

風による斜張橋ケーブル振動の屋外観測

松本 勝*・林 泰一・白土博通*・八木知己*

後藤光理**・酒井精一郎*・大谷 純*

*京都大学大学院工学研究科環境地球工学専攻

**日本鉄道建設公団

要旨

本研究では、斜張橋ケーブルで観測されるレインバイブレーションなどの高風速渦励振の発生メカニズムを解明するために、屋外に大型ケーブル模型を設置して、その挙動を観測した。その結果、降雨の有無により強風時の大型ケーブル模型の応答特性に大きな違いが見られ、レインバイブレーションと考えられる振動応答も得られた。また、風洞内において傾斜ケーブル模型を用いた自由振動実験を行い、屋外観測との対応を調べた。

キーワード：斜張橋ケーブル、高風速渦励振、レインバイブレーション、屋外観測

1. はじめに

斜張橋は、1955年にスウェーデンの Stromsund 橋において本格的に導入されて以来、今日に至るまで、その架橋数が増えつづけてきた。斜張橋がここ数十年の間に、このように普及・発展してきた理由は、ケーブル・塔・主桁により構成される景観が優れていること、ケーブル配置・塔形状など、形態が多様で設計の自由度が大きいことなどが挙げられる。さらに、高強度ケーブルの出現、構造解析法の進歩、合理的で精度の高い架橋技術の発展などにより着実にその支間長を伸ばし続け、1999年5月には中央径間長世界最長の斜張橋として多々羅大橋が完成した。しかし、このような斜張橋の長径間化に伴い、傾斜ケーブルの空力振動現象が大きな問題となっている。

斜張橋の傾斜ケーブルは構造的に柔軟で構造減衰が小さいために、主塔や主桁に比べて風によって敏感に振動が励起される。代表的な振動現象としては、カルマン渦励振、ウェイクギャロッピング、高風速渦励振（レインバイブレーション、雨なし振動）、ギャロッピングなどが挙げられるが、特にレインバイブレーションによるケーブル振動が近年注目されている。

名港西大橋などの数多くの斜張橋において観測

されているレインバイブレーションは、降雨を伴う強風時に、無次元風速 $V/fD=20, 40, 80$ といった風速域で発現する風速限定型振動であり、カルマン渦励振による振動振幅よりも大きいと言われている。この振動が頻繁に発生すると、ケーブル定着点の金属疲労が促進されるため、橋梁が非常に危険な状態に陥ることも考えられる。

これらのケーブル振動を抑制するための対策としては構造的制振対策と空力的制振対策がある。現在のところ主流となっている構造的制振対策としては、ケーブル同士を相互に連結する方法（名港西大橋など）、並列ケーブルをスパーサーでつなぐ方法（呼子大橋など）、あるいはケーブル端部にダンパーを設置する方法（檀石・岩黒島橋におけるゴム製ダンパー、安治川橋梁・荒津大橋におけるオイルダンパーなど）といったものがある。しかし、これらの対策によって風による空力振動が完全に抑制されているわけではなく、ダンパーやケーブル定着部の疲労損傷、オイルの粘性の低下といった維持・管理の問題、さらには美観の問題などがあり、いくつかの課題が残されている。

他方、空力的制振対策には東神戸大橋における軸平行突起付きケーブル、多々羅大橋におけるディンプル付きケーブル、弓削大橋におけるV型溝付きケーブルなどがある。今後、斜張橋の更なる

長径間化が予想され、構造的制振対策では制振できないことも考えられる。従って、より有効な制振対策のためには、各種空力振動、特にレインバイブレーションの発生メカニズムを明確に究明することが必要である。

現在までに風洞実験などの結果から、レインバイブレーションの発生要因として、降雨時にケーブル表面に形成される水路(樋上, 1986)、ケーブル背後に形成される軸方向流・軸方向渦、カルマン渦放出の3次元性、軸方向渦とカルマン渦の干渉(Matsumoto, 1998)などが指摘されている。しかし、これらのことが実際の実橋ケーブル振動と、どのように対応するかなど未解明な点も多く、また、風洞内においては降雨による影響を正確に再現することが難しい。

これらの風洞実験における問題点を解決するために、実橋のケーブルを用いて観測を行い解析する方法が考えられるが、供用中の実橋では、交通上の問題や、計測機器の使用に制約が多くなる。そこで本研究においては、実橋スケールの大型ケーブル模型を屋外に設置して、風向・風速、降雨の有無などの違いによるケーブル模型の挙動を観測し、レインバイブレーションの発生メカニズムに関して考察を行った。

2. 観測概要

以下に大型ケーブル模型振動の屋外観測概要を述べる。

2.1 大型ケーブル模型概要

観測は和歌山県西牟婁郡串本町潮岬にある京都大学防災研究所附属潮岬風力実験所(海拔 50m)

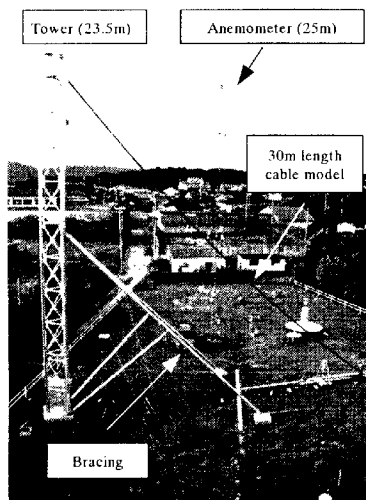


Photo 1 Completed setup of cable model

で行った。この地域は、毎年夏、秋には南西からの台風の影響を受けやすく、また、冬には北西風が卓越する。過去の研究(樋上, 1986)により、レインバイブレーションは降雨時に風が橋軸直角方向よりやや橋軸方向にずれた場合に、塔の風下側に位置するケーブル、すなわち風に対して下り勾配をもつケーブル(正姿勢)に多く発生することが分かっている。従って、これらの北西及び南西からの強風により、レインバイブレーションの発生が期待されるように、塔を西側にして大型ケーブル模型を東西方向に設置した。さらに、実際の斜張橋では、PE管を被覆したケーブルにレインバイブレーションが発生しやすいことが報告されている(Matsumoto et al., 1989)。そこで、アルミニウム管(厚さ 5mm)を、PE管(厚さ 5mm)で被覆した直径 0.11m、全長 30m の中空円柱(単位長さ重量は 59.4N/m)をケーブル模型として使用した。Photo 1 に大型ケーブル模型、及びそのサポート機構の外観を示す。ケーブル模型上端は塔の地表面からの高さ 21.1m の位置に固定されており、下端を東西方向に可動させることで、導入張力、及び地表面とのなす角を調節することができる。本観測では、初期ケーブル導入張力を約 17.6kN、地表面となす角を 40.8° に設定した。またケーブル模型と塔、及び地表面側の定着点は剛結されている。Table 1 に、無風時に測定された大型ケーブル模型の構造諸元を示す。単位長さ質量が小さいために、スクルーション数 Sc が実橋ケーブル (Sc 約 20~30) に比べて小さくなっているが、その分、大型ケーブル模型の振動が期待される。

Table 1 Dynamic properties of the cable model

Span length	30.0 (m)
Diameter	0.11 (m)
Mass per unit span length	69.4 (N/m)
Natural frequency (1st mode)	1.37 (Hz)
Natural frequency (2nd mode)	2.44 (Hz)
Logarithmic damping decrement (1st mode)	0.0079
Logarithmic damping decrement (2nd mode)	0.0045
Scruton number (1st mode)	6.534
Scruton number (2nd mode)	3.722

2.2 計測機器

大型ケーブル模型にはたらく張力、加速度を、それぞれロードセル及び加速度計により測定した。Fig.1に示すように、ロードセルはケーブル模型の地表面側定着点に連続して接続されている。また加速度計は模型下端から 2.8m の位置の模型表面に設置されており、ケーブル模型の面内及び面外振動の加速度を計測した。測定方法は、ロードセル及び加速度計から検出された電気信号を動歪計、ローパスフィルタ（設定値 20Hz）を介し、レコーダー（GRAPHTEC WR8500）でアナログ・デジタル変換、及び記録を行った。レコーダーのサンプリング周波数は 200Hz、データ数は 240000 個（20 分間）である。なお、面内振動とはケーブル模型と塔を含んだ面内での振動であり、面外振動とは面内振動と直角方向の振動を指す。

風向・風速は、大型ケーブル模型北側の鉄塔の地表面から 25m の位置に設けられた風車型風向風速計で測定されたデータ（サンプリング周波数 1Hz）を使用した（Photo 1 参照）。なお、風向は真北から時計回りに測った角度で定義し、 $0^\circ \sim 360^\circ$ 表示で示した。また、降雨量については、気象台潮岬測候所（標高 73m）で観測された、1 時間ごとの降雨量のデータを使用した。

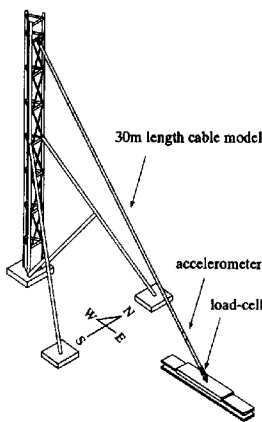


Fig. Position of accelerometer and load-cell

2.3 解析方法

計測されたケーブル模型の張力、加速度データ（20 分間）についてスペクトル解析をおこなった。また、その結果より得られた加速度のパワースペクトル密度をそれぞれの角振動数 $2\pi f$ (f : 振動数) の 4 乗で除したものを、大型ケーブル模型の変位のパワースペクトル密度と見なし考察を加えた。

時系列データの解析を行うに際して、フーリエ変換は最も一般的な解析手法である。しかし、フーリエ変換は積分核が $\exp(i\omega t)$ という定常な調和

振動であるために時系列中に数個の同じような情報が存在した場合、フーリエスペクトルでは 1 つにまとめられた情報になり、その情報の生起時刻を特定することは困難である。そこで、非定常な現象であると考えられる本大型ケーブル模型振動の解析手法として、時間と振動数の両方の情報を得るために用いられる手法の一つであるウェーブレット解析を採用した。ウェーブレット解析は時間と振動数の両方の領域で局在化の程度の良い関数を積分核として用いて変換を行うものである。本研究で使用した連続ウェーブレット解析は時系列データとウェーブレット関数系の畳み込み演算で表現され、時間と振動数のパラメータを変化させることによって時系列データ中の特定時間におけるスケール、すなわち振動数の逆数を連続的に捉えることができる。ウェーブレット関数を $\phi(t)$ 、時系列データを $s(t)$ 、スケールパラメータを a 、時間シフトを b とし、そのウェーブレット変換を $w(a, b)$ で表すと次のようになる。

$$w(a, b) = 1/a^{1/2} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \phi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) s(t) dt$$

ただし、*は複素共役を表す。

また、本研究においてはウェーブレット関数 $\phi(t)$ として、円柱後方の乱流の解析（石川ら、1995）や名港西大橋の傾斜ケーブルに対する振動解析（松本ら、1996）において、その有効性が確認されている Morlet のウェーブレットを採用した。

$$\phi(t) = \exp(ik_\phi t) \exp(-|t|^2/2)$$

ただし、 k_ϕ は振幅変調された正弦波の周波数あり、 $k_\phi = 2\pi$ とする。

なお、スペクトル解析の結果などで、解析データの違いによりケーブル模型の固有振動数が若干異なるのは、ケーブル模型に作用する風荷重が変化することで、ケーブル模型の張力が変化するためである。

3. 観測結果

ここでは、2000 年 11 月の計測開始から同 12 月末までに得られたデータの中から、南西及び北西の強風が発生したデータを 3 ケース選び、ケーブル模型振動の解析をおこなった。対象としたデータを Table2 に、ケーブル模型に対する風向を Fig.2 に示す。

これらのデータが計測された時間帯は風速が 10m/s を越し、計測で得られた加速度・張力など

Table 2 Observed data

	data ①	data ②	data ③
Wind velocity	12.28 m/s	15.14 m/s	15.54 m/s
Wind direction	SW	SSW	NW
Precipitation	0.0 mm/h	34.0 mm/h	0.0 mm/h

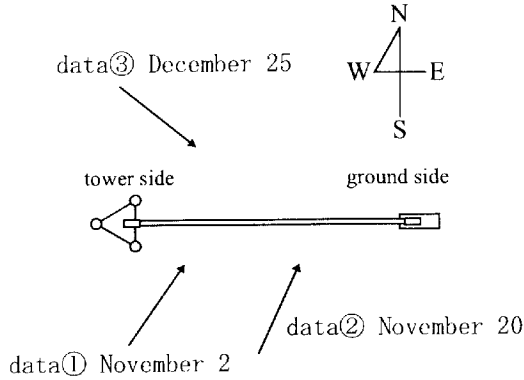


Fig.2 Wind direction of observed data

の応答値も風速が低いケースに比べかなり大きく、風向も風に対するケーブル模型の姿勢が正姿勢であったため、高風速渦励振やレインバイブレーションが発生した可能性が考えられる。また、今回の風向及び実橋で観測されるレインバイブレーションの振動方向を考えると、加速度計のデータは面内振動の加速度のみを対象とした。なお、Fig.3～Fig.8 中の日付時刻は計測が開始された時刻を表

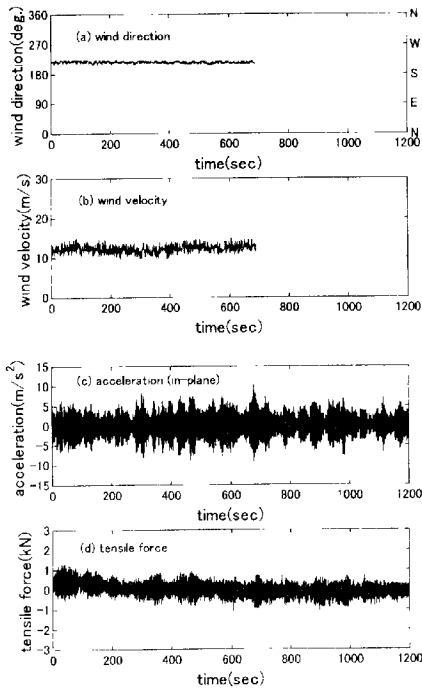


Fig.3 Time history of observed data (12:48, November 2, 2000, data ①)

しており、張力の時系列波形については、張力の変動分で表している。

3.1 11月2日のデータ（データ①）

このデータは台風が観測所を通過する数時間前に計測されたものであり、降雨は観測されていない。Fig.3(a)～(d)に風向、風速、面内加速度、変動張力データの時系列波形を示す（都合上、風向・風速データは計測開始から11分程度しか得られていない）。Fig.3(a)を見ると風向、風速はかなり安定していることがわかる。Fig.4(a)～(c)にそれぞれ面内加速度、面内変位、変動張力のパワースペクトル密度図を示す。面内加速度のスペクトル図を見ると、14.1Hz, 18.0Hzの面内7次、8次モードの固有振動数が卓越している。これらはその無次元風速が $V_r=7.9, 6.2$ に対応し、さらに、円柱のストローハル数を0.2とし、実際の風向偏角 β^* と平均風速に \cos 法則を適用した場合、カルマン渦放

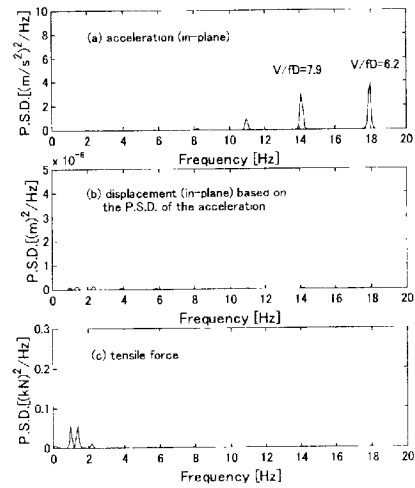


Fig.4 Power spectral density of observed data (12:48, November 2, 2000, data ①)

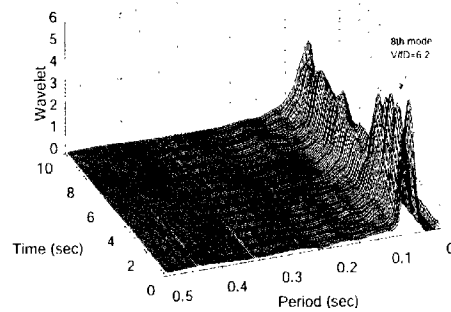


Fig.5 Wavelet analysis of the in-plane acceleration (12:48, November 2, 2000, data ①)

この卓越周波数はカルマン渦励振によるものと推察できる。しかし面内変位のスペクトル図では 1.37Hz、2.25Hz の面内 1 次、2 次の固有振動数が、張力のスペクトル図では 1.37Hz の面内 1 次の固有振動数が卓越している (Fig.4(b), (c)に見られる 1.07Hz の周波数成分は面外振動の 1 次モードの固有振動数である)。

次に Fig.3(c)の加速度データについてウェーブレット解析を行った結果を Fig.5 に示す。これを見ると、カルマン渦励振に対応する周波数成分が非定常に現れていることがわかる。

3.2 11月20日のデータ (データ②)

このデータは寒冷前線が観測所上空に発達した日に測定されたもので、計測された時間帯が含まれる 13時~14時の間には 34.0mm/h もの激しい雨が降った。Fig.6(a)~(d)に風向、風速、面内加速度、変動張力データの時系列波形を示す。Fig.5(d)を見ると、3.1 のデータ①と比較して張力の変動が大きくなっていることがわかる。Fig.7(a)~(c)にそれぞれ面内加速度、面内変位、変動張力のパワースペクトル密度図を示す。Fig.7(a)の面内加速度のスペクトル図を見ると、4.0Hz、5.96Hz の面内 3 次、4 次モードの固有振動数が卓越している。こ

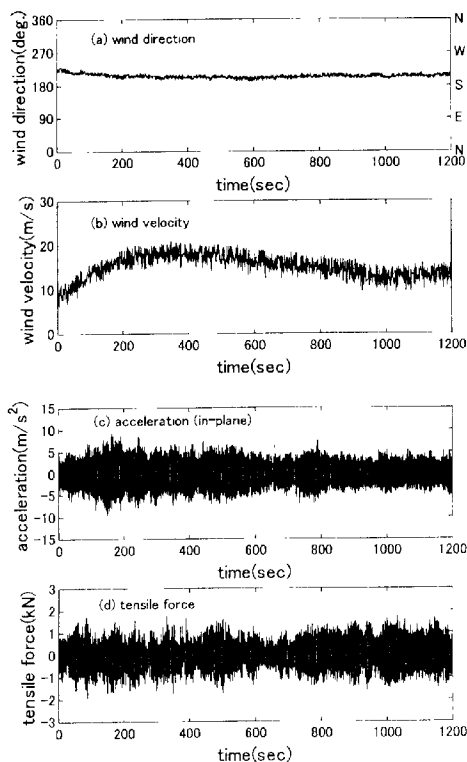


Fig.6 Time history of observed data (13:32, November 20, 2000, data②)

のケースも風向偏角 β^* と平均風速に \cos 法則を適用した場合、データ 1 と同様にカルマン渦放出周波数は約 20Hz 付近程度と考えられる。従って、データ①の Fig.4(a)と同様にカルマン渦励振による高次モードの振動数成分が現れる可能性があるが、面内 7 次、8 次の固有振動数成分 (14Hz、18Hz 付近) のスペクトルの値はデータ①と比較して小さくなっていることがわかる。また面内変位のスペクトル図では 4.0Hz、張力のスペクトル図では 8.0Hz と、共に面内 3 次モードの固有振動数成分 (ロードセルの設置方向の関係で、張力では面内方向の振動数は 2 倍で検出されている可能性がある) が卓越しており、データ 1 の場合とは異なっている。

以上のように、データ②の解析結果はデータ①の解析結果と大きく異なる。これは風向・風速がデータ①と②で類似していることを考慮すると、降雨による影響であると考えられる。また面内 3

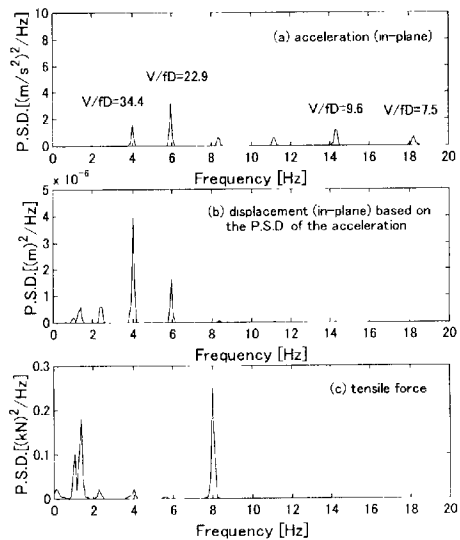


Fig.7 Power spectral density of observed data (13:32, November 20, 2000, data②)

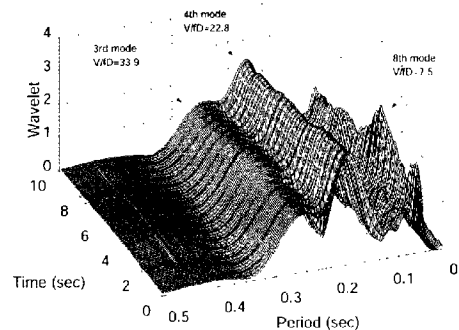


Fig.8 Wavelet analysis of the in-plane acceleration (13:32, November 20, 2000, data②)

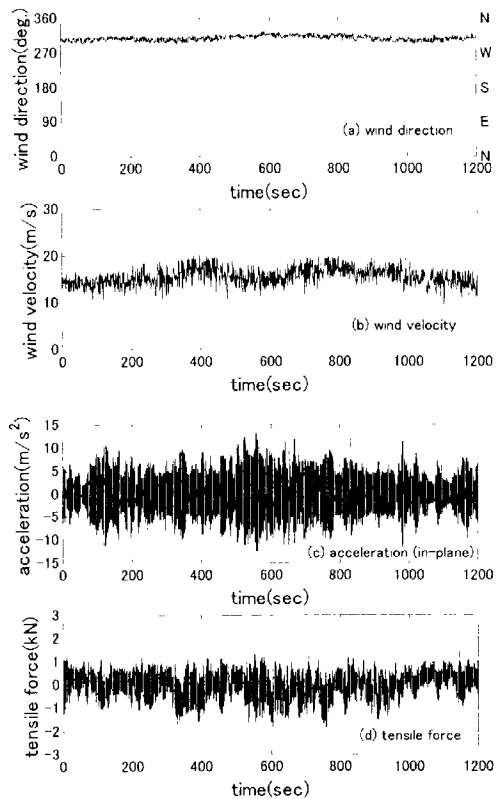


Fig.9 Time history of observed data
(19:06, December 25, 2000, data③)

次、4次(4.0Hz, 5.96Hz)の振動が無次元風速 $Vr=34.4, 23.1$ に対応することを考慮すると、データ②ではレインバイブレーションが発生していた可能性が示唆される。そこで、Fig.6(c)の加速度データについてウェーブレット解析を行った。その結果をFig.8に示す。これを見ると、3次、4次モードの振動数成分はほぼ定常であるが、カルマン渦励振によると思われる振動数成分は非定常に現れていることがわかる。

3.3 12月25日のデータ(データ③)

次に、風速はデータ①、②と同程度であるが風向がケーブル軸に対して対称となる北西風のデータについて解析を行った。なお、降雨は観測されていない。Fig.9(a)~(d)に風向、風速、面内加速度、変動張力データの時系列波形を示す。これを見ると、風速及び加速度の振幅はデータ②と同程度以上あるが、変動張力はデータ②よりも若干小さくなっている。Fig.10(a)~(c)にそれぞれ面内加速度、面内変位、張力のパワースペクトル密度図を示す。面内加速度のスペクトル図を見ると、降雨を伴わないデータ①のケースと同様に、カルマン渦励振により面内7次、8次の振動モードの周波数成分が卓越していると考えられる。

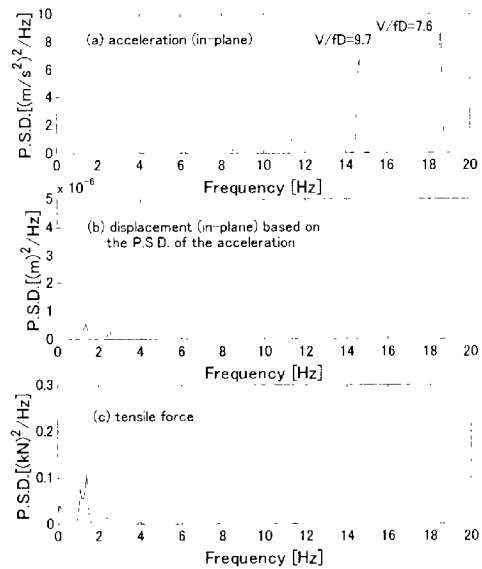


Fig.10 Power spectral density of observed data
(19:06, December 25, 2000, data③)

4. 風洞実験との対応

従来から、各研究機関において高風速渦励振、レインバイブレーションの空力振動特性、及び発生メカニズムを明らかにするために剛体模型や弾性体模型を用いて風洞実験が数多く行われてきた。そこで本研究においても剛体模型を用いた自由振動実験により斜張橋ケーブルの高風速渦励振、レインバイブレーションについて考察を行った。

4.1 実験概要

まず、円断面を有する直径 $D=54\text{mm}$ 、長さ 1500mm の剛体模型をコイルスプリングにより水平偏角 $\beta=45^\circ$ に支持し (Fig.11 参照)、自由振動実験を行った。模型の振動方向として、模型と主流方向を含む水平面に直交する方向を考え、ピアノ線によりローリング拘束を施し、ヒービングモードの振動を対象とした。気流は一様流、乱流 ($tu=6.5\%$) の2種類で行い、また降雨時の状況を再現するために模型上面に厚さ 1.6mm 、幅 3.6mm の人工水路を設置した。その位置は Fig.12 に示すように模型前縁側よみ点からケーブル表面に沿って測った角度 θ によって定義し、本研究においては $\theta=72^\circ$ とした。なお、模型が風洞壁を貫通している部分には直径 200mm の円形の窓が設けられている。

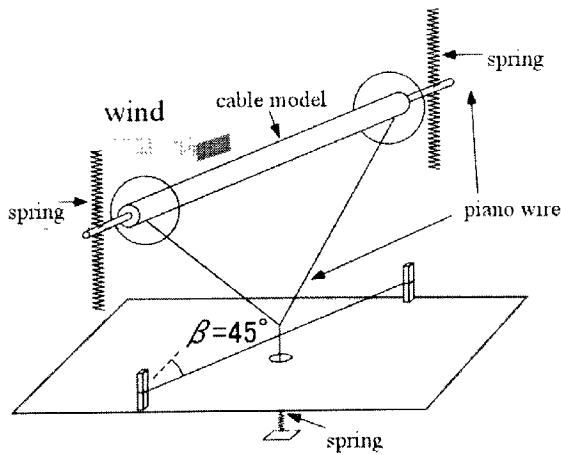


Fig.11 Setup of wind tunnel testing

4.2 自由振動実験結果

Fig.13(a)~(d)に風速応答振幅測定実験 (V-A 実験) の結果, Fig.14(a)~(d)に風速応答振幅減衰測定実験 (V-A- δ 実験) の結果を示す。

「一様流中, 水路無し」では V-A 図及び V-A- δ 図から発散型振動が見られる。

「一様流中, 水路有り」においても V-A 図から発散型振動が見られる。しかし, V-A- δ 図より無次元風速 $V/fD=40\sim 50$ 付近でやや高風速渦励振の傾向が見られるため, これが発端となって発散型振動へ移行していると考えられる。その結果, 「一様流中, 水路無し」と比較して発散型振動の発振風速が低下しているものと言える。

「乱流中, 水路無し」では, V-A 図を見ると, 一様流中に比べ発散型振動が抑えられており, 振

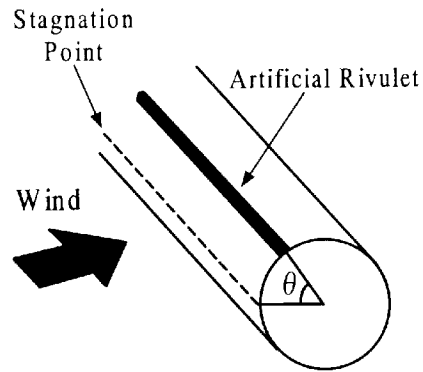


Fig.12 Position of artificial water rivulet

動が安定化しているが, V-A- δ 図からは, 無次元風速 $V/fD=40, 80$ 付近でやや高風速渦励振の傾向があることがわかる。

「乱流中, 水路有り」では, V-A 図から発散型振動が現れていることがわかる。V-A- δ 図を見ると, 無次元風速 $V/fD=40, 60$ 付近で局所的に減衰値が小さくなっており, それらの風速域で限定型振動が順次発生することで発散型振動のようになっているものと考えられる。また, 一様流中の発散型振動と比較して発現風速が低くなっていることが分かる。

従って, 傾斜ケーブル模型は乱流 ($Iu=6.5\%$), 及び水路により振動が発生しやすくなっているものと考えられる。乱流, 水路の効果が屋外における自然風, 降雨の効果であると考えると, この自由振動実験の結果は, 今回の屋外大型ケーブル模型の観測結果とよく対応していると言える。

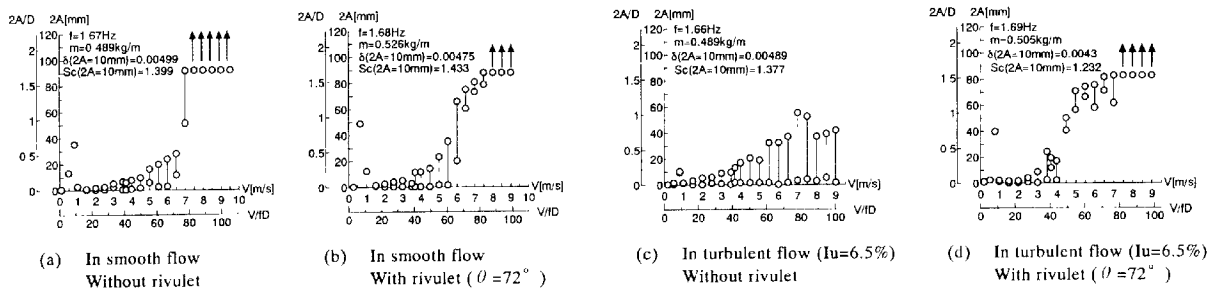


Fig.13 Velocity-amplitude diagrams of spring supported inclined cable model (With 200mm windows, $\beta = 45^\circ$)

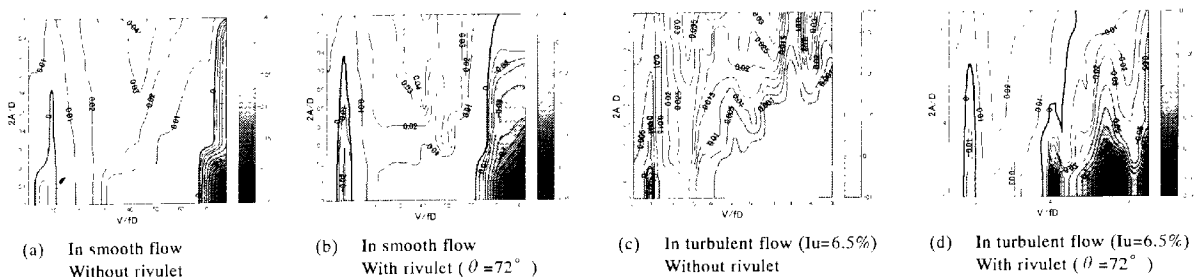


Fig.14 Velocity-amplitude-damping diagrams of spring supported inclined cable model (With 200mm windows, $\beta = 45^\circ$)

5. 結論及び今後の課題

屋外に大型ケーブル模型を設置して、その挙動を観測した結果、降雨の有無により強風時の大型ケーブル模型の応答特性に大きな違いが見られ、レインバイブレーションと考えられる振動応答も得られた。

斜張橋ケーブルのレインバイブレーションは、名港西大橋で観測されたのをきっかけに、その後、檀石・岩黒島橋、荒津大橋、天保山大橋などで観測され、実橋での観測を通して振動特性が調査されてきた。名港西大橋の観測において、レインバイブレーション発生時のケーブルの加速度データをウェーブレット解析した場合、2つの振動数のビート現象が報告されている (Matsumoto et al., 1999, Fig.15 参照)。しかし、本観測における Fig.7 に示すデータ②のケースを見ると、カルマン渦励振によると思われる振動数成分は非定常に現れているが、3次、4次モードのビート現象は得られなかった。更に、風洞実験で静止傾斜円柱模型後流域の変動風速をウェーブレット解析した場合、カルマン渦及び高風速渦励振に対応した低周波数成分が時間的に非定常に発生していることが指摘されている (Matsumoto et al., 2001, Fig.16 参照)。今後はケーブル模型周りの3次元な流れ場 (カルマン渦・軸方向渦・軸方向流など) とケーブル振動との対応を本大型ケーブル模型において調べてみる必要がある。

謝辞

本研究は、平成12年度科学研究費補助金・基盤研究(A)(2)「風によるケーブル振動の屋外観測並びにその挙動評価に関する研究」(課題番号12305030, 研究代表者 京都大学教授 松本 勝)によって行われたものである。

参考文献

- 樋上瑠一 (1986): 斜張橋ケーブルの Rain Vibration, 日本風工学会誌第27号
- 石川 仁・木谷 勝・望月 修 (1995): ウェーブレット変換による乱流後流の解析, 日本機械学会論文集 (B編) 61巻 587号
- Matsumoto, M., Yokoyama, K., Miyata, T., Fujino, Y. and Yamaguchi, H. (1989): Wind-induced cable vibration of cable-stayed bridges, Proc. Of Japan-Canada Joint Workshop on Bridge aerodynamics

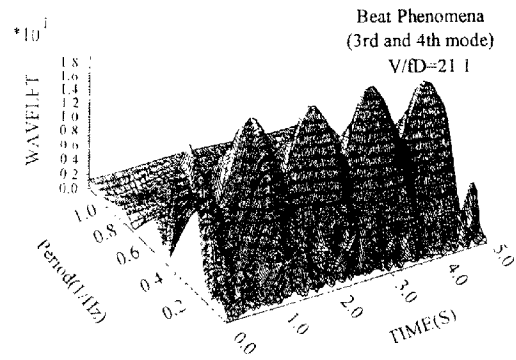


Fig.15 Beat response of cable of Meiko West Bridge (see Matsumoto et al., 1999)

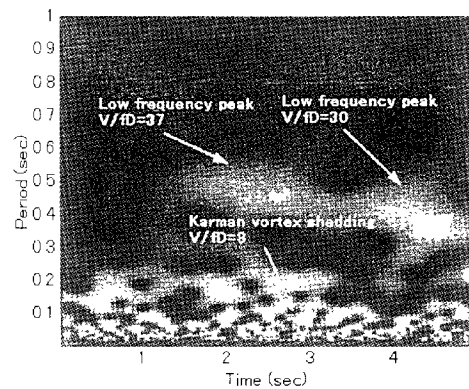


Fig.16 Wavelet analysis of fluctuating wind velocity in the wake of stationary inclined circular cylinder (see Matsumoto et al., 2001)

松本 勝・金村 宗・大東義志・佐久間智・井上 浩男 (1996): 実橋観測されたケーブルの空力弾性挙動とウェーブレット解析, 第14回風工学シンポジウム論文集

Matsumoto, M., Shigemura, Y., Daito, Y. and Kanamura, T. (1997): High speed vortex shedding vibration of inclined cables, International seminar on cable dynamics

Matsumoto, M. (1998): Observed Behavior of Prototype Cable Vibration and its Generation Mechanism, Proceedings of the international symposium on advances in bridge aerodynamics

Matsumoto, M., Yagi, T. and Tsushima D. (1999): Inclined Cable Aerodynamics-Velocity Restricted Response At High Reduced Velocity, Third International Symposium on Cable Dynamics, pp.91-96

Matsumoto, M., Yagi, T., Goto, M. and Sakai, S. (2001): Cable Aerodynamic Vibration at High-reduced Velocity, Fourth International Symposium on Cable Dynamics

Field Observation of The Full-scale Cable Model

Masaru MATSUMOTO*, Taiichi HAYASHI, Hiromichi SHIRATO*, Tomomi YAGI*,
Mitsutaka GOTO**, Seiichiro SAKAI*, Jun OHYA*

*Department of Global Environment Engineering, Graduate School of Engineering, Kyoto University

**Japan Railway Construction Public Corporation

Synopsis

A single full-scale cable model using 30m long polyethylene pipe for cable-stayed bridges was exposed to natural wind in order to investigate the 3-D wind-induced behavior and to clarify the mechanism of rain-wind induced vibration. Consequently the rainfall induced the rivulet on the cable surface, which makes the cable model more sensitive aerodynamically.

Keywords: cables of cable-stayed bridges, high speed vortex shedding, rain vibration, field observation