

工学的基盤面上に設置された地震観測網を利用する
地震動推定法による被害リスク推定法の精度に関する研究

An Estimation of accuracies of Seismic Risks of Wooden Houses at an Arbitrary Points
Case Studies in Owari-Asahi City in Aichi Prefecture in Japan

菅井 径世*・田中 裕苗*・漁 夏輝*・森 保宏**・安面 秀隆**・
廣内 大介***・安江 健一*****

SUGAI Michiyo*, TANAKA Yuna*, SUNADORI Natsuki*, MORI Yasuhiro**,
ANMEN Hidetaka**, HIROUCHI Daisuke*** and YASUE Ken-ichi*****

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

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

Abstract: The aim of this paper is to report the results of assessment of seismic risks of a wooden house using natural period-dependent spectrum intensity (SI_{lg}) and probabilistic damage index function. The risks are discussed in this paper in terms of probabilities of collapse of houses. SI_{lg} is defined as the integral of the velocity response spectrum. The velocity response spectrums are approximated, in this paper, by the transformation of a power spectrum density function estimated from an acceleration Fourier amplitude spectrum (AFS). The major findings of this analysis are outlined below. 1) The AFS on the ground surface at one of seismometer points in Owari-asahi City was estimated using the transfer functions and the observed records of AFS at the other seismometer points. By using observed records in the city and Kik-net installed outside the city, the estimation accuracy of AFS all seismometer points are particularly higher than using only observed records in the city. 2) The seismic risks estimated by AFS calculated using data of Kik-net are much better correspond to those by observed AFS than those by AFS calculated using data only in the City. However, the risks by AFS using Kik-net are still not quite identical to those by the observed AFS. The variations of AFS may affect the estimations of probabilistic damage index, and the accuracy of calculating AFS could be taken into account for the risk estimations.

Key Words: Seismic Risks: Seismic Hazard: Variation: Transfer Function: Fourier Amplitude Spectrum: Kriging Analysis: Accuracy: Quantitatively: Objectivity (地震ハザード、伝達関数、フーリエ振幅スペクトル、クリギング解析、精度、定量性、客観性)

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^[19]。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^[20]。

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^[21]。

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^[22]。

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^[23]。

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^[24]。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^[23]。

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^[25]。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^[47]。

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^[48]。

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^[49]。

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。

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^{[42][50]}。

令和2年度、著者らは、リアルタイムに観測された地震動から建物毎に地震動を推定するにあたって、観測を行う地震計の最適配置に関する検討を行い、7th Asian-Pacific Symposium on Structural Reliability and its Applications（第7回アジア太平洋における構造信頼性とその応用に関するシンポジウム）において公表した^[6]。本報告では、この結果を、前年度に示すことができなかった伝達関数空間分布とともに詳細に示した^[50]。

令和3年度、著者らは、リアルタイム地震動推定を行う際にデータベース化して利用する伝達関数について、検討を加えたので、この結果について報告した。伝達関数は、地震動が強くなる場合、地盤の塑性挙動の影響を大きくするため、地震波の周波数の大きな領域で小さくなる傾向があるものと予測して解析を行い、その結果を示した^[51]。

令和4年度、著者らは、前年度に地盤の塑性化挙動による伝達関数への影響を認識し、また、現在、進行中の研究活動において工学基盤のサイト増幅特性の広域空間分布についてもその重要性を予測するに至っているが、ひとまずは、最もシンプルな手法により、観測地震波によってリアルタイム地震動の推定結果と実測地

表 1-1. 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）	

震波の比較を行った。すなわち、構築した伝達関数のデータベースを利用して求めた推定値と実測値との比較により、提案するシステムの推定精度について検証を行いその結果を示した^[52]。

令和5年度、著者らは、さらに研究を進め、前年度に示した観測地震波によってリアルタイム地震動の推定結果と実測地震波の比較結果に基づき、各種の被害想定リスクについて、観測地震波によってリアルタイム地震動の推定結果と実測地震波による推定リスクの比較により、提案するシステムの推定精度について検証を行ったので、その結果について報告する。

1-2. 対象とした想定震源と地震動パラメタ

表 1-1 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。リアルタイム地震被害推定システムで利用する伝達関数は表に示した想定震源による地震波を利用して推定したものである。表 1-1 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

表 1-2. 推定可能な主な地震動と被害想定パラメタ 実績事例

地震動・被害想定パラメタ	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

に関しては、2014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^[22]。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1-1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タ3種を、表1-2に示す。

また、本報告では、表1-1に地震動パラメタに加えてフーリエ振幅スペクトルによる伝達関数も解析の対象とする。

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791地点を選択している。

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^[26]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^[22]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250m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タと予測された地震動パラメタとの、より有意な統計的キャリブレーションが可能であり、両パラメタの相関関数の同定と相関精度推定が可能な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タを算出する。ここで、地震動パラメタとは、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タと計算した地震動パラメタとのキャリブレーションを行い、2つのパラメ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タから実際の地震動パラメタを補正予測し、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。

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。これらの方法により工学的基盤面上における地震波を計算することができる。

ボーリング底部(=工学的基盤面上=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=地震動を解析するには、一般に、表層地盤内における地震応答解析が利用されている。地震応答解析には、FLUSH, SHAKE, FDEL, R-O 法等々、線形法、等価線形法、非線形法の各種の解析方法が提案されており、これらにより地表面での地震波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 $\mathbf{f}(\mathbf{u}_i)$ 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** 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)^[1]。

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

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、上式はラグランジェー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、自己相関距離が異常に短い値となり、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値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。

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

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 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。

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

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

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 $C'(\mathbf{u}_i, \mathbf{u}_j)$ 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

3-1. 概説

住宅の地震リスクは、地震動の強さ (GMI_S) と fragility 曲線を用いて評価することができる。

GMI_s は、最大速度 (PGV)、スペクトル強度 (SI)、日本の震度スケールなどがあり、ボーリング調査データを基に作成した仮想地盤モデルを用いて、一辺の長さが 250m などのメッシュごとに推定されている。理想は、建物地点ごとなど、より詳細に GMI を推定し、地震リスクをより正確に評価することで、地震被害を効果的に軽減し、回復力のある社会を構築することである。

そのために著者らは、限られた数の地震動観測記録と、その地点の地表層の伝達関数を用いて、地表の任意の地点における地震動の加速度フーリエ振幅スペクトル (AFS) を推定する方法を提案した。

AFS を用いると、その地点の地表面における地震動の固有周期依存スペクトル強度 (SII_g) を推定することができる。SII_g は、耐震等級 I_g の木造住宅の推定固有周期 TL から 3.5TL までの速度応答スペクトルの積分値として定義され、木造住宅の損傷度との相関が高いと考えられている。

本論文の目的は、地震動観測記録の SII_g を GMI として用い、確率論的被害指標関数を SII_g の関数として用いて、任意の地点における木造住宅の地震リスクを評価した結果を報告することである。また、その推定精度を、観測記録を用いて計算した同一地点の推定精度と比較することにより統計的に検討した。

3-2. 木造住宅の地震リスク評価法

① 任意の地点における地表面の AFS の推定

任意の地点の地表面 AFS は、限られた数の地震計の観測地震記録と、その地点の表層地盤の伝達関数を用いて、以下の手順で推定することができる (図 3-1)。ここでは、複数のボーリング地点の地表層の時系列解析により推定された伝達関数を用いて、Advanced Kriging 法 (Mizutani, et al, 2020) ^[6] を適用することにより、周波数ごとの伝達関数を推定することができる。

1. 全観測地点の工学的基盤面上の AFS は、地表面上の観測記録の AFS と各観測地点の伝達関数の逆数を用いて計算される。
2. 工学的基盤面上の AFS の領域は、座標 $\mu = \mu(u_i) = \mu(x_i, y_i)$ の最大次数 n_t の多項式で近似できる。

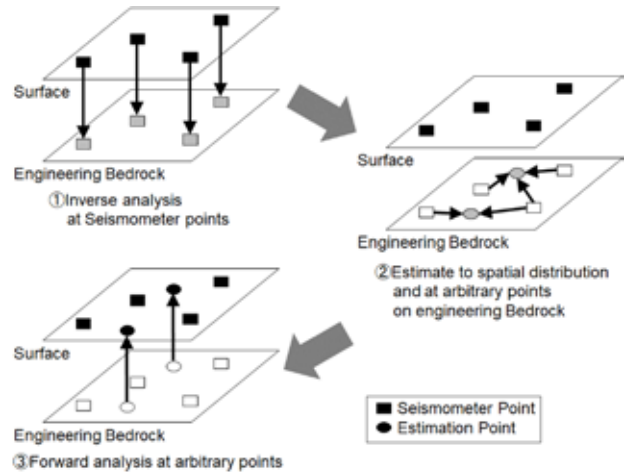


図 3-1. 地表で観測した地震動による地表における任意地点での地震動推定方法

$$\begin{aligned} \mu(u_i) &= b \cdot f(u_i) = \sum_{k=0}^{m_t-1} b_k f_k(u_i) \\ &= \sum_{k=0}^{m_t-1} b_k f_k(x_i, y_i) \\ &= b_0 + b_1 x_i + b_2 y_i \\ &\quad + b_3 x_i^2 + b_4 x_i y_i + b_5 y_i^2 \\ &\quad + \dots + b_{m_t-2} x_i y_i^{n_t-1} \\ &\quad + b_{m_t-1} y_i^{n_t} \end{aligned} \quad (1)$$

係数ベクトル(式(1)の b) は、すべての観測点における工学的基盤面上の AFS を用いて、最小二乗法により周波数ごとに計算される。ここで、 $f(u_i)$ は取得データの位置のベクトル、 m_t は b の要素数、 x_i と y_i は推定点の緯度と経度である。

$$m_t = \frac{(n_t + 1)(n_t + 2)}{2} \quad (2)$$

3. 任意の地点の地表面上の AFS は、その地点の下での工学的基盤面上の AFS と、ステップ 2 のベクトル b と推定点の座標 x_i, y_i を代入して得られるその地点の伝達関数を用いて推定することができる。

② SI_{I_g} の推定

Housner は、減衰を 20% とした速度応答スペクトルの積分値 $S_v(T; h = 0.2)$ として、0.1 秒から 2.5 秒までの SI を提案した^[5]。

しかし、各構造物の特性は考慮されていない。

古川ら (2020) ^[4] は、次式で定義される自然周期依存スペクトル強度 (SI_{I_g}) を提案した。

$$SI_{I_g} = \frac{1}{3.5 \cdot T_L - T_L} \int_{T_L}^{3.5 \cdot T_L} Sv(T; h = 0.20) dT \quad (3)$$

ここで、 T_L は木造住宅の自然周期をその I_g の関数として概算したものである。

$$T_L = 0.31 I_g^{-0.687} \quad (4)$$

I_g とは、木造住宅の構造性能を表す耐震等級である。 I_g 値 1.0 は、その住宅が現在の設計要件を満たしていることを示す。速度応答スペクトルは、加速度応答スペクトルとパワースペクトル密度関数の変換を用いて計算することができる（日本建築学会（2015））^[38]。

3-3. 確率的損傷指標関数

過去に発生した地震に関する現地調査を基に、建築時期によって分類された家屋の被害程度を推定するための fragility 曲線が提案されている。このような fragility 曲線は、地震ハザードが推定されるメッシュ内の家屋全体の被害を推定するのに有効である。しかし、同じ時期に建築された住宅であっても、その耐震性能は異なる。

古川らは SI_{I_g} をワイブル分布関数で表現した確率的被害指標関数を提案した、

$$w = 1 - \exp \left[- \left(\frac{SI_{I_g}}{u} \right)^k \right] \quad (5)$$

ここで、 k 、 u 、標準偏差 σ_Y は次のように表されるパラメータである。

$$k = \frac{-0.531 I_g^2 + 3.507 I_g + 0.936}{\exp(I_g^{0.65})} \quad (6)$$

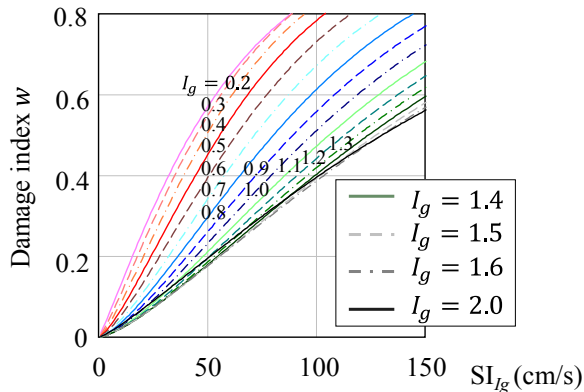


図 3-2. 非超過確率 90% の損傷指標関数

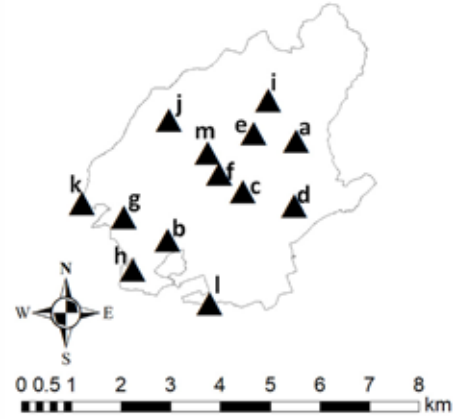


図 3-3. 尾張旭市内の地表面に設置した地震計地点

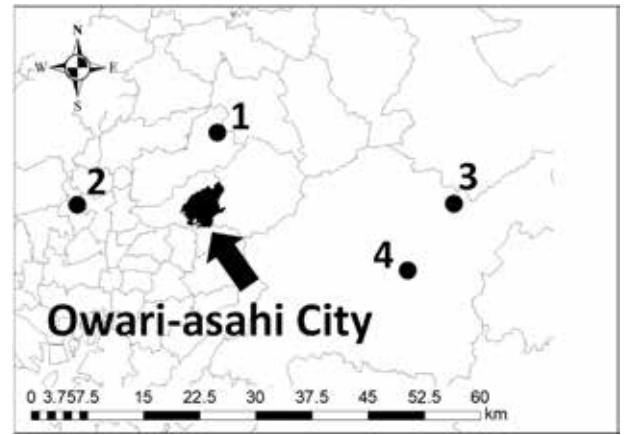


図 3-4. 尾張旭市と解析に利用した KiK-net の地震計の設置地点

$$u = 213(1 - \exp(-0.75 I_g^{2.2})) + 67 \quad (7)$$

$$\sigma_Y = 0.41(1 - \exp(-3.0 I_g)) \quad (8)$$

図 3-2 は、 I_g が 0.2～2.0 の範囲にあると仮定し、式 (5)～(8) を用いて推定した非超過確率 90% の損傷指標関数を示している。定義上、ある I_g の SI_{I_g} を他の I_g の SI_{I_g} と直接比較することはできないことに注意する必要がある。

3-4. 木造住宅の地震リスク評価

筆者らは、山口ら (2008)^[15] が提案した方法に基づいて、住宅の部分倒壊の地震リスクを評価した。被害指標 w の確率分布関数 $FW(w)$ を式 (9) により求める。

$$F_W(w) = \int F_W(w|V = v) \cdot f_v(v) dv \quad (9)$$

ここで、 $F_W(w|V = v)$ は GMI $V = v$ が与えられたときの w の確率分布関数であり、 $f_v(v)$ は V の確率密度関数である。

住宅の半壊の地震リスクは、次のようにして推定することができる。

$$P = P[W > a] = 1 - F_W(a) \quad (10)$$

ここで、 a は家屋の半壊に対する損害指数の下限值であり、著者らは岡田ら (2004) [17] に基づき $a = 0.4$ と仮定した。

年愛知県西部地震、以下 Eqk-2014 と略す)。もうひとつは、2015 年 3 月 4 日の M4.6 の地震 (2015 年愛知県西部地震、以下 Eqk-2015 と略す) によるものである。Eqk-2014 では、図 3-3 の m 地点を除く全ての地震計点と KiK-net の全ての地震計点で地震動を観測した。Eqk-2015 では、市内の 10 地点 (図 3-3 の g, h, l を除く) と KiK-net の全地震計点で地震動を観測。地震動は NS 方向と EW 方向に記録されている。

3-6. 地震計点における加速度フーリエ振幅スペクトルの推定

地震計の各点における地表面の AFS は、3-2①で述べた方法で、観測された地震記録と他の地震計点

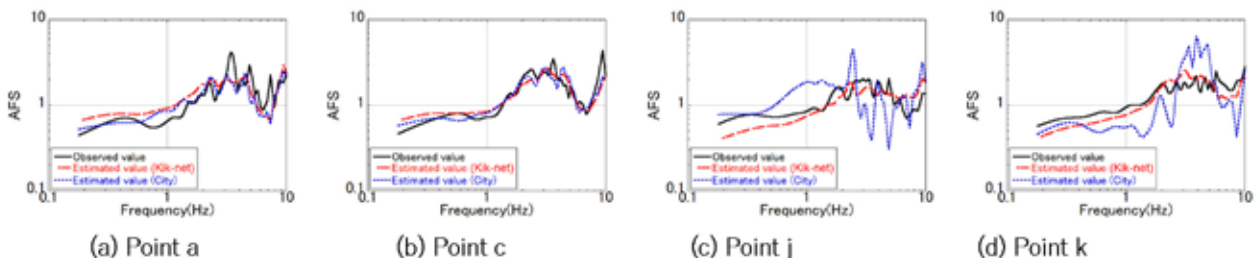


図 3-5 AFS の観測地と推定値の比較 (2014 年愛知県西部地震 南北方向の地震波に対して)

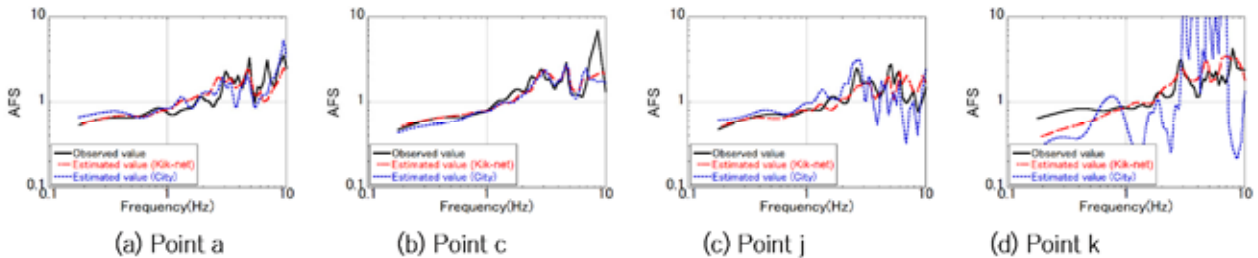


図 3-6 AFS の観測地と推定値の比較 (2015 年愛知県西部地震 東西方向の地震波に対して)

3-5. 対象地域とデータの分析

図 3-3 に三角形 (▲) で示すように、尾張旭市内の 13 地点を含む 17 地点で観測された 2 回の地震動記録を利用した。尾張旭市の面積は約 21.03km² である。残りの 4 地点は、日本政府機関によって構築された KiK-net ネットワークによるもので、図 3-4 に丸印 (●) で示されている。KiK-net では地震動が地盤面 ($V_s = 3000\text{m/s}$) で観測されているが、2.1.1 節で述べた AFS の推定方法を適用するため、筆者らは工学的基盤面 ($V_s = 400\text{m/s}$) での記録を考慮した。ここでは、機器震度による反射波の影響は小さいと仮定している。

ひとつは 2014 年 12 月 3 日の M4.2 の地震 (2014

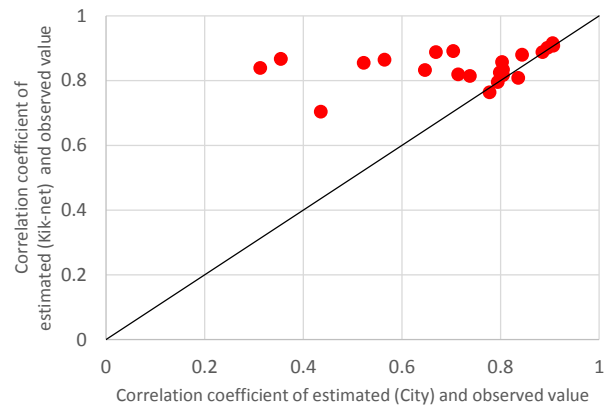


図 3-7. 加速度フーリエ振幅スペクトル (AFS) の推定値と実測値の関係

のみの伝達関数を用いて推定した。観測記録の AFS は、帯域幅 0.4Hz の Parzen 窓を用いて平滑化した。式(1)のベクトル b は、 $nt = 2$ の場合のみを考慮して計算した。

図 3-5 に Eqk-2014 での南北方向の記録を用いた各地震計点での地表面 AFS を、図 3-6 に Eqk-2015 での東西方向の記録を用いた地表面 AFS を示す。各図において、地震計点での地震観測記録の AFS を実線で示し（以下、観測値）、市街地のみでの地震観測記録を用いた推定 AFS を点線で示し（以下、推定値（市街地））、市街地と KiK-net の地震観測記録を用いた推定 AFS を鎖線で示す（以下、推定値（KiK-net））。

図に示すように、全ての地震計の地点において、推定値（KiK-net）は観測値とほぼ一致している。これは、工学的基盤面上の AFS の空間分布を、市内で観測された AFS のみを用いて推定する場合、空間分布を推定する回帰関数が観測範囲外で非現実的な値をとる可能性があるためである。しかし、市街地から離れた場所に設置された地震計の記録を用いることで、このような非現実的な空間分布の推定を回避することができ、提案する AFS 推定手法の精度を向上させることができる。

図 3-7 に各地点における地表面 AFS の推定値と観測値の相関係数の比較を示す。図に示すように、市街地の観測記録と KiK-net の観測記録を用いた場合、相関係数は 0.70 と 1.00 の範囲内に収まっている。逆に、市内の観測記録のみを用いた場合の相関係数は 0.3～1.00 であった。

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] Furukawa, T., Mori, Y., Usami, R., Mizutani, Y. and Idota, H. (2020). “Probabilistic Damage Index Functions for Old Wooden Houses Based on Period-Dependent Spectrum Intensity.” 17th World Conference on Earthquake Engineering, 8c-0033.
- [5] Housner, G.W. (1961) “Vibration of Structures Induced by Seismic Waves,” *Vibration Handbook*, Harris, C.M. and Crede, C.E. (eds.) Vol.3, pp.1-32.
- [6] Honjo, Y. and Kazumba, S.: Estimation of autocorrelation distance for modeling spatial variability of soil properties by random field theory, Proc. of 47th Geotechnical Symposium, The Japanese Geotechnical Society, pp.279-286, 2002
- [7] 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.
- [8] Matheron, G.: Traie de geostatistique appliqué, Technip, Paris, Vol.1 (1962), Vol.2 (1963) edition, 1962.
- [9] Matheron, G.: Principles of geostatistics, Economic Geology, Vol. 58, pp.1246-1266, 1963
- [10] 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
- [11] 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
- [12] 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.
- [13] Wackernagel, H. 2003, Geostatistic, the 2nd edition (translated into Japanese) Morikita Shuppan
- [14] 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)

- [15] Yamaguchi, T., Mori, Y. and Idota, H. (2008). "Effective Strategy for Upgrading Wooden Houses and Risk Information for Advancement of Upgrading – A study on decision-making tools for promoting aseismic reinforcement of old wooden houses (Part 2)." J. Struct. Constr. Eng., AIJ, Vol. 73, no. 632, pp. 1719–1726. (Japanese).
- [16] Y. Mizutani*, M. Sugai and Y. Mori : Practical Estimation Method for Acceleration Fourier Amplitude Spectrum at an Arbitrary Point by Using Advanced Kriging Method, 7th Asian-Pacific Symposium on Structural Reliability and its Applications, 2020.10
- [17] 岡田成幸,高井伸雄: 木造建築物の損傷度関数の提案と地震防災への適用ー地震動入力を確定的に扱う場合ー,日本建築学会構造系論文集,第582号,pp.31-38,2004.8.
- [18] 中部都市再生研究会: 最終報告書, 2005.3
- [19] 菅井径世, 小川克郎, 廣内大介, 西村雄一郎, 正木和明, 倉橋奨: 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～」, 環境経営研究所年報, vol.11, 2012.3
- [20] 菅井径世, 小川克郎, 森保宏, 加藤悟, 廣内大介, 西村雄一郎, 正木和明, 倉橋奨: 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～」, 環境経営研究所年報, vol.12, 2013.3
- [21] 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」, 環境経営研究所年報, vol.13, 2014.3
- [22] 菅井径世, 小川克郎, 加藤悟, 廣内大介, 西村雄一郎, 早川敏明: 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」, 環境経営研究所年報, vol.14, 2015.3
- [23] 菅井径世, 小川克郎, 加藤悟, 森保宏, 廣内大介, 西村雄一郎, 水谷由香里: 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」, 環境経営研究所年報, vol.15, 2016.3
- [24] 菅井径世, 森保宏, 小川克郎, 加藤悟, 廣内大介, 郎 迪, 水谷由香里: 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」, 環境経営研究所年報, vol.16, 2017.3
- [25] 菅井径世, 森保宏, 安江健一, 水谷由香里, 廣内大介: 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」, 環境経営研究所年報, vol.17, 2018.3
- [26] 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.
- [27] 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
- [28] 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.
- [29] 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
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] 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
- [33] 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.
- [34] 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
- [35] 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.
- [36] 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
- [37] 内閣府: 地震防災マップ作成技術資料, 2005.3
- [38] 日本建築学会: 建築物荷重指針・同解説 (2015), 日本建築学会, 2015.
- [39] 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

- [40] 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
- [41] 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
- [42] 水谷由香里, 菅井 径世, 森 保宏, 野津 厚, 水戸部 茂樹: 拡張クリギング法による表層地盤における伝達関数の空間分布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法, 日本建築学会構造系論文集, 日本建築学会技術報告集 84 巻 758 号 p. 459-467, 2019 年
- [43] 吉田 望: 地盤の地震応答解析, 鹿島出版会, pp. 197, 2010.10
- [44] 北原武嗣, 伊藤義人: 鋼製およびRC造橋脚の弾塑性動的応答と固有周期依存型SIとの相関性, 構造工学論文集, 第45A号 pp829-838, 1999.3
- [45] 田中一輝: フーリエ振幅スペクトル強度を地震動強さ指標とする損傷度関数に関する研究, 名古屋大学工学部建築学科卒業論文 2021.1
- [46] 宇佐美諒介: 固有周期依存型スペクトル強さを地震動つよさとする確率的損傷度関数に関する研究, 名古屋大学工学部建築学科卒業論文2020.2
- [47] Mizutani Y., Sugai M., Mori Y.: Application of Modified Kriging Method to Estimations of Earthquake Ground Motion Intensity at Construction Sites, Proceedings of the 12th International Conference on Structural Safety and Reliability, Vienna, Austria, 2017.8
- [48] 菅井径世, 森保宏, 水谷由香里, 安江健一, 廣内大介, 宮本愛恵美, 武田美季穂: 平成 30 年度環境経営研究所共同研究報告書「拡張クリギング法による表層地盤における伝達関数の空間分布についてー任意地点での加速度フーリエ振幅スペクトル評価のための検討」, 環境経営研究所年報, vol.18, 2019.3
- [49] 菅井径世, 森保宏, 水谷由香里, 安江健一, 廣内大介, 宮本愛恵美, 武田美季穂: 令和元年度環境経営研究所共同研究報告書「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」, 環境経営研究所年報, vol.20, 2022.1
- [50] 菅井径世, 森保宏, 水谷由香里, 安江健一, 廣内大介, 宮本愛恵美, 武田美季穂: 令和元年度環境経営研究所共同研究報告書「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・伝達関数の空間分布解析 伝達関数の空間分布について」, 環境経営研究所年報, vol.20, 2022.1
- [51] 菅井径世, 森保宏, 水谷由香里, 安江健一, 廣内大介, 岩井将行, 太田好規, 柴田寛巳: 令和 2 年度環境経営研究所共同研究報告書「拡張クリギング法による尾張旭市内の空間分布解析における地震動強さが表層地盤の伝達関数に及ぼす影響について」, 環境経営研究所年報, vol.21, 2022.12
- [52] 菅井径世, 漁夏樹, 森保宏, 矢野祐太, 廣内大介, 安江健一: 令和3年度環境経営研究所共同研究報告書「拡張クリギング法による尾張旭市内の空間分布解析における地震動強さが表層地盤の伝達関数に及ぼす影響について」 環境経営研究所年報, vol.22, 2024.3