

徳島大学工学部 正 員 沢田 勉

1. まえがき 地震動は一般に、P波、S波、および表面波から成り、振幅および周波数特性に非定常性を有する不規則な現象である。最近、大崎ら¹⁾、和泉ら²⁾は、地震動のフーリエ解析より得られるフーリエ位相の差分のひん度分布(位相差分分布)が地震動の非定常性と密接に関連していることを見出した。また、筆者らは前報告において、フーリエ位相の差分が地震波に含まれる周波数成分波の到着時間に対応することを示した。

本報告では、実地震動の位相差分分布の特徴を捉えるためそのモデル化を行ない、それをを用いた時間領域のウィンドーにより地震動を前半部(初期部と強震部)と後半部(減衰部)に分離することを試みた。

2. 実地震動の位相差分分布とそのモデル化 地震記録をフーリエ変換するとフーリエ振幅とフーリエ位相が得られる。⁴⁾ 位相差分 $\Delta\phi_k$ は、フーリエ位相 ϕ_k の差分であり次式で定義される。

$$\Delta\phi_k = \phi_{k+1} - \phi_k, \quad k=0, 1, \dots, N-1 \quad (1)$$

この位相差分 $\Delta\phi_k$ と周波数成分波の到着時間 t_k には次の関係がある。³⁾

$$t_k = -\Delta\phi_k / \Delta\omega \quad (2) \quad \text{ここで、}\Delta\omega\text{は角振動数の刻み}$$

幅であり、 $\Delta\omega = 2\pi\Delta f$, $\Delta f = 1/T$, T =地震動の継続時間である。

したがって、位相差分の定義域は $-2\pi \leq \Delta\phi_k \leq 0$ となるべきであるが、

強震記録をFFTによりフーリエ解析し位相差分分布を求めた場合、波形の後続のゼロの部分に振幅に対応しない分布が現われる。この分布を考慮するため、以下の解析においては、位相差分 $\Delta\phi_k$ の定義域を $-2\pi \leq \Delta\phi_k \leq \Delta\phi_u$, $\Delta\phi_u$ =波形の後続のゼロに対応する位相差分の値、とした。位相差分分布は位相差分の相対ひん度分布であり、大崎らは、この分布の平均と分散がそ

れぞれ、時刻歴における強震部の中心時刻およびその広がりに対応することを示した。強震記録の位相差分分布を求め、その累積確率を正規確率紙上にプロットするとFig.1のようになり、その形状はP, S, Lの領域で示されるような勾配の異なる本の直線でほぼ近似できようである。Fig.1で用いた記録は1968年十勝沖地震の際にそれぞれ、青森、八戸、宮古で得られた記録であり、図中のP, S, Lで示した領域は青森の記録に対するものである。これら3つの領域は地震波の初期部、強震部、減衰部に対応していると考えられる。そこで、本研究では、地震動の位相差分分布を次に示すような3つの正規分布の和として表わした。

$$\tilde{f}(\Delta\phi) = \tilde{f}_p(\Delta\phi) + \tilde{f}_s(\Delta\phi) + \tilde{f}_l(\Delta\phi) = \sum_{i=1}^3 \frac{a_i}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} \cdot \exp\left\{-\frac{(\Delta\phi - \mu_i)^2}{2\sigma_i^2}\right\} \quad (3)$$

ここで、 a_i , μ_i , σ_i はそれぞれ、実際の位相差分分布を3つの正規分布の和でモデル化したときの係数、平均、および標準偏差であり、 $\sum_{i=1}^3 a_i = 1$ である。これらの定数を実地震動の位相差分分布から決定するために以下の手順をとる。いま、実地震動の位相差分分布を $f(\Delta\phi)$ とすると、 $f(\Delta\phi)$ と式(3)の $\tilde{f}(\Delta\phi)$ の間には次の関係が成立する。 $f(\Delta\phi) \approx \tilde{f}(\Delta\phi)$ (4) この関係が近似的に満足されるよう次式に示す自乗和誤差を最小にするという基準を選ぶ。

$$S_e = \sum_{k=1}^{N_p} \{ \tilde{f}(\Delta\phi) - f(\Delta\phi) \}^2 \rightarrow \min \quad (5)$$

ここで、 N_p =位相差分の定義域の分割数である。また、この場合の制約条件は $\sum_{i=1}^3 a_i = 1$, $a_i \geq 0$, $\mu_i \geq 0$, $\sigma_i \geq 0$ (6) とする。したがって、式(3)の位相差分分布モデルに含まれる定数 a_i , μ_i , σ_i を求める問題は、式(6)の制約条件を満足しかつ式(5)の自乗和誤差を最小にするような定数を決定する最適化問題になる。式(5), (6)の非線形最適化問題を解くため、本研究では反復線形計画法を用いた。計算手法を概述すると以下のようになる。ただし、以下の式では簡便のため、 $X_i = a_i$, $X_{i+3} = \mu_i$, $X_{i+6} = \sigma_i$,

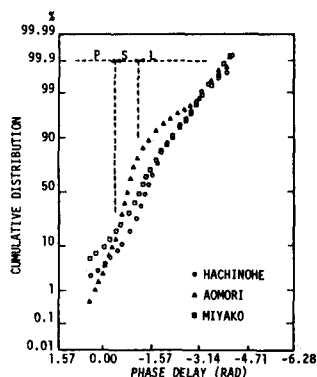


Fig. 1 CUMULATIVE DISTRIBUTION OF PHASE DELAY

$i = 1, 2, 3$ として式を表示している。まず、 X_i に任意の初期値 $X_i^{(0)}$ を与え、式(5)、(6) を $X_i^{(0)}$ の回りにテーラー展開し高次の微小項を無視すると次のようになる。(添字の(0)は初期における値を示す)

目的関数 : $S_e \doteq S_e^{(0)} + \sum_{i=1}^3 \left[\sum_{k=1}^{N_p} \{ \tilde{f}^{(0)}(\Delta\phi_k) - f(\Delta\phi_k) \} \{ \partial \tilde{f}^{(0)}(\Delta\phi_k) / \partial X_i \} \Delta X_i \right] \rightarrow \min \quad (7)$

制約条件 : $\sum_{i=1}^3 \Delta X_i = 1 - \sum_{i=1}^3 X_i^{(0)}$, $\Delta X_i \geq -X_i^{(0)}$ (8) したがって、式(5)、(6)

は式(7)、(8)のように線形化され、線形計画法の手法を適用することにより、変化量 ΔX_i が求められる。次に、 $X_i^{(1)} = X_i^{(0)} + \Delta X_i$ として同様な計算をくり返す。この過程を解が収束するまでくり返すことにより最適解が得られる。以上において、式(7)、(8)は近似式であるため解が発散することがあるので、変化量 ΔX_i に次のような上下限を設ける(Move Limit)。 $-\varepsilon X_i^{(0)} \leq \Delta X_i \leq \varepsilon X_i^{(0)}$, ε = 微小な値 (9)

3. 地震波の時間領域での分離の試み 地震動は前半部(初期部と強震部)と後半部(減衰部)でその周波数特性を異にする場合があるから、そのような場合には、それらを分離して別々に評価することは工学的に有用であると考えられる。そこで、前節で述べた位相差分布のモデルを用いて、地震波の前半部と後半部を強調するような時間領域のウィンドーを考えた。

$$\begin{aligned} W_1(t_k) &= \{ \tilde{f}_P(\Delta\phi_k) + \tilde{f}_S(\Delta\phi_k) \} / \tilde{f}(\Delta\phi_k) \\ W_2(t_k) &= \tilde{f}_L(\Delta\phi_k) / \tilde{f}(\Delta\phi_k) \end{aligned} \quad (10)$$

上式は、式(2)の関係から、周波数成分波の到着数で重み付けをしたウィンドーとなっている。このウィンドーを地震波 $x(t)$ に乗じるこ

とにより、前半部と後半部を分離した。Fig. 2 は、1968年十勝沖地震での青森の記録の波形であり、(a) 原波形、(b) 前半部、(c) 後半部を示す。Fig. 3 はこれらのフーリエスペクトルを示したものであり、図(b)より、前半部と後半部ではスペクトル特性が異なるが、かなり重複する部分もあることがわかる。Fig. 4 は、各波形の位相差分布を別個に求め図示したものであり、当然のことながら前半部と後半部の分布形状は著しく異なっている。

4. あとがき 本報告では、実地震動の位相差分布のモデル化を行ない、それを用いて地震波の前半部と後半部を分離する手法について述べた。周波数成分波の到着数で重み付けをした時間領域のウィンドーを提案し、実地震動の解析を行なった。現時点では、この手法により地震波を分離することは工学的に有用であると考えているが、次のような問題もある。

- (1) 周波数成分波の到着数のみを考えてウィンドーの形を決めたがそれ以外に振幅の情報も入れる必要があるのか。
- (2) この手法によりP波、S波、表面波を近似的に分離することは可能なのか。
- (3) Fig. 3のように地震波を分離してそれぞれを別個にモデル化し模擬地震動を作成した場合問題は無いのか。

現在、これらの点について検討中である。本研究で使用した強震

記録は京都大学工学部交通土木工学科後藤研究室所蔵のものである。記して謝意を表します。

参考文献 (1) 大崎ら, 第5回日本地震工学シンポジウム, 1978. (2) Izumi, et. al., Proc. of 5th Japan Earthq. Eng. Symp., 1978. (3) 沢田, 後藤, 土木学会第36回年講, 1981. (4) 大崎, 地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版, 1976.

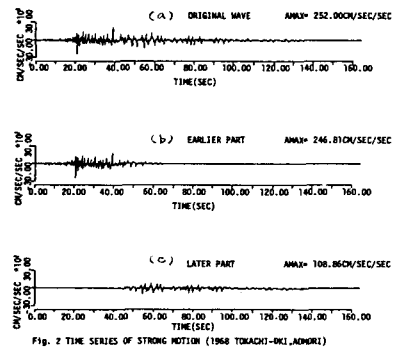
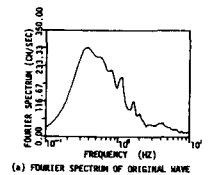
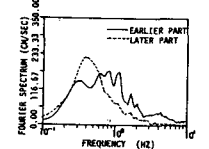


Fig. 2 TIME SERIES OF STRONG MOTION (1968 TOKACHI-OKI, AOMORI)



(a) FOURIER SPECTRUM OF ORIGINAL WAVE



(b) FOURIER SPECTRA OF EARLIER AND LATER PART
Fig. 3 FOURIER SPECTRA (1968 TOKACHI-OKI, AOMORI)

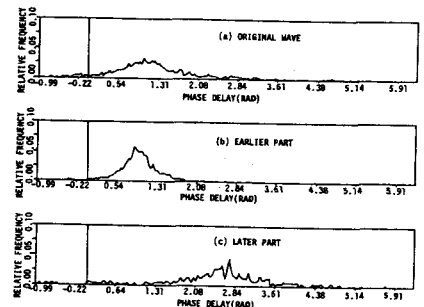


Fig. 4 DISTRIBUTIONS OF PHASE DELAY (1968 TOKACHI-OKI, AOMORI)