

# ヘリカルストランドの有無による マルチストランドケーブルの空力特性および周辺流れ特性

田中英之<sup>1</sup>・久保喜延<sup>2</sup>・山口栄輝<sup>3</sup>・及川孝一<sup>4</sup>

<sup>1</sup>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)

<sup>2</sup>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)

<sup>3</sup>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)

<sup>4</sup>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)

本論文では、風による振動が問題となっている斜張橋用ケーブルに対して、対風制振効果や経済性が見込まれるマルチストランドケーブルを提案している。本研究の目的は、渦励振等の空力不安定振動を抑制し、風荷重にも低減効果のあるケーブルの開発である。その前段階の研究として風洞実験を行い、マルチストランドケーブルのストランド配置および、そのケーブルに巻きつけたヘリカルストランドの効果について検討を行なった。ヘリカルストランドの効果については、巻き付ける角度やその径を変化させて応答特性や風荷重に及ぼす影響について調査した。また、模型後方の流速を測定することにより、ヘリカルストランドがケーブル周辺の流れに及ぼす影響についても調査を行った。その結果、ヘリカルストランドの対風制振効果が高いことが判明した。

**Key Words:** multi-strand cable, helical strand, aeroelastic vibration, aerodynamic stabilization, flow-behavior

## 1. はじめに

斜張橋用ケーブルでは、耐久性の向上を目的として束ねられたケーブル素線がポリエチレンなどで被覆され、一般に滑らかな円形断面を形成している。しかし、円形断面を有する斜張橋用ケーブルでは、大振幅を伴った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<sup>1)</sup>、その制振対策が問題になってきた。ケーブルの制振対策の1つとしてケーブルの断面形状を変化させることによって作用する外力を減少させ、振動を抑制する空力的制振法がある。空力的制振法の例としては、Uストラップケーブル(弓削大橋)<sup>2)</sup>や平行突起ケーブル(東神戸大橋)<sup>3)</sup>があり、多々羅大橋ではゴルフボールの表面のようなパターン化されたへこみを付けたインデントケーブル<sup>4)</sup>が採用されており、レインバイブレーションに対してその効果が確認されている。また、インデントケーブルのように人工的に粗度を設けることで、風荷重の低減効果もあることが報告されている<sup>5)</sup>。しかし、被覆管の加工には製作性、経済性の面で改善の余地があると考えられ、長大化による橋梁全体の

コストアップを考慮すると、あらゆる面でのコストの削減が必要であり、ケーブルに関しても例外ではない。

そこで、本研究では、同一径のストランドを多用することにより経済性が見込めるマルチストランドケーブルを提案し、その断面形状を工夫することにより空力特性を改善することを考えた。斜張橋への適応を視野に入れ、基礎的研究として一連の風洞実験を行い、その空力特性について検討した。レインバイブレーションに対しては水路の形成を阻害することが制振対策上重要になってくる<sup>6)</sup>が、本報告のマルチストランドケーブルでは、降雨時には水路が固定されるため、レインバイブレーションを抑制できる可能性がある。しかし、その抑制に関しては本報告では未検討である。

また、マルチストランドを束ねる役目をし、剥離の同時性を乱して空力安定性を得ることを目的として、その外周に螺旋状に素線ストランドを巻き付けた場合についての風洞実験も行った。その結果から、螺旋状に巻き付けたストランド(以下、ヘリカルストランド)の空力特性に対する有効性について検討を加えた。

さらに、振動抑制の効果を把握することを目的として、

可視化実験および後流の流速測定を行い、ストランド配置の違い、ヘリカルストランドを巻き付ける角度やその径がケーブル周辺の流況に対して与える影響についても検討を行なった。

## 2. 風洞実験概要

### (1) 使用模型

供試模型は長さ $l=800\text{mm}$ で、その基本断面形状は図-1に示すような代表長 $D=70\text{mm}$ のType Aの模型断面で、最縁ストランドを模擬している。実験にはType Aの他、その周囲に $\phi=10\text{mm}$ の丸棒を図-1の斜線で示すように付加した合計5つのストランド配置の模型を用いた。各模型タイプの代表長については簡単のためType Aと同様の $D=70\text{mm}$ を用いた。また外周に螺旋状にストランドを巻きつける際には、巻きつける角度 $\theta$ を図-2のように定義し、 $\theta=30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ でストランドを巻き付けた。その他のパラメーターとして、ヘリカルストランドの径を $\phi=0.10D, 0.15D, 0.20D$ と変化させ、それぞれについて巻きつける本数を1本とした場合と2本とした場合について実験を行った。

### (2) たわみ1自由度応答実験

ストランド配置およびヘリカルストランドが与える応答特性への影響について検討するため、たわみ1自由度応答実験を行なった。使用した風洞は九州工業大学所有の空力弾性試験用風洞(ゲッチングン型:測定断面 $1780\text{mm}\times 910\text{mm}$ )であり、一様流中で行った。模型は2本のコイルばねを介して鉛直に支持し、迎角 $\alpha$ を $0^\circ\sim 30^\circ$ まで $10^\circ$ 刻みで変化させた。模型の固有振動数は $f=2.84\sim 3.04\text{Hz}$ 、対数構造減衰率は $\delta=0.0009\sim 0.0011$ であった。応答特性を詳しく知るためにスクルトン数を $Sc=2.2\sim 2.7$ と実ケーブルの1/5程度として、模型が振動しやすい状態で実験を行った。風向きについてはケーブル軸に直角とした。

### (3) 静的空気力測定実験

ストランド配置およびヘリカルストランドの巻き角の変化が風荷重に与える影響について検討するため、模型静止時の静的空気力の測定を行った。実験には、九州工業大学所有の境界層型風洞縮流部(測定断面: $1800\times 1100$ )を用いて、一様流中で行った。実験時のレイノルズ数は $Re=0\sim 8.2\times 10^4$ の範囲とし、迎角 $\alpha$ を $0^\circ\sim 30^\circ$ まで $2^\circ$ 刻みで変化させて測定を行った。静的空気力は、模型両端を三分力天秤で支持して支持部のひずみを動ひずみ計によって検出している。実験によって得られた静

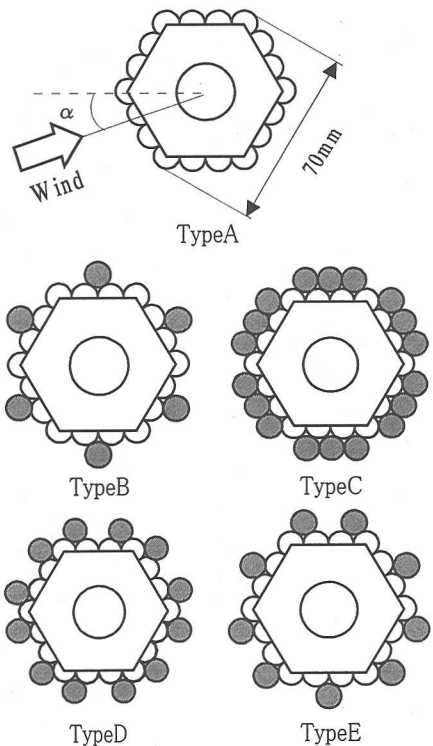


図-1 模型断面

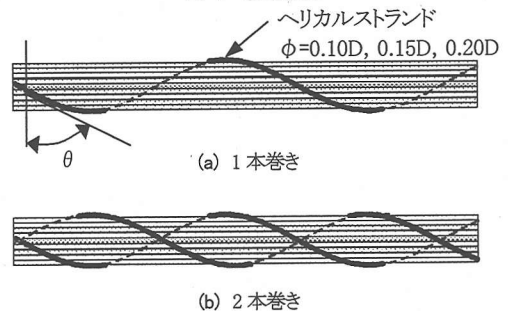


図-2 ヘリカルストランド

的空気力は、次式で表す抗力係数: $C_D$ 、揚力係数: $C_L$ 、空力モーメント係数: $C_M$ の各空気力係数として整理した。

$$C_D = F_D / (1/2 \rho V^2 \cdot H \cdot \ell) \quad (1)$$

$$C_L = F_L / (1/2 \rho V^2 \cdot B \cdot \ell) \quad (2)$$

$$C_M = F_M / (1/2 \rho V^2 \cdot B^2 \cdot \ell) \quad (3)$$

ここで $F_D, F_L, F_M$ は抗力、揚力、空力モーメントであり、 $\rho$ は空気密度である。 $H$ は模型高さ、 $B$ は模型幅で、各迎角 $\alpha$ ごとに力方向の投影面積が最大になるようにそれぞれ算出した。

### (4) 可視化実験

ストランド配置が後流に与える影響について検討するため、流動パラフィンを用いたスモークワイヤー法で可

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。風洞流速は  $V=0.6\text{m/s}$  で一定とし、模型は静止させた状態で実験を行った。供試模型は応答実験で用いたものの1/5のサイズ ( $D=14\text{mm}$ )とし、上下の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。

### (5)後流の流速測定実験

ストランド配置およびヘリカルストランドの巻き方向等がケーブルのスパン方向の流況に与える影響について、模型を静止させた状態で剥離流の流速を測定することによって検討を行なった。実験には、九州工業大学所有の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。迎角  $\alpha=0^\circ$  について、レイノルズ数を  $Re=1.5 \times 10^4, 2.5 \times 10^4, 3.7 \times 10^4, 4.8 \times 10^4$  として図-3に示す測定領域で流速測定を行った。

流速測定は図-3に示した測定領域について、模型の中心を  $Y=0, Z=0$  とし、 $Y$ 軸方向に  $Y$  座標 -220 から +220 まで 22mm 刻みで測定を行い、 $Z$ 軸方向に  $0.125H$  ( $H$ : 模型高さ) づつ  $0.625H$  まで下降させて  $Y$ 軸方向についてそれぞれ測定を行なった。尚、本実験では、 $X$ 軸方向に関しては  $X=3D$  と固定し、 $X$ 軸方向に測点を移動させた測定は行っていない。得られた流速の時系列データからスパン方向の相関を見るために、コヒーレンスを用いて検討した。コヒーレンスの基準となる流速の時系列データは測点  $Y=0$  (模型中央点) での時系列データとし、この測点と各測点間との相関を求めた。

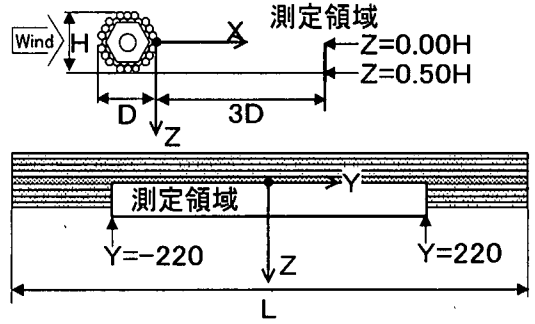


図-3 後流流速の測定領域

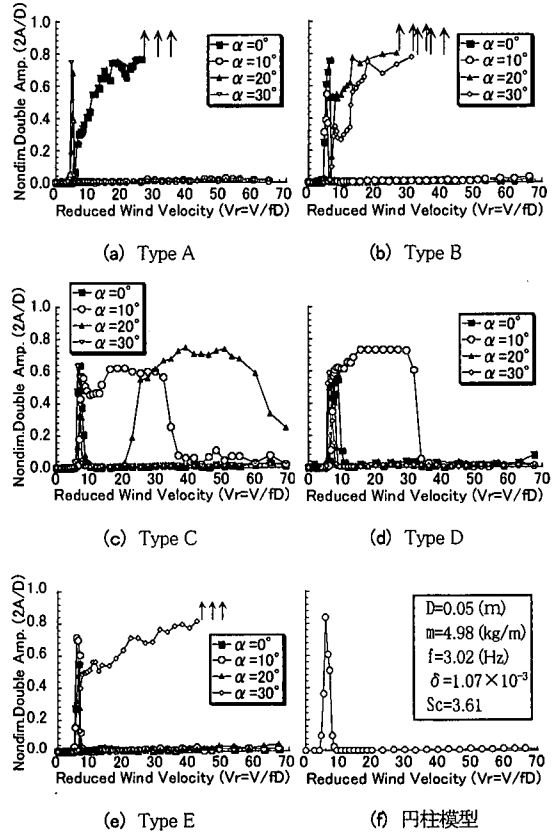


図-4 応答図

## 3. ストランド配置に関する考察

### (1) 応答特性

各模型断面 Type A ~ Type E の応答図を図-4に示す。図-4(a)から Type A においては迎角  $\alpha=0^\circ$  の場合にギャロッピング的な振動が発生しているのに対し、図-4(c)の Type C では、迎角  $\alpha$  にかかわらずギャロッピングと考えられる発散振動は発生していない。しかし、迎角  $\alpha=20^\circ, 30^\circ$  においては広い換算風速範囲で大振幅を伴った振動が発生している。Type B, E の場合では、Type A と同様にギャロッピングと考えられる発散振動が発生し、Type D では Type C と同様にギャロッピング的な振動は発生しなかったが、広い換算風速範囲で振動が発生した。

ここで、Type A と Type C の振動が発生した場合の空力減衰率を図-5に示す。図-5より、Type A において、ギャロッピング的な振動が発生した場合と Type C の振動時の場合では、その励振力に顕著な違いが現れている。

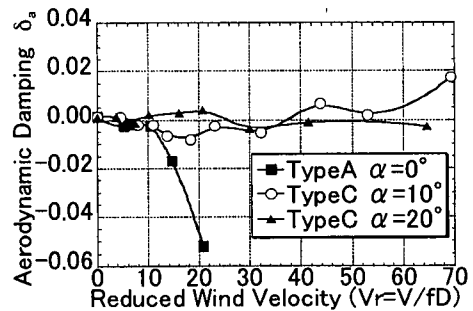


図-5 空力減衰率 ( $2A/D=0.4$ )

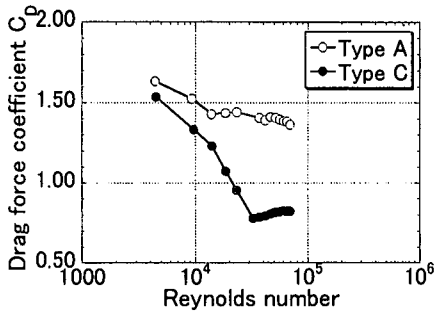
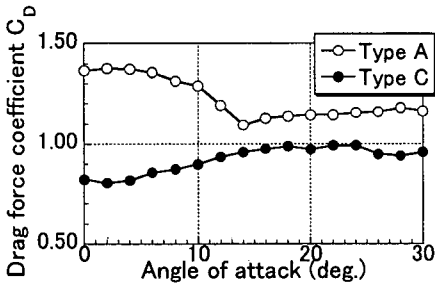
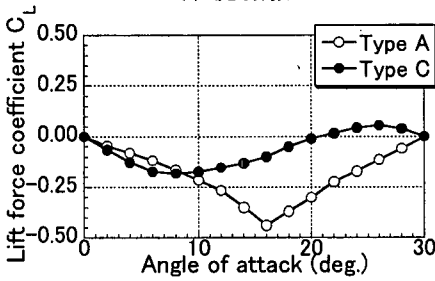


図-6 レイノルズ数による抗力係数の変化



(a) 抗力係数



(b) 揚力係数

図-7  $Re=7.0 \times 10^4$ での空気力係数

この傾向は他のタイプでも現れており、このことから、Type C, D と Type A, B, E の間には振動発生メカニズムの違いがあると判断できる。

渦励振についても、Type C, D の場合、その無次元倍振幅が  $2A/D=0.4 \sim 0.6$  程度であり、Type A, B, E に比べると2割ほど小さい値を示している。また、本研究と同程度のスクリーン数の場合、円柱の渦励振の振幅は  $2A/D=0.6 \sim 1.2$  程度という報告もあり<sup>7)</sup>、図-4(f)に示した  $Sc=3.6$  での円柱模型の応答図と比較すると、Type C, D では渦励振の抑制効果も認められる。

以上のことから、Type C, D のケーブル断面は Type A, B, E のストランド配置に比べ、より安定した応答特性を有すると考えられる。このように換算風速が  $Vr \leq 70$  と比較的低い風速領域においては、ストランド配置の違いによる基礎的な応答特性を確認できた。

(2)静的空気力特性

図-6 に迎角  $\alpha=0^\circ$  での Type A と Type C の抗力係数



(a) Type A,  $\alpha=0^\circ$



(b) Type C,  $\alpha=0^\circ$

図-8 流れの可視化映像

$C_D$  を示す。図-6 より、基本断面である Type A に比べ、Type C ではレイノルズ数の増加に伴って抗力係数  $C_D$  が大きく減少している。この抗力係数  $C_D$  の減少の割合は図-6 で示した迎角  $\alpha=0^\circ$  の場合に一番大きく、迎角  $\alpha$  の増大にしたがって、その割合は小さくなり、迎角  $\alpha=16^\circ$  付近を境として再び大きくなっている(図14(a)参照)。これは、Type C では  $Re=3.7 \times 10^4$  付近で臨界レイノルズ数に達しているためと考えられる。このように Type C のようなストランド配置とすることで、ケーブル表面に粗度を設けた場合と同じく臨界レイノルズ数が低くなることが確認できた。

次に、本論文において提案したマルチストランドケーブルは円断面と同じくレイノルズ数の影響を受ける断面ではあるが、本実験での測定範囲  $3.7 \times 10^4 \leq Re \leq 8.2 \times 10^4$  の範囲において抗力係数  $C_D$ 、揚力係数  $C_L$  はほぼ一定の値を示していた。そこで、 $Re=7.0 \times 10^4$  における抗力係数  $C_D$  と揚力係数  $C_L$  を各迎角毎にまとめたものを図-7 に示す。

図-7(a)から、Type A に比べ、Type C では抗力係数  $C_D$  が6割から8割程度の値を示している。図-7(b)より、Type A においては迎角  $\alpha$  が  $0^\circ \sim 16^\circ$  の間で揚力勾配が  $dC_L/d\alpha < 0$  となっている。Type C に関しては揚力の負勾配の範囲が Type A に比べ狭くなっている。準定常理論に基づく Den Hartog の判別式<sup>8)</sup>から考察すると、Type A は Type C に比べてギャロッピングに対して不安定な断面であると考えられ、応答実験の結果と同様、Type C のストランド配置とすることで空力特性は改善された。

(3)可視化実験による後流の検討

図-8 に Type A と Type C の静止時における流れの可

視化映像を示す。図-8(a)より、Type A では、剥離流は大きく巻き込み、規則的な渦列を形成しつつ剥離している。それに対して、Type C では図-8(b)のように剥離流の巻き込みは小さく、模型後方において模型から遠い位置では流線が乱れている。

このような後流の違いが空力特性に大きく影響しているが、後流の流況が違う原因としては、剥離点でのストランド配置が考えられる。Type A では六角形にストランドが配置されており、Type B, E でも外周のストランド間隔が広く配置されている。図-9(a), (b)に示されるように、これらにおいては、剥離点にあたるストランドは1つである。このような場合に剥離流が大きく巻き込み、ギャロッピングの発生や空気力の増大という結果をもたらしたと考えられる。また、Type C, D においては、図-9(c)に示したように剥離点近傍のストランドが適度な間隔を持って配置されているため、剥離点が2ヶ所存在する。このため、上流側のストランドからの剥離流が下流側のストランドに干渉され、明確な剥離渦が生じなかったことが空力特性の改善をもたらしたと考えられる。

可視化実験時のレイノルズ数は、 $Re=6.0 \times 10^2$  で、可視化実験以外の風洞実験時のレイノルズ数  $Re=10^3 \sim 10^5$  に比べると、かなり小さいためにレイノルズ数の影響が考えられる。しかし、可視化実験時の Type A と Type C の後流特性に差があった様に、より高いレイノルズ数域においても Type A と Type C の後流特性には差が生じていると類推できる。また、レイノルズ数の増大とともに、剥離流は模型により近い位置で層流から乱流へと遷移するようになるという既往の研究<sup>9)</sup>から、可視化実験以外の風洞実験時には、剥離流の巻き込み位置は模型により近づいていると考えられる。

#### 4. ヘリカルストランドに関する考察

##### (1) 応答特性に与える影響

Type C にヘリカルストランドを巻き付けた場合の応答図を図-10～図-12に示す。

図-10、図-13に径が $\phi=0.15D$ のヘリカルストランドを巻き角 $\theta$ を変えて設置した場合の応答と空力減衰率を示す。図-10より、どの巻き角の場合にも、ヘリカルストランドなしのケースで発生していた広い換算風速範囲での振動が抑制されている。さらに図-13より、ヘリカルストランドを設置することで、空力減衰率は大きくなっている。このことから、励振力の抑制についてもヘリカルストランドの効果が確認できた。また、Type C と同様に広い換算風速範囲での振動が見られた Type D についてもヘリカルストランドを設置することで振動

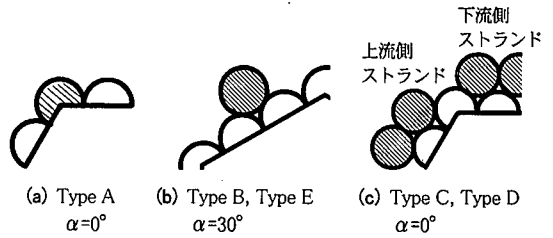


図-9 剥離点近傍のストランド配置

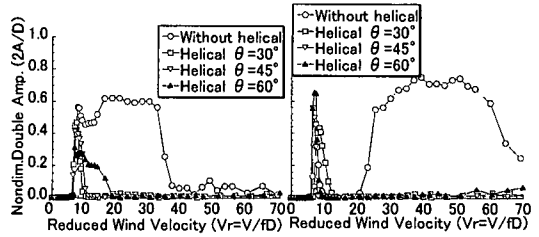


図-10 ヘリカルストランド( $\phi=0.15D$ )の巻き角 $\theta$ の違いによる応答

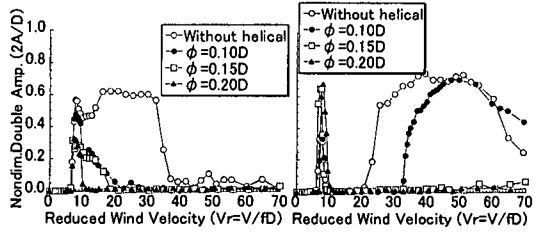


図-11  $\theta=60^\circ$ で設置したヘリカルストランドの径 $\phi$ の違いによる応答

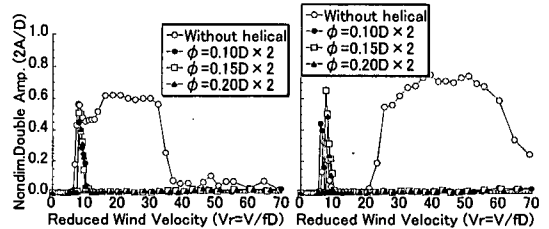


図-12  $\theta=60^\circ$ で設置した2本のヘリカルストランドの径 $\phi$ の違いによる応答

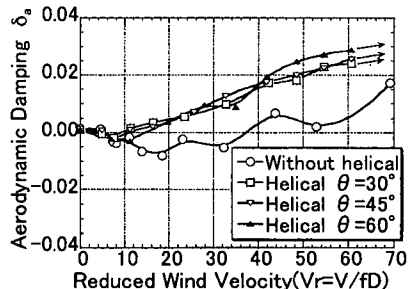


図-13 ヘリカルストランド( $\phi=0.15D$ )の巻き角 $\theta$ の違いによる空力減衰率( $\alpha=10^\circ$ ,  $2A/D=0.4$ )

は抑制された。

巻き角を  $\theta=60^\circ$  で固定してヘリカルストランドの径  $\phi$  を変えた場合、図-11 より、径  $\phi$  が大きくなるほど広い換算風速範囲での振動の抑制に効果を示している。特に、図-11 (b) の  $\phi=0.10D$  のケースでは、振動発生風速は高くなっているが、ヘリカルストランドなしの場合と同程度の振幅を伴った振動が発生している。しかし、 $\phi=0.15D$ ,  $\phi=0.20D$  の場合ではこのような振動は発生していない。以上より、渦励振の発生風速域よりも高い風速域で発生する振動の抑制には、巻き角を  $\theta=60^\circ$  の場合、少なくとも  $0.15D$  以上の径のケーブルを巻きつける必要があると考えられる。

また、巻き角  $\theta=60^\circ$  でヘリカルストランドを2本巻きつけた場合では、図-12 より、 $\phi=0.10D$  のケースにおいても、高い風速域での振動は発生しておらず、ヘリカルストランドを2本巻きつけた場合の効果が確認できた。しかし、今回の実験で用いた供試模型では模型長との関係から、ヘリカルストランドを巻きつけられる回数が限られているため、より長い模型を用いての検討が必要と考えられる。

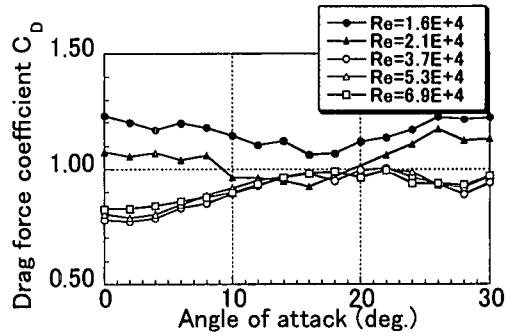
## (2)静的空気力特性に与える影響

先程述べたように Type C では、 $Re < 3.7 \times 10^4$  において抗力係数はレイノルズ数に対して減少し、 $3.7 \times 10^4 \leq Re \leq 8.2 \times 10^4$  の範囲においては一定値を示していた。図-14 に Type C および Type C に  $\phi=0.15D$  のヘリカルストランドを巻き角  $\theta=30^\circ, 60^\circ$  で設置した場合の抗力係数  $C_D$  と迎角  $\alpha$  の関係をレイノルズ数ごとに示す。

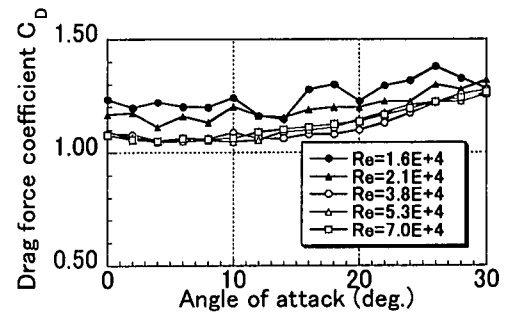
図-14 (a) より、Type C のヘリカルストランドなしの場合では  $Re < 3.7 \times 10^4$  および迎角  $\alpha \leq 16^\circ$  の範囲では、迎角  $\alpha$  が大きくなるにしたがって抗力係数  $C_D$  は減少し、 $\alpha \geq 16^\circ$  で抗力係数  $C_D$  が増加する下に凸の形状を示す。それに対して、 $Re \geq 3.7 \times 10^4$  では、グラフの形状は上に凸の形状を示す。このことから Type C では各迎角で  $Re=3.7 \times 10^4$  付近を境にその周辺の流れが大きく変化していると考えられる。

図-14 (b), (c) において、Type C にヘリカルストランドを巻き角  $\theta=30^\circ, 60^\circ$  で巻きつけた場合、 $Re \geq 3.7 \times 10^4$  の範囲では、抗力係数  $C_D$  のレイノルズ数による変化はどの迎角でも見られない。また、 $Re < 3.7 \times 10^4$  の範囲ではレイノルズ数の増加にともない抗力係数  $C_D$  は小さくなっている。これは Type C のヘリカルストランドなしの場合と同様の傾向であるが、Type C の場合に比べるとその変化は小さいため、レイノルズ数による影響は低減されている。

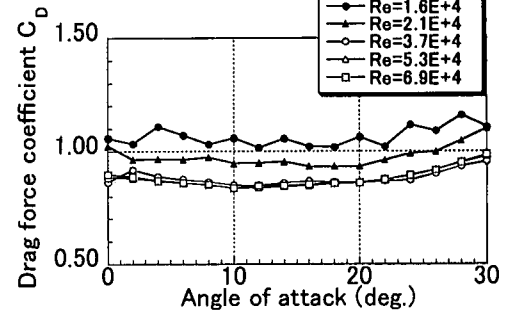
また、図-14 (c) より Type C にヘリカルストランドを  $\theta=60^\circ$  で巻きつけた場合では、迎角  $\alpha$  によらず抗力係



(a) ヘリカルストランドなし



(b)  $\theta=30^\circ$  で設置した場合



(c)  $\theta=60^\circ$  で設置した場合

図-14 ヘリカルストランドによるRe数と迎角に対する抗力係数 (Type C)

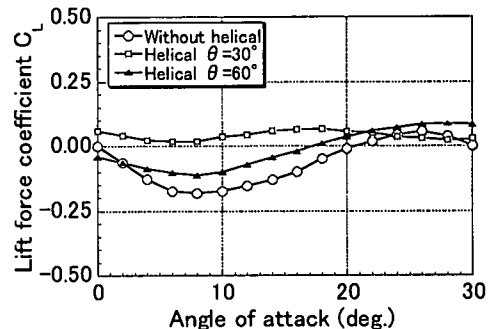


図-15 ヘリカルストランドによるRe数と迎角に対する揚力係数 (Type C)

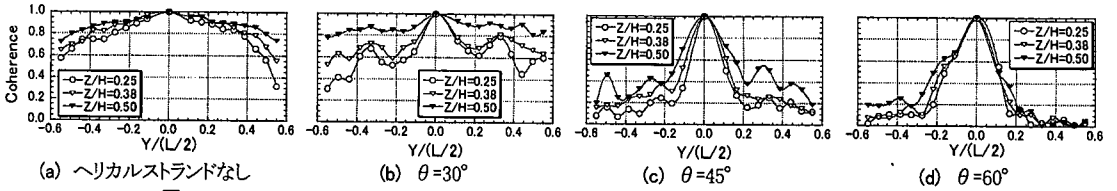


図-16 ヘリカルストランド( $\phi=1.5D$ )の巻き角 $\theta$ によるコヒーレンスの変化 (Type C,  $Re=4.8 \times 10^4$ )

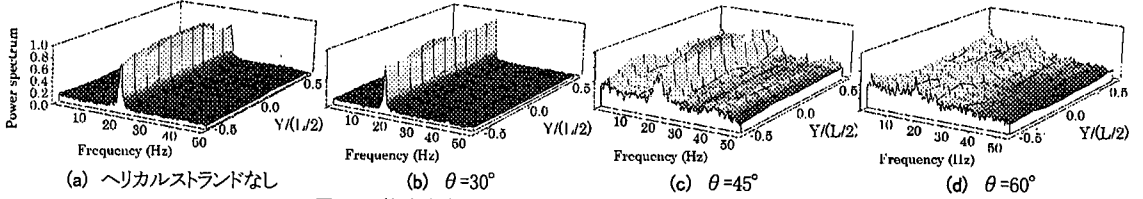


図-17 後流流速のスペクトル解析結果 (Type C,  $Re=4.8 \times 10^4$ )

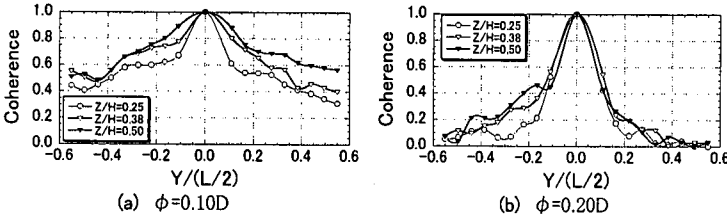


図-18 ヘリカルストランド( $\theta=60^\circ$ )の径 $\phi$ によるコヒーレンスの変化 (Type C,  $Re=4.8 \times 10^4$ )

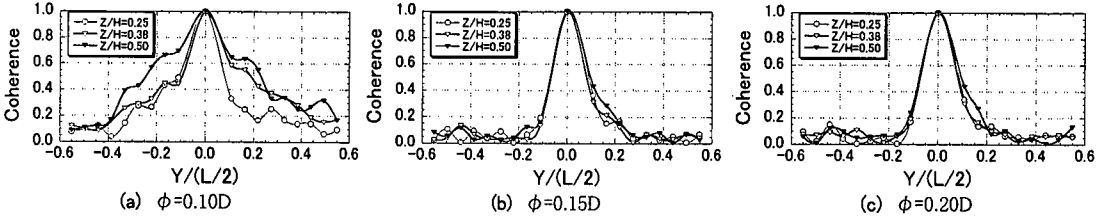


図-19 ヘリカルストランド( $\theta=60^\circ$ )を2本巻きつけた場合のコヒーレンス (Type C,  $Re=4.8 \times 10^4$ )

数  $C_p$  はほぼ一定の値を示しており、迎角  $\alpha$  の変化による影響はほとんど見られなくなっている。図-14(b)のヘリカルストランドを  $\theta=30^\circ$  で巻きつけた場合と  $\theta=60^\circ$  で巻きつけた場合を比較すると、ヘリカルストランドを  $\theta=60^\circ$  で巻き付けることで、レイノルズ数、迎角の影響をより低減できる。さらに、図-15によれば、ヘリカルストランドを巻き付けることで揚力係数の迎角に対する変動も小さくなっている。以上から、抗力および揚力に及ぼす迎角、レイノルズ数の影響がヘリカルストランドの巻き付け方により低減される場合があることが確認できた。

### (3)後流に及ぼす影響

$Re=4.8 \times 10^4$  における Type C のコヒーレンスの測定結果を実験ケースごとに図-16、図-18、図-19に示す。

まず、ヘリカルストランド( $\phi=0.15D$ )の巻き角が後流の流況に与える影響について考察する。ヘリカルストランドを巻き付けていない図-16(a)の場合と  $\theta=30^\circ$  で巻きつけた図-16(b)の場合を比較する。  $Z/H=0.25 \sim 0.38$  に

おいては、スパン方向に等間隔でコヒーレンスが低い値を示している位置がある。これは、ヘリカルストランドの下面側突起位置に対応している。しかし、測線  $Z/H=0.50$  では、ヘリカルストランドなしの場合と同様に、コヒーレンスはスパン方向に高い値を示しており、ヘリカルストランドの下面側突起位置後方においても、模型軸方向のコヒーレンスは小さくなっていない。すなわち、ヘリカルストランドの巻き角が  $\theta=30^\circ$  の場合には、ヘリカルストランドの影響は小さいと考えられる。さらに、ヘリカルストランドの巻き角が  $\theta=45^\circ, 60^\circ$  と大きくなると、図-16(c), (d)に示すように、  $Z/H=0.00 \sim 0.50$  のいずれの測線についてもコヒーレンスの値は低くなる傾向を示す。コヒーレンスの値が小さいということは、流れの三次元性が強くなっていることを示しており、ヘリカルストランドの巻き角を大きくした場合には、模型後方の広い範囲で流況が三次元的なものになっていることを意味している。

また、図-17にヘリカルストランドの巻き角を変化させた場合の、後流における流速変動のスペクトル解析の

結果を  $Re=4.8 \times 10^4$ ,  $Z/H=0.50$  の場合について示す。図-17(a), (b)のヘリカルストランドなし, および巻き角  $\theta=30^\circ$  の場合には, ストローハル成分の卓越したピークがある。しかし, 図-17(c)~(d)のように巻き角を  $\theta=45^\circ \sim 60^\circ$  と大きくした場合には, このような卓越したピークは現れていない。以上から, ヘリカルストランドの巻き角  $\theta$ を大きくすることで, 模型後方の広い範囲で流況を大きく変化させ, 渦列の形成を妨げる効果を得られることが確認された。

図-18(a)に示した径  $\phi=0.10D$  の場合では, そのコヒーレンスの値は, 他のケーブル径のコヒーレンスの値よりもかなり高くなっており, 径  $\phi=0.10D$  のヘリカルストランドでは, 後流にあまり影響を与えない。また, 径  $\phi=0.20D$  のヘリカルストランドでは, そのコヒーレンスの値に径  $\phi=0.15D$  の場合との差はあまり見られなかった。

図-19によれば, 径  $\phi=0.10D$  において, ヘリカルストランドの本数を2本にした場合では, 1本の場合に比べてコヒーレンスが低い値を示している。径が  $\phi=0.15D$  と  $0.20D$  の場合については1本巻きと2本巻きで顕著な違いは見られない。

## 5. まとめ

斜張橋用ケーブルとしてマルチストランド方式を採用したケーブルを提案し, その基礎的な研究として, ストランド配置を変化させて風洞実験を行い, その応答特性および空気力について比較した。また, ストランドを束ねるためにケーブルの周囲に螺旋状に巻きつけられた素線ストランド(ヘリカルストランド)の影響についても検討を行なった。以下に本論文で得られた主な結果を列挙する。

- (1) 剥離点が2ヶ所生じるようにストランドを配置することで発散型の振動が抑制される。
- (2) (1)と同様なストランド配置とすることで臨界レイノルズ数を低下させる効果を確認できた。

- (3)  $\phi \geq 0.15D$  の径のヘリカルストランドを設置することで, ヘリカルストランドを巻きつけない場合に発生していた特定の風速域での振動が抑制される。
- (4) ヘリカルストランドを設置することで, 空気力へのレイノルズ数, 迎角による影響は低減される。
- (5) ヘリカルストランドの径  $\phi$ が大きい程, また1本巻きつけた場合よりも2本巻きつけた場合の方がケーブル後方の流況をより三次元的なものにできる。特に  $\theta=60^\circ$  で設置した場合には規則的な渦列は形成されていない。
- (6) (5)のように三次元的な流況の変化の程度が大きい場合に, 応答特性, 風荷重の低減効果に良好な結果が得られている。

本研究では, レインバイブレーションに関する検討は行っていないが, 今後, 降雨時の実験, 傾斜ケーブルの実験を計画している。

## 参考文献

- 1) 植上瑋一: 斜張橋ケーブルの Rain Vibration, 日本風工学会誌, pp.17-28, 1986.
- 2) 宮崎正男: 斜張橋ケーブルの空力不安定振動と制振対策, 第10回風工学シンポジウム論文集, pp.145-150, 1988.
- 3) 松本勝, 北沢正彦, 石崎浩, 小川一志, 斎藤通, 下土井秀樹: 東神戸大橋の耐風設計, 橋梁と基礎, Vol.25, No.5, pp.35-43, 1991.
- 4) 藤原享, 山口和範, 真辺保仁: 多々羅大橋ケーブル制振対策, 橋梁と基礎, Vol.33, No.5, pp.16-19, 1999.
- 5) 宮田利雄, 山田均, 北条哲男: 表面粗度を持つケーブルの空力特性に関する実験的研究, 橋梁と基礎, Vol.27, No.9, pp.30-36, 1993.
- 6) 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.
- 7) 岡島厚, 杉谷賢一郎: 一様流中で種々な方向に振動する円柱九州大学応用力学研究所所報, No.57, pp.229-245, 1982.
- 8) Den Hartog, J. P.: *Mechanical Vibrations*, MacGraw-Hill, 1984
- 9) Basu, R.I.: Aerodynamic forces on structures of circle cross-section, Part1. *Jour. Wind Eng. & Indust. Aero.*, Vol.21, pp.273-294, 1985.

(1999. 12. 3 受付)

## AEROELASTIC PERFORMANCE AND FLOW-BEHAVIOR AROUND MULTI-STRAND CABLE WITH OR WITHOUT HELICAL STRAND

Hideyuki TANAKA, Yoshinobu KUBO, Eiki YAMAGUCHI and Kouichi OIKAWA

The present research is a basic research for development of a cable with good aeroelastic performance. A proposed cable in the present study is a multi-strand cable from viewpoint of cost performance. Wind tunnel tests were conducted to examine the aeroelastic performance of the multi-strand cable with or without helical strand. As a result, it was made clear that multi-strand cable with helical strand had better performance for reducing amplitude of aeroelastic vibrations and that the helical strand makes the drag and the lift forces decrease.