

## 南海トラフの地震を想定した強震動評価手法について（中間報告）

本報告は、「全国を概観した地震動予測地図」の作成(地震調査研究推進本部,1999)に向けて様々な想定地震を対象に強震動評価<sup>\*1</sup>を行う一環として、特定の海溝型地震(海域に発生するプレート間大地震)の強震動評価手法を検討し、事例として南海トラフの地震を取り上げ中間的な検討結果をとりまとめたものである。検討に当たっては地震調査委員会(2001)の南海トラフの地震の形状評価の結果(以下「長期評価報告書」という。)を踏まえ、南海トラフの地震として、図1-1及び図1-2の四国沖から浜名湖沖までの、領域X付近を中心にして発生する地震(南海地震)<sup>2</sup>及び領域Y付近を中心にして発生する地震(東南海地震<sup>2</sup>)を対象とした。

以下では、強震動評価手法を構成している4つの要素手法<sup>\*3</sup>について、震源の特性<sup>\*4</sup>を評価する手法とそれ以外の手法とに分けて記述した。

なお、この報告書のとりまとめに当たっては、糸魚川-静岡構造線断層帯(北部、中部)についての中間報告書(地震調査委員会強震動評価部会,2001;以下「糸静断層帯中間報告」という。)に記述された内容を踏まえた。

### 1 震源の特性を評価する手法

震源の特性は、巨視的震源特性<sup>\*5</sup>、微視的震源特性<sup>\*6</sup>、及びその他の震源特性<sup>\*7</sup>の3つに分け、それぞれについて評価する手法を検討し、想定されている次の南海トラフの地震に関してこの手法を適用してみた。この手法の良否の検討は、この手法で設定した震源の特性を利用して強震動を実際に試算することを通して行った。

#### (1) 巨視的震源特性の設定手法

巨視的震源特性の設定手法については、糸静断層帯中間報告の考え方を基本的に踏襲し、必要に応じてこれを見直すこととした。

このため、南海トラフの地震の巨視的震源特性の設定に当たっては、長期評価報告書に示された特性(図2;地震調査委員会,2001の表3-1及び表3-2)についてはそのまま採用することとした。但し、「平均的なずれの向き」は、今回適用することとした強震動計算手法(統計的グリーン関数法)では必要としなかった。

\*1 「強震動評価」とは、想定した地震が発生した際の強い揺れの状況の予測を行うことである。また、「強震動」とは、地震動の強い揺れのこと、人体に感じられるもの、即ち気象庁震度階級の震度1以上の揺れのことを指す場合もあるが、ここでは、災害を起こす可能性があるもの、即ち気象庁震度階級の震度5弱以上を考慮することとした。但し、強震動の試算に際しては震度4まで考慮した。

\*2 「東南海地震」という用語は1944年に発生した地震について使われてきた。この地震以前に領域Y付近を中心にして発生した地震の震源域は領域Z(図1参照)までを含むことが多く、「東海地震」と呼ばれている。例えば、1854年に発生した地震は安政東海地震と呼ばれる(地震調査委員会,1999)。しかし、ここでは、想定東海地震との区別を明確にするために、「東南海地震」と呼ぶことにした。以下読み易さに配慮して鍵括弧を省いた。

\*3 強震動評価手法は次の構成要素からなる: 「震源の特性を評価する手法」(震源の特性化手法ともいう。)、 「地下構造モデルの設定手法」、 「強震動計算手法」、 「予測結果の検証手法」。

\*4 「震源の特性」とは、想定した地震が発生した際にその震源域の中で強い地震波を出す領域(アスペリティ;後述)の分布等の特徴のことである。詳細は後述。なお、「震源」という用語は、単独では破壊開始点として用いられるので注意が必要である。

\*5 「巨視的震源特性」とは、想定震源域の全体の形状(震源断層形状)や想定震源域面上における地震発生時の平均的なすべりの特徴のことであり、次の項目がある。震源断層の位置・走向・傾斜角・深さ・長さ・幅(以上が震源断層形状)、震源断層の面積、地震モーメント、地震時平均応力降下量、地震時平均すべり量・方向。但し、これらの特性は、全てが相互に独立というわけではない。これらの項目の中で、「地震モーメント」とは、震源の物理学的な規模を表す値である。「平均応力降下量」の定義は後出。また、後出するモーメントマグニチュード(M<sub>w</sub>)は地震モーメントから決められるマグニチュードのことである。

なお、「すべり」という用語については、「ずれ」や「変位」という用語を使うこともあるが、ここでは「すべり」に統一して用いることにした。従って、「すべり量」は「ずれ量」や「変位量」ともいい、「すべり速度」は「ずれ速度」や「変位速度」ともいう。

\*6 「微視的震源特性」とは、想定震源域の不均質を示す特徴のことである。この報告書では、「糸静断層帯中間報告」と同様にして、「アスペリティ」及び「背景領域」という2種類の領域に分けるモデルを採用した。当該特性を示す特徴としては、次の項目がある。アスペリティの数、各アスペリティの位置・面積・平均すべり量・地震モーメント・実効応力、及び背景領域の面積・平均すべり量・地震モーメント・実効応力。但し、これらの特性は、全てが相互に独立というわけではない。これらの項目の中で、「背景領域」とは、震源断層面のうちアスペリティの領域を除いた部分のことである。「アスペリティ」及び「実効応力」の定義は後出。

\*7 「震源の特性」のうち巨視的及び微視的なもの以外の項目としては、破壊開始点の位置(通常「震源」と呼ぶ。)、破壊伝播様式、及び破壊伝播速度がある。

長期評価報告書に示されていない地震モーメントは、糸静断層帯中間報告とは異なり、震源断層の面積と地震モーメントとの関係を示す経験式から求めるのではなく、震源断層の面積、地震モーメント、及び応力降下量の物理的な関係式を用いて、過去の南海地震及び東南海地震のデータを参照しつつ、応力降下量の目安を設定した上で、震源断層の面積から求めた。この方法を採用したのは、震源断層の面積と地震モーメントとの関係を示す信頼できる経験式を作成するまでのデータがないためである。なお、目安として設定した応力降下量は、円形状を仮定すると3.0MPaとなり、矩形形状を仮定するとその半分程度となる。

以上の結果、巨視的震源特性の設定手法（設定作業の流れ）は図3のとおりであり、この手法を南海トラフの地震に適用した結果は表1-1及び表1-2のとおりである。

#### （2）微視的震源特性の設定手法

微視的震源特性の設定手法については、糸静断層帯中間報告の考え方を踏襲しつつも、新たな考え方を導入した。設定手法（設定作業の流れ）は図3のとおりである。但し、今回は、後述するように、震源の特性化の結果の良否の検討の目的で強震動試算を行うこととし、統計的グリーン関数法のみを利用したことから、これに必要な項目の設定作業の流れのみを示した。

アスペリティ<sup>\*1</sup>の数は、過去の南海地震・東南海地震の震源断層の推定すべり量分布、バックスリップ<sup>\*2</sup>分布、想定震源域の形状、及び近年の海溝型地震において推定されているアスペリティの数を参照し、南海地震・東南海地震それぞれの想定震源域について3つとした。また、それらの位置は、同様にして、南海地震では土佐湾、紀伊水道の南、及び潮岬（和歌山県）周辺、東南海地震では志摩半島（三重県）の南、熊野灘、及び渥美半島（愛知県）沖とすることとした（図2参照）。

アスペリティの総面積は、当該地震全体の地震モーメントと短周期震源加速度スペクトルレベル（アスペリティの総面積を反映した量）との関係の経験則に基づいて、震源断層の面積の約30%とする平均的なケース（ケース1）とデータのばらつきの範囲内においてケース1より小さめに設定したケース（大きめの揺れを予測することになるケース；ケース2）の2つを検討した。なお、6つの海溝型地震を参照して想定震源域の面積に対するアスペリティの総面積を求めた結果（石井・他,2000）では、その割合が35%となっており、上の平均的なケースの値に近い値となっている。

3つのアスペリティへの面積の割り振りは、その数・位置を検討した際の資料を参照し、2:1:1とした。

アスペリティの平均すべり量は、過去に発生した海溝型地震についてのすべり量の特徴（石井・他,2000）を参照し、想定震源域全体の平均すべり量の2倍とした。また、各アスペリティの平均すべり量は、個々のアスペリティの平均応力降下量と経験的にほぼ等しいと考えて求めることとした。

アスペリティの実効応力<sup>\*3</sup>は、平均応力降下量<sup>\*4</sup>と概ね等しいことを踏まえ、当該地震全体の地震モーメント、震源断層の面積、アスペリティの総面積、及び平均応力降下量の関係式から求めることとした。また、背景領域の実効応力は、アスペリティの実効応力、アスペリティ全体の平均すべり量、背景領域の平均すべり量等から求めることとした。これらの手法を南海トラフの地震に適用した結果は、表1-1及び表1-2のとおりである。

#### （3）その他の震源特性の設定手法

破壊開始点の位置は、1946年の昭和南海地震及び1944年の昭和東南海地震の震源の位置（宇津,1999）、1944年の昭和東南海地震のアスペリティと破壊開始点の位置関係、東南海地震と南海地震の発生の順番等を参考にして、総合的に判断した。その結果、破壊開始点の位置を、南海地震では想定震源域の南東端付近の潮岬沖、東南海地震では震源断層の西の北端付近の紀伊半島南部に設定（図2参照）した。破壊伝播様式は、

\*1 「アスペリティ」とは、通常は強く固着して、ある時に急激にずれて（すべって）地震波を出す領域のうち、周囲に比べてすべり量が大きい領域のことである。なお、「アスペリティ」という用語については、各種定義があるが、この報告書では、震源断層面の不均質性を表す1つの概念モデルである「アスペリティモデル」（Lay et al., 1982）を踏まえた定義を用いた。

\*2 プレート境界で地震が発生してから次の地震が発生するまでは、沈み込む海のプレートと陸のプレートとの境界面は固着しているので、海のプレートの沈み込みの進行につれて陸のプレートは引きずり込まれ、内陸側に押される。このようにして生じる陸のプレート内の変形は、プレート境界面上に仮想的な正断層のすべりを与えることで表すことができる（Savage, 1983）。この仮想的なすべりをバックスリップと言う。

\*3 「実効応力」とは、「断層面を動かす実効応力」を略記したもので、想定震源域において破壊する（すべる）直前（地震が発生する直前）に働いていたせん断応力（食い違いを起こすような単位面積当たりの力）と想定震源域の摩擦力の差であり、多くの場合、アスペリティにおいては地震発生に伴う応力降下の大きさ（静的応力降下量）にほぼ等しいとされている。前出の「平均応力降下量」とは、対象としている領域全体の静的応力降下量の平均の値である。

\*4 「平均応力降下量」の定義は前出。

これまでの多くの地震についての研究成果を踏まえ、破壊開始点から想定震源域面上を放射状に進むと考えるのが適当と判断した。破壊伝播速度<sup>\*1</sup>は、これまでの多くの地震についての研究成果を踏まえ、想定震源域の近傍の標準的なS波速度から推定した。

## 2 地下構造モデルの設定手法、強震動計算手法及び予測結果の検証手法

今回は、地震動の評価地点として、工学的基盤より浅い部分の地震波速度構造が解明されている場所を可能な限り選択することとし、強震動試算においてもこのことを踏まえたやり方を選択した。

### (1) 地下構造モデルの設定手法

強震動試算は、中部地方、近畿地方、中国地方、四国地方及び九州地方にある強震計観測網（KiK-net及びK-NET；青井・他,2000、Kinoshita,1998）の観測点を中心にして、地震基盤上、工学基盤<sup>\*2</sup>上、及び地表について行った。

震源域から地震基盤までの減衰構造は、地域特性があることに配慮して、南海地震及び東南海地震の想定震源域に隣接するZ領域（図1参照）において推定された構造（中央防災会議東海地震に関する専門調査会,2001）を利用することとした。

地震基盤から工学基盤までの速度構造・減衰構造は、平均的な特徴を持つと考えられた既存のもの（宮腰・他,1994）を利用することとした。

工学基盤から地表までの構造については、得られている構造データの有無に応じて次のようにした。KiK-netの観測点は、解明されている地震波速度構造を用い、減衰構造については経験的に設定した。なお、KiK-netの観測点は比較的地盤が堅固である。K-netの観測点は、当該地点の地下の平均S波速度の推定値を用いて行った（松岡・翠川,1994）。なお、K-NETの観測点は、人口密集地の平均的な地盤に設置されていることが多いという特徴がある。

なお、大阪平野等の一部の堆積平野については、既存の関連データがある地点（強震計観測網の観測点ではない場所）を選択し、地震基盤から地上までの信頼できる一次元速度構造モデルを設定した。このようにした理由は、堆積平野では周辺域に比べ特に大きい震度となる可能性があるため、この構造による結果と簡便な構造による結果を比較して、簡便な構造モデルの精度を点検するためである。

### (2) 強震動計算手法

今回は、震源モデルの設定の検証という目的を勘案して、上で地下構造モデルを設定したとびとびの場所についてサンプル的に震度相当値、最大速度及び最大加速度を試算することとした。

強震動計算手法としては、地震波を構成する波のうち震度の値を決定する主要因であるS波について統計的グリーン関数法<sup>\*3</sup>を採用し、地震基盤上の波形をまず試算した。次に、地震基盤上の波形を入力データとして、上で設定した構造モデルを用いて、工学基盤上の波形を試算した。地表における強震動の試算に当たっては、K-NETの観測点については、工学基盤上の最大速度に、工学基盤より上の平均S波速度構造に応じた係数を乗ずることにより、最大速度及び震度相当値を試算した。KiK-netの観測点等その他の地点については地表における波形試算まで行って震度相当値等を試算した。震度相当値の計算に際しては、合成された水平1成分の波形を直交する2成分の波形とし、また上下動は振幅零としたものを利用した。

一方、今回の試算では、堆積平野・盆地の地震基盤の形状は考慮しなかった。これの影響は1秒より長周期の地震波の最大地動をあたえる表面波については係わりが深く、場所によって最大加速度でみると5割増しになる例もある。今回は、このことに配慮して、経験式等を利用するに際しては、必要となる各種係数は平均的なものだけでなく、ばらつきの範囲で大きめの揺れを与えることになる場合も検討した。

なお、最大加速度については、揺れが大きい（加速度が大きい）場合に、地盤の物理的な性質が揺れとともに変化していき、この影響が震度や最大速度に比べて顕著（非線形性）に現れる。今回の試算では、目的に照らして簡便な方法を採用することとし、非線形性は考慮しないこととした。このため、最大加速度の試算結果は参照するに留めた。

\*1 この報告書では、「速度」という用語は、主に地盤の揺れ（地動速度ともいう。）を単に速度と記述している。それ以外の意味で「速度」を用いる場合には、必要に応じて「破壊伝播速度」、「地震波速度構造」というように形容句を付けるようにした。

\*2 「工学的基盤」とは、建物を建てる際に、基礎としてよりどころとする岩盤のことで、建物の設計者によって異なるが多くの場合S波速度で300m/s～700m/sの範囲にあり、今回は400m/s相当層上面を目安として考えた。

\*3 「統計的グリーン関数法」とは、震源スペクトルモデルや中小の地震の観測波形の特徴を用いて要素地震波形を合成し、さらに合成された要素地震波形を用いて大地震の波形を合成する方法のこと。要素地震波形のことをグリーン関数という。

### (3) 予測結果の検証手法

予測結果の検証手法としては、想定震源域で発生した過去の地震における推定震度分布や経験的に求められている最大加速度距離減衰式・最大速度距離減衰式との整合を確認するという手法を採用することとした。

長期評価報告書では、東南海地震の同定において、1944年の昭和東南海地震の震度分布を目安にしている。また、南海地震の同定においては、1946年の昭和南海地震及び1854年の安政南海地震の震度分布を目安にしている。これらを踏まえ、ここでも、昭和の2つの地震の震度分布、安政南海地震の震度分布・震度の大きさ、及び1854年の安政東海地震<sup>\*1</sup>の震度分布のうち浜松（静岡県）より西の領域の震度分布・震度の大きさを予測結果の検証の目安とした（図5-1及び図5-2参照）。さらに、試算結果と過去の地震の震度分布との比較に当たっては、震源の特性の不確定性及び地下構造モデルの簡略化により試算結果にはばらつきが想定されることから、震度は震度6弱相当以上（ランクA）、震度5強・5弱相当（ランクB）、及び震度4相当以下（ランクC）の3段階に分けることとした。最大速度の試算結果については、海溝型地震について経験的に求められている距離減衰式（司・翠川, 1999）と比較した。

なお、最大加速度の試算結果については、上述の理由により、経験的に求められている最大加速度距離減衰式との比較結果は参照するに留めた。

### 3 南海トラフの地震の震源特性の評価結果

南海トラフの地震についての強震動評価を事例として、海溝型地震の強震動評価手法をとりまとめた結果は流れ図（図3）に示したとおりである。これによって設定した震源特性（表1-1、表1-2及び図2）を用いて試算した震度等の概要は、図4-1、図4-2、図6-1及び図6-2に示すとおりである。図4-1及び図4-2は試算した2つのケースの結果を合わせて場所毎にランクを示したもので、ケースによってランクが異なる場合には幅を持たせて示した（ランクB<sub>+</sub>、ランクC<sub>+</sub>）。これらは、図5-1の震度分布のパターン及び震度の大きさと比較し、図5-2の震度分布のパターンと比較した。また、図6-1及び図6-2では、最大速度の試算値と経験式とをグラフ上で直接比較した。

これらの比較の結果、南海トラフの地震の震源特性は、今回設定したもので妥当であることが確認できた。また、堆積平野における個別の精密な試算の結果では、簡便な試算に比べ、計測震度の値で、0.1~0.2大きくなる程度の違いに止まっていることを確認した。以上の結果、海溝型地震の強震動評価手法の妥当性も概ね確認できたことになる。

なお、ここでは、震源特性の評価のために予想される揺れの平均像の目安を試算したものである。図4-1及び図4-2では予想される揺れの平均像と合わせる形で、考えうる震源特性の範囲内で大きめの揺れとなる場合についても記載しているものの、地下構造モデルの設定及び強震動計算において簡略化していること、並びに震源特性（特にアスペリティの位置）に不確定性があることから、場所によって揺れの程度が震度階級で一つ上になることも下になることもあることに注意することが必要である。

### 4 今後に向けて

全国を概観した地震動予測地図の作成に向けて、最終的な検討結果のとりまとめに当たって、次の事項について、既存の調査研究成果の収集及び試算を実施しながら検討していく。

- 面的な強震動の試算等により、震源特性の精密化。
- 周期1秒付近における強震動予測のばらつきの評価。
- 周期1秒程度より短周期側における強震動予測のばらつきの評価。特に統計的グリーン関数の信頼度の評価。
- 周期1秒程度より長周期側における強震動予測の評価。
- 地震基盤の形状の評価の実施及びその結果の地下構造モデルの精密化、並びにそれを用いた強震動試算。

なお、仮に想定東海地震が発生せずに推移した場合には、領域Zは次の東南海地震発生の際に同時に破壊する可能性も出てくると見られ、この点については、長期評価報告書では適当な時期に再検討する必要があるとしている。

\*1 1854年の安政東海地震は、領域Y付近を中心にして発生した地震だが、その震源域には領域Zを含む（長期評価報告書の表1参照）。

表1-1 想定東南海地震の震源特性

項目		ケース1	ケース2
マグニチュード(M)8.1前後。南海地震と同時発生した場合にはM8.5前後。			
震源断層位置		図2参照	同左
走向		図2参照	同左
傾斜角		6 ~ 44 °	同左
震源断層長さ		160 ~ 200 km	同左
震源断層幅		70 ~ 100 km	同左
震源断層面積		14500 km <sup>2</sup>	同左
震源断層上端 ~ 下端深さ		10 ~ 30 km	同左
地震モーメント		2.15E+21 N・m	同左
平均すべり量		363 cm	同左
平均応力降下量 (円形クラックの場合)		3.0 MPa	同左
加速度震源スペクトル短周期レベル		6.84E+19 N・m/s <sup>2</sup>	9.67E+19 N・m/s <sup>2</sup>
全 ア ス ベ リ テ ィ	地震モーメント	1.28E+21 N・m	6.42E+20 N・m
	総面積	4328 km <sup>2</sup>	2164 km <sup>2</sup>
	平均すべり量	726 cm	726 cm
	平均応力降下量	10.1 MPa	20.1 MPa
第 1 ア ス ベ リ テ ィ	面積	2164 km <sup>2</sup>	1082 km <sup>2</sup>
	平均すべり量	850 cm	850 cm
	地震モーメント	7.52E+20 N・m	3.76E+20 N・m
	実効応力	10.1 MPa	20.1 MPa
第 2 ア ス ベ リ テ ィ	面積	1082 km <sup>2</sup>	541 km <sup>2</sup>
	平均すべり量	601 cm	601 cm
	地震モーメント	2.66E+20 N・m	1.33E+20 N・m
	実効応力	10.1 MPa	20.1 MPa
第 3 ア ス ベ リ テ ィ	面積	1082 km <sup>2</sup>	541 km <sup>2</sup>
	平均すべり量	601 cm	601 cm
	地震モーメント	2.66E+20 N・m	1.33E+20 N・m
	実効応力	10.1 MPa	20.1 MPa
背 景 領 域	地震モーメント	8.66E+20 N・m	1.51E+21 N・m
	面積	10172 km <sup>2</sup>	12336 km <sup>2</sup>
	平均すべり量	208 cm	299 cm
	実効応力	1.3 MPa	2.7 MPa
破壊開始点		図2参照	同左
破壊伝播形式		放射状	同左
破壊伝播速度		2.7 km/s	同左

注\*：長期評価報告書による。

震源域のS波速度3.8km/s、剛性率は $4.09 \times 10^{10} \text{N/m}^2$

表1-2 想定南海地震の震源特性

震源特性	断層パラメータ	ケース1	ケース2	
地震の規模*	マグニチュード(M)8.4前後。東南海地震と同時発生した場合にはM8.5前後。			
巨視的 震源特性	震源断層の位置	図2参照	同左	
	走向	図2参照	同左	
	傾斜角	4~26 °	同左	
	震源断層の長さ	300 km	同左	
	震源断層幅	70~150 km	同左	
	震源断層の面積	35800 km <sup>2</sup>	同左	
	震源断層の上端~下端深さ	10~30 km	同左	
	地震モーメント	8.34E+21 N・m	同左	
	平均すべり量	570 cm	同左	
	平均応力降下量(円形クラックの場合)	3.0 Mpa	同左	
加速度震源スペクトル短周期レベル	1.07E+20 N・m/s <sup>2</sup>	1.52E+20 N・m/s <sup>2</sup>		
微視的 震源特性	全 ア ス ベ リ テ ィ	地震モーメント	4.98E+21 N・m	2.49E+21 N・m
		総面積	10686 km <sup>2</sup>	5343 km <sup>2</sup>
		平均すべり量	1141 cm	1141 cm
		平均応力降下量	10.1 MPa	20.1 MPa
	第 1 ア ス ベ リ テ ィ	面積	5343 km <sup>2</sup>	2672 km <sup>2</sup>
		平均すべり量	1336 cm	1336 cm
		地震モーメント	2.92E+21 N・m	1.46E+21 N・m
		実効応力	10.1 MPa	20.1 MPa
	第 2 ア ス ベ リ テ ィ	面積	2672 km <sup>2</sup>	1336 km <sup>2</sup>
		平均すべり量	945 cm	945 cm
		地震モーメント	1.03E+21 N・m	5.16E+20 N・m
		実効応力	10.1 MPa	20.1 MPa
	第 3 ア ス ベ リ テ ィ	面積	2672 km <sup>2</sup>	1336 km <sup>2</sup>
		平均すべり量	945 cm	945 cm
		地震モーメント	1.03E+21 N・m	5.16E+20 N・m
		実効応力	10.1 MPa	20.1 MPa
背 景 領 域	地震モーメント	3.36E+21 N・m	5.85E+21 N・m	
	面積	25114 km <sup>2</sup>	30457 km <sup>2</sup>	
	平均すべり量	328 cm	470 cm	
	実効応力	1.3 MPa	2.7 MPa	
その他の 震源特性等	破壊開始点	図2参照	同左	
	破壊伝播形式	放射状	同左	
	破壊伝播速度	2.7 km/s	同左	

注\*：長期評価報告書による。

震源域のS波速度3.8km/s、剛性率は $4.09 \times 10^{10}$ N/m<sup>2</sup>