

常時微^{VI}による構造物の減衰常数推定における問題点

九州大学 正員 小坪 清真
 〃 学生員 〇鳥野 清
 大林組 正員 串岡 正敏

I. まえがき

現在、我国では多くの長大橋梁が計画、建設されているが、世界でも有数の地震国であるため、特に、これら長大橋梁の耐震設計が重要な問題となってくる。構造物の耐震設計上必要となる振動性状として解明すべき重要な要素は固有振動数、共振時変位モード、減衰常数である。

これら振動性状の検出としては、従来、起振機による振動試験があるが、これは多大の労力を必要とする。著者等は今までに、常時微動測定から得られたランダムなデータを統計的に処理し、つまりパワースペクトルを出し、それから固有振動数、共振時変位モードをかなりの精度で求められることを示した。全く同様の手法で、常時微動から減衰常数の算出を行なったのが本研究である。

一般に、この手法で減衰常数が算出できるのは、減衰常数が小さいか、あるいは、相隣なる固有振動数が離れている場合であるが、これを一歩拡張して、減衰常数が大きいか、あるいは、相隣なる固有振動数が近接している場合の計算法と計算例を示すと共に、実際に、高千穂橋梁（宮崎県）、名護屋大橋（佐賀県）で行なった実験（常時微動測定と起振機による振動試験）の結果と比較して、この方法の有効性を示す。

II. 減衰常数

(1). 多自由度系の変位応答

S次の振動型 $Y_s(z)$ 、固有振動数 n_s 、減衰常数 h_s の多自由度系が地震加速度 $\ddot{\phi}(t)$ を受ける時、任意点入りのセプタンスを $\alpha(i\omega)$ 、外力 P のパワースペクトルを $S_f(\omega)$ とすると、任意点入りの変位のパワースペクトル $S_y(\omega)$ は次式で表わせる。

$$S_y(\omega) = |\alpha(i\omega)|^2 \cdot S_f(\omega) \quad \alpha(i\omega) = -\sum_{s=1}^S \frac{\beta_s \cdot Y_s(z)}{n_s^2 - \omega^2 + 2i h_s n_s \omega} \quad (1)$$

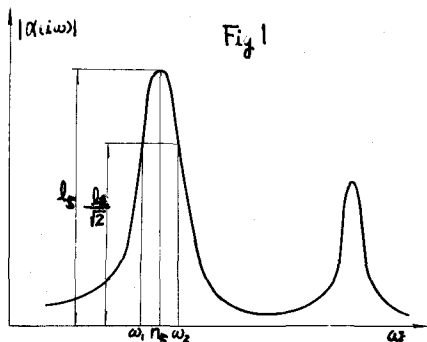
β_s はS次の利係数

S次のリセプタンス $\alpha(i\omega)$ の絶対値は次式となる。

$$|\alpha(i\omega)| = \frac{\beta_s \cdot Y_s(z)}{n_s^2 \sqrt{(1 - (\frac{\omega}{n_s})^2)^2 + 4 h_s^2 (\frac{\omega}{n_s})^2}} \quad (2)$$

(2). 減衰常数が小さいか、又は固有振動数が離れている場合 (Fig 1)

$|\alpha(i\omega)|_{\max}$ の $1/\sqrt{2}$ なる点の振動数を ω_1, ω_2 ($\omega_2 > \omega_1$) とすると (2) 式より次の関係式が求められる。



$$\frac{\beta_s \cdot Y_s(x)}{\eta_s^2 \sqrt{(1 - (\frac{\omega}{\eta_s})^2)^2 + 4\beta_s^2 (\frac{\omega}{\eta_s})^2}} = \frac{\beta_s \cdot Y_s(x)}{\eta_s^2 \sqrt{(1 - (\frac{\omega}{\eta_s})^2)^2 + 4\beta_s^2 (\frac{\omega}{\eta_s})^2}} = \frac{\beta_s \cdot Y_s(x)}{2\sqrt{2}\beta_s \eta_s} \quad (3)$$

$\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1$ とおくと (3) 式から減衰係数 β_s は次式で示される。

$$\beta_s = \Delta\omega / (2 \cdot \eta_s) \quad (4)$$

(3). 減衰係数が大きい、又は固有振動数が近接している場合 (Fig 2)

ト次、S 次のリセスタンスの最大値 l_r 、 l_s は (2) 式を用いて求められる。

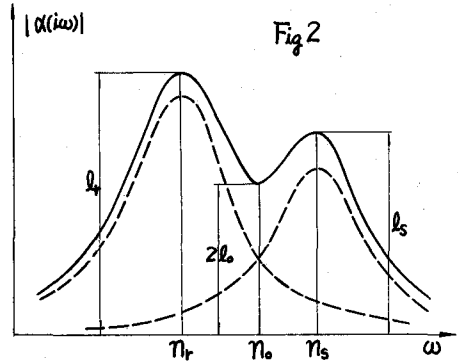
$\eta_r/\eta_s = N$ 、 $\eta_o/\eta_r = N_r$ 、 $\eta_o/\eta_s = N_s$ とおけば

$$\begin{aligned} l_r &= |\alpha_r(i\eta_r)| + |\alpha_s(i\eta_r)| \\ &= \frac{\beta_r \cdot Y_r(x)}{2\beta_r \eta_r^2} + \frac{\beta_s \cdot Y_s(x)}{\eta_s^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{(1-N^2)^2 + 4\beta_s^2 N^2}} \quad (5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} l_s &= |\alpha_r(i\eta_s)| + |\alpha_s(i\eta_s)| \\ &= \frac{\beta_r \cdot Y_r(x)}{\eta_r^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{(1-N^2)^2 + 4\beta_s^2 N^2}} + \frac{\beta_s \cdot Y_s(x)}{2\beta_s \eta_s^2} \quad (6) \end{aligned}$$

$$l_o = |\alpha_r(i\eta_o)| = \frac{\beta_r \cdot Y_r(x)}{\eta_r^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{(1-N_r^2)^2 + 4\beta_r^2 N_r^2}} \quad (7)$$

$$l_o = |\alpha_s(i\eta_o)| = \frac{\beta_s \cdot Y_s(x)}{\eta_s^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{(1-N_s^2)^2 + 4\beta_s^2 N_s^2}} \quad (8)$$



(7)、(8) 式を (5)、(6) 式に代入して、 $\beta_r \cdot Y_r(x)/\eta_r^2$ 、 $\beta_s \cdot Y_s(x)/\eta_s^2$ を消去すると次式が得られる。

$$l_r = \frac{l_o}{2\beta_r} \sqrt{(1-N_r^2)^2 + 4\beta_r^2 N_r^2} + \frac{l_o \sqrt{(1-N_s^2)^2 + 4\beta_s^2 N_s^2}}{\sqrt{(1-N^2)^2 + 4\beta_s^2 N^2}} \quad (9)$$

$$l_s = \frac{l_o \sqrt{(1-N_r^2)^2 + 4\beta_r^2 N_r^2}}{\sqrt{(1-N^2)^2 + 4\beta_s^2 N^2}} + \frac{l_o}{2\beta_s} \sqrt{(1-N_s^2)^2 + 4\beta_s^2 N_s^2} \quad (10)$$

(9)、(10) 式より β_s 、 β_r を求める方法として、これらの式を次式のように使用する。

$$\beta_r^2 = \frac{(1-N_r^2)^2}{4 \left\{ \left(\frac{l_r}{l_o} - \sqrt{(1-N_s^2)^2 + 4\beta_s^2 N_s^2} \right) / \sqrt{(1-N^2)^2 + 4\beta_s^2 N^2} \right\}^2 + N_r^2} \quad (11)$$

$$\beta_s^2 = \frac{(1-N_s^2)^2}{4 \left\{ \left(\frac{l_s}{l_o} - \sqrt{(1-N_r^2)^2 + 4\beta_r^2 N_r^2} \right) / \sqrt{(1-N^2)^2 + 4\beta_r^2 N^2} \right\}^2 + N_s^2} \quad (12)$$

β_r 、 β_s の近似解は (4) 式から求められるので、その前後を小さくきざんで、 $\beta_s = f(\beta_r)$ と $\beta_r = f(\beta_s)$ のグラフを描き交点を求めて解を出す。

(4). 計算例

(3) の場合の実例が見当たらないので、その信頼性のチェックのために、固有振動数、減衰係数をあらかじめ仮定して描いたパワースペクトル曲線から求めてみた。Fig 3 に於いて、(1) なる実線は減衰係数 ($\beta_r = 0.02$ 、 $\beta_s = 0.05$)、固有振動数 ($\eta_r = 20.0$ 、 $\eta_s = 25.0$ rad/s) なるパワースペクトル曲線、ト次、S 次とも共に Peak の 1/2 なる振動数内 ($\Delta\omega$) がとれる場合、(2) なる破線は $\beta_r = 0.05$ 、 $\beta_s = 0.05$ でト次だけ $\Delta\omega$ がとれる場合、(3) なる一点鎖線は $\beta_r = 0.10$ 、 $\beta_s = 0.05$ でト次、S 次とも $\Delta\omega$ がとれない場合である。

Table 1 がその計算結果である。この中で近似解というのは(4)式を使用し得た値であり $\Delta\omega$ のとれない場合は、片方の傾きを考慮して推定したものである。近似解に比べて著者等の示した(11)、(12)式を使用するとかなりの精度で求められ、(4)式では20~50%程度の過小評価していることがわかる。

III. 実験

実際の橋梁に常時微動を測定し、その結果からパワースペクトルを計算し減衰定数の算出を行ない、起振機による振動試験から得られた値と比較を行なった。

(1). 高千穂橋梁

高千穂橋梁(宮崎県)は高橋脚上に架設された三全直連続トラス鉄道橋である。

Fig 4 はその形状図であり、○印の位置に速度型電磁式地震計(感度

2V/cm/sec、固有振動数

0.3%と1.0%の

2種類)を設置し、騒

音の少ない夕オ、デー

タコーダーに常時微動

を記録した。

このデータをそのまま

処理すると、他の次数

に比べて1次のパワー

が大きすぎるため、2

次以上パワースペク

トルをとる場合には、

フィルターで1次をカット

する再処理を行ない

、これをAD変換器に

かけ各測点60個毎、

合計4070個づつ、

Digital化したF

FT(高速フーリエ変

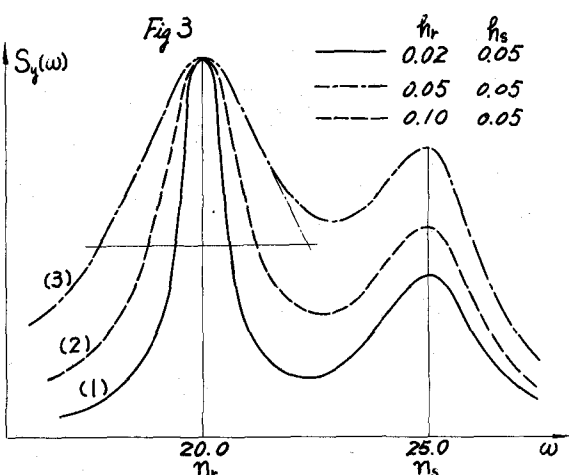
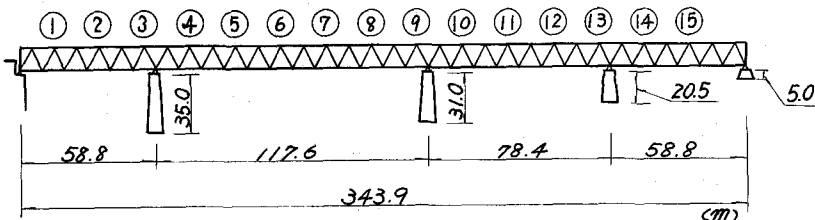


Table 1 計算結果

種類	1		2		3	
	h_r	h_s	h_r	h_s	h_r	h_s
観測値	0.02	0.05	0.05	0.05	0.10	0.05
近似解	0.025	0.058	0.062	0.064	0.115	0.076
厳密解	0.022	0.048	0.052	0.051	0.096	0.052

高千穂橋梁-線形形状図

Fig 4



○ 地震計設置位置

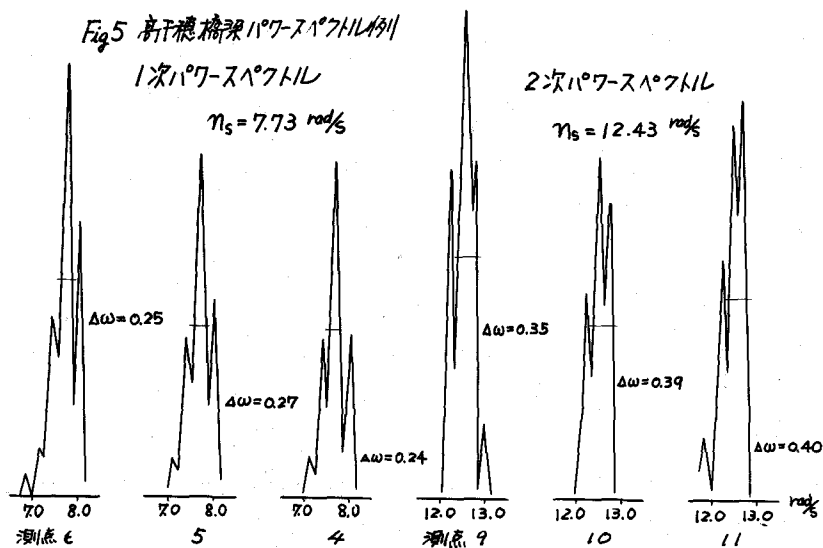
Fig 5 高千穂橋梁パワースペクトル例

1次パワースペクトル

$\eta_s = 7.73 \text{ rad/s}$

2次パワースペクトル

$\eta_s = 12.43 \text{ rad/s}$



換)でパワースペクトルを求めた。

Fig 5 は1次、2次のパワースペクトルの例と減衰常数の算出結果は Table 2 である。

(2). 名護屋大橋

名護屋大橋(佐賀県)は Fig 6 所示の形状をもつ。ディレクター道路橋である記録、データ処理は全く、高千穂橋梁と同じである。Fig 7、Table 3 はそのパワースペクトルの例と結果である。

Ⅳ. あとがき

Table 2 では1次、2次はよくあつた2いるが3次以上では過少評価をし2いる。

Table 3 でも1次はよくあつた2いるが、他の次数では完全に一致しないといえない。

この原因とし2、常時微動が非常に小さな振動を対象とし2あり、中でも高次になる程、変位が小さくなつてくるためと思われる。1次はそのパワーが大きいの22つの実験ともよく合つてい3る2であ3う。又、起振機による振動試験でも、変振曲線、変位モードから求めた値も多少異なり、バラツキも大きい。

大体に於いて、この簡単な方法で、耐震設計に必要な次数までの減衰常数は算出でき3ると思3う。ただ高次になると、多少この常時微動による方法では過少評価すると思われる。

参考文献

Random Vibration ... J.D. Robson、基礎工学4(岩波)数値解析Ⅱ、Bient Vibration Survey of New Port Bridge (Report No. 0370-2150) ... Bureau of Public Roads、常時微動によるモノ集用化(土木学会第26回講演集) ... 小坪、鳥野、串岡

Table 2 高千穂橋梁減衰常数

(%)

パワースペクトル曲線														起振機試験		
次数	2	3	4	5	6	7	8	10	11	12	14	15	平均	共振曲線	変位モード	
1			1.55	1.75	1.62								1.64	1.22	1.62	
2								1.57	1.59	1.52			1.56	1.18	1.77	
3		0.51				0.68	0.71						0.63	0.89	1.91	
4		0.91	0.95				0.60						0.83	1.31	1.51	
5											0.44	0.51	0.48	1.46	1.55	

名護屋大橋一般形状図

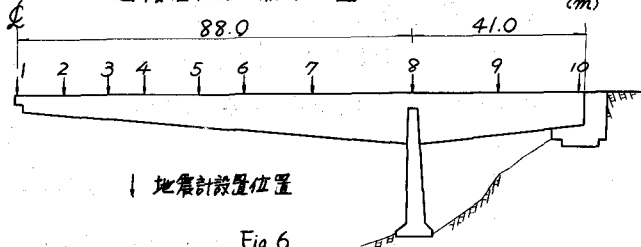


Fig 7

上下方向

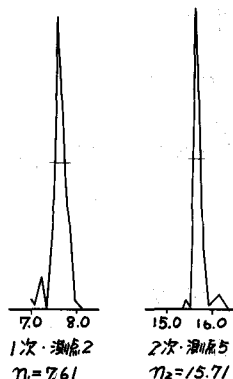


Fig 6

水平方向

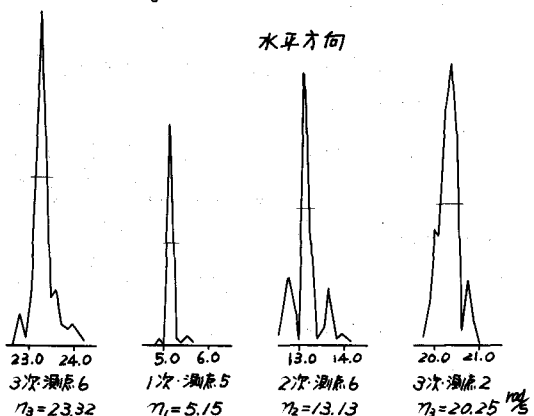


Table 3 名護屋大橋減衰常数

(%)

方向	次数	パワースペクトル曲線							起振機試験	
		1	2	3	4	5	6	平均	共振曲線	変位モード
上	1	1.58	1.31	1.31				1.40	1.43	
	2					0.51	0.48	0.50	0.29	
下	3	0.41				0.54	0.46	0.45	0.42	
	1				1.46	1.12		1.29	1.13	
水	2					0.64	0.57	0.61	0.38	
	3	0.54	0.90			0.37		0.60	1.14	