不規則振動計測による構造物の減衰定数の一解析法

九州大学　学生員　○藤島義久
九州大学　正員　鳥野清
九州大学　正員　園田敏矢

1. まえがき

各種構造物の耐震設計において重要な要素となる減衰定数は振動試験により求めなければならない。試験には起振機試験と常時微動試験とがあるが，このうち後者は比較的簡便であるが，不規則応答を処理しパワースペクトルの形状より求めるので，減衰定数算定において誤差が大きい。そこで本研究は多自由度系の不規則応答をモード解析を用いて各次数に分離し、各次数の応答値に対して1自由度系の不規則応答理論から各次数の減衰定数を精度よく求めようとするものである。

2. 解析理論

多自由度系を1自由度系に分解する方法

〈1〉第1法：変位モードの直交性を用いる解法

構造物をp個の多質点系に置換し、質点iの質量をm_i，S次の変位モードをY_{is}とする。いま各質点iの不規則応答$y_i(t)$が同時にp個測定されているとする。このとき，$y_i(t)$はS次の基準座標$a_s(t)$と変位モード$Y_{is}(t)$を用いて、

$$y_i(t)=\sum_{s=1}^{p} a_s(t)\cdot Y_{is} \quad \cdots (1)$$

(1)式に順次m_iY_{i1} $(i=1,\cdots,p)$をかけて両辺の総和をとれば

$$\sum_{i=1}^{p} m_iY_{i1}y_i(t)=\sum_{i=1}^{p} a_1(t)m_iY_{i1}^2+\cdots+\sum_{i=1}^{p} a_r(t)m_iY_{i1}Y_{ir} \quad \cdots (2)$$

ここで変位モードの直交性 $\sum_{i=1}^{p} m_iY_{i1}Y_{is}=0$ $(S=1,\cdots,r)$を用いると(2)式の右辺第2項以下は全てゼロになるので，直ちに次式が得られる。

$$\sum_{i=1}^{p} m_iY_{i1}y_i(t)=a_1(t)\sum_{i=1}^{p} m_iY_{i1}^2 \quad \cdots (3)$$

$$\therefore\ a_1(t)=\sum_{i=1}^{p} m_iY_{i1}y_i(t)\Big/\sum_{i=1}^{p} m_iY_{i1}^2 \quad \cdots (4)$$

同様にして(1)式に順次m_iY_{is} $(S=1,\cdots,p)$をかけてやると，$a_s(t)$は

$$a_s(t)=\sum_{i=1}^{p} m_iY_{is}y_i(t)\Big/\sum_{i=1}^{p} m_iY_{is}^2 \quad \cdots (5)$$

〈2〉第2法：構造物の質点重量が判らず，全測点同時測定不可の場合

いまg個の質点で不規則応答が同時測定されたとすると，$y_i(t)$と$a_s(t)$は，

$$\begin{vmatrix} y_1(t) \\ \vdots \\ y_g(t) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1r} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ Y_{g1} & Y_{g2} & \cdots & Y_{gr} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} a_1(t) \\ \vdots \\ a_r(t) \end{vmatrix} \quad \cdots (6)$$

(6)式が解けるには、$r \leq g$であることが必要で，$r=g$の時には連立方程式，$r<g$ならば最小自乗法を用いて$a_s(t)$を求める。$r>g$の時にはフィルターをかけ、求めたい次数をg個以下にして上式を用いる。

以上より得られる基準座標$a_r(t)$が1自由度の不規則振動であることを用いて、各次の自己相関関数を求めれば、直ちに減衰定数が得られる。

3. 模型実験

〈1〉模型概要：図.1に示すような5層ラーメンを模型に選び，入力（振動台）及び各層に加速度計を取り付け，測点とした。ここで用いた加速度計はひずみ式加速度計AS-2C（固有振動数100Hz，容量2g）である。

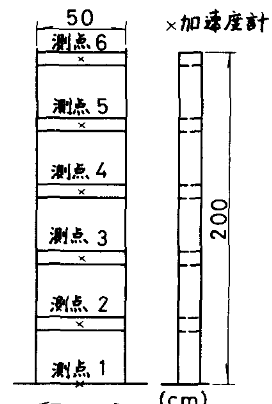

図.1

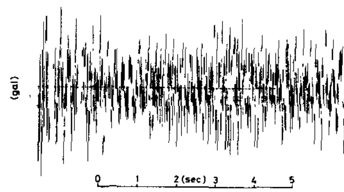

図.2

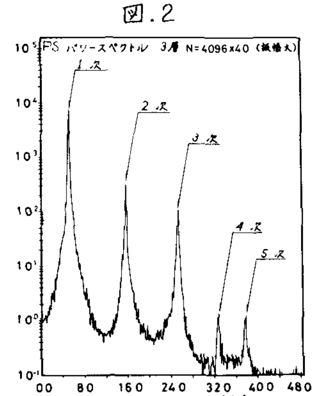

図.3

<2>実験概要及び結果・まず、構造物の常時微動に相当するものとして、振動台のランダム波加振を行なった。即ちホワイトノイズ発生器からのランダム波で加振し、この時の入力加速度と各層の応答加速度をデータレコーダに記録し、これをスペクトル解析して変位モードと固有振動数を求め、前述した2つの解法から減衰定数を求めた。得られた変位モードが図.4である。変位モードの直交性は表.1のように満足されているのがわかる。次に振動台の正弦波加振を行ない、得られた共振曲線から減衰定数を求めた。さらに各次共振振動数において振動台を急停止し、自由減衰振動から減衰定数を求めた。この際，加速度のレベルをランダム波加振時の自乗平均と同程度にした。

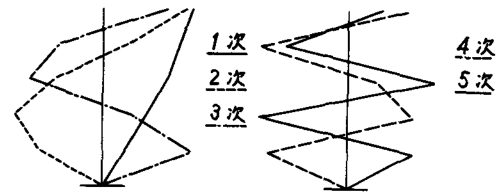

図.4

1次	2次	3次	4次	5次	
+2.570	+0.093	+0.114	+0.148	+0.163	1次
	+2.896	-0.003	+0.092	+0.030	2次
		+2.597	+0.012	+0.173	3次
			+2.960	-0.135	4次
				+3.187	5次

表1　変位モードの直交性 ($\Delta t = 1/500$, N=4096)

実験結果については，図.2にランダム波加振時の応答加速度を示す。この記録をローパスフィルターで56Hz以上をカットし、サンプリング間隔1/500秒でAD変換しデータ個数4096,8192に対してFFTを用いパワースペクトルを得た。図.3は4096個の場合を示す。図.5は上記の第2法による計算結果の一例である。図.6にはこの分離された基準座標に対する自己相関関数を示す。共振曲線は図.7に示している。又図.8は得られた自由減衰振動を3次まで示したものである。

最後に各解法により算出された減衰定数を表.2にまとめておく。

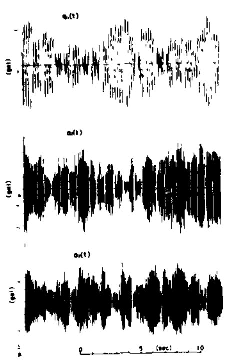

図.5

4. 考察

表.2において各解析法を比較してみると，最も信頼し得る自由減衰振動に対して、明らかに従来の手法，即ち全次数を含んだランダム振動のスペクトル解析から得られた値よりも、今回の各次数に分解して解析する手法がかなり精度が良くなっていることがわかる。本法は上述した常時微動への適用ばかりでなく、構造物の地震時応答記録についても適用可能で、微小振動時と地震時との減衰定数の相違を高次まで求められ、今後の耐震設計に有効であろう。

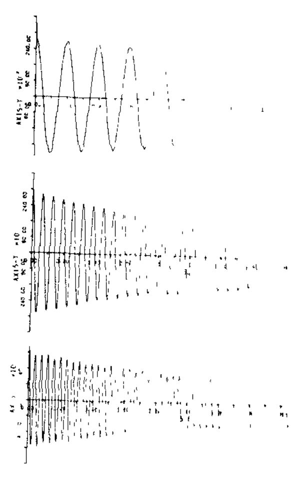

図.6

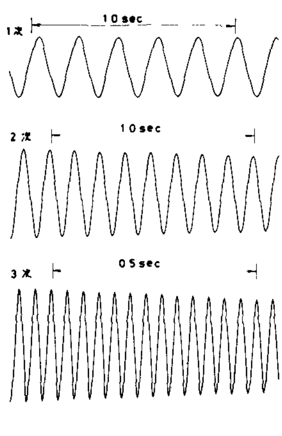

図.8

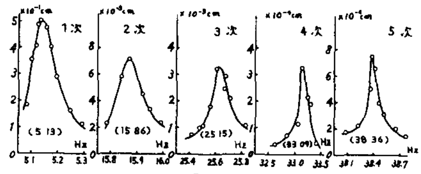

図.7

	常時微動試験				起振機試験	
	パワースペクトル		基準座標の自己相関		自由減衰振動	共振曲線
	N=4096	N=8192	第1法	第2法		
1次	1.24	1.16	0.71	0.66	0.72	0.83
2次	0.50	0.51	0.69	0.48	0.32	0.56
3次	0.66	0.40	0.43	0.35	0.21	0.19
4次	0.60	0.31	0.14	0.37	0.36	0.14
5次	0.46	0.28		0.12	0.32	0.08

(N=8192)　(%)

表.2