

非線形緩衝材を有する落橋防止ケーブルの設計法に関する研究

Study on design method for unseating prevention cables with nonlinear shock absorber

中尾尚史*, 伊津野和行**
Hisashi Nakao, Kazuyuki Izuno

* 立命館大学大学院, 理工学研究科, 環境社会工学専攻 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

** 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)

This paper studies the rational design method of seismic unseating prevention cables of bridges. Using the spring models for the cable and the shock absorber, the required capacity of the system is derived based on the law of conservation of energy. The cable is modeled as a linear spring, and the shock absorber is modeled as a rigid-plastic spring connected in series to the cable spring. The results show that the deformation limit and the nonlinearity of the shock absorber affect the applied load to the cable.

Key Words: unseating prevention system, shock absorber, law of conservation of energy, cable stiffness, deformation limit

キーワード: 落橋防止システム, 緩衝材, エネルギー保存則, ケーブル剛性, 変形限界, 非線形材料

1. はじめに

これまで地震により多くの橋梁が被害を受け, 人的な被害を被ってきた。また, 1995 年の兵庫県南部地震では初めて落橋による被害を受けた。その後 1996 年に改訂された道路示方書 V 耐震設計編¹⁾では, 緩衝効果のある落橋防止システムの採用が望ましいとされた。

これまでに, 緩衝材を用いた落橋防止ケーブルについて, 多くの研究^{2)~5)}が行われている。また, 桁の自由落下に対する落橋防止ケーブルの研究⁶⁾や, 緩衝材の設計法に関する研究⁷⁾も行われている。

しかし, 緩衝効果の具体的な評価方法や緩衝材の設計法は確立されていない。また道路示方書 V 耐震設計編には, 落橋防止システムに死荷重反力の 1.5 倍の耐力を持たせるように規定されているが, 1.5 の具体的な根拠は不明である。さらにケーブル長の規定がなく, 状況に応じて自由なケーブルの長さが設計されている状況にあり, ケーブル長が落橋防止システムに与える影響は検討されていない。

これまでの研究で用いられている緩衝材は, ゴムやばねなど, ケーブルに作用する力を低減する, 線形の緩衝材(線形ばね)がほとんどであり, エネルギーの消費については考えられていない。エネルギーを消費することのできる緩衝装置を用いれば, より安全で小型の落橋防止装置を構成することも可能になる⁸⁾。

そこで本研究では, 非線形緩衝材モデルを用いて, 緩衝効果の定式化・定量化を目指し, 合理的な設計法の開発を目的とする。

2. 落橋防止システムの定式化

2.1 落橋防止システムのモデル化

落橋防止システムとしては, 桁と桁とを連結するケーブルと緩衝材からなる装置を対象とし, 図-1に示すような線形ばねと非線形ばねを形成する緩衝材からなる装置を対象とする。

線形ばねは, 金属コイルばね等が考えられる。非線形ばねとしては, 例としては金属の塑性変形が考えられる。簡易的にケーブルばねと緩衝材ばねとを用いて図-2のようにモデル化を行う。

緩衝材には非線形特性を考慮することにした。非線形特性としては, 一般には弾塑性モデルが考えられるが, 初期剛性, 降伏点, 二次剛性の設定が必要になる。ここでは, パラメーターを少なくして簡易化して問題を扱うために, 図-3で示される剛塑性モデルを使って設計を行った。初期剛性 P が作用するまで緩衝材は動かず, P 以上の荷重に対してばね定数 k_s で応答する。

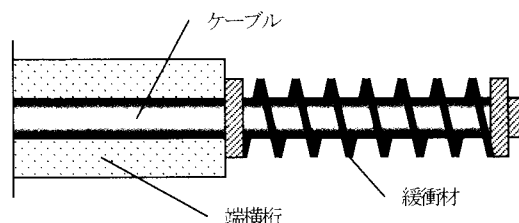


図-1 落橋防止システム

落橋防止システムを設置する桁は構造規模が異なる橋梁で単純桁を考える。設計を簡単にするために、桁に作用する外力はないと考え、1つの桁が作動速度 V で一定の方向のみに作動すると仮定する。桁が落下するまでに、作動している桁を停止させることを想定し、これらの想定からケーブルに作用する力 F と緩衝材の変形量 d を求める。

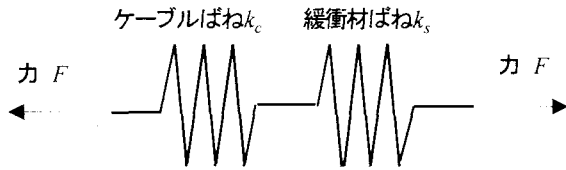


図-2 緩衝材を用いたケーブルモデル

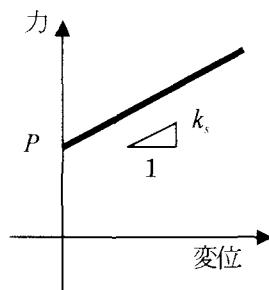


図-3 緩衝材の非線形特性

2. 2 運動方程式の誘導

前述の仮定から運動方程式を誘導する。ケーブルのみが変形した場合に、ケーブルに作用する力 F はエネルギー保存則から以下のように表すことができる。

$$F = \sqrt{k_c M V^2} \quad (1)$$

ここで、 k_c はケーブルのばね定数、 M は換算質量であり、 M は次式で与えられる。

$$M = \frac{m_1 \cdot m_2}{m_1 + m_2} \quad (2)$$

m_1, m_2 はケーブルが連結する2つの桁質量である。

V は桁の作動速度であり、デバイス作動時の作動速度 V を決めれば、ケーブルの設計ができることになる。作動速度 V の決め方としては、既往最大地震速度によって規定する方法や、ケーブルのない構造物に対して地震応答計算をして作動速度を想定する方法などが考えられる。

(1) 式により求められたケーブルに作用する力 F が緩衝材の初期復元力 P よりも小さければ、緩衝装置は作動しない。よってケーブルのみの作動を考えればよい。

ケーブルに作用する力 F が、緩衝材の初期復元力 P を上回った場合、緩衝材が作動し運動エネルギーを受ける。

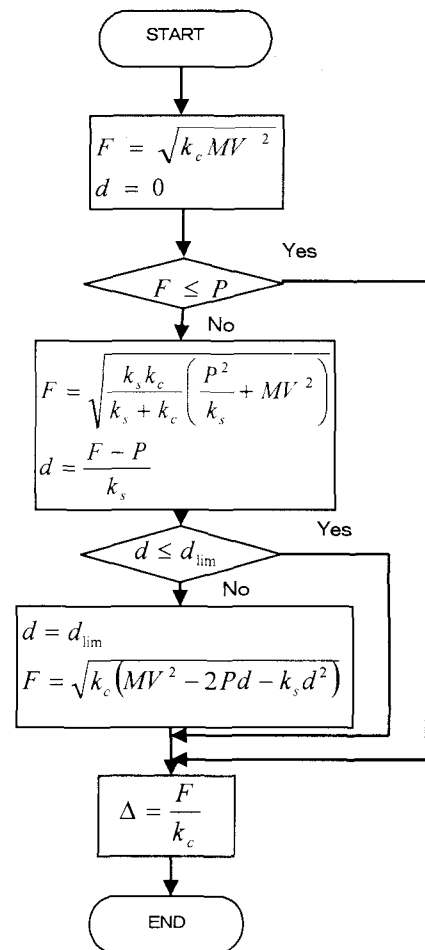


図-4 ケーブルに作用する力と緩衝材の変形量を求めるフローチャート

この場合、緩衝材のばね k_s 、緩衝材の初期復元力 P 、ケーブルおよび運動エネルギーを考える必要がある。

エネルギー保存則から次式が得られる。

$$F = \sqrt{\frac{k_s k_c}{k_s + k_c} \left(\frac{P^2}{k_s} + M V^2 \right)} \quad (3)$$

$$d = \frac{F - P}{k_s} \quad (4)$$

いかなる緩衝材でも無限に変形できるわけではなく、これ以上変形しない量がある。これを限界変形量 d_{lim} と定義する。(4) 式で得られた緩衝材の変形量 d が先に定義した限界変形量 d_{lim} に達しなければ、ケーブルに作用する力は (3) 式で得られる。

しかし、緩衝材の変形量 d が限界変形量 d_{lim} に達した場合は、緩衝材の変形量 d の値は限界変形量 d_{lim} となり、ケーブルに作用する力は次のようになる。

$$F = \sqrt{k_c (MV^2 - 2Pd - k_s d^2)} \quad (5)$$

$$d = d_{\lim} \quad (6)$$

図-4 に以上をまとめたフローチャートを示す。

3. 運動方程式の評価

3. 1 解析モデル

前節で導いた運動方程式の妥当性を評価するために、動的解析を行う。

解析モデルは、橋梁全体系を図-4のような二次元骨組モデルに置き換えて橋軸方向の解析を行う。橋梁は長大橋（スパン長 250m）、隣接中小橋（スパン長 50m）を対象とし、長大橋と隣接中小橋の間に落橋防止システムを設置する。

図-5 で橋脚、桁、基礎をはり要素、支承、地盤をばね要素として解析を行った。本研究では、支承部と落橋防止システム（緩衝装置）のみに非線形特性を考慮した。

また、それぞれの減衰定数は、長大橋の桁および橋脚に

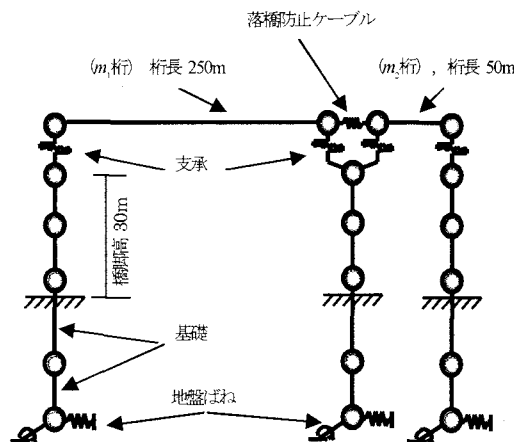


図-5 解析モデル

対してそれぞれ 0.02, 0.03 とし、隣接中小橋の桁および橋脚に対してそれぞれ 0.03, 0.05 とする。また、地盤ばねに対して 0.2 とした。

支承には、バイリニアモデルを用いた。なお、支承の減衰定数は 0.02 とした。これらの値を元にレイリー減衰を仮定して、Newmark- β 法（ $\beta = 1/4$, 計算時間刻み $\Delta t = 0.0005$ 秒）により計算を行った。

解析に用いる地震波は、道路示方書 V. 耐震設計編に適合する標準地震入力例のうち、Ⅲ種地盤用 type 1 の波形の 1 つを、橋軸方向に作動させた。

以上の条件で、解析により得られたケーブルに作用する力 F および緩衝材の変形量 d と、前節より試算された各々の値（予測値）とを比較し、運動方程式の妥当性を検討する。作動速度 V は、ケーブルがない場合の解析から得られた最大相対速度の結果から 5 m/s とし計算を行う。

また、ケーブルのばね定数 k_c は 1 GN/m、限界変形量は 50cm および 60cm、桁の質量は $m_1 = 1,790$ ton, $m_2 = 900$ ton と設定する。

3. 2 解析結果

図-6、図-7 は、それぞれ応答時間 11 秒～12 秒と 20.5 秒～21.5 秒のケーブルに作用する力 F の時刻歴応答を示した図である。図の横軸は時間、縦軸はケーブルに作用する力を表している。

図-6 より、剛性が低い緩衝材（ $k_s = 10$ MN/m）を用いた方が、ケーブルに作用する力 F が小さく、また作動周期が長いことがわかる。衝撃的な力の作用に対し、剛性の低い緩衝材を用いることで作用時間を長くし、作用する力の最大値を低減することができている。ただし、緩衝材の剛性が低いと限界の変形量に達しやすいという性質もあり、図-7 のように限界変形量に達してしまうと、逆に短時間にインパルス的な力が作用することになる。

図-8、図-9 に緩衝材のばね定数 $k_s = 10$ MN/m のときのケーブルに作用する力 F および緩衝材の変形量 d を示す。また図-10、図-11 で緩衝材のばね定数 $k_s = 100$ MN/m のときのケーブルに作用する力 F および緩衝材の変形量 d を示す。

横軸の P は、緩衝材の初期復元力であり、数値が大きくなるほど緩衝材の初期復元力が大きくなることを意味し

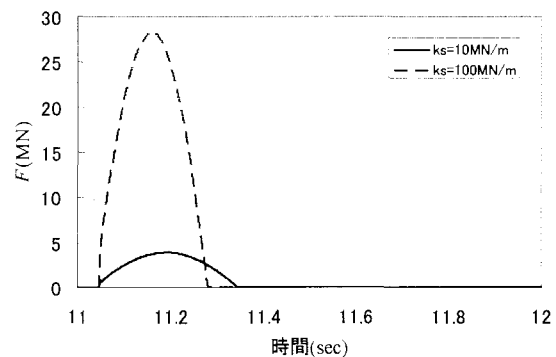


図-6 ケーブルの時刻歴応答
($P=0$ MN, $d_{\lim}=60$ cm, 11 秒～12 秒)

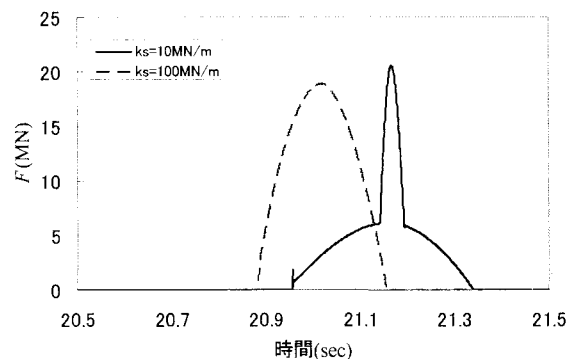


図-7 ケーブルの時刻歴応答
($P=0$ MN, $d_{\lim}=60$ cm, 20.5 秒～21.5 秒)

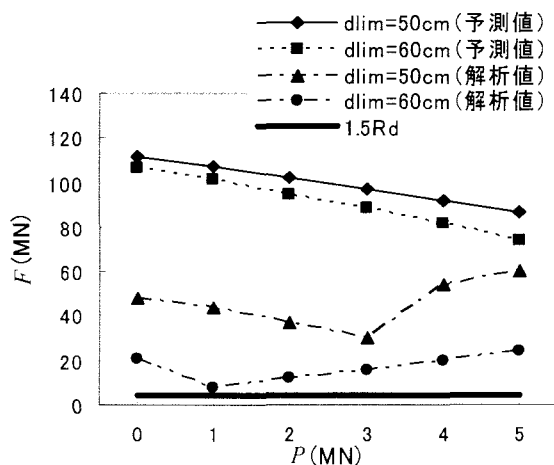


図-8 ケーブルに作用する力
($k_s=10\text{MN/m}$, $V=5\text{m/s}$)

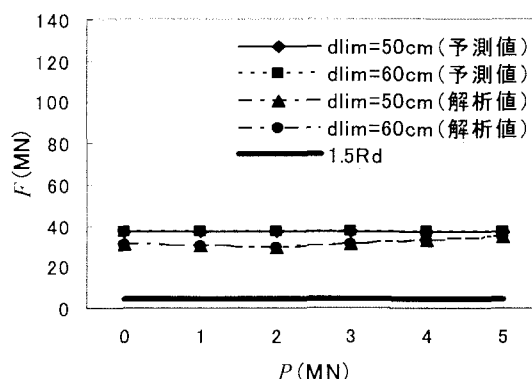


図-10 ケーブルに作用する力
($k_s=100\text{MN/m}$, $V=5\text{m/s}$)

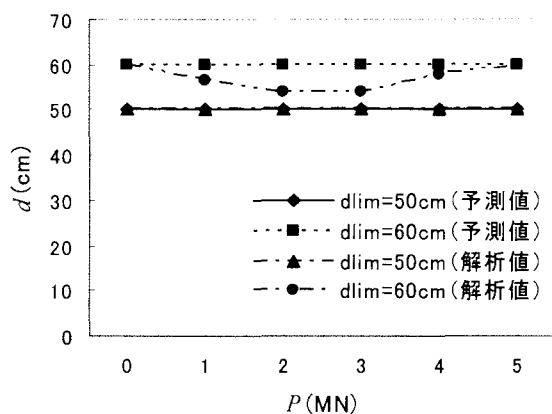


図-9 緩衝材の変形量
($k_s=10\text{MN/m}$, $V=5\text{m/s}$)

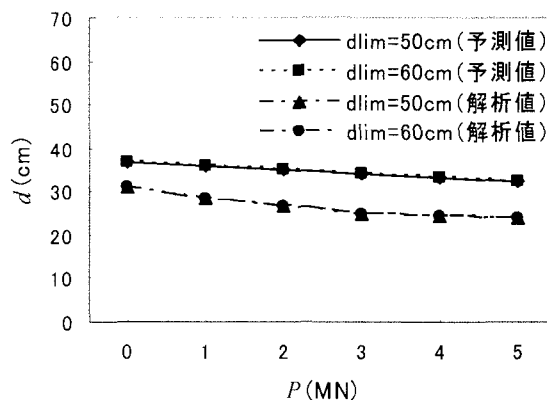


図-11 緩衝材の変形量
($k_s=100\text{MN/m}$, $V=5\text{m/s}$)

ている。縦軸の F および d は、ケーブルに作用する力、緩衝材の変形量を表している。図中の予測値は運動方程式により求めた値、解析値は動的解析により求められた値である。

図-8 および図-10 から、緩衝材のばね定数 $k_s=10\text{MN/m}$ および $k_s=100\text{MN/m}$ どちらを用いた場合でも、ケーブルに作用する力の解析値は、予測値のそれを下回っており、運動方程式で計算すると十分な耐力が得られると考えられる。また、緩衝材のばね定数 $k_s=10\text{MN/m}$ を用いた場合には、緩衝材の初期復元力 P が、ある一定値を超えると、ケーブルに作用する力 F が増加することがわかる。これは緩衝材が動き始めるために必要な作用力が増加し、緩衝効果が低下していると考えられる。

図-9 および図-11 を検討すると、緩衝材のばね定数 $k_s=10\text{MN/m}$ を用いた場合は、限界変形量を 50cm と設定しているときは、すべて限界変形量に達しており、限界変形量を 60cm と設定しているときは $P=0\text{MN}$ のみ限界変形量に達している。一方、緩衝材のばね定数 $k_s=100\text{MN/m}$ を

用いた場合には限界変形量に達しておらず、解析結果と予測値の違いも少ない。

図-8 および図-10 の $1.5R_d$ は、道路示方書 V 耐震設計編の規定を用いて、桁 (m_1) の死荷重反力 R_d に 1.5 倍して耐力を求めたものである。結果、すべての値で予測値、解析値を下回っており、道路示方書 V 耐震設計編の規定では、十分な耐力が得られないことがわかる。

以上のことから、ケーブルに作用する力 F について、緩衝材のばね定数 $k_s=10\text{MN/m}$ を使用した場合、運動方程式から得られた予測値はすべて解析値を下回っており、十分な耐力を得ている。しかし、予測値では緩衝材の変形量が全て限界変形量に達し、ケーブルに作用する力 F が大きくなっていることから、ケーブル耐力を十分に確保する必要がある。

緩衝材のばね定数 $k_s=100\text{MN/m}$ を使用した場合は、予測値、解析値ともに同じような挙動を示している。よって、2 章で提案したフローチャートで、十分に必要耐力を求めることができる。

4 ケーブルの設計

4. 1 ケーブル本数の設計

ここでは、2章で提案したフローチャートに基づいてケーブルを設計した場合、作動速度、ケーブル長や緩衝材の特性がケーブルに作用する力に及ぼす影響について、パラメトリックスタディを行う。

ケーブルに作用する力 F が求められると、必要なケーブル数は、ケーブルに作用する力 F をケーブルの降伏荷重で除することにより得られる。

$$N = F/P_y \quad (7)$$

ただし、端数は繰り上げにして、整数値にする。ここで、 N は必要なケーブル数、 P_y はケーブルの降伏荷重である。なお、ケーブルに作用する力 F は、(1) 式、(2) 式および (4) 式から求めた。またケーブルは、降伏荷重 $P_y = 4.2$ MN、ヤング率 $E = 200$ GN/m²、断面積 $A = 2635.3$ mm² を使用し、限界変形量は 50cm および 60cm を設定する。

4. 2 ケーブル長の設計

ここでケーブルのばね定数 k_c を設計する。ケーブルのばね定数は次の式で表される。

$$k_c = EA/L \quad (8)$$

E はケーブルのヤング率、 A はケーブル断面積、 L はケーブル長である。以上の条件で、ケーブル長 L を 2 m、4 m、6 m、8 m と変化させたときに得られるケーブルのばね定数 k_c を、(1) 式、(2) 式、(4) 式および (7) 式に用い、ケーブルに作用する力 F と必要なケーブル数 N を求め、適切なケーブル長を検討する。

また、作動速度 V によってケーブルのばね定数 k_c 、ケーブルに作用する力 F 、および必要なケーブル数 N がどのように変化するか検討する。

4. 3 試算例

本研究では、作動速度を 1m/s から 5m/s までの 5 つのケースについて検討した。 $V=3$ m/s 以上のケースでは、大半が限界変形量に達し、 $V=1$ m/s ではほとんど達しなかった。ので、ここでは $V=2$ m/s のケースについて述べる。

図-12、図-13 は限界変形量 50cm、図-14、図-15 は限界変形量 60cm の場合における緩衝材のばね定数 k_s を 0.01MN/m から 100MN/m、緩衝材の初期復元力 P を 0MN から 5MN まで変化したときのケーブルに作用する力 F 、および必要なケーブル数 N を示したものである。

ケーブルに作用する力 F と必要とするケーブル本数 N には比例関係にあり当然同じ傾向を示すものであるが、具体的な本数を示したほうが理解しやすく、ケーブルの取り付け設計の重要な要素となると考え両者を示す。

これらの図から、緩衝材の限界変形量に達していると、必要なケーブル数が多くなり、緩衝材の限界変形量に達していない場合は必要なケーブル数が少なくて済むことがわかる。

また、図-13 で緩衝材のばね定数 $k_s = 0.01$ MN/m、0.1 MN/m、1 MN/m では $P=0$ MN から 2 MN で必要なケーブル数が多く、 $P=3$ MN、4 MN では必要なケーブル数は、

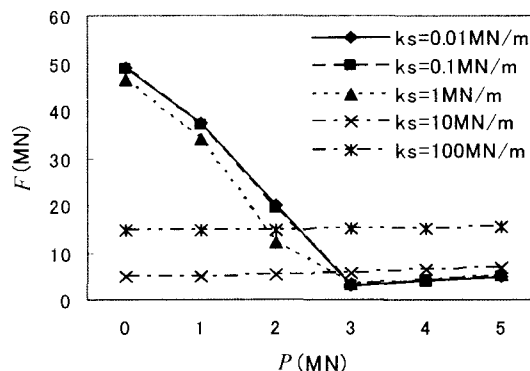


図-12 ケーブルに作用する力
($d_{lm}=50$ cm, $V=2$ m/s)

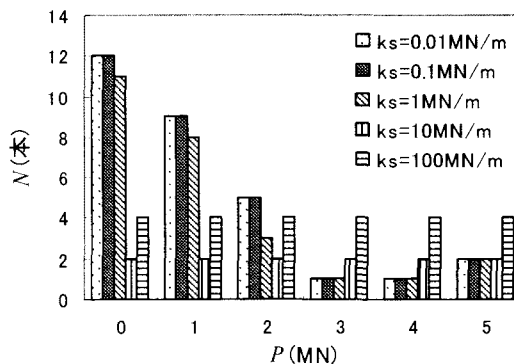


図-13 必要なケーブル数
($d_{lm}=50$ cm, $V=2$ m/s)

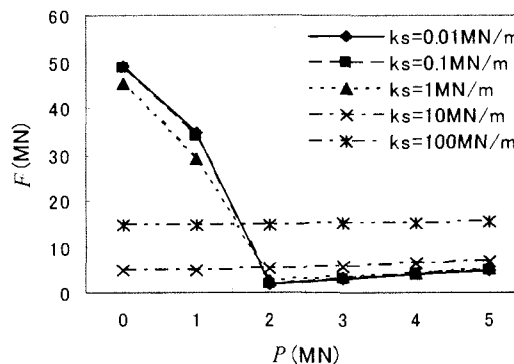


図-14 ケーブルに作用する力
($d_{lm}=60$ cm, $V=2$ m/s)

1本に減少し、 $P=5\text{ MN}$ になると $N=2$ 本に増加する。よって、必要なケーブル数が1本の場合は、もっと降伏荷重が小さいケーブルでもよいことがわかる。

図-15でも、図-14で限界変形量に達しているために、ケーブルに作用する力 F が大きい値を示している緩衝材の初期復元力 $P=0\text{ MN}$ と 1 MN で、必要なケーブル数が多くなっている。

逆に、図-14において、限界変形量に達していないためにケーブルに作用する力 F が、小さな値を示している

$P=2\text{ MN}$ から 4 MN では、必要なケーブル数は1本となり、 $P=5\text{ MN}$ となると必要ケーブル数は2本と増加する。これは緩衝材を作動させるための力が増加したためと考えられる。

さらに緩衝材のばね定数 $k_s=10\text{ MN/m}$, 100 MN/m のときは図-13, 図-15 から必要ケーブル数は全て2本または4本となっている。緩衝材のばね定数が $k_s=10\text{ MN/m}$, 100 MN/m では緩衝材の初期復元力 P に関係なく緩衝材のばね定数 k_s でケーブルに作用する力 F や必要なケーブル数 N が決まるといえる。

以上のことから、緩衝材のばね定数が $k_s=0.01\text{ MN/m}$, 0.1 MN/m , 1 MN/m では、緩衝材の初期復元力 P を最適なケーブル数にするように考えて設計する必要がある。

緩衝材のばね定数が $k_s=10\text{ MN/m}$, 100 MN/m では、必要なケーブル数が一定の本数を示すので、緩衝材の初期復元力 P は任意にすることができる。つまり、緩衝材のばね定数 $k_s=10\text{ MN/m}$, 100 MN/m を用いる場合には、緩衝材の初期復元力 P は必要ない。しかし、緩衝材のばね定数 k_s を大きな値にすると、逆に必要なケーブル数 N を増加させることになるので注意する必要がある。また、図から、限界変形量を大きくするほど、小さな緩衝材の初期復元力 P で最適なケーブル数にすることができる。

図-16 から図-25 は、ケーブル長 L を 2 m , 4 m , 6 m , 8 m としたときの、ケーブルに作用する力 F と必要な

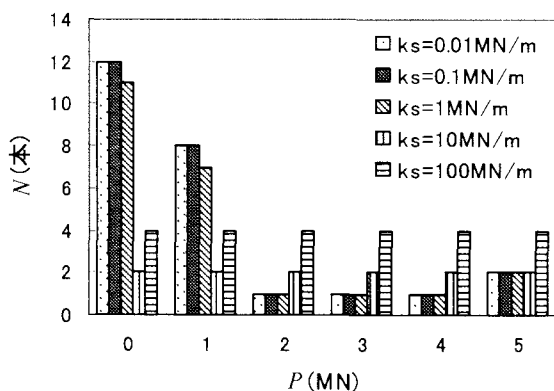


図-15 必要なケーブル数
($d_m=60\text{ cm}$, $V=2\text{ m/s}$)

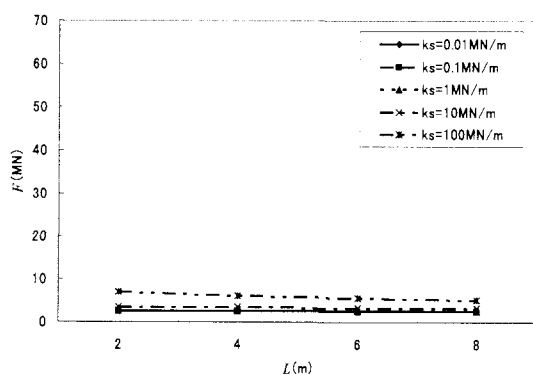


図-16 ケーブルに作用する力
($d_m=50\text{ cm}$, $V=1\text{ m/s}$)

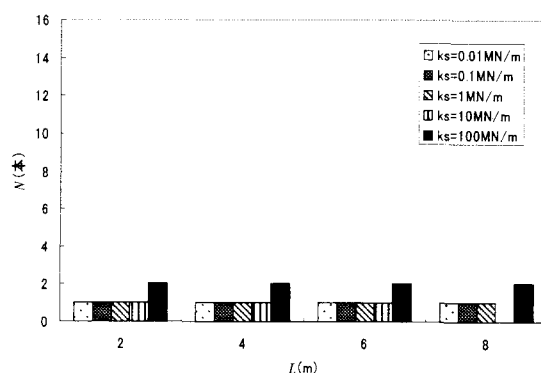


図-17 必要なケーブル数
($d_m=50\text{ cm}$, $V=1\text{ m/s}$)

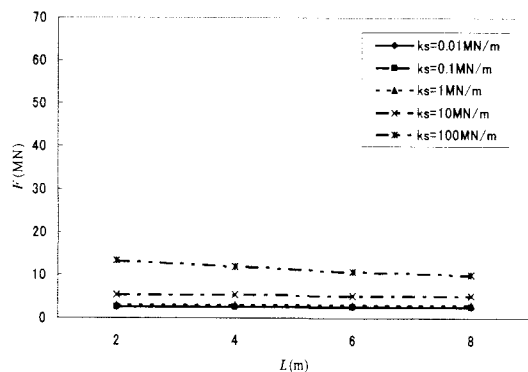


図-18 ケーブルに作用する力
($d_m=50\text{ cm}$, $V=2\text{ m/s}$)

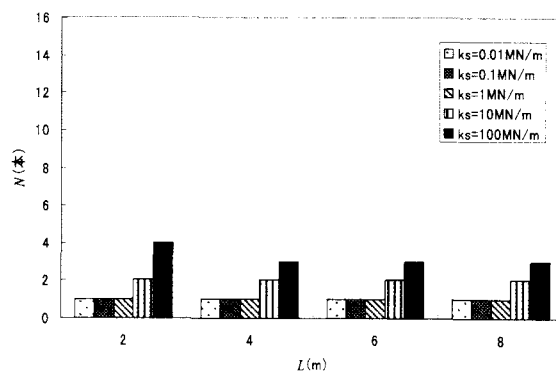


図-19 必要なケーブル数
($d_m=50\text{ cm}$, $V=2\text{ m/s}$)

ケーブル数 N を表したものである。なお、限界変形量を 50cm、緩衝材の初期復元力 P は 2.5MN を仮定した。

図-17、図-19 では、ばね定数の小さな緩衝材（ここでは $k_s=0.01$ MN/m, 0.1 MN/m, 1 MN/m）においては、全て一定のケーブル数となっている。ケーブル長によって、必要なケーブル数が変化しないことがわかる。

また、図-19 で示されている、緩衝材のばね定数が $k_s=10$ MN/m のときの必要なケーブル数は、2本となっており、緩衝材のばね定数が $k_s=100$ MN/m のときは、他のケースより必要なケーブル数が多くなっていることがわかる。

よって、地震による応答速度が小さいと予測した場合、なるべくばね定数の小さな緩衝材（ここでは $k_s=0.01$ MN/m, 0.1 MN/m, 1 MN/m）を使用したほうが有効であると考えられる。

図-20、図-22、図-24 と、装置の作動速度が大きくなると、ケーブル長 L が長くなるに伴いケーブルに作用する力 F が低下し、それによって必要なケーブル数 N が減少していることがわかる。大きな作動速度の場合はケーブル長 L を長くしたほうが必要なケーブル数 N を減らすことができる。

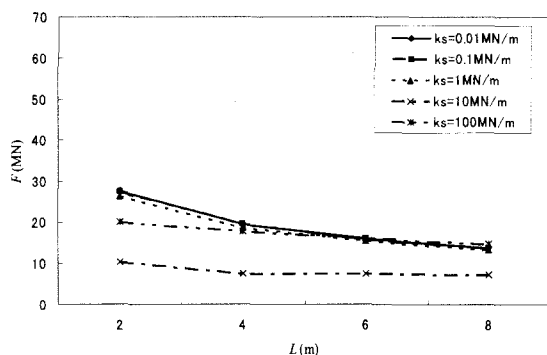


図-20 ケーブルに作用する力
($d_m=50$ cm, $V=3$ m/s)

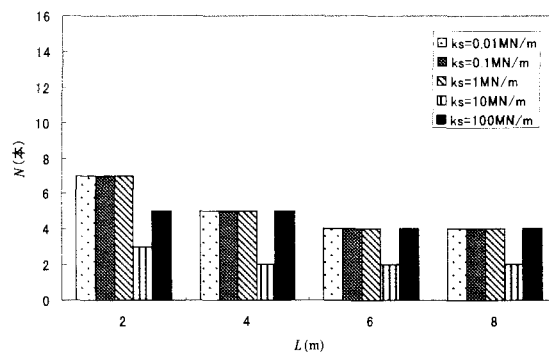


図-21 必要なケーブル数
($d_m=50$ cm, $V=3$ m/s)

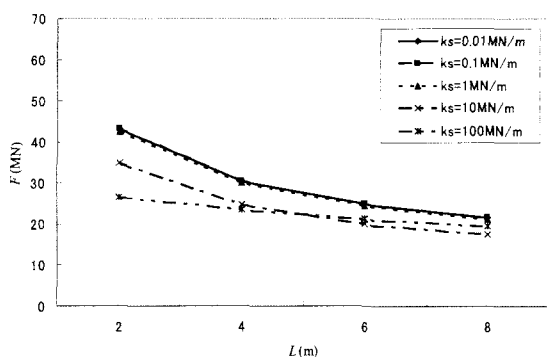


図-22 ケーブルに作用する力
($d_m=50$ cm, $V=4$ m/s)

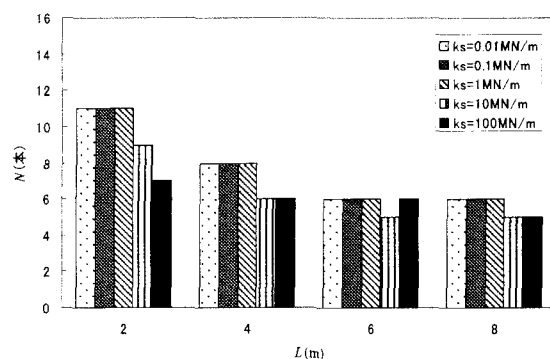


図-23 必要なケーブル数
($d_m=50$ cm, $V=4$ m/s)

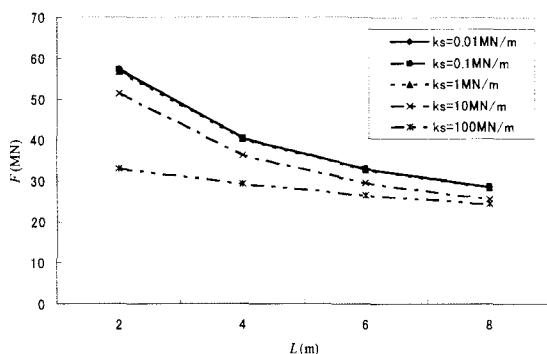


図-24 ケーブルに作用する力
($d_m=50$ cm, $V=5$ m/s)

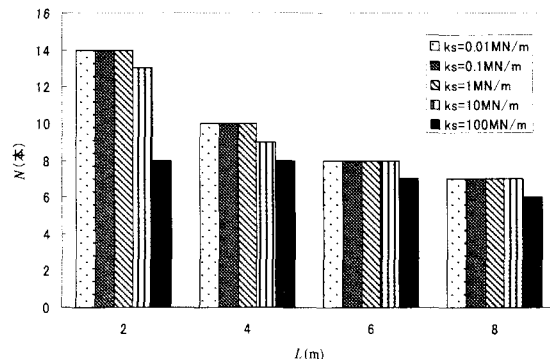


図-25 必要なケーブル数
($d_m=50$ cm, $V=5$ m/s)

また、緩衝材が限界変形量に達しているときは、ばね定数の大きな緩衝材（ここでは $k_s=10\text{MN/m}$ 、 100MN/m ）のほうが、ばね定数の小さな緩衝材よりも必要なケーブル数 N が少ないことから、限界変形量に達するくらいの大きな作動速度を予測される場合は、ばね定数の大きな緩衝材を用いたほうが有効だと考えられる。

しかし、図-23、図-25では、ばね定数の小さな緩衝材、ばね定数の大きな緩衝材とも必要なケーブル数 N の差は少なく、ケーブル長 L を長くすると必要なケーブル数 N は等しくなる。

5. 緩衝材の設計

緩衝材は1章で述べたように、線形ばねと非線形ばねを形成する緩衝材からなる装置を対象とする。本章では、線形ばね、特に金属コイルばねの設計について述べる。

図-26のような金属コイルばねを考えたとき、金属コイルばねのばね定数 k_s は次式で表すことができる⁹⁾。

$$k_s = \frac{Gd^4}{8nD^3} \quad (9)$$

ここで G はコイルばね材のせん断弾性係数、 d はコイルばね材の直径(mm)、 D はコイル径(mm)、 n はコイルの巻き数を表している。また、図中の α はコイルのピッチ角、 H はコイルの自由高さ(mm)である。

(9)式を変形させることにより、コイルの巻き数 n やコイルばね材の直径 d を求めることができる。

例として、ばね定数 $k_s=0.01\text{MN/m}$ の鋼のコイルばねを想定して設計を行う。 $D=220\text{mm}$ 、 $\alpha=10^\circ$ として、コイルの巻き数を13回、14回、15回としたときのコイルばね材の直径 d とコイルの自由高さ H を求める。

これらの条件で設計を行うと、表-1のようになる。表から、ばね定数 $k_s=0.01\text{MN/m}$ のコイルばねを設計すると、少なくとも750mm以上の自由高さをもつコイルばねが必要であることがわかる。

非線形ばね対しては、個々の条件を勘案して、個別の設計をすることになる。

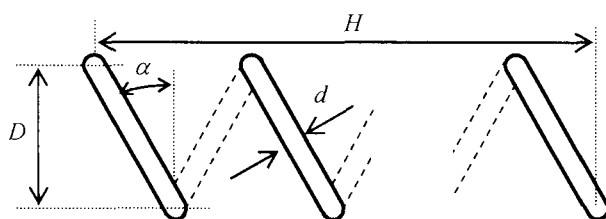


図-26 金属コイルばね

表-1 鋼コイルばねの設計結果

$D(\text{mm})$	n	$d(\text{mm})$	$H(\text{mm})$
220	13	19.4	756.2
220	14	19.7	819.5
220	15	20.1	883.2

6. おわりに

本研究では、非線形緩衝材モデルを用いて各々の解析を行った。得られた主な結果は以下の通りである。

- (1) エネルギー保存則より、ケーブルに作用する力と緩衝装置の変形量を予測することが可能と考えられた。
- (2) ばね定数の小さな緩衝材を使用する場合は、緩衝装置の限界変形量に達すると、ケーブルに作用する力が大きくなるので、緩衝装置の限界変形量を大きく設計する必要がある。
- (3) ばね定数の大きな緩衝材を使用する場合は緩衝装置の限界変形量に達しないが、緩衝材を硬くしすぎるとケーブルに作用する力が大きくなり、緩衝効果が小さくなる。
- (4) 緩衝装置の作動速度が大きい場合、ケーブル長を長くして、ケーブルに作用する力を抑えることが有効である。

今後は、落橋防止装置の具体的設計や、取り付け方法、さらには連続桁への適用等を検討していく必要がある。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，V．耐震設計編，1996。
- 2) 土木学会関西支部：緩衝型落橋防止システムに関する調査研究，2001。
- 3) 川島一彦，植原健治，庄司学，星恵津子：桁衝突および落橋防止装置の効果に関する模型振動実験および解説，土木学会論文集，No.703/I-59，pp.221-236，2002。
- 4) 梶尾幸秀，杉浦邦征，渡邊英一：緩衝型桁間連結ケーブルを用いた高架橋の地震時応答性状，土木学会論文集，No.710/I-60，pp.297-310，2002。
- 5) Izuno, K., Takeno, S., Nakao, H. and Kobayashi, H.: Demand capacity for unseating prevention cable of bridges, Proc. of 13th World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 3149, 10 pages (CD-ROM), Aug. 2004.
- 6) 伊津野和行，小林紘士，鎌田耕平：桁落下を想定した桁間ケーブル連結装置の所要条件に関する考察，土木学会論文集，No.668/I-54，pp.319-324，2001。
- 7) 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。
- 8) 伊津野和行，小林紘士：落橋防止ケーブルに対する緩衝材の適用と効果に関する研究，土木学会地震工学論文集，Vol. 27, Paper No.30, 6pages(CD-ROM)，2003。
- 9) ばね技術研究会：ばねの設計，第2版，丸善，1978。

(2004年9月17日受付)