

## 微動と地震動を用いた南海トラフ地震の建物応答予測

Predicting the response of Aichi Prefectural Office Local Autonomy in Nankai trough earthquake using records of seismic motions and microtremor

山田 純平<sup>†</sup>, 倉橋 奨<sup>††</sup>, 横田 崇<sup>†††</sup>  
YAMADA Jumpei<sup>†</sup>, KURAHASHI Susumu<sup>††</sup>, YOKOTA Takashi<sup>†††</sup>

**Abstract** According to Cabinet Office's Research, when Nankai Trough Earthquake hit, leaving a wide range of area in Japan in devastating condition. To predict earthquake motions on the specific surface site, it requires source, path and site effects at least. In addition, taking loss effect by building foundation and structural vibration property into account, in such a way building response can be presumed. We used methods utilizing observed record of seismic motions and microtremor, such as the Empirical Green's Function Method, a microtremor array, transfer function synthesis and modal analysis to predict the response of Aichi Prefectural Office Local Autonomy (APOLA) in Nankai trough earthquake. In particular, we observed seismic motions and microtremor in assessing site effects, transfer function synthesis and modal analysis uniquely. As a result of our predictions of ground motion at APOLA, there are two features. First, motion lasts as much as 110s. Lastly, the greatest motion arrives 90s after the earthquake occurs. Finally, we compared the results of prediction of ground motion at the APOLA to seismic scale quoted from cabinet office's research and acceleration response spectrum quoted from SPECIFICATION FOR HIGHWAY BRIDGES PART V SEISMIC DESIGN.

### 1. はじめに

南海トラフ巨大地震が発生した際の被害想定は、南海トラフの巨大地震モデル検討会<sup>1)</sup>が「東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査階<sup>2)</sup>を踏まえ、想定すべき最大クラスの地震の設定方針を検討することを目的として、検討会を設置している。この被害想定によれば、南海トラフ巨大地震が発生すると、静岡県から宮崎県にかけての一部では震度 7 となる可能性があるほか、それに隣接する周辺の広い地域では震度 6 弱から 6 強の強い揺れになると想定されている。この結果を踏まえて、著しい地震災害が生じる恐れがある地域が「南海トラフ地震防災対策推進地域<sup>3)</sup>」に指定され、建物の耐震化やハザードマップの整備等のハード・ソフト両面から総合的な地震防災対策を推進することとされている。愛知県は、全域が当該地域に指定されており、南海トラフの巨大地震モデル検討会で設定された「理論上最大想定モデル」や「過去地震最大モデル」を基に愛知県全土を対象とした地表震度分布を「愛知県東海地震・

東南海地震・南海地震等被害予測調査結果<sup>4)</sup>にて公表している。

このように南海トラフ地震を対象とした被害想定 of 調査が進められ、建物の被害軽減や耐震対策に必要なより詳細な地震動予測が行われている。

この地震動予測における震源で放出された地震動から建物の応答を計算するための流れを図 1 に示す。地表の地震動は、震源の破壊過程を表現する震源特性  $S(f)$  と震源断層域から観測地点までの媒質等による伝播過程の特性を表現する伝播経路特性  $P(f)$ 、地震動予測地点直下の地盤構造を表現するサイト特性  $G(f)$  の 3 つの特性で表現される<sup>5)</sup>。建物応答は、地表の地震動に建物基礎による入力損失効果  $H(f)$  を考慮した建物基礎入力地震動に、建物をもつ固有周期や減衰定数などで評価される建物振動特性  $B(f)$  を考慮して算出される。この手法に基づく地震動予測に関する既往研究を以下に示す。

内閣府の巨大地震モデル検討会では、過去に発生した南海トラフ沿いの地震より、将来起こりうる地震の震源断層モデルを設定し、日本全土を対象とした地表震度分布を求めている。

石井ら (2013)<sup>6)</sup> は、内閣府が設定した震源断層モデルを基に地震動と津波の両者を計算する断層モデルのパラ

<sup>†</sup> 愛知工業大学大学院 工学研究科 (豊田市)

<sup>††</sup> 愛知工業大学 工学部 土木工学科 (豊田市)

<sup>†††</sup> 愛知工業大学 工学部 土木工学科 (豊田市)

メータ設定手順の確立と、その設定例を提案した。また、提案した断層モデルを基に強震動予測手法の 1 つである経験的グリーン関数法<sup>7)</sup>を用いて震度分布を推定し、過去の南海トラフの地震の震度分布と比較した結果からモデルの妥当性を示している。ここで用いられた経験的グリーン関数法は、過去に観測された小地震の地震記録を用いて、大地震の地震動波形を計算する手法であり、多くの適用例<sup>8)</sup>が示されている。さらに経験的グリーン関数法を用いる際は、大地震の震源断層付近で発生した小地震を用いることでより正確な地震動再現が可能である。しかし、石井らが用いた小地震は、内閣府の震源断層モデルの付近で発生した地震記録であるものの、より適切な小地震の選定に議論の余地がある。

サイト特性は、地震動の増幅に大きく寄与しており、地表の地震動の予測には非常に重要な要素である。そのため、サイト特性を計算するために必要な地盤構造の調査は勢力的になされ、全国 1 次地下構造モデル<sup>9)</sup>や J-SHIS 深部地盤、J-SHIS 浅部地盤<sup>10)</sup>など全国を対象とした地盤構造モデルが公表されている。一方で、対象地点直下浅部の地盤構造までは反映されておらず、地震動予測の精度向上には、微動アレイ探査<sup>11)</sup>など物理探査による独自に調査した地盤構造の推定が必要であるのが現状である。

建物振動特性は、構造物モデルによる動的解析などがあるが、簡便な方法として山下ら (2012)<sup>12)</sup>が工学院大学新宿校舎を対象に、東北地方太平洋沖地震で観測された地震記録から固有周期、減衰定数、刺激係数を伝達関数適合法により同定し、1 階の観測波形から最上階の観測波形を再現する手法を提案している。一方で、山下らは観測した地震動を用いているが、その地震動がない場合は、他の方法により固有周期などの係数を算出することを考えなければならない。

このように、地震動予測に関する研究は勢力的に進められている一方で、それらは独立して評価されることが多く、南海トラフ地震の震源から建物応答に至る研究例は多くない。また、より精度よく詳細に求めるためには対象となる地点や建物の特性を抽出することが必要であるが、それらが網羅的にされているわけではない。

そこで本研究では、愛知県の中核を担う名古屋市中区三の丸に立地する愛知県自治センターを対象に、建物応答予測で考慮すべき 5 つの特性すべてを評価した南海トラフ地震の建物応答予測を行った。特に、サイト特性の算出には微動観測記録を用いた地盤構造の推定を、建物振動特性は、建物内の地震動と微動記録を用いて算出した。

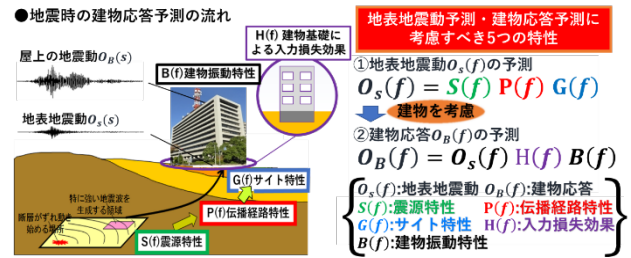


図 1 地震時の建物応答予測に考慮すべき 5 つの特性

## 2. 研究手順

### 2・1 対象建物概要

図 2 に本研究の対象建物の愛知県自治センターと、南海トラフの巨大地震モデル検討会による対象地点周辺の地表震度分布の地図を示す。当建築物は、名古屋市中区三の丸に立地し、館内には、防災安全局や災害対策本部室が設置され、愛知県の防災対策の根幹を担う重要構造物の 1 つといえる。構造は、1985 年竣工の SRC 造で、地上 12 階 (GL+47.20m)、地下 4 階 (GL-17.55m) の高層建築物である。1 階から 12 階までの平面構造は、東西 (EW) 方向 21.3m、南北 (NS) 方向 76m である。

南海トラフの巨大地震モデル検討会によると、対象地点周辺の地表震度は 6 弱と予測されており、構造物に甚大な被害を及ぼす可能性が危惧される。

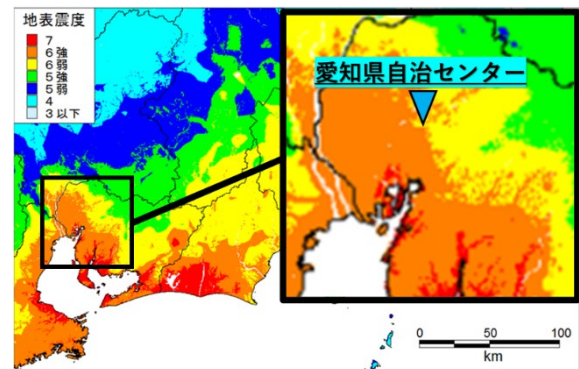


図 2 南海トラフ地震の地表震度分布と

愛知県自治センター位置

(南海トラフの巨大地震モデル検討会<sup>1)</sup>を基に作成)

### 2・2 研究手順

本研究の解析手順を、図 3 を用いて下記に示す。はじめに、愛知県自治センター周辺における南海トラフ地震の地震動評価を行う。地震動評価のうち、震源特性と伝播経路特性は、南海トラフの巨大地震モデル検討会で設定されている南海トラフ地震の震源断層モデルを基に経験的グリーン関数法を適用することで考慮した。

サイト特性は、微動アレイ観測により推定する地盤構造より算出する。表面地震動を建物の基礎入力動に変

## 微動と地震動を用いた南海トラフ地震の建物応答予測

換する際には、建物基礎による入力損失効果を考慮する必要がある。本研究では、水平動（NS方向,EW方向）に関して原田ら（1985）<sup>13）</sup>を改良した土木学会の耐震委員会での提案式<sup>14）</sup>を用いて基礎入力動を計算する。

最後に、建物振動特性は、建物内の地震動と微動記録を用いた伝達関数適合法から各モードの固有周期、減衰定数、刺激関数を同定し、モード合成法でk階における応答値を算出する。これらの特性から愛知県自治センターの南海トラフ地震における地震動計算および建物応答予測を行う。

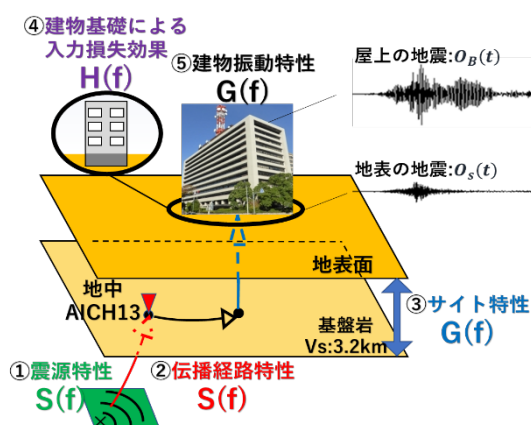


図3 地震時の建物応答予測までの流れ

### 3. 南海トラフ地震地中地震動の計算

#### 3・1 南海トラフ地震の震源断層モデル

南海トラフ地震の地中地震動計算に必要な震源特性、伝播経路特性の評価は、内閣府が公表する南海トラフの巨大地震モデル検討会で設定される南海トラフ地震震源断層モデルを用いて経験的グリーン関数法で行った。内閣府の震源断層モデルは、断層全体を示す領域（背景領域）と、より強く地震動を生成する領域（強震動生成域：SMGA (Strong Motion Generation Area)）と、津波を生成する領域で構築されている。本研究では、建物振動に影響する強震動を対象とするため、SMGAのみを対象とした。また、内閣府の震源断層モデルでは、駿河湾から高知沖まで非常に広い範囲に12個のSMGAが設定されているが、本研究では対象地点となる名古屋に震源距離が近く地震動の影響が大きい東海地域のSMGA (TK1, TK2, TK3, TK4)と駿河湾域のSMGA (SR1, SR2)の計6個のSMGAを地震動計算に用いた。対象としたSMGAモデルを図4に示す。また、表1には、地震動計算に必要な断層パラメータ（各SMGAの個数、断層面積、応力降下量、ライズタイム、地震モーメント）を示す。

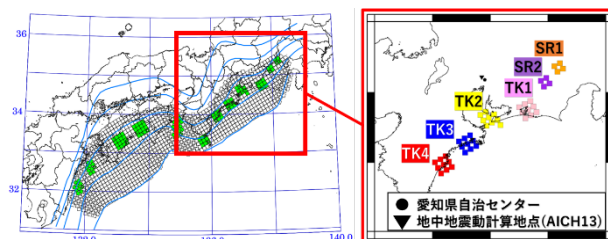


図4 南海トラフ地震震源断層モデル

左：内閣府の震源断層モデル

右：東海域4つ、駿河湾域2つのSMGA  
(南海トラフの巨大地震モデル検討会<sup>1)</sup>陸側ケースを基に作成)

表1 東海域（4つ）と駿河湾域（2つ）のSMGAの断層パラメータ

セグメント	パラメータ	東海域	駿河湾域
SMGA①	個数	9	4
	面積(km <sup>2</sup> )	922	419
	応力効果量(MPa)	45	34.8
	ライズタイム	5.62	3.79
SMGA②	個数	9	4
	面積(km <sup>2</sup> )	914	417
	応力効果量(MPa)	45	34.8
	ライズタイム	5.6	3.78
SMGA③	個数	9	
	面積(km <sup>2</sup> )	936	
	応力効果量(MPa)	45	
	ライズタイム	5.66	
SMGA④	個数	9	
	面積(km <sup>2</sup> )	942	
	応力効果量(MPa)	45	
	ライズタイム	5.68	

#### 3・2 経験的グリーン関数法の概要

愛知県自治センターにおける震源から地震基盤までの地震動は、経験的グリーン関数法により算出した。この手法は、震源特性と伝播経路特性の両方を考慮した地震動を算出できる。経験的グリーン関数法の構成式を式(1)、式(2)に、概念図を図5に示す。経験的グリーン関数法は、震源から遠方の観測点  $x=(x,y,z)^T$  における小地震（ここでは要素地震と呼ぶ）の振動数  $\omega$  における周波数領域の地震動  $u_0(x,\omega)$  から大地震の地震動  $u(x,\omega)$  を求める手法である。ここに、 $V_R$  は断層の破壊速度、 $C_s$  はS波の伝播速度を表す。 $\tau_{mn}$  は断層の破壊面が震源から小断層(m,n)に到達するまでの時間遅れを表す。破壊開始点から観測点の距離  $R_0$  および震源との距離を  $R_{mn}$  とする。また、 $t_{mn}$  は震源と小断層(m,n)から発生したS波が観測点に到達する時間を表す。なお、本解析による強震動の算出地点は、愛知県自治センターに最も近い KiK-net 地中観測点である AICH13 (図4参照) とした。

$$u(x, \omega) = \sum_{m=1}^{N_L} \sum_{n=1}^{N_W} \frac{R_0}{R_{mn}} T_{mn}(\omega) e^{-i\omega(t_{mn} + t_{mn})} u_0(x, \omega) \quad (1)$$

$$\tau_{mn} = \frac{\zeta_{mn}}{V_R}, \quad t_{mn} = \frac{R_{mn} - R_0}{c_s} \quad (2)$$

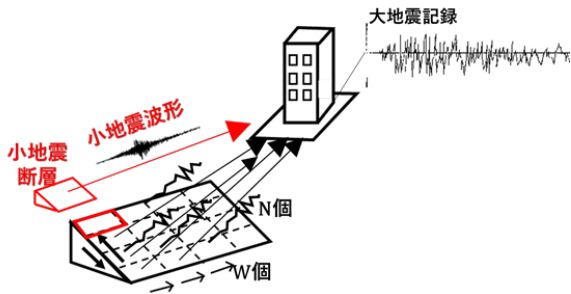


図 5 経験的グリーン関数法の概要図

### 3・2・1 要素地震の選定

要素地震の選定を行う。要素地震の候補の選定は以下の条件により行った。

1. 1996年～2022年に発生した KiK-net の観測記録
2. SMGA モデル(TK1～TK4,SR1,SR2)の近傍で発生
3. 海溝型地震と想定される震源深さが約 20km 以深

次に、選定した要素地震候補から震源位置が各 SMGA の場所に近いものを本研究で用いる要素地震とした。結果を図 6 右に示す。なお、経験的グリーン関数を用いた南海トラフ地震予測の既往研究として石井ら (2013) が用いた要素地震を図 6 左に併記する。石井らが使用した要素地震は、基本的には各 SMGA に近い場所のものを使用されているが、断層距離の観点から愛知県に最も影響が大きいと考えられる TK2 についての要素地震が選定されていない。つまり、少なくとも愛知県について、本研究で選定した要素地震を使用することで、石井らより精度のよい地震動計算が行える余地があると考えられる。

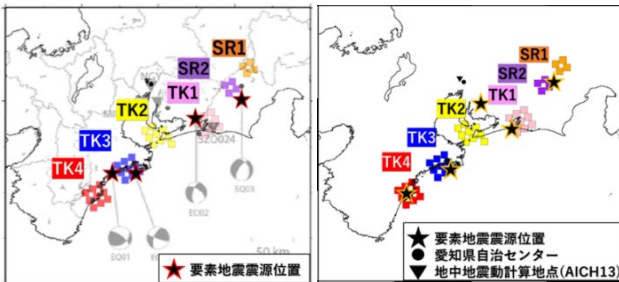


図 6 要素地震の震源位置

左：石井ら<sup>6)</sup>の要素地震震源位置

右：本研究の要素地震震源位置

### 3・2・2 要素地震の断層パラメータの推定

内閣府の震源断層モデルを用いた地震動計算に必要な要素地震の断層パラメータ (断層辺長、応力降下量) を求めた。はじめに、要素地震の地中観測記録から観測震源スペクトルを計算した。次に、式 (3) から計算される理論震源スペクトルと、観測震源スペクトルのフィッティングからコーナー周波数 $f_c$ を算出した。コーナー周波数から円形クラックモデルを仮定した式 (4) より、断層を円と仮定した半径 $r$ が求まり、最終的に短形と仮定した断層の辺長 $d_x$ を求めた。また、応力降下量を式 (5) より求めた。ここに、 $M_0$ は地震モーメント、 $\rho$ 、 $V_s$ は地震が発生する媒質の密度、S 波速度を表す。また、PRTITN は、地震動を水平方向 2 成分に分配する係数である。以上の手順を各要素地震に適応した結果のうち、TK1 と SR1、SR2 の例を図 7 に、求めた各要素地震のコーナー周波数と断層パラメータを表 2 に示す。

$$S_A(f) = R_{\theta\theta} \cdot PRTITN \cdot \frac{\pi M_0}{\rho V_s^3} \frac{f^2}{1 + (f/f_c)^2} \quad (3)$$

$$d_x = \sqrt{\pi (0.37 \times V_s / f_c)^2} \quad (4) \quad \sigma = \frac{7}{16} \cdot \frac{M_0}{r^3} \quad (5)$$

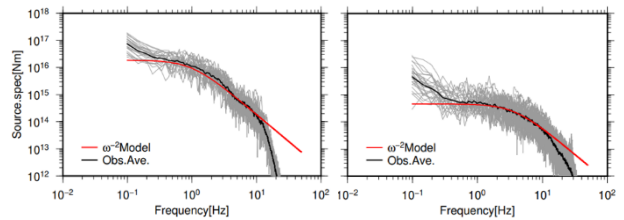


図 7 震源スペクトルのフィッティング結果

左：TK1 右：SR1・SR2

表 2 各 SMGA の断層パラメータ

断層パラメータ	TK1	TK2	TK3	TK4	SR1	SR2
コーナー周波数 $f_c$ (Hz)	1.0	2.7	0.9	1.1	3.7	
断層長 $d_x$ (m)	2426.5	898.7	2696.1	2205.9	655.81	
応力効果量 $\sigma$ (MPa)	3.17	1.27	8.38	4.56	3.98	

### 3・2・3 南海トラフ地震の地震動計算

選定した小地震を用いて経験的グリーン関数法で南海トラフの地震動計算を行う。まず地震動計算に必要な小断層の足し合わせ数、応力降下量比、ライズタイムを要素地震の断層パラメータと SMGA モデルより算出する。TK2 について例を挙げる。内閣府の震源断層モデルの SMGA のうち、TK2 の 1 つ分の断層面積は、平均 10.07km<sup>2</sup>である。一方で、要素地震の面積は、0.81km<sup>2</sup>と算出されている。したがって、TK2 の SMGA は、要素地

## 微動と地震動を用いた南海トラフ地震の建物応答予測

震を長さの約 12 倍となるので、その個数分の要素地震の波形を足し合わせれば、TK2 の SMGA の地震動を再現できることとなる。同様に、内閣府が公表している SMGA のパラメータと要素地震のパラメータの比を考慮して地震動を計算した。内閣府のモデルの破壊開始点は潮岬であるため、各 SMGA の破壊開始点は南西側の点とした。

設定された TK1~TK4 および SR1・SR2 の各 SMGA において波形計算を行った。最後に、各 SMGA が破壊する時間差を考慮して足し合わせすることで、SMGA 全体の地震動波形を算出した。算出した加速度波形 (EW 成分) を図 8 に示す。また、波形には、90 秒、120 秒、150 秒に独立した波群が見られる。これは、TK1、TK2 など各 SMGA から放出された地震動が時間差をもって到来していることを意味しており、全体で継続時間は 110 秒と非常に長い地震の揺れが予想される。90 秒の一番大きい振幅の波群は、主に TK2 からの地震動であり、震源に近いほど大きな揺れが予測されることと一致する。

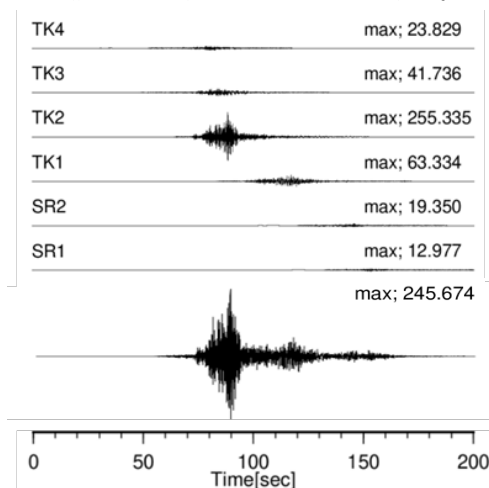


図 8 各 SMGA から生成される地震動と AICH13 における南海トラフ地震予測地震動

## 4. サイト特性の評価

### 4.1 微動アレイ探査概要

3 節では、KiK-net 地中観測点 AICH13 が設置されている地震基盤 ( $V_s=3.2\text{km/s}$ ) での地震動波形を算出した。次に、この波形から、自治センターの地表の波形を計算する。そのため、自治センター直下の地震基盤から地表までの地盤構造を推定する。

地震動評価に必要なローカルなサイト特性は、十分な調査が行われていないのが現状である。S 波速度構造を推定する手法として様々な提案がされているが、本研究では微動アレイ探査を用いた。微動アレイ探査は、対象地点にて図 9 の様に正三角形の 3 頂点と、正三角形に外接する円の中心に地震計を配置し微動を観測することで、

その位相特性から S 波速度構造を推定する手法である。具体的には、観測した微動記録から表面波の分散性をグラフ化した分散曲線を算出し地盤構造を得る。円の半径 (アレイ半径) は、求めたい深度に応じて変化させ観測を行う。本観測では、地震動計算地点 AICH13 が設置されている地震基盤 ( $V_s=3.2\text{km/s}$ ) までの地盤構造を求めるため 1m から 100m までの 6 つのアレイ半径で観測を行った。

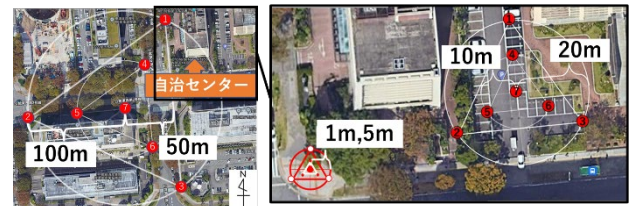


図 9 観測概要図

### 4.2 分散曲線の概要

分散曲線は、観測した微動波形のうち、鉛直成分を有するレイリー波から、周波数によって波の位相速度が変化する性質 (分散性) を抽出し、周波数と位相速度で示したものである。分散曲線の算出には CCA 法<sup>15)</sup>を用いた。

分散曲線は、表面波の変化のパターン (分散性) が S 波速度構造を反映することから、表面波の分散性を逆解析することで地下の S 波速度構造モデルを推定することができる。本観測で得られた分散曲線を図 10 に示す。各アレイ半径で分散性を示す周波数帯をつなぎ合わせると、に地盤構造の推定を行う。

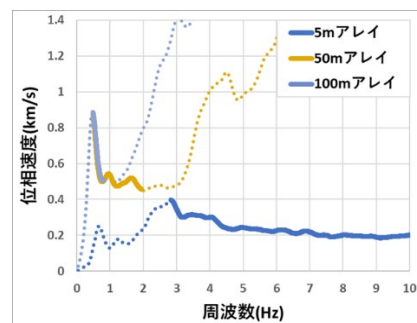


図 10 観測分散曲線

### 4.3 分散曲線を用いた S 波速度構造の推定

分散曲線から S 波速度構造を推定するために、最初に観測地点周辺で行われた地盤調査の情報から初期地盤モデルを設定する。次に設定した初期地盤モデルより各層の層厚や S 波速度を変化させ、その地盤構造モデルごとに理論分散曲線を計算する。理論分散曲線が観測分散曲線とよく一致した時、作成したモデルを観測地点直下の地盤構造とした。初期地盤モデルには、全国 1 次地下構造モデルを用いた。モデルの諸元を表 3 に示す。また、

初期地盤モデルから得られる理論分散曲線を図 11 に赤線で示す。理論分散曲線は観測分散曲線と比べ全周波数帯で高い位相速度を示す結果となった。特に高周波数側の位相速度は、観測分散曲線よりもかなり大きく算出されている。理論分散曲線の位相速度は、地盤構造モデルの S 波速度の値と概ね同じ値を示すことから、初期地盤構造モデルの第 1 層目の S 波速度が大きいことが推測された。そこで、観測分散曲線の高周波数側の位相速度(約 200m/s)を参考に初期地盤モデルの 1 層目に  $V_s=200\text{m/s}$  の層を追加した。また、各層の層厚を変化させ全周波数帯での理論と観測の分散曲線の一致度の向上を図った。その結果の分散曲線を図 12 に、求めた S 波速度構造の諸元を表 4 に示す。分散曲線の一致度は、初期地盤の時に比べ全周波数帯で向上した。推定したモデルの結果は、初期地盤モデルの 1 層目に層厚 20m、 $V_s=200\text{m/s}$  の層が追加され、各層の層厚が全体的に厚くなった。

表 3 初期地盤モデル諸元

層厚(m)	密度( $\text{t/m}^3$ )	P 波速度(m/s)	S 波速度(m/s)
70.5	1.80	1700	350
394.3	2.00	2000	600
68.4	2.20	2700	1300
-	2.65	5500	3200

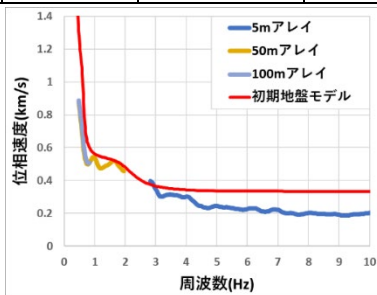


図 11 初期地盤モデルの理論分散曲線

表 4 推定地盤モデル諸元

層厚(m)	密度( $\text{t/m}^3$ )	P 波速度(m/s)	S 波速度(m/s)
20.0	1.70	1500	200
50.0	1.80	1700	350
500.0	2.00	2000	600
142.7	2.20	2700	1300
-	2.65	5500	3200

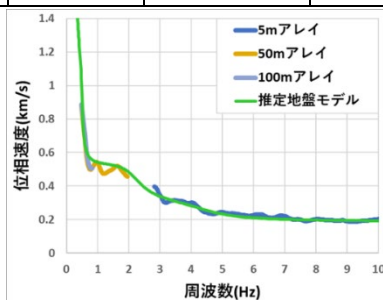


図 12 推定地盤モデル理論分散曲線

#### 4・4 サイト特性の算出

前節で推定した地盤モデルを基にサイト特性を算出する。サイト特性の算出方法は、Haskell<sup>16)</sup>を用いた。これは、成層自由地盤に実体波が斜め入射するときの地盤の応答変位を計算する手法である。サイト特性の算出に必要な  $Q_s$  値は全国 1 次地下構造モデルの値を用いた。本研究で新しく追加した 1 層目 ( $V_s=200\text{m/s}$ ) の  $Q_s$  値については、全国 1 次地下構造モデルの 1 層目 ( $V_s=350\text{m/s}$ ) と 2 層目 ( $V_s=500\text{m/s}$ ) の  $Q_s$  値から線形補間を行い算出した。その結果、1 層目 ( $V_s=200\text{m/s}$ ) の  $Q_s$  値は 40 となり、これを用いてサイト特性の算出を行った。サイト特性の算出結果を図 13 に示す。結果は、0.25Hz、0.8Hz、1.2Hz に振幅増幅量、約 20 倍を示した。このサイト特性を用いて、自治センターの地中における地震動を地表の地震動へと変換する。

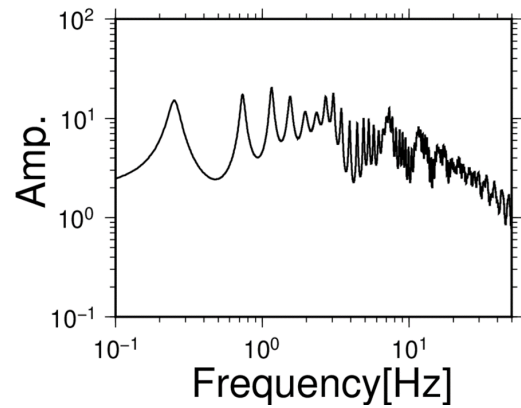


図 13 推定地盤モデルのサイト特性

### 5. 南海トラフ地震における愛知県自治センター建物応答予測

#### 5・1 建物基礎による入力損失効果の計算

地震動が建物に入力する際には、建物基礎によって地震動による構造物周辺の地盤の動きが拘束され、自由地盤に比べ構造物に入射される地震動が低減される入力損失効果が生じる。入力損失効果の特性は、杭基礎や直接基礎といった建物基礎の構造が大きく寄与する。それら建物基礎の構造に着目し、入力損失効果を簡易的に評価する手法として式 (6) に示す原田ら (1985)<sup>12)</sup>を改良した土木学会の耐震委員会での提案式<sup>13)</sup>がある。この手法は、建物基礎の根入れ深さ  $D_f$  (m) と基礎周辺地盤の S 波速度 (m/s) をパラメータとして算出され、周波数領域において地震動の低減効果を表現するものである。

自治センターは直接基礎であるため、根入れ深さは 1 階から地下 4 階までの高さを合計した 17.55m を用いた。 $V_s$  は、求めた自治センター直下の地盤構造モデルの 1 層目 (層厚 20m) の S 波速度  $V_s=200\text{m/s}$  を用いた。算出

した自治センターの建物基礎による入力損失効果を図 14 に示す。結果は、2.8Hz までは徐々に減衰する効果を示し、以降減量 0.405 倍で一定となった。

$$H(\omega) = \begin{cases} \left| \frac{\sin(\frac{\omega D_f}{V_s})}{\omega D_f / V_s} \right|^2, & \omega \leq \omega_n \\ 0.405, & \omega > \omega_n \end{cases} \quad (2)$$

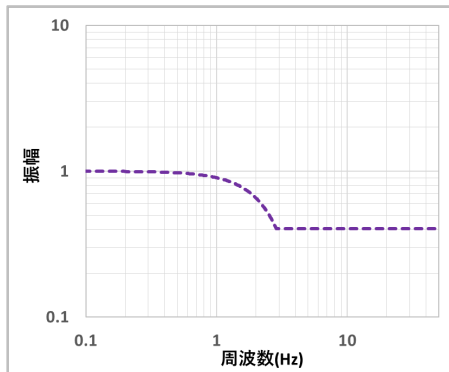


図 14 愛知県自治センターの入力損失効果

## 5・2 過去地震記録を用いた AICH13 地中地震動記録から愛知県自治センター地下 2 階における地震動再現

2・2・3 節で求めた南海トラフ地震の AICH13 における地中地震動を自治センター建物基礎の入力地震動へと変換するための手順を設定した。先ず、AICH13 の地中と自治センター地下 2 階で観測された地震を対象として、AICH13 の地中地震計が設置されている地震基盤上の記録は、同じ地震基盤上であれば、若干場所が移動しても地震動の特性は大きく変化しないという仮定の下で、AICH13 地中の地震動を自治センター直下の地震基盤上の地震動とした (図 3 参照)。その自治センター直下の地震基盤上の地震動を、4・4 節で求めたサイト特性を考慮して自治センター地点の地表地震動へと変換した。次に、自治センター地点の地表地震動を、前節で求めた建物基礎による入力損失効果を考慮して自治センター基礎 (地下 2 階) の入力地震動とし、観測波形との比較を行った。観測した地震動は、新城市で 2022 年 4 月 7 日午前 9 時 30 分頃に発生した、Mw4.4 の地震とした。

図 15 上に NS 方向について、AICH13 地中における地震動記録 (黒線) とサイト特性、入力損失効果を考慮して計算された自治センター地下 2 階の再現波形 (紫線) を示す。結果は、観測波形に比べて解析波形が大きくなった。そこで、解析波形の振幅が観測波形の振幅に合うように、解析波形の振幅を 0.5 倍まで減少させた。その結果を図 15 下に示す。観測波形と解析波形は良好に一致したことがわかる。

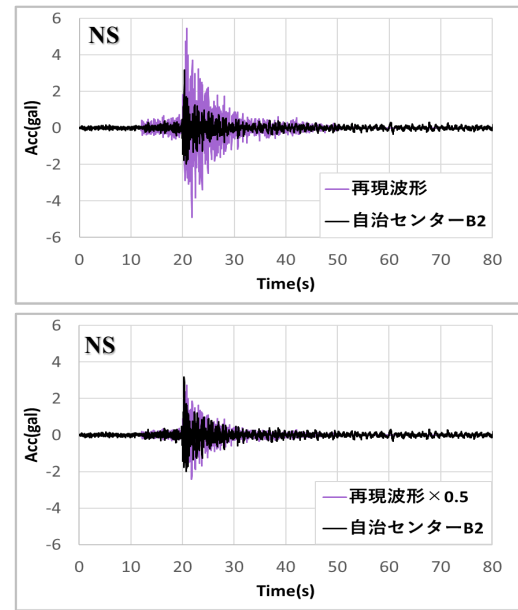


図 15 愛知県自治センター地下 2 階における再現波形と観測波形の比較

## 5・3 愛知県自治センターの建物振動特性の評価

建物振動特性は、伝達関数適合法とモード合成法により評価できる。モード合成法とは多自由度系の時刻歴応答解析を等価な 1 自由度系の足し合わせによって行う方法である。モード合成法を行うためには、別途、固有周期、減衰定数、刺激関数が必要であり、山下ら (2012) は、伝達関数適合法により、建物の下層と上層記録のスペクトル比から、固有周期、減衰定数、刺激係数を推定する方法を利用している。さらに、それらの値を東北地方太平洋沖地震において観測された高層ビルの 1 階観測波に適用することで、29 階の応答値を求めている。この手法について式 (7)、(8) を用いて説明する。

まず、応答再現を行う  $k$  階と、1 階の加速度記録のフーリエスペクトルの比を  $k$  階における伝達関数とする。この伝達関数のピーク値から固有周期を求める。

次に、モード展開により導いた周期  $T=2\pi/\omega$  の調和地振動  $e^{i\omega t}$  に対する伝達関数の理論解の実部振幅  $|G_k(\omega)|$  を、最小二乗法を用いて観測記録に適合させ、 $j$  次の減衰定数  $h_j$  と刺激関数  $\beta_j \Phi_{j,k}$  (式 (7)) を定める。なお、減衰定数は伝達関数のピークの広がり、刺激係数はピークの振幅を同定していることを意味している。求めた卓越周期、減衰定数  $h_j$  と刺激関数  $\beta_j \cdot \Phi_{j,k}$  から式 (8) で表現される多自由度系の運動方程式を解くことで各モードの波形が再現されさらに合算することで、上層階の応答波形が得られる。

本研究では、これら解析手法を従来通り建物内の地震動記録を用いると共に、微動記録の適応を検討する。

$$|G_k(\omega)| = \sqrt{G_{kR}(\omega)^2 + G_{kI}(\omega)^2}$$

$$G_{kR}(\omega) = \sum_{j=1}^N \frac{1 + (2h_j - B_j)^2 - B_j^2}{(1 - B_j^2)^2 + (2h_j B_j)^2} \cdot \beta_j \Phi_{j,k}$$

$$G_{kI}(\omega) = \sum_{j=1}^N \frac{-2h_j B_j^3}{(1 - B_j^2)^2 + (2h_j B_j)^2} \cdot \beta_j \Phi_{j,k}$$

$$B_j = \frac{\omega}{\omega_j} \quad (7)$$

$$\ddot{q}_{oj} + 2h_j \omega_j \dot{q}_{oj} + \omega_j^2 q_{oj} = -\ddot{u}_o \quad q_{oj} = \frac{q_j}{\beta_j} \quad (8)$$

5・3・1 地震動と微動を用いた伝達関数適合法

自治センターの建物振動特性の評価を行うために、地震動と微動の建物内観測を行った。地震動は、地下2階、6階、12階で、微動は、地下3階から屋上の各階で観測を行った。また、対象建物は長方形型であるため南北(NS)方向と東西(EW)方向で建物応答が異なることが予測される。そこで本観測では、地震動と微動の両方で3成分(NS,EW,UD)観測を行った。地震動の解析に用いた記録は、5・2節で用いた新城の地震(Mw4.4)である。

NS方向、EW方向において、地震動と微動の地下2階と12階の観測波形から得られるスペクトル比(地下2階と12階の伝達関数)と、その結果に式(7)から得られる理論の伝達関数をフィッティングさせた結果を図16、図17に、求めた各モードの3つの係数(固有周期、減衰定数、刺激係数)を表5、表6に示す。NS方向の結果は、地震動で3次モードまで、微動では2次モードまでフィッティングを行った。微動の結果で3次モードが得られなかった原因としては、微動は地震動に比べ振動のパワーが小さいためと考えられる。一方で、EW方向の結果は、地震動と微動の両方で2次モードまでに加え、1.5Hzのピークに理論のフィッティングを行った。同定した3つの係数を比較しても、地震動と微動の結果は両軸方向において良好な一致度を示したことから、微動記録を用いた建物振動特性の評価が可能であることが示唆される。

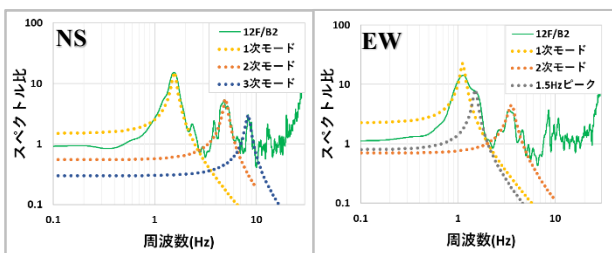


図 16 地震動を用いた伝達関数適合法

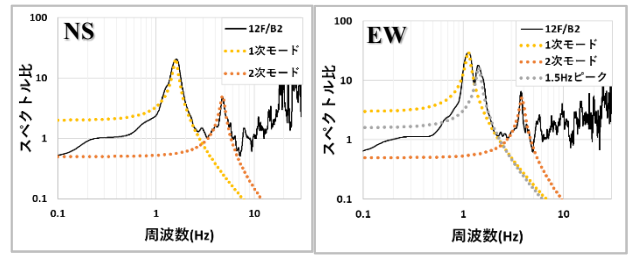


図 17 微動を用いた伝達関数適合法

表 5 NS 方向の固有周期、減衰定数、刺激係数

NS	Model1		Mode2		Mode3	
	地震	微動	地震	微動	地震	微動
固有周期	0.64	0.63	0.2	0.21	0.12	
減衰定数	0.05		0.05		0.05	
刺激係数	1.5	2.0	-0.55	-0.5	-0.3	

表 6 EW 方向の固有周期、減衰定数、刺激係数

EW	Model1		Mode2		1.5Hz ピーク	
	地震	微動	地震	微動	地震	微動
固有周期	0.89	0.89	0.28	0.26	0.66	0.7
減衰定数	0.05		0.05		0.05	
刺激係数	2.26	3.0	-0.65	-0.5	0.8	1.6

5・3・2 地震動と微動を用いたモード合成法による12階の応答再現

地震動と微動を用いた伝達関数適合法の結果から、モード合成法により自治センターの12階における応答波形の再現を行った。解析対象は、5・2節で用いた新城の地震をとし、NS方向の解析は、地震動と微動の伝達関数が概ね一致したことに加え、3次モードまでのフィッティングが行えたことから、地震動の伝達関数を用いた。一方で、EW方向の解析は、地震動と微動の伝達関数のピーク値と、2次モードのピークを示す周波数に差が生じたことから、地震動と微動のそれぞれの伝達関数で応答再現を行った。両軸方向の解析地震動の再現性評価は、表7、表8に示す検討ケースで行った。評価方法は、再現地震動と観測地震動で絶対値の振幅残差を合計したものを比較し、最も残差が小さかった検討ケースを、自治センターの建物振動特性とした。

各検討ケースの残差を表9に示す。NS方向の結果は、検討ケース③が、EW方向の結果は、検討ケース⑧が最も小さい残差を示した。それぞれの再現地震動と観測地震動の比較を図18に示す。



微動と地震動を用いた南海トラフ地震の建物応答予測

表 7 NS 方向の建物応答再現検討ケース

NS 方向	
ケース No.	検討内容
①	1次,2次,3次モードを考慮
②	1次,2次モードを考慮
③	1次モードのみを考慮

表 8 EW 方向の建物応答再現検討ケース

EW 方向	
No.	検討内容
④	微動で1次,2次,1.5Hzのピークを考慮
⑤	微動で1次,2次モードを考慮
⑥	微動で1次モード,1.5Hzのピークを考慮
⑦	地震動で1次,2次モード,1.5Hzのピークを考慮
⑧	地震動で1次,2次モードを考慮
⑨	地震動で1次,1.5Hzのピークを考慮

表 9 各検討ケース残差合計の比較

NS 方向		EW 方向	
No.	残差合計	No.	残差合計
①	4307.77	④	793253
②	4238.72	⑤	6047.49
③	4053.57	⑥	7909.43
		⑦	5551.248
		⑧	5064.62
		⑨	5358.79

5・3・3 愛知県自治センター12階における南海トラフ地震の建物応答予測

本節では、自治センター12階における南海トラフ地震の建物応答予測を行う。先ず、3・2・3節で求めたAICH13における南海トラフ地震の予測地震動を5・2節で設定したAICH13地中から自治センター建物基礎の入力地震動へと変換する手順に適用した。次に、前節で求めた自治センターの建物振動特性を用いて、自治センター建物基礎の入力地震動から12階における建物応答予測を行った。NS方向の応答予測は1次モードのみを考慮した解析を、EW方向は1次モード、2次モードを考慮した解析を行った。結果を図19に示す。結果は、最大加速度においてはNS方向で579gal、EW方向で897.1galとなった。また、変位波形においては、NS方向で3.23cm、EW方向で14.5cmとなった。

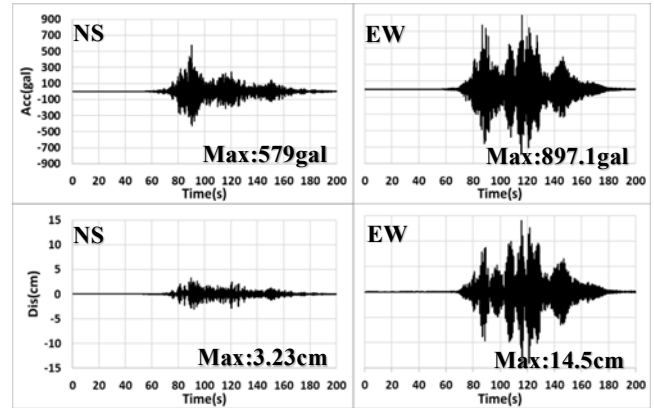


図 19 愛知県自治センター12階における南海トラフ地震の予測応答波形

上:加速度波形 下:変位波形

6. 地震動予測結果の評価

6・1 地表震動分布の比較

解析結果の妥当性を震度で確認する。これは、内閣府における南海トラフ地震の面的な評価が震度でなされているためである。自治センター地点における地表震度について、図2に示す南海トラフの巨大地震モデル検討会での結果と、本研究で求めた自治センター地点の地表地震動から算出した震度階級の比較を行った。検討会の結果は、6弱とされている。本研究の結果は、5強(計測震度で5.3)であった。計測震度と比較すれば、震度6弱に近い震度5強であれ、求めた自治センター地点の地表震度は既往のものと大きく外れない結果であることを確認した。

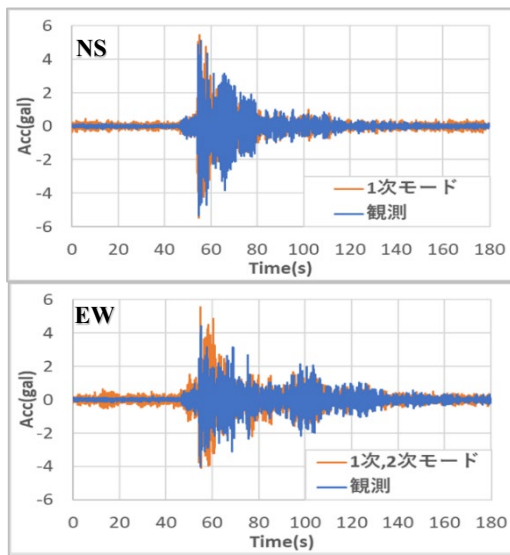


図 18 12階における再現波形と観測波形

## 6・2 地表加速度応答スペクトルの比較

本研究で求めた自治センター地点の地表地震動から得られる加速度応答スペクトルと、道路橋示方書のレベル2地震動(タイプI)の標準加速度応答スペクトルの比較を行った。結果を図20左に示す。なお、南海トラフ地震と同規模程度の地震としてK-NET、KiK-netで観測された東北地方太平洋沖地震(Mw9.0)の加速度応答スペクトル<sup>17)</sup>を図20右に併記する。本研究の結果は、ごく短い周期成分を除けば、道路橋示方書のレベル2地震動にほぼ包含される結果となった。また、長周期側について応答スペクトルが落ち込むものの、短周期側においては、東北地方太平洋沖地震の結果と同様、道路橋示方書のレベル2地震動を超える結果となった。

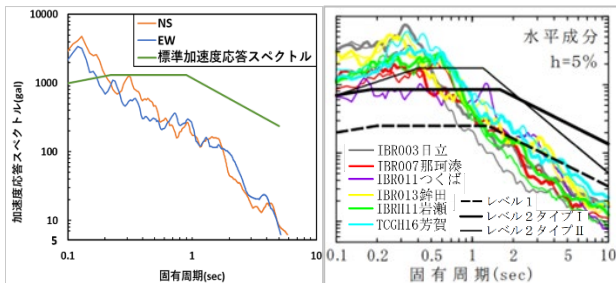


図20 愛知県自治センター地点の地表地震動加速度応答スペクトル

左:道路橋示方書標準加速度応答スペクトルとの比較  
右:東北地方太平洋沖地震の加速度応答スペクトル

## 6. まとめ

本研究では自治センターを対象として、南海トラフ地震の建物上層階における応答予測を行った。応答予測には、震源特性、伝播経路特性、サイト特性、建物基礎による入力損失効果、建物振動特性の5つの特性の評価を網羅的に行った。結果を次に示す。

- ① 震源特性と伝播経路特性は、愛知県自治センターに一番近い地中の観測点AICH13において、内閣府の南海トラフ地震震源断層モデルを基に経験的グリーン関数法を用いて地震動再現を行うことで考慮した。計算した予測地震動は、地震発生後約90秒後に最大振幅(245gal)を示し、継続時間が約110秒と非常に長い時間揺れが生じる結果となった。
- ② サイト特性は、愛知県自治センター周辺にて微動アレイ探査を行い、求めた地盤構造より構築した。求めた地盤構造は、初期地盤モデル(全国1次地下構造モデル)の1層目に $V_s=200\text{m/s}$ の層を20m加えたほか、各層の層厚が初期地盤モデルと比較して全体的に厚くなる結果となった。また、算出したサイ

ト特性は0.25Hz、0.8Hz、1.2Hzで約20倍の振幅増幅を示した。

- ③ 建物振動特性は、建物内の地震動と微動記録を用いた伝達関数適合法とモード合成法により12階の地震記録の再現を行うことで評価した。地震動と微動の地下2階と12階の伝達関数は良好に一致したことから、微動記録を用いた建物振動特性の評価の適応性を確認した。また、推定したNS方向とEW方向の各モードの波形より、12階の観測波形を最も再現できるケースの検討を行った。その結果、NS方向では、1次モードまで、EW方向は1次モード、2次モードを考慮することで観測波形をより再現することができた。
- ④ AICH13地中における南海トラフ地震の予測地震動から求めた自治センター建物基礎入力地震動に建物振動特性を考慮することで、12階における応答予測を行った。結果は、最大加速度においてNS方向で579gal、EW方向で897.1galとなった。変位波形においては、NS方向、EW方向それぞれで3.23cm、14.5cmとなった。
- ⑤ 本研究で計算した愛知県自治センター地点における南海トラフ地震の地表地震動の評価を、内閣府調査結果の震度と、道路橋示方書の標準加速度応答スペクトル並びに東北地方太平洋沖地震の加速度応答スペクトルを用いて行った。震度は5強(計測震度で5.3)であった。計測震度と比較すれば、南海トラフの巨大地震モデル検討会の結果(震度6弱)に大きく外れない結果となった。また、加速度応答スペクトルでは、東北地方太平洋沖地震の結果と同様に、短い周期成分を除けば、道路橋示方書のレベル2地震動にほぼ包含される結果となった。

## 参考文献

- 1) 平成24年(2012年)8月 南海トラフの巨大地震モデル検討会(第二次報告書)断層モデル編-強震断層モデルと震度分布について
- 2) 平成23年度~25年度、愛知県東海地震・東南海地震・南海地震等日会予測調査報告書
- 3) 南海トラフ地震に世帯した防災対応の検討、モデル地区における取り組み事例の紹介  
<https://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/pdf/jirei.pdf>,最終閲覧日2023年1月30日
- 4) 愛知県防災学習システム,平成23年度~25年度,愛知県東海地震・東南海地震・南海地震等日会予測調査報告書
- 5) 野津厚,長尾毅,山田雅行(2007),スペクトルインバージョンに基づく全国の強震動観測地点におけるサイト増幅特性とこれを利用した強震動評価事例,日本地震工学会論文集第7巻,第2号(特集号)
- 6) 石井やよい,壇一男,宮越淳一,高橋広人,護雅史,福和伸夫(2013),南海トラフの巨大地震の断層モデルの設定と経験的グリーン関数法による強震動予測,

## 微動と地震動を用いた南海トラフ地震の建物応答予測

- 清水建設研究報告 第90号平成25年1月
- 7) Irikura, K., 1986, Prediction of strong acceleration motions using empirical Green's functions, Proc. 7<sup>th</sup> Japan Earthq. Eng. Symp., 151-156
  - 8) 倉橋奨, 入倉孝次郎 (2017), 2011年東北地方太平洋沖地震における強震動生成域からの長周期地震動, 日本地震工学会論文集 第17巻、第2号
  - 9) Koketsu, K., Miyake, H., Fujiwara, H. and Hashimoto, T., 2008, Progress towards a Japan integrated velocity structure model and long-period ground motion hazard map. Proc. 14th World Conf. Earthquake Eng., S10-038.
  - 10) 若松加寿江・松岡昌志(2013): 全国統一基準による地形・地盤分類 250m メッシュマップの構築とその利用, 地震工学会誌 No.18, pp.35-38.
  - 11) 山田純平, 倉橋奨, 横田崇, 松多信尚 (2021), 長野県白馬村神城地区における微動アレイ探査によるS波速度構造の推定, 土木学会全国大会
  - 12) 山下哲郎, 久田嘉章, 坂本有奈利, 花房比佐友, 久保智弘 (2012), 新宿区超高層街区に建つ鉄骨造超高層建築の東北地方太平洋沖地震前後の振動特性, 日本地震工学会論文集 第12巻, 第4号 (特集号)
  - 13) 原田隆典他(1985), 有効入力動の計算式とその実測例による検討, 土木学会論文集, 第362号, I-4, pp.435-440
  - 14) 土木学会編: 動的解析と耐震設計, 第2巻, 動的解析の方法, 技報堂出版, pp.281-282, 1989.7
  - 15) 長郁夫, 先名重樹 (2016), 極小微動アレイによる浅部構造探査システム, シンセオロジー研究論文, 第9巻, 2号
  - 16) Haskell, N.A.: The dispersion of surface of waves on multilayer media. Bull. Sesm. Soc. Am. Vol.43, (1953), pp.17~34
  - 17) 原田隆典他(1985), 有効入力動の計算式とその実測例による検討, 土木学会論文集, 第362号, I-4, pp.435-440
  - 18) 土木学会編: 動的解析と耐震設計, 第2巻, 動的解析の方法, 技報堂出版, pp.281-282, 1989.7
  - 19) 東北関東大震災調査速報: 地震工学委員会地震防災技術普及小委員会被害調査報告 (2011), 平成23年東北地方太平洋沖地震 (地震応答スペクトル)
- (受理 令和5年3月20日)