

3. 地震動と地盤ひずみの観測

Observation of Earthquake Ground Motions and Strains

佐藤 暢彦*・片山 恒雄*

Nobuhiko SATO and Tsuneo KATAYAMA

1. ま え が き

埋設管やトンネルなどのような地中構造物は周辺地盤の加速度よりむしろ地盤のひずみと密接な関係にある。しかし、地震時地盤ひずみの観測資料は少なく、地中構造物の耐震設計に活用できる情報は不十分である。本観測では、地震動と地震時地盤ひずみに関する資料を得ることを目的とし、次の3つの地震観測を実施している。

- (1) 地震動の高密度アレー観測^{1),2)}
- (2) 地盤ひずみの直接観測
- (3) 地下埋設管の挙動の観測

アレー観測は地震動の把握と立体的な地盤ひずみの推定を目的としている。地盤ひずみの直接観測は地盤ひずみの資料を集めると同時に、アレー観測から推定される地盤ひずみを検証することに用いられる。最後の観測は地中構造物の一例として地下埋設管をとりあげ、地盤ひずみと地中構造物の地震時挙動との関係について調べる。

以上の観測は東京大学生産技術研究所千葉実験所構内で実施しており、(1)の観測は1982年4月中旬、(2)、

(3)の観測は同年12月末より開始している。なお、アレー観測から得られる地震動の記録は一連の研究の中の弱小モデルの地震観測における入力地震動の資料として利用される。

2. 観測地区の土質

アレー観測はおおよそ110mを一边とする三角形状の領域内で実施している。地震計を埋設するためのボーリング孔(以下では観測孔と呼ぶ)11箇所土質柱状図を得ているが、図1はその内の三角形の頂点に相当する所での土質柱状図を示している(位置は図3参照)。他の所の土質柱状図もほぼ類似であり、おおむね地表面下4~5mまでがローム層、その下3~4mが凝灰質粘土層、さらにその下が砂層となっている。N値はローム層と凝灰質粘土層においては10以下、砂層に入って

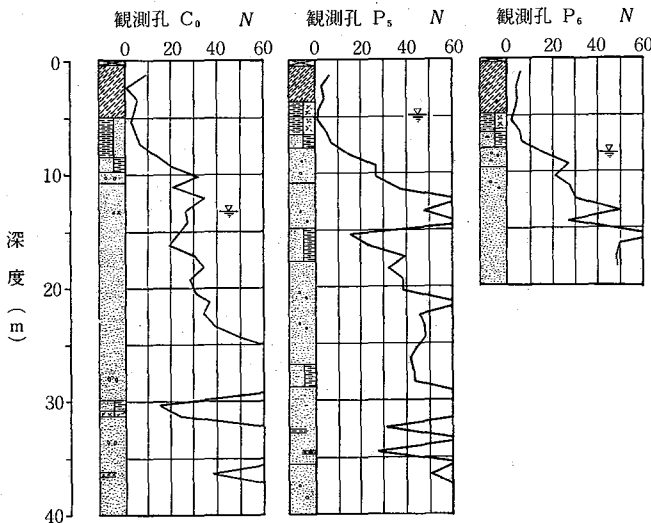


図1 土質柱状図の代表例(観測孔C₀, P₀, P₆)

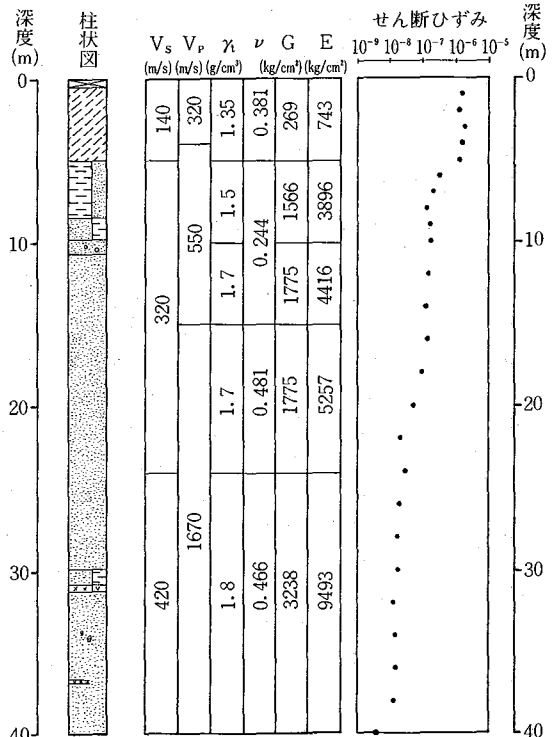


図2 観測孔C₀におけるPS検層結果

* 東京大学生産技術研究所 第5部

20~30 で漸増の傾向にあるが、ところどころ粘土質をかむところがあり、 N 値が 20 程度まで低下している。一つの観測孔 (C_0 、図 3 参照) において PS 検層を行った。この結果は図 2 で、地表 5 m を形成しているローム層においてはせん断波の伝播速度は 140 m/s、5~24 m が 320 m/s、24~40 m が 420 m/s であった。ローム層の卓越周期を求めてみると 0.14 秒となる。

観測地区の地表はほぼ平坦であり、観測地区内には実験棟が点在している。11 点の土質柱状図がほぼ類似していることから、本観測地区は概略水平に近い層構造をもっていると考えられる。

3. 地震動の高密度アレー観測

アレー観測網は一辺約 110 m の三角形の観測孔 C_0 、 P_5 、 P_6 の組と、観測孔 C_0 を中心として 5 m 離れた観測孔 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 および 15 m 離れた P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 と

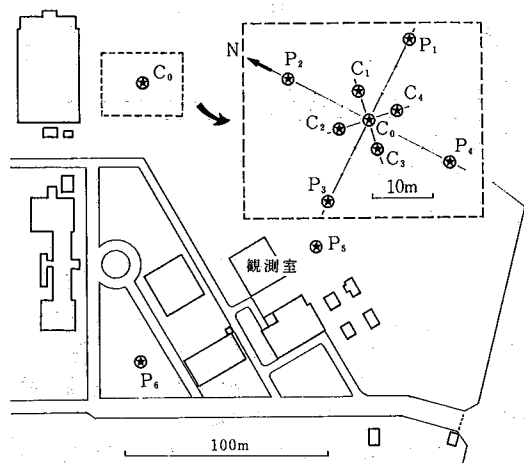


図 3 高密度アレー観測網

の組から構成されている(図 3-グラビア写真 1 ページ参照)。各観測孔に地震計を設置した深さは、1 m、5 m、10 m、20 m、40 m の組合わせであるが、1 m と 10 m は全観測孔に共通して設け(表 1)、埋設地震計を合計 36 台(108 成分) 使用している。

埋設地震計はせん断形圧電素子を用いた加速度変換器であって、直径 65 mm、全長 335 mm の地中埋設用ケース内に水平 2 方向と上下方向の計 3 成分のセンサと、それぞれに対応する専用増幅器を内蔵している(表 2)。地震計は 0.1~30 Hz の間で平坦な周波数特性をもっている。出力インピーダンスが低いため長い延長コードを用いてもノイズの混入は少なく、出力感度が 1 G 当たり 5 V あるため、記録装置に直接入力できる。一方、地震計ケース内に内蔵されている増幅器に電源を供給する必要があり、その取扱いの間違いによる故障が生じやすく、十分に注意を払わなければならない。図 4 は 2 台の地震計の周波数特性を実測したものであり、2 台の特性のばらつきは少ないといえる。アレー観測記録から地盤ひずみを計算する場合には、多数の地震計の特性が一致していることが特に重要である。

1 本の観測孔に多いもので 5 台の地震計を埋設するため、直径 116 mm のボーリングを行い、地震計埋設直前まではケーシングを残しておいた。地震計の埋設深さは小砂利の投入・締め固めで調節し、地震計は観測孔内にモルタルで固定した。この工程は、後に地表近くの地震計を試掘して目視で確認したところ良好であった。

表 1 地震計埋設深さ(※印)

深度 (m)	観 測 孔											
	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	
1	※	※	※	※	※	※	※	※	※	※	※	
5	※	※	※	※	※							
10	※	※	※	※	※	※	※	※	※	※	※	
20	※					※	※	※	※	※	※	
40	※										※	

表 2 埋設地震計の仕様

センサ	せん断形圧電素子
感震方向	水平 2 + 鉛直 1
測定範囲	±1000gal
感度	5 V/g
周波数応答	0.1~30Hz
直線性	0.1%以下
横感度	3%以下
耐水性	10気圧以上
電源	± 6V DC
寸法・重量	φ65×335mm, 約2.5kg

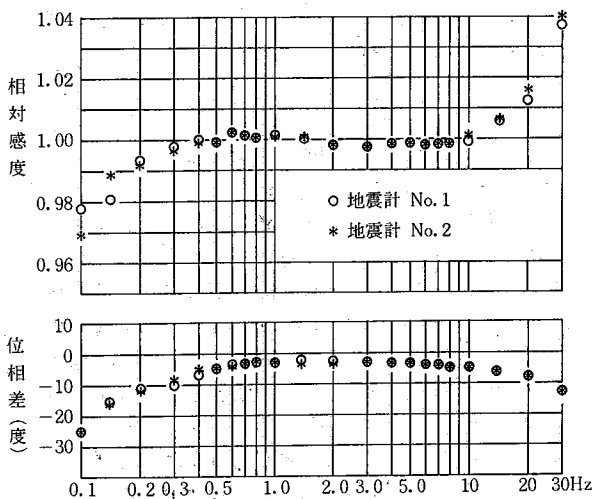


図 4 周波数特性の実測

表 3 地中地震計の埋設方位の推定結果

深度 (m)	地震記録	観 測 孔										
		C ₀	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆
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

(注) 北の方位を基準にして左回りを正としたときの値であり、単位は度である。

高密度アレー観測による記録が取れはじめたところ、いくつかの地震計の埋設方位に疑問が生じたため、地表(-1m)の11台の地震計を試掘して目視調査を行った。その結果、一部の地震計の埋設方位誤差はかなり大きなものであることがわかった。そこで、2つの地震計の記録間の相関値は互いの埋設方位が一致したとき最大となるという考えに基づいて、観測波形から地表の地震計の埋設方位を推定してみたところ、目視による実測値とよい一致を示した。表3は地中の地震計の埋設方位の推定結果を示したものである。³⁾

アレー観測記録から地盤ひずみを推定するには、地中の36点で記録される加速度を積分して変位を求め、その値を地盤中に構成される立体有限要素の節点変位とみなして要素のひずみ、すなわち、地盤ひずみを計算する方法を用いた。本アレー観測においては、要素の一辺の長さを5~110mの範囲で変えることができる。また、一辺の長さ110mの三角形の観測網を用いて地震波の入射方向とか伝播する波の特性などを調べることができる。

4. 地盤ひずみの直接観測

地盤ひずみ計は地盤中の2点間の相対変位を直接的に計測する目的で設置したものである。図5に製作した地盤ひずみ計を示したが、長さ3mの二重管でできている軸部分とその両端にある直径80cmの円板部分とから成っている(グラビア写真1ページ参照)。軸部分の外管の両端は円板に固定されており、中央部はゴム製の蛇腹で両板の相対変位を拘束せず、かつ外管内に浸水しないように工夫されている。一方、内管の一端は円板に固定されており、もう一枚の円板に固定された変位計によって、2枚の円板間の相対変位が測れるようになっている。

3台製作の地盤ひずみ計を高密度アレー観測孔C₀の近傍の深さ1.3mの水平面内にロゼット・ゲージ状に設

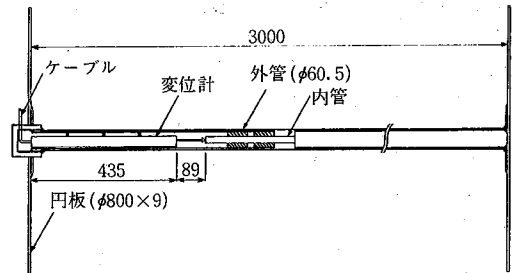


図5 地盤ひずみ計

置した(図6)。1台は観測孔C₂-C₀-C₄を結ぶ線と平行であり、1台は次節で述べる埋設管と平行である。残り1台は他の2本のなす角の2等分線上にあり、隣り合う地盤ひずみ計のなす角は53°50′である。

地盤ひずみ計の埋設にあたっては、掘削は最小限にとどめ、できるだけもとの地盤の状態を乱さないように気を付けた。両端の円板は乱されていない地盤にソイル・セメントで固定し、砂によって深さ0.6mまで埋め戻し、締め固めののち掘削土で埋め戻した。

5. 地下埋設管の挙動観測

全長120mの2条の埋設管も観測孔C₀の近傍に布設した(図6-グラビア写真1ページ参照)。埋設管はダクタイル鋳鉄管(JIS G 5526)と鋼管(JIS G 3452)の2種類であり、口径はともに150mmである。鋳鉄管は1本の長さ5mであり、±60mmの伸縮量をもつSII型継手(JIS G 5526)により連結されている。これに対して、1本当たり5.5mの鋼管は溶接により一体化されている。2条の管は1m離して平行に埋設されており、一端は水平断面3m×1m、深さ3mのコンクリート・ブロックに定着されている。この剛結部から90mの所に直角の曲り部があり、さらに30mの所が自由端となっている。

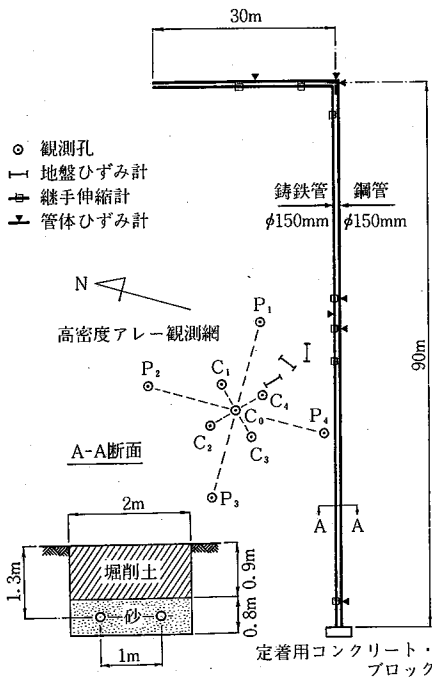


図6 高密度アレー, 地盤ひずみ計, 地下埋設管と測点

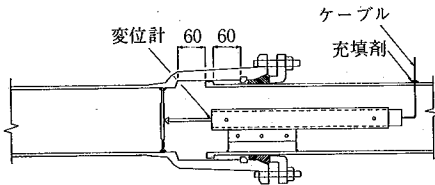


図7 铸铁管継手部の変位計設置状況

測定項目は図6に示すように、直線部、曲り部、剛結部の管体ひずみと铸铁管の継手の伸縮量である。管体ひずみは管体に焼付けて貼付したワイヤ・ストレーン・ゲージによって検出し、継手の伸縮は地盤ひずみ計に用いたものと同じ変位計によって検出した。図7は継手部の管内に設置した変位計を示している。管体ひずみは鋼管6箇所、铸铁管1箇所合計7箇所の管の両側にストレーン・ゲージを貼付して測定している。また、铸铁管の継手伸縮計は全部で7箇所に設置した。

埋設管の設置は実際に行われている方法と同様で、掘削した溝の中に厚さ約40cmのサンド・ベッドを作り、その上に埋設管を配置したのち、40cmの砂と70cmの掘削土で埋め戻した。埋設管の埋設深さは地盤ひずみ計と同じ1.3mである(図6)。

6. 観測システム

観測地点と観測室は延長ケーブルで結ばれている。観測孔C₀、P₀、P₀'の3つの地区の組に分け、それぞれ1つ

の端子箱を、また、観測室内にも端子箱を設けた。地震計のコードは6芯シールド・コードであって、この内3本が3成分の地震計の出力信号用、2本が内蔵増幅器の電源用、残りの1本が信号と電源の共通のグラウンドとなっている。地盤ひずみ計、継手伸縮計、管体ひずみ計には4芯シールド線が必要である。このため、信号用には4芯シールド線、電源用には3芯線を用いた。観測点の多いC₀地区の信号用ケーブルには4芯シールド線が40組で1本となった外径38mmの集合ケーブル2本を用いた。電源ケーブルは各端子箱に1本ずつ配線し、端子箱内で各地震計に分配した。使用したケーブルは信号用には公称断面積0.3mm²、導体抵抗67Ω/km、電源用には断面2mm²、導体抵抗10Ω/kmのものである。延長ケーブルは深さ50cmの所にレフレックス管を通して布設した。

地震計には安定した電源が供給されなくてはならない。延長ケーブルの導体抵抗による電圧降下と変動を避けるため、観測室から各観測地区の端子箱に±10Vで送り、そこに設けた定電圧回路により±6Vの安定した電源に変換して各地震計に分配した。

地盤ひずみ計と铸铁管の継手伸縮計からの信号は交流式ひずみ増幅器を、また、管体ひずみ計からの信号は直流式ひずみ増幅器をそれぞれ経由して集録装置に送られる。地震計からの信号は直接集録装置に入力された。地震計108成分、地盤ひずみ計3成分、継手伸縮計7成分、管体ひずみ計16成分(予備のひずみ計2成分を含む)の134成分は3台の集録装置(64ch仕様2台と32ch仕様1台、集録装置の詳細は2.3観測・処理システムを参照)を用いて同時記録されている。なお、2種類のひずみ増幅器はいずれもオート・バランス機構を内蔵しており、集録装置から出る信号に従って1日に1回自動的にひずみ増幅器のバランスをとっている。

7. ま と め

地震動と地盤ひずみの観測のために、高密度アレー観測、地盤ひずみの直接観測、地下埋設管の挙動の観測の合わせて134成分の同時地震観測を実施している。本報告は観測体制・機器について述べたもので、表4に示すようにすでいくつかの記録を得ている。観測結果の一部については、すでに解析を進めているが、今後地震観測を継続することによって、地震動と地盤ひずみに関する貴重な資料が集積され、地中構造物の耐震設計に寄与できるものと考えている。

謝 辞

ここで報告した(1)高密度アレー観測、(2)地盤ひずみ測定、(3)埋設管挙動観測のうち、(2)は昭和57年度科学研究費補助金 自然災害(研究課題番号

表 4 地震記録一覧

1983年4月30日現在

番号	発 生 日 時 年 月 日 時 分 秒	最大加速度 (gal) Co -1m			記録長 (s)	Tape No.	備 考
		EW	NS	UD			
1	'82 4 15 7 54 59		5	2	29	1.	
2	4 19 11 25 58		6	3	43	1	
3	6 1 5 15 0		2	1	50	1	
4	7 19 13 55 56	6	10	4	45	2	
5	7 23 23 24 30	30	27	13	323	2	茨城県沖 M=7.0 Δ=180 D=40
6	7 23 23 30 47	2	2	1	29	2	
7	7 24 2 54 54	3	2	1	105	2	
8	7 25 17 2 32	3	3	1	44	2	
9	8 8 19 32 21	3	3	2	30	3	
10	8 12 13 33 29	6	6	3	104	3	作業中のノイズあり
11	8 16 1 58 53	7	6	3	38	3	
12	8 24 1 41 11	4	3	2	65	3	
13	9 6 10 48 35	3	4	3	37	3	
14	9 6 10 49 44	5	5	3	83	3	
15	9 30 1 11 1	10	10	3	37	3	
16	10 25 0 50 18	25	10	7	34	3	NO.2集録装置操作ミス
17	'83 1 8 3 19 25	5	5	3	41	3	地盤ひずみ・埋設管の観測追加
18	1 10 3 36 58	5	5	8	44	3	
19	1 16 21 45 39	15	10	4	36	3	千葉県北部 震度2
20	1 27 18 7 44	8	8	13	53	3	東京都東部 震度1
21	1 27 18 43 56	4	6	9	40	3	東京都東部 震度1
22	2 22 11 49 12	7	7	4	45	3	震度2
23	2 27 21 14 33	50	63	14	181	3	茨城県南部 M=6.3, D=40km 震度3

57025012) の補助を受けたものである。また、(3)については、フジタ工業(株)技術研究所および久保田鉄工(株)鉄管研究部からの援助を受けた。地盤ひずみ計および鉄管継手伸縮計の製作等に関しては、久保田鉄工(株)鉄管研究部に多大のご協力をいただいた。ここに記して深甚なる謝意を表する。(1983年6月15日受理)

参 考 文 献

1) 佐藤暢彦, 片山恒雄: 超高密度地震観測について, 土木

学会第37回年次学術講演会講演概要集, 1982.

2) T. KATAYAMA and N. SATO: Ground Strain Measurements by A Very Densely Located Seismometer Array, Proceedings of 6th Japan Earthquake Symposium, 1982.

3) 佐藤暢彦, 片山恒雄: 地中地震計埋設方位の推定, 第17回地震工学研究発表会講演概要, 1983.

4) J. FARJODI, T. KATAYAMA and N. SATO: Estimation of Seismic-Induced Ground Strains by Dense Seismometer Array Observation, 第17回地震工学研究発表会講演概要, 1983.