

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

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***・水谷由香里**・廣内大介****

SUGAI Michiyo, MORI Yasuhiro, YASUE Ken-ichi,
MIZUTANI Yukari, and HIROUCHI Daisuke

*名古屋産業大学大学院・**名古屋大学大学院・*名古屋産業大学非常勤講師・****信州大学大学院

*Nagoya Sangyo University・**Nagoya 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、昨年度までに開発した地震計を持って、市民らの協力を得ながら、尾張旭市での地震観測活動を継続した。当初より、尾張旭市内地表面上における地震観測活動は、地震動の推定精度を上げるためのキャリブレーションに利用することと、リアルタイム地震被害推定システムへの活用を目的として実施してきているが、本年度の地震観測活動の中で、著者らは、研究協力者である一市民との研究協議に場において、改めてリアルタイム地震被害想定システム開発の重要性と、実現化可能性について議論を始めた。著者らが提案し、実用化したシステムにより、地震動を建物ごとにかつリアルタイ

ムで評価できれば、建物の地震被害低減に大きく貢献することが可能となる。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。

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。

さらに、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。

本報告では、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しめす。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。本報告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。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

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）	
高浜一猿投断層地震	（尾張旭市）

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。本報告では、表 1-1 と表 1-2 による 6 × 9 種の推定結果のうち、「2 連動地震」（以下 2 R 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 4 R と呼ぶ）に対する、PGV と計測地震動を解析対象とする。

表 1-2 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 種を示す。

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

表 1-2 推定した地震動・被害想定パラメタ

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

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⁷⁾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⁸⁾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、図 1 に示すような尾張旭市内とその付近で 250m ごとに 532 地点、さらに尾張旭市外で 4km ごとに 61 地点の計 593 地点を震源ごとに選択し、工学的基盤面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ータを

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ータおよび算出された地震動パラメー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ータが観測され、より多数の観測地点においてより多数の地震動パラメータが蓄積される時、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ー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。

なお、リアルタイムで地震動を予測するためには、PGA、PGV、PL 値など検討すべき様々なパラメータがあるが、本研究では、参考文献1)で示した地表面での地震動の空間分布の統計的性質と比較するため、計測地震動の事例解析を示す。

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

地震動パラメー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ータから、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ー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ー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 $z(\mathbf{u}_i)$ を計算する。

次に、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タを次式のような地震動パラメタベクトル \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。

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

(5)

ここで $\boldsymbol{\mu}$ は地震動パラメ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、係数パラメタ b_k ($k=0, \dots, K$) による係数パラメタベクトル \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-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**(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(Akaike 1989)

地震動パラメタを表す統計パラメタ $\boldsymbol{\theta}$ 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。

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

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 $\mu_{\boldsymbol{\theta}}$ と分散 $\sigma_{\boldsymbol{\theta}}^2$ 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。

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

ここで、統計パラメタ $\boldsymbol{\theta}$ は、 $\mu_{\boldsymbol{\theta}}$ 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 $\mu_{\boldsymbol{\theta}}$ や $\sigma_{\boldsymbol{\theta}}^2$ 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_i^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、 $z(\mathbf{u}_0)$ 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

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

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、 $\mathbf{v}_0 (= \lambda_0$ 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. 推定試算例

建物ごと（任意地点）での地震動推定法を提案する以前、地震被害想定をより精確あるいは詳細に行う目的で、メッシュのサイズを小さくする試みがとられてきた。

地震のリスクを想定する目的で、対象領域を多数の四角状のメッシュでカバーし、それぞれのメッシュで仮想地盤モデルを作成することによって、ハザードマップは作られてきた。例えば、地震動の強さは、仮想地盤モデルに基づいた 250mメッシュで計算されてきた。しかしながら、仮想地盤モデルには工学的判断と呼ばれる主観的な判断を必要とするため深刻な問題や困難さが付帯する。メッシュのサイ

ズが大きければ、地震動はメッシュの中で均一とは考えられない。このため、マップユーザーが、彼らの建物のための適切な災害軽減策を取ることが難しくなっている。そこで、メッシュサイズを小さくすると、市全体をカバーするためのメッシュの数は指数関数的に増える。このため、それぞれのメッシュに対応させて作成しなければならない仮想地盤モデルもは指数関数的に増える。これが、膨大な作業時間とコストを必要とすることになる。これは、最初に仮想地盤モデルを作成する際のコストのみでなく、継続的に増加するボーリング調査や、地震観測結果、微動計や弾性波調査結果などによる地盤情報が追加されれば、仮想地盤モデルも改良すべきであるが、この際にも工学的判断は必要であり、これに伴い、推定に主観性を排除することができなくなるとともに、大きな予算が必要となる。著者らが提案する地盤統計解析法による地震動推定が電子化したデータの計算機による客観的な解析によって追加情報を活用する場合とは、大きく異なる点である。

以上のような問題点に加え、単純にメッシュサイズを小さくすることが、どの程度、地震動の推定精度を上げられるかという点も明確でない。地盤に対して得られている情報量が同じである場合、メッシュのサイズを小さくすることで、より精確な推定結果ももたらすとは考え難いのである。メッシュサイズを小さくして高精度の推定が期待できるのは調査地点とその付近のメッシュのみであり、その他のメッシュで精度が向上する根拠はない。正確な地震動マップとは、地震動の推定値の精度が高いということとともに、定量的な推定精度についても情報が得られるマップと考えるべきである。

本報告では、これまでに解析してきた尾張旭市のボーリングデータを利用し、地震動の推定精度に対するメッシュサイズの影響について定量的に検討した結果を報告する。ここでは、地震動を推定するに当たって、拡張クリギング法(Akaike1973)を使用する。これは、提案した方法が、現時点で、任意の建物地点の地震動を定量的な精度を伴って客観的に推定できる唯一の実用的な方法であるからである。

また、仮想地盤モデルで推定した地震動の推定精度は不明である。なぜなら、この推定値はメッシュ全域の平均的な地震動を推定するものであり、この値と1点で測定される地震計によって実測された地震動とは比較できないからである。正確には、地震計が、メッシュの中心にあるか、東西南北のどちら

に近い側に設置されているかによって、観測される地震動が異なるので、メッシュの“平均的な値”である仮想地盤モデルによる推定値との比較を行う場合には、観測された地震動の大きさによっても、異なる程度によっても方法を変えねばならず、なお、困難であり、多くの場合意味をなさないことも考えられる。この点において、著者らの提案した方法は、任意の地点での地震動とその推定精度の客観的な計算結果を得ることを可能としており、地震計で観測された値との直接比較も可能である。

そこで、本報告では、ブロック・クリギング法により代表的な大きさのメッシュに対して、代表的な推定値であるメッシュ内の推定値の平均値と、この推定値がどの程度の精度を持っているかを示す推定誤差を比較する。この誤差値は、一般に、メッシュサイズが大きくなると小さくなる。これは、メッシュ内の地震動がばらつきながら分布しているため、その平均値を推定する場合には、母集団、すなわち母集団を収集する場(=メッシュ)が大きくなれば、母集団が大きくなるという統計学の基本原理による。また、メッシュ内やその周辺である程度のボーリングなどの調査地点が増えるのも、推定誤差を小さくする要因となる。ここで注意すべきは、同じ大きさのメッシュでも、この推定誤差がメッシュごとに異なるという点である。メッシュ内のボーリングなどの調査地点の数や、その分布の偏りなどによって、その推定誤差は変化する。これは、ポイント・クリギングによって推定した任意地点における推定値と推定誤差に対しても同様の原理が働く。したがって、ポイント・クリギングで推定した際の推定誤差は、場所によって変動しながらも、ブロック・クリギングよりも大きな推定値となる。もっと小さいメッシュ(面積を持たない点)として、ポイント・クリギングを理解すれば当然の結論である。しかしながら、本来は、ポイント・クリギングで推定した任意の地点の推定値とその推定誤差が、地震動マップを利用する上で、配慮しなければならない値である。ブロック・クリギングでの推定誤差がポイント・クリギングの推定誤差よりも小さい場合、ブロック(メッシュ)内の地震動が、その分、大きく変動していることを示すものであり、メッシュ内の建物ごとの地震動がどのような値になっているかは、その変動が大きい分、より正確な推定が難しいことを示している。

すなわち、ブロック内全域の平均値はおおよそ正確に推定できるものの、その内部の各地点での地震動はどの程度の精度で推定できているかが、より不明であり、この意味において、推定精度が悪くなることを示している。

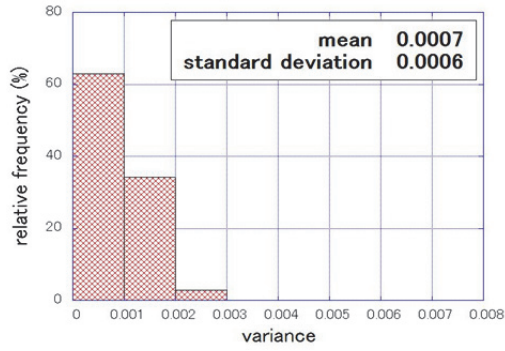
4. 検討結果

4-1. 地震動のメッシュ内における平均値に関する推定結果

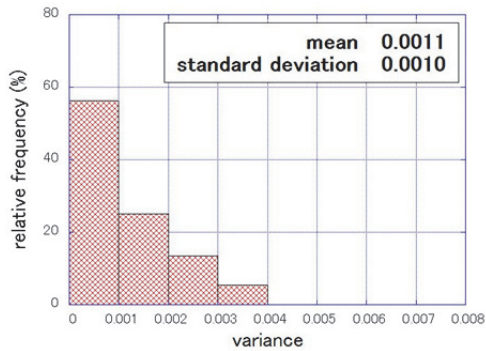
図-1に、ブロック・クリギング法で推定した尾張旭市の地震動を推定した際の推定誤差を示す。本報告では、推定誤差は、分散値をもって議論することとし、図は分散値のヒストグラムを相対度数で示している。図-1は、表1-1に示した想定震源のうち、東海・東南海地震に対する推定結果であり、図の(1)～(4)は、それぞれ、1000mメッシュ、500mメッシュ、250mメッシュ、50mメッシュの推定結果を示している。尾張旭市全域をカバーするためのメッシュの数は、それぞれ、35、112、384、8346枚である。なお、以下の結論については、他の想定震源からも同様の結果が得られている。

図-1の(1)～(4)を比較すると、メッシュ内の地震動の平均値を、どの程度の誤差(分散)で推定できるのかは、メッシュのサイズによって変化することが分かる。例えば、図-1の(1)から、1000mメッシュでは、62.9%のメッシュで、0.001以下の分散で、34.3%のメッシュで、0.001～0.002の分散で、2.8%のメッシュで、0.002～0.003の分散で推定できることが分かる。この図の分散の平均値は0.007である。

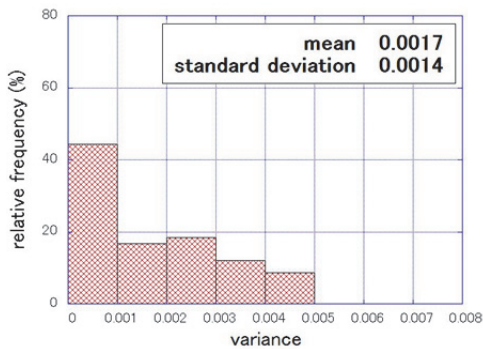
また、同図から明らかなように、この分散の平均値は、メッシュのサイズが(1000mから50mへと)小さくなるほど、(0.0007から0.0027へと)大きくなる。さらに、メッシュのサイズが(1000mから50mへと)小さくなるほど、その分布の広がり(standard deviation)は、(0.006とから0.0017へと)大きくなる。地震動の推定値に関する誤差(分散)は、当該のメッシュが、ボーリング調査など調査地点から遠い場合、大きくなり、近い場合、小さくなる。より小さなメッシュの方が、メッシュごとの推定精度の違いをより明確に推定できることが分かる。この違い。すなわち、この図からは、小さいメッシュの方が、より実用的な結果が得られることが分かる。



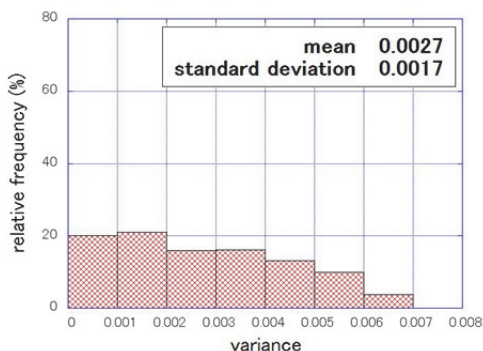
(1) 1000m mesh



(2) 500m mesh

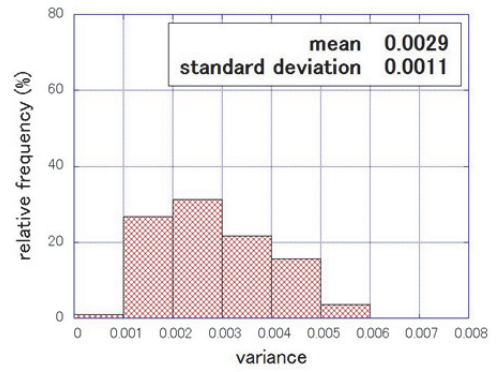


(3) 250m mesh



(4) 50m mesh

Figure 1. Relative Frequency of Variances in Estimating Average of Seismic Intensity among the Meshes



Each Construction Site

Figure 2. Relative Frequency of Variances in Estimating Average of Seismic Intensity at an

図-2は、図-1と同様の結果を、ポイント・クリギングで、尾張旭市内の各建物で計算した結果に基づいて示している。一般に、ボーリング調査は、建物が密集する中心市街地で実施されることが多いため、ボーリング調査地点と建物地点が近い場合は多い。

ここで、図-2と、図-1(4)を比較すると、図から分かるように、ポイント・クリギングで地震動を推定する際の誤差(分散)は、50mメッシュのそれよりもさらに大きいことが明らかである。これは、ポイント・クリギングによる分散が0.0001より小さくなることはほとんどないことも大きな理由の1つとなっている。すなわち、図-2では、このような小さな推定誤差で地震動を推定することはほぼ不可能であったという事実を示している、図-1の(4)のような50mメッシュといった非常に小さなメッシュでも、そのメッシュ中で地震動を推定する場合、地震動は、地点ごとに異なった値となっており、有意に分布しているため、メッシュでの推定誤差(分散)が小さくなってきていることを示している。すなわち、50mメッシュといった非常に小さなメッシュでさえも、十分小さいとは結論できないことを明示している。

ここで、もう1つ重要な点は、図-3(3)および(4)に示した250mと50mメッシュの分布のばらつき(standard deviation)が、図-2に示したそれよりも大きいことである。これも、ポイント・クリギングによる分散が0.0001より小さくなることはほとんどないことも大きな理由の1つとなっている。図-3(3)および(4)の分布は、大数の法則により、小さい分

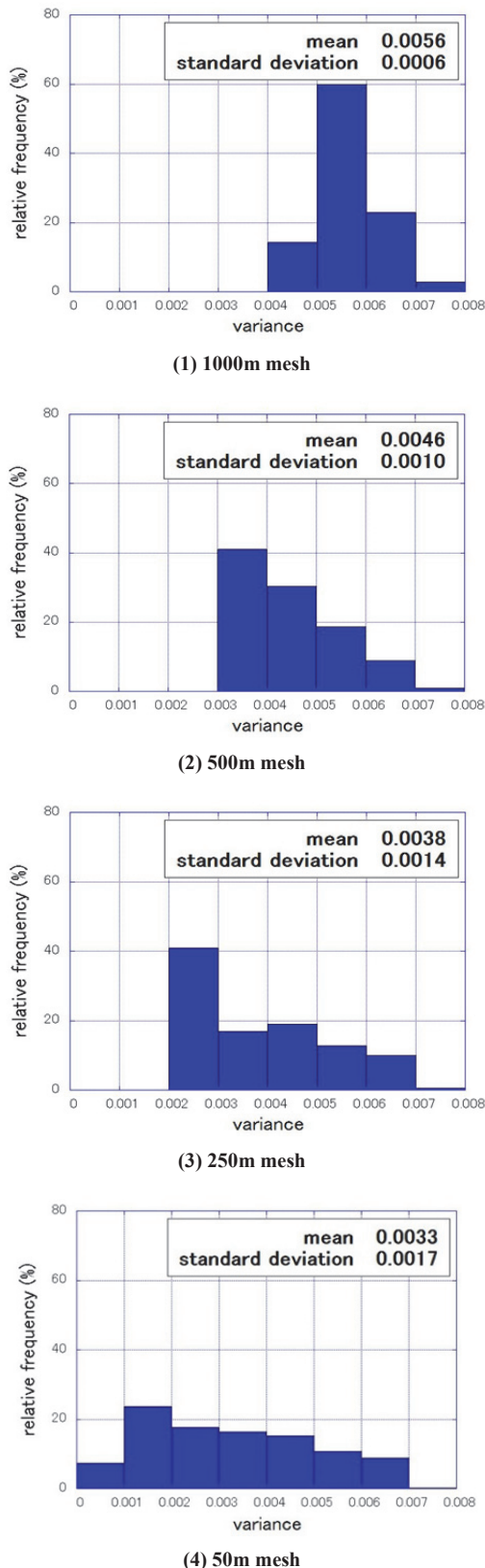


Figure 3. Relative Frequency of Dispersion of Seismic Intensity within Meshes

散に偏っているが、この偏りは、“見せかけ”の精度の高さであり、これも、実際の地震動は、50mといった小さなメッシュ内においても地点ごとに異なった値となっていることの証拠である。

4-2. メッシュ内の地震動の推定精度

本節では、地震動のメッシュ内の“ばらつき”について議論する。図-3の(1)～(4)は、それぞれ、図-2の(1)～(4)に対応したサイズのメッシュ内におけるばらつきの相対度数分布を示している。当然のことながら、図-3の(1)～(4)に示したとおり、メッシュ内の“ばらつき”の平均値は、メッシュのサイズが小さくなると小さくなる。また、図から分かるように、地震動のメッシュ内の“ばらつき”は、メッシュのサイズが小さくなると分布の幅が大きく広がる。これは、ボーリングなどの地盤調査地点が密に分布するメッシュの近くで、メッシュ内の地震動の推定値の“ばらつき”が小さくなり、離れた地点では大きくなることによる。小さなサイズのメッシュほど、こうしたメッシュ内の地震動の“ばらつき”の大小をより正確に推測することができる。

5. まとめ

本報告では、ブロック・クリギングによる推定法に基づき、以下のような結論を得た。

- (1) 地震動をメッシュ単位で推定する場合、当該のメッシュ内の地震動の平均値の推定精度は、メッシュのサイズとボーリング調査結果などの地盤情報の2つに依存する。
- (2) メッシュ内での地震動のばらつきも同様、メッシュのサイズとボーリング調査結果などの地盤情報の2つに依存する。
- (3) メッシュ内あるいはその近辺で、ボーリング調査などが密に実施されているメッシュでは、当該のメッシュ内における地震動の推定精度が高くなる。
- (4) メッシュ内あるいはその近辺で、ボーリング調査などが密に実施されているメッシュでは、地震動の“ばらつき”が小さい場合、メッシュ内における地震動の推定精度はさらに高くなる。
- (5) 一方、ボーリング調査が近辺で実施されていないメッシュや、メッシュにおいて地震動の“ばらつき”が大きい場合は当該のメッシュ内における地震動の推定精度が低くなる。

- (6) 仮想地盤モデルに基づくメッシュ単位での地震動のハザードマップでは、各メッシュ内の地震動のばらつきを定量的に評価できない。
- (7) メッシュ内の地震動のばらつきは、メッシュサイズが小さくても無視できない。尾張旭市では、50m サイズのメッシュでもメッシュ内に地震動の有為なばらつきがあった。
- (8) したがって、仮想地盤モデルによる地震ハザードマップは、サイズの小さいメッシュを利用することで、詳細つ精度が高くみえることがあるが、こうしたマップでは、利用者に誤った情報を与え、効果的な地震対策を立て難い。

6. おわりに

本報告は、著者らが提案した方法でボーリング地点における地震動パラメタの評価誤差を考慮するクリギング法による統計解析結果を、標本点における評価誤差を考慮しない一般的なクリギング法によるそれと比較しながら、その妥当性、有用性を検証した。本報告で特に注目すべきは、現実の地震動の空間分布をモデル化する場合、一般的なクリギング法に対して、「計算誤差分散」という変数を1つのみ加えることによって、極めて鮮明な結果が得られることを実証したことである。その結果、1) 最小の AIC は一般的なクリギング法よりも提案法の場合の方が説明変数 60~120 個程度に相当する 120~250 程度小さくなり統計学的に有利であることが分かった。また、2) 最小の AIC となる最適解のレンジは、一般的なクリギング法では、トレンド関数の次元によって 30~80m であるのに対し、提案法では 150~700m と有為に長く、補間推定において非常に有利であること、さらに、3) 提案法におけるシルに対する計算誤差分散は、有為に小さい値にとどまりながら、その和は一般的なクリギング法のシルと同程度であることが分かった。

提案法はこのような一般的なクリギング法に対して有用である一方、必要とする計算はシル、レンジ、計算誤差分散の3つのパラメタの決定と、最小二乗法によるトレンド関数の決定のみである。250m、50m などのメッシュ単位で、当該メッシュ内、あるいは周辺にあるボーリングデータから工学的判断に基づいて1つ1つのメッシュに対

する仮想の地盤モデルを作成し、メッシュ単位で地動最大加速度、地動最大速度、計測震度などの地震動強さを推定するこれまでの手法と比較すると、多数の地盤モデルの想定作業をすべて省略することができるため、コストの大幅な削減が可能であり、同時に客観性の高い推定が可能となる。以上から、今後、他の都市への普及が期待される。

尾張旭市では、図3-1に示した各シナリオ地震について、提案法を用いて地震ハザードを評価し、建物の重心点ごとに、地震動パラメタを推定し、これを用いて被害想定を実施しており（個人情報取り扱いに対する配慮からホームページ上ではブロック・クリギングによる50mメッシュでの計測地震動と液状化に関するハザードマップのみを公開¹⁶⁾）、今後も、市民の移動状況や、住宅などの新築、建て替え、ボーリングデータの追加など、ハザードやリスク評価に係わる情報を、継続的に更新し、増加させていく計画である。これと平行して著者らは、別途開発した高精度、低コストの地震計を尾張旭市内に設置しており、今後も観測情報を活用して地震ハザード評価の精度向上を進めていく予定である。

今後、著者らは、地震観測網による計測結果により、研究を重ねる計画である。さらに、リアルタイムの災害情報システムの構築や、地震発生時に対する事前準備の最適化、事後準備の最適化、避難計画への利用等への応用など様々な地震対策についても研究を進めていく予定である。

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 field 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] 中部都市再生研究会：最終報告書、2005.3
- [13] 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
- [14] 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
- [15] 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
- [16] 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
- [17] 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
- [18] 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
- [19] 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
- [20] 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, pp.447-452, 2016.6.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.

付録. 研究の全体構想

解析のフローチャートを示しながら、本研究の計画・方法（：研究の全体構想）を、(A)解析の手順、(B)データの蓄積と精度アップのシステム、(C)成果のイメージと利用の順に示す。

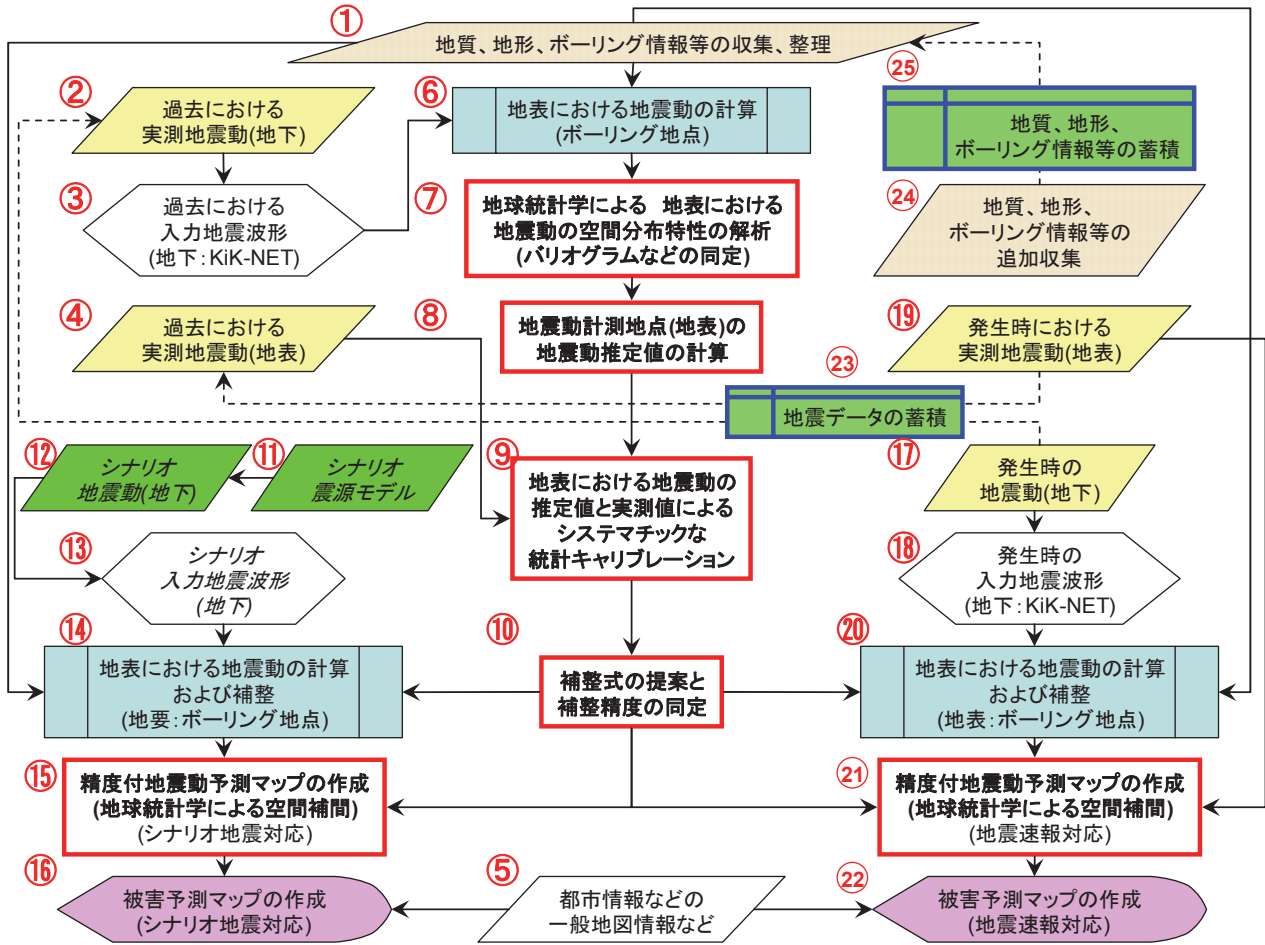
(A) 解析の手順

解析は、(a)補整式とその精度の同定、(b)シナリオ地震に対する被害予測マップの作成、(c)地震速報のための被害予測マップの作成の3つの手順に分けて進める。ただし、これまでに解析したのは、既往の地震の再現解析と補整式とその精度の同定である。

(a)補整式とその精度の同定

1. データの収集と整理

最初に、図の解析のフローチャートに示すように、①で地質、地形、ボーリングデータ等地盤情報を収集し、地質データに基づいて、解析領域を分ける。さらに、②で過去に発生した地震データ(震源、マグ



1. 付録 解析のフローチャート

ニチュードなどを収集し、③で当該地震の地下深部における地震波形を KiK-NET から収集する。さらに、④で当該の地震による地表における地震動の記録を収集する。また、⑤で、地震被害を推定するための都市情報などを収集する。

地震動の再現計算

次に、④のデータを入力地震動とし、①のボーリングデータに対して、各種方法を用い、⑥でボーリング地点(地表)での地震動を計算する。

2. 地震動計測空間分布の算定

⑦で、⑥で各ボーリング地点において計算した地震動(地表)に対し、クリギング法により地球空間統計特性を同定する。この時、確率場モデル(正規分布、対数正規分布等)、バリオグラムに関する検討と同定を行う。特に、⑥で三次元に広がる地盤に対して一次元を仮定した計算法を適用することによって発生する誤差を、クリギング解析上、“観測誤差”として計算を進める。

3. 推定地震動の空間補間推定

⑧で、⑦での解析結果と⑥で推定した地震動に基づき、④で収集した地震計の設置された地点での地震動を補間推定する。

4. 推定地震と実測地震動の比較、キャリブレーション

⑨で、⑧で推定した地震動と④で収集した地震動を比較し、統計解析によりキャリブレーションを行い、⑩で、実測値に対する推定値の補整式とその補整精度を求める。また、この時、⑥で利用する計算方法による誤差特性を分析し、最も補整誤差の小さい計算方法を選択する。

(b)シナリオ地震に対する被害予測マップの作成

1. シナリオ震源モデルの設定と地震伝播の計算
最初に、⑪で、シナリオ地震の震源モデルを設定する。あるいは、過去に提案された東南海地震の震源モデルを利用する。また、⑪に基づいて基盤中の地震伝播(主に距離減衰)を計算し、⑬の解析対象地域

における地震波を推定する。地震動の推定と補整

次に、⑭で、⑬で推定した地震波を入力地震動とし、①のボーリングデータに対して、⑨で選択した最も精度のよい計算方法を用いて、ボーリング地点(地表)での地震動を計算する。さらに、この推定値を⑩の補整式で補整し、その精度を計算する。

2. 精度付地震動予測マップの作成(シナリオ地震対応)：推定地震動の空間補間推定

⑮で、⑭で各ボーリング地点において計算、補整した地震動(地表)に対し、⑦で同定した確率場モデルを利用して、クリギング法により、任意の地点、あるいは、任意の領域における地震動を推定し、その推定精度を計算する。

3. 被害予測マップの作成(シナリオ地震対応)

⑯で、⑮で推定した地震動と、その推定精度に基づき、⑤で収集した都市データ等を利用して、被害予測マップを作成する。マップは行政の様々な情報と重乗し、解析することを念頭に、GIS を用いて表示するとともに、拡張可能なシェイプ形式で管理活用していく。

(c)地震速報のための被害予測マップの作成

1. 発生時の地震情報の収集

最初に、⑰で、地震発生時の震源情報を収集する。

2. 発生地震の地震波(解析対象領域の地下)の収集

同時に、⑱で、発生地震の地下深部における地震波形を KiK-NET から収集する。また、⑲で地表における地震動をリアルタイムに計測し収集する。

3. 地震動の推定と補整

次に、⑳で、⑱で推定した地震波を入力地震動とし、①のボーリングデータに対して、⑨で選択した最も精度のよい計算方法を用いて、ボーリング地点(地表)での地震動を計算する。さらに、この推定値を⑩の補整式で補整し、その精度を計算する。

4. 精度付地震動予測マップの作成(地震速報対応)：推定地震動の空間補間推定

㉑で、㉒で各ボーリング地点において計算、補整した地震動(地表)と⑲で実測した地震動(地表)の 2 種類のデータに対し、それぞれの推定精度(⑲の場合は誤差=0)を付帯させて、⑦で同定した確率場モデルを利用して、クリギング法により、任意の地点、あるいは、任意の領域における地震動を推定し、その推定精度を計算する。

5. 被害予測マップの作成(地震速報対応)

㉓で、㉑で推定した地震動と、その推定精度に基づき、⑤で収集した都市データ等を利用して、被害

予測マップを作成する。

(B) データの蓄積と精度アップのシステム

(a) 地震データの追加収集と整理

㉔で、⑰と⑱および⑲と収集した地震データにより、⑩で提案した補整式と補整精度の精度を向上させる。

(b) 地質、地形、ボーリングデータの追加収集と整理

㉔で、地質、地形、ボーリングデータを追加収集し、㉓で、蓄積するデータは①のデータに追加し、さらなる地震動予測の精度アップに利用する。

(c) 追加データの収集の方法とメリット

特に、⑮、⑯、㉑、㉒の予測マップを基に、ボーリング情報や地震計測の不足している地点などを洗い出すことができる。この場合、ボーリング調査の追加や、地震計の設置場所の追加、変更などによって、さらに予測精度の高いマップを作成することが可能となる。

また、⑤のデータも逐次更新することが望ましい。

(C) 成果のイメージと利用方法の検討：高精度地震動マップと GIS を活用した利活用へのカスタマイズ

作成した高精度地震動マップは、行政が行う様々な災害事前、事後対策のベースマップとして活用可能である。特にこれまでの紙ベースのマップと異なり、地震動観測データの蓄積やボーリング試料の追加による地震動マップの予測精度の向上に伴う更新(進化)に加え、付加情報の更新も同時に可能である。したがって災害の事前対策から即時の災害情報提供まで、幅広く提供可能である。GIS を用いた空間的な地震動マップに、例えば耐震化と非耐震構造物分布を重乗表示し、橋梁や道路の被災予測、緊急輸送道路のネットワーク検索など、GIS の分析機能を用いた精査が可能である。これらについて行政と議論しながらカスタマイズを行っていく。