

徳島大学工学部 正員 ○沢田 勉
高松市役所 高橋 誠
中央復建コンサルタンツ 三宮通一

1. まえがき 強震記録をフーリエ解析して得られるフーリエ位相の差分(位相差分)は、地震動の非定常性と密接に^(1,2)関係する。本文では、このような位相差分を、地震波に含まれる表面波の分散特性の検出、および模擬地震動の作成に⁽³⁾応用したので、ここに報告する。

2. 表面波の分散特性の検出への⁽³⁾応用 位相差分を用いて表面波の分散特性を検出する方法を述べ、それによる解析結果も非定常パワースペクトル等と比較することにより若干の考察を加える。位相差分は次式で定義される。⁽¹⁾

$$\Delta\phi_k = \phi_{k+1} - \phi_k \quad (1) \quad \text{ここで、}\phi_k$$

は第 k 次の周波数のフーリエ位相である。ある周波数近傍の位相差分の平均は、その周波数成分波の到着時間と関係するから、式(1)の $\Delta\phi_k$ は、地震波の非定常性の情報を含む。Fig. 1は、強震記録(1968年十勝沖地震、八戸港湾)の解析より得られる式(1)の位相差分を、波形と対照させて示したもので、横軸は周波数、縦軸は $\Delta\phi_k/\Delta\omega$ 、 $\Delta\omega=2\pi\Delta f$ 、 Δf =周波数の刻み幅である。この図より、波形の強震部付近に $\Delta\phi_k/\Delta\omega$ が集中していることがわかる。この図は、周波数領域での位相差分の変動を表すから、以下ではこれを位相差分波と呼ぶ。文献(2)では、ある周波数近傍の位相差分の重み付平均が、その周波数成分波の到着時間と密接に関連することを指摘した。ここでは、平均化操作が波の平滑化と等価であることを考慮して、この位相差分波をローパスフィルターに通すことにより、到着時間の平均的な傾向を捉える。ローパスフィルターの上限の周期は、Fig. 1の位相差分波のフーリエスペクトルの第1ピークを含む周期とした。Fig. 2には、このようにして平滑化された位相差分波(太い実線)を示した。図中には、竜田による非定常パワースペクトルの等高線表示と、⁽⁴⁾神山による理論分散曲線より計算した群遅延時間も併記した。この図より、0.4 Hz 付近、および 1.0 Hz 付近で非定常パワーが大きい部分では、位相差分波に右上りの傾向があることがわかる。すなわち、これらの周波数付近では、長周期成分波がそれより短周期の波より速く到着するという、表面波の分散特性が現れているといえる。ところで、分散性を有する波にはエアリー相⁽⁵⁾が現われる。これは、極小の進行速度をもつ周波数成分はかたまて進行し、大量のエネルギーが集中して運ばれるという現象である。図中の 0.4 Hz 付近のパワーが大きい部分がエアリー相であれば、本解析法は誤った結果を与える。しかしながら、1.0 Hz 付近ではパワーのピークと到着時間がよく対応していること、また、理論分散曲線より求めた群遅延時間(点線)と位相差分波が、前述の周波数近傍でよく一致していることなどを考慮すると、0.4 Hz 付近のパワーがエアリー相によるものかどうかの判断は難しい。本解析法より得ら

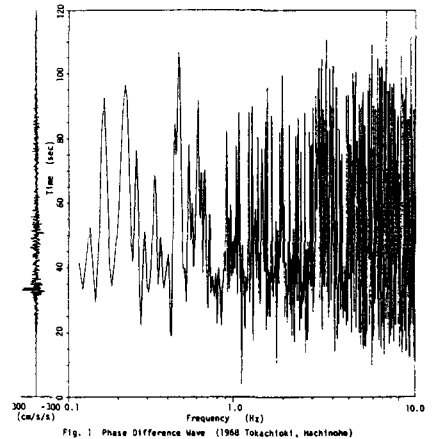


Fig. 1 Phase Difference Wave (1968 Tokachioki, Nacchino)

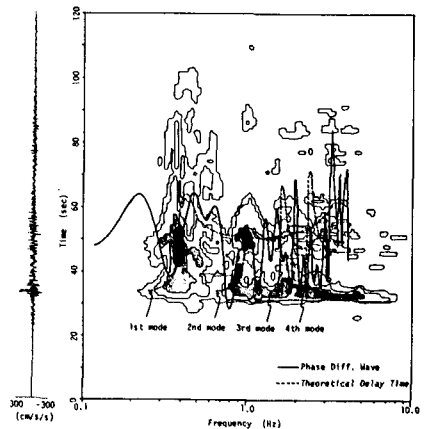


Fig. 2 Phase Diff. Wave, Theoretical Delay Time and Evolutionary Spectrum (1968 Tokachioki, Nacchino)

れた結果には、このような問題点もあるが、ある周波数近傍の成分波に分散特性があるか否かを判断するには有用である。本手法は、地震動記録のフーリエ解析より得られる位相差分波をローパスフィルターに通すだけ"で"いから、簡単であるという利点もある。

3. 位相差分分布のモデル化と模擬地震動への応用 位相差分のひん度分布(位相差分分布)は地震波の包絡線と対応する。このことを利用すると、振幅が非定常な模擬地震動を作ることができる。そのためには、実地震動の位相差分分布の形状を詳細に検討し、それを簡単なモデルで表さなければならぬ。Fig. 3, および 4 は、実地震動記録(1968年十勝沖地震, 室蘭, および青森)の位相差分の累積分布を正規確率紙上にプロットしたものである(太い実線)。図によると、この分布は正規分布(細い実線)とかなり異なる形状を示す。そこで、この分布を次のような確率密度関数でモデル化した。

$$f(\Delta\phi) = \frac{a_1}{2\pi} + \frac{a_2}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(\Delta\phi - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (2)$$

上式の第1項目は一様分布を、第2項目は正規分布を表し、 $a_1 + a_2 = 1$ である。式(2)の関数形を規定する係数 a_1, a_2, μ, σ は、式(2)と実分布の自乗和誤差を最小にするという条件より決定した。このモデルより発生した位相差分の累積確率を、Fig. 3, 4 に点線で示した。この図から明らかなように、モデル分布は実地震動の位相差分分布の形状をよく捉えてゐる。このことより、実地震動の位相差分分布には、正規分布により規定される分布以外に、全くランダムな特性をもつ分布が含まれることがわかる。このランダムな特性が、地震の震源特性や伝播経路の不規則性によるのか、または、地震動記録に含まれる種々の誤差によるのかについての検討は行なっていない。式(2)を用いて地震動の非定常性を表現する場合には、各係数に物理的意味をもたせることが必要である。一様分布の含まれる割合を表す係数 a_1 にはそれがはいが、いくつかの強震記録を解析した結果、 a_1 はほぼ 0.2 前後になることがわかったので、これを確定値として取り扱うことも可能であると考えてゐる。Fig. 5, および 6 は、式(2)より位相差分を発生させ、それを用いて

作成した模擬地震動の加速度応答スペクトル(点線)を示したものである。実地震動のそれ(実線)と比較すると、両者はよく一致してゐることがわかる。

4. おわりに 位相差分の2つの応用例について述べた。報告したように、位相差分概念は、地震動の非定常性の解析や、模擬地震動の作成等に有用である。本研究で使用した記録は京都大学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) 大崎他; 第5回日本地震工学シンポジウム講演集, 1978. (2) 沢田; 第6回日本地震工学シンポジウム, 1982. (3) 亀田; 土木学会論文集, 第235号, 1975, 3. (4) 神山; 土木学会論文集, 第284号, 1979, 4. (5) 岡本; 地震力を考えた構造物設計法, p. 80, オーム社, 昭54年。

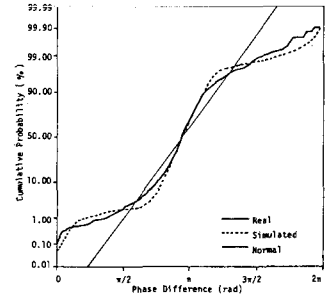


Fig. 3 Cumulative Probability Distribution of Phase Difference (1968 Tokachioki, Muroran)

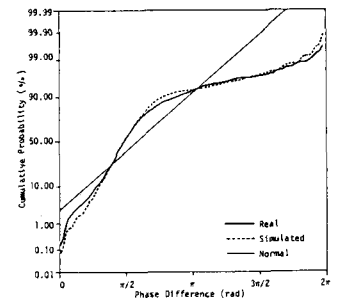


Fig. 4 Cumulative Probability Distribution of Phase Difference (1968 Tokachioki, Aomori)

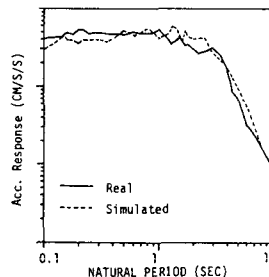


Fig. 5 Acceleration Response Spectrum (1968 Tokachioki, Aomori)

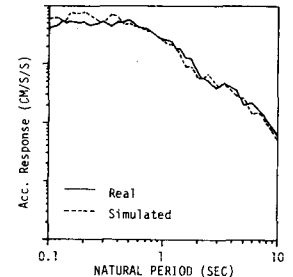


Fig. 6 Acceleration Response Spectrum (1968 Tokachioki, Muroran)