

## 風洞実験および屋外観測による斜張橋ケーブルの空力振動に関する研究

京都大学大学院	学生員	大谷 純	京都大学工学研究科	フェロー	松本 勝
京都大学工学研究科	正会員	白土 博通	京都大学工学研究科	正会員	八木 知己
京都大学大学院	学生員	酒井 精一郎	京都大学大学院	学生員	岡田 太賀雄

**1.はじめに** 斜張橋ケーブルにおいて発生する高風速渦励振（レインバイブレーション・雨無し振動）は、無次元風速 40, 80 等で発生する風速限定型の振動であり、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、ケーブル後流域に形成される軸方向流、カルマン渦放出の3次元性などが指摘されているが、その振動現象を完全に説明できているとは言い難い。本研究は剛体ケーブル模型を用いた風洞実験、および屋外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観測を実施したものであり、主にカルマン渦放出特性に着目して斜張橋ケーブルの空力振動現象について考察を述べる。

**2.剛体模型のカルマン渦放出特性** 円断面を有する直径 54mm、長さ 1500mm の剛体模型を水平偏角  $\alpha=45^\circ$  に設置し、変動揚力を模型両端に設置したロードセルによって測定した（Fig.1 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。その位置は模型前縁側よみ点から測った角度で定義した（Fig.2 参照）。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おり、開いた状態を「窓あり」、完全に塞いだ状態を「窓なし」と定義する。

Fig.3 に変動揚力の卓越周波数から求めた St 数の分布図を示す。水路の設置位置によりカルマン渦の放出周波数が大きく変化しており、特に  $\alpha=60^\circ \sim 100^\circ$  付近において顕著に現れている。このことは水路が  $\alpha=60^\circ \sim 80^\circ$  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<sup>1)</sup>と対応しているものと考えられる。

一方、過去の研究<sup>2)</sup>において剛体模型に作用する変動圧力から求めたスパン方向の St 数の分布図を Fig.4 に示す。模型スパン方向全域において St 数が変化しており、特に模型上流端付近においてその変化が大きいことがわかる。さらに高風速渦励振の励振力と考えられる低周波数成分が上流端側で卓越している<sup>2)</sup>ことが指摘されており、従っ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で低周波数の渦が発生し、高風速渦励振を励起している可能性が示唆される。

また実橋ケーブルにおいて作用する自然風は高度方向に風速が異なることを考慮すると、ケーブルスパン方向にカルマン渦の放出周波数が変化すると考えられる。さらに水路はケーブルスパン方向に一定の位置に形成されているとは考えにくい。従って降雨時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されると考えられ、降雨時に高風速渦励振（レインバイブレーション）が多く発生していることに対応するものと考えられる。

**3.大型ケーブル模型の屋外観測** 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）で行った。使用した大型ケーブル模型は、ワイヤーケーブルを心材とし、ポリエチレンで被覆したアルミニウム管（直径 0.16m、長さ 0.5m）58 個を外材とした、全長 30m の模型である（Fig.5 参照）。各外形材とワイヤーケーブルの定着点は一箇所であり、隙間は防食用ポリ塩化ビニール粘着テープで塞いであり、外形材の全体剛性への効果を抑えている。模型上端を西側（高

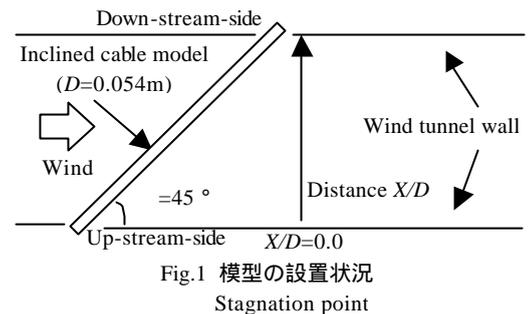


Fig.1 模型の設置状況

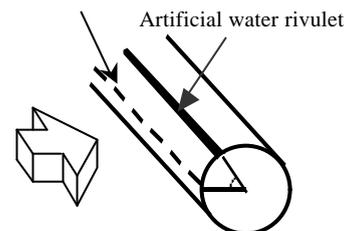


Fig.2 人工水路の設置位置

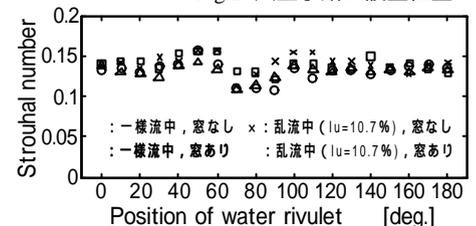


Fig.3 変動揚力から求めた水路位置による St 数の分布図（模型上流端側，V=8.0m/s）

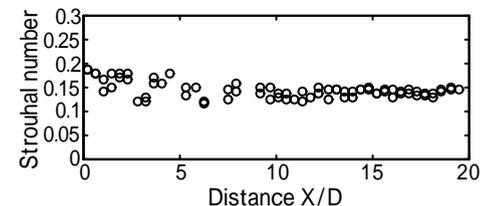


Fig.4 変動圧力から求めたスパン方向の St 数の分布図（一様流中，水路なし，窓あり，V=4.0m/s）

キーワード：斜張橋ケーブル，高風速渦励振，カルマン渦放出特性，屋外観測

連絡先：京都大学大学院工学研究科環境地球工学専攻

〒606-8501 京都市左京区吉田本町 TEL：075-753-5093 FAX：075-761-0646

さ 21m), 下端を東側に設置し, 鉛直方向に約 45° 傾斜させてある (Photo.1 参照). 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. なお面内振動とはケーブル模型と塔により形成される面内での振動であり, 面外振動とはそれに垂直な面内での振動である.

平成 13 年, 8 月 21 日に台風 11 号が観測所付近を通過し, 面外 1 次モードの卓越した激しい振動が観測された.

Fig.6 に最も振動が顕著であった時間帯 (20 分間) における面外加速度の時刻歴波形を示す. この時間帯の風向は ESE~SE, 平均風速は 13.2m/s, 瞬間最大風速は 35.3m/s, 乱れ強度  $I_u=40.8\%$  である. また, 降水量は 37.0mm/h である. 面外加速度データから面外 1 次モードを抽出し, 模型中央点での振動応答に換算したものを Fig.7 に示す. 最大倍振幅で 1.36m を記録しており, 目視による観測とほぼ等しいことが判明した.

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発生が考えられるが, 従来から言われているレインバイブレーションはケーブルが風向に対して下り勾配であるとき, 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. 本研究においては模型は風向に対して上り勾配であり上面水路も確認されておらず, 面外方向に振動している. また, 過去に行われた屋外観測 (大型ケーブル模型として直径 0.11m, 全長 30m の中空円柱パイプを使用) において, レインバイブレーションと考えられる振動応答が得られ, 面内加速度のウェーブレット解析において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<sup>3)</sup> (Fig.8 参照). しかし, 今回観測された大振幅面外振動においては, カルマン渦に対応した周波数成分は現れておらず (Fig.9 参照), 従来から言われているレインバイブレーションとは振動性状に相違点が見られる. また, 面外 1 次モードの周波数を無次元風速に換算すると  $U/VD=120$  付近となり, 高風速渦励振が発生すると考えられる風速域の上限付近に相当することから, ギャロッピングの可能性も考えられる.

さらに準定常理論を用いてパフェッティング応答による振動振幅を評価したが, 振動振幅はここまで大きくはならず, また, 振幅が大きい時間帯においては比較的定常的な振動性状を示したことから, パフェッティングの可能性は小さいものと考えられる.

**4.まとめ** カルマン渦放出特性の水路位置による変化, およびケーブルスパン方向における変化が高風速渦励振の発生において何らかの関連性があることが示唆された. また, 屋外観測において降雨を伴った強風時における振動現象においてカルマン渦放出特性に相違点が見られた. 従って, 斜張橋ケーブルの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と思われる.

- 参考文献** 1) M.Matsumoto, T.Yagi, M.Goto, S.Sakai “Cable aerodynamic vibration at high reduced velocity” proceedings of Fourth International Symposium on Cable Dynamics, Montreal, Canada  
2) 松本 勝, 八木知己, 對馬大輔, 後藤光理, 酒井精一郎, 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, 2000  
3) M.Matsumoto, H.Shirato, T.Yagi, M.Goto, S.Sakai, J.Ohya “Field Observation of The Full-scale Wind-induced Cable Vibration”, The 5<sup>th</sup> APCWE, Kyoto, 2001

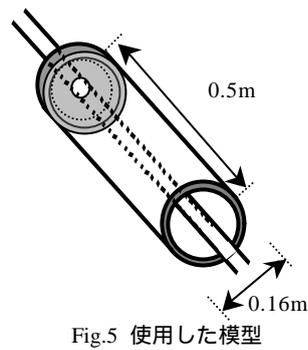


Fig.5 使用した模型

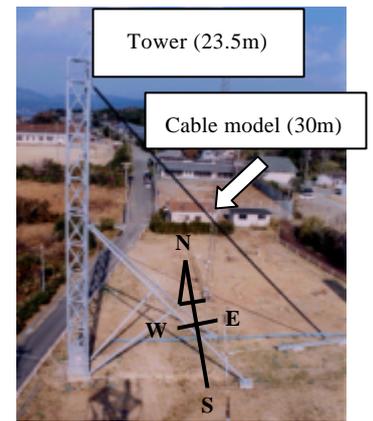


Photo.1 大型ケーブル模型の設置状況

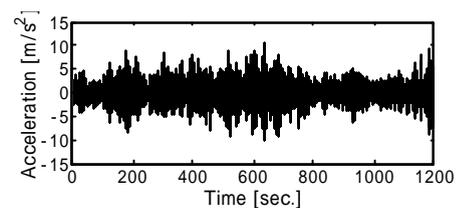


Fig.6 面外加速度の時刻歴波形

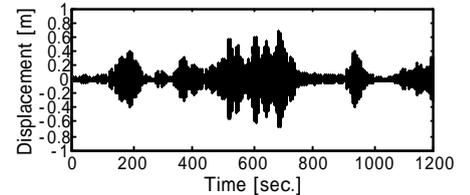


Fig.7 面外振動の時刻歴波形

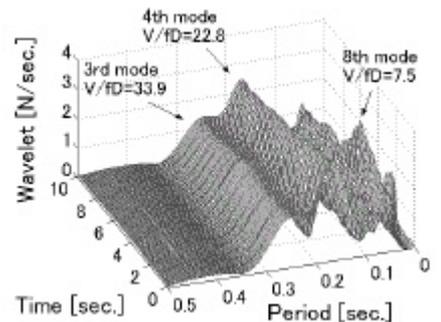


Fig.8 面内加速度のウェーブレット解析結果 (参考文献 1), 模型直径 0.11m, 長さ 30m)

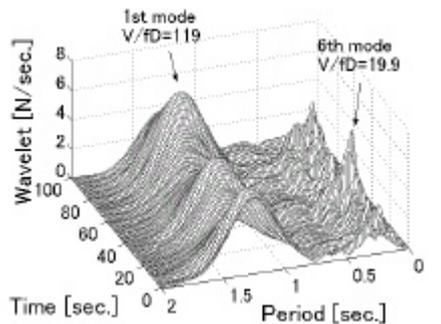


Fig.9 本観測における面外加速度のウェーブレット解析結果 (600~700sec)