

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

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*

*京都大学大学院工学研究科環境地球工学専攻

要 旨

本研究は、斜張橋傾斜ケーブルにおいて観測される、各種空力振動現象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、自然風下での動態観測を行ったものである。台風 0111 号が潮岬に接近した際、強風下で激しいケーブル振動を観測し、その振動現象について考察を行った。さらに、風洞実験によって静止傾斜円柱における変動空気を測定し、傾斜ケーブル周りのカルマン渦放出特性と斜張橋ケーブルの空力振動現象との関連性について検討を加えた。

キーワード:斜張橋ケーブル, 屋外觀測, 高風速渦励振, レインバイブレーション, ギャロッピング, カルマン渦

1. はじめに

斜張橋は近年盛んに造られ、長径間化が進んできた橋梁形式であるが、その傾斜ケーブルが風によって振動する事例が多数報告されており、このケーブルの空力振動の発生メカニズムを解明することは急務の課題となっている。

代表的な空力振動現象としては、カルマン渦励振、高風速渦励振（レインバイブレーション、雨無し振動）などが挙げられる。カルマン渦励振はケーブル後流域に発生するカルマン渦によって励起される振動現象で、カルマン渦放出周波数とケーブルの各次モードの固有振動数とが一致したときに発生する。高風速渦励振はカルマン渦励振の共振風速域よりも高い無次元風速 $V/fD=40,80$ 等 (V : 風速, f : 固有振動数, D : ケーブル径) で発現する風速限定型の振動現象である。その発生要因として、これまで数多くの風洞実験などにより、降雨時にケーブル表面に形成される水路、ケーブルの後流域に形成される軸方向流、カルマン渦の3次元放出、低周波数の渦とカルマン渦との相互干渉などが指摘されている

(Matsumoto et al., 1999) が、未だ実際の斜張橋ケーブルに生じている現象を完全に説明できていない。

その理由として、風洞実験では自然風の乱れや降雨の状況を再現することが困難であること、ケーブルが傾斜していることから流れ場の3次元性が強いこと、また模型のスケールの問題などが挙げられる。また実橋観測では、交通への影響等で観測の自由度が制限される。

そのため筆者らは、平成12年に京都大学防災研究所潮岬風力実験所に大型傾斜ケーブル模型を設置して、実際の気象条件の下で振動観測を行ってきており、既にレインバイブレーションと思われる振動現象を確認している(松本ら, 2001; Matsumoto et al., 2001a)。

本研究では、平成13年8月21日に台風11号が潮岬に接近した際、強風下でケーブル模型が激しく振動した事例について考察する。さらに、風洞実験によって、静止傾斜円柱における変動空気を測定し、傾斜ケーブル周りのカルマン渦放出特性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る。

2. 観測概要

観測は、京都大学防災研究所附属潮岬風力実験所（和歌山県潮岬、海拔 50m）で行った。この地域は台風及び季節風の影響で、一年を通じて比較的強い風が期待できる。Photo 1 に大型ケーブル模型、及びその支持機構の外観を示す。使用した模型は、ワイヤーケーブルを心材とし、ポリエチレンを被覆したアルミニウム管（直径 0.16m、長さ 0.5m）58 個を外形材とし、全長 30m となっている（Table 1 参照）。外形材と心材は一箇所で固定して、外形材間の隙間は防食用ポリ塩化ビニル粘着テープで埋められている（Fig. 1 参照）。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。なお、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知られている。観測所付近は、冬場に西側からの季節風が卓越することから、南西および北西の風に対してレインバイブレーションが発生しやすいように設置方向を考慮している。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ことから（Matsumoto et al., 1989）、模型表面には同様の被覆が施されている。また、ケーブルと地表面がなす鉛直角はおよそ $\alpha \approx 45^\circ$ である。振動応答は、地表面から高さ 2.8m の模型表面に設置した加速度計により検出し、風向及び風速は、模型の北東に位置する地表面から高さ 10m の位置に設けられた超音波風向風速計により計測した。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。また降雨量は気象台潮岬測候所（標高 73m）で観測された 1 時間ごと降雨量のデータを用いた。模型の振動方向はケーブル模型と塔により形成される面内での振動を面内振動、それに垂直な面での振動を面外振動と定義する。

3. 観測結果

平成 13 年 8 月 20 日～22 日にかけて日本列島に上陸した台風 11 号により観測所付近は激しい暴風雨に見舞われた。特に風雨が激しくなった 8 月 21 日の 12 時～13 時に、倍振幅で 1m 程度の大きな面外振動が観測された。そこで、面外振動が卓越した時間帯を含む 12 時 21 分～41 分に計測されたデータについて

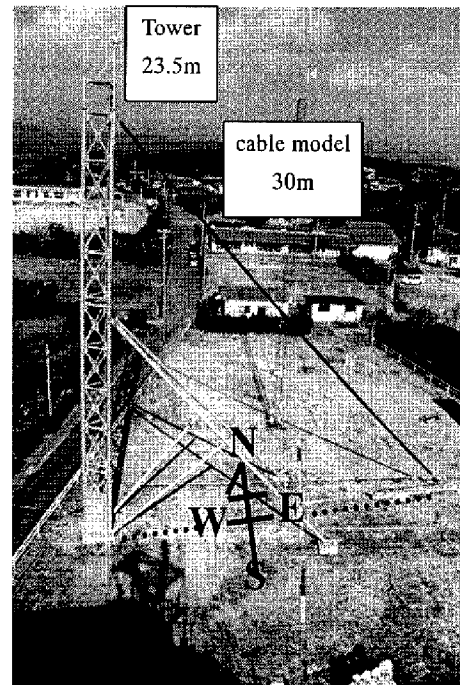


Photo. 1 Full-scale inclined cable model

Table 1 Structural characteristic of cable model

cable length	30(m)		
cable diameter	0.16(m)		
mass per length	11.46(kg/m)		
natural frequency		in-plane	out-plane
	1st mode	0.78(Hz)	0.78(Hz)
	2nd mode	1.56(Hz)	1.56(Hz)
	3rd mode	2.34(Hz)	2.34(Hz)
4th mode	3.12(Hz)	3.12(Hz)	
log.damping decrement	2nd mode	0.0051	
Scruton number	2nd mode	3.81	

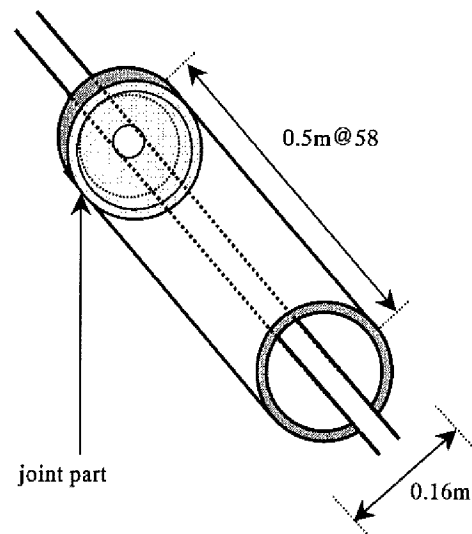
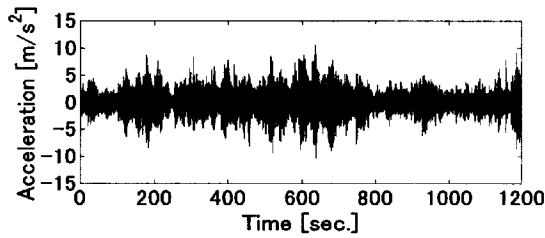
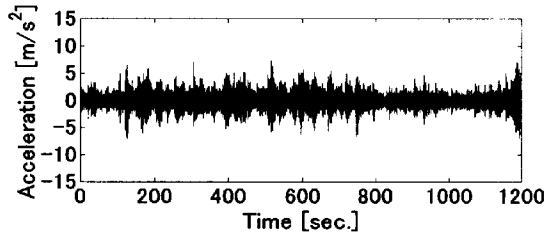


Fig. 1 Cable model



a) Out-plane acceleration



b) In-plane acceleration

Fig. 2 Time history of observed acceleration data

て解析を行った。Fig. 2 に面外及び面内加速度の時刻歴波形図を示す。計測された 20 分間について、平均風向は 126° (ESE~SE), 平均風速は 13.2m/s, 最大風速は 35.3m/s, 乱流強度 $I_u=40.8\%$ (20 分間), であり, 降雨量は 37.0mm/h である。Fig. 3 に面外加速度のスペクトル図を示す。これより, 面外 1 次モードの固有振動数が卓越しており, 模型は面外 1 次モードで大きく振動していたことが確認できる。そこで, 卓越していた 1 次モードのみを抽出して評価を行った。Fig. 4 に 1 次モードの模型中央点における面外変位の時刻歴応答波形図を示す。これより, 面外振動の最大振幅は倍振幅で 1.36m であることがわかり, 目視による観測結果とほぼ対応していることがわかった。

この大振幅振動は降雨を伴う強風時に観測されたことから, レインバイブレーションの可能性が考えられる。上述のように, 従来から言われているレインバイブレーションとは, 風向に対して模型が下り勾配をもつ正姿勢であるとき, 上面水路が形成され, 面内方向に振動することが知られている。しかし今回観測された大振幅振動は, 風向に対して模型は上り勾配をもつ逆姿勢であり, 上面水路も確認されおらず, 面外振動であった。過去の研究 (松本ら, 2001, Matsumoto et al., 2001a) においてレインバイブレーションと思われる応答が得られたケース (ただし, 模型として直径 0.11m, 全長 30m の中空円柱パイプを使用) について, 卓越振動方向である面内加速度のウェーブレット解析を行った結果は, Fig. 5 に示す様にカルマン渦に対応した周波数成分が非定常に現れていることが指摘されている。しかし, 今回の大振幅面外振動では Fig. 6 に示す様にカルマン

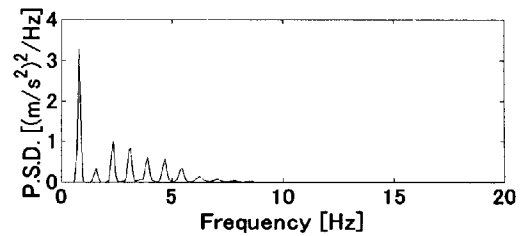


Fig. 3 P.S.D. of out-plane acceleration

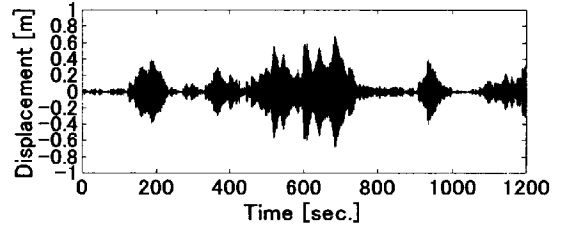


Fig. 4 Time history of first mode displacement at the center of cable

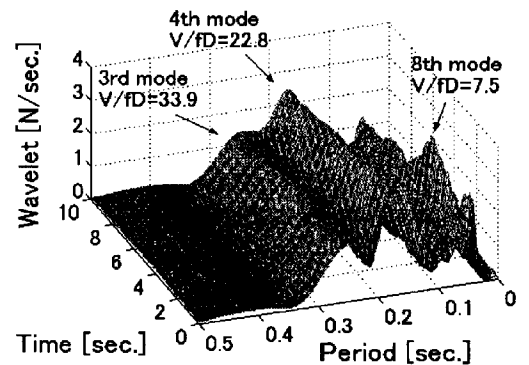


Fig. 5 Wavelet analysis of the in-plane acceleration (considered as a rain-wind induced vibration)

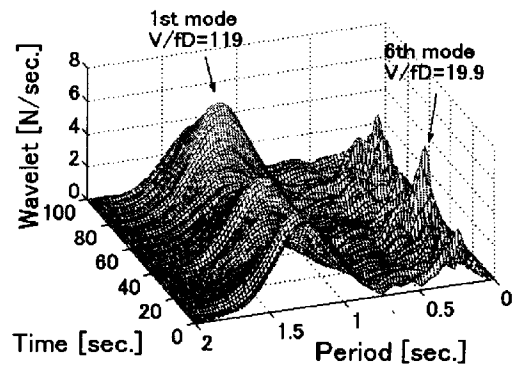


Fig. 6 Wavelet analysis of the out-plane acceleration in this observation (600sec~700sec)

渦に対応した周波数成分は現れておらず, 両者のウェーブレット解析の結果には相違点が見られる。

次に, 準定常理論を用いてバフエッティング応答振幅を評価した。実際の風向偏角 β^* , 及びよどみ点から水平線までの角度 θ_s は, ケーブル模型の鉛直面内傾斜角 α , 及び水平偏角 β (風向) を用いて次の

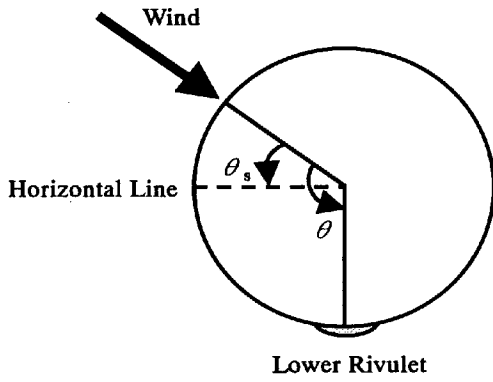


Fig. 7 Position of water rivulet

式で表される。

$$\beta^* = \sin^{-1}(\cos \alpha \cdot \sin \beta) \quad (1)$$

$$\theta_s = 90^\circ - \cos^{-1}\{\sin \alpha \cdot \sin \beta / (\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha \cdot \cos^2 \beta)^{1/2}\} \quad (2)$$

大型ケーブル模型の鉛直面内傾斜角を $\alpha=45^\circ$ とし、面外振動が卓越した 600 秒~700 秒の時間帯の平均風向 122.5° を β とした場合、 $\beta^* \approx 37^\circ$ 、 $\theta_s \approx 48^\circ$ となる。

次に、大振幅振動時には同時に激しい降雨を伴っているが、風向に対するケーブル模型の姿勢が逆姿勢であったことを考慮して、ケーブル表面上に形成される水路はケーブル真下に形成される下面水路のみを仮定した。その場合、Fig. 7 に示すよどみ点から下面水路形成位置までの角度 θ は $\theta = \theta_s + 90^\circ \approx 138^\circ$ となる。さらに、Fig. 8 に本研究の風洞実験で求めた風速 13.0m/s ($\text{Re} \approx 4.7 \times 10^4$) に対する円柱模型 (模型直径 54mm 、長さ 1500mm) の静的空気力係数の結果を示す。これより、乱流中における水平偏角 $\beta=37^\circ$ 、水路位置 $\theta=138^\circ$ の円柱模型の抗力係数及び揚力係数を $C_D \approx 0.7$ 、 $C_L \approx 0.0$ と仮定した。

これらの C_D 、 C_L 、 β^* 、 θ_s を用いて、パフエーティングによる大型ケーブル模型の振動を以下の準定常理論を考慮した 1 自由度運動方程式で表した。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = \frac{1}{2} \rho U^2(t) \cdot C_x \cdot A \quad (3)$$

$$m\ddot{z} + c\dot{z} + kz = \frac{1}{2} \rho U^2(t) \cdot C_z \cdot A \quad (4)$$

$$C_x = C_D \cos \beta^* \cdot \cos \theta_s - C_L \sin \theta_s \quad (5)$$

$$C_z = C_D \cos \beta^* \cdot \sin \theta_s + C_L \cdot \cos \theta_s \quad (6)$$

ただし、 $m=11.463(\text{kg/m})$ 、 $k=m\omega_0^2$ ($\omega_0=2\pi f_1$ 、 $f_1=0.78\text{Hz}$)、 $c=2m\omega_0 \times \frac{\delta}{2\pi}$ 、 $\rho=1.2(\text{kg/m}^3)$ 、

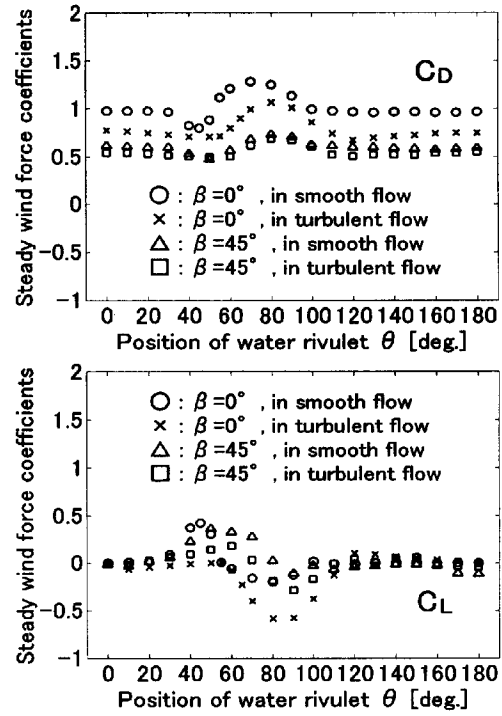


Fig. 8 Steady wind force coefficients in wind tunnel test

$A=0.16(\text{m}^2/\text{m})$ 、 $C_D=0.7$ 、 $C_L=0.0$ 。

この運動方程式について、面外 1 次の振動が卓越した時間帯の風向、風速データを用いて、対数減衰率 δ をパラメータとして線形加速度法 (Newmark の β 法) により時刻歴応答解析を行った。その際、Fig. 4 に示す 1 次モードの変位波形から算出した $t=400$ 秒における模型の変位、速度、加速度を初期条件として 400 秒~700 秒までを連続して解析し、600 秒~700 秒までの区間で評価した。さらに、風速 $U(t)$ としては風の乱れが大きいことを考慮して、計測された風速をそのまま上式に代入した。なお、実際の減衰は $\delta = \delta_{\text{structure}}$ (構造減衰) + δ_{air} (空力減衰) で表されるが、今回対象とした 600 秒~700 秒の時間帯の平均風速 $\bar{U} = 14.9(\text{m/s})$ を考えた場合、

$$\delta_{\text{air}} = 2\pi \frac{\rho \bar{U} C_x A}{2\omega_0 m} \approx 0.060 \quad (7)$$

$$\delta_{\text{air}} = 2\pi \frac{\rho \bar{U} C_z A}{2\omega_0 m} \approx 0.067 \quad (8)$$

となる。

Fig. 9 に対数減衰率 $\delta=0.01$ の場合の 600 秒~700 秒の面外 1 次振動のパフエーティング応答解析結果を示す。また、比較として Fig. 10 に加速度波形からデジタルバンドパスフィルタを使って求めた面外 1 次の腹の位置における変位の時刻歴波形図 (1 次モードの実変位) を示す。これを見ると、1 次モードの

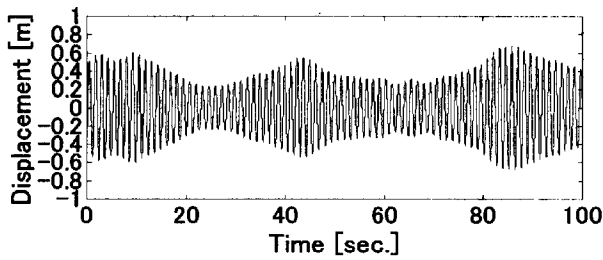


Fig. 9 Time history of the 1st mode displacement calculated from acceleration (600~700sec)

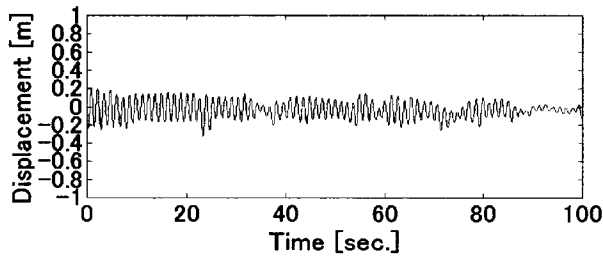


Fig. 10 Time history of the 1st mode buffeting response calculated from numerical integration, $\delta=0.01$, (600~700sec)

実振幅は $\delta=0.01$ と小さく見積もった対数減衰率(空力減衰を考えた場合 $\delta \geq 0.06$ であったと考えられる)を用いて計算したパフェティングによる応答振幅よりも遙かに大きい振幅であることがわかる。また、大規模な振幅であった時間帯は比較的定常な振動性状であったことから、したがって今回観測された大振幅の面外振動はパフェティングではない可能性が高いと言える。

さらに面外1次モードの周波数で無次元風速に換算すると $V/fD \approx 120$ であり、高風速渦励振の発現風速のほぼ上限に相当する風速域であると考えられ、ギャロッピングの可能性も検討の余地がある。過去の研究(松本ら, 1990)において、一様流中において水平偏角 β を有する剛体円柱模型の自由振動実験を行った場合、 $\beta=25^\circ$ 以上では傾斜ケーブル背後の軸方向流の影響が大きくなりギャロッピングが発生することが指摘されている (Fig. 11 参照)。今回振動が卓越した時間帯において実際の風向偏角 $\beta = \beta^* \approx 37^\circ$ であることを考慮すると、観測された面外1次モードの振動はギャロッピングであった可能性がある。しかし、過去の研究(松本ら, 1990)において、乱れ強度 $Iu=4.8\%$ 程度の乱流中ではギャロッピングは安定化されることも指摘されている (Fig. 12 参照)。本観測中の乱れ強度は非常に大きく、このような乱流強度の大きい状態においてギャロッピングが発生するかどうか、検討を行う必要があると思われる。

上述の考察の結果から、本振動現象はパフェッテ

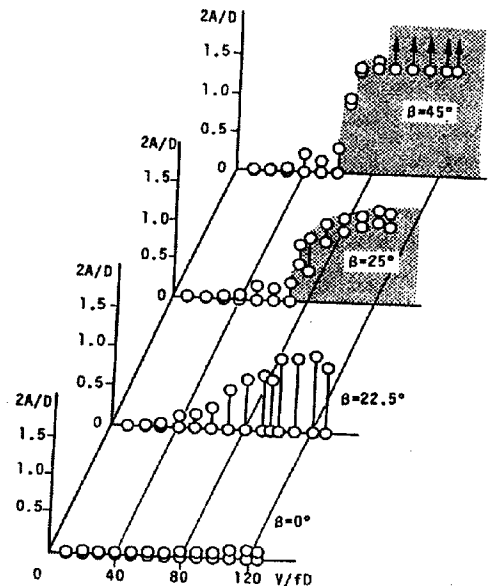


Fig. 11 Velocity - amplitude diagrams for effect of horizontal yaw angle β

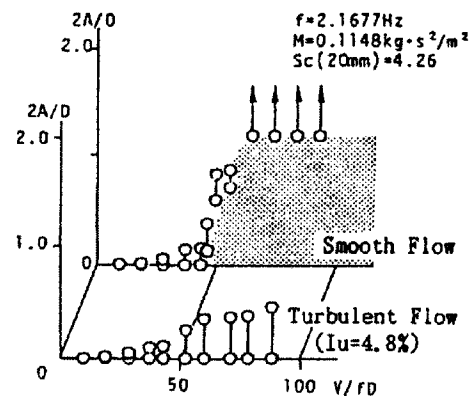


Fig. 12 Velocity - amplitude diagrams for effect of turbulence

イングの可能性は小さく、高風速渦励振もしくはギャロッピングの可能性が考えられるが、現象の特定のためには、更なる検討が必要であると思われる。

4. カルマン渦放出特性に着目した風洞実験

4.1 実験概要

円断面を有する直径 54mm、長さ 1500mm の剛体ケーブル模型を、鉛直面内傾斜角 $\alpha=0^\circ$ 、水平面内傾斜角 $\beta=45^\circ$ に設置した。模型が風洞壁を貫通する部分には直径 110mm の円形の窓が設けられているが、この状態を「窓あり」、完全に塞いだ状態を「窓なし」と定義し、模型上流端側風洞壁からの距離を $X(m)$ と定義する。(Fig. 13 参照)。また、降雨時の状況を再現するために模型表面に厚さ 1.6mm、幅 3.6mm の人工水路を設置した。その設置位置 θ は模

型前縁側よどみ点から測った角度で定義する (Fig. 14 参照)。

4.2 風洞実験結果

人工水路の設置位置 θ を変化させて剛体ケーブル模型に作用する変動揚力を模型端部に設置したロードセルにより測定した。上流端側ロードセルにより検出した変動揚力のスペクトル解析を行い、Fig. 15にその卓越周波数から求めたSt数の分布図を示す。ケーブル表面に形成される水路位置によりカルマン渦放出周波数が異なることがわかり、特に $\theta=40^\circ\sim 100^\circ$ 付近においてその傾向が顕著に現れている。このことは水路が $\theta=60^\circ\sim 80^\circ$ 付近に設置されたときに高風速渦励振の励振力が強く働くこと (Matsumoto et al., 2001b) に対応しているものと思われる。

一方、Fig. 16に過去の研究(松本ら, 2000)において剛体ケーブル模型(一様流中, $\alpha=0^\circ$, $\beta=45^\circ$, 水路無し, 窓あり)に作用する変動圧力のスペクトル解析結果から求めたスパン方向のストローハル数の分布図を示す。模型端部に窓を設けた場合、カルマン渦の放出周波数は模型スパン方向に変化しており、特に模型上流端側 $X/D=0.0\sim$ 模型中央部 $X/D=10.0$ 付近において $St=0.20\sim 0.15$ と変化していることがわかる。実際の自然風は高度方向に風速が変化することを考慮すると、実橋ケーブルにおいてはケーブルスパン方向にカルマン渦の放出周波数に変化していると考えられる。従って「窓あり」では、実橋ケーブルに近い特性を再現していると考えられる。さらに過去の研究(松本ら, 2000)において、「窓あり」の場合、特に模型上流端側においてSt数が大きく変化していることと、高風速渦励振の励振力になると考えられる低周波数の渦が模型上流端側後流域において強く発生していることが対応していると指摘されている。以上のことから、傾斜ケーブルにおいてカルマン渦放出周波数がケーブルスパン方向に変化することにより低周波数の渦が発生し、高風速渦励振が励起されている可能性が示唆される。

ここで実橋ケーブルにおいて、降雨時にケーブル表面上に形成される水路の状況を考えた場合、ケーブルスパン方向に一定の位置に水路が形成されているとは考えにくい。従って、Fig. 15に示すように水路位置によりカルマン渦放出周波数が異なることを考慮すると、水路形成位置がケーブルスパン方向に一様でない場合には、カルマン渦放出周波数のケーブルスパン方向への変化がさらに増幅していると考えられる。よって、水路形成のないケーブル(晴天時)に比べてカルマン渦放出周波数のケーブル方向

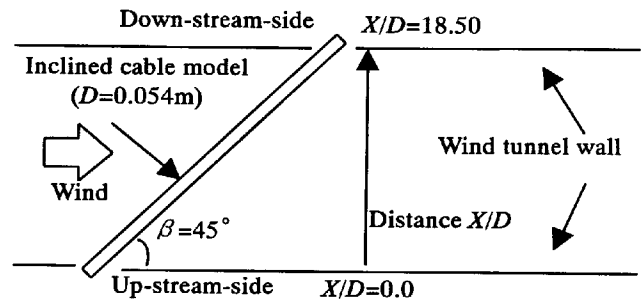


Fig. 13 Top view of wind tunnel

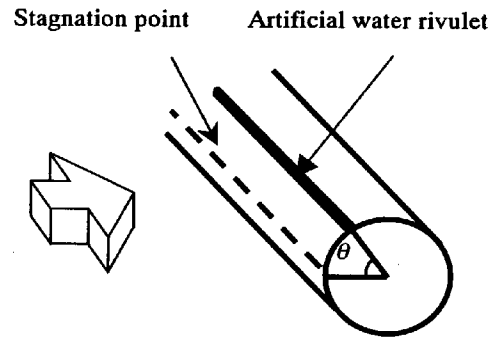


Fig. 14 Position of artificial water rivulet

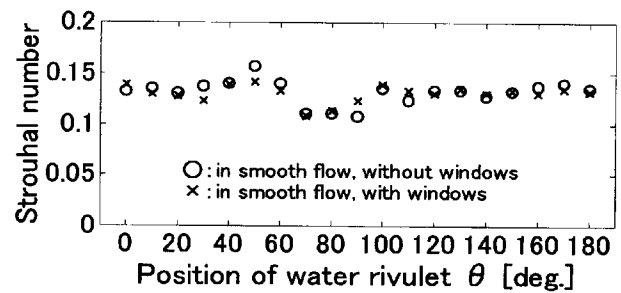


Fig. 15 Strouhal number on stationary cable model with various position of artificial water rivulet, obtained from unsteady lift force ($\beta=45^\circ$, $V=8.0\text{m/s}$)

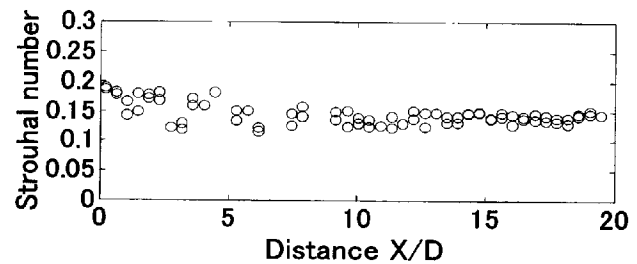


Fig. 16 Strouhal numbers along axis of stationary cable model, obtained from unsteady pressure at $\theta=135^\circ$ from stagnation point. ($\beta=45^\circ$, $V=4.0\text{m/s}$, in smooth flow with windows)

変化が増幅していると考えられる。このことは実際の斜張橋ケーブルにおいて降雨時に多くの高風速渦励振(レインバイブレーション)が観測されていることと対応していると考えられる。また、レインバイブレーションの発生に関して、水路がケーブル運動に連成して振動すること (Ruscheweyh et al., 1999)

は必要ないと考えられる。

5. 結論及び今後の課題

- 1) 台風 11 号による強風により大振幅面外振動が確認された。準定常理論を用いた解析を行いパフェッティングとしての可能性は小さいことが判明した。従って、この大振幅振動は、高風速渦励振もしくはギャロッピングと考えられるが、現象を特定するためには、更なる検討が必要であると思われる。
- 2) 傾斜ケーブルでは、カルマン渦放出周波数がケーブルスパン方向に変化することにより高風速渦励振が励起されている可能性が示唆された。更に、実際の斜張橋ケーブルにおいて、ケーブル表面の水路形成位置は、ケーブルスパン方向に一様とは考えにくい。従って、水路が形成されている場合には、カルマン渦放出周波数のケーブルスパン方向変化が増幅していると考えられ、降雨時に多く高風速渦励振(レインバイブレーション)が観測されていることと対応していると考えられる。また、レインバイブレーションが発生するためには、水路がケーブル運動に連成して振動する必要はないと思われる。
- 3) 斜張橋ケーブルにおける空力振動の発生メカニズムの解明において、カルマン渦放出特性をよりの確に把握することが重要であるものと思われる。

謝 辞

本研究は、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)により実施された。

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・八木知己・對馬大輔・後藤光理・酒井精一郎(2000):斜張橋ケーブルにおける軸方向渦と高風速渦励振に関する基礎的研究, 第 16 回風工学シンポジウム論文集, pp.501-506
- Matsumoto, M., Shirato, H., Yagi, T., Goto, M., Sakai, S. and Ohya, J. (2001a): 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.
- 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., Yagi, T., Goto, M. and Sakai, S. (2001b): Cable aerodynamic vibration at high-reduced velocity, Proceedings of Fourth International Symposium on Cable Dynamics, pp.43-50.
- 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, pp.101-110.
- Ruscheweyh, H.P. (1999): The Mechanism of rain-wind-induced vibration, Proceedings of the Tenth International Conference on Wind Engineering, Wind Engineering into 21st Century, Larsen, Larose, Livesey (eds), Balkema, Rotterdam, pp.1041-1047.

Field Observation of Wind-induced Cable Vibration Using Full-scale Cable Model and Its Vibration Mechanisms

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

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

Synopsis

This study aims to clarify generation mechanisms of inclined cable aerodynamics, such as vortex-induced vibration at high reduced wind velocity, rain-wind induced vibration, galloping and so on by field observations using full scale cable model. A large amplitude vibration was observed under strong wind and heavy rain condition, and then, its type of vibration is discussed. Also, wind tunnel tests were conducted and the mechanisms of inclined cable aerodynamics are considered.

Keywords: cables of cable-stayed bridges, field observation, vortex-induced vibration at high reduced wind velocity, rain-wind induced vibration, galloping, Karman vortex