

桁の自由落下に対して必要な耐震連結装置の 性能に関する検討

鎌田 耕平¹・伊津野 和行²・小林 紘士³

¹学生会員 立命館大学大学院 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 立命館大学助教授 理工学部土木工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

³正会員 工博 立命館大学教授 理工学部土木工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

1. はじめに

1999年に発生したトルコ・コジャエリ地震と台湾・集集地震では、断層運動によるメートル単位の大変位によって橋梁が被害を受けた。橋梁直下を断層が横切る可能性は低いものの、現実には起こりうるということが明らかになった。橋脚が被害を免れても、大変位によって橋脚間距離が広くなり、桁が落下することも考えられる。人的被害を最小限に抑えるためには、このような大変位に対する落橋防止システムの構築が必要であろう。

現行の落橋防止システム¹⁾は、橋脚から桁が落下しないよう十分な桁かかり長を確保し、ケーブルやブロック等で桁の移動を制限することが基本になっている。落橋防止システムに関連しては、新しい素材の利用も含めて数多くの研究^{2)~9)}が行われており、いずれも地震応答中の桁の、橋脚上における挙動が詳細に検討されている。なお、阪神・淡路大震災以前には、桁落下に対する落橋防止連結板の衝撃応答解析も実施例がある¹⁰⁾。ここでは、ケーブルを用いた落橋防止システムについて考える。ケーブルで隣接する桁どうしが連結されていても、万一、桁が橋脚からはずれた場合、ケーブルで桁を支えることは想定されていない。ケーブル等の設計にあたっては、ケーブルの耐荷力は、桁の死荷重反力 R_d の1.5倍を保証するように道路橋示方書では定められている¹⁾が、この1.5という値の根拠についての記述は見あたらない。

断層運動による大変位等、何らかの特殊な状況によって万一桁が橋脚からはずれても、ケーブルで桁を支えることができれば、人的被害を少なくするこ

とができると考えられる。

よって本研究では、桁が橋脚から落下する場合を想定し、桁間連結装置によって桁を支えるための条件について、基礎的な検討を行った。あくまでも、現行の落橋防止システムの設計では想定されていない状況について検討をおこなっていることを述べておく。

2. 桁の自由落下

落橋防止装置として、図-1に示す桁と桁の間をケーブルで連結するタイプの装置を考える。何らかの特殊な状況により、支承が破壊して桁かかり長以上に桁が移動して、桁が橋脚より自由落下する場合を検討する。

その際、以下の仮定を設ける。

- 1) 桁は剛体として扱う。
- 2) ケーブルの自重は無視する。
- 3) 落下中の減衰は無視する。
- 4) 重力加速度のみを考え、地震による加振は考えない。
- 5) 橋脚及び落下する桁に連結された隣接部はまったく動かない。
- 6) 落下する桁は何にもぶつからずに落下する。

桁の長さを l 、質量を m とすれば、桁端まわりの慣性モーメント $I = ml^2/3$ である。回転角を θ 、重力加速度を g とすれば、桁が片端を中心に回転落下する運動方程式は次式になる。

$$I\ddot{\theta} = mgl/2 \quad (1)$$

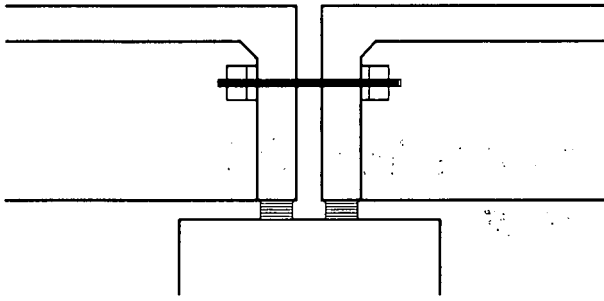


図-1 ケーブルを用いた桁間連結装置

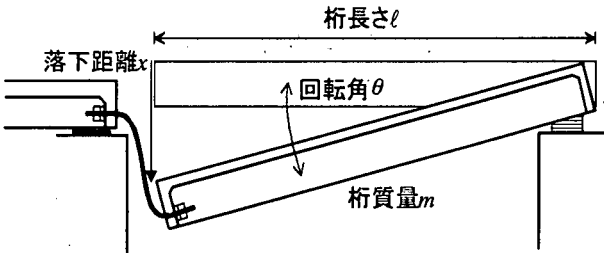


図-2 単純桁の橋脚からの落下

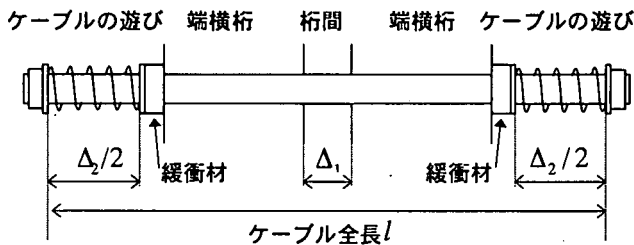


図-3 桁間連結装置の詳細

時間 $t = 0$ で回転角と回転角速度の初期値を 0 とすれば、桁端の落下速度 v と落下距離 x は、次式で表される。

$$v = l\dot{\theta} = 3gt/2 \quad (2)$$

$$x = l\theta = 3gt^2/4 \quad (3)$$

また、 x 落下するのに要する時間は、

$$t = \sqrt{4x/3g} \quad (4)$$

となる。 x 落下後の速度 v は、次式になる。

$$v = \sqrt{3gx} \quad (5)$$

3. ばねや減衰機構による衝撃の緩和

ケーブル端部に設けられた遊びの部分に、ばね k_s と粘性減衰機構（ダッシュポット） c 、および履歴減衰機構（非線形ばね）を設置し、桁の落下に抵抗

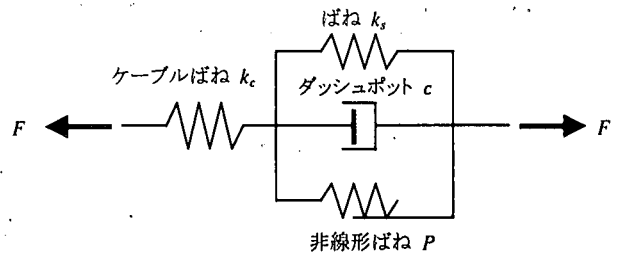
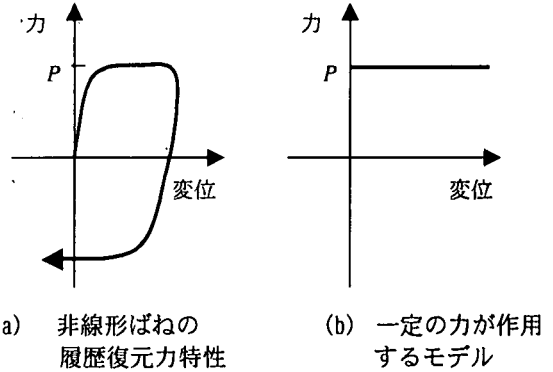


図-4 ばねと減衰機構を付加したケーブルのモデル化



(a) 非線形ばねの履歴復元力特性 (b) 一定の力が作用するモデル

図-5 一方向载荷に対する非線形ばねの簡易モデル

することを考える。図-4 のようなモデルを設定する。履歴減衰機構に対しては、図-5(a) のような履歴復元力特性を考える。これは、鋼部材や高減衰ゴム、あるいは新素材による緩衝装置を想定している。ケーブルに力が作用し始めてから最下点に達するまでの動きのみを考えると、第 1 近似として図-5(b) のように一定の力 P が作用すると仮定してもよい。このときケーブルに作用する力 F と全体の変形量 Δx との間には次のような関係がある。

$$F = \frac{k_s k_c}{k_s + k_c} \Delta x + \frac{k_c}{k_s + k_c} P \quad (6)$$

桁落下後、ケーブルおよびばねやダッシュポットが作用し始めるときの落下距離を初期自由落下距離 $\delta_0 = \Delta_1 + \Delta_2$ とおいて、桁の回転の運動方程式をたてる。ここで、 Δ_1 は桁間距離、 Δ_2 はケーブルの遊びである。

$$\frac{ml^2}{3} \ddot{\theta} + cl\dot{\theta} \times l + \frac{k_s k_c}{k_s + k_c} l\theta \times l + \frac{k_c}{k_s + k_c} P \times l = mg \times \frac{l}{2} \quad (7)$$

ここで、ケーブルと付加する装置の合成ばね定数

$$k = \frac{k_s k_c}{k_s + k_c}, \text{ 円振動数 } \omega = \sqrt{\frac{3k}{m}}, \text{ 減衰定数 } h = \frac{3c}{2m\omega}$$

とにおいて、これを式(5)より $\dot{\theta} = \sqrt{3g\delta_0}$ の

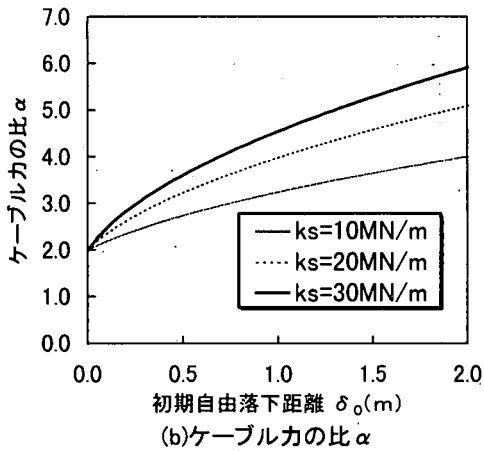
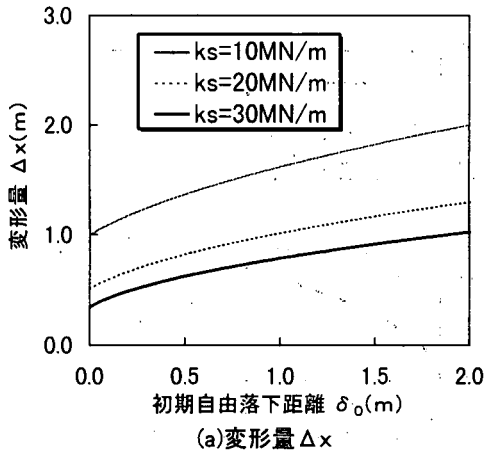


図-6 初期自由落下距離と装置のばね定数の影響

もとで解くと、

$$\theta = \frac{mg}{2kl} - \frac{P}{k_s l} + e^{-h\omega t} \frac{1}{l} \sqrt{\frac{mg\delta_0}{k}} \sin \sqrt{1-h^2} \omega t + e^{-h\omega t} \left(\frac{P}{k_s l} - \frac{mg}{2kl} \right) \cos \sqrt{1-h^2} \omega t \quad (8)$$

が得られる。よって、落橋防止装置の伸び量 Δx は

$$\Delta x = \frac{mg}{2k} - \frac{P}{k_s} + e^{-h\omega t} \sqrt{\frac{mg\delta_0}{k}} \sin \sqrt{1-h^2} \omega t + e^{-h\omega t} \left(\frac{P}{k_s} - \frac{mg}{2k} \right) \cos \sqrt{1-h^2} \omega t \quad (9)$$

となる。ここで、死荷重反力 $R_d = \frac{mg}{2}$ 、ケーブルと

装置に付加したばね定数の比 $\gamma = \frac{k_c}{k_s + k_c}$ 、履歴復元

力の大きさをあらわす係数 $q = \frac{\gamma P}{R_d}$ 、初期自由落下

の度合い $\beta = \frac{k\delta_0}{R_d}$ とおくと、式(6)と式(9)より、ケ

ーブルに作用する力 F は次式で表される。

$$F = R_d +$$

$$R_d \times e^{-h\omega t} \left(\sqrt{2\beta} \sin \sqrt{1-h^2} \omega t + (q-1) \cos \sqrt{1-h^2} \omega t \right) \quad (10)$$

F が最大値となる時間 t を t_1 とすれば、

$$t_1 = \frac{\tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{2\beta(1-h^2)} - h(q-1)}{h\sqrt{2\beta} + \sqrt{1-h^2}(q-1)} \right)}{\omega\sqrt{1-h^2}} \quad (11)$$

であり、ケーブルに作用する力の最大値 F を死荷重反力 R_d の α 倍とすれば、

$$\alpha = 1 + e^{-h\omega t_1} \sqrt{(q-1)^2 + 2\beta} \times \cos \left(\sqrt{1-h^2} \omega t_1 - \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{2\beta}}{q-1} \right) \right) \quad (12)$$

となる。道路橋示方書では $\alpha=1.5$ として設計することになっている。この式(12)に $h=0$ 、 $q=0$ を入れると次式になる。

$$\alpha = 1 + \sqrt{1+2\beta} \quad (13)$$

このことから、履歴減衰、粘性減衰がなければ、 $\beta=0$ のとき、つまり初期自由落下距離 δ_0 が 0 のときでも、ケーブルにかかる力は死荷重の 2 倍以上になることがわかる。

ここで、装置のばね定数、粘性減衰、履歴減衰の程度の違いと Δx 、 α の関係について図-6、7、8に示す。図-6、7、8より、 $\delta_0 - \Delta x$ 、 $\delta_0 - \alpha$ とも、上に凸の曲線であることがわかる。これは $\sqrt{\delta_0}$ の関数であることによる。また、初期自由落下距離が増えると装置の変形量、ケーブルにかかる力が大きくなることがわかる。このことから、本研究で想定する落橋のケースでは、設計移動量は小さいほうがよいといえる。

図-6 の k_s の違いと Δx 、 α の関係について見てみる。このとき $R_d=4.9\text{MN}$ 、 $k_c=500\text{MN/m}$ 、 $h=0$ 、 $q=0$ である。図-6 より、 k_s が小さいほど Δx は大きくなり、 α は小さくなることがわかる。このことから、ケーブルに作用する力を小さくするためには、なるべく弱いばねを装置に付加すればよいことがわかる。しかし、弱いばねを付加すると変形量が大きくなるため、その変形量を十分に保証する必要がある。また、式(13)からも明らかのように、初期自由落下距離が 0 のときでも、ばねを付加するだけではケーブルに作用する力を死荷重の 2 倍以下にすることはできないことがわかる。

次に図-7 の h の違いと Δx 、 α の関係について見てみる。このとき $R_d=4.9\text{MN}$ 、 $k_s=10\text{MN/m}$ 、 $k_c=500\text{MN/m}$ 、

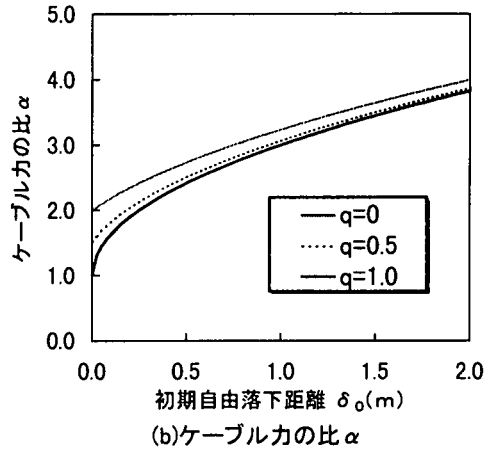
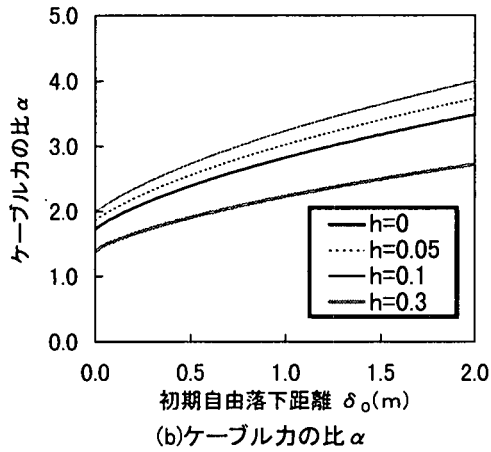
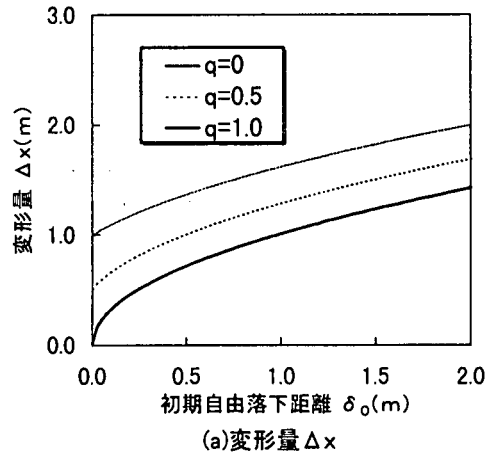
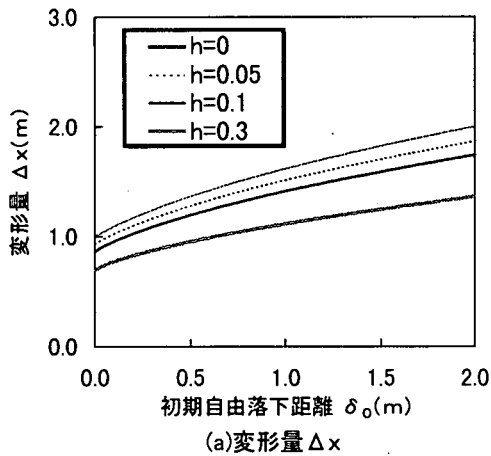


図-7 初期自由落下距離と粘性減衰の影響

図-8 初期自由落下距離と履歴減衰の影響

$q=0$ である。図-7(a), (b)とも h が大きくなると、グラフの傾きが小さくなる。このことから、 h が大きくなると、 Δx が小さくなるとともに、 δ_0 の変化の影響が小さくなることからわかる。 $h=0.3$ では Δx , α ともに、70%ほどに抑えることができるが、 $h=0.05$ では 90%ほどにしか抑えることができない。 $h=0.3$ のような高い粘性減衰性能を持つ装置は実現が難しいと考えられることから、速度比例の減衰力ではケーブルにかかる力や装置の変形量を抑える効果が小さいといえる。

最後に、図-8の q の違いと Δx , α の関係について見てみる。このとき $R_d=4.9\text{MN}$, $k_s=10\text{MN/m}$, $k_c=500\text{MN/m}$, $h=0$ である。 δ_0 が大きくなると、それぞれの q に対する値が、接近してくる。 α の方が、この傾向が強い。このことから、 δ_0 が大きくなると、履歴減衰の効果が小さくなるからわかる。また、履歴減衰は、力よりも変位を抑える効果の方が高いことがわかる。

以上のことより、装置の変形量を小さくするには、強いばねを付加するか、大きな履歴復元力を与えることを考えればよく、ケーブルにかかる力を小さく

するには、弱いばねを付加すればよいことがわかる。設計では、弱いばねを付加することでケーブルにかかる力を小さくし、履歴減衰によって装置の変形量を小さくすることを考えればよい。

4. 設計法に関する検討

ここでは、ケーブル及びケーブルに付加する装置の設計法について検討した。図-9に設計手順をフローチャートで表す。

はじめに α を決定する。ケーブルにかかる力はケーブルの降伏応力 σ_y より小さくなければならないことから、

$$\sigma_y \geq \frac{\alpha R_d}{A} \quad (14)$$

となる。この式からケーブル断面積 A を算出する。次に、ケーブル長 l を橋梁の諸元から決定し、 l と A を次式に代入してケーブルばね定数 k_c を算出する。

$$k_c = \frac{EA}{l} \quad (15)$$

ここで E はケーブルの弾性係数である。装置のばね

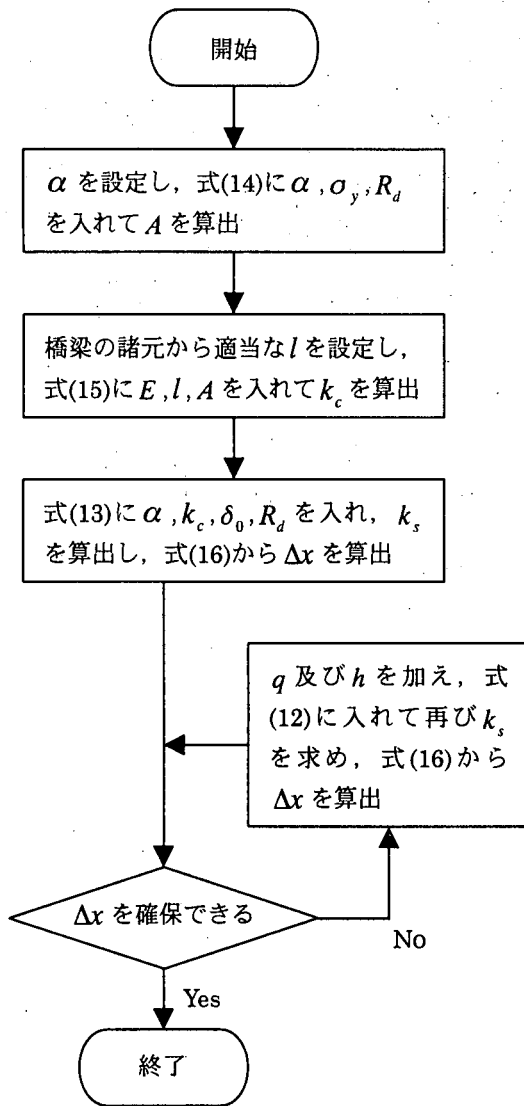


図-9 ケーブル諸元を求めるフローチャート

定数 k_s と比べてケーブルばね定数 k_c が十分に大きいとき、 k_c は α 、 Δx にほとんど影響を与えないため、ケーブル長 l は自由に決めることができる。

以上の手順から α 、 k_c を決定し、 k_s を算出する。3章で述べたように、 α を抑える効果は h 、 q にはあまりないため、まずは $h=0$ 、 $q=0$ の式(13)から k_s を算出する。 k_s を決定した後、装置の変形量 Δx は、次の α と Δx の関係式から求められる。

$$\Delta x = R_d \left(\frac{\alpha}{k} - \frac{q}{k_s} \right) \quad (16)$$

こうして求めた Δx が大きすぎるようであれば、 q 、 h を加えて式(12)に入れ、再び k_s を算出してから Δx を求める。それでも、まだ大きいときには、 α の決定からはじめなければならない。このとき、変更後の α は、変更前よりも大きくする。

ここで、例を挙げて実際に計算してみる。桁質量

$m=1000\text{ton}$ 、桁間距離 $\Delta_1=0.2\text{m}$ 、ケーブルの遊び $\Delta_2=0.8\text{m}$ 、ケーブルの降伏応力 $\sigma_y=1.6\text{GN/m}^2$ 、弾性係数 $E=196\text{GN/m}^2$ であり、橋梁の諸元から、ケーブル長 $l=3.0\text{m}$ とするケースを考える。このとき $R_d=mg/2=4.9\text{MN}$ 、 $\delta_0=\Delta_1+\Delta_2=1.0\text{m}$ である。

$\alpha=1.5$ とした場合、式(14)より、ケーブル断面積 $A=4.6 \times 10^{-3}\text{m}^2$ となる。ケーブル長 l が 3.0m であるので、式(15)より、ケーブルのばね定数 $k_c=300\text{MN/m}$ となる。手順としては、次に、 $\alpha=1.5$ 、 $k_c=300\text{MN/m}$ 、 $\delta_0=1.0\text{m}$ 、 $R_d=4.9\text{MN}$ を用いて、式(13)を解くのであるが、3章で述べたように、 $q=0$ 、 $h=0$ の場合は、 α は 2 以上の値しかとらないため、 $q=1.0$ 、 $h=0.05$ を入れて計算してみる。すると、 $k_s=0.7\text{MN/m}$ となり、式(16)から装置の変形量 $\Delta x=3.5\text{m}$ となる。

次に、 $\alpha=3$ とした場合について計算してみる。ケーブル断面積 $A=9.2 \times 10^{-3}\text{m}^2$ 、ケーブルのばね定数 $k_c=600\text{MN/m}$ となる。 $\alpha=3$ 、 $k_c=600\text{MN/m}$ 、 $\delta_0=1.0\text{m}$ 、 $R_d=4.9\text{MN}$ を用いて式(13)を解くと、装置のばね定数 $k_s=7.4\text{MN/m}$ となる。式(16)から、装置の変形量を求めると、 $\Delta x=2.0\text{m}$ という大きな値になるため、式(12)に $q=1.0$ を入れて k_s を計算し直すと、 $k_s=10\text{MN/m}$ となり、式(16)から、 $\Delta x=1.0\text{m}$ という値が得られる。

さらに α を大きくし、 $\alpha=6$ とした場合について計算してみる。このときケーブル断面積 $A=1.8 \times 10^{-2}\text{m}^2$ 、 $k_c=1200\text{MN/m}$ となり、粘性減衰や履歴減衰がないとき、 $k_s=62\text{MN/m}$ で、装置の変形量 $\Delta x=0.5\text{m}$ となる。

これらの例から、 α を大きく設定すれば、ケーブル断面積を大きくしなければならないが、装置の変形量は小さく抑えることができることがわかる。

5. おわりに

本研究では、桁が橋脚から落下する場合を想定し、それに対して必要な耐震連結装置の性能を検討した。得られた主な結論は以下の通りである。

- 1) 履歴減衰、粘性減衰がないとき、ケーブルにかかる力は死荷重の 2 倍以上になる。
- 2) 装置のばね定数を小さくすると、ケーブルにかかる力を抑えることができるが、それだけ装置の変形量が大きくなる。履歴減衰をあわせて用いれば、変形量をある程度抑えることができる。
- 3) 粘性減衰を大きくすると、ケーブルにかかる力及び装置の変形量に、初期自由落下距離が与える影響は小さくなる。減衰定数が 0.3 のとき、ケーブルにかかる力は、減衰がないときの 70% ほどに抑

えることができるが、減衰定数が 0.05 のときには 90%ほどにしか抑えることができない。

- 4) 履歴減衰を大きくすると、装置の変形量を抑えることができるが、ケーブルにかかる力はあまり抑えることができない。

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) 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，土木学会論文集，No.612/I-46，pp.129-142，1999.
- 3) 庄司学，川島一彦，宇根寛，剣持安伸，長谷川恵一，島ノ江哲：緩衝材物性および载荷/除荷周波数が異なる場合のゴム製緩衝装置の応力度-ひずみ関係，第3回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp.221-226，1999.
- 4) 越峠雅博，運上茂樹，足立幸郎，長屋和宏：落橋防止構造における緩衝材の効果に関する検討，第2回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポ

ジウム講演論文集，pp.423-426，1998.

- 5) 野島昭二，上東泰，石田博，野々村千里：緩衝材を併用した落橋防止システムの検討，土木学会第53回年次学術講演会，第1部B，pp.318-319，1998.
- 6) 伊藤敏弘，石川信隆，加藤正実，石川智男，池田啓士，生駒信康：併用下の高架橋における落橋防止システムの設計・施工，橋梁と基礎，Vol.33，No.4，pp.1-6，1999.
- 7) 森山卓郎，依田照彦，平栗一哉：桁間衝突が落橋におよぼす影響に関する実験的研究，土木学会第54回年次学術講演会，第1部B，pp.602-603，1999.
- 8) 井嶋克志，帯屋洋之，錦織真樹，後藤茂夫：ゴム支承支持された中小規模斜桁・曲線桁の地震時衝突応答と落橋防止，土木学会論文集，No.647/I-51，pp.217-228，2000.
- 9) 梶田幸秀，渡邊英一，杉浦邦征，丸山忠明，永田和寿：鋼製支承の破損を考慮した連続高架橋の地震時応答性状と落橋防止装置の有効性の検討，構造工学論文集，Vol.45A，pp.903-914，1999.
- 10) 長嶋文雄，成田信行：落橋防止装置連結部材の衝撃応答解析，構造工学論文集，Vol.40A，pp.1343-1348，1994.