

非抗圧縮性を表現できるモデルを用いたケーブルの非線形振動解析

長崎大学大学院 学生会員 ○井上 靖 長崎大学工学部 学生会員 Wu Qing Xiong

長崎大学工学部 フェロー 高橋和雄 長崎大学大学院 正会員 中村聖三

1. まえがき

ケーブルは圧縮力には抵抗しないので、ケーブルの非線形振動を取り扱う場合に、非抗圧縮性の影響を評価しておくことが必要である。これまで圧縮力が入った後のケーブルの非線形振動を取り扱うことができなかったが、著者らは運動方程式を差分法を用いて離散化し、曲げや減衰を考慮することによって、非抗圧縮性を表現できるモデルを開発した¹⁾。本研究では非抗圧縮性を表現できるモデルを用い、水平方向変動張力を受ける場合²⁾のケーブルの非線形振動に及ぼす非抗圧縮性の影響を評価し、ケーブルに圧縮力が出現する水平張力の大きさを形状および材料パラメーターの基に解析する。

2. 解法

図-1に示すような長さに沿って等分布質量を有する。サグ比 f/l が1/8以下の扁平ケーブルを解析の対象とする。水平方向変動張力 $H_p \sin \Omega t$ と鉛直荷重 $p(x,t)$ を受ける

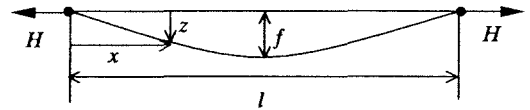


図-1 ケーブルの一般図

ける場合の運動方程式に、曲げと減衰の項を考慮し、さらに無次元化すると次式が得られる。

$$\frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial \tau^2} + 2h\omega_1 \cdot \frac{\partial \bar{w}}{\partial \tau} - \frac{1}{\pi^2} (1 + \bar{h} + h_p \sin \bar{\Omega} \tau) \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{8\gamma}{\pi^2} (1 + \bar{h} + h_p \sin \bar{\Omega} \tau) + \frac{k^2 \delta}{\pi^2} \cdot \frac{\partial^4 \bar{w}}{\partial \bar{x}^4} = \frac{8\gamma}{\pi^2} (\bar{p}(\bar{x}, \tau) + 1) \quad (1)$$

$$\bar{h} = k^2 \frac{1}{1 + 8\gamma^2} \left\{ \frac{1}{2} \int_0^l \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 dx + 8\gamma \int_0^l w dx \right\} \quad (2) \quad \text{ここに、} \bar{x} = \frac{x}{l}, \gamma = \frac{f}{l} : \text{サグ比}, k = \sqrt{\frac{EA}{H}} : \text{縦波-横}$$

波伝播速度比, h : 減衰定数, $\delta = \frac{EI}{l^2} \cdot \frac{1}{EA}$: 曲げ一伸び剛性比, $\bar{w} = \frac{w}{l}$: 無次元変位, H : 初期水平張力, ΔH :

付加変動水平張力, H_p : 水平方向変動張力の振幅, $\bar{h} = \frac{\Delta H}{H}$, $h_p = \frac{H_p}{H}$, w : z 方向のたわみ, $\tau = \omega_1 t$: 無次元時間, ω_1 : 弦の1次固有円振動数, Ω : 水平方向変動張力の円振動数, $\bar{\Omega} = \frac{\Omega}{\omega_1}$ 。

ケーブルの非抗圧縮性を考慮する場合は、全水平張力 $(1 + \bar{h} + h_p \sin \bar{\Omega} \tau)$ が0より小さくなった場合を0とする。

数値解法として、陽な差分法を用いる。要素分割数は100とし、時間間隔は 2.5×10^{-5} とする。数値安定のため、 $\delta = 10^{-7}$ および $h = 0.001$ を用いる。

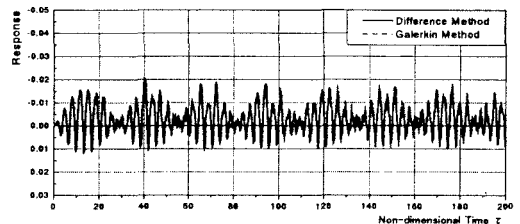


図-2 中央点の変位の時刻歴応答

($\gamma = 0.026$, $k = 30$, $h_p = 0.20$, $\bar{p} = 0$)

3. 解析の精度

差分法の精度を確認するために、非抗圧縮性を無視した場合の差分法と Galerkin 法による時刻歴応答を図-2に示す。図から精度は十分であると確認できる。

4. 解析結果

(1) 非抗圧縮性の影響 水平方向変動張力のみが作用する場合 ($\bar{p} = 0$) について、非抗圧縮性の影響を評価する。 $\gamma = 0.026$ および $k = 30$ ケーブルに1次固有振動数と同じ振動数をもつ水平方向変動張力 $h_p = 0.2$ および $h_p = 0.4$ の場合の変位応答および空間波形を図-3に示す。全水平張力応答から明らかのように、ケーブルに圧縮力が入る領域が存在するが、水平方向変動張力 h_p が増加しても、その発生領域は増加しない。この理由は、空間波形から明らかのように、圧縮力の領域の変位応答が増えないことによるものである。非抗圧縮性を考慮した場合とこれを無視する場合のケーブル中央点の最大変位を図-4に示す。図のように、最大応答に及ぼす非抗圧縮性の影響は小さい。

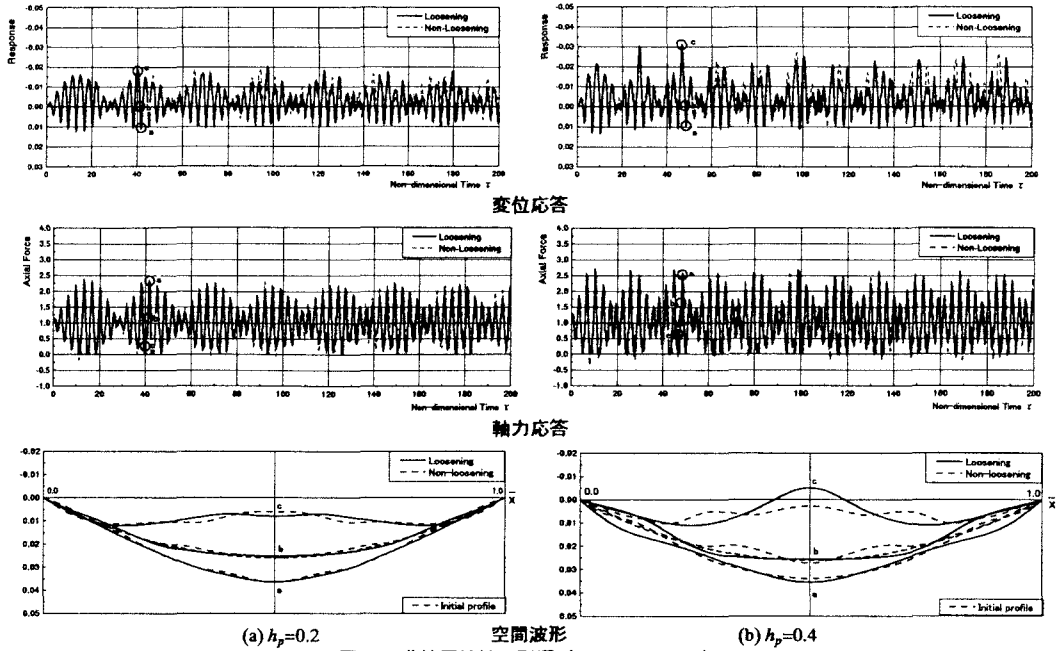


図-3 非抗圧縮性の影響 ($\gamma=0.026$, $k=30$)

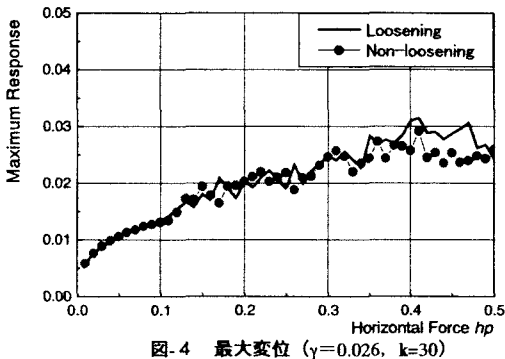


図-4 最大変位 ($\gamma=0.026$, $k=30$)

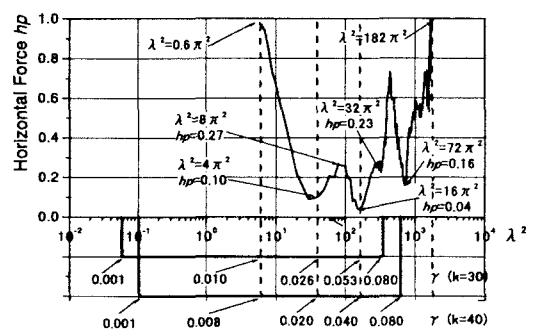


図-5 圧縮力が出現する水平方向変動張力

2) 圧縮力が出現する水平方向変動張力 圧縮力が出現する水平方向変動張力の振幅 h_p とサグ比 γ との関係を図-5に示す。最小値は $k=30$ の場合にサグ比 0.026 および 0.053 付近、 $k=40$ の場合にはサグ比 0.020 および 0.040 付近で現れる。周期的変動鉛直荷重の場合と同様に、ケーブルの振動モードが対称 1 次から対称 2 次、対称 2 次から対称 3 次に遷移中のサグ比で圧縮軸力が発生しやすい。

5. まとめ

本研究によって得られた結果をまとめる。

- (1) ケーブルの最大応答に及ぼす非抗圧縮性の影響は小さい。
- (2) ケーブルの振動モードが遷移中のサグ比で圧縮軸力が出現しやすい。

参考文献

- 1) 井上, 高橋, 中村, Wu: ケーブルの緩みを考慮した非線形振動解析, 土木学会第 56 回年次学術講演会講演概要集, I-A069, pp.138-139, 2001.
- 2) 高橋, 鎌田, 花田: 係数励振振力と周期的変動荷重を受ける偏平ケーブルの非線形振動, 土木学会論文集, No.549/I-37, pp.115-124, 1996.