

(30) 地中地震計の埋設方位の推定

東京大学生産技術研究所 正員 ○ 佐藤 暢 彦
 東京大学生産技術研究所 正員 片山 恒 雄

1. はじめに 東京大学生産技術研究所千葉実験所において埋設地震計36台を用いた高密度アレー観測を1982年4月より開始し、1983年4月末の時点で23の実地震の観測記録を得ている。これらの記録の同じ方位の波形を並べて比較してみると、波形に類似性がみられないものがいくつかあった。むしろ、水平2方向の波形を入換えた方がよく似ているもの、波形の振幅の符号を逆にした方がよく似ているものがあった。前者は90度、後者は180度の埋設方位の狂いと考えれば説明できるものである。たまたま、前者とみられる地震計が地表(-1m)にあったため、それを目視できるまで掘出して埋設方位を調べたところ50度の狂いがあることが確認された。このため、埋設方位の確認が容易な残り10台の地表の地震計も掘出して調べてみた結果、埋設方位にかなり大きな誤差があることが明らかとなった(表-1)。目視で埋設方位の確認が困難な地中の地震計については地表のもの以上の誤差があるのではないかと想像され、これらの地震計の埋設方位を得られた地震記録から推定することを試みた。地表の地震計についての埋設方位の推定値は実測値と対応もよく、また、地震による推定値のばらつきも小さいことなど明らかとなり、本推定法を用いることによって、地中地震計の埋設方位の推定がある程度可能であることが判明した。

表-1 地表地震計埋設方位の実測値

観測孔	水平方向	上下方向	備考
C0	西 7°	0°	再設置
C1	西 13°	北 2°	
C2	西 12°	西 2°	
C3	西 1°	南 4°	再設置
C4	西 14°	北東 5°	再設置
P1	東 7°	0°	
P2	西 7°	0°	
P3	東 13°	0°	
P4	西 20°	北 3°	
P5	東 14°	南 3°	再設置
P6	東 50°	北 2°	再設置

(注) 水平方向は北、上下方向は上を方位誤差の基準とする。

2. 高密度アレー観測(1),(2) 高密度アレー観測網は水平方向に110m、深さ方向に40mの拡がりをもって、埋設地震計36台で構成されている(図-1、表-2)。

観測地区の土質柱状図の代表例を図-2に示す。概略、地表面からローム、凝灰質粘土、砂となっている。観測孔C0におけるP5検層の結果によると、せん断波の伝播速度は地表から5m深さまで140m/s、5~24mが320m/s、24~40mが420m/sである。

観測地区の地表は起伏が小さく、実験棟が点在している。図-2に示す以外の観測孔の土質柱状図もほぼ同様であり、当観測地区はほぼ平坦に近い土質構成をなしている。

実地震記録は1983年4月末現在23例得ているが、地表の最大加速度が

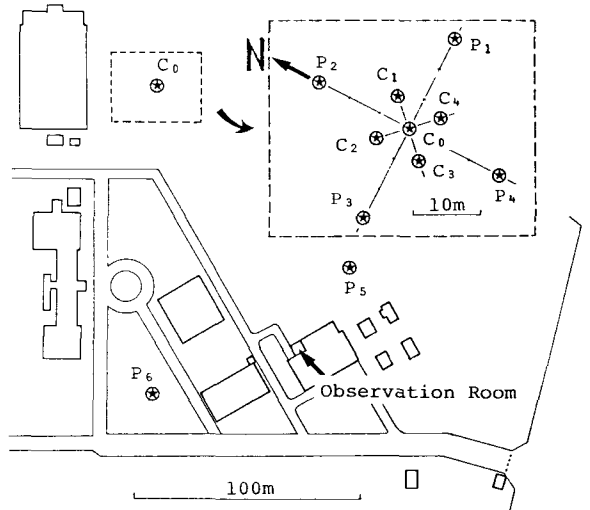


図-1 高密度アレー観測網

表-2 地震計の埋設深さ(※印)

深さ(m)	観 測 孔											
	C0	C1	C2	C3	C4	P1	P2	P3	P4	P5	P6	
-1	※	※	※	※	※	※	※	※	※	※	※	
-5	※	※	※	※	※							
-10	※	※	※	※	※	※	※	※	※	※	※	
-20	※					※	※	※	※	※	※	
-40	※									※		

39gal と 70gal であった 2 つの記録を本推定に用いた。表-3 は地震諸元であり、図-3 は記録波形の一例である。

なお、測点番号は 6 文字で表わし、最初の 2 文字が観測孔、次の 2 文字が深度 (m)、最後の 2 文字が測定方向をそれぞれ表わしている。

3. 埋設方位の推定方法 実地震においては、地表地盤の固有振動の励起や波の伝播により地表地盤は全く一様に振動するものではないが、大きめの地震の主要動に続く比較的周期の長い成分の振動は、図-3 の波形例からわかるように、ほぼ一様に振動しているように思われる。

このことは、図-4 に示した加速度記録による水平面内の地動の軌跡がほぼ同じ形になっていることから確認できよう。しかし、形は同じであるが向きはまちまちである。この差が地震計の埋設方位の狂いとみなした。

埋設方位の判明している地震計の水平 2 方向の記録を $x_0(t), y_0(t)$ 、埋設方位を推定しようとする地震計の記録を $x_1(t), y_1(t)$ とする。方位不明な地震計を θ だけ回転させたときの記録は次式ようになる。

$$x_1'(t) = x_1(t) \cdot \cos \theta + y_1(t) \cdot \sin \theta, \quad y_1'(t) = y_1(t) \cdot \cos \theta - x_1(t) \cdot \sin \theta \quad (1)$$

ここに、水平 2 方向のそれぞれの振幅の相関値の和を次式で定義する。

$$S = \int x_0 \cdot x_1' \cdot dt + \int y_0 \cdot y_1' \cdot dt \quad (2)$$

S が最大になるとき、2

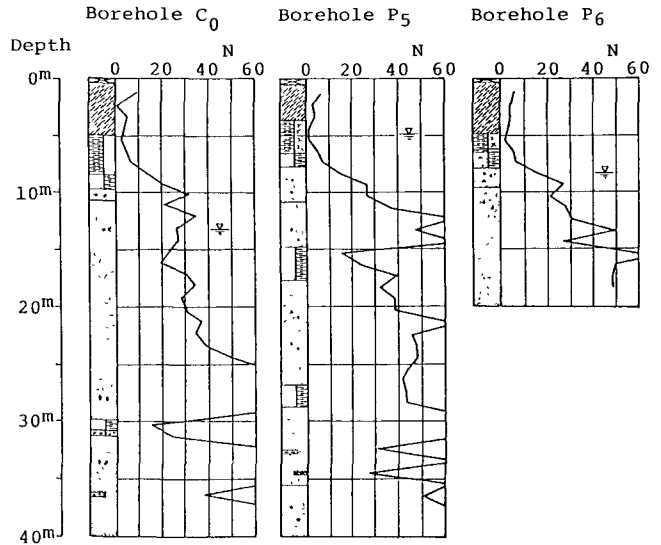


図-2 観測孔 C0, P5, P6 の土質柱状図

表-3 推定に用いた地震の諸元

	名称	発生日時	北緯	東経	D	M	震央距離	最大加速度
1	茨城県沖	1982年 7月 23日 23時 50分	141° 57'	36° 11'	30km	7.0	180km	39gal
2	茨城県南部	1983年 2月 27日 21時 14分	140° 06'	35° 58'	70km	6.0	40km	70gal

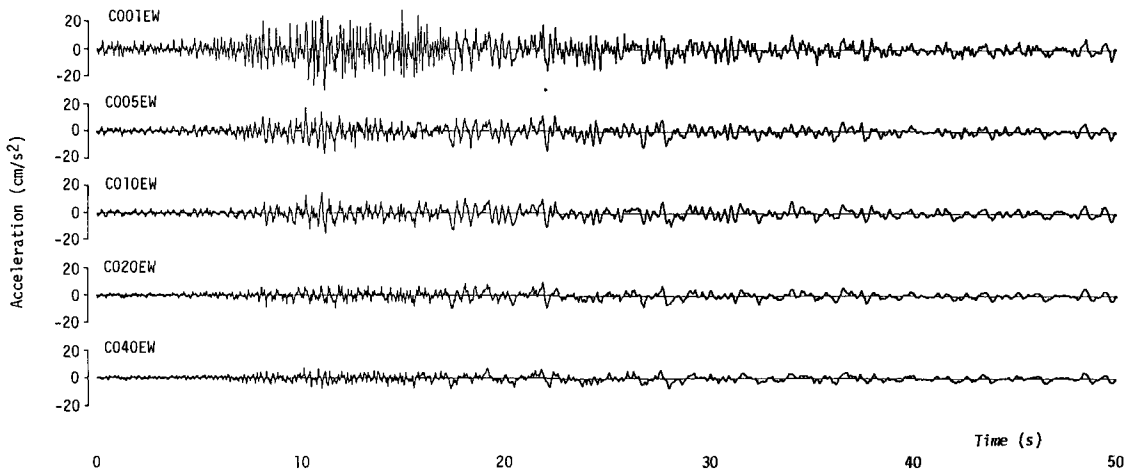


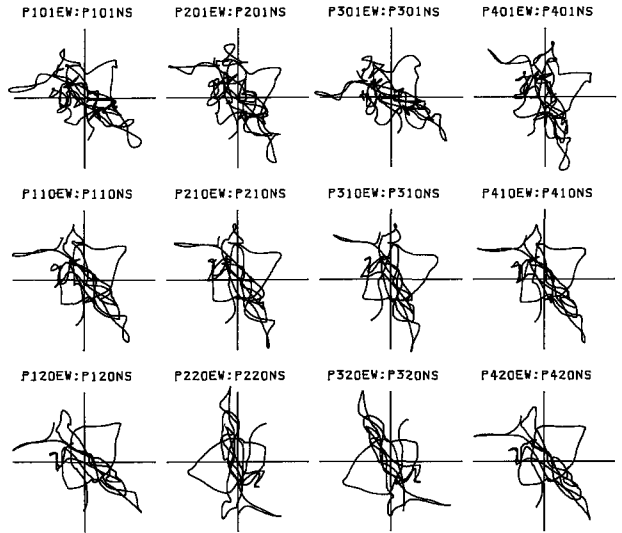
図-3 記録地震波形例 (1982年 7月 23日 23時 50分: 茨城県沖)

つの地震計の記録波形が最も類似しており、この θ だけ埋設方位が狂っていることになる。最大を与える θ は(1)式を(2)式に代入して整理すれば次式ようになる。

$$\theta = \arctan \left\{ \frac{(\int x_{0y1} dt - \int x_{0y2} dt)}{(\int x_{0x1} dt + \int y_{0y1} dt)} \right\} \dots (3)$$

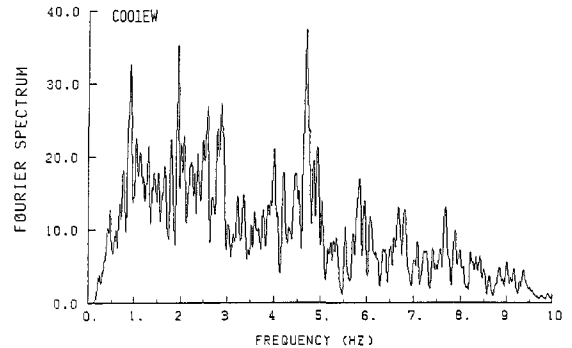
ここに、各種分値は記録波形のみから算定できる値である。

なお、(3)式は2つの地震計が記録した振幅の差の2乗和を最小にする θ でもある。波形に変位を用いれば、2つの地震計間の相対変位を最小にする θ と解釈できる。



図一4 水平加速度振動の軌跡

4. 推定結果 本推定法の妥当性を検討するために、埋設方位の判明している地表の地震計11台の内、1台(C0)を基準として残りの10台の埋設方位を推定した。2つの地震の解析に用いた区間は主要動後の15秒間と比較のために主要動部の15秒間の4ケースとした。波形の次元としては記録そのものの加速度とその積分により得られる変位を用いた。また、2点間での位相差が大きくなる短周期成分を除くために2種類のハイカット・フィルタを用いた。すなわち、波形に0.2秒と1秒の移動平均(running mean)を行った。図一5は地表の加速度記録のスペクトルであるが、1.0, 5.0, 10.0秒のピークが顕著であり、フィルタによってこれらの成分が除去されることになる。以上の条件を用いて得られた埋設方位の推定値と目視による実測値を比較した(表一4)。



図一5 加速度記録のフーリエ・スペクトル

表一4 地表地震計の埋設方位の実測値と推定値の比較

使用記録	波形次元 区間	T	測						点					
			C0	C1	C2	C3	C4	P1	P2	P3	P4	P5	P6	
推定	1 2 加速度 /C	0.2	基準	-16.0	-11.0	-1.4	-2.2	+7.8	-8.6	+14.0	-23.1	+0.9	-0.9	
			基準	-16.1	-11.0	-1.2	-1.9	+8.3	-9.9	+14.2	-21.5	-4.9	+1.0	
推定	1 2 加速度 /C	1.0	基準	-16.1	-11.0	-1.1	-1.7	+7.7	-9.6	+14.1	-22.5	-0.2	-1.4	
			基準	-15.1	-10.2	-1.2	-2.1	+7.7	-10.7	+13.5	-21.6	+0.8	-4.4	
推定	1 2 加速度 /M	1.0	基準	-16.1	-10.5	-2.4	-2.6	+8.1	-9.2	+13.8	-22.1	+1.4	-5.4	
			基準	-15.4	-10.5	-1.6	-2.1	+6.3	-11.0	+12.0	-23.4	-3.9	-2.4	
値	1 2 変位 /C	0.2	基準	-15.5	-11.1	-3.6	-1.8	+8.5	-8.5	+14.0	-22.7	-1.2	-3.3	
			基準	-15.7	-10.8	-1.5	-2.2	+7.5	-9.5	+13.2	-22.9	-3.8	-2.7	
値	1 2 変位 /M	0.2	基準	-16.0	-11.1	0	-1.9	+8.4	-10.0	+14.2	-22.5	+2.3	+1.4	
			基準	-15.7	-10.9	-1.9	-2.0	+5.6	-13.6	+10.4	-23.3	-2.0	-2.5	
実測値			0	-13	-12	0	0	+7	-7	+13	-20	0	0	

(注) 区間のMは地震記録の主要動部分、Cはその後の部分を表す。Tは移動平均の時間幅を表す。

図一五 地中地震計の埋設方位の推定結果

深度 (m)	使用 記録	観 測 孔										
		C0	C1	C2	C3	C4	P1	P2	P3	P4	P5	P6
-1	実測値	0	-13	-12	0	0	+7	-7	+13	-20	0	0
-5	1	-22.4	-7.3	-17.8	+13.4	-54.2						
	2	-22.3	-7.0	-17.9	+14.9	-54.8						
-10	1	-	-13.5	+3.9	-	+7.1	-6.2	-11.8	-21.7	-4.4	-23.3	-29.7
	2	+180.0	-12.0	+3.6	+182.2	+7.0	-5.5	-11.4	-21.3	-5.8	-24.2	-30.5
-20	1	-10.1					+5.2	+149.4	+161.1	-0.3	-	-22.4
	2	-9.1					+4.8	+149.6	+160.0	-1.6	+180.1	-23.2
-40	1	-9.5										-13.5
	2	-9.4										-14.3

実測値から少しずれたところでまとまっており、実測値をもう一度確かめる必要がある。10個の値のばらつきはC1～C4, P1～P4, P5～P6の順に大きくなっていて、基準とした観測孔C0に近いほどばらつきが小さいことを意味している。推定に用いた5つの条件を比較するために、2つの地震による推定値の差の平均を求めると、表一四の上段から順に2.0, 1.2, 2.2, 1.2, 2.7度となる。主要動後の変位または短周期成分を除いた加速度波形を用いる方が地震記録による推定値のばらつきが小さいといえる。

以上の検討をもとに、各観測孔の埋設方位が既知である地表地震計を基準として、主要動後の変位波形を用いて地中の地震計の埋設方位を推定した(表一五)。2つの地震記録による推定値の差は最大で1.5度と小さく、よく一致した値を示している。地震計の埋設方位はかなり大きく狂っていることが明らかとなった。

5. まとめ 埋設地震計36台からなる高密度アレー観測を開始したところ埋設方位に疑問が生じたため、地震記録から地中地震計の埋設方位を推定することを試みた。本推定法は埋設方位が既知な地震計と未知のものとの記録間の相関値が埋設方位が一致したとき最大になるということに基づいており、実測値とよく一致した推定値を得た。本推定法を適用するときに注意すべき点を以下に列挙する。(1)地震計の特性が同一とみなせなくてはならない。(2)地震計の埋設地域内で地盤の急変がなく、地盤が一様に振動すると想定される場合ほどよい結果を得る。(3)少なくとも1台の地震計の埋設方位が判明していなくてはならない。埋設方位が既知な地震計と未知との間の距離が短い方が安定した推定値を求めることができる。(4)地震記録の使用する区間は主要動後に続くゆるやかなゆれの部分とする。(5)記録は加速度でも変位でもよいが、地盤のもつ固有周期等の短周期成分を除く必要がある。

高密度アレーの36台ある地震計の埋設方位の推定結果(表一五)によると、かなり大きな誤差を示している。埋設用ボーリング孔内で回転を拘束する部分が地震計に全くなかったこと、埋設用ロッドと地震計を連結している治具に問題があったことに起因したと考えられる。使用した治具はロッドと地震計を切離すために加える打撃の後においては地震計の方位を調節することが不可能なものであった。表一五の使用記録1の推定値の中に一印が3つあるが、これは地震計の不良で記録が得られなかったもので、再設置したため後の地震においては記録が得られた。再設置においては地震計の先端に回転止めの鋼板を取付け、埋設用治具も切離し後も方位の調節が可能なものを使用した。再設置した地震計の推定値はいずれも180度前後の誤差を示している。180度の誤差は地震計ケース内へのセンサの取付ミスによるもので、埋設作業による誤差は僅かである。地震計と埋設治具の改良により、埋設精度が向上したといえる。

- (1) 佐藤・片山：超高密度地震観測について，土木学会第37回年次学術講演会，I-300，1982。
 (2) KATAYAMA and SATO : Ground Strain Measurements by A Very Densely Located Seismometer Array, Proceedings of 6th Japan Earthquake Engineering Symposium, 31, 1982.