

地震動に含まれる位相特性の抽出とそのモデル化

京都大学防災研究所 正 員 土岐憲三

京都大学防災研究所 正 員 佐藤忠信

安田生命保険

○森口康弘

1. まえがき：設計用地震動を作成する場合、位相と振幅の相関性を明確にする必要がある。なぜなら、地震動は因果関数であり、両者を独立に設定することはできないからである。本研究では複素ケプストラム解析の手法や、最小位相推移関数を用いて実地震動記録を処理することによってその位相の特性を調べ、位相の非定常性をモデル化することによって、地震動の因果性に着目した模擬地震動を作成するための手法の開発を図ろうとするものである。

2. 現在までの模擬地震動の作成法：現在よく用いられている方法は、過去の地震動のフーリエスペクトルの振幅特性を統計的に予測して、位相と振幅を独立に与え、設計用地震動を合成する方法である。そこで、図-1のように位相(a)と振幅(b)とを独立に与え模擬地震動(c)を作成した。一般にフーリエ振幅と位相とを独立に与えて地震動を模擬する場合には、波形の因果性がなくなる。この問題点を克服するために、因果性のない模擬波形に包絡線関数を乗じて模擬地震動を作成することがよく行われる。こうした問題点を明らかにする目的で、模擬波形の $t < 0$ の部分を強制的にゼロとした波形(図-1(d))をフーリエ変換しそのフーリエ振幅スペクトルを求めた。図-2がその結果である。元のフーリエ振幅と対比してわかるように2Hz、4Hzのところで卓越周期が認められる。

因果性を満たすように模擬波形を修正すると、そのフーリエ振幅は元のものから大きく変化した。そこで模擬地震動を作成する際には因果性に留意した作成手法が必要である。そこで以下のような方法を用いて位相のモデル化を行い、模擬地震動を作成した。

3. ケプストラム解析を用いた位相のモデル化：因果性を有する波形はヒルバート変換により求められる最小位相推移関数と大きさが1である全域通過関数の積であらわせることが知られている¹⁾。ここでは、El Centro (1940, NS成分)の記録を利用して、その最小位相推移関数と全域通過関数を算出し、これを用いて地震波の位相のモデル化を行う。第1の方法として、最小位相推移関数の位相(図-3(a))を平滑化したものをその基本位相特性とする(図-3(b))。ここで位相のモデル化のために、元の位相が求めた基本位相に対しどの程度ばらつきを持っているか調べる。図-4にばらつきのヒストグラムが示されている。これは平均0、標準偏差0.607ラジアン²の正規分布曲線で表現できる。そこで正規乱数を発生し、これを基本位相にのせることにより位相をモデル化し、波形を再合成した。結果が図-5に示されている。第2の方法として、最小位相推移関数の位相が角振動数 ω の奇関数で表されるとして、位相を ω の3次式で表現し、非線形最小二乗法を適用し、近似したものを位相の基本特性とした。この場合についても第1の方法と同様にそのばらつきを調べると、平均0.

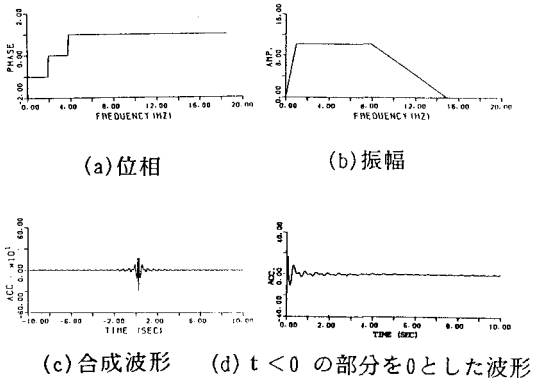


図-1 模擬地震動

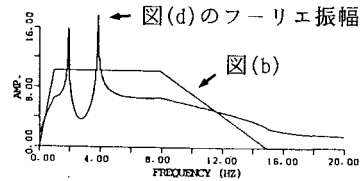


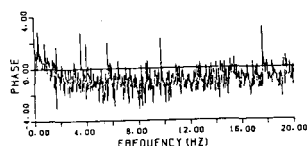
図-2 フーリエ振幅スペクトルの比較

0、標準偏差0.630ラジアンで正規分布で表現できた。そこで、正規乱数を用いて位相をモデル化し、波形を再合成した（図-6）。

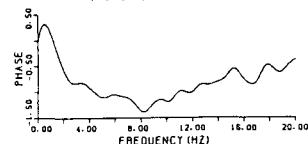
4. ケプストラム解析を用いた位相のモデル化：地震動記録は震源における破壊過程を示す時間関数（インパルス列）、震源から観測地点までの伝播経路の特性を示す時間関数（グリーン関数）、及び観測地点近傍の局所的な地盤構造による反射・屈折や媒質の不均質性などの情報をもつ時間関数（ランダムインパルス列）の3つの合成積で表現される。複素ケプストラム解析を用いて、実記録波形を3つの関数に分離する手法が開発されている²⁾。その手法を用いて、El Centro記録（1940、NS成分）の波形をグリーン関数とインパルス列に分離し、グリーン関数の位相に着目してそれをモデル化する。位相を平滑化した場合と最小二乗近似した場合に対するグリーン関数の位相のばらつきはどちらも正規分布の状態であらせ、その平均と標準偏差はそれぞれ0.0、0.241ラジアンと0.0、0.626ラジアンと求められた。再合成した波形が図-7(a), (b)である。(c)はEl Centro(1940, NS成分)の観測波形である。

5. まとめ：地震波形におよぼす位相の影響は非常に大きく、模擬地震動のシュミレーションでは従来行われている振幅と位相を独立に与える方法でなく、地震動の因果性に着目したシュミレーション法が必要である。位相のモデル化によって同じ基本特性を持った模擬地震動が数多くシュミレートできることになり、それを利用した解析も可能となる。ケプストラム解析からとまるグリーン関数の位相を平滑化するモデル化が最もよく波形を再現できるとと思われる。

参考文献 1) A. パポリス：工学のための応用フーリエ積分、オーム社、1972年。2) 佐藤忠信・土岐憲三・石塚 憲：ホモロフィックフィルターを用いた地震動位相特性の抽出、京都大学防災研究所年報 第31号、昭和 63年 4月。



(a) 最小位相スペクトル



(b) 最小位相スペクトルの平滑化

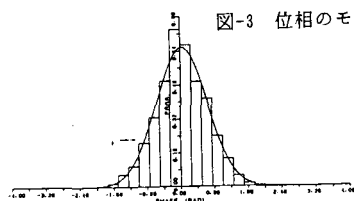


図-3 位相のモデル化

図-4 最小位相スペクトルのランダム性

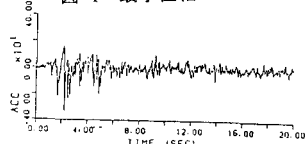


図-5 再合成した波形

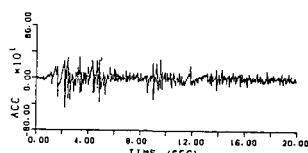
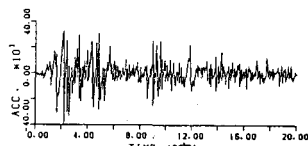
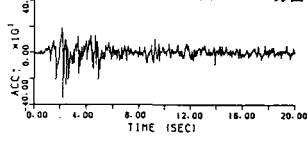


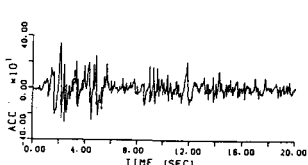
図-6 最小2乗近似を用いた場合



(a) 平滑化した場合



(b) 最小2乗近似を用いた場合



(c) El Centro(1940, NS成分)の観測波形

図-7 ケプストラム解析を用いた位相のモデル化