

(32) アレー観測記録に基づく表層地盤内の水平空間変動パラメータ

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、表層地盤内の地震動の空間変動を3次元的に考慮することが必要不可欠であり、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。水平成層自由地盤を対象とした既往の研究には、例えば鉛直アレー観測記録を1次元波動伝播理論に基づいて説明した研究¹⁾、地中観測記録自体を詳細に解析した研究²⁾、また、平面アレー観測記録を用いて地表のコヒーレンス関数を解析・モデル化した研究³⁾などがある。以上のような基盤上の土柱(1次元)あるいは地表面(2次元)の地震応答解析は数多く行われているが、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、地中での各層の空間変動、さらには3次元空間変動について観測記録に基づいて検討している研究⁴⁾はあまりない。一方、水平鉛直方向における地震動の空間変動の原因解明のために、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による数値解析が行われ不均質地盤による影響が検討されているが⁵⁾、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。

表層地盤内での地震外力の性質を理解するために、本研究では地震動の空間変動に着目し、地中での地震動の空間変動パラメータについて千葉アレーの地震観測記録⁶⁾を用いて検討する。ここでは地下-1 m、-10 m、および-20 mの平面アレー観測記録に基づき、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と考えられるコヒーレンス関数および空間相関係数を推定し、これらの深さ依存の特徴を考察する。ここで、振動数の次元を持つ空間相関係数は地点間距離のみの関数であり、深さ方向に対する地震動の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 水平成層地盤の深さ z の層での震央方向 ($j=R$)、震央直交方向 ($j=T$)、および上下方向 ($j=U$) の加速度記録を定常均質確率波とすると、 (x, x_0) 地点と $(x, \xi_r, x_0 + \xi_r)$ 地点で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。

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

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

考慮する時間ウィンドーおよび振動数帯域におけるその層を代表する分散 σ_{jj}^2 は (3) により得られ、 γ_{jj} と (4) で定義される単位面積を持つパワースペクトル g_{jj} を用いると、(5) で表される空間相関係数 η_{jj} が得られる^{7,8)}。

$$\sigma_{jj}^2(z) = \int_f G_{jj}(0, 0, z, f) df \quad (3)$$

$$g_{jj}(0, 0, z, f) = G_{jj}(0, 0, z, f) / \sigma_{jj}^2(z) \quad (4)$$

$$\eta_{jj}(\xi_r, \xi_r, z) = \int_f g_{jj}(0, 0, z, f) \gamma_{jj}(\xi_r, \xi_r, z, f) df \quad (5)$$

各深さにおける η_{jj} は、振動数領域に関して $g_{jj}(0, 0, z, f) df$ の重みを持つ γ_{jj} の積分を表している。また η_{jj} と確率波の他の2次の統計量との関係は次のように表される。まず G_{jj} と相関関数 R_{jj} の関係を (6) および (7) に示す。

$$R_{jj}(\xi_r, \xi_r, z, \tau) = \int_f G_{jj}(\xi_r, \xi_r, z, f) e^{2\pi i f \tau} df \quad (6)$$

$$G_{jj}(\xi_r, \xi_r, z, f) = 2 \int_{-\infty}^{\infty} R_{jj}(\xi_r, \xi_r, z, \tau) e^{-2\pi i f \tau} d\tau \quad (7)$$

ここで確率波として実体波を考慮し、例えば各地点の波形間の時間ラグ τ_{0jj} が振動数に依存しない場合には、 G_{jj} は (8) のように書き表すことができ、 R_{jj} 、 G_{jj} 、および η_{jj} の関係は (9) のようになる。

$$G_{jj}(\xi_r, \xi_r, z, f) = G_{jj}(0, 0, z, f) \gamma_{jj}(\xi_r, \xi_r, z, f) e^{-2\pi i f \tau_{0jj}(\xi_r)} \quad (8)$$

$$R_{jj}(\xi_r, \xi_r, z, \tau_{0jj}(\xi_r)) = \int_f |G_{jj}(\xi_r, \xi_r, z, f)| df = \sigma_{jj}^2(z) \eta_{jj}(\xi_r, \xi_r, z) \quad (9)$$

以下では、ここで示した γ_{jj} および η_{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⁶⁾を用いており、水平成分の加速度記録は震央方向成分と震央直交方向成分のものと変換している。また表-1に示すように上下動で初動部分の7.5秒、水平動で強振部分の10秒という短い時間ウィンドーを用いることにより、アレー観測記録を定常均質確率波であると仮定しており、有限の加速度記録から2地点間の γ_{jj} を得るためにバンド幅が0.4 HzのParzenウィンドーを用いてスペクトル

表-1 P波・S波の解析時間(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

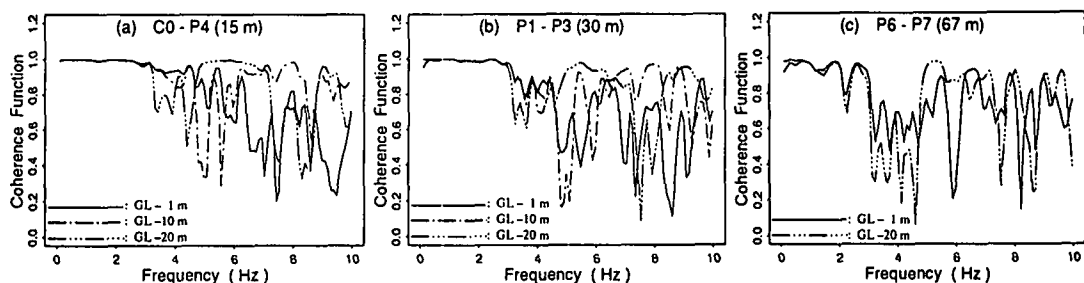


図-1 記録 8519 の震央直交方向振動成分に対する各深さでの 2 地点間コヒーレンス関数

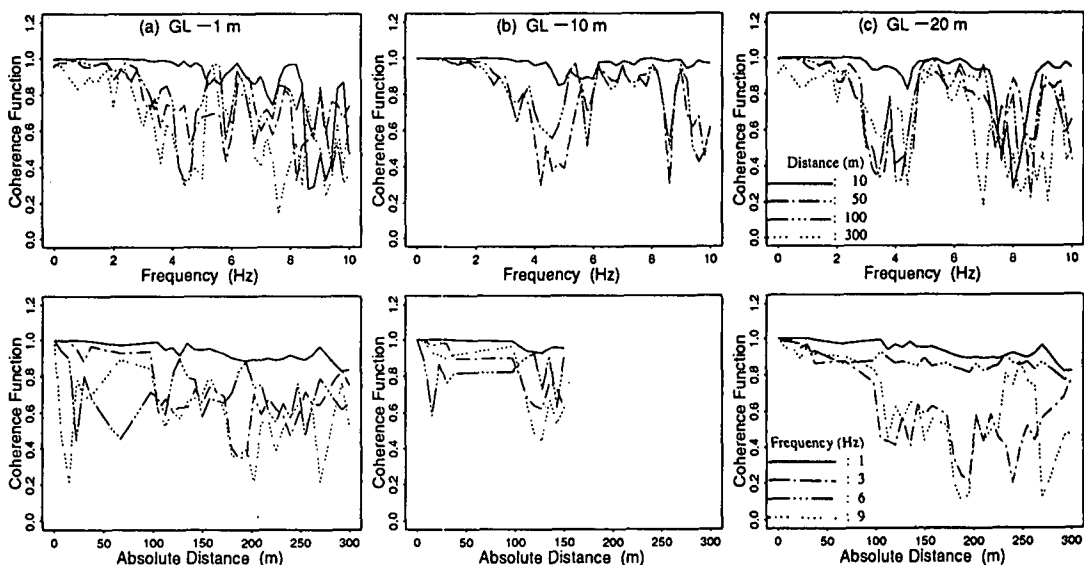


図-2 地震記録 8519 の震央直交方向振動成分に対する補間後のコヒーレンス関数 (上段: 振動数, 下段: 地点間距離)

の平滑化を行っている。ただし加速度記録のサンプリング間隔は 0.005 秒である。また、ここでは以上の γ_{ij} に関する解析手法の妥当性などについての説明は省略する。

空間相関係数の解析の前に、まず地下 -1 m, -10 m, および -20 m での平面アレー観測記録に対する γ_{ij} を解析し、 γ_{ij} の深さ依存性について検討する。例として図-1 に地震記録 8519 の震央直交方向成分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_{ij} を示す。各 2 地点間の γ_{ij} の特定した振動数での値を地点間距離に関して並べ変えて線形補間すると、振動数に関するものと同様に地点間距離に関する γ_{ij} が得られる。そこで図-1 と同様に地震記録 8519 の震央直交方向成分に対して利用できる地点の観測記録から γ_{ij} を推定し、地点間距離に関して線形補間した γ_{ij} を図-2 に示す。ここで地下 -10 m の平面アレー観測記録に関しては地点間距離が約 150 m までのものしか得られないため、図-2 (b) には 150 m 以上に対する結果は示されていない。また γ_{ij} は振動数に関しては等間隔であるのに対し地点間距離に関しては等間隔ではないこと、図-2 の下段には 1 Hz, 3 Hz, 6 Hz, そして 9 Hz に対して γ_{ij} を示しているが地点間距離に関する γ_{ij} は考慮する振動数によってかなり異なることに注意する必要がある。

図-1 および図-2 からわかるように、 γ_{ij} 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、5 Hz 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、つまり地表面と共振する振動数にほぼ一致する。 γ_{ij} が減少することにより地盤変位が生じることが示されており、地中においてはこれらの表層地盤の卓越振動数付近の成分波がその深さでの地盤変位に大きく寄与していることがわかる。考慮する振動数帯域での γ_{ij} の減少に関しては、全体的な単調減少に加えてこれらの表層地盤の卓越振動数付近の大きな減少に留意しなければならない。しかしながら、これらの大きな減少を除くと、つまり γ_{ij} の極大値を考慮すると γ_{ij} 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コヒーレントであると考えられることから、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の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とがわかる。図-1 には地点間距離が 67 m までの γ_{ij} のみを示しているが、図-1 および図-2 から、

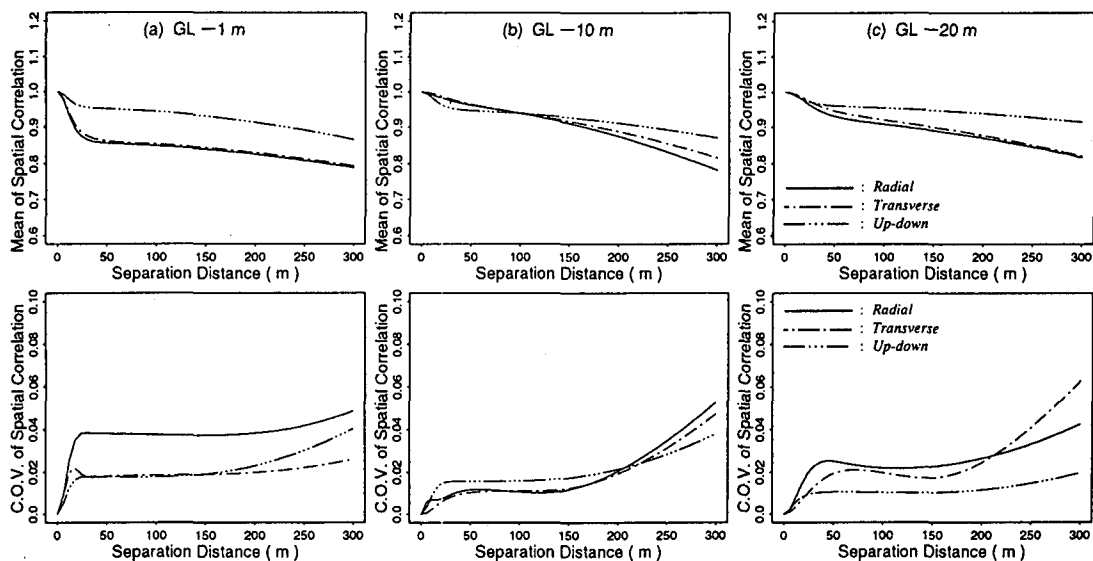


図-3 12 地震記録から求めた各深さでの空間相関係数 (上段: 平均値, 下段: 変動係数)

この γ_{ij} の深さ依存性は近距離のものほど顕著である。この解析結果は工学的認識と調和的であり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および図-2には震央直交方向成分に対してのみの解析結果を示しているが震央方向成分および上下成分に関しても同様の傾向がある。ただし上下成分から得られる 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、上下成分に対応する地盤の卓越振動数に関しては8 Hz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. 空間相関係数 η_{ij} およびそのモデル化 (1) および (2) の定義に基づいて、 γ_{ij} が振動数および地点間距離の増加により減少することを表す数多くの γ_{ij} のモデル式が提案されている。(5) の η_{ij} を推定するために γ_{ij} モデルの代りに地点間距離に関して適切に補間した γ_{ij} を用いることも考えられるが、ここでは既に推定されている γ_{ij} モデル³⁾を用いる。水平2成分および上下成分に対して地下-1 m, -10 m, および-20 mの各深さごとに計算した η_{ij} の平均値および変動係数を各々図-3に示す。ただしここでは地点間距離を震央方向に対して45°の方向にとっている。図-3の上段の図より各 η_{ij} の値は地点間距離が離れるにつれて小さくなっており、特に50 m以下の近距離においては γ_{ij} の減少傾向をよく反映している。また各地点間距離に関して η_{ij} は深いところほど1.0に近くなっていることがわかる。3成分の比較からは、上下成分の η_{ij} が水平成分のものより大きいことがわかる。ただし、地下-10 mの水平2成分に関しては近距離での減少がうまく表れておらず、 γ_{ij} の地点間距離に関するモデルパラメータの推定があまりうまく行われていないことがわかる。図-3の下段の図からは、各 η_{ij} の変動係数は地点間距離が離れるにしたがって大きくなる傾向を示していることがわかる。地点間距離が約150 mまでに関してみると、地下-1 mでは震央方向成分の変動係数が他の2成分のものと比べて大きく、地下-20 mでは上下成分の変動係数が他の2成分のものと比べて小さくなっている。これらの η_{ij} の解析結果は千葉アレー観測記録を用いた γ_{ij} の解析結果³⁾から求めているので、地下-1 mと-20 mに関しては地点間距離が約300 m以下を、地下-10 mに関しては約150 m以下をカバーするものである。また、利用しているアレー観測記録がカバーする範囲内に関してはそれなりに適切な結果が推定されていると考えられる。

通常データ数が少ない場合にはモデル化は難しいが、ここでは図-1と図-2に示す γ_{ij} の解析結果および図-3 (a) に示す η_{ij} の平均値から η_{ij} が深くなるにつれて1.0に漸近することを考慮して、 η_{ij} モデルを(10)のように提案する。

$$\eta_{ij}(z; \xi_r, \xi_t) = 1 - c_\eta(\xi_r, \xi_t) \exp \left\{ -z/z_\eta(\xi_r, \xi_t) \right\} \quad (10)$$

ここで $1 - c_\eta$ は地表面での η_{ij} の値であり、 z_η 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-3の(b) 地下-10 mの η_{ij} の推定結果があまり適切ではないと考え、ここでは図-3の(a) 地下-1 mと(c) 地下-20 mに示す η_{ij} の値を用いて、(10)のモデルパラメータの値を用いて計算した。その結果を図-4と図-5に示している。図-4は各地点間距離に対して地下-1 mと-20 mの η_{ij} の値および深さ方向に関する η_{ij} モデルを併せて示しており、この図より近距離のものほど地下-1 mと-20 mの η_{ij} の差が大きいことがわかる。また図-5 (a) は地表面での η_{ij} の減少を表しており、この図より c_η の値は近距離での急激な増加をとめない、地点間距離の増加とともに大きくなっていること、水平動に対する η_{ij} の値が上下動のものの2~3倍であることがわかる。一方図-5 (b) は η_{ij} の減少の相関距離

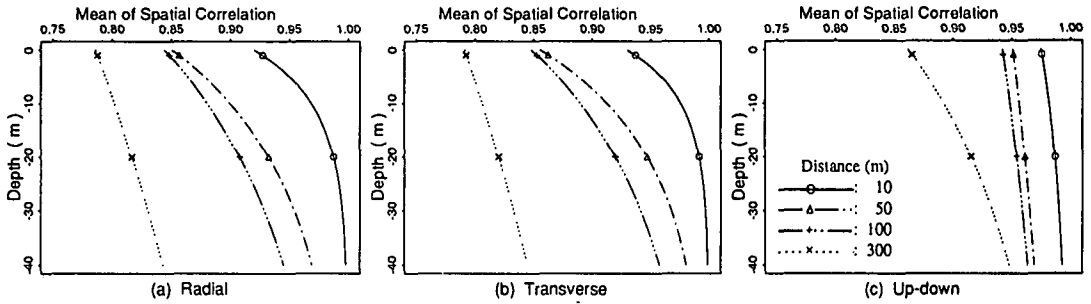


図-4 各地点間距離に関する空間相関係数の平均値およびその深さ依存モデル (水平: 12 地震, 上下: 11 地震)

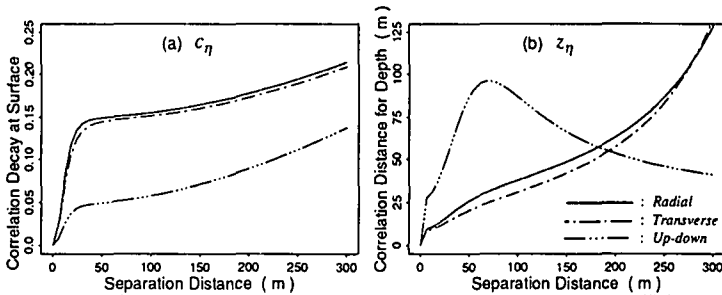


図-5 地点間距離に関する深さ依存空間相関係数モデルのパラメータの推定結果

z_c の値を表しており、水平動に対する z_c は地点間距離の増加につれて単調に大きくなっているのに対して、上下動のものは 70 m 位でピークを示している。これは水平成分に対する η_{ij} の値は地点間距離が離れるにしたがって地下 -1 m と -20 m の η_{ij} の差が小さくなっているのに対し、地点間距離が約 70 m 以上になると η_{ij} の値は逆に地点間距離が離れるにしたがって地下 -1 m と地下 -20 m の η_{ij} の差が大きくなっているためである。

5. まとめ 工学的にはほぼ水平成層自由地盤と考えることができる千葉サイトにおいて、地下 -1 m, -10 m, および -20 m の平面アレーにより観測された加速度記録の実体波部分を用いて、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空間相関係数について解析を行った。その結果、コヒーレンス関数は深いところほど大きくなる傾向を示し、特に近距離かつ高振動数域でその傾向が顕著であること、一方、空間相関係数も同様に深くなるにしたがって大きくなり、水平成分では近距離になるにつれて、上下成分では地点間距離が約 70 m を境にしてそこから離れるにつれてその傾向が顕著であることがわかった。また、振動数の次元を持つ空間相関係数の深さ依存についてはそのモデルを示し、その深さ方向の相関距離について考察した。ただしここではコヒーレンス関数の極大値を包括するように推定したモデルを用いているが、コヒーレンス関数には振動数領域全体に関する局所的な変動に加えて、地中ではさらに表層地盤の重複波の生ずる振動数付近で大きな減少があることがわかった。このことより、地盤内において本提案モデルを用いる場合には、考慮する深さにおいて地盤の卓越振動数付近のコヒーレンス関数の大きな減少を別途考慮する必要があることを示した。

最後に、ここで考慮した地震動の空間変動パラメータの深さ依存性に対する解析結果と鉛直アレー観測記録から得られる最大加速度に対する解析結果¹⁰⁾を比較すると、深くなるにつれて最大加速度は小さくなるが、空間変動パラメータは逆に大きくなるという傾向を示し、その増加あるいは減少の傾向は逆ではあるが類似していることがわかった。

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) Katayama, T., *Structural Safety*, Vol. 10, pp. 27-51, 1991.
- 5) Menke, William, Arthur L. Lemer-Lam, and Rakesh Mithal, *Struct. Safety*, Vol. 10, pp. 163-179, 1991.
- 6) Katayama, T., F. Yamazaki, S. Nagata, L. Lu and T. Turker, *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, Vol. 19, pp. 1089-1106, 1990.
- 7) Vanmarcke, E., *Random Fields: Analysis and Synthesis*, MIT Press, Cambridge, MA, 1983.
- 8) Harada, T., *Proce. 8th World Conf. Earthquake Eng.*, Vol. II, pp. 605-612, 1984.
- 9) 川上英二, 佐藤靖彦, 土木学会論文報告集, No. 337, pp. 37-46, 1983.
- 10) Lu, L., F. Yamazaki and T. Katayama, *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, Vol. 21, pp. 95-108, 1992.