

I-A 102

傾斜ケーブルの非線形応答性状に与える支点移動の影響について

大同工業大学大学院 学生員

高橋 真貴

大同工業大学工学部 正会員

水澤 富作

1. はじめに ケーブルは、構造物の支持、物体の位置保持、曳航、設置回収のため、地上構造物や海洋構造物の主要構造要素として古くから用いられている¹⁾。単軸応力部材としてのケーブルのつり合い形状は、張力を与えることにより幾何剛性が生じ、また軸方向変位が小さくとも有限変形を考慮する必要がある。また、ケーブル問題の解析過程は、初期つり合い形状を求める形状決定問題と、この形状をもとに解く動的問題とに分けられる。これまで、水平ケーブルの初期形状決定や自由振動解析は、多く研究されているが²⁾、移動支点を有する傾斜ケーブルの動的問題の研究は、さほど多く見受けられないようである。風や地震動などによる、吊り橋や斜張橋の主塔の振動がケーブルに与える影響を検討する上で、ケーブルの非線形応答性状に与える支点移動の影響についての研究が必要であるように思われる。

本研究ではViscous Relaxation法³⁾を用いてケーブルの初期形状解析を行ったのち、増分反復法を用いてFig. 1に示すような移動支点で動的荷重を受ける傾斜ケーブルの動的応答解析を行い、傾斜ケーブルの非線形応答性状に与える支点移動の影響について検討を行っている。

2. 解析手法 支点移動を有するケーブルシステムの運動方程式を、2次元有限変位弾性理論、Total Lagrangian表現と仮想仕事の原理より求めている。ケーブルのモデル化に際しては、2次元のアイソパラメトリック・ケーブル要素を適用し、Viscous Relaxation法を用いてケーブルの初期形状解析を行ったのち、自由振動解析と動的な非線形応答解析を行っている。式の定式化にあたり、次のような仮定を設けている。(1)ケーブルの断面は十分小さく、また単軸応力を仮定する。(2)ケーブルの曲げとねじりの影響は無視する。(3)ケーブル軸に垂直な平面は、変形後もこの軸に垂直である。(4)無応力でのケーブルの初期形状を、変形後の形状における応力とひずみの表現に用いる(Total Lagrangian表現)。増分反復法において、増分値を時間ステップで置き換えれば、ケーブル要素の非線形運動方程式が導けるので、時刻 $t+\Delta t$ における運動方程式は次のように表せる。

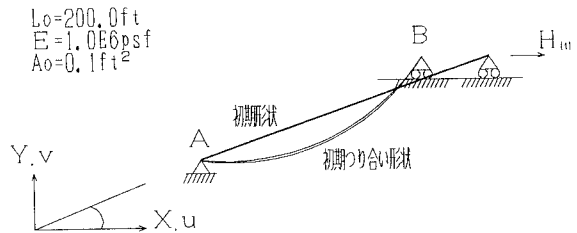


Fig. 1 水平動的荷重を受ける傾斜ケーブル

$$[M] \{ {}^{t+\Delta t} \ddot{u} \} + [{}^{t+\Delta t} K_T] \{ \Delta u \} = \{ {}^{t+\Delta t} P \} - \{ {}^t F \}$$

ここで、 $[{}^{t+\Delta t} K_T]$ = 接線剛性マトリクス、 $[M]$ = 質量マトリクス、 $\{ \Delta u \}$ = 増分変位ベクトル、 $\{ {}^{t+\Delta t} \ddot{u} \}$ = 加速度ベクトル、 $\{ {}^{t+\Delta t} P \}$ = 外力ベクトル、 $\{ {}^t F \}$ = 内力ベクトルである。

3. 数値計算例及び考察 ここでは、Fig. 1に示すような移動支点で水平動的荷重を受ける2次元傾斜ケーブルの動的応答性状に与える、動的荷重の振幅比 α 、円振動数係数 β 、傾斜角 θ や初期水平荷重 H_0 の影響について検討する。ここで、 $H(t) = H_0 \{ 1 + \alpha \sin(\beta \omega_0 t) \}$ で仮定している。ただし、 $\alpha = H_a / H_0$ 、 $\beta = \omega / \omega_0$ であり、 H_a は動的荷重の振幅、 H_0 は初期つり合い水平荷重、 ω と ω_0 は動的荷重の円振動数とケーブルの円振動数を示す。また、数値計算では、ケーブル長 L_0 は200ft、断面積 A_0 は0.1ft²、弾性係数 E は1.0E6psf、密度 ρ は0.031lb・sec²/ft⁴にとり、自重のみでつり合っているものと仮定している。なお、Viscous Relaxation法を用いて、種々の水平荷重 H_0 での初期形状解析を行い、要素分割数の影響について検討している。これらの結果から、要素分割数として16要素を用いれば、かなり精度の高い結果が得られている。

3.1 変位応答性状 Fig. 2には支点移動を有する傾斜ケーブルの中央点での変位応答性状に与える振幅比

α の影響を示す。ただし、初期水平荷重 $H_0=20.01b$ 、円振動数係数 $\beta=1.5$ 、傾斜角 $\theta=30^\circ$ に仮定している。これより、振幅比 α が大きくなると、動的変位に与える非線形性が大きく生じてくる。これは、動的水平荷重の大きさが初期つり合い荷重に近づくので、ケーブルの幾何学的非線形性が顕著に生じてくるためである。

3.2 張力応答性状 固定端でのケーブル張力 N_A と移動支点でのケーブル張力 N_B に与える初期水平荷重 H_0 の影響がFig. 3に示してある。ただし、振幅比 α は0.2、円振動数係数 β は0.5、傾斜角 θ は 30° に仮定している。なお、比較のために動的水平荷重の時刻歴応答を示してある。また、Fig. 4は、ケーブル張力 N_A と N_B に与える傾斜角 θ の影響を示す。ただし、 H_0 は60.01b、振幅比 α は0.2、円振動係数 β は0.5に仮定している。これより初期水平荷重 H_0 の増大にしたがって、張力応答は、動的水平荷重に追従した線形性状を示す。しかし、初期水平荷重が小さくなり、サグが大きくなると張力応答に非線形性が見られ、とくに固定端部では、かなり複雑な応答が生じてくる。またケーブルの傾斜角 θ の減少にともない、サグが大きくなるために非線形性が見られる。これより、張力応答はサグに依存し、サグが大きき場合には、固定端部に大きな衝撃が作用することが明らかになった。

4. あとがき 動的水平荷重を受ける支点移動を有する、傾斜ケーブルの非線形応答解析を行い、ケーブルの変位応答と張力応答に与える初期荷重 H_0 と傾斜角 θ 、動的水平荷重の振幅比 α と水平荷重の円振動数係数 β などの影響について解析を行った。得られた結果を示すと、次のようになる。(1)支点移動を有するケーブルの動的応答は、初期荷重が小さくなり、サグが増大すると、非線形性が顕著に生じてくる。(2)また、動的水平荷重の振幅比 $\alpha=H_d/H_0$ に大きく依存し、 α の増大とともに、非線形性が大きく生じてくる。(3)傾斜角 θ の増大にともない張力変動幅が大きくなる。(4)支点移動を有するケーブルでは、動的水平荷重を受けると固定端部で大きな動的張力が生じ、サグが大きくなると、固定端部に大きな衝撃力が生じてくることが明らかになった。なお、本研究は、大同工業大学奨励研究費の援助を受けて行ったものである。

参考文献 1) J. W. Leonard: Tension structures (McgrawHill, 1988). 2) 高橋他: 平成7年度土木学会中部支部研究発表概要集, pp. 65-66(1996). 3) 水澤他: 大同工業大学紀要 Vol. 20 pp. 95-106(1990).

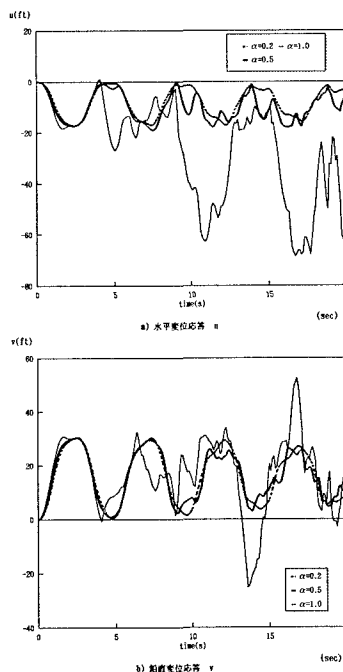


Fig. 2 動的変位に与える振幅比 α の影響
 $H_0=20.01b, \beta=1.5, \theta=30^\circ$

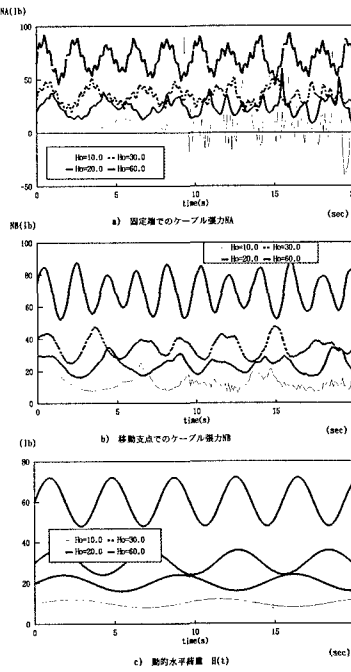


Fig. 3 ケーブル張力に与える初期水平荷重 H_0 の影響
 $\alpha=0.2, \beta=0.5, \theta=30^\circ$

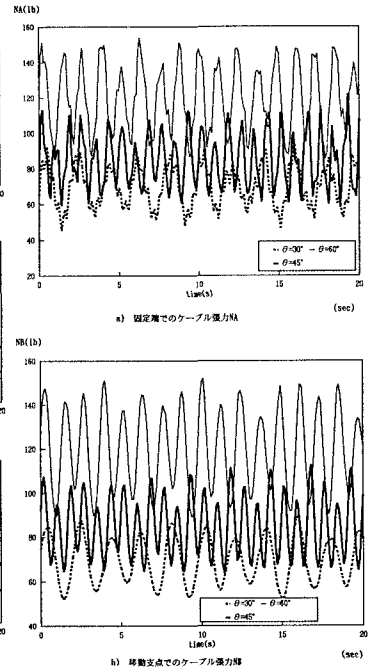


Fig. 4 ケーブル張力に与える傾斜角 θ の影響
 $H_0=60.01b, \alpha=0.2, \beta=0.5$