

工学的見地から見た地震波の相似について

A Study on the Similarity of Seismic Wave from Engineering Point of View

田 村 重四郎*・鄭 京 哲*
Choshiro TAMURA and Jingzhe ZHENG

1. ま え が き

地震工学においては、地震波形の相似を判断することが非常に重要である。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とき、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。いままで、相互相関、Coherenceなどによって判断する方法が用いられてきたが、適用範囲が限られており、工学的意味がはっきりしない場合もあって、これらはかならずしも工学的に有効な基準とは判断されないことがある。たとえば、数値シミュレーションの結果と実験または観測結果を比較する場合、相互相関、Coherenceなどによっても、合うか合わないか、また何が合うか、何が合わないかを判定することが難しく、感覚的に判断する場合が少なくない。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の検討を試みる。

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、さらに対象とする周波数の範囲もまた重要な要素となる。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、このスペクトル強度の領域を取り上げることとする。波形を構成する卓越する振動成分、すなわ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が工学的である。以上のことより、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

*東京大学生産技術研究所 第1部

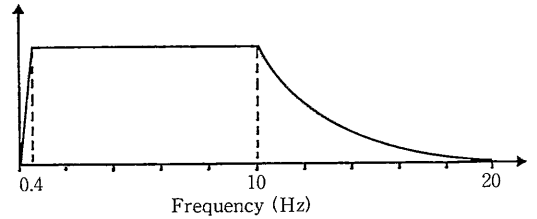


図-1 周波数フィルター

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 と次式のように定義する。

$$R_A = \sum_i ABS(f_{1i} - f_{2i}) * W_i \quad (1.1)$$

$$\text{ただし, } W_i = \frac{f_{1i} + f_{2i}}{\sum_i (f_{1i} + f_{2i})} \quad (1.2)$$

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 が0のとき振幅分布が一致することを意味するが、この値の評価はきわめて重要である。個々の対象によって変わることが予想される。後に例で示すように、本研究では、 $R_A / \alpha (f_{1i} + f_{2i}) \max$ を用いて試算した結果、 $\alpha = 0.05 \sim 0.1$ としたとき、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。

2.2 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 と定義し次式であらわす。

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

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。多くの波形についての計算結果によれば、

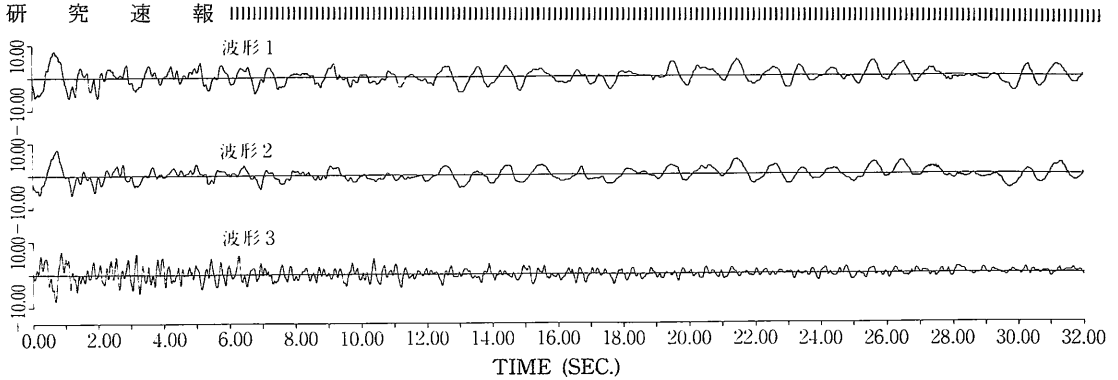


図-2 解析波形

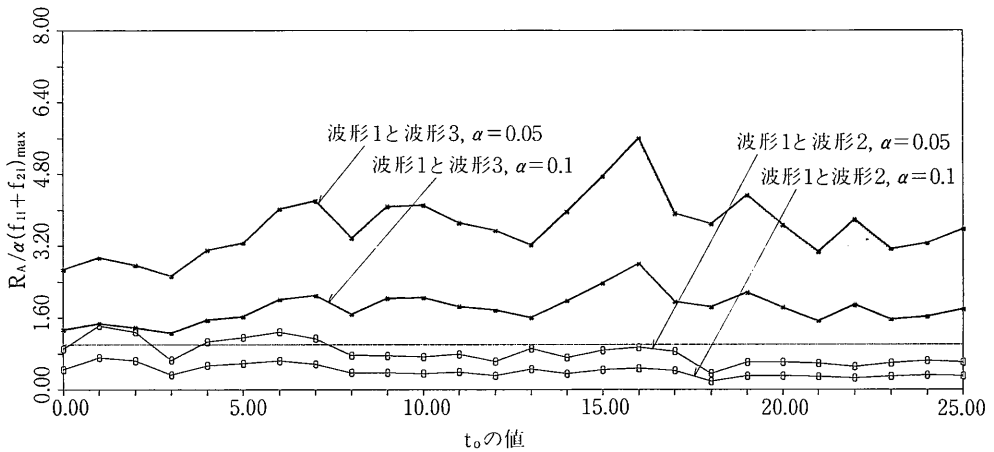


図-3 加重平均振幅差の時間変化

$R_A / \alpha (f_{11} + f_{21})_{max}$ が小さいとき、 $R_p / 180^\circ$ 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個の継続時間が約32秒間の波形を例にとり、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 $R_A / 0.1 (f_{11} + f_{21})_{max}$ または $R_A / 0.05 (f_{11} + f_{21})_{max}$ の値を示している。波形1と波形3の結果より、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。

線形範囲内では、加重平均振幅差のみが小さければ、

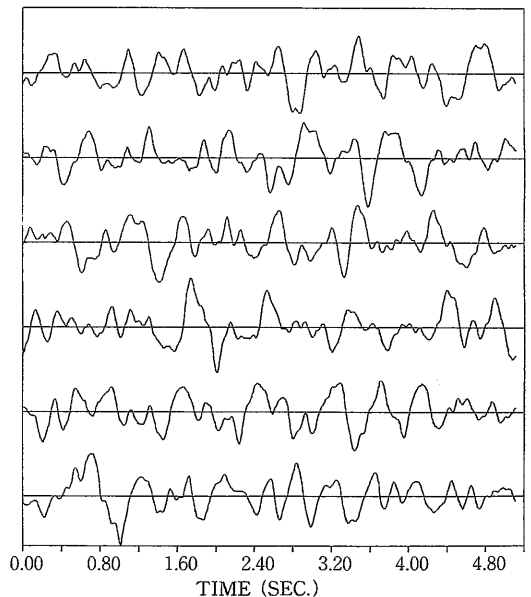


図-4 同一振幅スペクトルで位相が異なる波形の例

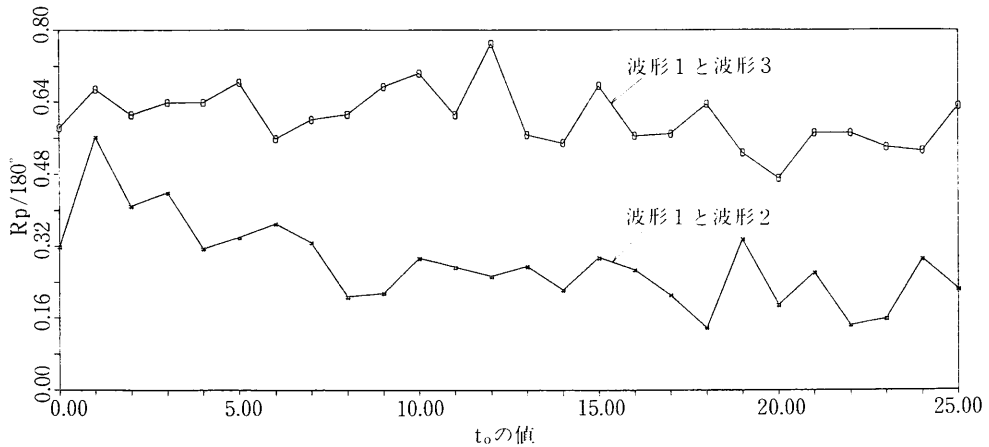


図-5 加重平均位相差の時間変化

波は相似すると考えてよい場合が多い。図-4に示すのはスペクトルの振幅分布が同じで、位相が異なる6個の波形である。加重平均振幅差はないが、見かけの波形がまったく異なっている。地震時の構造物の挙動を考える場合、一般にこの位相は異なる結果を与えるから、波形を比較する場合、位相差もまた注目する必要がある。

非線形の範囲では、位相の相似はさらに重要である。

3.2 加重平均位相差による相似性の評価

図-4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-5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。たとえば、波形1と波形2については、 $R_p/180^\circ$ が $t_0 = 0$ 秒のときに小さいが、 $t_0 = 1$ 秒のときには急に大きくなり、これは最初の大きな一波の影響をはっきり反映している。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-5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。したがって、 $R_A/0.1(f_{11}+f_{21})_{\max} \sim R_A/0.05(f_{11}+f_{21})_{\max}$ 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、波形が相似すると言うことができよう。

3.3 工学的相似と相互相関

いままで、波形の相互相関がよく用いられてきた。こ

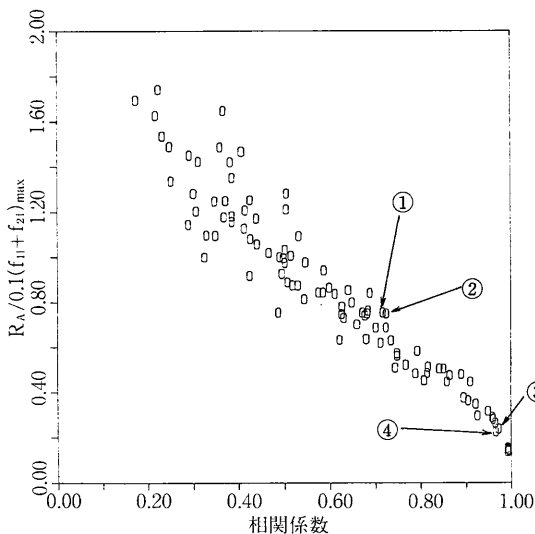
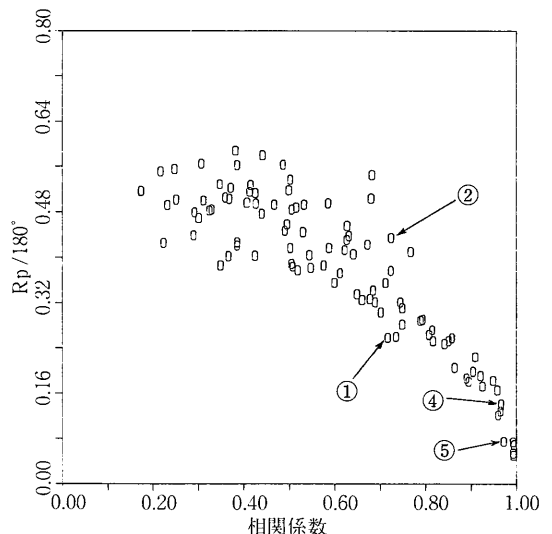


図-6 (a) 相関係数と加重平均振幅差



(b) 相関係数と加重平均位相差

研 究 速 報

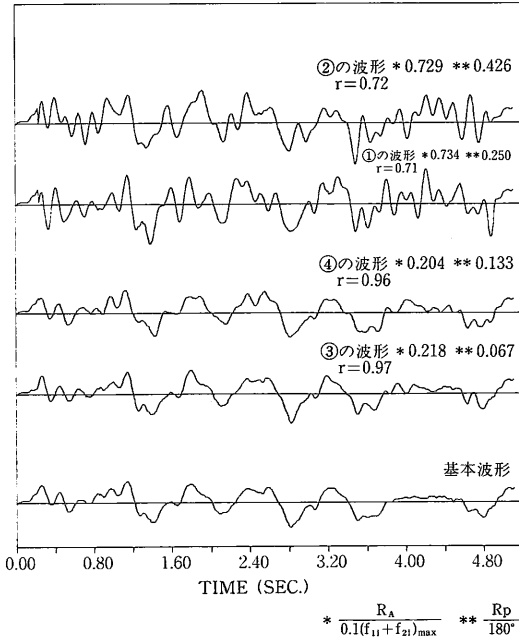


図-7 相関係数がほぼ同値で評価指標値が異なる波形の例

ここで用いた評価指標と波形の相関との関連を検討してみる。線形問題を考えるとき、加重平均振幅差によって相似を評価すればよい場合がある。このとき、加重平均振幅差が小さくても、波形の相関係数はかならずしも大きいとはいえない。図-4の例では、加重平均振幅差が0であるが、波形の相関は非常に低い。

加重平均振幅差の指標と加重平均位相差の指標の値がいずれも小さければ、波形の相関係数も小さくなっていく。図-6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。この結果を見ると、全体的な傾向としては、評価指標が小さければ、相関係数は高くなるが、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①、②点または③、④点を例にとり、その波形を図-7に示す。波形①と波形②は相関係数 $r=0.71$ で加重平均振幅差がほぼ同じであるが、波形①の加重平均位相差が波形②のものより小さいから、波形①は波形②にくらべてよりよく基本波形と類似す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、相関よりもここで用いた評価指標の方がもっと細かく相似性を評価できることを示している。

一般の場合は、図-1のフィルターを用いればよいが、考察の目的によって検討したい成分のみを強調するようにフィルターを換える必要がある場合がある。たとえば、長周期成分についての相似を検討する場合、長周期の成分に大きな重み、比較的短周期の成分に小さい重みをかけるようなフィルターを用いればよい。

4. お わ り に

工学的考え方から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、この評価方法の妥当性および将来の応用の可能性を示した。今後、この評価方法を用い、不整形基盤の影響範囲、表面波による地中構造物の地震応答について検討を進めていく予定である。(1990年12月11日受理)

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, 833-846, 1990
- 2) Zheng, J., C., Tamura and K., Konagai, Earthquake response analysis of surface ground by wave front tracing method, Journal of Physics of the Earth (to be published)
- 3) 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