

剛性変化する非線形緩衝材を用いた落橋防止ケーブルの設計に関する研究

立命館大学理工学部 正会員 ○中尾 尚史
立命館大学理工学部 正会員 伊津野 和行

1. はじめに

1996年に改訂された道路橋示方書で、落橋防止ケーブルに緩衝効果を与えることが望ましいと記載されたことから、緩衝材の開発および研究が行われている。これまでに著者らは、非線形緩衝材を有する落橋防止ケーブルの設計を行ってきたが、緩衝材が限界の変形量に達すると、それ以上の緩衝効果が得られないと仮定して研究を行ってきた。しかし、ゴムなどを緩衝材として使用する場合、ハードニングを起こすと、それ以降の変形量は非常に小さくなるが、わずかであっても緩衝効果があると考えられる。よって本研究では、緩衝材の限界性能および落橋防止ケーブルの緩衝効果について検討を行う。

2. 解析モデル

落橋防止ケーブルは図-1に示すような、線形ばねと非線形ばねを形成する緩衝材からなる装置を対象とし、ケーブルばねと緩衝材ばねとにモデル化を行う。緩衝材の非線形特性としては、図-2で示されるように、初期抵抗力 P が作用するまで緩衝材は動かず、 P 以上の荷重に対してばね剛性 k_s で応答する剛塑性モデルを使って設計を行う。これまでの研究では、緩衝材がハードニングを開始する変形量 d_{lim} に達すると、ばね剛性は無限大になると設定してきた。今回の研究では、緩衝材がハードニングを開始する変位量（ここでは剛性変化点と呼ぶ）に達すると、それ以降の変位については剛性の変化を考慮して ak_s で応答することにした。本研究では a は剛性増加率と呼ぶ。

落橋防止システムを設置する桁は中小高架橋（桁質量： $m_1=900t$ ， $m_2=500t$ ）を対象とする。設計を簡単にするために、作動中に桁へ作用する地震外力はないと考え、1つの桁が初速度 V で一定の方向のみに作動すると仮定する。桁が落下するまでに、作動している桁を橋脚上で停止させることを想定し、これらの想定からケーブルに作用する力 F と緩衝材の変形量 d を求めると、緩衝材が剛性変化点に達しない場合と達した場合で

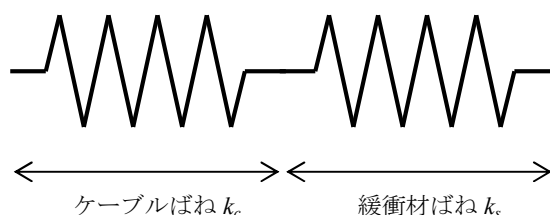


図-1 落橋防止ケーブルのモデル図

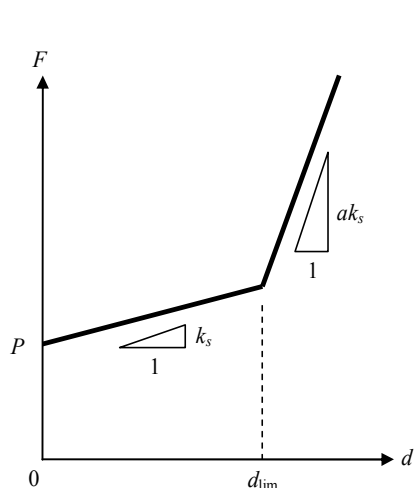


図-2 緩衝材の非線形特性

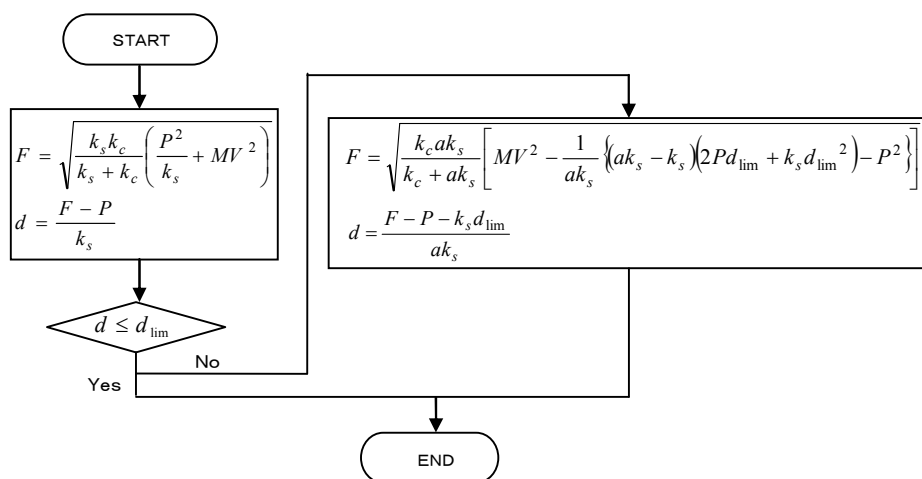


図-3 緩衝材の変形量と

ケーブルに作用する力のフローチャート

キーワード 落橋防止ケーブル，緩衝材，非線形特性，ばね剛性

連絡先 〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1 立命館大学 TEL 077-566-1111

それぞれ以下の式になる．また図-3 にフローチャートを示す．

$$F = \sqrt{\frac{k_s k_c}{k_s + k_c} \left(\frac{P^2}{k_s} + MV^2 \right)}$$

$$d = \frac{F - d}{k_s} \quad (1)$$

$$F = \sqrt{\frac{k_c a k_s}{k_c + a k_s} \left[MV^2 - \frac{1}{a k_s} \left\{ (a k_s - k_s) (2 P d_{\text{lim}} + k_s d_{\text{lim}}^2) - P^2 \right\} \right]}$$

$$d = \frac{F - P - k_s d_{\text{lim}}}{a k_s} \quad (2)$$

(1) 式は緩衝材が剛性変化点に達しない場合，(2) 式は緩衝材が剛性変化点に達した場合を示している．式中の k_c ， V ， M はそれぞれ，ケーブルの剛性，桁の作動速度，桁の換算質量である．以上の式を用いてケーブルに作用する力および緩衝材の変形量を数値計算により求め，落橋防止ケーブルへの影響について検討する．

3. 緩衝材の緩衝効果

緩衝材が剛性変化点に達した場合による緩衝材の変形量およびケーブルに作用する力を示したのが図-4 および図-5 である．図中の横軸は緩衝材の初期抵抗力，縦軸は緩衝材の変形量およびケーブルに作用する力である．また凡例の a は剛性増加率であり， ∞ は剛性変化点以上に緩衝材は変形しない，すなわち緩衝材の剛性が無限大であることを示している．本研究では緩衝材の初期剛性および剛性変化点を 0.01 MN/m および 0.5 m ，桁の作動速度を 2 m/s に設定して数値計算を行った．

緩衝材が剛性変化点に達した場合（初期抵抗力が 1 MN 以下の場合），剛性増加率が無限大の場合に比べ，ケーブルに作用する力が低下する．しかし，緩衝材の変形量が増大する．例えば剛性増加率が 1.0×10^3 の場合，初期抵抗力がない場合におけるケーブルに作用する力は， 4 MN と非常に小さくなるが，緩衝材の変形量は 0.8 m となり緩衝材の剛性変化点の 1.6 倍変形することになる．

剛性変化後，最大で 1 cm 程度緩衝材が変形すると考えると，図-4 から剛性変化後の剛性は 1000 MN/m ($a = 1.0 \times 10^5$) 以上であることが推測される．その場合のケーブルに作用する力は，緩衝材の初期抵抗力がない場合では 25 MN 程度になり，剛性増加率が無限大の場合に比べ 10 MN 程度小さくなる．また緩衝材の初期抵抗力が 1 MN の場合のケーブルに作用する力は 5 MN 程度小さくなる．

緩衝材の初期抵抗力が 2 MN 以上になると，緩衝材が剛性変化点に達しないため，初期抵抗力を増加させても，ケーブルに作用する力は全ケースで同じになる．

4. おわりに

本研究は，緩衝材の剛性変化による緩衝効果について数値計算を行った．これによって得られた結果は以下の通りである．

- ① 緩衝材が剛性変化点に達したことによる剛性増加を考慮すると，剛性増加率を無限大にした場合よりも，ケーブルに作用する力は小さくなる．
- ② 剛性増加後の最大変形量は 1 cm 程度であると考えれば，緩衝材の初期抵抗力がない場合， 10 MN 程度の低減効果がある．

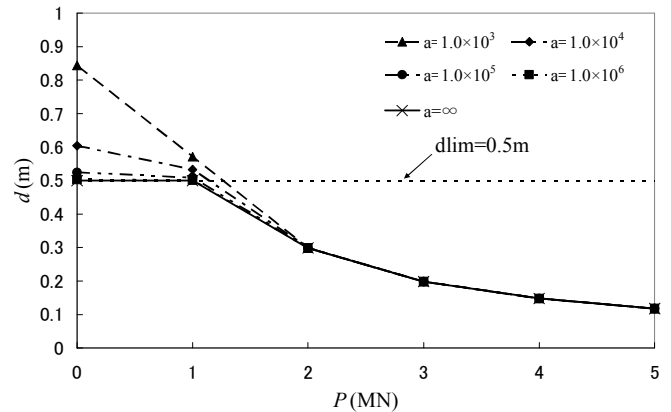


図-4 緩衝材の変形量

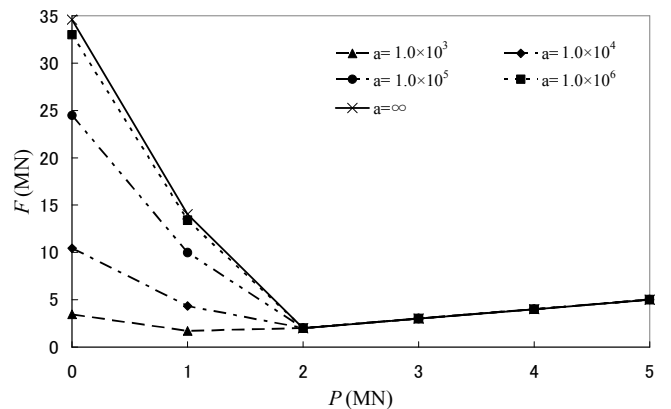


図-5 ケーブルに作用する力