

(12) 不均質地盤の相関特性と散乱減衰の周波数依存性との関係について

東電設計（株）正会員 栗田哲史 正会員 都築富雄 正会員 安中 正
東京電力（株）正会員 嶋田昌義 正会員 藤谷昌弘

1. はじめに

鉛直アレー観測記録の分析より、地盤における地震波の減衰が周波数に依存していることが指摘されている^{例え}
1)。その原因として、地盤の不均質性に起因する散乱現象が考えられている²⁾。著者等もこのような視点から、地盤の不均質性と地震波の散乱減衰の関係について、数値シミュレーションによる検討を行っている³⁾。ここでは、地盤の不均質性の代表的なものとして速度構造の揺らぎを考えている。この揺らぎの性質は、自己相関関数の関数型、分散、相関距離等の統計的性質で表すことができる。本研究は、この揺らぎの統計的性質と散乱減衰との関係について検討するもので、特に、自己相関関数の関数型に着目している。各種関数型の自己相関関数を用いて不均質場を作成し、数値シミュレーションによって、各不均質場毎の散乱減衰を求める。この結果を用いて相関特性の違いによる散乱減衰の周波数依存性の変化について考察する。

2. 地盤震動シミュレーションと散乱減衰の評価方法

地盤震動シミュレーションは図-1に示す二次元有限要素モデルを用いて行った。各要素にランダムに発生させた統計的性質を有するせん断剛性を与えて不均質地盤を作成した。基盤面よりRicker waveletの平面SV波を入射して地盤震動解析を行い、各深度での変位応答を出力した。ここで、側方をエネルギー伝達境界としているため、変位応答の出力は境界の影響を受け難い中心線付近（y軸）のみを用いている。本研究で用いた不均質地盤の諸元を表-1に示す。また、入射波のピーク周波数は $f_c=6\text{Hz}\sim 32\text{Hz}$ とした。

直達波の散乱減衰（1/Q）は、入射した波動が伝播距離に対して減衰していく比率から、次式の関係を用いて重み付き最小二乗法により求めた。

$$\frac{A(y)}{A_0(y)} = \exp \left[-\frac{2\pi f_c y}{2V_{sm} Q(f_c)} \right] \quad (1)$$

ここで、

$A(y)$: 直達波の最大振幅（不均質地盤）, $A_0(y)$: 直達波の最大振幅（均質地盤）
 V_{sm} : 不均質地盤の平均S波速度, f_c : 入射波のピーク周波数

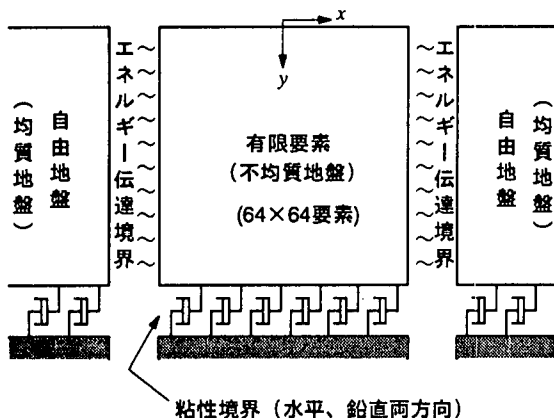


図-1 解析モデル

表-1 不均質地盤の諸元

単位体積重量 (t/m^3)	1.8
平均P波速度 (m/s)	1000.0
平均S波速度 (m/s)	200.0
V_p/V_s	一定
揺らぎの変動係数	0.2
内部減衰	0.0

3. 不均質地盤の自己相関関数

本研究では以下に示す3種類の関数型の自己相関関数を用いて、不均質地盤を作成した。ここで、 ξ_x, ξ_y は2点間の距離、 σ^2 は揺らぎの分散、 a_x, a_y は相関距離を表している。

Gauss型

$$R(\xi_x, \xi_y) = \sigma^2 \exp \left\{ - \left(\frac{\xi_x}{a_x} \right)^2 - \left(\frac{\xi_y}{a_y} \right)^2 \right\} \quad (2)$$

指数関数型

$$R(\xi_x, \xi_y) = \sigma^2 \exp \left\{ - \frac{\xi_x}{a_x} - \frac{\xi_y}{a_y} \right\} \quad (3)$$

von Karman型

$$R^\nu(\xi_x, \xi_y) = \frac{\sigma^2 2^{1-\nu}}{\Gamma(\nu)} \left(\frac{\xi_x}{a_x} + \frac{\xi_y}{a_y} \right)^\nu \cdot K_\nu \left(\frac{\xi_x}{a_x} + \frac{\xi_y}{a_y} \right) \quad (4)$$

ここで、 ν は次数を表している。また、

$K_\nu(\cdot)$: ν 次の第2種変形Bessel関数

$\Gamma(\cdot)$: Gamma関数

である。図-2に相関距離が2mの時のGauss型、指数関数型、von Karman型 ($\nu=0.3, \nu=0.1$) の自己相関係数を示す。図より各関数型の特徴は、Gauss型は相関の減少が緩やかであり、指数関数型、von Karman型の順に相関が急激に減少する傾向にある。これは、Gauss型が長周期成分を最も多く含み、指数関数型、von Karman型 ($\nu=0.3$)、von Karman型 ($\nu=0.1$) の順に長周期成分が少なくなり、代わって短周期成分が多くなり、ホワイトノイズに近い性状になることを示している。

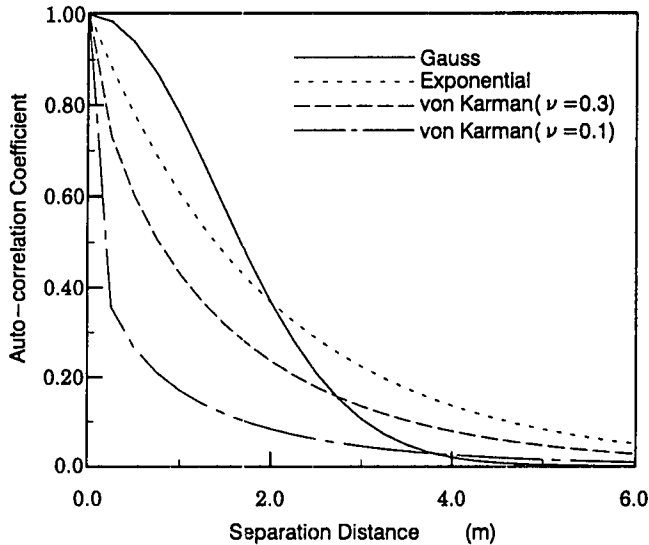


図-2 各種関数型の自己相関係数

4. 不均質地盤の自己相関関数と散乱減衰

式(2)～(4)の自己相関関数を用いて作成した不均質地盤を用いて地盤震動解析を行い、直達S波の散乱減衰を求めた。各不均質地盤は乱数の種を変えて2種類作成し、各々の地盤毎に散乱減衰を求めている。図-3に(1)Gauss型、(2)指数関数型、(3)von Karman型 ($\nu=0.3$)、(4)von Karman型 ($\nu=0.1$) の各関数型の自己相関関数を用いて作成した不均質地盤の散乱減衰 ($1/Q$) を示す。図の横軸は、波数×相関距離として周波数を無次元化している。図中の■印と▲印はシミュレーション結果、3本の曲線は次式に示す一次散乱理論に基づく散乱減衰の理論値⁴⁾を示している。

$$Q^{-1}(k) = 2k^2 \left(\frac{\delta c}{c} \right)^2 \int_{\theta_{min}}^{\pi} P[2k \sin(\theta/2)] d\theta \quad (5)$$

ここで、 k は波数、 $\delta c/c$ は地盤の速度の揺らぎの変動係数、 $P[\cdot]$ は揺らぎの自己相関係数を2次元Fourier変換した関数である。また、 θ_{min} は等方散乱している散乱波のうち減衰に寄与する波の波線方向からの角度の最小値を表して

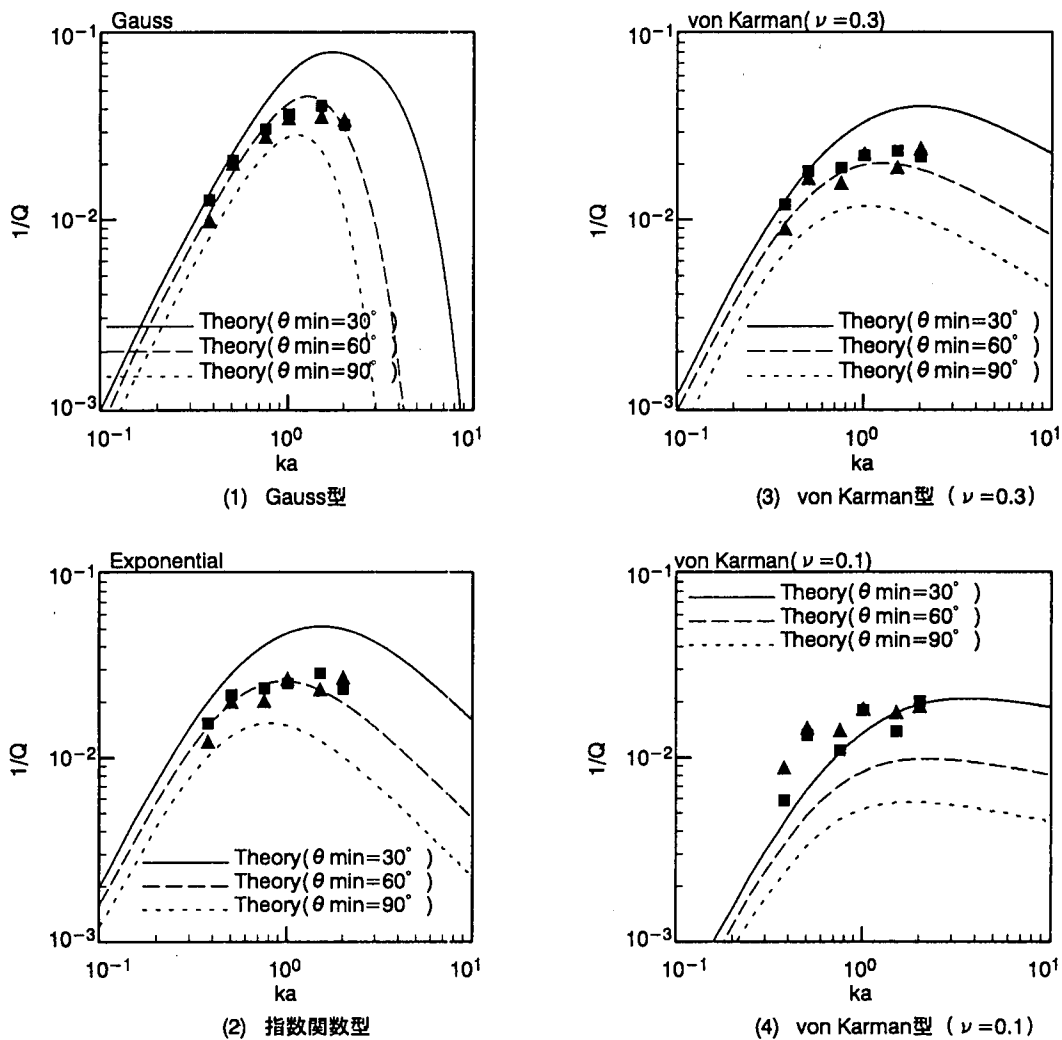


図-3 各種関数型不均質地盤における散乱減衰

いる。有限要素法によるシミュレーション結果は一次散乱理論の結果と良く一致している。唯一、(4) von Karman型 ($\nu=0.1$) の場合の長周期側でシミュレーション結果と一次散乱理論の結果に差が見られるが、これは、作成した不均質地盤が目標とする統計的性質を十分に有していなかったためと思われる。

$ka < 1$ の長周期側ではどの関数型の場合でも周波数に依存して散乱減衰が大きくなり、その勾配もほぼ等しい。各関数型で差異が表れるのは $ka > 1$ の領域である。Gauss型は最も周波数依存性が強く、指数関数型、von Karman型 ($\nu=0.3$) の順に周波数依存性が弱くなり、遂に von Karman型 ($\nu=0.1$) ではほぼ平坦になる。これは、地盤の不均質性の相関特性が長周期成分を多く含むものから周期帯が広いものになるに従って、散乱減衰の周波数依存性の度合いが小さくなるということである。そこで、更に極端な例としてバンドリミテッド・ホワイトノイズの不均質地盤を作成して散乱減衰を求めた。ここで、バンドは波長2m~16mとした。

図-4にホワイトノイズの場合の散乱減衰を示す。シミュレーション結果は、図中に示した周波数の2乗に比例する直線と一致している。このように地盤の不均質性の相関が全く無い場合、散乱減衰は周波数または波数の2乗に比例することが分る。以上のことから、散乱減衰が周波数に依存して減少する現象は、地盤物性の空間的分布に相関があることに起因していることが分る。

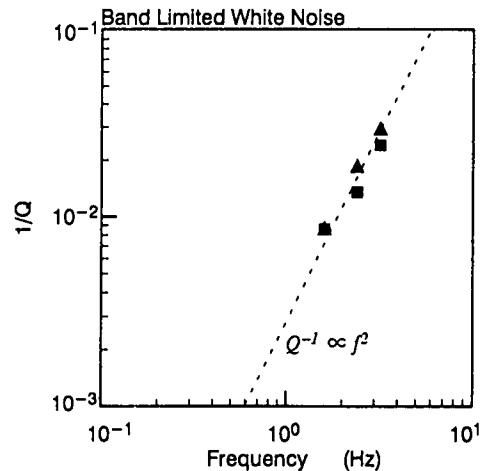


図-4 バンドリミテッド・ホワイトノイズ型不均質地盤の散乱減衰

5. おわりに

地盤の不均質性の統計的性質を表す自己相関関数の関数型に着目し、Gauss型、指数関数型、von Karman型の自己相関関数を用いて不均質地盤を作成し、数値シミュレーションによって各不均質地盤毎の散乱減衰を求めた。この結果、相関特性の違いによる散乱減衰の周波数依存性の変化が明確に表れた。これによると、一般に地震記録の観測に見られる周波数に依存して減衰が小さくなる現象は、地盤物性の空間的な分布に相関があることに起因していることが分った。更に、その空間的な物性の揺らぎに長周期成分が多く含まれる程、周波数に依存して減衰が小さくなる傾向が顕著に表れることが分った。

参考文献

- 1) 武村 他:表層地盤の地震時応答と減衰特性 その1 水平動, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.459~460, 1992.
- 2) Sato and Kawase : Finite Element Simulation of Seismic Wave Propagation in Near-Surface Random Media, International Symposium the Effects of Surface Geology on Seismic Motion, pp.257~262, 1992.
- 3) 藤谷 他:速度構造に異方性揺らぎを有する地盤中の地震波の散乱減衰, 土木学会第49回年次学術講演会, 第1部門, pp.1398~1399, 1994.
- 4) Frankel and Clayton: Finite Difference Simulations of Seismic Scattering : Implications for the Propagation of Short-Period Seismic Waves in the Crust and Models of Crustal Heterogeneity, JGR, pp.6465~6489, 1986.