

衝突速度スペクトルに基づく 桁間連結ケーブルの所要耐力算定

武野 志之歩¹・伊津野 和行²

¹正会員 工修 (株)建設技術研究所 東京本社道路・交通部 (〒338-0804 埼玉県さいたま市上木崎 1-14-6)

²正会員 工博 立命館大学 理工学部土木工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

上部構造の長周期化に伴い、桁間連結装置が担う役割が重用視されている。しかし、現行設計法では死荷重反力に基づいた所要耐力に対して設計されており、動的挙動が考慮されていない。地震時挙動下にある桁間連結装置について、所要耐力を簡易に把握する手段があれば有用である。本研究ではケーブルを用いた桁間連結装置を対象とし、ケーブルの吸収エネルギーとケーブル内の応力波伝搬を考慮した場合の所要耐力について検討した。連結装置の作動を一種の衝突現象とみなし衝突速度に着目することで、所要耐力の誘導を試みた。

Key Words : impact load, collision velocity, unseating prevention system, seismic restrainer

1. はじめに

地震時における落橋を回避する目的で、落橋防止システムの設置が行われている。現行の規定では、連結装置の作動は桁かかり長より十分短い範囲で行われ、仮に装置が作動するケースが生じて、橋脚天端と桁端部の相対変位量が桁かかり長に満たない範囲では連結装置の要求耐力は重要ではない。しかし、隣接桁間の衝突等想定外の荷重により支承が損傷した場合、桁が支承から逸脱して変位が増大する可能性がある。落橋に至る場合も考慮して連結装置の耐力を検討する必要がある¹⁾。落橋防止装置に対する所要耐力設計法の確立が必要である。

現行の設計法では死荷重反力により要求耐力を規定している。そのため、以下のような問題が考えられる。

○地震振動下における最大応答荷重が考慮されていない。

○連結装置作動時には衝撃的な荷重が作用すると考えられる。衝撃問題を考えた場合の安全性に対する検討が不十分である。

本研究では、桁間連結ケーブル装置による落橋防止構造を対象とし、連結装置の所要耐力について検討を行った。所要耐力の算定にはケーブルの吸収エネルギーに基づく振動解析的なアプローチと、応力波伝搬による衝撃解析的なアプローチを試みた。なお、本研究における検討では、桁間連結ケーブルのみを対象とした所要耐力の検討を行うものとし、緩衝材等の効果は検討しない。

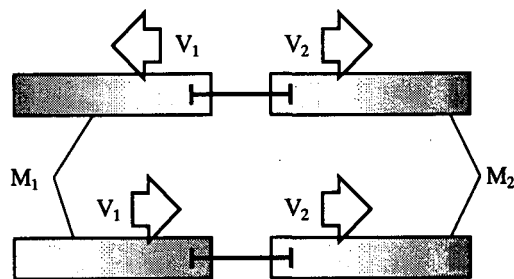


図-1 連結ケーブル作動時の桁挙動

2. 吸収エネルギーに基づく所要耐力

ここでは、ケーブル挙動時の振動状態を考慮したケーブル所要耐力について検討する。連結ケーブル装置が稼働するケースとしては、以下の2ケースが考えられる。

図-1に概要図を示す。

○2つの桁(M_1 , M_2)が互いに離れる方向の速度ベクトル(v_1 , v_2)を有して連結ケーブルが作動するケース

○2つの桁(M_1 , M_2)が同方向の速度ベクトル(v_1 , v_2)を有して連結ケーブルが作動するケース

力積の定義より、ケーブルに作用する荷重は連結ケーブル装置に作用する相対速度に比例する。したがって、桁の速度応答に着目して検討を行うことは妥当である。また、現象を簡易化して把握することが可能である。ここで、質量 M_1, M_2 の桁がそれぞれ速度 v_1, v_2 で挙動してい

るときと等価な運動量 $M \times V$ を仮定する。ケーブル作動時には桁の挙動が拘束されることから、一種の衝突現象が発生したと考えられる。よって、ケーブルが挙動する直前の相対速度として衝突速度 V_c を定義する²⁾。このとき、双方の桁が有する運動エネルギーがすべてケーブルのひずみエネルギーに変換されると仮定すると(1)式が得られる。

$$\frac{1}{2} M \cdot V_c^2 = \frac{1}{2} k \cdot \delta_x^2 \quad \dots (1)$$

ただし、 k は連結ケーブルの弾性挙動下における剛性、 δ_x は連結ケーブルの最大ひずみである。図-2 に概要を示す。ここで、ケーブルのばね剛性 k はケーブルの断面積 A_c 、ケーブル長 L 及びケーブルの弾性係数 E を用いて(2)式のように定義される。

$$k = \frac{A_c \cdot E}{L} \quad \dots (2)$$

したがって、ケーブルに作用する応力の最大値 $\sigma_{\max}$ は(3)式となる。

$$\sigma_{\max} = \frac{k \cdot \delta_x}{A_c} = \frac{k}{A_c} \sqrt{\frac{M}{k}} \cdot V_c = \sqrt{\frac{EM}{A_c \cdot L}} \cdot V_c \quad \dots (3)$$

また、最大応答荷重 $F_{\max}$ は(4)式となる。

$$F_{\max} = A_c \cdot \sigma_{\max} = \sqrt{\frac{A_c}{L} EM} \cdot V_c \quad \dots (4)$$

以上、ケーブルのエネルギー吸収に着目して最大応答荷重の誘導を試みた。(3)式、(4)式により、地震時に作用するケーブルの最大応力及び最大荷重は、ケーブル寸法と材質、ケーブルに影響を及ぼす桁の質量 M 、及び衝突速度 V_c に依存する。

3. 応力波伝搬に基づく所要耐力

ここでは、連結装置が作動するときの衝撃に着目して検討を行う。装置稼働時にはケーブルに急激な負荷が作用するため、一種の衝突現象が発生すると考えられる。連結ケーブルに作用する衝撃応力を簡易に評価するため、以下に示す条件を仮定した。

- ① 連結ケーブルを弾性体、衝突する桁を剛体とする。
- ② 連結ケーブル内に作用する応力波は、ケーブルの長さ方向一次元に限り伝搬する。
- ③ 作用応力はケーブル端部の断面に一樣に作用する。
- ④ 衝撃応力に対する緩衝材の効果は安全側の評価を行うため考慮しない。

落橋防止システムが衝撃的に作動するのは、連結ケーブルの両端部で桁と落橋防止システムのストッパーと衝突が生じた場合である。問題を簡易化するため、前節と

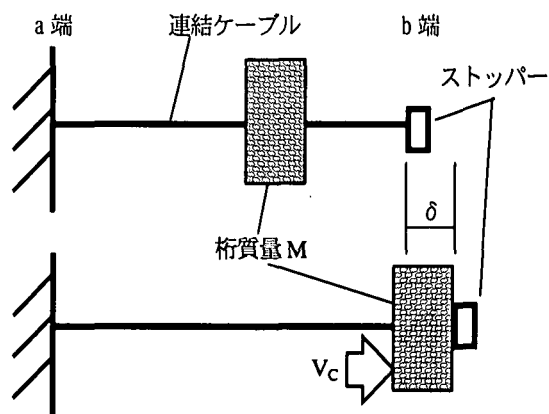


図-2 吸収エネルギーに着目する場合に想定したケーブル挙動

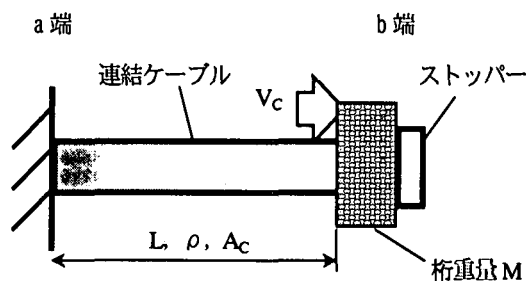


図-3 応力波伝搬に着目する場合に想定したケーブル挙動

同様に桁間連結装置が作動する状況を仮定した。図-3 に概念図を示す。一端 a を固定端とし、他端に仮想質量 M の桁が衝突する場合を想定して検討する。図中の速度 V_c は両側の桁が連結ケーブルに引張力を作用させたときの衝突速度であり、桁間の相対速度に相当する。このとき、衝突により連結ケーブルに作用する初期の衝撃応力は応力波の伝播区間と応力波による物体ひずみ量より、弾性係数 E と応力波速度 C_0 を用いて次式のようになる。

$$\sigma_0 = E \cdot \varepsilon = E \frac{V_c}{C_0} \quad \dots (5)$$

一方、力積の定義式では衝突時に2つの弾性棒に生じた力積の和と運動量変化の和が等しいことから衝撃応力は次式でも表現される。

$$\sigma_0 = \rho \cdot C_0 \cdot V_c \quad \dots (6)$$

(5)式と(6)式より部材内の応力波速度 C_0 を消去すると、衝突時の衝撃応力 σ_0 は(7)式³⁾のようになる。

$$\sigma_0 = \sqrt{\rho E} \cdot V_c \quad \dots (7)$$

ここで、桁の衝突による衝撃を直接受けるケーブル端の運動方程式は以下の様に導ける。

$$M \frac{dv}{dt} + \sigma_s = 0 \quad \dots (8)$$

(7)式を代入し、微分方程式の解を導く。初期条件として $t=0$ のとき応力として(7)式が適用できる。

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\sigma_s}{\sqrt{\rho E}} \right) + \frac{\sigma_s}{M} = 0 \quad \dots (9)$$

$$\sigma_s = \sigma_0 \exp \left(-\frac{\sqrt{\rho E}}{M} t \right) = \sqrt{\rho E} \cdot V_c \cdot \exp \left(-\frac{\sqrt{\rho E}}{M} t \right) \quad \dots (10)$$

応力波が長さ L のケーブルを往復するのに要する時間 T は、応力波速度 C_0 を用いて (11) 式で導かれる。

$$T = \frac{2L}{C_0} = 2L \sqrt{\frac{\rho}{E}} \quad \dots (11)$$

ケーブルに荷重が作用している時間を D とすると、応力波がケーブルを往復する回数 n は D / T となる。したがって、衝突を受ける端部 (b 端) における衝撃応力をそれらの総和として取り扱ふと、 σ_s は (12) 式となる。

$$\sigma_s = \sqrt{\rho E} \cdot V_c \times \sum_{a=1}^n \left[\exp \left(-\frac{\sqrt{\rho E}}{M} (a-1)T \right) + \exp \left(-\frac{\sqrt{\rho E}}{M} aT \right) \right] \quad \dots (12)$$

このときケーブルに作用する衝撃荷重は (13) 式である。

$$F_s = A_c \cdot \sigma_s \quad \dots (13)$$

以上、連結ケーブル作動時の応力伝搬に着目して、ケーブルに作用する衝撃応力と衝撃荷重の誘導を試みた。連結装置作動時の衝突速度を抽出することで、衝撃応力や衝撃荷重を確認することが可能である。

4. ケーブル所要耐力の算定例

ここで、連結ケーブルに作用する最大応答荷重と衝撃荷重の算定を行う。計算条件を以下に示す。

○桁重量 $W=2.5 \text{ MN}$

○設計地震力 $H_F=1.5Rd=3.75 \text{ MN}$

また、連結ケーブルの諸元を以下のように仮定する。

○断面積 $A_c=3.5 \times 10^{-3} \text{ m}^2$

○長さ $L=5.0 \text{ m}$

○単位体積重量 $w=100 \text{ kN/m}^3$

○弾性係数 $E=200 \text{ GPa}$

○降伏応力 $\sigma_y=1.2 \text{ GPa}$

最大応答荷重は (5) 式を用いて算出できる。

$$\begin{aligned} F_{\max} &= \sqrt{\frac{A_c}{L} EM} \cdot V_c \\ &= \sqrt{\frac{3.5 \times 10^{-3}}{5.0} \times 2.0 \times 10^8 \times \frac{2.5 \times 10^3}{9.8}} \times V_c \\ &= 6.0 \times V_c \text{ MN} \end{aligned}$$

最大応答荷重が設計地震力を上回るのは、 $F_{\max}$ を $H_F=3.75 \text{ MN}$ とした場合の衝突速度により判断できる。すなわち、最大応答荷重を設計地震力により許容できるのは、衝突速度 $V_c=3.75 / 6.0 = 0.625 \text{ m/sec}$ を示す場合である。

一方、衝撃荷重は以下の手順により算定できる。まず、ケーブルに荷重が作用している時間 D を、 0.1 sec と仮定する。ケーブル内応力波の往復回数は以下となる。

$$\begin{aligned} n &= \frac{D}{T} = D \cdot \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \\ &= 0.1 \cdot \frac{1}{2 \times 5} \sqrt{\frac{9.8}{1.0 \times 10^2} \times 2.0 \times 10^8} = 44 \end{aligned}$$

すなわち、本計算例では衝突時間を 0.1 sec と仮定した場合、ケーブル内では応力波が 44 往復する。(13) 式に代入して衝撃荷重を算定する。

$$\begin{aligned} F_s &= A_c \sqrt{\rho E} \cdot V_c \\ &\times \sum_{a=1}^{44} \left[\exp \left(-\frac{\sqrt{\rho E}}{M} (a-1)T \right) + \exp \left(-\frac{\sqrt{\rho E}}{M} aT \right) \right] \\ &= 1.6 \times 10^2 \times 5.066 = 0.81 \times V_c \text{ MN} \end{aligned}$$

計算結果より、衝撃荷重が設計地震力を上回るのは衝突速度 $V_c=3.75 / 0.81 = 4.6 \text{ m/sec}$ 以上となる場合である。

5. ケーブルの所要耐力設計に関する予備検討

ここでは、ケーブルに作用する最大応答荷重や衝撃荷重の特性を把握するため、ケーブル寸法による影響や桁重量による影響について検討する。

まず、前 2 章で示した最大応答荷重算定式を用い、その軽減策について検討する。最大応答荷重は衝突速度依存性を有しているため、衝突速度の低下により荷重低減が計れるが、ここではケーブル寸法に着目して有効な条件を誘導する。(4) 式を変形すると次式が得られる⁴⁾。

$$\frac{A_c}{L} \leq \frac{H_F^2}{EM} \cdot \frac{1}{V_c^2} \quad \dots (14)$$

(14) 式によれば、最大応答荷重を設計地震力により許容するには、ケーブル断面積とケーブル長の比がある一定値条件を満たす必要が生じる。現行設計法においては、桁重量に比例してケーブル所要断面積を決定していることから、(14) 式を許容するようなケーブル長を設定することが効果的である。

次に、設計地震力と最大応答荷重、衝撃荷重の大小関係の傾向を調べる。ここでは、4 章の計算例で用いた諸元に基づき、ケーブル長 L を 5m, 10m, 15m と変化させた場合について、それぞれ桁重量の影響を検討した。これは仮の諸元であり現実性は考慮していない。図-4 に

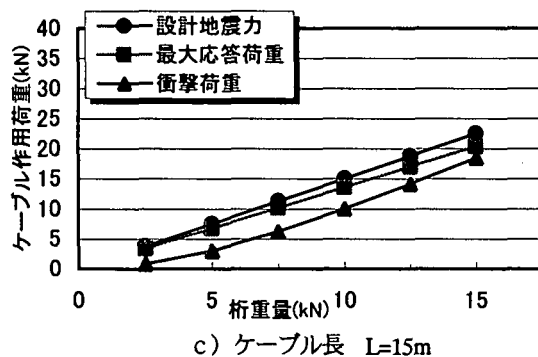
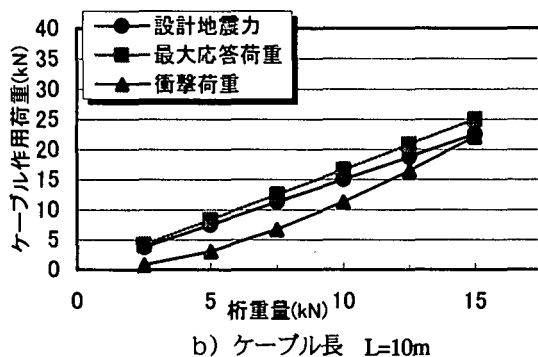
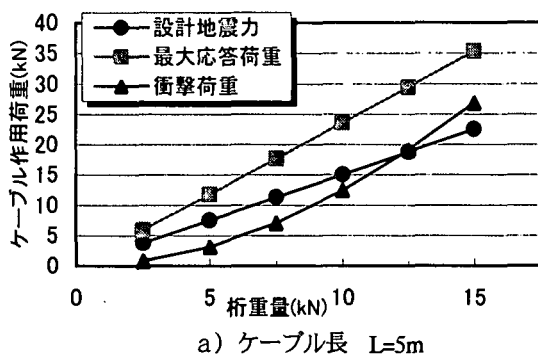


図-4 桁重量とケーブル長が作用荷重に及ぼす影響

桁重量に対するそれぞれの値を示す。桁重量の変化に伴い、現行設計法によりケーブル断面を決定している。また、衝突速度は一律に $V_C=1.0\text{m/sec}$ と仮定した。

桁重量の影響に着目する。桁重量が増加するに伴い最大応答荷重、衝撃荷重とも一律に増加する傾向にある。最大応答荷重が一次関数的な増加傾向になっているのに対し、衝撃荷重は二次関数的な増加を示すため、桁重量が大きくなるほど2つの荷重差は小さい。ケーブル長に着目すると、設定値が長いほど最大応答荷重と衝撃荷重は低減される。したがって、連結ケーブルに作用する荷重を低減するにはケーブル長を長く設定することが効果的であるが、最大応答荷重と衝撃荷重の差が小さくなる傾向があるため、極度に長いケーブルの設定は注意を要する。

以上より、本研究ではケーブル所要耐力設計法として、図-5 に示す手順を提示する。ケーブルに作用する最大応答荷重により設計地震力により算定されたケーブル断面の評価を行い、ついで衝撃荷重の照査を行うものとした。

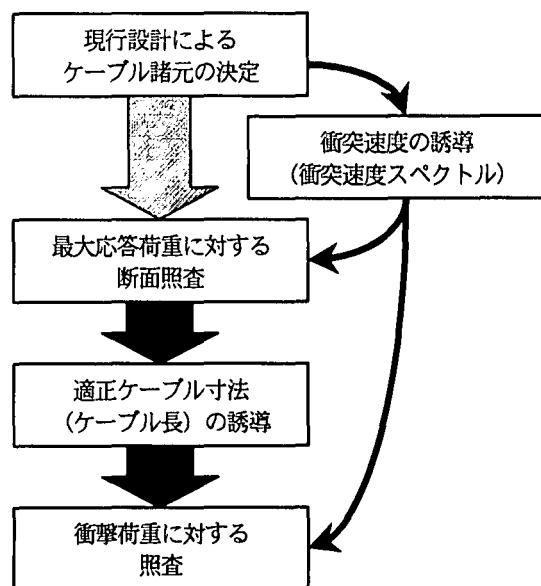


図-5 連結ケーブルの所要耐力設計

6. まとめ

以上、本研究では桁間連結ケーブル装置の所要耐力について、ケーブルの吸収エネルギーと応力波伝搬の両観点に基づいて検討し、所要耐力式を誘導した。桁質量として考慮すべき値やエネルギー収支の詳細、あるいは応力波伝搬時の反射率等、今後、検討する必要がある。以下、本研究における主な結果を述べる。

- 1) 地震時に連結ケーブルに生じる最大応答荷重及び衝撃荷重は、ケーブル作動時の衝突速度に依存する。したがって、連結装置の設計では連結される構造系の影響を考慮する必要がある。
- 2) ケーブルの最大応答荷重はケーブル寸法比を一定値に確保することで、設計地震力により許容できる。
- 3) 衝撃荷重の大きさはケーブルの材質に依存し、ケーブル寸法による影響は小さい。
- 4) 現行設計法を適用すると桁重量が小さくケーブル長が長いほど、ケーブルに作用する荷重は小さい。
- 5) ケーブル長を長く設定するほど、最大応答荷重と衝撃荷重の差が小さくなる。

参考文献

- 1) 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, 668/I-54, pp.319-324, 2001.
- 2) 武野志之歩, 伊津野和行: 隣接橋梁間の地震時相対速度応答と衝突速度スペクトルに関する研究, 土木学会論文集, 668/I-54, pp.163-175, 2001.
- 3) 日本機械学会編: 衝撃破壊工学, 技報堂出版株式会社, 1990.
- 4) 多谷虎男: 振動・衝撃の基礎理論とラプラス変換, 1984.