

屋外観測および風洞実験による傾斜ケーブルの空力振動に関する研究

松本 勝*・白土博通*・八木知己*・林 泰一・

酒井精一郎**・大谷 純***・岡田太賀雄*・大石孝弘*

*京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻

**愛媛県

***特許庁

要旨

斜張橋ケーブルにおける空力振動現象の解明のため、筆者らは 2000 年から大型傾斜ケーブル模型による屋外観測を行っている。これまで、風洞実験において振動応答の類似性を確認し、その発生メカニズムについての解明が進められているものの、傾斜ケーブル周りの流れ場は 3 次元性が強く、模型端部の条件に振動応答が敏感であることや、降雨の状況の再現性、自然風の乱れによる応答評価の問題など、風洞実験に基づいた研究手法では解明が困難な要素が残されている。そこで、実際の気象条件のもとで観測された振動現象について考察を行った。さらに風洞実験によって、剛体ケーブル模型を用いて静的空気を測定し、傾斜ケーブルのギャロッピングの発現について考察を加え、斜張橋ケーブルの空力振動現象について考察を行った。

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，ギャロッピング，屋外観測

1. はじめに

近年，世界各地で建設されている長大斜張橋において，その傾斜ケーブルの空力振動，特にレインバイブレーションの問題が解決されておらず，その制振技術の開発，もしくはその発生メカニズムの解明が急速に進められている。

斜張橋ケーブルにおける代表的な空力振動現象として，カルマン渦励振，レインバイブレーション（高風速渦励振）等が挙げられる。カルマン渦励振は，ケーブルの固有振動数と，カルマン渦放出周波数が近接したときに生じる。レインバイブレーションは，降雨を伴った強風時に激しく振動する空力現象であり，その発生要因として，降雨時にケーブル表面に形成される水路，風向に対して傾斜していることに起因する軸方向流，カルマン渦放出の非定常性，3 次元性，低周波数成分の渦などが指摘されている（Matsumoto et al., 1999）。また，風が橋軸直角方向よりやや塔側にそれた方向から吹く場合に発生しやすいこと（樋上, 1986），

ある特定の無次元風速域で発生する傾向があることが確認されている。しかし，未だ斜張橋ケーブルに生じている現象を完全に説明できておらず，現象の解明は急務の課題である。

そこで筆者らは，2000 年に京都大学防災研究所潮岬風力実験所に実橋スケールの大型ケーブル模型を設置し，実際の気象条件の下で振動観測を行っている。この観測により，2000 年度においてレインバイブレーションと考えられる振動現象が確認されており（松本ら，2001，Matsumoto et al., 2001），2001 年度には台風接近時におけるギャロッピングと考えられる振動現象が確認されている（松本ら，2002a,b）。

本研究では，計測された全データについて風速と振幅の関係を図式化し，比較的大きな振動が得られたものについて上記の振動現象と比較ながら考察を行った。さらに，風洞実験においてケーブル模型の後流域に穴あきスプリッタープレートを挿入することで，レインバイブレーションの発生要因とされる軸方向流と類似した効果を再現し，

軸方向流の効果について考察を行った。これらの考察から、斜張橋ケーブルにおける空力振動現象の発生メカニズムの解明を試みた。

2. 観測概要

2.1 大型ケーブル模型概要

観測は京都大学防災研究所附属潮岬風力実験所（海拔 50m）で行った。この地域は台風および季節風の影響で一年を通じ比較的風が強く、ケーブル模型の振動観測に適しているものと考えられる。

実際の橋梁に使用されている傾斜ケーブルは、鋼線の束を PE 管で被覆したものが多く使用されており、PE 管で被覆したものはレインパイプ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）。本研究では、振動が励起されやすいように、構造減衰、単位長さ重量が小さいケーブル模型を使用することにした。以下に本研究で用いた 3 種類のケーブル模型の構造等を示す。

1 つ目は、2000 年 11 月から 2001 年 8 月にかけて設置したもので、アルミニウム管（直径 110mm、長さ 4000mm、厚さ 5mm）7 本と、同様の構造のアルミニウム管（長さ 2000mm、直径 150mm、厚さ 5mm）1 本を主材とし、PE 管（厚さ 5mm）で被覆した全長 30m の中空円柱（単位長さ質量 6.06kg/m）をケーブル模型として使用した。以下このケーブル模型をケーブル模型 A と呼ぶ。

2 つ目は、2001 年 8 月から 2002 年 10 月にかけて設置したものであり、アルミニウム管（厚さ 5mm）を PE 管（厚さ 5mm）で被覆した直径 0.16m、長さ 0.50m の中空円筒エレメント 58 個を外形材として、心材のワイヤーケーブルにつなげた全長

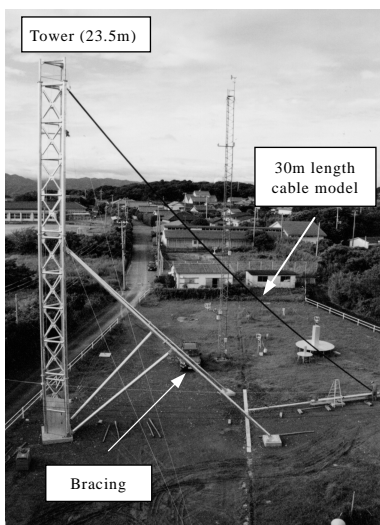


Photo 1 Completed setup of cable model

30m のケーブル模型（単位長さ質量 11.46kg/m）である。なお、各エレメント間の隙間は防食用ポリ塩化ビニル粘着テープで埋めている。このような構造にすることで、曲げ剛性が小さくなり、また、弦の振動に近くなるものと考えられる。以下このケーブル模型をケーブル模型 B と呼ぶ。

3 つ目は 2002 年 11 月から設置したものであり、アルミニウム管（直径 150mm、長さ 4000mm、厚さ 5mm）7 本と、同様の構造のアルミニウム管（長さ 2000mm、直径 150mm、厚さ 5mm）1 本を主材とした全長 30m のケーブル模型（単位長さ質量 6.5kg/m）を使用した。なお、模型表面にはラッカーにフラットベースを混ぜた塗装を施すことで PE 管と同様の撥水性を持たせている。以下、このケーブル模型をケーブル模型 C と呼ぶ。

大型ケーブル模型は塔を西側にして東西方向に張られており、ケーブル模型上端は塔の地表面からの高さ 21m の位置に固定されている。また、ケーブルと地表面がなす鉛直角 α はおよそ 45° である（Photo 1 参照）。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。

なお、Table 1 に、これらのケーブル模型の構造諸元をまとめたものを示す。いずれも Sc 数は実橋ケーブルの Sc 数と比較すると小さくなっている。

Table 1 Structural characteristics of full-scale inclined cable model

cable length (m)	30
cable diameter (m)	0.11
mass per length (kg/m)	6.06

	out-plane			in-plane		
	frequency (Hz)	log_damping δ	Sc	frequency (Hz)	log_damping δ	Sc
1st mode	1.07	-	-	1.37	0.00790	6.53
2nd mode	2.25	-	-	2.44	0.00450	3.72
3rd mode	3.81	-	-	4.00	-	-
4th mode	5.57	-	-	5.96	-	-

(2000/09/25)

a) Cable model type A

cable length (m)	30
cable diameter (m)	0.16
mass per length (kg/m)	11.46

	out-plane			in-plane		
	frequency (Hz)	log_damping δ	Sc	frequency (Hz)	log_damping δ	Sc
1st mode	0.78	-	-	0.78	-	-
2nd mode	1.56	-	-	1.56	0.00510	3.81
3rd mode	2.34	-	-	2.34	-	-
4th mode	3.12	-	-	3.12	-	-

(2001/08/10)

b) Cable model type B

cable length (m)	30
cable diameter (m)	0.15
mass per length (kg/m)	6.50

	out-plane			in-plane		
	frequency (Hz)	log_damping δ	Sc	frequency (Hz)	log_damping δ	Sc
1st mode	0.98	0.03934	18.57	1.46	0.02782	13.13
2nd mode	2.34	0.01702	8.03	2.64	0.00937	4.42
3rd mode	4.59	0.00351	1.66	4.88	-	-
4th mode	7.42	-	-	7.81	-	-

(2002/11/01)

c) Cable model type C

また、面内、面外 1 次モードの構造減衰が他のモードと比較して大きくなっている。また、ケーブル模型 A, C は各モードの固有振動数が 1 次モードの倍数になっていないが、これはケーブル模型 A, C は模型の構造上、梁の効果が現れているものと考えられる。

2.2 計測機器

大型ケーブル模型の振動を、ケーブル表面に設置した加速度計により測定した。加速度計は地表面から高さ 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測定した。加速度計から検出された電気信号は動歪計により検出し、40Hz に設定したローパスフィルタを介し、レコーダー (GRAPHTEC WR8500) でアナログ・デジタル変換して記録されている。レコーダーのサンプリング周波数は 200Hz であり、常時計測を行っている。

風向・風速は、大型ケーブル模型の北東に位置する角柱上の、地表面から高さ 10m の位置に設置された超音波風向風速計により測定し、加速度計のデータと同時記録 (サンプリング周波数: 200Hz) を行った。なお、風向は真北から時計回りに測った角度で定義し、 $0^{\circ} \sim 360^{\circ}$ で表示している。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。

2.3 解析方法

大型ケーブル模型の振動振幅を評価するに際し、スペクトル解析で顕著に卓越した周波数 (固有振動数) に対応した単一モードの振動を仮定した。そして、デジタルバンドパスフィルタにより加速度時系列データから卓越振動モードに対応した加速度成分を抽出し、得られた時系列データを $\omega^2 = (2\pi f_n)^2$ で除した値を加速度計設置位置の変位データとした。そして、模型全体の振動形状を sin 波と仮定し、加速度計設置位置の変位データから最大振幅となる腹の位置の変位データを求めた。そして、振動モード別に、20 分間における平均風速、および平均風向と、平均倍振幅の関係を示し、そこから平均倍振幅の大きいデータに着目してより詳細に解析を行った。各卓越モードの振動の軌跡をプロットしたりサーージュ図を示し、模型の 2 次元的な振動方向特性を評価した。なお、リサーージュ図中に示す実線は、模型前縁側のよどみ点とケーブル模型中央を結んだものであり、抗力が卓越する方向であると考えられる。その直角方向に点線を設けているが、これはギャロッピング、渦励振等が最も振動しやすい方向と考えられる。

3. 観測結果

3.1 ケーブル模型 A における応答解析

ここでは、2000 年 11 月から 2001 年 2 月までのケーブル模型 A における観測記録について示す。平均風速 - 平均倍振幅の図 (Fig.1 参照) より、面

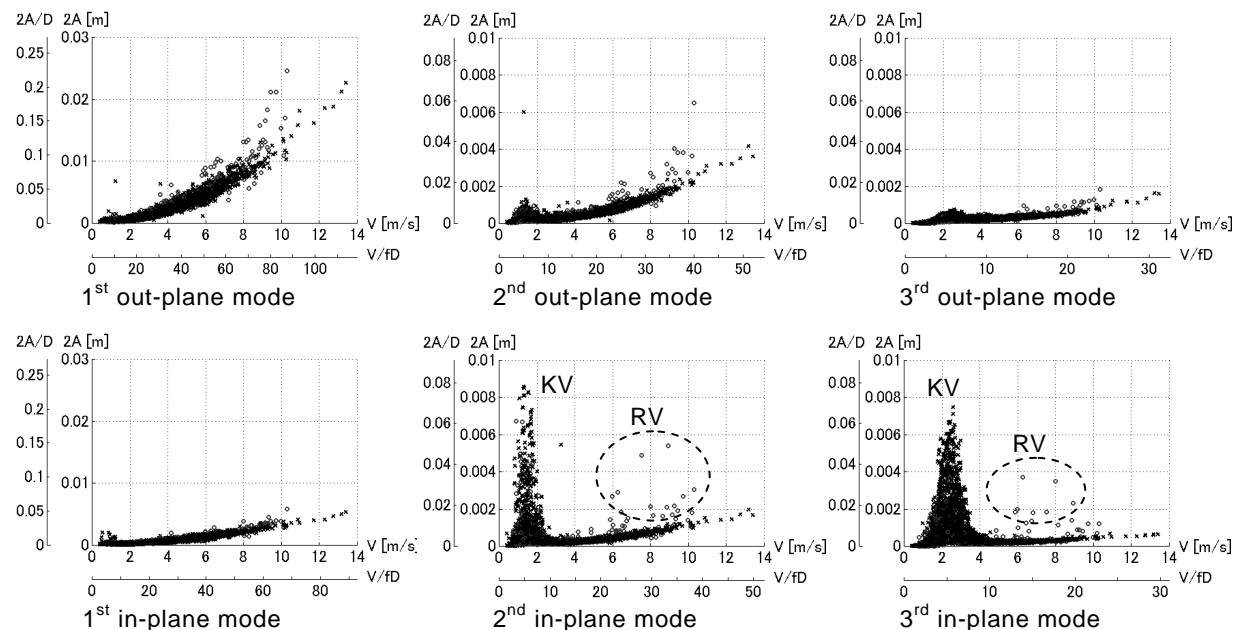


Fig.1 Velocity - amplitude diagrams for Type A model, where o: with rainfall, x: without rainfall, KV: Karman vortex-induced vibration, RV: rain-wind induced vibration

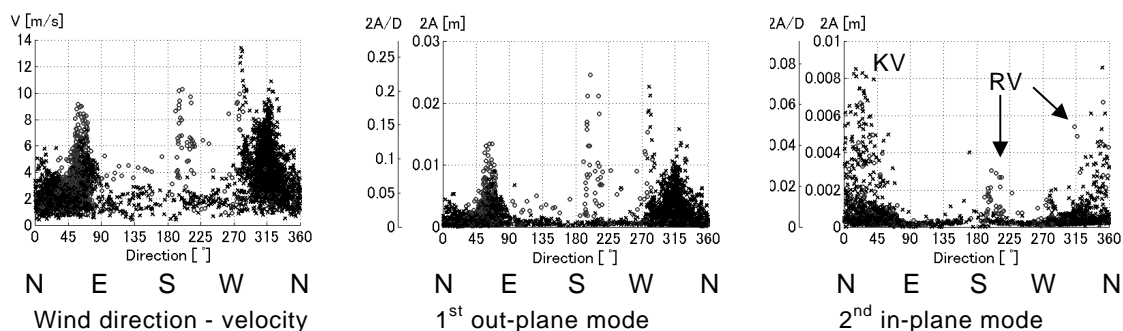


Fig.2 Wind direction - velocity diagram and wind direction - amplitude diagrams for Type A model, where O: with rainfall, x: without rainfall, KV: Karman vortex-induced vibration, RV: rain-wind induced vibration

Table 2 Weather conditions of analyzed data

	case1	case2
mean wind velocity (m/s)	8.1	7.67
mean wind direction (deg.)	198.9(SSW)	316.3(NNW)
turbulence intensity (%)	40.9	30.1
rainfall (mm/h)	34	1.5

内 2, 3 次モードのカルマン渦励振が顕著に現れていることが分かる。また、降雨時に振幅が大きくなる傾向があり、特に面内 2 次, 3 次モードでは風速限定型振動の傾向が見られる。さらに、平均風向-平均倍振幅の図 (Fig.2 参照) より、降雨を伴う場合、SSW (南南西) から風が吹く時に変位が大きくなっている。降雨時にケーブル模型が下り勾配となるような風向の時に特定の風速域で振幅が大きくなる傾向が見られ、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。

そこで、降雨時に平均倍振幅が大きくなっているデータに着目して各種解析を行った。ここでは比較のために 2 種類の観測記録について示す。ケース 1 は、過去の研究 (松本ら, 2001, Matsumoto et al., 2001) において確認されたものであり、レインバイブレーションと考えられる振動現象が得

られている。ケース 2 は本研究において得られたものであり、平均風速 - 平均倍振幅 (Fig.2 参照) において風速 7.5m/s 付近で面内振動振幅が大きくなっているデータである。なお、過去の研究において確認されたケース 1 において、解析を行った際に用いた風速計は模型北側の鉄塔の地表面から高さ 25m の位置に取り付けた風車型風向風速計であるが、今回の解析においては風向、風速データを全て統一するために、模型北東側に位置する角柱の地表から 10m の高さに設けられた超音波風向風速計によるデータを使用している。

各ケースにおける 20 分間の平均風速、平均風向、乱れ強度、および 1 時間あたりの降水量を Table 2 に示す。平均風速はいずれも 8m/s 程度、風向は橋軸に対してほぼ対称であり、共にケーブル模型が正姿勢となる風向である。従って、風向、風速の条件はほぼ同じと考えてよい。なお、このような風向の時、実橋ケーブルではレインバイブレーションが多く観測されている。

次に、Fig.3 にケース 1 において振動が卓越しているものと考えられる面内 3 次モードの加速度の時刻歴波形、及び振幅が大きくなっている 940 ~

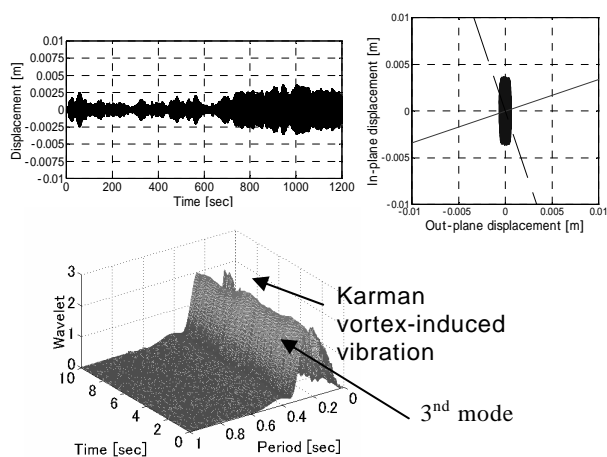


Fig.3 Response of 3rd in-plane mode, displacement locus of 3rd mode and wavelet analysis of in-plane acceleration (Case 1)

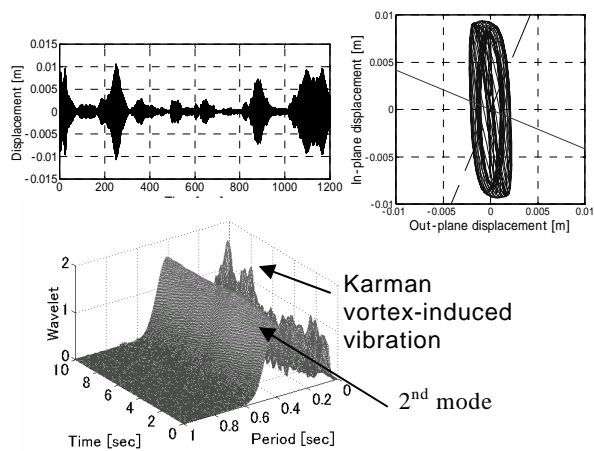


Fig.4 Response of 2nd in-plane mode, displacement locus of 2nd mode and wavelet analysis of the in-plane acceleration (Case 2)

950 秒におけるウェーブレット解析結果とリサージュ図を示し, Fig.4 にケース 2 において振動が卓越しているものと考えられる面内 2 次モードの加速度の時刻歴波形, 及び振幅が大きくなっている 1090 ~ 1100 秒におけるウェーブレット解析結果とリサージュ図を示す。

ケース 1 については, Fig.3 のウェーブレット解析結果より, 3 次モード ($V/fD=17.6$) に対応するピークが見られ, ほぼ定常であった。また, カルマン渦の周波数成分は非定常に現れている。ケース 2 については, Fig.4 のウェーブレット解析結果から, 2 次モード ($V/fD=27.9$) に対応するピークと 3 次モード ($V/fD=16.6$) に対応する弱いピークが見られ, 2 次モードについてはほぼ定常であった。また, ケース 2 についてもカルマン渦の周波数成分は非定常に現れている。無次元風速に換算すると, それぞれ, $V/fD=27.9, 16.6$ となることから, ケース 1 と同様, レインパイブレーションである可能性が示唆される。また, リサージュ図を

見ると, ケース 1, 2 について, 2, 3 次モードで比較的点線に沿った定常的な面内振動であることが分かる。

以上のことより, ケース 1, 2 については, 振動状況に相似性が見られる。また, 風向を考えると上面水路が形成されやすいことが考えられ, 従ってケース 2 の振動もレインパイブレーションの可能性が考えられる。水路の形成については目視による確認は行っていないが, ケース 1 は降水量が 34.0mm/h と比較的多い降水量であるのに対して, ケース 2 では降水量は 1.5mm/h と少ないことから, わずかな降水量であっても空力振動特性が不安定化することが分かる。

3.2 ケーブル模型 B における応答解析

ここでは, 2001 年 8 月から 2002 年 3 月及び, 2002 年 8 月末から 2002 年 9 月までのケーブル模型 B における観測記録について示す。Fig.5 に平均風速 - 平均倍振幅, Fig.6 に平均風向 - 平均倍振

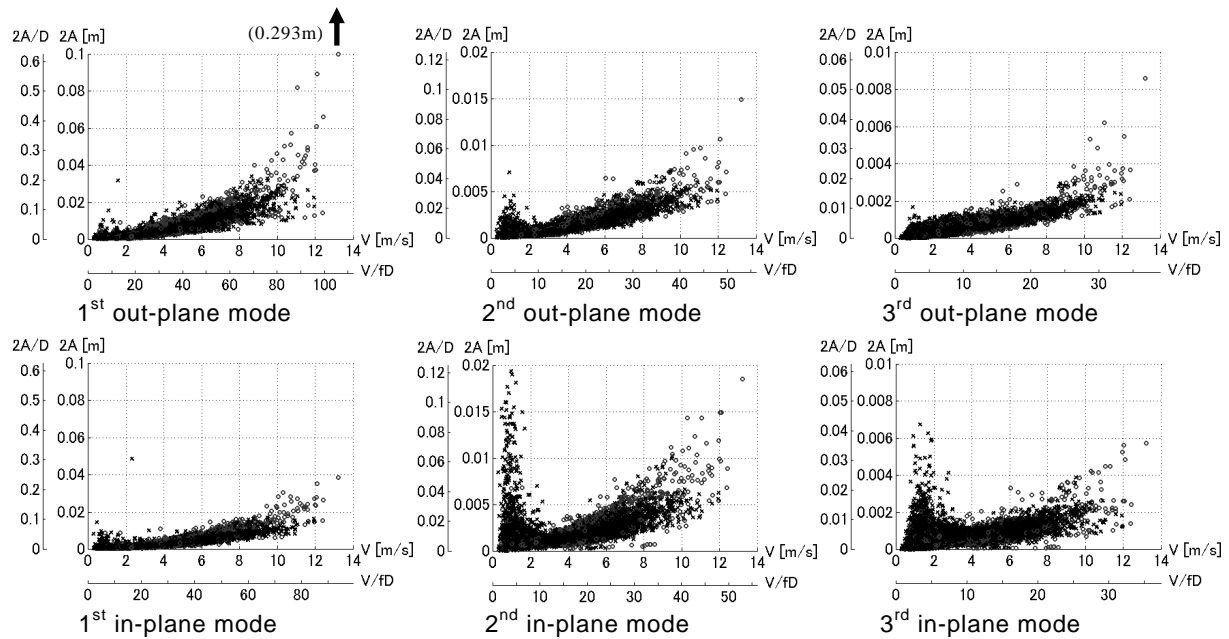


Fig. 5 Velocity - amplitude diagrams for Type B model, where o: with rainfall, x: without rainfall

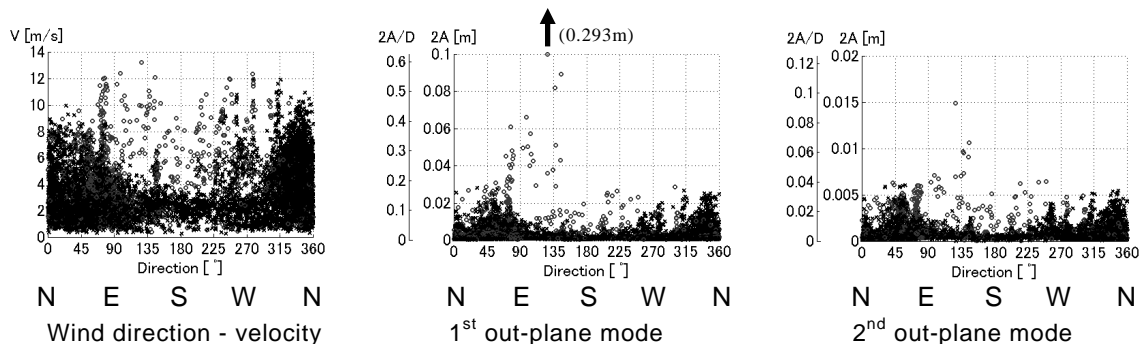


Fig. 6 Wind direction - velocity diagram and wind direction - amplitude diagrams for Type A model, where o: with rainfall, x: without rainfall

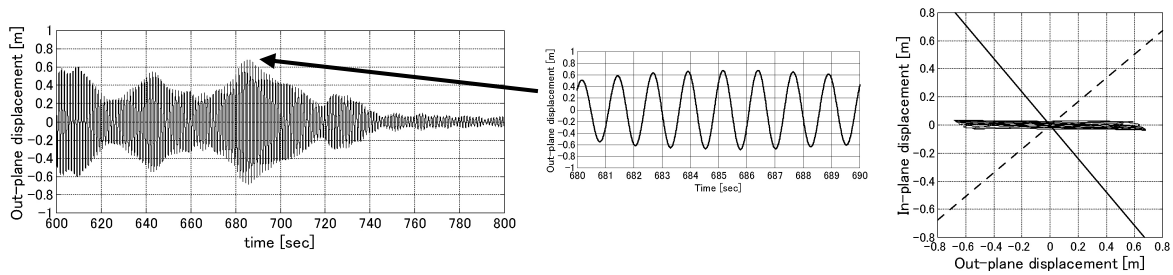


Fig.7 Response of 1st out-plane mode and displacement locus of 1st mode (case 3)

幅の関係を示す。Fig.5 より、カルマン渦励振は面内方向でよく現れていることが分かる。また、高風速域において降雨ありの状況で振幅が大きいものがいくつか見られるが、これらのプロットは2001年8月に通過した台風11号によるものであり(松本ら, 2002a,b), 振幅が極端に大きくなっていることが分かる。台風11号の通過時における風向は126°(SE)であり、ケーブル模型が風向に対して上り勾配であり、上面水路は形成されていない。また、その時の振動現象がギャロッピングが高風速渦励振かの特定には至っていない。

そこで、台風通過時の中で特に大振幅振動が観測されたデータと平均風速が高く、降水量が多い気象条件の下、水路が形成される可能性のある下り勾配であるデータを選び、両者を比較検討した。前者のデータをケース3、後者のデータをケース4とする。各ケースにおける20分間の平均風速、平均風向、乱れ強度、及び1時間あたりの降水量をTable 3に示す。ただしケース4における風向データは、風速計のキャリブレーションの問題により誤差を含んでいる可能性があるため参考値として扱うが、風向に対してケーブル模型は下り勾配であったと考えられる。

ケース3について、Fig.7に振幅が卓越していると考えられる面外1次モードにおいて最も振幅が大きくなっている時間帯600秒~800秒の200秒間における振幅の時刻歴波形及び、その中でも最大の振幅が得られた時間帯である680秒~690秒の10秒間におけるリサージュ図を示す。このときの平均風速は16.7m/sであり、無次元風速では $V/fD=133.8$ となる。また、リサージュ図を見て分かる通り、面内方向にはほとんど振動していない。風向を考えると、面内振動が現れるはずであるが、これは、ケーブル模型の構造上面内1次モードの構造減衰が他のモードに比べて高いことが影響しているものと考えられる。さらに、Fig.8に600秒~800秒における10秒毎の平均風速と乱れ強度を示す。これにより、平均風速が大きく、また、乱れ強度が小さくなった際に大振幅で振動していることがわかる。

Table 3 Weather conditions of analyzed

	case3	case4
mean wind velocity (m/s)	13.2	10.3
mean wind direction (deg.)	126.0(SE)	299.5(NW)
turbulence intensity (%)	40.8	46.3
rainfall (mm/h)	37	24

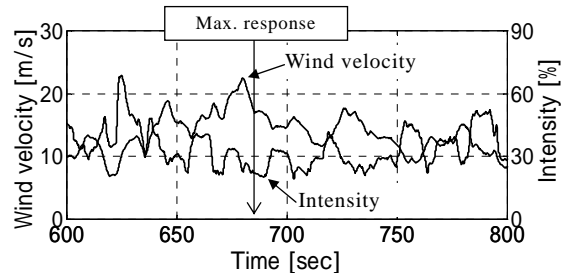


Fig.8 Wind velocity and intensity (10 sec average).

また、この振動は、準定常理論により計算されたパフェッティングの応答解析結果よりはるかに大きな振幅で振動しておりパフェッティングである可能性は少ないと考えられる。また、風向が下り勾配ではなく上り勾配であるため、上面水路は形成されないと考えられ、レインパイプレーションの可能性も少ないと考えられる。また、高風速渦励振の可能性も考えられるが、このケーブル模型において似たような振動は観測されておらず、可能性は低い。よって、ギャロッピングの可能性が考えられるが、一般に強乱流下においてギャロッピングの発生は難しいと考えられ(松本ら, 1990), 更なる検討を要す。

次にケース4について、卓越していた面内3次モードについて、振幅の時刻歴波形と最も振幅が大きかった時間帯である200秒~210秒の10秒間におけるリサージュ図及びウェーブレット解析結果をfig.9に示す。この卓越周波数から無次元風速を求めると $V/fD=33.8$ となる。降雨量が多いこと、水路が形成されやすい風向であること、振動性状などからレインパイプレーションである可能性が示唆される。しかしウェーブレット解析の結果から、高風速渦励振(レインパイプレーション)の発生において重要であると考えられているカルマン渦の周波数成分がほとんど見られない。ギャロッピングの可能性も考えられるが、ケース3のよ

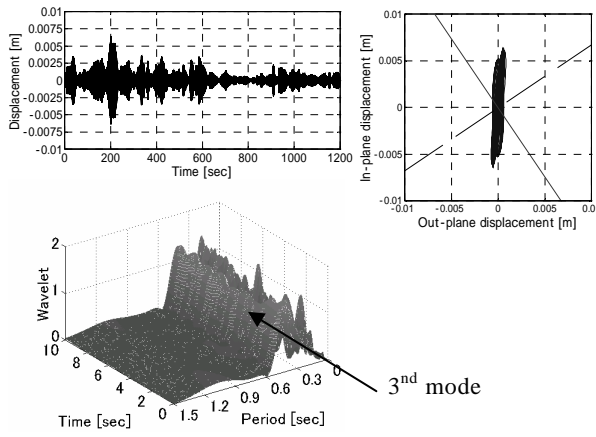


Fig.9 Response of 3rd in-plane mode, displacement locus of 3rd mode and wavelet analysis of in-plane acceleration (case 4)

うに発散的な振動には至っていない。

以上より、平均風速が高く、降水量が多い気象条件の下で、上面水路の形成の可能性がある風向のデータと過去の研究の結果について比較を行ったが、両ケースともにカルマン渦の周波数成分が現れないなどの共通の振動特性は見られたものの、振動振幅は全く異なった結果となり、原因の解明には至らなかった。これらについては今後の課題である。

3.3 ケーブル模型 C における応答解析

ここでは、2002年11月から2003年1月までのケーブル模型 C における観測記録について示す。なお観測期間が短いことから、全風向における十分なデータは得られていない。Fig.10 に各モード

における平均風速 - 平均倍振幅の図を示す。いずれの振動モードにおいても、カルマン渦励振の振幅については、ケーブル模型 A, B においては面内方向における振幅が大きいのに対し、ケーブル模型 C においては面外における振幅のほうが大きくなっていることがわかる。ただし、今のところ計測期間が短く、得られたデータの絶対数も少ないため、安易に評価することはできない。さらに南南西からの強風によって比較的大きな振幅が見られるが (Fig.10 において波線で囲んだ部分) これらのデータは、ほぼ同時期に計測されたものであり、この振動現象についての考察は今後の課題である。

4. 剛体ケーブル模型の静的空気力特性

4.1 実験概要

レインパイブレーションを始めとする傾斜ケーブルの空力振動現象は、振動発生機構が極めて複雑であり、特にカルマン渦放出の3次元性や非定常性、低周波成分の渦放出などに代表されるような、ケーブル後流域における複雑な渦構造に起因していると考えられる。従って、この振動現象を、ギャロッピングの振動解析手法として確立されている準定常理論を用いた解析で表現できるのかどうか、疑問が生じる。

一般に傾斜ケーブルの空力振動を不安定化する要因として、ケーブル後流域に形成される軸方向流、降雨時にケーブル表面に形成される水路などが挙げられる。しかし、最近の準定常理論を用い

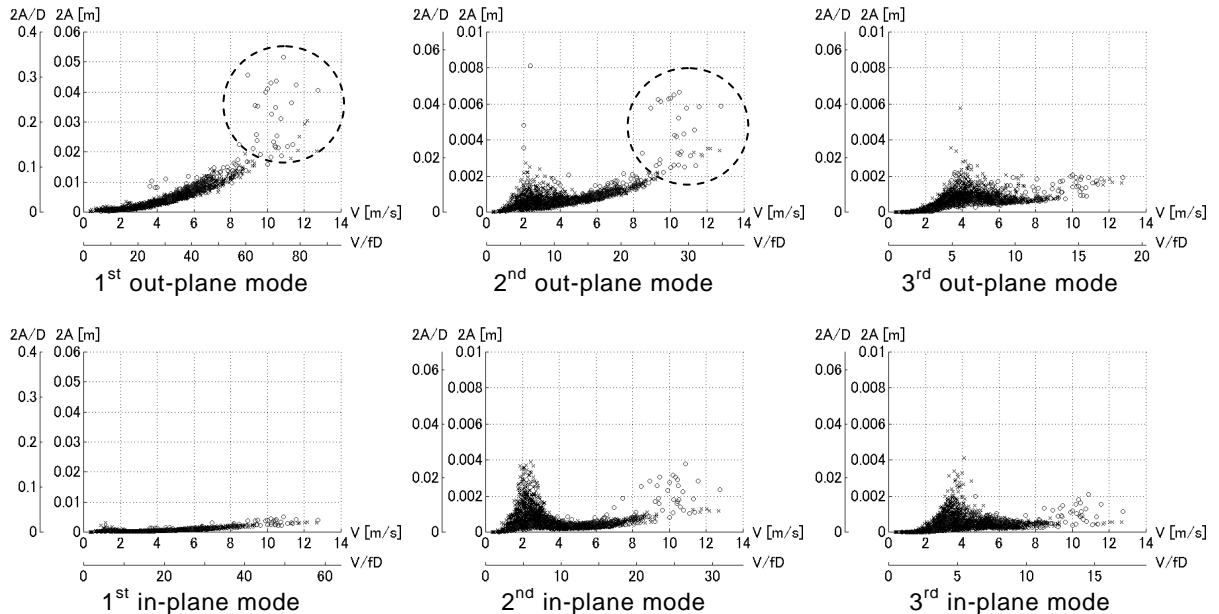


Fig. 10 Velocity - amplitude diagrams for Type C model, where o: with rainfall, x: without rainfall

た研究報告(Gu et al., 2001)によると、水平偏角 $\beta=0^\circ$ における静的空気力を用いているものが見受けられ、軸方向流の形成による効果が無視されている。過去の研究(Matsumoto et al., 2000)において、水平偏角 β の増加に伴い、ギャロッピングの不安定性が増幅され、 $\beta=25^\circ$ 以上でギャロッピングが発生する、という報告がある。これは水平傾斜 β が大きくなることでケーブル後流域に形成される軸方向流が強まるためであり、ギャロッピングの発現において軸方向流はケーブル後流域へのスプリッタープレート挿入と類似した効果があるものと考えられている。従って、軸方向流の効果は、傾斜ケーブル振動の解析に無視してはならない要素である。

しかしながら、模型を傾斜させて静的空気力測定を行う場合、軸方向流は常に風向に対して wake center に形成されることから、相対迎角の変化に応じた軸方向流の位置を正しく評価できず、傾斜ケーブルの空力振動解析に準定常理論を適用する際に問題が生じる。そこで本節では、傾斜なしケーブル模型後流域にスプリッタープレートを挿入し、その位置を変化させることで、傾斜ケーブルにおける軸方向流の形成位置の影響を加味し、水路位置の変化の効果と併せて傾斜ケーブルにおける静的空気力特性を評価する。そして、それらの結果を基に傾斜ケーブルにおけるギャロッピングの発現の可能性について考察する。

円断面を有する直径 $D=50\text{mm}$ 、長さ 1060mm の剛体模型を、水平偏角 $\beta=0^\circ$ に支持したものと、円断面を有する直径 $D=54\text{mm}$ 、長さ 1500mm の剛体模型を、水平偏角 $\beta=45^\circ$ に支持したものとを用いた。気流は一樣流で行い、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。その位置は模型前縁側よどみ点からケーブル表面に沿って測った角度 θ によって定義した。さらに、模型後流域に形成される軸方向流を評価するため、模型後流域に厚さ 2mm 、長さ 200mm の穴あきスプリッタープレート（以下 PSP）を挿入した。なお、開口部を設けたのは 2 せん断層の干渉を維持するためであり、開口率 30% のものを用いた。その位置は模型前縁側よどみ点からケーブル表面に沿って測った角度 ϕ によって定義した。模型が風洞壁を貫通している部分には直径 110mm の円形の窓が設けられているが、水平偏角 $\beta=0^\circ$ の際には完全に塞ぎ、水平偏角 $\beta=45^\circ$ の際には窓を設けて実験を行った。

4.2 静的空気力測定実験結果

人工水路の設置位置 θ と PSP の設置位置 ϕ を変化させ、剛体ケーブル模型に作用する静的空気力を模型端部に設置したロードセルにより測定した。Fig.11 に一樣流中において計測された静的空気力係数（抗力係数 C_D 、揚力係数 C_L ）を示す。なお、静的空気力係数は以下のように定義した。

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho V^2 A}, \quad C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho V^2 A}$$

ただし、 F_D : 抗力 (N/m), F_L : 揚力 (N/m), ρ : 空気密度 (kg/m^3), V : 風速 (m/s), A : 受風面積 (m^2/m)

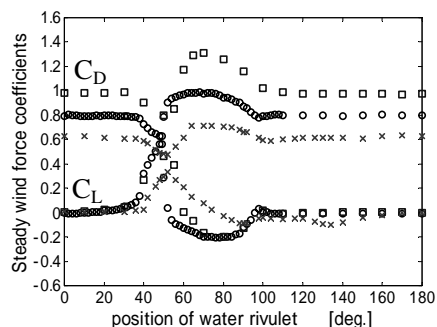
これにより、PSP を挿入することで水平偏角 $\beta=45^\circ$ に傾斜させた際と同じように C_D を全体的に減少させていることがわかる。また、 C_L については水路位置 $\theta=40^\circ \sim 60^\circ$ 付近において勾配は異なるものの全体的な形状は類似していると言える。

さらに、得られた静的空気力係数を用いて、 $dC_F/d\alpha$ を算出し、ギャロッピング不安定性について検討した。なお、 $dC_F/d\alpha$ はギャロッピングの不安定性を論じる尺度であり、 $dC_F/d\alpha$ が負のときにギャロッピングが発生することが知られている。 C_F は以下の式により定義した。

$$C_F(\theta, \alpha) = (C_D(\theta + \alpha) \sin \alpha + C_L(\theta + \alpha) \cos \alpha) \frac{1}{\cos^2 \alpha}$$

$dC_F/d\alpha$ の算出に関しては、人工水路と PSP の効果を見るため、次の 5 ケース (Fig.12 参照) について考えた。

- (a) 水路と PSP の両方の効果を考慮 ($\beta=0^\circ$)
- (b) PSP を固定し水路の効果のみ考慮 ($\beta=0^\circ$)
- (c) PSP なしで水路の効果のみ考慮 ($\beta=0^\circ$)
- (d) 水路を固定し PSP の効果のみ考慮 ($\beta=0^\circ$)
- (e) PSP なしで水路の効果のみ考慮 ($\beta=45^\circ$)



- : $\beta=0^\circ$, without windows, with fixed PSP ($\phi=180^\circ$)
- : $\beta=0^\circ$, without windows
- × : $\beta=45^\circ$, with 110mm windows

Fig.11 Steady wind force coefficients of cable model, in smooth flow ($V=8.0\text{m/s}$)

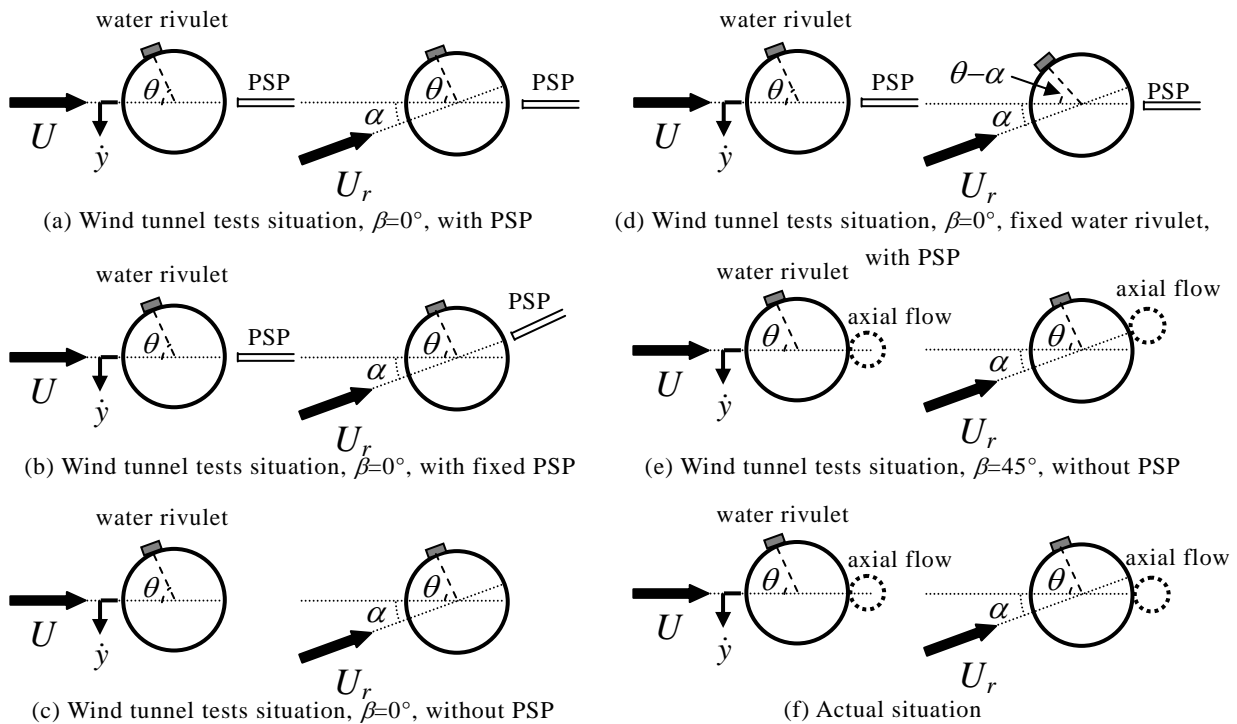
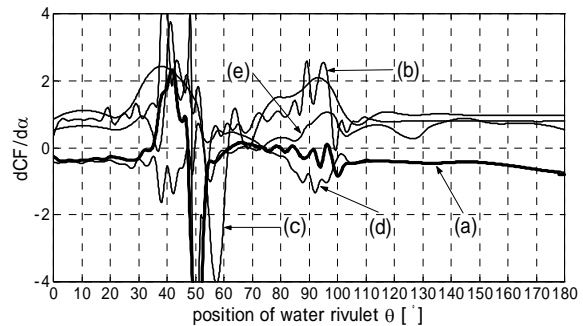


Fig.12 Position of water rivulet, axial flow and PSP

Fig.13 に、一様流中における水路位置と $dC_F/d\alpha$ の値の関係を示す。ここで、PSP と水路の動きの両方の影響のある(a)をみると、 $dC_F/d\alpha$ は水路位置 $\theta=0^\circ \sim 30^\circ, 50^\circ \sim 65^\circ, 100^\circ \sim 180^\circ$ 付近において有意な負の値となっている。一方、PSP の動きのみに着目した(d)については $dC_F/d\alpha$ は水路位置 $\theta=0^\circ \sim 50^\circ, 70^\circ \sim 180^\circ$ 付近で有意な負の値となっており、また、他の条件のように、水路位置 $\theta=40^\circ \sim 60^\circ$ において $dC_F/d\alpha$ の値の大幅な変動は見られない。これは、この水路位置付近では水路の影響が卓越するためと考えられる。また、水路の動きのみに着目した(b),(c),(e)では、水平偏角 $\beta=0^\circ$ の時は水路位置 $\theta=50^\circ \sim 60^\circ$ 付近、水平偏角 $\beta=45^\circ$ の時は水路位置 $\theta=52^\circ \sim 65^\circ$ 付近で負の値になっている。従って、(a)の条件が傾斜ケーブルの静的空気力特性を正しく評価できているならば、水路位置 $\theta=0^\circ \sim 30^\circ, 100^\circ \sim 180^\circ$ 付近においては、軸方向流の効果によるギャロッピング、水路位置 $\theta=50^\circ \sim 65^\circ$ 付近では、水路位置の影響の卓越したギャロッピングが発生する可能性が考えられる。

5. 結論及び今後の課題

(1)ケーブル模型 A については、降雨時に振幅が大きくなる傾向が見られ、レインバイブレーションと考えられる振動現象が見られた。また、降水量が少なくても風向、風速の条件によりレインバイ



- (a) $\beta=0^\circ$, with PSP
- (b) $\beta=0^\circ$, with fixed PSP ($\phi=180^\circ$)
- (c) $\beta=0^\circ$, without PSP
- (d) $\beta=0^\circ$, with PSP, fixed water rivulet
- (e) $\beta=45^\circ$, without PSP

Fig.13 Position of water rivulet - $dC_F/d\alpha$ diagram.
($V=8.0\text{m/s}$, in smooth flow)

ブレーションが発生する可能性が示唆された。
(2)ケーブル模型 B については、台風の通過時に面外 1 次モードの大振幅振動が観測されたが、ケーブル模型 A のように、レインバイブレーションのような風速限定型振動は見られなかった。この理由として、模型の構造上、水路が形成されにくい可能性があることが挙げられる。台風通過時の面外 1 次モードの大振幅振動は、パフェッティングの可能性は少なく、ギャロッピングの可能性が考えられるが、一般に強乱流下においてギャロッピングの発生は難しいと思われ、更なる検討を要す。

(3)傾斜ケーブルの空力振動に準定常理論を適用する際に、軸方向流の位置が問題になるため、水平偏角なしの剛体ケーブル模型後流域にスプリッタープレートを挿入して静的空気力測定を行った。その結果から、ギャロッピングの発生において軸方向流の効果が卓越するものと水路位置の効果が卓越するものが考えられた。

謝辞

本研究は、平成 14 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

- 樋上琇一(1986):斜張橋ケーブルの Rain Vibration, 日本風工学会誌第 27 号
- 松本 勝・白石成人・白土博通・平井滋登・佐野祐一・桂 一詞(1990):斜張橋ケーブルのレインバイブレーションの振動性状とそれに及ぼす乱流およびスクルートン数の影響,第 11 回風工学シンポジウム論文集, pp.269-274
- 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(2001):風による斜張橋ケーブル振動の屋外観測,京都大学防災研究所年報 第 44 号 B-1, pp.137-145
- 松本 勝・白土博通・八木知己・林 泰一・酒井精一郎・大谷 純・岡田太賀雄(2002a):雄区外大型傾斜ケーブル模型を用いた斜張橋ケーブルの空力振動に関する研究,京都大学防災研究所年報 第 45 号 B-1, pp.399-406
- 松本 勝,白土博通,八木知己,酒井精一郎,大谷 純,岡田太賀雄(2002b),風洞実験及び屋外動態観測に基づく傾斜ケーブルの空力振動現象に関する研究,第 17 回風工学シンポジウム論文集,2002, pp369-374
- Gu, M., Lu, Q. (2001): Theoretical analysis of wind-induced vibration of cables of cable-stayed bridges, the Fifth APCWE,
- Matsumoto, M., Yokoyama, K., Miyata, T., Fujino, Y. and Yamaguchi, H. (1989): Wind-induced cable vibration of cable-stayed bridges, Proceedings of Japan-Canada Joint Workshop on Bridge aerodynamics
- Matsumoto, M., Yagi, T. and Tsushima D. (1999): Inclined cable aerodynamics-velocity restricted response at high reduced velocity, Proceedings of Third International Symposium on Cable Dynamics, pp.91-96
- Matsumoto, M. (2000): Vortex-excited vibration and galloping instability of inclined cables, 6th Italian Conference on Wind Engineering, IN-VENT-2000
- Matsumoto, M., Shirato, H., Yagi, T., Goto, M., Sakai, S. and Ohya, J. (2001): Field observation of the full-scale wind-induced cable vibration, Proceedings of the 5th Asia-Pacific Conference on Wind Engineering, Kyoto, Japan, pp.105-108

**Investigations on Wind-induced Vibrations of Stay-cables
Based on Field Observations and Wind Tunnel Tests**

Masaru MATSUMOTO*, Hiromichi SHIRATO*, Tomomi YAGI*, Taiichi HAYASHI,
Seiichiro SAKAI**, Jun OHYA***, Takao OKADA*, Takahiro OISHI*

*Department of Civil & Earth Resources Engineering, Kyoto University

**Ehime Prefecture

***Japan Patent Office

Synopsis

Authors have been conducted the field observation of large-scale inclined cable model at the Shionomisaki Wind Effect Laboratory of Disaster Prevention Research Institute since 2000. Using a few types of the cable models, their responses have been measured and analyzed especially under seasonal wind of winter and typhoon wind of summer. Then, the rain-wind induced vibration and the galloping like vibration was observed. The mechanism of the second vibration was not completely proved as galloping. However, this result might show the possibility of divergent type vibration at the stay cables. Also, the steady wind force coefficients for inclined cables were investigated using wind tunnel tests.

Keywords: stay-cables, high speed vortex-induced vibration, rain-wind induced vibration, galloping, field observation,