

京都大学大学院 学生員 ○對馬 大輔
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 フェロー 松本 勝
川崎重工業(株) 正会員 重村 好則¹⁾

1) 研究当時京都大学大学院

1. はじめに 斜張橋ケーブルにおいて、降雨を伴う強風下で頻繁に発生するレインパイプレーションは無次元風速 $V/\bar{D}=40,80$ などカルマン渦励振の共振風速より高い風速域で発現することが多く、高風速渦励振の様相を呈している。本研究では、斜張橋ケーブルの高風速渦励振に着目し、実橋ケーブルの振動特性、静止及び振動円柱の揚力特性並びに後流域特性などから、その発生メカニズムならびに降雨、軸方向流などの因子がそれに及ぼす影響について考察を行った。

2. 静止円柱の変動揚力特性 2次元剛体模型を水平支持し、その両端に設置したロードセルでケーブル模型に作用する変動揚力を計測し、スペクトル解析を行った。なおケーブルが風洞壁を貫通している部分には直径 200mm の窓が開いている。図 2-1 に示す $V=3\text{m/s}$ 、水平風向偏角 $\beta=0^\circ$ 、すなわちケーブルが主流に対して直角に支持されたときの揚力のスペクトル解析から無次元風速 $V/\bar{D}=20$ 付近に対応する周波数で高風速渦励振の励振力となっていると思われる揚力成分の存在が確認された。図 2-2 より $\beta=45^\circ$ として主流に対してケーブルが傾斜すると、この揚力の低周波成分が低周波数側へ移動し、対応する無次元風速が 40 付近となっていることが分かる。過去の研究²⁾により、傾斜ケーブルの後流域にはケーブル軸方向に沿った、いわゆる軸方向流が存在することが知られており、揚力の低周波成分が低周波数側へ移動したのは軸方向流の影響である可能性が考えられる。この結果は、図 2-3 に示すように $\beta=0^\circ$ においてケーブル後流域に人工軸方向流を発生させたときに、揚力の低周波成分に対応する無次元風速が 40 弱になっていることとも一致する。さらに図 2-4 に示すようにケーブル端部に端板を設置して軸方向流の供給を阻害すると揚力の低周波成分が消滅したことを併せて考えると、高風速渦励振の発現は軸方向流に大きく依存していると考えられる。また水路や乱流が高風速渦励振に及ぼす影響について調べるために、人工水路を設置したケースや乱流中でも測定したが、これらによって揚力の低周波成分が強調される傾向は明確には現れなかった。

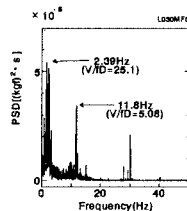


図 2-1 $V=3\text{m/s}$, $\beta=0^\circ$
窓あり、一樣流

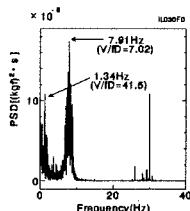


図 2-2 $V=3\text{m/s}$, $\beta=45^\circ$
窓あり、一樣流

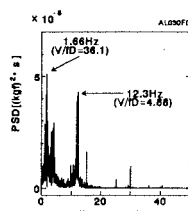


図 2-3 $V=3\text{m/s}$, $\beta=0^\circ$
軸方向流付、一樣流

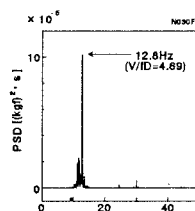


図 2-4 $V=3\text{m/s}$, $\beta=0^\circ$
端板付、一樣流

3. 振動円柱の非定常空気力特性 強制加振法による非定常空気力を $\beta=0^\circ$ でロードセルを用いた直接測定によって行った。図 3-1 に示す一樣流中での H^* 分布を見ると $V/\bar{D}=30$ 付近で H^* が正の値を示し、この風速域で高風速渦励振が発現する可能性が示唆される。またケーブル表面の $\theta=72^\circ$ の位置に人工水路を設置したときの結果を図 3-2 に示す。この場合、 $V/\bar{D}=20, 40, 60, 100$ などの風速域で励振力が作用しており、水路によって空力的に不安定化していることが分かる。またケーブル後流域に人工的に軸方向流を与えたときの結果を図 3-3 に示す。これを見ると $V/\bar{D}=40$ で H^* が正となり、この風速域で高風速渦励振が発現する可能性が考えられる。また乱流中で人工水路を設置したと

Daisuke TSUSHIMA, Masaru MATSUMOTO, Hiromichi Shirato, Yoshinori SHIGEMURA

ころ一様流中と同様に非定常空気力特性が非常に敏感に反応し、ケーブルが不安定化していることがわかった。さらに図 3-4 に示すように乱流中でケーブルの後流域に人工軸方向流を与えたところ $V/D=40$ 付近で大きく不安定化していることがわかる。従って一様流中、乱流中での結果を併せて考えると軸方向流が高風速渦励振の発生に大きく関与している可能性が考えられる。

$$H_1' = \frac{L_1 \cos \alpha}{\rho D^2 \omega^2 \eta}$$

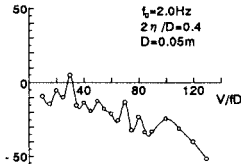


図 3-1 一様流

$$H_1' = \frac{L_1 \cos \alpha}{\rho D^2 \omega^2 \eta}$$

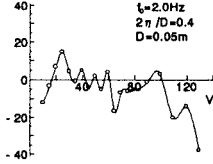


図 3-2 水路付 ($\theta=72^\circ$)
一様流

$$H_1' = \frac{L_1 \cos \alpha}{\rho D^2 \omega^2 \eta}$$

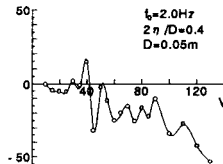


図 3-3 人工軸方向流付
一様流

$$H_1' = \frac{L_1 \cos \alpha}{\rho D^2 \omega^2 \eta}$$

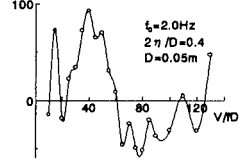


図 3-4 人工軸方向流付
乱流

4. 軸方向流と高風速渦励振

これまでの結果から、高風速渦励振の発現が軸方向流によって何らかの影響を受けていることが判明した。そこでケーブル後流域の流れの可視化を行い、ビデオカメラで撮影した。図 4-1 に傾斜ケーブル ($\beta=45^\circ$) の後流域に発生する軸方向流の様子を可視化写真を示す。これより、傾斜ケーブルの後流域のケーブル表面近くに

Wind
 $V=0.8\text{ m/s}$



図 4-1 軸方向渦の可視化写真

軸方向渦が発生していることが確認される。またビデオ映像で見るとこの軸方向渦は軸方向の流れからちぎれて主流方向に流されているように見える。また静止円柱の変動揚力 ($V=3.0\text{ m/s}$, $\beta=45^\circ$) のウェーブレット解析を行ったところ、カルマン渦放出によるピークが間欠的に強められており、またその時刻において無次元風速 $V/D=40$ 付近の揚力の低周波成分が現れていた。これらの結果を踏まえると、カルマン渦と軸方向渦がカルマン渦放出数回につき 1 回同期して間欠的に強い渦が放出され、その渦によって高風速渦励振が励起されている可能性が考えられる。この概念図を図 4-2 に示す。この仮説に基づいてカルマン渦放出 3 回につき 1 回、軸方向渦とカルマン渦が同期すると仮定すると、白樫ら³⁾による $\beta=45^\circ$ の円柱模型がカルマン渦放出周波数の 1/3 倍付近の周波数で高速域共振が発生したという報告に整合し、カルマン渦放出 5~6 回につき 1 回、軸方向渦と同期すると仮定すると、 $V/D=40$ 付近となり高風速渦励振が発現するとされる風速域と一致する。従ってこの仮説により $V/D=20, 40, 80$ といった風速域で起こると言われる高風速渦励振の発生メカニズムの説明が可能である。

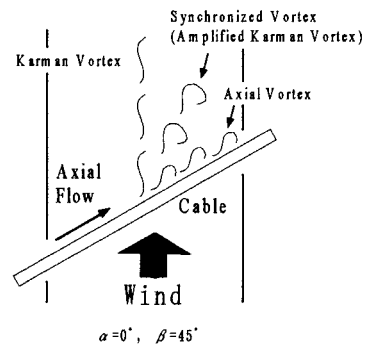


図 4-2 軸方向渦とカルマン渦

5. 結論

静止及び振動円柱の揚力特性などから高風速渦励振の発現には軸方向流が大きく関与していることが判明した。それに基づいて軸方向流の可視化を行ったところケーブル軸方向に沿って軸方向渦の存在が確認され、この軸方向渦とカルマン渦との同期による間欠的な渦放出によって高風速渦励振が励起されている可能性が示唆された。

参考文献 2) 松本 勝, 白石成人, 北沢正彦, 辻井正人, 平井滋登, 「傾斜円柱の空力振動特性 —

ケーブル Rain Vibration との関連性—」, 第 10 回風工学シンポジウム論文集, 1988

3) 白樫正高, 上野真司, 石田康弘, 脇屋正一, 「弾性支持された円柱の流体力学的振動に関する研究」, 日本機械学会論文集 (B 編) 49 巻 446 号, 1983