

多点入力地震動モデルと構造系の 不規則応答について

京都大学防災研究所 正会員 亀田 弘行 神戸市 ○林 泰三

1、はじめに 近年の建造物の長大化に伴い、入力地震動の空間相関性に起因する建造物の応答への影響が注目されている。本研究は、不規則振動論の立場から、空間相関性を有する地震動モデルを導入し、入力地点間距離や位相速度などが線形多自由度系の定常ランダム応答に与える影響について、スペクトルモーメント（応答の分散）を用いて考察する。

2、入力地震動の有理関数型パワースペクトルモデルとコヒーレンスモデル 各入力地点における地震動モデルには、Kameda, Ueda, Nojima¹⁾による、マグニチュードM、震央距離Δ、地盤条件から決定される地盤の非線形増幅特性をも考慮したモデルを用いる。まず、地表層の増幅特性の影響をほとんど受けない工学的基盤面における地震動パワースペクトルGrとして次式に示す有理関数型モデルを用いる。

$$G_T(\omega) = \gamma^2 \frac{\lambda \cdot \beta_g}{\pi^2 f_p} \frac{f_p^2 / f_p^2}{(1 - f^2 / f_p^2)^2 + 4 \beta_g^2 f^2 / f_p^2} \quad (1)$$

ここに、 γ : peak R. M. S. 加速度 (gal), f_p : パワースペクトルの卓越振動数 (hz), β_g : パワースペクトルのバンド幅をあらわすパラメータ。この関数はM、Δから推定される。つぎに地表層を構成する土質材料の非線形性を評価するためにパワースペクトル変換係数 β_R^2 を導入する。

$$\beta_R^2(\omega) = \left\{ \frac{1 + 2 \alpha^2 f^2 / f_s^2}{(1 - f^2 / f_s^2)^2 + 4 h_s^2 f^2 / f_s^2} \right\}^2 \quad (2)$$

この変換係数は地盤条件とともに基盤入力地震動の強度により変化し、式(2)中のモデルパラメータ α , f_s , h_s をM、Δ、地盤条件の関数として定めている。地表面でのパワースペクトルGsは式(1)と式(2)の積により構成される。

$$G_S(\omega) = \beta_R^2(\omega) \cdot G_T(\omega) \quad (3)$$

一方、亀田・沢田・亀井²⁾は非定常な多点地震動の解析をマルチフィルターを用いて行い、次式に示すコヒーレンスモデルを提案した。

$$Coh^2(\omega) = \frac{1}{(a_c \cdot d^{\alpha_c} \cdot \omega^2 + 1)^2} \cdot \exp(-\beta_c \cdot d_x) \quad (4)$$

上式中、 a_c , α_c , β_c は回帰係数、 d , d_x は入力地点間距離とその地震波伝播方向への投影距離である。このモデルは、高振動数ほど、また入力地点間距離が大きくなるほど相関性が低くなる特質を有する。

3、定常ランダム応答のスペクトルモーメント 線形多自由度系にモーダルアナリシスを仮定した場合、一般にそのスペクトルモーメントは次式で表される。

$$\lambda_m = \sum_j \sum_k \sum_p \sum_q \underbrace{\phi_j^{(j)} \phi_k^{(k)}}_{\text{モード}} \underbrace{\alpha_{jp} \alpha_{kq}}_{\text{入力地点}} \int_0^\infty \omega^m \overline{H_j(\omega) H_k(\omega)} G_{pq}(\omega) d\omega \quad (5)$$

($m = 0, 1, 2$)

$\phi_j^{(j)}$: j次モードベクトルの第j成分、 α_{jp} : 地点pからのj次モードの刺激係数、 H_j : j次モードの周波数応答関数、 G_{pq} : 入力地震動p、qの相互スペクトル密度。ここで、 G_{pq} は、コヒーレンスの定義と G_{pq} の位相部分を $\theta_{pq}(\omega) = d_x / U \cdot \omega$ (U : 位相速度) と与えることより

$$G_{pq}(\omega) = \sqrt{Coh^2(\omega)} \cdot \beta_R^2 \cdot G_T(\omega)_p \cdot \beta_R^2 \cdot G_T(\omega)_q \cdot e^{i \frac{d_x}{U} \omega} \quad (6)$$

となる。従って、 G_{pq} の複素共役性を考慮すると式(5)は、

Hiroyuki KAMEDA, Taizo HAYASHI

$$\therefore \lambda_m = \sum_j \sum_k \sum_p \sum_q \phi_1^j \phi_2^k \alpha_{jp} \alpha_{kq} \begin{cases} \lambda_{I,m}(j,k,p,q;d) \\ \lambda_{II,m}(j,k,p,q;d) \end{cases} \quad (m=0,1,2) \quad (7)$$

ここで、

$$\lambda_{I,m} = \text{Re} \left[\int_0^\infty \omega^m H_j H_k \sqrt{C_0 A^2 \cdot (\beta_R^2 \cdot G_r)_p (\beta_R^2 \cdot G_r)_q} \cdot e^{+i \frac{d}{U} \omega} d\omega \right] \quad (8)$$

$$\lambda_{II,m} = \text{Re} \left[\int_0^\infty \omega^m H_j H_k \sqrt{C_0 h^2 \cdot (\beta_R^2 \cdot G_r)_p (\beta_R^2 \cdot G_r)_q} \cdot e^{-i \frac{d}{U} \omega} d\omega \right] \quad (9)$$

式(8),(9)の積分を0次、2次のスペクトルモーメントに対して留数定理を用いて行った。以下に結果の一例を示す。

$T_j=1.0$ 秒前後のモードに着目した場合では(図1)、2つのモードの振動数が接近するほど他のモードとの連成、すなわちモーダルカップリングが生じ、また、入力地点間距離の増大に従い、ある周期的変動を伴ってスペクトルモーメントが低減する。図2に図1の $\omega_j=\omega_k$, $\omega_j=0.9\omega_k$, $\omega_j=1.1\omega_k$ での断面図を2通りの位相速度($U=400, 800\text{m/s}$)について示す。スペクトルモーメントの低減特性、周期的変動が位相速度に大きく影響されることがわかる。図2の中の包絡線はこの低減特性を評価したもので、コーレンスモデルと留数積分結果から次式のように推定される。

$$E(dx) = \pm \lambda_0(j,j,p,q;0) \cdot \sqrt{\exp(-\beta \cdot dx)} \cdot e^{-\frac{d}{U} \omega_j h_j} \quad (10)$$

式(10)の第2項、第3項はそれぞれ振幅、位相の空間相関性の情報を反映したものと解釈できる。

数値計算では、この他 $T_j=3.0, 0.3$ 秒前後のモードを対象として同様の解析を行った。その結果、前者では、モーダルカップリングはあまり生じず、入力間距離の隔たりによるスペクトルモーメントの低減の割合は小さい。逆に、後者では、モーダルカップリングの程度は大きくなるが入力間距離の隔たりによるスペクトルモーメントの低減が著しい。

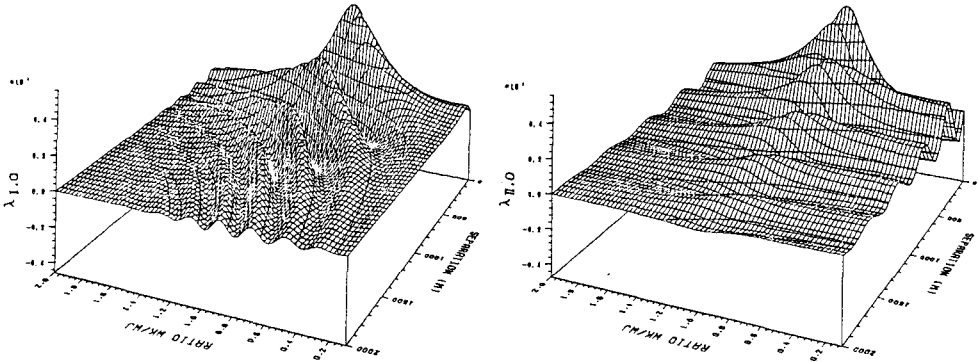


図1 0-thスペクトルモーメント $\lambda_{I,0}$ $\lambda_{II,0}$ ($T_j=1.0\text{sec}$, $h_j=h_k=0.10$, $U=400\text{m/s}$)

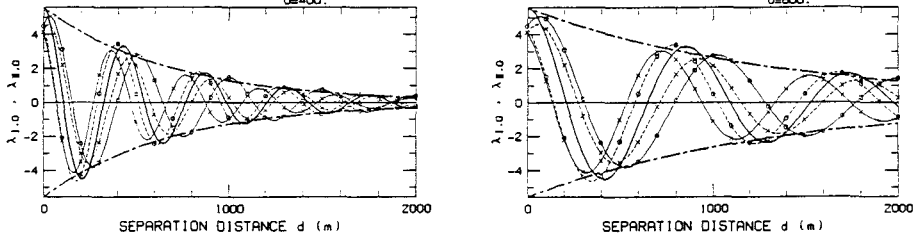


図2 スペクトルモーメントの低減特性 ($T_j=1.0\text{sec}$, $h_j=h_k=0.10$)

- 参考文献 1) Kameda, H., Ueda, K., Nojima, N.: Proc. 7th Japan Earth. Eng. Symp., 1986, pp. 181-186
 2) 亀田弘行・沢田勉・亀井紀幸, 第19回地震工学研究発表会, 昭和62年 7月, pp. 25-28