

**地震時に生ずる地盤ひずみの
観測とその結果について**
Results of Ground Strains Observed During Earthquakes

* ** ***

森地 重暉 今村 芳徳 佐伯 宗大

by Shigeaki MORICHI, Yoshinori IMAMURA and Munehiro SAEKI

To verify the aseismicity of the underground structures, examining the strains generated in the surrounding subsoil is required. However, observation of ground strains generating during earthquake is seldom made. Given this situation, we took direct measurements of ground strains generating during earthquake to clarify the mechanical properties of such strains.

Field work began with driving steel piles(diameter 70mm) into the ground through three points at the vertices of each of three squares. The relative displacements between the piles in place, namely ground strains, were measured. The study results of these records indicate that ground strains generating during earthquake seem to resemble more to the state of pure shearing.

key words: Ground strains during earthquake , Earthquake observation

1 はじめに

埋設管を始めとして地中構造物の耐震性についての究明は、その種の構造物の建設の増大と共により一層重要性を増してきた。地上構造物の地震時に生ずる変形が加速度の影響を受けるに対して、地中構造物の変形は周辺地盤の変形に追従する。それ故に、地中構造物の耐震性の検討には、地震時に地中構造物に発生するひずみとその生成の原因である周辺地盤に生ずるひずみについての究明が必要とされる。

実際に、地震時に地中構造物に生ずるひずみの値を知るには観測が不可欠で、埋設管、沈埋トンネル、地下鉄トンネル、タンク等についての観測が行われている((1)~(8))。中村等は、1982年に、過去に報告された文献中の資料を用いて、地中構造物に地震時に生ずるひずみの定量的研究を行っている(9)。地中構造物に生ずるひずみを支配する地盤ひずみの地震時観測は、一般に実施上の困難を伴うためか、実施例は少ない((10)~(11))。地中構造部に生ずるひずみを用いて地盤ひずみを推定することも考えられる。佐藤等は、近接した地盤での両者の記録を比較検討して、その種の推定方法の妥当性を検討している(12)。又、地盤ひずみを算定するために、1点での加速度記録やアレイ観測で得られた加速度記録等を利用することも行われている((13)~(20))。このような算定結果は直接に測定された値ではないが、多くの観測資料を利用することが可能なので、算定方法の発展が望まれる。その他、時空間確率過程モデルを利用して地盤ひずみを求める

* 正会員 工博 東京理科大学教授 理工学部土木工学科 (〒278 野田市山崎2641)

* 正会員 工博 東京理科大学講師 理工学部土木工学科

** 学生員 東京理科大学大学院 理工学研究科土木工学専攻

ことが考えられる。田村等(21)、星谷(22)の論文には、関連する研究についての紹介がなされている。

このような背景を考慮して、より一層正確に地震時に生ずる地盤ひずみを観測し、地盤ひずみについての力学的性質を究明することが必要であると考えた。そのために地盤ひずみの直接観測を試み、得られた結果に若干の考察を加えることにした。

2 観測方法

2・1 観測場所

地盤ひずみの観測場所として、千葉県野田市山崎にある東京理科大学構内にある土木工学科屋外実験場を選定した。面積約7300m²の関東ローム台地の一画で、東に向かい約6°傾斜している。地下水位は約1mの低地である。地盤の土質の状態は図-1に示す通りである。およそ関東平野の中心部における普通の地盤と考えてよい。観測場所の位置は、北緯35°55'03'、東経139°54'57'である。

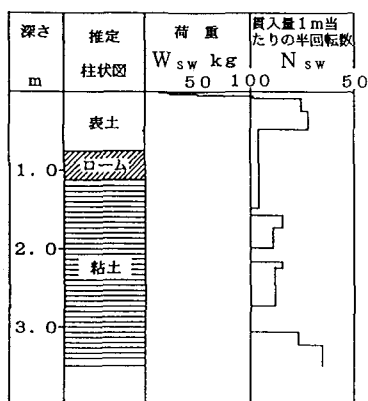


図-1 観測場所の土質

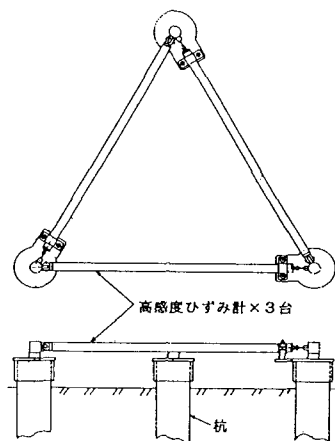


図-2 ひずみ計の設置状況

2・2 観測方法

地盤の自由表面に生ずる表面方向の垂直ひずみを3方向観測した。直径70mm、肉厚3mmのチューブ状の鉄杭を、地表に抜がった一辺ほぼ1mの正三角形の頂点の位置に打ち込み、鉄杭の地表面での高さを10cm程度とした。地震時に生ずる杭間の相対変位を観測した。相対変位の測定は、次のように行った。杭間に棒状の差動トランス型変位計(DS-100型：東京測振(株))、重量2.1kg)を装着し、地震時に生じた相対変位を測定した(図-2)。変位計は増幅器の回路上の工夫で相対変位が0に戻るようになっている。観測された相対変位を原長(約1m)で割り、得られた値を垂直ひずみとした。

相対変位量の記録はデジタル的に1/100秒毎に行った。記録装置はSAMTAC(東京測振(株))である。ひずみ測定位置の近くに3成分の地中埋設型の圧電型加速度計(PV-22、リオン(株))を埋設した。加速度計は観測場所に生ずる加速度の測定に用いる外に、記録装置の起動用に利用した。水平方向の加速度が10galを超過

したときに記録を開始するようにした。記録を開始する時刻を地震の発生時刻とした。記録は発生時刻の10秒以前から行うようになっている。発生時刻の表示には水晶時計を用いているが、時刻の修正には、N. H. K.の時報を利用している。地震記録には、テープ（アンリツ（株））を用いた。

機器の設置状況は図-3に示されている。図中で、 A_1 、 A_2 及び A_3 は、加速度計の設置位置であるが、現在では、 A_1 、 A_2 の加速度計が故障しているので、 A_3 のみを使用している。即ち、 A_3 での加速度を観測位置での値とし、また、記録装置の起動用に用いている。ひずみの+は引張に、又、-は、圧縮に対応する。

著者等は、観測場所よりテープのみ回収して、自室にて観測結果の数的処理を施すことにした。なお、大地震時に停電のあることを想定し、無停電装置を用いている。観測並びに数的処理の概念図を図-4に示す。

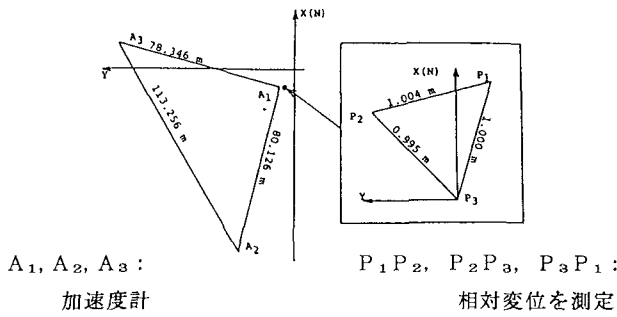


図-3 機器の設置状況

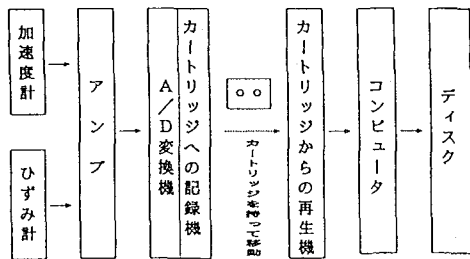


図-4 観測と数的処理の概念図

2・3 観測結果の処理

変位計の増幅器の回路上の問題であると思われるが、ひずみの観測記録には、若干0の値のレベルの変動がある。図-5には、ひずみの原記録の一例が示されている。

同図に示される0のレベルの偏差を補正するために次に示す式を用いた。

$$X_i' = \frac{1}{2m+1} \sum_{j=-m}^m X_{j+i} \quad \dots \dots \dots (1)$$

即ち、 i 番目の記録値 X_i は、次のように修正する。 X_i を中心に $-m$ 番目から m 番目の計 $(2m+1)$ 個の記録値の平均値 X_i' を求め、 $(X_i - X_i')$ を修正後の記録値とした。図-6には、図-5の修正後の結果が示されている。本文では、周期が3秒以下の成分を解析の対象とするために、 $m=150$ とした。このようにした場合、記録値 X_i に対する平均値 X_i' を求めるのに $X_{i-150}, \dots, X_i, \dots, X_{i+150}$ の301個のデータを用いるので、原記録における急激な立ち上がり部分が、その部分から150個前のデータから150個後のデータにまで影響を及ぼすことになり、その影響が不自然な形で残る。この問題に対しては、図-6に示すように、0レベルは直線上にあると考え、最小2乗法により記録値と0レベルとの差の2乗和が最小になるように直線の勾配 α と α' を求めた。次いで、 $-\alpha$ と α' とを0のするように修正を行った。修正した結果を図-7に示す。

なお、交流のノイズ50Hzに対しては、記録値が1/100秒毎であることを利用して、式(1)において $m=1$ とした X_i' を修正後の記録値とし、修正を行った。加速度記録はハムの影響が多いため修正の計算は3回の反復としたが、ひずみ記録に対しては、一度だけ反復計算を行っている。

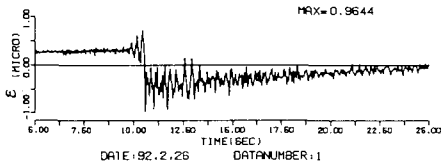


図-5 原波形

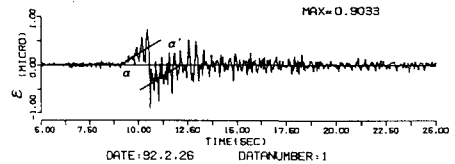


図-6 $m=150$ (式-1) で補正した波形

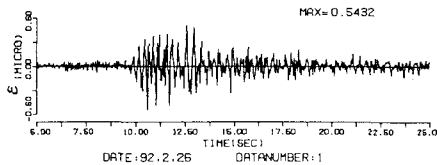


図-7 補正して得られた波形

2・4 観測記録からのひずみ成分の算定

地盤表面における観測結果から、当該観測点における垂直ひずみ2成分とせん断ひずみを求め、ひずみの特性を検討することにした。

X, Y 座標系において、垂直ひずみ $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ 及びせん断ひずみ γ_{xy} を用いて、図-8中の X 軸より θ 方向の垂直ひずみを表すと次式に示すようになる。

$$\epsilon_{\theta} = \epsilon_x \cos^2 \theta + \epsilon_y \sin^2 \theta + \gamma_{xy} \sin \theta \cdot \cos \theta \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここで、X方向の垂直ひずみ、Y方向の垂直ひずみ、せん断ひずみをそれぞれ、

$$\epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}$$

$$\epsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}$$

としている。又、 u 、 v は各々、X、Y方向の変位を意味する。

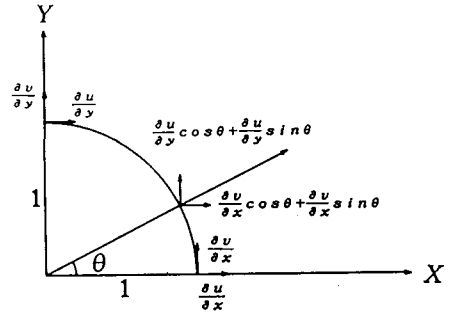


図-8 θ 方向のひずみ

図-9に示す通り、磁北をX軸とし、X、Y座標系を定める。 P_1P_3 、 P_2P_3 及び P_1P_2 の方向の垂直ひずみ ϵ_a 、 ϵ_b 、 ϵ_c が観測できるので、これを利用し垂直ひずみ ϵ_x 、 ϵ_y 及びせん断ひずみ γ_{xy} を算定する。各変位計のX軸からの方向 θ は表-1に示す通りである。

表-1 各変位形のX軸からの方向

$\angle P_1P_3X$	$-16^\circ 15' 17''$
$\angle P_2P_1X$	$104^\circ 12' 27''$
$\angle P_2P_3X$	$44^\circ 10' 35''$

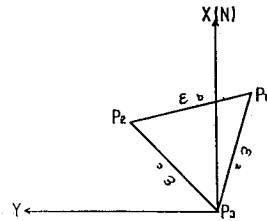


図-9 X、Y座標系

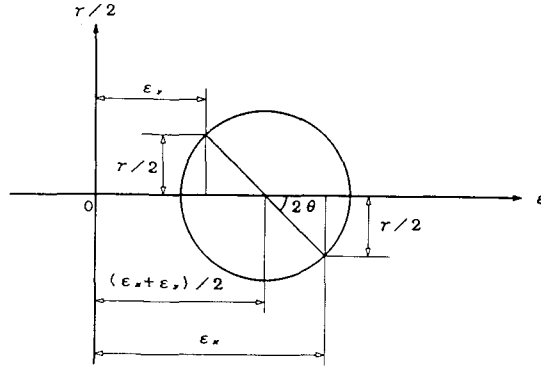
(2)式に代入すると次式を得る。

$$\begin{aligned} \epsilon_a &= 0.92166 \epsilon_x + 0.078348 \epsilon_y - 0.26872 \gamma_{xy} \\ \epsilon_b &= 0.060238 \epsilon_x + 0.93976 \epsilon_y - 0.23793 \gamma_{xy} \quad \dots \dots \dots (3) \\ \epsilon_c &= 0.51437 \epsilon_x + 0.48563 \epsilon_y - 0.49979 \gamma_{xy} \end{aligned}$$

よって ϵ_a 、 ϵ_b 、 ϵ_c を用いて ϵ_x 、 ϵ_y 及び γ_{xy} を求めるには次式を用いればよい。

$$\begin{pmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.90110 & -0.20122 & 0.36013 \\ -0.23479 & 0.92208 & 0.31272 \\ -0.69924 & -0.62710 & 1.3263 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \epsilon_a \\ \epsilon_b \\ \epsilon_c \end{pmatrix} \quad \dots \dots \dots (4)$$

このようにして、 ϵ_x 、 ϵ_y 及び γ_{xy} を求める。ひずみ状態の特性を検討するために、最大主ひずみ ϵ_1 、最小主ひずみ ϵ_2 、最大せん断ひずみ γ_{max} 及びX軸と最大主ひずみとのなす角 θ 等を求める。Mohrのひずみ円を併記して関係式を示しておく(図-10)。



$$\left. \begin{matrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \end{matrix} \right\} = \frac{1}{2} \left\{ (\epsilon_x + \epsilon_y) \pm \sqrt{(\epsilon_x - \epsilon_y)^2 + \gamma_{xy}^2} \right\} \quad \dots \dots \dots (5)$$

$$\gamma_{max} = \sqrt{(\epsilon_x - \epsilon_y)^2 + \gamma_{xy}^2} \quad \dots \dots \dots (6)$$

$$2\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\gamma_{xy}}{\epsilon_x - \epsilon_y} \right) \quad \dots \dots \dots (7)$$

図-10 Mohrのひずみ円

3 観測結果とそれらについての考察

1988年より現在まで57個の観測記録が得られた。一例としてひずみの大きな観測結果(1993年5月21日の記録)を示す。図-11に示した $\epsilon_a, \epsilon_b, \epsilon_c$ は2.3に示す方法で原記録を補正したもので各杭間の相対変位よりひずみを求めている。次に式(4)を用い、 ϵ_x, ϵ_y 及び γ_{xy} を算定する。図-12にその結果を示す。同図を見ると、 ϵ_x と ϵ_y とは互いにはほぼ逆位相であることが分かる。

次に、式(5)、(6)及び(7)を用いて主ひずみや最大せん断ひずみを求め、また、 ϵ_1 とX軸のなす角 θ の変動状況を調べる。図-13にそれらの結果が示されている。 ϵ_1 と ϵ_2 とは、ほぼ逆位相に近い状況を呈している。また、 γ_{max} は主ひずみの最大値の約2倍になっている。 θ の変動は約 90° の変動差があるが、正弦的な変動とは若干異なると考える。

図-14に、この記録の16.70秒から17.17秒までの1/100秒毎のMohrひずみ円の変動状況を示す。円上

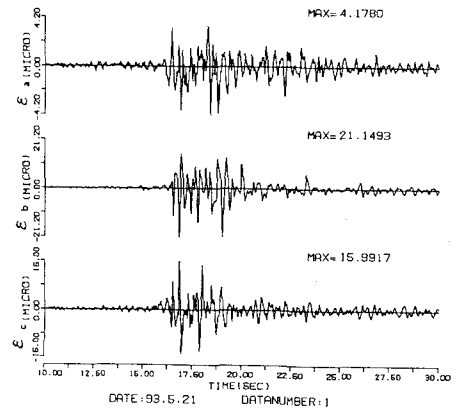


図-11 原記録を補正した波形

の黒丸は(ϵ_x , $\gamma_{xy}/2$)を示している。これらの円の状況から、次の2つのことがいえる。

- (1) 円の半径が小さくなるあたりで、最大主ひずみとX軸のなす角度は約90°変動しており、半径の大きいところではほとんど変動がない。
- (2) 半径の大きいところで、円は原点を含んでおり、中心点と原点との距離は半径より小さい。

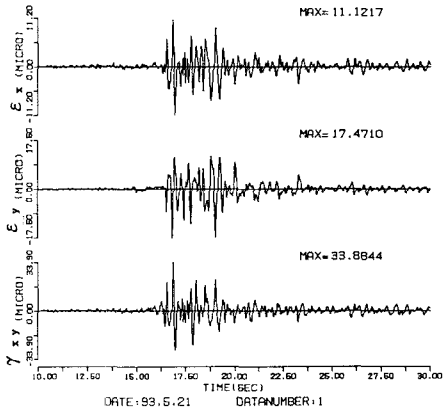


図-1 2 補正した原記録より算定した波形

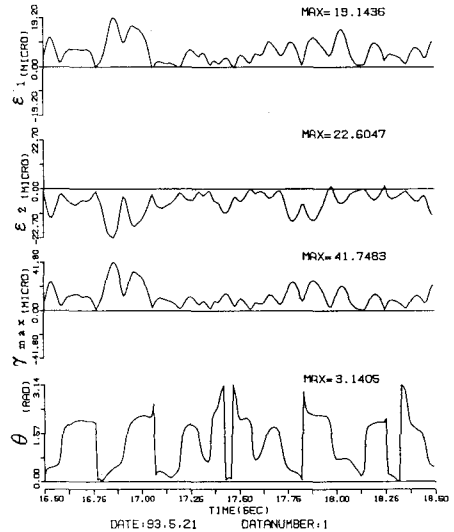


図-1 3 主ひずみ、最大せん断ひずみ、最大主ひずみとX軸とのなす角度の波形

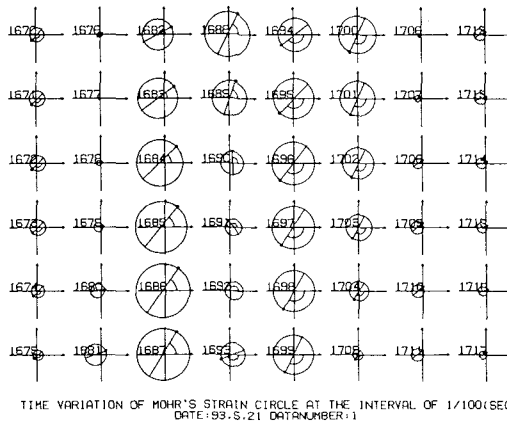


図-1 4 Mohrのひずみ円

これら(1),(2)について、さらに検討を深めた。

まず(1)に関連して、最大主ひずみの方向の記録の継続時間での頻度分布を求めた。図-15にその結果の一例を示す。分布図は、2つのピークを持った形をしていることが分かる。更に全記録について、横軸にその地震番号をとり、その2つのピーク値をプロットしたものを図-16に示す。このグラフから、最大主ひずみとX軸のなす角度は地震によってあまり差異はなく、一定の傾向を持つことが分かる。

(2)に関連して、1/100秒毎のMohrのひずみ円の直径で主ひずみ和を割った値 $((\epsilon_1 + \epsilon_2) / \gamma_{max})$ の記録の、継続時間での頻度分布を求めた。図-17にその結果が示されている。頻度分布図は0(即ち、純せん断状態)を中心にして分布していることが分かる。この分布の標準偏差は0.34程度である。 $\epsilon_1 = \epsilon_2$ の場合は、 $\gamma_{max} \rightarrow 0$ なるので、求める値は ∞ へと発散する。このようなことについて検討するために、図-17に示すものの逆数になる $(\gamma_{max} / (\epsilon_1 + \epsilon_2))$ の頻度分布を算定した。その結果は図-18に示されている。この値が0になる場合、即ち要素の純膨張圧縮の状態は殆ど見出すことは出来なかった。また、主要動の始まる前後で $((\epsilon_1 + \epsilon_2) / \gamma_{max})$ の頻度分布の差異があるか否かについて調べたが、その差異を見出すことは出来なかった(図-19、-20)。純せん断状態にあるひずみのMohr円は、中心点と原点とが一致するので、ここで示したひずみの状態は、純せん断状態に近いものと考えられる。

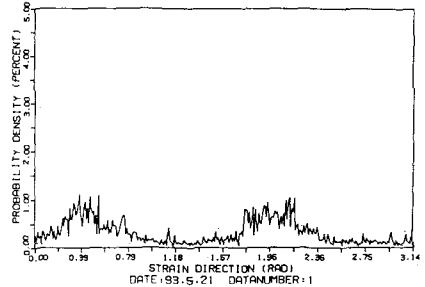


図-15 最大主ひずみとX軸のなす角度の頻度分布

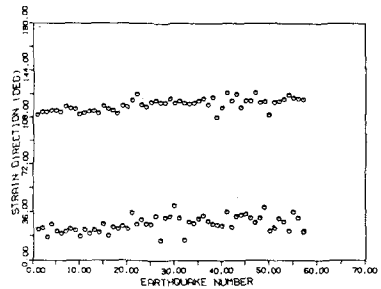


図-16 地震ごとの、最大主ひずみとX軸のなす角度のピーク値の関係

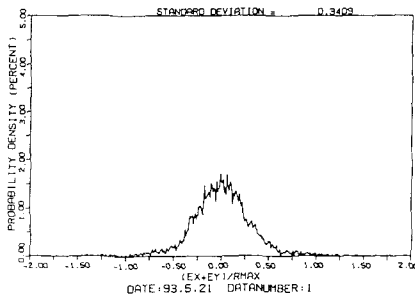


図-17 $((\epsilon_1 + \epsilon_2) / \gamma_{max})$ の頻度分布

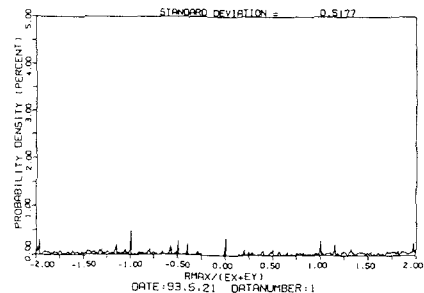
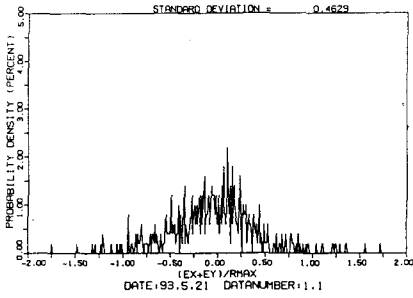
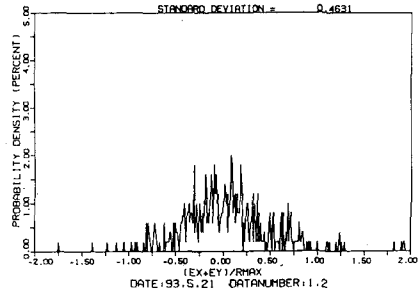


図-18 $(\gamma_{max} / (\epsilon_1 + \epsilon_2))$ の頻度分布



初動部分(11.0~16.0秒)

図-19 $((\epsilon_1 + \epsilon_2) / \gamma_{max})$ の頻度分布



主動部分(16.0~21.0秒)

図-20 $((\epsilon_1 + \epsilon_2) / \gamma_{max})$ の頻度分布

以上のようなひずみの状態は、他の地震でも同様な傾向を示した。図-21に示す例は1992年7月18日の三陸はるか沖地震のもので、スペクトルで1Hz以下にピーク値を持つ長周期の地震である。震央距離が大きく(約500km)、震源深さが浅かった(約2km)ために、長周期が卓越した例と思われる。このような地震でも、 ϵ_1 と ϵ_2 とは、ほぼ逆位相の状況を呈し、また、 γ_{max} は主ひずみの最大値の約2倍になっている。 $((\epsilon_1 + \epsilon_2) / \gamma_{max})$ の頻度分布は図-22に示すが、その標準偏差は0.23程度で、前例に比べ純せん断状態の傾向が強いものと考えられる。

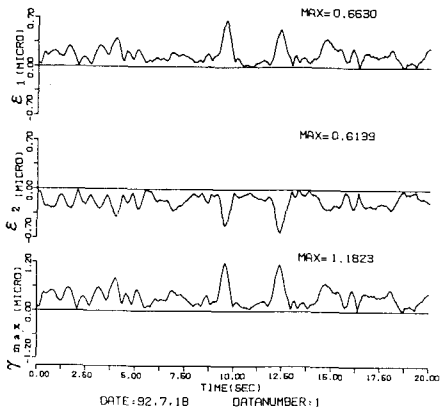


図-21 三陸はるか沖地震の波形

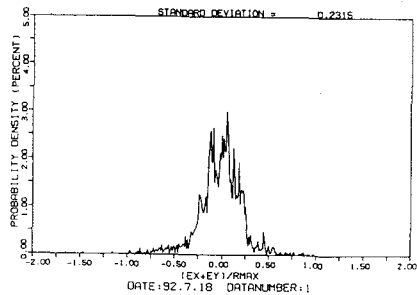


図-22 $((\epsilon_1 + \epsilon_2) / \gamma_{max})$ の頻度分布

表-2には、現在までに記録された地震について、主ひずみ(ϵ_1 又は ϵ_2)の絶対値と γ_{max} の時刻歴での最大値、加速度の時刻歴での最大値を示す。ここで、加速度の最大値とは、水平2成分と、鉛直成分との合成成分での時刻歴での最大値を意味する。

表-2 観測されている地震のリスト(次頁にも続く)

No	発生 年月日	発生時刻	震央位置			震央 距離 (km)	震源 深さ (km)	マグニ チュード	千葉 震度	最大 加速度 (gal)	ひずみの最大値 (micro)	
			北緯・東経		主ひずみ						最大せん断ひずみ	
				北緯								東経
1	88.07.15	09:51:18	茨城県西部	36° 15' N	140° 04' E	39	59	4.4	Ⅱ	7.94	1.40	2.47
2	89.02.04	19:57:45	福島県沖	37° 18' N	141° 19' E	198	61	5.4	Ⅲ	1.60	0.61	1.10
3	89.02.19	21:27:18	茨城県西部	36° 01' N	139° 54' E	11	55	5.6	Ⅲ	83.4	13.8	25.7
4	89.02.19	21:31:57	茨城県西部	36° 01' N	139° 55' E	11	---	3.4	—	2.14	0.349	0.645
5	90.05.29	06:00:19	茨城県西部	36° 03' N	139° 58' E	15	56	3.5	—	1.50	0.401	0.682
6	90.06.01	10:22:26	千葉県東方沖	36° 33' N	139° 12' E	95	59	6.0	Ⅳ	3.82	2.21	3.51
7	90.06.05	22:43:26	神奈川県中部	35° 00' N	139° 07' E	125	123	5.5	Ⅲ	2.97	1.30	2.63
8	90.06.27	06:55:35	相模湾	35° 33' N	139° 12' E	77	148	5.4	Ⅱ	3.04	1.59	2.76
9	90.08.05	12:36:59	茨城県沖	36° 24' N	141° 06' E	119	39	5.8	Ⅱ	6.26	2.18	3.81
10	90.08.08	20:11:21	千葉県北部	35° 47' N	140° 12' E	30	114	4.7	Ⅱ	2.66	0.932	1.43
11	90.08.23	08:47:31	千葉県中部	35° 21' N	140° 24' E	77	50	5.4	Ⅳ	6.95	2.78	4.33
12	90.08.23	11:45:21	千葉県中部	35° 21' N	140° 24' E	77	50	5.2	Ⅲ	4.29	1.90	2.90
13	90.08.24	22:44:26	東京都東部	35° 40' N	139° 39' E	37	42	3.7	—	2.95	0.845	1.37
14	90.10.06	23:33:26	鹿島灘	36° 29' N	140° 37' E	89	51	5.0	Ⅲ	13.3	2.98	4.51
15	90.10.29	16:58:51	茨城県西部	36° 06' N	139° 58' E	21	50	3.5	—	3.71	0.824	1.51
16	90.11.18	04:15:31	千葉県西部	35° 55' N	140° 34' E	59	36	4.3	Ⅱ	4.36	1.50	2.46
17	90.12.07	18:39:13	新潟県南部	37° 13' N	138° 33' E	189	14	5.4	—	4.34	1.84	2.77
18	90.12.08	04:36:04	茨城県西部	36° 13' N	139° 49' E	34	65	4.1	—	6.03	1.21	2.07
19	90.12.16	14:24:16	千葉県中部	35° 37' N	140° 13' E	43	77	4.0	Ⅱ	4.44	1.54	2.26
20	91.01.07	23:54:35	茨城県西部	36° 06' N	140° 00' E	22	56	3.8	—	3.11	1.02	1.65
21	91.09.07	23:19:35	茨城県南部	36° 06' N	140° 13' E	34	111	4.4	—	2.75	0.569	0.907
22	91.09.26	21:18:44	茨城県沖	35° 43' N	140° 01' E	24	41	2.7	—	3.22	0.508	0.875
23	91.09.29	13:14:19	千葉県北部	35° 45' N	140° 06' E	25	79	4.9	Ⅱ	4.97	1.02	1.87
24	91.09.29	13:42:46	千葉県北部	35° 46' N	140° 08' E	26	82	4.2	Ⅰ	2.06	0.247	0.444
25	91.09.29	14:00:22	千葉県北部	35° 45' N	140° 08' E	27	81	4.3	Ⅱ	1.96	0.376	0.711
26	91.10.19	08:31:26	茨城県西部	36° 06' N	139° 55' E	20	59	4.3	Ⅰ	19.1	2.23	3.93
27	91.10.27	14:07:28	茨城県沖	36° 03' N	141° 20' E	129	32	5.2	Ⅰ	2.19	0.361	0.688
28	91.11.19	17:24:16	茨城県沖	35° 06' N	140° 01' E	91	80	4.9	Ⅲ	14.7	1.94	3.70
29	92.02.26	10:54:24	茨城県西部	36° 03' N	139° 57' E	15	56	3.9	—	4.53	0.554	1.02
30	92.03.14	09:17:28	茨城県西部	36° 09' N	140° 06' E	31	74	3.8	—	1.77	0.252	0.472
31	92.07.09	21:59:30	茨城県沖	35° 44' N	141° 06' E	109	39	4.6	Ⅰ	1.86	0.303	0.525
32	92.07.18	17:40:10	三陸はるか沖	39° 24' N	143° 28' E	497	2	6.6	—	1.16	0.663	1.18
33	92.07.29	15:21:39	茨城県西部	36° 10' N	140° 03' E	30	59	3.6	—	4.06	0.552	1.02
34	92.08.07	20:13:44	若狭湾	35° 44' N	135° 20' E	415	363	6.2	Ⅰ	2.18	0.418	0.712
35	92.08.14	14:37:26	茨城県西部	36° 03' N	140° 08' E	25	76	4.0	—	2.81	0.401	0.738
36	92.08.27	13:09:57	茨城県西部	36° 03' N	139° 59' E	16	57	4.7	Ⅰ	18.4	1.96	3.42
37	92.08.30	04:20:06	東海道はるか沖	33° 12' N	138° 20' E	335	325	6.6	Ⅱ	9.48	1.93	3.49
38	92.09.14	11:47:20	鹿島灘	36° 26' N	140° 40' E	89	55	4.0	—	2.65	0.315	0.596

表-2 観測されている地震のリスト (前頁の続き)

No	発生年月日	発生時刻	震央位置 北緯・東経		震央 距離 (km)	震源 深さ (km)	マグニ チュード	千葉 震度	最大 加速度 (gal)	ひずみの最大値 (micro)	
			北緯	東経						主ひずみ	最大せん断ひずみ
39	92, 09, 30	14:08:28	茨城県南西部	36° 07' N 139° 50' E	23	59	3.9	—	1.93	0.290	0.537
40	92, 10, 01	11:32:06	茨城県中	36° 36' N 140° 59' E	122	48	4.6	—	1.58	0.256	0.490
41	92, 10, 22	17:53:22	茨城県南西部	36° 05' N 139° 55' E	18	61	3.4	—	4.76	0.322	0.584
42	92, 10, 28	10:54:57	茨城県南西部	36° 02' N 140° 07' E	22	80	3.7	—	1.63	0.210	0.356
43	92, 11, 01	00:11:14	茨城県中	36° 43' N 141° 08' E	141	49	4.8	I	4.21	0.708	1.38
44	92, 11, 06	07:36:17	茨城県中部	36° 29' N 140° 37' E	89	52	4.1	—	2.08	0.225	0.428
45	92, 11, 25	20:21:37	茨城県南西部	36° 09' N 139° 54' E	26	61	3.5	—	1.71	0.214	0.381
46	92, 11, 28	09:46:57	茨城県南西部	36° 05' N 139° 53' E	19	60	4.7	I	12.1	1.82	3.19
47	92, 12, 09	16:13:39	千葉県北部	35° 54' N 140° 32' E	56	46	4.4	II	3.41	0.452	0.814
48	92, 12, 09	23:25:03	千葉県北部	35° 53' N 140° 33' E	57	49	3.9	I	1.90	0.405	0.808
49	92, 12, 26	15:10:36	東京都東部	35° 42' N 139° 41' E	32	38	3.3	—	3.06	0.226	0.451
50	93, 01, 06	08:10:41	茨城県南西部	36° 06' N 139° 59' E	20	58	3.7	—	3.38	0.275	0.525
51	93, 01, 15	20:08:18	鋼路沖	42° 15' N 144° 23' E	860	107	7.8	II	9.53	1.59	3.10
52	93, 01, 19	23:42:14	日本海中	38° 37' N 133° 52' E	614	489	6.9	I	2.12	0.481	0.949
53	93, 03, 19	15:00:30	茨城県中	36° 05' N 141° 39' E	157	39	5.7	II	2.70	0.571	1.03
54	93, 04, 13	20:16:21	三宅島近海	34° 15' N 140° 11' E	187	95	5.0	I	1.57	0.256	0.486
55	93, 04, 14	20:27:00	茨城県南西部	36° 07' N 139° 55' E	20	60	3.6	—	1.98	0.275	0.470
56	93, 05, 16	22:19:02	茨城県南西部	36° 09' N 140° 03' E	28	58	3.7	—	3.98	0.477	0.877
57	93, 05, 21	11:36:46	茨城県南西部	36° 01' N 139° 54' E	15	61	5.4	III	142	22.6	41.7

ひずみの結果を概観すると、地震について、 γ_{max} の時刻歴での最大値は主ひずみ(ϵ_1 又は ϵ_2)の絶対値の最大値のほぼ2倍になっている。図-23には、表-2に示す全ての地震について、 γ_{max} と主ひずみ(ϵ_1 又は ϵ_2)の絶対値のそれぞれの時刻歴での最大の関係が示されている。この関係は、次式のように表され、明らかに上述のことが裏づけられている。

$$\gamma_{max} = 1.757 \times \max(|\epsilon_1|_{max}, |\epsilon_2|_{max})^{0.975}$$

ちなみに純せん断状態では、最大せん断ひずみは主ひずみの2倍である。

次に、主ひずみの絶対値の時刻歴での最大値と加速度の最大値との関係と、最大せん断ひずみの最大値と加速度の最大値との関係が、表-2に示した資料を基に計算され、それぞれ図-24、図-25に示されている。両図を見ると大局的に、加速度の増加に伴い、ひずみも増加していることが分かる。又、マグニ

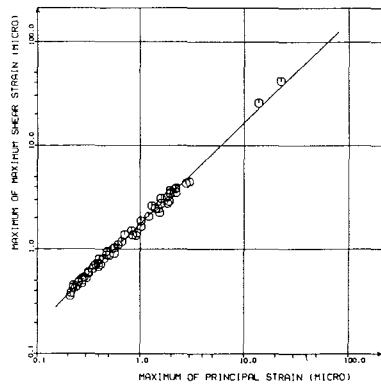


図-23 主ひずみの最大値と最大せん断ひずみの関係

チュードの大きい場合は小さい場合に比べて、同一の加速度では、ひずみが大きくなる傾向がある。現時点では、地震の数も多くなく、又、大きいひずみ(10micro以上)の生じた地震も2例だけなので資料を提示するに止める。中村も文献(9)の中で、埋設管の軸ひずみが地震動の最大値と高い相関を示すことを指摘している。また、大規模の地震動ほど、軸ひずみは最大加速度に比例することを述べているが、図-24、図-25でも同様なことが示されている。

図-26、図-27には、各々、主ひずみの絶対値、最大せん断ひずみの最大値と震央距離との関連を示す。マグニチュード(M)が大きい程、同一の震央距離では、ひずみが大きくなる様子が分かる。このことは、大規模な地震ほど、震央距離の増大によるひずみの減少が少ないことと同義であり、中村も文献(9)の中で、岡本も文献(23)の中で、同様なことを指摘している。

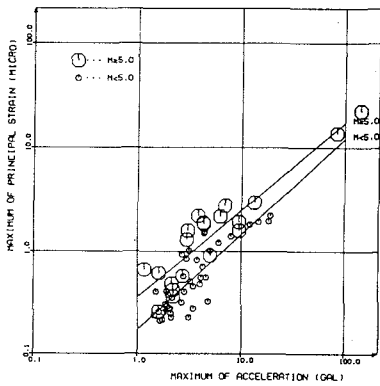


図-24 主ひずみの最大値と
最大加速度の関係

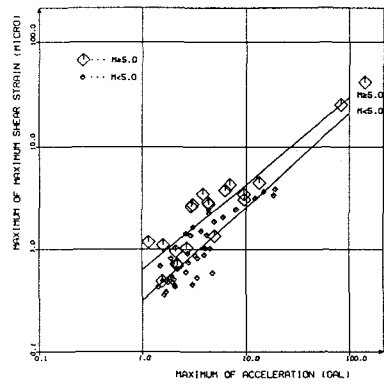


図-25 最大せん断ひずみの最大値と
最大加速度の関係

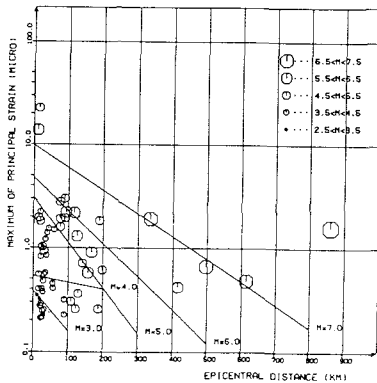


図-26 最大主ひずみの最大値と
震央距離の関係

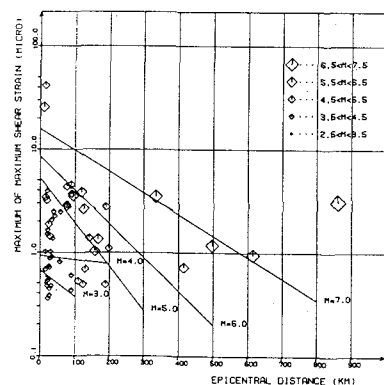


図-27 最大せん断ひずみの最大値と
震央距離の関係

4 結び

地中構造物の耐震性の合理的な究明のためには、地震時に生ずる地盤ひずみの把握が重要である。このようなことを考慮して、実地盤で地震時に生ずる地盤表面の3方向の垂直ひずみの観測を試行し、57個の地震についての観測結果を得た。ひずみの性質を力学的に調べ、又、ひずみの大きさと加速度、震央距離、震源深さ、マグニチュードとの関連を調査し、次の結論を得た。

- (1)最大主ひずみとX軸のなす角度は、地震によって差異はあまり見受けられない。
- (2)当該観測場所に生ずる地表面でのひずみは純せん断状態に近い。
- (3)最大せん断ひずみの時刻歴での最大値は主ひずみのもののほぼ2倍である。
- (4)大局的には、地盤に生ずる加速度が大きければ発生するひずみも大きいと考えてよい。
- (5)マグニチュードの大きい地震程、同程度の震央距離では生ずるひずみが大きい。

5 謝辞

本研究を成すにあたり、多賀健一（ヒメノ（株））、佐藤暢彦（東京測振（株））両氏には、多大の御教示をいただきました。また、小川育英会には、多大の御援助をいただきました。深甚なる謝意を表します。

参考文献

- (1) 桜井彰夫・高橋 忠・堤 一・矢島 浩・野口俊郎・岩片 透：松代地震を利用した超高压地中電線路埋設管の耐震研究、電力中央研究所報告、No. 67058, 1967.
- (2) Tamura, C., S. Okamoto and H. Hamada: Dynamic Behavior of a Submerged Tunnel during Earthquakes, Report of the Institute of Industrial Science, the University of Tokyo, Vol. 24, No. 5, 1975
- (3) 浜田政則：大型地下タンクの地震時挙動の観測と解析、土木学会論文報告集、No. 273, pp. 1~14, 1978年5月.
- (4) 浜田政則・杉原 豊・志波由紀夫・岩野政浩：岩盤空洞の地震時挙動観測と考察、土木学会論文報告集、No. 341, pp. 187~196, 1984年1月.
- (5) Yamaguchi, Y., M. Tsujita and K. Wakita: Seismic Behavior of a Rock Tunnel, Proc. of J. S. C. E., No. 374, pp. 249~260, Oct., 1986.
- (6) 榎 信昭・鈴木 操・長岡弘明・小山和夫：地震観測記録に基づく地下式円筒貯槽のひずみ応答特性、土木学会論文集、No. 398/I-10, pp. 367~376, 1988年10月.
- (7) 田村重四郎・岡本舜三・小長井一男：トンネルの地震時の変形（ひずみ）について、第8回日本地震工学シンポジウム論文集、pp. 625~630, 1990年.
- (8) 土山茂希・中村 晋・奥田宏明：地震観測に基づく地中送電用洞道の地震時挙動、土木学会論文集、No. 455/I-21, pp. 115~114, 1992年10月.
- (9) 中村正博・片山恒雄・久保慶三郎：地中構造物の実測地震時ひずみに関する定量的研究、土木学会論文報告集、No. 320, pp. 35~46, 1982年4月.
- (10) 片山恒雄・山崎文雄・永田 茂・佐藤暢彦：高密度3次元アレーによる地震動観測と記録のデータベース化、土木学会論文集、No. 442/I-14, pp. 361~370, 1990年10月.
- (11) 永田 茂・片山恒雄・山崎文雄・佐藤暢彦：加速度速度変位地震計の同時観測に基づく記録精度の検討、土木学会論文集、No. 442/I-14, pp. 371~380, 1990年10月.

- (12) 佐藤暢彦・中村正博・岩本利行・大保直人：地震動と埋設管のひずみに関する実測的検討、第7回日本地震工学シンポジウム講演集、pp. 583～588, 1986年.
- (13) 神山 真：地震時における地盤内の応力、ひずみの評価、土木学会論文報告集、No. 250, pp. 9～24, 1976年6月.
- (14) Toki, K: Strain Amplitude by Body and Surface Waves in a Near Surface Ground, Proc. of U. S. - Japan Seminar on Earthquake Engineering Research with Emphasis on Lifeline System, pp. 15～28, 1976.
- (15) 高田至郎・J. P. Wright：ライフライン系解析のための相対地盤震動、土木学会論文報告集、No. 299, pp. 13～22, 1980年7月.
- (16) 山田善一・野田 茂：表面波による相対地盤震動を推定するための理論的な試み、土木学会論文報告集、No. 335, pp. 41～50, 1983年7月.
- (17) 山田善一・野田 茂、大脇 崇：1979 Imperial Valley地震による震源近傍での地盤変動の評価、土木学会論文報告集、No. 344/I-1, pp. 303～312, 1984年4月.
- (18) 大石 博・関口宏二：埋設管路の地震時ひずみ発生機構に関する二、三の考察、土木学会論文集、No. 350/I-2, pp. 227～236, 1984年10月.
- (19) 大槻 明・田葺 隆、清水勝美：傾斜基盤を有する不整形地盤の地震時挙動と地盤ひずみ、土木学会論文集、No. 350/I-2, pp. 291～300, 1984年10月.
- (20) 田村敬一・川島一彦・相沢 興・高橋和之：地震時地盤ひずみの解析を目的とした個別記録方式によるデジタル強震計の記録精度、土木学会論文集、No. 392/I-9, pp. 367～375, 1988年4月.
- (21) Tamura, K. and K. Aizawa.: Differential Ground Motion Estimation Using a Time-space Stochastic Process Model, Proc. of J. S. C. E., No. 441/I-18, pp. 49～56, Jan. 1992.
- (22) 星谷 勝：条件付確率場のシュミレーション理論、土木学会論文集、No. 459/I-22, pp. 113～118, 1993年1月.
- (23) Okamoto, S.: Introduction to Earthquake Engineering (Second Edition), University of Tokyo Press, ISBN 4-13-068104-4 (UPT 69042), ISBN 0-86008-361-6, 1984.

(1993年 9月 16日 受付)