

落橋防止ケーブルの設計作動速度に関する基礎的研究

野瀬大資¹・伊津野和行²

¹学生会員 立命館大学大学院理工学研究科（〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1）

²正会員 工博 立命館大学教授 理工学部都市システム工学科（〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1）

1. はじめに

近年、落橋防止システムの合理的な設計法を確立する必要性が高まっている。¹⁾落橋防止システムは、設計段階における想定外の事態にも備えなければならないが、設計段階でシステムの作動状況を把握することは困難である。そこで本研究では、落橋防止システムの作動速度に着目し、隣接する構造物間の最大相対速度を推定することによってシステムに作用する力を決め、現行基準の設計と比較検討した。

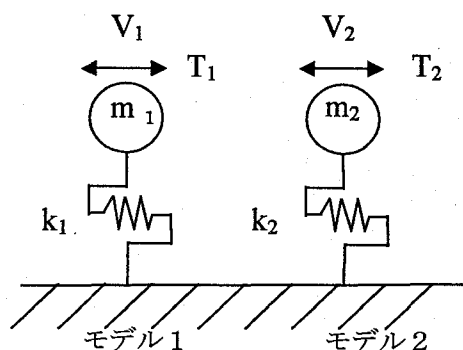


図1：解析モデル

2. 隣接構造物の相対運動

図1のように、独立した2つの異なる固有周期を有する構造系間に生じる相対速度を、数値シミュレーションによって検討した。固有周期 $T_1=0.5\sim 1.0$ 秒（0.1秒間隔）を有するモデル1と、それぞれに対する周期比 $T_2/T_1=0.6\sim 1.5$ （0.1間隔）を有するモデル2とを考えた。構造物のばね k_1, k_2 に非線形性を考慮すると、相対速度は線形の場合より小さくなったため、ここでは安全側として線形ばねを仮定した。減衰定数はどちらも $h=0.05$ とした。II種地盤波タイプI地震動の標準波形3波を用いて時刻歴応答解析を行い、その最大相対速度を求めた。これを、横軸に周期比をとって相対変位応答スペクトル²⁾と同様に、相対速度応答スペクトルとして図2のように表示した。

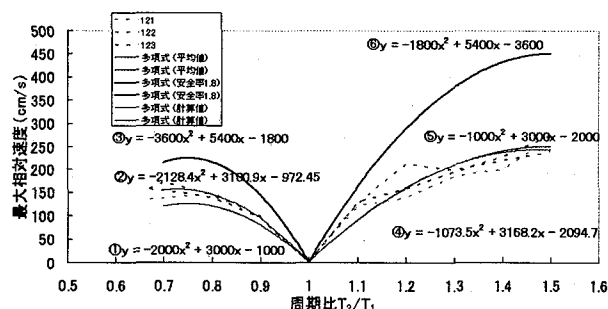


図2：相対速度応答スペクトル

3. 最大相対速度の推定式

まず相対速度に関する提案式の検討を行なった。図2の121, 122, 123は、3つの標準波形それぞれ

を入力した場合の固有周期 $T_1=1$ 秒の時の相対速度を示したものである。周期比1では2つのモデルが同じ動きをするため相対速度は0になり、固有周期が離れるほど相対速度が大きくなる。②式と④式は3波平均値に対して周期比1で0となる2次式で最小自乗近似した式で、①式と⑤式はそれぞれ②式と④式の係数を有効数字1桁に簡易化した式である。安全のため、標準波形3波の値をすべて包含するよう、①式と⑤式に安全率をかけることにすると、1.8倍した③式と⑥式が得られる。ただし、この式では最大相対速度の推定値が実際の値より大きくなりすぎる領域があるため、 $T_2/T_1 < 1$ では 200cm/s 、 $T_2/T_1 > 1$ では 300cm/s を上限値として設定すること

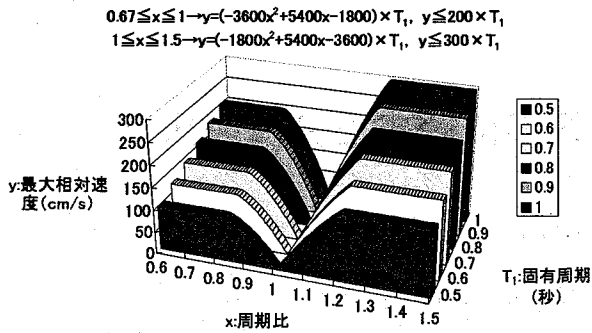


図3：各固有周期に対するスペクトル

とする。

図2の③式と⑥式の最大相対速度の値にそれぞれ上限をつけ、かつ固有周期 $T_1=0.5\sim 1.0$ 秒（0.1秒間隔）間ですべての相対速度を求められるようにした提案式を示すのが図3である。

周期比 $T_2/T_1=0.67\sim 1$ の場合、

$$y = (-3600x^2 + 5400x - 1800) \times T_1, y \leq 200 \times T_1 \quad (1)$$

周期比 $T_2/T_1=1\sim 1.5$ の場合、

$$y = (-1800x^2 + 5400x - 3600) \times T_1, y \leq 300 \times T_1 \quad (2)$$

なお、 y は最大相対速度、 x は周期比 (T_2/T_1)、 T_1 はモデル1の固有周期である。これらの式を用いると、II種地盤波タイプI地震動の標準波形3波を用いた応答結果は、すべて包含されることを確認した。 T_1 が大きくなると相対速度も大きくなる傾向にある。これらの式によって、落橋防止システムの作動速度を推定することとする。

4. 落橋防止ケーブルの設計

落橋防止ケーブルの設計に関して、システムの作動速度からケーブル所要断面積・ケーブル耐力を算定し、現行設計法と比較し検討した。作動速度が推定されれば、エネルギー保存則より、2つの物体の相対運動のエネルギーを、連結するケーブルのひずみエネルギーに置換して止めるのに必要なケーブル緒元を決定することができる³⁾。ケーブル所要断面積 A_E は次式により定義される。

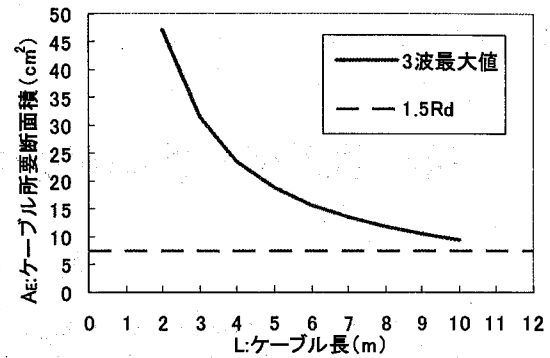


図4：ケーブル長とケーブル所要断面積の関係

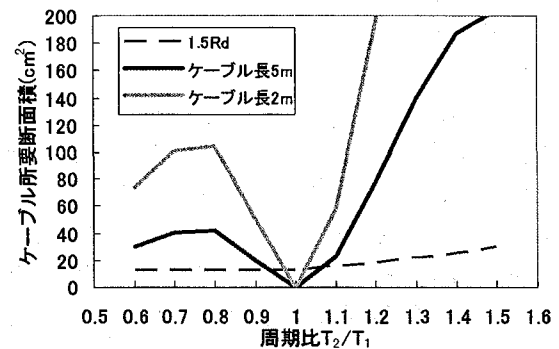


図5：ケーブル所要断面積の比較

$$A_E \geq \frac{m_1 m_2 E}{(m_1 + m_2) L} \left(\frac{y}{\sigma_a} \right)^2 \quad (3)$$

ただし、 m_1 と m_2 は隣接する桁の質量、 E はケーブルのヤング率、 L はケーブル長、 y は(1)式と(2)式的设计作動速度、 σ_a は本研究では降伏まで許容することとしてケーブルの降伏応力とした。

例として、固有周期 $T_1=0.5$ 秒と $T_2=0.75$ 秒時の相対速度により求めたケーブル所要断面積とケーブル長さの関係を図4に示す。 $m_1=63.5$ t、 $m_2=142.5$ t、 $E=2.0 \times 10^5$ N/mm²、 $\sigma_a=1.4$ GPa である。ケーブルも力学特性はバネと見なせるため、相対運動を止める際にある限度以内に応力を抑えるには、長いケーブルの方が有利である。現行基準の1.5Rdで設計したケーブル所要断面積は約7.4cm²である。現行の基準を採用するのであれば、ケーブルの長さが10mでも提案式による所要断面積に満たない。提案式を採用する場合には、現行より太いケーブルが必要になる。また、設計作動速度でケーブルが作動した場合、許容応力に達しないようにするためには、ある程度長いケーブルが必要である。

次に、ケーブル長2mと5mの時の落橋防止システムの作動速度から算定したケーブル所要断面積を比較し、また現行の基準とも比較を行ったものを図5

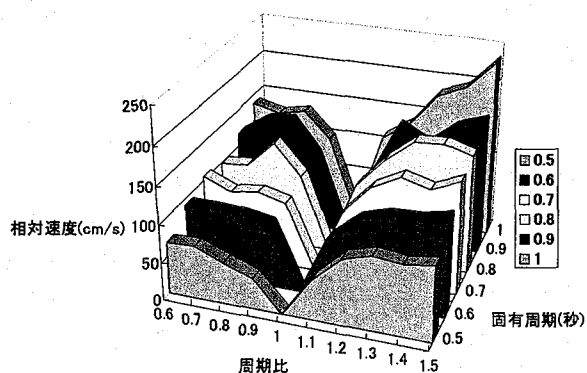


図 6 : 各固有周期に対するスペクトル
(ケーブルなし)

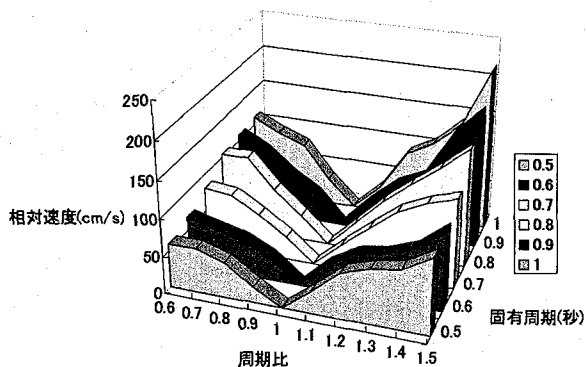


図 7 : 各固有周期に対するスペクトル
(ケーブル剛性 100kN/m)

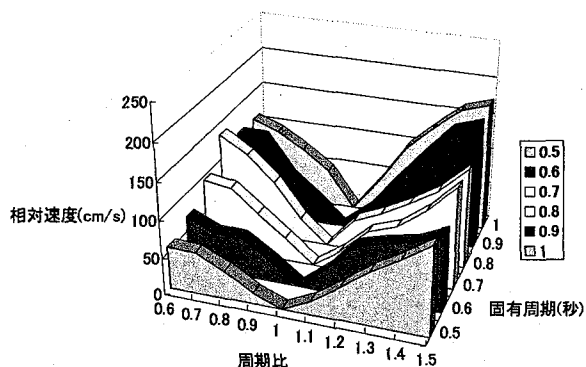


図 8 : 各固有周期に対するスペクトル
(ケーブル剛性 1000kN/m)

に示す。ケーブルが短いほど、必要となる断面積は大きくなる。また周期比があまり変わらない(ケーブル長 5m で $\pm 10\%$, 2m で $\pm 5\%$)と、現行基準の方が必要断面積は大きくなるが、周期比が離れるにつれ提案式による必要断面積の方が大きくなる。

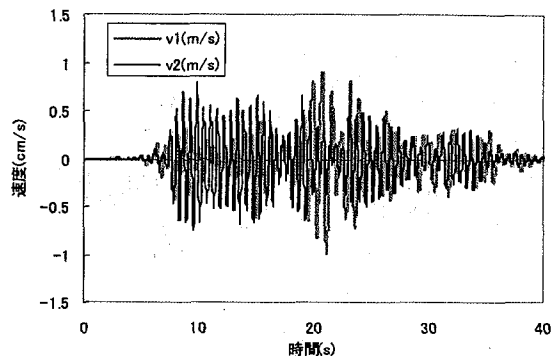


図 9 : 時刻歴速度応答(ケーブルなし)

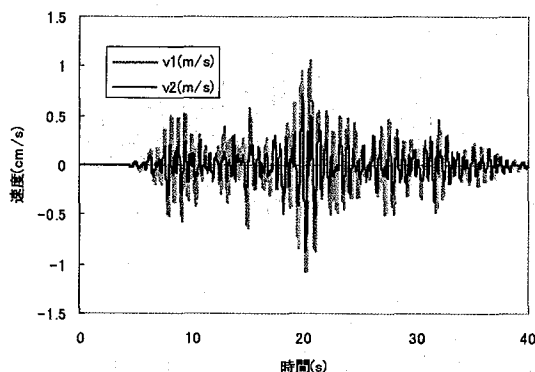


図 10 : 時刻歴速度応答(ケーブル剛性 100kN/m)

5. ケーブルの有無による相対速度の比較

Ⅱ種地盤波タイプⅠ地震動の標準波形 3 波により算定した最大相対速度をケーブルの有無によりそれぞれ比較を行った。今回はケーブルの遊びを考慮していないので、ケーブルに少しでも引張力が加わると作動し始める。その作動した時の速度の最大値をプロットしている。独立した 2 つの構造系間(ケーブルなし)に生じる相対速度と、ケーブルを考慮したケーブル剛性 100kN/m と 1000kN/m の時に生じる相対速度をそれぞれ比較した。独立した 2 つの構造系間(ケーブルなし)に生じる相対速度は図 6 に、ケーブルを考慮したケーブル剛性 100kN/m と 1000kN/m の時に生じる相対速度は、図 7、図 8 に示す。ケーブルを考慮しない場合と考慮した場合の相対速度を比較するとケーブルを考慮した場合の相対速度の方が小さかった。これはケーブルにつながれていると、それぞれの揺れが制御され速度の差が小さくなり相対速度が小さくなっていることが考えられる。周期比があまり変わらないと相対速度の差は大きい、周期比が離れると相対速度の値はあまり変わらなかった。またケーブル剛性 100kN/m と 1000kN/m の時の相対速度を比較すると、値はあまり変わらないことがわかった。

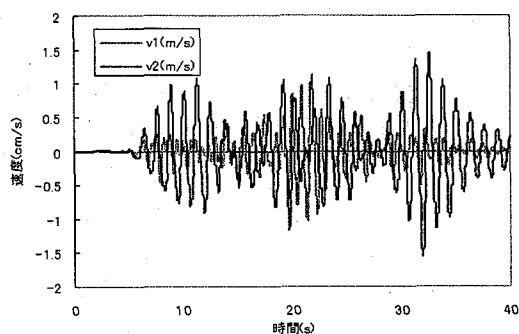


図 11：時刻歴速度応答(ケーブルなし)

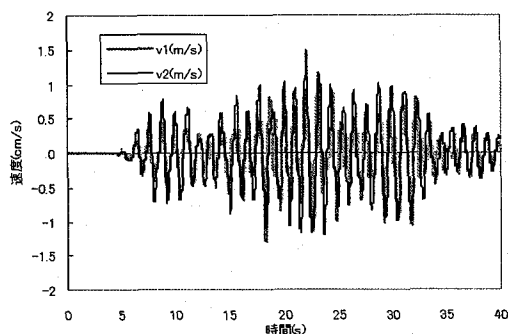


図 12：時刻歴速度応答(ケーブル剛性 100kN/m)

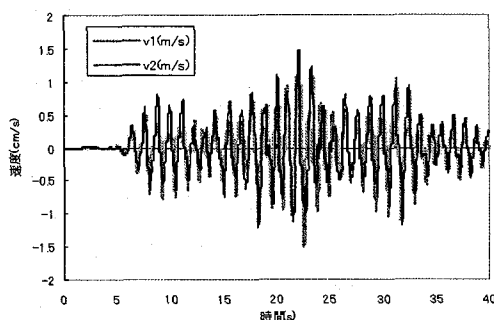


図 13：時刻歴速度応答(ケーブル剛性 1000kN/m)

次に、ケーブルを考慮しない場合と考慮した場合とでは周期比があまり変わらないと、相対速度の値に大きな差があることについて検討を行った。図 9、図 10 は例として固有周期 $T_1=0.8$ 秒と $T_2/T_1=0.72$ 秒時のケーブルを考慮しない場合とケーブル剛性 100 kN/m の場合のそれぞれの速度により比較を行った。図 9 のケーブルを考慮しない場合は時間が 10 秒から 20 秒の間は、特にそれぞれの速度 V_1 、 V_2 の差が大きかった。図 10 のケーブルにつながれている場合、対応する時間帯における相対速度が小さく抑えられていることがわかる。

最後に、ケーブルを考慮しない場合と考慮した場合とでは周期比が離れると、相対速度があまり変わらなかったことについて検討を行った。図 11、図 12、図 13 は例として固有周期 $T_1=0.9$ 秒と $T_2/T_1=1.35$ 秒時のケーブルを考慮しない場合とケー

ブル剛性 100 kN/m の場合、ケーブル剛性 1000kN/m の場合のそれぞれの速度により比較を行った。ケーブルを考慮しない場合は、2 つのモデルがばらばらに動くので、それぞれの速度 V_1 、 V_2 の差が大きい。一方、ケーブル剛性 100kN/m と 1000kN/m の両方とも、それぞれの速度 V_1 、 V_2 の値の大きさはあまり変わらないが、位相のずれが生じているため相対速度は大きくなっている。ケーブルにより振動を制御できるのには限界があるという見方もできる。

6. おわりに

本研究では、落橋防止システムの作動速度を推定する式を提案し、それに基づいた落橋防止ケーブルの設計法について示した。ここではⅡ種地盤に対する値を示したが、同様の考え方で他の地盤種別に対する作動速度も推定でき、式も検討することができる。

本研究で得られた主な結論は以下の通りである。

- 1) 落橋防止ケーブルを設計するにあたって、現行の基準を採用するのであれば、周期比が 5% 以上離れると、推定式による所要断面積に満たない。推定式を採用した場合では、現行より太いケーブルが必要になる。また、ケーブルの長さが短い方がケーブル所要断面積は大きくなる。
- 2) ケーブルの有無による相対速度の比較を行うと、ケーブルにつながれていると、それぞれの揺れが制御されて相対速度が小さくなる。またケーブル剛性を変化させても、相対速度はあまり変わらない。

参考文献

- 1) 土木研究センター：落橋防止構造設計ガイドライン(案)，2005 年。
- 2) 川島一彦・佐藤貴志：相対変位応答スペクトルの提案とその適用，構造工学論文集，Vol. 42A, pp. 645-652, 1996 年。
- 3) 武野志之歩・大野敬美・伊津野和行：作動速度に基づく落橋防止用連結ケーブルと緩衝材の設計法に関する研究，土木学会論文集，No. 731/I-63, pp. 341-352, 2003 年 4 月。