

東京大学 学生員 清水 亨
 東京大学 正 員 山口 宏樹
 東京大学 正 員 伊藤 学

1. はじめに

送電線、斜張橋、および架設中の吊橋の動力学的挙動を問題とする場合、これらの構造物ではケーブル固有の特性が全体系の特性に大きく反映されるため、まず単一ケーブルの動特性を把握しておくことが基本的かつ重要な問題となる。ケーブルはサグを有するため重力の作用下で平面を構成するが、その平面内における運動を面内運動、その平面に垂直な方向の運動を面外運動と呼ぶものとする、既往のケーブル模型のメカニカルな加振実験において、その加振力が面内方向のみであつても面外運動が励起される次元運動をすることが報告されている。これはケーブルの力学的特徴である幾何学的非線形性に起因するものと考えられ、定性的には1自由度系の近似によって理論的に説明がなされたと言える¹⁾。しかしながら、現実のケーブルは無数の自由度を有し、実際にどのような挙動を示すかを実験を通じてある程度定量的に把握しておくことが必要となる。以上の様な背景を踏まえて、本研究では、ケーブルの非線形3次元挙動、とりわけ面内周期外力による面外運動の励起現象について実験を主体として調べ、非線形振動論におけるいわゆる動的不安定現象との対応を試みた。

2. 実験装置及び実験方法

図1に示す様に、サグを有する水平ケーブルについて、固定端に近い位置に左右対称に設置した電磁誘導式加振器により、面内鉛直方向に周期的な外力を加え、図に示す $x_e = 0.50L$ 、 $0.29L$ 、 $0.11L$ の3測点について光学変位計を用いて面内変位、面外変位を測定した。模型ケーブルには、実際のケーブルとの対応を考えて、鋼線とより合せたザイルにケーブルの長さに沿って均一に鉛線を巻きつけたものを使用した。既往の研究から、ケーブルの動特性については特にサグ比が重要なパラメータであることが指摘されているため、本実験においてもサグ比を主たるパラメータとして採用した。実験ケースはサグ比 $\gamma = 0.15, 0.10, 0.051, 0.013$ の4ケースで、この他に支点間傾斜角 θ のパラメータとしての影響を調べるために $\gamma = 0.10$ 、 $\theta = 12.0^\circ$ も実験ケースに加え、合計5ケースについて実験を行なった。なお、支点間傾斜角を設定したケースについては初期形状に対称性がよいため、加振器は1台のみで加振した。

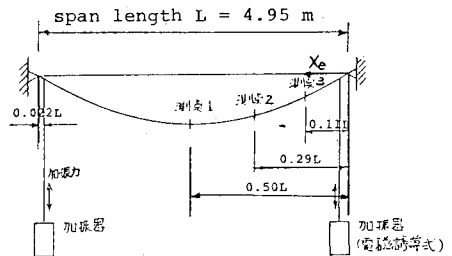


図1. 実験装置概略

3. 実験結果及び考察

まず、面内鉛直加振時の面内、面外についての変位応答曲線を作成したところ、面内変位(倍振幅)が最大値を有する箇所と面外運動の顕著な連成が広範囲にわたって認められたため、さらに面内運動の共振点付近での面内運動と面外運動の連成について詳細に調べた。図2は $\gamma = 0.10$ 、 $\theta = 0^\circ$ 、図3は $\gamma = 0.013$ 、 $\theta = 0^\circ$ 、図4は $\gamma = 0.10$ 、 $\theta = 12.0^\circ$ についての図で、横軸は、面外最低次固有振動数で無次元化した面内外力振動数、縦軸は、スパン長で無次元化した面内変位(倍振幅)を表わしている。図中●は面内運動の他に面外運動が生じなかった点であり、○は面内運動のみで面外運動が生じなかった点を示す。連成運動が認められた点について連成時の面内モード、面外モードの組合せ、ならびにリサーチ図によって検討したところ●は図の様に大きく分類することができた。図中でハッチを施した領域が面内面外連成領域である。

図2と図3を比較すると明らかな様に、面内面外連成領域についてもサグ比の影響が非常に大きい。すなわち、サグ比が小さくなると面内面外連成領域が極端に狭くなること、ならびに面内モード、面外モードの異なる連成が起こりにくくなることが実験的に明らかになったと言える。これは、サグ比が小さくなるとケーブルの幾何剛性が増大し、非線形性が発現するのに十分な面内振幅の発達が妨げられることが原因として考えられる。

支点間傾斜角の影響については、図2と図4を比較すると、どちらも面内面外連成領域はかなり広範囲にわたって存在しているが、横軸2.0付近から広がる領域に注目すると、図4 ($\theta=12.0^\circ$) の方が図3 ($\theta=0^\circ$) に比べて広がり方が大きい。サグを有するケーブルでは、面内振動モードの遷移現象が知られており、水平ケーブルでは対称モードのみが1次高次の対称モードへ遷移し、逆対称モードは遷移しないのに対し、傾斜ケーブルでは対称モードのみならず逆対称モードも遷移を生ずる³⁾。2.0付近から広がる領域は逆対称1次モードであるため、その広がり方が支点間傾斜角の存在により変化したものと考えられる。

また、3次元運動としては、面内、面外モードが同じ場合は回転運動が支配的で、比較的きれいな回転運動は特にサグ比の大きな場合には少なく、いびつなものや偏平な回転も観察された。面内、面外モードの異なる場合は不規則かつ複雑な運動が多く見られた。

4. まとめ

ケーブルの幾何学的非線形性に基づく3次元運動、特に面内外力による面外運動の励起(線形理論では、このような結果は得られない)について実験により詳細に検討した。その結果、サグ比、支点間傾斜角が重要なパラメータであることが判明した。本研究における面内面外連成領域と非線形振動論におけるいわゆる動的不安定領域との関連については、ここでは示さなかったが、両者が深くかかわり合うことが十分に予想され、このことは今後の検討を要する課題と言える。

(参考文献)

- 1) 山口, 宮田, 伊藤: ケーブル系の非線形動的応答における一挙動, 第24回構造工学シンポジウム論文集, 1978年2月
- 2) 山口, 宮田, 伊藤: 幾何学的非線形性に基づくケーブルの面内面外連成運動, 第35回年次講演会概要集, 1980年
- 3) 山口, 伊藤: 単一ケーブルの3次元線形自由振動, 土木学会論文報告集, 第286号, 1979年6月

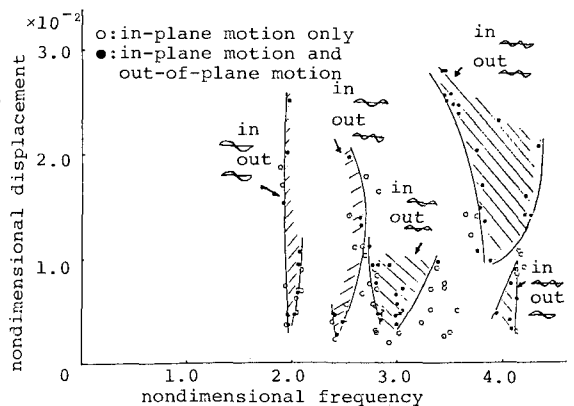


図2. 面内面外連成領域 ($\gamma=0.10, \theta=0^\circ$)

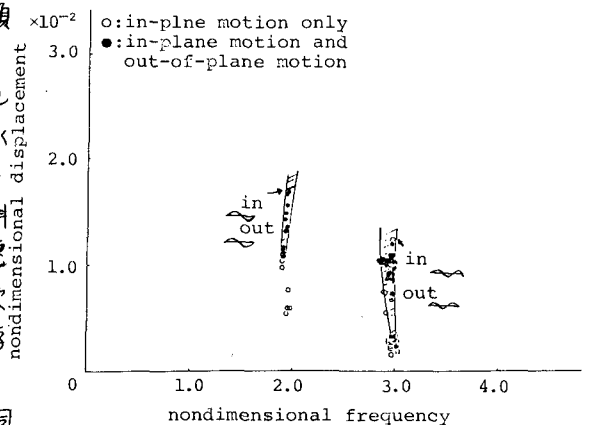


図3. 面内面外連成領域 ($\gamma=0.03, \theta=0^\circ$)

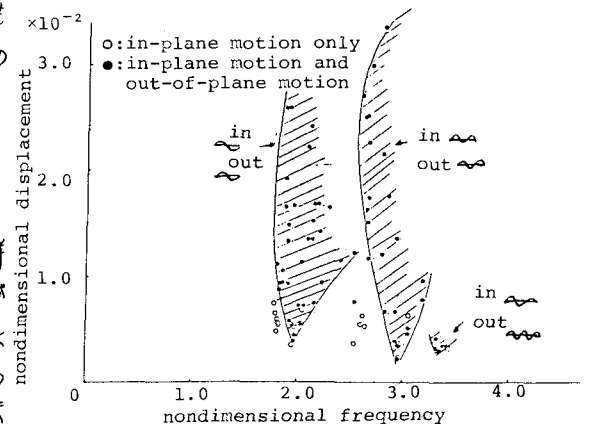


図4. 面内面外連成領域 ($\gamma=0.10, \theta=12.0^\circ$)