

拡張クリギング法による表層地盤の固有周期依存型 SI 値・伝達関数の
尾張旭市内の空間分布解析
伝達関数となるスペクトル比について

Results of Spacial Statistical Analyses on Application of Kriging Method
For Providing Digital Hazard Maps of Strong Ground Motion in the City of Owariasahi
Influence of Mesh size on the Accuracy of Estimations of Earthquake Ground Motion

菅井径世*・森保宏**・安江健一***・廣内大介****・
宮本愛恵美*****・武田美季穂*****

SUGAI Michiyo*, MORI Yasuhiro**, YASUE Ken-ichi***, HIROUCHI Daisuke****

MIYAMOTO Aemi***** and TAKEDA Mikiho*****

*名古屋産業大学大学院・**名古屋大学大学院・***富山大学・****信州大学大学院
*****名古屋産業大学

*&*****Nagoya Sangyo University・**Nagoya University・***Toyama University・****Shinshu University

Abstract: A part of the present report is excerpted from the some results of the paper entitled “A Case Study of Influence of Mesh Size on Accuracy of Earthquake Ground Motion Intensity Estimation”, which is published in 5th International Symposium on Reliability Engineering and Risk Management. The aim of the present paper is to report the impact of mesh sizes on accuracies of estimation of earthquake ground motions intensity. For the purpose of earthquake damage estimation in a municipality, hypothetic ground models are often created for meshes that cover the city. When large meshes are employed, the average of the ground motion intensities within a mesh can be estimated with relatively high accuracies, though the ground motion intensities greatly vary from point to point in a mesh. With small meshes, the ground motion intensities do not vary much within a mesh, though accurate estimation cannot be expected. Here, the estimated values of earthquake ground motion intensities using hypothetic ground models and their accuracies in typical sizes of meshes are investigated using the modified Kriging method, with which the ground motion intensity at an arbitrary point in the city can be estimated with quantitative measure of accuracy (Akaike1973). Based on the case study in Owari-asahi city, Aichi Prefecture, Japan, the influences of mesh sizes are also discussed from the viewpoints of both accuracies and variation.

Key Words: Kriging Analysis; Seismic Hazard; Variation; Case Study; Estimation Error

1. はじめに

1-1. 概要

著者らは、平成23年度の年報において、高精度な地震災害情報システムの構想を提案した。クリギング法と呼ばれる最も一般的かつシステムティックな統計解析法(=地球統計学：不偏線形最尤法)を活用すれば、任意の地点(=ピンポイント)での地震動推定が可能である。

これ以降、毎年、確実に大きな進歩を遂げ、尾張旭市での実用化を機に、多くの自治体で導入が検討され始めている。このように短期間で、新しいシステムの採用には慎重とならざるを得ない自治体、行政が、著者らが講演会を開くたびに興味を持ち、導入を検討されていることは特筆すべきである。

平成24年度には、このクリギング法が、客観的実測データのみを利用しながらも、最も高精度に、しかも、コストを大幅に抑えて、地震対策の中心的役割を担うべき中小自治体にも装備可能なハザードマップ、被害想定マップの作成システムとなることを示してきた。

平成25年度には、低コストで開発した地震計測装置により、提案システムの精度を、客観的に、最高精度を保持、更新することが可能であることと、リアルタイム(発災時)の地震対策にも利用可能であることを示した。

平成26年度、尾張旭市は、これまでに著者らが積み重ねてきた研究成果を採用し、本システムを実用に資して全面的に活用した、地震ハザードマップ及び、被害想定マップを作成した。

平成27年度、尾張旭市は、成果をまとめて、9月1日において、ハザードマップを市内全戸配布しているが、その後も、このマップを別途求められることも非常に多い。市の災害対策室によれば、市のHPでも公表されている一方で、1日に数部程度、印刷されたマップを提供することも頻繁にあるそうである。マスメディアからの取材も多い。

平成28年度、著者らは、海津市の1部で試算を行うなどし、著者らが構築したシステムが、尾張旭市のみでなく、他市へも容易に導入可能であることを再確認しつつある。また、尾張旭市内外において、講演活動をおこないながら、昨年度までに開発した地震計を持って、市民らの協力を得えながら、尾張旭市での地震観測活動を継続した。さらに、地表面

と比較して工学基盤面上の地震波の空間的変動がかなり小さいことを、尾張旭市を事例として定量的に証明した。著者らが構築したシステムが、尾張旭市のみでなく、他市へも容易に導入可能であることを再確認しつつある。また、尾張旭市内外において、講演活動をおこないながら、前年度までに開発した地震計を持って、市民らの協力を得えながら、尾張旭市での地震観測活動を継続した。

平成29年度には、尾張旭市の推定結果を事例として、メッシュサイズが推定精度に与える影響を、ブロック・クリギング法によって解析した結果を示した。

既存の研究成果として、想定地震による工学的基盤面での250mメッシュごとの地震動を基に、建物ごとに入力する地震動の推定手法が提案されているが、著者らは研究協力者との議論において、この手法をリアルタイムで建物ごとの地震動推定に用いるためには、工学的基盤面における地震動およびその空間分布を評価することが非常に重要であり、この評価が可能であるか、また、評価結果が実用に利用できるのかを確認することが必要であるとの結論に至った。

本研究の最も特徴的な建物ごとの(任意地点における)地震動推定に対し、メッシュごとに仮想地盤モデルを作成して地震動推定をする場合、客観性が失われる、精度が不明である、さらに作成にも、修正にも著者らの提案法と比較すれば膨大なコストを必要とする等の問題点があることは指摘してきた。

しかしながら、そうした実態にもかかわらず、メッシュサイズを小さくすることにより詳細な地震動マップを作成する試みが継続されている事例がある。

メッシュサイズを小さくすると、あたかも詳細な地震動マップが得られたような錯覚を与える。しかしながら、メッシュサイズを小さくしても、地震動の推定の根拠となるボーリング調査などによる地盤情報が増えるわけではなく、精度の低い推定結果であるメッシュの数が増えるのみであるとの論理的推論は容易に立てることができる。平成29年度報告書は、この推論を定量的に証明するものである。これにより、客観性や、維持管理を含むコストパフォーマンスに関する問題のほか、精度に関する問題について確認した結果を報告した。

平成29年度、著者らは、地震被害想定に利用さ

れる最大速度の建物ごとの統計解析結果について国際会議において公表した。

平成30年度には、以上の研究成果を踏まえ、尾張旭市内の表層地盤における伝達関数の空間分布に関する解析結果について報告した。

すなわち、著者らは、解析対象である尾張旭市とその周辺部の領域内において密に採集されたボーリング等の表層地盤データと、想定地震を用いた当該地点での表層地盤における伝達関数、および拡張クリギング法によって全建物地点等の任意地点での伝達関数を周波数毎に推定することで、限られた地震観測地点から工学的基盤面におけるスペクトル評価と空間補間計算を経て、任意地点での地表面における加速度フーリエ振幅スペクトルを推定する手法を提案した。

表層地盤の伝達関数の空間分布が精度よく推定できれば、リアルタイムにおける地震被害想定システムやその他の災害対応システムシステム開発が現実的なものとなり、発災時のみならず事前対策の最適化を図ることも可能となること、

令和元年度、著者らは、地震被害想定に利用することができる固有依存型 SI 値の観測記録と、推定値の比較をもとに、想定震源による地震動に対しても、リアルタイムに観測された振動に対しても、適切な地震計の配置により、精度よく地震動を推定できることを証明し、日本建築学会構造系論文集において公表した。

本報告では、この結果のスペクトル比について詳細に示す。

1-2. 対象とした想定震源と地震動パラメータ

表1に、尾張旭市の実際の業務で対象とした6種類の想定震源を示す。表1に示したように、尾張旭市では、東海・東南海の2連動地震、東海・東南海・南海の3連動地震と、東海・東南海・南海・日向灘の4連動地震の陸側における震源を対象としている。特に、東海・東南海・南海・日向灘の4連動地震に関しては、平成26年5月に愛知県から被害予測の調査結果が報告されている。この報告によると、南海トラフで繰り返し発生する地震について「過去最大モデル」と「理論上最大モデル」によって想定している。「過去最大モデル」は、南海トラフで繰り返し発生している地震の中で、発生したことが明

表1. 対象とした想定地震

想定震源名	備考 (提供元)
東海・東南海地震	2連動地震 (愛知県)
東海・東南海・南海地震	3連動地震 (内閣府)
南海トラフ地震 (過去最大)	東北地方太平洋沖地震を受けて想定されたもの (愛知県)
南海トラフ地震 (東側)	
南海トラフ地震 (陸側)	
高浜一猿投断層地震	(尾張旭市)

らかで規模の大きいもの (宝永、安政東海、安政南海、昭和東南海、昭和南海の5地震) を重ね合わせたモデルである。「理論上最大想定モデル」は、千年に一度あるいはそれよりもっと発生頻度が低いものであり、南海トラフで発生する恐れのある地震の中で、あらゆる可能性を考慮した最大クラスの地震を想定している。この「理論上最大想定モデル」は陸側ケースと東側ケースの2つのケースに分けて検討している。参考までに、表1に示した震源に対して推定した、地震動6種および被害想定パラメータ3種を表2に示す。

本報告では、表1と表2による6×9種の推定結果のうち、「2連動地震」(以下2Rと呼ぶ)と「理論上最大想定モデル」の陸側ケースの想定地震(以下4Rと呼ぶ)に対する、PGVと計測地震動を解析対象とする。

1-3. 推定に用いたボーリングデータ

ボーリングデータは、尾張旭市が同市内に存在するデータを電子化したもののうち、位置情報が明確な677地点を選択している。

第4章において、仮想都市における推定ハザードマップを示すが、実際の尾張旭市の推定結果を示さない理由は、市行政が個人住宅の地点における推定結果を一般には公表しない方針を立てているためである。仮想都市を用いる場合、選択したボーリングの緯度、経度に対して座標変換を行い、仮想都市でのボーリングデータとしている。

1-4. 本報告での解析対象

本報告での解析対象地域は愛知県尾張旭市を中心とする概ね半径 15km の範囲としている。尾張旭市では 6 種類の想定地震を用いて地震ハザード評価が行われている³²⁾が、本研究ではその中の愛知県が内閣府の検討を基に想定した南海トラフを震源とする南海トラフ巨大地震²¹⁾である過去最大、理論最大・東側、理論最大・陸側（以下、過去最大、東側、陸側）の 3 種類を対象とした。

上記の 3 種類の想定地震については、工学的基盤面上において尾張旭市を含む県全体で 250 m メッシュごとに地震波形が計算されている。これらを利用して、工学的基盤面上における地震動分布の計算を行った。

2. 空間統計解析のための基礎方程式

2-1. 定式化の概要

本研究では、空間統計法のうち、最少二乗不偏線形推定値を求めるクリギングの各手法を利用することにより新しい地震動予測方法を提案する。この方法によれば、任意の空間における地震動パラメータの分布推定及びその精度推定が可能であり、予測が客観的であり、地震動パラメータの算出における人為的ミスが少なくなり人件費を低廉化することが可能である。また、実際に起こった地震において計測された地震動パラメータと予測された地震動パラメータとの、より有意な統計的キャリブレーションが可能であり、両パラメータの相関関数の同定と相関精度推定が可能である地震動予測方法の評価方法を提供できる。さらに、この相関関数と推定精度は、より高精度で信頼度の高い地震動予測を実施するために役立たせることができる。

すなわち、本研究では、第 1 に、ボーリング情報に基づく地震動予測方法を開発する。この手法では、最初に、ボーリング調査によって実測された柱状図や各地層の N 値等の地盤データをもとに、将来起こるであろう仮想地震に対してボーリング地点における地震動パラメータを算出する。ここで、地震動パラメータとは、例えば最大加速度、最大速度、最大変位、震度、実効加速度、卓越周期、S I 値等である。次に、算出した多数の地震動パラメータに基づき、クリギングの手法によって、任意地点又は任意領域における地震動パラメータを客観的に推定し、その推定誤

差を算出する。本章では、この推定誤差(精度)を“空間分布推定誤差(精度)”と呼ぶこととする。クリギングの手法としては特に限定はなく、トレンドが一定でかつ既知という条件で解析するシンプル(単純)クリギング、トレンドが未知という条件で解析を行うオーディナリー(通常)クリギング、トレンドを位置の関数の線形結合として解析するユニバーサル(普遍)クリギング、ノンリニア(非線形)クリギング等の各種クリギングの手法を、データの性質に応じて用いることができる。この地震動予測方法における作業は、電子化されたデータを計算機によって処理することにより実行できる。しがたって、人為的判断によって作成された地盤モデルに基づくことなく、その予測を客観的に行うことができる。すなわち、人為的ミスもなく、人件費も低廉となる。

また、この手法を基本として、地震観測装置が設置されている観測地点において実際に発生した実地震の地震動パラメータをもって、当該の実地震を想定してボーリング地点で算出した地震動パラメータとの共変量クリギングを行うことにより、客観的、統計的に、観測した地震動パラメータと計算した地震動パラメータとのキャリブレーションを行い、2つのパラメータの相関関数を同定し、相関精度を推定することが可能となる。観測地点でこの相関関数と相関精度を利用すれば、計算した地震動パラメータから実際の地震動パラメータを補正予測し、その予測精度を計算することができる。共変量クリギングの手法を用いれば、観測地点とボーリング地点の位置や数が一致していなくても、地震動パラメータのキャリブレーションを行うことができる。すなわち、多数のデータによる精度の高い統計的キャリブレーションを行う

表 2. 推定した地震動・被害想定パラメータ

地震動・被害想定パラメータ	備考
最大加速度 (PGA)	加速度 瞬時の衝撃
最大速度 (PGV)	リスク計算に利用
計測地震度	地震動の一般的指標
SI 値 (揺れの指標)	一般的な構造物
PL 値	液状化の指標
沈下量	液状化に伴う
半壊リスク	PGV と建物強度より
全壊リスク	PGV と建物強度より
死亡リスク	PGV と建物強度より

ことができる。あるいは、ボーリング地点で推定し、補間することにより推定した観測地点での補間推定値と、当該の観測地点で実測した地震動パラメタを比較することで予測精度を計算することができる。このとき、算出した相関精度は、地震動予測方法の精度の指標とすることができる。本研究では、この推定誤差(精度)を“解析誤差(精度)”と呼ぶこととする。すなわち、この精度を評価指標規準として、各種の地震動予測方法の優劣を判断することができるので、より精度の高い地震動予測方法を開発する際に利用できる。

なお、キャリブレーションの精度は、一般に、計測された地震動パラメタおよび算出された地震動パラメタのデータ量が多くて多様なほど向上する。すなわち、今後、実地震が発生する度に、より多様な地震動パラメタが観測され、より多数の観測地点においてより多数の地震動パラメタが蓄積される時、キャリブレーションの精度を向上させることができる。また、観測地点の周辺内において、より多くの地盤データが採取され、算出される地震動パラメタの数が増加するほど、キャリブレーションの精度が向上する。多数の多様なデータが蓄積されれば、より詳細な地震動予測方法の評価が可能となり、より精度の高い地震動予測方法を開発する際にも有利となる。

すなわち、以上の手法により、地盤地震動の地域性や局所性を予測できるとともに、予測精度も明確となる。したがって、合理的な性能設計法を活用する際にも極めて有利である。さらに、都市再生プロジェクトにおいては、撤退か耐震化かを議論する際にも重要な情報を提供できる。結果として、安全・安心の社会形成へ大きく役立てることができる。

2-2. クリギングによる地震動空間分布解析法の提案—クリギング法の定式化

① はじめに

地震動パラメタが空間分布する領域において、いくつかの特定(ボーリング)地点において計算した地震動パラメタから、クリギング法によって任意の地点(あるいは任意の部分領域)における地震動パラメタを推定することができる。

このためには、特定地点において計算した地震動パラメタから領域を表現する確率場モデルを推定し、同定する必要がある。

一般に、ボーリング地点における地震動解析については、既に提案されているいくつかの手法を利用することができる。後述するが、各手法の精度については、クリギング手法を活用することにより、統計的、客観的に推定することが可能である。また、確率場モデルを同定すれば、直ちに、これに基づいて、特定地点において計算した地震動パラメタから統計的補間を行い、各任意地点における推定値と推定にともなう推定誤差を求める作業が可能となる。この空間補間計算は、現代のコンピュータを持ってすれば容易な作業であり、短時間で客観的に完了することができる。

すなわち、クリギング推定において最も重要な解析は、確率場モデルの同定であり、特に自己相関関数の推定である。全体の推定精度は、ほぼ自己相関関数によって支配されるのである。また、確率場モデルの同定は、データによって難易度が異なり、精度にも影響を及ぼす。確率場モデルの同定は、重要であり、高度な解析技術を要するクリギング推定法の要である。本節では、いくつかの同定手法を紹介し、実際のボーリング地点における地震動計算結果を利用して、その有効性を確認する。

また、その後、クリギング手法を活用したボーリング地点における地震動の計算精度の推定法についても論述する。

② 確率場モデルの推定方法

最初に、ボーリング地点 $\mathbf{u}_i = \mathbf{u}(x_i, y_i)$ において、調査されたボーリングの実データから地震動パラメタ $\mathbf{z}(\mathbf{u}_i)$ を計算する。

最初に、対象とする地震の震源モデルを仮定する。近年、東南海地震、東海・東南海連動型地震、あるいは南海地震や、これら東南海地震と南海地震の連動型地震等の震源想定についての研究が進められており、いくつかの震源モデルが提案されている。活断層等、想定される他の震源についても、いくつかの震源モデルを仮定することが可能であり、今後発生する地震については、こうした震源モデルをいくつか仮定することから地表の地震動を推定することになる。

想定した震源から工学的基盤面(=表層地盤の底面)までに存在する“工学的基盤”内における地震波の伝播に関しては、上記のようなハイブリッド法等を利用することができる。すなわち、こうした手法に

より、表層地盤の底面に伝わる地震波を推定することが可能である。

このとき、上記のように、FDEL、FLUSH、SHAKE等の解析方法を利用することにより、ボーリング底部(=表層地盤の底面)において推定された地震波から、地表面(=表層地盤の上面)の地震波=地震動を計算することができる。

ただし、今後発生する地震の予測ではなく、工学的基盤や表層地盤における地震動伝播解析手法の精度を推定するために行う既往の地震のシミュレーション解析においては、実測した地震波を利用することができる。工学的基盤の表層については、例えば、KiK-Netをそうした深い位置での地震動波形を計測するためのネットワークとして活用できる。また、表層基盤の表層(地表)については、K-Net等が、地表における地震動波形を計測するために活用できるネットワークの代表例である。

ボーリング底面に伝播した地震動を入力パラメータとし、既往の解析手法とボーリング情報によって n 個のボーリング地点で計算された地震動パラメータを次式のような地震動パラメータベクトル \mathbf{z} で表す。

$$\mathbf{z} = \{z(\mathbf{u}_1), \dots, z(\mathbf{u}_n)\} \quad (1)$$

\mathbf{z} は、例えば、高さや色によって、その大きさと位置分布を表現することができる。

このとき、計算した任意地点の地震動パラメータ $z(\mathbf{u}_i)$ と $z(\mathbf{u}_j)$ の共分散関数 $C(\mathbf{u}_i, \mathbf{u}_j)$ による共分散行列を \mathbf{C} とする。ここで共分散関数 $C(\mathbf{u}_i, \mathbf{u}_j)$ とは、 \mathbf{u}_i と \mathbf{u}_j で計算した $z(\mathbf{u}_i)$ と $z(\mathbf{u}_j)$ の相関性の度合いを表した関数であり、一般に \mathbf{u}_i と \mathbf{u}_j の間の距離 $h=|\mathbf{h}|$ が長くなるほど小さく(相関性が小さく)なるような確率モデルによって表される。例えば、以下のような指数型モデル等が利用される。

$$C(\mathbf{u}_i, \mathbf{u}_j) = C(\mathbf{h}) = \sigma^2 \rho(h) = \sigma^2 \exp\left(-\frac{h}{\ell}\right) \quad (2)$$

$$\text{ここで } \ell > 0 \text{ and } h = |\mathbf{h}| = |\mathbf{u}_i - \mathbf{u}_j| \geq 0 \quad (3)$$

ここで、 σ^2 はシル、 ℓ は自己相関距離と呼ばれる正の係数である。上式から分かるように、 $\rho(0)=1$ 、で $\rho(\infty)=0$ である。 $\rho(h)$ は、 h が増加するにつれて急速に減少する。

このとき、 \mathbf{u}_i と \mathbf{u}_j との共分散関数 $C(\mathbf{u}_i, \mathbf{u}_j)$ による

共分散行列 \mathbf{C} は、一般に、次式のように表すことができる。

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} C(\mathbf{u}_1 - \mathbf{u}_1) & C(\mathbf{u}_1 - \mathbf{u}_2) & \cdots & C(\mathbf{u}_1 - \mathbf{u}_n) \\ C(\mathbf{u}_2 - \mathbf{u}_1) & C(\mathbf{u}_2 - \mathbf{u}_2) & \cdots & C(\mathbf{u}_2 - \mathbf{u}_n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C(\mathbf{u}_n - \mathbf{u}_1) & C(\mathbf{u}_n - \mathbf{u}_2) & \cdots & C(\mathbf{u}_n - \mathbf{u}_n) \end{bmatrix}$$

(4)

また、地震動パラメータの計算値の空間分布が正規確率密度分布にしたがうと仮定すれば、 n 個のデータから得られる同時確率密度関数 $p(\mathbf{z}|\boldsymbol{\theta})$ は次式で得られる。

$$p(\mathbf{z}|\boldsymbol{\theta}) = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\right)^n |\mathbf{C}|^{-\frac{1}{2}} \exp\left\{-\frac{1}{2}(\mathbf{z}-\boldsymbol{\mu})^T \mathbf{C}^{-1}(\mathbf{z}-\boldsymbol{\mu})\right\} \quad (5)$$

ここで $\boldsymbol{\mu}$ は地震動パラメータのトレンドベクトル $\boldsymbol{\mu} = \{\mu(\mathbf{u}_1), \dots, \mu(\mathbf{u}_n)\}^T$ である。 $\mu(\mathbf{u}_i)$ は、以下に示すトレンド関数 $f_k(\mathbf{u}_i)$ ($k=0, \dots, K$) によるトレンド関数ベクトル $\mathbf{f}(\mathbf{u}_i)$ と、係数パラメータ b_k ($k=0, \dots, K$) による係数パラメータベクトル \mathbf{b} とによる位置座標 \mathbf{u}_i の関数モデルであると仮定することが多い。すなわち、

$$\mu(\mathbf{u}_i) = \sum_{k=0}^K b_k f_k(\mathbf{u}_i) \quad (6)$$

において、 $\mathbf{f}(\mathbf{u}_i)$ は次式のように表される。

$$\mathbf{f}(\mathbf{u}_i) = \{f_0(\mathbf{u}_i), \dots, f_K(\mathbf{u}_i)\}^T \quad (7)$$

また、係数ベクトル \mathbf{b} は次式のように表される。

$$\mathbf{b} = \{b_0, \dots, b_K\}^T \quad (8)$$

ここで \mathbf{X} は次式のようなトレンド行列とする。

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} f_0(\mathbf{u}_1) & f_1(\mathbf{u}_1) & \cdots & f_K(\mathbf{u}_1) \\ f_0(\mathbf{u}_2) & f_1(\mathbf{u}_2) & \cdots & f_K(\mathbf{u}_2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_0(\mathbf{u}_n) & f_1(\mathbf{u}_n) & \cdots & f_K(\mathbf{u}_n) \end{bmatrix} \quad (9)$$

この時、 $\boldsymbol{\mu}$ は次式のように表すことができる。

$$\boldsymbol{\mu} = \mathbf{X}\mathbf{b} \quad (10)$$

ここで、クリギング法による地震動の統計的空間補間をする際には、地震動の空間分布の統計モデルである上記の共分散関数行列 \mathbf{C} とトレンド行列 \mathbf{X} および係数ベクトル \mathbf{b} を決定する必要がある。

③ 共分散関数ーバリオグラム関数およびトレンド関数の推定方法

i. はじめに

上記のように、自己相関関数 $\rho(\mathbf{u}_i, \mathbf{u}_j)$ は、地震動パラメタの空間分布のばらつき、特に地点 \mathbf{u}_i と \mathbf{u}_j における地震動パラメタ $\mathbf{z}(\mathbf{u}_i)$ と $\mathbf{z}(\mathbf{u}_j)$ の相関性を表している。自己相関距離 ℓ は、ばらつきの大きな地盤において短く、比較的均質な地盤において長い。地震動パラメタ \mathbf{z} の空間分布は特にこの自己相関距離 ℓ によって表現される。地震動パラメタの空間分布を表現するパラメタ(トレンド関数 $\mu(\mathbf{u})$ 、分散(シル) σ^2 、自己相関距離 ℓ) のなかでも、自己相関距離 ℓ の推定が最も難しいことが知られている。

一方、指数型、双曲型、球型など多数が提案されているが、パラメタの空間分布のばらつきが大きい地盤工学においては自己相関関数のタイプが計算に影響するようなことは稀である。

以下においては、地震動パラメタの自己相関関数のパラメタを適切に決定する代表的な方法を紹介する。ただし、手法の選択について重要なのはデータの性質や量によって手法を使い分けることであることを記しておく。

ii. 最尤法

最尤法は、最も一般的に確率場あるいは確率場を現す統計パラメタを推定する手法であり、上記の同時確率密度関数 $p(\mathbf{z}|\mathbf{b}, \boldsymbol{\theta})$ 、または下記のように同時確率密度関数 $p(\mathbf{z}|\mathbf{b}, \boldsymbol{\theta})$ の対数値 $L(\mathbf{z}|\mathbf{b}, \boldsymbol{\theta})$ の最大化を基準として、モデルパラメタを決定する手法である。

$$\begin{aligned} L(\mathbf{z}|\mathbf{b}, \boldsymbol{\theta}) &= \ln p(\mathbf{z}|\mathbf{b}, \boldsymbol{\theta}) \\ &= -\frac{n}{2} \ln(2\pi) - \frac{1}{2} \ln |\mathbf{C}| - \frac{1}{2} (\mathbf{z} - \mathbf{X}\mathbf{b})^T \mathbf{C}^{-1} (\mathbf{z} - \mathbf{X}\mathbf{b}) \end{aligned} \quad (11)$$

ここで、 $|\mathbf{C}|$ は \mathbf{C} の行列式(determinant)、 \mathbf{C}^{-1} は \mathbf{C} の逆行列である。

また、このとき、トレンド成分 $\mathbf{X}\mathbf{b}$ の係数パラメタベクトル \mathbf{b} については、次式の最小二乗法で推定することができる。

$$\hat{\mathbf{b}} = (\mathbf{X}^T \mathbf{C}^{-1} \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{C}^{-1} \mathbf{z} \quad (12)$$

ただし、上式には、共分散行列 \mathbf{C} の逆行列が含まれるため、係数パラメタベクトル \mathbf{b} は、対数尤度 $L(\mathbf{z}|\mathbf{b}, \boldsymbol{\theta})$ を最大化する過程で同時に求めることとなる。

iii. AIC を利用する方法

上記からも明らかなように、例えば、トレンド関数における係数のパラメタ数(次数 K) 等は任意の数値である。また、共分散関数のパラメタ数等も任意である。一般に、同時確率密度関 $p(\mathbf{z}|\mathbf{b}, \boldsymbol{\theta})$ の対数値 $L(\mathbf{z}|\mathbf{b}, \boldsymbol{\theta})$ の最大値は、パラメタ数を多くすることによってより大きくすることが可能である。しかしながら、パラメタ数を多くすることで、データ \mathbf{z} が本来内在している情報量より以上に最尤値を最大化しても適切ではない。

一般に赤池統計量 AIC は、パラメタ数 m と対数最大尤度 $\text{Max}\{L(\mathbf{z}|\mathbf{b}, \boldsymbol{\theta})\}$ との適切なバランスを取るために利用される基準である。すなわち、確率場モデル、すなわち、共分散関数 $C(\mathbf{u}_i, \mathbf{u}_j)$ やトレンド関数 $f(\mathbf{u}_i)$ 等の同定には、最大対数尤度とパラメタの数 m に基づく情報量基準である AIC(赤池統計量) 基準によってその優劣を検討した結果を利用することができる。AIC は、下記のように最大対数尤度の 2 倍の負値とモデルパラメタ数 m の 2 倍との和を最小化する基準として定式化されている(Akaike1973)。

$$\text{AIC} = -2 \times \text{Max}\{\ln p(\mathbf{z}|\mathbf{b}, \boldsymbol{\theta})\} + 2 \times (m) \quad (13)$$

最尤法あるいは赤池統計量基準法が有効であるのは、データ \mathbf{z} に関する高質で十分な情報量が得られている場合である。すなわち、最大値となる基準を明確に推定することが可能である場合である。

iv. 拡張ベイズ法

地盤工学において自然体積地盤を解析の対象とする場合には、データの質が低かったり、情報量が充分でなかったりすることが頻繁である。例えば、非都市域や開発の初期にある郊外等においては、一般に実施されているボーリング調査数は小さい。このため、こうした地域において入手できるデータのみから得られる情報では、正確な地震動の分布を求めることが困難であることが多い。すなわち、最尤法や、AIC の最小値が不明瞭となり、正しい統計パラメタを明確に特定できないことが多い。

以上のように、対象地域からのみ得られる情報量が小さい場合には、拡張ベイズ法(以下、EBM と略称する)を利用することができる。EBM によれば、近似した環境における既往の経験や情報を、“事前情報”として利用することにより、こうした少ない情報(尤度) から重要な情報を“抽出”することができる。

地震動パラメタを表す統計パラメタ θ の事前情報が正規分布にしたがうと仮定すれば、事前分布は、以下のように表現することができる。

$$p'(\theta|\mu_\theta, \sigma_\theta^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(\theta - \mu_\theta)^2}{2\sigma_\theta^2}\right\} \quad (14)$$

通常のベイズ推定とは異なり、EBM では、事前分布における平均値 μ_θ と分散 σ_θ^2 は、次式で定義される ABIC 値を最小化することによって推定される。

$$\begin{aligned} \text{ABIC}(\theta|\mu_\theta, \sigma_\theta^2, m) \\ = -2 \times \ln \int p(\mathbf{z}|\theta) \cdot p'(\theta|\mu_\theta, \sigma_\theta^2) d\theta + 2 \times (m') \end{aligned} \quad (15)$$

ここで、統計パラメタ θ は、 μ_θ によって求められることとなる。実際の推定計算において、上式はラグランジュ-ガウス数値積分法等を利用することによって求められることになる。

一般の地盤工学においては、通常の土質パラメタの自己相関距離は、水平方向には数十から数百メートル、鉛直方向には数十センチメートル程度であることが多いことが知られている。こうした地盤調査における既往の情報や経験を活用することにより、目標地域におけるパラメタの μ_θ や σ_θ^2 をより適切に推定することが可能となり、地震動分布の予測に利用することが可能となる。

v. データに推定誤差(ノイズ)がある場合

本手法においては、ボーリング地点において実際に計測した地盤情報に基づいて、ボーリング地点における地震動パラメタを推定し、これを空間補間する。しかしながら、地層構造も広い範囲にわたって均質ではないため、たとえボーリング地点における地層構造も変動する局面の位置地点での構造に過ぎない。地層構造が連続あるいは、不連続に周囲と接していれば、周辺地盤の地震動の影響を受けて、当該ボーリング地点で生じる地震動は予測とは異なる可能性が高い。すなわち、一次元的な構造から当該地点の地震動を推定することはできないのであり、周囲の地盤の影響を受けて 3 次元的空間の中で生じた地震動をその当該地点での推定をする必要がある。また、ボーリング調査をおこなっても当該地点における土質パラメタを細大漏らさず測定し、推定に反映させることはできない。したがって、ボーリング

地点で推定した地震動パラメタといえども、これはある程度の推定誤差を持った値であることを評価することが適切である場合がある。ここでは、この推定誤差を“計算誤差”と呼ぶ。

“計算誤差”が存在するにも拘らず、これを評価しないで、自己相関関数を推定すると、自己相関距離が以上に短い値となり、全域の空間分布推定結果は、“ホワイトノイズ”のような分布状況となり、推定は無意味となる。

したがって、地震動パラメタの空間分布を推定する際には、このボーリング地点における推定誤差に配慮して、共分散(自己相関)関数を決定することが重要である。ボーリング地点で推定した地震動パラメタの値に誤差(ノイズ)が付帯している場合、このノイズは、ナゲットと呼ばれる阿多によって評価することができる。共分散関数は、このナゲットが以下のような 3 つの条件を満たすものと認められることから、容易に定式化して推定することができる。

- 1) ボーリング地点 i におけるナゲットに関する統計(誤差)モデルは以下のように表すことができる。

$$\mathbf{z}(\mathbf{u}_i) = \mathbf{y}(\mathbf{u}_i) + \varepsilon_i \quad (16)$$

ここに ε_i は、ボーリング地点 i における推定誤差であり、平均値は 0 で、分散 σ_ε^2 は各地点 i において既知であるとする。

また、ここで平均地震動パラメタのベクトル \mathbf{y} は、以下のように定義する。

$$\mathbf{y} = \{y(\mathbf{u}_1), \dots, y(\mathbf{u}_n)\} \quad (17)$$

- 2) ボーリング地点 i における推定誤差は、平均地震動パラメタ $y(\mathbf{u}_i)$ に対して独立である。すなわち、次式が成立する。

$$\text{cov}(y(\mathbf{u}_i), \varepsilon_i) = 0 \quad (18)$$

- 3) さらに、任意のボーリング地点 i における推定誤差 ε_i と、 i とは異なる任意のボーリング地点 j における推定誤差 ε_j は互いに独立である。すなわち、次式が成立する。

$$\text{cov}(\varepsilon_i, \varepsilon_j) = 0 \quad (i \neq j) \quad (19)$$

上記 3 つの条件により、“計算誤差” ε はクリギング解析においてフィルタリングすることが可能であ

り、次式に示すような線形結合を用いて、 $\mathbf{z}(\mathbf{u}_a)$ から $y(\mathbf{u}_0)$ を推定することが可能である。

$$y^*(\mathbf{u}_0) = \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot z(\mathbf{u}_i) \quad (20)$$

ここで、ナゲットを付帯した共分散関数 \mathbf{C}' は次式によって表すことができる。

$$\mathbf{C}' = \mathbf{C} + \mathbf{C}_{Obs} \quad (21),$$

ここで

$$\mathbf{C}_{Obs} = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \sigma_2^2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \sigma_n^2 \end{bmatrix} \quad (22)$$

ここで、ナゲットの効果は、行列 \mathbf{C}_{Obs} の誤差分散 σ_i^2 によって表現されている。注意すべきは、この誤差分散が行列 \mathbf{C}_{Obs} の対角項のみに現れていることである。

“計算誤差” が付帯する場合の共分散関数は、行列 \mathbf{C} ではなく、行列 \mathbf{C}' に対して、最尤法、AIC 法、拡張ベイズ法等を適用することによって推定することができる。誤差分散 σ_i^2 についても、トレンド関数 μ 、分散 σ^2 、自己相関距離 \mathbf{l} を推定する過程において同時に推定することができる。“計算誤差” が無視し得ないほど大きい場合、行列 \mathbf{C}' を利用することにより、ナゲット効果に配慮しない場合よりも長い自己相関距離を伴ったより適切な自己相関関数を推定することができる。

④ クリギングによる空間分布推定法

一旦、共分散関数が決定されれば、空間補間計算は容易である。共分散関数の決定過程においては、トレンド関数等も同時に推定されるので、トレンドの空間分布、地震動予測分布、信頼区間分布について、一般的なパーソナル・コンピュータによって、ほぼ自動的に、極短時間で客観的な推定結果を得ることができる。主な計算内容は以下のとおりである。

クリギング手法によれば、同定された確率場モデル領域内の任意の点 \mathbf{u}_0 における地震動パラメタの推定値 $Z(\mathbf{u}_0)$ とその推定誤差 $\sigma^2(\mathbf{u}_0)$ を次式によって求めることができる。

$$\hat{Z}_0(\mathbf{u}_0) = \boldsymbol{\lambda}^T \mathbf{z} \quad (23)$$

$$\sigma_0^2(\mathbf{u}_0) = \mathbf{C}(\mathbf{u}_0 - \mathbf{u}_0) - \mathbf{v}_0^T \mathbf{m}_0 \quad (24)$$

ここに、 $\boldsymbol{\lambda}_0$ は、次式のような \mathbf{u}_0 に関する重み係数ベクトルである。

$$\boldsymbol{\lambda}_0 = \{\lambda_1(\mathbf{u}_0), \dots, \lambda_n(\mathbf{u}_0)\}^T \quad (25)$$

また、 \mathbf{v}_0 は、次式のような重み係数ベクトル $\boldsymbol{\lambda}_0$ と、ラグランジェの未定係数ベクトル $\boldsymbol{\eta}$ による係数ベクトルである。

$$\mathbf{v}_0 = \begin{Bmatrix} \boldsymbol{\lambda}_0 \\ -\boldsymbol{\eta} \end{Bmatrix} \quad (26)$$

さらに、 \mathbf{m}_0 は、次式のような \mathbf{u}_0 における共分散ベクトル $\mathbf{c}(\mathbf{u}_0)$ と、トレンド関数ベクトル $\mathbf{f}(\mathbf{u}_0)$ によるベクトルである。

$$\mathbf{m}_0 = \begin{Bmatrix} \mathbf{c}(\mathbf{u}_0) \\ \mathbf{f}(\mathbf{u}_0) \end{Bmatrix} \quad (27)$$

共分散ベクトル $\mathbf{c}(\mathbf{u}_0)$ は、 \mathbf{u}_0 について次式のように定義できる。

$$\mathbf{c}(\mathbf{u}_0) = \{C(\mathbf{u}_1 - \mathbf{u}_0), \dots, C(\mathbf{u}_n - \mathbf{u}_0)\}^T \quad (28)$$

また、トレンド関数ベクトル $\mathbf{f}(\mathbf{u}_0)$ は、式(6)によって \mathbf{u}_0 について次式のように定義できる。

$$\mathbf{f}(\mathbf{u}_0) = \{f_0(\mathbf{u}_0), \dots, f_K(\mathbf{u}_0)\}^T \quad (29)$$

すなわち、 \mathbf{m}_0 は、共分散ベクトル $\mathbf{c}(\mathbf{u}_0)$ とトレンド関数ベクトル $\mathbf{f}(\mathbf{u}_0)$ により既知である。

ここで共分散行列 \mathbf{C} とトレンド行列 \mathbf{X} とを結合した行列 \mathbf{C}'' を次式のように定義する。

$$\mathbf{C}'' = \begin{bmatrix} \mathbf{C} & \mathbf{X} \\ \mathbf{X}^T & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (30)$$

ただし、“計算誤差” に配慮する場合には、上記の行列 \mathbf{C} ではなく、 \mathbf{C}' を適用すればよい。

この時、 \mathbf{v}_0 は、次式を解くことによって決定することができる。

$$\mathbf{C}'' \mathbf{v}_0 = \mathbf{m}_0 \quad (31)$$

ここに、 $\mathbf{v}_0 (= \boldsymbol{\lambda}_0 \text{ と } \boldsymbol{\eta})$ 、共分散関数 $C(\mathbf{u}_i, \mathbf{u}_j)$ あるいは $\mathbf{C}'(\mathbf{u}_i, \mathbf{u}_j)$ と、地震動パラメタベクトル \mathbf{z} から任意の点 \mathbf{u}_0 における地震動パラメタの推定値 $Z(\mathbf{u}_0)$ とその推定誤差 $\sigma^2(\mathbf{u}_0)$ を求めることができる。

3. リアルタイム地震動推定と被害推定への展開

著者らが、これまで提案した手法をさらに展開することによって、地震が発生した際に得られる限られた数の観測記録を用いて、任意地点での地震動強さを推定することが期待できる。本報告書は、その概要について記すものである。

リアルタイムでの地震動推定において、地表面に設置した地震計の観測記録から直接地震動強さの空間分布を評価するためには、想定震源に対する地震動推定の場合と同様、表層地盤における地盤パラメータや層圧等に大きなばらつきが存在することに注意しなければならない。例えば尾張旭市での解析事例において、地表面における PGA や PGV、計測震度の自己相関距離は 150~700m²⁷⁾程度であり、設置した地表面における地震計 2 地点間での観測記録における相関係数を最低でも 0.5 以上とするためには、おおよそ 100 m 四方に 1 台の密度での観測記録が必要となり、このように密に地震計を配置した地震観測網を設置し、維持管理することは、一般に実用的とは言えない。

一方、工学的基盤面以深における地盤パラメータ等のばらつきは比較的小さく、例えば尾張旭市での工学的基盤面における地震動強さの自己相関距離は 1.5~2 km 程度以上³⁰⁾ある。したがって、**図 1**に示すように、おおよそ数 km 四方に 1 台の密度で地表面に地震計を設置し、得られた観測記録から増幅率の逆数を乗ずる（逆解析）ことによって同地点での工学的基盤面における地震波、続いて工学的基盤面における任意地点での地震波の空間分布を推定し、これに当該地点での増幅率を乗ずれば（順解析）、任意地点での地表面における地震動強さを推定することができる。しかしながら PGV などの地震動強さの増幅率は、表層の地盤特性のみならず地震動の振動数特性にも依存することから、増幅率の評価には大きな不確定性を伴う。

本報告では、表層地盤における伝達関数（以下、単に「伝達関数」という）を用いることを念頭に、限られた数の地震計観測記録と、解析対象領域内の空間分布推定において十分密に採集されたボーリング等による表層地盤データとを用いて、地表面における任意地点での加速度フーリエ振幅スペクトル（加速度波形のフーリエ変換の実部と虚部

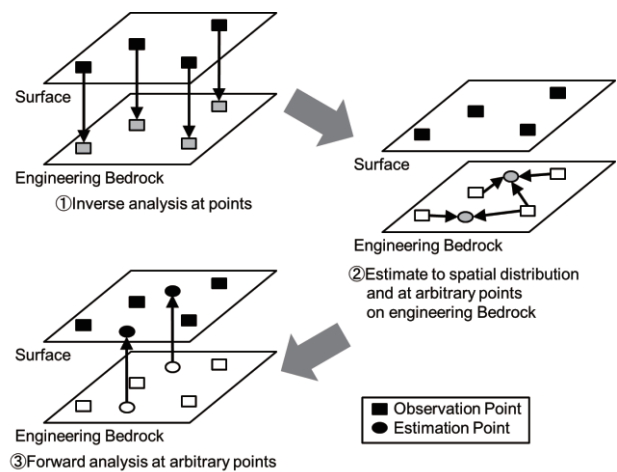


図 1. 提案法の概要

の二乗和平方根)を推定する手法を提案する。加速度フーリエ振幅スペクトルを用いれば、文献 33)の手法より、加速度応答スペクトルを求めることも可能となる。ここでは、まず想定地震の工学的基盤面における地震波を用いて地震応答解析（順解析）により評価したボーリング地点での伝達関数に、拡張クリギング法を適用して空間補間計算することにより、任意地点での伝達関数を推定する。地震計により観測が行われている場合には、空間補間計算にてこれらの観測結果による当該地点での伝達関数を追加・利用することもできる。あらかじめ解析対象領域内の全建物地点や地震観測地点を含めた任意地点での伝達関数を補間推定し、データベース化しておくことで、地震発生後に地震応答解析をすることなく、観測地点での地表面における加速度フーリエ振幅スペクトルを計算し、工学的基盤面におけるスペクトル評価と空間補間計算を経て、直ちに任意地点での地表面における加速度フーリエ振幅スペクトルを計算することができる。

さらに本報告では、愛知県尾張旭市を事例とし、限られた数の仮想地震計の観測記録に提案手法を適用して得られた各ボーリング地点での加速度フーリエ振幅スペクトルと、工学的基盤面における地震波と伝達関数から直接計算した同ボーリング地点での加速度フーリエ振幅スペクトルとを比較することで提案手法の妥当性を検討する。

表 3. 式 (33) および (34) で利用した定数

	a	b	c	d	e	f
Sand	729.7	0.89	338.0	0.47	111.30	0.3020
Cohesive soil	179.1	0.79	46.84	0.27	94.38	0.3144
Gravel	392.8	0.75	75.36	0.30	123.05	0.2443

4. ボーリング地点での伝達関数

地表面における加速度フーリエ振幅スペクトル $A^0(f)$ は、(32) 式で表現することができる。

$$A^0(f) = A^E(f) \cdot A^G(f) \quad (32)$$

ここに、 $A^E(f)$ は工学的基盤面における地震波の加速度フーリエ振幅スペクトル、 $A^G(f)$ は観測地点での伝達関数である。任意地点での $A^G(f)$ は、(1) 式より得られるボーリング地点での $A^G(f)$ (地表面と工学的基盤面における加速度フーリエ振幅スペクトルの比) に拡張クリギング法を適用した補間推定によって求めることができる。

ボーリング地点での地表面における加速度フーリエ振幅スペクトルおよび伝達関数を評価するための地震応答解析手法としては、時刻歴応答解析や等価線形解析など様々な方法があるが、後述するように、地表面における地震計観測記録を工学的基盤面に引き戻す必要があることから、工学的基盤面における地震波を入力とする、等価線形一次元地震応答解析により算定した。その際、周波数依存の等価ひずみ²⁹⁾を用いた。地震応答解析の地盤モデルに用いる G - γ 、 h - γ 関係についてはボーリングデータの土質区分を砂、粘性土、礫の3種類に分類し、下記の今津・福武の式²³⁾を用いて設定した。

$$\frac{G}{G_{\max}} = \frac{1}{(1+a(\gamma) \cdot b)}, \quad h = c(\gamma) \cdot d \quad (33)$$

ここに、 G/G_{\max} はせん断剛性比、 h は減衰定数(%), γ はせん断ひずみ、 a 、 b 、 c 、 d は表 3 に示す土質ごとのパラメタ²⁴⁾である。また S 波速度 V_s (m/s) は(34)式により算出した。

$$V_s = e \times N^f \quad (34)$$

ここに、 N は層ごとの平均 N 値、 e 、 f は表 3 に示す土質ごとのパラメタである。なお、この手法は地盤のひずみレベルが 0.1% までの範囲内におけ

る想定結果は有効である³⁷⁾。また、地表面と工学的基盤面における加速度フーリエ振幅スペクトルは、いずれもバンド幅 0.4Hz の Parzen ウィンドウを用いてスペクトルの平滑化を行った。

5. 解析例

5-1. 対象地域とデータ

本研究で対象とする愛知県尾張旭市内の伝達関数の評価に用いたボーリングデータは、同市が平成 25 年度事業において独自に収集し整理した 676 本と、周辺の市などから提供を受けた 72 本の計 748 本である。尾張旭市での個々のボーリングデータの長さはおよそ 20m であり、その中でも調査深度の深いボーリングデータの平均 N 値が 50 程度以上となる層が工学的基盤面であると設定し³⁷⁾、尾張旭市の場合、工学的基盤面から地表面までの深度は 20m 程度であると判断した。

地震動データとしては、尾張旭市が平成 26 年に実施した被害想定において同市が独自の被害想定を行った猿投一高浜断層帯地震 (以下、猿投一高浜地震)、愛知県が想定した東海・東南海連動地震 (以下、2 連動地震)、国が想定した東海・東南海・南海 3 連動地震 (以下、3 連動地震)、および愛知県が内閣府の検討を基に想定した南海トラフを震源とする 3 種の南海トラフ巨大地震²¹⁾ (いわゆる「過去最大」、「理論最大・東側」、「理論最大・陸側」、以下、それぞれ過去最大地震、東側地震、陸側地震) の 6 震源による 250m メッシュ (2 連動、3 連動地震は 1km メッシュ) ごとの工学的基盤面における地震波 (猿投一高浜地震は 1 成分、その他の震源は水平 2 成分 (NS, EW 方向) の計 11 種類の地震波) 群を用いた。本研究では、これらのメッシュ毎に算定された工学的基盤面における地震波をその中心地点での地震波とし、各ボーリング地点での工学的基盤面における地震波は、ボーリング地点から最も近い 4 つのメッシュの中心点での地震波の加速度フーリエ振幅スペクトル

を距離の逆数の 2 乗で加重平均した加速度フーリエ振幅スペクトルと、最も近接するメッシュの中心点での地震波の位相で構成されていると仮定した。

5-2. ボーリング地点での伝達関数の推定結果

748 の各ボーリング地点にて、2.1 節の手法に基づき、3.1 節の 11 種類の個々の地震波に対する地表面と工学的基盤面における加速度フーリエ振幅スペクトルの比を求めた。一例として 4 つのボーリング地点（**図 2** の◎）での各想定地震によるスペクトル比を**図 3**に示すが、猿投一高浜地震を除いた全地震のスペクトル比はほぼ一致している。ここで、猿投一高浜地震は他の震源と比較して地震動強さが大きい（計測震度 6 強程度、その他の震源は 4~6 弱程度）ことから、それがスペクトル比に及ぼす影響を確認するため、猿投一高浜地震の地震波を 2 倍の大きさにして、他の地震と同様にスペクトル比を求めた（**図 3** の太い実線）が、(a)は 0.6~4Hz, (b)は 0.3~6Hz, (c)0.6~7Hz, (d)は 1~10Hz で元の猿投一高浜地震のスペクトル比の値と異なる部分が見られた。一般には同一の地盤でもスペクトル比が一致しない場合があり、その最大の要因は地震動によりひずみレベルが異なることであると考えられる。また、これに加えて、地震波の入射角（鉛直入射か斜め入射か）や入射方向（東から、あるいは西からなど）もスペクトル比に対して影響する可能性がある。ただし今回の場合、比較的浅部の地盤を扱っていることから、スネルの法則により地震波の入射角は鉛直に近いと考えられ、入射角や入射方向の影響は比較的小さいと考えられる。したがって、今回はひずみレベルが提案手法の適用範囲内である 0.1%程度以内となる場合、スペクトル比の地震毎の違いは大きくないと判断した。本論文における最大ひずみレベルは猿投一高浜地震の 0.001%であることから、適用範囲内の結果となっている。本研究では想定地震を用いた手法の提案を目的とするため、**図 3**に示すような地震動強さの大きさによるスペクトル比の値の変化を伝達関数に考慮することは今後の課題とすることとし、今回の尾張旭市内においては各ボーリング地点での 11 種類の地震波群から得られるスペクトル比の平均値(対数平均)

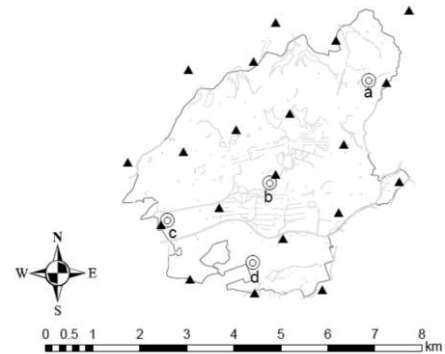


図 2. 4 つのボーリング調査地点のサンプルと仮想地震計の設置地点

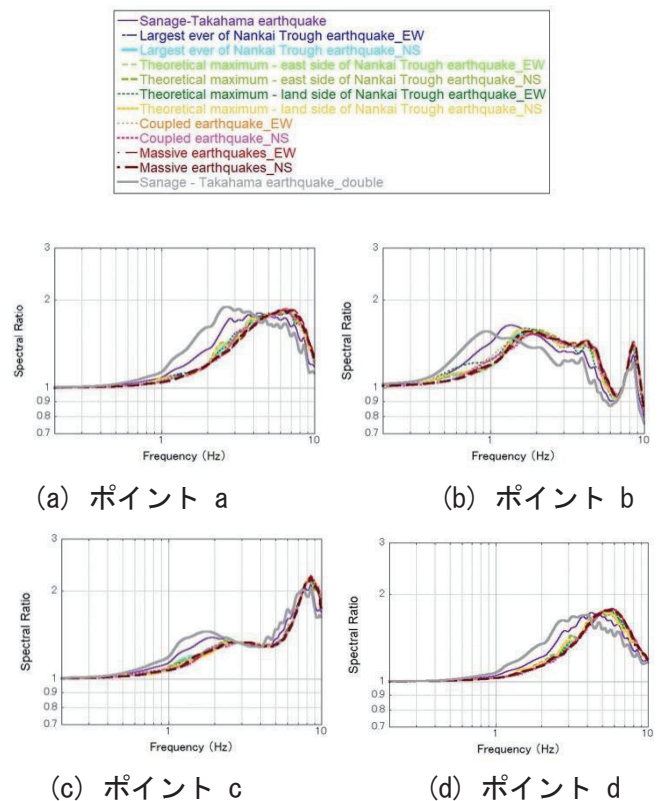


図 3. 4 つのボーリング地点におけるスペクトル比

をその地点での伝達関数とした。

図 4 に 748 の各ボーリング地点での伝達関数の周波数ごとの最大値と最小値、平均値を示す。0.4Hz 以下では最大値、最小値共におおよそ 1.0 程度であるが、これより高い周波数では最大値は次第に増加している。一方、最小値は 2Hz まで 1.0 程度であるが、その後減少に転じている。**図 4** にも見られるとおり、0.5Hz 以上では各地点での増

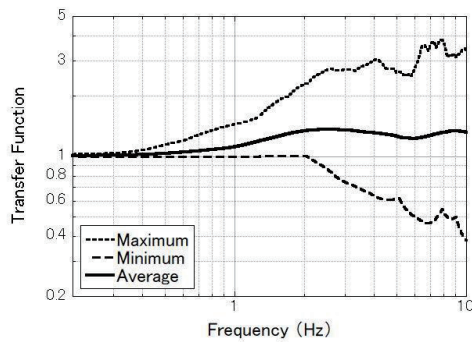


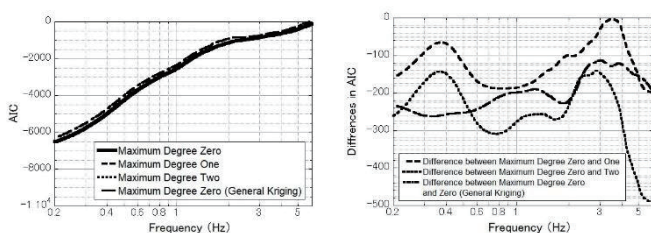
図 4. 748 のボーリング地点における伝達

幅率が異なることから、空間統計解析による任意地点での伝達関数が必要である。

5-3. 伝達関数のパリオグラムの解析結果

(4)式の第1項は、(6)式のトレンド関数の最大次数が大きくなると小さくなるが、一方で第2項は大きくなる。そのため、最大次数を増やしていくとある最大次数までは(4)式の第1項と第2項の和は減少するが、それ以降は増加する。そこで本研究では、すべての周波数に対して AIC が増加に転じるまで最大次数を増やして計算を行った。

図 5 は、0.2~6.0Hz の周波数領域における伝達関数について(a) (4)式で評価される AIC, (b) (a)の AIC についてトレンド関数の最大次数が 1 あるいは 2 の場合、最大次数 0 との差を示している。確認のため最大次数 2 の場合まで計算を行ったが、対象とした全ての周波数において、AIC の値はトレンド関数の最大次数を 0 とした場合に最小となっており、したがって尾張旭市では最大次数 0 のトレンド関数によって最適な確率場モデルを表すことができる。また、図 5(a)(b)の一点鎖線は一般的なクリギング法による同データを用いた場合の



(a) AIC (b) AIC の差異

図 5. 提案法における AIC の絶対値と差異値

最大次数 0 の AIC の値を示しているが、例えば周波数 0.6012Hz の時は拡張クリギング法で求めた AIC との差が 244, 1.001Hz は 199, 2.038Hz は 216, 4.065Hz は 127 と、どの周波数においても拡張クリギング法を用いて求めた AIC の値の方が 1 以上小さくなる。AIC では、同じデータに対する複数の確率場モデルを比較する場合、その差が 1 以上あることをもって有意な差がある⁽²²⁾とされるため、したがって拡張クリギングを用いた場合の方が確率場モデルを極めて適切に表現できていると判断できる。図 6 は拡張クリギング法によるレンジ、図 7 はシル+計算誤差分散を示したものであるが、トレンド関数による値の違いはほとんど見られなかった。

以上のような空間統計解析結果として、妥当な値が得られた。以上の結果に基づき、推定すべき任意地点（任意の住宅の立地地点等）の加速度を周波数ごとに推定することが可能である。

6. おわりに

本論文では、解析対象領域内において密に採集されたボーリング等の表層地盤データと想定地震を用いた当該地点での表層地盤における伝達関数、および拡張クリギング法によって全建物地点等の任意地点での伝達関数を周波数毎に推定することで、限られた地震観測地点から工学的基盤面におけるスペクトル評価と空間補間計算を経て、任意地点での地表面における加速度フーリエ振幅スペクトルを推定する手法を提案した。

その結果、①愛知県尾張旭市を例として、工学的基盤面における 11 種類の想定地震波群と市内外のボーリングデータを用いて、等価線形次元応答解析によりボーリング地点での伝達関数を周波数ごとに求め、拡張クリギング法により周波数

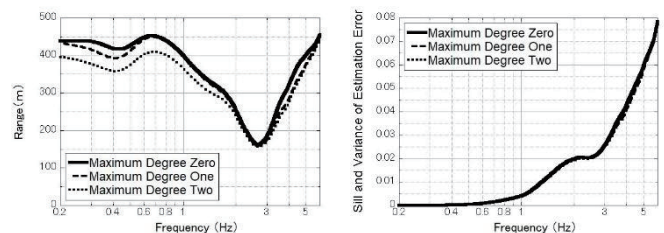


図 6. レンジの計算結果 図 7. シルの計算結果

ごとに伝達関数の空間分布を推定した。尾張旭市の場合、高周波数域において各地点での増幅率が異なることから、特にその域にて空間統計解析による任意地点での伝達関数が必要であることを示していると考えられる。②求めた任意地点での伝達関数と限られた地震計地点の観測記録を用いた任意地点での加速度フーリエ振幅スペクトル評価手法を提案し、さらに妥当性を検討した。尾張旭市内のボーリング 642 地点での加速度フーリエ振幅スペクトルを提案手法により求めた値（推定値）と各地点での工学的基盤面における想定地震波と伝達関数によって得られる地表面における加速度フーリエ振幅スペクトル（観測値（仮））を求め比較を行ったところ、推定値と観測値（仮）の加速度フーリエ振幅スペクトルの比は各周波数・震源において平均値は 1 に近い値となるが、標準偏差は周波数が 2.0Hz より低いところでは 0.1 程度の値となり、周波数が高くなるにつれて最大で 0.3 程度の値となる部分が見られた。

本提案手法の検証は尾張旭市を対象とした事例であるが、同市と同様な標準～硬質地盤の地域であれば、あらかじめその地域の地盤情報と地表面と工学的基盤面における地盤の空間分布特性の整備を行うことにより、適用が可能であると考えられる。軟弱地盤の場合は、等価線形一次元応答解析時の最大ひずみの範囲が 0.1% を超える可能性があるため、特に複数の地震動の観測記録におけるキャリブレーションを行う必要がある。

ある解析対象領域において提案手法を適用する場合、地表面における観測結果を用いて空間補間をする場合に必要となる地震計設置地点よりも高い密度でのボーリングデータ等の地盤情報が必要となるが、この地盤情報を用いた拡張クリギング法によって任意地点での表層地盤の伝達関数をデータベース化しておくことにより、地震発生後に地震応答解析をすることなく、直ちに任意地点での地表面における加速度フーリエ振幅スペクトルの推定が可能となる。さらに、災害による地形の変形や地盤改良により地盤に変化があった場合にも、これらに関する調査情報を利用した修正や、追加データによる改良が容易であることから、より精度の高いデータベースを用いた地震動の推定が可能となる。

謝辞

本報告における研究成果を挙げるにあたり、尾張旭市から、ボーリングデータの提供のほか、常に暖かく力強いご支援を賜りました。ここに記して深甚なる謝意を表します。

参考文献

- [1] Akaike, H.: Information theory and an extension of the maximum likelihood principle, 2nd International symposium on Information Theory, edited by B.N. Petrov and F. Csaki, pp.267-281, Akad. Kiado, Budapest, Hungary, 1973.
- [2] Akaike, H.: Likelihood and Bayes procedure with discussion, Bayesian Statistics, edited by J.M. Bernardo et al., pp.143-166, 185-203, Univ. Press, Valencia, Spain, 1980.
- [3] Akaike, H.: Selection of prior distribution and its application, Bayesian, Statistics and Its Applications, (in Japanese) edited by Y. Suzuki and N. Kumamoto, pp.81-98, Univ. of Tokyo Press, Japan 1989.
- [4] Honjo, Y. and Kazumba, S.: Estimation of autocorrelation distance for modeling spatial variability of soil properties by random filed theory, Proc. of 47th Geotechnical Symposium, The Japanese Geotechnical Society, pp.279-286, 2002
- [5] Krige, D.G.: A statistical approach to some mine valuation and allied problems on the Witwatersrand, Master's thesis, University of Witwatersrand, South Africa, 1951.
- [6] Matheron, G.: Traie de geostatistique appliqué, Technip, Paris, Vol.1 (1962), Vol.2 (1963) edition, 1962.
- [7] Matheron, G.: Principles of geostatistics, Economic Geology, Vol. 58, pp.1246-1266, 1963
- [8] Michiyo Sugai, Yuichiro Nishimura, Susumu Kurahashi, Haruna Yamada, Sayaka, Tomida : Detailed Scale Ground Motion Maps with the Highest and Guaranteed Accuracies and it's sharing using Web-GIS with the Local Government and the Community, Proc. of 15WCEE, 15th World Conference of Earthquake -, Lisbon, Portugal, 2012.9, Abstract submitted
- [9] Michiyo Sugai, Yusuke Honjo : Introduction to a new methodology, to develop earthquake ground motion prediction maps and their accompanying accuracies, International Symposium on Earthquake Engineering - Commemorating Tenth Anniversary of the 1995 Kobe Earthquake (ISEE Kobe 2005), Engineering Seismology "Simulation of strong ground motions and seismic hazard assessment", Kobe/Awaji, January 13 - 16, 2005
- [10] Michiyo Sugai : Some Sensitivity Analyses of Probability of Earthquake Occurrence to Some Design Parameters、Proc. of the International

- Workshop Kamakura 2002, 11-12 April 2002 Hayama, Japan.
- [11] Wackernagel, H. 2003, Geostatistic, the 2nd edition (translated into Japanese) Morikita Shuppan
- [12] Mori, Y., Mizutani, Y., Kang, J., and Idota, H. : Upgrade Decision- Making for Earthquake-Vulnerable Wooden Houses Using Probabilistic Damage Index Functions, ASCE-ASME J. Risk Uncertainty Eng. Syst., Part A: Civ. Eng., 04017037, 2018.4(1)
- [13] 中部都市再生研究会：最終報告書、2005.3
- [14] 平成23年度環境経営研究所共同研究報告書：「高精度地震動マップの作成のための尾張旭市地区の地盤特性に関する統計解析～高精度地震動マップの公益的な普及に向けて～」、平成24年3月
- [15] 平成24年度環境経営研究所共同研究報告書：「高精度地震動マップの作成のための尾張旭市地域の地盤特性に関する統計解析～高精度地震動マップの広域的な普及と利用に向けて～」、平成25年3月
- [16] 平成25年度環境経営研究所共同研究報告書：「耐震改修による地震リスクの低減効果評価システムの構築のための地震動計測について」、平成26年3月
- [17] 平成26年度環境経営研究所共同研究報告書：「尾張旭市の高精度地震動マップに関する実務的空間統計解析結果について、地震動計測による地震動予測マップの精度保証と高精度化に向けて」、平成27年3月
- [18] 平成27年度環境経営研究所共同研究報告書：「尾張旭市で実際に利用された高精度地震動マップの空間統計解析結果、実用化されたハザードマップの統計解析結果とその妥当性、有用性について」、平成28年3月
- [19] 平成28年度環境経営研究所共同研究報告書：「尾張旭市で実際に利用された高精度地震動マップの展開に関する研究クリギング法を用いた工学的基盤面における地震動分布の推定に関する研究」、平成29年3月
- [20] 平成29年度環境経営研究所共同研究報告書：「尾張旭市で実際に利用された高精度地震動マップの空間統計解析結果 メッシュサイズが推定精度に与える影響に関する研究」、平成30年3月
- [21] 愛知県 防災会議地震部会:平成23年度～25年度愛知県東海地震・東南海地震・南海地震など被害予測調査結果, 2014.5.
- [22] 今津雅紀, 福武毅芳: 動的変形特性のデータ処理に関する一考察, 第21回土質工学研究発表会講演集, pp. 533-536, 1986. 6
- [23] 今津雅紀, 福武毅芳: 砂礫材料の動的変形特性, 第21回土質工学研究発表会講演集, pp. 509-512, 1986. 6.
- [24] 岩田 知孝, 入倉 孝次郎: 観測された地震波から, 震源特性・伝播経路特性及び観測点近傍の地盤特性を分離する試み, 地震2, 第39巻, pp. 579-593, 1986. 8
- [25] 尾張旭市で予想される地震の予測結果 <https://www.city.owariasahi.lg.jp/kurasi/bousai/bousai/owariasahisideyosousareru.html>, 2015.9 参照 2018.3.3.
- [26] 坂元慶行, 石黒真木夫, 北川源四郎 著, 北川敏男 編集: 情報量統計学 (情報科学講座 A・5・4) (情報科学講座), 共立出版, 1983.
- [27] 菅井 径世, 水谷由香里, 森保宏: クリギング法を用いた建物ごとの地震ハザード推定の実用化、日本建築学会技術報告集 第22巻 第51号, 447-452, 2016年6月
- [28] 菅井径世, 森 保宏, 小川克郎: クリギング法による地震動分布推定の実用化に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No. 707, pp.39-46, 2015.1.
- [29] 杉戸真太, 合田尚義, 増田民夫: 周波数依存性を考慮した等価ひずみによる地盤の地震応答解析法に関する一考察, 土木学会論文集, No. 493/II-27, pp. 49-58, 1994. 6
- [30] 本多眞: 地質工学における時間及び空間系挙動の確率・統計学的予測に関する研究, 清水建設株式会社, ORI, 研究報告00-02, 2000.
- [31] 例えば, 中部電力株式会社: 尾張旭市 地震動・液状化調査等委託業務 報告書, 2005.1
- [32] 内閣府: 地震防災マップ作成技術資料, 2005. 3
- [33] 日本建築学会: 建築物荷重指針・同解説 (2015), 日本建築学会, 2015.
- [34] 藤原広行: リアルタイム地震被害推定システムの開発, 地域防災, 日本防火・防災協会, No. 17, pp. 14-17, 2017.12
- [35] 福和伸夫, 林 宏一, 飛田 潤: 地盤モデルに基づく2地点間の伝達関数と地震観測記録を用いた任意地点における地震動の推定, 日本建築学会構造系論文集, No. 609, pp. 81-88, 2006.11
- [36] 水谷由香里, 菅井径世, 森 保宏: クリギング法を用いた工学的基盤における地震動推定に関する研究, 日本建築学会東海支部研究報告書, 第55巻, pp. 189-192, 2017. 2
- [37] 吉田 望: 地盤の地震応答解析, 鹿島出版会, pp. 197, 2010. 10