

## 吊橋主ケーブルの腐食による終局限界状態シミュレーション

中央大学 学生会員 ○綿貫 瑠奈  
中央大学 正会員 佐藤 尚次

## 1. はじめに

吊橋や斜張橋などの吊り形式橋梁に用いられるケーブル部材は、荷重伝達の中核をなす、橋梁にとって生命線のようなものである。また損傷しても取り換えが困難であることから確実な品質管理が求められる。しかし、国内外ともに供用開始から年数を重ねた吊橋のケーブルが腐食や疲労により、破断に至った事例が確認されている<sup>1)2)</sup>。

ケーブルは腐食により断面積が減少すると、伝達される張力に対しての安全余裕も徐々に減少して、その張力が引張強度を上回るとき残りの全ての素線は同時に破断すると考えられる。一方、ケーブルを構成する素線1本1本の強度にはばらつきがある。最弱素線の破壊時が、限界強度ではなく、破断した素線のみで他の素線に応力が再分配されていき、荷重の増加によってどこかでこの再配分が限界に達して、連鎖的に破断が起きると考えられる。

## 2. 研究目的

そこで本研究では、各素線強度のばらつきを考慮して、ケーブル内部の腐食進行に伴う主ケーブル全体の強度低下の過程を追う。また、ケーブル強度を抵抗側  $R$ 、ケーブルに伝達される荷重を作用側  $S$  として、活荷重のばらつきを考慮した場合の信頼性指標  $\beta$  の時間的変化の検証を行う。

## 3. 対象モデル

対象モデルの作成にあたり、安全率、引張強さの平均および標準偏差、ケーブル張力の設計荷重、腐食速度のデータが必要となる。また、ケーブルの安全率が異なり、竣工時期が近く、支間長が同程度であることから、因島大橋、大鳴門橋、関門橋の吊橋主ケーブルを対象とする。

## 4. 研究手法

まず素線強度とケーブルのモデル化をそれぞれ行い、その後シミュレーションにより腐食進行度別のケーブル強度を算出していく。

## ① 素線強度のモデル化

まず各素線の強度のばらつきは、物体の劣化や寿命のモデルを表現するものとしてよく用いられるワイブル分布によってモデル化する。式(1)がワイブル分布の累積密度関数、式(2)が平均、式(3)が分散である。

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\eta}\right)^m} \quad \text{式(1)}$$

$$\mu = \eta \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right) \quad \text{式(2)}$$

表-1 素線強度モデルに関する値

橋名	安全率	引張強さ(実験値)(kgf/mm <sup>2</sup> )			パラメータ	
		基準値	平均	標準偏差	m	$\eta$
関門橋	2.76	160	167.36	1.96	109	168.38
因島大橋	2.86	160	167.50	2.27	94	168.52
大鳴門橋	2.5	160	168.60	2.30	93	169.63

表-2 初期状態のケーブル破断シミュレーション結果

橋名	ケーブル強度(kgf/mm <sup>2</sup> )		素線(本)		断面積 (mm <sup>2</sup> /素線)	最大張力(t/ケーブル)	
	基準値	結果平均	初期	限界		基準値	結果平均
関門橋	160	167.46	14014	13891	19.94	44284	46384
因島大橋	160	167.57	11557	11439	20.98	33890	40215
大鳴門橋	160	168.63	19558	19356	22.64	70450	73897

$$\sigma^2 = \eta^2 \cdot \left\{ \Gamma\left(1 + \frac{2}{m}\right) - \left[ \Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right) \right]^2 \right\} \quad \text{式(3)}$$

ここで、 $\mu$ は平均、 $\sigma$ は標準偏差、 $x$ は素線強度、 $m$ は形状パラメータ、 $\eta$ は尺度パラメータ、 $\Gamma$ はガンマ関数  $\Gamma(x) = \int_0^{\infty} t^{x-1} \cdot e^{-t} dt = (x-1)!$  ( $x > 0$ )である。

式(2)の両辺を2乗しこれを式(3)で除すると式(4)のように表すことができ、実際のケーブルの試験結果から得られた $\mu$ と $\sigma$ の値を代入することで $m$ が求まる。

$$\frac{\sigma^2}{\mu^2} = \frac{\Gamma\left(1 + \frac{2}{m}\right)}{\left[ \Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right) \right]^2} - 1 \quad \text{式(4)}$$

また式(2)を変形した式(5)に $\mu$ と $m$ を代入することにより、 $\eta$ が求まる。

$$\frac{1}{\eta} = \frac{1}{\mu} \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right) \quad \text{式(5)}$$

パラメータが決定したら、ケーブルを構成する素線本数分の一様乱数( $0 \leq r \leq 1$ )を発生させ、これらをワイブル分布に変換する。ここで式(1)を用いると、素線強度 $x$ が求まる。

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\eta}\right)^m} = r \quad \text{式(6)}$$

$$\therefore x = \eta \cdot [-\ln(1-r)]^{\frac{1}{m}} \quad \text{式(7)}$$

以上の手順で作成した各主ケーブルの素線強度モデルに関する値を表-1に示す。

キーワード 吊橋主ケーブル、腐食、ワイブル分布、信頼性指標

連絡先: 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 中央大学後楽園キャンパス 2号館 2323号室 Tel:03-3817-1816

② ケーブルのモデル化

$x$ の値を $x(1), x(2) \dots x(n)$ と小さい順に並べ、各素線はケーブル内部にランダムに配置する。

ケーブルにかかる張力をケーブルの断面積で割ることで応力 $\sigma_t$ が求まる。式(8)のようにケーブルの断面積は素線の断面積を本数分足したものとみなす。

$$\sigma_t = \frac{T}{n \cdot A} \quad \text{式(8)}$$

ここで、 $T$ は張力、 $n$ は素線本数、 $A$ は素線の断面積である。

$T$ を 0 から増加させ $x(1)$ の値を超えた時点で一番弱い素線が破断する。これを式(9)に表す。またこの時の残りの素線本数は $(n-1)$ 本である。

$$x(1) < \frac{T}{n \cdot A} \quad \text{式(9)}$$

素線が破断したら、ケーブルにかかる荷重は残りの素線に均等に応力再配分がなされる。その状態で直前に破断した素線の次に弱いものが耐えていれば $T$ をさらに大きくし、その素線が破断したら再度応力再配分が行われる。同様にこの処理を繰り返す。残り全ての素線が応力に耐えられなくなるまで続ける。これにより、最終的に $T$ の最大値すなわちケーブルの限界張力が求まる。

腐食の無い初期状態でのシミュレーションを行った結果を表-2に示す。全てのケーブル強度は基準値を上回っており、最大張力に関しても、限界本数分の素線が破断した状態での値は初期状態の基準値を上回っていることが分かった。これは、素線のばらつきを考慮したことによる安全余裕であると考えられる。

③ 腐食進行度別の信頼性指標  $\beta$  算出

ケーブル強度 $T_{max}$ の時間的変化のイメージを図-1に示す。このように時間の経過とともに腐食範囲は拡大し、ケーブル張力は減少していく。前述した処理を腐食進行度別に行い、抵抗側  $R$  の確率分布を求める。素線 1 本あたりの腐食に対する耐用年数は式(10)を用いて求める。また、腐食速度は使用環境によって異なり、今回は海岸地帯の吊橋を対象にしているため、腐食速度を $19.6 \text{ g/m}^2/\text{年}$ とする<sup>3)</sup>。

$$\text{耐用年数} = \frac{\text{亜鉛付着量}(\text{g/m}^2)}{\text{腐食速度}(\text{g/m}^2/\text{年})} \times 0.9 \quad \text{式(10)}$$

仮定として、温度変化がない場合、腐食速度は一定であり、腐食減量は時間に比例して増加するものとする<sup>4)</sup>。素線はケーブル下面および側面の外側から1層ずつ腐食させる。また、素線配置によって腐食する素線の順番が変わるため、素線配置を変更した複数のパターンを想定する。以上のことを考慮して、一様乱数の初期値を変えながら、図-2に示す手順でシミュレーションを行った。

信頼性指標  $\beta$  は、2 次モーメント法を適用した式(11)を用いて求める。

$$\beta = \frac{\mu_R - (\mu_D + \mu_L)}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_L^2}} \quad \text{式(11)}$$

ここで、 $\mu_R$ はケーブル強度の平均、 $\mu_D$ は死荷重の平均、 $\mu_L$ は活荷重の平均、 $\sigma_R$ はケーブル強度の標準

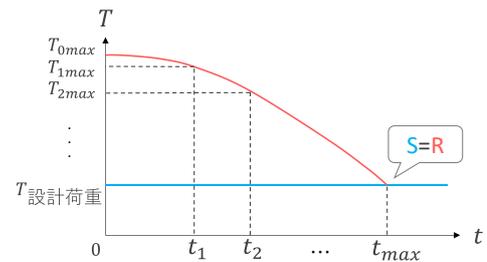


図-1 腐食進行による R 低下のイメージ

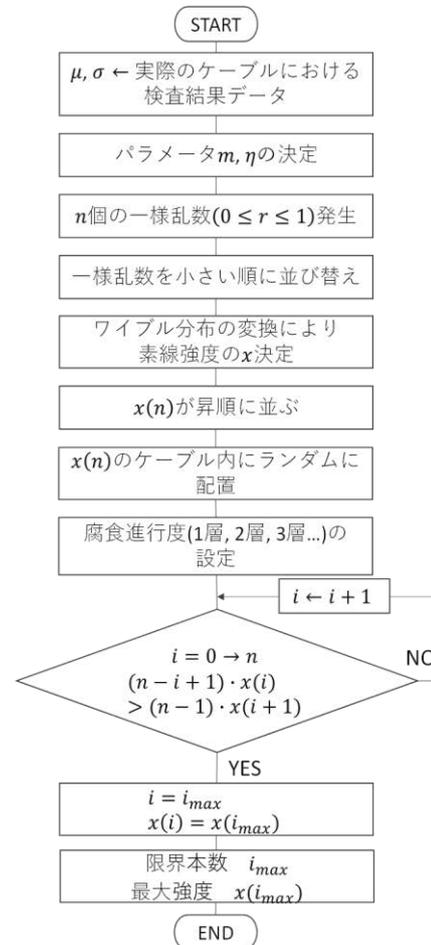


図-2 シミュレーションフロー

偏差、 $\sigma_L$ は活荷重の標準偏差である。

5. おわりに

今後は、腐食によるケーブル強度低下の過程および活荷重の確率分布に関する値を算出した後に、時間別の信頼性指標の算出を行う。結果は学会の席で発表の予定である。

参考文献・出典

- 1) 吊橋の主ケーブル一部破断時の対応事例. 土木技術資料 56-3(2014). 2014
- 2) 東京大学生産技術研究所. 【記者会見】ミャンマー連邦共和国マウンミャ橋崩落の現地調査と類似橋梁の安全確認調査の報告. 2018.06.05
- 3) 北海道内田鍛工株式会社. 溶融亜鉛めっきガイドブック. 2019.3
- 4) 北川信, 古家和彦, 中村俊一, 鈴木恵太. 吊橋ケーブル送気乾燥システムの防食性能に関する研究. 土木学会論文集 No.672/VI-50, 145-154. 2001.3