

落橋防止ケーブルに対する緩衝材の 適用と効果に関する研究

伊津野和行¹·小林紘士²

¹立命館大学理工学部教授 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1) E-mail: izuno@se.ritsumei.ac.jp ²立命館大学理工学部教授 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1) E-mail: kobayash@ se.ritsumei.ac.jp

地震時の落橋を防止するために,道路橋には落橋防止システムの設置が義務付けられている.しかし, 現行設計法では死荷重反力のみに基づいて要求耐力が規定されており,緩衝効果の具体的な評価方法は規 定されていない.本研究では桁間連結ケーブル装置を対象とし,緩衝材の設計法について検討を行った. 線形ばねと完全弾塑性型非線形ばねによる緩衝を考え,緩衝材の限界変形量をも考慮して,エネルギー保 存則から運動方程式を定式化した.その結果,緩衝材の線形ばねの剛性を強くすれば,非線形ばねにおけ る復元力の大きさの影響は小さいこと,逆に線形ばねの剛性が弱い場合には,非線形ばねの復元力を大き くするのが効果的であることを示した.

Key Words : bridge unseating prevention system, limitation for deformation of device, PC cable, shock absorber

1. はじめに

現在道路橋においては、地震時における想定外の 状況に対しても落橋を防ぐことを目的とし、落橋防 止システムが構築されている.道路橋示方書¹⁾にお いて、桁かかり長を補完するための落橋防止構造は 死荷重反力の1.5倍の耐力を持つよう規定されてい るが、その具体的な作動状況や1.5という数字の安 全率は不明である.

近年,各研究機関において落橋防止構造の研究が さかんに実施され,落橋を防止するために必要な性 能や各種装置の性能について多くの知見が得られる ようになってきている²⁻⁷⁾.しかし,緩衝材の緩衝 効果をも含めた実用的な設計法を確立するためには, まだ検討例が少ないのが現状である.

著者らはこれまでに、線形の緩衝材(線形ばね) を用いた場合の緩衝効果とその設計法について検討 した⁸⁾. 必要な耐力は、想定する装置作動速度(桁 間相対応答速度)によって異なるが、それぞれの場 合で最適な効果を得るための緩衝材の剛性が存在す ることを示した.しかし、線形ばねによる緩衝は、 装置に作用する最大耐力を低減するものの、エネル ギーは消費しない.装置のひずみエネルギーとして 蓄えられたエネルギーは、桁の一次的な停止を実現 した後に、運動エネルギーに再変換されてしまう. 例えば、桁の一端が橋脚からはずれて自由落下する ケースを考えた場合、落橋防止ケーブルでつり下げ てそれ以上の落下を食い止めたとしても、ケーブル が線形ばねでモデル化されるならば、そこから3G (≒30m/s²)もの加速度で上昇に転じることになる。 桁の落下を止めるだけでは十分ではなく、通行中の 車両の安全性を確保できるかどうかの検討も必要で ある.

そのためには、エネルギーを消費することのできる緩衝装置を考え、挙動を改善できる可能性について検討する必要がある.これまでにも非線形な変位 -復元力特性を有する緩衝材の開発が報告されてお り^{9,10)}、それらの設計法を提示することは有用であ ろう.

よって本研究では、単純化した非線形緩衝材モデ ルを用いて、その設計法と緩衝効果について検討した.

2. 落橋防止構造の解析モデル

落橋防止構造としては、図-1に示すような、隣接 する桁どうしをPCケーブルで連結するタイプのも のを想定した.支承部の破壊によって双方の桁が橋 脚上を滑り始め、それを連結ケーブルの作用によっ て動きを止めることを想定する(図-2参照).



図-1 桁間連結ケーブル型落橋防止構造



図-2 連結ケーブルの想定作動状況

問題を簡単にするため、桁の移動中は地震加速度 等、外力が作用しないと考え、初期相対速度Vを与 えられた2つの質点が、ケーブルによる復元力を受 けながら運動を開始し、相対変位が最大値を迎える までの動きをシミュレーションする.その時点で双 方の桁が停止する保証はないが、それ以降は相対変 位が小さくなる方向へ振動を開始するため、落橋防 止構造のシミュレーションとしては、相対変位が最 大値に達するまででよいと判断した.

本研究で想定するような落橋防止構造が作動する ケースは、固有周期の異なる橋梁が隣接する際に顕 著であると考えられる.道路橋示方書によれば、隣 接する桁重量が2倍以上、もしくは固有周期が1.5倍 以上の橋梁では、桁間を相互に接続する落橋防止シ ステムの採用は避けることを推奨している.したが って、桁間連結ケーブルの解析例として、隣接橋と の桁重量比が2倍よりわずかに小さくなる程度の橋 梁を想定した.具体的には、都市部の高架橋を想定 し構造規模が異なる橋梁(桁長50m及び30m程度) を想定した.モデルは2連の単純桁を想定し、それ ぞれの桁質量はm₁=1,790ton及びm₂=900tonと仮定し た.桁間に設置する連結ケーブルはL=2mのPCケー ブルを想定した.

ケーブル剛性は現行設計法に基づき次式から算定 を行う.

$$H_{\rm F} = 1.5R_{\rm d} = 13\rm{MN}$$
 (1)

ただし、 H_F は落橋防止構造の設計地震力、 R_d は死荷 重反力である.また、この設計地震力に対して必要 なケーブル断面積は、以下のようになる.

$$A = H_F \div (\sigma_v \div 1.7 \times 1.5) = 100 \text{cm}^2 \qquad (2)$$

ここで、Aはケーブル断面積、 σ_y はケーブルの降伏 応力(1.2GN/m²)である. 1.7 は許容応力度を設定



図-3 緩衝材を付加したケーブルのモデル化



(a) 非線形履歴応答特性 (b) 簡易モデル

図-4 一方向載荷に対する非線形ばねの簡易モデル

する際の安全率,1.5は許容応力度の割増し係数である.

ケーブルの断面積Aと長さL, ヤング率E (200 GN/m²) より, ケーブルのばね定数 k_c は次のように求められる.

$$k_{z} = EA/L = EA/L = 1 \text{GN/m}$$
(3)

緩衝材としては、図-3に示すように、ケーブル端 部に設けられた線形ばねk_sと非線形ばねを設置する ことを考えた.これは、図-1、図-2の連結ケーブル 部分を線形ばねk_c、緩衝材部分を線形ばねk_sと非線 形ばねの並列結合でモデル化したものである.非線 形ばねの変位-復元力特性としては、図-4(a)のよ うな特性を考える.これは、鋼部材や高減衰ゴム、 あるいは新素材の利用を想定している.ケーブルに 力が作用し始めてから桁が停止するまでの動きのみ を考えると、第一近似として図-4(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.初 期剛性無限大の完全弾塑性型で、一方向への動きを モデル化したものである.

3. 落橋防止構造の運動方程式

次に,運動方程式の定式化を行う.落橋防止構造 (装置全体)に作用する力の最大値をF,ケーブル の最大変形量をΔ,緩衝材の最大変形量をdとする. 緩衝材は無限大に変形できるわけではないため,そ の限界変形量をd_{im}とする. 前述のように、初期の相対速度Vで動き出した2つ の質点が、相対変位が最大値に達するまでどのよう に運動するのかを考える.そのためには、まず、初 期状態で2つの質点が有していた運動エネルギーが、 エネルギー保存則に則りケーブルのひずみエネルギ ーにすべて変換されることを考えて、ケーブルに作 用する力の最大値F₁を求める.運動中に外力が作用 しない場合を想定し、初期条件として止まっている 桁に相対速度Vを与えた場合を考えているため、運 動量保存則より、2つの桁の重心位置は動かない. よって、次式で表される換算質量Mを用いて装置作 動前の運動エネルギーを表現することができる.

$$M = \frac{m_1 \cdot m_2}{m_1 + m_2} \tag{4}$$

運動エネルギーは次式(5)の左辺で表され,右辺 はケーブルの最大ひずみエネルギーである.

$$\frac{1}{2}MV^2 = \frac{F_1^2}{2k_c}$$
(5)

この式(5)より,ケーブルのみが変形したと考えた場合にケーブルに作用する力の最大値F₁は次のようになる.

$$F_1 = \sqrt{k_c M V^2} \tag{6}$$

この値 F_1 が, 図-4(b)のモデルで表される非線形緩 衝材の復元力Pよりも小さければ緩衝材は変形せず, ケーブルの変形のみになる.この場合,ケーブルに 作用する力の最大値Fと,緩衝材の変形量dは次式 のようになる.

$$F = F_1 \quad , \quad d = 0 \tag{7}$$

次に、F₁がPよりも大きい場合には、緩衝材も変形する.緩衝材の非線形ばねに作用する力Pと、線形ばねに作用する力(緩衝材全体に作用する力からPを引いた値)を考え、エネルギー保存則を適用する.

$$\frac{1}{2}MV^2 = \frac{\left(F_2 - P\right)^2}{2k_c} + Pd_2 \tag{8}$$

ここで、*F*₂はケーブルに作用する力の最大値、*d*₂は 緩衝材の変形量であり、これらは式(8)を解いて、 次式で求められる.

$$F_2 = \sqrt{\frac{k_s k_c}{k_s + k_c} \left(\frac{P^2}{k_s} + MV^2\right)} \tag{9}$$

$$d_2 = \frac{F_2 - P}{k_s} \tag{10}$$

実際には、緩衝材の大きさは有限であるので、生 じ得る変形量、すなわち、ある限界変形量 d_{im} を有 する.よって、式(10)で表される緩衝材の変形量 d_2 が、限界変形量 d_{im} より小さければ、装置に作用す る力の最大値Fと緩衝材の変形量dは次式となる.



図-5 装置に作用する力と変形の最大値を求める フローチャート

$$F = F_2 \quad , \quad d = d_2 \tag{11}$$

しかし、計算上d₂が限界変形量d_{lim}より大きい場合 には、緩衝材がd_{lim}までしか変形できない場合に消 費するエネルギー量を考えて、次式のようなエネル ギー保存則を用いることになる.

$$\frac{1}{2}MV^{2} = \frac{\left(F - P\right)^{2}}{2k_{c}} + Pd_{\lim}$$
(12)

緩衝材の変形量dは限界変形量d_{im}となり,式(12) より,装置に作用する力の最大値Fは次式となる.

$$d = d_{\lim} \tag{13}$$

$$F = \sqrt{k_c \left(MV^2 - 2Pd - k_s d^2\right)} \tag{14}$$

なお、いずれの場合もケーブルの変形量∆は次式 となる.

$$\Delta = \frac{F}{k_c} \tag{15}$$

以上をまとめて、図-5に全体のフローチャートを 示す.装置作動時の初期速度Vが与えられれば、こ のフローによって、装置に作用する力の最大値、緩 衝材およびケーブルの変形量を計算することができ る.初期速度Vの設定には、相対速度応答スペクト ル¹¹⁾の利用や、既往最大値を元にした仮定などが考 えられる.

4. 落橋防止構造特性が応答値に与える影響

緩衝材の線形ばね定数を変化させた時,非線形ば ねの復元力Pや緩衝材の限界変形量d_{im}の違いによっ て,装置に作用する力と変形量の最大値がどのよう に影響を受けるかについて数値的に検討する.

図-6は緩衝材の線形ばね定数k_sを1MN/mとしたケース,図-7はk_sを10MN/mとしたケース,図-8はk_sを100MN/mとしたケースの結果である.それぞれ,緩衝材の限界変形量d_{lim}を20cm,30cm,40cmとした場合について,(a)緩衝材の変形量dと,(b)装置に作用する力の最大値Fとを,横軸に緩衝材の非線形復元力Pをとってプロットしている.いずれも,桁の相対速度の初期値(装置の作動速度)として, V=2m/sを想定し,換算質量Mは600tonを仮定した.なお,図-8では,緩衝材の線形ばね定数k_sが十分大きいため,応答がすべて20cm未満であり,設定した3種類の限界変形量よりも小さい.そのため3本の線がすべて同じ値を示して重なっている.これらの図を比較することにより,以下のことがわかる.

まず、図-8のように緩衝材の線形ばねを強くすれ ば、復元力Pの大きさの影響は小さい.緩衝材が変 位するだけの外力が加われば、その非線形復元力特 性は大きくても小さくても、その影響は大きくない. Pが0から5MNに大きくなれば、装置に作用する力 の最大値Fは1割ほど増加し、緩衝材の変形量dは3 割ほど減少する.

逆に、図-6や図-7のように、緩衝材の線形ばねが 弱い場合には、非線形ばねの復元力Pを大きくする と装置に作用する力を効果的に低減できる.Pを大 きくして、緩衝材の変形が、その限界変形量d_{im}に 達しないようにすることが重要である.限界変形量 に達しなければ、装置に作用する力は1/5以下に抑 えられる.

限界変形量に達しない場合で比較すれば,非線形 ばねの復元力Pが大きいほど,装置に大きな力が作 用するが,その増加傾向は大きくない.よって,非 線形ばねの復元力Pも,線形ばねのばね定数k。も, どちらも大きくして,限界変形量に達しないように 工夫することが,装置に作用する力を軽減すること につながる. しかし、本ケースで想定したケーブルの耐力 H_F は、 式(1)に示すとおり13MNであり、図-8では限界変 形量に達しないにもかかわらず、設計値を上回る力 が作用する.図-6と図-7では、限界変形量に達しな ければ、装置に作用する力はケーブルの耐力 H_F よ り小さくなる.よって、線形ばねのばね定数 k_s は、 設計値から決まるある上限値以上としない方がよい.

この試算例では、式(7)の F_1 は50MNであり、図-6 ~8で示したPの範囲では、いずれも F_1 >Pとなる. よって、緩衝材が限界変形量に達しない場合には、 式(9)の F_2 が装置に作用する力の最大値となる.式 (9)の値が式(1)の H_F よりも小さくなるために必要 な線形ばねのばね定数 k_s は、式(9)より以下の式と なる.

$$k_{s} < \frac{k_{c}(H_{F}^{2} - P^{2})}{k_{c}MV^{2} - H_{F}^{2}}$$
(16)

式 (16) より, k_s の上限値は,P=0の時76MN/m, P=5MNの時65MN/mとなる.これらの上限値を超え ない範囲で,なるべく大きな値のばね定数を用いる ことが望ましいといえる.

また、これらの値が決まれば式(10)より緩衝材の 最大変形量が計算できるので、緩衝材の効果を十分 に発揮させるために必要な最小限界変形量を規定す ることも可能である。ケーブルの耐力 H_F を式(10) の F_2 に代入すれば、緩衝材に要求すべき限界変形量 の下限値を次式で決定すればよいことになる。

$$d_{\rm lim} > \frac{H_F - P}{k_s} \tag{17}$$

5. まとめ

本研究では,落橋防止構造として桁間連結ケーブ ルを対象とし,装置の作動速度を想定した設計法に ついて検討を行った.エネルギー保存則を元に,緩 衝材の非線形応答特性をも考慮した設計法を提案し, その試算例を示した.本研究で得られた主な結論は 以下の通りである.

- (1)線形ばねおよび完全弾塑性型の非線形ばねから 構成される緩衝材を考えた場合、線形ばねを強 くすれば、非線形ばねの特性の影響は小さくな る.逆に、線形ばねが弱い場合には、非線形ば ねの復元力を大きくして、緩衝材がその限界変 形量に達しないように工夫することが、装置に 作用する力を小さくすることにつながる.
- (2) 緩衝材がその限界変形量に達した場合,装置に 作用する力は,限界変形量に達しない場合より かなり大きくなる.
- (3) 緩衝材の線形ばね定数を調整することにより, 装置に作用する力をケーブルの設計耐力より小 さくすることが可能である.また,緩衝材に必 要な最小限界変形量を導くことが可能である.





参考文献

- 日本道路協会:道路橋示方書・同解説, V. 耐震設計 編, 2002.
- 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) 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.651/I-52, pp.223-232, 2000.
- 4) 井嶋克志,帯屋洋之,錦織真樹,後藤茂夫:ゴム支 承支持された中小規模斜橋桁・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.
- 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,No.668/I-54, pp.319-324, 2001.
- 園田佳臣,西本安志,石川信隆,彦坂熙:落橋防止 用矩形ゴム製緩衝材の性能評価手法に関する基礎的 考察,土木学会論文集,No.689/I-57,pp.215-224, 2001.

- 川島一彦,上原健治,庄司学,星恵津子:桁衝突及 び落橋防止装置の効果に関する模型振動実験および 解析,土木学会論文集,No.703/I-59,pp.221-236, 2002.
- (3) 武野志之歩・大野敬美・伊津野和行:作動速度に基づく落橋防止用連結ケーブルと緩衝材の設計法に関する研究,土木学会論文集,No.731/I-63, pp.341-352, 2003.
- 9) 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.
- 村田清満,高山智宏,後藤貴士,山田正人,生駒信 康,浮島徹:エネルギー吸収機能を有する落橋防止 装置による耐震補強効果,土木学会論文集,No.689/ I-57, pp.275-288, 2001.
- 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, No.668/I-54, pp.163-175, 2001.

(2003.6.26 受付)

DEMAND CAPACITY FOR UNSEATING PREVENTION CABLE WITH INELASTIC SHOCK ABSORBER

Kazuyuki IZUNO and Hiroshi KOBAYASHI

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 for the connecting cable with inelastic shock absorber. The shock absorber added at the end of the cable was modeled as an elastic spring and an inelastic spring. The law of conservation of energy was used to determine the demand capacity for the shock absorber. The results showed that the spring constant of the elastic spring of the shock absorber has the suitable range to reduce the maximum acting force to the cable.