

波動伝播挙動を適用したケーブルの損傷評価法

大同工業大学大学院 学生員 ○加藤秀一  
大同工業大学工学部 正会員 水澤富作

**1. はじめに** 吊構造物や海洋構造物に用いられるケーブルでは、腐食による断面欠損や疲労などによるワイヤーの欠損によりケーブルに局所的な損傷が発生する可能性がある。したがって、損傷を有するケーブルのたわみや振動数などの力学特性を明らかにし、またケーブルに生じた局所的な損傷の位置と損傷の度合を推定することは、維持管理や構造設計において重要な課題である。損傷を有する梁や骨組構造物については、種々の手法により研究されている。しかしながら、任意のサグをもつケーブルの損傷評価については、あまり研究がなされていないように思われる。

本研究では、局所的な損傷を有する水平ケーブルの損傷位置を張力の波動伝播応答から評価する方法について述べる。

**2. 解析手法** ケーブルシステムの運動方程式を、Total Lagrangian 表現と仮想仕事の原理を用いて定式化している。ケーブルは2節点ケーブル要素で離散化し、Viscous Relaxation 法を用いてケーブルの初期つり合い形状解析を行い、初期つり合い形状を中心にした微小振幅振動を仮定し、自由振動解析を行っている<sup>1)</sup>。また、動的応答解析では Newmark の $\beta$ 法を用いている。式の定式化にあたり、次のような解析仮定を設けている。(1) ケーブルは弾性材料であり、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) 減衰の影響は無視する。(4) 伸びと有限変位の影響を考慮する。時間  $t+\Delta t$  における運動方程式は、増分反復法において増分値を時間ステップで置き換えることにより、ケーブルの非線形運動方程式として次式で表される。 $[M] \{^{t+\Delta t} \ddot{u}\} + [^{t+\Delta t} K_r] \{\Delta u\} = \{^{t+\Delta t} P\} - \{F\} \dots\dots\dots (1)$  ここで、 $[^{t+\Delta t} K_r]$ : 接線剛性マトリックス、 $[M]$ : 質量マトリックス、 $\{\Delta u\}$ : 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、 $\{F\}$ : 内力ベクトルである。

ケーブルの移動支点に作用するステップ荷重は、 $P_t = \alpha P_0(t) \delta(t - t_0) \dots\dots\dots (2)$  で仮定している。ここで、初期つり合い荷重の割増係数、 $\alpha = P_d/P_0$ 、 $P_d$ は動的荷重の振幅、 $P_0$ は初期つり合い荷重を示す。

**3. 数値計算例と考察** ここでは、図-1に示すような損傷を有する水平ケーブルの波動伝播応答に基づく損傷評価法について述べる。数値計算例では、ケーブルの初期長さ、 $L_0=50.0\text{m}$ 、ケーブルの初期断面積、 $A_0=0.000491(\text{m}^2)$ 、ヤング係数、 $E_0=1.96\text{E}9(\text{N/m}^2)$ 、単位長さ重量、 $W_0=5.532(\text{N/m})$ を用いている。ケーブル内を伝わる縦波の伝播速度は、 $C_1=\sqrt{E_0/\rho}=1305.5(\text{m/sec})$ である。また、ケーブルの離散化は、2節点ケーブル要素を用いて64分割している。図-2には、図-1に示す初期荷重、 $P_0$ が作用する水平ケーブルの移動支点にステップ荷重、 $P_t$ を受ける場合の、固定端での張力の波動伝播応答に与える損傷位置の影響が示してある。ここで、図-2のa)が損傷のない場合、b)が固定端から  $L_c/L_0=0.25$  に傷損がある場合であり、c)は固定端から  $L_c/L_0=0.5$  に傷損がある場合である。ただし、 $f/L=0.1$ 、 $P_0=0.343\text{kN}$ 、 $\alpha=0.2$ 、断面欠損比、 $A_w/A_0=0.5$ に仮定している。これより、固定端から反射した張力波が、移動支点に向かって進行し、この波動が損傷部で反射し固定端に到達するときの、張力応答の波の崩れから反射時間 ( $L_c/L_0=0.25$  の場合  $t=0.018$  秒、

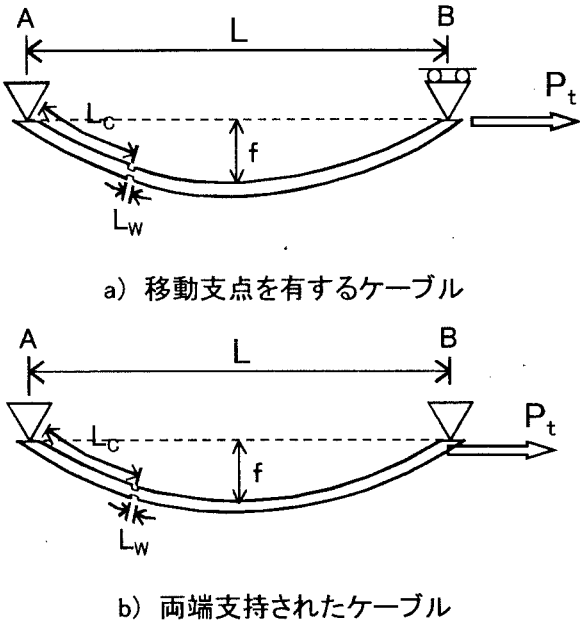
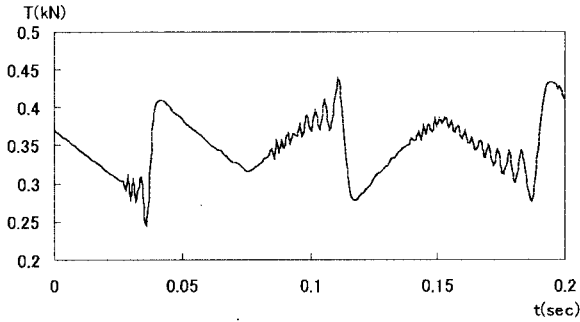
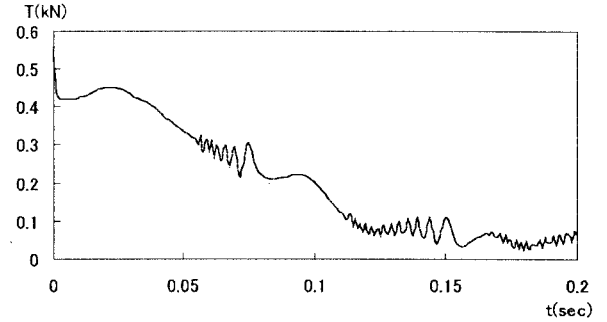


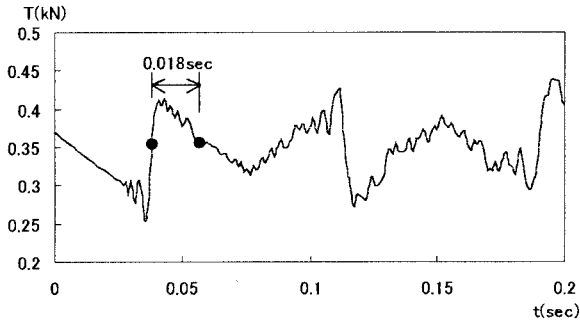
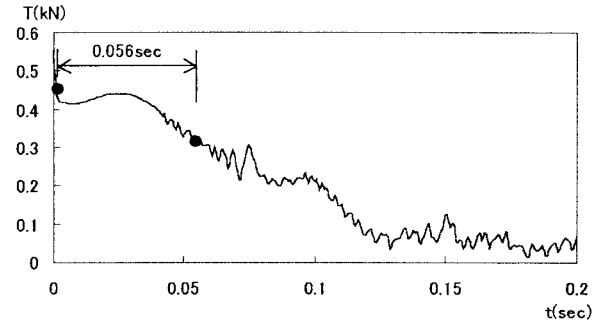
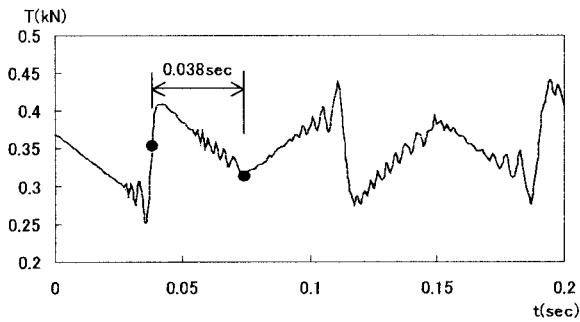
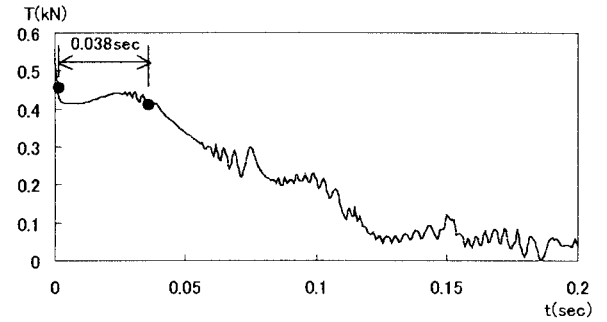
図-1 損傷ケーブルモデル



a) 損傷がない場合



a) 損傷がない場合

b)  $L_c/L_0=0.25$ b)  $L_c/L_0=0.25$ c)  $L_c/L_0=0.5$ c)  $L_c/L_0=0.5$ 図-2 水平ケーブルの張力の波動伝播応答に与える損傷位置の影響;  $f/L=0.1$ 図-3 両端支持された水平ケーブルの張力の波動伝播応答に与える損傷位置の影響;  $f/L=0.06$ 

$L_c/L_0=0.5$  の場合  $t=0.038$  秒) を求めることにより、固定端部から損傷部までの距離がほぼ推定できる。図-3には、両端支持された水平ケーブルのB端部で水平方向にステップ荷重を受ける場合のB端部での張力の波動伝播応答に与える損傷位置の影響が示されている。ここで、 $f/L=0.06$ 、 $P_0=0.138\text{kN}$ 、 $\alpha=1.0$ 、 $L_c/L_0=0.25$  と  $0.5$ 、 $A_w/A_0=0.5$  に仮定し、比較のために損傷を持たない場合の結果も示してある。これより両端支持されたケーブルでも、損傷部からの反射波による張力応答の波の崩れから反射時間を求めることにより、固定端部から損傷域までの距離がある程度推定できる。また、両端支持された場合では荷重が作用する点に近い端部の張力応答の方が損傷の影響を把握するのに適している。

**4. おわりに** 本文で得られた結果は以下のようにまとめられる。(1) 損傷断面での張力の波動伝播応答を用いれば、特定された断面からの損傷位置を推定することができる。とくに、損傷断面からの張力の反射波の特性から、サグを有するケーブルでも損傷位置が推定できる。(2) 両端支持されたケーブルでの張力の波動伝播応答は、荷重を作用させる点に近い端部の方が損傷の影響を把握するのに適している。

**参考文献** 1) 加藤秀一、水澤富作：変動荷重を受ける3次元ケーブルの動的応答に与える波動伝播の影響。土木学会第54回年次学術講演会講演概要集, I-A78, pp.156-157, 1999. 2) 水澤富作、高木信治：曲率変化に基づくはり構造物の損傷評価法について。構造工学論文集, Vol. 38A, pp. 21-29, 1992.