

## 2005 年福岡県西方沖の地震の観測記録に基づく強震動評価手法の検証

地震調査委員会強震動評価部会(2007)は、「震源断層を特定した地震の強震動予測手法（「レシピ」）」（以下、「レシピ」という）の検証のため、平成 17 年（2005 年）3 月 20 日に発生した福岡県西方沖の地震（M7.0）の理論的に計算された強震波形を実際に得られた観測記録と比較することによって、「レシピ」における適用性やその改良すべき点について検討した（以下「中間報告」という）。この「中間報告」では、現在の「レシピ」によって観測記録がおおむね再現可能であることが確認された。また、破壊伝播速度が震源断層モデルを特性化する上で大きな影響を与えることが分かった。しかし、「レシピ」に基づいた強震動計算において、福岡平野や筑紫平野などでは周期 1～2 秒付近に見られる卓越周期の振動性状を十分に説明できていないことが課題として挙げられた。これは、地下構造モデルの再構築が必要であることを示唆するものであった。また、福岡市の中心市街地では、震源距離がほぼ等しい観測点間でも観測された最大速度値に大きな差が生じており、約 1km メッシュでは表現しきれない表層の増幅をよりきめ細かく評価することが必要となった。

以上の課題を踏まえ、観測記録の再現を主眼に地下構造モデルを再構築し、このモデルを用いての強震動予測の再計算を行って「レシピ」における適用性やその改良点について検討した。

### 1. 検証の概要

特性化震源モデルおよび強震動評価手法の検証では、基本的に「中間報告」と同様な流れをとった。

地下構造モデルについて、まず深い地盤構造ではレシピに従い、三次元差分法による計算波形と観測記録を比較して、1 次地下構造モデル<sup>1</sup>を構築した。浅い地盤構造では、「中間報告」で用いた 1km メッシュとは異なり、約 250m メッシュ<sup>2</sup>の地形・地盤分類メッシュマップを用い、最大速度の増幅率を求めた。

これらの地下構造モデルを用いて、「ハイブリッド合成法」による強震動計算を行った。ここで、中間報告では震源断層の要素断層の大きさを 1km 四方としていたものから、2km 四方にしたもので算出した。

さらに、「ハイブリッド合成法」による震度算出方法について、工学的基盤上面

- 1 1 次地下構造モデルは、物理探査結果や地質資料等によって構築した深い地盤構造モデル（0 次モデル）に対して地震観測点において計算によるスペクトル比と観測記録によるスペクトル比を比較して修正した深い地震構造モデル（0.5 次モデル）を作成し、さらに 0.5 次モデルを用いて三次元差分法による計算波形と観測記録およびスペクトル比等と比較して修正したモデルのことをいう。
- 2 ここで設定した 250m メッシュは、辺の長さが基準地域メッシュ（約 1km×約 1km）の辺の長さの 4 分の 1 の長さとなる「4 分の 1 地域メッシュ」として設定したものである。

から地表における震度を推定するための手法の検討を行い、この手法を「レシピ」へ導入した。

それぞれの評価結果の検証は観測記録との比較により行った。用いた指標は、最大速度、計測震度、時刻歴波形および応答スペクトルである。

以上の結果を基に、現行の「レシピ」における課題について検討した。

なお、福岡市の中心市街地においては、ボーリングデータが比較的多く得られていたため、これらを用いた一次元地下構造モデルを約 250m メッシュごとに作成し、強震波形を計算して、観測波形との比較を行った。

## 2. 想定する震源断層

「中間報告」と同じ震源モデルを用いた。すなわち、レシピによる特性化震源モデルを基本として、波形インバージョンに基づく震源破壊過程の結果を参考に以下の 4 ケースを特性化震源モデルとして与えた。設定した震源モデルのパラメータは表 1 に示す通り、巨視的震源モデルは 4 ケースとも同じである。

ケース 1 : Kobayashi *et al.* (2006) に基づく特性化震源モデル

ケース 2 : Asano and Iwata (2006) に基づく特性化震源モデル

ケース 3 : Sekiguchi *et al.* (2006) に基づく特性化震源モデル

ケース 4 : 「レシピ」に基づく特性化震源モデル

## 3. 用いた地下構造

基本的には九州全域の 1 次地下構造モデルの構築を行い、本検討において想定する震源断層を含む強震動評価を行う範囲の地下構造モデルを抽出して、強震動計算に用いた。今回、以下の点を新たに検討した。

- a) 深い地盤構造についてはレシピに従い、三次元差分法による計算波形と観測記録を比較して、1 次地下構造モデルの構築を行う
- b) 浅い地盤構造については、約 250m メッシュによる地形・地盤分類メッシュマップを用い、最大速度の増幅率を求める
- c) 福岡市の中心市街地については、ボーリングデータを用いた一次元地下構造モデルを約 250m メッシュごとに作成する

### 3.1 計算対象領域

「中間報告」と同様に、福岡県西方沖の地震の本震において震度 5 強が観測された地点を包含する、以下の 4 点で囲まれる矩形内（図 1 参照）を対象領域とした。

北西端 : 北緯 33.9167° 東経 129.7375°

北東端 : 北緯 33.9167° 東経 130.7375°

南西端：北緯 33.1167° 東経 129.7375°  
南東端：北緯 33.1167° 東経 130.7375°

### 3.2 深い地盤構造について

「中間報告」において、九州全域の各種物理探査結果、ボーリング調査および物理検層結果、地形・地質解釈資料等の資料収集、整理を行い、「深い地盤構造」の0次モデルを作成した（図 4-1, 4-2 の左図参照）。深い地盤構造の物性値を表 2 に示し、地震基盤以深の地殻構造の物性値を表 3 に示す。

「中間報告」では、観測地点の一次元地下構造モデルを用いて、レイリー波の水平成分のスペクトルと上下成分のスペクトル比（H/V スペクトル比）の計算値と観測値の H/V スペクトル比を比較し、観測値を説明できるように深い地盤構造モデルの修正を行って 0.5 次モデルを作成した。今回は、この 0.5 次モデルを使って三次元差分法により地震動計算を行い、計算波形の H/V スペクトル比と観測記録の H/V スペクトル比を比較することによって 1 次地下構造モデルを構築した。修正作業の手順は以下の通りである。

- ① 初期の 0.5 次モデルを用いて計算されたレイリー波の H/V スペクトル比と、観測記録による水平動成分と上下成分の H/V スペクトル比を比較し、深い地盤構造モデルの修正が必要な観測地点を抽出する
- ② 代表的な地震について、工学的基盤上面までの 0.5 次モデルを用いた三次元差分法による計算を行い、計算波形と観測記録の形状およびスペクトル形状を比較する
- ③ モデル修正が必要な各観測地点について、波形形状および H/V スペクトル比を説明できるように速度構造の修正を行う
- ④ 各観測地点での修正結果を用いて、地質構造による補完などにより、周辺地域への調整を行う
- ⑤ 上記②から④の作業を九州地域全体について行い、深い地盤構造の 1 次モデルを構築する。
- ⑥ 構築した 1 次モデルを用いて再度代表的な地震について三次元差分法による計算を行い、地盤構造モデルの説明性を確認する

図 2 に深い地盤構造の 1 次モデルに用いた地震の震源と観測点位置を示す。図 3-1～図 3-5 には、九州北部の代表的な観測点における観測記録と三次元差分法による計算波形との比較および 0.5 次モデルと 1 次モデルの比較を示す。

以上の検討の結果、最終的には、深い地盤構造の 1 次モデルは、図 4-1、4-2 に示す通りとなった。なお、同図には、左図に旧モデル、中図に新モデル、右図にこれらの深さの差を示している。

### 3.3 浅い地盤構造について

浅い地盤構造は、今までの強震動評価で用いられていた、面的な評価によるモデル化を行った。

「中間報告」では、約 1km メッシュの国土数値情報を利用した手法（松岡・翠川(1994)および藤本・翠川(2003)）による最大速度の増幅率を用いた。この後、日本全国を統一した地形・地盤分類メッシュマップの構築や経験式の更新がなされたことにより、今回は、新たな微地形データと経験式を用いることにした。

表 4 に、新旧の微地形区分と経験式の対応を示す。図 5 に、現行の方法と新規の方法（約 250m メッシュ）の最大速度増幅率を示す。

## 4. 強震動評価手法

工学的基盤上面位置での強震動計算は、短周期領域に統計的グリーン関数法、長周期領域に理論的手法である三次元差分法を用い、両者を合成する「ハイブリッド合成法」により行った。なお、「ハイブリッド合成法」における接続周期は 1 秒である。

### 4.1 新しい計測震度換算式

工学的基盤上面から地表への換算は、工学的基盤上面における最大速度の値に前述の最大速度の増幅率を乗じることにより地表の最大速度を算出した。また、計測震度は、下記に示す藤本・翠川(2005)による最大速度と計測震度の経験的關係式より求めることとした。なお、ここでは計測震度 5 弱以上になる地点に主眼を置いているため、便宜的に計測震度 3 以下についても下記の式を用いて算出した。

$$I = 2.002 + 2.603 \cdot \log(PGV) - 0.213 \cdot \{\log(PGV)\}^2 \quad (4 \leq I)$$

ただし、 $I$  は計測震度、 $PGV$  は最大速度(単位 cm/s)。

### 4.2 工学的基盤上面での波形の 1km メッシュから 250m メッシュへの展開

工学的基盤上面の波形は約 1km (3 次) メッシュの中心点について計算を行う。新たな浅い地盤モデルは約 250m メッシュでモデル化されているが、一つの 3 次メッシュ中に含まれる 16 個の 250m メッシュに対して、すべて同じ入力波形を与えて 16 個のメッシュそれぞれの増幅率を考慮して地表の最大速度および計測震度を求めることとした。図 6 に約 1km メッシュの工学的基盤上面での波形を約 250m メッシュの表層地盤へ展開したイメージを示す。

### 4.3 統計的グリーン関数法の計算に用いる要素断層の大きさについて

「中間報告」において計算波形で見られた周期 0.5 秒～1 秒のスペクトルの落ち込みが指摘され、ここでは、統計的グリーン関数法の要素断層の大きさを変えることで対処することとした。

統計的グリーン関数法では、要素断層に用いる地震と本震の規模が大きく異なる場合には、特定の周期に落ち込みが出るのが指摘されている。「レシピ」において、地震動の長周期成分と短周期成分の波形計算に当たり、震源モデルを統一的に扱うために要素断層の大きさを一様にし、破壊伝播速度を一定としている。このような場合には短周期成分が平滑化される傾向にあるが、要素断層の大きさを適切に選択することで、見かけ上、特定周期の落ち込みが改善される。これらのことから、「中間報告」におけるスペクトルの落ち込みを改善するため、統計的グリーン関数法の計算で用いる要素断層の大きさを 1km 四方から 2km 四方に変更した場合について計算を行った。このとき、断層端からそれぞれ 5km、7km と設定されていたケース 2 の 2 個のアスペリティについては、その位置を 1km 北西側に移動させた。その他の条件については、「中間報告」と同じとした。

図 7 に要素断層の大きさの違いによるスペクトルの違いの例を示す。要素断層が 1km 四方の時に見られた 0.6Hz ～ 3Hz のスペクトルの落ち込みは、要素断層を 2km 四方にすると、1Hz～3Hz のスペクトルの落ち込みが小さくなっている。これは、入倉(1994)などで指摘されている多数の小地震による重ね合わせを行った場合に中間周期帯でスペクトルの落ち込みが生じるという問題が、要素断層の大きさを 1km 四方とした計算において現れていたことを示唆している。

図 8 に中間報告および要素断層の大きさの違いによる地震動計算結果の比較を示す。左列と中列の違いは中間報告との深い地盤構造モデルの違いによるものである。統計的グリーン関数法において要素断層を 2km 四方とした場合（右列）、スペクトルの落ち込みが改善したことから最大速度が全体的にやや大きめとなっている。

#### 4.4 「ハイブリッド合成法」による震度算出方法について

周期 2 秒以上の地震動が卓越するような場合、工学的基盤上面の最大速度から最大速度増幅率および最大速度と計測震度の経験式を用いて地表の計測震度を求めると過大評価となる傾向がある。これは、計測震度が主に周期 0.1～2 秒の波から計算され、長周期成分がフィルターにより落とされる（気象庁告示；気象庁, 1996）ことによる。この計算ではその効果がうまく入っていないことが原因と考えられる。そこで、この点を改善するための震度算出手法について検討を行った。

「ハイブリッド合成法」により計算される工学的基盤上面の波形をもとに、気象庁(1996)に従って計測震度を算出することにより、計算された波形の卓越周期等が加味された震度が求められることが期待される。ただし、地表の震度を求めるためには、浅い地盤構造による震度増分が必要となる。経験的に震度増分を求める手法として、次の二通りが考えられる。

- ① 工学的基盤上面の波形に対して評価地点における「最大速度増幅率」を掛け合わせた波形を地表の波形とみなし、この波形より気象庁(1996)に従って震度を求める。
- ② 工学的基盤上面の波形から気象庁(1996)に従って算出した「工学的基盤上面震度」に対して、「最大速度増幅率」および「最大速度と計測震度の経験的関係式」より求められる「震度増分」を加える。

①については、2003年十勝沖地震を対象とした同様の検討(森川・他, 2007)で施行されている手法であるが、この場合、計測震度 ( $I$ ) を算出するための式

$$I = 2 \cdot \log a + 0.94 \quad \dots \dots \dots (1)$$

(ただし、 $a$  は継続時間が 0.3 秒となるフィルター処理済み波形の最大振幅) より、「工学的基盤上面震度」に対して震度増分 ( $\Delta I$ )

$$\Delta I = 2 \cdot \log(amp) \quad \dots \dots \dots (2)$$

を加えることに相当する (ただし、 $amp$  は最大速度増幅率)。

一方、②の震度増分は、最大速度 ( $PGV$ ; 単位 cm/s) と計測震度の関係式

$$I = 2.002 + 2.603 \cdot \log(PGV) - 0.213 \cdot \{\log(PGV)\}^2 \quad \dots \dots \dots (3)$$

(藤本・翠川, 2005) から

$$\Delta I = 2.603 \cdot \log(amp) - 0.213 \cdot \{\log(amp)\}^2 - 0.426 \cdot \log(PGV_b) \cdot \log(amp) \quad \dots (4)$$

と表される (ただし、 $PGV_b$  は工学的基盤上面の最大速度(単位 cm/s))。

以上に関して、最大速度増幅率と表層 30m の平均 S 波速度 ( $AVS30$ ; 単位 m/s) の関係式 (藤本・翠川, 2006)

$$\log(amp) = 2.367 - 0.852 \cdot \log(AVS30) \quad \dots \dots \dots (5)$$

より求められる震度増分と  $AVS30$  の関係を図 9 に示す。工学的基盤上面における最大速度が 10~20cm/s 程度の場合には手法①、手法②ともほとんど同じ増分となっているが、工学的基盤上面における最大速度が大きい場合、手法②では軟弱地盤 ( $AVS30$  が小さい) で増分が低減しており、両者に違いが見られる。

## 5. 強震動予測結果とその検証

### 5.1 強震動予測結果

浅い地盤の最大速度の増幅率および最大速度と計測震度の経験式について、表 4 の①に示す旧手法と②に示す新手法の新旧二通りの方法によって求めた地表での最大速度分布および計測震度分布を、図 10 および図 11 に中間報告での結果も併せてそれぞれ示す。

## 5.2 観測記録との比較

### 1) 最大速度と計測震度

面的な浅部地盤の増幅特性を評価する場合、微地形データから表層 30m までの平均 S 波速度  $AVS30$  を設定し、これより増幅率に変換したものを工学的基盤上面の最大速度にかけて地表の最大速度を算出し、さらに計測震度に換算する。最大速度、計測震度の観測値との比較を図 12 ~ 図 15 に示す。なお、ここでは、今回の計算結果として統計的グリーン関数法の計算における要素断層の大きさを 2km 四方とした場合のみを採用し、観測点が含まれるメッシュについて計算結果を示している。従来の手法によって求められた値は、中間報告と比べて同程度か若干大きくなっている。これは、工学的基盤上面における最大速度分布 (図 8) と同様、統計的グリーン関数法の計算において要素断層の大きさを 2km 四方として 1km 四方の時に観測より落ち込んでいた周波数 1Hz~3Hz の特性を観測記録と同程度とした影響と考えられる。一方、新しい手法によって求められた値は、特に大きな最大速度、震度が観測された平野部で大きめとなっている。これは、最大速度の増幅率が平野部の軟弱な地域で大きくなったことによると考えられる (図 5 参照)。

### 2) 工学的基盤上面における「ハイブリッド合成法」による計算波形と観測記録との比較

「ハイブリッド合成法」による工学的基盤上面の計算波形について、観測記録および中間報告での計算波形との比較を図 16 に示す。計算波形については、観測点を含むメッシュにおけるものであり、観測記録については、中間報告と同様に、PS 検層によって  $V_s=500\text{m/s}$  以上の層までの速度構造が既知である観測点については、一次元重複反射理論による伝達関数を計算し、それを除すことによって工学的基盤上面相当の波形を求めている (図 16-4 の灰色線)。

深い地盤構造モデルにおいて大きな変化がない地点では、今回の計算波形は中間報告とほぼ同じとなっている (例えば、福岡市内; 図 16-1)。一方、筑紫平野の南西部では、新モデルにおいて堆積層が厚く修正されている。その中でも、特に第 1 層が厚くなった地点において、長周期成分 (周期 2~5 秒) の卓越周期や振幅が中間報告と比べると改善されている様子が見られる (FKO015、SAG007; 図 16-2)。ただし、初期モデルから厚い堆積層が設定されていた地域でもあり、波形の変化はそれほど顕著ではない。そのため、第 1 層の厚さにほとんど変化がない地点では、中間報告とほとんど違いが見られない (J90083; 図 16-2)。筑紫平野の北東部 (筑後川中流域) に関しても、新モデルにおいて堆積層がさらに厚く修正されたことにより、卓越周期などの改善が見られる (J90094、J90095; 図 16-3)。ただし、中間報告において過大評価となっていた地点については改善の傾向は見られない (J90086; 図 16-3)。一方、中間報告の計算波形において周期 0.3 秒付近で過大な増幅が見られていた背振 (せふり) 山地付近の地点では、今回の計算結果において顕著な改善が見られる (SAG003、SAG005; 図 16-4)。これは、比較的薄かった堆

積層の厚さが新モデルにおいてさらに薄く修正されたことによるものと考えられる。ただし、この周期帯における過大評価が改善されていない地点もある（例えば、FKO007；図 16-4）。

### 5.3 新たな震度算出方法による震度分布

2005 年福岡県西方沖の地震の計算結果に関して、福岡市地域における等価線形法による応答計算結果による震度と今回提案した震度算出方法を適用して求められた震度との比較を図 17 に示す。等価線形法による応答計算結果（6 章参照）は、算定した地表の波形をもとに気象庁(1996)に従った震度算出を行っている。なお、気象庁(1996)に従った震度算出にあたっては、上下動成分については考慮せずに計測震度の計算を行った。現行手法を用いた震度は等価線形による震度よりも大きくなっているが、①、②の両手法では等価線形による地表の波形より算出された震度との対応が良くなっている。

計算領域全体を想定した強震動評価について上記の方法を適用して地表の震度を求めた結果を図 18 に示す。筑紫平野南部で震度 5 強の地域が狭くなっている。観測値と比較した結果を図 19 に示す。手法①、②による結果は全体として若干過大評価ではあるものの、現行手法と比べてケース 1 で大幅に改善されており、ケース間の違いも小さくなっている。

「ハイブリッド合成法」によって計算された工学的基盤上面の波形をもとに、最大速度に増幅率をかけて、最大速度と計測震度の経験式より算出される計測震度の問題点に対し、本検討で提案した気象庁(1996)の計測震度算出法を用いた二通りの方法によって改善が見られ、精度向上が確かめられた。このような手法を適用することは、震源や深い地盤構造モデルの情報を基に計算された波形を活かした予測結果が得られるという利点もある。ただし、手法①においては、工学的基盤上面の速度波形に速度増幅率をかけて地表波形を算出することから、浅い地盤構造の周期特性を反映していない地表波形となる。

したがって、「ハイブリッド合成法」における地表の震度算出手法として、上記の手法②の震度増分を用いることを提案する。

## 6. ボーリングデータに基づく浅い地盤構造モデルによる地表の波形計算

地震調査委員会の強震動評価においては、通常、面的な浅い地盤の増幅特性を評価する場合、微地形データから表層 30m までの平均 S 波速度  $AVS30$  を設定し、これより増幅率に変換したものを工学的基盤上面の最大速度にかけて地表の最大速度を算出し、さらに計測震度に換算している。本来ならば、ボーリングデータに基づく浅い地盤構造モデルを構築して応答計算を行い、地表の波形を求める方法が精度の良い方法であるが、検討地域全域でのデータの取得が困難なこと、データの収集・整理に多くの労力を要することから、全国を一律かつ簡便な方法で行うため、上述の方法をとっている。この検討対象地域は、福岡市の中心市街地およびその周辺で、



多くのボーリングデータを取得できる環境にあることから、ボーリングデータに基づいて浅い地盤構造モデルを構築し、応答計算を行って地表の波形を計算する方法を試行的に行った。

## 6.1 ボーリングデータによるモデル化

警固断層近傍地域の福岡市の中心市街地について、ボーリングデータを収集・整理し、そのデータを用いて浅い地盤の速度構造モデルを作成した。図 20 に作業の流れを示す。約 250mメッシュ毎に、ボーリングデータにもとづいて、地質区分と N 値の代表柱状モデルを設定し、別途整理した N 値と S 波速度の相関を用いて、各層に S 波速度を与えて層構造を設定する。ボーリングデータの存在しないメッシュについては、そのメッシュの近傍で、ボーリングデータのある、同じ地形区分のメッシュのデータをもとに層構造を設定する。この際、周辺部も含めて N 値 50 以上を示す地盤上面の深度コンターを作成して基準面とし、データの無いメッシュでの N 値 50 以上を示す地盤深度を推定し、これを用いて層厚を調整する。このようにして計算領域内の全てのメッシュについて速度層構造を設定する。

図 21 にモデル化範囲とボーリング掘進深度を示し、図 22 および図 23 に N 値 50 以上の層の上面深度分布を示す。図 24 にボーリングデータを用いた浅い地盤の速度構造モデルと地形区分等による地盤モデルの比較を示す。同じ地形区分においても実際には N 値 50 以上の工学的基盤上面までの深さや平均 S 波速度  $AVS30$  が異なっているのがわかる。

これらを基に作成した浅い地盤構造モデルについて代表的な断面で表現したものを図 25 に示す。これらに図には、警固断層南東部の位置を示しているが、警固断層を挟んで西側と東側では工学的基盤上面の深さが異なることがわかる。

## 6.2 計算方法

応答計算は、工学的基盤上面における時刻歴波形を入力波形として、等価線形解析法による一次元地震応答計算を行い、地表の時刻歴波形を計算した。計算の流れを図 26 に示す。また、比較のため、一次元重複反射理論による線形応答計算も行った。

物性値については、S 波速度は福岡市域および周辺地域において収集した PS 検層のデータも踏まえ、N 値と S 波速度の関係式（中央防災会議, 2003）を用いることにした。また、密度および動的変形特性（ $G/G_0 \sim \gamma$ 、 $h \sim \gamma$  の関係）についても、上記資料で示されている土質区分と密度値および動的変形特性曲線を用いた。これらを表 5 および図 27 に示す。

$$V_s = 112.73 \cdot N^{0.256} \cdot \left\{ \begin{array}{l} \text{alluvium} \\ \text{diluvium} \\ \text{tertiary} \end{array} \right\} \cdot \left\{ \begin{array}{l} \text{clay} \\ \text{sand} \\ \text{gravel} \end{array} \right\}$$

$V_s$  : S 波速度

$N$  :  $N$  値

地質年代区分に対する補正係数

*alluvium* : 沖積層に対する補正係数 1.000

*diluvium* : 洪積層に対する補正係数 1.223

*tertiary* : 新第三紀層に対する補正係数 1.379

土質区分に対する補正係数

*clay* : 粘土層に対する補正係数 1.000

*sand* : 砂層に対する補正係数 0.885

*gravel* : 礫層に対する補正係数 0.900

(中央防災会議, 2003)

### (3) 計算結果

4 ケースの計算結果について、最大速度分布を図 28 に、工学的基盤 ( $V_s=600\text{m/s}$ ) 上面からの最大速度増幅率を図 29 に示す。それぞれ、地形区分等および速度構造モデルの AVS30 を用いた経験式による評価結果と等価線形および線形による応答計算結果を合わせて示している。ケース 1 の応答計算による結果では最大速度がほとんど増幅していないが、ケース 2~4 では沿岸部および警固断層の北東側の地域で大きく増幅している。ケース 1 では、最大速度が主に周期 2 秒以上の長周期成分に支配されており、この周期帯の地震動が浅い地盤構造で増幅していないことが考えられる。全体的に、応答計算による増幅率は AVS30 による増幅率よりも小さい傾向が見られる。

計測震度分布を図 30 に、工学的基盤上面からの震度増分の分布を図 31 に示す。なお、図 30 では基準となる工学的基盤上面の震度を、工学的基盤上面の波形から気象庁 (1996) に従って計測震度を算出した値としている (ただし、上下動成分については考慮しない)。ケース 1 では、地形区分等による評価において他のケースに比べて明らかに大きくなっている。応答計算による結果では、ケース 1 が他より若干小さくなっているが、他のケースはほぼ同じ分布となっている。

図 32 および図 33 に、警固断層に直交する線上で断層を挟む地点におけるケース 4 の結果との違いと埋め立て地の軟弱地盤の地点における速度波形および工学的基盤上面からの増幅の比較を示す。警固断層に直交する線上で断層を挟む地点のうち堆積層が薄い断層の南西側の地点では、0.3 秒以下の短周期成分が増幅しているのに対して、堆積層が厚い断層の北東側の地点では、周期 1 秒以下の比較的広帯域にわたって増幅している様子が見られる。断層位置において工学的基盤上面の深さが異なっている Line-1、Line-2 では、断層を境界とした違いが明瞭である。また、断層の北東側の地点の等価線形結果は短周期成分が減衰している。また、埋め立て地の軟弱地盤の地点においては、断層線上北東側の地点よりも短周期成分の減衰が大き

くなっている。これらの減衰が生じている地点では、地盤の非線形応答が生じていることが示唆される。

計算領域内において 2005 年福岡県西方沖の地震（本震）の強震動記録が公開されている地点（11 地点）について、観測記録と計算結果との比較を行った。11 地点ごとに地表最大速度に対して計算結果と観測値の比をとったものを図 34 に示し、計測震度に対して計算結果と観測値の差をとったものを図 35 に示す。これらを見ると、微地形区分による増幅率をかける方法（現行の方法）がもっともばらつきが大きく、ボーリングデータによる速度構造モデルの地表から 30m までの平均 S 波速度  $AVS30$  を用いた方法が次にばらついている。等価線形法および線形法による応答計算の結果は、他の 2 つの方法に比べるとばらつきが小さくなっている。ただし、等価線形法と線形法の結果の違いは、僅かであった。これは、今回対象とした観測点の表層地盤において非線形性が現れるほどの軟弱な地盤が少なかったことが考えられる。

次に、波形の比較を図 36 に示す。ほとんどの地点において、短周期成分が過大評価となっている。ただし、これらは工学的基盤上面においてすでに過大評価である。この地域の深い地盤構造モデルは、厚さ数十 m の  $V_s=600\text{m/s}$  層が  $V_s=2100\text{ m/s}$  の層の上にある構造となっている（図 4）。そのため、工学的基盤上面の波形は、 $V_s=600\text{m/s}$  層によって周期 0.5 秒以下の短周期成分が大きく増幅したものである。深い地盤構造モデルに関しては主に周期 1 秒以上の長周期成分を対象として修正を行ってきたが、短周期成分も考慮した修正が必要であると言える。

等価線形計算によって求められた最大加速度、最大せん断ひずみ、最大せん断応力の分布を、図 36 で示した 11 観測点のうち、福岡市内の 7 観測点について図 37-1～37-4 に示す。さらに、埋め立て地の軟弱地盤における 2 地点について同様な図を図 37-5～37-6 に示す。前出の 7 観測地点においては、福岡市早良区で地表から 5m の深さで最大せん断ひずみが 0.5%と大きくなっているが、最大加速度の低下はおきていない。一方、後出の 2 地点のうち海の中道では地表から 10m の深さで、最大せん断ひずみが 0.2～0.4%となり、この深度より浅いところで最大加速度の低下が見られる。これは、非線形性が現れていることが示唆される。

以上のことから、ボーリングデータによる速度構造モデルを用いた応答計算による手法の妥当性が確認された。ただし、計算結果の短周期成分の過大評価や非線形性の現れる軟弱地盤への対応などが課題として挙げられる。

## 7. まとめ

地震調査委員会強震動評価部会では、平成 19 年 3 月 19 日に「2005 年福岡県西方沖の地震の観測記録に基づく強震動評価手法の検証について（中間報告）」を公表した。強震動評価手法の検証について、主に以下の結果が得られた。

- a) 2005 年福岡県西方沖の地震の観測記録に基づいた強震動評価手法の検証を実施し、現在のレシピによって概ね再現可能であることが確認された。

b) ハイブリッド合成法による地表の最大速度および計測震度については、いずれの解析ケースも概ね観測値に対応する計算結果が得られた。

さらに、個々の技術的事項として、以下の検討結果が得られた。

i) すべり速度時間関数と破壊伝播速度を変化させた場合、すべり速度時間関数の変化よりも破壊伝播速度の変化の方が影響が大きかった。（「中間報告」図 19 参照）

ii) 波形インバージョンに基づく震源破壊過程の結果を直接用いた計算の方が観測記録の再現性は良かった。（「中間報告」図 20 参照）

iii) 中村・宮武(2000)によるすべり速度時間関数の近似式を用いる場合、ライズタイム算出における幅の違いによる計算波形の比較を行うと、最大速度振幅の違いが現れることから、幅の取り扱いに注意が必要である。この検討によって「レシピ」の記載の追記を行った。（「中間報告」図 21 参照）

「中間報告」で上記の成果が得られたが、次の課題もあげられた。

山地や台地などの表層の軟弱層が薄い地域では観測波形の再現性は良かったが、福岡平野や筑紫平野などの軟弱層が厚く堆積している地域では観測波形の再現性が必ずしも良くなかった。特に、福岡平野や筑紫平野では周期 1~2 秒付近の振動性状を十分に説明できていなかった。さらに、観測記録が密に分布している福岡市の中心市街地では観測点間での地震動に差が生じているのが見られ、第四紀層の厚さの変化によるものと考えられたが、約 1km メッシュの微地形を用いた表層の増幅率の設定ではこれを説明できなかった。ここでは、これらの課題について再検討を行った。

地下構造モデルについては、中間報告時の深い地盤構造モデル（0.5 次モデル）に対して三次元差分法による計算を行い、計算波形と観測波形の比較によって、1 次地下構造モデルの構築を行った。浅い地盤構造モデルでは、全国を統一した地形・地盤分類による約 250m メッシュデータを用い、新たな地表から 30m までの平均 S 波速度  $AVS30$  および増幅率への経験式を用いて増幅率の設定を行った。さらに、福岡市の中心市街地においては、ボーリングデータを用いた約 250m メッシュにおける S 波速度構造の地盤構造モデルの構築を行った。

観測点において擬似速度応答スペクトルとの比較では、中間報告時よりは観測記録の説明性は良くなっているが、一部では改善されていない観測点があった。波形の形状においても、短周期が観測波形よりも卓越した計算波形が見られる観測点や主要動は説明できていても後続波形を説明できていない観測点などが見られた。福岡平野や筑紫平野の周期 1~2 秒付近の振動性状については、深い地盤構造モデルの影響も考えられるが、統計的グリーン関数法の計算時の要素断層の大きさによる影響を指摘し、改善を図った。今後も中小地震による観測波形を用いて、深い地盤構造モデルの検証および修正を行っていくことが必要であり、場合によっては地下

構造探査等を行って、1次地下構造モデルの構築に必要なデータの追加を行っていくことも重要と考えられる。

これまでは、地表の地震動の算出には、工学的基盤上面の最大速度に増幅率をかけて地表の最大速度を求め、経験式によって計測震度を求めていた。筑紫平野等の卓越周期が2秒を超えるような地域では、2秒以上の周期が最大速度に影響し、これによる震度にも影響が出てきて過大評価となる。このようなことから、「ハイブリッド合成法」によって計算された工学的基盤上面の波形を、気象庁(1996)の計測震度の算出法により工学的基盤上面の震度を求め、最大速度増幅率および最大速度と計測震度の経験式より求められた震度増分を加えて地表の計測震度を求める方法を提案した。この結果、予測した計測震度の精度が向上することが確認され、2秒以上の長周期が卓越するような地域における計測震度の算出に導入する必要があると考えられる。

福岡市の中心市街地において、ボーリングデータに基づく浅い地盤構造モデルを設定し、時刻歴波形による応答計算を行った。微地形区分による増幅率を用いた地表の地震動分布に比べると、地盤の違いによる地震動分布の違いが明瞭となり、観測記録をより説明できる結果となった。また、表層地盤の増幅が入力地震動(工学的基盤上面)の周期特性によって異なることが確かめられた。埋め立て地の軟弱地盤においては非線形応答が現れている地点があり、逐次非線形解析法による検討が必要であることが示唆された。

## 8. 今後に向けて

地震動の予測精度を向上させるには、中間報告で述べたように観測記録の集積や地下構造モデル、波形インバージョンに基づく震源破壊過程の解析、地震動シミュレーション等のさらなる研究が必要である。2005年福岡県西方沖の地震では、K-NET および KiK-net 観測網、気象庁および自治体震度計観測網などにより貴重な強震記録が数多く得られたため、「レシピ」の高度化に資する検討を行うことが可能となった。しかしながら、震源近傍での強震動の性状や堆積層による地盤増幅などの検討を行うにはまだ不十分であり、今後の観測点の増強が望まれる。

今回の評価では、深い地盤構造モデルの1次モデル化を行い、それを用いた強震動評価の結果は、中間報告に比べ平野部などで顕著な改善が見られた。これは深い地盤構造の1次モデル化の重要性を示すものであり、全国1次地下構造モデル構築(瀬瀬・他, 2008)を一層推進する必要がある。

また、試算ではあるが、ボーリングデータを用いた浅い地盤構造モデルを設定して応答計算を行い、地表の波形を求めた。従来手法の微地形による速度増幅率を用いた地表最大速度および計測震度に比べると、観測点が近傍であっても推定される地震動の大きさが大幅に変わる地点があること、また周期特性の違いが明瞭に出るなどの結果が見られた。これらは、浅い地盤構造の詳細なモデル化の必要性を示唆したものであり、地下構造モデルの構築に必要なデータの取得および整理、そして

モデル化の方法の研究も大変重要であるといえる。平成 18 年 7 月からは科学技術振興調整費【重要課題解決型研究】「統合化地下構造データベースの構築」のプロジェクトが開始され、国民共有の公的財産となることが期待される国土の地下構造に関する情報を収集・整理し、表層地盤から深部に至る系統的・網羅的な統合化地下構造データベースを構築する取り組みが開始された（藤原, 2007）。こうしたプロジェクトの今後の成果が期待される。

## 参考文献

- Asano K. and T. Iwata (2006) : Source process and near-source ground motions of the 2005 West Off Fukuoka Prefecture earthquake, *Earth, Planets and Space*, Vol. 58 , No. 1, 93-98.
- 中央防災会議 (2003) : 第 16 回東南海・南海地震等に関する専門調査会 参考資料 2, 平成 15 年 12 月 16 日.
- 藤本一雄・翠川三郎 (2003) : 日本全国を対象とした国土数値情報に基づく平均 S 波速度分布の推定, *日本地震工学会論文集*, Vol.3, No.3, 13-27.
- 藤本一雄・翠川三郎 (2005) : 近年の強震記録に基づく地震動強さ指標による計測震度推定法, *地域安全学会論文集*, 7, 241-246.
- 藤本一雄・翠川三郎 (2006) : 近接観測点ペアの強震記録に基づく地盤増幅度と地盤の平均 S 波速度の関係, *日本地震工学会論文集*, Vol.6, No.1, 11-22..
- 藤原広行 (2007) : 統合化地下構造データベースの構築に向けて, シンポジウム「統合化地下構造データベースの構築に向けて」予稿集, 9-22.
- 入倉孝次郎 (1994) : 震源のモデル化と強震動予測, *地震*, 2, 46, 495-512.
- 地震調査委員会強震動評価部会 (2007) : 2005 年福岡県西方沖の地震の観測記録に基づく強震動評価手法の検証について (中間報告) (平成 19 年 3 月 19 日公表) .
- 気象庁 (1996) : 気象庁告示第 4 号.
- Kobayashi R., S. Miyazaki, and K. Koketsu (2006) : Source processes of the 2005 West Off Fukuoka Prefecture earthquake and its largest aftershock inferred from strong motion and 1-Hz GPS data, *Earth, Planets and Space*, Vol. 58 , No. 1, 57-62.
- 瀧川一樹・三宅弘恵・引間和人 (2008) : 全国 1 次地下構造モデル構築の現状, 第 2 回シンポジウム「統合化地下構造データベースの構築」予稿集, 63-64.
- 松岡昌志・翠川三郎 (1994) : 国土数値情報とサイスマックマイクロゾーニング, 第 22 回地盤震動シンポジウム資料集, 23-34.
- 松岡昌志・若松加寿江・藤本一雄・翠川三郎 (2005) : 日本全国地形・地盤分類メッシュマップを利用した地盤の平均 S 波速度分布の推定, *土木学会論文集*, 794/I-72, 239-251.
- 翠川三郎・藤本一雄・村松郁栄 (1999) : 計測震度と旧気象庁震度および地震動強さの指標との関係, *地域安全学会論文集*, 51-56.
- 森川信之・藤原広行・河合伸一・青井 真・功刀 卓・石井 透・早川 讓・本多 亮・小林京子・大井昌弘・先名重樹・奥村直子 (2007) : 2003 年十勝沖地震の観測記録を用いた強震動予測手法の検証, *防災科学技術研究所研究資料*, 第 303 号, 149p.
- 中村洋光・宮武 隆 (2000) : 断層近傍強震動シミュレーションのための滑り速度時間関数の近似式, *地震* 2, 53, 1-9.
- Sekiguchi H., S. Aoi, R. Honda, N. Morikawa, T. Kunugi, and H. Fujiwara (2006) : Rupture process of the 2005 west off Fukuoka prefecture earthquake obtained from strong motion data of K-NET and KiK-net, *Earth, Planets and Space*, Vol. 58, No. 1, 37-43.
- 若松加寿江・松岡昌志 (2007) : 九州の地形・地盤分類 250m メッシュマップの構築, *日本地震工学会大会 - 2007 梗概集*, 102-103.