I－319　斜張橋ケーブルの Rain Vibration，特に風速限定型振動に関する基礎的研究

京都大学大学院　学生員　青木　淳　　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　　水　　産　　庁*　正　員　西崎孝之
阪神高速道路公団　正　員　北沢正彦　　（*研究当時京都大学大学院生）

１．はじめに　レインバイブレーションは、斜張橋のケーブルが風と雨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。実橋での観測から、その特徴として、①降雨時に発生する。②ある限られた風速域で発生する限定型振動である。③風向きが橋軸に対して偏角を持つ。などが挙げられる。一方風洞実験においては、風速限定型と発散型の２種類の振動が発生し、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、発散型振動については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、発散型の振動は気流の乱れによって安定化されることも指摘されている[2]。限定型振動的様相を示す実橋でのケーブル挙動は、発散型振動が自然風の乱れによって抑制された結果とも考えられる。本研究では実橋で発生していると思われる風速限定型の振動についてその発生機構を考察する。

２．実験結果と考察

・振動応答特性　図１は風向偏角β=0°水路位置θ=63°にケーブル模型を設置し、気流を一様流、乱流（Iu=4.8%,12%）と変化させたときの振動応答を比較したものである。一様流および乱流（Iu=4,8%）中において無次元風速 V/fD=40付近で限定型振動が発生している。またこの限定型振動は、ある適当な乱れ強さの乱流下で不安定化する傾向があることが図から示唆される。図２はβ=45°、θ=72°、一様流の条件下における V-A-δ図である。V/fD=40における限定型振動のほかに、V/fD=80付近に減衰が局所的に小さくなるピークがみられる。これは、ギャロッピング型振動の中に限定型振動が混在していることを示している。

・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[3]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次元的、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３参照）。すなわち、彼らによると渦放出はスパン方向に３次元的に分布しており、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、大きな渦放出がなされる、としている。そこで、風向偏角β=0°、水路なしの条件下でケーブルを固定し、静止模型の一様流（V=8m/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４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。

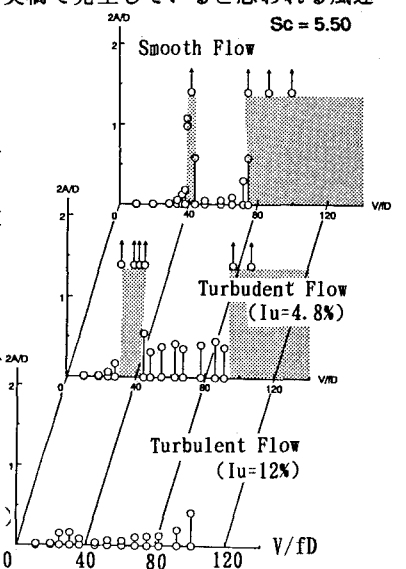

図１　気流の種類による振動応答の変化（β=0°，θ=63°）

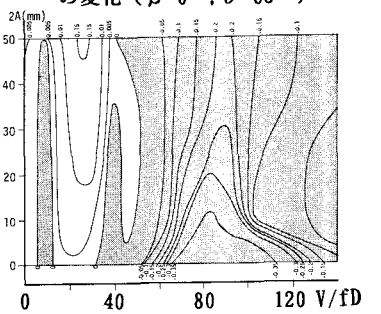

図２　V-A-δ図
（β=45°，θ=72°，一様流）

特にx=15,20,25では２つのピークが存在している。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-δ図（図２）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。また、この長周期の渦放出は図５に示すように、変動風速を2Hzの幅で区切った周波数成分ごとに取り出した波形からも認められる。

次に風向偏角β=0°、水路なし、一様流(V=8m/s)の条件下でケーブルを1～6Hz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。図６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。x=35cmのときV/fD=40付近に、x=20cmのときV/fD=75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すると思われ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St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。また長周期の渦について、送電線が乱流中で振動を起こすとき[4]「電線の小さ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、いくつかのカルマン渦が集約されて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。」という報告もあり、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。

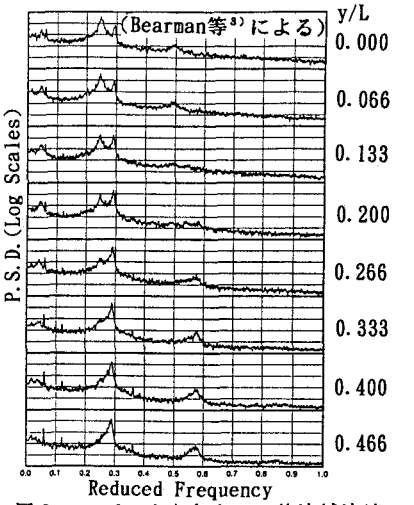

図３　スパン方向各点での後流域流速のパワースペクトル密度

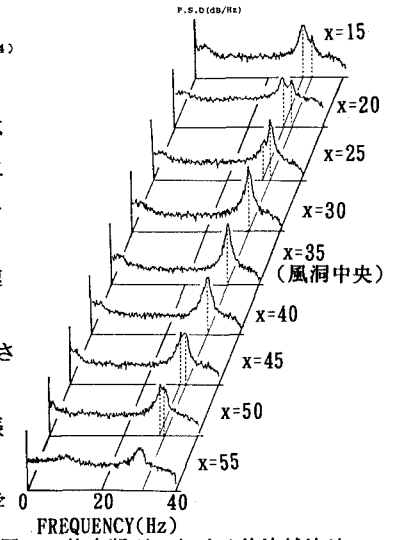

図４　静止断面における後流域流速のパワースペクトル密度
（x:風洞側壁からの距離(cm)）

３．結論　本論文では斜張橋ケーブルのレインバイブレーションの風速限定型振動の発生機構に関して考察した。その結論を以下に示す。

①限定型振動はV/fD=40，80付近にその発生要因を有し、適度な乱れ強さの乱流によって不安定化する。

②カルマン渦放出のスパン方向の３次元性が確認され、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多大なるご協力を頂いた、京都大学工学部白土博通助手、京都大学大学院山岸　稔氏、三井建設辻本和弘氏、三井造船赤瀬雅之氏（両名共、研究当時京都大学学生）に深く感謝致します。

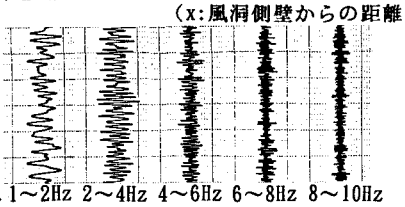

図５　静止断面における後流域流速変動

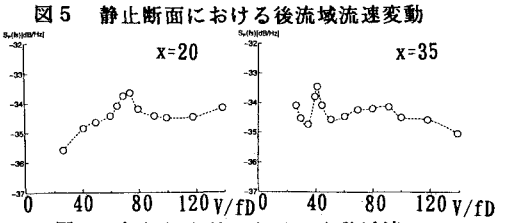

図６　加振振動数における変動風速のパワースペクトル密度のピークの変化

（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)P.W.Bearman, N.Tombazis,"The Effects of Three-Dimensional Imposed Disturbances on Bluff Body Near Wake Flows", 1992年 (4)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", 1982年