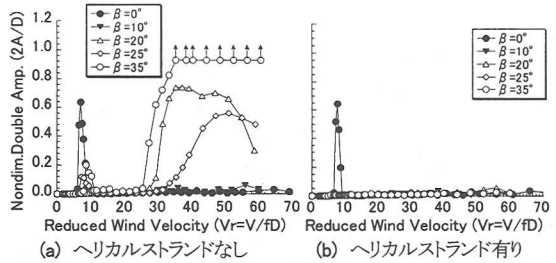


図-5 ストランド模型の応答

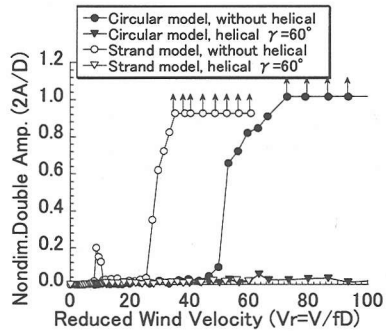


図-6 各模型の応答の比較(偏角 $\beta=35^\circ$)

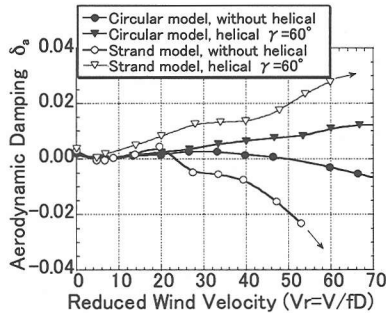
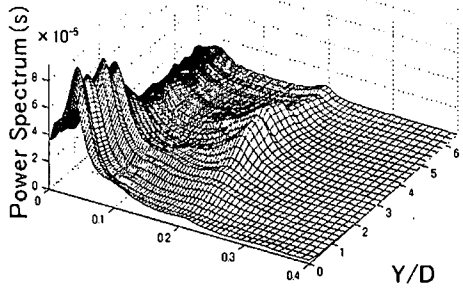


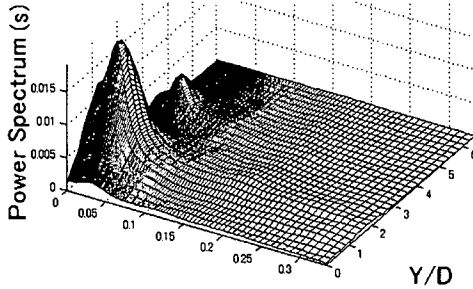
図-7 各模型の空力減衰率の比較(偏角 $\beta=35^\circ$, $2A/D=0.4$)

では換算風速 $V_r=25$ 以上で振動が発生している。特に偏角 $\beta=35^\circ$ では発散振動が発生しており、偏角 β の増加によって空力的に不安定になっている。それに対して、図-5(b)に示すように、ヘリカルストランドを $\gamma=60^\circ$ で設置した場合でも、偏角 $\beta=0^\circ$ では $2A/D=0.6$ 程度の渦励振が発生している。しかし、図-5(a)において偏角 $\beta \geq 20^\circ$ で発生していた振動はヘリカルストランドの設置により完全に抑制されている。

発散振動が発生した偏角 $\beta=35^\circ$ でのストランド模型と円柱模型の応答と空力減衰率を比較したものを図-6、図-7に示す。ヘリカルストランドを設置していない場合では、発振換算風速は円柱模型で $V_r=45$ 付近、ストランド模型では $V_r=25$ 付近であった(図-6)。また図-7に示すように、ストランド模型の発散率は円柱模型に比べて高風速域でかなり大きくなっている。このように、偏角がついた場合のストランドケーブルは空力的に非常に不安

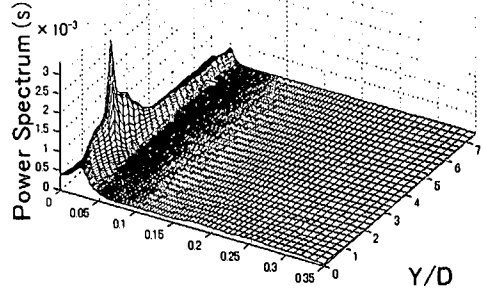


(a) 静止時 ($V=8.0\text{m/s}$)

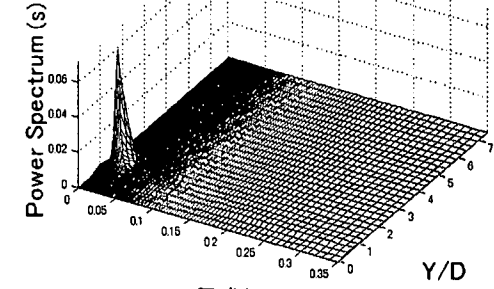


(b) 加振時 ($Vr=40.0$)

図-8 円柱模型の圧力変動のワースペクトル (ヘリカルストランドなし, 偏角 $\beta=35^\circ$, $\theta=135^\circ$)



(a) 静止時 ($V=8.0\text{m/s}$)



(b) 加振時 ($Vr=40.0$)

図-9 ストランド模型の圧力変動のワースペクトル (ヘリカルストランドなし, 偏角 $\beta=35^\circ$, $\theta=150^\circ$)

定である。一方ヘリカルストランドを設置した場合は、ストランド模型、円柱模型ともに高風速域でも空力減衰率が正のままとなっている。また、ヘリカルストランドを設置したストランド模型においては、空力正減衰の値がヘリカルストランドを設置した円柱模型よりも大きくなっており、ヘリカルストランド設置により減衰率が正となる効果は、ストランド模型における方が円柱模型においてよりも大きいことがわかる。

(2) スパン方向変動圧力の分布

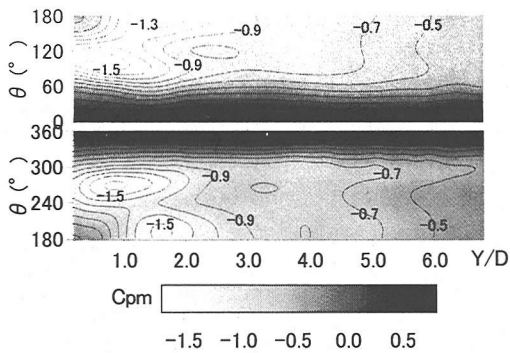
模型に作用する圧力変動の模型スパン方向全域の分布を見るため、ワースペクトルをスパン方向位置 Y/D (模型中央からスパン方向の上流側へ 320mm の位置が原点) と無次元周波数 fD/V を軸として図-8、図-9 に示す。図-8 には円柱模型の静止時と加振時の測定結果をそれぞれ示す。なお、スパン方向の圧力孔の位置は既往の研究⁹⁾との対応を見るため、 $\alpha=0^\circ$ での淀み点から $\theta=135^\circ$ の位置に設定した。

円柱模型静止時(図-8(a))には、模型スパン方向にわたって $fD/V=0.027$ 付近の低周波数成分が現われている。この低周波数成分は、 $\beta=0^\circ$ ではみられないものである。水平偏角をつけた場合では図-8(a) ($\beta=35^\circ$) をみてもわかるように、特に模型のスパン上流域 ($Y/D \leq 2$; 水平偏角のため、スパン方向でみた場合、この部分が模型の上流側となる) で、この低周波数成分のピークが強く現われてい

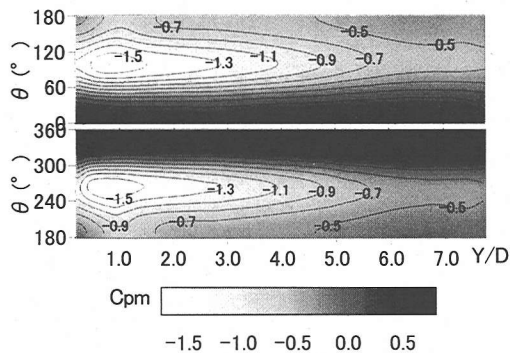
る。また $Y/D \geq 2$ では、ストローハル数 $St=0.2$ のカルマン渦による変動圧力のピークも確認できる。加振時には、実験を行った $Vr=40 \sim 70$ のどの換算風速でも、図-8(b) のように加振成分の周波数域でピークが現われている。このピークは模型上流域で特に強く卓越しており、静止時の結果との対応が見られる。この結果は、松本ら⁹⁾による傾斜円柱の圧力特性と同じ傾向を示している。

図-9 にストランド模型の静止時と加振時の測定結果を迎角 $\alpha=0^\circ$ についてそれぞれ示す。スパン方向の圧力孔の位置は円柱模型のケース(図-8)に近い $\theta=150^\circ$ の位置とした。

静止時(図-9(a))には、 $fD/V=0.03$ 程度の低周波数成分のピークが模型スパン方向全域にわたり、円柱模型の場合よりも明確に確認できる。特に模型上流域の $Y/D=1.5$ 付近においては顕著である。加振時(図-9(b))については、実験を行った $Vr=40 \sim 70$ のすべての換算風速域で、加振成分のピークが模型上流側で発生している。静止時、加振時とも円柱模型の場合と同じく模型上流域 ($Y/D \leq 2$) において低周波の加振成分が顕著に卓越しているが、その圧力変動のワースペクトルの値はストランド模型の場合の方が大きくなっている。また、静止時における円柱模型の場合に模型下流域で生じていたカルマン渦によるピークは、ストランド模型においては確認できない。水平偏角をつけていない $\beta=0^\circ$ のストランド模型の場合ではストローハル成分の卓越したピークのみが確認でき



(a) 円柱模型(上図:模型上面, 下図:模型下面)



(b) ストランド模型(上図:模型上面, 下図:模型下面)

図-10 ヘリカルストランドなしの場合の圧力分布 C_p
($\beta=35^\circ$, $V_r=70$)

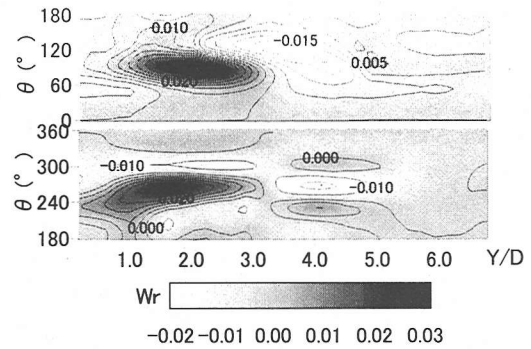
たこと、ならびに偏角をつけた円柱模型でも低周波成分が卓越する上流域ではストローハル成分のピークがみられないことを考慮すると、水平偏角をつけたストランド模型においては、スパン方向全域にわたって低周波成分が強く現われているためにストローハル成分が見られない可能性が考えられる。

(3) 圧力及び仕事の分布

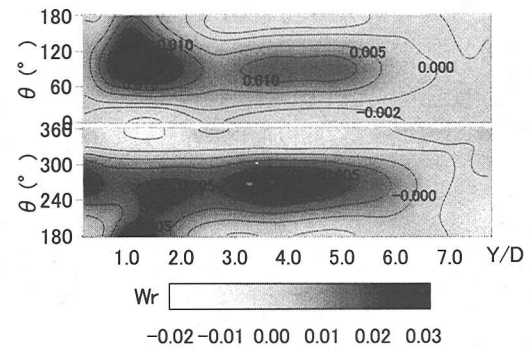
ヘリカルストランドを設置していない状態の円柱模型とストランド模型(いずれも $\beta=35^\circ$, $V_r=70$)について、圧力分布を平均圧力係数 C_{pm} として図-10に示す。なお、応答実験において迎角による違いが少なかったため、圧力測定は $\alpha=0^\circ$ の場合のみ行った。

図-10(a)の円柱模型では、模型の上流域の模型上面($\theta=90^\circ$)と下面($\theta=270^\circ$)付近及び、模型背面($\theta=180^\circ$)で特に圧力が低い値を示している。それに対して、ストランド模型の場合(図-10(b))では、圧力が低い値を示している範囲が円柱模型のように局所的ではなく、 $\theta=100^\circ$ と 260° において $Y/D=1.0$ 付近の上流域を中心としてスパン方向に広がる傾向がある。

模型に作用している励振力について検討するため、図-11に、非定常圧力が振動1周期中に模型になす無次元



(a) 円柱模型(上図:模型上面, 下図:模型下面)



(b) ストランド模型(上図:模型上面, 下図:模型下面)

図-11 ヘリカルストランドなしの場合の無次元仕事 W_r
($\beta=35^\circ$, $V_r=70$)

仕事の分布を示す。無次元仕事 W_r は次式により算出された。

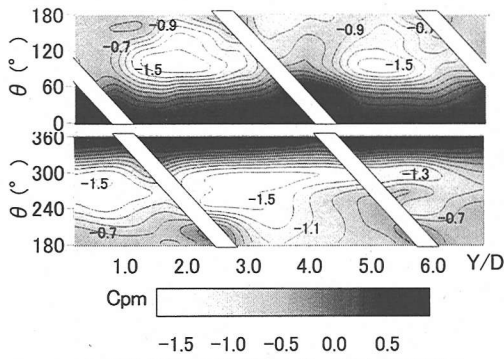
$$W_r = \pi \cdot C_{pf} \left(\frac{A}{D} \right) \sin \theta \cdot \sin \phi \quad (1)$$

ここで、 C_{pf} : 非定常圧力係数(rms で表す)、 A : 加振振幅、 D : 模型代表長、 θ : 淀み点からの角度、 ϕ : 模型が最上点に達したときの正圧ピークの遅れを正とした位相差

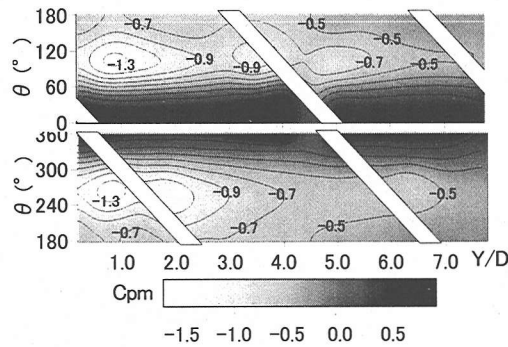
円柱模型の場合(図-11(a))、模型上流の $Y/D=1.0 \sim 3.0$ の範囲で模型に大きな励振力が働いていることが確認できる。それに対して、ストランド模型の場合(図-11(b))では、 $Y/D=0.0 \sim 6.0$ の広い範囲にわたり励振力が作用している。

上記の分布を積分して求めた模型のスパン方向単位長さあたりに作用する無次元仕事 W_p についてみると、円柱模型の場合では $W_p=0.55$ であるが、模型スパン方向全域に励振力の作用しているストランド模型では $W_p=1.27$ と円柱模型の2倍以上の励振力が働いている。これは、円柱模型に比べ、ストランド模型の方が空力的に不安定となっていることを示しており、応答実験の結果と整合する。

以上の結果から、ヘリカルストランドを設置していな

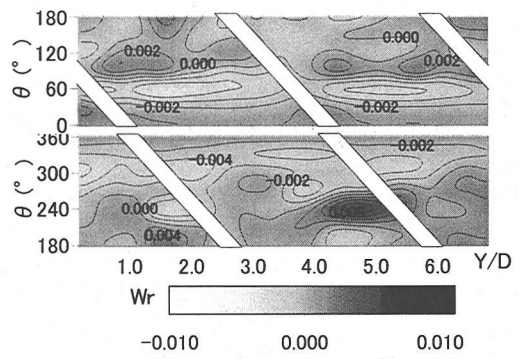


(a) 円柱模型(上図:模型上面, 下図:模型下面)

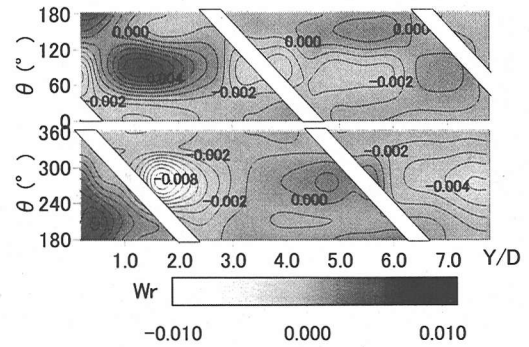


(b) ストランド模型(上図:模型上面, 下図:模型下面)

図-12 ヘリカルストランド設置時の圧力分布 C_p
($\beta=35^\circ$, $V_r=70$)



(a) 円柱模型(上図:模型上面, 下図:模型下面)



(b) ストランド模型(上図:模型上面, 下図:模型下面)

図-13 ヘリカルストランド設置時の無次元仕事 W_r
($\beta=35^\circ$, $V_r=70$)

い場合、円柱模型では模型上流域のみにおいて励振力が強く作用するのに対し、ストランド模型では、模型全体に励振力が作用する。これが応答実験において空力安定性の差を生じさせている1つの要因と考えられる。

なお、図-10および図-11においては、上下対称な模型に対する分布を示しているのので、結果は上下対称となることが期待されるが、特に W_r の分布において多少の誤差がみられる。模型の製作精度などが、圧力の位相差などに微妙な影響を及ぼしたためと推察されるが、詳細な原因は明らかではない。

(4) ヘリカルストランド設置による圧力及び仕事の分布の変化

図-12 にヘリカルストランドを設置した状態の円柱模型とストランド模型(いずれも $\beta=35^\circ$, $V_r=70$)について、その圧力分布を平均圧力係数 C_p として示す。模型の上下で流れに対するヘリカルストランドの相対的な巻き角が異なるため、模型の上面と下面での圧力分布は異なったものとなる。

円柱模型の場合(図-12(a))では、ヘリカルストランドの設置によって、設置前(図-10(a))に比べて圧力の分布に顕著な違いが認められる。すなわち圧力の低い箇所が

ヘリカルストランド設置位置の間に存在し、圧力の低い部分が模型スパン方向全体にわたって存在することとなる。

ストランド模型の場合(図-12(b))、ヘリカルストランドの設置による影響は円柱模型の場合と比べて少なく、ヘリカルストランドを設置していない場合(図-10(b))と比較しても、ヘリカルストランド設置後の圧力分布には大きな変化はなく、模型スパン方向の上流域の $Y/D=1.0$ 付近を中心として圧力の低い部分がスパン方向に拡がって存在する。この原因として、ストランド間の溝が空気の通り道の役割を果たし、ヘリカルストランド近傍においてもスパン方向で流れの連続性が保たれている可能性が考えられるが、詳細については検討していく必要がある。

次に、模型に作用している励振力について検討する。図-13 に、非定常圧力が振動1周期中に、ヘリカルストランド設置時の模型になす無次元仕事 W_r を示す。

円柱模型にヘリカルストランドを設置した場合(図-13(a))では、設置しない場合に図-11(a)で見られた模型上流域($Y/D=1.0\sim 3.0$)に作用していた励振力は全く見られない。それに対し、ストランド模型にヘリカルストランドを設置した場合(図-13(b))、模型上面の上流域

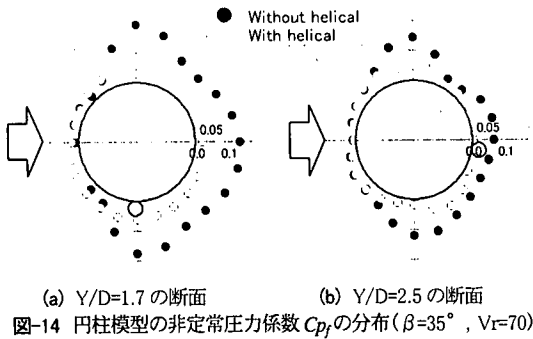


図-14 円柱模型の非定常圧力係数 C_{p_f} の分布 ($\beta=35^\circ$, $V_r=70$)

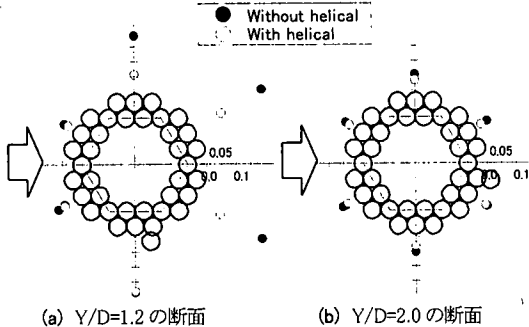


図-15 スtrand模型の非定常圧力係数 C_{p_f} の分布 ($\beta=35^\circ$, $V_r=70$)

($Y/D=1.0\sim 2.0$)で励振力が働き、模型下面の上流域 ($Y/D=1.0\sim 2.0$)では逆に減衰力が作用している。

ヘリカルストランドを設置した場合にstrand模型に作用するspan方向の単位長さあたりの無次元仕事 W_p は $W_p=-0.55$ であり、円柱模型に設置した場合の $W_p=-0.39$ に比べると低い値をとっており、空力的に安定な値をとっている。この結果は応答実験の結果に対応している。以上、圧力測定の結果からも、ヘリカルストランドの設置によって空力的に安定化されることが確認された。またヘリカルストランドの影響は、円柱模型とstrand模型では、特性が異なっていることが明らかとなった。

(5) 断面周りの圧力及び仕事の分布に基づくヘリカルストランドの影響に関する考察

各模型について、圧力が低い値を示した模型下面および模型背面付近にヘリカルストランドが位置する断面に注目し、その断面周りでの非定常圧力係数 C_{p_f} の分布を図-14、図-15に示す。

円柱模型の場合(図-14)、ヘリカルストランドを設置していないと非定常圧力は模型の上下面、模型背面で比較的大きい。しかし、ヘリカルストランドが設置された場合では、模型周囲の非定常圧力は小さい値となる。特に、図-14(b)に示すように模型背面にヘリカルストランドが位置する断面でも、模型背面だけでなく、模型の上下面

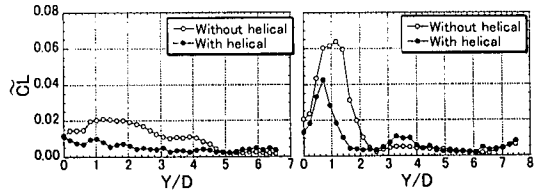


図-16 変動揚力係数 ($\beta=35^\circ$, $V_r=70$)

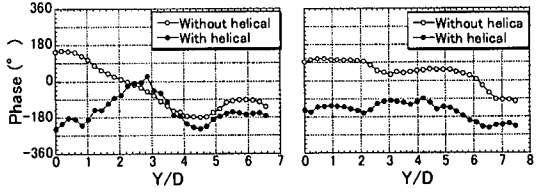


図-17 揚力の変位に対する位相差 ($\beta=35^\circ$, $V_r=70$)

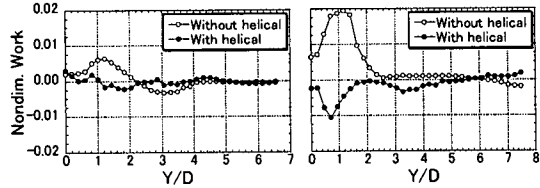


図-18 揚力による仕事 ($\beta=35^\circ$, $V_r=70$)

で非定常圧力が低下している。

それに対して、strand模型にヘリカルストランドを設置した場合(図-15)、 $Y/D=1.2$ の断面ではヘリカルストランドの効果が模型後方で見られ、非定常圧力が低下している。しかし、 $Y/D=2.0$ の断面では図-15(b)に示すように、非定常圧力の低下は円柱模型の場合に比べると、全体的にわずかである。

次に、各断面で周方向積分して変動揚力を求め、その模型変位に対する位相差と無次元仕事を算出した。図-16～図-18にそれぞれ示す。

図-16(a)より、円柱模型にヘリカルストランドを設置した場合は、変動揚力は全体的に小さくなっており、特に模型上流域でその影響が著しい。一方、strand模型にヘリカルストランドを設置した場合は、図-16(b)のように、ヘリカルストランドの設置によって模型上流域において変動揚力は小さくなっているが、その程度は円柱模型ほどではなく、下流域に比べると上流域に作用する変動揚力は依然として大きな値を示している。

円柱の模型変位に対する位相差(図-17(a))については、ヘリカルストランドを設置していない場合、 Y/D が大きくなるに従って位相は徐々に遅れており、模型上流域では励振力が、下流域では減衰力が作用している(図-18(a))。しかし、ヘリカルストランドを設置した場合は、模型上流域で位相が逆転しており、減衰力が作用している(図-18(a))。それに対して、strand模型の位相差(図

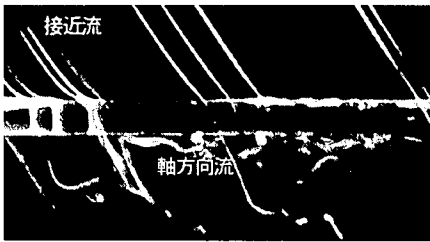


図-19 円柱模型の可視化映像 ($\beta=35^\circ$, $V=1.0\text{m/s}$)

-17(b))は、ヘリカルストランドを設置していない場合でも、ヘリカルストランドを設置した場合でも、スパン方向で位相差はあまり大きくなく、ほぼ一定の値を示している。そのため、図-18(b)に示すように、ヘリカルストランドを設置していない場合では、スパン方向全体にわたって励振力が模型に作用している。しかし、ヘリカルストランド設置時には、位相が遅れるため、スパン方向全体にわたって減衰力が作用している。

以上より円柱模型では、ヘリカルストランドを設置した場合、非定常圧力が低下し、模型上流域の位相が遅れるという2つの影響により、励振力が小さくなり空力的に安定する。一方、ストランド模型にヘリカルストランドを設置した場合では、非定常圧力を低下させる効果は小さいが、広い範囲で位相の正負が逆転する。そのため、ヘリカルストランド設置前に広い範囲にわたって励振力として作用していた非定常圧力が、ヘリカルストランド設置時には広い範囲で減衰力として作用し安定化したものと考えられる。以上のような理由から、3.(1)で述べたように、ストランド模型は円柱模型より安定化したものと考えられる。

4. 流れ場が空気力特性に及ぼす影響に関する考察

図-19に、円柱模型を上面から見た可視化写真を示す。写真左側の模型上流域で模型背面にスパン方向に沿った渦の発生が見られる。また、右側の模型下流域では、明らかな渦の発生は認められないが、軸方向の流れに剥離した流れが巻き込んだ後、軸方向流と一体となって下流方向に流れていく様子が確認された。松本らによれば、この模型背面の軸方向流が斜風作用時にケーブルに振動が発生する要因であるとされている^(4),5)。本研究で行った圧力測定実験は、この軸方向流の存在を直接確認するものではないが、軸方向流が流れ場ならびに空気力に及ぼす影響について既往の文献において指摘されていることを考慮すると、総合的に説明できうる結果も得られている。そこで以下に軸方向流の影響の可能性も含めた現象の考察を行う。

風向に対して斜めに配置されたケーブルにおいては、

ケーブル背面に生成する軸方向流の影響により、低周波成分の渦放出が生じ、また、カルマン渦の形成が妨げられるという指摘がある⁶⁾。図-8、図-9で示した模型背面における変動圧力のスペクトルはこの指摘と整合するものであり、もし、低周波成分の卓越したピークが軸方向流の影響により生成していると考えれば、円柱模型に比べ、ストランド模型ではスパン方向全体にわたって軸方向流の影響を受けていると推測できる。この軸方向流の影響によって、図-11に示したように、模型上流域でのみ強い励振力が作用していた円柱模型に比べ、ストランド模型では広い範囲で励振力が作用している可能性がある。

また、軸方向流の存在によって、円柱模型からの2つの剥離せん断流れの相互干渉が阻害され、模型の上下面で著しい圧力低下をもたらされることにより振動が励起されるという報告がある^{2),7)}。これに基づくと、円柱模型にヘリカルストランドを設置することによって模型上流域で揚力が作用しなくなった原因として、模型背面の軸方向流の発生がヘリカルストランドによって乱された可能性が考えられる。それに対して、ストランド模型にヘリカルストランドを設置した場合では、ストランド間の溝が完全に塞がれていないため、円柱模型に比べてその効果が小さかったと考えられる。同様の理由で、ストランド模型では変位に対する位相の差がスパン方向でほぼ一定であると考えられる。また、ヘリカルストランドを設置した場合に位相の逆転が生じている範囲は、ヘリカルストランドがない場合に軸方向流の影響が大きい範囲である。この軸方向流の影響が大きいと、ヘリカルストランドを設置した場合、接近流方向の流れと軸方向流に加え、ヘリカルストランドに沿った流れが生じる。このヘリカルストランドに沿った流れによって位相の逆転が生じていると推察する。

このような影響から3.(5)で述べたように、各模型にヘリカルストランドを設置した際の減衰力の大きさに差が出たと推測できる。

5. まとめ

提案されているマルチストランド方式のケーブルに対し、水平偏角を持たせた状態で風洞実験を行い、その空力特性について円柱模型と比較、検討した。また、ヘリカルストランドの影響についても検討した。その結果、以下に示すことが明らかとなった。

- (1) 水平偏角を与えることによって、ストランド模型は空力的に不安定になり、発散力の大きな振動が発生する。また、その空力特性は円柱模型よりも不安定である。

- (2) スtrand模型では、励振力がスパン方向全体に作用している。空力不安定性の1つの原因となっているこうした特性は、軸方向流の影響が模型下流域にまでおよんでいるために生じている可能性がある。
- (3) ヘリカルstrandの設置により、水平偏角を持つ風に対してもstrand模型は振動を生じなくなる。また、ヘリカルstrand設置による減衰付加の効果は、円柱模型よりもstrand模型の場合の方が大きい。
- (4) ヘリカルstrandの効果として、(a)模型に作用する変動揚力を小さくする効果と、(b)模型変位に対する位相を変化させる効果が確認された。円柱模型では(a)の効果によって、励振力が小さくなり、また(b)の効果も伴って空力的安定化される。strand模型の場合では、(a)の効果は比較的小さいが、(b)の効果がスパン方向の広い範囲で生じる。そのため、ヘリカルstrandを設置していない状態で作用していた励振力が、設置時にはスパン方向の広い範囲で減衰力として作用するため、(3)で述べた大きな減衰効果が得られた。

本研究では、圧力測定などにより、水平偏角をつけたマルチstrandケーブルの応答実験結果の特性は、上記のようにある程度明らかにすることができた。しかし、圧力低下などの現象が模型スパン方向の上流域においてみられるということが、実際の斜張橋ケーブルにどのように対応するのか、また、そうした現象の原因は何かといったことに対して、さらに検討していく必要があると考えられる。

また、本研究では、水平偏角を変化させた場合の鉛直振動のみを考慮し、対風応答の基本的特性を明らかにしてきたと考えている。しかし、今後は傾斜角や鉛直と水平方向の連成振動も考慮し、実際の斜張橋ケーブルの状況を広く反映した場合の、より一般的なケースについても

検討していくことが望まれる。

謝辞: 本研究の遂行に際し、実験および結果の整理について、九州工業大学工学部建設社会工学科助手 加藤九州男氏、大学院生 磯部敏靖氏よりの協力を得たことを記し、謝意を表します。

参考文献

- 1) 樋上瑋一: 斜張橋ケーブルの Rain Vibration, 日本風工学会誌, pp.17-28, 1986.
- 2) 松本勝, 白石成人, 北沢正彦, 辻井正人, 平井滋登: 傾斜円柱の空力振動特性—ケーブル Rain Vibration との関連性—, 第11回風工学シンポジウム論文集, pp.139~144, 1988.
- 3) 田中英之, 久保喜延, 山口栄輝, 及川孝一: ヘリカルstrandの有無によるマルチstrandケーブルの空力特性および周辺流れ特性, 土木学会論文集, No.661/ I-53, pp.133~140, 2000.
- 4) 日本鋼構造協会: 構造物の耐風工学, 東京電機大学出版局, 1997.
- 5) 松本勝, 對馬大輔, 佐久間智, 八木知己, 重村好則: 斜張橋ケーブルの振動特性並びに高風速渦励振の発生メカニズムに関する研究, 第15回風工学シンポジウム論文集, pp.527~532, 1998.
- 6) 後藤光理, 松本勝, 八木知己, 對馬大輔: 傾斜ケーブルにおける軸方向渦と高風速渦励振に関する基礎的研究, 土木学会第54回年次学術講演会, pp.740~741, 1999.
- 7) Matsumoto, M., Shiraiishi, N., Kitazawa, M., Knisely, C., Shirato, H., Kim, Y. and Tsujii, M.: Aerodynamic Behavior of Inclined Circular Cylinders-Cable Aerodynamics, International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics and its Applications, pp.63~72, 1988.

(2000. 10. 19 受付)

AEROELASTIC PERFORMANCE OF MULTI-STRAND CABLE WITH HORIZONTAL SKEW ANGLE AND EFFECT OF HELICAL STRAND

Hideyuki TANAKA, Yoshinobu KUBO, Kichiro KIMURA, Eiki YAMAGUCHI and Koichi OIKAWA

The multi-strand cable is proposed because it is economical and it shows good wind-resistant performance under normal wind. In this study, the aeroelastic performance of the multi-strand cable with horizontal skew angle was experimentally investigated, because skew wind usually acts on cables of cable-stayed bridges. In skew wind, the multi-strand cable was less stable than a circular cylinder, partly a due to larger span wise area of exciting aerodynamic force. On the other hand, with application of a helical strand, the multi-strand cable became more stable than a circular cylinder because the damping aerodynamic force acted over most of the area of the span. The effect was caused by changing the sign of the phase between the force displacement and the aerodynamic force. Possible relationship of the axial flow and the observed aerodynamic characteristics are also discussed.