桁間連結装置の設計手法に関する検討

立命館大学理工学部　正会員　伊津野和行・小林紘士

１．はじめに　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がある。道路橋示方書では、桁が橋脚から落下することを防ぐため、桁かかり長S_E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。また、ケーブルの耐荷力は死荷重反力R_dの1.5倍とするよう決められているが、この値の意義は明らかではない。桁間連結装置が作動する状況を想定し、その動的挙動を検討することは有意義だと考える。

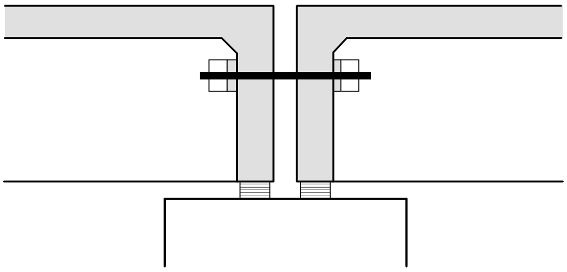

図1　ケーブルを用いた桁間連結装置

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_0）は十分に長いため、地震応答による桁間相対変位はΔ_0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、図3のように1つの桁の支承部が破壊して桁が移動し始め、$\Delta_0+\delta_0$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_0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、地震外力が働かない状況における水平挙動を考える。ケーブルに力が作用し始めた時の桁速度をv_0とし、摩擦係数をμ、動く桁の質量をm、ケーブルのばね定数をk、死荷重反力をR_dとする。桁の変位は $x=-\dfrac{\mu R_d}{k}+\dfrac{\mu R_d}{k}\cos\sqrt{\dfrac{k}{m}}t+v_0\sqrt{\dfrac{m}{k}}\sin\sqrt{\dfrac{k}{m}}t$ となる。ケーブルに作用する力の最大値と、死荷重反力との比をαとすると、$\alpha=\sqrt{\mu^2+mkv_0^2/R_d^2}-\mu$ である。

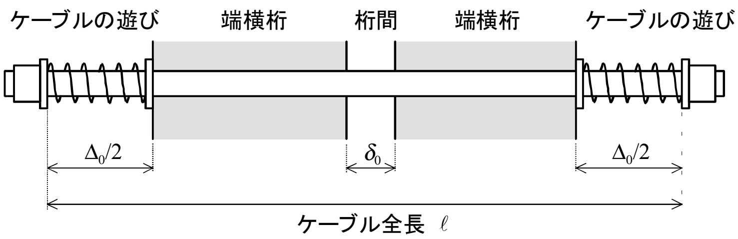

図2　桁間連結装置の詳細

PC単純桁をケーブルで連結することを想定し、桁の質量m=1000t、k=490MN/m、死荷重反力R_d=4.9MNとする。このばね定数は、断面積10cm^2、長さ2.5mのケーブル6本に相当する。摩擦係数を横軸に、αを縦軸にとり、種々のv_0に対してプロットすれば図4になる。摩擦係数が大きくなっても、ケーブルに作用する力にさほど変化はない。ケーブルに作用する力を、設計値である死荷重反力のα=1.5倍にするためには、ケーブル作動時の速度がv_0=30kine以内である必要がある。また、v_0=100kineに対して抵抗するためには、α=4.5倍の力が必要になる。

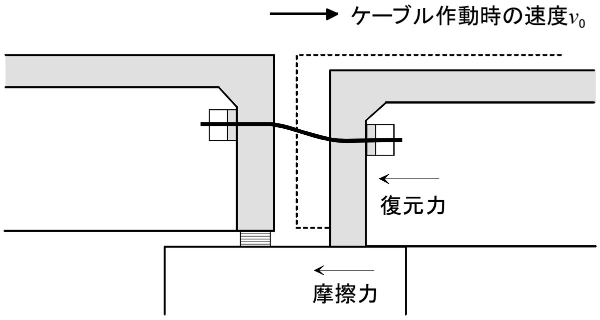

図3　桁の水平移動

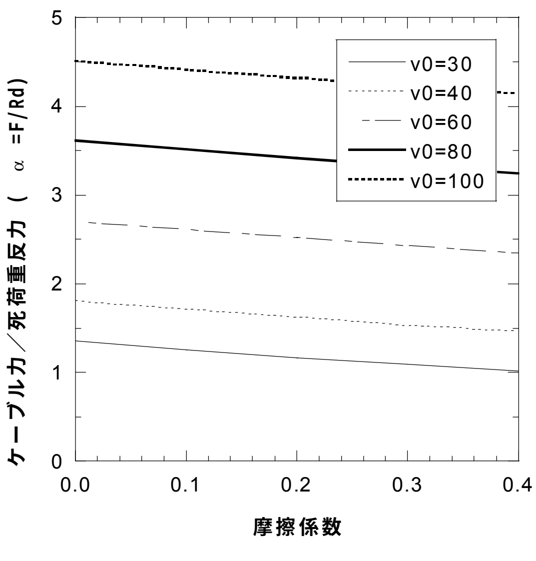

図4　ケーブル力と摩擦係数の関係

キーワード：落橋防止システム、桁間連結装置 （〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1　Tel./Fax.077-561-2728）

３．桁の自由落下に関するモデル化　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について検討する。図5のように、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)ケーブルはばねと考える、4)落下中の減衰は無視する、という仮定を設ける。

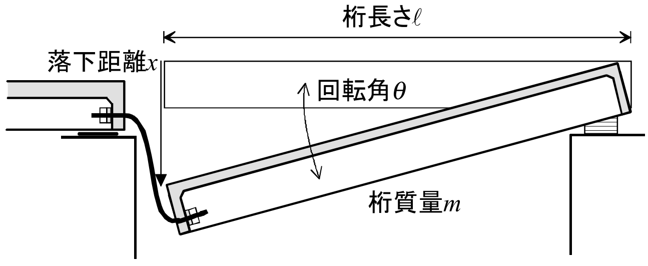

図5　桁の橋脚からの落下

桁の長さをℓ、質量をmとすれば、慣性モーメント$I = m\ell^2/3$であり、回転角をθ、時間をtとすれば、運動方程式は$I\ddot{\theta} = mg\ell/2$になる。$t$=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、$v = \ell\dot{\theta} = 3gt/2$　および　$x = \ell\theta = 3gt^2/4$　である。また、x落下するのに要する時間は、$t = \sqrt{4x/3g}$となる。$x$cm落下した時の速度vは、重力加速度をgとすれば、$v = \sqrt{3gx}$である。桁間連結装置に作用する力をF、作用する時間をΔtとすると、$F\ell\Delta t = I\dot{\theta}$より、力積は$F \cdot \Delta t = mv/3$で表される。作用する力が設計値に等しくなるのは、$F = 1.5R_d = 3mg/4$なので、$x$cm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、作用する時間として、$\Delta t = 4\sqrt{x/27g}$必要になる。落下距離を、図2のケーブルの遊びの長さ(Δ_0=70cm)と桁間長さ(δ_0=15cm)の合計(Δ_0+δ_0=85cm)と考えれば、落下開始後0.3秒後に速度500kine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、作用時間(衝突緩和時間)として0.2秒の確保が必要になる。

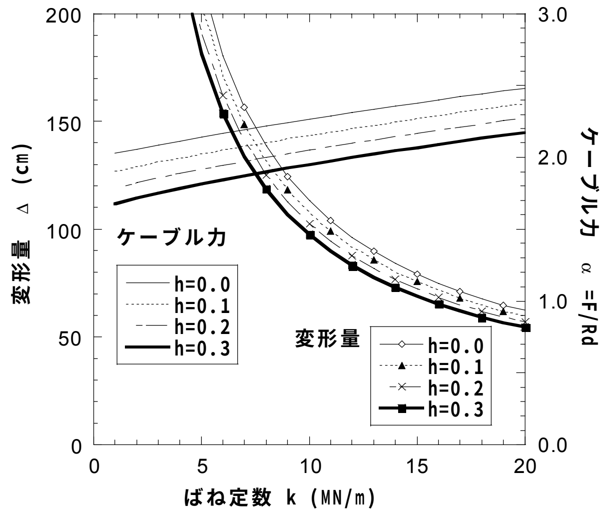

図6　ばね定数および減衰定数の影響

４．ばねや粘性減衰機構による衝撃の緩和　次に、ケーブル端部に設けられた遊びの部分にばねと粘性減衰機構(ダッシュポット)を設置し、桁の落下に抵抗することを考える。桁間距離$\delta_0$cm落下した後、ばねやダッシュポットが作用し始める。減衰定数をhとすれば、落下距離xと、ケーブル力の最大値Fと死荷重反力R_dの比αは、次式となる。

$$x = \delta_0 + \frac{mg}{2k} + e^{-h\omega t}\sqrt{\frac{mg\delta_0}{k}}\sin\sqrt{1-h^2}\,\omega t - e^{-h\omega t}\frac{mg}{2k}\cos\sqrt{1-h^2}\,\omega t$$

$$\alpha = 1 + \sqrt{1 + \frac{2k\delta_0}{R_d}}\exp\left\{-\frac{h}{\sqrt{1-h^2}}\sin^{-1}\left(\frac{1}{\sqrt{1+2k\delta_0/R_d}}\right)\right\}$$　　ただし、$\omega = \sqrt{\dfrac{3k}{m}}$　である。

図6に、hを0から0.3まで変化させた場合について、αとばね＋ケーブルの変形量Δのグラフを示す。減衰がない場合に変位を遊びの長さΔ_0=70cmにとどめるためには、k=17MN/mのばね定数が必要になる。ケーブルのばね定数を考慮すれば、k=18MN/mのばねを設置する必要がある。このとき、α=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。また、減衰がなければ$\alpha = 1 + \sqrt{1 + 2k\delta_0/R_d} \geqq 2$であり、死荷重反力の1.5倍に力を抑えることは不可能である。粘性減衰によって最大荷重も変形も小さくなるが、それほど大きな効果はない。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、k=15MN/mのばね定数が必要になり、ケーブルに作用する力はR_dの2.1倍になる。15cm自由落下してから減衰機構が作用しても効果は小さいということであり、これ以上の効果を期待するためには、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。

現在の設計体系で考えられているケーブル力は、桁が橋脚から自由落下することは想定していない。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有していないことは理解しておく必要がある。