

## (42) 地震波相似性についての考察

日本大学生産工学部 田村重四郎  
東京大学生産技術研究所 小長井一男  
東京大学大学院 鄭 京哲

### 1. まえがき

地震波の特性およびその伝播特性、地盤および構造物の動的特性などを検討する時、波形の相似についての判断が必要となる場合が少なくない。これまで、相互相関、Coherenceなどによって判断する方法が多く用いられてきたが、ここでは、工学的立場から特定のフィルターを通ったフーリエ変換における加重平均振幅差と加重平均位相差の二つの指標によって地震波の相似性を考察し、さらにこれより傾斜基盤の影響範囲の評価を試みる。

### 2. 評価指標

地震波形を支配するのは各周波数成分における振幅および位相である。工学的判断を行う場合、更に対象とする周波数の範囲も又重要な要素となる。最近では、地震工学的に有意義な周波数の領域は0.05Hzから約20Hzまでの広範囲にわたるが、今までスペクトル強度として震度との関連で一般的に使用されている周波数の範囲は0.4Hz~10Hzであった。ここでは、この周波数領域でスペクトル強度を検討する。波形を構成する卓越する振動成分、即ち振幅の大きい振動成分における差異を最も重視し、振幅の小さい周波数における差異の影響が小さいという見方をとる。以上の観点から、特定の周波数フィルターを通った波のフーリエ変換における加重平均振幅差と加重平均位相差を取り上げ、この二つの指標によって地震波の相似を評価することにする。フィルターについては、現在採用されている速度応答スペクトルを参考にして、図-1の曲線を用いる。

#### 2.1 加重平均振幅差

フィルターをかけた各周波数における振幅の大きさを重みとする振幅の差の和を加重平均振幅差 $R_A$ と定義する。

$$R_A = \sum_i \text{ABS}(f_{1i} - f_{2i}) \cdot W_i \quad (1.1) \quad , \quad \text{ただし、} W_i = \frac{f_{1i} + f_{2i}}{\sum (f_{1i} + f_{2i})} \quad (1.2)$$

$W_i$ は重みである。 $f_{1i}$ と $f_{2i}$ は比較される波形のフーリエスペクトル振幅である。 $R_A = 0.0$ は振幅分布が一致することを意味するが、この値の評価は極めて重要である。 $R_A / \alpha (f_{1i} + f_{2i})_{\max}$ を用いて試算した結果、 $\alpha = 0.05 \sim 0.1$ とした時、この値が1.0以下であれば、振幅特性の相似性がよく、特に $\alpha = 0.05$ の場合、波形の周波数特性がよく類似することが認められた。

2.1 加重平均位相差 フィルターをかけた各周波数における振幅の大きさを重みとする位相の差の和を加重平均位相差 $R_P$ と定義する。

$$R_P = \sum_i \text{ABS}(p_{1i} - p_{2i}) \cdot W_i \quad (1.3)$$

$W_i$ は式(1.2)と同様である。 $p_{1i}$ と $p_{2i}$ は比較される波形の位相である。多くの波形を対象とした計算によれば、 $R_A / \alpha (f_{1i} + f_{2i})_{\max}$ が小さい時、 $R_P / 180^\circ$ が約0.3以下になると、見かけの波形はよく類似する。

### 3. 地震波の相似

#### 3.1 加重平均振幅差による相似性の評価

式(1.1)に定義されている加重平均振幅差を用いることによって工学的重要な周波数成分およびその中の最も支配的な成分を重視するような相似の評価ができる。図-2に示す3個の継続時間約32秒間の波形を例に取り、加重平均振幅差と波の相似について検討してみる。 $t_0$ ( $t_0=0, 1, 2, \dots, 25$ )秒から5.12秒間の波形について、波形1と波形2、波形1と波形3の加重平均振幅差を求め、これを図-3に示す。横軸は $t_0$ で、縦軸は $R_A / 0.1(f_{1i} + f_{2i})_{\max}$ および $R_A / 0.05(f_{1i} + f_{2i})_{\max}$ の値を示している。波形1と波形2の結果が波形1と波形3のものに比べて全体的に小さくなっている。時間的に両者を比較すると、評価指標の値が波形の微妙な変化を反映していることがわかる。

#### 3.2 加重平均位相差による相似性の評価

図-2に示す三の波形について、 $t_0$  ( $t_0=0, 1, 2, \dots, 25$ ) 秒から5.12秒間の波形1と波形2、波形1と波形3の加重平均位相差を求め、これを図-4に示す。横軸は $t_0$ で、縦軸は $R_p/180^\circ$ の値である。この結果によると、加重平均位相差は波形の変化をよく反映していることがわかる。例えば、波形1と波形2については、 $R_p/180^\circ$ が $t_0=0$ 秒の時に小さいが、 $t_0=1$ 秒の時には急に大きくなり、これは最初の大きな一波の影響を強く受けている。また、 $R_p/180^\circ$ が約0.3より小さければ、見かけの波形が似てくることが図-2と図-4からわかる。これはほかの波形についてのケースにも共通した結果である。従つて、 $R_A/0.1(f_{1i} + f_{2i})_{\max}$  また  $R_A/0.05(f_{1i} + f_{2i})_{\max}$  の値が1.0より小さく、しかも $R_p/180^\circ$ が0.3より小さければ、波形の相似性が高い。

### 3.3 工学的相似と相互相関

加重平均振幅差と加重平均位相差の二つの指標の値がとも小さければ、波形の相関係数も小さくなっていく。図-5はある波形(基本波形とよぶ)と、この波形のフーリエ変換に基づいて一様な乱数を発生させることより合成した100個の波形との、相関係数と加重平均振幅差、または加重平均位相差との関係を示すものである。全体的な傾向としては、評価指標値が小さければ、相関関数は高くなるが、相関係数が同じでも評価指標値にバラツキがあることが認められる。相関係数がほぼ同じで評価指標値が異なる例を図-6に示す。波形①と波形②については( $\gamma=0.71$ )、加重平均振幅差がほぼ同じであるが、波形①の加重平均位相が波形②のものより小さいから、波形①はより基本波形に類似していることがこの図からわかる。波形③と波形④についても( $\gamma=0.96$ )同様な傾向、つまり評価指標値が小さい波形③が波形④より基本波形と似ていることが認められる。これらは、ここで用いた評価指標の方が相関以上に細かく相似を下すことができることを示している。

### 4. 加重平均振幅差による傾斜基盤の影響範囲の評価

傾斜基盤上の表層地盤と水平基盤上の表層地盤とは、地表面の地震応答が異なっている。耐震設計を行う際、傾斜基盤の影響範囲を調べることは重要である。ここでは、加重平均振幅差を用い、図-7に示す地盤モデルの傾斜基盤の影響範囲を検討してみる。簡単のため、基盤を剛体とし、SH波が垂直入射する場合を考える。入力地震波の特性も考慮して影響範囲を評価すべきであるが、ここでは、ホワイトノイズを入力に用いた。周波数領域において、地表面の応答は基盤からの入力のスペクトルと地盤の伝達関数の積で表されるから、ホワイトノイズを入力する時には、地盤の伝達関数だけで傾斜基盤と水平基盤の場合の違いを評価することができる。

まず、図-7に示すモデルの地表面の各点の伝達関数を求める。傾斜角が30度の結果(細線)を、水平基盤を想定した場合の伝達関数(太線)と併せて図-8に示す。 $x/H$ の増加に伴って両者の差異は小さくなっていくことがわかる。次に地表面の各地点において、傾斜基盤と水平基盤のみの場合との伝達関数の加重平均振幅差を計算する。傾斜角が30度と10度の場合の結果を図-9に示す。 $x/H$ の増加に従つて、評価指標の値は小さくなっていく。 $x/H$ が約1.0より小さい場合、傾斜角が30度の時の結果が大きいが、 $x/H$ が2.1より大きくなる場合には、傾斜角が10度の方が幾分大きくなっている。 $R_A/0.05(f_{1i} + f_{2i})_{\max}$ が1.0より大きければ、波形の振幅特性は相似しないとす、 $x/H$ が約2.9より大きければ、傾斜基盤の影響を無視することができる。

### 5. おわりに

加重平均振幅差および加重平均位相差によって波形の相似についての検討を行い、評価指標値が波形の振幅および位相についての差異をよく反映していること、また、ここで用いた評価方法で相互相関を用いる以上に詳細に相似性を検討することができることが示された。また、不整形基盤の影響範囲の評価を試み、この評価方法の将来応用の可能性を示した。

### 参考文献

- 1) Trifunac, M.D., How to model amplification of strong earthquake motions by local soil and geologic site conditions, Earthquake engineering and structural dynamics, Vol.19, 1990
- 2) 鄭, 田村, 小長井, 傾斜基盤の影響範囲について, 土木学会第45回年次学術講演会, 1991年9月

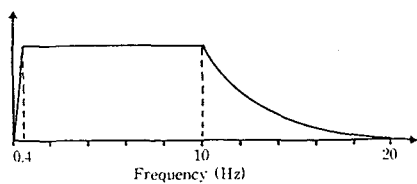


図-1 周波数フィルター

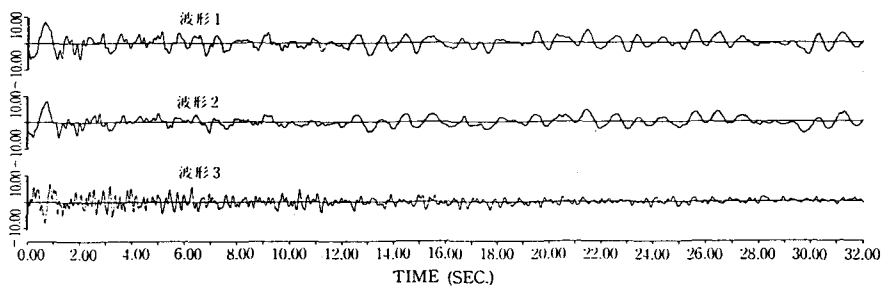


図-2 解析波形

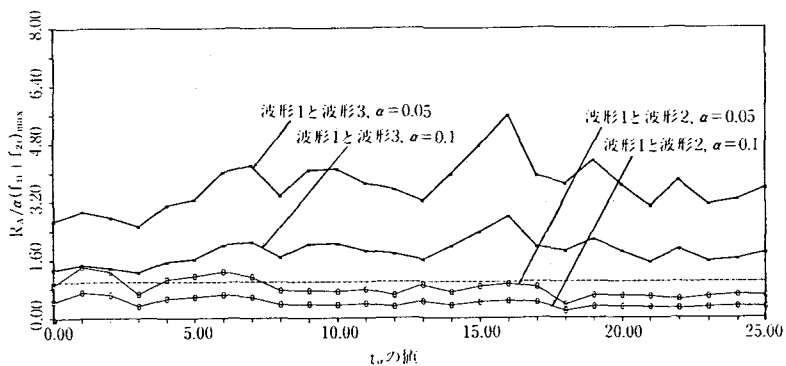


図-3 加重平均振幅差の時間変化

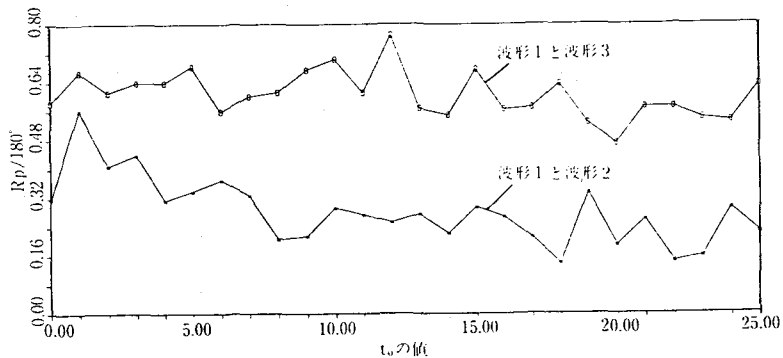


図-4 加重平均位相差の時間変化

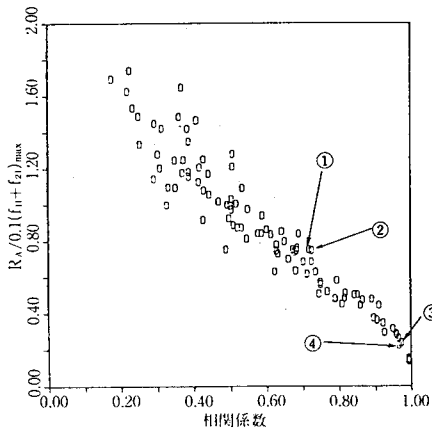
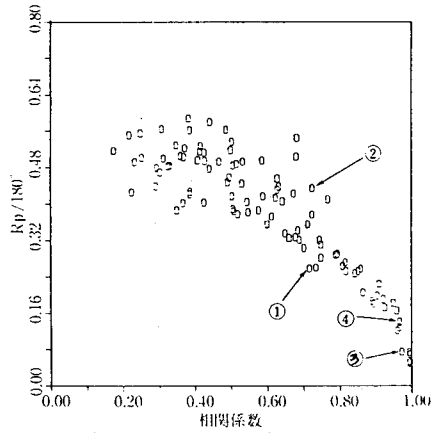


図-5 (a) 相関係数と加重平均振幅差



(b) 相関係数と加重平均位相差

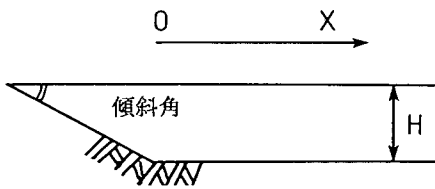


図-7 地盤モデル

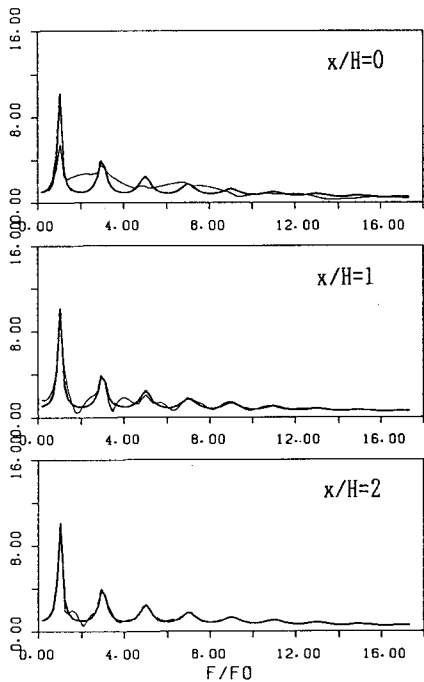


図-8 地盤の伝達関数 — 水平基盤 — 傾斜基盤  
 $F_0$ : 水平基盤の場合の1次固有振動数

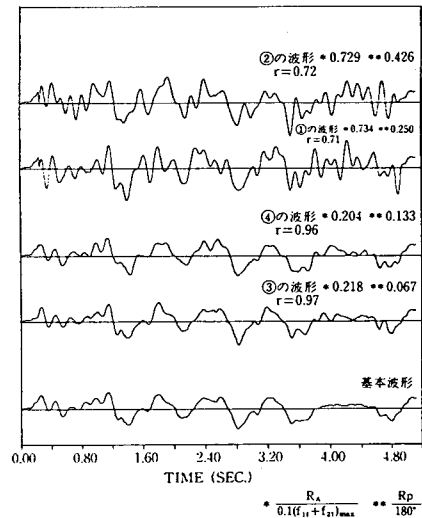


図-6 相関係数がほぼ同値で評価指標が異なる波形の例

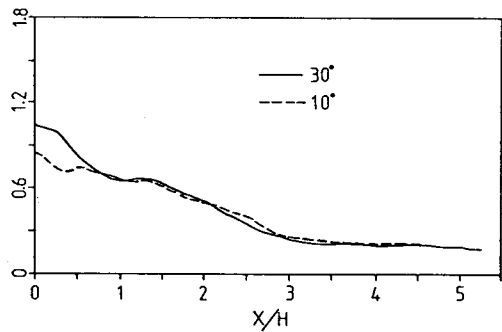


図-9 加重平均振幅差の分布