

京都大学大学院 学生員 ○酒井 精一郎 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
日本鉄道建設公団 正会員 後藤 光理¹⁾ 京都大学大学院 学生員 大谷 純

1)研究当時京都大学大学院

1.はじめに 斜張橋ケーブルの空力振動現象の一つであるレインパイプレーションは降雨を伴う強風時にあって、カルマン渦励振よりも高無次元風速域で発現する振動振幅の大きな風速限定型振動であり、頻繁な発生はケーブル定着点の金属疲労の促進につながる。風洞実験などの結果から、振動の発生要因として、降雨時にケーブル表面に形成される水路、ケーブル背後に形成される軸方向流・軸方向渦、カルマン渦放出の3次元性、軸方向渦とカルマン渦の干渉などが指摘されているが、未解明な点も多い。さらに風洞実験では降雨の影響を再現することが難しい。そこで実橋スケールのケーブル模型を屋外に設置して、風向・風速、降雨の有無など条件の違いによるケーブル模型の挙動を観測した。

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）でおこなった。ケーブル模型にはアルミニウム管（厚さ5mm）を、PE管（厚さ5mm）で被覆した直径0.11m、全長30mの中空円柱（単位長さ質量は6.06kgf/m）を使用し、初期導入張力を約1.8tf、地表面となす角を40.8°として、塔を西側にして東西方向にケーブル模型を設置した（Photo 1 参照）。計測はケーブル模型の地表面側定着点に連続して設置されたロードセル、及びその位置から2.8m離れた模型表面に設置された加速度計を用いて、大型ケーブル模型にはたらく張力、加速度をローパスフィルター（20Hz）を通して測定した。無風時に計測された面内振動の固有振動数及び構造減衰などの大型ケーブル模型の構造諸元をtable 1に示す。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での振動である。風向・風速は、大型ケーブル模型北側の鉄塔の地表面から25mの位置に設けられた風車型風向風速計で測定されたデータを、また降雨量は気象台潮岬測候所で観測されたデータを使用した。

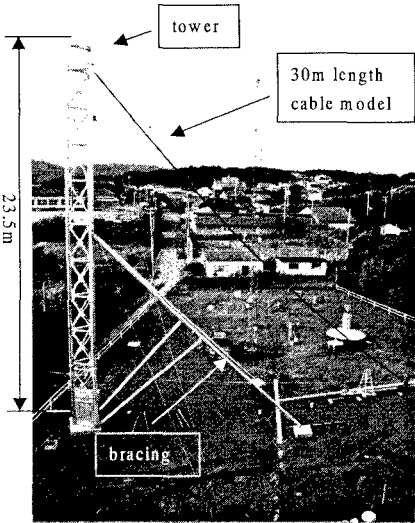


Photo 1 大型ケーブル模型外観

3.観測結果 2000年11月の計測開始から同12月末までに得られたデータの中で、実橋で観測されるレインパイプレーションが、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主塔の風下側に位置するケーブルに多く発生し、面内方向に振動することを考えて、南西及び北西の強風が発生したデータを選び、ケーブル模型振動の解析をおこなった。対象としたデータは、

データ①：平均風速 12.28m/s、風向 SW、降雨なし
データ②：平均風向 15.54m/s、風向 NW、降雨なし
データ③：平均風速 15.14m/s、風向 SSW、降雨あり（34.0mm/h）である。Fig.1～Fig.6 にそれぞれの面内加速度、変動張力のスペクトル解析結果を示す。面内加速度のスペクトル図において、降雨

Table 1 大型ケーブル模型構造諸元

ケーブル長	30(m)
ケーブル径	0.11(m)
単位長さ重量	6.06(kgf/m)
面内1次固有振動数	1.37(Hz)
面内2次固有振動数	2.44(Hz)
面内1次対数減衰率	0.0079
面内2次対数減衰率	0.0045
スクルトン数(面内1次)	6.534
スクルトン数(面内2次)	3.722

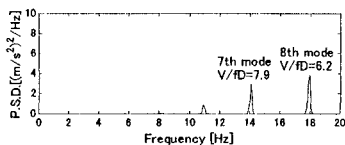


Fig.1 データ①の加速度の P.S.D. 図

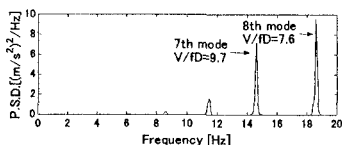


Fig.2 データ②の加速度の P.S.D. 図

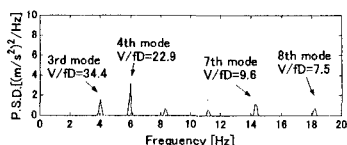


Fig.3 データ③の加速度の P.S.D. 図

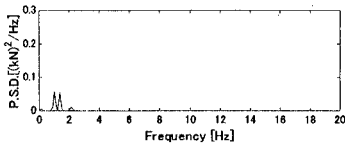


Fig.4 データ①の張力の P.S.D. 図

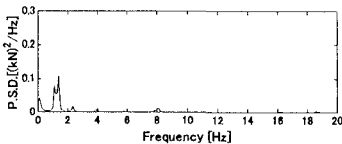


Fig.5 データ②の張力の P.S.D. 図

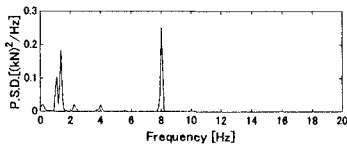


Fig.6 データ③の張力の P.S.D. 図

なしの場合 (Fig.1,2) では、面内 7 次、8 次モードの振動にあたる固有振動数が卓越しているが、円柱のストローハル数を 0.2 とし、実際の風向偏角と平均風速により $\cos$ 法則を考えた場合、いずれのケースも約 20Hz 付近のカルマン渦が発生していると考えられるため、これらはカルマン渦励振によるものと推察できる。しかし、Fig.3 の降雨ありの場合では 4.0Hz、5.96Hz の面内 3 次、4 次モードの固有振動数が卓越していることがわかる。同様に、変動張力のスペクトル図においても降雨ありの場合 (Fig.6) では、面内 3 次モードの固有振動数の 2 倍の値 (8.0Hz) が卓越しており、降雨なしの場合 (Fig.4, Fig.5) と大きく異なる。(ロードセルの設置位置の関係から、面内振動の振動数は 2 倍に検出される可能性がある。) これらの面内 3 次、4 次の振動は無次元風速 $V/ID=34.4, 23.1$ に対応しており、従来言われている高風速渦励振の発現風速域 $V/ID=20, 40, 80$ に近いことを考えると、データ③のケースではレインバイブレーションが発生していた可能性が示唆される。

次にデータ③の面内加速度のデータについてウェーブレット解析をおこなった結果を Fig.7 に示す。実際にレインバイブレーションが観測された名港西大橋のケーブルの加速度データをウェーブレット解析した場合¹⁾、2 つの振動数のビート現象が発生したとの報告 (Fig.8 参照) もあるが、Fig.7 に示すデータ③のケースを見ると、カルマン渦と思われる振動数成分は非定常に現れているが、3 次、4 次モードのビート現象は得られなかった。風洞実験で傾斜円柱模型後流域の変動風速をウェーブレット解析した場合、カルマン渦及び高風速渦励振の励振力になると考えられる、軸方向渦が時間的に非定常に発生していることが指摘されているため、ケーブル模型周りの流れ場とケーブル振動との対応を調べてみる必要がある。

4.まとめ 屋外に大型ケーブル模型を設置して、その挙動を観測した結果、降雨の有無により強風時の大型ケーブル模型の応答特性に大きな違いが見られ、レインバイブレーションと考えられる振動応答も得られた。今後はカルマン渦・軸方向渦・軸方向流などのケーブル模型周りの 3 次元的な流れ場を、屋外でも調べてみる必要がある。

参考文献 M.Matsumoto, Y.Shigemura, Y.Daito, T.Kanamura, "High speed vortex shedding vibration of inclined cables", International seminar on cable dynamics, 1997

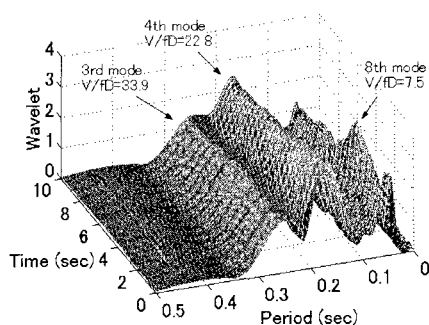


Fig.7 本観測実験データ②

面内加速度のウェーブレット解析図
(平均風速:14.9m/s, 降雨 34.0mm/h)

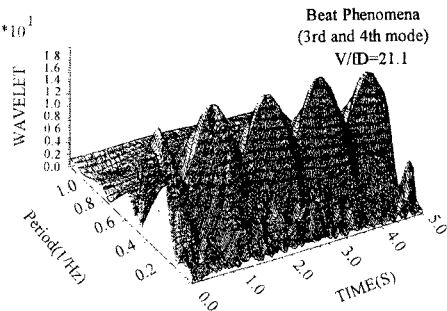


Fig.8 名港西大橋 c16 ケーブル
面内加速度のウェーブレット解析図
(平均風速:7.5m/s, 降雨 5~10mm/h)