

# 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

伊津野 和行<sup>1</sup>・小林 紘士<sup>2</sup>・鎌田 耕平<sup>3</sup>

<sup>1</sup>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)

<sup>2</sup>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)

<sup>3</sup>学生員 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)

地震時の大変位が橋梁に与える被害を考えたとき、落橋防止システムとしての桁間連結装置の重要性は高い。本研究では、桁が橋脚から落下するという最悪の事態を想定し、落下する桁を連結ケーブルで支えるための条件について基礎的な検討を行った。単純桁の自由落下と、ばね、粘性減衰機構、履歴減衰機構を考慮した緩衝過程の定式化を行った。数値計算により、ケーブルに作用する力の最大値と、緩衝に必要な作動距離の試算例を示した。

**Key Words:** *unseating prevention system, PC cable, fall of girder, coefficient of friction, seismic design of bridges*

## 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、現実に起こり得る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<sup>1)</sup>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<sup>2)~6)</sup>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<sup>7)</sup>。

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。現行の設計では、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、桁の死荷重反力 $R_d$ の1.5倍の耐荷力を保証するよう定められている<sup>1)</sup>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行っていることを述べておく。また、動的応答によってケーブルが実際に切断するかどうかまでの検討は行っておらず、応答によってケーブルに生じる最大張力を問題とした。

## 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。ここではPC桁を想定している。

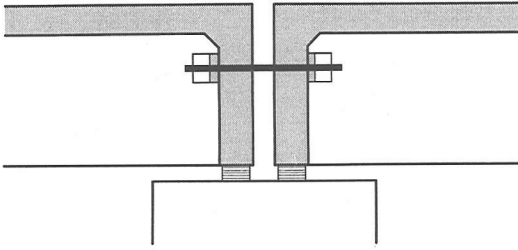


図-1 ケーブルを用いた桁間連結装置

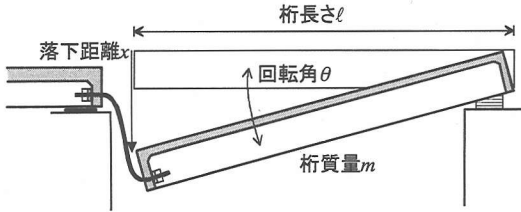


図-2 単純桁の橋脚からの落下

何らかの特殊な状況により、支承が破壊して桁が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について検討する。図-2のように、隣接桁の支承も破壊し、橋脚の端までせり出して当該桁が落下する状況を想定した。橋台と連結された桁が落下する場合にも、ここで考えるものと同様の考察が成り立つ。単純桁の片端を回転中心とし、反対側が自由落下する場合を考える。

その際に、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落下する、という仮定を設ける。

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  $\theta$ 、重力加速度を  $g$  とすれば、運動方程式は次式になる。

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

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、

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

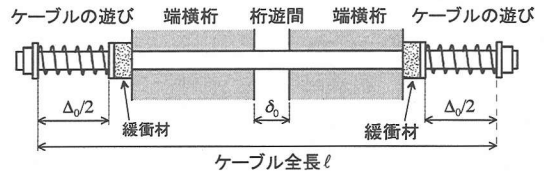


図-3 桁間連結装置の詳細

となる。 $x$  落下後の速度  $v$  は、

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

である。 $x$  だけ落下したときに、ケーブルで桁を支える場合を考える。桁がケーブルに吊り下げられた瞬間、ケーブルに一定値  $F$  が  $\Delta t$  時間作用し、その後、桁は静止して吊り下げられた状態になるものとする。

運動量の計算式は、次式で表される。

$$F\ell\Delta t = I\dot{\theta} = \frac{ml^2}{3} \cdot \frac{\sqrt{3gx}}{\ell} = ml\sqrt{\frac{gx}{3}} \quad (6)$$

ここで、ケーブルの設計値を、

$$1.5R_d = 3mg/4 \quad (7)$$

とする。ここで、 $R_d = mg/2$  は死荷重反力である。式(6)のケーブル力  $F$  が、式(7)の設計値になるとき、 $\Delta t$  は、

$$\Delta t = 4\sqrt{x/27g} \quad (8)$$

である。この式から、 $x$  落下したものを設計値以内の力によって支えるためには、作用する時間  $\Delta t$  として、少なくとも式(8)で与えられる値が必要となる。

例として、図-3の装置を考える。PC桁の端横桁に設置されたケーブルを想定し、桁遊間距離を  $\delta_0$  とする。両端にはゴム等の緩衝材が設置されており、地震応答中に設計で想定された桁の動きをケーブルが妨げないように、ケーブルには遊びが設けられている。ケーブルの遊びの長さを  $\Delta_0$  とし、簡単のため両端で  $\Delta_0/2$  ずつと仮定した。ケーブルの遊び部分にはばねが設けられている。自由落下する距離としては、まず、桁遊間距離  $\delta_0$  が考えられる。また、ケーブルの遊び部分に設置されているばねは、ケーブルの過度のたるみを防止するためのもので剛性は十分に低いため、この長さ  $\Delta_0$  も自由落下すると考える。緩衝材の厚さは十分薄いとして無視することにし、落下距離には含めなかった。

ここで、具体的な落下距離を仮定してみる。図-3のケーブルの遊びの長さを  $\Delta_0=70\text{cm}$ 、桁遊間長さを  $\delta_0=15\text{cm}$  とした場合について考えてみる。落下距離を、桁遊間距離とケーブルの遊びの長さの合計  $\Delta_0+\delta_0=85\text{cm}$  と考えれば、式(4)と式(5)より、落下開始後

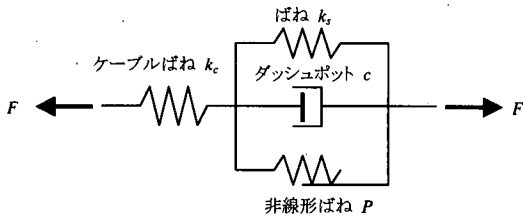


図-4 ばねと減衰機構を付加したケーブルのモデル化

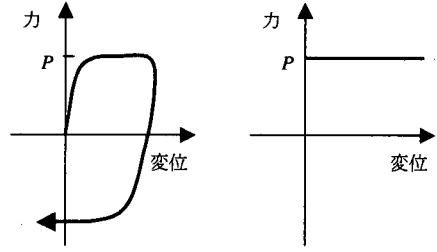
0.34秒後に速度5m/sでケーブルが作動する。桁間連結装置に作用する荷重を設計値以内に抑えるためには、式(8)より、作用時間(衝突緩和時間)として0.23秒の確保が必要になる。

緩衝材としては通常ゴム材が用いられているが、支圧強度の照査のみが行われており、ばね定数や減衰定数の設計段階における検討はなされていない。また、0.23秒間にわたって一定の力が作用することが必要であり、その実現には、緩衝装置の実験を通じた数多くの検証が求められる。衝撃緩和時間0.23秒が確保できるかどうかの保証はないといえよう。また、この考察は落下を受け止めたケーブルが剛体の場合に成り立つが、ケーブルには弾性がある。よって、ケーブルを剛性の高いばねと考えた検討を、次章に示す。

### 3. ばねや減衰機構による衝撃の緩和

ここでは、桁の落下に対するばねや減衰機構の効果について検討する。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、桁の落下に抵抗することを考える。図-4のようなモデルを設定する。前章で扱った図-3の装置では、端部のばねの剛性は小さく、この部分の長さも自由落下すると仮定した。ここでは、図-3における剛性の小さなばねの代わりに、あるいは、このばねの横に剛性の大きなばねを設置して、落下状況を改善することを考える。よって、装置が作動するまでは自由落下し、その後、図-4のばねやダッシュポットが作用することになる。

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であろう。この時、ケーブルに作用する力 $F$ と、全体の変形量 $y$ との間には、次のような関係がある。



(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 一方荷重に対する非線形ばねの簡易モデル

$$F = \frac{k_s k_c}{k_s + k_c} y + \frac{k_c}{k_s + k_c} P \quad (9)$$

ここで、 $k_c$ はケーブルのばね剛性、 $k_s$ は設置したばねのばね剛性であり、線形ばねを仮定している。

桁遊間距離 $\delta_0$ 落下した後、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して、桁の回転の運動方程式をたてる。

$$\frac{ml^2}{3} \ddot{\theta} + c l \dot{\theta} + \frac{k_s k_c}{k_s + k_c} l \theta + \frac{k_c}{k_s + k_c} P \times l = mg \times \frac{l}{2} \quad (10)$$

$k_c$ と $k_s$ の合成ばね定数を、

$$k_1 = \frac{k_s k_c}{k_s + k_c} \quad (11)$$

とおけば、式(10)は式(12)に変形できる。

$$\ddot{\theta} + \frac{3c}{m} \dot{\theta} + \frac{3k_1}{m} \left( \theta + \frac{k_s P}{l} - \frac{mg}{2k_1} \right) = 0 \quad (12)$$

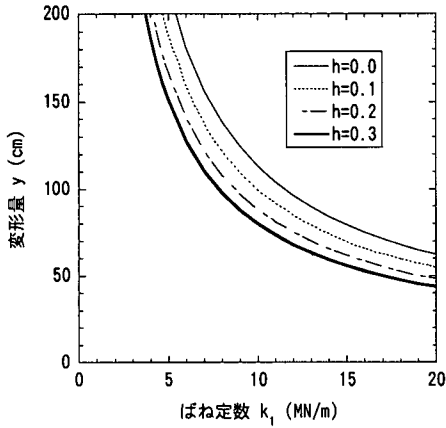
$$\omega = \sqrt{\frac{3k_1}{m}}, \quad h = \frac{3c}{2m\omega} \quad \text{とおき、初期条件 } t=0 \text{ で } \theta=0,$$

式(5)より $\theta = \sqrt{3g\delta_0}$ のもとでこれを解くと、

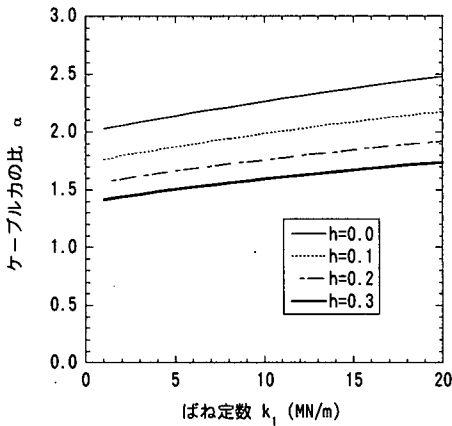
$$\theta = \frac{mg}{2k_1} - \frac{P}{k_s l} + e^{-h\omega t} \frac{1}{l} \sqrt{\frac{mg\delta_0}{k_1}} \sin \sqrt{1-h^2} \omega t + e^{-h\omega t} \left( \frac{P}{k_s l} - \frac{mg}{2k_1} \right) \cos \sqrt{1-h^2} \omega t \quad (13)$$

が得られる。よって、落橋防止装置の伸び量 $y$ は、

$$y = \frac{mg}{2k_1} - \frac{P}{k_s} + e^{-h\omega t} \sqrt{\frac{mg\delta_0}{k_1}} \sin \sqrt{1-h^2} \omega t + e^{-h\omega t} \left( \frac{P}{k_s} - \frac{mg}{2k_1} \right) \cos \sqrt{1-h^2} \omega t \quad (14)$$



(a) 変形量  $y$



(b) ケーブル力の比  $\alpha$

図-6 ばね定数と粘性減衰の影響

となる。式(9)と式(14)より、ケーブルに作用する力  $F$  は次式で表される。

$$F = \frac{mg}{2} + e^{-h\omega t} \sqrt{mgk_1\delta_0} \sin \sqrt{1-h^2}\omega t + e^{-h\omega t} \left( \frac{k_c}{k_s+k_c} P - \frac{mg}{2} \right) \cos \sqrt{1-h^2}\omega t \quad (15)$$

ここで、次のような係数を導入する。

$$\beta = \frac{k_1\delta_0}{R_d} \quad (16a)$$

$$\gamma = \frac{k_c}{k_s+k_c} \quad (16b)$$

$\beta$  はばねの強さと自由落下距離、および死荷重反力との関係、 $\gamma$  はケーブル剛性と設置するばねの剛性との関係を表す係数である。最初の自由落下距離  $\delta_0$  が 0 の時、式(16a)より、 $\beta=0$  となる。これらの係数を用いて式(15)の  $F$  を死荷重反力  $R_d$  の関数として書き改

めると次式になる。

$$F = R_d \left\{ 1 + R_d e^{-h\omega t} \sqrt{\left( \frac{\gamma P}{R_d} - 1 \right)^2 + 2\beta} \times \cos \left( \sqrt{1-h^2}\omega t - \phi \right) \right\} \quad (17)$$

ただし、 $\phi = \tan^{-1} \frac{\sqrt{2\beta}}{\gamma P/R_d - 1}$  である。ケーブルに作

用する力  $F$  の最大値  $F_{\max}$  は、式(17)を微分してゼロとおいて求められ、これを、

$$F_{\max} = \alpha \cdot R_d \quad (18)$$

とおく。 $\alpha$  はケーブルに作用する力の最大値の、死荷重反力に対する倍率を示す指標となる。 $F$  が最大値となる時間  $t$  を  $t_1$  とすれば、

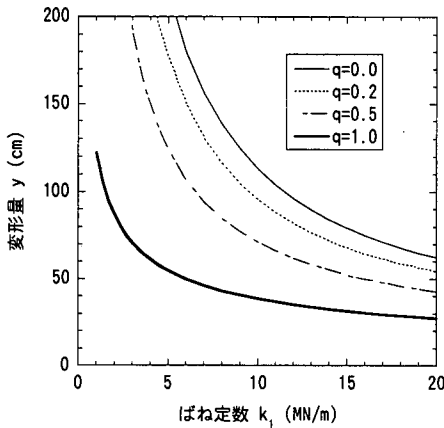
$$t_1 = \frac{1}{\omega \sqrt{1-h^2}} \tan^{-1} \left( \frac{\sqrt{2\beta(1-h^2)} - h(\gamma P/R_d - 1)}{h\sqrt{2\beta + \sqrt{1-h^2}}(\gamma P/R_d - 1)} \right) \quad (19)$$

であり、 $\alpha$  の値は、式(17)の  $t$  として式(19)の値を代入して、次式となる。

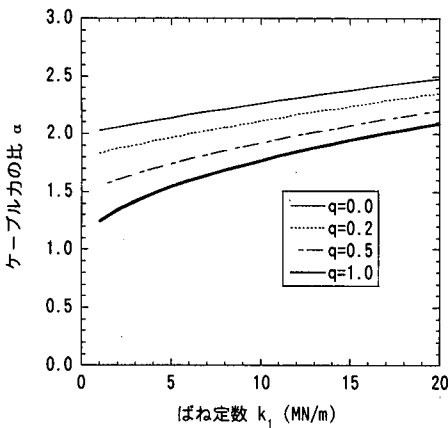
$$\alpha = 1 + e^{-h\omega t_1} \sqrt{\left( \frac{\gamma P}{R_d} - 1 \right)^2 + 2\beta} \times \cos \left( \sqrt{1-h^2}\omega t_1 - \phi \right) \quad (20)$$

図-6に、履歴減衰機構がないケース ( $P=0$ ) の、 $h$  を 0 から 0.3 まで変化させた場合について、ケーブルとばねの変形量の合計  $y$  (図-6a)、及びケーブル最大作用力と死荷重反力との比  $\alpha$  (図-6b) のグラフを示す。初期自由落下距離は、桁遊間距離  $\delta_0=15\text{cm}$  と考え、PC桁を想定して死荷重反力は  $R_d=4.9\text{MN}$  を仮定した。 $k_1$  を決めれば、必要なケーブル力  $F$  や  $\alpha$ 、さらには変形量  $y$  が決まる。

例えば、図-3に示したケーブル両端にある遊びの長さ  $\Delta_0=70\text{cm}$  に、現在の剛性の小さなばねに代えて、十分な剛性を有するばねを設置することを考える。減衰がない場合 ( $h=0$ ) に、変形量  $y$  を遊びの長さ  $\Delta_0$  にとどめるためには、図-6(a)より  $k_1=17\text{MN/m}$  のばね定数が必要になる。ケーブルとして、断面積  $10\text{cm}^2$ 、長さ  $2.5\text{m}$  の PC ケーブル 6 本 (許容耐力  $6\text{MN}$ ) を想定すれば、ケーブルのばね定数は  $k_c=490\text{MN/m}$  となる。この場合、 $k_1=17\text{MN/m}$  を実現するためには、 $k_s=17.6\text{MN/m}$  のばねを設置する必要がある。このとき、図-6(b)より  $\alpha=2.4$  となり、死荷重反力の 2.4 倍の力が必要だということがわかる。



(a) 変形量  $y$



(b) ケーブル力の比  $\alpha$

図-7 ばね定数と履歴減衰の影響

また、粘性減衰もなければ、式(20)で  $h=0$ 、 $P=0$  とおいて、

$$\alpha = 1 + \sqrt{1 + 2\beta} \geq 2 \quad (21)$$

であり、ばね剛性に関わらず死荷重反力の2倍以上の力がケーブルに作用する。現行基準にある死荷重反力の1.5倍に力を抑えることは不可能である。最小値の2倍となるのは、 $\beta=0$ の時、つまり、初期の自由落下距離  $\delta_0$  が0の時である。

粘性減衰によって最大荷重も変形も小さくなる。例えば、 $h=0.3$ の減衰定数を有する減衰機構を採用すれば、上記の計算と同じく最大変位を70cmに抑えるには、図-6(a)より  $k_1=12\text{MN/m}$ のばね定数が必要となり、図-6(b)より、ケーブルに作用する力は  $R_d$  の1.6倍になる。

これ以上の効果を期待するためには、履歴減衰を考えるか、落下中にも減衰機構が働くような工夫が

必要となる。落下中に減衰機構が作用すれば、落下速度を抑えることができ、ケーブルに作用する力も小さくできる可能性がある。

次に、履歴減衰の影響を考える。

$$q = \frac{\gamma P}{R_d} \quad (22)$$

とにおいて、ケーブルに作用する力と変形量をプロットしたのが図-7である。図-7(a)がケーブルとばねの変形量の合計  $y$  とグラフ、図-7(b)がケーブル最大作用力と死荷重反力との比  $\alpha$  のグラフである。粘性減衰に関しては、 $h=0$ とした。図-6と同様、初期自由落下距離は、桁遊間距離  $\delta_0=15\text{cm}$  と考えた。  $q$  は履歴減衰力の大きさを表す指標である。  $q$  が大きいと、履歴復元力が大きく、履歴減衰が大きいことを表す。このとき式(21)は、

$$\alpha = 1 + \sqrt{(q-1)^2 + 2\beta} \quad (21')$$

となり、 $q=1$ の時ケーブルに作用する力が最小値となる。ケーブルの剛性が、設置するばね剛性に比べて十分に高い場合、

$$\gamma = \frac{k_c}{k_s + k_c} \doteq 1 \quad (23)$$

と考えれば、式(23)より、 $P$ を次式で近似することができる。

$$P \doteq qR_d \quad (24)$$

つまり、 $q=1$ というのは、死荷重反力と同じだけの履歴復元力を用意することに相当する。大きな履歴復元力を与える減衰機構を設ければ、ケーブルに作用する力(図-7b)も変形量(図-7a)も小さく抑えることが可能になる。  $q=1$  ( $P \doteq R_d$ ) という大きな履歴復元力が実現できれば、変形量を70cmに抑えるためには、図-7(a)より  $k_1=3\text{MN/m}$ のばね定数が必要になり、図-7(b)の対応する  $\alpha$ より、死荷重反力の1.4倍の力がケーブルに作用することになる。

さらに、履歴減衰も粘性減衰も0ではないときには、式(20)から、

$$\frac{\partial \alpha}{\partial q} = 0 \quad (25)$$

を計算すれば、 $h \ll 1$ の場合には解が求められ、

$$q = 1 - h \sqrt{\frac{2\beta}{1-h^2}} \quad (26)$$

のときに、 $\alpha$ は最小となる。減衰定数  $h$  が大きくなれば、 $q$  が1より小さい値で  $\alpha$  が最小になり、最適な効果を与える履歴復元力が  $h$  によって異なることがわかる。

現在の設計体系で考えられているケーブル力は、

桁が橋脚から落下することは想定していない。そのため、桁間衝突等による強い衝撃力が作用しなくても、桁が橋脚からはずれるだけで連結ケーブルが切れ、桁が落下に至る可能性があると考えられる。しかし、もし落下した場合にそれを支持するだけの耐力を保証することも、今後は必要ではないかと考えられる。ゴムや新素材によって履歴減衰を確保する装置も開発されており<sup>4)~6)</sup>、今後の展開が期待される。また、落橋の原因究明やその防止策についても検討が始められており<sup>8)~10)</sup>、従来別々の振動単位として設計されていた隣接構造物間の地震時相互作用について、落橋防止システムも含めた全体系での解析の重要性がますます高まっていくものと考えられる。

ばね等を設置するにしても、地震応答中に作動しないように遊びを設ける必要がある。そうすると、自由落下する距離が長くなることになり、ケーブルに作用する初速度が大きくなる。適切な遊びの長さ、ばね定数や減衰性能の設定について、詳細な検討をしていく必要がある。

#### 4. 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、桁間連結装置で桁を支えるための条件について考察した。得られた主な結論は以下の通りである。

- 1) 単純桁の片端が他端を回転中心として自由落下する場合、落下距離が短くても、桁間連結装置作動時の速度は大きくなる。
- 2) ばねによって落下時の衝撃緩和を考えた場合、ばね定数を小さくするとケーブルに作用する力を小さくすることができるが、作動に要する変形量は大きくなる。粘性減衰機構も履歴減衰機構もない場合、ばね定数に関わらず、桁の死荷重反力の2倍以上の力がケーブルに作用する。

- 3) 粘性減衰機構や履歴減衰機構を考えると、ケーブルに作用する力も作動に要する変形量も小さくすることができる。適切な作動距離と、ばね定数や減衰性能の設定について、詳細な検討を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) 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：緩衝材物性および載荷/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I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) 長嶋文雄，成田信之：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．
- 8) 森山卓郎，依田照彦：桁間衝突が落橋におよぼす影響に関する実験的検討，土木学会論文集，No.654/I-52，pp.223-232，2000．
- 9) 井嶋克志，帯屋洋之，錦織真樹，後藤茂夫：ゴム支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．
- 10) 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年3月．

(2000.5.2 受付)

## DEMAND CAPACITY FOR UNSEATING PREVENTION CABLE TO SUPPORT FALLING GIRDER

Kazuyuki IZUNO, Hiroshi KOBAYASHI and Kohei KAMATA

A girder-to-girder connecting cable to prevent a girder from unseating is important device to prepare for huge displacement response due to severe earthquake. This paper studied the demand capacity of the connecting cable for the worst situation that the girder was falling off from the pier top. First, the equation of motion for a free falling of a simple girder was derived. Then, the subsequent shock absorbing process with a spring, a viscous damping device and a hysteretic damping device was considered. The numerical simulations showed an example of the maximum acting force to the connecting cable and demand displacement for its operation.