

# 南海トラフ沿いの巨大地震を対象とした設計用長周期地震動の 策定手法による建物応答性状の違いに関する検討

## A STUDY ON THE DIFFERENCE OF BUILDING RESPONSE CHARACTERISTICS BY THE METHOD OF FORMULATING LONG-PERIOD GROUND MOTIONS FOR DESIGN OF A LARGE EARTHQUAKE FOR THE HYPOTHETICAL NANKAI TROUGH EARTHQUAKE

小 阪 宏 之\*<sup>1</sup>, 細 谷 典 弘\*<sup>2</sup>, 太 田 行 孝\*<sup>3</sup>  
*Hiroyuki KOSAKA, Norihiro HOSOYA and Yukitaka Ohta*

According to a notice from the Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT), for new high-rise buildings etc. to be newly constructed with ministerial approval based on performance evaluation to be applied for after April 2017, design long-period ground motions that are assumed to occur at the construction site due to a large earthquake along the Nankai Trough are to be considered.

The time history waveforms of long-period ground motions for designs (hereinafter referred to as ‘public waves’) are available on the website of the Building Research Institute (BRI), and these are used in most cases in design, but it is also possible to create them using the improved empirical relation formula that is the basis for the calculation of public waves.

In this paper, the requirements for developing long-period earthquake ground motions for designs using the improved empirical relation formula as of July 2022 are rearranged, the differences in response spectra in the target area between the case of using public waves and the case of developing the improved empirical relation formula are confirmed, and the response analysis for the high-rise RC frame model is conducted, and the differences in response characteristics are discussed.

**Keywords :** Long-period ground motion for design, Nankai Trough earthquake, High-Rise RC frame model, Seismic Response Analysis  
設計用長周期地震動, 南海トラフ地震, 超高層 RC 造骨組モデル, 地震応答解析

### 1. はじめに

国土交通省は2016年6月24日付で「超高層建築物等における南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動への対策について(技術的助言)」<sup>1)</sup>(以下, 技術的助言)を公表した。技術的助言によれば, 関東, 静岡, 中京, 大阪の対象地域内において, 2017年4月以降に申請する性能評価に基づく大臣認定によって新築される超高層建築物等については, 南海トラフ沿いの巨大地震によって建設地で発生すると想定される設計用の長周期地震動を検討する旨が記載されている。策定手法については国土交通省による建築基準整備促進事業において作成されたため, 「基整促波」と呼ばれており, 作成する長周期地震動は後述する条件を満たす基整促波に基づくか, あるいは基整促波と同等以上のものとして作成する必要がある。これらに関する詳細は, 「長周期地震動対策に関わる技術資料・データ公開特設ページ」<sup>2)</sup>(以下, データ公開ページ)に資料がまとめられている。なお, 資料によっては「地方」と称されていたり, 「地域」や「圏」と称されていたりするが, 本稿では引用部を除いて「地域」で統一する。

ところで, 基整促波の作成手法としてはデータ公開ページ<sup>2)</sup>によると3種類の定義があり, いずれを使用してもよいということになっているが, 現状としては当社が設計を行う場合はそのうちの公開されている時刻歴波形(以下, 公開波)を用いるケースに限られている。これについては公開波を用いるケース以外の要件が複雑であることや, 別途計算が必要である点等から設計者に浸透していないことが要因であると考えられる。技術的助言<sup>1)</sup>が施行されてから

5年が経過しており, いささか古い話題ではあるが, 本稿では2022年7月現在, データ公開ページ<sup>2)</sup>に記載されている基整促波の要件を改めて整理し, 公開波を用いた場合と, その他の基整促波作成手法で作成した場合において汎用建物モデルを用いて応答解析を実施し, どのような違いがあるのかについて議論する。本稿が実務設計の一助となれば幸いである。なお, 基整促波と同等以上のものであれば, 基整促波以外の策定手法を用いる事もできるが, 基整促波と同等以上という要件があることから設計実務上ではほとんど使用されることはないと考えられるため, ここでは割愛する。また, 今後も基整促波の要件については改訂が行われる可能性があるため, 2022年7月現在の要件に従った検討ケースである点にも注意されたい。

### 2. 基整促波の適用要件の整理

#### 2.1 基整促波の定義

データ公開ページ<sup>2)</sup>によると, 2022年7月現在, 基整促波の定義は以下の3種類となっている。

- ① 長周期通知別紙に示す10区域ごとに示した加速度波形及び速度波形
- ② 長周期通知別紙に示す10区域ごとに示した擬似速度応答スペクトルをもとに, 基整促波の方法により, 適切に位相を設定して算定した加速度波形及び速度波形

\*1 戸田建設株式会社 技術研究所 修士(工学)

\*2 戸田建設株式会社 構造設計部 修士(工学)

\*3 戸田建設株式会社 構造設計部 博士(工学)

Technology Research Institute, TODA CORPORATION, M.Eng.

Structural Design Division., TODA CORPORATION, M.Eng.

Structural Design Division., TODA CORPORATION, Dr. Eng

- ③ 各地点の観測データをもとに、基整促波の方法により、二乗和平方根法 (SRSS 法) により算出した擬似速度応答スペクトルを 1.1 で除して平均的な擬似速度応答スペクトルを求めたうえで、適切に位相を設定して算定した加速度波形及び速度波形

基整促波①は単純に公開波をそのまま用いるという事であり、事前に計算が不要という点や、適用条件等が明快で理解しやすいという点などから最も広く用いられている手法である。基整促波②は公開波と同じ加速度応答スペクトル振幅をターゲットとして、位相特性については算出点個別の位相特性を与えて作成される波である。位相特性の与え方についてはデータ公開ページ<sup>2)</sup>の本文中に記載されている基整促波の方法、すなわち大川他(2013a)<sup>3)</sup>の手法 (以下、改良経験式手法)に基づいて設定される。改良経験式手法の詳細については、大川他(2013a)<sup>3)</sup>、大川他(2013b)<sup>4)</sup>、小阪他(2019)<sup>5)</sup>などを参照されたい。基整促波③は広範にわたる震源断層をセグメントごとに区切り、各セグメントで改良経験式手法によってターゲットとなる加速度応答スペクトルを策定後、二乗和平方根法(SRSS 法)によって合成し、その振幅値を 1.1 で割った加速度応答スペクトルをターゲットとして算出点個別の位相特性をフィッティングし直すという手法になる。基整促波②では解放工学的基盤におけるターゲットスペクトルの大きさは公開波と同じであるが、基整促波③を使用する場合は異なるターゲットスペクトル振幅で波動が算定されることとなる。

この3つが基整促波である。大川他(2013a)<sup>3)</sup>及び大川他(2013b)<sup>4)</sup>では振幅特性の設定方法としては三の丸波作成方法<sup>6)</sup>に準ずる手法、すなわち、21 波算定した波の擬似速度応答スペクトルの対数平均値をターゲットスペクトルとし、位相特性については 21 波算定した波の最大速度が中央値を取る位相を与えるという手法で検討が行われているが、上記の適用範囲には「適切に位相を設定」としか書かれておらず、三の丸波作成手法<sup>6)</sup>に準拠する必要はない。

## 2.2 基整促波の適用範囲

基整促波①の適用範囲を図 1 に示す。国土交通省の HP 上で対象地域の地図と対象となる町丁目リストが公開されており<sup>7)</sup>、算定地点がどこにあればどれを使うというのが決まっている。関東地域、静岡地域、中京地域、大阪地域のみが対象とされており、それ以外の地域は南海トラフ沿岸域であっても対象範囲外となる。

基整促波②の適用範囲は、計算を行うのが特定地点か任意地点かによって異なる。特定地点とは、改良経験式手法において個別に振幅特性及び位相特性を規定する群遅延時間に関する回帰係数が公開されている観測点位置を指し、任意地点は深部地盤モデルから求められる堆積層伝播時間  $T_z$  の関数として上記の回帰係数を算出することが可能である地点を指す。特定地点の場合は基整促波①と同じく図 1 の範囲内に位置していれば適用可能である。特定地点の場合は全国の観測点で回帰係数が示されているが、当然ながらターゲットとなる加速度応答スペクトルが定義されていない所では適用できない。改良経験式手法で任意地点の算定が可能な領域は、関東平野の 1 都 6 県 (島嶼部は除く)、濃尾平野の愛知県、岐阜県、

大阪平野の大阪府・京都府・兵庫県、奈良県である (以下、三大平野内とする)。特定地点では三重県内や静岡県内も算定可能であるが、任意地点では大川他(2013b)<sup>4)</sup>に適用範囲外と示されているため、これらの地域では適用出来ない。また、任意地点でも同様に上記範囲内であっても、図 1 に示される範囲外の地点についてはターゲットとなる加速度応答スペクトルが存在しないわけであるから、作成することは出来ない。

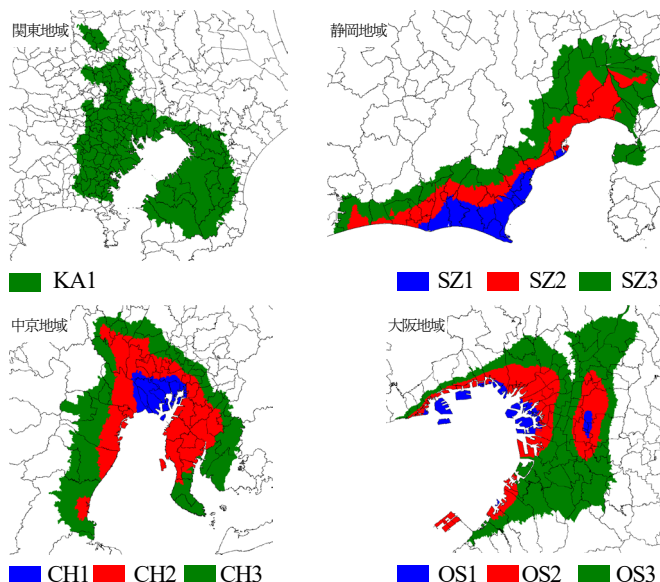


図 1 基整促波①の適用範囲 (国土交通省の HP<sup>7)</sup>より引用、加筆)

基整促波③の適用範囲については、データ公開ページ<sup>2)</sup>の「別紙 2 付録 5」に「基整促波③の適用について」という項目があり、以下のように記載されている。

- ・ 長周期通知別紙に示す 10 区域のうち、複数の区域が隣接する静岡県(SZ1, SZ2)、中京圏 (CH1, CH2) および大阪圏 (OS1, OS2) に用いる。
- ・ 求めた擬似速度応答スペクトルは、建築物の一次固有周期付近 (構造種別等に応じて周期の範囲が異なる。詳細は別紙 1 参照) で、隣接する区域の簡略化スペクトルの小さい方の値を下回らない。(例: 当該区域が CH1 の場合は CH2 の簡略化スペクトルを下回らない、CH2 の場合は CH3 の簡略化スペクトルを下回らない。)
- ・ ターゲットスペクトル  $pSv$  に合致する時刻歴波形を作成する場合の位相は、適切に設定する。

すなわち、特定地点の場合は図 1 の青・赤で示される範囲のみ、任意地点の場合は、その中から三重県と静岡県を除いた範囲のみという事になる。改良経験式手法では特定地点での計算は回帰係数が公開されている全国の観測点位置で可能であるし、三大平野内であれば全域で任意地点の計算を行う事も可能であるが、上記適用範囲外であれば基整促波③ではないという扱いになる。

纏めると、以下が結論となる。

- 1) 基整促波の対象範囲は図 1 に示される範囲内であり、それ以

外の地域は対象外である。

- 2) KA1, CH3, OS3, SZ3 の領域では基整促波①（公開波）に加えて基整促波②も適用可能であるが、スペクトルレベルは同等である。
- 3) CH1, CH2, OS1, OS2, SZ1, SZ2 の領域については、全ての基整促波を用いることが出来る。基整促波③を用いた場合は、それ以外の手法と異なるスペクトルレベルの長周期地震動を作成可能である。

### 2.3 「適切に位相を設定する」手法について

位相については、技術的助言<sup>1)</sup>が施行された当初は全ての項目で位相を適切に設定し、としか書かれていなかったが、2019 年 11 月 14 日に適切な位相の設定についてデータ公開ページ<sup>2)</sup>に資料が追加された。資料には以下のように記載されている。

「適切に位相を設定」することの目安として、作成される時刻歴波形の  $V_e/pSv$  を別紙 2 別添「基整促波②③の方法による  $V_e$  と  $pSv$  の比」に示す 220 地点の  $V_e/pSv$  から最寄りの地点を選定して比較し、超高層建築物等の一次固有周期付近（構造種別等に応じて周期の範囲が異なる。詳細は別紙 1 参照）に含まれるすべての周期と一次固有周期付近の両端の周期において同等以上となるように、位相を設定することとする。

超高層建築物等の一次固有周期付近の定義については、これもまた 2019 年 11 月 14 日に加筆されており、免震建築物では免震層の設計限界変位時の固有周期を上限とし、その 0.8 倍を下限とする周期の範囲、鉄骨造建築物においては当該建築物の一次固有周期から当該建築物が塑性化した後の最大の一次固有周期の 1.2 倍の固有周期まで、鉄筋コンクリート造建築物(鉄骨鉄筋コンクリート造も含む)においては一次固有周期から塑性化した後の最大の一次固有周期の 1.7 倍の固有周期の範囲までとされている。つまりは、入力が決まらなると上部構造が決まらないはずだが、上部構造が決まらなると入力が決まらなるという条件であるため、基整促波②及び③を適用する場合については反復計算を行うか、確実に収まるように広めの周期範囲を設定するかのどちらかが必要となる。

$V_e/pSv$  については、例えば秋山・北村(2006)<sup>9)</sup>に示されている減衰関数と呼ばれるもので、減衰 10% のエネルギー Spektral  $V_e$  と、任意の減衰（ただし、基整促波では 5% とされている）の擬似速度応答 Spektral  $pSv$  の比で表される。秋山・北村(2006)<sup>9)</sup>では速度応

答 Spektral であったが、小穴・北村他(2017)<sup>9)</sup>では「擬似」速度応答 Spektral で検討がなされており、基整促でも  $pSv$  が用いられている。 $V_e$  は弾塑性系の累積塑性変形に対応するという事になっており、 $pSv$  のレベルが同等の場合は継続時間が長いほど  $V_e/pSv$  比が大きくなる。つまり、 $V_e/pSv$  が小さくならないようにという事は、継続時間が長い地震を選定するようにという意図が込められているようである。

比較対象とされる 220 地点の  $V_e/pSv$  は基整促波②及び③それぞれについてデータ公開ページ<sup>2)</sup>に示されており、改良経験式手法を用いて策定されている。定義されている位置を図 2 に示す。特に中京地域の西側についてはほとんど観測点が存在せず、最も近い点といっても場所によっては数十 km 離れた地点を参照することになるため、算定地点によってはどの乱数を用いても条件を満たさないということは起こりうる。また、基整促波③の関東のサイトでも比較対象地点の評価が公開されているが、前述の通り KA1 は基整促波③の策定対象範囲外であることに注意されたい。なお、同等以上の目安については、データ公開ページ<sup>2)</sup>の「別紙 2 付録 7」に示されており、以下の式(1)及び式(2)を満足するということである。ここに、 $T_i$  は一次固有周期付近で比較・判定する周期成分、 $N$  は一次固有周期付近で比較・判定する離散点数、 $V_e(T_i, 0.10)$  は周期  $T_i$  における 10% 減衰エネルギー Spektral、 $pSv(T_i, 0.05)$  は周期  $T_i$  における 5% 減衰擬似速度応答 Spektral、 $obj$  は作成する設計用長周期地震動、 $ref$  は比較対象とする地点を意味する。

$$\epsilon_{min} = \left\{ \frac{\left( \frac{V_e(T_i, 0.10)}{pSv(T_i, 0.05)} \right)_{obj}}{\left( \frac{V_e(T_i, 0.10)}{pSv(T_i, 0.05)} \right)_{ref}} \right\}_{min} \geq 0.85 \quad (1)$$

$$\epsilon_{ave} = \sum \left\{ \frac{\left( \frac{V_e(T_i, 0.10)}{pSv(T_i, 0.05)} \right)_{obj}}{\left( \frac{V_e(T_i, 0.10)}{pSv(T_i, 0.05)} \right)_{ref}} \right\} / N \geq 1.00 \quad (2)$$

### 2.4 断層モデルについて

データ公開ページ<sup>2)</sup>の「別紙 2 付録 3」及び「別紙 2 付録 4」に断層モデルの位置座標と諸元が 2 種類公開されている。一つは宝永地震型の 4 連動 6 セグメントモデル、もう一つは安政東海地震型の 3 セグメントモデルである。データ公開ページ<sup>2)</sup>の「別紙 2」の記述を見ると、図 1 の区域分けを算定する際、関東地域と静岡地域は安政東海地震モデル、中京地域と大阪地域は宝永地震モデルを用いたとされている。各震源断層モデルを図 3 に示す。宝永地震モデルに

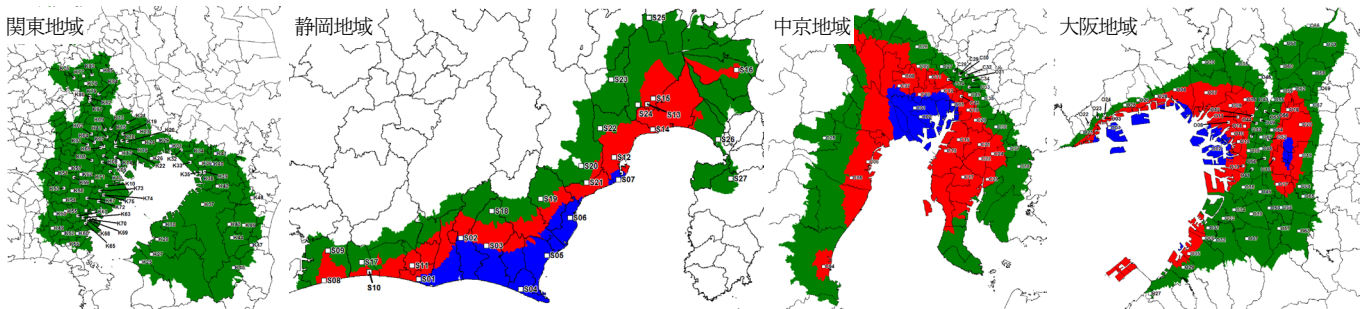


図 2 比較対象とする  $V_e/pSv$  が公開されている地点（データ公開ページ<sup>2)</sup>より引用、加筆）

については、内閣府(2012)<sup>10</sup>の南海トラフ沿いの巨大地震の断層モデルを元に作成されているが、内閣府(2012)<sup>10</sup>のモデルと比べると多少陸域に食い込み範囲が無くなっており、安政東海地震モデルと宝永地震モデルでは駿河湾域の食い込みが大きく異なっているのが特徴である。なお、大川他(2013b)<sup>4</sup>では内閣府(2012)<sup>10</sup>のモデルをそのまま使用しているので、データ公開ページ<sup>2</sup>に掲載されているものとは異なるモデルとなっている(図4、震源断層の構成位置だけではなく、モーメントマグニチュードMwや地震モーメントM0の値も異なる)。

各セグメントのMwとM0については、データ公開ページ<sup>2</sup>の「別紙2付録3」に示されている(表1)。表1ではMwの頭打ちを考慮した値が示されており、カッコ書きで「今回の長周期地震動評価に使用した値」と記載されているが、「別紙1」には「宝永地震モデル(Mw8.9)」と記載されており、整合性が取れていない。破壊伝播速度はデータ公開ページには明記されていないが、前述の大川他(2013a)<sup>3</sup>及び大川他(2013b)<sup>4</sup>では破壊伝播速度2.7km/sで設定されているようである。なお、これらのモデルが公開されてはいるが、これらのモデルは公開波の算定時に使用したモデルであるという書き方がされており、基整促に準拠するためにはこのモデルを使わなければならないという事は書かれていないが、データ公開ページ<sup>2</sup>に記載されている点などを考慮すると、これを用いて策定するのが無難である。以上が基整促波の適用要件のまとめとなる。

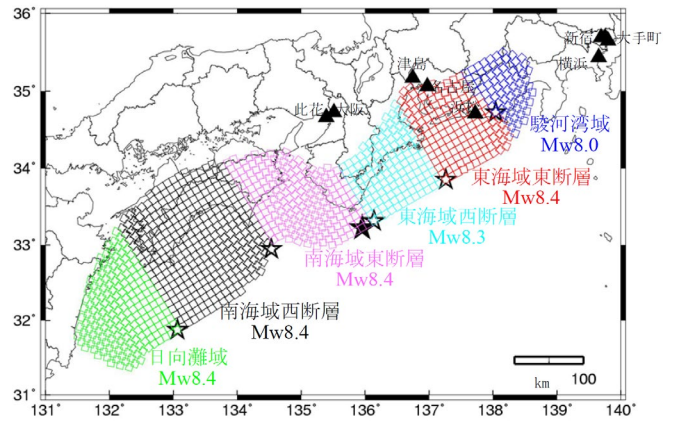


図4 大川他(2013b)<sup>4</sup>に示される宝永地震モデル。★は第一破壊開始点位置を、☆はセグメント破壊開始点位置、▲は大川他(2013b)<sup>4</sup>における計算地点を示す。図3(a)と比べると陸域への食い込みが異なる。

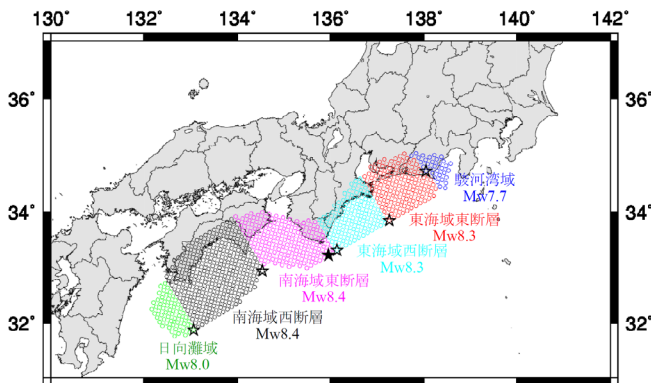
表1 データ公開ページ<sup>2</sup>「別紙2付録3」に示される断層諸元。カッコ内の数値は東北地域太平洋沖地震の検討より定められたMwの頭打ちを考慮した値

(a) 宝永地震モデル

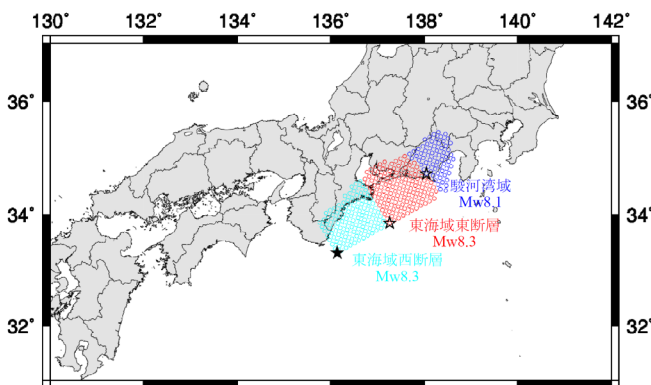
		M0(Nm)	Mw
日向灘域		1.16E+21	8.0
南海域	西断層	1.14E+22(5.0E+21)	8.6(8.4)
	東断層	5.38E+21(5.0E+21)	8.4
東海域	西断層	3.20E+21	8.3
	東断層	3.79E+21	8.3
駿河湾域		5.17E+20	7.7
全体		2.54E+22(1.87E+22)	8.9(8.8)

(b) 安政東海地震モデル

		M0(Nm)	Mw
東海域	西断層	3.44E+21	8.3
	東断層	4.01E+21	8.3
駿河湾域		1.57E+21	8.1
全体		9.02E+21	8.6



(a) 宝永地震モデル (データ公開ページ<sup>2</sup>「別紙2付録3」から引用)



(b) 安政東海地震モデル (データ公開ページ<sup>2</sup>「別紙2付録3」から引用)

図3 データ公開ページ<sup>2</sup>に示される震源断層モデル。★は第一破壊開始点位置を、☆はセグメント破壊開始点位置を示す

### 3. 基整促波③を適用した場合の擬似速度応答スペクトル

基整促波③の対象地域の任意地点(OS1, OS2, CH1, CH2の三重県を除いた領域)について、基整促波①と比べてターゲットスペクトルがどの程度異なるかについて検討を行った。設計実務では都合よく建設サイトの直近に特定地点があるケースは稀であるため、今回は任意地点を対象としている。

計算した地点は、地震調査研究推進本部(2012)<sup>11</sup>の深部地盤モデル(以下、推本地盤モデル)で示されている地点とした。推本地盤モデルは緯度が0.00833度刻み、経度が0.0125度刻みなので、およそ1km刻みということになる。どこがどのエリアに該当するかということについては、図1の地図と、国土交通省HPの町丁目リスト<sup>7</sup>の双方を確認して設定した。具体的な算定手順としては、計算地点の緯度経度から逆ジオコーディングによって字・町丁目を取

得し、エリア対応表と相互比較することで大まかに対象エリアを取得、地図を見ながら抜けている部分を埋めて計算地点を抽出した。町丁目リストとの比較時点で抜けている部分については、単なる表記ゆれによる不一致が大部分であるが、地図と字・町丁目が対応していない、あるいは明らかに範囲内にもかかわらず表に掲載されていない地点がいくつか存在することを確認した。これも踏まえて、双方を参照することは重要である。表にも載っておらず、地図で見ても判断がつかない地点は隣接する大きい方のエリア内であると仮定した。

得られた OS1, OS2, CH1, CH2 内の任意地点（ただし三重県を除く）の各地点について、データ公開ページ<sup>2)</sup>に示される宝永地震型 4 連動 6 セグメントモデル(Mw の頭打ち無しモデルとする)、深部地盤モデルは大川ら(2013b)<sup>4)</sup>では推本地盤モデルと内閣府(2013)<sup>12)</sup>の地盤モデル(以下、内閣府地盤モデル)それぞれで長周期地

震動の算定に必要な回帰係数が公開されているため、推本地盤モデルと内閣府地盤モデル双方について基整促波③の定義に従って SRSS/1.1 のターゲットスペクトルを作成し、その地点の公開波のターゲットスペクトル(以下、基準化スペクトル)と比較した。例えば、計算した地点が CH1 の範囲内の地点であれば CH1 の基準化スペクトルと比較する。各地点について基整促波③/基準化スペクトル(基準化スペクトル比とする)を作成し、基準化スペクトル比の周期を 1~2 秒, 2~3 秒, …, 9~10 秒の 9 区間に分け、その区間の平均値を地図上にプロットした。図 5 に中京地域の推本地盤モデル、図 6 に中京地域の内閣府地盤モデルの場合の結果を、図 7 に大阪地域の推本地盤モデル、図 8 に大阪地域の内閣府地盤モデルの場合の結果を示す。赤色は基準化スペクトル比が 1 を超える領域、青色は 1 を下回る領域となっている。つまりは青色の領域は基整促波③を使うとターゲットスペクトルが小さくなる領域となり、赤色の領域

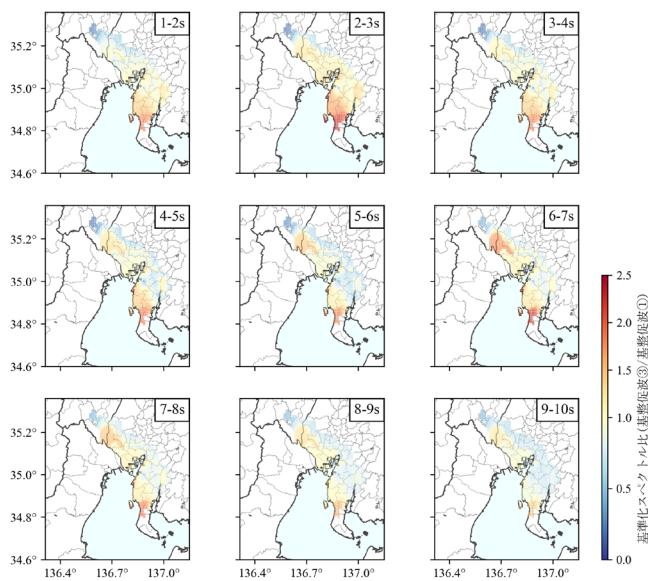


図 5 中京地域の基準化スペクトル比 (推本地盤モデル)

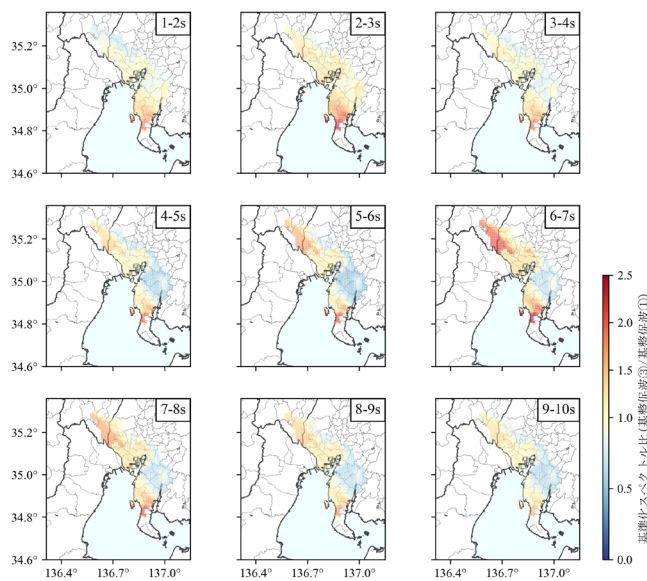


図 6 中京地域の基準化スペクトル比 (内閣府地盤モデル)

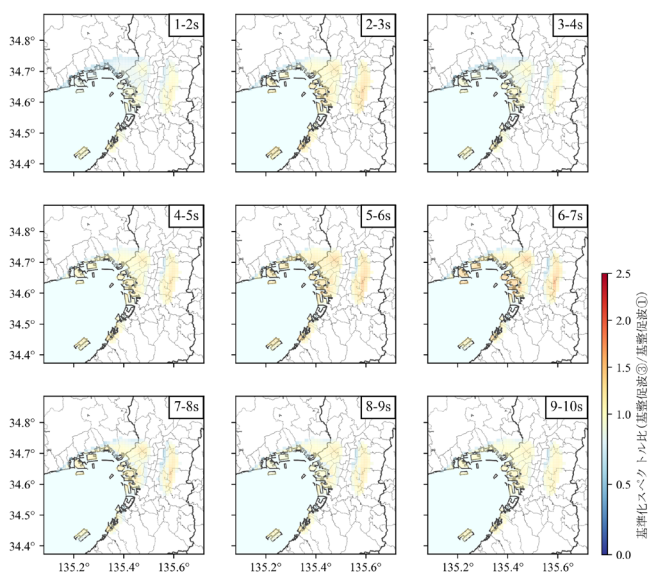


図 7 大阪地域の基準化スペクトル比 (推本地盤モデル)

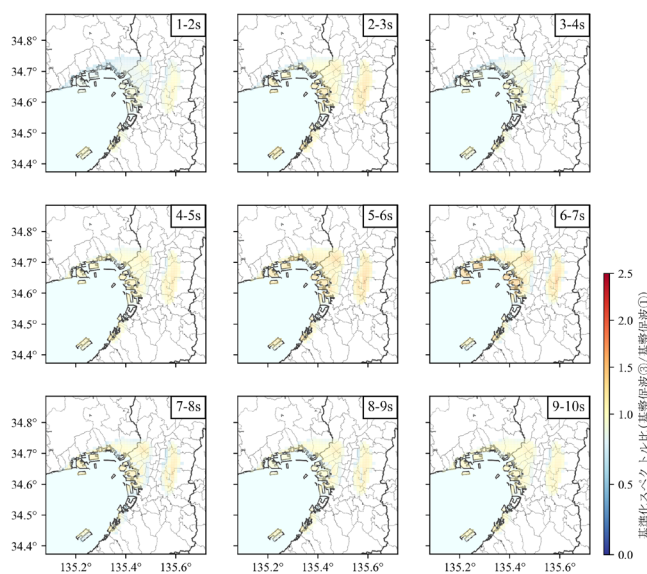


図 8 大阪地域の基準化スペクトル比 (内閣府地盤モデル)

は公開波のスペクトルの方が小さい領域となる。なお、対象とする建物の周期で決まる範囲内において隣接エリアの  $pSv$  及び  $Ve$  を下回る地点では基整促波③とすることは出来ないが、この範囲は対象とする建物の周期によって変わってくるので基整促波③としての適用可否にかかわらず出てきた結果を全てプロットしている。

中京地域については、基本的に CH1 に指定されている領域(名古屋港湾岸部)については、多少赤色と青色が入れ替わったりはするが、ほぼ基準化スペクトル比は 1 に近い値となっており、劇的にスペクトルレベルが変わるわけではなさそうである。一方で、CH2 に指定されている領域については結構場所によって差があり、常滑市南部や武豊町では明らかに基整促波③で算定されるスペクトルが基準化スペクトルを大きく上回っている。公開波の算出スキームでは 3km メッシュで計算してそのスペクトルを 100m メッシュで空間補間して字・町丁目内で一度平均化してから周期 3 秒のみに着目して振り分けたと記載があるので、周期 2-3s、および周期 3-4s の結果は大きく外れることはないはずだが、ここの違いについてはよく分からない。もう一点、周期 6-7s などで岐阜県と愛知県の境目のあたりで赤色と青色の境目がはっきりしている領域があるが、これは単純に CH1 と CH2 が入れ替わる領域である。周期 3-4 秒を見る限りはこの境目は滑らかである。内閣府地盤モデルでもこれらの傾向は同様であるが、岐阜県内における違いはより大きくなる。

大阪地域については、中京地域と異なり、全領域でおおよそ基準化スペクトル比は 1 に近い値となり、OS1 と OS2 の接続部も滑らかである。また、推本地盤モデルと内閣府地盤モデルで傾向がほとんど変わらない結果となった。

#### 4. 基整促波の種類による建物応答特性の違い

選択する基整促波の種類によるスペクトル振幅については一部地域を除けばあまり大きく変わらないことが確認された。ここでは、超高層 RC 造の汎用建物モデルと、2 種地盤及び 3 種地盤相当の 4 種の表層地盤モデルを設定して時刻歴応答解析を実施し、選択する基整促波の種類によって建物応答がどの程度異なるのかを確認する。

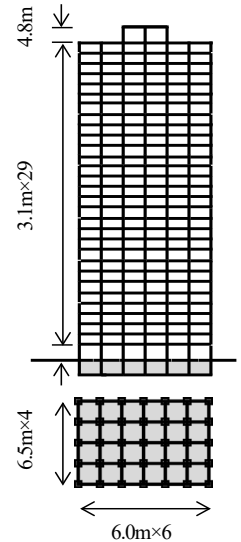
##### 4.1 モデルの設定と入力長周期地震動

###### (1) 建物解析モデル

秋田他(2011)<sup>13)</sup>では、既存超高層 RC 造建築物を対象に 3 つの設計年代(第 1 年代:1971~1989 年, 第 2 年代:1990~1999 年, 第 3 年代:2000 年~)に分類し、構造特性を表す骨組モデルを作成している。本解析ではその中から、第 3 年代における代表的な階数のモデルである 3G30X を対象とする。3G30X の骨組モデルの諸元を表 2 に示す。解析モデルは立体フレームモデルとし、柱には曲げ・せん断・軸変形を、梁には曲げ・せん断変形を考慮する。柱には平面保持の仮定によるファイバーモデルを用いる。梁の曲げ変形には、曲げひび割れ及び曲げ降伏による剛性変化をトリリニア曲線で評価したスケルトンカーブにより弾塑性特性を考慮する。その他、解析モデルの詳細は太田他(2018)<sup>14)</sup>を参照されたい。なお、本建物解析モデルの一次固有周期は 1.94 秒、一次固有周期から塑性化した後の最大の一瞬固有周期(安全限界変形時)の等価周期は 3.30 秒である。

表 2 30 階建 RC 造骨組モデルの諸元

モデル名・方向 <sup>※1</sup>	3G30X
建築物高さ (m)	94.6
階数	30
基準階階高 (m)	3.1
柱芯面積 (m <sup>2</sup> )	936
柱支配面積 (m <sup>2</sup> )	39.0
スパン長 (m)	6
スパン数	6
塔状比	2.63
$F_c$ (N/mm <sup>2</sup> ) <sup>※2</sup>	54
主筋強度 (N/mm <sup>2</sup> ) <sup>※3</sup>	490
平均重量 (kN/m <sup>2</sup> ) <sup>※4</sup>	14.3
$T_1$ (sec)	1.94
$T_{e1}$ (sec) <sup>※5</sup>	3.30
$sC_B$	0.09
$\mu_s$ 値 <sup>※6</sup>	1.43



※1: X 方向は長辺方向  
 ※2: 使用コンクリートの中で設計基準強度  $F_c$  の最大値  
 ※3: 使用主筋の中で最大値  
 ※4: 基準階重量を柱芯面積(バルコニー含まず)で除した値  
 ※5: 安全限界変形時の等価周期  
 ※6: 安全限界変形時に達する基準地震動の入力倍率

###### (2) 対象とする基整促波

前章の検討で大阪地域では基準化スペクトル比の違いが大きくないことが分かったので、基準化スペクトル比の違いが比較的大きい中京地域の CH1 及び CH2 内の領域を対象とする。前項で示した建物モデルの弾性 1 次固有周期から塑性化した後の最大の 1 次固有周期の 1.7 倍の範囲、すなわち周期範囲 1.94 秒から 5.61 秒の範囲内において 2 章で述べた適用条件を満足する、すなわち隣接エリアの基準化スペクトル振幅及び図 2 の中で最も近い地点の  $Ve/pSv$  を上回り、かつその周期範囲内で基準化スペクトル比の平均値が最小となる地点を対象として、基整促波②及び③を作成した。これは、基整促波③を適用した場合に適用範囲内で公開波と最もスペクトル振幅が異なるケースを比較する目的で選定している。なお、基整促波②と③は同地点位置で算定したが、2 章で述べた適用条件が基整促波②と③では異なるため、位相特性生成時の乱数セットは異なるケースで作成した。基準化スペクトル比の平均が最も大きいケースについては、実務設計においては、わざわざ公開波と比べて大きいケースを敢えて選択するという事は考えにくいので、検討対象から外した。あくまで一例ということで算定した具体的な地点についてはここでは示さない。なお、基整促波③の手法では地表面及び解放工学的基盤双方で出力することが可能であるが、公開波や基整促波②では解放工学的基盤で規定された  $pSv$  にフィッティングさせた加速度波形として与えられるため、ここでは条件を揃えて全て解放工学的基盤で算定した。図 9 に今回作成した各基整促波の  $pSv$  を示す。前章の検討で示した通り、適用条件を除外視して算定すると中京地域の基準となる周期 3 秒付近で基準化スペクトル比が 0.5 程度になる地域も存在するが、具体的な建物モデルを設定して基整促波の適用条件を考慮すると、周期 3 秒付近の  $pSv$  はおおよそ同等となる。以降、基整促波①を公開波、推本地盤モデルの基整促波②及び基整促波③を推本②、推本③、内閣府地盤モデルの基整促波②及び基整促波③を内閣府②、内閣府③と呼称する。

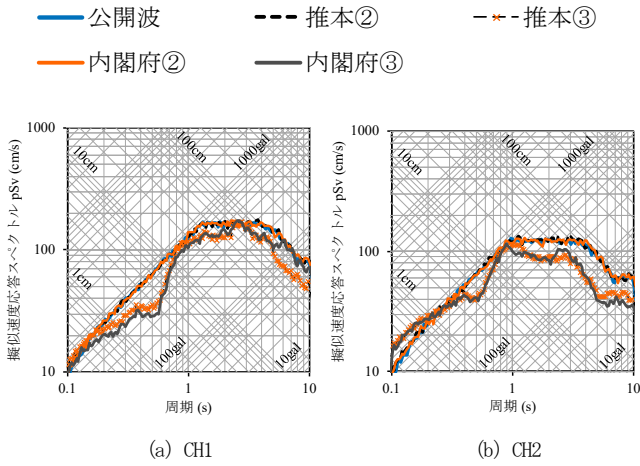


図9 作成した策定方法の異なる基盤促波の解放工学的基盤における pSv

(3) 表層地盤モデル

解法工学的基盤位置で算定した各基盤促波を時刻歴応答解析モデルへの入力波とするため、仮想の表層地盤モデルを設定して地表面波を作成した。仮想の表層地盤モデルは太田他(2018)<sup>14)</sup>に倣って単純な2層地盤モデルを計4種設定し、地表面波の策定は逐次非線形応答解析により策定した。地盤の履歴モデルは修正 R-O モデルとし、そのパラメータは安田らの方法<sup>15)</sup>により策定した。図10に設定した4種の表層地盤モデルのせん断波速度構造を示す。No.1及びNo.2は2種地盤相当、No.3及びNo.4は3種地盤相当である。図11に逐次非線形応答解析によって算定した地表面位置の pSv を示す。中京地域の基準となっている周期3秒に最も近い卓越を持つのは表層地盤 No.4 のモデルである。

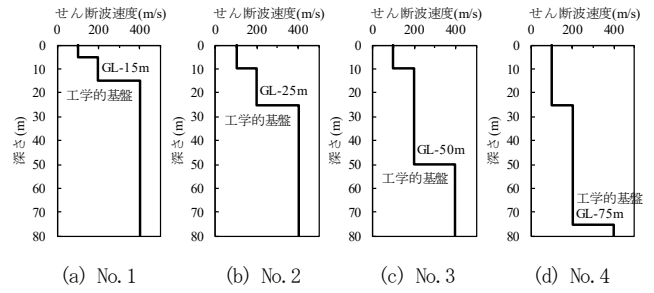


図10 設定した表層地盤の速度構造モデル

4.2 応答解析結果

応答解析により得られた各層の最大応答層間変形角を図12に、各ケースの最大層間変形角を表3に示す。図12には併せて1/100, 1/50, 3/100を目安として赤点線で示している。まず一つ特徴として見られるのは、同じ地点で算定した基盤促波でも、選定する手法によって応答のモード形状が異なるという点である。基盤促波②と基盤促波③では入力波の位相はおおよそ一致し、基盤促波①と基盤促波②では入力波の pSv 振幅はおおよそ一致しているが、これだけの違いがみられる。表層地盤モデルによって傾向は様々だが、必ずしも pSv 振幅が他よりも少し小さいはずの基盤促波③を適用したケースが基盤促波①や②と比べて最大応答層間変形角が小さくなるとは限らないということが分かる。また、同じ表層地盤モデル、同じエリアで見ると、今回選定した地点については、深部地盤モデルは内閣府地盤モデルを適用したケースよりも推本地盤モデルを適用したケースの方が最大応答層間変形角が小さくなるケースが多い。これについては、選定した地点特有の傾向なのか、あるいはこの建物モデル特有の傾向なのか、それとも建物モデルや地点に寄らない普

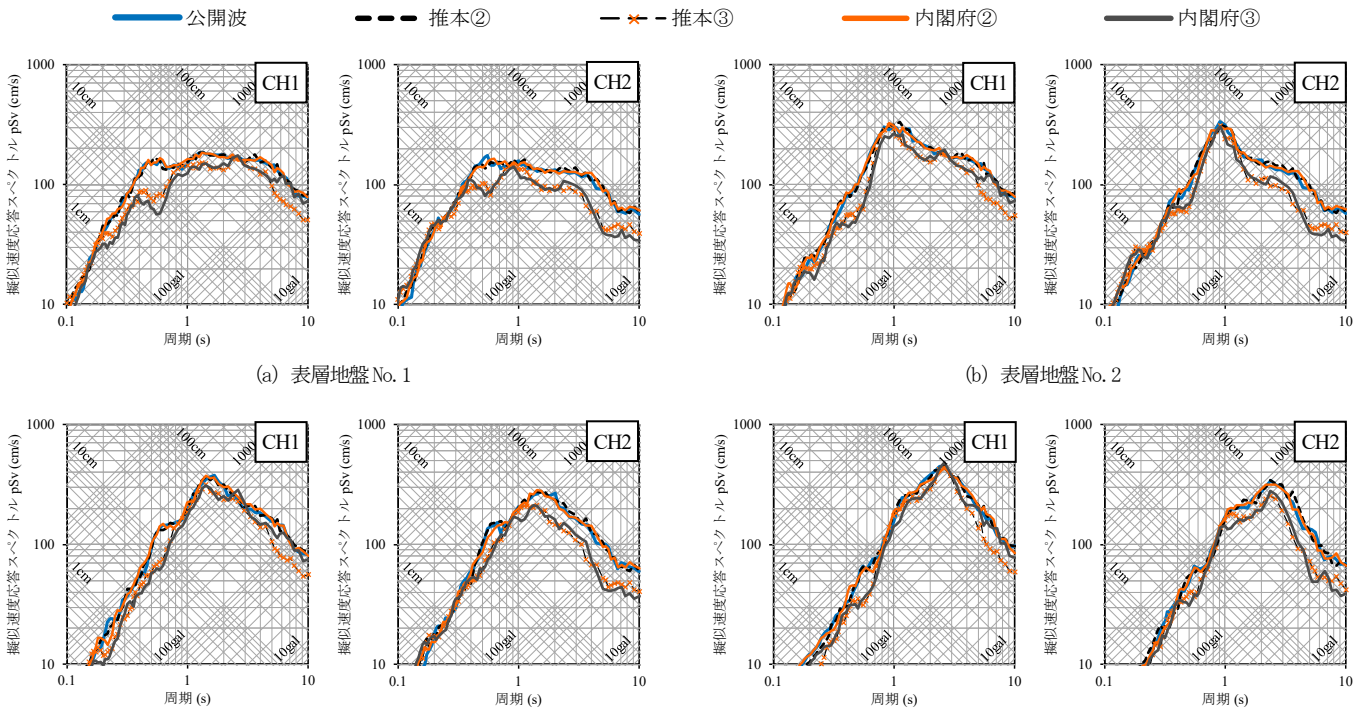


図11 作成した策定方法の異なる基盤促波の地表面位置における pSv

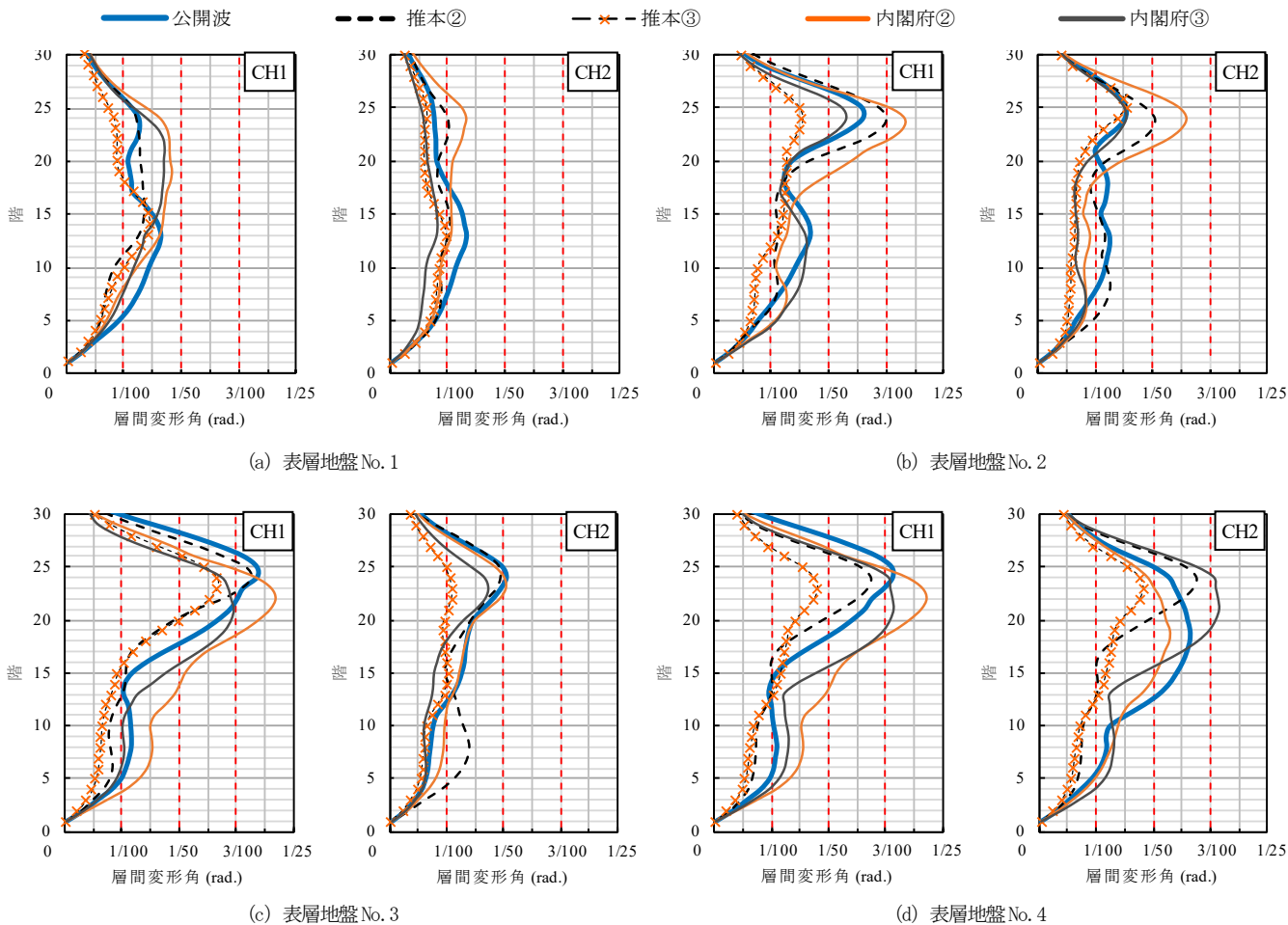


図 12 各ケースで得られた最大応答層間変形角分布

表 3 各ケースで得られた最大層間変形角. 1/50 以上のケースを桃色, 1/50-1/100 のケースを黄色で示す.

エリア	地盤No.1		地盤No.2		地盤No.3		地盤No.4	
	地震動	$R_{max}$ (rad.)	地震動	$R_{max}$ (rad.)	地震動	$R_{max}$ (rad.)	地震動	$R_{max}$ (rad.)
CH1	公開波	1/60	公開波	1/39	公開波	1/30	公開波	1/32
	推本②	1/73	推本②	1/33	推本②	1/31	推本②	1/36
	推本③	1/68	推本③	1/65	推本③	1/37	推本③	1/55
	内閣府②	1/55	内閣府②	1/30	内閣府②	1/27	内閣府②	1/27
	内閣府③	1/59	内閣府③	1/43	内閣府③	1/34	内閣府③	1/32
CH2	公開波	1/75	公開波	1/65	公開波	1/49	公開波	1/38
	推本②	1/76	推本②	1/49	推本②	1/51	推本②	1/36
	推本③	1/122	推本③	1/65	推本③	1/91	推本③	1/55
	内閣府②	1/95	内閣府②	1/39	内閣府②	1/49	内閣府②	1/43
	内閣府③	1/101	内閣府③	1/65	内閣府③	1/58	内閣府③	1/32

偏的な傾向なのかについては更なる検証が必要である。もう一点、この結果から言えることとしては、最もよく使われている公開波については、作成可能な5波の中で考えると必ずしも最も安全側ではないということである。あくまで基整促波が任意の地点における振幅特性と位相特性を策定することが可能である改良経験式手法を根拠として設定されている点を鑑みると、公開波では、CH1 につい

ては名古屋市港区の、CH2 については K-NET 津島(AIC003)地点の位相特性が設定されているため、対象サイトがこの地点から離れている場合については位相特性も振幅特性も公開波のものとは大きく異なることが想定されるので、必要に応じて他の手法も選択してダブルチェックを行う等により安全検討を行うことも視野に入れるべきである。



## 5. まとめ

本稿では、技術的助言<sup>1)</sup>に記載されている基整促波の要件を整理し、基整促波の適用要件に従って策定した計 5 種の基整促波を用いた超高層 RC 造建物モデルを対象とした時刻歴応答解析を実施した。得られた知見を以下に示す。

- 1) 基整促波③を適用した場合と基整促波①を適用した場合の pSv の違いについては、中京地域については深部地盤モデルや策定地点によってやや違いが大きい地点があるが、大阪地域については深部地盤モデルや策定地点による差はあまり大きくない。
- 2) 同じ基整促波ではあるが、策定手法によってターゲットとなるスペクトル振幅や位相特性の考え方が異なるため、建物の応答モードや最大応答層間変形角は大きく異なる。
- 3) 今回設定した 30 階建て RC 造建物モデルについては、深部地盤モデルは推本地盤モデルを使用した場合の方が、内閣府地盤モデルよりも応答が小さくなる傾向が見られた。ただし、これについては、策定地点や建物モデルに依存する可能性があるため、他のモデルや異なる地点で策定した場合について検証が必要である。
- 4) 実務設計で最もよく用いられていると考えられるのが基整促波①であるが、必ずしも安全側になるとは限らないことが示された。対象サイトの位置や表層地盤モデル等によっては他の策定手法とのダブルチェックを実施した方が安全側となる。

### 謝辞

本研究は民間 7 社（㈱安藤・間、㈱熊谷組、佐藤工業㈱、戸田建設㈱、西松建設㈱、㈱フジタ、前田建設工業㈱）による共同研究「極大地震動に対する建物の構造安全性に関する研究その 2」において議論したものの一部である。ここに記して謝意を表す。

### 参考文献

- 1) 国土交通省住宅局 「超高層建築物等における南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動対策について（技術的助言）」、国住指定 1111 号、2016、<http://www.mlit.go.jp/common/001136168.pdf>(参照 2022-07-26)。
- 2) 建築研究所 長周期地震動対策に関わる技術資料・データ公開特設ページ、<https://www.kenken.go.jp/japanese/contents/topics/lpe/index.html>(参照 2022-07-26)。
- 3) 大川出, 佐藤智美, 佐藤俊明, 藤堂正喜, 北村春幸, 鳥居信吾, 辻泰一, 北村佳久 超高層建築物等への長周期地震動の影響に関する検討—長周期地震動作成のための改良経験式の提案と南海トラフ 3 連動地震による超高層・免震建物の応答解析—, 建築研究資料, No.144, 2013.8.
- 4) 大川出, 佐藤智美, 佐藤俊明, 藤堂正喜, 北村春幸, 鳥居信吾, 辻泰一, 北村佳久 超高層建築物等への長周期地震動—南海トラフ 4 連動地震による超高層・免震建物の応答解析—, 建築研究資料, No.147, 2013.9.
- 5) 小阪宏之, 田中良一, 仲野健一, 前川利雄, 畑義雄, 山崎康雄, 石川理人, 久田嘉章 南海トラフを対象とした改良経験式に基づく設計用入力地震動策定における留意点, 日本地震工学会論文集, Vol.20, No.3, p.1559-1569, 2017.11.
- 6) 宮腰淳一, 中田猛, 福和伸夫, 柴田昭彦, 白瀬陽一, 斉藤賢二 名古屋市三の丸地区における耐震改修用の基盤地震動の作成, 日本地震工学会大会梗概集, Vol.3, p.394-395, 2005.1.
- 7) 国土交通省 超高層建築物等における南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動への対策について, [https://www.mlit.go.jp/jutakukentiku/build/jutakukentiku\\_house\\_fr\\_000080.html](https://www.mlit.go.jp/jutakukentiku/build/jutakukentiku_house_fr_000080.html) (参照 2022-07-26)。
- 8) 秋山宏, 北村春幸 エネルギースペクトルと速度応答スペクトルの対応, 日本建築学会構造系論文集, Vol.71, No.608, p.37-43, 2006.10.
- 9) 小穴温子, 北村春幸, 佐藤俊明, 壇一男 長周期長時間地震動を含む強震記録に基づく応答スペクトルとエネルギースペクトルの関係, 日本建築学会構造系論文集, Vol.82, No.740, p.1559-1569, 2017.11.
- 10) 内閣府 南海トラフの巨大地震モデル検討会, 2012, <https://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/model/>(参照 2022-07-26)。
- 11) 地震調査研究推進本部 「長周期地震動予測地図」2012 年試作版, 2012, [https://www.jishin.go.jp/evaluation/seismic\\_hazard\\_map/lpshh/12\\_choshuki/](https://www.jishin.go.jp/evaluation/seismic_hazard_map/lpshh/12_choshuki/)(参照 2022-07-26)。
- 12) 内閣府 首都直下地震モデル検討会, 2013, <https://www.bousai.go.jp/kaigirep/chuobou/senmon/shutochokkajishinmodel/>(参照 2022-07-26)。
- 13) 秋田知芳, 栗本耕太郎, 五百井壮, 和泉信之 既存超高層鉄筋コンクリート造建築物の構造特性と骨組モデル, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.2, p.925-930, 2011.7.
- 14) 太田行孝, 保井美敏, 小山和樹, 釣賀達稀, 和泉信之 南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動を用いた 30 階建鉄筋コンクリート造骨組の被災度評価, 第 15 回日本地震工学シンポジウム, GO05-03-03, 2018.12.
- 15) 安田進, 山口勇 種々の不攪乱土における動的変形特性, 第 20 回土質工学研究発表会, p.539-542, 1985.6.