やや長周期地震動を用いた 地中埋設地震計の方位推定

東京電力株式会社*

植竹 富一

東電設計株式会社**

真下 貢

株式会社竹中工務店技術研究所***

天池 文男

An Azimuthal Estimation of Underground
Seismographs Using Long Period
Ground Motion

Tomichi UETAKE

Tokyo Electric Power Company, Uchisaiwai-cho
1-1-3, Chiyoda-ku, Tokyo 100, Japan

Mitsugu MASHIMO

Tokyo Electric Power Services Co., LTD,
Uchisaiwai-cho 1-3-1, Chiyoda-ku,
Tokyo 100, Japan

Fumio AMAIKE

Technical Research Laboratory, Takenaka
Corporation Minamisuna 2-5-14,
Koto-ku, Tokyo 136, Japan

(Received May 30, 1991;

Accepted July 24, 1991)

§ 1. はじめに

近年、地盤の振動性状や地盤中での地震波の伝播特性の把握を目的として、地盤中でアレー観測が行われるようになり、記録の蓄積、解析技術の進歩とともに精密な解析が進められつつある。

一方、このアレー記録の解析精度は、解析手法、地下構造のモデル化ばかりでなく、時刻や地震計設置方位等、観測システム自体の精度にも影響されと考えられる。

このうち埋設地震計の方位については、設置時に方位の精度を確保する特別な工夫がなされる場合〔例えば深掘委員会(1986)〕もあるが、一般にはボーリング孔頂部のけがき線や磁石式の方位計で方位を合わせるだけの場

合が多いのが現状であろう。埋設地震計の方位についての議論は佐藤・片山(1983)の例があるものの、実際に記録を解析する際には、設置方位が正しいと仮定している場合が多いのが実状と考えられる。

今回、地中地震計の方位推定の試みとして、東京電力福島第一原子力発電所構内に設置されている加速度強震計の方位を、観測記録に見られた周期数秒～十数秒の成分を用いて検討したのでその結果を報告する。

§ 2. 調査対象地震計の概要

福島第一原子力発電所は福島県東部にあり、太平洋に面して立地している。今回、調査対象とした地震計をFig. 1に示す。(a)は平面図、(b)は東西方向の断面図である。建屋周辺地盤に設置された地震計のうち、P7(OP+13.5 m: OPは小名浜港の平均海水面を示す)は埋戻し土上に、P12(OP-4 m)、P4(OP-18 m)、P13(OP-18 m)、P14(OP-130 m)は泥岩中に設置されている。また、P3(OP+1 m)、P5(OP+1 m)、P6(OP+1 m)は建屋最下部のコンクリートスラブ上に設置されている。

地震計は変位帰還型(P3, P4: 固有振動数 $f_0=450$ Hz)及び速度帰還型(P5~P14: 固有振動数 $f_0=5$ Hz)の加速度強震計である。地震観測装置の総合周波数特性

Fig. 1. Installation points of seismographs in Fukushima-daiichi Nuclear Power Plant.

* 〒100 東京都千代田区内幸町 1-1-3

** 〒100 東京都千代田区内幸町 1-3-1 幸ビル 8 階

*** 〒136 東京都江東区南砂 2-5-14

は、0.1~20 Hz でほぼフラットとなっている。収録システムは、最深点 P14 への入力 1 gal 以上で起動され、記録は、遅延時間 5.12 秒、AD 変換 12 bit、サンプリング周波数 100 Hz で MT に収録されている。

§ 3. 方位の推定方法

地震計が、地表あるいは床面上に設置されていれば、方位計や周囲の基準となるものを用いて、容易に方位の確認を行うことができる。しかし、地中に埋設された地震計については直接地震計を見ることができないため、従来、重錘落下や板たたき等の人工震源による地震計の波形を用いて地震計の方位確認が行われてきた。

これらの人工震源を用いる方法では、波形が非常に短周期となるため、地下構造の不整形・不均質の影響を受けやすいことや、地震計測装置のサンプリング周波数を十分あげないと解析の精度が落ちてしまう等の問題点がある。

一方、人工震源の代わりに地震観測記録を用いる方法がある。この方法では、各地震計の記録を比較し、その振動方向のずれから地震計相互の方位のずれを求める。したがって、新たな実験を行う必要がない代わりに相対方位しか求まらないという欠点がある。また、短周期成分の多い記録の場合には、人工震源の場合と同様の問題が生じることがある。

今回の検討では、地震観測記録を用いる方法を採用することとしたが、観測点間の距離に比べ十分波長の長い波を用いれば、観測点間の不整形・不均質構造に影響されることなく精度良く方位を推定できると考え、長周期成分の S/N 比が良い地震記録を用いることとした。ただし、実際の観測記録は、このような長周期成分だけを含むものではないことから、ここでは観測記録の中からやや長周期成分（周期数秒～十数秒）を、バンドパスフィルターにより抽出して用いた。

具体的には以下の手順で地震計方位の推定を行った。

①記録時間の長い地震記録の中から長周期成分の見られる波形を選定する。

②記録に、中心周期 T 秒に対して周波数領域で ±10% の幅を持つバンドパスフィルターをかける。

③その波形から、水平面内のオービットを作成する。

④オービットの偏向性がよい部分を選び出す。

⑤地震計ごとに共通時間内でオービットの振動方向のずれを求め、地震計の相対方位を推定する。すなわち、基準となる地震計のオービットに対し、方位を推定する地震計のオービットが θ 度ずれていたとすれば、この地震計は基準となる地震計に対して $-\theta$ 度ずれて設置されていることになる。なお、角度は時計回りを正とした。

Fig. 2. Original and band-pass filtered seismograms of the 1983 Nihonkai Chubu earthquake at point P3. The center periods of band-pass filter are 5.2, 8.5 and 14 sec. "A" indicate the time interval to draw particle orbits in Fig. 3

また、佐藤・片山(1983)は、主要動以降のローパスフィルター波形（波形に 0.2 秒及び 1.0 秒の移動平均を行ったもの）の相関を用いて方位を推定しているが、ここではバンドパスフィルター波形を用いて同様の検討も行ってみた。

なお、今回は、基準とする地震計として原子炉建屋最下部の地震計 (P3) を用いた。地震計が設置されている建屋の振動試験結果によれば、建屋の 1 次固有周期は約 0.3 秒であり、今回対象とした周期帯では建屋の固有振動の影響は少ないと考えられる。

§ 4. 方位の推定結果

福島第一原子力発電所で得られた記録のうち、長周期成分が顕著に見られた 1983 年日本海中部地震の記録を地震計方位の検討に用いた。観測点 P3 での観測波形及

Fig. 3. Filtered seismogram's particle orbits of the 1983 Nihonkai Chubu earthquake. Arrows show the direction of the epicenter.

Table 1. Estimated azimuth of seismographs by long period earthquake ground motion in degree.

Installation points of the seismographs		Relative azimuth obtained by the difference of the polarization angle				Relative azimuth obtained by the correlation method
		Period			Mean value	
		5.2 sec	8.5 sec	14 sec		
Base of the building	P 3	0.0	0.0	0.0	0	0
	P 5	1.8	0.1	0.5	1	0
	P 6	-2.3	-1.9	-0.9	-2	-2
Underground	P 7	-4.7	-5.1	-4.2	-5	-5
	P 12	-26.3	-24.1	-25.0	-25	-26
	P 4	56.8	58.1	59.2	58	57
	P 13	-11.4	-10.9	-9.1	-10	-11
	P 14	-4.5	-5.0	-4.0	-5	-5

Note : Positive direction of azimuth is clockwise.

びそのバンドパスフィルター波形（中心周期 5.2 秒, 8.5 秒, 14 秒）を Fig. 2 に示す。

同記録のバンドパスフィルター波形の振幅が十分大きい部分を選び、水平面内でオービットを描いた。Fig. 2 中 A で示した各区間に対応するオービットを Fig. 3 に示す。図中の矢印は震央方向を示している。どの観測点のオービットもほぼ同じ形状の楕円形をしている。建屋内の P3, P5, P6 及び地盤中の P7, P13, P14 の振動方向は、ほぼ同一であるが、地盤中の P4, P12 では、振動方向が他の観測点とかなり異なっている。ただし、地震計間の相対的ずれ方は周期によらず一定のようである。なお、オービットの振動方向と Fig. 2 の水平動・上下動の振幅比から、周期 5.2 秒及び周期 14 秒の波ではラブ波的な波が卓越し、周期 8.5 秒ではレーリー波的な波が卓越していると考えられる。

P3 を基準とした各地震計の相対方位を Table 1 に示す。オービットから求めた各地震計の推定方位は、周期

によらず安定した結果となっており、そのばらつきは大きくても 2 度程度である。建屋内部の地震計は比較的方向がそろっており相互のずれは 2 度以内であるが、地盤中の地震計の方は相対的にずれが大きく、P4 では 58 度、P12 では -25 度という結果となった。また、バンドパスフィルター波形の相関から求めた結果との差異は ±1 度程度であり、両手法での結果はよく一致している。

次に、3 つの周期の平均として求めた地震計方位の妥当性を確認するために、求めた方位を用いて各地震計の記録を補正し、基準とした建屋内の地震計 P3 の記録と比較した。Fig. 4 には P3 の記録に地盤中の地震計 P4, P14 の補正前後の記録を重ねて示してある。補正前に比べ、補正後はどの周期でも波形の一致度は改善されており、推定した方位の妥当性が示されたといえる。また、一般に加速度計で長周期を扱う場合、ノイズレベルが問題となるが、周期 10 秒以上まで波形がよく一致していることから、今回用いた記録では長周期まで十分 S/N

Fig. 4. Band-pass filtered seismograms of radial component of 1983 Nihonkai Chubu earthquake. (a) before and (b) after azimuth correction. In each trace, the center periods of the used band-pass filter are shown.

比がよかったことがわかる。

なお、今回の推定結果では、周期により1度前後のばらつきが見られたため、地震計の推定方位としては小数点以下を四捨五入した値を採用することとした。

§ 5. おわりに

今回の調査の結果、建屋内部の地震計に比べて地盤中に埋設された地震計でずれが大きいことがわかった。この原因として、鉄筋コンクリート製の大きな建屋の存在により設置時に用いた磁石式方位計の測定精度が低下した可能性や、地震計を設置用のロッドから切り離してボーリング孔底部に設置する際に方位のずれが生じた可能性等が考えられるが、原因を特定することは難しい。

以上のように埋設地震計の方位精度が確保しにくいという事実は、地盤中で得られた地震記録を解析する際には何等かの方法で設置後の地震計方位を確認する必要があることを示していると考えられる。

また、今回の調査では、地震計の方位推定に地震記録を比較する方法を用いた。この方法は、絶対方位を求める場合には方位の基準となる地震計を必要とするもの

の、磁性体の影響を受けることはなく、また、観測点間距離に比べて十分長い波長の波を用いることにより、地盤の不整形・不均質の影響も受けにくいという利点がある。ただし、この方法の利点を生かすためには、長周期側で十分S/N比のよい観測記録が必要である。しかしいずれにしても、現在埋設されている多くの地震計の方位は誤差を含んでいる可能性が考えられ、記録の利用にあたっては十分な注意が必要といえよう。今回用いた方位推定法は、その補正の一助となるものと考えられる。

謝 辞

今回の調査に当たり小林啓美・東京工業大学名誉教授の多大な御指導を受けました。記して感謝の意を表します。

文 献

- 深掘委員会, 1986, 観測井・実験井の掘削と関連技術, 地質と調査, 第2号, 58-62.
佐藤暢彦・片山恒雄, 1983, 地中地震計の埋設方位の推定, 第17回地震工学研究発表会講演概要, 土木学会, 115-118.