

斜張橋ケーブルの限定型振動としてのレインバイブレーションに関する研究

Rain-Wind Induced Vibration of Inclined Cables as Velocity Restricted Vibration

松本 勝¹⁾, 西崎孝之²⁾, 青木 淳³⁾, 北沢正彦⁴⁾, 白土博通⁵⁾

By Masaru MATSUMOTO, Takayuki NISHIZAKI, Jun AOKI, Masahiko KITAZAWA, and Hiromichi SHIRATO

This paper aims to investigate the fundamental mechanism of "rain-wind induced vibration" of inclined cables in cable-stayed bridges. A series of wind tunnel experiments indicated that rain-wind induced vibrations are classified three types: "velocity divergent type", "velocity restricted type", and their mixed type. The response characteristics observed on prototype inclined cables do not look like divergent type response, but "velocity restricted type" response. And the mechanism of latter type response is related to "vortex-shedding with long period," which is excited by the three dimensionality of Karman vortex shedding along the cable axis.

Key Words: Velocity restricted type vibration, Formation of Rivulet, Vortex shedding with long period, Three dimensionality of Karman vortex-shedding.

1. まえがき

レインバイブレーションは、斜張橋のケーブルが風と雨の作用によって振動する現象であり、国内外のいくつかの斜張橋で振動例が報告されている。これまでの風洞実験において、風速限定型と発散型の2種類の振動が確認されており、発散型の振動については、その発生要因として、気流がケーブルに対して偏角（風向偏角）を有して吹くことによるケーブル背後の「軸方向流」、および雨によってケーブル表面に形成される「上面側水路（以下、水路と呼ぶ）」の2つが指摘され、ギャロッピングの準定常理論に基づき定性的に説明されている¹⁾。また、限定型振動については、何らかの渦放出による長周期の風速変動に起因した振動であるとされている²⁾。一方、実橋で観測されているレインバイブレーションは、発振風速域が限定された振動であり、この振動は、水路形成位置が風速に支配されるために空力的に不安定な水路位置となる風速域が限定されることによるものであると一見考えられるけれども、風洞実験において観測されている「長周期の風速変動に起因した限定型振動」である可能性が濃厚である。

本研究では、実橋で発生していると考えられる“限定型振動としてのレインバイブレーション”について、風洞実験を通してその発生機構の解明を試みた。

-
- | | | | |
|-------|-------------------|----------|-------------------|
| 1) 工博 | 京都大学助教授 | 工学部土木工学科 | (〒606 京都市左京区吉田本町) |
| 2) 工修 | 水産庁（研究当時京都大学大学院生） | | (〒100 東京都千代田区霞が関) |
| 3) | 京都大学大学院 | | (〒606 京都市左京区吉田本町) |
| 4) 工修 | 阪神高速道路公団 | 神戸建設部設計課 | (〒650 神戸市中央区新港町) |
| 5) 工博 | 京都大学助手 | 工学部土木工学科 | (〒606 京都市左京区吉田本町) |

2. 風洞実験概要

図-1に斜張橋ケーブルの風に対する姿勢を示す。模型の姿勢は、鉛直面内傾斜角 α と水平面内風向偏角 β の2つの角度によって定義される。実際の風向偏角 β^* は、 α 、 β を用いて、 $\beta^* = \arcsin(\cos \alpha \cdot \sin \beta)$ と表される。今回の実験では $\alpha = 0^\circ$ とし、模型を水平面内に鉛直バネ吊り1自由度支持したので $\beta^* = \beta$ となる。

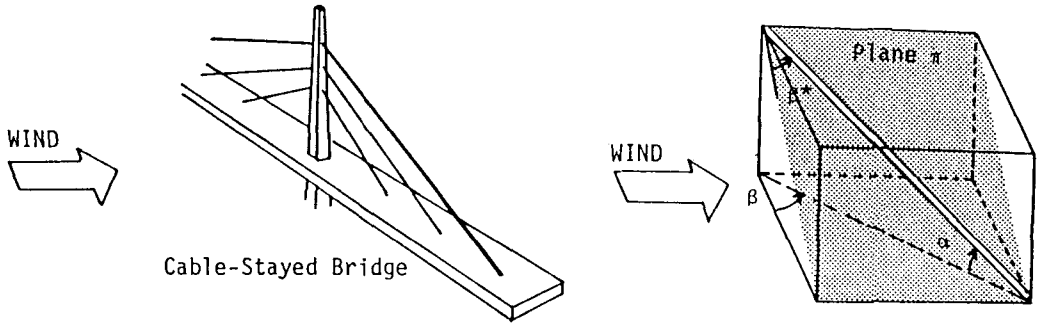


図-1 ケーブルの姿勢（風向偏角 β^* ）

ケーブル模型は直径50mm、長さ1400mmのアルミニウム製パイプを用いた。また疑似水路として図-2に示すように幅7.5mm、厚さ1.2mmのテープを張り付けて人工的に再現した。

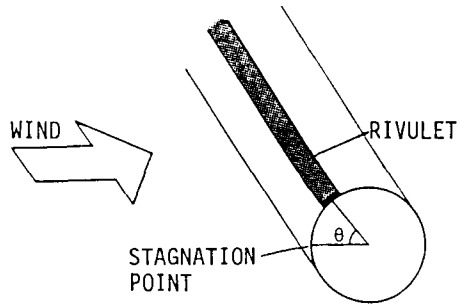


図-2 人工水路の位置 θ

(厚さ1.2mm、幅7.5mm、ケーブル径50mm)

3. 自由振動応答特性

風洞実験におけるケーブル模型の自由振動応答特性は、風向偏角 β 、水路の有無およびその位置 θ 、気流の種類、スクルートン数などによって複雑な影響を受けているが、大別して次の3タイプに分けられる。

- ①風速限定型振動（図-3-a） ②風速発散型振動（図-3-b） ③両者の混在した振動（図-3-c）

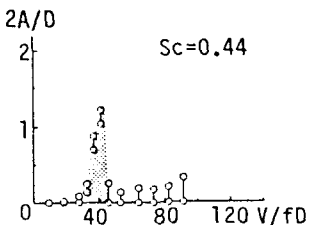


図-3-a 風速-振幅図
($\beta = 35^\circ$, $\theta = 72^\circ$, 一様流)

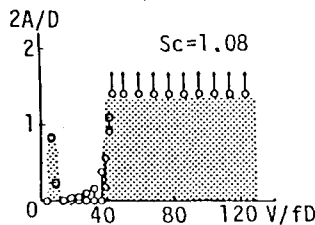


図-3-b 風速-振幅図
($\beta = 45^\circ$, 水路無し, 一様流)

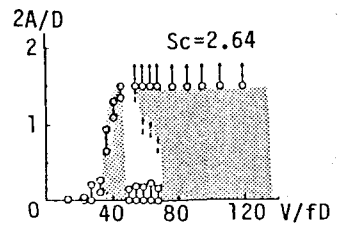


図-3-c 風速-振幅図
($\beta = 40^\circ$, $\theta = 72^\circ$, 一様流)

無次元風速 $V/fd=40$ 付近で発生している限定型振動は、水路位置が人工的に固定されているので、第1節で述べたような「実風速限定型振動」と考えるのは困難である。

・V-A- δ 特性

図-4は、風向偏角 $\beta=45^\circ$ 、水路位置 $\theta=72^\circ$ 、一樣流の条件下におけるV-A- δ (Velocity-Amplitude-Damping) 図である。無次元風速(V/fD , V :実風速, f :固有振動数, D :ケーブル直径) $V/fD=40$ において限定型振動が発生し、 $V/fD=50$ 以上の風速域で風速発散型のギャロッピング振動が発生している。そしてギャロッピング型振動の中の無次元風速 $V/fD=80$ 付近に減衰率が局所的に小さくなるピークがみられる。言い替えるとこの風速域ではケーブルの励振力が局所的に大きい。すなわち、 $V/fD=40$ 付近だけでなく、 $V/fD=80$ 付近にも限定型振動が混在していることがわかる。また、図-5は風向偏角 $\beta=0^\circ$ 、水路なし、一樣流の場合のV-A- δ 図であるが、この場合もやはりストローハル数($St=0.2$)の整数倍である $V/fD=40, 80, 120$ 付近で、若干減衰が小さくなっている。負減衰までは達せず、振動となって顕在化しないが、限定型振動の要因となるものが潜在していることがわかる。このように、限定型振動は風向偏角を持たず($\beta=0^\circ$)、水路のない円柱ケーブル自体が潜在的に有する性質であり、無次元風速 $V/fD=40, 80, 120$ 付近にその要因を有している。そして水路形成、風向偏角などによって不安定性が増幅され、振動が発現するに至るものと考えられる。

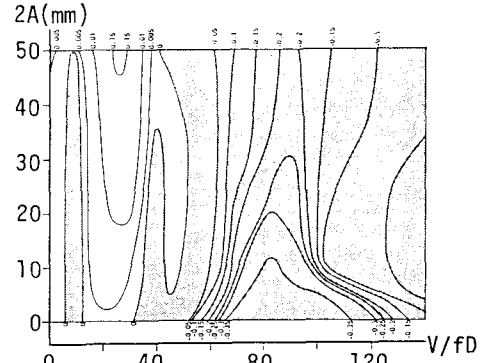


図-4 V-A- δ 図 ($\beta=45^\circ$, $\theta=72^\circ$, 一樣流)

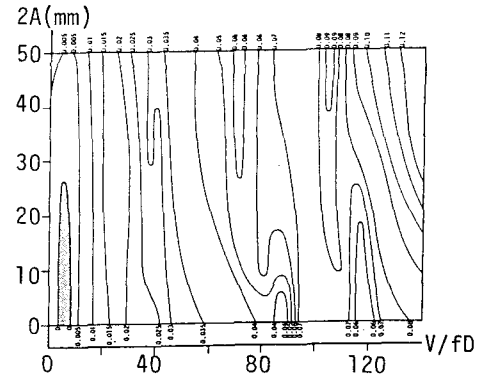
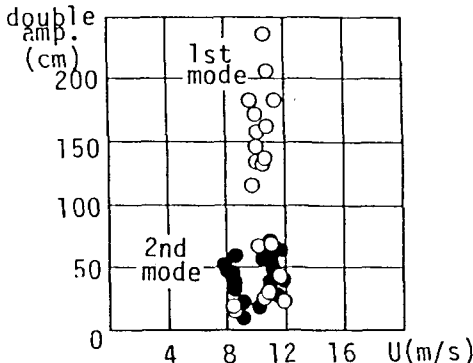


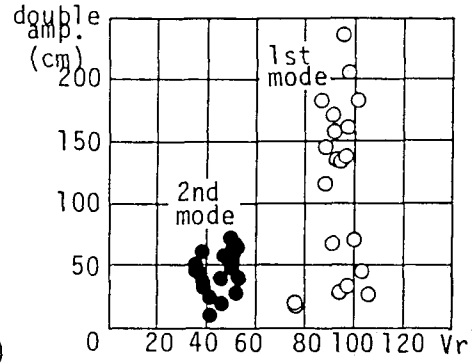
図-5 V-A- δ 図 ($\beta=0^\circ$, 水路無し, 一樣流)

4. 実ケーブルの振動応答

図-6-aに天保山大橋(主径間350m, 最長ケーブル長183.5m)のケーブルにおいて観測されたレインバイブレーションの振動例を示す³⁾。1次モード, 2次モード共, 限定された風速域(8m/s~12m/s)で振動が発生している。しかし図-6-bのように、横軸を実風速 V (m/s)でなく無次元風速 V/fD で評価すると、1次モードは $V/fD=75\sim105$ 付近, 2次モードは $V/fD=35\sim55$ 付近で振動が発生しており、前節で述べたように、無次元風速域 $V/fD=40$ および80付近で限定型振動が発生している。つまり、実ケーブルにおいては水路形成位置など実風速に支配される要因があり、振動数が変化しても発現実風速域が変化しないとも受け取れる一方で、文献2)にも述べられている無次元風速で支配された“長周期の渦”に対応したとも考えられる振動が発生している可能性も考えられる。次節ではこの長周期の風速変動についてさらに考察する。



a 実風速-振幅図



b 無次元風速-振幅図

図-6 実際の斜張橋で観測された振動例

5. 後流域流速変動測定

2次元模型における渦生成の3次元性については、Bearman等⁴⁾が指摘している。彼らは断面が弾丸型の2次元模型を用いて実験し、まず後端がスパン方向にまっすぐな(波打っていない)模型で流れの可視化を行い、流れが3次的、すなわち渦生成がスパン方向に複雑に変化していることを確認した。次に、渦放出の3次元性を捉えやすくするために、後端がスパン方向に波打った形状をした模型を用いて渦の発生位置を固定して実験した。その結果、波打った後端の、山の部分と谷の部分で異なる2つの周波数の渦放出が観測され、この2つの周波数の差に相当する周波数の風速変動も確認できる、としている(図-7、図-8参照)。

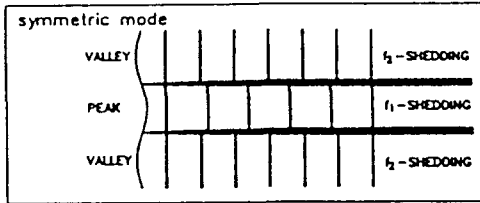


図-7 2つの異なる渦放出の模式図(Bearman等⁴⁾による)

すなわち、彼らによると渦放出はスパン方向に3次的に分布しており、何回かの渦放出に1回それらの位相がスパン方向に揃うとき、他の渦よりも大きな渦放出がなされ、その大きな渦を長周期の風速変動として捉えることが出来るとしている。そこで、風向偏角 $\beta=0^\circ$ 、水路なしの条件下でケーブルを固定し、静止模型の一樣流($V=8\text{m/s}$)中での後流域の変動流速のパワースペクトル密度を測定した。その結果を図-9に示す。カルマン渦放出によるとみられる32Hz付近にピークがみられ、その渦放出周波数がスパン方向に変化していることがわかる。言い替えると、ストローハル数が一定でなく、スパン方向に複雑に変化している。特に、 $x/W=0.214, 0.286, 0.357$ (x :風洞側壁から測定位置までの距離(cm), W :風洞側壁間の距離(70cm))を見るとわかるように、2つの渦放出周波数のピークが卓越している。この2つの渦放出周波数の差ごとに、位相の揃った大きな渦が放出され、この渦による長周期の風速変動が風速限定型振動の発生と深い関わりがあるものと思われる。図よりその差は約2Hzであり、この変動から計算される共振無次元風速は $V/fD=80$ となり、 $V-A-\delta$ 図(図-5)中の減衰率の小さくなっている箇所とほぼ対応している。

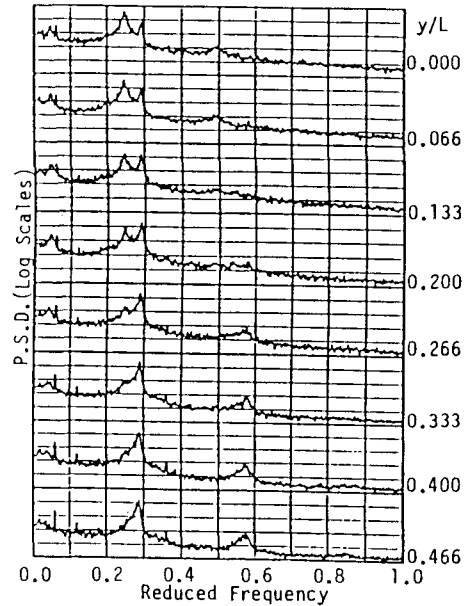


図-8 静止断面における後流域流速のパワースペクトル密度(Bearman等⁴⁾による)

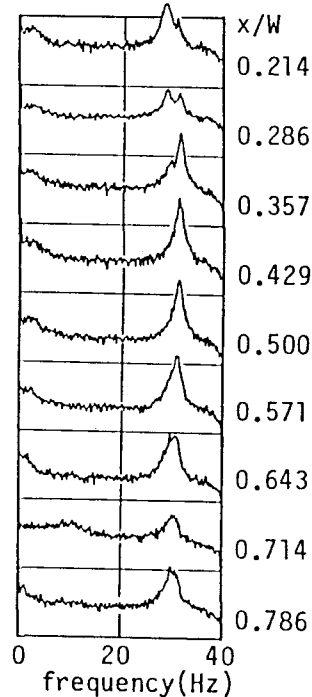


図-9 静止円柱における後流域流速のパワースペクトル密度
(x :風洞側壁から測定位置までの距離(cm),
 W :風洞側壁間の距離(70cm))

次に風向偏角 $\beta=35^\circ$, $\theta=58^\circ$, 一様流($V=4\text{m/s}$)の条件下でケーブルを1~10Hzで強制加振(倍振幅10mm, ケーブル径は50mm)し, 同様の測定を行った. 加振振動数を変化させることにより, 実風速一定のまま無次元風速を変化させた. 図-10は各加振振動数における変動風速パワースペクトルのピーク値の変化を示したものである. また, 図の網掛け部分は倍振幅10mmにおいて減衰率が負である風速域を示している. 無次元風速 $V/fD=7$ 前後の渦励振域以外に $V/fD=35\sim 50$ 付近において, 風速変動のピークが大きくなっている. この風速域が限定型振動が発生している風速域と一致していることより, 限定型振動の発生がこの変動に起因するものであると考えられる. この変動は, 2次元円柱のストローハル数が約0.2であることを考えると, カルマン渦放出よりも8~15倍の周期を有する極めてゆっくりした変動である.

また, ケーブルの限定型振動とよく似た振動を送電線が乱流中で起こすという報告⁶⁾もなされており, その発生機構について, 図-11に示すように, 「電線の小さ

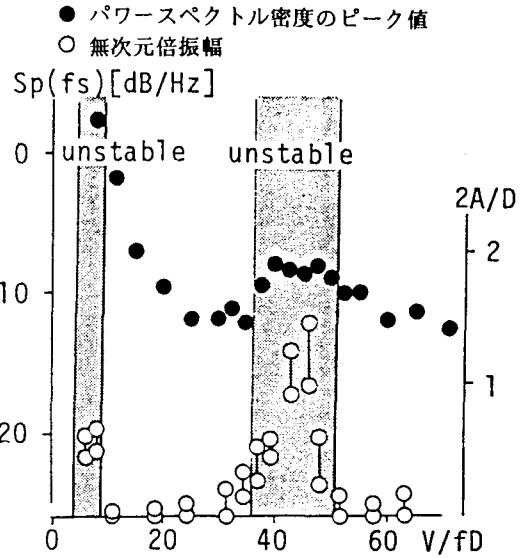


図-10 加振振動数における変動風速のパワースペクトル密度のピークの変化 ($\beta=35^\circ$, $\theta=58^\circ$, 一様流)

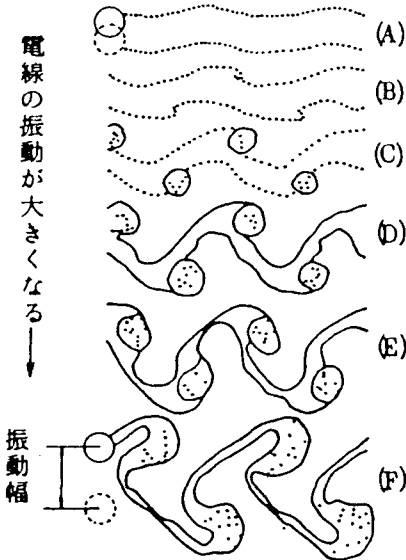


図-11 集約されたカルマン渦の模式図
[文献5)による]

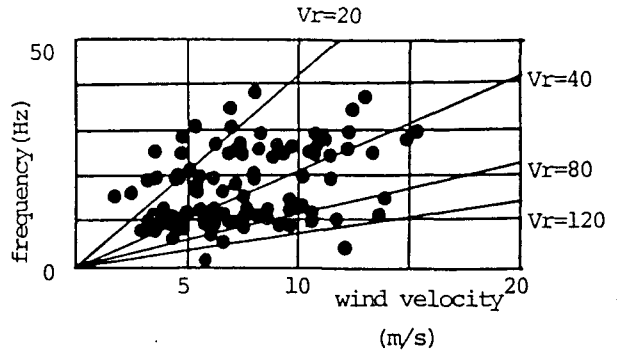


図-12 「乱流振動」の観測例

な振動や乱流の影響によってカルマン渦列が乱れを受けると, 図中の(A)のように渦列も波打ってくる. このような状態になると渦列は定在できなくなり, 各々の渦が運動をはじめ, (A)~(F)のようにその様相を変化していく. すなわちカルマン渦の渦列は集約されて1つの大きな渦を形成し, これに応じて等価的な渦の個数が減少し, 低い周波数の(=長周期の)渦を発生する.」⁶⁾という説明がなされている. この「送電線の乱流振動」の観測例を縦軸に固有振動数, 横軸に実風速をとってプロットしたものが図-12であるが, 無次元風速 $Vr=20, 40, 80, 120$ 付近で振動が発生しているようにも見える. 図-11のようにカルマン

渦が集約しているという考えは、実験的に明らかにされたものではなく、その正当性は十分ではないが、ケーブルの限定型振動とよく似た振動がカルマン渦に起因した長周期の風速変動によるとの報告がなされている。そして、このようなカルマン渦の集約に「渦放出の3次元性」が関わっていると考えられ、ケーブルにおいてもこれに類似したメカニズムでカルマン渦が集約されていると考えることができる。

6. 結論

本論文では、限定型振動としてのレインバイブレーションについてその発生機構を考察した。以下にその結論を示す。

- ① 限定型振動の発生要因は風向偏角 $\beta=0^\circ$ で水路のない円柱ケーブル自体が潜在的に有する性質であり、風向偏角や水路などによって空力的不安定性が増幅されることによって、振動が発現するものと思われる
- ② 風洞実験において観測された限定型振動は、 $V/fD=40, 80, 120$ 付近にその発生要因を有し、カルマン渦に起因した長周期の風速変動による振動である。
- ③ カルマン渦の放出がスパン方向に一様でない、すなわち渦放出の3次元性が確認され、これによってカルマン渦の数回につき1回、大きな渦が発生していると思われる、これが限定型振動の発生に大きく関わっている可能性がある。

(謝辞) 本研究の遂行にあたりご協力をいただいた、京都大学大学院 山岸 稔氏に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 松本ら, "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年
- 2) 松本ら, "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トン数の影響", 第11回風工学シンポジウム論文集, 1990年
- 3) 阪神高速道路公団, 日立造船(株) "天保山大橋のケーブル振動とその対策", 研究報告, 1992年
- 4) P.W.Bearman, N.Tombazis, "The Effects of Three-Dimensional Imposed Disturbances on Bluff Body Near Wake Flows", Preprints of the Second BBAA, 1992年
- 5) 微風振動調査専門委員会, 微風振動ワーキンググループ, "架空送電線の微風振動", 電気学会技術報告, No. 129, 1982年

(1993年9月16日受付)