

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

Results of Application of Kriging Method to Producing By Providing Digital Hazard Maps of Strong Ground Motion in the City of Owariasahi

菅井径世*・小川克郎*・加藤悟*・森保宏**
廣内大助***・西村雄一郎****・早川敏明**

SUGAI Michiyo, OGAWA Katsuro, KATO Satoru, MORI Yasuhiro,
HIROUCHI Daisuke, NISHIMURA Yuichiro, and HAYAKAWA Toshiaki

*名古屋産業大学大学院、**名古屋大学大学院、***信州大学大学院、****奈良女子大学大学院

*Nagoya Sangyo University、Nagoya University、***Shinshu University、& ****Nara Women's University

Abstract: This report presents some results of application of Kriging method to produce earthquake hazard maps of Owari-Asahi city. In this practical application, it is found that the spatial distribution of strong ground motions can be clearly estimated by the modification method proposed by the authors.

In fiscal year of 2015, the city made a decision to adopt the modification method proposed by the authors for providing the hazard and damage estimation map. By this method, strong ground motions can be estimated accurately at a minimum costs. Because the Kriging analyses can also provide quantitatively the estimation errors, the low accurate estimation areas can be found at a glance in the all area. Such hazard maps have been created by covering their areas with numbers of meshes of which sizes are such as 250meters square less or more, and the strong ground motion intensities are indicated for each mesh. Strong ground motions are, however, more desired to be estimated at each construction site than for those large size meshes. Large meshes cannot provide information detail enough to plan earthquake countermeasures. On the other hand, when the meshes are reduced in size, it requires a large amount of time and costs, because the ground layered systems must be modeled for all the meshes. It also should be noted that the amount of information about ground conditions and soils in the city is not increased by reducing the size. Simple adoption of small size meshes would lead us to create an expensive but not adequately accurate hazard map. Recently, some advanced numerical analysis methods, such as based on three dimensional finite element methods (FEM), are developed to estimate soil behaviors highly accurately. The methods, however, need very accurate soil parameters and detail boundary conditions; yet, either of them is hardly available in a whole city. Such advanced numerical methods can be effectively utilized for only particular places, but not for all over a city

While the authors guide the experts to accomplish the project, some sample computations are antecedently performed to estimate the spatial distribution of the strong ground motions, using sample ordinary boring investigation data and one-dimensional earthquake response analyses. As a result, the authors found that the only one proposed parameter of explanatory variable can work as well as tens of number of explanatory variable in the sample statistical analysis to estimate the stochastic field of the strong ground motions.

Keywords: earthquake, hazard map, stochastic field, modeling, accuracies, Kriging, ground strong motion

1. はじめに

(ア) 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。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、全面的に活用した本システムを、実用に資して、地震ハザードマップ、被害想定マップを作成した。

本報告では、尾張旭市の事業における空間統計計算を指導した立場から、その空間統計結果とその特長を紹介する。

(イ) 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、

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—猿投断層地震	(尾張旭市)

表1-1 対象とした想定地震

「過去最大モデル」と「理論・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・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・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2Rと呼ぶ)と「理論・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。

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。

(ウ) 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。

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

表1-2 推定した地震動・被害想定パラメタ

2. 空間統計解析のための基礎方程式

(ア) 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、実際に起こった実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採取して、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の補正予測し、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。本章では、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、徹底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。

(イ) 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 $z(\mathbf{u}_i)$ 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の上表面(=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、図-4. 3. 2 のように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、 $\rho(0)=1$ 、 $\rho(\infty)=0$ 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。

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} C(\mathbf{u}_1 - \mathbf{u}_1) & C(\mathbf{u}_1 - \mathbf{u}_2) & \cdots & C(\mathbf{u}_1 - \mathbf{u}_n) \\ C(\mathbf{u}_2 - \mathbf{u}_1) & C(\mathbf{u}_2 - \mathbf{u}_2) & \cdots & C(\mathbf{u}_2 - \mathbf{u}_n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C(\mathbf{u}_n - \mathbf{u}_1) & C(\mathbf{u}_n - \mathbf{u}_2) & \cdots & C(\mathbf{u}_n - \mathbf{u}_n) \end{bmatrix} \quad (4)$$

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。

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

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

また、このとき、トレンド成分 Xb の係数パラメタベクトル 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。

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

ただし、上式には、共分散行列 C の逆行列が含まれるため、係数パラメタベクトル b は、対数尤度 $L(z|b, \theta)$ 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 $p(z|b, \theta)$ の対数値 $L(z|b, \theta)$ 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 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 $\text{Max}\{L(z|b, \theta)\}$ 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 $C(u_i, u_j)$ やトレンド関数 $f(u_i)$ 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(Akaike1972)

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

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 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 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。

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

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。

(イ) 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。

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

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。

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

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

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、 $\mathbf{v}_0 (= \boldsymbol{\lambda}_0 \text{ と } \boldsymbol{\eta})$ 、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. 推定試算例

(ア) AIC の試算結果

図3-1に、式(15)による AIC の計算値を示す。(1)は2Rの場合のPGV、(2)は4Rの場合のPGV、(3)は2Rの場合の計測地震動、(4)は、4Rの場合の計測地震動に関する AIC 値を示したものである。また、それぞれの図には、式(15)による AIC の第1項を色塗りで、第2項をクロス戦で示している。また、ケースAは、式(22)の計算誤差分散を考慮した場合、ケースBは、これを0として考慮しない場合

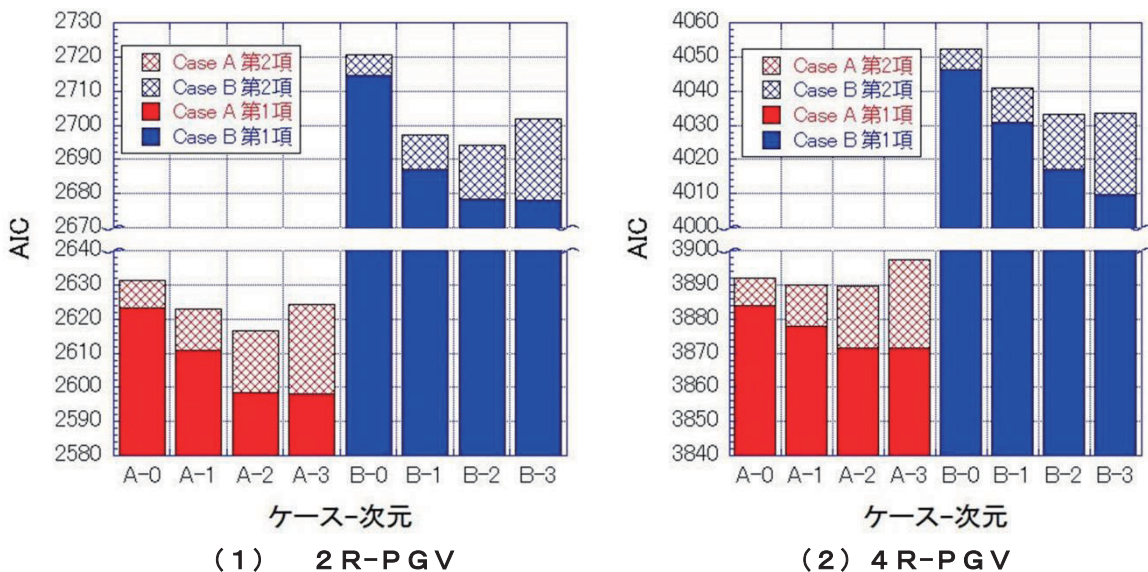


図3-1 推定した AIC (次項につづく)

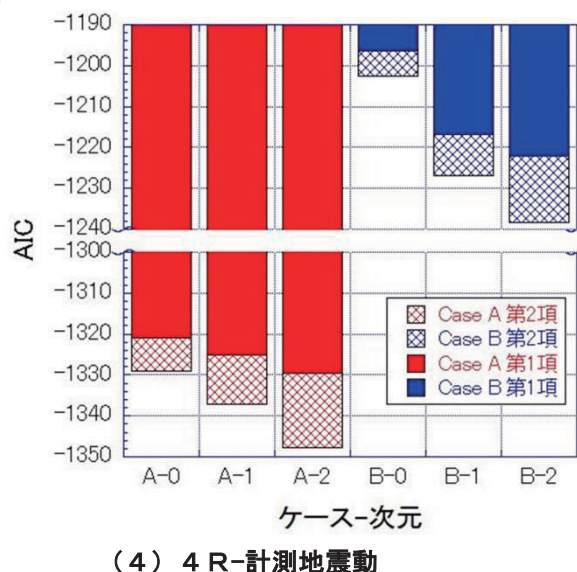
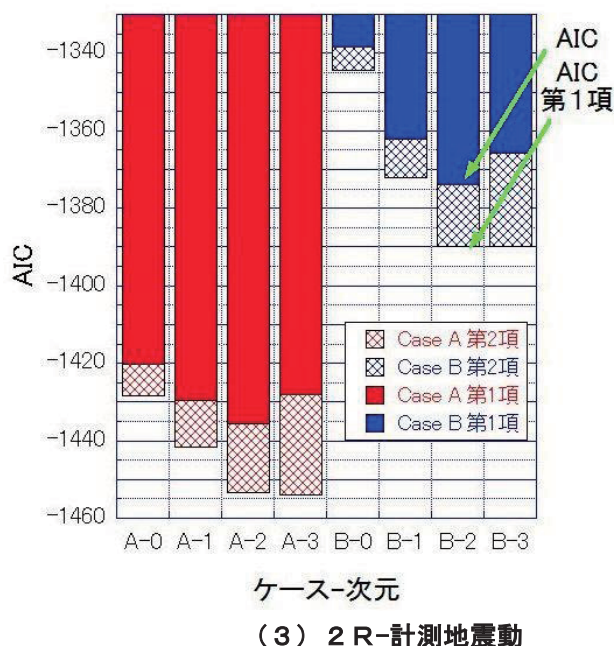


図3-1 推定したAIC (承前)

である。各ケースについては、それぞれ、式(6)によるトレンド関数の次元を示している。試算例では、0次元（オーディナリクリギングと呼ばれる場合）から3次元までの結果を示している。ただし、4Rの計測地震動の場合、計算機の精度上の問題で、3次元での計算結果は得られなかったため示していない。計測地震動の場合、式(15)によるAICの第1項が負値となっているが、第2項は正值である。図では、(1)～(4)までのいずれの場合も、クロス線で示した部分の上面が、式(15)によるAICの値（第1項と第2項の和）であるように表示している。

図3-1のいずれの場合も、トレンド関数の次元が大きくなるにつれて、AICの第1項は小さな値となっている。これは確率場を表現するためのパラメタ（説明変数）が増えたためであり、当然の結果である。一方、第2項はトレンド関数の次元が大きくなるにつれて増えるため、式(15)によるAICの値（第1項と第2項の和）は、(1)～(4)のケースA、Bいずれの場合も2次元のトレンド関数を用いた結果が最適解となっている。ただし、この次元の最適値は、推定する地震動パラメタによって、変化する。

一方、特に注目すべきは、図3-1から明確に分かるように、(1)～(4)のいずれの場合も、ケースAのAICが、ケースBのそれよりも非常に小さな値となっていることである。例えば、図3-1(1)

の最適解であるケースAとケースBの2次元でのAICの第1項を比較した場合、約77.8小さな値となっている。第2項の差は、式(15)から同じ次元のトレンド関数の場合、計誤差分散というパラメタ1個による差=2としかならない。すなわち、図3-1(1)の最適解であるケースAとケースBとのAICの差分=77.8は、説明変数の差が僅か2でしかないとを考慮すると、この差は、38(=77.8÷2)個分以上の説明変数の差であることが分かる。同様に、(2)場合は71個以上、(3)場合は30個以上、(4)場合は50個以上と、どの場合においても非常に大きな差が生じている。すなわち、図からは、最も標準的なトレンド関数のせつめい編纂を増やす方法よりも、計算誤差分散1つを考慮することで、各確率場を非常に巧みに表現できることが証明されていることが明確に分かる。

(イ) シルの試算結果

図3-2に、式(3)によるシルと計算誤差分散の推定値を示す。図3-1の場合と同様、(1)は2Rの場合のPGV、(2)は4Rの場合のPGV、(3)は2Rの場合の計測地震動、(4)は、4Rの場合の計測地震動に関するシルと計算誤差分散の値を示したものである。図3-1に示したAICの値と同様、0次元から3次元までの結果を示している。ただし、ただし、4Rの計測地震動の場合、計算機の精度上の問題で、

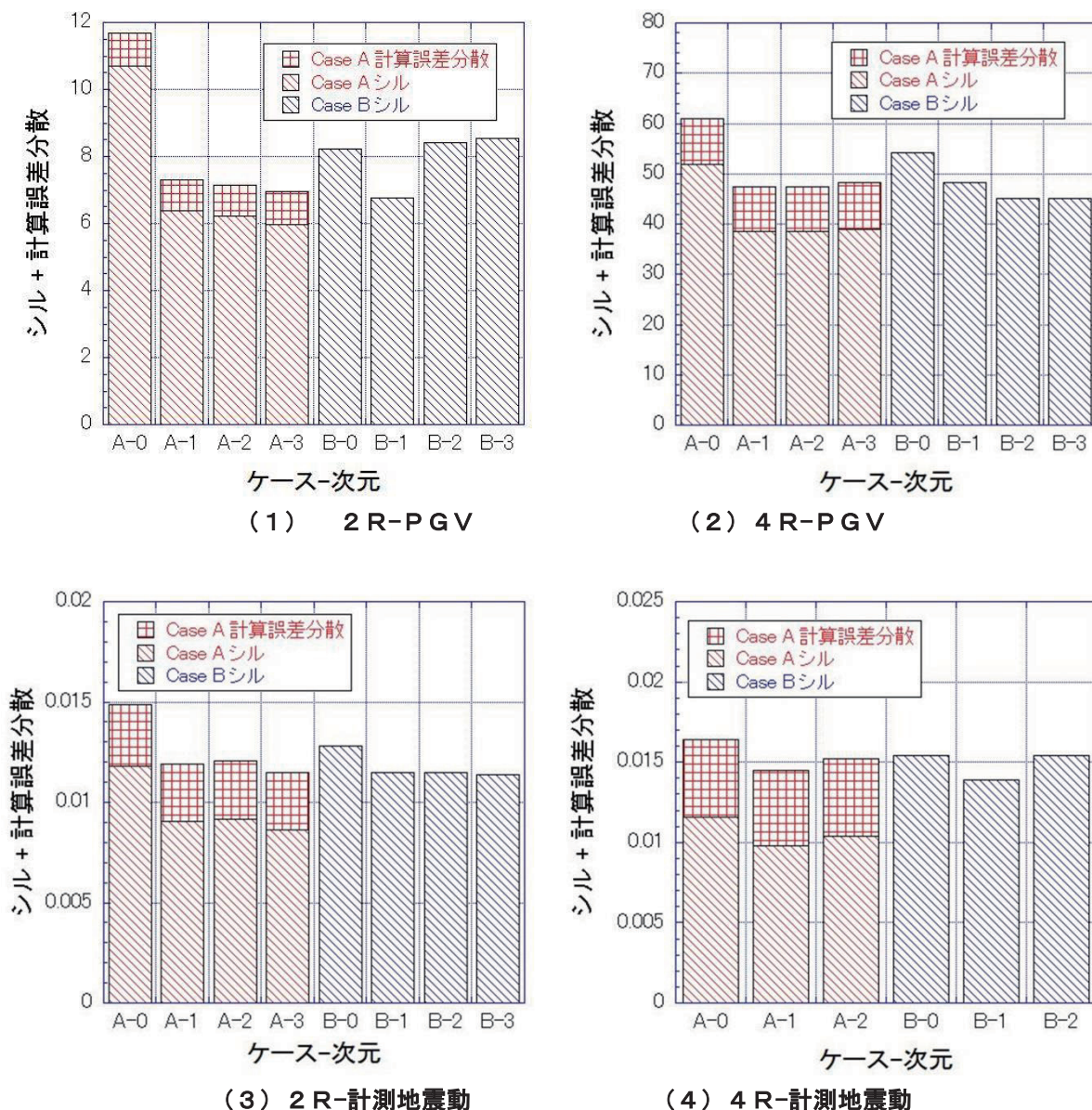


図 3-2 推定したシルと計算誤差分散

3次元での計算結果は得られなかったので示していない。

一般に、シルもトレンド関数の次元が大きくなると、小さくなるが、こうした傾向に対して、図3-2の中に、イレギュラーな結果が見られるのは、やはり、計算機の精度上の問題によるものであると推測される。特に、トレンド関数の次元が大きくなるとこうした誤差の影響が大きくなる。しかしながら、いずれの場合、特に、AIC が最適値となるトレンド関数2次元の場合には、どの図においても、ケースAとケースBとの間に大差はなく、ケースAの場合においては、シルに対する計算誤差分散は小さい値

となっている。「シルに対して計算誤差分散が大きい」ことは、ボーリング地点での計算値の精度を十分に期待できないことを意味しており、この場合、空間分布の推定には意味がなくなる。計算誤差分散が、図に示す程度の範囲内にあることは非常に重要である。

(ウ) レンジの試算結果

図3-3に式(3)によるレンジの推定値を示す。図3-1の場合と同様、(1)は2Rの場合のPGV、(2)は4Rの場合のPGV、(3)は2Rの場合の計測地震動、(4)は、4Rの場合の計測地震動に関するシルと計算誤差分散の値を示したものである。図3-1に

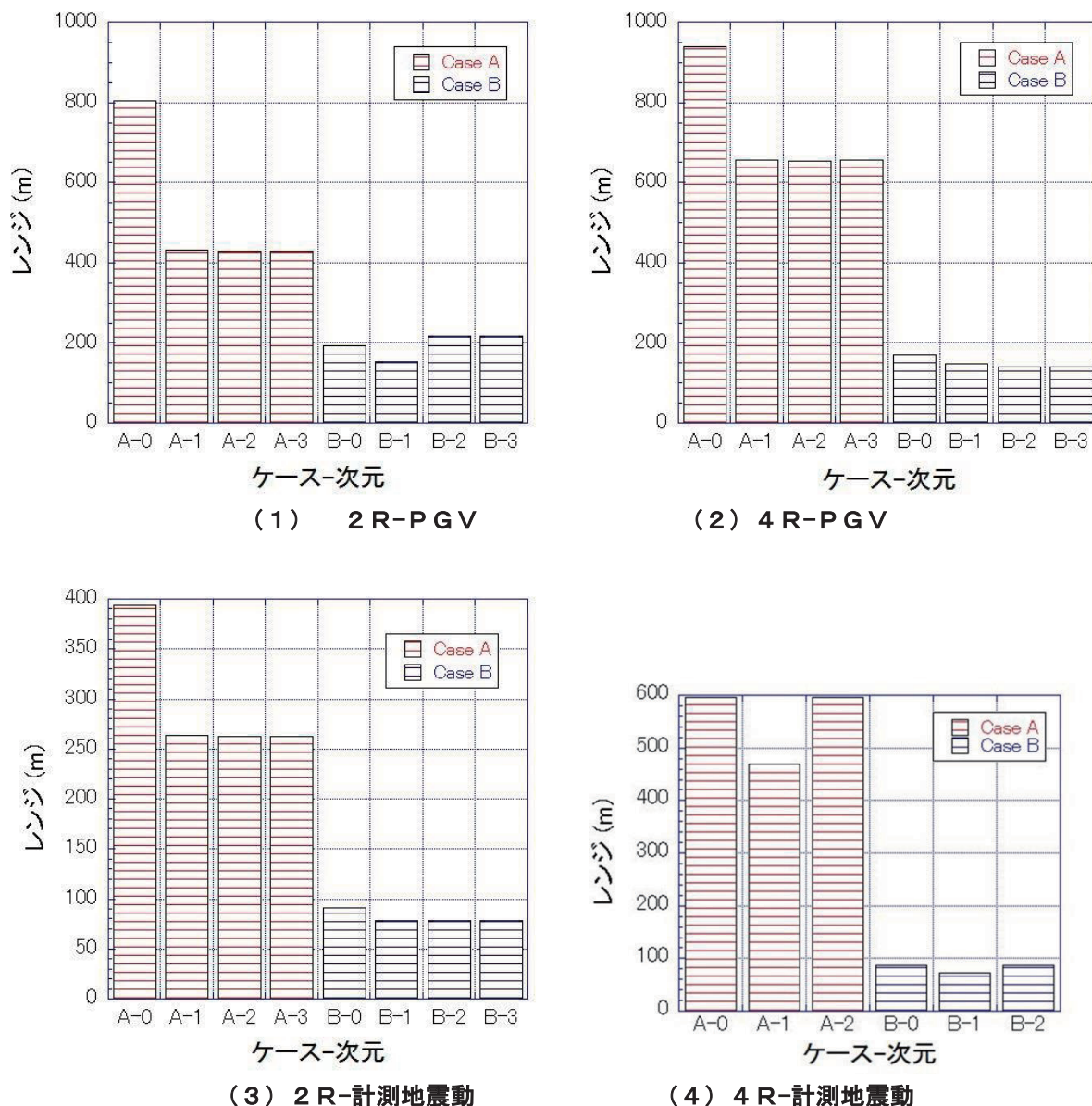


図 3-3 推定したレンジ

示した AIC の値と同様、0次元から3次元までの結果を示している。ただし、ただし、4 R の計測地震動の場合、計算機の精度上の問題で、3次元での計算結果は得られなかったもので示していない。

一般に、レンジもトレンド関数の次元が大きくなると、小さく（短く）なるが、こうした傾向に対して、図 3-3 の中に、イレギュラーな結果が見られるのは、やはり、計算機の精度上の問題によるものであると推測される。特に、トレンド関数の次元が大きくなるとこうした誤差の影響が大きくなる。しかしながら、いずれの場合も、ケース A のレンジは、ケース B の場合と比較して、レンジは非常に長い。

これは、地震動の空間分布を推定するうえで、ケース A の方が、ケース B の場合よりも、はるかに有利であることを意味している。図 3-1 に示したように、ケース A では、AIC も小さく、地震動の空間分布に関する確率場を非常によく再現できていると同時に、任意地点における空間分布の推定にも有利なことが分かる。

(エ) 計算誤差分散の試算結果

図 3-4 にそれぞれの地震動に対するシルと計算誤差分散の比を変動係数として示す。図 3-1 の場合と同様、(1) は 2 R の場合の PGV、(2) は 4 R の場合の PGV、(3) は 2 R の場合の計測地震動、(4)

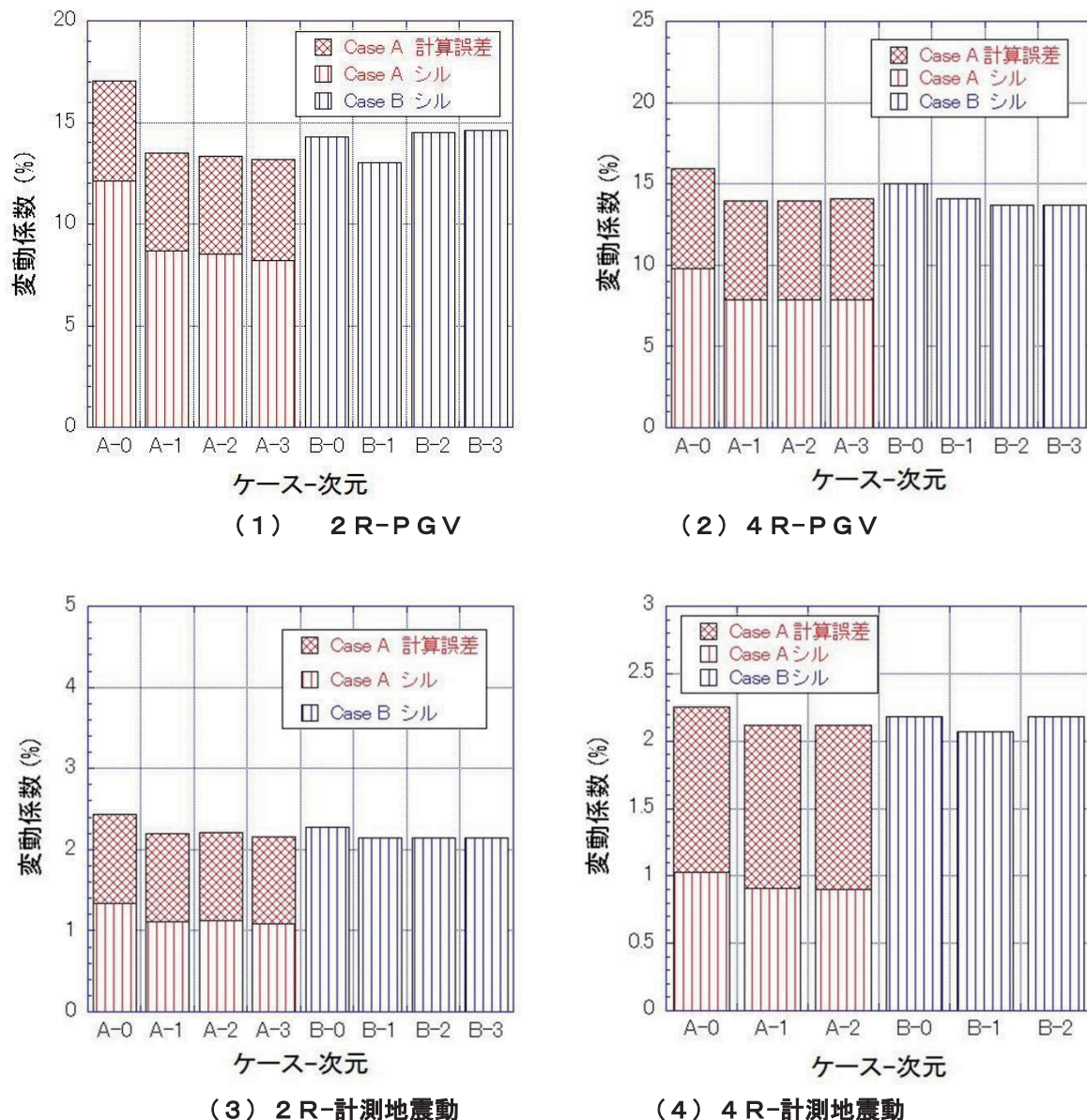


図3-3 推定した変動係数

は、4Rの場合の計測地震動に関するシルと計算誤差分散の値を示したものである。図3-1に示したAICの値と同様、0次元から3次元までの結果を示している。ただし、ただし、4Rの計測地震動の場合、計算機の精度上の問題で、3次元での計算結果は得られなかったため示していない。

図に示したように、すべてのケースにおいて変動係数は小さな値となっている。すなわち、2Rの場合でも15%程度であり、4Rの場合では、数%程度と非常に小さな値となっている。

ただし、この誤差は、ボーリング地点で計算した各種地震動の空間分布のばらつきを表現するために

推定した確率場モデルに伴って算出された値であり、ボーリングデータから地震動を計算するための力学モデルに伴う誤差等については、著者らが計画し、準備している地震観測網による計測結果に基づいて議論されるべきである。

4. おわりに

本報告では、著者らが提案したクリギング法に基づく高精度な地震災害情報システムによる実務計算の数例を紹介するに至った。尾張旭市は、地震動の推定精度を高めるために、本報告で利用したボーリングデータに加え、市周辺の行政などからさらにボー

リングデータを加えて、公式公開する予定である。しかしながら、本報告で示した計算統計値は、ほぼ実用されるものと同様の値である。

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。

しかも、著者らが提案する手法は、精度が高いのみでなく、その精度の定量的な算定が可能であり、詳細な結果が得られるうえに、コストも安価である。さらには、本システムを利用すれば、維持管理が容易であり、常に最新の情報に基づいて、最高精度のハザードマップを作成することが可能である。

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。

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] 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

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。

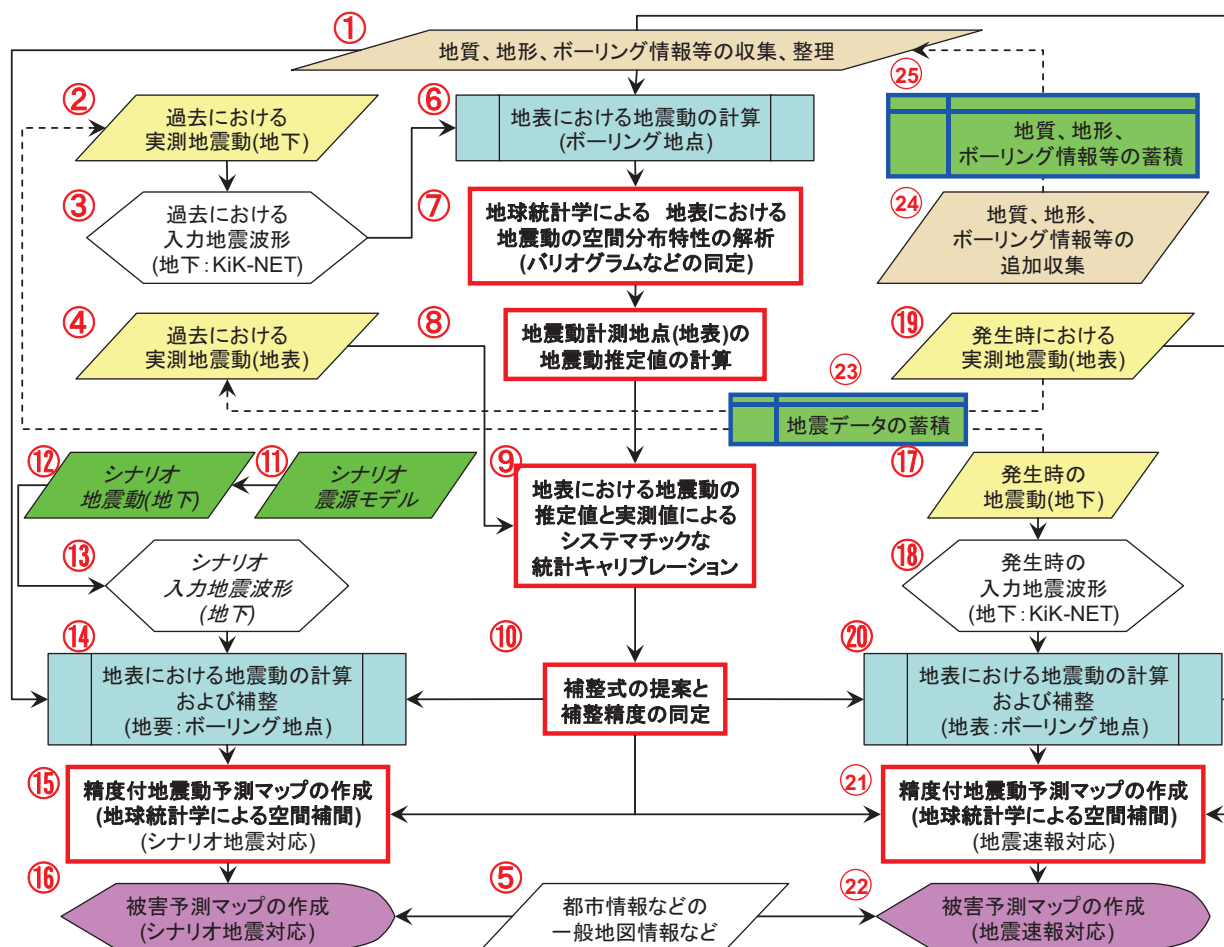
(A) 解析の手順

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、本年度中に解析したのは、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、マグニチュードなど)を収集し、③で当該地震の地下深部



付録 解析のフローチャート

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

シナリオ震源モデルの設定と地震伝播の計算

1. 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)

㉒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

㉓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。