

東京大学大学院 学生会員○ 中村博一
東京大学生産技術研究所 正会員 山崎文雄

1. はじめに 大規模構造物の地震時挙動予測をより現実的に行うには、表層地盤中の地震動の空間変動を3次的に考慮することが必要不可欠である。そのためには地表あるいは任意の深さにおける地震動の空間変動に加えて、その深さ方向に関する変化を知る必要がある。鉛直アレー観測記録に関しては、鉛直1次元波動伝播理論により比較的よく説明できることからこの理論を適用した研究^{例え1)}、あるいは地中観測記録自体の詳細に解析した研究などが数多くある^{例え2)}。また地表の平面アレー観測記録に関してもコヒーレンス関数などを用いた多くの研究がある^{例え3)}。しかしながら、利用できる3次元アレー観測記録があまりないことも影響して、観測記録に基づく地中での水平方向の空間変動、さらには3次元空間変動について検討している例はあまりない。なお表層地盤の速度構造に不均質性を割り付けた差分法や有限要素法の数値解析により、地震動の減衰や空間変動に対する不均質地盤の影響が検討されている^{例え4)}、それらは実証的というよりは定性的でありその不均質性に対する妥当性は示されていない場合が多い。

本研究では千葉アレーの地震観測記録⁵⁾に基づいて、表層地盤の不均質性の検証時に利用可能な地震動の空間変動パラメータの1つである時空間変動スケールについて、GL-1m, GL-10m, およびGL-20mの平面アレー観測記録に基づいた解析を行い、ここで考慮する比較的狭い水平面における時空間変動スケールの深さ依存性をモデル化する。時空間確率波から得られる時空間変動スケールとは、その時間変動および水平方向の空間変動の両方からの影響を含んだものであり、深さ方向に対する地震動の時空間変動の理解を容易にするために、必要な地震動パラメータの1つであると考えられる。

2. 確率波およびその2次の統計量 任意の深さ z における加速度記録の震央方向($j=R$)、震央直交方向($j=T$)、および上下方向($j=U$)の各振動成分を定常均質確率波とすると、 (x_r, x_t) 地点と $(x_r + \xi_r, x_t + \xi_t)$ 地点の片側パワースペクトル G_{jj} を用いて、コヒーレンス関数 γ_{jj} は(1)のように得られ、条件(2)を満たす。

$$\gamma_{jj}(\xi_r, \xi_t, z, f) = |G_{jj}(\xi_r, \xi_t, z, f)| / G_{jj}(0, 0, z, f) \quad (1)$$

$$\gamma_{jj}(0, 0, z, f) = 1.0 \quad (2)$$

また単位面積パワースペクトル(3)を用いて、時空間変動スケール(4)を得る⁶⁾。

$$g_{jj}(0, 0, z, f) = G_{jj}(0, 0, z, f) / \int G_{jj}(0, 0, z, f) df \quad (3)$$

$$\alpha_{jj}(z) = \int g_{jj}(0, 0, z, f) \iint \gamma_{jj}(\xi_r, \xi_t, z, f) d\xi_r d\xi_t df \quad (4)$$

(4)において、 γ_{jj} の ξ に関する平面内の積分値は、確率波の各振動数成分波の相関が比較的大きい範囲を表す相関面積と呼ばれるものである。したがって、各深さにおける α_{jj} は、 $g_{jj}(0, 0, z, f) df$ の重みを持つ相関面積の積分を表している。以下では、これらの γ_{jj} および α_{jj} の深さ依存性について検討する。

3. コヒーレンス関数 γ_{jj} の深さ依存性 本解析では千葉アレー観測記録⁵⁾を用いており、水平成分の加速度記録は R と T のものに変換している。また表1に示すように上下動で7.5秒、水平動で10秒という短い時間ウィンドーを考慮することにより、アレー観測記録を定常均質確率波であると仮定している。 γ_{jj} に関する解析手法の詳細³⁾についてはここでは省略する。

α_{jj} の解析の前に、まず地震動の空間変動を表す γ_{jj} の深さ依存性について調査する。解析にはGL-1m, GL-10m, およびGL-20mでの平面アレー観測記録を用いている。図1に地震記録8519の T から求めた各深さにおける2地点間C0-P4, P1-P3, およびP6-P7の γ_{jj} を示す。この図からもわかるように、 γ_{jj} は高振動数になるにつれて変動しながら減少しているが、5Hz付近で特に大きく減少している。これらの振動数は考慮する表層地盤の卓越振動数にはほぼ一致する。これらの大きな減少を除くと、つまり γ_{jj} の極大値³⁾を考慮すると γ_{jj} は深くなるにつれて大きくなっている。つまり基盤では地震動はほぼ均質であると考えられ

表1 P波・S波の時間ウィンドー(単位: 秒)

Event	P-window	S-window
8510	0.5~8.0	8.0~18.0
8519	2.0~9.5	11.0~21.0
8525	0.5~8.0	8.0~18.0
8601	0.5~8.0	9.0~19.0
8602	2.0~9.5	17.0~27.0
8722	0.5~8.0	8.0~18.0
8816	2.0~9.5	13.0~23.0
8823	2.0~9.5	11.0~21.0
9013	0.0~7.5	7.5~17.5
9014	0.0~7.5	7.5~17.5
9113	—	9.0~19.0
9202	0.5~8.0	12.0~22.0

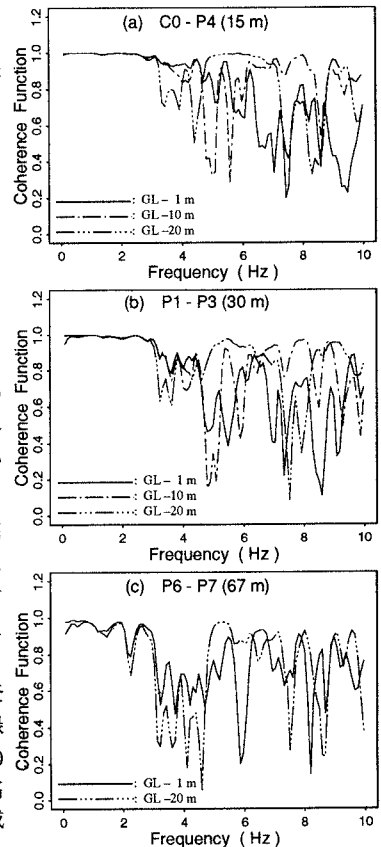


図1 記録8519の震央直交方向振動成分に対する各深さでの2地点間コヒーレンス関数

ることから、地中の γ_{ij} はその深さが基盤から地表に近づくにつれて徐々に乱され減少するということがこの結果から示唆される。またその減少は高振動数ほど大きい。ここでは地点間距離が67mまでの γ_{ij} のみを示しているが、この振動数依存性は近距離のものほど顕著である。この結果は工学的認識と調和的である。またこの結果から地震時に見掛け上一塊となって動く地盤のサイズは深いところほど大きいであろうということが推測される。図1は T に対してのみの解析結果を示しているが R および U に関しても同様の傾向がある。ただし U から得られる γ_{ij} に関しては水平成分の γ_{ij} と比較すると全体的に大きく、 U に対応する地盤の卓越振動数に関しては8Hz付近にあり水平成分のものと比較して高振動数側にある。

4. 深さ依存時空間変動スケール α_{0ij} およびそのモデル化 本研究では γ_{ij} の解析結果³⁾から(4)の無限積分の値の存在を前提としているが、地点間距離が約300m以上に関しては、利用しているアレー観測記録のカバーする範囲外なので、必ずしも適切な結果が推定されているとは限らない。また、深さ依存の傾向を調査するためにも α_{0ij} を意味のある値で正規化することが望ましい。ここでは千葉アレーがカバーしている ξ_0 に関する300m×300mの面積 A_0 で α_{0ij} を正規化したものを(5)のように新たに定義する。

$$\alpha_{0ij}(z) = \frac{1}{A_0} \int_f g_{ij}(0, 0, z, f) \iint_{\xi_0} \gamma_{ij}(\xi_r, \xi_t, z, f) d\xi_r d\xi_t df \quad (5)$$

実際に地点間距離に関する無限積分には危険が伴う。(5)の α_{0ij} を推定するために、地点間距離に関して適切に補間した γ_{ij} を用いることができるが、ここでは既に推定されている γ_{ij} モデル³⁾を用いる。各深さにおいて推定した水平2成分および上下成分に対する α_{0ij} の平均値および変動係数を各々図2の(a)および(b)に示す。図2(a)から各 α_{0ij} の値は深くなるにつれて1.0に近づいていることがわかる。また図2(b)から変動係数は全体的に0.3付近であるが、 R の変動係数はGL-1mのものだけ他と比べて大きく、 T の変動係数は深くなるにつれて大きく、 U の変動係数は深くなるにつれて小さくなっていることがわかる。地震動の空間変動パラメータである α_{0ij} の深さ依存性に対する解析結果を、鉛直アレー観測記録から得られる最大加速度などの最大地震動パラメータの深さ依存性に対する解析結果⁷⁾と比較すると、それらは最大地震動パラメータが大きくなるにつれて α_{0ij} が小さくなるという逆の傾向を示すが、その増加あるいは減少の傾向は極めて類似している。

通常データ数が少ない場合には意味のあるモデル化は非常に難しいが、漸近条件を持つ正規 α_{0ij} 、つまり α_{0ij} に対してはモデル化がそれほど無意味ではない。本研究では、 γ_{ij} の解析結果、図2(a)に示す α_{0ij} の値、および α_{0ij} が漸近条件を持つことを考慮し、 α_{0ij} モデルを(6)のように提案する。

$$\alpha_{0ij}(z) = 1 - c_d \exp(-z/z_c) \quad (6)$$

ここで $1 - c_d$ は地表面での α_{0ij} の値であり、 z_c はこのモデルの指数部の相関距離に対応するものである。図2(a)に示す α_{0ij} のデータを用いて、上式のモデルパラメータの値を図2(b)に変動係数の逆数を重みとした重み付き最小自乗法により推定した。その結果を表2に示しており、 c_d の値からは地表面での水平動に対する α_{0ij} の値が上下動のものの約0.9倍であること、 z_c の値からは水平動に対する相関距離が上下動のものの約1.7倍であることがわかる。また図2(a)には推定したモデルをデータと併せて示しており、GL-10mに対する α_{0ij} の平均値が他のものよりもモデル曲線から離れているが、モデルパラメータはよく推定されている。

5. まとめ 千葉サイトで観測されたGL-1m, GL-10m, およびGL-20mの平面アレー観測記録を用いて、表層地盤の不均質性の検証時に利用可能となる地震動の空間変動パラメータであるコヒーレンス関数ならびに時空間変動スケールについて解析を行い、時空間変動スケールの深さ依存についてはモデルを示した。また最大地震動パラメータに関する既往の研究結果との比較により、空間変動に関するパラメータは最大地震動パラメータとは逆に深いところほど大きくなるということを示した。

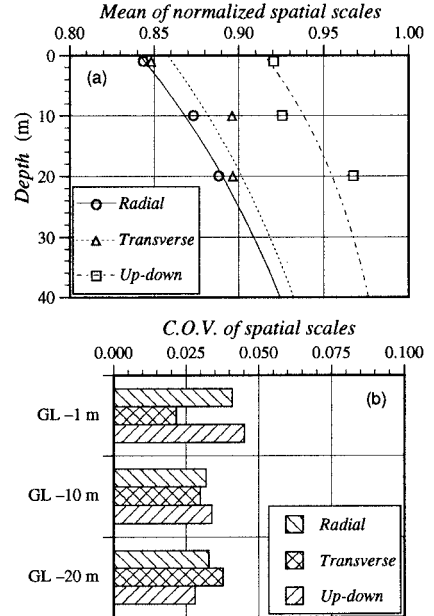


図2 各深さにおける時空間変動スケールの平均値および変動係数(水平: 12地震, 上下: 11地震)

表2 時空間変動スケールの深さ依存モデルに対するパラメータの推定結果

Vibration component	Parameters of the model c_d (-)	z_c (m)	Coefficient of determination
Radial	0.158	54.3	0.97
Transverse	0.142	54.1	0.78
Up-down	0.085	31.3	0.78

参考文献

- 1) Tanaka, T., S. Yoshizawa, T. Morishita, K. Osada, and Y. Osawa, *Proc. 5th World Conf. Earthquake Eng.*, pp. 658-667, 1974.
- 2) Malin, P. E., J. A. Waller, R. D. Borchardt, E. Cranswick, E. G. Jensen, and J. Van Schaack, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 78, No. 2, pp. 401-420, 1988.
- 3) Nakamura, H. and F. Yamazaki, *Transaction of the 13th SMIRT* (K361, to appear), 1995.
- 4) Menke, William, Arthur L. Lerner-Lam, and Rakesh Mithal, *Struct. Safety*, Vol. 10, pp. 163-179, 1991.
- 5) Katayama, T., F. Yamazaki, S. Nagata, L. Lu and T. Turker, *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, Vol. 19, pp. 1089-1106, 1990.
- 6) Vanmarcke, E., *Random Fields: Analysis and Synthesis*, MIT Press, Cambridge, MA, 1983.
- 7) Lu, L., F. Yamazaki and T. Katayama, *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, Vol. 21, pp. 95-108, 1992.