



特集



橋梁ケーブルの空力振動

大型傾斜ケーブル模型を用いた空力振動現象に関する屋外動態観測

Field Observation on Wind-induced Vibrations of Large-scale Inclined Cable Model

八木知己^{*1}

松本 勝^{*2}

Tomomi YAGI, Masaru MATSUMOTO

1. はじめに

斜張橋ケーブルの空力振動現象には、渦励振、レインパイブレーション、ドライステートギャロッピング等が考えられるが、通常工学的に問題となるのは、降雨時に観測されるレインパイブレーションとケーブル表面が乾燥している状態で発生するドライステートギャロッピングである。一般に、レインパイブレーションとは、降雨時に、風下に向かってケーブルの高さが低くなっていく「下り勾配」を持つケーブルの表面に水路が形成されることによって発現すると考えられている¹⁾。ただし、実橋で観測される場合には、水路の形成を確認することは困難であり、降雨時の振動を全てレインパイブレーションと呼んでいることが多い。一方、水路が形成されていない状況で発生するドライステートギャロッピングは、雨なし振動とも呼ばれるが、レインパイブレーションに比べて観測事例は少ない。一般に、臨界レイノルズ数域に達するような高風速下で発生すると考えられているが²⁻⁵⁾、未だ不明な点も多く残されている。また、降雨下においても、水路が形成されていなければ、ドライステートギャロッピングで振動している可能性もある。従って、降水量、風向、風速といった気象データとケーブルの応答データからだけでは、振動メカニズムを考察すること

は實際上、困難なことが多い。実橋の観測データからは、簡単に分類できないような振動事例が観測されることも多々あり、全ての観測事例を未だ説明できていないのが現状である。

典型的なレインパイブレーションの観測事例としては、名港西大橋⁶⁾で最初に観測されて以来、荒津大橋⁷⁾、天保山大橋⁸⁾の他、数々の斜張橋で観測されている。天保山大橋では、風速9~10m/sで倍振幅237cmにも及ぶ大振幅振動が観測されており、このような条件下でケーブル表面に水路が形成されて、レインパイブレーションが発生したのかどうか、疑問の声もある。一方で、ドライステートギャロッピングと思われる実橋での振動事例は数少ないが、可能性のある振動事例を写真1に示す⁹⁾。台風通過時に、地面に定着されたケーブルが大振幅振動を発生し、橋梁の高欄、フェアリングが損傷した事例である。目撃者の証言によると、振動時は雨が止んでいたとのことであり、ドライステートギャロッピングの疑いがある。

以上のように、限られた実橋の観測事例からだけでは、メカニズムの解明が容易ではない。また風洞実験においては、数々の研究成果が上がっているが、実際の斜張橋ケーブルに比べて、アスペクト比の極めて小さな模型を

*1 京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 准教授
Associate Professor, Department of Civil and Earth Resources Engineering, Kyoto University

*2 京都大学 名誉教授
Professor Emeritus, Kyoto University

使用している事、さらには風洞内で模型を傾斜させると模型端部（風洞壁）による影響が実験結果に現れるといった問題があり、実橋の観測事例を完全に説明するには至っていない。そこで筆者等は、実橋の観測事例と風洞実験結果を関連付ける目的で、2000年から2003年にかけて、大型傾斜ケーブル模型を作製し、屋外観測を行った¹⁰⁻¹⁴⁾。その当時の結果を以下に報告する。



写真1 実橋ケーブルの振動事例⁹⁾

響で乱流強度が大きいことには注意を要する。長さ30mの大型ケーブル模型を設置するために、現地に高さ23.5mの塔を建設し、地表面高さ21mの位置に模型上端を固定し、模型下端は地表面付近に定着させた（写真2参照）。模型上端と下端を結ぶ線と地表面がなす鉛直角 α はおおよそ45°である。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いる。

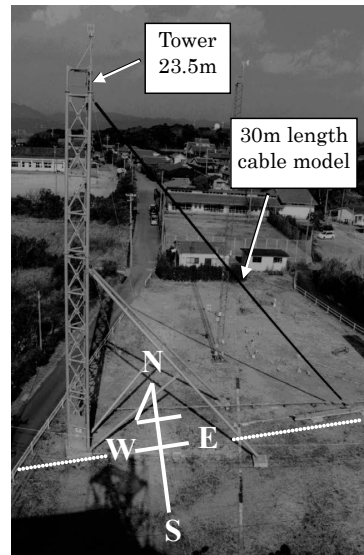


写真2 大型ケーブル模型設置状況

2. 観測概要

2. 1 大型ケーブル模型概要

大型ケーブル模型の設置ならびに観測は、和歌山県潮岬に所在する京都大学防災研究所附属潮岬風力実験所の敷地内（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と考えられるが、周辺環境の影

ケーブル模型の径は、実際の斜張橋に使用されているケーブル径とほぼ同等のものとし、ケーブル模型の表面も実橋に合わせてポリエチレン管（PE管）で被覆した。ただし、空力振動が励起されやすいように、実橋ケーブルに比べて、構造減衰ならびに単位長さ重量を小さくしている。本研究では、観測期間中、3種類のケーブル模

表1 ケーブル模型の構造諸元 (f : 固有振動数, δ : 対数減衰率, Sc : スクルートン数)

	Type A			Type B			Type C		
Cable length L (m)	30			30			30		
Cable diameter D (m)	0.11			0.16			0.15		
Mass/length m (kg/m)	6.06			11.46			6.50		

	Type A			Type B			Type C		
	f (Hz)	δ	Sc	f (Hz)	δ	Sc	f (Hz)	δ	Sc
Out-plane									
1 st mode	1.07	-	-	0.78	0.01750	13.06	0.98	0.03934	18.57
2 nd mode	2.25	-	-	1.61	0.01420	10.30	2.34	0.01702	8.03
3 rd mode	3.81	-	-	2.44	0.00807	6.02	4.59	0.00351	1.66
4 th mode	5.57	-	-	3.22	-	-	7.42	-	-
In-plane									
1 st mode	1.37	0.00790	6.53	0.93	0.03750	27.98	1.46	0.02782	13.13
2 nd mode	2.44	0.00450	3.72	1.61	0.00846	6.31	2.64	0.00937	4.42
3 rd mode	4.00	-	-	2.44	0.00607	4.53	4.88	-	-
4 th mode	5.96	-	-	3.22	0.00912	6.80	7.81	-	-

型を使用した。以下にその特徴を列記すると共に構造諸元を表1に示す。

(1) ケーブル模型 A

本模型は、2000 年 11 月から 2001 年 8 月にかけて設置されたもので、アルミニウム管（直径 100mm、長さ 4000mm、厚さ 5mm）7 本と、同様の構造のアルミニウム管（直径 100mm、長さ 2000mm、厚さ 5mm）1 本を連結し、PE 管（厚さ 5mm）で被覆した中空円柱構造の模型である。ケーブル模型の径は 0.11m、全長は 30m、単位長さ質量は 6.06kg/m である。構造減衰が比較的小さいのが特徴である。

(2) ケーブル模型 B

本模型は、2001 年 8 月から 2002 年 10 月にかけて設置されたものであり、アルミニウム管（直径 150mm、長さ 500mm、厚さ 5mm）を、PE 管（厚さ 5mm）で被覆した中空円筒エレメント 58 個を外材として、心材のワイヤーケーブルに取り付けたものである。ケーブル模型の径は 0.16m、全長は 30m、単位長さ質量は 11.46kg/m である。このような構造にすることで、ケーブル模型の動特性に対するアルミニウム管の曲げ剛性の影響が小さくなり、比較的、弦の振動特性に近くなる。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。

(3) ケーブル模型 C

本模型は、2002 年 11 月から観測終了まで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（直径 150mm、長さ 2000mm、厚さ 5mm）1 本を連結した模型であり、ケーブル A と同様の構造である。ただし、模型を軽量化するために、表面を PE 管では被覆せず、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。ケーブル模型の径は 0.15m、全長は 30m、単位長さ質量は 6.5kg/m である。ただし、本報告には当模型を用いた計測結果は省略する¹³⁾。

表 1 より、実橋ケーブルと比較して、何れのケーブル模型も S_c 数が小さくなっている。また、ケーブル模型 A および C では、各モードの固有振動数が 1 次モードの倍数になっておらず、これはアルミニウム管の曲げ剛性の効果が現れているものと考えられる。一方、ケーブル模型 B では、比較的弦に近い構造特性を示しているが、模型質量が大きいため、固有振動数は小さくなっている。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、面外振動とはケーブル模型と塔が作る面に垂直な方向の振動と定義する。

2. 2 観測方法

大型ケーブル模型の振動計測では、地表面から高さ 2.8m の位置の模型表面に加速度計を設置し、ケーブル面内及び面外振動の加速度を測定した。データ計測のサンプリング周波数は 200Hz とし、常時計測を行った。風向ならびに風速は、大型ケーブル模型近傍の北東位置における地表面からの高さ 10m の位置に設置された超音波風向風速計により測定した。なお、風向は真北から時計回りの角度 $0^\circ \sim 360^\circ$ で表示している。また、降雨の有無については、近隣の気象台潮岬測候所（標高 73m）で観測された、1 時間ごとの降雨量のデータで判断した。

加速度データから振動振幅を評価する際には、卓越振動数（固有振動数）毎に、対応するモード形状が正弦波であると仮定して、最大振幅を算出した。計測機器の仕様上、20 分間のデータが 1 セットとなるため、データの平均化処理は 20 分間平均とした。

3. 観測結果

以下に、ケーブル模型 A ならびにケーブル模型 B に関する観測結果を示す。また、図 1、表 2 に示す顕著な振動事例 4 ケースについては、より詳細に報告する。

3. 1 ケーブル模型 A における観測結果

2000 年 11 月から 2001 年 2 月の期間におけるケーブル模型 A を用いた観測記録から得られた平均風速・平均倍振幅を図 2 に示す。面内・面外の 1 次～3 次モード別の

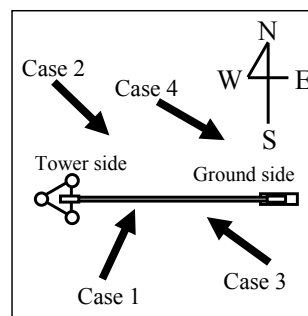


図 1 顕著な振動事例の風向

表 2 顕著な振動事例の気象条件（20 分間平均値）

	Cable model type A		Cable model type B	
	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Mean wind velocity (m/s)	8.10	7.67	13.2	10.3
Mean wind direction (deg.)	198.9 (SSW)	316.3 (NNW)	126.0 (SE)	299.5 (NW)
Turbulence intensity (%)	40.9	30.1	40.8	46.3
Precipitation (mm/h)	34	1.5	37	24

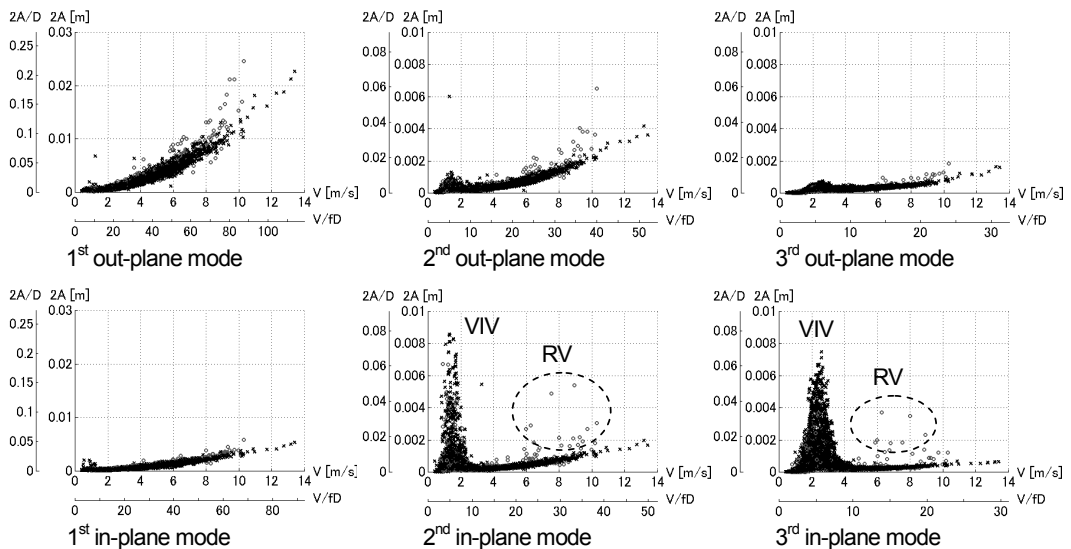


図2 平均風速—平均倍振幅図 (20 分間平均値, ケーブル模型 A)
(○: 降雨時, ×: 降雨なし, VIV: 渦励振, RV: レインパイブレーション)

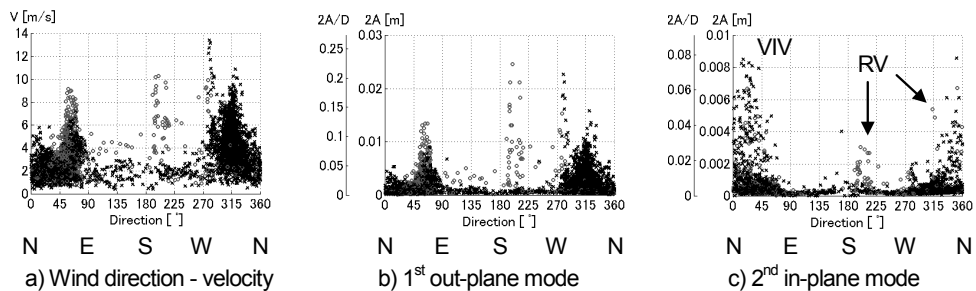


図3 風向と風速ならびに応答の関係 (20 分間平均値, ケーブル模型 A)
(○: 降雨時, ×: 降雨なし, VIV: 渦励振, RV: レインパイブレーション)

応答振幅を観測時の気象データから降雨時と降雨なしに分けてプロットした。それぞれのプロットは、20 分間平均値である。面外 1 次モードでは、バフetting と思われる比較的大きな応答が見られる。また、面内 2, 3 次モードでは、渦励振が顕著に現れていることが分かる。さらに全体的傾向として、降雨時に振幅が大きくなっている傾向があり、特に面内 2, 3 次モードでは、ある特定の風速域でその傾向が顕著である。さらに、図 3 に a) 風向と風速、b) 風向と面外 1 次モード応答、c) 風向と面内 2 次モード応答の関係を示す (全て平均値)。a) と b) を比較すると、両図の形状が似ていることから、面外 1 次モード応答はバフetting と考えることができる。また、c) 面内 2 次モードの応答図からは、渦励振が発生している風向は、N—NNE が卓越しており、ケーブル軸に直交していることが分かる。一方、前述の降雨時に見られる風速限定型の応答が発生する際の風向は、SSW もしくは

NW であり、ケーブル姿勢は風向に対して下り勾配となっている。したがって、これらの応答結果は、レインパイブレーションである可能性が高いと考えられる。

次に、表 2 に示したレインパイブレーションと考えられるケース 1 とケース 2 について、より詳細に調べる。20 分間の平均風速はいずれも 8m/s 程度、風向は共にケーブル姿勢が下り勾配となる風向であるが、降雨量は大きく異なり、気象用語上ケース 1 は「激しい雨」、ケース 2 は「弱い雨」となる。まず、ケース 1 において振動が卓越している面内 3 次モードの時刻歴応答波形、およびその振幅が比較的大きい 940～950 秒における面内・面外 3 次モードのリサージュ図、さらには同区間の面内加速度応答のウェーブレット解析結果を図 4 に示す。なお、リサージュ図中に示す実線は、風向とケーブル軸が作る面を示し、破線はその直交方向である。また、ケース 2 においても同様に 2 次モードに着目し応答波形を図 5 に

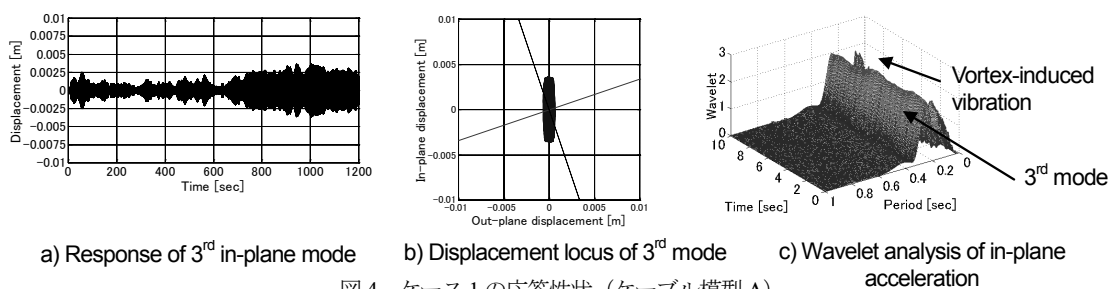


図4 ケース1の応答性状（ケーブル模型A）

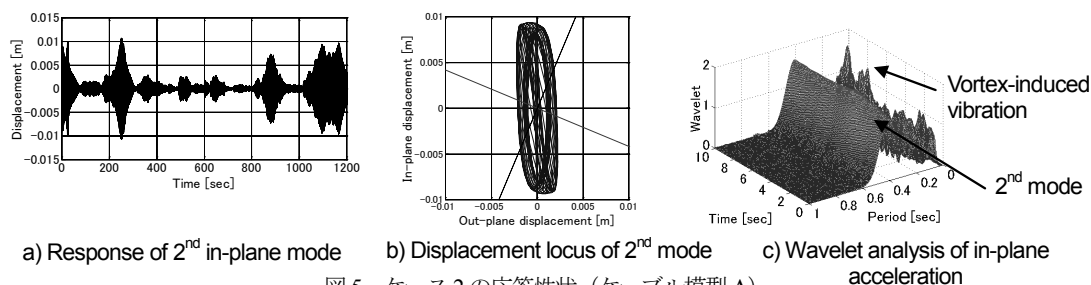


図5 ケース2の応答性状（ケーブル模型A）

示す。ウェーブレット解析とリサージュ図の解析区間は、1090～1100 秒の 10 秒間である。ウェーブレット解析結果より、ケース 1（図 4）では 3 次モード（ $V=7.8\text{m}$, $V/fD=17.7$ ），ケース 2（図 5）では 2 次モード（ $V=7.5\text{m}$, $V/fD=27.9$ ）に対応する応答はほぼ定常であるが、カルマン渦の放出周波数成分が非定常に現れていることが分かる。また、リサージュ図より、両ケース共、それぞれの卓越モードで比較的破線に沿った定常的な面内振動であることが分かり、卓越モードの違いはあるものの、振動特性は比較的良好に似ている。前述の通り、風向を考えると両ケース共、レインバイブレーションの可能性が高く、ケース 2 のようにわずかな降水量であっても空力的に不安定化することが分かる。

3. 2 ケーブル模型 B における観測結果

次に、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。図 6 に平均風速—平均倍振幅、図 7 に a) 風向と風速、b) 風向と面外 1 次モード応答、c) 風向と面外 2 次モード応答の関係を示す（全て平均値）。図 6 より、渦励振は面内方向でよく現れていることが分かる。また、前述のケーブル模型 A のように、明らかにレインバイブレーションとわかる降雨時の風速限定型振動は見られなかった。この理由として、ケーブル模型の構造上、パーツとパーツの間に段差があり、水路が形成を妨げた可能性は否定できない。ただし、高風速域において降雨ありの状況で振幅が大きい観測記録がいくつか見られる

が、これらのプロットは 2001 年 8 月に付近を通過した台風 11 号によるものである¹¹⁻¹²。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、「激しい雨」が観測されているが模型表面に水路は形成されていなかったと考えられ、この時の振動現象はレインバイブレーションではなかったと推定される。

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をケース 3、別の観測日で平均風速が比較的高く、降水量が多い気象条件の下、風向に対してケーブルが下り勾配となり、レインバイブレーションが発生する可能性のあるデータをケース 4 とした（図 1, 表 2 参照）。

ケース 3 について、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 秒間における面内・面外 1 次モードのリサージュ図を図 8 に示す。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、面内振動が現れてもおかしくはないが、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、図 9 に 600 秒～800 秒における 10 秒平均の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

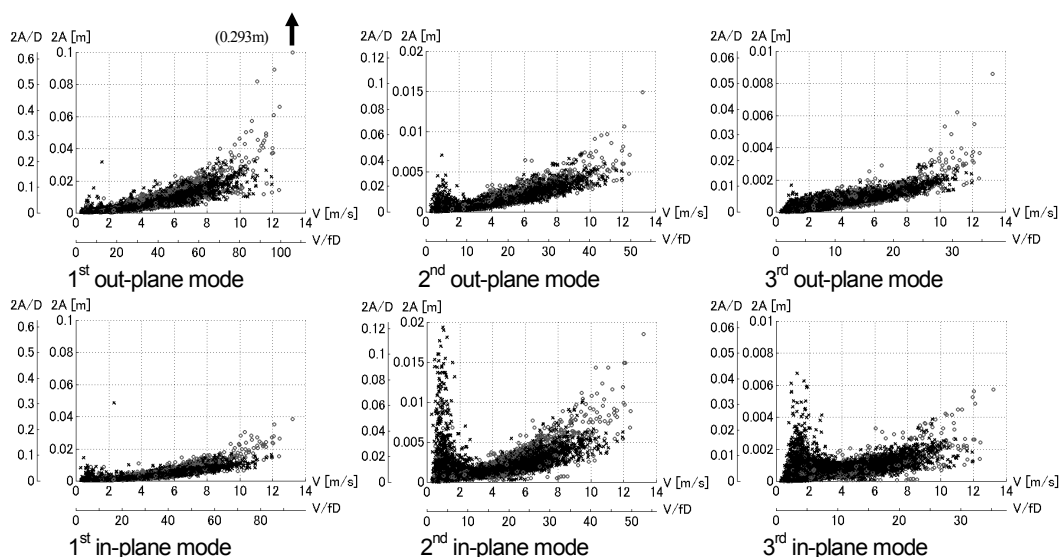


図6 平均風速—平均倍振幅図 (20 分間平均値, ケーブル模型 B, ○ : 降雨時, × : 降雨なし)

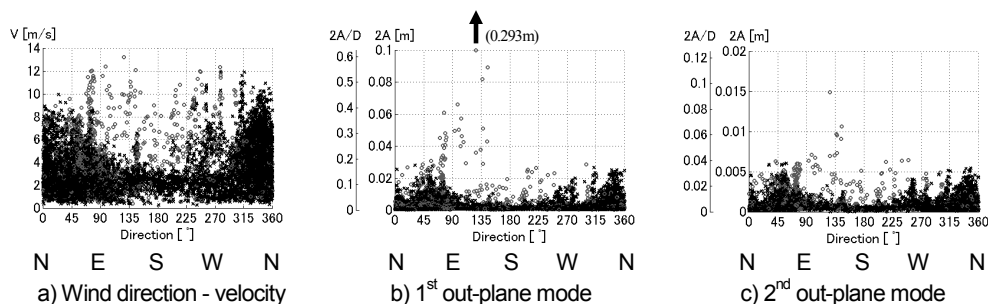


図7 風向と風速ならびに応答の関係 (20 分間平均値, ケーブル模型 B, ○ : 降雨時, × : 降雨なし)

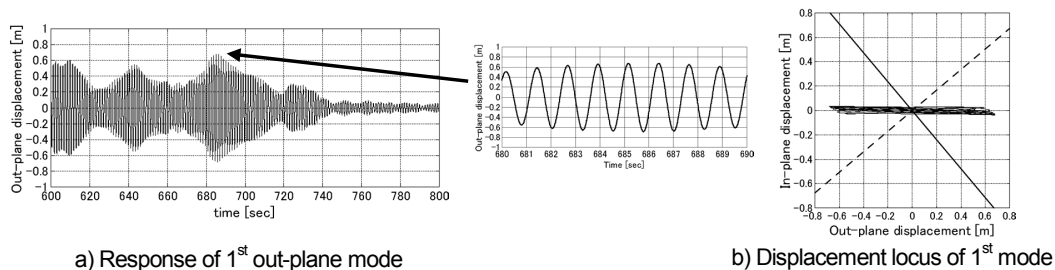


図8 ケース3の応答性状 (ケーブル模型 B)

際に振動振幅が大きくなっていることがわかる。この振動応答は、別途準定常理論により計算されたパフエ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、パフエッティングである可能性は小さいと考えられる。より簡単に考察するのであれば、図7のa)とb)を比較すれば、この大振幅応答が他のパフエッティング応答と比べて際立って大きいことがわかる。また、風向が下り勾配ではなく上り勾配であるため、水路は形成さ

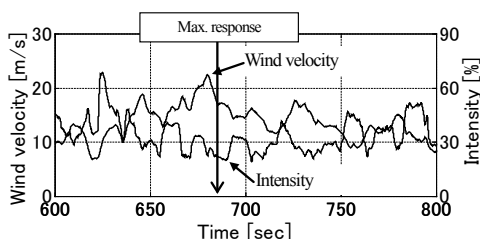


図9 風速と乱れ強度の関係 (10 秒平均)

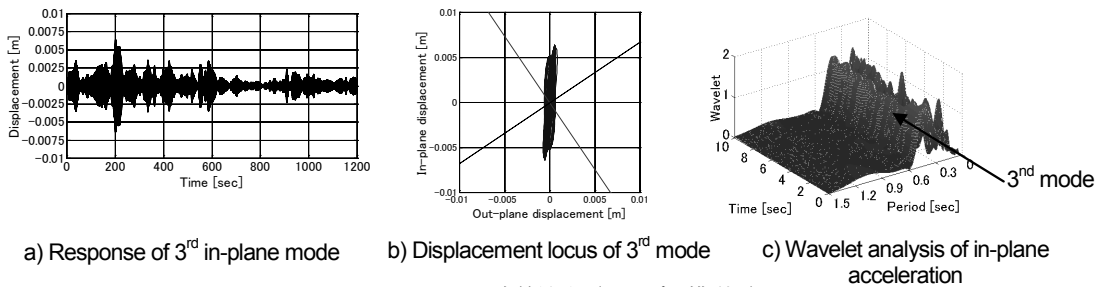


図 10 ケース 4 の応答性状 (ケーブル模型 B)

れていなかったと推定されるため、レインバイブレーションの可能性も小さいと考えられる。従って、本振動現象は、ギャロピングである可能性が高いが、一般に強乱流下においてはギャロピングの発生は難しいとの報告もあり¹⁵⁾、更なる検討を要する。

次にケース 4 について、卓越している面内 3 次モードにおいて、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 秒間における面内・面外 3 次モードのリサージュ図及び面内加速度応答のウェーブレット解析結果を図 10 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「強い雨」で比較的多いこと、水路が形成されやすい風向であること、発散的な振動性状を示していないことなどからレインバイブレーションである可能性が示唆される。

ケーブル模型 B においては、比較的高風速域でかつ降水量が多い状態における観測結果が得られたが、風向に応じてその振動性状は異なり、ギャロピングと思われる振動ならびにレインバイブレーションと思われる振動が観測された。

4. まとめ

以上の結果をまとめると以下の通りである。

- (1) 風速・風向が同様であっても、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推定される振動現象が観測された。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ブレーションが発生する可能性が示唆された。
- (2) 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。レインバイブレーションやバフエッティングの可能性は小さく、ドライステートギャロピングであった可能性も考えられるが、一般に強乱流下においてギャロピングの発生は困難とも思われ、更なる検討を要する。

謝辞

大型ケーブル模型を用いた屋外観測実験は、平成 12～14 年度日本学術振興会科学研究費補助金・基盤研究(A)(2) (課題番号：12305030, 研究代表者：松本 勝) によって実施された。

参考文献

- 1) Matsumoto, M., Shiraishi, N. and Shirato, H., “Rain-wind induced vibration of cables of cable-stayed bridges”, J. Wind Eng. Ind. Aerod., Vol.43, pp.2011-2022, (1992)
- 2) Cheng, S., Irwin, P.A., Jakobsen, I.B., Lankin, J., Larose, G.L., Savage, M.G., Tanaka, H. and Zurell, C., “Divergent motion of cables exposed to skewed wind”, Proc. of the Fifth Int. Symp. on Cable Dynamics, pp.271-278, (2003)
- 3) Larose, G.L., Jakobsen, J.B. and Savage, M.G., “Wind-tunnel experiments an inclined and yawed stay cable model in the critical Reynolds number range”, Proc. of the Fifth Int. Symp. on Cable Dynamics, pp.279-286, (2003)
- 4) Matsumoto, M., Yagi, T., Hatsuda, H., Shima, T., Tanaka, M. and Naito, H., “Dry galloping characteristics and its mechanism of inclined/yawed cables”, J. Wind Eng. Ind. Aerod., Vol. 98, No.6-7, pp.317-327, (2010)
- 5) Matsumoto, M. and Laneville, A., “Generation of Galloping of Bluff Body in Relation to Karman Vortex”, Proc. of the 13th Int. Conf. on Wind Engineering, (2011)
- 6) 樋上 琇一, 「斜張橋ケーブルの Rain Vibration」, 日本風工学会誌第 27 号, pp.17-28, (1986)
- 7) Yoshimura, T., Tanaka, T., Sakai, N. and Higa, S., “Rain-wind induced vibration of the cables of the Aratsu Bridge”, 第 10 回風工学シンポジウム論文集, pp.127-132, (1988)
- 8) 森 喜仁, 石飛 太郎, 南條 正洋, 「天保山大橋のケーブル振動とその対策」, 第 12 回風工学シンポジウ

ム論文集, pp.273-278, (1992)

- 9) Matsumoto, M., Yagi, T., Liu, Q., Oishi, T. and Adachi, Y,
“Effects of axial flow and Karman vortex interference on
dry-state galloping of inclined stay-cables”, Proc. of the
Sixth Int. Symp. on Cable Dynamics, pp.247-254, (2005)
- 10) Matsumoto, M., Shirato, H., Yagi, T., Goto, M., Sakai, S.
and Ohya, J., “Field observation of the full-scale
wind-induced cable vibration”, J. Wind Eng. Ind. Aerod.,
Vol. 91, pp.13-26, (2003)
- 11) 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, 「屋外大型傾斜ケー
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, (2002)
- 12) 松本 勝, 白土 博通, 八木 知己, 酒井 精一郎, 大
谷 純, 岡田 太賀雄, 「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, pp.369-374,
(2002)
- 13) 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, 「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」, 京都大学防災研究所年報, 第 46 号
B, pp.319-329, (2003)
- 14) Matsumoto, M., Yagi, T., Sakai, S., Ohya, J., Okada, T.,
“Field observations of wind-induced cable vibrations
using large-scale inclined cable model”, Proc. of the
Eleventh Int. Conf. on Wind Engineering, pp.2149-2156,
(2003)
- 15) 松本 勝, 白石 成人, 白土 博通, 平井 滋登, 佐野
祐一, 桂 一詞, 「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, (1990)