

防災センター構内3成分ひずみ計の 設置姿勢について

島田 誠一*・野口 伸一*・坂田 正治**

国立防災科学技術センター

The Attitude of the Three-Component Borehole Strainmeter and the Seismometer in the Yard of NRCDP***

By

Seiichi Shimada, Shin'ichi Noguchi and Shoji Sakata

National Research Center for Disaster Prevention, Japan

Abstract

The observation unit, which is composed of a three-component borehole strainmeter, a three-component seismometer and precision thermometer, was installed in the yard of NRCDP in 1984. Unfortunately some troubles at the time of installation made the azimuth and the tilt of the vessel unclear. For derivation of three components of strain from the data obtained by the three-component strainmeter, the distribution of mortar thickness around the strainmeter in the borehole and the direction of the strainmeter should be determined. Therefore we estimate the azimuth and the tilt of the vessel. From the well-logging the maximum tilt of the borehole is estimated to be about 25' at the depth where the observation vessel is settled. Considering the shape of the vessel and the diameter and the tilt of the borehole, we estimated the angle between the axes of the vessel and the borehole to be about 10.4'. Consequently the thickness of the mortar between the three-component strainmeter and the surrounding rock varies from 19 mm to 40 mm at the upper end of the detection part and 8 mm to 51 mm at the lower end. The azimuth of the maximum tilt of the vessel is estimated to be about N35°W. The azimuth of the vessel was estimated from the initial motion analysis by using the falls of weight, the nearby blasts and some earthquakes. From the observations of the blasts and the earthquakes we estimated the azimuth to be N201.5°E±4.7° and N202.3°E±8.8°, respectively. From these observation we estimate the azimuth of vessel at N202°E.

* 第2研究部地殻力学研究室, **第2研究部総合地震予知研究室

***The National Research Center for Disaster prevention.

1. はじめに

国立防災科学技術センターでは、平野部直下型地震の予知のために茨城県南西部をテストフィールドとして各種観測機器の開発研究を行なっている。その中の一つとして、ボアホール式 3 成分ひずみ計を新たに開発し、昭和 56 年度には茨城県八郷町に深さ約 160 m のボアホールを 2 本掘削し、2 式を設置した (Sakata et al., 1982)。昭和 58 年度には、茨城県桜村の当センター構内に約 650 m のボアホールを掘削し、ボアホール式 3 成分ひずみ計および微小地震計 3 成分などを一つの装置としてまとめて設置した。これらの機器を収めた装置を、本論文では地殻活動観測装置 (または単に「観測装置」と呼ぶことにする。

この 3 成分ひずみ計および地震計による観測では、計器の設置方位が正確に求まっていなければならない。そのうえ、3 成分ひずみ計は計器の軸心とボアホールの孔芯とが一致するように設置することが望ましい。しかし、昭和 58 年度の設置においては、次節に述べる事故により設置姿勢が不明のまま観測装置が設置された。この観測装置による観測に当って、設置傾斜角および方位はなくてはならない値である。そこで本稿では、これらの値を推定することを試みた。

2. 観測装置および設置作業

図 1 に観測装置および観測装置を孔底において収容する着底部ガイドの構成と寸法を示す。観測装置は長さ約 8.5 m、直径 10 cm 余りの非常に細長い円筒で、上部約 3 分の 1 に微小地震計 3 成分および精密温度計が収容され、下部約 3 分の 2 の 3 成分ひずみ計と接続されている。図 2 に 3 成分ひずみ計の概念図を示す。下部の感圧部は 3 つの隔室に分かれており、周囲の岩石のひずみ変化によって隔室の断面積が変化すると、上部の検出部のペローズの長さが変化しひずみ計の出力として検出される。各隔室の断面積変化量と岩石のひずみ変化量は、ひずみ計が孔に対して同心になっていると仮定して理論解析した結果、簡単な連立方程式で関係づけられる。従って、理論と一致させるためには、孔芯とひずみ計の軸心を一致させることが重要であり、また当然各セクションの方位は正確に求まっていなければならない。微小地震計は固有周波数 1 Hz の動コイル型地震計であり、水平 2 成分の方位は正確に求まっている必要がある。

3 成分ひずみ計は下部約 3 分の 2 にあたる感圧部が上部より細くなっており、そのため図 1 のように観測装置は、上部の直径 152 mm、長さ約 4.7 m と、下部の直径 114.3 mm、長さ 3.8 m との 2 つの円筒から成る。さらに、観測装置上部の軸心を孔芯とできるだけ一致させるために、観測装置の上部には 8 方向に矢羽状の出張り (上部セントラライザー) が取り付けられ、直径 166 mm と太くなっている。また観測装置底部には、観測装置の方向を定めて設置

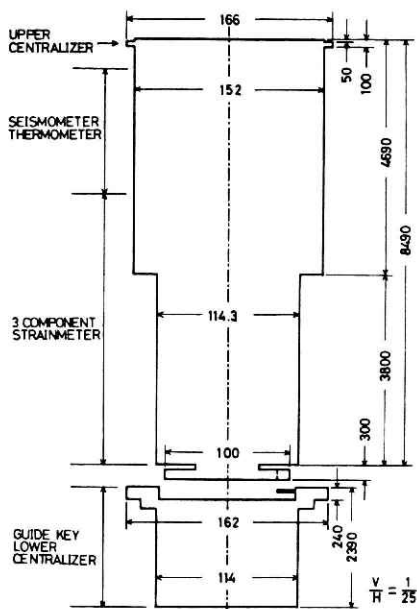


図1 構内地殻活動観測装置および着底部ガイドの構成と寸法。縦横比は1:25。

Fig. 1 The composition and the size of the observation vessel installed in the yard of NRCDP. The ratio of the height to the diameter is 1:25.

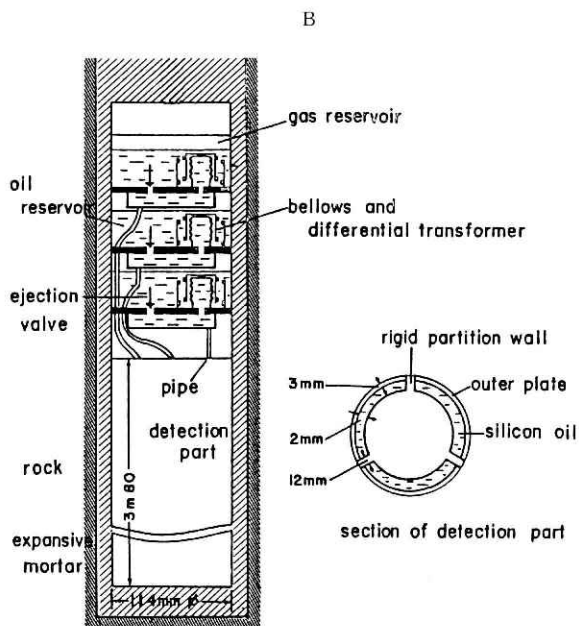


図2 3成分ひずみ計の概念図 (Sakata et al., 1982)

Fig. 2 Schematic illustration of the borehole three-component strainmeter (Sakata et al., 1982).

するため、着底部ガイドの出張り（キーと呼ぶ）と対応する溝（キー溝と呼ぶ）が切り込まれた先端部がある。着底部ガイドは長さ約 2.4 m の円筒状で、観測装置下部の軸心が孔芯と近づくよう最上部が直径 162 mm と太くなっている。

次に昭和 58 年度の設置作業の概要を示す。まず観測装置設置前に着底部ガイドを孔底に設置し、この着底部ガイドのキーの方位をジャイロスコープ検層によって測った。次に、3 成分ひずみ計および地震計用の 2 本のケーブルを接続した観測装置を鋼管のロッドにつなぎ、着底部ガイド上端まで下降させた。さらに、着底部ガイドのキーに観測装置底部のキー溝が合わさるように、観測装置本体を着底させた。これにより、観測装置の方位は着底部ガイドのキー方位から求まり、また観測装置はほぼ孔芯と同心に設置されたことになる。その後、観測装置の中心部をくり抜いた管を通して観測装置の底部から観測装置と孔壁との間にモルタルを注入した。最後に観測装置とロッドとを切り離し、ロッドを回収しようとした。ところが、ロッドの引き上げ時にロッドにケーブルがからまり、観測装置はケーブルに引張られ着底部ガイドからはずれた。しかも信号線のチェックからケーブルも一部損傷していることがわかり、観測装置の回収は不可能と考えられたので、やむをえずそのままの設置姿勢で設置作業を終了し、観測装置を固定した。このため、観測装置の設置傾斜角および方位は不明のまま観測が開始された。

3. 設置傾斜角の推定

次に観測井の設置深度付近での形状を述べる。最終拡孔は直径 172 mm のダイヤモンドビットで行なわれた。岩質は深度 574 m から孔底まで粗粒玄武岩であった。コア採取率は 100%、棒状・半棒状コア 87% としっかりしており、特に設置深度付近は割れ目も少なく、孔の荒れ・拡がり等はないと推定される。キャリパー検層から設置深度付近の孔径は概ね 173 mm と求まった。また孔芯傾斜は 2 つの方法で測定された。一つは拡孔時に村田式孔芯傾斜測定器で測定され、設置深度付近で最終拡孔時に最大傾斜角 $40^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 程度、誤差 $\pm 12'$ であった。もう一つは着底部ガイドの設置後ジャイロスコープで検層したときに得られ、最大傾斜角 $17^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 、最大傾斜方位 $N 35^{\circ}W\sim N 45^{\circ}W$ であった。ここで最大傾斜角とは、下向きにとった最大傾斜ベクトルの方位である。ジャイロスコープは、装置の検出精度が方位・傾斜角とも $\pm 0.4^{\circ}$ 、方位ドリフトが毎時 1.5° 以下と精度が高い。しかし、検層装置の直径が 101 mm で孔径よりかなり小さくケーブルも細くて柔らかいので、孔芯傾斜の測定には検層装置を孔壁に接触させながら下降させなければならない。本井では深度 520 m 付近からほぼ同方向の傾斜が続いており、その累積水平距離は 80 cm 以上にもなっている（図 3）。このことからジャイロスコープ検層は孔壁に沿って行なわれ、村田式測定器よりも正確であると考えられる。そこで、観測装置深度での最大傾斜角 25° 、最大傾斜方位 $N 35^{\circ}W$ とした。

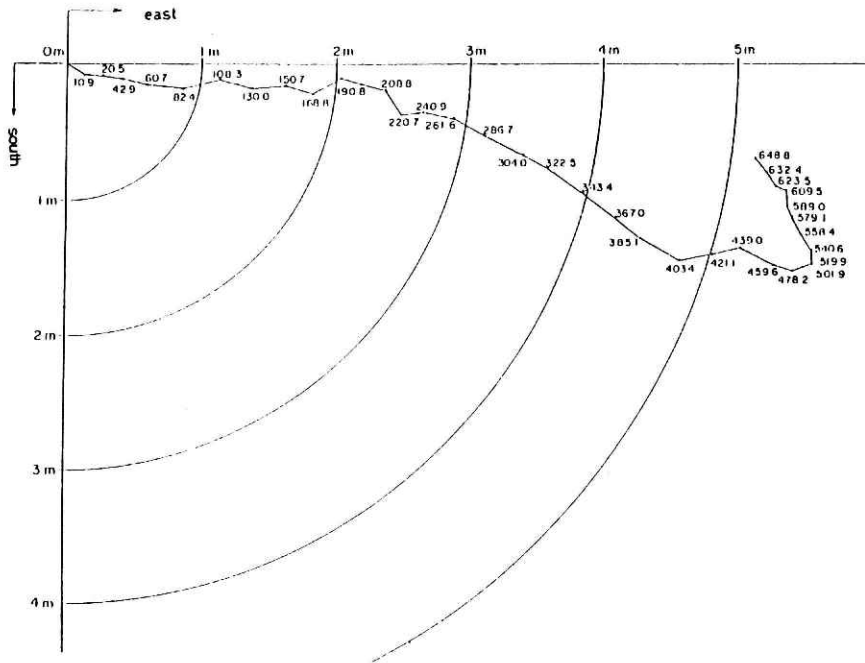


図3 ジャイロスコブ検層により得られた孔芯位置の水平投影図。折線は孔芯を表わし、折線横の数字は深度 (m) を表わす。

Fig. 3 Horizontal projection chart of the borehole axis obtained by the gyroscopic well logging. The polygonal line indicates the borehole axis and the number beside the line the depth (meter unit).

以上のような観測井の形状に基づいて、次に観測井内での観測装置の姿勢を求めてみる。観測装置が着底部ガイドに正常に収容されたならば、観測装置の下部は着底部ガイドに固定されるが、上部はボアホールの最大傾斜方向と反対方向へと倒れると予想される (図4の左図)。一方、今回のように観測装置が着底部ガイドに収容されずケーブルから吊り下げられた状態では、観測装置は上端をボアホールの最大傾斜方向で孔壁に接し、中央部の直径の変化する角で上端と反対方向の孔壁と接することになる (図4の右図)。このとき、観測装置の弾性変形を無視すれば、観測装置の軸心と孔芯とのなす角度は約 $10.4'$ 、両者の間隔は観測装置上端で 3.5 mm 、中央部の直径の変化する部分 (3成分ひずみ計感圧部上端) で 10.5 mm である。またこのとき3成分ひずみ計感圧部と孔壁との間に注入されているモルタルの厚さは深さや方位によって異なり、上端で最大 40 mm 、最小 19 mm 、下端で最大 51 mm 、最小 8 mm となる。こうして観測装置と観測井との間の位置関係が推定できた。

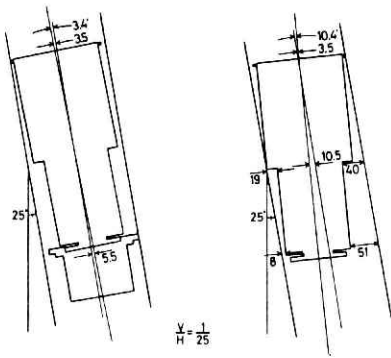


図 4 観測井内における観測装置の姿勢。左図は着底部ガイドに観測装置が収容され、観測装置の軸心と孔芯が最も離れた場合。右図は観測装置が着底部ガイドに収容されない場合。それぞれ孔芯傾斜は $25'$ 、縦横比は $1:25$ である。

Fig. 4 The attitude of the vessel in the borehole. The left is the case where the vessel is set in the guide key and the discrepancy of the axes of the vessel and the borehole is the maximum. The right is the case where the vessel is not set in the guide key. In both chart the borehole tilt is $25'$ and the ratio of the height and the diameter is $1:25$.

4. 設置方位の推定

4.1 方位推定の方法

観測装置の設置方位を推定するには、設置された 3 成分ひずみ計または微小地震計の観測記録から求める以外に方法がない。このうち 3 成分ひずみ計は、既に述べたように各セクションのモルタルの厚さが大きく異なることの影響がすぐには評価できないため、ひずみ計記録から方位を推定するのは難しいと考えられる。そこで、地震計によって観測された地震または人工震源の波動の水平 2 成分の初動の振幅比から、設置方位を推定することとした。そのためには震源の位置が正確にわかっていなければならない。今回は次のような 3 種類の方法で、方位を試みた。

① おもり落とし法

深さ 100 m 程度の浅いボアホールに地震計を設置した場合によく行なわれるもので、通常数十～数百 kg のおもりを地震計の近くで落とし、水平動の振幅を観測する方法である。おもりを落とす場所は地震計の設置深度と同程度の距離、ボアホールから離す必要があるが、任意の方向が選べるので、様々な方向の平均値をとれば到来方向に偏りなく方位が決定できるという長所がある。しかし、今回の場合はボアホールが 650 m と深く、また 400 m 程度の厚い堆積層の存在がわかっているので、震動がうまく地震計に伝わらないのではないかというおそれがあった。

② 発破観測による方法

防災センターの北東約 4 km～7 km の筑波山塊南端には数か所に採石場があり、1 日平均数回の発破が行なわれている。あらかじめ発破の場所と時刻がわかれば、発破の観測から地震計の方位を推定できる。ただし、発破が狭い範囲に位置する場合には到来方向が一方に限定されてしまう。特に今回の地点では、北東約 4 km にある筑波山塊に露出している

基盤岩が、次第に深くなって観測井では深度約 400 m に達しており、このように基盤構造に傾きがある場合、求めた方位に系統誤差の生じるおそれがある。

③ 自然地震の観測による方法

水平 2 成分の初動振幅が明瞭であり、かつ当センターの関東・東海微小地震観測網で震源を正確に求めることができた地震の到来方向から地震計の方位を推定する。長く観測を続ければ様々な方向からの地震波によって到来方向の偏りは少なくなるが、人工的な震源ではないので震源位置の決定精度や伝搬途中の媒質の影響によって個々の地震では誤差が大きくなること、自然地震の発生を待つので観測の効率が悪いことなどの欠点がある。

4.2 観測結果

① おもり落とし法

おもり落とし法による観測は 1984 年 3 月 27 日、28 日の 2 日間行ない、観測井から見て北東、南東、南西方向各 2 か所、北西方向各 1 か所の計 7 か所でおもりを落とした。このうち北東、南東各 1 か所、南西 2 か所について水平 2 成分の振幅が読み取れ、地震計方位は 4 か所の平均で N 177.5°E と求まった。しかし、この方法は懸念した通り S/N 比が悪く、信頼性が高いとは言えなかった。

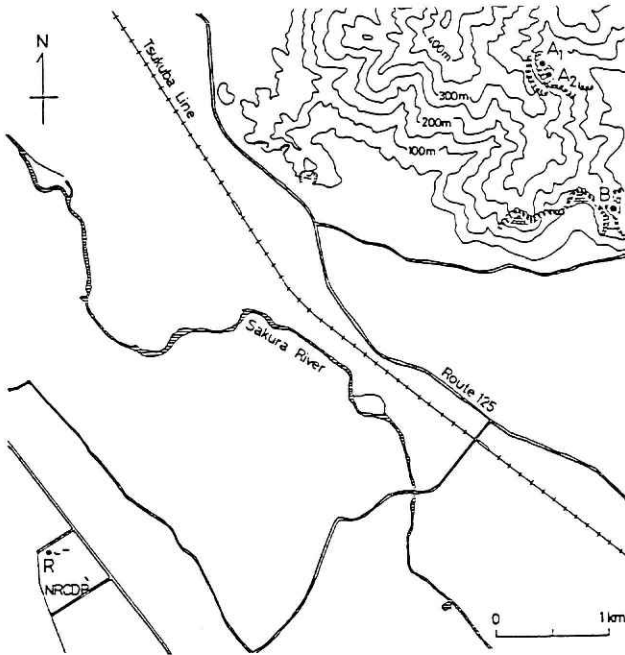


図 5 観測された発破の発破点(A₁, A₂, B)と観測井(R)の位置。
 Fig. 5 The locations of the observed blasts (A₁, A₂, B) and the observation well.

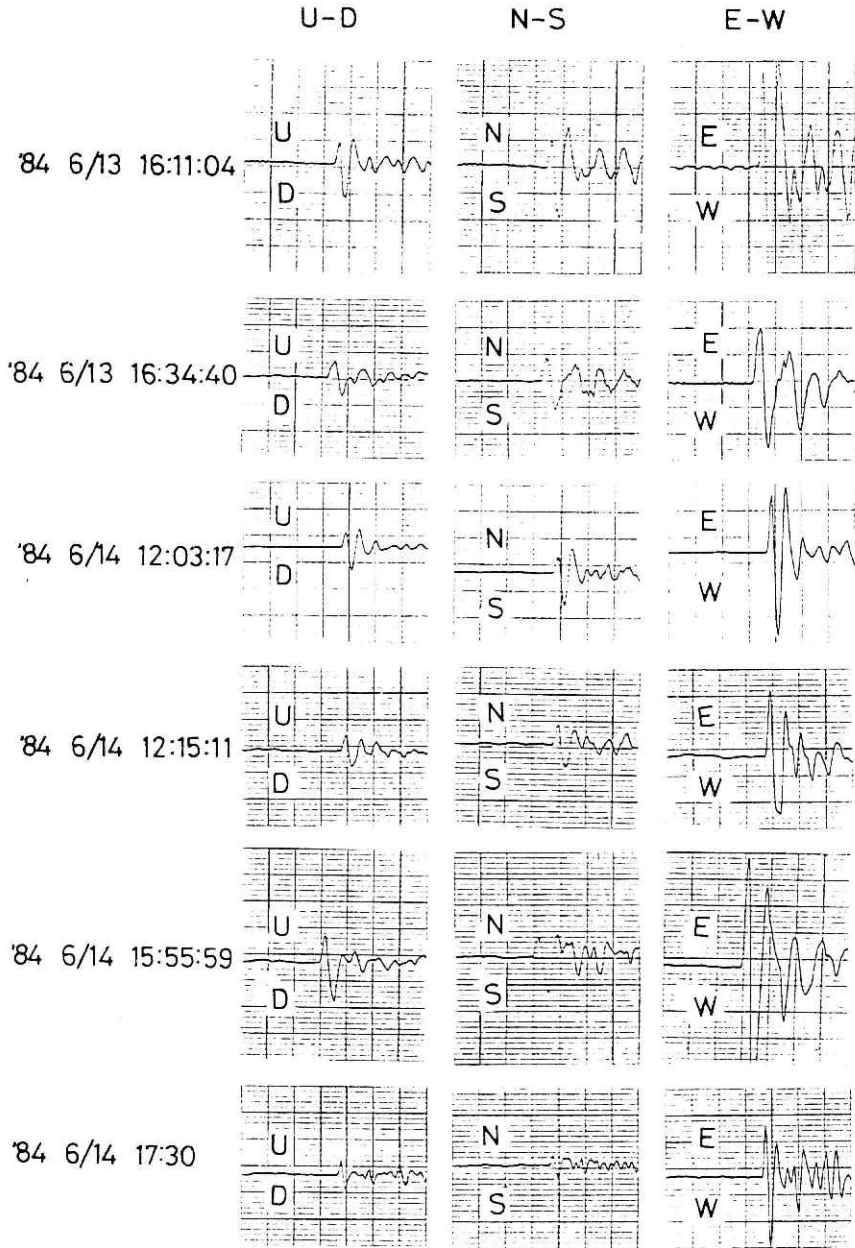


図 6 各発破で観測された地震計 3 成分の初動付近の波形。

Fig. 6 The wave forms of the initial motion of the blasts observed by the seismometer.

表 1 観測された発破の時刻, 発破点, 到来方向, 観測された3成分の初動振幅と求められた地震計方位.

Table 1 The result of blast observations. Time, blast point, arrival azimuth of the blasts, three components amplitudes of the initial motion observed by the seismometer and the estimated installation azimuth.

Time	Blast point	Blast point azimuth	Amplitude (mm)			Arrival azimuth	Installation azimuth
		A _{bl} (deg)	U-D	N-S	E-W	A _{ar} (deg)	A _{ar} -A _{bl} (deg)
84. 6.13. 16:11:04	A ₁	46.2	3.9	5.1	17.5	253.8	207.6
84. 6.13. 16:34:40	A ₂	47.2	3.1	4.6	10.2	245.7	198.5
84. 6.14. 12:03:17	B	59.5	2.8	3.0	10.8	254.5	195.0
84. 6.14. 12:15:11	A ₂	47.2	2.9	3.7	12.2	253.1	205.9
84. 6.14. 15:55:59	B	59.5	5.0	3.5	20.6	260.4	200.9
84. 6.14. 17:30	B	59.5	2.5	1.6	9.5	260.4	200.9

Mean±Standard deviation 201.5±4.7

② 発破観測による方法

発破観測は1984年6月13日, 14日の2日間行ない, 計6回の発破が観測できた. 図5に観測された発破の発破点(A₁, A₂, B)と観測井(R)の地図上の位置を示す. 図6には各発破で観測された3成分の初動付近の波形を示す. 立ち上がりの鋭い明瞭な記録が得られている. 2万5千分の1の地図と図6から発破の到来方向と3成分の初動振幅を読み取り地震計方位を求めてまとめたのが表1である. 6回の発破から求めた地震計方位の平均値と標準偏差はN 201.5°E±4.7°であった.

③ 自然地震の観測による方法

自然地震の観測を1984年5月にほぼ1月間行ない, 計17個の震源の正確に求めた地震について水平2成分の初動振幅を読み取ることができた. このうち2つは自然地震ではなく発破であった. 図7にこれらの地震の震央を示す. 観測井北方の地震がないもの, 到来方向の範囲も広く震源も偏っていない. 図8に初動付近の3成分の記録を示す. 表2にはこれらの地震の発震時, 震源座標, マグニチュード, 観測井からの震央距離と到来方向, 観測された3成分の初動振幅およびこれから求めた地震計方位をまとめた. これら17の地震から求めた地震計方位の平均値と標準偏差はN 202.3°E±8.8°であった. また図9にはこれらの地震について到来方向と求めた地震計方位の関係を示したが, 特に両者の間に相関はないようである.

5. 議 論

前述したように, 地震計方位は発破観測でN 201.5°E±4.7°, 自然地震でN 202.3°E±8.8°

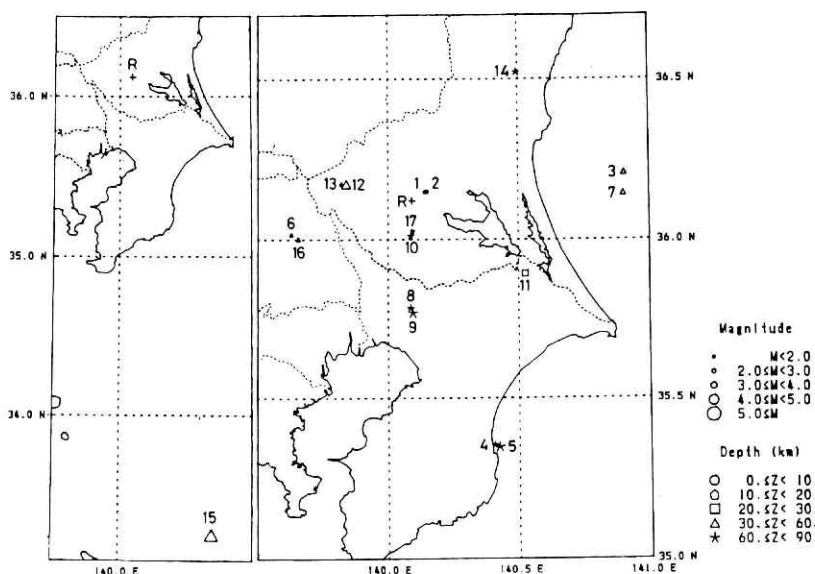


図7 観測装置の設置方位計算に用いた地震の震央位置。

Fig. 7 The locations of the earthquakes by which the installation azimuth is estimated.

表2 観測された地震の発震時、震源座標、マグニチュード、震央距離、到来方向、観測された3成分の初動振幅と求められた地震計方位。

Table 2 The result of earthquake observations. Time, epicentral coordinate, magnitude, epicentral distance, arrival azimuth of the earthquakes, three components amplitudes of the initial motion observed by the seismometer and the estimated installation azimuth.

Time	Epicenter			M	Epicentral distance (km)	Epicentral azimuth A_{ep} (deg)	Amplitude (mm)			Arrival azimuth A_{ar} (deg)	Installation azimuth $A_{ar} - A_{ep}$ (deg)
	Lat.	Long.	Depth (km)				U-D	N-S	E-W		
84. 5. 4. 17:00	36.149	140.140	0.0	—	5.1	235.0	3.1	4.8	9.3	251.6	196.6
84. 5. 4. 17:03	36.150	140.149	0.0	—	5.9	238.6	1.0	1.6	7.0	261.9	203.3
84. 5. 5. 15:41	36.209	140.906	37.5	3.0	73.8	262.8	0.5	-1.8	-2.6	280.9	198.6
84. 5. 8. 23:00	35.356	140.404	61.7	3.7	89.6	341.8	-0.9	1.2	0.1	353.7	192.0
84. 5. 9. 1:23	35.349	140.424	63.5	4.0	90.9	340.9	1.6	-2.0	-0.3	349.4	188.7
84. 5.14. 20:49	36.016	139.630	43.6	2.8	43.4	74.1	-1.3	-12.8	12.3	96.0	201.7
84. 5.16. 13:54	36.144	140.902	41.5	3.4	72.8	268.4	1.6	-3.8	-4.7	288.8	200.9
84. 5.20. 17:48	35.786	140.085	71.1	3.8	37.3	1.1	18.0	-20.5	11.2	31.9	210.8
84. 5.20. 19:54	35.770	140.094	69.8	4.0	39.1	359.9	17.5	-21.0	12.6	35.8	215.9
84. 5.21. 15:51	36.012	140.086	67.6	3.0	12.3	3.0	2.5	-8.1	1.6	32.6	209.6
84. 5.23. 1:05	35.892	140.525	26.8	3.3	46.6	303.4	18.2	-9.1	-4.8	345.2	222.1
84. 5.23. 7:38	36.173	139.840	54.2	4.7	23.5	103.8	-1.0	-3.3	1.7	120.5	196.6
84. 5.23. 7:44	36.174	139.821	52.9	2.9	25.2	103.1	1.0	3.6	-2.3	113.5	190.3
84. 5.25. 21:27	36.522	140.495	66.7	3.0	57.2	219.3	1.5	4.1	2.6	240.0	201.0
84. 5.26. 9:19	33.260	140.698	35.0	5.0	322.3	350.3	2.3	-2.2	0.5	12.3	202.3
84. 5.26. 11:06	36.001	139.656	46.1	2.6	41.6	71.0	-1.0	-10.1	8.9	96.4	205.2
84. 5.28. 16:38	36.027	140.094	62.5	2.6	10.6	359.6	-1.7	4.8	-0.7	22.4	202.8

Mean ± Standard deviation 202.3 ± 8.8

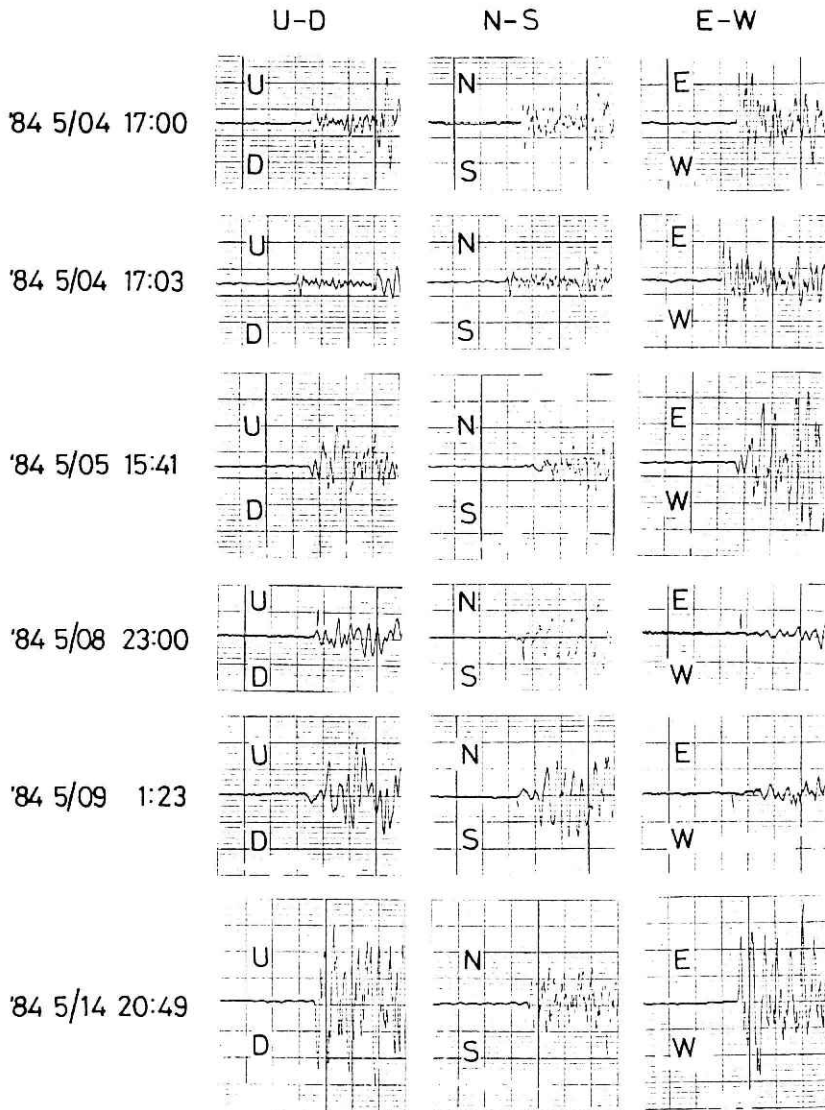


図8 観測装置の設置方位計算に用いた地震の地震計3成分の初動付近の波形。

Fig. 8 The wave forms of the initial motion of the earthquakes by which the installation azimuth is estimated.

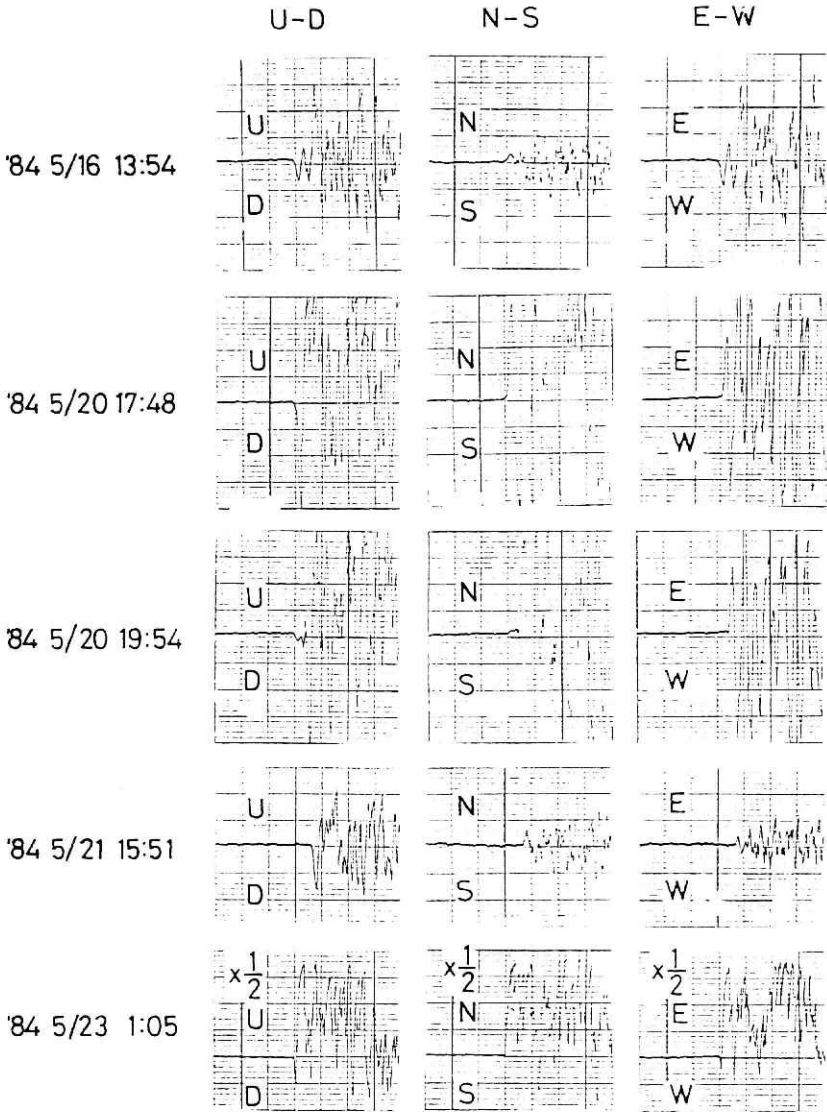


図 8 観測装置の設置方位計算に用いた地震の地震計 3 成分の初動付近の波形。

Fig. The wave forms of the initial motion of the earthquakes by which the installation azimuth is estimated.

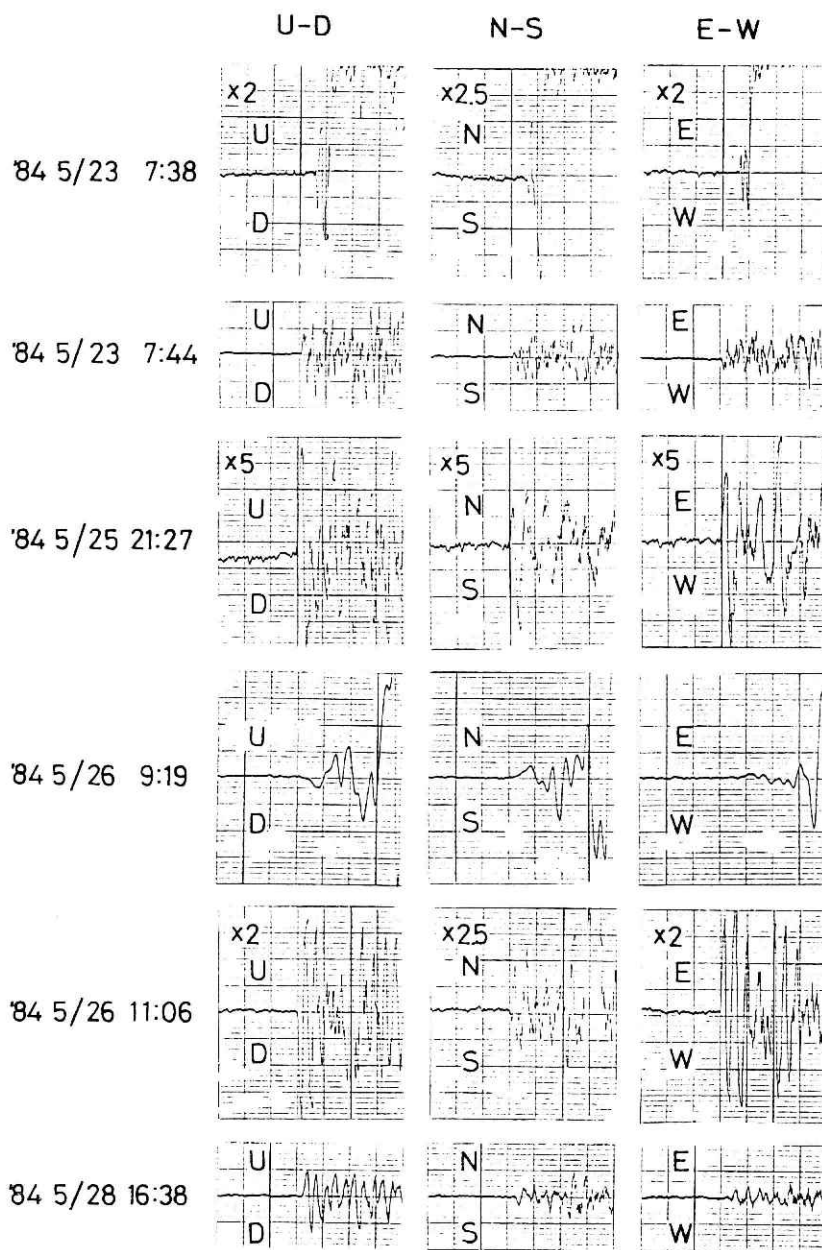


図8 観測装置の設置方位計算に用いた地震の地震計3成分の初動付近の波形。

Fig. 8 The wave forms of the initial motion of the earthquakes by which the installation azimuth is estimated.

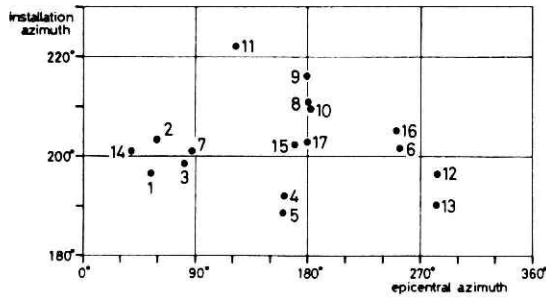


図9 設置方位計算に用いた地震の到来方向(横軸, 北から東への角度)と求めた設置方位(縦軸, 同)との関係。

Fig. 9 The relation between the epicentral azimuth (clockwise from north) and the estimated installation azimuth (clockwise from north) of the earthquakes.

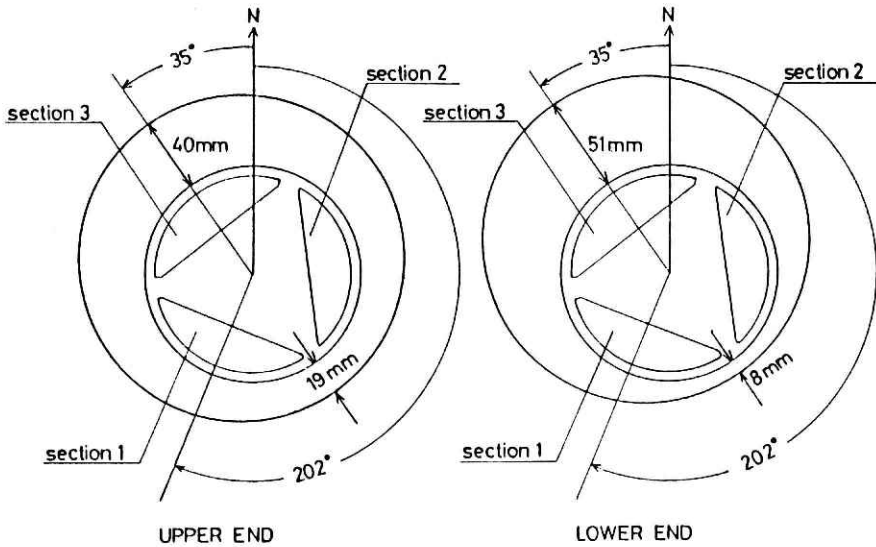


図10 3成分ひずみ計感圧部各セクションでのモルタルの厚さの推定断面図。左図は感圧部上端, 右図は感圧部下端。

Fig. 10 The estimated cross sections which indicate the thickness of the mortar at the detection part of the three-component strainmeter. The left is the upper end of the detection part and the right the lower end.

と両者の平均値の違いが1度以内に求まった。両者の標準偏差の大きさから見て、1度以内というのは偶然に近いが、これらの結果は観測装置の方位を $N 202^{\circ}E$ とするのが妥当であることを示している。

次に、推定された設置傾斜角と方位から求めた3成分ひずみ計感圧部の上端と下端での各方向のモルタルの厚さを図10に示す。ここで、3成分ひずみ計の最大傾斜角は、ジャイロスコープによる検層結果から推定したものであり、直接の観測に裏付けられたものではないが、

この方向にある可能性が最も高く、今後この3成分ひずみ計の観測結果から補正値を得る場合の第1近似としては妥当なものである。設置方位の値も観測の標準偏差の大きさから考えて、第1近似と位置付けるべきものであろう。モルタル壁の厚さの不均一性の影響については、今後数値計算などでその大きさを見積っていく必要がある。また、最大傾斜角方向や設置方位の1次近似値に対する補正値は、今後3成分ひずみ計の観測を行なって、地震時のステップや地球潮汐の解析などから求めていく必要がある。

6. ま と め

当センター構内の約650mのボアホール内に設置され、3成分ひずみ計および微小地震計3成分などを収めた地殻活動観測装置が、設置時の事故によりその設置方位および設置傾斜角が不明になってしまったので推定した。その結果、次のような推定値が得られた。

- (1) 観測装置の軸心と孔芯とのなす角度は約 10.4° 、両者の間隔は3成分ひずみ計感圧部上端で10.5mmである。また3成分ひずみ計感圧部におけるモルタルの厚さは上端で最大40mm、最小19mm、下端で最大51mm、最小8mmである。孔井の最大傾斜方位は $N 35^\circ W$ と推定されるので、観測装置の最大傾斜方位もこの方向である可能性が高い。
- (2) 設置方位をおもり落とし法、発破観測、自然地震観測から推定した。おもり落とし法ではあまり良好な結果は得られなかった。発破観測および自然地震観測ではいくつかの良好なデータが得られ、それらから推定した設置方位の平均値および標準偏差はそれぞれ $N 201.5^\circ E \pm 4.7^\circ$ 、 $W 202.3^\circ \pm 8.8^\circ$ であった。これらから設置方位を $N 202^\circ E$ と推定した。最後に、設置時に損傷した地震計水平動EW成分のケーブルが1984年秋に断線し、この成分の観測が不可能になった。従って今後地震計の観測によって設置方位をより正確に求めることはできなくなった。

7. 謝 辞

設置方位推定のためのおもり落とし法および発破観測では、住鋳コンサルタント株式会社の植木保吉技師長および智田明夫氏ならびに株式会社明石製作所の古屋和男氏および斗沢敏雄氏ほか両社の方々にお世話になった。また自然地震観測では第2研究部の木下繁夫主任研究官に信号増幅器、磁気テープ記録機、ペンレコーダー等をお借りして使用させていただいた。また、同部の大竹政和地震活動研究室長には研究に当り多くの助言をいただいた。さらに同部の佐藤春夫主任研究官には原稿を読んでいただき助言をいただいた。あわせて深く感謝する。

参 考 文 献

- 1) Sakata, S., S. Shimada and S. Noguchi (1982): Continuous Crustal Strain Observation in Kanto District, a Triple Junction Area, by New-Type Three-Component Borehole Strainmeters. *Proc. of the General Meeting of the IAG, Tokyo, May 7-15, 1982*, 226-232.

(1985年5月29日 原稿受理)