

(64) ライフライン地下構造物の耐震解析に用いる地盤変動の解析例

宮崎大学工学部 〇原田隆典 建設省土木研究所地震防災部 岩崎敏男, 小山達彦 川島一彦

1. まえがき

埋設トンネル, 埋設管, 地下タンクなどの地震挙動に関しては, 慣性力が支配的である地上構造物とは異なり, これら地下構造物の耐震性は周辺地盤の異地点間に生ずる地震時地盤の相対変位に支配される。このため, 地下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”が多用されてきている。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, 定量的な資料が欠けているのが現状である。そこで, 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, 以下の4項目の生の資料の検討に加え, 空間変数を含めた確率過程理論による整理と初歩的解釈を行な, たのでその概要を報告する。(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) 地下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の分布

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。図-1と2は震前と震後の路線測量の結果から求められた西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。路面は路線に沿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は, 地震動との係わりに関して今後解明しなければならぬが, 平地地盤が液状化すると, 図-1と2に示す程度の水平変動が生じるものと考えよう。このような変位分布の特徴を把握するため下記に5つの統計量を整理してみる。場所  $x_i$  点の変位を  $v_i = v(x_i)$  とすると,

- (1) 平均値  $\bar{v}$ , (2) 平均値回りの標準偏差  $\sigma_v$ , (3) 空間相関関数  $R_v(\xi)$

$$R_v(\xi) = \frac{\sigma_v^2 \sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})(v_{i+\xi} - \bar{v})}{\sigma_v^4}$$

$$\xi = x_j - x_i$$

- (4) 最大相対変位  $d_m(\xi | x_i)$

$$d_m(\xi | x_i) = \text{Max.} |v_j - v_i|$$

- (5) 最大平均歪  $E_m(\xi | x_i)$

$$E_m(\xi | x_i) = d_m(\xi | x_i) / \xi$$

図-3と4に路面の水平変動データから求めた空間相関関数を示す。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ふが, 2点間距離100 m程度の領域の相

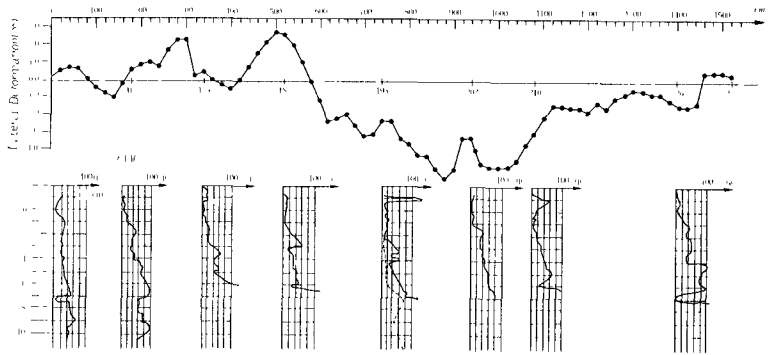


図-1 海老ヶ瀬地区の水平変動 (新潟地震1939年)

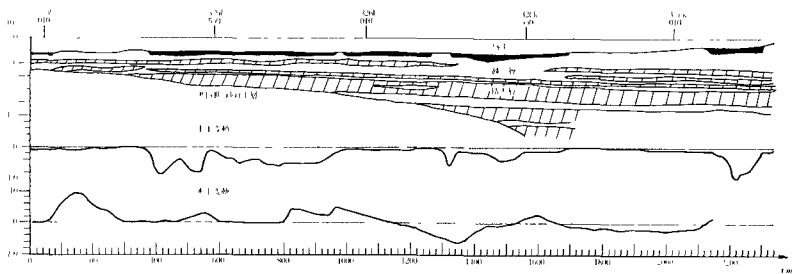


図-2 南バイパスの上下および水平変動 (日本海中部地震1983年)

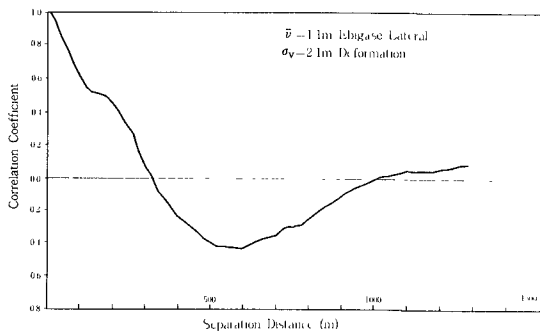


図-3 海老ヶ瀬地区の水平変動の空間相関係数

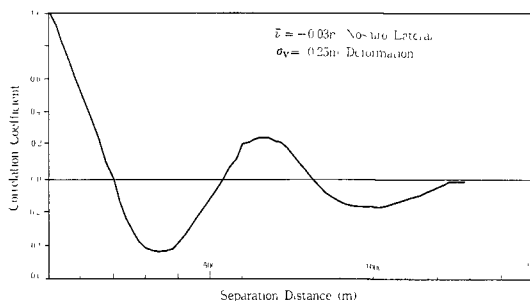


図-4 南バイパスの水平変動の空間相関係数

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等が読みとれる。次に、図-5の△▲印は水平変動資料から、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。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。このグラフでは、最大平均歪は、式(5)の関係より最大相対変位と2点間距離を対数グラフにプロットしてあるので、45°の斜軸の値として読むことができる。図-5の実線は確率過程理論による地盤変形スペクトルである[1]。海老ヶ瀬地区の場合、2点間距離400~900mで最大相対変位は既打ちとなり、約4~8mの相対変位と約 $6 \times 10^{-2} \sim 6 \times 10^{-3}$ と大きな地盤歪が認められる。南バイパスのものは、これよりも小さいが、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、地盤歪にして最大で約 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ 以上の変動が起り得ると言えよう。

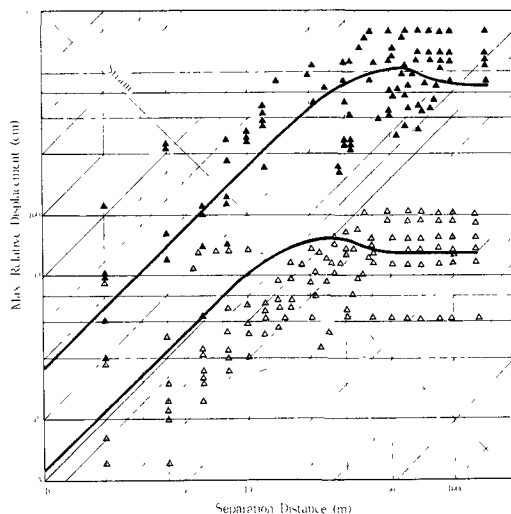


図-5 海老ヶ瀬地区と南バイパスの地盤変形スペクトル

### 3. 地震計アレー記録による変位分布

SMART-1によるアレー記録を用いて地震時地盤の変位分布を検討する。このアレーは台湾に設置されたリング状アレーで図-6に示すように、半径200m、1km、2km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点の加速度計は同時観測のできるよう工夫されている。震源方向にx軸をとり、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つの相対変位成分が考えられる。

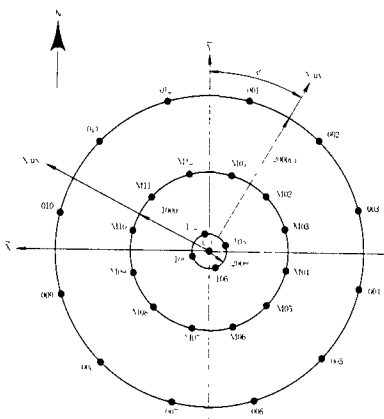


図-6 SMART-1アレーとその座標系

$$(6) \quad \begin{aligned} dx_x(x, y, t | \xi_x) &= U(x + \xi_x, y, t) - U(x, y, t), & dy_y(x, y, t | \xi_y) &= V(x, y + \xi_y, t) - V(x, y, t) \\ dx_y(x, y, t | \xi_y) &= U(x, y + \xi_y, t) - U(x, y, t), & dy_x(x, y, t | \xi_x) &= V(x + \xi_x, y, t) - V(x, y, t) \end{aligned}$$

SMART-1のEvent5のデータを使い式(6)の相対変位の最大値と2点間距離 $\xi$  ( $\xi_x, \xi_y$ )の関係をプロット

すると、図-7の地盤変形スペクトルが得られる。

なお、図-7の実線は確率過程理論による理論的な地盤変形スペクトルである[1]。地震計の設置数のためプロット数は少ないが、2点間距離が大きくなると最大相対変位は大きくなり、約1kmで、 $d_{xx}$ や $d_{yy}$ は一定の傾向を示す。 $d_{xx}$ では、約3cmの最大相対変位と約 $3 \times 10^{-5}$ の軸歪が読みとれる。なお、このデータのx, y軸方向の最大加速度の(平均値, 標準偏差)はそれぞれx軸(118 gal, 34 gal), y軸(103 gal, 26 gal)である。

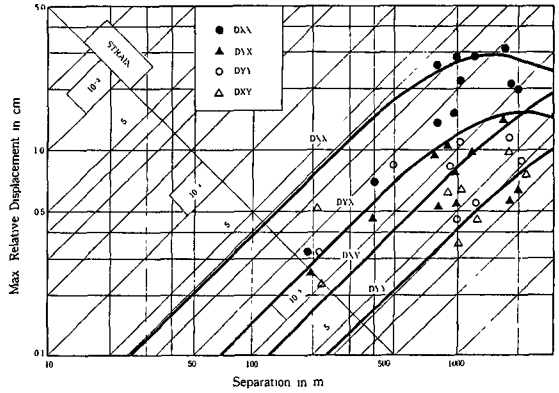


図-7 SMART-1, Event 5による地盤変形スペクトル

**4. FEM モデルによる変位分布**

地盤条件や地震

波形状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することのできる数学モデルによる検討が不可欠となる。この目的のためにFEMによる数値計算モデルを開発した。このプログラム"SPATIAL-V"[1]により深さ70m, 水平距離1200mの砂層と粘性土層からなるほぼ水平な地層構造を有する地盤の地震時変位分布を計算した。土の動的非線形特性はせん断弾性係数および減衰比のみずみ依存性カーブに適合するようにくり返し計算を行い、考慮している。この地盤の基礎に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。各解析ケースで得られた地表上の変位波形から地盤変形スペクトルを求め、その結果を図-8に示す。ケース1と2の比較では、線形解析のケース1の方がやや小さな値を示すが、最大相対変位1~2cm, 最大地盤軸歪、 $4 \times 10^{-4}$  ~  $2 \times 10^{-5}$ 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3~5cm, 最大軸歪約 $9 \times 10^{-4}$  ~  $1 \times 10^{-4}$ 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り違っており、ケース3では、図-8に記載するように平均値は、167 gal, 最大値は311 galであった。今後、計算例を蓄積して、各要素の影響を分析しなけりおならない。ここで示し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の解決のための1つの有効な道具になるものと考えらる。

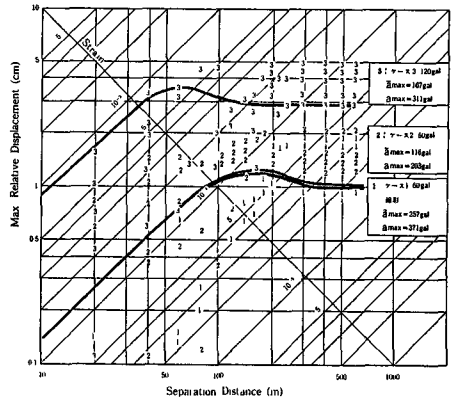


図-8 地盤応答解析による地盤変形スペクトル

**5. 埋設管路の震害資料から推定した地盤の変位分布**

径の小さい埋設管路の地震時応力は管路の軸応力が支配的となる。他方、これらの管路の震害統計資料が単位km当りの管路

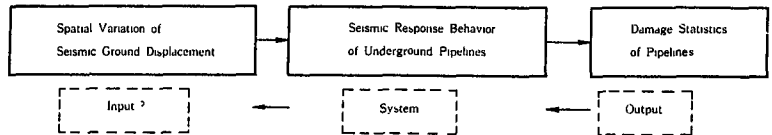


図-9 震害資料による変位分布の推定の考え方

の破壊箇所数と地盤加速度の関係として調査されている。このようなことから、図-9に示す考え方により、入力であるところの地震時の地盤の変位分布を推定する。解析の詳細は文献[1]に譲るが、図-10は卓越周期の違う4つの地盤を想定して、震害統計資料に合うように地盤の変位分布のパラメータを決めた結果を示す。この結果より地盤変形スペクトルを描いたものが、図-11である。この図は、対象距離 $S_0 = 1000$  m,  $A_{max} = 100$

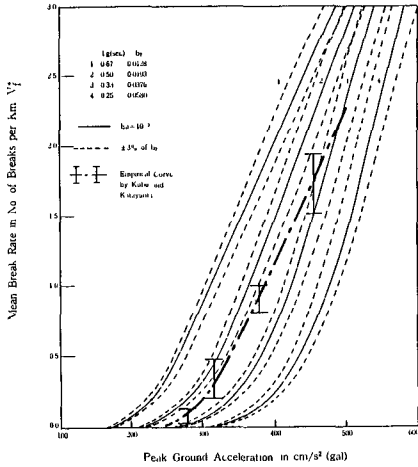


図-10 埋設管の震害統計とモデルによるもの比較

図-11 →  
埋設管の震害統計から推定した地盤変形スペクトル

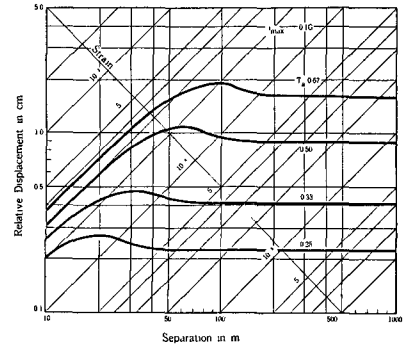


表-1 →  
データとの比較から求めた空間相関関数のパラメータ値

データ名 (1)	図番号 (2)	標準偏差 $\sigma$ (cm) (3)	パラメータ $b_x, b_y$ ( $m^{-1} \times 10^{-4}$ ) (4)
海老川扇地区	4	210	2.21
池代南バイパス	5	25	4.71
SMART-1 (Event 5)	23	$\sigma_x = 1.24$ $\sigma_y = 0.64$	$b_{xx} = 0.884, b_{yy} = 0.332$ $b_{xy} = 0.643, b_{yx} = 0.332$
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

gal のものであるが、加速度が  $(\alpha \times 100)$  gal に対するスペクトルはこの図の値を  $\alpha$  倍して求めることができる [1]。

6. 確率過程理論による整理とまとめ 理論によると、地盤変形スペクトルは空間相関関数より計算することができる [1]。これまでのデータより、空間相関関数として、一次元の場合には、

$$(7) R(z) = \sigma^2 [1 - 2(bz)^2] e^{-(bz)^2}$$

SMART-1 の二次元の場合には、

$$(8) R_{ii}(z_i) = \sigma_{ii}^2 [1 - 2(b_{ix} z_x)^2] e^{-(z_i^T b z_i)}$$

$$z_i = (z_x, z_y)^T, b = \begin{bmatrix} b_{ix} & 0 \\ 0 & b_{iy} \end{bmatrix}, i = x, y$$

式(7)、(8)のパラメータを表-1に示す。また、これまでの地盤変形スペクトルをまとめると、図-12 のようになる。図-12より、(1) 液状化の生じた地盤の変動が最も大きく、 $10^{-3} \sim 10^{-1}$  の地盤歪が認められる。他方、(2) 液状化しない地盤のものは液状化地盤の変動の  $1/10 \sim 1/100$  と小さいが、地盤の最大加速度が  $200 \sim 300$  gal と高くなるケースでは、 $10^{-3}$  程度の地盤歪が生じる。(3) SMART-1 のアL-記録の結果は多少右方向に位置して、地盤歪の値も小さいが、非液状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者の地盤変形スペクトルは比較的良好一致している。この図の解釈は今後検討しなければならないが、液状化しない平坦地盤の変形スペクトルのおよその上限を推定できるものと思われ。なお、本研究は、著者の一人が招へい研究員として、昭59年4月より6ヶ月間、建設省工研研究所に滞在して実施した研究の一部で、記してお世辞にな、下関係諸氏に感謝する次第である。文献[1] 土木研究所資料第2143号、建設省、昭59年9月

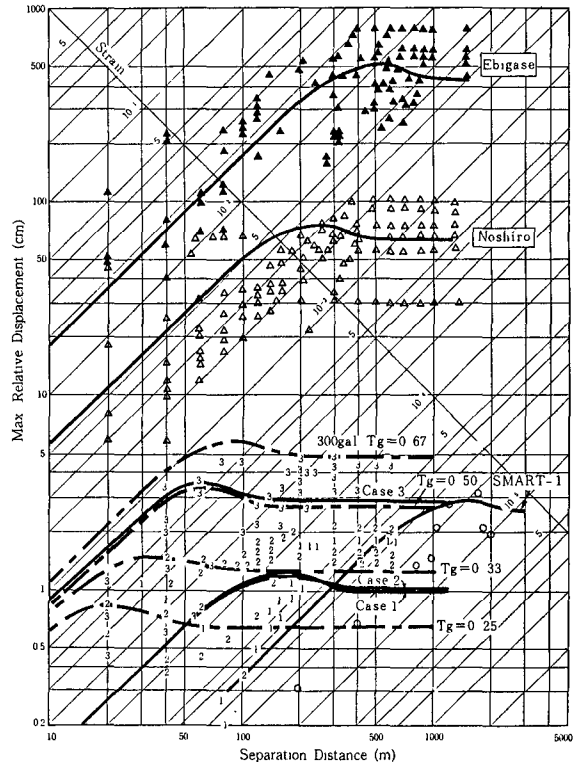


図-12 各種条件での地盤変形スペクトル