

宮崎大学工学部 正員 原田隆典  
コロンビア大学 M. Shinozuka

1. まえがき 最近の耐震設計では、一地点の地震動特性の他に、多地点間の地震動特性（地震動の平面分布）の情報が必要とされ始めた。従来、この方面の理論的研究では、水平方向に伝播するある種の波動を仮定して、解析が進められてきたが、工学的に問題となる地震動の周波数領域で満足な解を得るには解決すべき問題が多い。地形、波動の種類、波動の入射角および伝播経路の効果、また、土の非線形特性の影響など不確定な要素が多い。したがって、本小文では、地震動を場所の確率関数と見なして、地震動の平面分布の検討を試みる。

2. 基本的な考え方 図-1 にモデルの基本的な考え方を示す。地中埋設管の地震時挙動(System)および震害資料(Output)に関しては、不十分ではあるが、挙動の機構および定量的資料が得られている。すなわち地中埋設管の地震時挙動は管軸方向地震動の2地点間の相対変位に支配されることおよび被害箇所数と地震動強度の統計資料である。したがって、以下に述べるように、Outputの資料から、Inputの地震動の平面分布を同定することができる。時間を固定して考え、地震時の地表面の変動状態を平面的に眺めた場合、管軸方向の埋設管の運動方程式は次のように書ける。

$$-\frac{d^2u}{dx^2} + \beta^2 u = \beta^2 \gamma(x), \quad \beta = \sqrt{\frac{R}{EA}} \quad \dots (1)$$

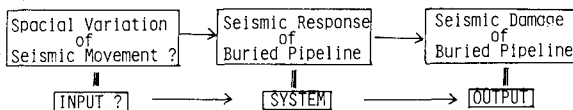
ここに、 $u$ と $\gamma$ は、埋設管および地震動の変位で、また、 $R$ 、 $E$ 、 $A$ は地盤のばね、埋設管の剛性および断面積である。地震動変位 $\gamma(x)$ を平均値零を持つ場所 $x$ の定常カウス確率関数と考えると、場所 $x$ に関するフーリエ変換から、(1)式は、次のように書ける。

$$S_u(\omega) = \frac{\beta^4}{(\omega^2 + \beta^2)^2} S_r(\omega) \quad \dots (2)$$

$S(\omega)$ はスペクトル密度関数で、 $\omega$ は(ラジ/秒)の次元を持ち波数と呼ばれる。ここで、確率関数 $\gamma(x)$ の自己相関関数 $R(\tau)$ の物理的、解析的に可能な表現として、次の関数を仮定する。

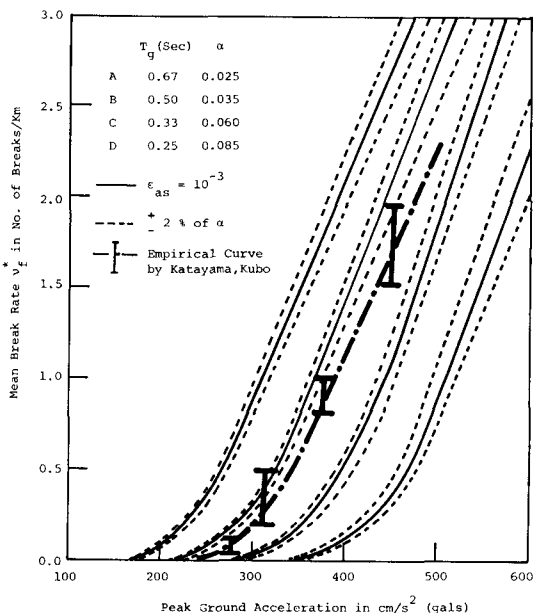
$$R_r(\tau) = D^2 e^{-\alpha|\tau|} \left(1 + \alpha|\tau| + \frac{\alpha^2}{3}|\tau|^2\right) \cos \theta \tau \quad \dots (3)$$

$D$ は地震動変位の場所に関する2乗平均値で、 $\alpha$ と $\theta$ は(ラジ/秒)の次元を持つパラメータである。(3)式は2点間の距離 $\tau$ の増加により2点での相関が減少する



Identification of the Spatial Variation of Seismic Movement from the Data of Seismic Damage of Pipes

図-1 モデルの基本的な考え方



Correlation Between Mean Break Rate and Peak Ground Acceleration, Effect of the Parameter  $\alpha$

図-2 1Km当りの平均破壊箇所数と加速度の関係

現象と波動伝播による相関関数の波状特性を表わしている。波状特性は、 $\cos \theta t$  で表現されているが、現時点では、波動伝播特性に不明確な点が多いので、2地点間の相関の減少という物理的制約のみ考え、 $\theta = 0$  と仮定する。 $R_r(\tau)$  のフーリエ変換から地震動変位のスペクトル密度関数  $S_r(\omega)$  は、図-4中の式で与えられる。次に、未知パラメータ  $\alpha$  の評価方法を考えよう。定常ガウス確率過程に対しては、Riceの公式[1]とフーリエ変換を使い、積分を実行することにより、1km 当りの埋設管の平均破断回数  $L_f^*$  は、

$$L_f^* = \frac{10^3}{L_e} \exp\left(-\frac{\epsilon_{as}^2}{20\epsilon^2}\right), \quad L_e = \frac{2\pi}{\sqrt{3}\alpha} \sqrt{1+4\frac{\alpha}{\beta}}$$

$$\sigma_\epsilon^2 = \frac{1}{3} (D\alpha)^2 (1+4\frac{\alpha}{\beta}) / (1+\frac{\alpha}{\beta})^4 \dots (4)$$

$\alpha \ll \beta$  の場合、(4)式は

$$L_f^* = \frac{\sqrt{3}}{2\pi} 10^3 \alpha \exp\left(-\frac{3\epsilon_{as}^2}{2D^2\alpha^2}\right), \quad (\text{No. of Breaks/km}) \dots (5)$$

地表面の2乗平均地震動変位  $D(\text{m})$  は金井博士の研究より[2]、地表面の加速度  $A(\text{cm/s}^2)$  および地盤の卓越周期  $T_g$  との間に次の関係がある。 $D = 2.53 \times 10^{-4} T_g^2 A$ 。この式と(5)式から、埋設管の平均破断回数  $L_f^*$  (個/km) と地表面加速度  $A$  の関係が得られる。 $L_f^*$  と  $A$  の式で、4種類の地盤 ( $A \sim D$ ) および埋設管の地震時許容歪  $\epsilon_{as}$  を仮定し、更に未知パラメータ  $\alpha$  を次のような考察により仮定すると、図2の実線、鎖線に示すような関係が求まる。久保、片山博士[3]による埋設管の被害資料(図-2の一点鎖線)に次のような判断を加えて、視察により  $\alpha$  を決めた。図-2の被害資料は各種地盤別に得られていないが、悪い地盤条件 ( $A < B$ ) の被害率は良い地盤条件 ( $C < D$ ) のそれよりも高いという経験を考慮した。図-2のように求まった  $\alpha$  と地盤条件の間には、図-3のような直線関係がある。

$$\log \alpha = -(1.24 \log T_g + 1.82) \dots (6)$$

したがって、注目地域の地盤の卓越周期  $T_g(\text{Sec})$  と(6)式から、 $\alpha$  が求まり、図-4に示す地震動の工学的平面分布関数  $\gamma(x)$  のスペクトル密度関数  $S_r(\omega)$  を得ることが出来る。結局、時間を固定して、平面的に眺めたときの地震動変位  $\gamma(x)$  の標本関数は、 $S_r(\omega)$  から、通常の数値計算により求められることになる。本研究は、東大生産研教授、久保慶三郎代表の日米科学協力事業の一環で、著者の一人が米国コロンビア大学に滞在し、ここで行なわれた研究の一部である。本研究の機会を下さり、常に励まして助言を下さる久保慶三郎教授、並びに片山恒雄助教授(東大生産研)、堤一教授(宮崎大学)に感謝の意を表わす次第である。

- [1]. S.H. Crandall and W.D. Mark, "Random Vibration in Mechanical Systems," P47, Academic Press, 1963
- [2]. 金井清, "地震工学", P97, 共立出版
- [3]. 久保・片山・佐藤, "地下埋設管被害の定量的解析," 第4回日本地震工学シンポジウム, 1975.

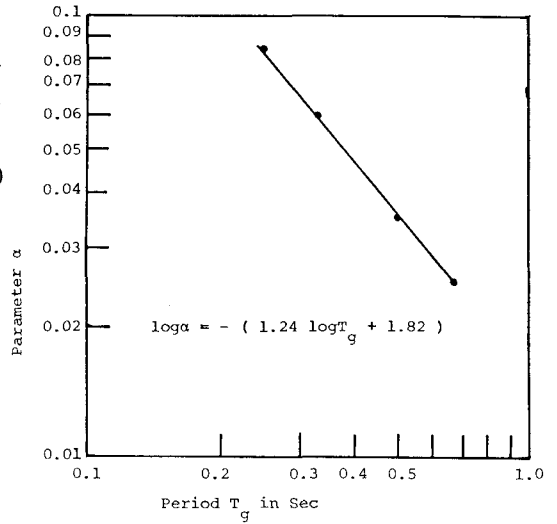


図-3  $\alpha$  と  $T_g$  の関係

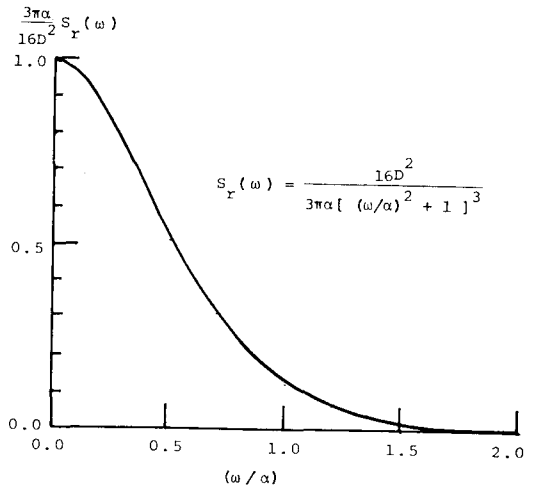


図-4 平面分布のスペクトル密度関数