

(15) 地震動記録に含まれる多重震源過程の抽出

京 都 市 正 員 石 塚 憲
 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

1. はじめに

構造物の耐震設計を行う際に、基本的かつ重要な課題は地震動の設定法である。例えば原子力施設等の大型重要構造物の耐震性の照査のためによく利用される模擬地震動は、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、振幅と位相を独立に与えることによって合成している。しかし、地震動は波動の到着時刻以前では振幅がゼロとなる因果性関数であるから、フーリエスペクトルの振幅と位相の間には相関性がある。したがって、両者の独立性を仮定することによって合成された模擬地震動は、本質的に矛盾を含んでいることになる。地震動の位相特性は震源の破壊過程に基づくものと伝播経路の特性から決定されるものに分離できるので、本研究では地震動の位相特性を合理的に設定することを目的として、この2つの影響を分離するための方法論を構築する。このために、地震動記録は因果関数であり、震源における破壊過程がインパルス列で表現でき、伝播経路を表す伝達関数との合成積によって各観測点における地震動記録が表現できると仮定する。こうすることによって震源における破壊過程を地震動記録から分離抽出できることを示す。著者の一人はすでに最小位相推移関数を用いることによって断層面上の破壊過程の抽出できることを示したが¹⁾、本研究ではケブストラム解析²⁾を用いれば地震動記録から破壊過程を表す時間関数を容易に分離できることに着目し、これを達成するアルゴリズムを構築した。その適用例としてインベリアル地震(1979)の記録を用いて断層面上の破壊過程の推定を行う。

2. ケブストラム解析を用いた波形分離法

地震動記録 $f(t)$ は、震源における破壊過程を表す時間関数（インパルス列 $h(t)$ ）と震源から観測点までの伝達経路の特性を表す時間関数（グリーン関数 $g(t)$ ）との合成積で表現される。合成積の形で表現される信号のフーリエ変換は合成前の各信号のフーリエ変換の積となるので、帯域選択形のフィルタリング操作で両者を分離することは不可能である。一般によく行われるのは逆フィルターを用いる方法で、いずれか一方の信号の逆フィルターを構成して記録波形から他方を分離抽出する方法である。しかし逆フィルターの安定性や実現可能性を別にしても、その構成には対象となる信号についての正確な知識が必要であり、実際にはそれも未知であることが多く、この手法は一般に使えないことが多い。一方、二つの信号が和の形で結合している場合には、対象となる周波数帯域だけを選択的に取り出すフィルター等を用いた波形処理によって信号の分離が可能である。こうした点に着目した信号処理の手法としてケブストラム解析がある。これは、合成積の形で結合した波形をフーリエ変換によって積の形に変換し、さらにその対数をとることによって和の形に変換して処理する解析法である。特に複素ケブストラム解析は位相情報が変換の際に保持されるので、波形の復元が可能であり有用な解析手法である。本研究では複素ケブストラム解析を用いて、対象とする地震動記録のグリーン関数の特性を考慮し、位相アンラップ操作やフィルタリング操作の簡略化を行った上で、記録波形のみから破壊過程を表す時間関数と伝達経路の特性を表す時間関数とに分離することを試みる。解析法の概要を図-1に示す。まず、原波形 $f(t)$ をフーリエ変換し複素対数をとることによってグリーン関数とインパルス列のフーリエ変換形 ($\hat{G}(\omega), \hat{H}(\omega)$) の和の形に変

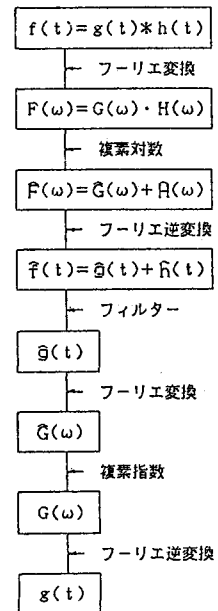


図-1 ケブストラム アルゴリズム

換する($\hat{F}(\omega)$)。次にこれをフーリエ逆変換しケプストラム($\hat{f}(t)$)を求める。インパルス列とグリーン関数は周波数領域において和の形に変換されるので、ケプストラムにおいても2つの時間関数 ($\hat{g}(t), \hat{h}(t)$) は和の形で表現される。したがって、適当なフィルターを用いることによってインパルス列を除去し、グリーン関数の情報を持つケプストラム ($\hat{g}(t)$) を分離抽出することが可能である。さらに、逆の手順をたどることによって通常の時間領域におけるグリーン関数を求めることができる。インパルス列については、原波形のフーリエ変換形をグリーン関数のフーリエ変換形で除することによってインパルス列のフーリエ変換形を分離できる。以下に、グリーン関数を8波重ね合わせて合成した波形に対して、上で述べた解析手法を適用し、インパルス列の分離がどの程度可能かを示す。用いたインパルス列は入力時刻が 0, 1, 3, 4, 5, 9, 13, 14 秒であり、強度は1.0, 1.5, 0.5, -1.0, 1.5, 2.0, -1.3, 1.5 とした。グリーン関数は1自由度形(固有周期1秒、減衰10%)のインパルス応答関数とした。図-2は合成された模擬波形である。図-3はケプストラム、図-4は分離した波形である。図-4からケプストラム解析を用いた波形分離法を用いれば、グリーン関数ならびにインパルス列の大きさ、インパルスの入力時刻とも精度よく分離することが可能であることが分かる。

3. インパルス列による震源推定

地震動観測記録をケプストラム解析を用いた波形分離法によってインパルス列を分離し、この中の顕著なインパルスに着目して逆に断層面上の破壊(発震)位置と時刻を推定する。いま、地表面上の任意の4個の観測点の空間座標 $(X_1, Y_1, 0) \sim (X_2, Y_2, 0)$ と各観測点におけるインパルスの到着絶対時刻 $T_{a1}, T_{a2}, \dots, T_{a4}$ から波動の伝播速度(S波速度、 V_s)が既知という条件のもとで、破壊点の空間座標 (X, Y, Z) と破壊時刻 T を求めることを考える。これは式(1)の方程式を解くことによって達成される。ただし、インパルス到着時刻は絶対時刻を知る必要があるので、解析に用いる地震動記録はトリガータイムが既知でなければならない。

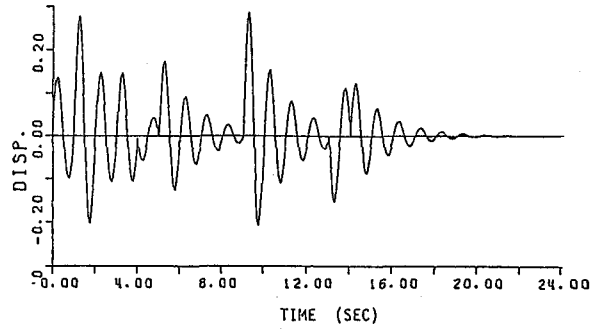


図-2 模擬波形

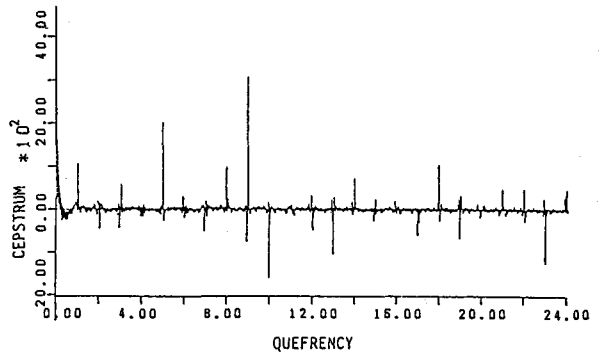
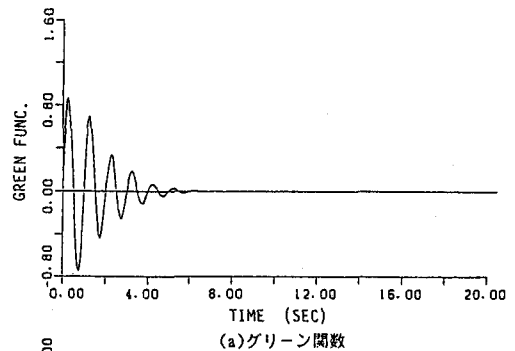
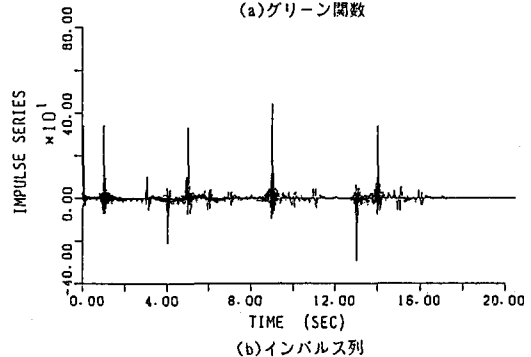


図-3 ケプストラム



(a)グリーン関数



(b)インパルス列

図-4 分離した波形

$$\begin{aligned} \sqrt{(X_1 - X)^2 + (Y_1 - Y)^2 + Z^2} &= V_s \cdot T_1 \\ \sqrt{(X_2 - X)^2 + (Y_2 - Y)^2 + Z^2} &= V_s \cdot T_2 \\ \sqrt{(X_3 - X)^2 + (Y_3 - Y)^2 + Z^2} &= V_s \cdot T_3 \\ \sqrt{(X_4 - X)^2 + (Y_4 - Y)^2 + Z^2} &= V_s \cdot T_4 \end{aligned} \quad (1)$$

$$T = T_{a1} - T_1 = T_{a2} - T_2 = T_{a3} - T_3 = T_{a4} - T_4$$

4. 実地震動記録に対する適用

1979年のImperial Valley 地震の記録に対して、ここで提案した波形分離法と震源推定法を適用し、断層面上での主な破壊点と破壊時刻を推定する。用いた記録はU.S.G.S.が発表している変位記録の内、Trigger Time の既知である14観測点の記録である。また、解析の対象をSH波1種類にしぼり、断層面上の1つの破壊によるインパルスが地震波の伝播速度の違いによって2つ以上のインパルスとして分離されることをなるべく防ぐため、Imperial断層に平行なN140°E成分の波形を用いた。本研究ではHartzellら³⁻⁴⁾の研究結果を参考にして断層面の位置ならびに規模を想定した。また、以後の震源推定のために用いた座標はU.S.G.S.によって公表されている震央を原点とし、断層の走行方向をY軸、断層に垂直な方向をX軸、鉛直方向をZ軸としている。S波の伝播速度はBradyら⁵⁾の地盤調査の結果から2.8km/secとした。

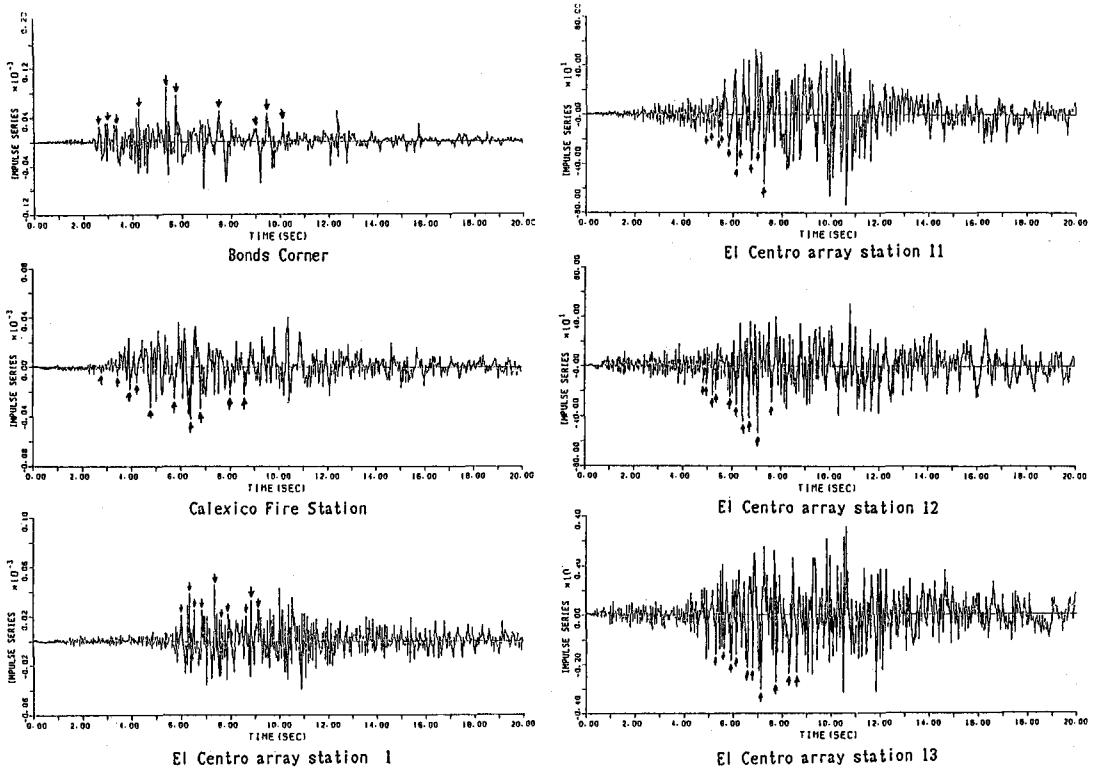


図-5 震源推定に用いたインパルス列

以上のデータを用いると、各観測点における最初のS波のインパルス到着時刻と最終のインパルスの到着

時刻を求めることができる。この区切られたS波の到着時刻内で各観測点において同数の顕著なインパルス抜き出してインパルス絶対到着時刻を設定し、式(1)を解くことによって断層面上の一連の顕著な破壊点を推定した。解析の結果14観測点の記録の内、精度よくインパルス列が分離できていると考えられるのは図-5に示した6観測点の記録であった。したがって、この6個のインパルス列から顕著と思われるインパルスを抜き出し(矢印で示す)式(1)を適用した。この時、4個の記録から1個の解(断層面の破壊)が求められるので、 $C_4=15$ 通りの解が得られることになる。得られた解の内、有意な解を平均したものをもっとも確からしい解とした。図-6は最も確からしい破壊点を示すとともに、Hartzellらが発表している結果と比較したものである。表-1に推定された断層面上の破壊点の破壊時刻を示す。Hartzellらが発表している結果を比べると推定した8つの主だった破壊点と、Hartzellらのくい違い量の大きな地点とがほぼ一致していることがわかる。くい違い量とインパルスの強度を同じ尺度で考えることはできないが、大きなくい違いが生じている部分では、大きなインパルスが発生していると考えられる。また、インパルスの発生時刻に関しては、第1番目のインパルスの発生時刻とU.S.G.S.が発表しているOrigin time(23時16分54.5秒)との間には2.18秒の差があるが、これは、断層面上での最も早い破壊の強度が、他の破壊点のそれと比べて相対的に小さかったため、大きなインパルスとして選ばれなかったためとであると考えられる。

表-1 推定された破壊時刻

破壊点 No.	破壊時刻
1	23:16'56.68
2	57.20
3	57.92
4	58.68
5	59.47
6	59.78
7	17'00.99
8	01.70

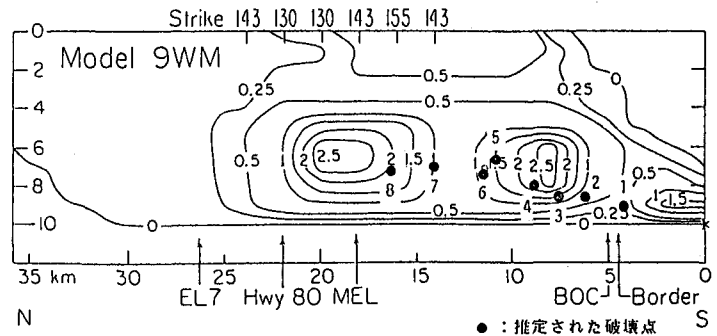


図-6 推定された破壊点とHartzellらが推定したディислоケーション分布

5. おわりに

本研究では地震動記録から分離したインパルス列を用いて断層面上の破壊過程の推定を行った。本研究の目的とした地震動記録に含まれる位相情報の抽出は、分離したインパルス列が、断層面上の破壊過程を表現している点からみて、達成されていると考えられる。地震動に含まれる位相情報を明らかにするためには、伝播経路の特性と断層面上の破壊過程に起因する位相に着目して、両者の特性を明確にする必要があるが、両位相特性の分離手法を開発し、断層の破壊過程の抽出を試みた本研究は、地震動の位相特性を明らかにする上で有用な知見を提供するものといえる。

参考文献

- 1) 辰巳安良・佐藤忠信：地震波の因果性を用いた1979Imperial Valley 地震の多重震源解析、土木学会論文集、第380号/I-7、pp.475-484、1987。
- 2) 森下巖・小畑秀文：信号処理、計測自動制御学会、pp.149-173、1982。
- 3) Hartzell, S.H. and T.H. Heaton: Inversion of Strong Ground Motion and Teleseismic Data for the Fault Rupture History of the 1979 Imperial valley, California Earthquake, B.S.S.A., Vol.73, No.6, pp.1553-1583, April, 1982.
- 4) Hartzell, S.H. and D.V. Helmburger: Strong-Motion Modeling of the Imperial Valley Earthquake of 1979, B.S.S.A., Vol.72, No.2, pp.571-596, April, 1982.
- 5) Brady, A.G., Perey, V. and P.N. Mork: Seismic Engineering Data Report, Open-File Rept 80-703, U.S.G.S., April, 1980.