

緩衝材を有する落橋防止ケーブルの設計法に関する検討

中尾尚史¹・伊津野和行²

¹学生員 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）

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

1995年の兵庫県南部地震では初めて落橋による人的な被害を受けた。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、落橋防止のために設置する各構成要素の役割が明確にされ、また緩衝効果のある落橋防止システムの採用が望ましいと記載された。

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定されている状況にあり、ケーブル長が落橋防止システムの性能に与える影響は検討されていない。

これまでに、緩衝材を用いた落橋防止ケーブルについての研究^{2)~7)}や、桁の自由落下に対する落橋防止ケーブルの研究⁸⁾、また緩衝材の設計法に関する研究⁹⁾が行われている。それらの研究では、主に緩衝材にゴムなどの線形の緩衝材（線形ばね）が用いられている。

だが、これらの緩衝材ではエネルギーの消費については考えることができない。よって、非線形な履歴復元力特性を有し、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ができる可能性がある¹⁰⁾。

本研究では、エネルギーを消費することのできる非線形緩衝材モデルを用いて、緩衝効果やケーブルの定式化・定量化を目指した。そして、エネルギー保存則を元にした定式化により、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設計

(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、図-1に示すような桁と桁とを連結するケーブルと、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。

非線形ばねとしては、例えば金属の塑性変形を利用したデバイス等が考えられる。簡易的にケーブルばねと緩衝材ばねを用いて図-2のようにモデル化を行う。

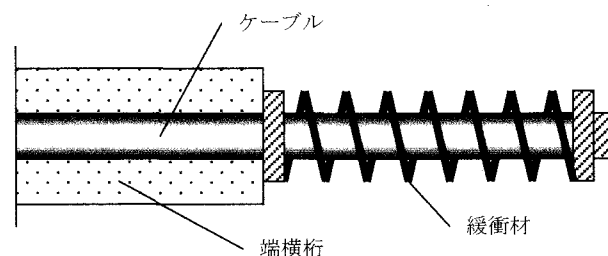


図-1 落橋防止システム

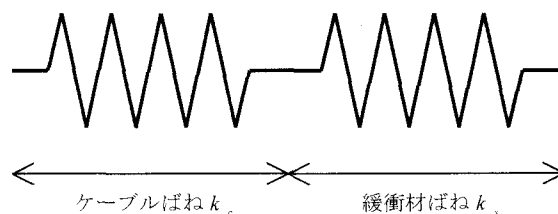


図-2 緩衝材を有するケーブルモデル

緩衝材の非線形特性としては、基礎的なものを設定することにした。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。初期復元力 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 で応答するものとした。

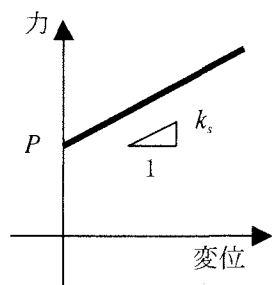


図-3 緩衝材の非線形特性

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（桁質量： $m_1=1,790t$, $m_2=900t$ ）で単純桁を考える。道路橋示方書では、隣接する桁の質量を2倍より小さく設定することになっているため、ここでは、2倍より少し小さくなるように桁質量を設定した。設計を簡単にするために、作動中に桁へ作用する地震外力はないと考え、1つの桁が初速度 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、作動している桁を橋脚上で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 と緩衝装置の変形量 d を求める。

(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。

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

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

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

(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、緩衝装置が作動し運動エネルギーを分担する。この場合、緩衝装置のばね 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。

緩衝材が作動するとき、緩衝材ばねに作用する力は $(F-P)$ となり、緩衝材の変形量は以下のようになる。

$$d = \frac{F - P}{k_s} \quad (3)$$

そこで、(3)式を用いて緩衝材に働くエネルギーを考慮して、エネルギー保存則を用いると、

$$\frac{1}{2} MV^2 = \frac{F^2}{2k_c} + \frac{(F-P)^2}{2k_s} + Pd \quad (4)$$

式(4)を解くと、ケーブルに作用する力 F が求められる。

$$F = \sqrt{\frac{k_s k_c}{k_s + k_c} \left(\frac{P^2}{k_s} + MV^2 \right)} \quad (5)$$

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。(3)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(5)式で得られる。

しかし、緩衝装置の変形量 d が限界変形量 $d_{\lim}$ に達した場合は、緩衝装置の変形量 d の値は

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

となり、エネルギー保存則を用いると、

$$\frac{1}{2} MV^2 = \frac{1}{2} \frac{F^2}{k_c} + \frac{1}{2} k_s d_{\lim}^2 + Pd_{\lim} \quad (7)$$

が成り立つ。(7)式を解くと、ケーブルに作用する力

は次のようになる。

$$F = \sqrt{k_c (MV^2 - 2Pd - k_s d^2)} \quad (8)$$

以下に述べた式のフローチャートを記す。

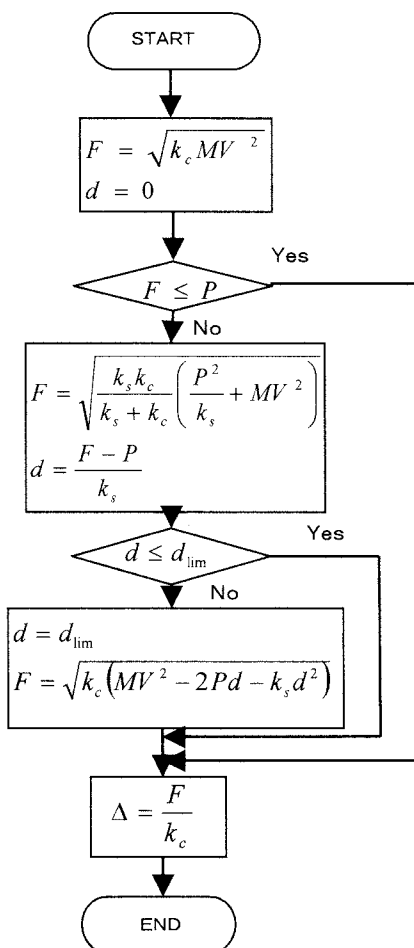


図-4 ケーブルに作用する力と
緩衝材の変形量を求めるフローチャート

(3) 設計結果

本研究では、初速度 $V=2$ m/s、ケーブルのばね定数 $k_c=1$ GN/m、限界変形量 $d_{lim}=50$ cm および 60 cm と設定して設計を行った。また換算質量 M は $m_1=1,790$ t、 $m_2=900$ t より $M=600$ t とする。

図-5 から図-10 は緩衝材のばね定数を、 $k_s=0.01$ MN/m、 $k_s=1$ MN/m、 $k_s=100$ MN/m と設定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 を示したものである。

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する。縦軸の F および d は、ケーブルに作用

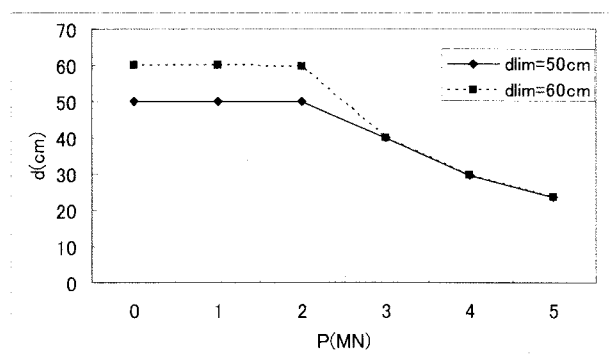


図-5 緩衝材の変形量 ($k_s=0.01$ MN/m)

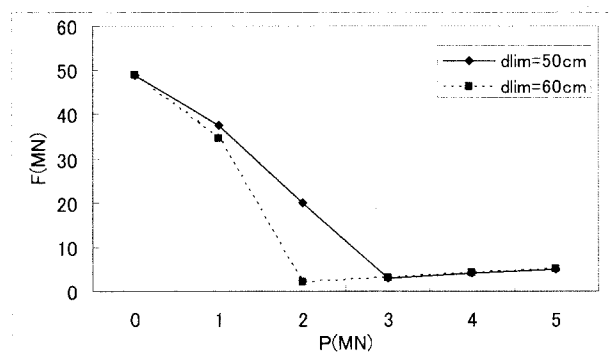


図-6 ケーブルに作用する力 ($k_s=0.01$ MN/m)

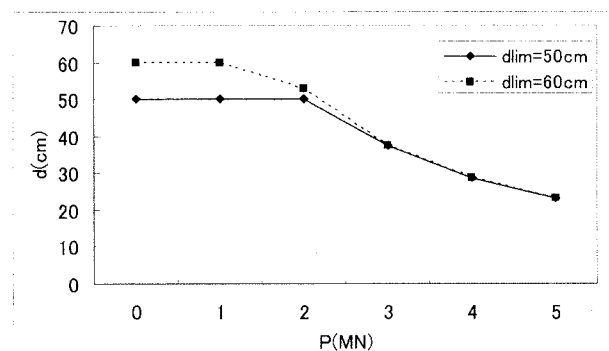


図-7 緩衝材の変形量 ($k_s=1$ MN/m)

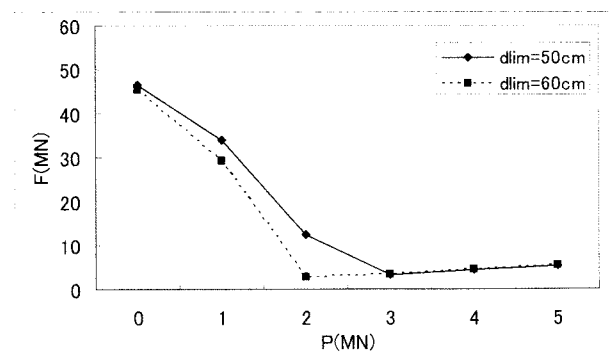


図-8 ケーブルに作用する力 ($k_s=1$ MN/m)

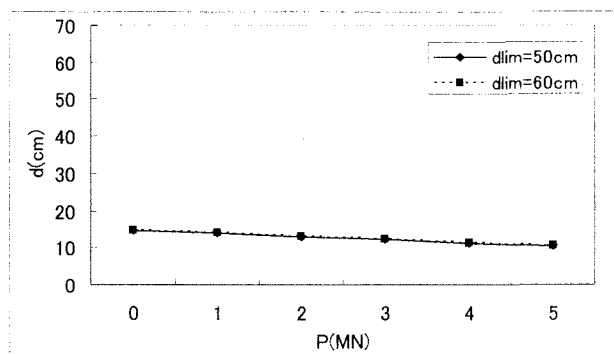


図-9 緩衝材の変形量 ($k_s=100\text{MN/m}$)

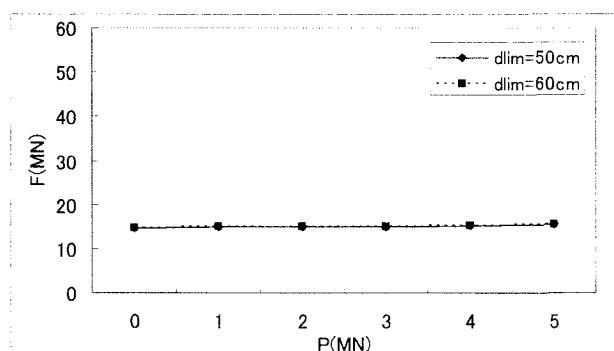


図-10 ケーブルに作用する力 ($k_s=100\text{MN/m}$)

する力、緩衝材の変形量を表している。

a) $k_s=0.01\text{MN/m}$ および $k_s=1\text{MN/m}$ の場合

緩衝材のばね定数 $k_s=0.01\text{MN/m}$ および $k_s=1\text{MN/m}$ の場合、緩衝材の初期復元力 P が小さい場合は、緩衝材の変形量 d が限界変形量 d_{lim} に達してしまい、それによりケーブルに作用する力 F が増加している。緩衝材の初期復元力 P を大きくすると、緩衝材の変形量 d を減少させることができる。そして、ケーブルに作用する力 F を抑えることができる。

しかし、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、緩衝効果が低下したためと考えられる。

よって、十分な緩衝効果が得られるように、緩衝材の初期復元力 P を設定する必要がある。

b) $k_s=100\text{MN/m}$ の場合

緩衝材のばね定数 $k_s=100\text{MN/m}$ を用いた場合には、緩衝材の変形量 d は全て限界変形量 d_{lim} に達しておらず、ケーブルに作用する力 F も一定の値を示している。これ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 が決まるといえる。

よって、緩衝材のばね定数が $k_s=100\text{MN/m}$ のような、大きな値の緩衝材では、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、緩衝材の初期復元力 P は必要ないともいえる。

(4) ケーブル長の設計

(2)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、ケーブル長がケーブルに作用する力に及ぼす影響について検討する。

ケーブル長は、主にケーブルのばね定数 k_c に影響を与える。ケーブルのばね定数 k_c は次の式で表される。

$$k_c = EA/L \quad (9)$$

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、(5)式および(8)式に用い、ケーブルに作用する力 F を求め、適切なケーブル長を検討する。

(5) ケーブル長がケーブルに与える影響

設計ではヤング率 $E=200\text{GN/m}^2$ 、断面積 $A=2635.3\text{mm}^2$ (直径 58mm) を使用した。また、緩衝材の初期復元力 P を 2.5 MN、限界変形量 d_{lim} を 50cm と仮定し、作動速度を 2 m/s、3 m/s、4 m/s としたとき、ケーブル長を変化させた場合のケーブルに作用する力 F を求めた。なお、ケーブルは実際使われているケーブルの規格を用いた。

図-11~13 の横軸はケーブル長 L 、縦軸はケーブルに作用する力 F を示している。

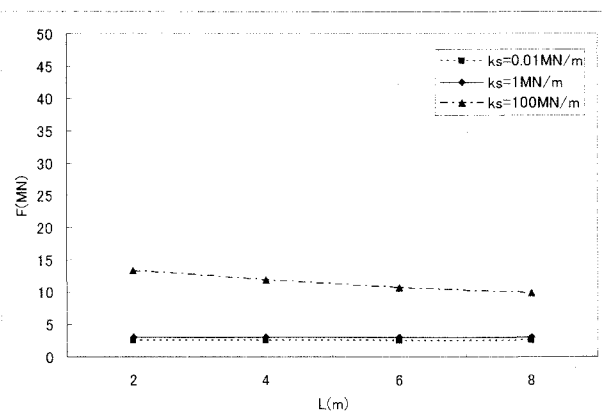


図-11 ケーブルに作用する力 ($V=2\text{m/s}$)

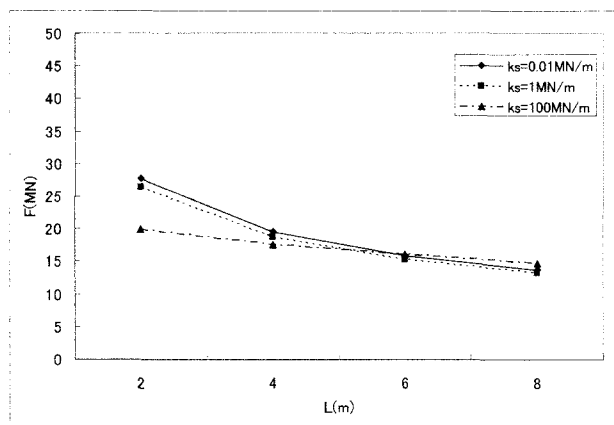


図-12 ケーブルに作用する力 ($V=3\text{m/s}$)

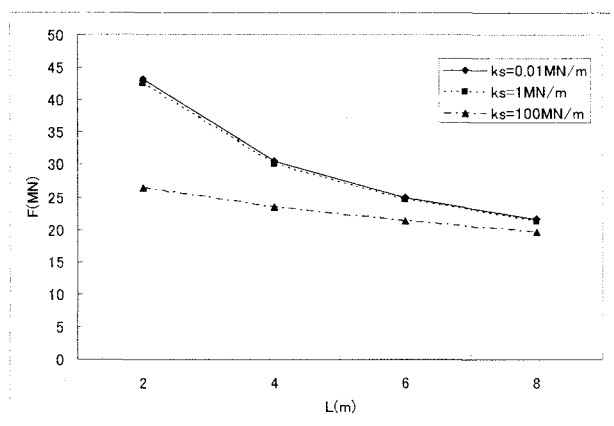


図-13 ケーブルに作用する力 ($V=4\text{m/s}$)

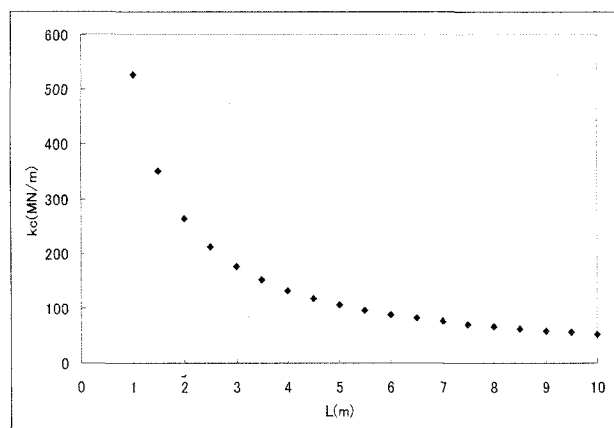


図-14 ケーブルばね定数の変化

図-11 のように、作動速度が 2 m/s のときは、ケーブルに作用する力 F は、ほぼ一定の値を示している。よって、ケーブル長を自由な長さに設計しても差し支えない。

図-12 および図-13 のように、作動速度を少し

上げると、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 が低下している。大きな作動速度を想定する場合は、ケーブル長 L を長くしたほうがケーブルに作用する力 F を小さくすることができる。

図-14 にケーブルのばね定数 k_c を示した。これと図-13 を比較すると、ケーブルのばね定数 k_c を小さく設計すると、ケーブルに作用する力 F を小さくすることができる、考えられる。

3. 落橋防止システム設置に関する検討

(1) 落橋防止システムの作動シナリオ

前章では、提案したフローチャートに基づいてケーブルに作用する力 F および緩衝材の変形量 d を求めた。本章では、実際に落橋防止システムをどのように設計・設置するかを検討する。

表-1 ケーブルに作用する力の小さい設計ケース ($V=1\text{m/s}$)

$k_s(\text{MN/m})$	$P(\text{MN})$	$L(\text{m})$	$d(\text{cm})$	$F(\text{MN})$
0.01	1	2	29.76	1
0.01	1	4	29.57	1
0.01	1	6	29.38	1
0.01	1	8	29.19	1
0.1	1	2	29.37	1.03
0.1	1	4	29.17	1.03
0.1	1	6	28.98	1.03
0.1	1	8	28.78	1.03
1	1	6	25.78	1.26
1	1	8	25.54	1.26

表-2 ケーブルに作用する力の小さい設計ケース ($V=2\text{m/s}$)

$k_s(\text{MN/m})$	$P(\text{MN})$	$L(\text{m})$	$d(\text{cm})$	$F(\text{MN})$
0.01	3	2	39.4	3
0.01	3	4	38.83	3
0.01	3	6	38.26	3
0.01	3	8	37.69	3
0.1	3	2	39.16	3.04
0.1	3	4	38.58	3.04
0.1	3	6	38.01	3.04
0.1	3	8	37.43	3.04
1	2	8	50	3.14
1	3	8	35.11	3.35

表-3 ケーブルに作用する力の小さい設計ケース
($V=3\text{m/s}$)

$k_s(\text{MN/m})$	$P(\text{MN})$	$L(\text{m})$	$d(\text{cm})$	$F(\text{MN})$
0.01	5	4	50	7.24
0.01	5	6	50	5.91
0.01	5	8	50	5.12
0.1	5	4	50	7.03
0.1	5	6	50	5.74
0.1	5	8	49.88	5.05
1	5	2	50	6.29
1	5	4	49.28	5.49
1	5	6	48.25	5.48
1	5	8	47.22	5.47

表-4 ケーブルに作用する力の小さい設計ケース
($V=4\text{m/s}$)

$k_s(\text{MN/m})$	$P(\text{MN})$	$L(\text{m})$	$d(\text{cm})$	$F(\text{MN})$
0.01	5	8	50	17.4
0.1	5	8	50	17.36
1	5	8	50	16.93
10	2	8	50	18.33
10	3	8	50	16.44
10	4	6	50	16.5
10	4	8	50	14.29
10	5	4	50	16.63
10	5	6	50	13.58
10	5	8	50	11.76

表-5 ケーブルに作用する力の小さい設計ケース
($V=5\text{m/s}$)

$k_s(\text{MN/m})$	$P(\text{MN})$	$L(\text{m})$	$d(\text{cm})$	$F(\text{MN})$
1	5	8	50	25.34
10	3	8	50	25.02
10	4	8	50	23.66
10	5	8	50	22.23
100	0	8	24.41	24.41
100	1	8	23.42	24.42
100	2	8	22.44	24.44
100	3	8	21.48	24.48
100	4	8	20.54	24.54
100	5	8	19.61	24.61

まず、作動速度 V を 1m/s から 5m/s までの各々の作動速度の、最適な落橋防止システムを設計する。

最適設計はケーブルに作用する力 F を(1)式、(5)式、(8)式および(9)式より求め、ケーブルに作用する力 F

の小さい値からそれぞれ10ケースを選定し、それをケーブルばね定数 k_s の小さいものから並べ検討する。なお、換算質量 M は前章と同じ 600t に設定し、緩衝材の限界変形量は 50cm とする。

表中の k_s は緩衝材のばね定数、 P は緩衝材の初期復元力、 L はケーブル長、 d および F は緩衝材の変形量とケーブルに作用する力を表しており、 k_s と P および L は落橋防止システムを設計するときの値であり、 d と F は設計した場合の値を示している。

表-1、表-2、表-3から、作動速度 V が 1m/s から 3m/s までは、緩衝材のばね定数 k_s が 0.01 MN/m 、 0.1 MN/m のように、ばね定数の小さな緩衝材を使用したほうがケーブルに作用する力を小さくすることができ、有効であると考えられる。この場合、緩衝材の初期復元力 P は作動速度 V に応じて設計する必要があるが、ケーブル長 L を変化させても、ケーブルに作用する力 F は一定の値を示している。よって、ケーブル長 L は自由に設計することができる。

しかし表-3では、約半数のケースで緩衝材が限界の変形量達しており、それ以外のケースにおいても、限界の変形量である 50cm に近いことから、十分に緩衝材の変形量をとる必要がある。

表-4、表-5のように、作動速度 V が 4m/s 、 5m/s と大きくなると、緩衝材のばね定数が 10 MN/m や 100 MN/m のような、ばね定数の大きな緩衝材を使用するケースが多く見られる。また、ケーブル長 L も長くとしたほうが有効であると考えられる。

また、作動速度 V が 5m/s の場合では、緩衝材のばね定数が 100 MN/m 以外のケースでは、緩衝材は限界の変形量に達しており、設計するときには十分に考慮しなければならない。

(2) 必要ケーブル数の設計

ケーブルに作用する力 F が求められると、実際に設置するケーブル数を設計する必要がある。

ケーブル数を計算するには、必要なケーブルの断面積を求めればよい。必要なケーブルの断面積は、ケーブルに作用する力 F をケーブルの降伏応力で除することにより求められる。

$$A_n = \frac{F}{\sigma_y} \quad (10)$$

ここで、 A_n は必要なケーブル断面積、 σ_y はケーブルの降伏応力であり、PCケーブルを想定する場合、ケーブルの降伏応力 σ_y は 1.2GN/m^2 である。

必要なケーブル断面積 A が求められたら、用いるケーブルの断面積で除することにより、必要なケーブル断面積が算出される。

$$N = \frac{A_n}{A} \quad (11)$$

N は必要なケーブル数、 A は用いるケーブルの断面積(mm^2)である。

今回の設計では、作動速度 V を 2m/s 、ケーブル長 L を 4m 、換算質量 M を 600t 、緩衝材の限界変形量 d_{lim} を 50cm と設定した。また、ケーブル1本の断面積 A を 550mm^2 、 1500mm^2 、 3000mm^2 と設定したときの必要なケーブル数を比較検討した。

(3) 試算結果

図-15、図-16、図-17は、緩衝材のばね定数 k_s を 0.01 MN/m 、 1 MN/m 、 100 MN/m と変化させた場合の必要なケーブル数を示したものである。

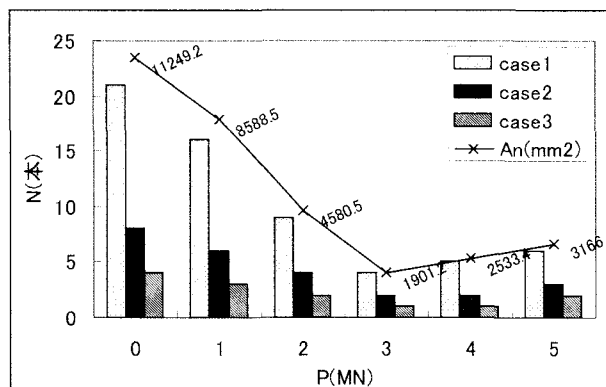


図-15 必要なケーブル数 ($k_s = 0.01\text{ MN/m}$)

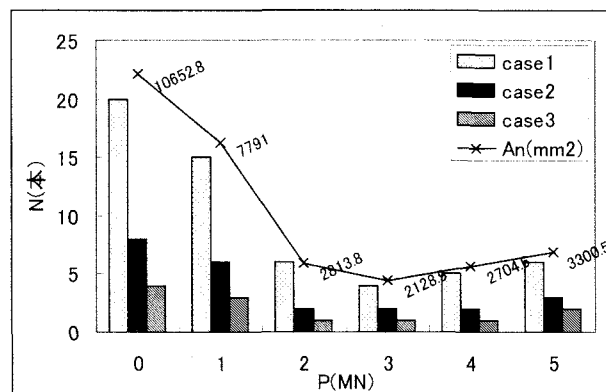


図-16 必要なケーブル数 ($k_s = 1\text{ MN/m}$)

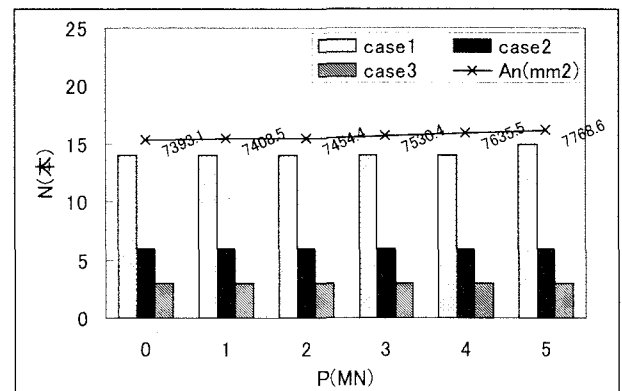


図-17 必要なケーブル数 ($k_s = 100\text{ MN/m}$)

横軸の P は、緩衝材の初期復元力であり、縦軸の N は必要なケーブル数を示している。また、図中のcase1, case2, case3はケーブルの断面積 A である 550mm^2 、 1500mm^2 、 3000mm^2 を指している。なお、折れ線で示している A_n は必要なケーブル断面積を表している。

図-15、図-16のように、緩衝材のばね定数 k_s が 0.01 MN/m 、 1 MN/m のときは、緩衝材の初期復元力 P を増加させると、必要なケーブル数 N を少なくすることができる。

逆に、図-17に示される緩衝材のばね定数 k_s が 100 MN/m のときは、必要なケーブル数 N はすべて一定の値を示している。この場合は、前章で述べたように、緩衝材の初期復元力 P は自由に設計できるといえる。

ただし、ケーブル本数が少ない場合には、個々の取り付け部に大きな力が作用することになる。例えば、図-15の $k_s = 0.01\text{ MN/m}$ 、 $P = 0\text{ MN}$ 、case2では、取り付け部に必要な板厚が 200mm 以上にもなり、現実的な値ではない。取り付け部の制限からケーブル本数を増やすとともに、桁の補強についても検討する必要がある。

4. 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設計を行った。その結果、次のことが考えられる。

①ばね定数の小さな緩衝材を使用する場合は、緩衝材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、緩衝材の限界変形量に達しないように設計する必要がある。

②ばね定数の大きな緩衝材を使用する場合は緩衝材

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る。よって、ケーブル長を長くしてケーブルに作用する力を減少させるなど、設計には配慮する必要がある。

③作動速度が大きい場合、ケーブル長を長くし、ケーブルのばね定数を低下させることにより、ケーブルに作用する力を低減させることができる。

④作動速度が小さい場合は、緩衝材のばね定数が小さいほうが、また、作動速度が大きい場合は、緩衝材のばね定数が大きく、ケーブル長が長いほうが設計には有効である。

今後は、今回考えた落橋防止装置の具体的設計や、取り付け方法について考えていく必要がある。

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) 川島一彦， 庄司学：衝突緩衝用落橋防止システムによる桁間衝突の影響の低減効果， 土木工学論文集， No.612/I -46， pp.129-142. 1999.
- 5) 梶田幸秀， 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.
- 6) 北原武嗣， 梶田幸秀， 西本安志， 鈴木智子， 磯貝幸子：桁間衝突時の衝撃力緩和・エネルギー吸収能に与える緩衝用ゴム厚の影響， 第 6 回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集， pp.139-144. 2003.
- 7) 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, Vancouver, B.C., Canada, Paper No. 3149, Aug. 2004.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10)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(CD-ROM)， Paper No.30， 6 pages， 2003.