

# 地震動と地盤ひずみの観測(II)

## Observation of Earthquake Ground Motions and Strains(II)

佐藤 暢彦\*・片山 恒雄\*・ジャムシード ファルジューディ\*\*  
 Nobuhiko SATO, Tsuneo KATAYAMA and Jamshid FARJOODI

### 1. はじめに

地中構造物の地震時の挙動は、地震加速度よりもむしろ地震によって地盤に発生するひずみに密接な関係がある。そこで、地震動と地盤ひずみの関係について、地中構造物の耐震設計に活用できるような資料を得ることを目的として、

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

を実施している。このうち、(1)の観測を1982年4月中旬に、(2)、(3)の観測の一部を1982年12月末にそれぞれ開始した。1983年6月初旬に(2)、(3)の残りの部分の観測を開始して、現在の観測システムに至っている。

観測の開始以来、1984年6月11日までの約2年間に、合計50の地震記録が得られている。欠損の少ない記録のうち、主な地震11例について、地震諸元および震央位置をそれぞれ表1、図1に示す。

### 2. 観測システムの概要<sup>1),2)</sup>

観測は東京大学生産技術研究所千葉実験所構内で実施

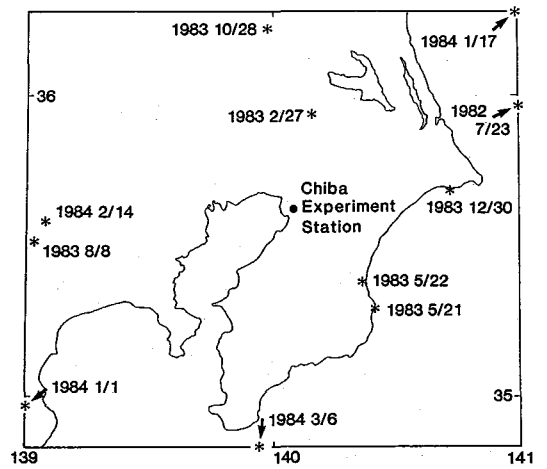


図1 主な記録地震の震央位置(1982年4月~1984年6月)

表1 主な記録地震の諸元(1982年4月~1984年6月)

番号	地震記録日時 年月日時分秒	最大加速度(gal) C0-1m			最大地盤ひずみ ( $\times 10^{-6}$ )	記録長 (s)	震央位置		深さ (km)	M	震央距離 (km)	震度 千葉
		EW	NS	UD			北緯	東経				
1	1982 7 23 23 24 30	28.6	26.2	12.4		322.7	36 11	141 57	30	7.0	178	3
2	1983 2 27 21 14 33	47.9	55.5	13.0	15.5	182.2	35 56.2	140 9.3	72	6.0	35	3
3	1983 5 21 19 46 46	17.2	18.1	15.2	4.3	114.0	35 17.4	140 24.7	49	5.0	46	3
4	1983 5 22 15 13 10	5.7	8.1	23.5		36.0	35 23.0	140 21.2	40	3.7	34	2
5	1983 8 8 12 48 16	15.4	14.6	5.6	5.4	198.6	35 31.1	139 1.5	22	6.0	99	3
6	1983 10 28 10 50 47	12.2	13.9	7.2	4.6	76.0	36 12.2	140 1.4	60	5.1	65	3
7	1983 12 30 11 30 53	11.5	15.0	6.0	4.2	99.9	35 40.5	140 45.0	52	5.3	58	3
8	1984 1 1 18 4 47	25.3	24.3	12.7	7.0	223.1	33 37.2	136 50.5	388	7.3	374	3
9	1984 1 17 20 14 16	13.9	17.5	6.9	3.5	76.4	36 26.9	141 14.8	43	5.6	138	3
10	1984 2 14 1 53 18	6.2	10.3	5.5	2.2	75.0	35 35.1	139 6.4	25	5.2	91	2
11	1984 3 6 11 19 3	22.5	28.1	8.4	10.1	347.5	29 20.4	139 12.3	452	7.9	705	4

\* 東京大学生産技術研究所 第5部

\*\* 東京大学大学院

している。

(1) の高密度アレー観測は一边が 110 m 前後の三角形の 3 つの観測孔の組と、そのうちの 1 つの観測孔 (C0) を中心として 5 m 離れた 4 つの観測孔、および、15 m 離れた 4 つの観測孔の組で構成されている (図 2)。各観測孔の深さ方向の測点は地表面下 1 m, 5 m, 10 m, 20 m, 40 m の位置の組合せで設けられており (表 2)、全体で埋設用の 3 成分圧電式加速度計 36 台 (108 成分)

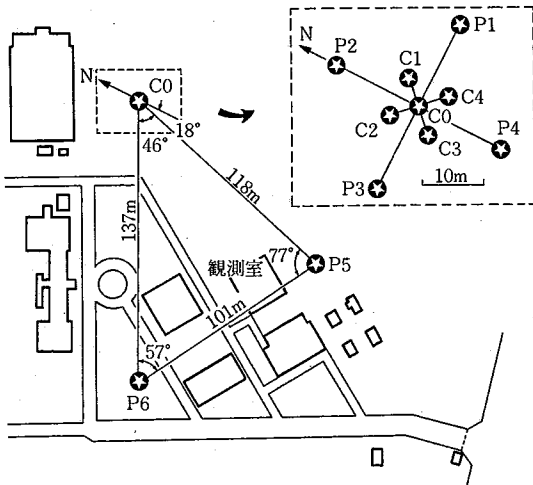


図 2 高密度アレー観測網

表 2 地震計埋設位置 (○印)

観測孔 深さ	P1	P2	P3	P4	P5	P6	C0	C1	C2	C3	C4
1m	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
5m							○	○	○	○	○
10m	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
20m	○	○	○	○	○	○	○				
40m					○	○					

を用いて観測している。

(2) の地盤ひずみの直接観測は、地盤内の 3 m 離れた 2 点間の相対変位を変位計で検出する装置を製作し、これを深さ 1.3 m の水平面内の異なる 3 方向 (図 3 の G1, G2, G3) に埋設したもので行っている。

(3) の地下埋設管の挙動の観測は、全長 120 m のダクトイル鑄鉄管と鋼管各 1 条を地下 1.3 m に L 字型に布設し、ダクトイル管については継手伸縮量と管体ひずみ、鋼管については管体ひずみがそれぞれ観測の対象である。ダクトイル管は継手伸縮量 7 か所 (DJ1~DJ7) および管体ひずみ 1 か所 (DS1)、鋼管は管体ひずみ 9 か所 (SS1~SS9) でそれぞれ測定している (図 3)。このうち SS8 と SS9 は、曲がり部の特性を詳細に把握するため、1984 年 5 月から観測を開始したものである。

管体ひずみは管の左右 2 か所で測っているので、以上の観測は合計 138 成分の同時観測となり、3 台のデジタル集録装置で 1 秒間に 200 回の割合でデジタル磁気テープに記録している。<sup>3)</sup>

### 3. 地震動のアレー観測結果<sup>4)</sup>

アレー観測は 1982 年 4 月から実施しているが、最大の地盤加速度は、1983 年 2 月 27 日に茨城県南部で発生したマグニチュード 6.0 の地震 (表 1 の No. 2) で得られており、その大きさは 66 ガルであった。この地震の際に記録された 108 成分の地盤加速度の最大値を表 3 に示す。たとえば、少し離れた観測孔 P5, P6 を除く 9 つの観測孔の深さ 1 m の EW 成分の最大加速度は、44.5 ガルから 53.0 ガルまでの間にばらついており、平均は 48.7 ガル、変動係数は 0.055 である。このように、水平距離 30 m 以内の同一埋設深さの最大加速度の平均値と変動係数を表 1 に示した 11 個の地震についてまとめたものが、表 4 である。ここでは、水平振動成分は震央方向 (R) と

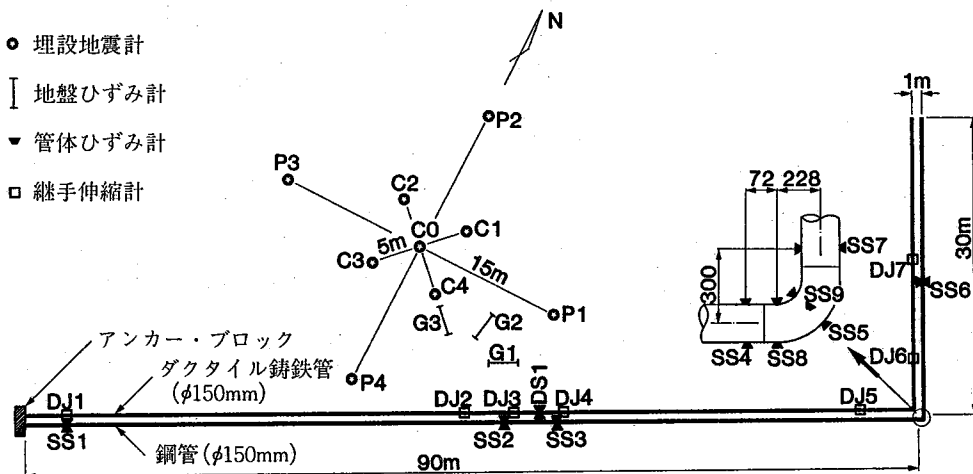


図 3 地盤ひずみ計と地下埋設管

表 3 最大加速度一覧 (1983 年 2 月 27 日: 茨城県南部, M = 6.0)

Depth	Comp.	C0	C1	C2	C3	C4	P1	P2	P3	P4	P5	P6
1m	EW	48.0	45.8	48.2	46.8	50.6	53.0	49.3	44.5	52.1	40.2	38.6
	NS	55.5	53.3	57.3	55.1	57.9	66.4	62.5	61.4	64.5	59.7	51.5
	UD	12.5	13.6	16.5	13.1	14.4	15.3	13.8	17.3	15.2	14.7	15.7
5m	EW	37.7	39.6	37.5	39.8	39.2						
	NS	41.4	41.8	40.9	39.2	42.1						
	UD	12.4	11.0	11.7	12.1	12.0						
10m	EW	28.9	29.3	28.5	27.3	30.1	31.3	26.4	25.3	29.2	20.3	23.9
	NS	33.0	35.9	34.4	31.9	32.5	35.8	37.2	35.0	31.1	30.4	32.2
	UD	9.3	8.9	9.9	10.3	9.4	10.4	8.3	9.6	10.4	9.6	11.6
20m	EW	19.3					20.4	19.0	20.1	20.3	18.5	20.2
	NS	22.9					22.9	21.1	21.6	21.0	22.1	23.0
	UD	7.4					6.8	7.0	7.3	8.8	8.1	9.9
40m	EW	18.7									19.2	
	NS	18.3									17.4	
	UD	7.3									8.6	

表 4 最大加速度の平均値 (MNS) と変動係数 (COV)

Date	Y	1982	1983						1984				
			M/D	7/23	2/27	5/21	5/22	8/8	10/28	12/30	1/1	1/17	2/14
- 1m	R	MNS	31.1	59.3	20.3	9.5	18.5	14.7	13.3	26.5	17.3	6.8	29.8
		COV	0.112	0.074	0.084	0.165	0.161	0.066	0.085	0.087	0.192	0.128	0.059
	T	MNS	27.2	46.7	18.2	5.3	16.3	13.7	14.5	24.7	11.9	10.1	23.0
		COV	0.092	0.061	0.136	0.261	0.139	0.083	0.044	0.081	0.046	0.067	0.036
	UD	MNS	12.6	14.6	16.5	23.0	6.2	5.9	5.1	10.7	6.3	2.7	7.7
		COV	0.122	0.102	0.076	0.052	0.142	0.109	0.061	0.144	0.094	0.194	0.100
- 5m	R	MNS	16.7	41.4	10.1	3.3	7.6	7.3	6.7	12.6	6.9	3.5	24.7
		COV	0.032	0.024	0.059	0.136	0.045	0.041	0.065	0.039	0.058	0.040	0.021
	T	MNS	18.8	36.8	7.9	1.8	8.5	6.8	7.3	14.9	6.5	6.5	20.8
		COV	0.079	0.026	0.068	0.081	0.028	0.067	0.052	0.076	0.073	0.047	0.028
	UD	MNS	9.6	11.8	8.6	8.5	4.0	3.4	4.4	7.1	4.3	2.1	8.3
		COV	0.155	0.040	0.037	0.045	0.103	0.067	0.036	0.060	0.017	0.150	0.079
- 10m	R	MNS	13.7	34.5	8.2	1.6	6.4	5.3	4.9	10.1	5.6	2.9	22.2
		COV	0.052	0.056	0.077	0.066	0.113	0.048	0.046	0.045	0.063	0.084	0.026
	T	MNS	17.2	26.6	5.7	1.4	6.9	5.1	6.2	11.0	5.6	4.5	20.4
		COV	0.064	0.059	0.110	0.193	0.074	0.061	0.034	0.070	0.060	0.059	0.026
	UD	MNS	6.6	9.6	7.6	7.5	3.0	2.7	3.5	5.9	3.2	1.7	6.6
		COV	0.056	0.071	0.080	0.048	0.056	0.164	0.121	0.087	0.074	0.169	0.073
- 20m	R	MNS	9.4	23.6	6.3	1.4	4.2	3.7	3.7	8.7	5.7	2.0	18.0
		COV	0.064	0.036	0.067	0.085	0.046	0.037	0.041	0.054	0.061	0.024	0.019
	T	MNS	13.1	20.1	5.1	1.4	4.6	3.9	4.6	7.7	3.8	3.7	18.8
		COV	0.057	0.029	0.060	0.093	0.050	0.059	0.059	0.062	0.037	0.063	0.034
	UD	MNS	5.5	7.5	6.2	7.1	2.6	1.9	2.5	4.3	2.4	1.2	5.9
		COV	0.049	0.094	0.035	0.061	0.117	0.144	0.073	0.170	0.053	0.150	0.056

震央直交方向 (T) を対象とした。

本アレー観測は地層構造が水平方向に大きな変化のない比較的一様な地盤で行っているが、たかだか 30 m という範囲においても、最大加速度のばらつきが変動係数で 0.1~0.2 程度ある。このばらつきは深くなるにつれて小さくなる傾向がある。ある 1 つの地震記録をもとに構造物の動的解析などを行った場合、いくら解析精度を上げても、計算結果の単なる数値的な解釈以上に、使用し

た地震記録には前述程度のばらつきがあるものと考えた、全体的傾向の「工学的な」判断が重要であることを示唆している。

#### 4. 地盤および埋設管ひずみの観測結果<sup>5)</sup>

これまでに得られた最大の埋設管ひずみは、地盤加速度も最大であった前述の茨城県南部の地震の際に発生し、管軸方向ひずみ  $15 \times 10^{-6}$  が記録されている。しかし、

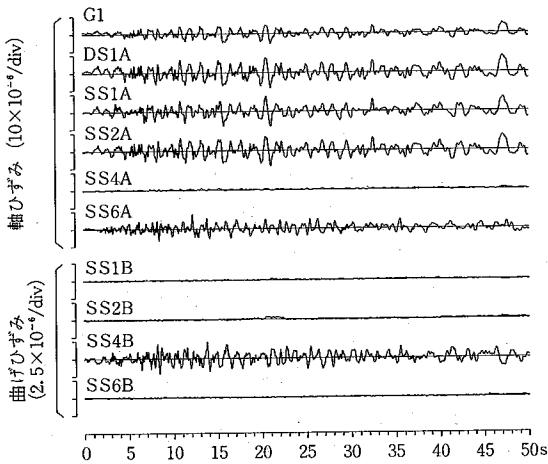


図 4 地盤ひずみと埋設管ひずみの記録例 (1984年3月6日:鳥島近海, M=7.9)

当時は埋設管ひずみの一部分しか観測されておらず、ひずみ観測の全体システムが完成以降では、1984年3月6日鳥島近海で発生したマグニチュード7.9の地震(表1のNo.11)による埋設管ひずみ(約 $10 \times 10^{-6}$ )が最大である。本節では、この地震によって得られた記録について述べる。

図4は記録波形である。管体ひずみは管外面の左右で

測られており、これらの平均値が軸ひずみ、差の半分が曲げひずみとなる。図4では、図3の測点名称にそれぞれA(Axial), B(Bending)を付け加えて、軸ひずみと曲げひずみを区別している。ダクトイル鑄鉄管の場合は、地盤ひずみの大部分が継手部で吸収されるため、継手伸縮量を管1本の長さ5mで除した値と管体ひずみの和をDS1Aとして示した。同様に、地盤ひずみ計の場合も、相対変位を2点間の距離3mで除した換算値をG1として表示してある。図4の波形の観察から以下の諸点がまとめられるが、これらの傾向は、他の地震記録にもほぼ共通に認められている。

- (1) 埋設管長手部中央(図3参照)におけるダクトイル管の軸ひずみ(DS1A)と鋼管の軸ひずみ(SS2A)は波形も大きさもよく一致している。
- (2) 軸ひずみ(SS2A)と地盤ひずみ(G1)は波形的にはよく一致しているが、大きさは地盤ひずみ計の値の方が小さい。
- (3) 管の軸ひずみは、アンカー・ブロック近傍(SS1A)でも特に大きくはならず、90°曲がり部(SS4A, および図4には示されていないSS7A)では小さくなっている。また、90mと30mの直線部中央(SS2A, SS6A)においては、大きさはほぼ等しいが、波形は異なる。
- (4) 管の曲げひずみは、曲がり部(SS4B, および

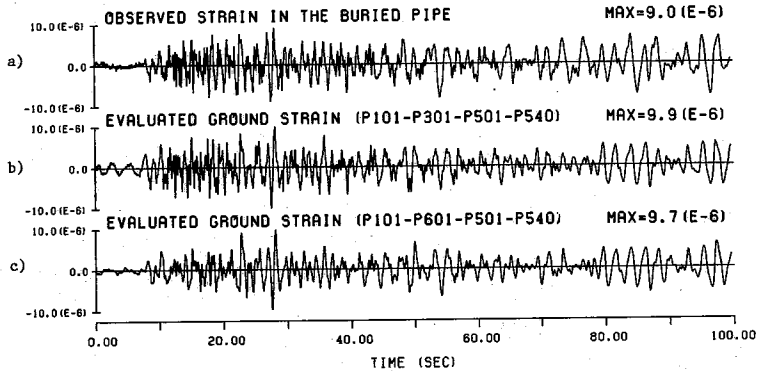


図5 アレー観測結果から推定した地盤ひずみ

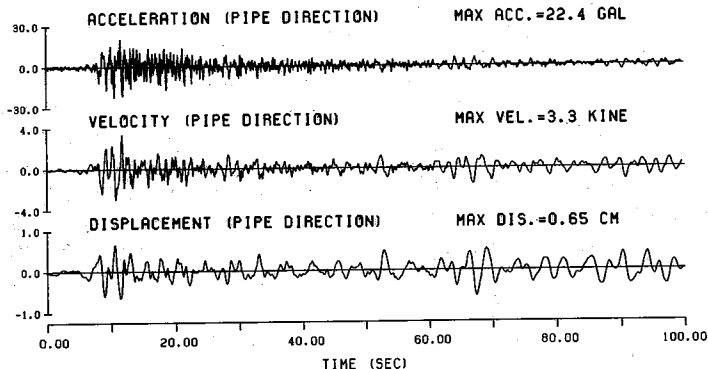


図6 地盤の加速度・速度・変位(観測孔C0の-1m, 管路長手方向)

図4には示されていないSS7B)で軸ひずみの1/4程度の大きさとなっているが、その他の点ではほとんど発生していない。

通常、地震被害を調べてみると、埋設管の被害は管の曲がり部や分岐部に集中している。このことは、上記(3)、(4)に述べた、これまでの本観測結果と矛盾する。被害が発生する程度の強い地震動を受けた場合には、埋設管と地盤の間にすべりが発生し、その結果、曲がり部などに応力が集中するのではないかと考えられる。また、鳥島近海の地震の際には、曲がり部SS5がほとんど曲げひずみを記録していない。これらについては、今後の観測から明らかにしていきたい。

### 5. アレー観測結果から地盤ひずみの推定<sup>9)</sup>

アレー観測は地震時の地盤加速度を記録している。この加速度記録から地盤ひずみを推定するためには、次の2つのステップが必要となる。

(1) 加速度記録を2度積分して変位記録に変換する。この積分は、フーリエ変換を用いて振動数領域で行い、ローカット(0.2 Hz)とハイカット(10 Hz)のフィルタ処理をしたのち、フーリエ逆変換によって地盤変位記録を得る方法をとっている。

(2) アレー観測の各測点の組合せでできる3次元有限要素の節点に(1)で求めた変位を作用させ、その要素内のひずみ(地盤ひずみ)を計算する。

1984年3月6日鳥島近海の地震の場合の計算結果の一部を示す。観測孔P1, P3, P5の各-1mとP5の-40mの4点からなる要素を用いたときの計算ひずみを図5b)に、観測孔P1, P5, P6の-1mとP5の-40mの4点からなる要素を用いたときの計算ひずみを図5c)にそれぞれ示し、埋設管の管体ひずみ(SS2A)の実測値と比較した。計算ひずみは埋設管の軸に一致する成分を求めたものである。また、図6は観測孔C0の-1mの測点における管路の長手方向の地盤加速度・速度・変位を示している。

実測値と計算値を比較してみると、いずれの要素を用いた場合でもよく一致している。要素の一辺の長さが短い方の計算結果図5b)は、長い方の結果図5c)よりも、時刻20秒前後の短周期成分をよく表している。図6からも分かるように、地震の後半部では加速度振幅は数ガル程度に小さくなっているにもかかわらず、ひずみの計算結果が実測値とよく一致していることは注目される。

図5の地盤ひずみと図6の地震動加速度・速度・変位と比較してみると、地盤ひずみが最大となる時刻(27~28

秒)には、地震動のいずれの波形も特に大きくなっていない。時間の流れによる振幅の変化でみると、約100秒間にわたりほぼ同じレベルを保っている地盤ひずみに近い波形は、地盤の速度・変位であり、加速度のレベルとはまったく対応していない。周期に注目すると、地盤ひずみの周期は地盤変位の周期より短く、地盤速度の周期に近いようである。また、地盤ひずみと地盤速度の位相には部分的に対応しているところも見られる。

### 6. ま と め

地震動と地盤ひずみの観測を開始して、2年余り経過し、地盤加速度で70ガル、地盤ひずみで $15 \times 10^{-6}$ 程度までの記録が得られた。本報告では、狭い地域内で最大加速度がどれくらいばらつくか、地中埋設管のひずみと地盤ひずみはどの程度対応するか、アレー観測は地盤ひずみの推定にどれ位有効か、などを検討した。しかし、地震動と地盤ひずみに関して有用なデータが得られるレベルの地震記録は、まだほんの数例しか得られていない。これからも地震観測を継続することによって、地震動と地盤ひずみの特性に関する資料を集積すると同時に、その中から地中構造物の耐震設計に役立つ知見を得たいと考えている。

また、1984年度には、現在の地震計アレーを含む形で、一辺300m程度の三角形アレーを追加することにしており、最終的には約150成分の地震動・地盤ひずみ・埋設管ひずみ・埋設管継手伸縮量の同時測定システムに拡張される予定である。

(1984年6月28日受理)

### 参 考 文 献

- 1) KATAYAMA, T. and SATO, N.: Ground Strain Measurements by a Very Densely Located Seismometer Array, Proceedings of The Sixth Japan Earthquake Engineering Symposium, 1982
- 2) 佐藤暢彦・片山恒雄: 地震動と地盤ひずみの観測, 生産研究, 35, 9, 1983
- 3) 高梨晃一・佐藤暢彦・大井謙一: 観測・処理システム, 生産研究, 35, 9, 1983
- 4) 片山恒雄・佐藤暢彦: 多点同時観測記録から求めた地震動特性のばらつき, 土木学会第39回年次学術講演会講演概要集I, 1984
- 5) 佐藤・片山・大保・岩本・中村: 東京大学生産技術研究所における地下埋設管の地震観測例, 土木学会第39回年次学術講演会講演概要集I, 1984
- 6) KATAYAMA, T., FARJOODI, J. and SATO, N.: Measurement of Seismic Ground Strain by a Dense Seismograph Array, Eighth World Conference on Earthquake Engineering, 1984