

(35) 千葉アレーサイトの地盤による S 波増幅の震動方向依存性

信州大学 正会員 泉谷恭男

信州大学 杉村昌則

1. はじめに

地震動の卓越方向は、震源での地震波の放射パターン、伝播経路での散乱、地盤内での増幅などの影響の総合されたものである。これら様々な影響のうちで、局所的な地盤の影響が他よりも大きいという研究結果があり、入射してきた地震波のうち、ある特別な方向成分のみを強く増幅するような性質 (directional site resonance) を地盤が有していると推定されている^{1),2)}。

我々は前論文³⁾において、千葉アレーにおける、8~10 Hz の周波数成分の地震動の卓越方向について解析し、それに対する震源から千葉アレーに至る部分での影響と、局所的な地盤の影響を定性的に分離することを試みた。その結果、比較的大きい地震の際には、アレーに入射して来た地震波の偏向性が弱いため、局所的な地盤の性質を反映した震動卓越方向を示すこと、逆に、比較的小地震の場合には入射してきた地震波の偏向性が強いいため、局所地盤の影響をあまり受けないことを見出した。

今回は、0~2, 2~4, 4~6, 6~8 Hz の地震動についても同様の解析を行い、震動卓越方向に対する地盤の影響について検討し直した結果を報告する。更に、局所的な地盤の影響について、地震時の地盤の震動状態との関連についても考察する。

2. 解析手法

使用したデータ、地震動の卓越方向の定義、地震動の卓越方向特性を空間的な平均場と変動場に分離する手法については、前論文³⁾に詳しく述べているので、ここでは要点のみを簡単に記す。

千葉アレーデータベース⁴⁾として公開されている地震記録の内、震央距離が 70 km 以内の 17 地震の記録を解析した。用いた観測点は、C0~C4 および P1~P4 の 9 地点であり、深さ 1 m に埋設された加速度計の記録を解析した。これら 9 観測点は半径 15 m の円内に配置されている。5 種類のバンドパスフィルター (0~2, 2~4, 4~6, 6~8, 8~10 Hz) を通した加速度記録から S 波が卓越している強震動部分を幅 5 秒のウィンドウをかけて抽出し、主軸解析⁵⁾を行った。

S 波部分のみを用いているため、地震動の最大主軸と中間主軸はほぼ水平面内にある。東から反時計回りに測った最大主軸方向 ϕ_{jk} を震動卓越方向と定義する。 j は地震、 k は観測点を示す添字である。また、中間固有値の最大固有値に対する比 γ_{jk} を用いて、偏向性の強さを示す。

観測された (ϕ_{jk}, γ_{jk}) は震源、伝播経路、地盤の性質を反映しているはずである。これを図-1 のように、観測された震動卓越方向特性 (ϕ_{jk}, γ_{jk}) は、各地震に固有でかつ 9 観測点に共通する要素 (ϕ_j, γ_j) と、地震に無関係で各観測点に固有の要素 (ϕ_k, γ_k) が相乗的に合成された結果であると仮定する。図の楕円の長軸方向は ϕ を、短軸の長さとの長軸の長さの比は γ を表している。(a) は、地震 j の際にアレー全体としては等方的に震動していたが、観測点固有の性質によって、観測された地震動は卓越方向特性 $(\phi_{jk}, \gamma_{jk}) = (\phi_k, \gamma_k)$ を有するに至ったことを示している。また (b) は、地震 j の際にアレー全体が震動卓越方向特性 (ϕ_j, γ_j) を有しており観測点 k は特別な性質を持たなかったとすると、観測された地震動は卓越方向特性 $(\phi_{jk}, \gamma_{jk}) = (\phi_j, \gamma_j)$ を有することを示している。(c) はアレー全体がある震動卓越方向特性を示し、観測点も固有の性質を有している場合である。

震源での放射特性や震源から千葉アレーに至る伝播経路での地震波の散乱の影響、アレー観測点の地盤の平均的な性質は共通要素 (ϕ_j, γ_j) に含まれ、 (ϕ_j, γ_j) は j 地震の際のアレー全体の平均的な震動卓越方向特性を表している。これに対して (ϕ_k, γ_k) は各観測点のごく近傍の地盤状態等の影響を表しており、アレー全体の平均的な震動場 (ϕ_j, γ_j) からの変動分に相当する。つまり、 k 地点はアレー全体の平均的な地点に比べて ϕ_k 方向に震動し易いこと、また、 γ_k が小さい場合にはその傾向が激しいことを意味する。

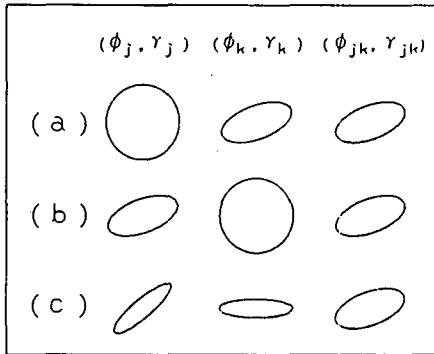


図-1 平均場と変動場の合成

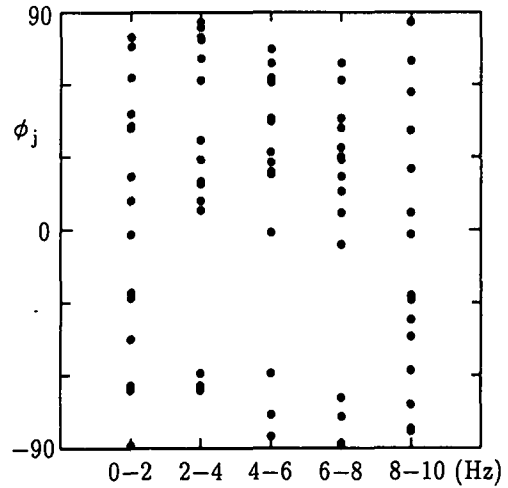


図-2 平均的な震動卓越方向 ϕ_j

5つの周波数帯毎に、17地震の際の9地点の記録について観測された (ϕ_{jk}, γ_{jk}) を最もよく説明できるように、17地震の (ϕ_j, γ_j) と9観測点の (ϕ_k, γ_k) とを推定した。

3. 平均場

以上の操作によって得られた17個の地震の際のアレーの平均的な震動卓越方向 ϕ_j を、5つの周波数帯について図-2に示す。2~4, 4~6, 6~8 Hzの3つの周波数帯において、 $-10 \sim -60^\circ$ の範囲に ϕ_j のプロットが存在せず、空白の領域が見られる。この空白領域は他の周波数帯(0~2, 8~10 Hz)には現れておらず、震源から出た地震波そのものが最初から持っていた性質とは考えにくい。何故なら、震源理論によれば、射出パターンが周波数によって変化することはないからである。また、17地震についての震源から千葉アレーに至る伝播経路は異なっているため、伝播経路での影響とも考えにくい。従って、この現象は、千葉アレーサイト全体が2~8 Hzの周波数帯でこの方向に震動しにくい性質を持っている、もしくは、それ以外の方向に震動しやすい性質を持っていると考えるのが自然であろう。

4. 変動場

5つの周波数帯の (ϕ_k, γ_k) について示したものが図-3である。この図は各観測点においては、楕円の長軸である ϕ_k 方向に地震動が卓越し易いことを示している。偏平な楕円で示された場合ほどその性質が強い。0~2 Hzの場合は9観測点共にほぼ円形であり特別な性質を示さない。

一方、周波数が高くなると、各観測点の固有の性質が現れ、 (ϕ_k, γ_k) で表される楕円は偏平になる。今回解析した9観測点の内では、特にP3観測点が最も強い局所的な変動を表している。僅か10 mしか離れていない観測点間で地震動の性質が異なる原因は、ごく表層の地盤内にあると考えるのが妥当であろう。

各観測点には、地表から10 mの深さにも地震計が設置されている。1987年千葉県東方沖地震の際の1 mと10 mの深さでのS波部分の観測記録のスペクトルの比が、震動方向によってどのように変化するかを調べてみた。NS, EW成分の観測記録から、方向を 10° 毎に変えた成分波を合成し、スペクトル比(1 m / 10 m)を求めた。図-4に、C0およびP1~P4地点において、スペクトル比の形(特にピークの周波数)が最も異なる直交2方向成分のスペクトル比を示した。スペクトル比のピーク周波数の変化に注目すると、C0とP2地点においては、どの震動方向でも大差ない。P1とP4地点では、 $E10^\circ N$ 成分または $E20^\circ N$ 成分のスペクトル比のピーク周波数とその直交成分のものよりも高い。しかし、その違いは僅かである。ところが、P3地点のスペクトル比のピークは、 $E10^\circ N$ 成分では5.5 Hz付近、 $E80^\circ S$ 成分では4.5 Hz付近と、

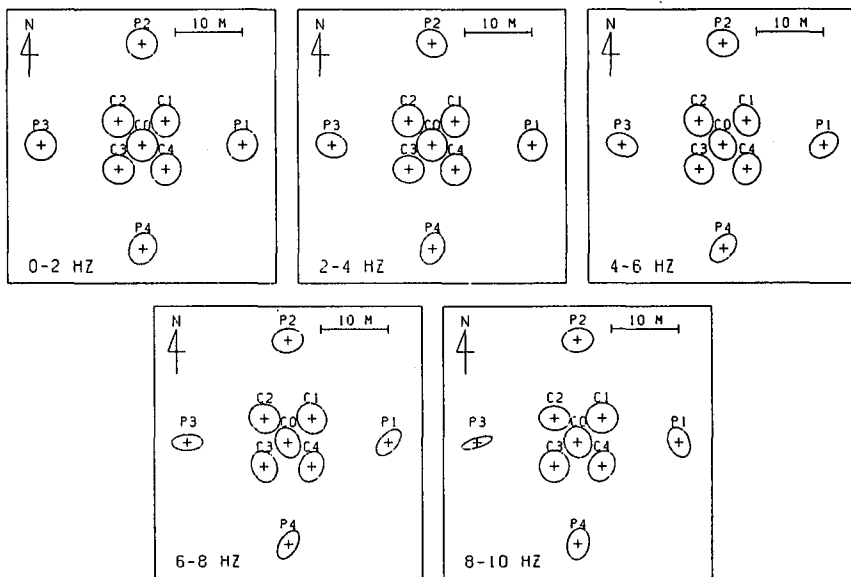


図-3 変動場 (ϕ_k, γ_k)

明らかにピークが分離しているのが見られる。千葉アレーにおける地盤の伝達関数が震動方向によって異なることは、Lu ほか⁶⁾によっても見いだされている。彼らはその違いを除去して平均的な伝達関数を得る方法を提案している。しかし本研究では、P3 地点における震動方向によるスペクトル比の違いの原因について若干の考察を行う。

C0 地点での地盤モデル⁴⁾を用いて S 波垂直入射に対する理論スペクトル比を計算すると実線のようになり、P3 地点における E10°N 成分のスペクトル比のピークをほぼ説明できるが、E80°S 成分については説明できない。理論スペクトル比のピーク周波数は、地盤内での多重反射の結果、深さ 10m で節を形成する波の周波数に相当する。従って、もし、観測スペクトル比を S 波の重複反射モデルで説明するとすれば、E80°S 方向に振動する S 波速度は E10°N 方向に振動する S 波速度よりも遅いと考えなければならない。仮に、深さ 10 m よりも浅い地盤内の S 波速度を 2 割減じて計算してみると点線のようなスペクトル比となり、E80°S 成分のピークを説明できるようになる。

以上の考察から、観測される地震動卓越方向に対する局所的な地盤の影響としては、ある方向の震動成分が他の方向の成分よりもただ単純に強く増幅されるというようなもの^{1),2)}ではなさそうである。図-4に見られるような、スペクトル比のピーク周波数が震動方向によって異なるというような現象が、図-3に示された (ϕ_k, γ_k) の周波数による複雑な振舞いの原因となっている可能性がある。このようなスペクトル比のピークずれの原因として、ごく表層の地盤が S 波速度に関して異方的な性質を有していることが考えられ、また、その状況は狭い範囲でもかなり異なっていると思われる。

5. まとめ

密に配置された加速度計アレー記録を解析し、17 個の地震の震動卓越方向特性について検討した。その結果以下のことが明らかになった。

1. 千葉アレーサイトは地震の際に、2~8 Hz の周波数帯において、E10°S~E60°S 方向に揺れにくい性質を有している。

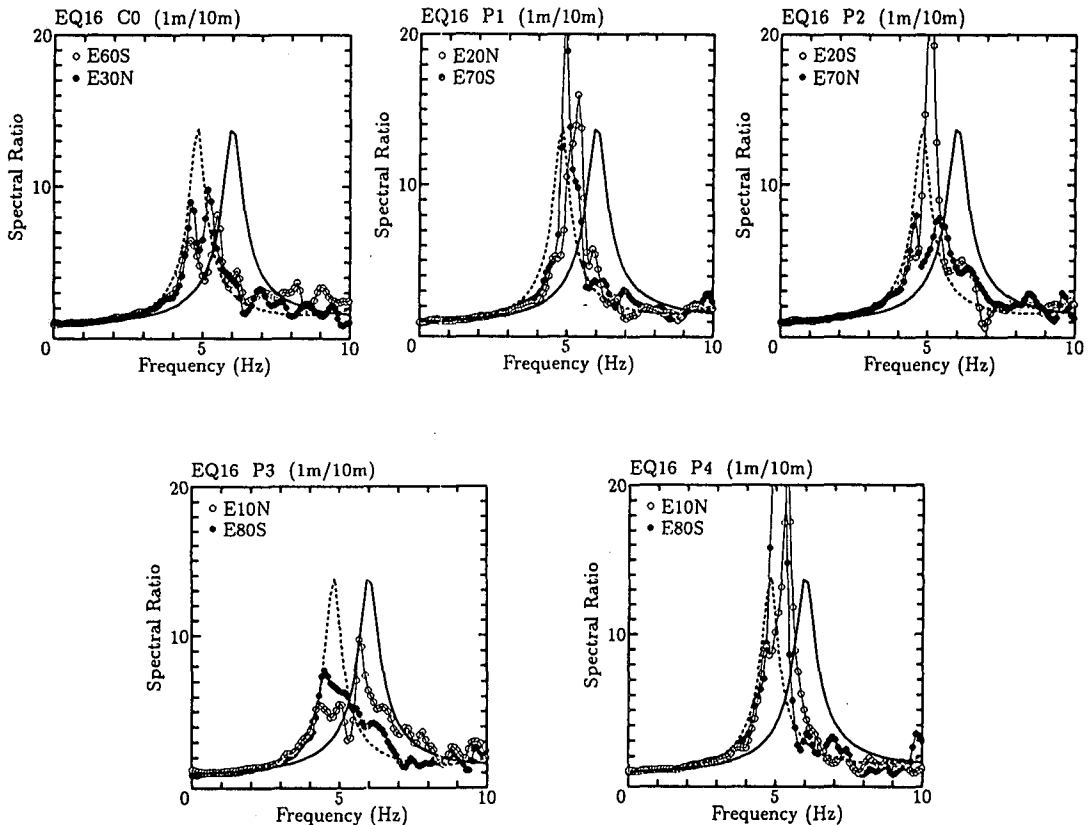


図-4 1987年千葉県東方沖地震の地震動スペクトル比

2. 地震動卓越方向に対する局所的な地盤の影響は、観測点毎に異なる。また、高周波数成分ほど著しい。
3. 局所的な地盤の影響は、表層地盤がS波速度に関して異方的な性質を有するため、振動方向によって地盤の応答特性が異なっているために引き起こされている可能性がある。

謝 辞

千葉アレーのデータは東京大学生産技術研究所片山研究室よりお借りした。記して感謝します。本研究は文部省科学研究費の補助を受けて行った。

文 献

- 1) Bonamassa, O. and Vidale, J.E.: *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.81, pp.1945-1957, 1991.
- 2) Vidale, E., Bonamassa, O. and Houston, H.: *Earthquake Spectra*, Vol.7, pp.107-125, 1991.
- 3) 泉谷恭男, 寺田彰: 地震第2輯, Vol.46, pp.35-44, 1993.
- 4) Katayama, T., Yamazaki, F., Nagata, S., Lu L. and Türker, T.: Report No. 90-1(14), Institute of Industrial Science, University of Tokyo, 100pp 1990.
- 5) 星谷勝, 石橋裕: 土木学会論文報告集, No. 268, pp.33-46, 1977.
- 6) Lu, L., Yamazaki, F. and Katayama, T.: *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, Vol.21, pp.95-108, 1992.