

I-242 斜張橋ケーブルのレインパイプレーション発生機構と水路形成位置の関係

京都大学大学院 学生員 桂 一詞
 京都大学工学部 正 員 松本 勝
 京都大学工学部 正 員 白石成人
 京都大学工学部 正 員 白土博通
 （株）鴻池組 正 員 佐野祐一
 京都大学大学院 学生員 西崎孝之

I. まえがき これまでの研究よりレインパイプレーションの発現にはケーブルの上面に形成される水路が深く関わること、流下方向に上り勾配を持つケーブルの上面には水路を形成させにくいことが報告されている。¹⁾ また、著者らは、ケーブル模型において適当な位置に人工水路を設置した場合の空力特性について検討し、水平偏角 β と水路位置 θ をパラメータとして、一樣流中における応答性状のタイプと不安定領域を示した。²⁾ 更に水路形成に関する解析的な研究には、その断面形状について、寺元・藤野ら³⁾が、上面側水路の微小要素に着目して、作用力のつりあいから水路の断面形状に関する非線形支配微分方程式を導き断面形状を解析的に求めている例があるが、水路位置に関する検討までは至っていない。そこで本研究では、実橋ケーブルにおける上面側水路位置を実験的手法と解析的手法とを用いて比較検討することによって、実橋でのレインパイプレーション発生機構についてについての考察を試みる。

II. 実験及び解析概要 本研究では実物大のケーブル模型（140mm ϕ ）を風洞吹き出し口に固定支持し、その表面に水を流した状態において傾斜角 α 水平偏角 β 及び風速を変化させ上面側の水路位置を測定した。また、解析的に水路形成位置について検討する際には、①ケーブルが静止状態である②ケーブル軸に直角である断面内の2次元問題である③水路中の水が静止状態である④気流が断面直角方向に流下することを仮定し、水路表面上の各点におけるつりあい方程式 $P_a + \sigma/R = P_w$ （ただし、 P_a :作用する風圧、 σ :水の表面張力、 R :局所的な曲率半径、 P_w :作用する水圧）を利用した。解析の際、入力に利用したデータは、人工水路（厚さ1.2mm、幅7.5mm）付きケーブル模型（50mm ϕ 、アルミニウム製）の風圧分布（詳細は⁴⁾参照）、水の空気に対する表面張力および光反射法によって測定した水の各表面材質に対する接触角である。これらを用いることにより水路前縁における曲率半径を求め近傍の形状を決定する。この形状に沿って微小距離 d だけ離れた点Aにおいて同様に曲率半径を求めることによってA点近傍の形状を決定する。この操作を水路前縁から後縁まで繰り返すことにより水路形状を求めた。（図1）

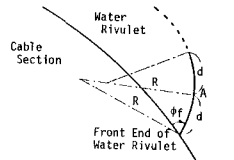


図1 解析手法（略図）

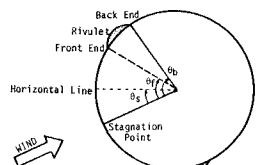


図2 水路位置定義

III. 水路位置測定実験結果とその考察 測定結果を図3～8に○で示す。ただし、図の網掛け部分はこれまでに示された空力的に不安定な水路位置²⁾より、無次元風速 $V/fD=30\sim70$ 、ケーブル振動数 $f=2\text{Hz}$ 、ケーブル径140mm ϕ を仮定した場合の不安定領域である。

① $\beta=30^\circ$ の場合 $\alpha=30^\circ$ （図3）の場合には風速がおおよそ10～12m/sにおいて上面側水路が形成され、それ以上の風速では形成されない。ただし、 $V=10\sim12\text{m/s}$ においても、淀み点から水路前縁までの角度 θ_r が 90° 以上となっている。 $\alpha=40^\circ$ においては（図4）風速が10m/s以上で上面側水路が形成された。この場合、 $\alpha=30^\circ$ に比べて θ_r が小さくなり、空力的に不安定と考えられる水路位置に近づいた。

② $\beta=45^\circ$ の場合 $\alpha=30^\circ$ では（図5）風速 $V=10\text{m/s}$ 以上で水路が形成される。 $V=10\sim12\text{m/s}$ においては空力的に不安定な水路位置に、14m/s以上で θ_r が 75° 前後に形成される。 $\alpha=40^\circ$ では（図6）、 $V=8\text{m/s}$ 以上で水路が形成され、 $V=8\sim10\text{m/s}$ のとき空力的に不安定な水路位置に、11m/s以上では $\theta_r=80^\circ$ 前後に形成される。

③ $\beta=55^\circ$ の場合 $\alpha=30^\circ$ において（図7）、 $V=10\text{m/s}$ 以上で水路が形成され、 $V=10\sim12\text{m/s}$ において空力的に不安定な水路位置に、12m/s以上

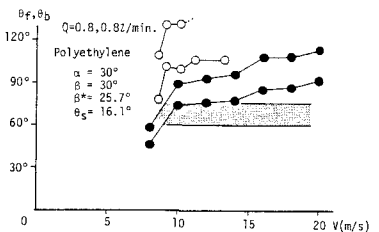


図3 風速-水路位置関係図

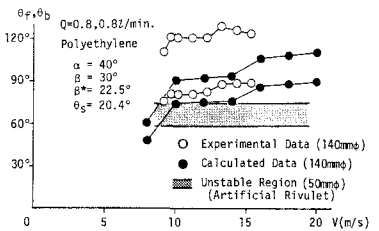


図4 風速-水路位置関係図

では θ_r が 75° 前後に形成される。 $\alpha=40^\circ$ (図8)では、 $V=9\text{m/s}$ 以上で水路が形成され、風速と共に水路位置が後流側に移行し 14m/s 以上で $\theta_r=85^\circ$ 前後に形成される。

更に、PE間の表面に12本の矩形突起を設けたケーブルとポリ塩化ビニルシートを巻いたケーブルについても同様の実験を行ったが、上面側には明確な水路形成はみられなかった。

全体的に、風速と共に水路位置が後流側に移行する傾向にあり、このことには実橋におけるレインバイブレーションの発生風速域が限定されている事実と符合する(図9参照)。また、同じ水平偏角でも傾斜角によって水路位置が違い、これは、ファン型マルチケーブル形式の斜張橋での観測において、ある段のケーブルのみに振動が生じたという報告を裏付けるものと考えられる。

IV. 水路形成の解析的検討 風速 $V=6\sim 20\text{m/s}$ まで 2m/s 毎に計算させた水路位置について以下に述べる。

① $\beta=30^\circ$ の場合 $\alpha=30^\circ$ および 40° の場合には(図3, 4)風速が 8m/s において θ_r にして 50° 付近に上面側水路が計算された。 $V=10\sim 20\text{m/s}$ において、風速が高くなるにつれ θ_r が 80° 付近から 90° 付近へと移行した。全体的に実際の不安定な位置より淀み点側に計算された。

② $\beta=45^\circ$ の場合 $\alpha=30^\circ$ では(図5)風速 $V=8$ で水路が形成され始め、全体的に実際の不安定な位置より淀み点側にずれる。 $\alpha=40^\circ$ (図6)ではほぼ実際の不安定な位置と一致している。

③ $\beta=55^\circ$ の場合 $\alpha=30^\circ$ では(図7)、水路位置測定実験で水路が形成されている $V=10\text{m/s}$ では水路が計算されないが、 $V=12\text{m/s}$ 以上では θ_r がほぼ一致している。 $\alpha=40^\circ$ (図8)では、 $10^\circ\sim 20^\circ$ 程度淀み点側にずれて計算されるが、風速変化による水路位置変化の傾向は合っている。

今回行った方法では、水路前縁及び後縁の接触角を固定することより解を求めたが、全体として、風速が大きくなるほど収束解が後流側において得られることなど、現象を比較よく再現したものとなった。以上のことから、2次元断面内の力のつりあいという単純化されたモデルによっても、水路形成位置のおおよその傾向はつかめると言える。

V. 結論 1) 実験的手法と解析的手法より、ケーブルの姿勢、風速によって、形成される水路の位置が異なることが明らかになると共に、両手法による水路形成の有無や位置に関して概略の一致を見た。これより実橋におけるレインバイブレーションは、①風向が橋軸方向に対して偏角を持った場合に②限られた風速域において③流下方向に下り勾配を持つ姿勢のあるケーブルが④水路が空力的に不安定な位置に近づくことによって振動が発生しているものと考えられる。これはファン型マルチケーブル形式の斜張橋での観測において、ある段のケーブルのみに振動が生じたという報告を裏づけるものと考えられる。

2) 矩形突起付ケーブルおよびビニルシート巻ケーブルにおいて上面側の水路形成が抑えられ、制振対策として有効である。

参考文献 1) 樋上靖一、"斜張橋ケーブルのRain Vibration"、日本風工学会誌第27号、1986 2) 松本 勝他、"斜張橋ケーブルのRain Vibration発生機構における二つの要因についての考察"、第11回風工学シンポジウム論文集、1990 3) 寺元博昭、藤野陽三他、"ケーブル上面に生じる水路の断面形状解析"、日本風工学会年次研究発表会梗概集、1987 4) 松本 勝他、"斜張橋ケーブルのレインバイブレーション発生機構における非定常圧力と水路位置に関する考察"、日本風工学会年次研究発表会梗概集、1991

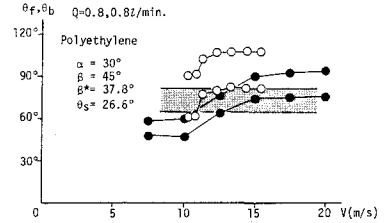


図5 風速-水路位置関係図

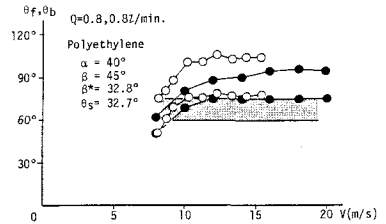


図6 風速-水路位置関係図

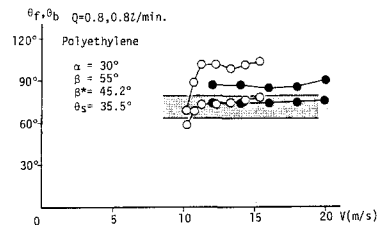


図7 風速-水路位置関係図

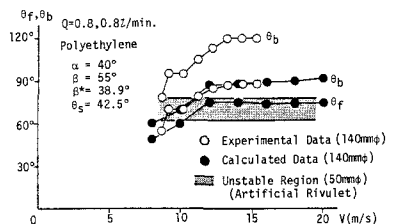


図8 風速-水路位置関係図

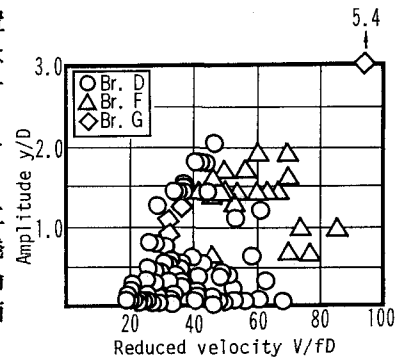


図9 実橋での観測例