

インデント加工を施した制振ケーブルの開発

Development of Lowdrag Aerodynamically Stable Cable with Indented Processing

北條 哲男^{*(1)}
Tetsuo HOJO

山崎 伸介^{*(2)}
Shinsuke YAMAZAKI

岡田 裕行⁽³⁾
Hiroyuki OKADA

抄 録

長大斜張橋の耐風設計では、風雨によるケーブルの振動(レインバイブレーション)の抑制対策が不可欠である。更に、ケーブルへの風荷重が橋梁全体の風荷重に大きな割合を占めるようになるため、ケーブルの風荷重を低減することは橋梁の合理的な設計をするために重要となる。本研究では、レインバイブレーションに対して空力的に安定で、かつ設計風速域で抗力係数の小さなケーブル断面を風洞実験により検討した。その結果、ケーブルの表面にインデント加工を施す制振ケーブルを開発し、世界最大の斜張橋である多々羅大橋に適用した。

Abstract

A wind-resistant design of cables for large cable-stayed bridges is required as a measure against rain-wind induced vibration. In such bridges, many cables are arranged in a short pitch, which causes a large drag force on the cables. Therefore, reduction of drag force on cables is essential for rationalizing bridge design, as well as restraint of vibration. This paper describes studies on a new cable having both a low drag co-efficient force and rain-vibration suppressing effects. Through many investigations using wind tunnel tests, an indented cable was developed as a countermeasure against rain-wind induced vibration, and finally it was applied to the Tatara Bridge which is the largest cable-stayed bridge in the world.

1. 緒 言

斜張橋の建設数の増加に伴ない、風によるケーブルの振動が多く、の橋梁で報告^{1,2)}されている。近年の長大斜張橋には、ポリエチレン等により防食被覆が施された単一ストランドから成るケーブルが用いられる場合が多く、表面が平滑な被覆層を持つケーブルには、雨と風の相互作用により振動する現象(レインバイブレーション)がしばしば認められる。これまでにレインバイブレーションの振動現象や制振対策に関して種々の研究^{2,3)}が行われているが、斜張橋が長大化し斜張橋ケーブルが長尺化すると、ケーブルに付加的な装置を取り付けてもその取付位置や構造等の制約から十分な制振効果が得られない場合があり、ケーブル自身で制振効果を持つ空力的な制振対策の重要性が増しつつある。

更に、長大斜張橋では多数のケーブルが密に配置され、ケーブルへの風荷重が橋梁全体の風荷重に大きな割合を占めるようになるため、ケーブルの風荷重を最小に抑えることは橋梁を合理的に設計するうえで不可欠となる。これまでの空力対策断面は、レインバイブレーションの制振効果を得るためにケーブル表面に加工を施すことを目的としており、抗力係数等を含む総合的な空力特性についてはあまり検討されていない。

本報は、この点に着目したケーブルの制振対策の検討を目的としたものであり、レインバイブレーションに対して空力的に安定で、

かつ抗力係数が小さい特性を持つ制振ケーブルの開発について述べる。

2. 長大斜張橋ケーブルの技術課題

2.1 ケーブルの風荷重の低減

最近の長大斜張橋は、マルチケーブルとスレンダーな箱桁で構成される場合が多く、斜張橋ケーブル自身に作用する風荷重が大きくなりつつある。斜張橋が1000m級と同様の構造構成と仮定して試算し、ケーブルと桁に作用する風荷重を比較してその関係を図1に示す。斜張橋の規模の増大とともにケーブルに作用する風荷重が増加し、長大化に従い桁の風荷重を上回る傾向にあり、また抗力係数の増減の影響が直接的に現れるようになる。ケーブルの抗力係数が増大した場合、塔や桁など暴風時に断面決定されている部材の断面設計に影響を及ぼすことになる。従って、抗力係数の低減によりケーブルの風荷重を最小に抑えることは、長大斜張橋を合理的に設計するうえできわめて重要である。

ケーブルは円柱状の構造要素であるために、その抗力係数はレイノルズ数 Re ($Re=UD/\nu$, U :風速, D :直径, ν :動粘性係数)の影響を大きく受ける⁴⁾。一般に、表面が滑らかな無限円柱の臨界レイノルズ数は直径を代表長にして 4×10^5 前後にあり、長大斜張橋の標準的なケーブル直径を15cm程度と仮定するとほぼ設計風速域に相当する。この臨界レイノルズ数を境にして、低いレイノルズ数

*⁽¹⁾ 鉄構海洋事業部 建設・技術部 開発グループ グループリーダー工博
神奈川県相模原市西橋本5-9-1 ☎229-1131 ☎(042)771-6165

*⁽²⁾ 鉄構海洋事業部 建設・技術部 ケーブル計画・技術グループ マネジャー

*⁽³⁾ 鉄構海洋事業部 建設・技術部 ケーブル計画・技術グループ

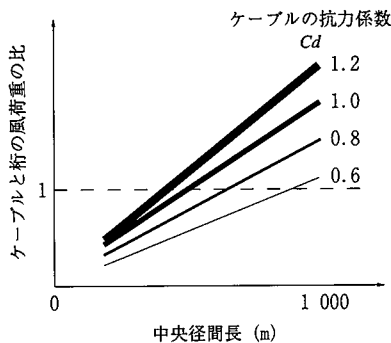


図1 斜張橋のケーブルと桁に作用する風荷重

領域を亜臨界域、高い範囲を超臨界域と呼び(図2参照)、臨界レイノルズ数付近で円柱周辺流の剥離状況が、いわゆる層流剥離の状況から乱流剥離の状況へ徐々に遷移するとされている。

表面が滑らかな円柱の抗力係数は、亜臨界域では1.2程度の値であるが、臨界レイノルズ数で0.5を下回る値となった後、再び乱流剥離の状況に流れが安定するにつれ抗力係数は増加する傾向となる。斜張橋や吊橋の一般的なサイズの表面が滑らかなケーブルの場合、設計風速付近で抗力係数が大きく低下する臨界レイノルズ数の範囲にあり、設計上は抗力係数として0.7を用いている。

一方、円柱表面が滑らかでなく一様な粗度を持つ円柱の場合、臨界レイノルズ数は低下し、レイノルズ数の増加に伴い抗力係数も増加することが知られている。例えば、直径の1%程度の粗度を表面に施した場合、臨界レイノルズ数は 6×10^4 程度となり、設計風速付近では1前後の抗力係数に増加するとされている。また、ケーブル表面に平行突起あるいは溝を付ける等の表面処理を施したこれまでのレインバイブレーションの空力対策断面は、高レイノルズ数領域(即ち、設計風速域)で抗力係数は1.2に漸近する。

このように、表面が滑らかな場合に抗力係数は最小となり、高い制振効果を得るために表面粗度や変形度を大きくするほど抗力係数は大きくなる。即ち、従来ではケーブルの空力安定化対策と小さい抗力の実現は相反することになり、長大斜張橋構造の合理化のためには不都合なこととなる。従って、ケーブルの抗力特性を改善し、かつレインバイブレーションの制振効果を確保する空力対策断面を新たに開発することが必要となった。

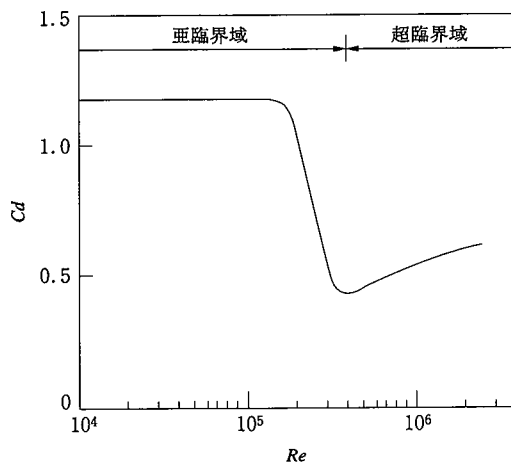


図2 円断面の抗力係数とレイノルズ数の関係

2.2 ケーブルの制振対策

2.2.1 ケーブルの振動現象

斜張橋ケーブルは径間長の長大化に伴い極めて長尺化し、例えば中央径間1000m級の場合、ケーブルの定着間距離は約500mにもなる。更に、ケーブル断面は基本的には円形で、構造減衰も小さいため風により振動を発生しやすい。ケーブルの風による振動現象は、渦励振、レインバイブレーション、ウエイクギャロッピングに分けられる。

渦励振は、ケーブルの後流に生じる交番渦の作用により渦の周期がケーブルの振動周期と一致するために生じる振動現象である。発生風速は、 $U = fD/S$ (f : ケーブルの固有振動数、 D : ケーブル径、 S : ストローハル数)により算出できる。渦励振の振動特性として、その発生メカニズムから限定振動となることが多く、低い風速域で発生し振動振幅も比較的小さい。渦励振の励振力は弱いため、ケーブル定着部に緩衝材を設置するなど減衰を付加することにより制振が可能であることが確認されている。

レインバイブレーションは、降雨を伴った風が作用した場合、ケーブル表面に形成される水路より空力的に不安定になり発生する振動現象である。なお最近の研究⁵⁾によれば、斜張橋のレインバイブレーションは表面水路の存在が一つの原因であるものの、降雨がなくても傾斜ケーブルには軸方向の流れがあり本質的に振動する可能性があり、これらの二つの条件が複雑にからみあって発生するものと考えられている。名港西大橋で観測されて以来、榎石・岩黒橋、荒津大橋、天保山大橋など多数の斜張橋で振動の発生が確認されており、最大振幅がケーブル径の5~6倍に達することもある。実橋における観測や風洞実験の結果^{1,2)}から、レインバイブレーションについては以下の特徴が明らかにされている。

- 1)ケーブル形状: 円形ケーブルで表面が滑らかな場合に生じる。
- 2)振動数: 振動数は主に3 Hz以下の範囲で発現する。
- 3)発現風速: 雨を伴った風速6 m/s以上の風により生じる。
- 4)風向: ケーブルがいわゆる正姿勢の風向により振動しやすい。
- 5)制振対策: 対数減衰率で $\delta = 0.02$ 程度の減衰を付加すれば、ほぼ制振できる。

ウエイクギャロッピングは、並列ケーブルにおいて、風上側のケーブルの後流(ウエイク)によって風下側のケーブルに生じる振動である。ケーブル間隔によって影響を受け、ケーブル間隔が5D以内で発生するケースが多いが、更に間隔が広がるとウエイクインデューストフラッターが発現すると考えられている。

レインバイブレーションは、その発生により斜張橋を崩壊に至らせるような振動ではないが、ケーブルやその定着部に損傷を与える可能性が大きいため、長大斜張橋の耐風設計上その制振対策が不可欠となっている。従って、本研究ではレインバイブレーションを対象にしてその制振対策の検討を行った。

2.2.2 制振対策

斜張橋ケーブルの制振対策としては、大きく分けて三種類の方法が挙げられる^{6,7)}。

減衰付加方式は、ケーブルと桁の間にダンパーを設置しケーブルの構造減衰を大きくすることにより制振する方法であり、レインバイブレーション対策としてかなり一般的に用いられている。ダンパー設置による減衰付加効果は、ある程度の精度で理論的に推定することができる。ダンパーにはいくつかの種類があり、油圧ダンパー(写真1参照)、粘性せん断型ダンパー、高減衰ゴムによるダン

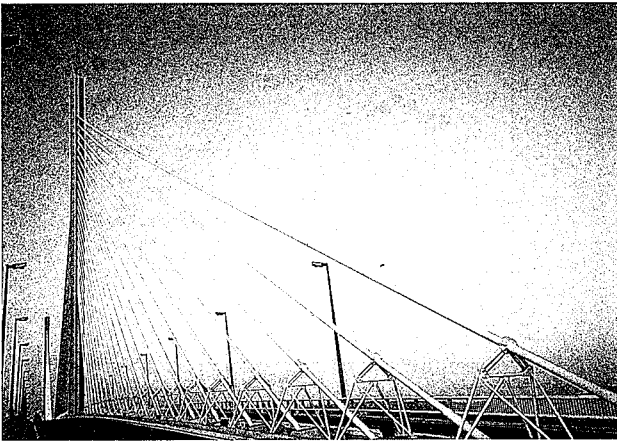


写真1 減衰付加による制振対策(プロトヌ橋)

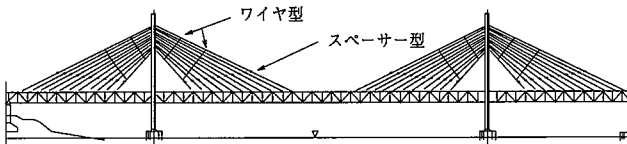


図3 ケーブル相互連結による制振対策(岩黒島橋・櫃石島橋)

パーの実施例がある。いずれの形式においても減衰付加は可能であるが、付加減衰量の経年変化、耐久性に注意を払う必要がある。ただし長大斜張橋では、減衰効果を得るためにはダンパー設置を桁上の高い位置に設置することが必要となり、取り付け位置の制約や取り付け構造の剛性低下の影響で十分な制振効果が得られない場合がある。

ケーブル相互連結方式(図3参照)は、隣接するケーブルをワイヤーで連結し、機械的に振動を抑える方法である。この方法では、連結した位置が振動モードの腹に当たる振動は抑えられるが、節になる振動には効果がないため、制振に必要な高次のモード形状を考慮して連結点を決める必要がある。しかし、事前に減衰付加効果の定量的な把握が難しく、更に連結ワイヤーや治具類の維持管理に対する問題などもあり、十分な予備検討が必要になる。長大斜張橋では、長尺ケーブルの高次の多数のモードを対象にすると多くの制振ワイヤーを設置することになり、すべてのモードに有効な連結方法は実用的ではないと考えられる。

空力対策⁹⁾は、ケーブルの表面を加工して励振力そのものを抑制しようとする方法である。このため、減衰付加やケーブル相互連結のような取り付け装置類が不要となる利点がある。空力対策としては、風洞実験によりいくつかの断面が提案されているが、レインバイブレーションの発生の要因である表面水路の形成を妨げたり、断面周辺の流れを乱すことにより制振効果を得るものである。これまで実橋で採用されている表面形状としては、並行突起⁹⁾(図4参照)、Uストライプ¹⁰⁾、ヘリカルストライク¹¹⁾があり、制振効果の有効性も確認されつつある。しかしながら、このような対策案は2.1に述べたようにケーブルの抗力係数が増大し、設計風速域で風荷重が大幅に増加する。従って、長大斜張橋ケーブルの制振対策法として、抗力係数の低減化を図ることができれば空力対策は十分有力な方法と考えられる。

このような観点から、レインバイブレーションの制振対策として空力対策に着目して開発を進めた。本検討での抗力係数を最小化する基本的な考え方は、抗力係数の臨界レイノルズ数付近の特性をよ

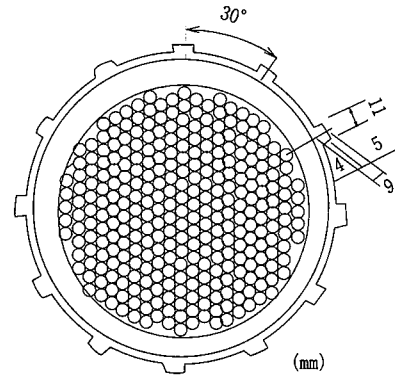


図4 空力制振対策(東神戸大橋)

りレイノルズ数の高い領域まで広げることにある。つまり、表面に滑らかな部分を確保しつつ乱流剥離の遷移しやすい粗な領域を組み合わせることで、臨界レイノルズ数付近の抗力係数特性のある範囲にわたって維持できるような表面形状とすることである。一方、レインバイブレーションに対しては、ケーブル表面に形成される水路が振動発生に大きな影響を持つとされているため、ケーブル表面に施す粗度の配置により周辺流の制御を行い、水路形成の阻害によるレインバイブレーションの制振を考える。このため、まず表面粗度を持つケーブルの静的空力特性について検討した。

3. 表面粗度付きケーブルの静的空気力特性

3.1 表面粗度付きケーブルに関する基礎実験

ケーブル表面粗度が静的空気力特性に及ぼす影響を把握するために三分力試験^{12,13)}を実施した。模型は実物大の直径を有するアルミニウム管に実物と同じポリエチレンを被覆し、その表面に粗度を付けた。実験には、粗度の影響を明らかにするために、形状や分布の異なる3種類の模型を用いた(表1参照)。

模型A及び模型Bの実験は、建設省土木研究所の非定常空気力風洞(断面高さ2.0m、幅1.0m)で実施し、風洞風速約25m/sまで測定を行った。この場合、風洞実験で得られるレイノルズ数は約 2.2×10^5 である。また、模型Cの実験は、住友重機械工業の大型回流風洞(断面高さ3.0m、幅2.0m)で実施し、実橋の設計風速レベルと同程度である風洞風速約55m/s(レイノルズ数約 5.5×10^5)まで測定を

表1 ケーブル模型諸元

模型名	直径 D (m)	表面粗度 k (μm)	表面相対粗度 (k/D)	備考
A ₁	0.132	3	2.3×10^{-5}	平滑
A ₂	0.122	30	2.5×10^{-4}	全面一様
A ₃	0.132	100	7.6×10^{-4}	全面一様
A ₄	0.124	200	1.6×10^{-3}	全面一様
A ₅	0.124	600	4.8×10^{-3}	全面一様
A ₆	0.128	1 500	1.2×10^{-2}	全面一様
B ₁	0.147	200	1.4×10^{-3}	全面格子状
B ₂	0.147	600	4.1×10^{-3}	全面格子状
B ₃	0.149	1 200	8.1×10^{-3}	全面格子状
C ₁	0.140	3	2.1×10^{-5}	平滑
C ₂	0.140	1 500	1.1×10^{-2}	離散的凹型
C ₃	0.140	1 500	1.1×10^{-2}	離散的凸型

行った。

図5に示すように、一様な分布の粗度を持つケーブルの場合には、表面粗度の増大に伴い限界レイノルズ数は低下することが分かる。表面相対粗度 k/D が大きいほど、限界レイノルズ数における抗力係数の値は平滑円断面の抗力係数 $C_d \approx 0.5$ より大きくなり、また風速の増加とともに抗力係数は上昇し、 $C_d \approx 1.2$ に早く漸近する傾向が認められた。直径の約1%の一様な粗度を持つ模型 A_6 では、限界レイノルズ数 4×10^4 程度で抗力係数 $C_d \approx 0.9$ となり、 $Re = 2.2 \times 10^5$ で $C_d \approx 1.2$ を示した。本実験は、既往の実験範囲に比べ、より微小な粗度についても行ったものであるが、粗度係数 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ の範囲では、これまでの報告の結果ともよく一致している。

模型 $A_4 \sim A_6$ とほぼ同程度の大きさの粗度を格子状に施した模型 $B_1 \sim B_3$ の抗力係数の測定結果を図6に示す。格子状の粗度を持つ円断面の場合にも、一様な粗度を持つ模型 $A_4 \sim A_6$ と同様に表面粗度の増大に伴い限界レイノルズ数が低下する。ただし、抗力係数の上昇の様子は、一様な粗度を持つ模型Aとはやや異なる傾向を示し、その上昇の過程は非常にゆるやかである。直径の約1%の格子状粗度を持つ B_6 は、限界レイノルズ数は 7×10^4 程度となり、 $Re = 2.2 \times 10^5$ では抗力係数 $C_d \approx 1.0$ を示した。

模型 $A_4 \sim A_6$ とほぼ同程度の大きさの粗度を離散的に凹型及び凸型に施した模型 C_2 及び C_3 の抗力係数の測定結果を図7に示す。直径の約1%の粗度を持つ模型 C_2 及び C_3 は、両者ともほぼ同様の傾向となり、限界レイノルズ数が 1×10^5 程度で抗力係数 $C_d \approx 0.6$ となった。 $Re = 5.5 \times 10^5$ まで(風洞風速約55m/s)測定を行ったが、この

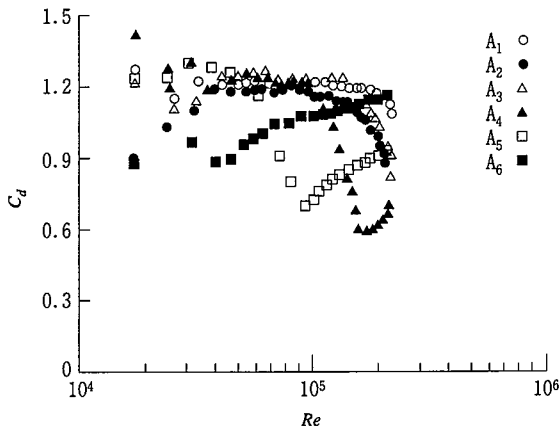


図5 模型 $A_1 \sim A_6$ の抗力係数とレイノルズ数の関係

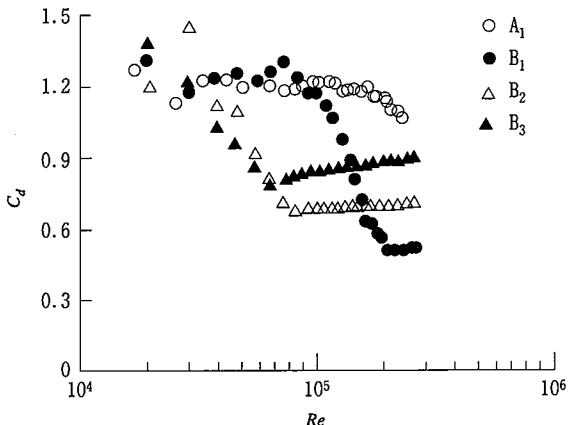


図6 模型 $B_1 \sim B_3$ の抗力係数とレイノルズ数の関係

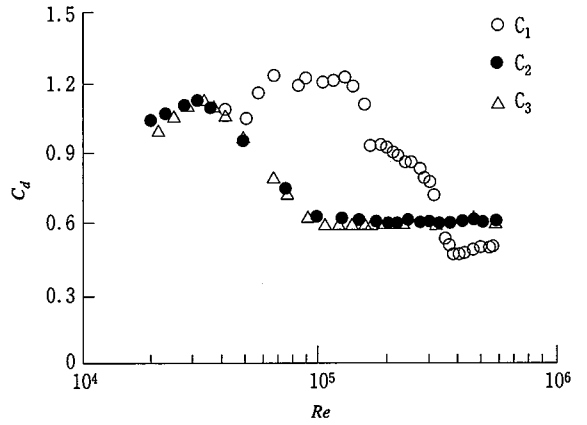


図7 模型 $C_1 \sim C_3$ の抗力係数とレイノルズ数の関係

範囲では抗力係数はほぼ一定値をとり、増加する傾向は見られなかった。

このように円断面の場合、これまでの研究でも指摘されている通り、表面粗度の大きさとともに表面粗度の形状や分布により円断面の表面に沿う境界層の剥離のパターンが異なり、抗力特性が変化する。本実験においては、平滑な部分が増加するのに伴い抗力係数は低減し、かつその遷移領域が広がる傾向を把握することができた。従って、同じ大きさの粗度を持つ断面でも離散的に粗度を施せば、設計風速域においても平滑な断面とほぼ同程度の抗力係数が得られることが判明した。

3.2 インデント加工ケーブルの静的空気力特性

基礎実験の結果から、表面の粗度は凹の楕円状のくぼみ(インデント)で与えることにより、滑らかな部分を確保しつつ粗度の集中する部分を模様状に配置した。本実験¹⁴⁾での粗度配置模様は全実験の結果を分析し、製作性、架設性を考慮して配置したものである。ここで示すものは実験を実施したものうちの一部分ではあるが、要件を満たす滑面と粗面の組合せ模様の最適化は行っていない。図8に風洞実験に用いた模型 D_2 の表面形状を示す。また、主要な諸元は表2にまとめる通りである。なお、本実験も模型Cの実験と同様に住友重機械工業の大型回流風洞で実施した。

滑らかな表面の通常ケーブルの表面相対粗度(k/D)が0.002%であるのに対し、インデント加工したくぼみの表面相対粗度は1%である。この1%の表面粗度の影響は決して小さいものではなく、ケーブル表面全周に一律に粗度をつけた場合は、比較的小さい風速で限界レイノルズ数を迎えて抗力係数0.8程度を示し、それより高

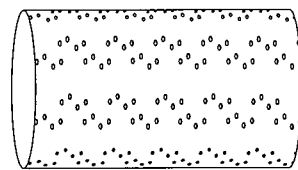


図8 模型 D_2 (インデント加工ケーブル)

表2 ケーブル模型諸元

モデル	直径 D (m)	表面粗度 k (μ m)	表面相対粗度 (k/D)	備考
D_1	0.15	3	2.0×10^{-5}	平滑
D_2	0.15	1 500	1.0×10^{-2}	インデント

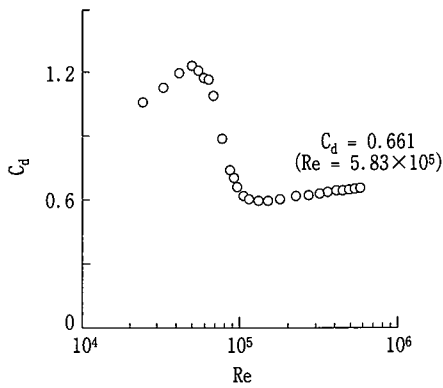


図9 模型D₂の抗力係数とレイノルズ数の関係

いレイノルズ数になる設計風速付近では少し増加し1程度の抗力係数となると予測される。本実験で使用する非一様な表面粗度を持つ場合、気流方向と表面粗度模様との位置的な関係の影響が予想されるが、事前の実験により、この影響は極めて小さいことを確認している。

インデント加工ケーブルD₂の抗力とレイノルズ数に関する実測値を図9に示す。測定を実施した上限の風速は55m/sであり、レイノルズ数に換算すると5.5×10⁵であった。ここで用いた表面形状を持つケーブルは、両者ともほぼ同じ特性を示すことが分かる。インデント加工ケーブルの臨界レイノルズ数はおよそ1×10⁵であり、抗力係数はおよそ0.6となる。この抗力係数は臨界レイノルズ数を超え、測定した風速の上限までほぼ一定となる。このレイノルズ数に対し変化の小さい抗力特性は、円柱でみられるはずのレイノルズ数による周辺流れの変化が大きく現れていないことを示唆している。従って、本表面形状を用いれば設計風速域においても抗力係数が0.7を上回らず、平滑な円断面と同様な設計が可能であることが把握できた。

4. インデント加工ケーブルの振動特性

4.1 レインバイブレーション制振実験

表面粗度を持つケーブルのレインバイブレーションに対する制振性を検討するため、降雨状態及び降雨のない状態での振動実験¹⁴⁾を実施した。模型縮尺による実験レイノルズ数の違いを避けるためにケーブル模型は実物大とした。ケーブル模型の諸元及び風洞実験の概略を表3、図10に示す。

振動応答測定に用いたケーブル長は3mで、模型はケーブル軸に関し鉛直面内直角方向に振動するように支持した。模型の振動系質量は7.8kg/mであり、固有振動数は0.45~1.25Hzの範囲、無風時の対数減衰率は0.003程度であった。無風時の対数減衰率は実ケーブルと同程度である一方で、質量は1/10程度と軽く、スクルーション数 S_c ($S_c = 2m\delta / \rho D^2$, m : 質量, ρ : 空気密度)が小さいため空力振動が起きやすい状態である。従って、振動応答の測定にはスクルーション数による補正を考慮しながら実施した。

表3 振動実験ケーブル模型諸元

モデル	質量 (kg/m)	振動数 (Hz)	対数減衰率 δ	スクルーション数 S_c
D ₁	7.8	0.45~1.25	0.003	約2
D ₂	7.8	0.45~1.25	0.003	約2

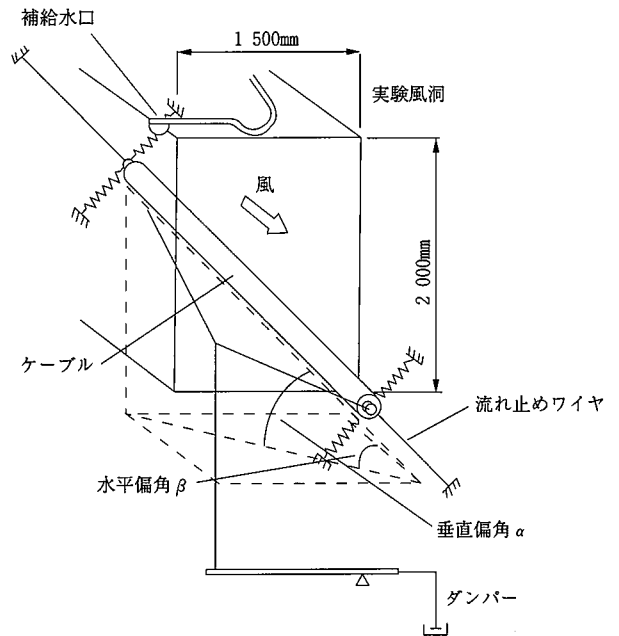


図10 風洞実験概要

ケーブルの姿勢は、振動の発生報告例が多い事例及び長大斜張橋での設置状態を考慮して定めた。即ち、降雨状態では鉛直面内の傾きが $\alpha = 20$ 度、鉛直面の風軸に対する偏角が $\beta = 45$ 度とし、降雨がない場合の振動に対しては、 $\alpha = 0$ 度、 $\beta = 30$ 度の姿勢を実験対象とした。ケーブルへの降雨方法は、ケーブル模型上部から模型に沿って水を補給する、いわゆる補給水の方法で実施した。補給する水量は別途行った実験¹⁵⁾で最も大きな振動応答が得られたものを適用した。

4.2 制振効果

4.2.1 降雨時の振動応答

図11、12に表面が滑らかな模型D₁及びインデント加工を施したケーブル模型D₂の降雨時の振動応答(A/D, A: 振幅, D: ケーブル径)を示す。模型D₁については、低次の振動数0.45Hzでは風速10m/s付近から大きな発散振動、いわゆるレインバイブレーションが発生している。また、5m/s付近においても振動応答が発生していることが分かる。10m/s付近から発生する発散振動は、高い振動数領域で発生する従来から確認されている振動とほぼ同様であるが、5m/s付近の振動はケーブルの長尺化に伴う固有振動数の低下の影響によるものと考えられる。振動数が0.73Hz場合、8m/sを超えた風速で大きな振動が発生し、1.25Hzでは振動応答は非常に小さくなる。

一方、インデント加工ケーブル模型D₂では、振動数0.45Hzでは5m/s付近の低い風速で励振自体は強くないものの、限定型の振動応答が観測された。この振動応答は低い振動数の場合に発生し、原型ケーブルの場合と同様に振動数依存性があると考えられる。10m/s付近からの高風速側の発散振動には制振効果が大きく現れ、0.59Hz以上の高い振動数の場合には振動応答は非常に小さく抑えられる。実験中のケーブルに形成される水路の観察の結果、インデント加工による周辺流の制振効果により、ケーブルを伝い落ちる水路の形成は所期の目的の通り抑制されているように見えた。

以上の実験は一様流中での結果であるため、更に乱流効果によって振動特性がどのように変化するかについても実験を行った。図13に乱流の乱れの強さとして約10%を与えた場合の実験結果を示す。

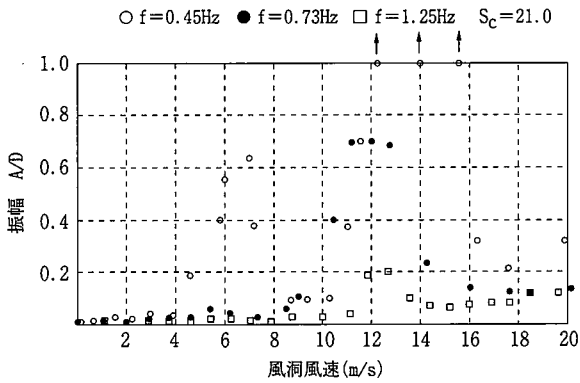


図11 模型D₁の振動実験結果(降雨状態、一様流中)

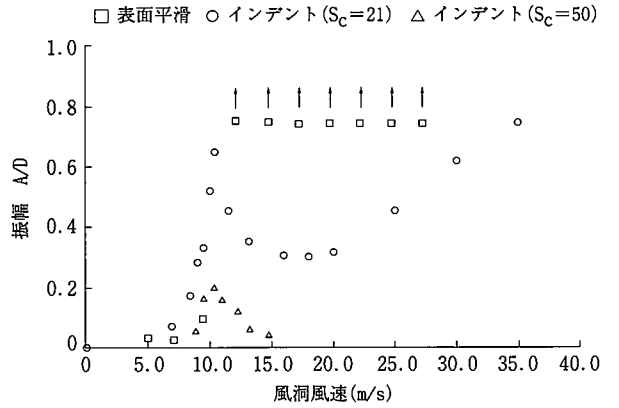


図14 模型D₂の振動実験結果(降雨のない状態、一様流中)

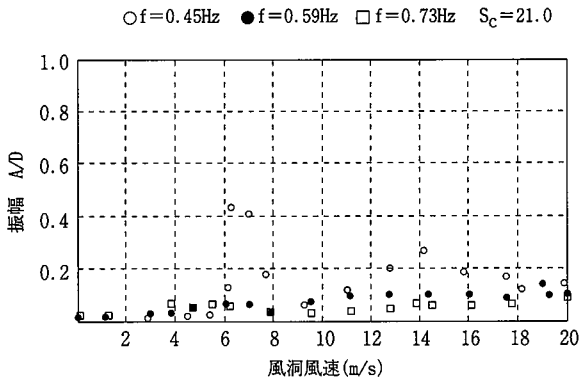


図12 模型D₂の振動実験結果(降雨状態、一様流中)

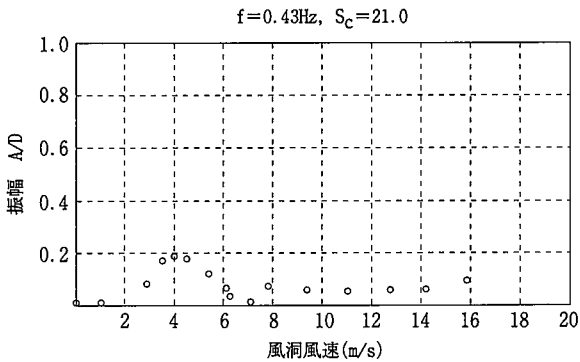


図13 模型D₂の振動実験結果(降雨状態、乱流中)

インデント加工ケーブルは、低振動数の場合一様流中の低風速領域では限定型の振動が発生するが、実橋レベルでの乱流中ではその振動振幅は1/2以下に減少し極めて小さくなる事が判明した。また、実橋において経年変化によりケーブル上面のインデント部分がほこり等で平滑化された場合を想定した実験も行い、上表面インデントが平滑となった程度では制振効果に変化はないことを確認した。

4.2.2 降雨のない状態の振動応答

二次元傾斜円柱では、円柱軸に沿う流れの存在により空力振動が発生すると指摘もあるため、降雨のない状態でも実験を行った。図14に傾斜円柱としてのインデント加工ケーブル模型D₂の振動応答を示す。この振動応答は比較的高い風速で発生するとされており、換算風速($f \cdot D/U$)で400程度の範囲で観測を実施した。振動応答は10m/s程度より発生し、風速の増加とともにゆるやかに振動が発達して行く。表面が平滑な模型D₁と比較すると、インデント加工ケー

ブルでは発散型の振動の発現する風速は30m/s程度に上昇する。スクリーン数が50程度となれば、振動応答は残るものの限定型の振幅も十分小さなものとなる。なお本実験は一様流中のもので、乱流の影響については検討していないが、一般的には乱流中では一様流中の応答を上回ることはないと考えられている。

4.3 圧力分布特性

離散的なインデント加工を施したケーブルは、平滑な表面と比べると静的特性やレインバイブレーション制振性が大きく異なるため、圧力分布特性を検討することによりその特徴を分析した。圧力の測定は、ケーブル円周方向に10度ピッチで36個所圧力孔を設け、順次スキャンして測定を行った。

図15、16に表面の平均圧力係数C_pを示す。表面が滑らかな原型ケーブル模型D₁では、レイノルズ数の増加に従い、側面での圧力の低下と後流側の剥離域で圧力の回復が徐々に起きていることが分かる。従って、流れの状況はレイノルズ数に応じ徐々に変化してい

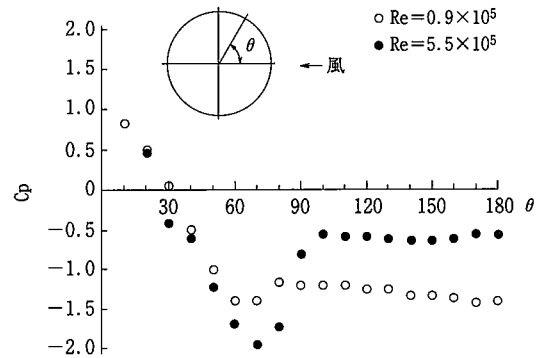


図15 模型D₁の圧力分布測定結果

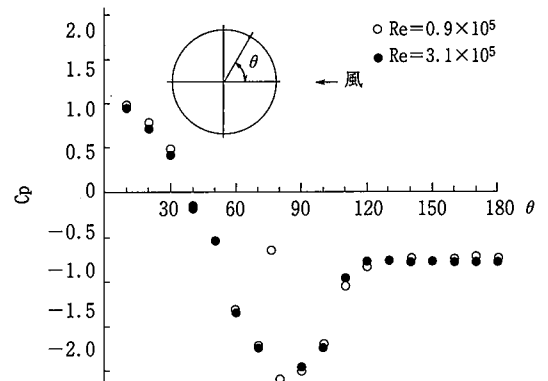


図16 模型D₂の圧力分布測定結果

る。一方、インデント加工ケーブル D_2 では、臨界レイノルズ数(0.9×10^5)より高いレイノルズ数領域では風速変化によらずほぼ同様の圧力分布を示し、表面が滑らかなケーブルの高レイノルズ数領域(5.5×10^5)の圧力分布とほぼ同様な分布形状を保持している。抗力係数もレイノルズ数の対応する範囲で0.6強を示していることから、インデント加工により、臨界レイノルズ数を越えた領域で一定の周辺流を実現できていることを示していると考えられる。

5. 制振ケーブルの製作

5.1 多々羅大橋への適用

多々羅大橋は、本州四国連絡橋尾道-今治ルートのうち、生口島と大三島を結ぶ斜張橋である。中央支間長890m、橋長1480mで、中央支間長はノルマンディー橋より34m長く、世界最大の斜張橋である(図17参照)。本橋では、中央支間長に対し側支間長が短いため、死荷重をバランスさせるように側支間端部にPC桁を配置した鋼-PC複合の3径間連続複合箱桁形式となっている。ケーブル形式は2面吊21段のマルチファン形式であり、ケーブルには被覆平行線ストランドが用いられた。

多々羅大橋では、橋梁規模の長大化に伴いケーブルも長尺化し、最長ケーブルでは長さが約460mとなり、最低次の振動数が約0.26Hzと既存の斜張橋に比べると著しく低下する。ケーブルの制振対策は不可欠であり、レインバイブレーションの制振を目的とした対策の検討¹⁰⁾を行った。その結果、ダンパーによる付加減衰方式で制振効果を確保するためには、ダンパーの取り付け位置が高くなり(桁上約4.5m)、装置や構造等の問題があるため、ケーブル自体の耐風安定性の向上を図る空力的対策を採用することが基本方針とされた。多々羅大橋ではケーブルの抗力係数 $C_d=0.7$ として設計し

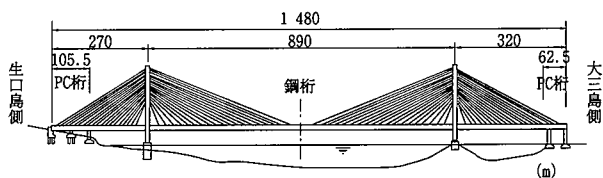


図17 多々羅大橋一般図



写真2 多々羅大橋インデント加工ケーブル

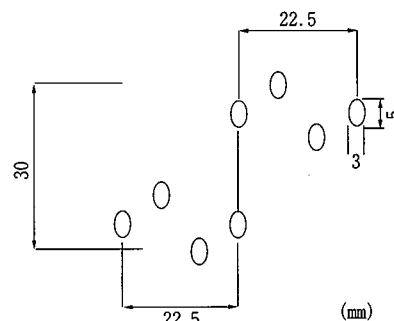


図18 インデント形状

ており、これまでの検討結果を踏まえ、空力対策断面として抗力が小さく制振効果の高いインデント加工ケーブル¹⁷⁾が選定された(写真2参照)。

5.2 ケーブルの製作

ケーブルは、引張強度 160kgf/mm^2 (1570N/mm^2)、直径7mmの亜鉛めっき鋼線にわずかの撚りを加えながら集束し、高密度ポリエチレンを押し出し被覆したもの(NEW-PWS)である。新日本製鐵は、中央径間側のケーブル約2000トンを製作した。ケーブル長は約110~460m、ケーブル外径は約110~170mmで構成されている。ケーブルへの表面加工は、ポリエチレン押し出し被覆後にケーブル表面にインデント加工を施す方法とした。図18にインデント加工の形状詳細を示す。

6. 結 言

斜張橋が長大化して1000m級となると、制振対策としてケーブル自体の耐風安定性を向上させる空力対策案の重要性が高まる。本論文では、長大斜張橋ケーブルに要求される特性に適応した空力対策案として新たに開発したインデント加工ケーブルについて述べた。

インデント加工ケーブルは、滑らかな面と粗度が集まる部分を組み合わせた模様状の粗度状況を持つケーブルで、設計風速領域において抗力係数が平滑な円断面と同等であり、レインバイブレーションの制振に有効である。このように、模様状の表面粗度を用いて表面に加工することにより周辺流を制御する本研究での方法は、今後の長大斜張橋ケーブルの制振対策のみならず、すべての円柱状の構造物への適用が可能と考えられ、今後応用技術の展開を図って行きたい。

なお、本制振ケーブルは多々羅大橋に適用され、架設完了後約1年間にわたり現地においてケーブルの振動観測が実施されたが、レインバイブレーションの発生は認められていないと報告¹⁸⁾されており、実橋においても制振効果が確認されている。

謝 辞

ケーブルの耐風性や制振対策の検討について、多大なる御指導を頂いた横浜国立大学 宮田教授・山田教授、並びに本州四国連絡橋公団・多々羅大橋架設共同企業体の関係各位に深く感謝の意を表します。また、風洞実験に関して協力していただいた住友重機械工業の関係者に感謝致します。

参考文献

- 1) 国土開発技術研究センター:斜張橋ケーブルの耐風性に関する検討報告書, 1989
- 2) 土木研究センター:斜張橋ケーブルの耐風性検討報告書, 1993
- 3) 樋上:斜張橋ケーブルのRain Vibration.日本風工学会誌, 27,17-28 (1986)
- 4) 岡内, 伊藤, 宮田:耐風構造, 丸善, 1977
- 5) 松本 ほか:斜張橋ケーブルのRainVibration発生機構における二つの要因についての考察, 第11回風工学シンポジウム論文集, 1990
- 6) 横山, 日下部:斜張橋ケーブルの風による振動と対策, 橋梁と基礎, 75-84(1989-8)
- 7) 米田:斜張橋ケーブルの風による振動, 第2回振動制御コロキウム Part A, 1993-8
- 8) Matsumoto,M., Hikami,Y., Kitazawa,M.:Cable Vibration and Its Aerodynamic/Mechanical Control, Cable-stayed and Suspension Bridge, Deauville, 1994-10
- 9) 松本 ほか:東神戸大橋の耐風設計, 橋梁と基礎, 35-43(1991-5)
- 10) 宮崎, 齋藤, 鈴木:斜張橋ケーブルの空力振動対策, 土木学会第48回年次学術講演会概要集, 1993
- 11) Flamond,O.:Rain-wind Induced Vibration of Cables, Cable-stayed and Suspension Bridge, Deauville, 1994-10
- 12) 宮田, 山田, 北條: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, 30-36(1993-9)
- 13) Miyata,T., Yamada,H., Hojo,T.:Experimental Study on Aerodynamic Characteristics of Cables with Patterned Surfaces, Journal of Structural Engineering, 40A, 1065-1076(1994)
- 14) 北條, 山崎, 宮田, 山田:抗力が小さく空力的に安定な斜張橋ケーブルの開発, 橋梁と基礎, 27-32(1995-6)
- 15) 北條:斜張橋ケーブルのレインバイブレーション特性とその制振対策に関する実験的研究, 日本風工学会誌, 50, 19-26(1992)
- 16) 藤原, 森山:多々羅大橋ケーブル制振対策, 本四技報, 31-41(1996-7)
- 17) Miyata,T. , Yamada,H. ,Fujiwara,T., Hojo,T.:Wind-resistant Design of Cables for the Tataro Bridge, IABSE symposium, Kobe, 1998
- 18) 藤原, 森山, 真辺:多々羅大橋ケーブル制振対策, 橋梁と基礎, 16-19(1999-5)