

土木研究所資料

ライフライン地中構造物の耐震設計 に用いる地盤変動

(Preliminary Study on Spatial Variation of
Ground Deformation for Seismic Design of
Buried lifeline Structures)

昭和59年9月

建設省土木研究所
地震防災部耐震研究室

Copyright ©1984 by P. W. R. I.

All rights reserved, No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複写は土木研究所長の承認を得ずしてこれを行なってはならない。

ライフライン地中構造物の耐震設計 に用いる地盤変動

招へい研究員 原 田 隆 典*
地震防災部長 岩 崎 敏 男
耐震研究室長 川 島 一 彦
耐震研究室 小 山 達 彦

要 旨

本報告は、ライフライン地中構造物の耐震設計に重要な管路に沿う地震時の地盤の変位分布の特徴を、1) 液状化に伴う路面の変状、2) 高密度強震観測結果の解析、3) 有限要素法による数値解析、および、4) 地中埋設管の震害統計資料の解析により検討するとともに、確率過程理論による整理を行ったものである。

キーワード：線状地中構造物，耐震設計，地震時地盤ひずみ，埋設管，液状化，確率過程理論

目 次

1. まえがき	1
2. 液状化による路面の水平変動	2
3. 地震計アレー観測記録による変位分布	12
4. 有限要素法を用いた数値計算モデルによる変位分布	15
5. 確率過程理論による整理と解釈	25
5.1 空間相関関数	25
5.2 最大相対変位	26
5.3 地盤変動データの解析例	27
6. 埋設管路の震害統計資料から推定した地盤の変位分布	31
7. 地震時の地盤変位分布の特徴	34
8. ま と め	36
参考文献	37

1. ま え が き

沈埋トンネル、埋設管、地下タンクなどの地震時挙動に関しては、慣性力が支配的である地上構造物とは異なり、これら地中構造物の耐震性は周辺地盤の異地点に生ずる地震時地盤の相対変位に支配される。このため、地中構造物の耐震解析では、地震時における地盤の変位分布を仮定し、これを地盤ばねを介して構造物に作用させ、断面力や変形を照査する、いわゆる“応答変位法”が多用されている。しかし、地震時の地盤の変位分布に関する研究はスタートしたばかりで、定量的な資料が極めて少ないのが現状である。

本報告は、管路に沿う地震時地盤の変位分布に関する特徴の把握を目的に、下記の4項目の生の資料の検討に加えて空間変数を含めた確率過程理論による整理と解釈を行い、今後の研究課題についてとりまとめたものである。

- (1) 液状化による路面の水平変動の分布
- (2) 地震計アレーによる地盤の変位分布
- (3) 有限要素法による地盤モデルから得られる変位分布
- (4) 地中埋設管路の震害統計資料から推定した地盤の変位分布

2. 液状化による路面の水平変動

液状化による地盤の変形に関する事例は多いが、これを計測した例は少ない。ここでは、新潟地震（1939年）と日本海中部地震（1983年）の際に国道7号海老ヶ瀬地区の約1.5 kmと能代南バイパス約2.2 km区間において計測された路面の水平変動の事例とその解析について述べる。

この2つの地区では、液状化による噴砂跡が多数現われており、この地区の地盤は液状化したものと推定されている。図-1, 2は震前と震後の路線測量の結果から求められた両地区における路面中心線の水平変動の様子を表わしたものである。^{1, 2)} 表-1, 2にその数値を示す。表-3, 4には、両地区の沈下量のデータを示す。路面は路線にそって水平方向に蛇行し、図-1の海老ヶ瀬地区では約5 m、図-2の南バイパスでは約1 mの最大水平移動量が認められる。このような蛇行の原因については現地の地形地質および土質条件さらに地震動との係わりに関して、今後解明されなければならないが、平地地盤が液状化すると、図-1, 2に示す程度の水平変動は生じるものと考えられよう。

このような変位分布の特徴を把握するために、下記の5つの統計量を整理してみる。

(1) 平均値 $\bar{v}$

図-1, 2の記号に従うと

$$\bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i, \quad v_i = v(x_i) \quad \dots\dots\dots (1)$$

(2) 平均値回りの標準偏差 σ_v

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2} \quad \dots\dots\dots (2)$$

(3) 空間相関関数 $R_v(\xi)$

$$R_v(\xi) = \sigma_v^{-2} \sum_{i=1}^n \frac{(v_i - \bar{v})(v_j - \bar{v})}{\sigma_v^2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\xi = x_j - x_i$$

(4) 最大相対変位 $d_{max}(\xi | x_i)$

$$d_{max}(\xi | x_i) = \text{Max. } |v_j - v_i| \quad \dots\dots\dots (4)$$

(5) 最大平均歪 $\epsilon_{max}(\xi | x_i)$

$$\epsilon_{max}(\xi | x_i) = d_{max}(\xi | x_i) / \xi \quad \dots\dots\dots (5)$$

上記統計量(1)~(3)の意味は白明であるので(4)と(5)の最大相対変位と平均歪の特性について説明を加える。図-3に示すように波長L, 振幅dの正弦波形の場合、式(4)で定義される最大相対変位は2点間距離ξが長くなるにつれて大きくなり約半波長の距離において、最大値2d~dを示

し、以後、一定値をとる。最大平均歪は $\xi \leq \text{約 } L/2$ の領域では、 x_i 点の歪の最大値を表わし、 $\xi > \text{約 } L/2$ では ξ に比例して減少する。最大平均歪は、式(5)で定義されているため、図-3のように最大相対変位と2点間距離を両対数グラフにプロットすると、 45° の斜軸の値として読みとることができる。このようなグラフを地盤変形スペクトルと呼ぶものとする。なお、第5章では確率過程理論を展開して、理論的な整理や考察を行う。

図-1, 2または表-1, 2に掲載した路面の水平変動データから求めた空間相関関数を図-4, 5に示す。図中に平均値や平均値回りの標準偏差を示す。両者の相関関数の形状は違うが、2点間距離100 m程度の領域の相関値は1~0.5と高く、この領域での地盤の変動はほぼ同様であることを読みとることができる。

図-6の▲△印は水平変動資料を使い最大相対変位、最大平均歪および2点間距離の関係を対数グラフにプロットしたものである。図-6の実線は、第5章に示す確率過程理論による地盤変形スペクトルである。海老ヶ瀬地区の場合、2点間距離400~900 mで最大相対変位は頭打ちとなり約4~8 mの相対変位や約 $6 \times 10^{-2} \sim 6 \times 10^{-3}$ と大きな地盤最大歪が認められる。能代南バイパスのものは、海老ヶ瀬地区のものより小さいが地盤変形スペクトルの形状はほぼ同じで約 $3 \times 10^{-2} \sim 1 \times 10^{-3}$ とこの場合も大きな地盤歪が認められる。したがって、液状化した地盤の変動は大きく、地盤歪にして約 10^{-3} 以上の変動が起こり得るものと言えよう。

表-1 海老ヶ瀬水平変位データ(単位m)

	0	20	40	60	80	100 m
1	0.00	0.00	0.20	0.60	0.70	0.70
2		0.10	-0.40	-0.70	-1.00	-0.30
3		0.60	0.80	1.00	0.80	1.70
4		2.30	2.30	0.20	0.50	0.00
5		-0.20	-0.50	0.00	0.80	1.60
6		2.20	2.70	2.60	2.10	1.00
7		-0.10	-1.20	-2.30	-2.20	-1.90
8		-2.60	-3.20	-3.00	-2.20	-2.30
9		-3.30	-3.60	-4.20	-4.30	-5.10
10		-5.60	-5.00	-3.20	-3.20	-4.70
11		-4.90	-5.00	-4.90	-4.60	-3.60
12		-2.90	-2.10	-1.40	-1.40	-1.50
13		-1.50	-1.70	-1.20	-1.40	-0.90
14		-0.70	-0.50	-0.50	-0.70	-0.70
15		-1.10	-1.30	-1.40	-1.30	0.50
16		0.50	0.50	0.40	—	—

表-2 能代南バイパス水平変位データ(単位m)

	0	20	40	60	80	100 m
1	0.00	0.02	0.02	0.07	0.28	0.62
2		0.84	0.98	0.91	0.79	0.62
3		0.45	0.42	0.32	0.11	0.04
4		0.03	0.06	0.11	0.00	0.00
5		0.08	0.06	0.05	0.06	0.15
6		0.20	0.32	0.32	0.16	0.00
7		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9		0.47	0.45	0.38	0.34	0.26
10		0.22	0.20	0.47	0.46	0.38
11		0.32	0.27	0.22	0.18	0.12
12		0.04	0.00	0.00	-0.05	-0.08
13		-0.14	-0.23	-0.25	-0.35	-0.44
14		-0.45	-0.55	-0.66	-0.60	-0.41
15		-0.22	-0.16	-0.09	-0.06	-0.07
16		-0.04	0.03	0.08	0.15	0.22
17		0.24	0.21	0.13	0.04	0.00
18		-0.01	-0.08	-0.08	-0.12	-0.15
19		-0.16	-0.17	-0.17	-0.20	-0.18
20		-0.15	-0.17	-0.18	-0.19	-0.20
21		-0.20	-0.19	-0.19	-0.18	-0.18
22		-0.14	0.00	0.18	—	—

表 - 3 海老ヶ瀬沈下データ (単位 m)

	0	20	40	60	80	100 m
1	0.000	0.000	0.000	0.514	0.298	0.888
2		0.717	0.492	0.976	0.568	0.652
3		0.235	0.597	0.775	0.898	1.014
4		1.004	0.807	0.906	1.035	0.956
5		0.776	0.766	0.148	0.513	0.549
6		0.559	0.669	0.729	0.874	0.694
7		0.724	0.729	0.809	0.900	0.764
8		0.829	0.834	1.014	0.984	0.947
9		0.761	0.886	1.086	1.134	0.951
10		0.676	0.246	0.731	0.696	0.645
11		0.515	0.630	0.450	0.515	0.605
12		0.585	0.730	0.720	0.720	0.642
13		0.582	0.122	0.397	0.337	0.332
14		0.662	0.352	0.562	0.447	0.342
15		0.542	0.687	0.901	1.032	0.698
16		0.000	0.000	0.000		

表 - 4 能代南バイパス沈下データ (単位 m)

	0	20	40	60	80	100 m
1	0.12	0.10	0.09	0.09	0.05	0.05
2		0.07	0.09	0.06	0.05	-0.02
3		0.05	0.11	0.10	0.13	0.00
4		-0.01	-0.01	-0.01	0.17	0.68
5		0.87	0.60	0.44	0.35	0.64
6		0.80	0.78	0.18	0.10	0.22
7		0.32	0.30	0.54	0.42	0.36
8		0.34	0.50	0.48	0.51	0.59
9		0.48	0.49	0.51	0.48	0.46
10		0.46	0.46	0.36	0.22	0.09
11		0.04	0.02	0.04	0.05	0.04
12		0.04	0.03	0.06	0.08	0.09
13		0.05	0.02	0.02	0.03	0.03
14		0.09	0.62	0.12	0.10	0.13
15		0.16	0.17	0.17	0.27	0.38
16		0.31	0.28	0.19	0.16	0.16
17		0.14	0.12	0.08	0.13	0.04
18		0.04	0.03	0.04	0.01	0.01
19		0.02	0.01	0.03	0.03	0.03
20		0.02	0.04	0.04	0.04	0.05
21		0.04	0.05	0.03	0.04	0.05
22		0.07	0.24	0.21	0.43	1.01
23		0.78	0.77	0.46	0.08	0.08
24		0.13	0.05			

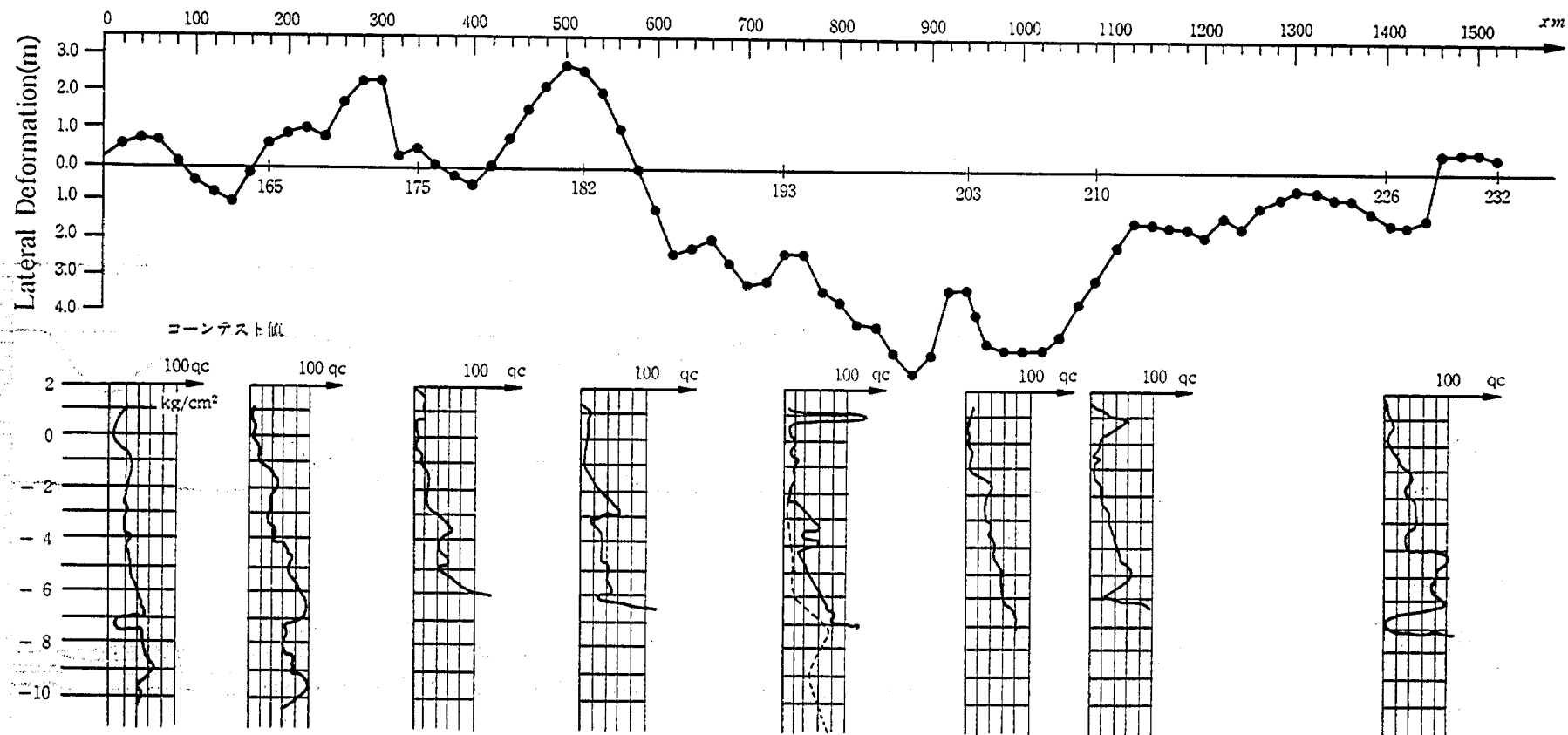


図 - 1 海老ヶ瀬地区国道 7 号線の水平変動

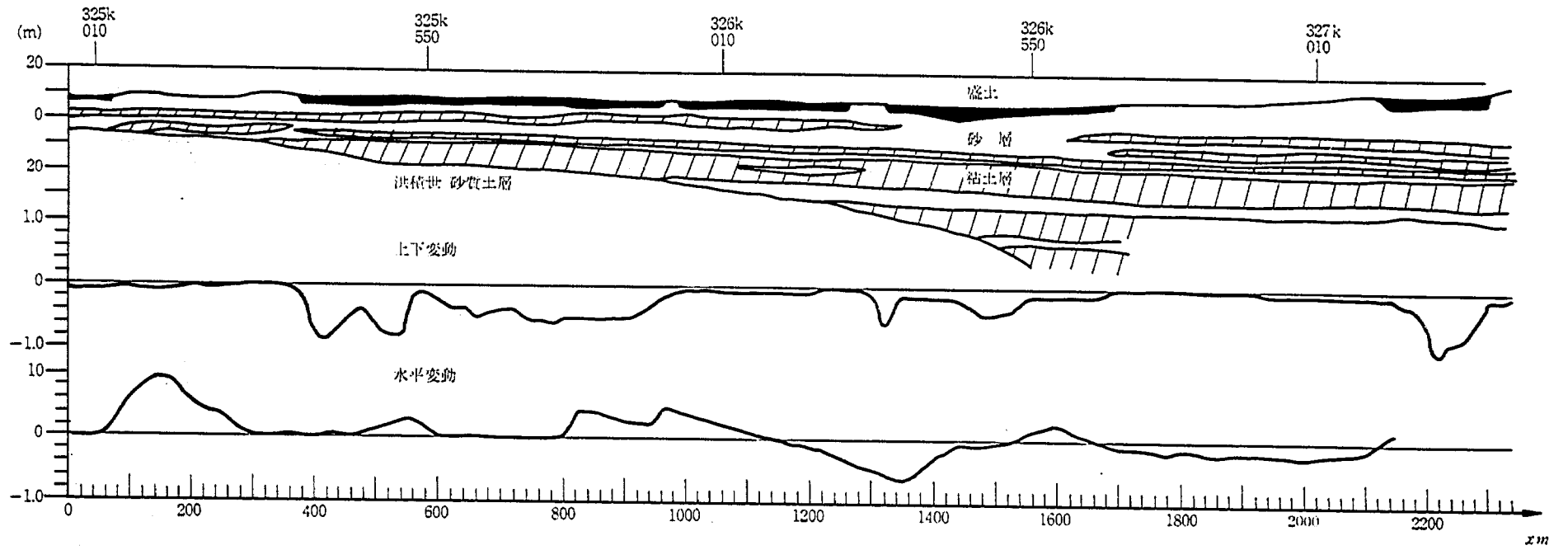


図 - 2 能代南バイパスの上下および水平変動

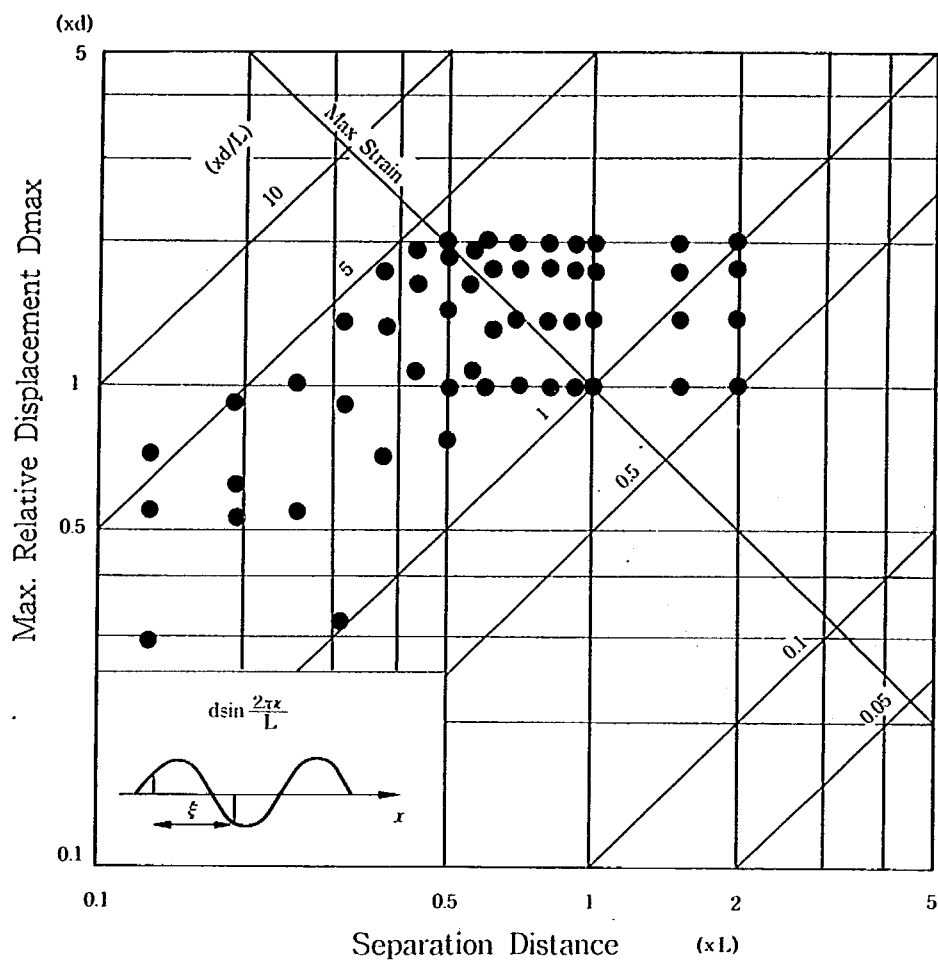


図 - 3 正弦波の地盤変形スペクトル

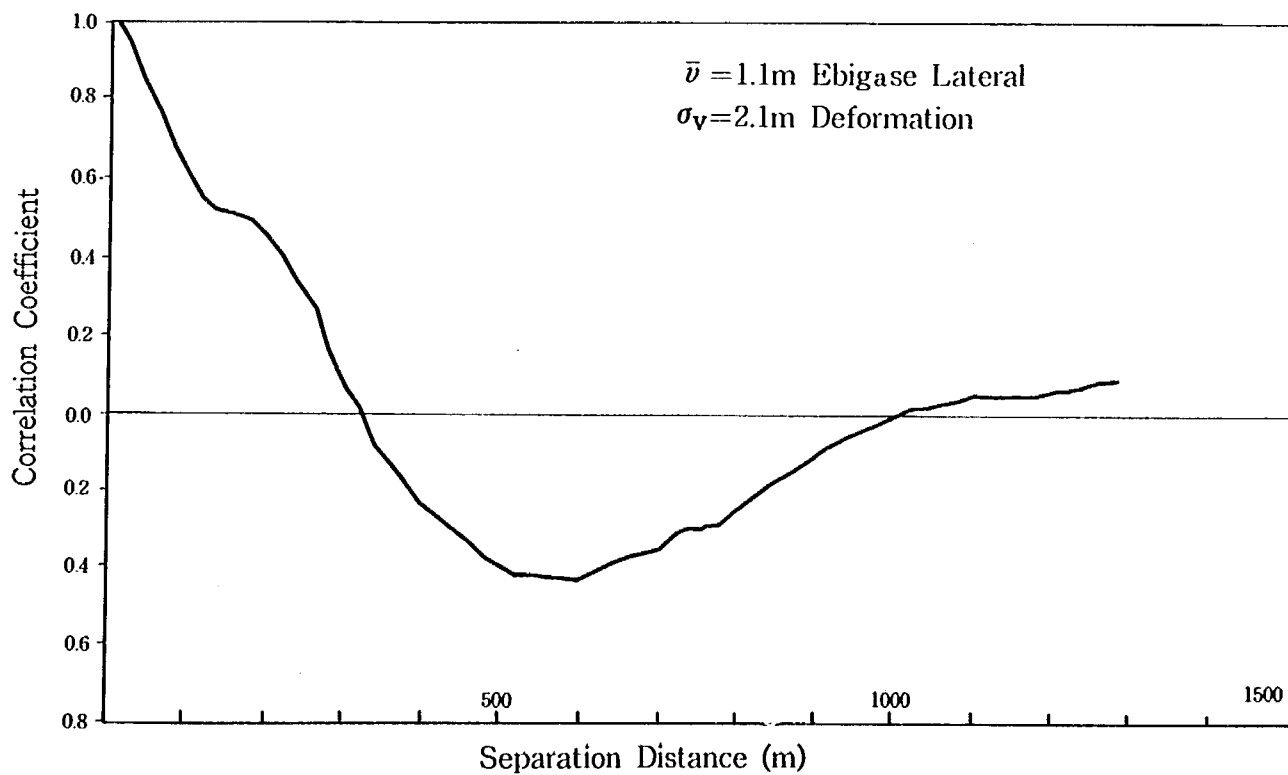
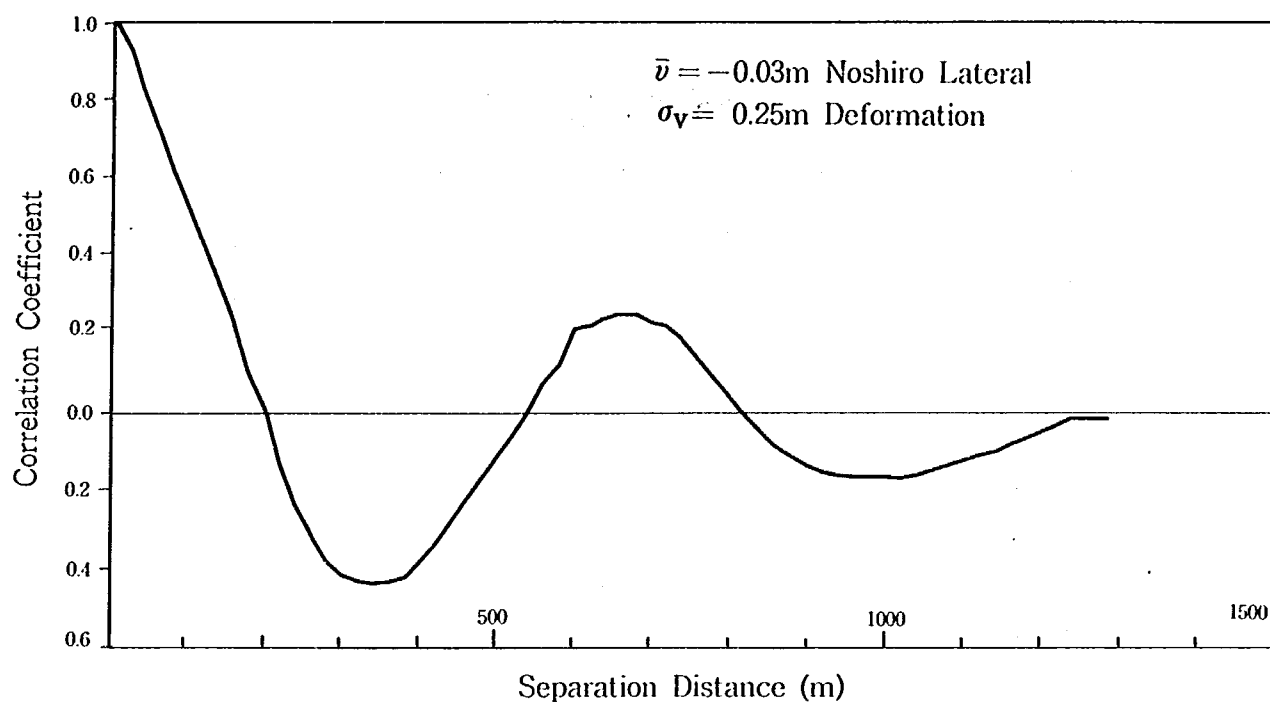


図 - 4 海老ヶ瀬地区の水平変動の空間相関関数



図－5 能代南バイパスの水平変動の空間相関関数

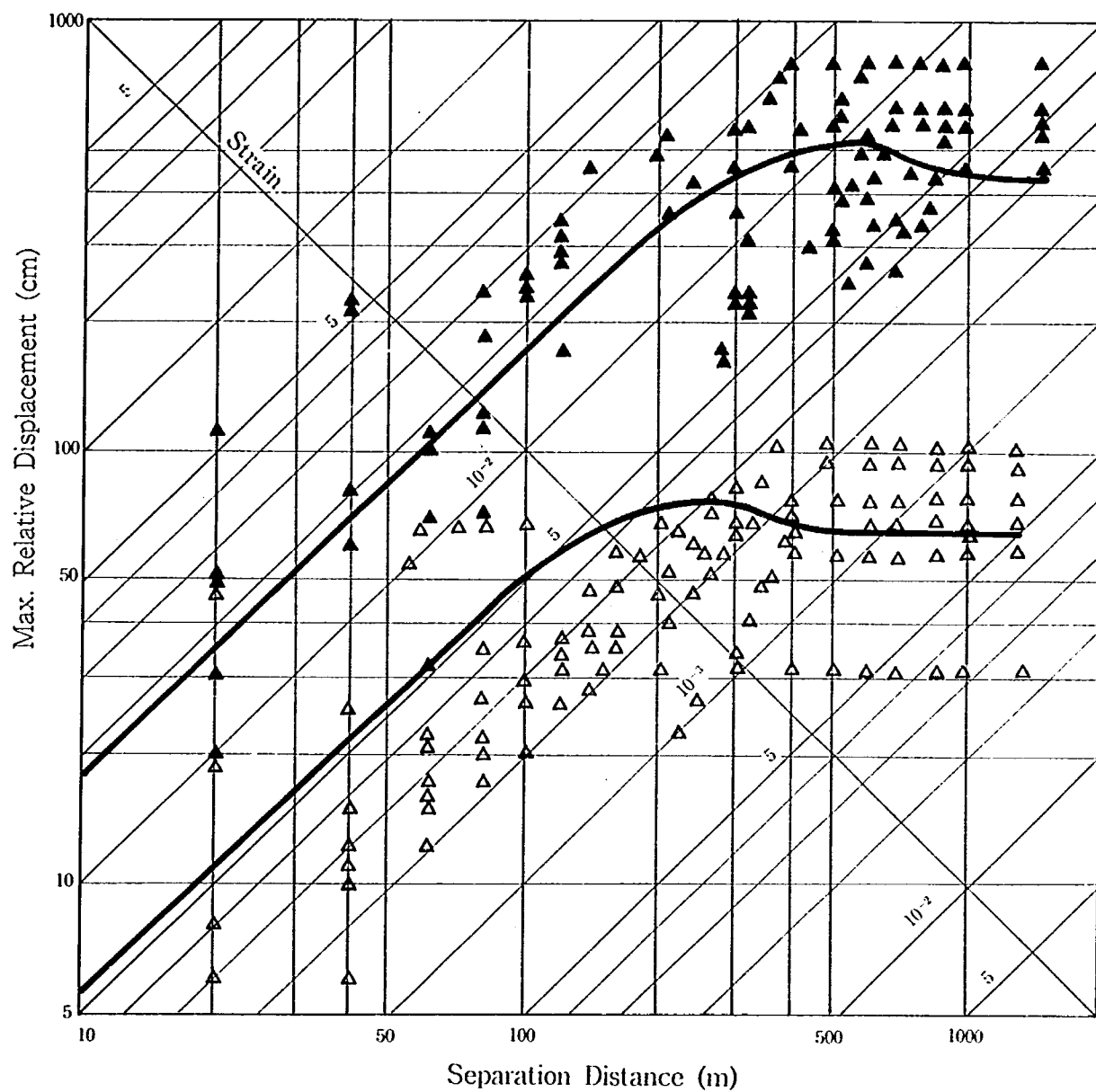


図-6 海老ヶ瀬地区，能代南バイパスの水平変動による地盤変形スペクトル

3. 地震計アレー観測記録による変位分布

SMART-1 によるアレー観測記録を用いて地盤の変位分布を検討する。SMART-1は台湾に設置されたリング状アレーで図-7に示すように、半径 200 m, 1 km, 2 km の各リングに 12 の測点を持つ。リング中心点の観測点を加えた合計 37 点の加速度地震計は同時観測ができるよう工夫されている。³⁾

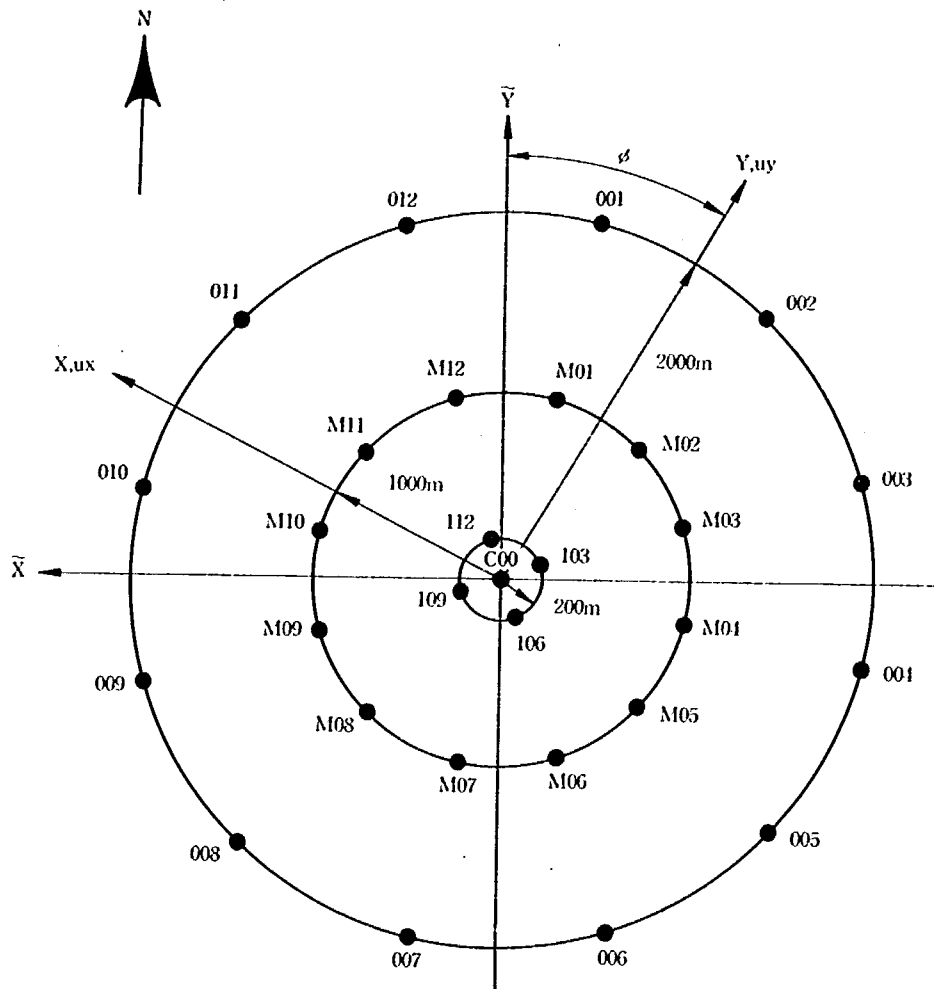


図-7 SMART-1 アレーとその座標系

解析の詳細は文献[4]に譲るが、1981年1月29日、 $M=6.9$ の地震(Event 5)による加速度記録の強震部分7秒間を対象に、まず、加速度記録を変位波に変換する。次に地震動の伝播方向等の推定を目的に、各地点の記録に対して座標軸を回転させ、 $u(t)$ と $v(t)$ の相互相関($E[u(t)v(t)]$)が零になるように座標回転角 ϕ を求める(図-7参照)。全地点での平均的な値として、 $\phi=77^\circ$ を解析に用いる。この座標軸の x, y 点の変位波形を $u(x, y, t)$ 、 $v(x, y, t)$ とすると次の4つの相対変位の成分が考えられる(図-8参照)。

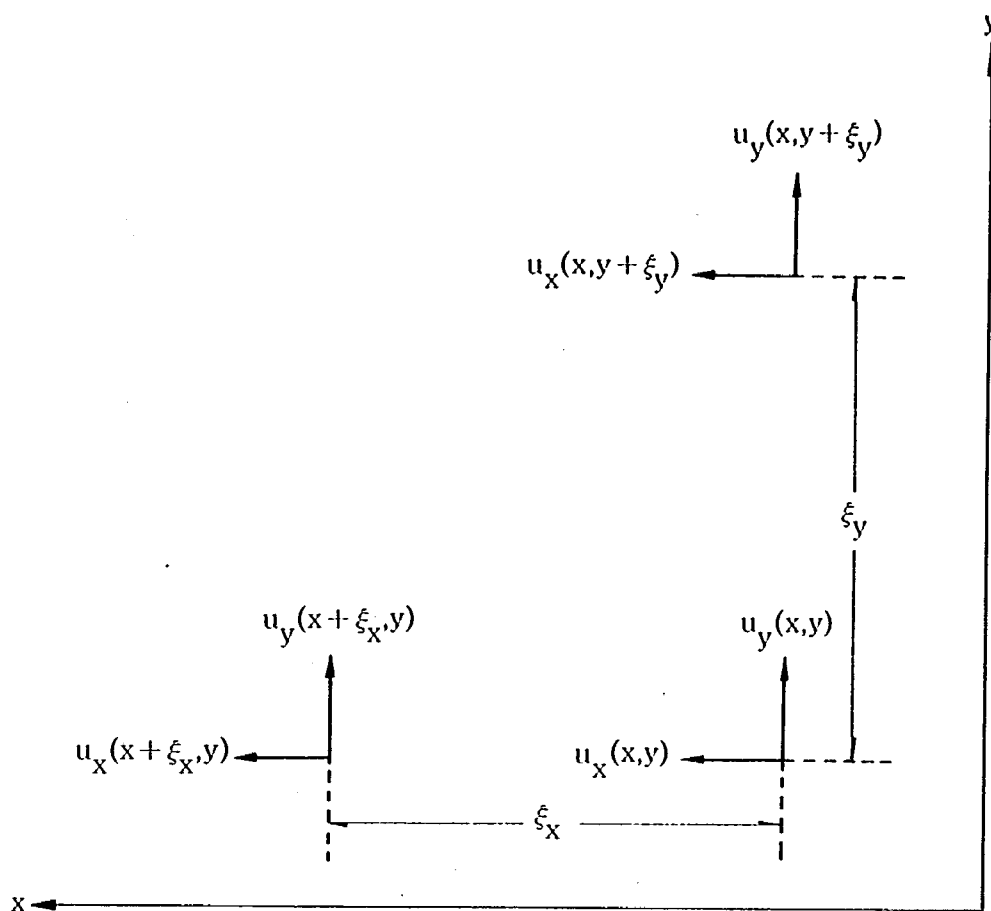


図-8 2次元平面の相対変位

$$d_{xx}(x, y, t \mid \xi_x) = u(x + \xi_x, y, t) - u(x, y, t)$$

$$d_{yy}(x, y, t \mid \xi_y) = v(x, y + \xi_y, t) - v(x, y, t)$$

..... (6)

$$d_{xy}(x, y, t \mid \xi_y) = u(x, y + \xi_y, t) - u(x, y, t)$$

$$d_{yx}(x, y, t \mid \xi_x) = v(x + \xi_x, y, t) - v(x, y, t)$$

上式の d_{xx} , d_{yy} はそれぞれ x 軸, y 軸における軸方向の相対変位, d_{xy} , d_{yx} はせん断形の相対変位と呼ぶことができよう。Event 5 の変位波形を使い, 式(6)の相対変位の最大値と2点間距離 ξ (ξ_x , ξ_y) の関係をプロットすると図-9 の変形スペクトルが得られた。なお, 図-9 の実線は第5章の確率過程理論による理論的な変形スペクトルである。地震計の設置数のためプロット数は少ないが, 2点間距離が長くなると最大相対変位は大きくなり約 1 km で d_{xx} や d_{yy} は一定の傾向を示す。 d_{xx} では約 3 cm の最大相対変位, 約 3×10^{-5} の軸歪が読みとれる。なお, この場合の x , y 軸方向の最大加速度の(平均, 標準偏差)はそれぞれ x 軸(118 gal, 34 gal), y 軸(103 gal, 26 gal)である。

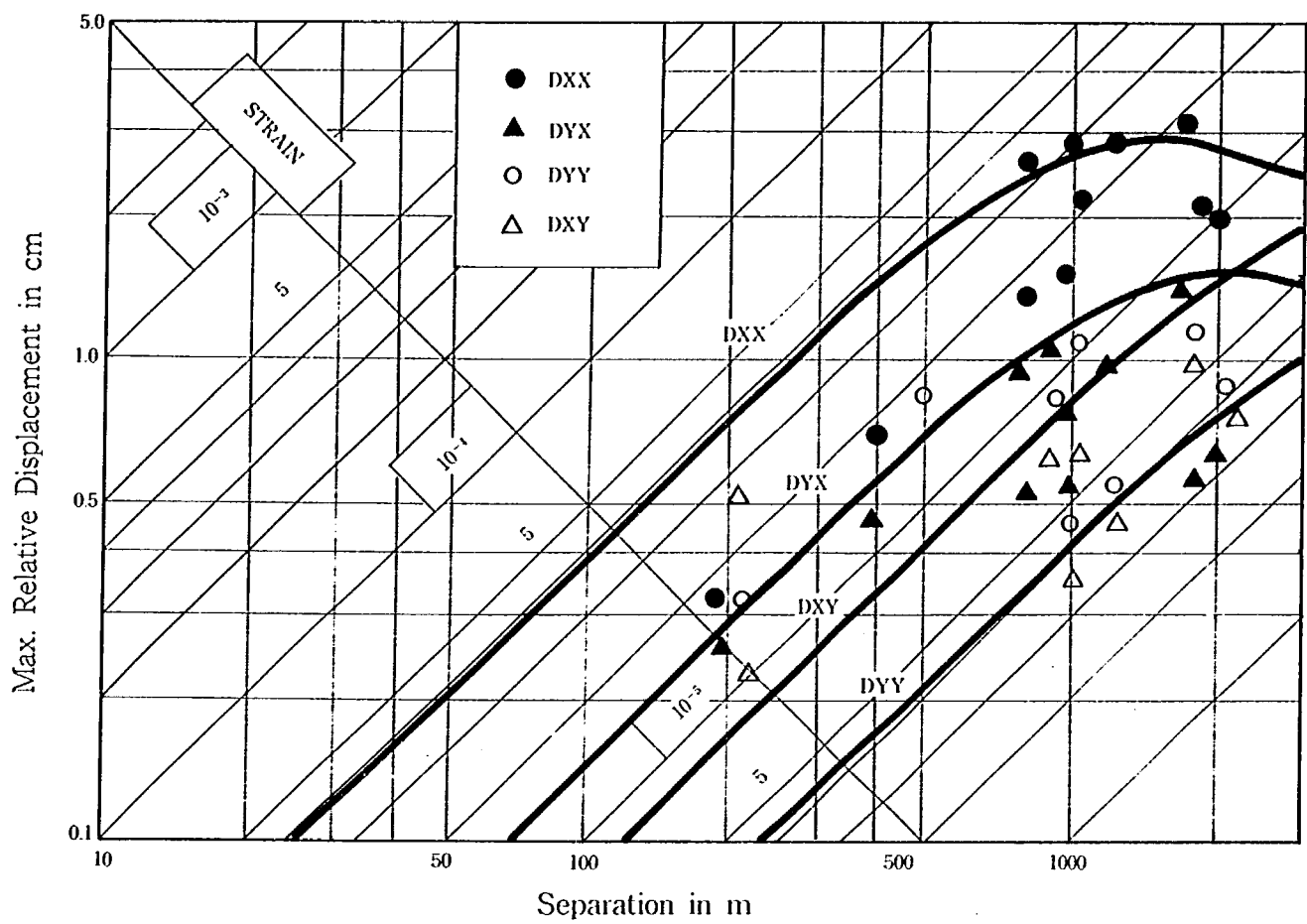


図 - 9 SMART-1 Event 5 による地盤変形スペクトル

4. 有限要素法を用いた数値計算モデルによる変位分布

地盤条件や地震波形などの要因と変位分布の特徴を検討するには、これらの要因を考慮した数学モデルによる検討が不可欠となろう。この目的のために有限要素法による数値計算モデルを開発中である。⁵⁾ モデルの特徴は

- (1) 平面歪要素
- (2) 伝達境界による境界条件の処理
- (3) 等価線形化法により土材料の非線形特性の考慮

と通常の2次元有限要素モデルであるが出力として、

- (4) 指定時刻における変位分布
- (5) 空間相関関数
- (6) 地盤応答変形スペクトル等

地盤の地震時空間的変位分布やその特性が求まるよう工夫されている。

このプログラムにより図-10に示すような分割で深さ70 m 水平距離1200 m の砂層と粘性土層からなる地盤の地震時変位分布を計算した。材料表を表-5に示す。表層はせん断波速度85 m/sと軟弱であるが下層は、500~800 m/sと硬い地層となっている。土の動的非線形特性は、図-11に示すような動的せん断弾性係数および減衰比のひずみ依存性カーブに適合するせん断弾性係数、減衰比をくり返し計算で求めることで考慮している。この地盤の基盤に図-12に示すような開北橋記録の地震波を最大加速度60 gal, 120 galとして10秒間入力した。解析ケースを表-6に示す。入力加速度60 galに対する線形地盤応答解析で得られた(ケース1)地表面A, B, C(図-10参照)の応答加速度波形を図-13に示す。3点は各々40 m 離れているが、応答波形は図のように異なる。最大加速度値も250 gal, 273 gal, 196 galとわずか40 m 離れることにより最大70 gal程度の差が生じている。

表-5 地盤モデルの材料定数

層番号 (1)	単位体積重量 g/cm ² (2)	ポアソン比 (3)	せん断弾性係数 kg/cm ² (4)	せん断波速度 m/S (5)
1 砂	1.80	0.48	133.0	85
2 砂	1.70	0.48	287.0	125
3 粘土	1.50	0.48	612.0	200
4 砂礫	1.90	0.48	2050.0	325
5 砂岩	2.10	0.48	5360.0	500
6 砂岩	2.20	0.48	14367.0	800

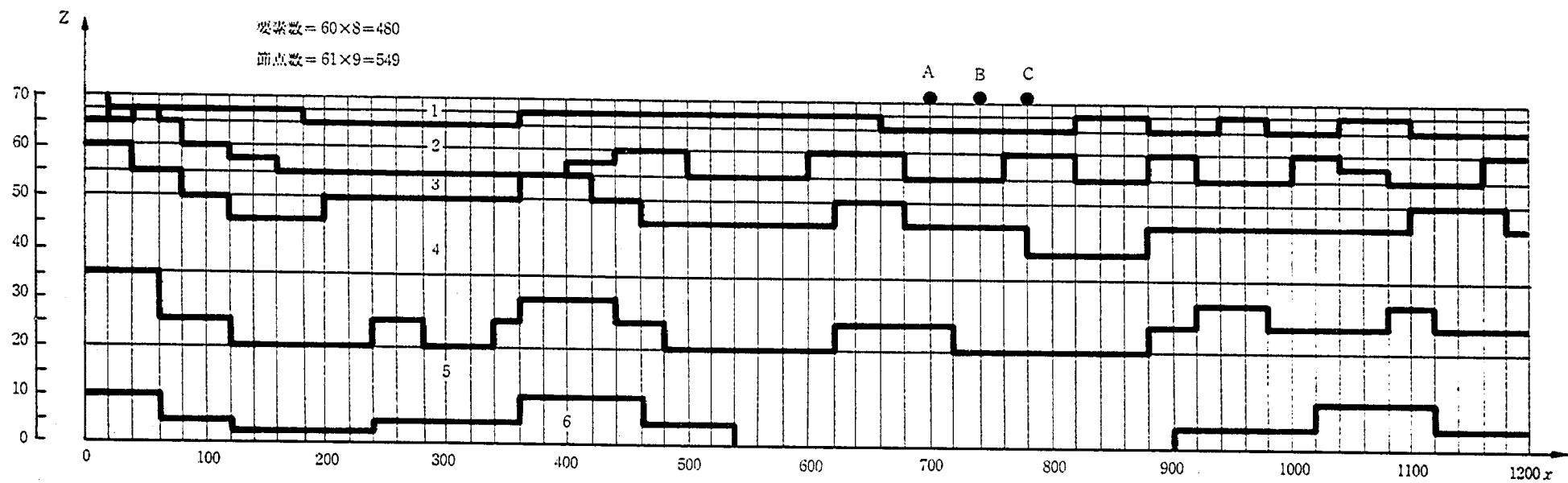


図 - 10 解析に用いた地盤モデル

表-6 解析ケース

入力最大加速度 (1)	線形解析 (2)	非線形解析 (3)
60 gal	ケース 1	ケース 2
120 gal		ケース 3

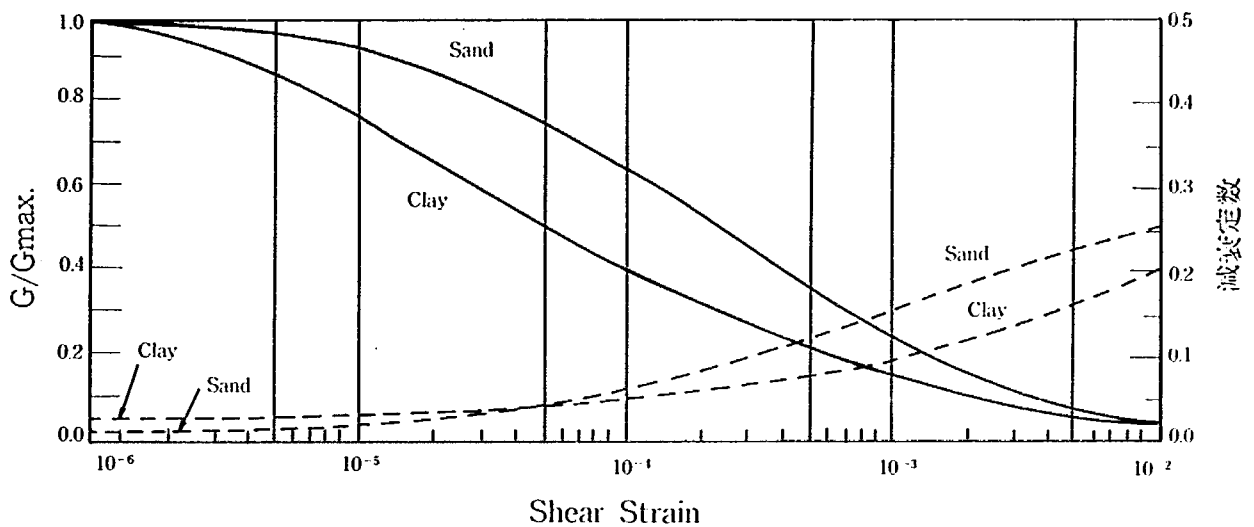


図-11 材料定数のひずみ依存曲線

時刻 $t = 3.5$ 秒から 0.5 秒間隔で各時刻における地表面の変位分布を図示したものが図-14, 15, 16 である。横軸は地表面左端から右端への距離を表す(図-10 参照)。各図はそれぞれケース 1, 2, 3 に対応しケース番号の順に線形, 弱非線形, 中非線形と非線形性が強くなる。各図において, 地表の変位分布の様子は時刻によって違うが, 入力加速度が大きくなって地盤応答の非線形性が強くなると, 変位分布の様子は周期性が強く現われてくる。このことは, 式(3)により求めた変位分布の空間相関関数からも認められ, 120 gal 入力のケース 3 では, 約 180 m の周期が空間相関関数に現われている(図-17, 18, 19)。

図-3 で示したように各時刻の変位分布を使って最大相対変位と 2 点間距離の関係をプロットすると, 図-20 の地盤変形スペクトルが得られた。ケース 1 と 2 の比較では, 線形解析のケース 1 の方がやや小さ目の値を示すが, 最大相対変位, 1~2 cm, 最大地盤軸歪, $4 \times 10^{-4} \sim 2 \times 10^{-5}$ 程度とほぼ同じ値が得られている。ケース 3 の 120 gal 入力では, 最大相対変位約 3~5 cm, 最大軸歪約 $9 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-4}$ と大きな地盤変形が認められる。地表の最大加速度は場所によって違うが, ケース 3 における解析では図-20 に掲載するように平均値は 167 gal, 最大値は 311 gal であった。

この解析から地震時地盤の変形分布に関して, 次のような考察ができよう。

地盤の変位分布の原因としては大別すると、

(1)地震波の伝播による位相差から生ずる変位分布と、(2)各点の地盤応答の違いに起因する変位分布、の2つが考えられる。この解析のように、図-10に示す程度の不整形地盤に鉛直下方から地震波を入力した場合、地盤材料の非線形性が強くなるにつれて、地表面に沿う地盤の変位分布は周期的になり、また、軸歪 1×10^{-3} 程度の地盤歪が生じた。このことは、上記要因(2)により変位分布の周期性や大きな地盤歪の生じることを意味する。したがって、地中構造物の破壊が問題となるような変位分布に関しては、要因(2)が重要であると言えようが、この点に関しては、今後さらに研究してゆかなければならない。なお、この解析で使用した数値計算モデルでは、要因(2)の他に要因(1)の効果は基盤各点で入射する地震波に位相差を与えて評価できるので、モデルの結果と実測記録の整合性等を含めた解析例の蓄積により要因(1)と(2)の地盤変位分布に及ぼす影響等が解析的に評価できよう。ここで示したような有限要素法を使った数値計算モデルとその整理法は、地震時の地盤の空間的変位分布の問題解決に1つの有効な方法を与えるものと思われる。

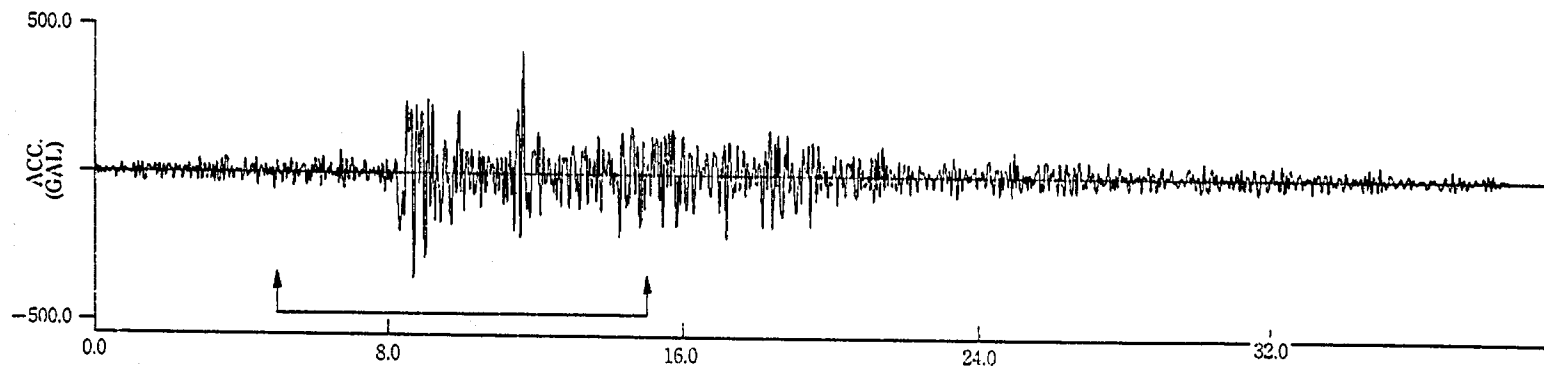


図-12 入力に用いた開北橋記録

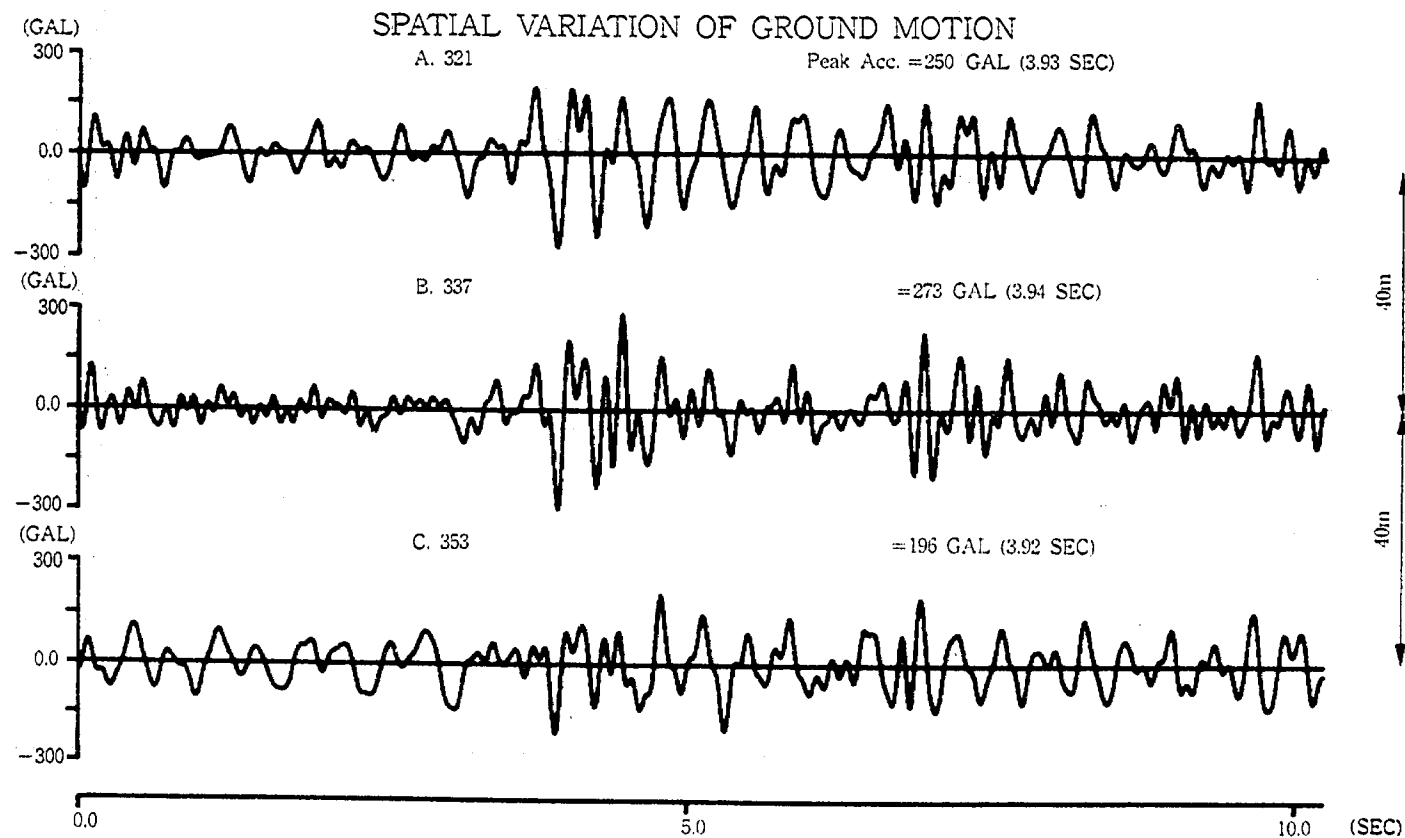


図-13 線形地盤応答解析で得られた地表面A, B, C点の加速度波形 (60 gal入力)

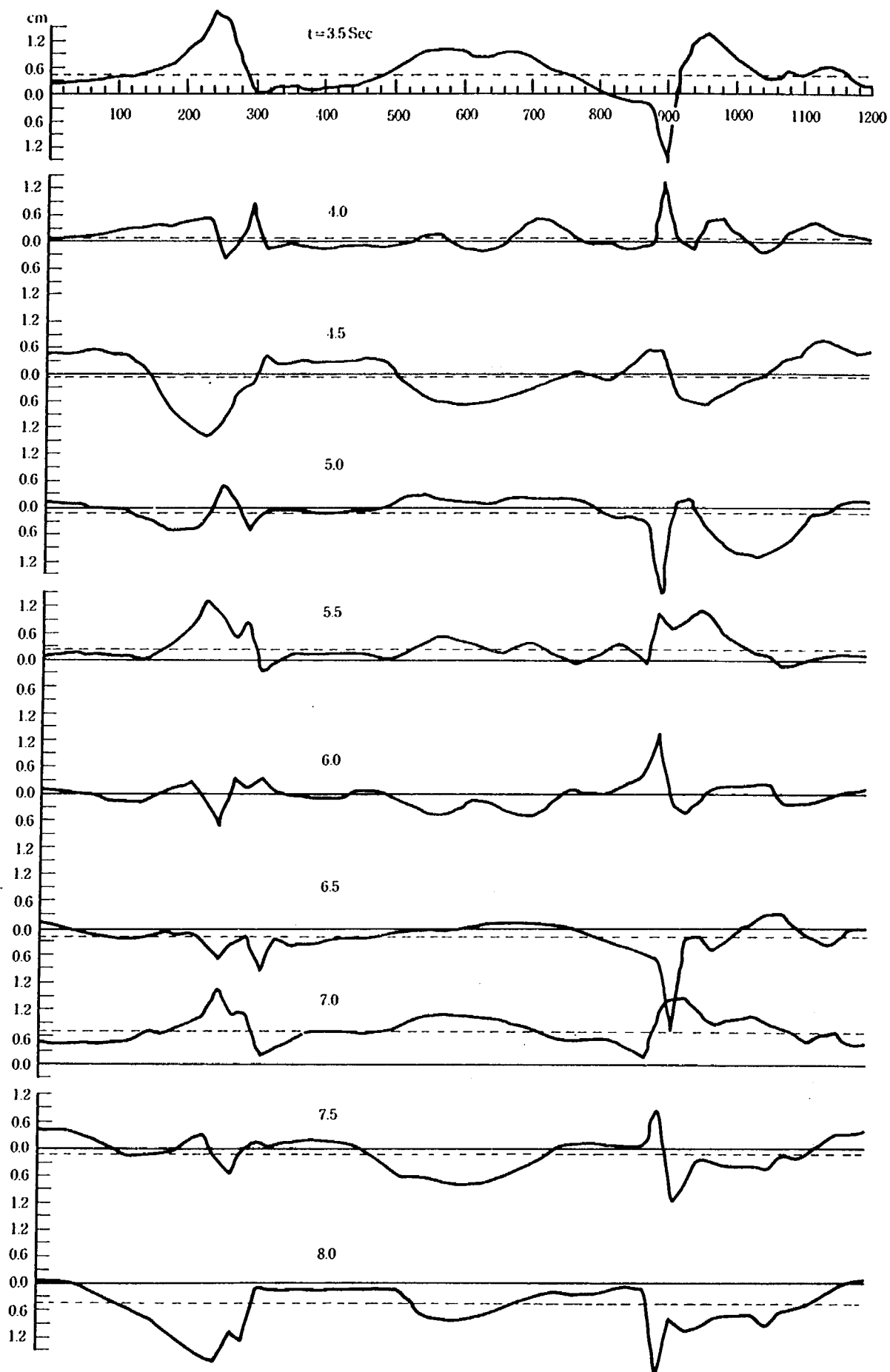


図-14 線形応答解析による各時刻の地表変位分布(ケース1)

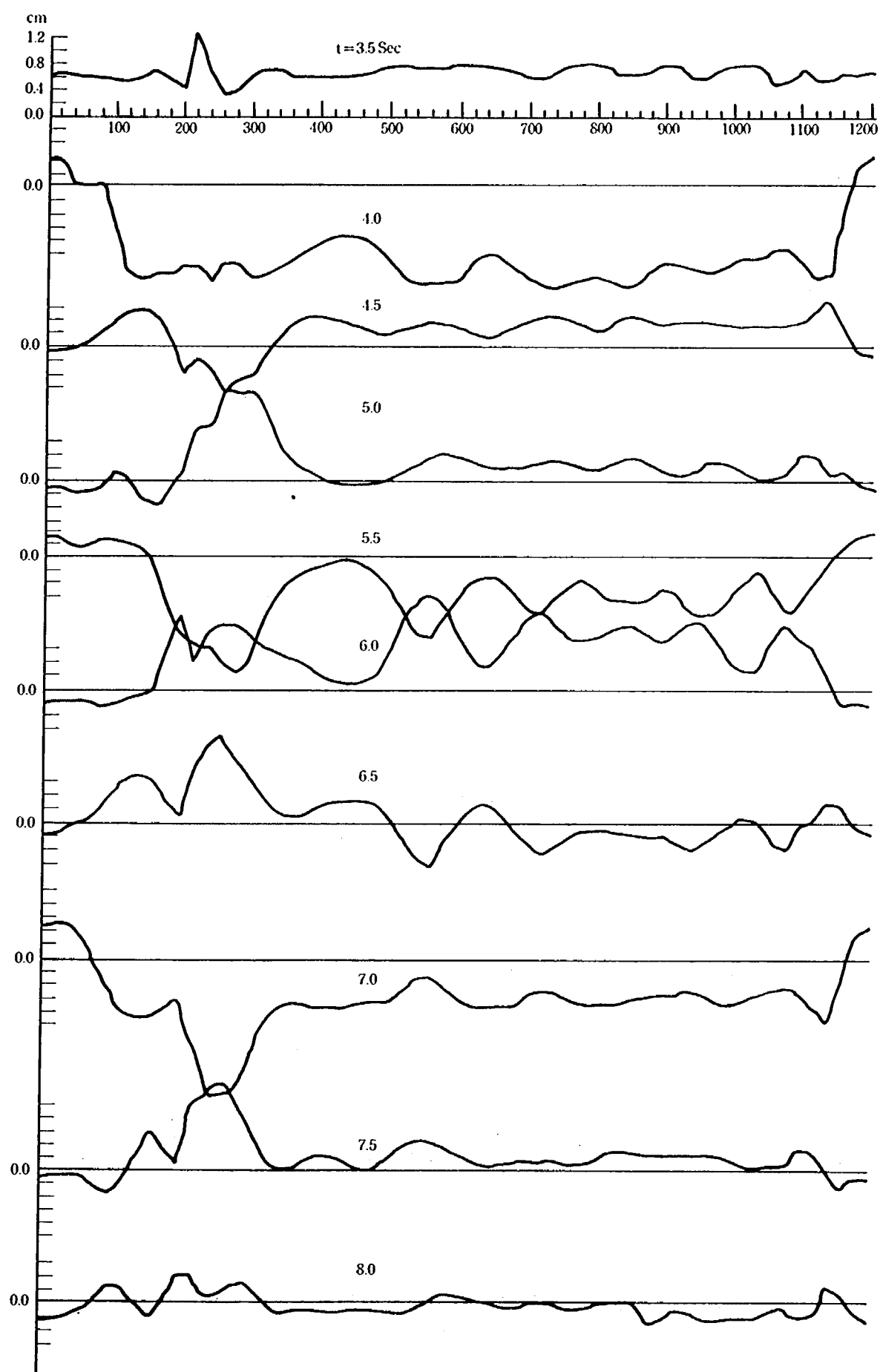


図 - 15 非線形応答解析による各時刻の地表変位分布 (ケース 2)

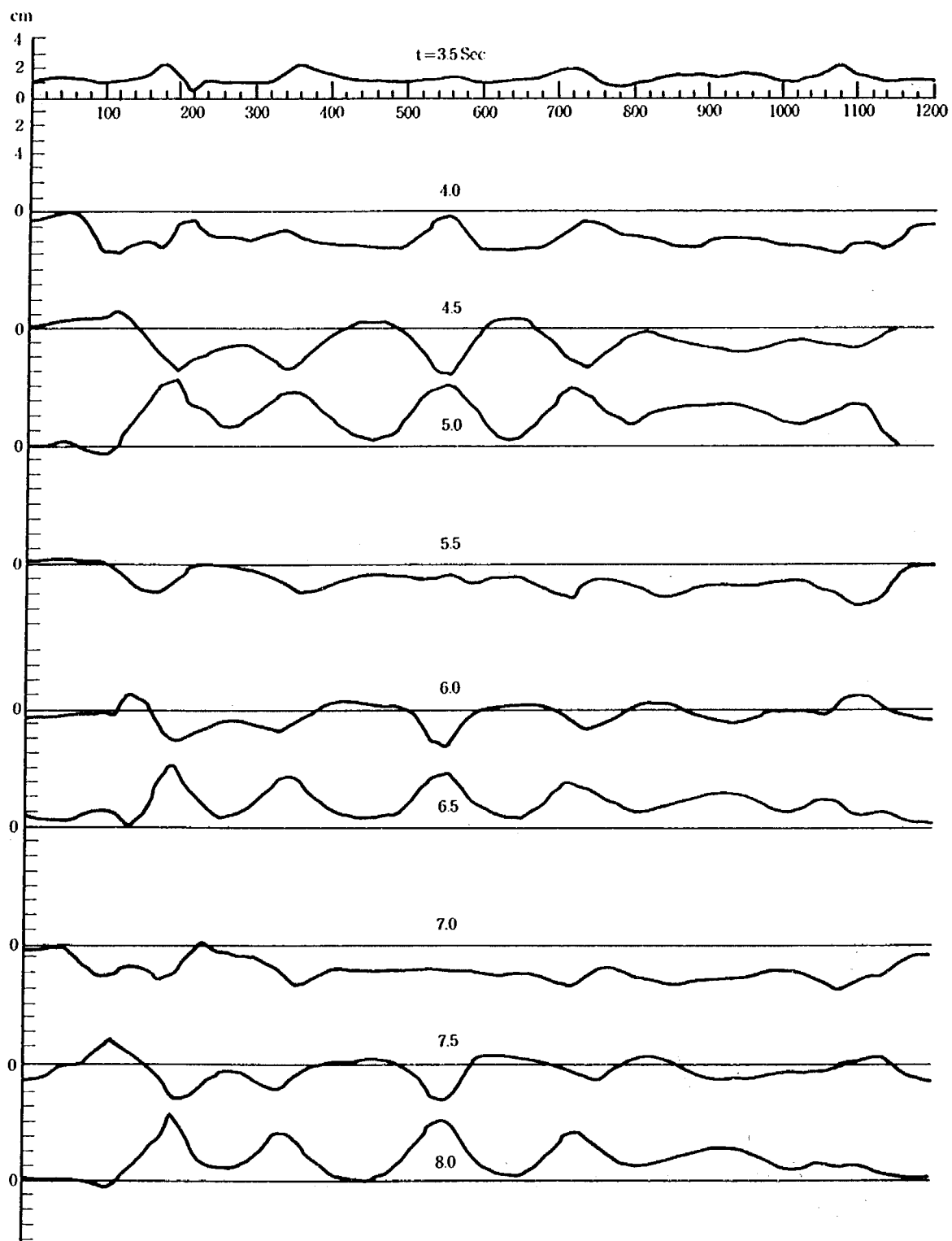


図-16 非線形応答解析による各時刻の地表変位分布(ケース3)

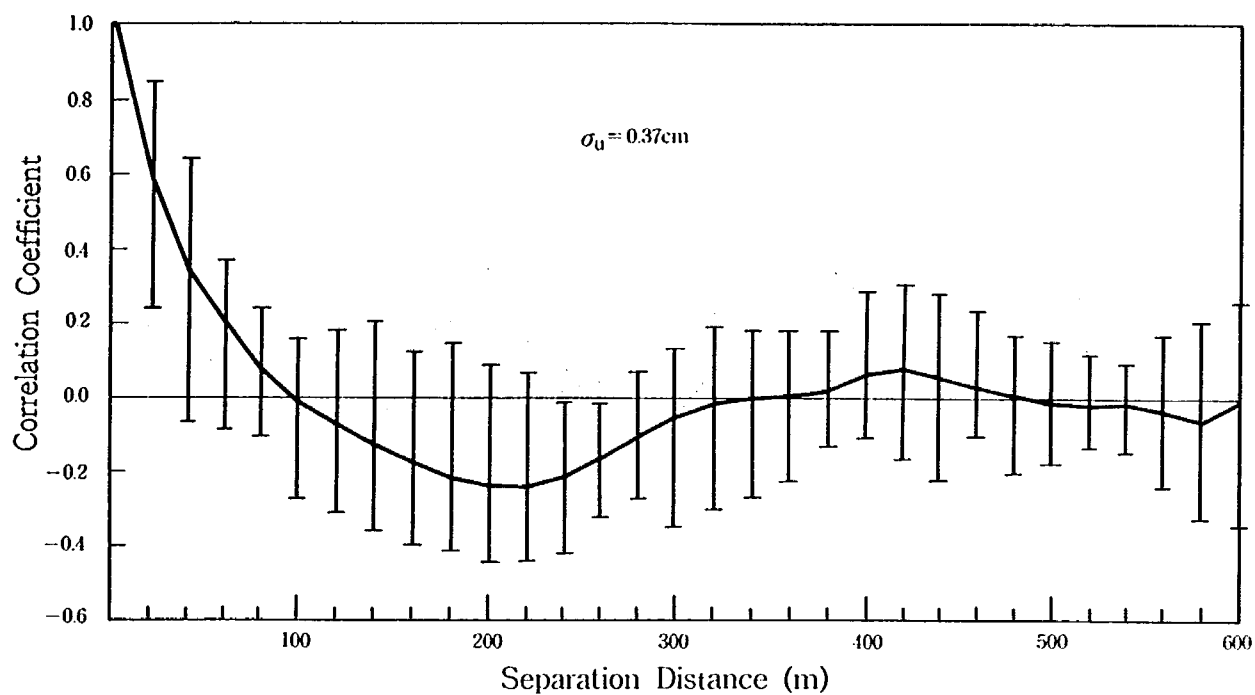


図-17 線形応答解析による変位分布の空間相関関数(ケース1)

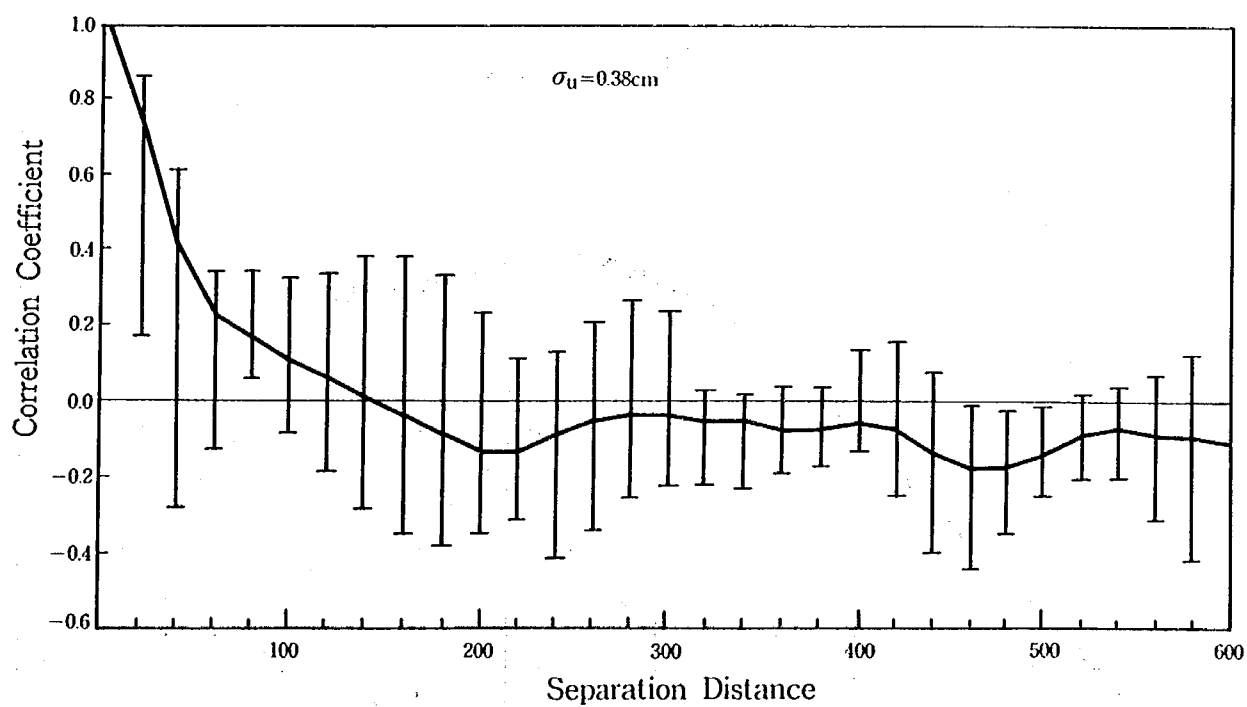


図-18 非線形応答解析による変位分布の空間相関関数(ケース2)

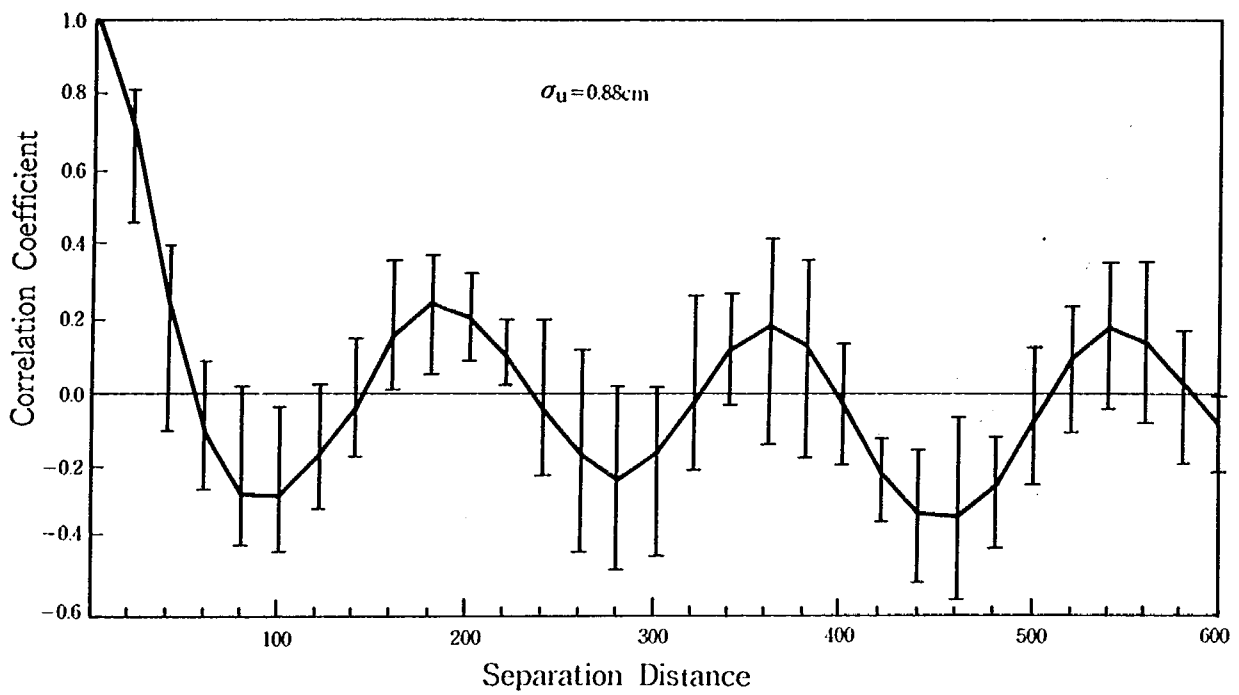


図-19 非線形応答解析による変位分布の空間相関関数（ケース3）

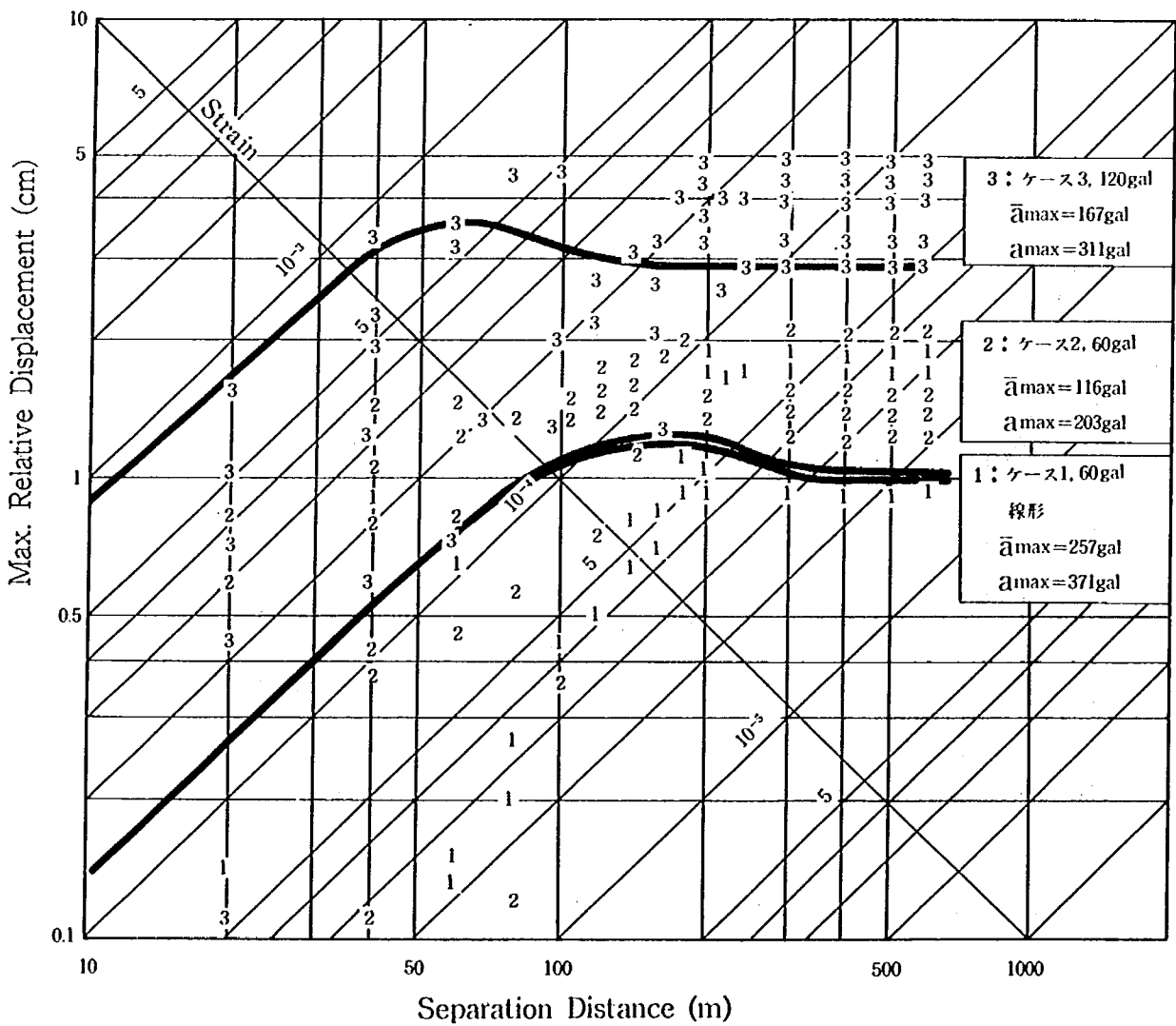


図-20 地盤応答解析による変形スペクトル

5. 確率過程理論による整理と解釈

5.1 空間相関関数

前章までに示した地震動の空間的変動の理論的な整理を目的に、確率過程理論による解釈と整理を行う。⁶⁾

地面上に固定した直角座標系で x, y 軸方向の地震動変位を $U_x(x, y, t), U_y(x, y, t)$ とする。ここに、 x, y は空間座標位置、 t は時間を表わす。また、理論的展開を簡単にするために、地震動は平均値零の均質一定常ガウス確率過程と仮定する。

このような地震動に対する相関関数は定義により、次のように表現できる。

$$\left. \begin{aligned} Q_{ui}(\underline{\xi}, \tau) &= Q_{ui}(\xi_x, \xi_y, \tau) \\ &= E[U_i(x, y, t) U_i(x + \xi_x, y + \xi_y, t + \tau)] \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

($i = x, y$)

ここに $E[U_i]$ は確率変数 U_i の期待値を表わす。変数 ξ_x, ξ_y は、それぞれ x, y 軸方向の 2 地点間距離を、変数 τ は時間ずれを表わす。

Wiener-Khintchine の関係により、スペクトル密度関数は、

$$\left. \begin{aligned} P_{ui}(\underline{\xi}, \omega) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} Q_{ui}(\underline{\xi}, \tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \\ Q_{ui}(\underline{\xi}, \tau) &= \int_{-\infty}^{\infty} P_{ui}(\underline{\xi}, \omega) e^{i\omega\tau} d\omega \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

ここに ω は (円) 振動数を表わす。

もし、2 地点間距離が零であれば、上式のスペクトル密度関数は、1 地点における両側スペクトル密度関数となる。すなわち、

$$P_{ui}(0, \omega) = S_{ui}(\omega) \dots\dots\dots (9)$$

この両側スペクトル密度関数で式(8)のスペクトル密度関数を規準化して、振動数依存空間相関関数が定義できる。

$$r_{ui}^{\omega}(\underline{\xi}) = \frac{P_{ui}(\underline{\xi}, \omega)}{S_{ui}(\omega)} \dots\dots\dots (10)$$

また、時刻 $t = t_0$ における変位の空間的分布模様に対する空間相関関数は式(8)で $\tau = 0$ とし得られる。さらに式(10)を使うと空間相関関数は、

$$R_{ui}(\underline{\xi}) = Q_{ui}(\underline{\xi}, 0) = \int_{-\infty}^{\infty} r_{ui}^{\omega}(\underline{\xi}) S_{ui}(\omega) d\omega \dots\dots\dots (11)$$

式(11)によると、空間相関関数は、1 地点における時刻歴の両側スペクトル密度関数を重み関数として、振動数依存空間相関関数を積分したものとなっている。したがって、式(10)で定義された振動数依存空間相関関数は、空間-時間関数 $U_i(x, y, t)$ の振動数成分毎の空間相関の程度を表わす尺度と解釈できよう。もし、空間-時間関数にエルゴート性が仮定できれば、空間

相関関数は、サンプル関数の時間軸にそった平均値として与えることができる。

$$R_{ui}(\underline{\xi}) = \frac{\ell_{im}}{T_u \rightarrow \infty} \frac{1}{T_u} \int_0^{T_u} u_i(x, y, t) u_i(x + \xi_x, y + \xi_y, t) dt \dots\dots\dots(12)$$

ここに T_u は時間間隔で、英小文字 u_i は確率過程 U_i のサンプル関数を意味する。

5.2 最大相対変位

空間-時間関数 $U_i(x, y, t)$ は平均値零の均質-一定常ガウス確率過程と仮定しているため、式(6)で与えられる相対変位 $D_{ij}(x, y, t | \xi_j)$, ($i=x, y$) もまた、平均値零の均質-一定常ガウス確率過程となる。したがって、相対変位の最大値は確率的に予測しなければならない。工学的には、相対変位の絶対値の極値(極小値と極大値)が重要であるが、時刻 $t=t_0$ におけるこの極値の平均値は近似的に次式により計算することができる。⁸⁾

$$|\overline{d_{ij}}|_{\max}(\xi_j) / \sigma_{Dij} = \begin{cases} \sqrt{2.6 \ln [2 \sqrt{2\pi} a_0 / A_0]} & a_0 \geq 0.43 A_0 \\ \sqrt{2} & \text{その他} \end{cases} \dots\dots\dots(13)$$

ここに a_0 は考えている $x-y$ 平面の面積で、 A_0 は、

$$A_0 = \frac{(2\pi)^2 \sigma_{Dij}^2}{\sigma_{Dijx}^2 \sigma_{Dijy}^2} \dots\dots\dots(14)$$

σ_{Dij}^2 , σ_{Dijk}^2 は相対変位 D_{ij} の分散および相対変位の k 軸方向の傾きの分散で、相対変位の空間相関関数を $R_{Dij}(\eta_x, \eta_y, | \xi_j)$ とすると、

$$\begin{aligned} \sigma_{Dij}^2 &= R_{Dij}(0, 0 | \xi_j) \\ \sigma_{Dijk}^2 &= - \left[\frac{\partial^2 R_{Dij}(\underline{\eta} / \xi_j)}{\partial \eta_k^2} \right]_{\underline{\eta}=0} \end{aligned} \dots\dots\dots(15)$$

ここに、 $\underline{\eta} = (\eta_x, \eta_y)$ は x, y 軸にそう 2 点間距離で、相対変位の空間相関関数は、式(11)または(12)で与えられる変位の空間相関関数 $R_{ui}(\underline{\xi})$ から次式により計算することができる。

$$\begin{aligned} R_{Dij}(\underline{\eta} | \xi_j) &= 2 R_{ui}(\underline{\eta}) - R_{ui}(\eta_x + \xi_j, \eta_y + \xi_j) \\ &\quad - R_{ui}(\eta_x - \xi_j, \eta_y - \xi_j) \end{aligned} \dots\dots\dots(16)$$

$$\eta_i + \xi_j = \begin{cases} \eta_i + \xi_i, & i=j \\ \eta_i & i \neq j \end{cases}$$

したがって、相対変位の極値の平均値 $|\overline{d_{ij}}|_{\max}$ は、考える領域の面積 a_0 と変位場の空間

相関関数 $R_u(\xi)$ が与えられると式(13)~(16)によって計算することができる。

空間軸が1次元の場合には上式よりも簡単になり、相対変位は、

$$D(x, t | \xi) = U(x + \xi, t) - U(x, t) \dots\dots\dots (17)$$

時間 $t = t_0$ におけるこの相対変位の極値の平均値は次式で与えられる。⁶⁾

$$|\bar{d}|_{max} / \sigma_D = \begin{cases} \sqrt{2 \ln(2 S_0 / L_D)} & S_0 \geq 1.36 L_D \\ \sqrt{2} & \text{その他} \end{cases} \dots\dots\dots (18)$$

ここに、 S_0 は考える領域の長さで、 L_D は、

$$L_D = 2\pi \frac{\sigma_D}{\sigma_D^2} \dots\dots\dots (19)$$

σ_D^2 、 σ_D^{*2} は、式(15)と同様に相対変位 D の分散および相対変位の x 軸方向の傾きの分散で相対変位の空間相関関数を $R_D(\eta | \xi)$ とすると、

$$\begin{aligned} \sigma_D^2 &= R_D(0 | \xi) \\ \sigma_D^{*2} &= - \left[\frac{d^2 R_D(\eta | \xi)}{d\eta^2} \right]_{\eta=0} \end{aligned} \dots\dots\dots (20)$$

ここに、

$$R_D(\eta | \xi) = 2R(\eta) - R(\eta + \xi) - R(\eta - \xi) \dots\dots\dots (21)$$

したがって、最大相対変位の極値の平均値を求めるには、変位の空間相関関数を推定すればよいことがわかる。

5.3 地盤変動データの解析例

2章~4章で示した地震時の地盤の変位分布資料を確率過程理論による理論式によって整理し、データから直接求めた地盤形スペクトルと比較してみる。

理論式により相対変位の極値を計算するためには、変位の空間相関関数をモデル化しなければならないが、式の誘導からわかるように、空間相関関数は微分可能で歪の極値は存在するので、すくなくとも4回の微係数が存在しなければならない。図-4、5および図-17~19のデータの空間相関の形状や式の簡便性も考慮して一次元の場合には、

$$R(\xi) = \sigma_u^2 [1 - 2(b\xi)^2] e^{-(b\xi)^2} \dots\dots\dots (22)$$

SMART-1の地震計アレー観測記録の解析では式(22)により求めた空間相関の形状を考慮して(図-23、24参照)、

$$R_{ui}(\underline{\xi}) = \sigma_{ui}^2 [1 - 2(b_{ix} \xi_x)^2] e^{-(\underline{\xi}^T \underline{b} \underline{\xi})} \dots\dots\dots (23)$$

$$\underline{\xi} = \{\xi_x, \xi_y\}^T, \quad \underline{b} = \begin{bmatrix} b_{ix}^2 & 0 \\ 0 & b_{iy}^2 \end{bmatrix}$$

$i = x, y$

式(22)と式(23)による空間相関関数は図-21, 22に示す形状で, パラメータ b , $\underline{b}$ によって, 相関の程度が変わる。前章で計算した空間相関関数との比較によりパラメータを決める。空間相関関数が零を横ぎる距離を1つの目安にパラメータを決めたものを表-7に示す。

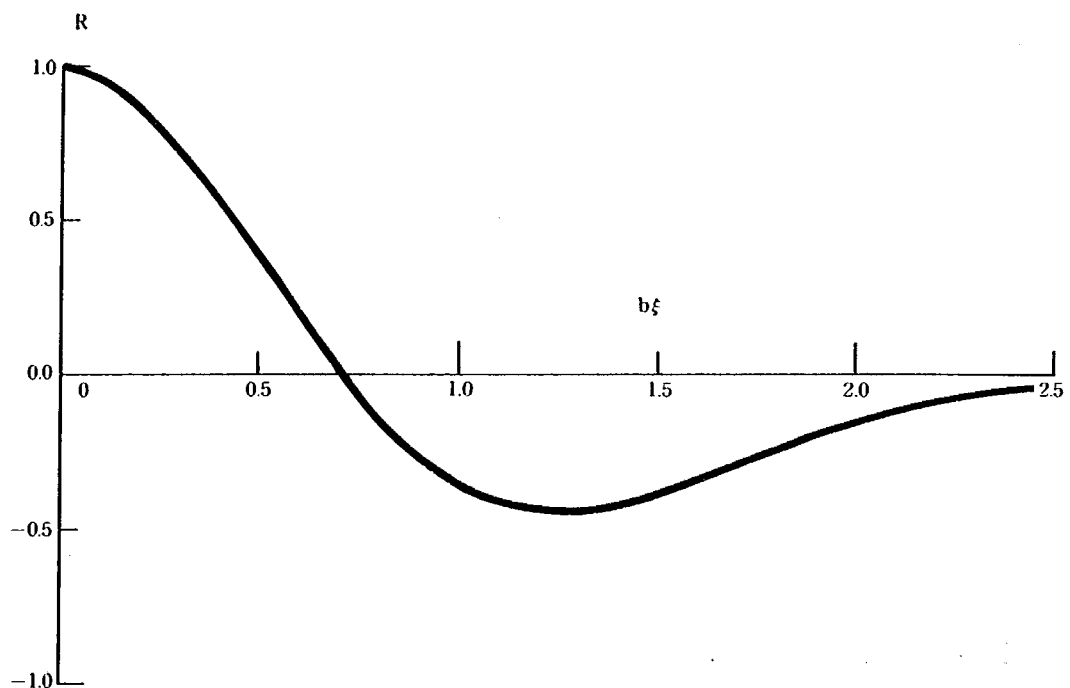


図-21 1次元問題の空間相関関数

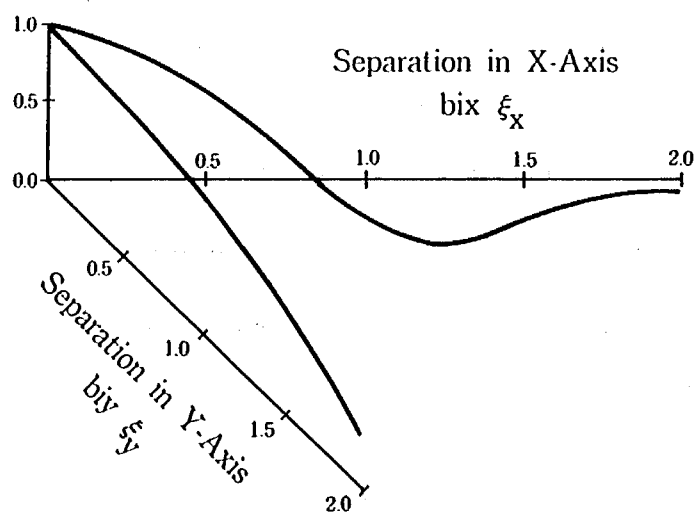


図-22 2次元アレー記録の空間相関関数

表-7 データとの比較から求めた空間相関関数のパラメータ値

データ名 (1)	図番号 (2)	標準偏差 σ (cm) (3)	パラメータ $b, \underline{b}$ ($m^{-1} \times 10^{-3}$) (4)
海老ヶ瀬地区	4	210	2.21
能代南バイパス	5	25	4.71
SMART-1 (Event 5)	23 24	$\sigma_u = 1.24$ $\sigma_v = 0.64$	$b_{xx} = 0.884, b_{xy} = 0.332$ $b_{yx} = 0.643, b_{yy} = 0.332$
FEMモデルケース 1	17	0.37	7.07
ケース 2	18	0.38	7.07
ケース 3	19	0.88	17.18

なお、図-23、24に地震計アレーによる実測データによるものと、表-7の値を式(23)に代入したモデル化によるものを比較するが、よい一致が認められる。

表-7の値を式(22)と(23)に代入して空間相関関数を決めて最終的に、式(13)、(18)により最大相対変位の平均値と2地点間距離の関係を図示したものが、図-6、9、20の実線である。大局的にはこの理論曲線によって最大相対変位の特性が表現できていると言えよう。

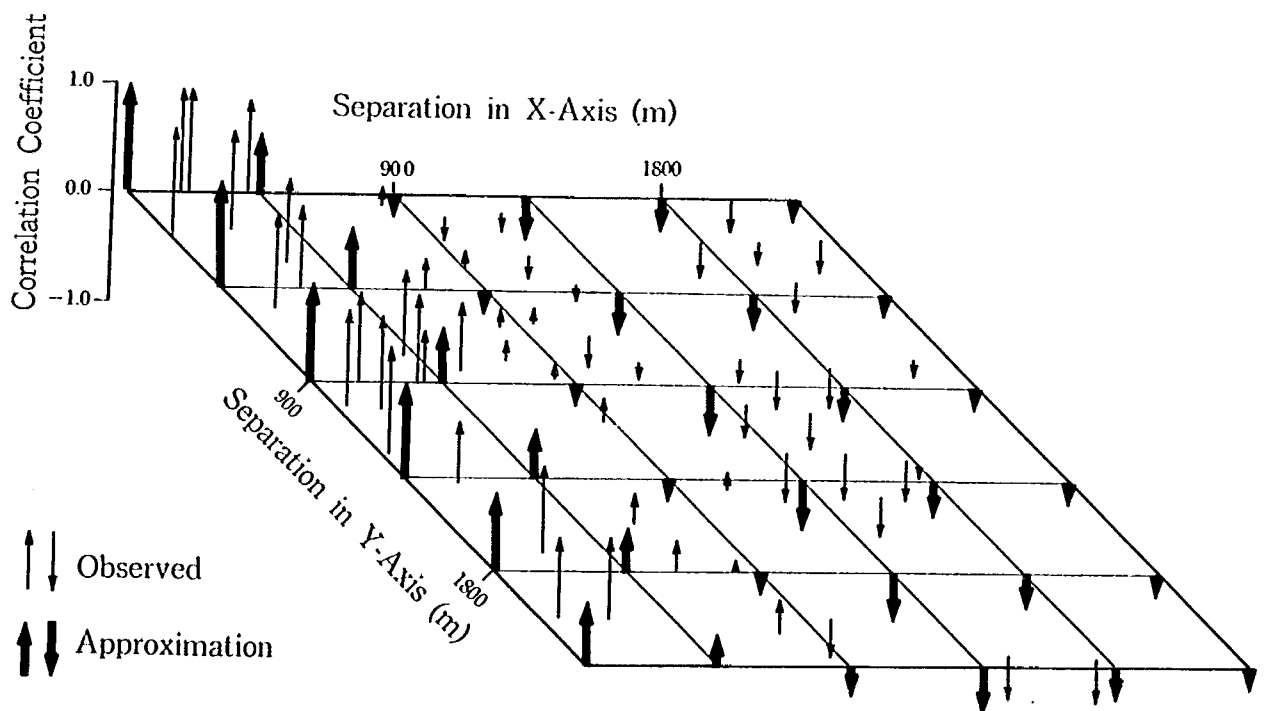


図-23 SMART-1 Event 5による変位 U_x の空間相関関数 R_{u_x}

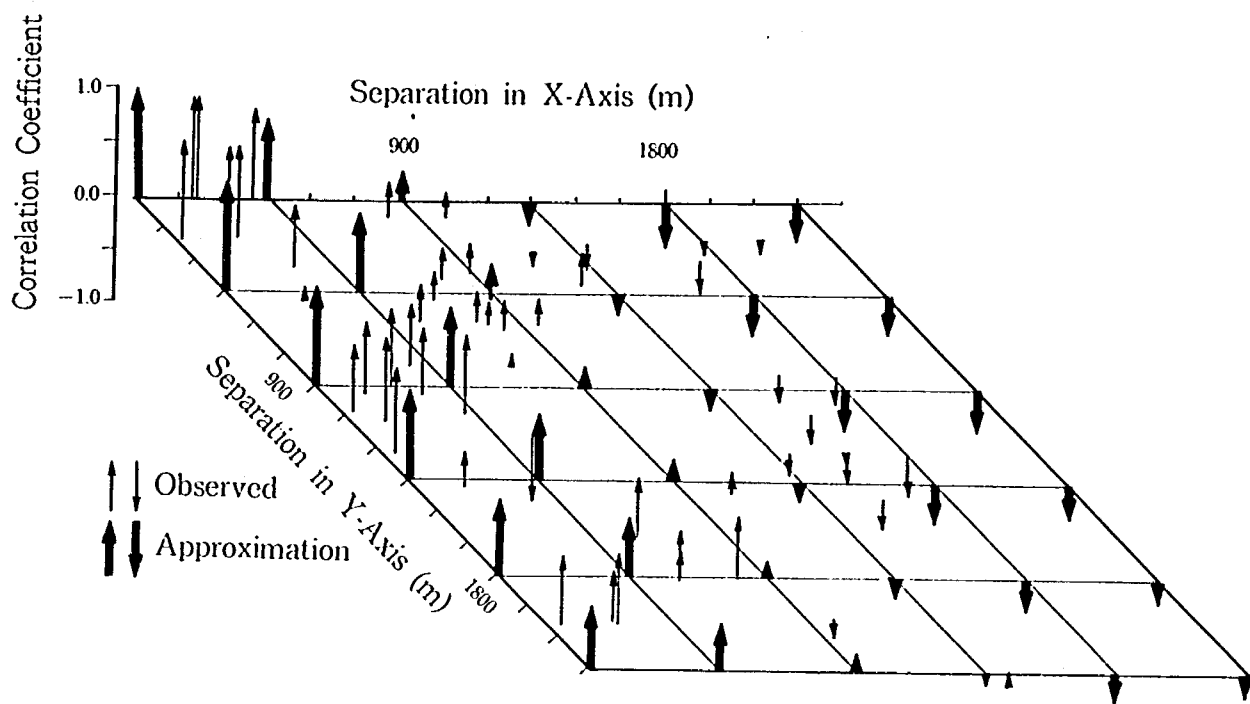


図 - 24 SMART-1 Event 5 による変位 U_y の空間相関関数 R_{uy}

6. 埋設管路の震害統計資料から推定した地盤の変位分布

水道管路やガス管のように径の小さい埋設管路の地震時の応力は、管の軸応力が支配的で、管路に働く慣性力は無視できる等の地震時挙動が明らかにされている。他方、これらの管路の震害統計資料が単位 km 当りの管路の破壊箇所数と地盤加速度の関係として得られている。このようなことから、図-25 に示す考えから、入力である地震時の地盤の変位分布を推定することを考える。

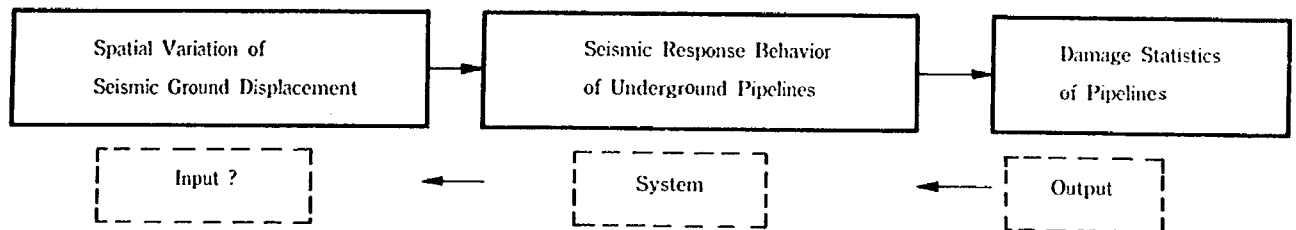


図-25 震害資料による変位分布の推定の考え方

解析の詳細は文献〔6〕に譲ってここでは仮定と結果のみ示す。モデルの仮定は、

- (1) 式(2)の空間相関関数を仮定する。
- (2) 埋設管は地盤ばねで支持された直管とする。
- (3) 埋設管の破壊は軸歪 $\epsilon_a = 0.8 \sim 2.0 \times 10^{-3}$ とする。

図-26 は $\epsilon_a = 10^{-3}$ として卓越周期の違う 4 つの地盤を想定し震害統計に合うように試行錯誤により式(2)のパラメータ b (m^{-1})を決めた最終結果を示す。この解析から、式(2)のパラメータは次式のように地盤の最大加速度 a_{max} (gal) と地盤の卓越周期 T_g (sec) の関数として与えられている。

$$\sigma_u = \begin{cases} 2.53 [2 \ln b + 13.318]^{-1/2} T_g^2 a_{max} \times 10^{-2} \text{ (cm)}, & L \leq 735 \text{ (m)} \\ 1.75 T_g^2 a_{max} \times 10^{-2} \text{ (cm)}, & \text{その他} \end{cases} \quad \dots\dots (24)$$

$$\log b = - [1.533 \log T_g + 2.159] \quad \dots\dots\dots (25)$$

式(24)(25)を式(18)と(22)に代入して、埋設管の震害資料から推定した地盤変形スペクトルを描いたものが図-27 である。図-27 は、対象距離 $S_0 = 1000$ m, $a_{max} = 100$ gal のものであるが、地盤加速度が $(\alpha \times 100)$ gal に対する地盤変形スペクトルは式(24)からわかるように図-27 の値を α 倍にしたものとなる。

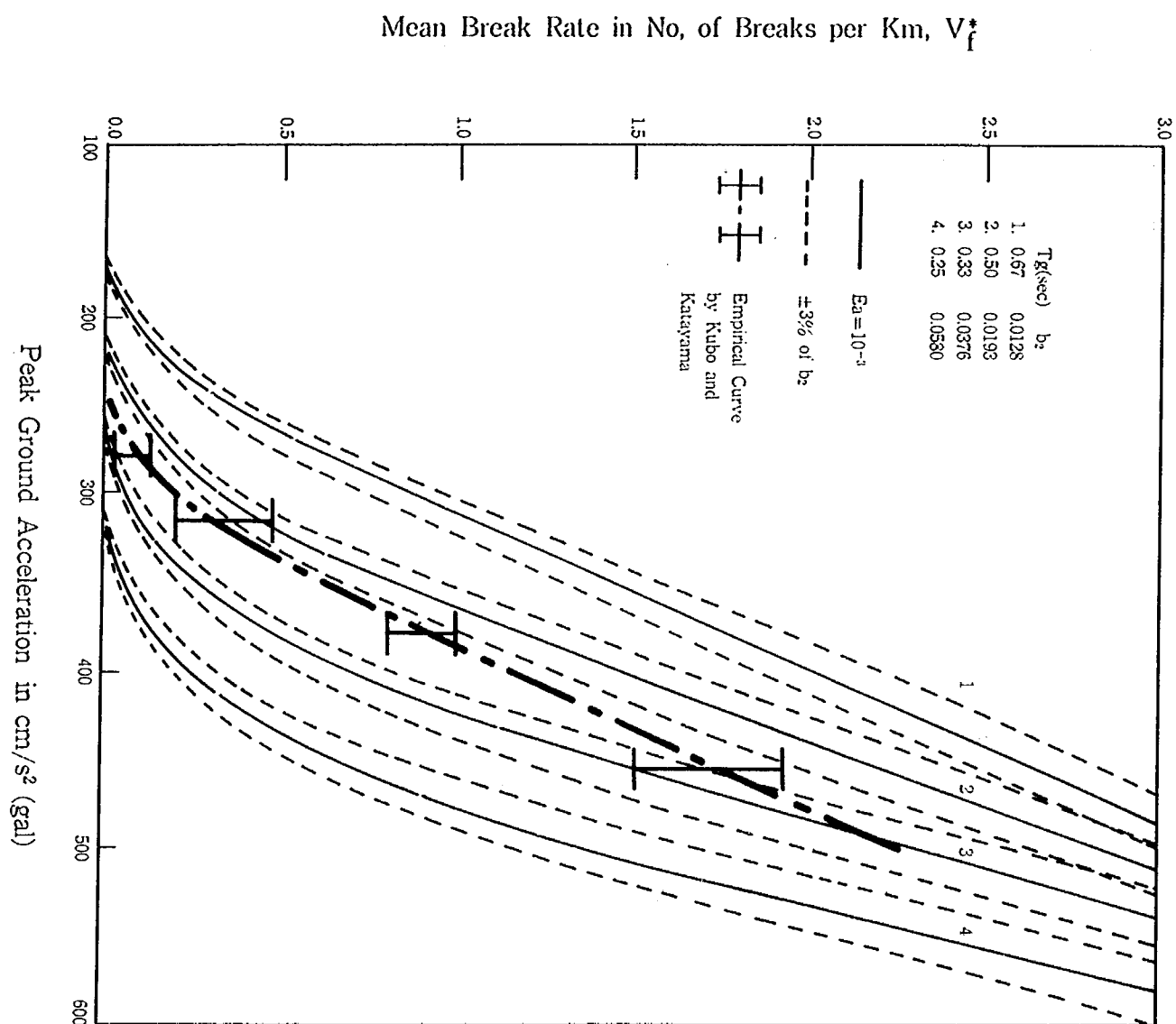


図 - 26 埋設管の震害統計とモデルによるものの比較

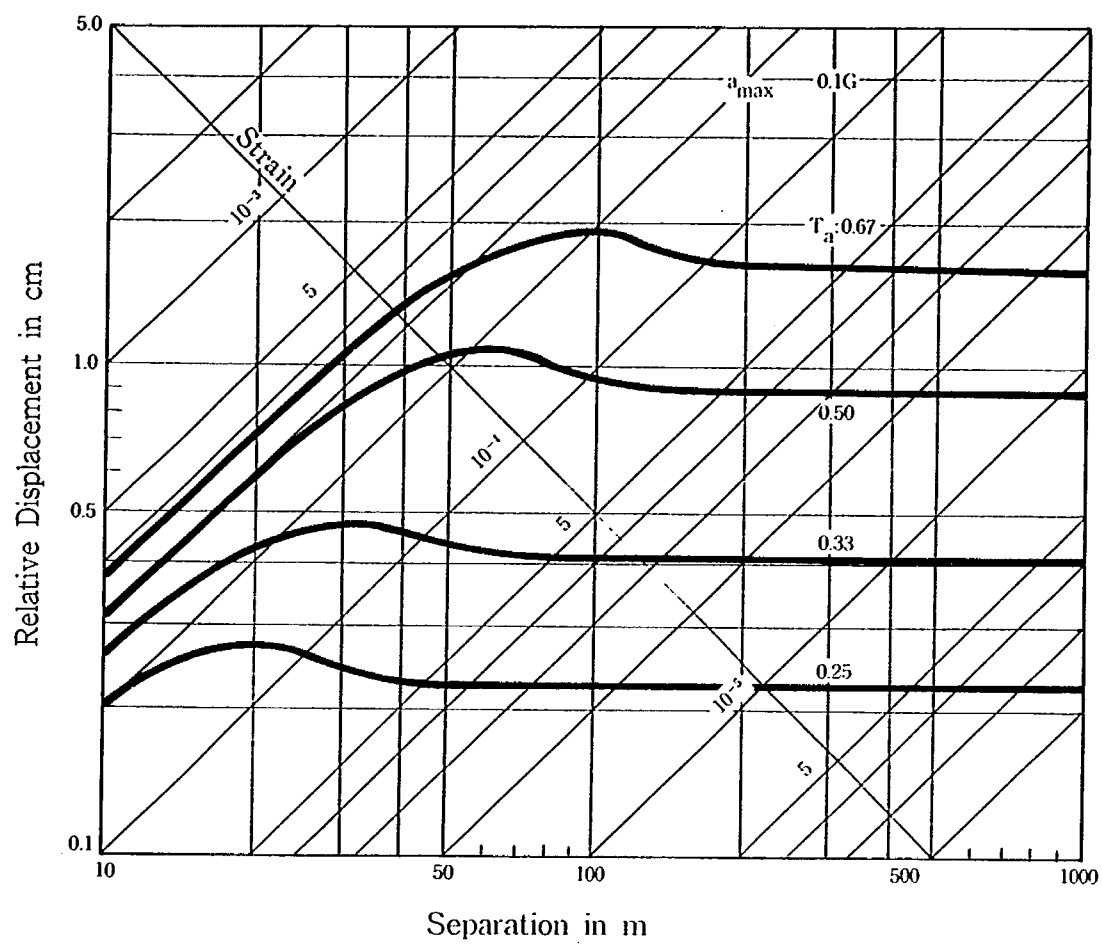


図 - 27 埋設管の震害統計から推定した地盤変形スペクトル

7. 地震時の地盤変位分布の特徴

6章までの地盤変形スペクトルをまとめて示すと図-28のようなものになる。この図より地盤変形スペクトルのばらつきは地震時地盤応答の複雑さを反映して大きい。この程度のばらつきのもとに図-28により地震時の地盤の変位分布の特性を概観すると次のようになる。

- (1) 液状化の生じた海老ヶ瀬地区および能代南バイパスの変動が最も大きい。ここでは 30 cm ~ 800 cm の相対変位および 10^{-3} ~ 10^{-1} の地盤歪が認められる。
- (2) 他方、液状化しない地盤のものは液状化した地盤の変動に比べると約 1/10 ~ 1/100 と小さいが、地盤の最大加速度が 200 ~ 300 gal と高くなるケースでは 10^{-3} 程度の軸歪が地盤に生じる。
- (3) SMART-1 によるアレー観測記録による結果は多少右方向に位置して、地盤歪の値は小さいが非線形地盤応答解析によるもの、震害統計資料から推定したもの、の3者は比較的良好一致している。

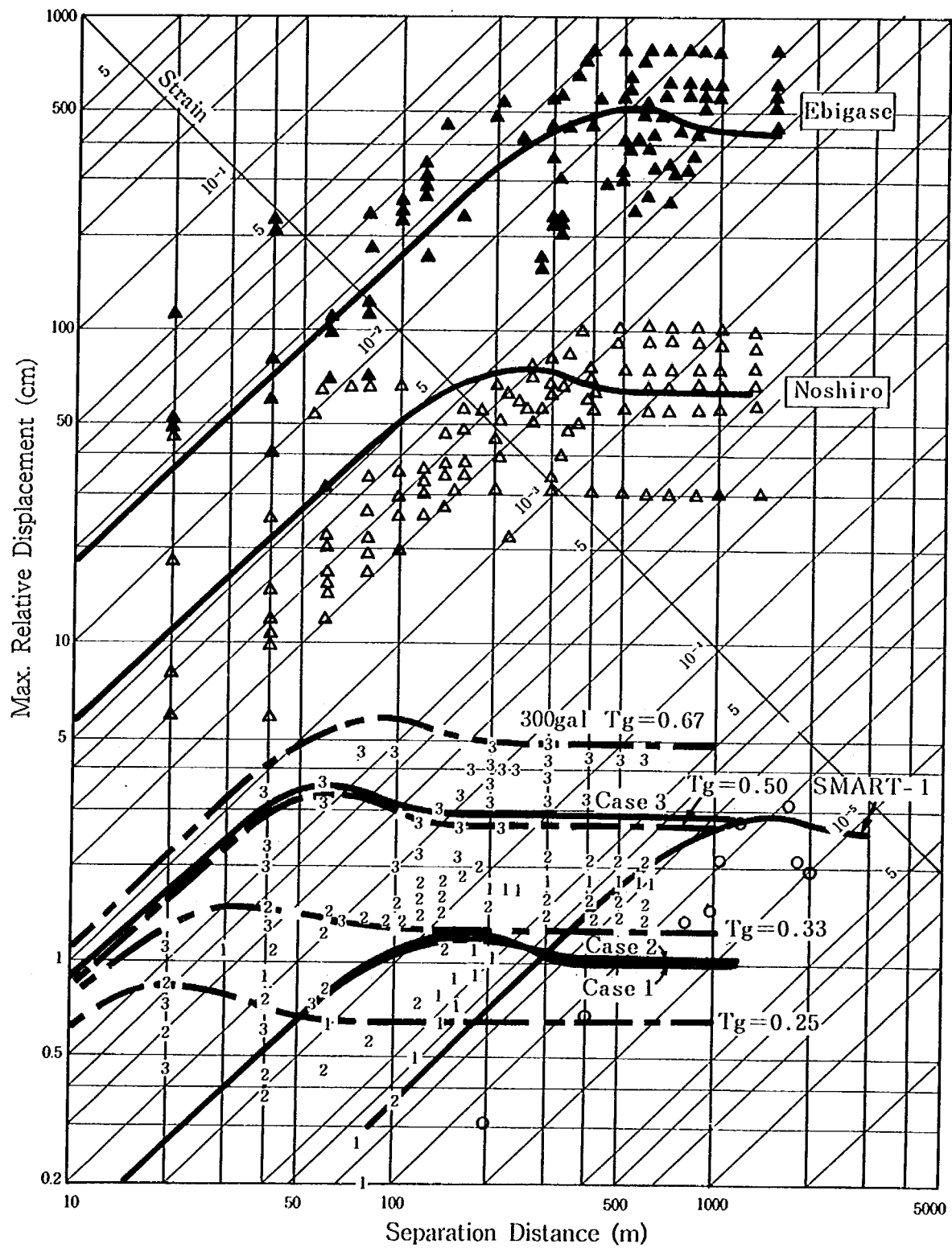


図 - 28 各種条件の地盤変形スペクトル

8. ま と め

埋設構造物の耐震設計に用いる地震荷重の策定を目的に、管路に沿った地震時地盤の変位分布の特徴について、次の4項目の検討を行った。(1)液状化による路面の水平変動の分布、(2)地震計アレーによる変位分布、(3)有限要素法による変位分布、(4)埋設管路の震害統計資料から推定した変位分布。検討においては、データそのものの整理法と空間変数を含めた確率過程理論による整理法に主眼をおいた。このような検討結果と今後の研究課題をまとめると、次のようになる。

- (1) 地盤の変位分布の整理方法の1つとして、地盤変形スペクトルを考案した。このスペクトルは、両対数グラフのたて軸に2点間の最大相対変位をよこ軸に2点間距離をプロットすることにより、地盤の最大相対変位と最大歪が2点間距離の関数として読みとれるよう工夫され、地震動の強さと地盤条件をパラメータとしている。
- (2) 地盤の変位分布に関する問題の解決に、有限要素法による地盤応答解析モデルと確率過程理論が有用であることが示された。
- (3) 解析例を蓄積しなければならないが、非線形地盤応答解析モデルでは、入力加速度の増加とともに地表面の変位分布に周期性が顕著に現われた。
- (4) 液状化地盤の変形スペクトル値は、最も高く、30～800 cmの相対変位および 10^{-3} ～ 10^{-1} の地盤歪が認められた。
- (5) 液状化の起こらない地盤の変形スペクトル値は、液状化地盤のものに比べ約1/10～1/100と小さいが、地盤の最大加速度が200～300 gal程度では 10^{-3} 程度の高い地盤軸歪が観察された。今後の課題として、以下の4つの項目等に関する調査、研究が必要と考えられる。
 - 1) 本研究で用いた有限要素法による地盤応答解析モデルの実測例による検証
 - 2) 地盤材料の非線形性と変位分布の周期性に関する原因調査
 - 3) 地震計アレー観測記録の解析例の蓄積
 - 4) 本報告で示した地盤変形スペクトルで想定し得る地盤変位分布による埋設管路の非線形応答解析等による埋設管の耐震性検討

参 考 文 献

- 1) 新潟国道工事事務所, "新潟地震による国道の被災について" 1964.
- 2) 能代工事事務所, "被害の実態と問題点-道路", 日本海中部地震に関するシンポジウム資料集, 土木学会東北支部, 1984.
- 3) Bolt, B. A., Loh, C. H., Penzien, J., Tsai, Y. B., and Yeh, Y. T.,
"Preliminary Report on the SMART-1 Strong Motion Array in Taiwan",
EERC-82/13, University of California, Berkeley, 1982.
- 4) Oda, T. "Probabilistic Analysis of Seismic Array Data", 宮崎大学修士論文,
1984.
- 5) プログラム「SPATIAL V」, 建設省土木研究所, 耐震研究室, 1984.
- 6) Harada, T. "Probabilistic Modeling of Spatial Variation of Strong Earth-
quake Ground Displacement", Proc. of 8th WCEE, San Fransisco, 1984.
- 7) Capon, J., "High-Resolution Frequency-Wavenumber Spectrum Analysis",
Proc. of IEEE, Vol. 57., No 8, pp. 1408-1418, 1969.
- 8) 原田隆典, "2次元均質ガウス確率過程の最大値予測について", 宮崎大学工学部研究報告,
第30号, pp. 153~155, 1984.

ライフライン地中構造物の
耐震設計に用いる地盤変動

ISSN 0386-5878
土木研究所資料第 2143 号
昭和 59 年 9 月 (1984)

原田隆典・岩崎敏男
川島一彦・小山達彦

キーワード 線状地中構造物, 耐震設計, 地震時地盤ひずみ, 埋設管,
液状化, 確率過程理論

要 旨

本報告はライフライン地中構造物の耐震設計に重要な管路に沿う地震時の地盤の変位分布の特徴を, 1) 液状化に伴う路面の変状, 2) 高密度強震観測結果の解析, 3) 有限要素法による数値解析, および, 4) 地中埋設管の震害統計資料の解析により検討するとともに, 確率過程理論による整理を行ったものである。



郵便はがき

四十円切手
をはって下
さい

3 0 5 - □ □

建設省土木研究所
耐震研究室
御中

茨城県筑波郡豊里町大字旭一番地

No. 36

No. 36

配布先氏名

配布先住所





土木研究所資料第2143号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名 印

