

非線形挙動を考慮した落橋防止ケーブルの 要求性能に関する研究

鎌田耕平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 理工学部土木工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

桁と桁、もしくは桁と橋台をケーブルで結んだタイプの落橋防止装置に必要な性能について検討した。道路橋の落橋防止システムの設計にあたっては、死荷重反力の1.5倍以上の耐力を有することが要求されているが、その理論的な根拠は明確に示されていない。本研究では、桁に地震力が作用し、支承部が破壊して桁の移動量が設計移動量を超えたとき、ケーブルに作用する力について数値解析を実施した。そのとき、ケーブルの塑性化、桁と橋座との摩擦、粘性減衰を考慮し、その効果についても検討した。

Key Words : *unseating prevention system, seismic restrainer, plasticity, coefficient of friction, damping factor*

1. はじめに

近年の大地震では、断層運動による大変位によって、橋梁が被害を受ける例が報告されている。橋梁の耐震性が向上しているとはいえ、フェイルセーフ機構として落橋防止システムの重要性も高い。本研究では、図-1に示すように橋脚上を桁が滑ることを想定し、落橋防止ケーブルが桁を止めるための条件について考察した。道路橋示方書¹⁾では、桁が橋脚から落下するのを防ぐため、桁かかり長を十分に広く取り、橋脚上に桁をとどめることが定められている。したがって、ケーブルに十分な耐力があり、ケーブルの伸びが過大でなければ、支承破壊等起因する桁落下を防ぐことが期待できる。落橋防止装置の耐荷力は死荷重反力の1.5倍とするよう決められているが、この値が決められた根拠は不明確である。よって本研究では、地震による支承部の破壊によって桁が移動した場合、落橋防止装置にどのくらいの力が作用するかを検討した。その際、ケーブルの塑性化や桁の摩擦による減衰なども考慮した。

2. 桁の水平移動に関するモデル化

ここでは、図-2に示すように、ケーブルによって桁間を連結する装置を想定した。ケーブルの両端には遊びの部分があり、そこにばねが設置されている。ばねの剛性は非常に弱く、かつ、ケーブルの遊びの長さ(両端で合計 Δ_2)は十分に長いため、地震応

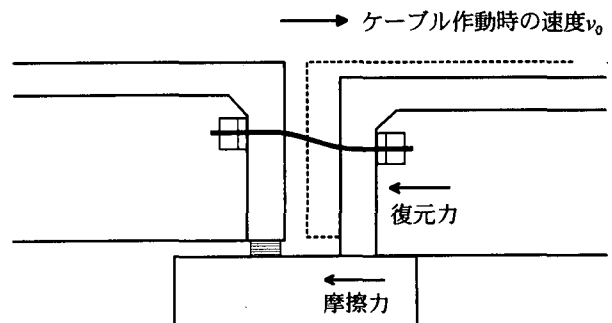


図-1 想定図

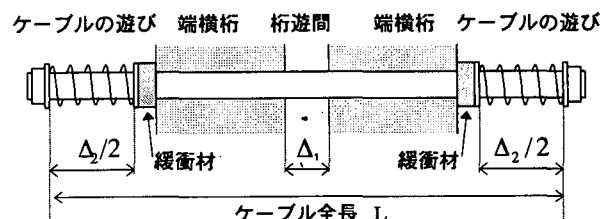


図-2 耐震連結装置の詳細

答による桁間相対変位は Δ_2 より小さく、地震応答中に桁間連結装置が作動する可能性は低い。よって、1つの桁の支承部が破壊して桁が移動し始め、 $\Delta_1 + \Delta_2$ 移動したところでケーブルに力が作用することを考える。 Δ_1 は桁間の長さである。桁の移動中には、橋脚との間で摩擦力が作用する。簡単のため、一方の桁が静止しており、もう一方の桁が移動することを考え、地震力が働かない状況における水平挙動を考える。以下に、桁の水平移動に関する基本式を示す。

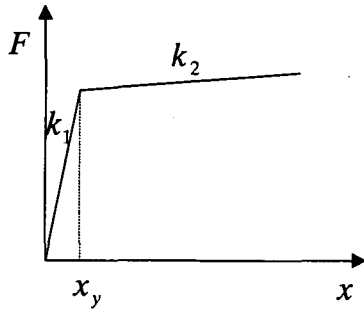


図-3 ケーブルの変位復元力特性

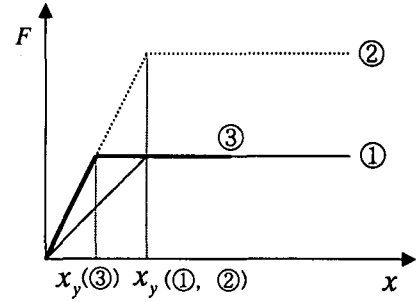


図-4 ケーブル長、降伏耐力の違いによる変位復元力特性の変化

(1) ケーブルの剛性が線形であるとき

桁質量を m 、粘性減衰係数を c 、ケーブルのばね定数を k_1 、桁と橋座との摩擦係数を μ 、支承部の死荷重反力を R_d 、橋脚上での装置の変形量を x とおくと、ケーブルに力が作用するときの桁の運動方程式は次式で表わされる。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + k_1x + \mu R_d = 0 \quad (1)$$

これを x について解くと、

$$x = e^{-h\omega t} \left(\frac{\mu R_d}{k_1} \cos \omega' t + \frac{1}{\omega'} \left(v_0 + \frac{h\omega \mu R_d}{k_1} \right) \sin \omega' t \right) - \frac{\mu R_d}{k_1} \quad (2)$$

となる。このとき、 v_0 はケーブルに力がかかり始めるときの桁の速度、 $\omega = \sqrt{k_1/m}$ 、 $h = c/2\sqrt{mk_1}$ 、 $\omega' = \omega\sqrt{1-h^2}$ 、 t は時間であり、 x が最大となるとき、

$$t = \frac{1}{\omega'} \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{1-h^2} \sqrt{mk} v_0}{\mu R_d + h v_0 \sqrt{mk}} \right) \quad (3)$$

である。このときケーブルに作用する力を F とすると、 $F = k_1x$ となる。

(2) ケーブルの剛性が非線形域に入ったとき

図-3 のようなケーブルの変位復元力特性を考える。降伏前のケーブルのばね定数（初期剛性）を k_1 、降伏後のケーブルのばね定数（二次剛性）を k_2 、降伏時のケーブルの変形量を x_y とおくと、降伏後の桁の運動方程式は次式で与えられる。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + k_2x + (k_1 - k_2)x_y + \mu R_d = 0 \quad (4)$$

これをケーブルの変形量 x について解くと

$$x = e^{-h\omega t} (A \cos \omega' t + B \sin \omega' t) - C \quad (5)$$

となる。ここで A 、 B 、 C は定数であり、降伏時の速度を v_1 とおくと、

$$A = x_y + C, \quad B = \frac{v_1 + h\omega A}{\omega'}$$

$$C = \frac{\mu R_d + (k_1 - k_2)x_y}{k_2}$$

このとき $F = k_1x_y + k_2(x - x_y)$ である。

計算では、まずケーブルの降伏耐力と支承部の死荷重反力の比 α_y を設定し、式(2)からケーブルに作用する力を求め、力が降伏耐力に達した直後から式(5)を用いる。

本研究では、次式から初期剛性 k_1 を求めている。

$$A = \alpha_y R_d / \sigma_y \quad (6)$$

$$k_1 = EA/L \quad (7)$$

ここで、 A はケーブルの断面積、 α_y はケーブルの降伏耐力と死荷重反力との比、 σ_y はケーブルの降伏応力、 E はケーブルの弾性係数、 L はケーブル長である。式(6)は降伏耐力比 α_y の設定値を大きくすると、その分、断面積の大きなケーブルを用いることを意味する。つまり α_y を 2 倍に設定するということは、ケーブルばね剛性が 2 倍になることを意味し、図-4 の変位復元力特性で考えると、①から②になることを意味する。また、ケーブル長 L を半分にすると、変位復元力特性は図-4 の①から③になる。

3. 計算例

ここではケーブルの塑性化を考慮したときのケーブル変形量及びケーブルに作用する力を計算する。基本条件として、ケーブルは弾性係数 $E=200$ GPa、降伏応力 $\sigma_y=1.6$ GPa の PC 鋼材を想定する。また、二次剛性 k_2 は $k_2=k_1/100$ とした。

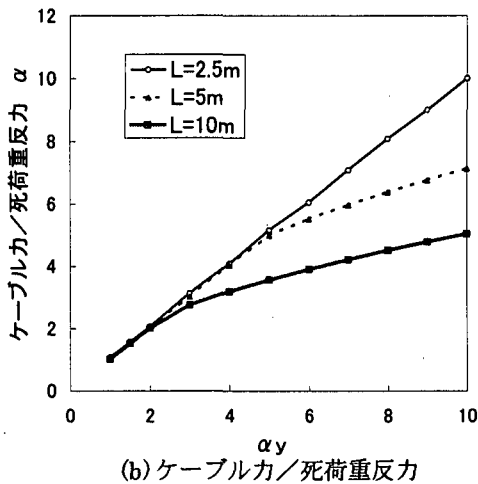
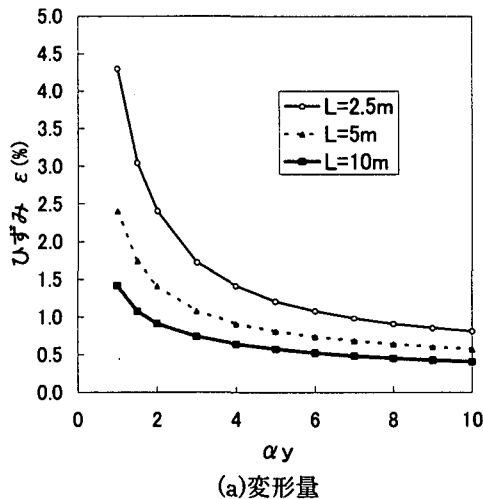


図-5 ケーブル長の影響

(1) 粘性減衰、摩擦を考慮しない場合

図-5は初速度 $v_0=1.0\text{m/s}$ のもとで、横軸に α_y 、縦軸にケーブルのひずみ ε 、ケーブルに作用する力と死荷重反力の比 α をとり、種々のケーブル長に対してプロットしたものである。図-5(a)より、 α_y が大きくなると伸びは小さくなることからわかる。これは、 α_y が大きくなると図-4の①から②のようにケーブルのばね定数が大きくなるからである。

また、ケーブル長が短いと伸びが大きくなることからわかる。これは、ケーブル長が短くなると図-4の①から③のように降伏ひずみに達しやすくなり、ケーブルの塑性化が進むためである。今回想定しているPC鋼材は最大荷重時伸びが3.5%以上とされている²⁾。安全率1.5を考慮して2.3%を許容ひずみとすると、 $L=2.5\text{m}$ の場合、 α_y はおおよそ2以上必要であることがわかる。図-5(b)から、 $L=5\text{m}$ 、 10m のときそれぞれ $\alpha_y=5$ および2以下の範囲で塑性化が起こる。塑性化を許容しない場合には、想定する初速度に対して十分な長さや断面を持つケーブルを用

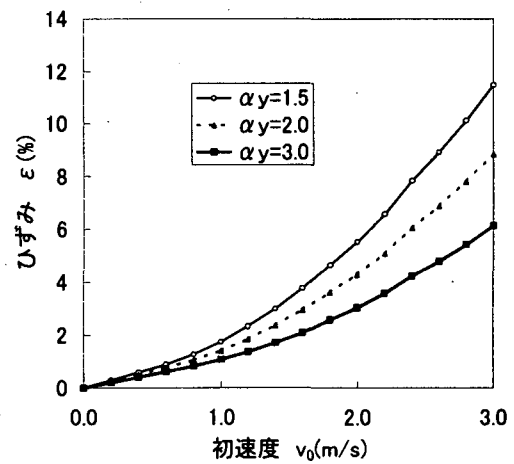


図-6 初速度の影響

いる必要がある。

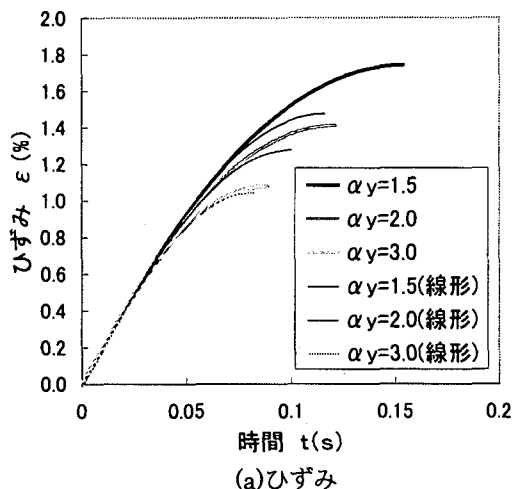
図-6はケーブル長 $L=5\text{m}$ のもとで、横軸に初速度、縦軸にケーブルのひずみ ε をとり、種々の α_y についてプロットしたものである。2.3%を許容ひずみとすると、 $\alpha_y=1.5$ のとき、初速度 $v_0=1.2\text{m/s}$ までが許容範囲だと考えられる。 α_y が大きくなれば許容できる初速度は速くなる。

図-7は、ケーブル長 $L=5\text{m}$ 、初速度 $v_0=1.0\text{m/s}$ のもとで、種々の降伏耐力比 α_y をもったケーブルについて、 ε 、 α の時刻歴を ε が最大となる時刻までプロットしたものである。凡例中の α_y (線形)は、降伏耐力比が α_y であるケーブルと同じばね定数のもとで、降伏しないものとして計算したものである。図-7(a)より、 α_y が大きくなると、ひずみ ε が最大となるまでの時間が短くなることがわかる。塑性化を考えると、線形ケースと比べて、ひずみが最大となるまでの時間とひずみ量が伸び、 $\alpha_y=1.5$ の場合、時間は0.12sが0.15sに、ひずみは1.48%が1.74%となる。 α_y が大きくなると、その差は小さくなる。図-7(b)より、降伏するまでの時間は α_y の違いにあまり関係なく、ほぼ同時であることがわかる。塑性化を考えると、ケーブル力と死荷重反力の比 α を所定の値に保ったまま桁を停止させることができる。変形量の増加が許容できれば、塑性化を考慮した設計もあり得る。

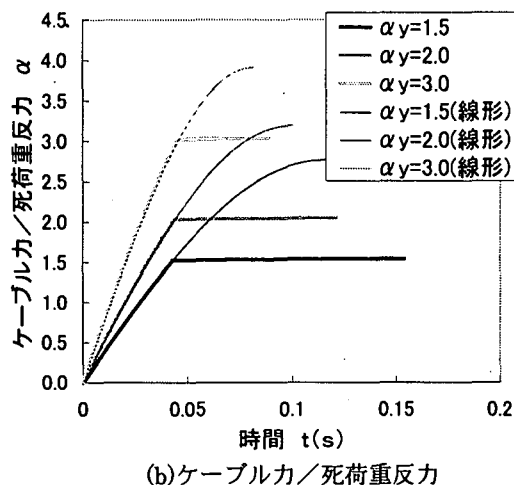
(2) 粘性減衰、摩擦を考慮する場合

ここでは、落橋防止装置に新たに減衰装置を付加する場合や、桁と橋座との摩擦を考慮する場合について計算した。

図-8はケーブル長 $L=5\text{m}$ 、初速度 $v_0=1.0\text{m/s}$ のもとで横軸に減衰定数 h 、縦軸にひずみ ε をとり、種々の α_y についてプロットしたものである。図-8から



(a) ひずみ



(b) ケーブル力/死荷重反力

図-7 ケーブルの降伏応力の影響

$\alpha_y = 3, 2, 1.5$ のとき、それぞれ $h = 0.2, 0.3, 0.5$ 以下の範囲で塑性化することがわかる。

図-9 はケーブル長 $L = 5\text{m}$ のもとで横軸に摩擦係数 μ 、縦軸にひずみ ε をとり、種々の α_y についてプロットしたものである。図-9 から $\alpha_y = 3, 2, 1.5$ のとき、 $\mu \leq 1$ の範囲では塑性化を防ぐことができないことがわかる。また、 α_y が大きくなると、摩擦係数 μ の影響が少なくなる。これは、図-7(a)からわかるように、 α_y が大きくなるとひずみが小さくなり、摩擦による減衰効果が少なくなるからである。

4. まとめ

今回想定した弾性係数 $E = 200 \text{ GPa}$ 、降伏耐力 $\sigma_y = 1.6 \text{ GPa}$ 、長さ $L = 5\text{m}$ の落橋防止ケーブルについて以下の結果が得られた。

1) 初速度が 1.0m/s で、粘性減衰、摩擦を考慮しない場合、降伏耐力比 α_y が 5 以下の範囲でケーブル

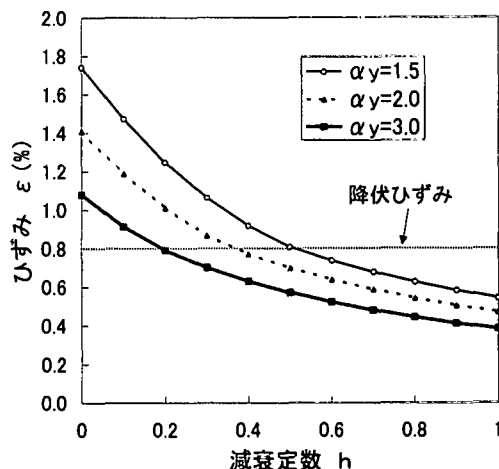


図-8 塑性化を考慮したときの減衰定数の影響

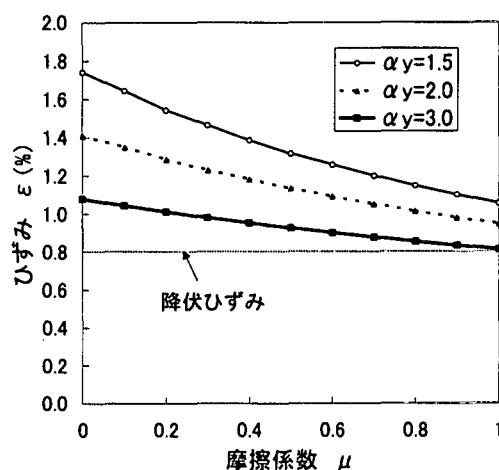


図-9 塑性化を考慮したときの摩擦係数の影響

は塑性化する。塑性化を考慮するとケーブルのひずみは線形ケースに比べて増加するが、許容ひずみを 2.3% と考えると、 $\alpha_y \geq 1.5$ でひずみは許容範囲内に収まる。

- 2) $\alpha_y = 1.5$ 、初速度 $v_0 = 1.0\text{m/s}$ のとき、ケーブル変形量は減衰定数 $h = 1.0$ で 70% 程度低減する。しかし、減衰定数 $h = 0.2$ の場合、30% 程度の低減効果しか得られない。
- 3) 摩擦によるケーブル変形量の低減効果は、 α_y が小さい方が大きくなる。 $\alpha_y = 1.5$ 、初速度 $v_0 = 1.0\text{m/s}$ のとき、ケーブル変形量は摩擦係数 $\mu = 1.0$ で 40% 程度低減する。しかし、 $\mu = 0.2$ のときには 10% 程度しか低減できない。

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) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，I．共通編，1996。