

PC長大斜張橋の高減衰化を図る 簡易設計手法に関する一提案

謝 嬋娟¹・山下幹夫²・白鳥愛介³

¹正会員 工博 開発コンサルタント(株) 技術本部企画室 (〒110 東京都台東区東上野2-9-4)

²正会員 開発コンサルタント(株) 技術副本部長

³正会員 開発コンサルタント(株) 技術本部構造室設計第一課課長代理

PC長大斜張橋における耐震性の向上を目指し、高減衰装置を支点部に用いて地震時の応答を低減すべく、その装置の総減衰量を試算できる簡易モデルを提案し、設置個所と配分法を含めた初期段階の免震設計の簡易化設計手法を検討したものである。

Key Words : PC cable-stayed bridge, damper, seismic resistance, simplification

1. はじめに

長大斜張橋のように減衰性能が小さく、振動しやすい構造物は、耐震性向上を目指し、現状において効果的であるダンパーを用いて高減衰化を図り、設計上支配的となる断面力を大幅に低減させ、経済的な設計を実現することが重要である。

しかし、このような設計では、ダンパー特性値の試算が不可欠であり、斜張橋のような複雑な形状を有する構造物において、詳細モデルの検討では多大な計算量となり効率的ではない。本論文は、PC斜張橋の最適免震設計の実用化を図るためには、モデルの簡略化が必要であると考え、最適な総ダンパー量の設定が可能となる3節点簡易モデルと、総ダンパー量の各支点への配分法を研究し、パソコン程度でダンパーの初期設定が行える設計法を提案するものである。

2. 最適総減衰量の設定

(1)簡易モデルの設定

汎用プログラムを使わなくとも総ダンパー量の試算を可能にするため、モデルをできる限り簡略化することが肝要である。そのためには、最も単純なケースとしてダンパーを中間支点のみに配置する斜張橋(図-1)形式で、以下項目の考慮によって3節点

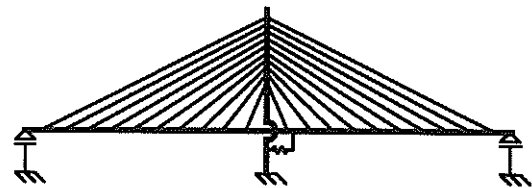


図-1 簡易モデルの検討における対象橋梁

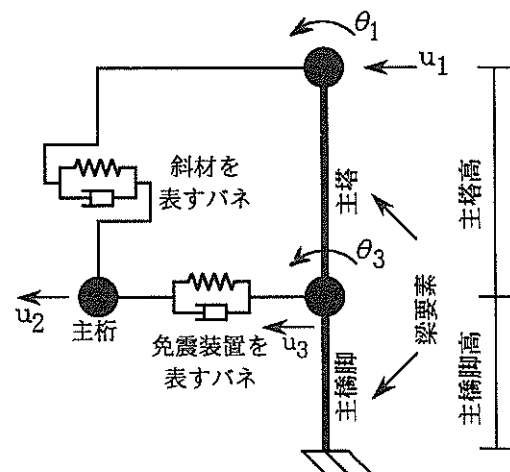


図-2 3節点簡易モデル

簡易モデルを提案した(図-2)。

a) 簡易モデルは、最適総ダンパー量の設定を目的とするものであるため、シミュレーションした各主要応答値の変化傾向さえ詳細モデルと合致すれば、適用性があると考えられる。

- b) 着目する主要応答値は、主塔と主橋脚基部の曲げモーメントであるため、主塔と主橋脚を実物とおりに梁要素とモデル化する。
- c) PC主桁は、鋼桁などに比べて重量と剛性とも大きいので、主にその水平振動が主塔と主橋脚基部曲げモーメントに影響を与えることとなる。そこで主桁は水平移動可能な1節点系とモデル化する。

なお、主塔、主橋脚と斜材の質量は分布質量とし、主桁の質量は集中質量として節点2におくこととした。

運動方程式は次式で表される。

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = -[M]\{1\}\ddot{Z} \quad (1)$$

ここに、

$$[M] = \frac{1}{420} \begin{bmatrix} 156M_T + 140M_C & 22M_T L_T & 70M_C & 0 \\ 22M_T L_T & 4M_T L_T^2 & 0 & 0 \\ 70M_C & 0 & 140M_C + 420M_G & 0 \\ 54M_T & 13M_T L_T & 0 & 0 \\ -13M_T L_T & -3M_T L_T^2 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$[K] = \begin{bmatrix} 12K_T + K_C & 6K_T L_T & -K_C & -12K_T \\ 6K_T L_T & 4K_T L_T^2 & 0 & -6K_T L_T \\ -K_C & 0 & K_C + K_D & -K_D \\ -12K_T & -6K_T L_T & -K_D & 12K_T + K_D + 12K_F \\ 6K_T L_T & 2K_T L_T^2 & 0 & 6(K_F L_F - K_T L_T) \\ 6K_T L_T & 2K_T L_T^2 & 0 & 6(K_F L_F - K_T L_T) \\ 2K_T L_T^2 & 0 & 0 & 0 \\ 6(K_F L_F - K_T L_T) & 0 & 0 & 0 \\ 4(K_F L_F^2 + K_T L_T^2) & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \{u\} = \begin{bmatrix} u_1 \\ \theta_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ \theta_3 \end{bmatrix},$$

$$M_C = \rho c A_C L_C, \quad M_T = \rho r A_T L_T, \quad M_F = \rho f A_F L_F, \\ M_G = \rho c A_G L_G, \quad K_T = E_T I_T / L_T^3, \quad K_F = E_F I_F / L_F^3, \\ K_C = \sum (E_C A_C \cos^2 \alpha / L_C).$$

式中、添字 C, F, T, G, D は、斜材、主橋脚、主塔、主桁とダンパーを表し、 ρ は単位体積あたりの質量、 α はケーブルと主桁の傾斜角度、A は断面積、L は部材の長さ、u は変位、 θ は回転角度、 \ddot{Z} は地動加速度である。

また、 K_C については、計算上の便宜から、次式で求めてもよいと考えられる。

ハープ形に対して：

$$K_C = 0.5nE_C [(A \cos^2 \alpha / L)_{上段} + (A \cos^2 \alpha / L)_{下段}]$$

ファン形に対して：

$$K_C = E_C (A \cos^2 \alpha / L)_{中段}$$

ここに、n は、ケーブルの本数である。

(2) 最適総ダンパー量の簡易計算法

最適総ダンパー量は、地震時橋梁の各主要値が最小となるダンパーの特性値であり、提案簡易モデルを用いて以下のように求めることができる。

- ダンパーの主要特性を表すものをパラメーターにとってパラメータスタディを実施す（バイリニアのような物理系ダンパーには一次剛性 K_1 を、設計に用いる免震装置にはゴム断面積Aやゴム厚tをパラメーターとすればよい）。
- 上記のパラメーターに対し等価線形法の応答スペクトル解析を行う。
- 主桁の最大変位、主塔と主橋脚基部の最大曲げモーメントのフローティングタイプに対する比率を算出し、これらのパラメーターに対する変化傾向を求める。
- 下限値であるケースを見出し、そのダンパー量を最適総ダンパー量と設定する。

(3) 適用性の確認

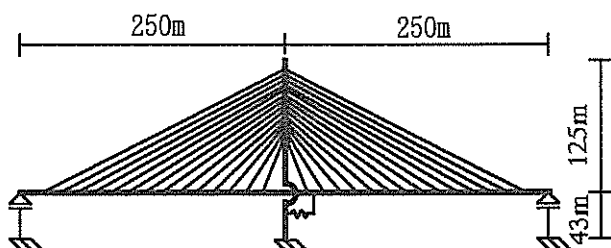
適用性の確認に用いられた橋梁モデルは、図-3に示す支間長の異なる3タイプである。いずれのモデルでも主桁の幅員およびケーブル間隔は同一である。

検証は、ダンパーをバイリニア型（降伏変位 $u_v = 1\text{cm}$ 、一次剛性と二次剛性の比 $K_1/K_2 = 6$ 、ただし、大変位の場合は履歴曲線の退化性を考慮して $K_1/K_2 = 10$ とする）として、等価線形法の応答スペクトル解析で求められた詳細モデルと簡易モデルの各主要応答値の K_1 に対する変化傾向の比較により行った。図-4～図-6には、それぞれ地震外力をL1（震度法のI種地盤用）、L2（保有水平耐力法のI種地盤用）とL3（兵庫県南部地震神戸海洋気象台）レベルと想定する場合の各主要応答値のフローティングタイプに対する低減率とダンパーの一次剛性 K_1 の関係を示す。提案した簡易モデルは、全体的に詳細モデルと変化傾向がほぼ一致し、ダンパー総量の設定には有効であることがわかった。

なお、提案簡易モデルは、汎用プログラムでの解析はむろんの事、パソコンでプログラム化しても容易な計算レベルにあり、実用上の利便性も十分反映できると考えられる。

	$E(\text{tf/m}^2)$	$A(\text{m}^2)$	$I(\text{m}^4)$	$W(\text{tf/m}^3)$
主桁	3.1×10^6	23.6	23.3	3.25
主塔	3.3×10^6	62.3	401.0	2.72
主橋脚	2.8×10^6	209.5	3003.0	2.39
ケーブル	2.0×10^7	0.0499	-	7.94

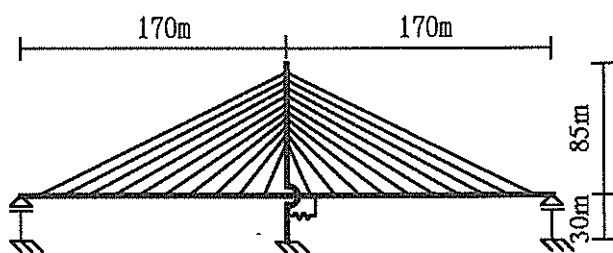
$$L_c = 4296(\text{m}) \quad K_c = 115520(\text{tf})$$



(a) スパン250m

	$E(\text{tf/m}^2)$	$A(\text{m}^2)$	$I(\text{m}^4)$	$W(\text{tf/m}^3)$
主桁	3.1×10^6	23.8	23.8	3.31
主塔	3.3×10^6	51.0	275.5	2.48
主橋脚	2.8×10^6	132.9	1817.7	2.57
ケーブル	2.0×10^7	0.0499	-	7.94

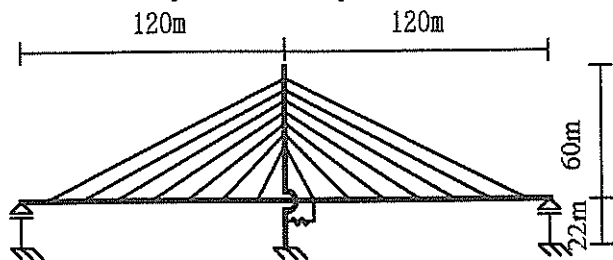
$$L_c = 2112(\text{m}) \quad K_c = 121566(\text{tf})$$



(b) スパン170m

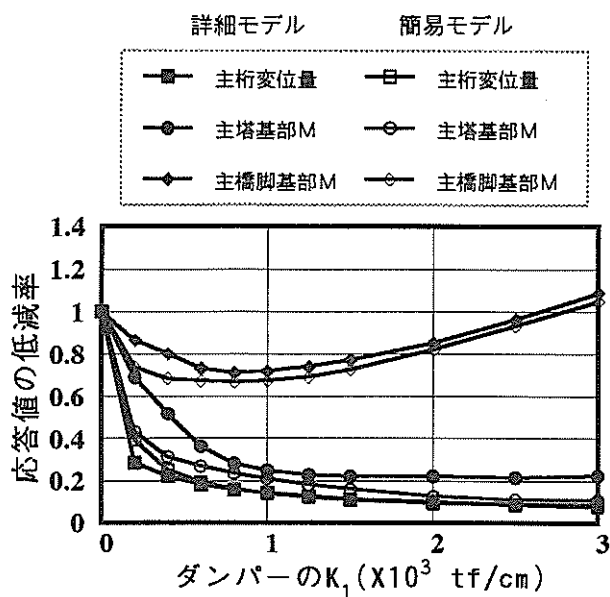
	$E(\text{tf/m}^2)$	$A(\text{m}^2)$	$I(\text{m}^4)$	$W(\text{tf/m}^3)$
主桁	3.1×10^6	23.9	24.2	3.39
主塔	3.3×10^6	44.5	180.9	2.49
主橋脚	2.8×10^6	112.4	990.8	2.60
ケーブル	2.0×10^7	0.0499	-	7.94

$$L_c = 1034(\text{m}) \quad K_c = 123449(\text{tf})$$

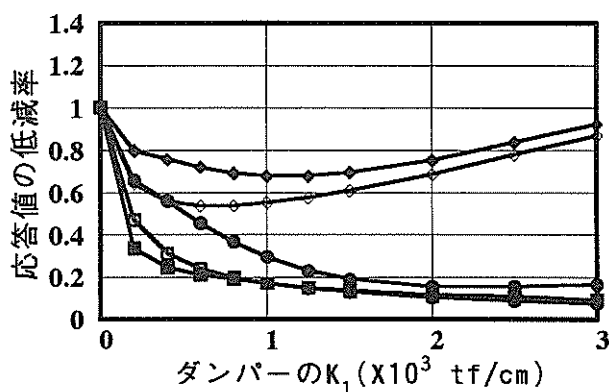


(c) スパン120m

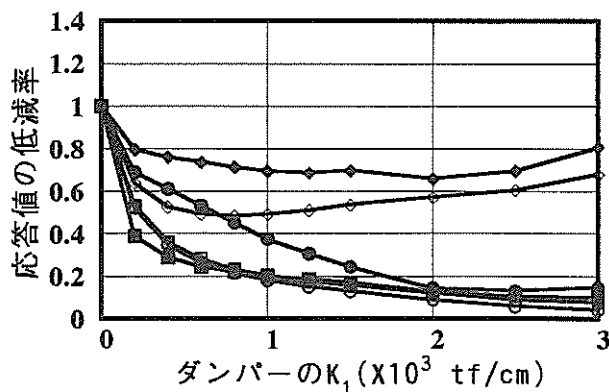
図-3 簡易モデルの検討に用いた解析モデル



(a) スパン250m



(b) スパン170m



(c) スパン120m

図-4 主要応答値の低減率と一次剛性 K_1 の関係 (L1レベル)

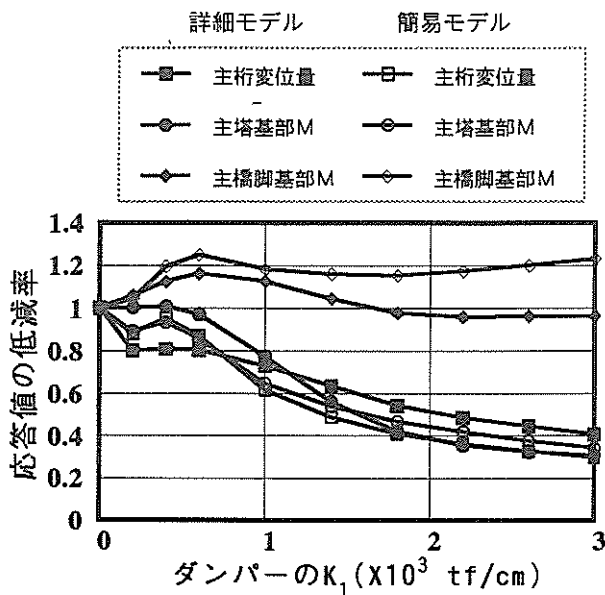


図-5 主要応答値の低減率と一次剛性 K_1 の関係
(L2レベル, スパン250m)

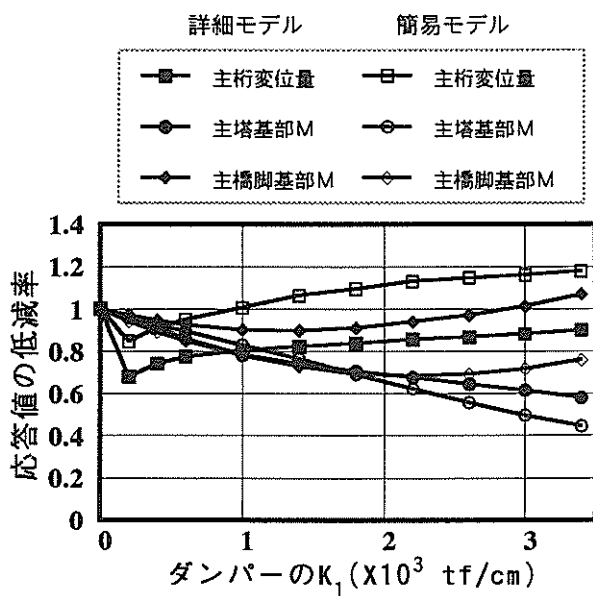


図-6 主要応答値の低減率と一次剛性 K_1 の関係
(L3レベル, スパン250m)

3. 各支点毎への配分

前項は、中間支点のみにダンパーを設置する場合の総ダンパー量の簡便計算法を検討してきたが、ここでは、多点にダンパーを設置する場合、その最適総ダンパー量の変化と各支点への配分法について検討する。

	$E(\text{tf/m}^2)$	$A(\text{m}^2)$	$I(\text{m}^4)$	$W(\text{tf/m}^3)$
主桁	3.1×10^6	23.6	23.3	3.23
主塔	3.3×10^6	75.4	533.9	2.64
主橋脚	2.8×10^6	278.1	4175.0	2.53
ケーブル	2.0×10^7	0.0499	-	7.94

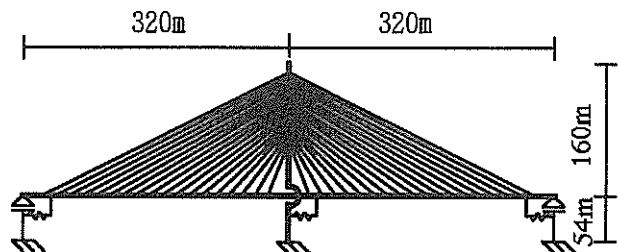


図-7 スパン320mの解析モデル

表-1 検討ケース

スパン長(m)	I_e/I_m	$I_m(\text{m}^4)$	K_{1e}/K_{1m}
170	0.25~1.0	909~3636	0.0~0.5
250		1560~6238	
320		2088~8350	

(1) 検討概要

検討に用いる橋梁は、支間長が170m、250m (図-3の(b)と(a)と同様であるが、端支点にもダンパーを設置した) と320mの2径間PC斜張橋 (図-7、主桁の幅員およびケーブルの間隔がほかのモデルと同様である) である。その支点に設置するダンパーは、2.と同様に、パイリニア型と仮定し、等価線形法によりその非線形性を考慮した。

検討は、主橋脚の剛性 I_m 、端橋脚と主橋脚の剛性比 I_e/I_m 及びダンパーの一次剛性比 K_{1e}/K_{1m} をパラメーターとし、詳細モデルでの応答スペクトル解析を基本に、得られた主要応答値と最適総ダンパー量の変化傾向の比較検討を行った。

また、実用上では等価線形法を用いる場合も多く、ダンパー量を等価剛性 K_B として用いる必要も生じることから、各ケースについてダンパーの等価剛性 K_B と一次剛性 K_1 の関係などにも検討を加えた。

(2) 検討結果

検討対象としたケース及びその最適ダンパー特性値の代表例を表-1と表-2に示した。表より以下の結果が示された。

表-2 スパン長250mの解析ケースとダンパーの最適特性値

I_e/I_m	$I_m (m^4)$	K_{1e}/K_{1m}	ΣK_1 の 最適値	R_m	ΣK_B (tf/cm)	h_{Bm} (%)	h_{Be} (%)	u_{Bm} (cm)	u_{Be} (cm)	K_{Be}/K_{Bm}	
0.50	3119	0.00	800	0.70	231.52	23.4		0.097			
		0.125	1000	0.64	306.93	24.7	23.9	0.084	0.089	0.122	
		0.25	1050	0.61	326.04	24.7	24.3	0.081	0.085	0.245	
		0.50	1100	0.57	348.27	25.1	24.8	0.078	0.081	0.496	
	3119 *0.5	0.00	800	0.65	228.00	23.0		0.101			
		0.25	1000	0.55	303.70	24.4	23.4	0.085	0.095	0.237	
		0.50	1100	0.50	342.35	25.1	24.2	0.079	0.086	0.481	
	3119 *2.0	0.00	800	0.78	231.52	23.4		0.097			
		0.25	1050	0.71	328.75	24.8	24.8	0.080	0.079	0.250	
		0.50	1100	0.68	352.31	25.2	25.1	0.077	0.076	0.503	
	0.25	3119	0.00	800	0.70	231.52	23.4		0.097		
			0.25	1050	0.61	326.04	24.7	24.3	0.082	0.086	0.245
0.50			1100	0.58	348.27	25.1	24.8	0.080	0.080	0.496	
0.75	3119	0.00	800	0.70	231.52	23.4		0.097			
		0.25	1050	0.61	326.04	24.7	24.3	0.081	0.085	0.245	
		0.50	1100	0.57	348.10	25.2	24.7	0.078	0.080	0.492	
1.00	3119	0.00	800	0.70	231.52	23.4		0.097			
		0.25	1050	0.61	326.04	24.7	24.3	0.081	0.085	0.245	
		0.50	1100	0.57	348.10	25.2	24.7	0.078	0.080	0.492	

ここに、

- I_e, I_m : 端、主橋脚の断面二次モーメント(m^4)、
 K_{1e}, K_{1m} : 端、主橋脚の天端に設置するダンパーの一次剛性(tf/cm)、
 ΣK_1 : 各橋脚天端に設置するダンパーの一次剛性のtotal値(tf/cm)で、
 $\Sigma K_1 = 2K_{1e} + K_{1m}$ 、
 R_m : 主橋脚基部Mの応答低減率、
 h_{Be}, h_{Bm} : 端、主橋脚の天端に設置するダンパーの等価減衰定数(%)、
 K_{Be}, K_{Bm} : 端、主橋脚の天端に設置するダンパーの等価剛性(tf/cm)、
 ΣK_B : 各橋脚天端に設置するダンパーの等価剛性のtotal値(tf/cm)で、
 $\Sigma K_B = 2K_{Be} + K_{Bm}$ 、
 u_{Be}, u_{Bm} : 端、主橋脚の天端に設置するダンパーの変位(cm)。

a) 算出した K_{Be}/K_{Bm} の値は、 K_{1e}/K_{1m} の値とほぼ同じであり(表-2)、その最適値(主要応答値の低減傾向)が橋脚の剛性比(図-8)や主橋脚剛性(図-9)に関係しない。

b) スパンが非常に長く、かつ主橋脚剛性が大きい場合を除いて、最適総等価剛性 ΣK_B は、ダンパーの配分率のみに左右され、集中して設ける場合の値に対して式(2)によって補正する必要がある(図-10)。

$$(\alpha - 1)^2 = 0.25 \cdot K_{Be}/K_{Bm} \quad (2)$$

c) 一般的な設計範囲であると考えられる $K_{Be}/K_{Bm} < 0.25$ のケースでは、ダンパーの等価減衰定数(h_{Be} 、 h_{Bm})、支承変位(u_{Be} 、 u_{Bm})は、集中して設ける場合とは大差がない。

4. 最適免震設計法

上記の検討結果から、支点免震の初期設計としては、以下に示すように実施すれば、最適減衰性能が発揮できる免震設計が可能であると考えられる。

- (1) 3節点簡易モデルを用いて、応答スペクトル解析により主橋脚天端のみにダンパーを設ける場合のダンパーの形状(断面積A、厚さt)を試算で求め、ダンパーの等価剛性 K_B 、等価減衰 h_B と支承変位 u_B の値を算出する。
- (2) 端橋脚剛性を考慮し、耐荷力よりダンパーの配分率 $n(n=K_{Bm}/K_{Be})$ を設定する。
- (3) 上記の配分率から式(2)により補正係数 α を求め、最適総ダンパー量 αK_B を下記式により各支点へ配分する。

$$K_{Be} = \alpha \cdot K_B / (n + 2) \quad \text{式(3)}$$

$$K_{Bm} = \alpha \cdot n \cdot K_B / (n + 2) \quad \text{式(4)}$$

ここに、 $n=K_{Bm}/K_{Be}$ 、 K_B は、(1)で求められたものである。

- (4) 各支点に設置するダンパーの等価減衰定数 h_{Be} 、 h_{Bm} および支承変位 u_{Be} 、 u_{Bm} は、集中して設置する場合の等価減衰定数 h_B 及び支承変位 u_B と同等になるように仮定し、 K_{Be} 、 K_{Bm} 、 h_{Be} 、 h_{Bm} 、 u_{Be} と u_{Bm} から各ダンパーの形状決定を行う。

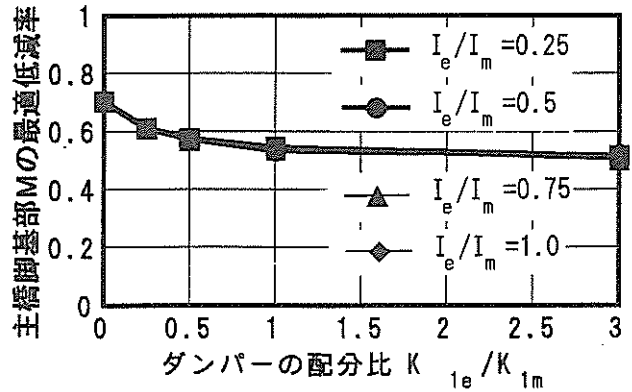


図-8 ダンパー配分比と橋脚剛性比の関係 (スパン250m)

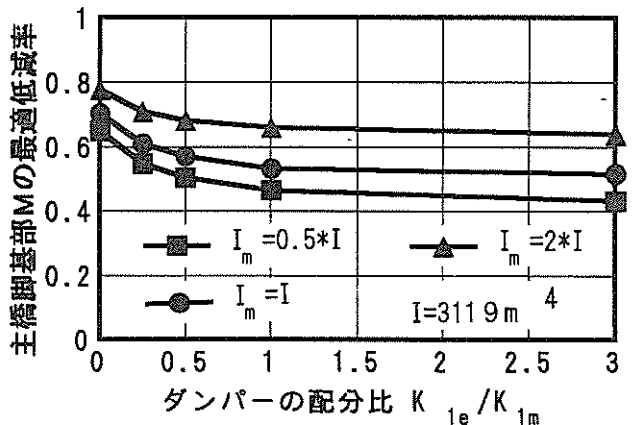


図-9 ダンパー配分比と主橋脚剛性の関係 ($I_e/I_m=0.5$, スパン250m)

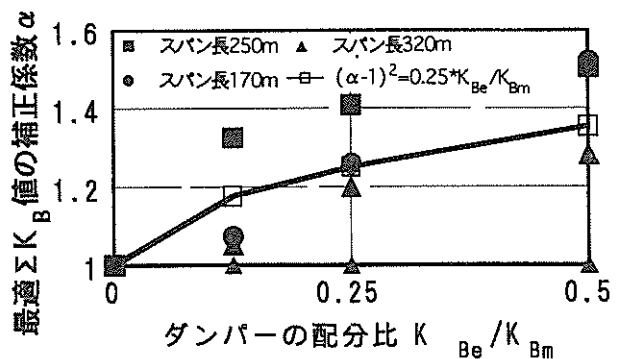


図-10 最適 ΣK_B の補正係数 α と配分比の関係

5. まとめ

PC長大斜張橋の耐震性向上のため、支点ダンパーの効果的な配置で、より高減衰化を図ることが重要である。そのため、この実用化に向けた研究を実施してきた。以下に本研究の成果をまとめる。

- (1) 2径間連続PC斜張橋において、主橋脚上の支点到にダンパーを設けた場合について検討した。検討では、3節点簡易モデルを考案し、主要点の応答値の変化傾向をダンパー特性値とを関連づけ、最適総ダンパー量の簡易設定手法を開発した。
また、この手法および簡易モデルの妥当性は、詳細なモデルでの動的応答解析などを用いて比較検証した。
- (2) ダンパーを1点に設けるのではなく、多支点到に設ける場合についても、支間長、主橋脚剛性、橋脚剛性比、ダンパー剛性比などをパラメーターとした動的応答解析を実施し、各主要点の応答値やダンパー配分による変化傾向を検討したうえで、各支点到へのダンパー配分法を提案した。
- (3) (1)、(2)の検討結果に基づいて、ダンパー形状の初期設定段階に用いる最適支点到免震設計手法を提案した。

6. あとかき

本研究では、3節点簡易モデルを提案し、長大斜張橋の最適免震設計の簡易化を検討したもので、汎用プログラムを使わなくとも適性ダンパー量の試算

が容易に行えることによって省力化が可能となり、免震設計の普及に対し一助となるものと考えられる。しかしながら、このような簡略化が可能なレベルは、ダンパー（免震装置）サイズの初期設定段階に限られることから、最終的には、詳細モデルによる動的応答解析によって免震効果を確認する必要があると考えられる。

なお、本報告は建設省土木研究所、土木研究センター、民間19社による共同研究「高減衰材料を用いた長大橋の免震技術の開発」の一環として行われたものをまとめたものである。

参考文献

- 1) 山下幹夫, 謝 嬋娟, 白鳥愛介: PC長大斜張橋の免震化を図る研究・第一報, 土木学会第49回年次学術講演会概要集, 1-643, pp.1284-1285, 1994.
- 2) 山下幹夫, 謝 嬋娟, 白鳥愛介: PC長大斜張橋の免震化を図る研究・第二報(簡易モデル及びダンパー総量の決定法), 土木学会第50回年次学術講演会概要集, 1-783, pp.1566-1567, 1995.
- 3) 山下幹夫, 謝 嬋娟, 白鳥愛介: PC長大斜張橋の免震化を図る研究・第三報(ダンパーの配分法について), 土木学会第50回年次学術講演会概要集, 1-783, pp.1568-1569, 1995.
- 4) 謝 嬋娟, 山下幹夫: PC長大斜張橋の免震化を図る研究・第四報(最適免震設計法について), 土木学会第51回年次学術講演会概要集, 1-B42, pp.84-85, 1996.

(1996.9.14 受付)

THE STUDY ON SIMPLIFICATION ABOUT OPTIMUM MENSHPIN DESIGN OF PC CABLE-STAYED BRIDGE

Senken SHA, Mikio YAMASHITA and Yoshiyuki SHIRATORI

A study on simplification about optimum Menshin design of PC cable-stayed bridge installed by dampers at the deck-pier connections is conducted in this paper. First, a three-node simplified model, which can be conveniently used to determine the total quantity of damper required, is proposed. Next, a distributive method of the total quantity of damper is presented by parameter study with span length, stiffness of pier, stiffness of damper and so on as its parameters. Finally, based on the proposed simplified model and distributive method, a simplified method of optimum Menshin design of PC cable-stayed bridge is presented.