

非抗圧縮性を考慮したケーブルの非線形振動挙動

長崎大学工学部 学生会員 ○井上 靖 長崎大学工学部 フェロー会員 高橋和雄
 長崎大学工学部 正会員 中村聖三 長崎大学大学院 学生会員 Wu Qing Xiong

1. まえがき

ケーブルは圧縮力に抵抗しない部材であるが、ケーブルの運動方程式はケーブルの引張状態を基準に誘導されているために、圧縮力にも抵抗できる形となっている。最近トラス要素を用いた解析¹⁾が始められているが圧縮領域のケーブルの特性を反映した解析はまだ行われていない。本研究ではサグ比が小さい単一偏平ケーブルを対象とし、差分法を用いてケーブルの運動方程式を離散化して解き、面内非線形強制振動で圧縮力が出現する場合の応答特性を明らかにし、圧縮力が入ってくる形状及び材料パラメーターの影響を評価する。

2. 解析の概要

図-1に示すようにケーブルは、断面を一定として、長さに沿って当分布質量を有するサグ比 $\gamma < 1/8$ の偏平ケーブルを解析の対象とする。静止状態のつりあい式と運動状態のつりあい式を考慮し、無次元化すると両端支持した偏平ケーブル(サグを考慮した)の非線形運動方程式が次のように得られる²⁾。

$$\frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial \tau^2} - \left(1 + \frac{\Delta H}{H}\right) \cdot \frac{1}{\pi^2} \cdot \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial x^2} + \frac{8\gamma}{\pi^2} \cdot \frac{\Delta H}{H} = \frac{8\gamma}{\pi^2} \cdot \bar{p}(\bar{x}, \tau) \quad (1)$$

$$\frac{\Delta H}{H} = k^2(1 + 8\gamma^2) \cdot \left[\frac{1}{2} \int_0^L \left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial x} \right)^2 d\bar{x} + 8\gamma \int_0^L \bar{w} d\bar{x} \right]$$

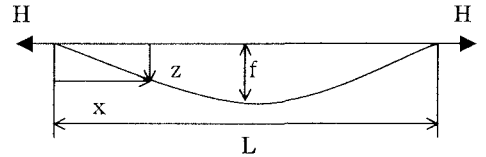


図-1 ケーブルの一般図

ここに、 w : z 方向の変位、 H : 初期水平張力、 ΔH : 変動水平張力、

$\gamma = \frac{f}{L}$: サグ比、 $k^2 = \frac{EA}{H}$: 縦波一横波伝播速度比、 $\bar{p}(\bar{x}, \tau) = \frac{p(x, t)}{mg}$: 無次元荷重、 $\bar{w} = w/L$ 、 $\tau = \omega_1 t$ 、

ω_1 : 弦の1次の固有振動数

ケーブルに存在する曲げの項を評価するために、式(1)に曲げ抵抗の項を考慮する。

$$\frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial \tau^2} + \frac{k^2 \delta}{\pi^2} \cdot \frac{\partial^4 \bar{w}}{\partial \tau^4} - \left(1 + \frac{\Delta H}{H}\right) \cdot \frac{1}{\pi^2} \cdot \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial x^2} + \frac{8\gamma}{\pi^2} \cdot \frac{\Delta H}{H} = \frac{8\gamma}{\pi^2} \cdot \bar{p}(\bar{x}, \tau) \quad (2) \quad \text{ここに、} \delta = \frac{EI}{L^2} \cdot \frac{1}{EA} : (\text{曲げ抵抗比})$$

非抗圧縮性を考慮した場合、全水平張力 $(1 + \frac{\Delta H}{H})$ が圧縮力となった場合に $(1 + \frac{\Delta H}{H} = 0)$ とする。

数値解法として、ケーブルの非線形運動方程式を空間や時間に関して、何らの仮定を設ける必要のない陽な差分法を用いて計算する。

3. 解析結果

要素分割数は20とし、荷重は各節点に $\bar{p}(\bar{x}, \tau) = p_0 \sin \tau$ の分布荷重を与えるものとする。

(1) 圧縮力が出現する荷重の検討

ケーブルの動特性を支配するパラメーターは、サグ比 γ 、縦波一横波伝播速度比 k 、曲げ抵抗比 δ の3個である。図-2はサグ比0~0.1の範囲で $\delta = 10^{-6}$ の場合の圧縮力が出現する荷重を求めたものである。 $k^2 = 300$ を破線、 $k^2 = 900$ を実線、 $k^2 = 4000$ を点線で示す。 $k^2 = 300$ の場合にサグ比が約0.04以上、 $k^2 = 900$ の場合にサグ比が約0.02以上、 $k^2 = 4000$ の場合にサグ比が約0.01以上で無次元荷重約1.0以上の時いずれも圧縮力が出現している。

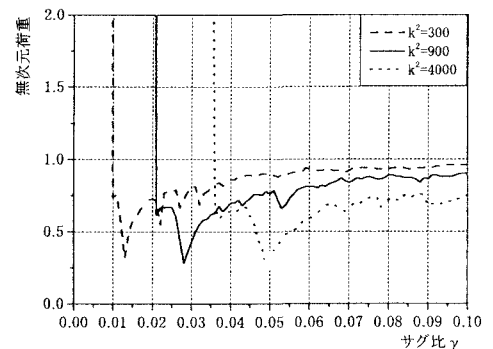


図-2 無次元荷重とサグ比の関係

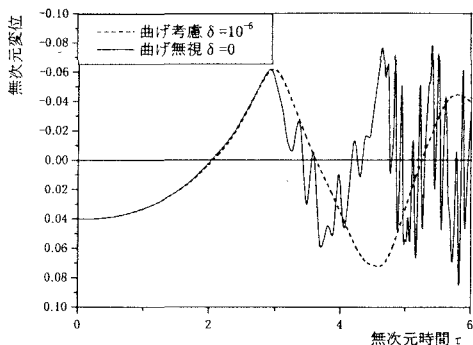


図-3 中央点の変位の時刻歴応答

(2) 曲げの項の影響

図-3は、曲げの項を無視した場合 ($\delta = 0$, 実線) と曲げの項を考慮した場合 ($\delta = 10^{-6}$, 破線) の中央点の変位の時刻歴を示したものである ($\gamma = 0.04$, $k^2 = 900$)。無次元時間が3を過ぎると高調波が発生している。

(3) 非抗圧縮性が振幅に及ぼす影響

図-4, 5は非抗圧縮性が時間応答と空間波形に及ぼす影響を明らかにするために $\delta = 10^{-6}$, $\gamma = 0.04$, $k^2 = 900$, $p_0 = 2.0$ の場合を例に示す。非抗圧縮性考慮を実線で非抗圧縮性無視を点線で示す。図-4を見ると非抗圧縮性は振幅および振動数に影響を及ぼしている。図-5のように時間が経過すると同じ時間の空間波形にも差がでてくる。

(4) 形状及び材料パラメーターの影響

無次元荷重を 1.0 としたときの非抗圧縮性を考慮した場合と無視した場合の中央点変位の最大値の比を図-6に示す。実線は $k^2 = 900$ 、破線は $k^2 = 300$ 、点線は $k^2 = 4000$ である。 $k^2 = 900$, 4000 の場合に最大で約 50%の差が生じている。 $k^2 = 300$ の場合でも最大で約 40%の差が生じている。

4. まとめ

本研究では非抗圧縮性がケーブルの非線形振動に及ぼす影響を評価した。その結果、特定のサグ比、縦波一横波伝播速度比において応答に大きな差が生じることが明らかになった。加振振動数や応答の振動数特性については講演時に発表する。

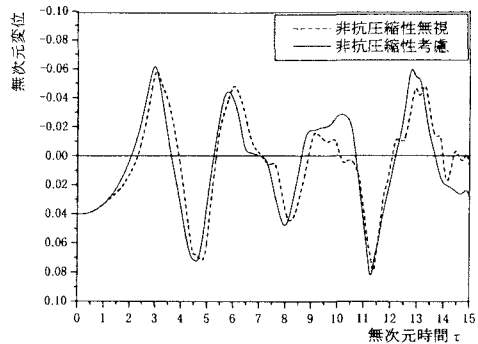


図-4 中央点の変位の時刻歴応答

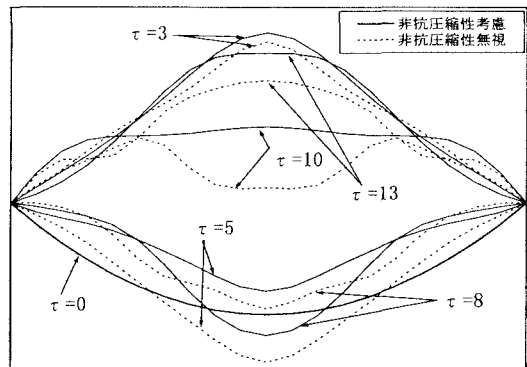


図-5 空間波形

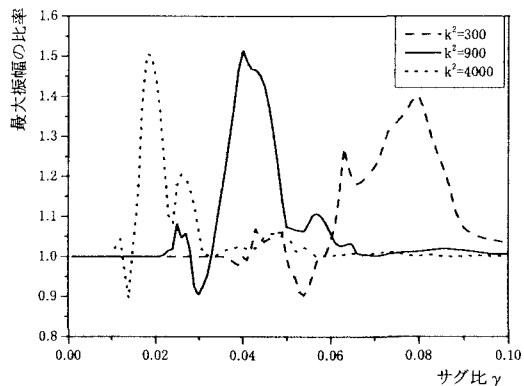


図-6 最大振幅の比率とサグ比の関係

参考文献

- 1) 清水渉, 野村卓史, 新明正人: トラス要素を用いたケーブルの非線形動的解析, 土木学会第53回年次学術講演会, 1998.10, pp.448-449.
- 2) Irvine, H. M.: Cable Structures, The MIT Press, 1981.