

I-177 常時微動による構造物の振動モード解析について

九州大学 正員 小坪 清 真
同 学生員 荒牧 軍 治
同 同 岡山 泉 達 弥

1. 緒言

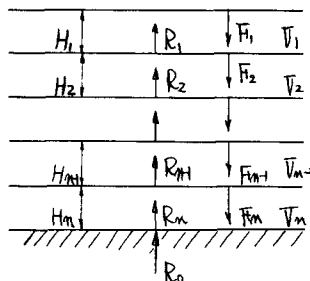
常時微動測定による地震時地盤卓越周期の推定，ランダムな走行荷重による橋梁の振動を解析しその固有振動周期を求めるなど，不規則振動論を応用して地盤および構造物の振動性状を解析することが各方面で行われている。しかし，これらは構造物の固有周期や減衰定数を解析することにより，振動型まで解析した例は少ない。本論文は，常時微動を測定解析することにより，構造物の固有周期や減衰定数ばかりでなく，その振動型をも解析できることを示したものである。

2. 地盤のパワースペクトルと振動型

常時微動を基盤からの入射波による上層地盤の重複反射の現象と考えれば，常時微動のパワースペクトルの地盤深さ方向の分布は地盤のせん断振動の振動型と一定の関係にあるであろう。図-1 は n 層地盤における上昇波 R_i と下降波 F_i とを示したもので次の関係が成立つことは周知のとおりである。

$$\left. \begin{aligned} F_1(T) &= R_1(T - H_1/V_1) \\ R_1(T) &= \gamma_1 R_2(T - H_2/V_2) + \beta_1' F_1(T - H_1/V_1) \\ F_2(T) &= \beta_2 R_2(T - H_2/V_2) + \gamma_1' F_1(T - H_1/V_1) \\ R_2(T) &= \gamma_2 R_3(T - H_3/V_3) + \beta_2' F_2(T - H_2/V_2) \\ &\vdots \\ F_n(T) &= \beta_n R_n(T - H_n/V_n) + \gamma_{n-1}' F_{n-1}(T - H_{n-1}/V_{n-1}) \\ R_n(T) &= \gamma_n R_0(T) + \beta_n' F_n(T - H_n/V_n) \end{aligned} \right\} (1)$$

図-1 上昇下降波



ここに， V_i は各層の波動速度， γ_i は $(i-1)$ 層と i 層間の透過係数と反射係数， γ_i' ， β_i' は i 層と $(i+1)$ 層間の透過係数と反射係数である。

基盤からの入射波 $R_0(T)$ を用いて各層の波動の大きさを求めることができる。ここでは $R_0(T)$ として，0.25 % から 0.25 % おきに 10 % までの振動数成分を一樣に含む人工ランダム波を用い，図-2 に示す一層および二層地盤に対して波動の重複反射を計算し各深さでの波動のパワースペクトルを求めた。これが，図-3 である。次に，このスペクトルがピークを示す振動数におけるパワースペクトルの平方根の深さ方向の分布を示したものが図-4 の丸印である。

一方，せん断振動論によりこの地盤の固有振動数を求めると前記波動論による卓越振動数とよく一致する。また，図-4 の実線は振動論によって得られたせん断振動型を表す。

図-2 地盤

(a) 一層地盤	(b) 二層地盤
地表面 0	地表面 0
$w = 1.96 \text{ t/m}^2$	$G_1 = 8,000 \text{ t/m}^2$
$G_1 = 32,000 \text{ t/m}^2$	-----10m
$V_1 = 400 \text{ m/s}$	$G_2 = 24,500 \text{ t/m}^2$
30m	-----24m
基盤	基盤
$V_0 = 1200 \text{ m/s}$	$G_0 = 288,000 \text{ t/m}^2$

これらの数値計算から明らかに、基盤から入射する波動の重複反射によって生ずる地盤の卓越振動数における波動のパワースペクトルの平方根の分布は、せん断振動論によって求められる地盤の振動型に相似であることがわかった。したがって、一般の構造物においても、構造物の各点で常時微小動を測定することによって、その振動型が解析できるものと思われる。

3. 不規則振動論による多自由度系の変位応答

単位長重量 $w(x)$, r 次の振動型が $Y_r(x)$, r 次の固有円振動数が n_r , 減衰定数が h_r の多自由度系が地動加速度 $\phi(t)$ をうけるときの振動変位のパワースペクトル $S_y(w)$ は次式で表わされる。

$$S_y(w) = |dy(iw)|^2 S(w) \quad (2)$$

ここに、 $dy(iw)$ は任意点 x のリセパタンス、 $S(w)$ は地動のパワースペクトル

である

$dy(iw)$ は次式で表わされる。

• パワースペクトルの平方根
— 振動論

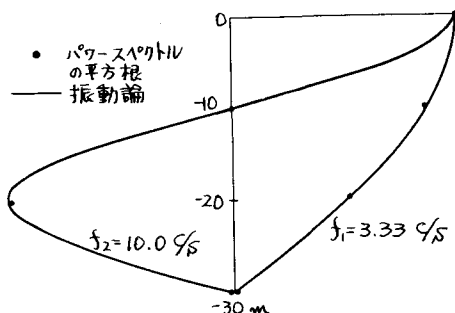
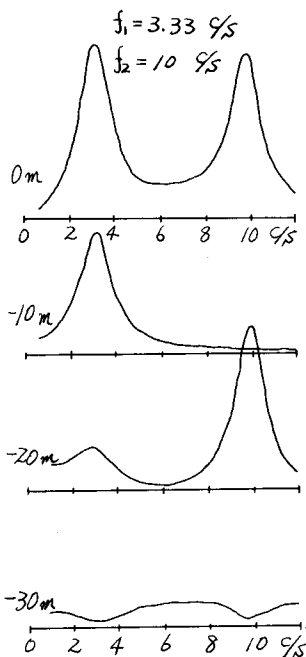


図-4 パワースペクトルの平方根の分布

(a) 一層地盤

図-3 地盤のパワースペクトル

(a) 一層地盤



(b) 二層地盤

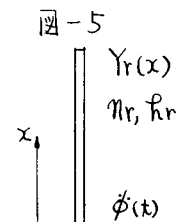
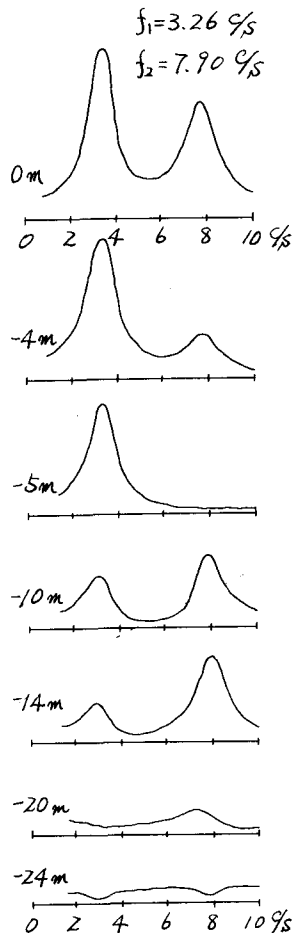
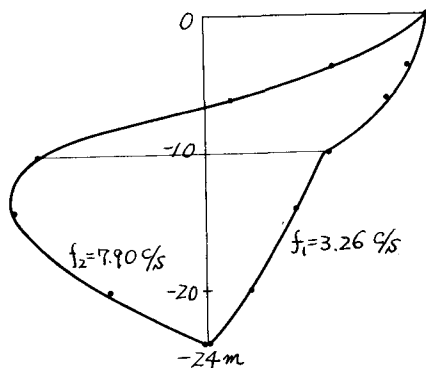


図-5

(b) 二層地盤



$$dy(i\omega) = \sum_r \frac{\beta_r Y_r(x)}{\eta_r^2 - \omega^2 + 2i\eta_r \omega} \quad (3) \quad (\beta_r \text{ は } r \text{ 次の刺激係数})$$

$$|dy(i\omega)|^2 = \left\{ \sum_r \frac{\beta_r Y_r(x)(\eta_r^2 - \omega^2)}{(\eta_r^2 - \omega^2)^2 + 4\eta_r^2 \omega^2} \right\}^2 + \left\{ \sum_r \frac{\beta_r Y_r(x) \cdot 2\eta_r \omega}{(\eta_r^2 - \omega^2)^2 + 4\eta_r^2 \omega^2} \right\}^2 \quad (4)$$

η_r が十分小さくかつ、固有振動数がはなれている場合には、近似的に次式で表わされる。

$$|dy(i\omega)|^2 = \sum_r \left\{ \frac{\beta_r Y_r(x)(\eta_r^2 - \omega^2)}{(\eta_r^2 - \omega^2)^2 + 4\eta_r^2 \omega^2} \right\}^2 + \sum_r \left\{ \frac{\beta_r Y_r(x) 2\eta_r \omega}{(\eta_r^2 - \omega^2)^2 + 4\eta_r^2 \omega^2} \right\}^2$$

$$\approx \sum_r \beta_r^2 Y_r^2(x) \frac{1}{(\eta_r^2 - \omega^2)^2 + 4\eta_r^2 \omega^2} \quad (5)$$

したがって、 β 次の固有振動数における変位のパワースペクトルの分布は次式となる。

$$S_y(\omega) = \left\{ \sum_r \beta_r^2 Y_r^2(x) \frac{1}{(\eta_r^2 - \omega^2)^2 + 4\eta_r^2 \omega^2} \right\} \cdot S(\omega) \quad (6)$$

$\eta_r = \eta_s$ における値が特に大きくなるので、上式の値は次のようになる

$$S_y(\omega) = \beta_s^2 Y_s^2(x) \frac{S(\omega)}{4\eta_s^2 \omega^2} \quad (7)$$

すなわち、パワースペクトルの平方根の分布は振動型 $Y_s(x)$ に近似的に等しくなる。

4. 実橋に対する測定例

図-6(a)は測定の対象とした名護屋大橋(デビダーク橋、佐賀県)である。この橋については、すでに、理論計算および起振機試験により固有振動数および振動型が求められている。

実験において、換振器は速度型で(各々、固有周波数 0.3 9/s)

上下方向および水平方向を測定した。換振器からの信号は増幅器を通してデータレコーダーに記録し、その際、モニターオシロを使って振幅の最大を調整した。

又、AD変換器がなかったので、データレコーダーより直記式電磁オシロに記録し、これより0.04 secおきに読みとり Digital 化した。なお、再生に当っては高周波雑音を消すことおよび低次の振動を強調するために、データレコーダーからの出力を積分し変位を電磁オシロに記録した。

図-6(a) 名護屋大橋 単位 m

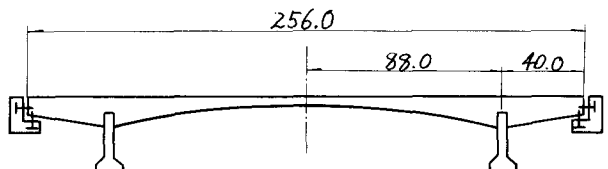


図-6(b) 換振器の設置点

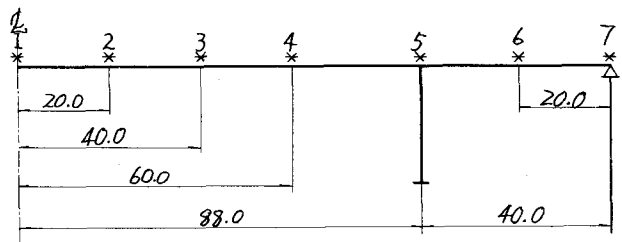


図-7 は各測点における上下方向変位のパワースペクトルである。変位記録を読みとったため2次以上のパワースペクトルは出なかった。速度記録を読みとれば高次振動まで出るであろう。

表-1, 図-8 は起振機実験による変位振動型と常時微動による変位振動型を示す。常時微動による変位振動型は各測点におけるピークのパワースペクトルの平方根分布を求めたものである。

表-1 振動型

測点	上下振動		水平振動	
	A	B	A	B
1	1.00	1.00	1.00	1.00
2	0.59	0.60		0.74
3	0.32	0.31	0.54	0.44
4	0.19	0.11		0.25
5	0.0	0.0	0.03	0.08
6			0.0	0.0
7			0.0	0.0

A: 常時微動による振動型

B: 起振機による振動型

5. 考察

以上の結果より、(7)式において理論的に求められたように、パワースペクトルの平方根分布は振動型 $Y_B(x)$ に近似的に等しくなることがわかる。

参考文献

- (1) J. D. Robson 「An Introduction to Random Vibration」
- (2) 小坪・荒牧・高田 「ディビダーク橋の振動性状に関する試験」
九大工学集報 昭和45年1月

図-7 変位のパワースペクトル

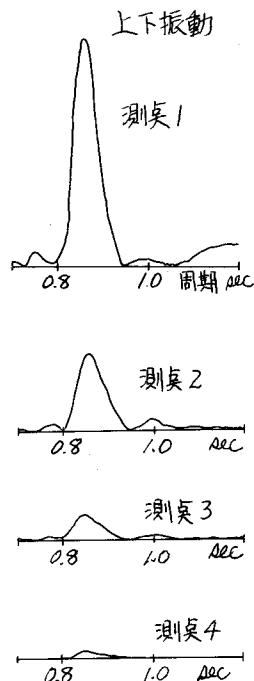
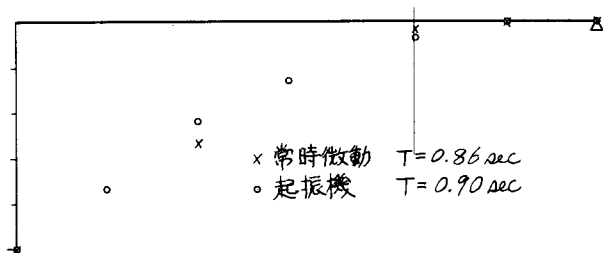


図-8 振動型

(a) 上下振動



(b) 水平振動

