

斜張橋ケーブルにおける角折れ緩衝材と制振ダンパーの併用に関する検討

大日本コンサルタント 正会員 ○吉岡 勉 非会員 豊島孝之 寺田武志
中井商工 非会員 中平昌孝

1. はじめに

斜張橋のケーブルには、角折れによる2次応力低減を目的として定着管の隙間に角折れ緩衝材（弾性シーラ材）が設置される場合があり、多々羅大橋にて緩衝材の減衰付加効果が認められている¹⁾。また、レインパイブレーションを制振させるための構造減衰は、道路橋耐風設計便覧に対数減衰率で0.02~0.03が必要とされ、制振ダンパーが併用される事例が増えている。

図-1のように角折れ緩衝材と制振ダンパーを併用する場合の減衰性能について、名港中央大橋における実験的検討²⁾や2種のダンパーを併用する場合の評価手法の研究³⁾はあるものの、緩衝材とダンパーの併用を解析的に検討した事例は見当たらない。本報では、名港中央大橋での併用の場合のケーブル加振実験を複素固有値解析により再現解析して解析手法の妥当性を検証した上で、複数のケーブル長及びダンパータイプをパラメータに減衰性能を感度解析した内容を示す。

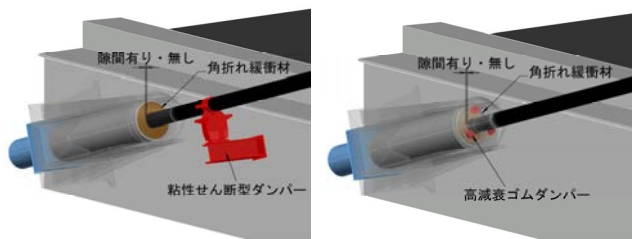


図-1 角折れ緩衝材と制振ダンパーの併用

2. 併用モデルの複素固有値解析方法

減衰材3点支持（桁側・塔側緩衝材+高減衰ゴム or 粘性感断型ダンパー）による複素固有値解析モデルを図-2に示す。複素固有値解析は粘性項（速度項）を含めて解く手法であるが、ここでは使用プログラムの都合より制振ダンパー2種を緩衝材と同じ複素バネモデルに置換し、減衰特性を剛性項（変位項）で表現した運動方程式を固有値問題に帰着して解く方法とする。

・複素バネを含むケーブルの運動方程式

$$[M]\{\dot{y}\} + [K']\{y\} = \{0\} \quad (1)$$

[M]：質量マトリクス

[K']：複素バネの減衰を含む剛性マトリクス

・複素バネ式 $k'_j = k_j(1 + iy)$ (2)

j：質点番号、 γ ：複素減衰定数

具体的には制振ダンパーだけを設置した状態の減衰計算を事前に行い対数減衰率 δ を得て、これに近似する等価複素減衰定数 γ' をトライアル計算により求めて複素バネ定数 k' に置換する。バネ定数 k は緩衝材及び制振ダンパー単体の計算で算出されるバネ定数（等価剛性）をそのまま使用する。角折れ緩衝材は要素試験により得られた複素減衰定数 $\gamma = 0.25$ を用いる。ケーブル本体の材料減衰は0.003（名港中央大橋はケーブルのみの実測値）とし、複素固有値解析より得られたn次モード減衰に後から加算する方法とする。

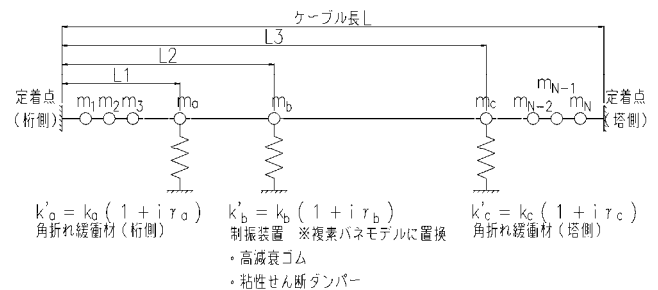


図-2 減衰材3点支持による複素固有値解析モデル

3. 名港中央大橋ケーブル振動実験の再現解析

名港中央大橋では架設後（供用開始前）にレインパイブレーションの発生が確認されるとともに、制振装置の効果確認と設計の妥当性確認のためケーブル加振実験が行われている²⁾。中央径間最上段のC35ケーブルは $\phi 7 \times 397$ の工場製作型、長さ302m、外径161mmのケーブルであり、加振実験により制振装置の各種設置状態による対数減衰率が測定されている（図-3）。

ケーブルのみ(○)での減衰は0.01未満と小さいが、粘性感断型ダンパー設置(□)により0.04程度以上の減衰が得られていることがわかる。また、角折れ緩衝材設置(△)での減衰は0.01~0.02である。

一方、緩衝材+ダンパー設置(▽)では、ダンパー設置(□)の減衰より低く、3次モード以降では0.02程度にまで低下している。これは、緩衝材の剛性によりダンパーの挙動が拘束され、ダンパーの各次モードの最適粘性係数が変化したためと考えられる。なお、1次モードは計測されず、2次モードの減衰低下はほとんどない理由については解明できていない。

この振動実験結果を、2章で示した手法により再現解

キーワード 斜張橋, 角折れ緩衝材, 制振ダンパー, 構造減衰, 複素固有値解析, レインパイブレーション

連絡先 〒330-6011 さいたま市中央区新都心11-2 大日本コンサルタント(株)構造耐震技術センター TEL048-600-6692

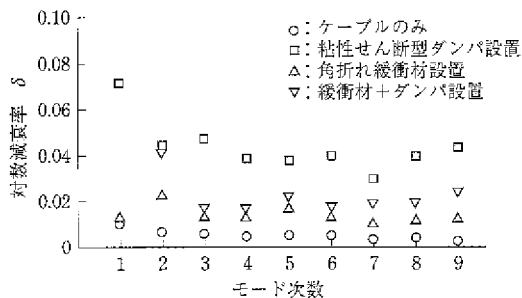


図-3 ケーブル振動実験による減衰測定結果 (C35) ②

析した際の諸元を表-1に、解析結果を図-4にそれぞれ示す。解析諸元のうち、実験時の温度条件のみ不明であり、ここでは0~10℃という実験記録より予備解析した結果、ダンパー温度 10℃の結果を示す。粘性せん断型ダンパーの等価複素減衰定数 γ' は前述したとおり当時のダンパー計算書に示される減衰率 δ をもとにトライアル計算より設定している。

図-4より、粘性せん断型ダンパーを設置した解析は1次モードで多少の誤差があるものの、概ね再現できている。一方、緩衝材+ダンパー設置の解析では、ダンパーのみの解析に対して減衰率が1~3次で43~46%減となっている。低減を示していない実測の2次モードに対しては不整合であるものの、緩衝材を隙間無しで併用することでダンパーの減衰性能が低下するという実測の傾向を再現できているといえる。

表-1 C35 ケーブル振動実験の再現解析諸元

a) ケーブル諸元

ケーブル長さ	ケーブル張力	ケーブル単位重量	ケーブル外径	定着管長さ	定着管内径	振動モード別条件		
						固有振動数		
L0	T	W	ΦD1	L1	ΦD2	f		
m	tf	tf/m	m	m	m	1次	2次	3次
302.27	523.4	0.1065	0.161	8.13	0.542	0.361	0.722	1.083

b) 角折れ緩衝材諸元

設置位置	緩衝材孔径	緩衝材外径	充填長さ	静的せん断弾性率 (0℃)	バネ定数	複素減衰定数
L1	ΦD1	ΦD2	La	G ₀	K1	γ'
m	m	m	m	N/mm ²	tf/m	---
8.13	0.161	0.542	0.2	0.853	128.9	0.25

c) 粘性せん断ダンパー諸元

設置位置	せん断断面積	振幅	粘性体厚さ	温度条件	振動モード別条件					
					等価減衰定数			等価剛性		
L2	S	a	d	t	C _e			K _e		
m	cm ²	cm	cm	℃	1次	2次	3次	1次	2次	3次
8.868	450	0.1	1.0	10	kgf·s/cm	kgf·s/cm	kgf·s/cm	kgf/cm	kgf/cm	kgf/cm
					238.8	168.9	137.9	434.8	594.1	713.1

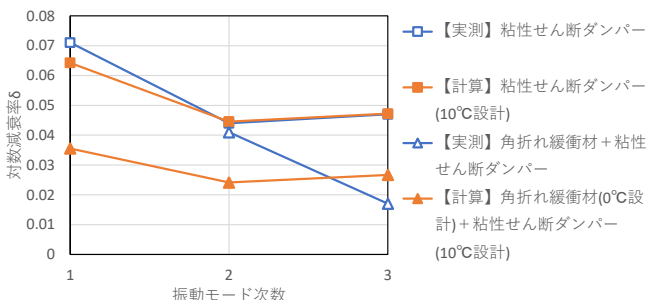


図-4 C35 ケーブル振動実験の再現解析結果

参考文献

- 1) 藤原, 山口, 真辺: 多々羅大橋ケーブル制振対策, 橋梁と基礎, Vol.33, pp.16-19, 1999.5.
- 2) 森内, 鈴木, 上島, 志治: 「名港中央大橋」のケーブル加振実験, 石川島播磨技報, Vol.38, No.2, pp.130-134, 1998.
- 3) 米田, 望月, 瀬戸内: 斜張橋ケーブルを対象とした併用ダンパー方式の減衰評価手法とその設計法に関する研究, 土木学会論文集, No.516/VL27, pp.183-196, 1995.6.

4. ケーブル減衰性能の感度解析

ダンパーの種類、ケーブル径・長さ、ダンパー取付位置及び緩衝材との離れなどをパラメータに、2章に示す方法で感度解析した際の諸元を表-2に、感度解析結果を図-5にそれぞれに示す。

図-5より、②ダンパーを設置することでケーブルの構造減衰は0.03以上が得られている。一方、緩衝材を隙間なしで併用した③では減衰性能が低下し、粘性せん断型ダンパーより高減衰ゴムダンパーの方が減衰性能の低下は顕著である。これは桁側緩衝材とダンパーの離れが高減衰ゴムの場合は0.1mと近接し、緩衝材の剛性が影響したためであり、粘性せん断型ダンパーにおいても離れ比が小さいほど減衰性能の低下が顕著である。また、桁側の緩衝材は隙間を設け、④塔側の緩衝材とダンパーを併用した場合の減衰は②より増加しており、ダンパーから十分離れた位置の緩衝材は隙間を設ける必要がなく、減衰性能は加算されるといえる。

表-2 感度解析ケースの各種諸元

制振装置	ケーブル諸元				緩衝装置設置位置				
	No.	素線本数 (本)	外径 D (mm)	長さ L (m)	単位重量 m (kg/m)	桁側緩衝材 x1 (m)	ダンパー位置 x2 (m)	ダンパー離れ x2-x1 (m)	塔側緩衝材 x3 (m)
高減衰ゴム 0℃	AC1	7φ-421	180	175.1	136.3	5.7	5.8	0.1	173.0
	AC2	7φ-421	180	159.7	136.3	5.6	5.7	0.1	157.6
	AC3	7φ-397	175	134.6	127.8	5.3	5.4	0.1	132.6
	AC4	7φ-253	141	108.6	82.1	5.1	5.2	0.1	106.7
粘性せん断ダンパー 40℃	BC1	7φ-421	180	254.4	136.3	3.4	9.0	5.5	63.1
	BC2	7φ-397	175	216.7	127.8	3.4	7.6	4.2	102.3
	BC3	7φ-337	163	179.0	109.0	3.1	6.0	2.9	139.5
	BC4	7φ-253	141	141.5	82.1	3.0	5.3	2.3	177.0
	BC5	7φ-223	135	104.1	72.9	2.7	4.4	1.7	214.6
	BC6	7φ-223	135	64.9	72.9	2.7	3.4	0.7	252.3

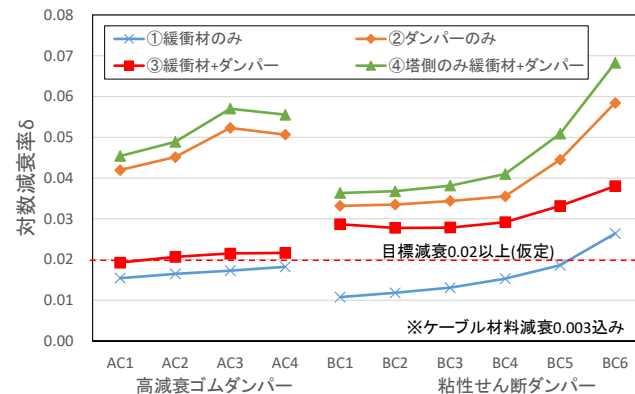


図-5 各種パラメータによる減衰性能感度解析結果

5. おわりに

本検討により、角折れ緩衝材とダンパーを併用する場合、桁側の緩衝材は隙間を設ける必要性が解析的に示された。また、緩衝材とダンパーの離れを調整しやすい粘性せん断型ダンパーでは隙間なしでも目標減衰 (例えば 0.02 以上) を確保できることが示唆された。