

(44) 強震記録のポーラリゼーション解析

専修大道短大 正員 金子 孝吉
 専修大道短大 正員 三上 敬司
 北大理学部 正員 高波 鉄夫

I. まえがき

時間領域で適用する非線形ポーラリゼーション・フィルター解析 (polarization filter techniques) の一つである "REMODE"-filter解析は Flinn¹⁾ によって提案されたものであり、地震波のある方向に指向された位相を強調するために多くの研究者に用いられている。しかし、それらの多くはシグナルとノイズの分離を行うことに注がれていた。それはまた実地震波の波形解析においては、震源で発生したP波、S波とそれらの実体波が地表下の境界層や不整形な地層によって反射、屈折を行った結果として誘起された後続波との分離を目的とするためにも使われている。さらに、微小地震と常時微動などのバックグラウンド・ノイズとの分離、あるいは近年多重震源の判定や実体波と表面波の波形識別にも利用されこの種のフィルターに関する知識が蓄積されてきた^{2), 3)}。解析の特色は3次元空間での地震動粒子軌跡の楕円球の性質をあらわす特性 (rectilinearity) と方位指向性 (direction of polarization) の2つのパラメータで表現しようとする考えに基づいている。

さて、本研究は3成分加速度強震記録を用いて地震動のポーラリゼーションの状態を推定し、波動主成分の識別と分離を行ったものである。さらに進めて、地震動の最大のパワーを示す主要動部における最大主軸成分方向の波動を合成している。その結果、この3成分強震記録から合成された最大主軸成分波は観測地点で最大の震動をする方向の地震動の波形であると言える。

II. ポーラリゼーション・フィルター解析

ここで示す道路橋架設地点で観測した強震記録のポーラリゼーション解析については Montalbetti³⁾ の手法を基礎としており図-1に示した流れの操作手順に従い実行される。

3成分地震波記録 G_{e_i} の中で水平成分の方位は橋軸方向 (LG) と橋軸直角方向 (TR) の場合が多く、観測地点が異なれば水平成分の方向もそれぞれ異なるため、まず座標変換して NS、EW の成分波 G_i を作成する [2]。

立上りから1組N個のデジタル量に関する共分散行列Vを求める。この行列の固有値と固有ベクトルを計算し、これらの値から最大主軸、中間主軸および最小主軸の大きさ (λ_i) とそれぞれの入射角 (ψ_i)、方位角 (θ_i) を計算しその分散の大きさの時間変化を図示する。ただし、 $i=1,2,3$ である [3] [4]。方位角と入射角により地震動の基本的な水平方位成分R(Radial)とその方向に直角な成分T(Transverse) および上下方向Z(Vertical)の3成分の波を合成するための direction function $D_i = (e_i)^k$ ($i=R,T,Z$) を求める。なお e_i は方位座標変換の関数である。また一方 rectilinearity function は Flinn が用いたような $F_1 = \{1 - (\lambda_2/\lambda_1)^n\}^m$ の他に3次元に拡張した次式

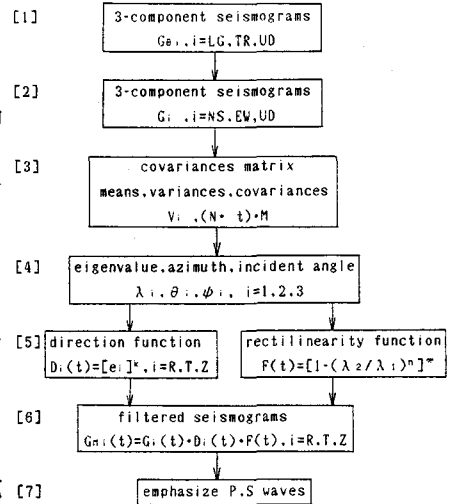


図-1 Polarization Filter 解析の流れ

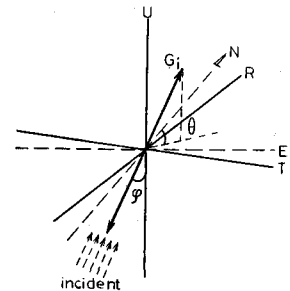


図-2 座標と主軸

$$F_2 = \left\{ 1 - \left(\frac{\lambda_2^2 + \lambda_2 \lambda_3 + \lambda_3^2}{3 \lambda_1^2} \right)^n \right\}^m, \quad F_3 = \left(\frac{\lambda_1^2 - \lambda_2^2}{\lambda_1^2 - \lambda_2 \lambda_3} \right)^m \dots \dots (1)$$

も定義しておく。

なお、解析例においては $k=2$ $n=1$ $m=1$ を用いている。さてこれらは N 個のデジタルデータ（データ間隔 t 秒のとき $N \cdot t$ 秒の時間）分に相当するもので、線形な時間ウィンドウ関数になっている。これを地震波の全データに適用するため、ウィンドウの時間幅を一定にしてウィンドウの中心の時刻 t_j ($j=1, 2, \dots, M$) のフィルター関数として順次時刻を再新し同じ計算を繰り返す。時刻の移動により M 回ウィンドウが変化するため非線形フィルターとみなすことができるが、隣のウィンドウ同士は重なる時間領域をもっており低域通過フィルターを適用した場合に該当している [5]。

結局目標とするところの主軸成分を強調した地震波形 G_{Mj} は次式で表現することができる [6]。

$$G_{Mj}(t) = G_{ij}(t) \cdot F_j(t) \cdot D_{ij}(t) \dots \dots \dots (2)$$

さらに、“REMODE”filter を用いて P 波初動部から推定された入射方向の成分とそれと入射角の方位が平行で入射角が直角な S V 波の成分を強調するような P 波、 S 波を合成し作図することによって波形識別を容易にしている [7]。

Ⅲ. 強震記録の主成分解析と波形識別

ポーラリゼーション・フィルターを用いて実地震の記録を解析するわけであるが、ここで扱った強震記録は表-1に示すものである。

表中の5つの観測地点（幌満橋、千代田大橋、島松沢橋、広尾橋、石狩河口橋、札幌IC高架橋）について主成分解析を行なった。

なお、観測地点は HOR、CHI、SHI、HIR、KAK、SAIのようにコードネームで表わすことにする。主成分解析を行った結果から、HOR および HIR の場合を図-2および図-3に示す。最大（実線）、中間（破線）および最小（点線）の主軸の入射角 ψ 、方位角 θ として λ の時間変化を示した。

入射角は鉛直軸に対するものであるから最大主軸 ψ が HOR では 20sec ぐらいまでかなり上下動が支配的であるのに対して HIR では 4sec 以後はほぼ θ 90° であり水平動が卓越していることになる。方位角の図を比べてみると HOR は全時間殆ど NS 方向を向いているのに対し HIR では主要動部 (16 sec 付近) の方位は中間主軸が $\theta=0^\circ$ つまり NS 成分に、

表-1 浦河沖地震と強震観測地点

| 地震 | 浦河沖地震 本震 1982.03.21.11:32 N42°04' E142°36' D=40km N=7.1 | | |
|-----|---|---------------------------------------|--|
| 観測点 | (1) 幌満橋 (HOR) | 地点 N42°04' E143°02' $\Delta=36.0$ km | 加速度強震計 SMAC-B2 GL 3成分 LG(N52°30'E),TR,UD A _{1max} =95.0 A _{2max} =100.1 A _{3max} =29.8 |
| | (2) 千代田大橋 (CHI) | 地点 N42°55' E143°23' $\Delta=168.1$ km | 加速度強震計 SMAC-B2 GL 3成分 LG(N53°45'E),TR,UD A _{1max} =74.0 A _{2max} =83.7 A _{3max} =17.0 |
| | (3) 島松沢橋 (SHI) | 地点 N42°55' E141°32' $\Delta=128.4$ km | 加速度強震計 SMAC-Q GL 3成分 LG(N38°25'W),TR,UD A _{1max} =121.0 A _{2max} =107.7 A _{3max} =58.7 |
| | (4) 広尾橋 (HIR) | 地点 N42°16' E143°19' $\Delta=63.0$ km | 加速度強震計 SMAC-Q GL 3成分 LG(N23°00'E),TR,UD A _{1max} =265.8 A _{2max} =207.1 A _{3max} =72.0 |
| | (5) 石狩河口橋 (KAK) | 地点 N43°13' E141°21' $\Delta=163.6$ km | 加速度強震計 SMAC-B2 GL 3成分 LG(N42°42'E),TR,UD A _{1max} =96.2 A _{2max} =45.3 A _{3max} =14.5 |
| | (6) 札幌IC高架橋 (SAI) | 地点 N43°04' E141°25' $\Delta=147.2$ km | 加速度強震計 SMAC-Q GL 3成分 LG(N09°43'W),TR,UD A _{1max} =249.9 A _{2max} =299.2 A _{3max} =40.5 |

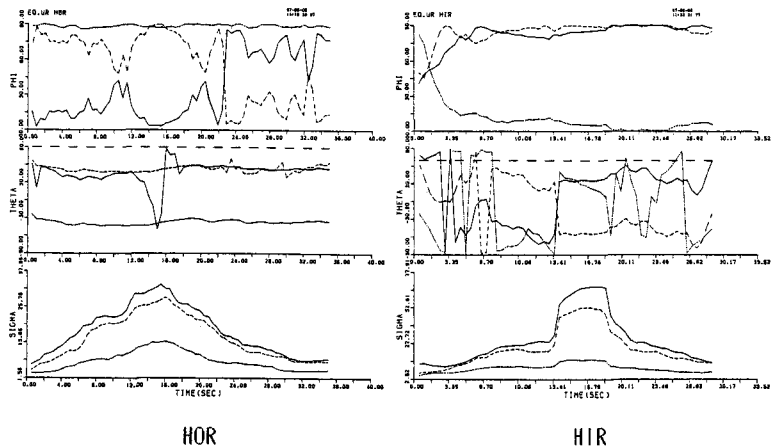


図-2 主軸パラメータの時間変化 図-3 主軸パラメータの時間変化

最大主軸が EW 成分に一致していることがわかる。

また、下の図は地震動のパワーを示すものと見なせる。HOR が次第に大きくなり徐々に減少していくのに対して HIR は急に大きな力の波が来ていることを示している。結局 HOR は震央距離が小さく浦河沖地震の発生の情報を強く受けており、HIR では伝播経路および地表面の影響を受けていることがわかる。

また、式(2)で与えた rectilinearity の時間変化を示したのが図-4である。太実線は F_2 で、細線は F_3 である。なお、KAKと SHI には主軸のパラメータの時間変化図をあわせて示してある。rectilinearity の時間変化は各点の特性がそれぞれ現われている。 $F_2=1$ の場合は直線であり、 $F_2=0$ の場合は球の意味を持っている。また、 $F_2=2/3$ の値で円盤を意味している。一般に楕円球の体積を考慮した F_2 は F_3 より変動が小さいことが言え、主要動は水平動が卓越することが多いため F_2 は $2/3$ の値に近くなる。

何れの場合も主軸パラメータと rectilinearity の時間変化は関係しており、 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ の急激な変化につれて rectilinearity も変化していることがわかる。

IV・主要動最大主軸成分波

さて、主要動の中で振幅の最大な波の主軸(たとえば図-5)を求め、最大主軸 λ_1 の示す方向に生波形を変換し、波動の伝播方向(Radial)もしくはそれに直角な成分(Transverse)の波形を合成した。

図-6は HOR の場合で上から UD, NS, EW(LG, TR)から座標変換してもとめる)および T, R 成分の波形である。この場合、生波形は上下動が極めて卓越している。図-2の主軸の方位からもわかるように R 成分の振幅が大きくなっている。このことは、震源方向からの入射波の成分が卓越していることを示すものである。

さらに図-7は HIR におけるもので生波形 UD、NS、EW、主成分波形 T, R、強調波形 P, SV である。P, SV は "REMODE" Filter を使って入射方向の P 波成分とそれに直角な SV 波成分を強調して求めたものである。

図をみると最大主軸成分を示す T 成分が EW 成分によく似ており振幅がわずかに大きくなっていることがわかる。この HIR の地点は表-1からわかるように震央距離が $\Delta=63.0$ km であるから後続の水平動の波が上下動に比べて極めて卓越している。

主要動の最大振幅を示す部分の最大主軸成分 λ_1 の方位で変換して合成した T 成分波が EW 成分に比べて

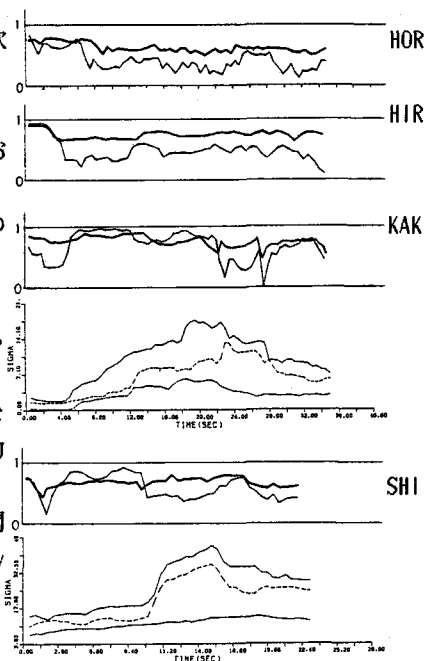


図-4 rectilinearityと主軸のパラメータ

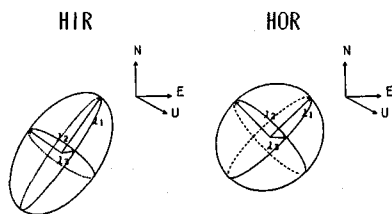


図-5 最大主要動における主軸と楕円球

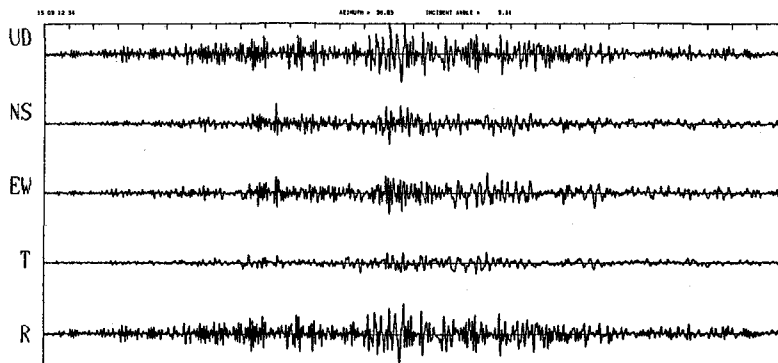


図-6 強震記録の生波形、合成波形 (HOR)

どの程度大きいのかを調べることにする。

T 成分(実線)と EW 成分(破線)のパワースペクトルを求めて図-8に示す。T 成分の振幅が EW 成分より各周波数において大きくなっていることがわかる。このように各地点における記録においても最大主軸の T 方向成分はいずれも生波形のどれかに近い波形を示してはいるが、振幅は幾分か大きくなる傾向にある。つまり、T 成分波は主要動における最大の地震動の波を示すものである。また、P 波成分と SV 波成分は完全に分離することができる。

以上のことからこのポーラリゼーション・フィルター解析は強震記録の波形識別には有力な手法であるということが言え、最大主軸の方向成分はこの地震動が持つ最大の成分波を有する波であると言える。

V. あとがき

ポーラリゼーション・フィルターを用いた手法は古くから利用されていたが、時間領域における移動平均的な手法であるため、周波数領域で操作するほどの威力を発揮しないこともあって、いままで工学の分野では利用頻度が少なかったように思われる。時間領域ではあっても主成分解析から得られた方位指向性の特性と粒子軌跡の rectilinearity 特性を考慮したデジタル・フィルターを使用することによって空間的に地震動をとらえ、波形分析を行えるということで十分にその威力を発揮している。特に最大主軸成分波を作成することができるため、工学的にも耐震設計におけるより実的な入力地震波として提供できるだろう。

本研究の解析には北海道大学大型計算機センターの HITAC 680H を使用した。

なお、ここで使用した強震記録を提供して頂いた開発局土木試験所構造研究室 吉田 紘一室長 に深謝の意を表します。

参考文献

- 1) Flinn, E.A. : Signal analysis using rectilinearity and direction of particle motion, Proc. I.E.E. E.E., 53, 1874, 1965.
- 2) Griffin, J.N. : Application and development of polarization(REMODE) filters, Seismic Data Laboratory Report 141, Teledyne Inc, Alexandria, Va. (AD-630-515), 1966.
- 3) Montalbetti, J.F. & Kanasewich, E.R. : Enhancement of Teleseismic Body Phases with a Polarization Filter, Geophys. J.R. astr. Soc., 21, 119-129, 1970.
- 4) Kaneko, T. & Watanabe, N. : Multiple Filter Orbit Analysis of Seismograms, Proc. of the 6th Japan Earthq. Eng. Symp., 409-416, 1982.
- 5) Watabe, M., Tohdo, M., Hanazato, t. & Matsukawa, k. : Some Features of Earthquake Ground Motions due to the MEXICAN Earthquake of September 19, 1985, Proc. of the 7th Japan Earthq. Eng. Symp., 319-324, 1986.

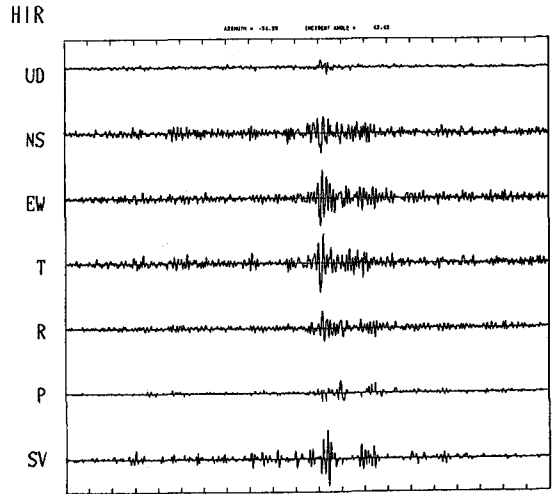


図-7 強震記録の生波形、合成波形、強調波形

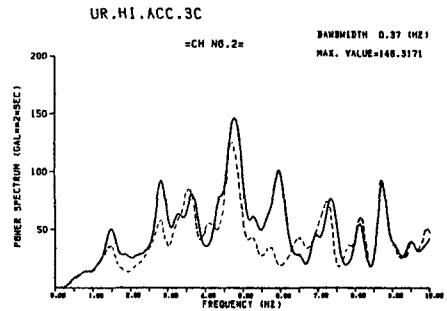


図-8 パワースペクトル図 (HIR)