

## 国土交通省「長周期地震動への対策」における『基整促波』の作成

平成 28 年 6 月 24 日，国土交通省より，「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」<sup>1)</sup>が全国の建築行政機関や指定性能評価機関に対し通知されました（国住指第 1111 号）。当通知（および技術的助言，以下「長周期通知」と記します）は文字どおり，南海トラフ沿いを震源とする巨大地震が発生した場合に，超高層建築物や免震建築物に影響を及ぼすと考えられる長周期地震動への対策が具体的に示されたもので，その体系は『基整促波』とよばれる設計用長周期地震動を基準に，それを用いて建物の安全検証を行うこととされています。

本資料では，基整促波の定義を確認した後，観測データに基づく建設地のサイト特性を生かした基整促波の作成方法を，震源モデルに内閣府(2012)の南海トラフ沿いの巨大地震の断層モデル(Mw9.0)を用いて示します（基整促波が対象とする安政東海地震や宝永地震の震源モデルとは異なる）。そして作成した愛知県津島（AIC003）における地震動の応答スペクトルを既往の文献のものと比較し，妥当性を検証します。

なお波形の作成には『SS21/正弦波合成法による地震波作成プログラム』を主に用います。

### ■ 基整促波とは

長周期通知<sup>1)</sup>の中に，設計用長周期地震動の作成方法として，基整促波および基整促波以外の策定手法が規定されています。

#### 1. 設計用長周期地震動の作成方法

（略）対象地震によって建設地で発生すると想定される長周期地震動は，基整促波又は基整促波の策定手法と同等以上に適切に建設地で発生すると想定される長周期地震動を推定できると認められる策定手法により策定した，少なくとも超高層建築物等の一次固有周期付近の擬似速度応答スペクトル及びエネルギースペクトルが基整促波と同等以上であって，かつ，0.1～10 秒の周期成分を含み，継続時間が 500 秒以上の設計用長周期地震動とされており，具体的な運用は次のとおりとします。

##### (1) 基整促波

基整促波とは，次のいずれかの方法により策定した波形をいうものとします。

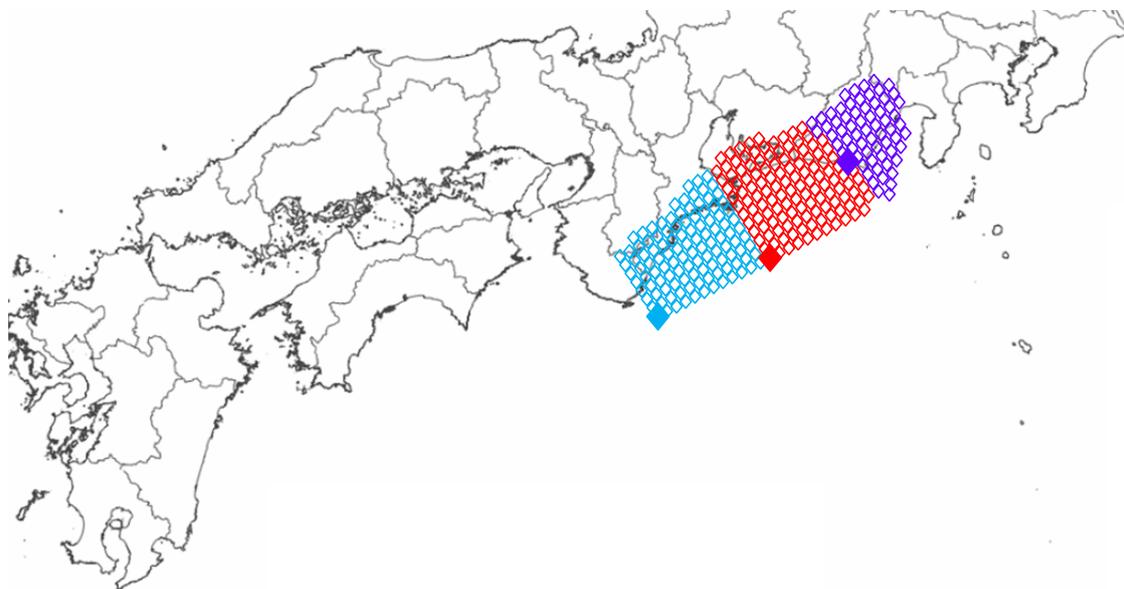
- ① 長周期通知別紙に示す 10 区域ごとに示した加速度波形及び速度波形
- ② 長周期通知別紙に示す 10 区域ごとに示した擬似速度応答スペクトルをもとに，基整促波の方法により，適切に位相を設定して算定した加速度波形及び速度波形
- ③ 各地点の観測データをもとに，基整促波の方法により，二乗和平方根法（SRSS 法）により算出した擬似速度応答スペクトルを 1.1 で除して平均的な擬似速度応答スペクトルを求めたうえで，適切に位相を設定して算定した加速度波形及び速度波形

##### (2) 基整促波以外の策定方法

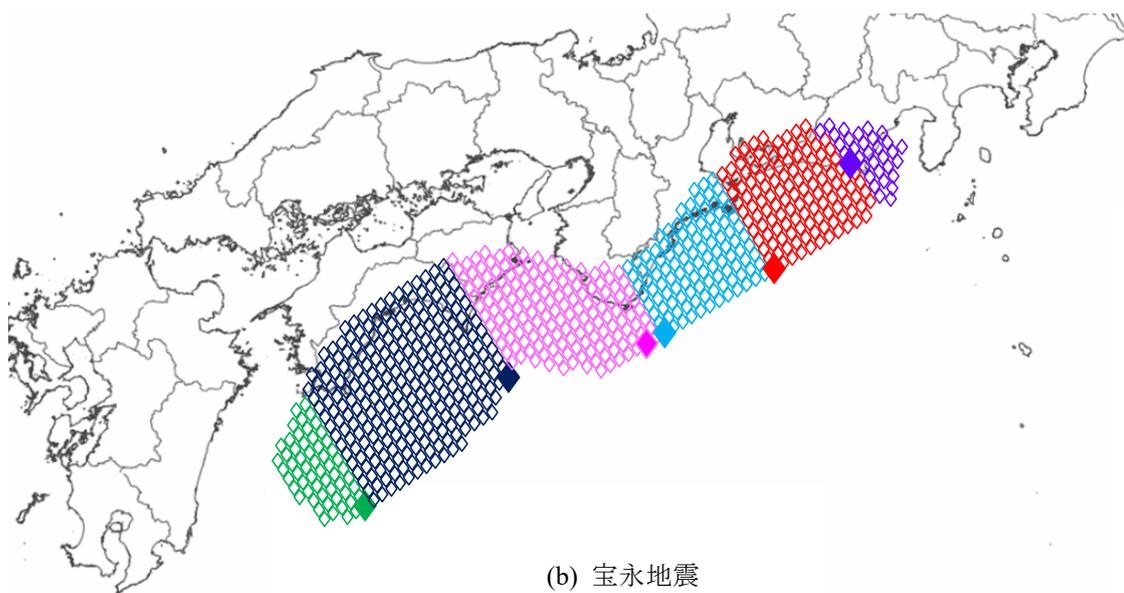
基整促波以外の方法の場合，原則として，次の①～④の全てに該当する場合，基整促波と同等以上のものとして，今般の長周期地震動対策に用いることができるものとします。

- ① 当該方法が，一般社団法人日本建築学会の指針や政府の報告書等において認められたものであること
- ② 当該方法の計算過程において，位相の選択等にあたり，恣意的な操作が行われていないこと
- ③ 超高層建築物等の一次固有周期付近の擬似速度応答スペクトル及びエネルギースペクトルが，(1)の①から③までのいずれかの基整促波と同等以上であること
- ④ 0.1～10 秒の周期成分を含み，継続時間が 500 秒以上の加速度波形及び速度波形であること

基整促波が対象としている安政東海地震と宝永地震の震源モデル<sup>1)</sup>を図1および表1に示します。



(a) 安政東海地震（白地図は国土地理院地図閲覧サービスより。以下同様）



(b) 宝永地震

図1 基整促波が対象としている地震の震源域

表1 基整促波が対象としている地震の震源パラメータ

	安政東海地震		宝永地震	
	Mw	Mo (Nm)	Mw	Mo (Nm)
日向灘域	—	—	8.0	1.16E+21
南海域 西側	—	—	8.4	5.00E+21
南海域 東側	—	—	8.4	5.00E+21
東海域 西側	8.3	3.44E+21	8.3	3.20E+21
東海域 東側	8.3	4.01E+21	8.3	3.79E+21
駿河湾域	8.1	1.57E+21	7.7	5.17E+20
全体	8.6	9.02E+21	8.8	1.87E+22

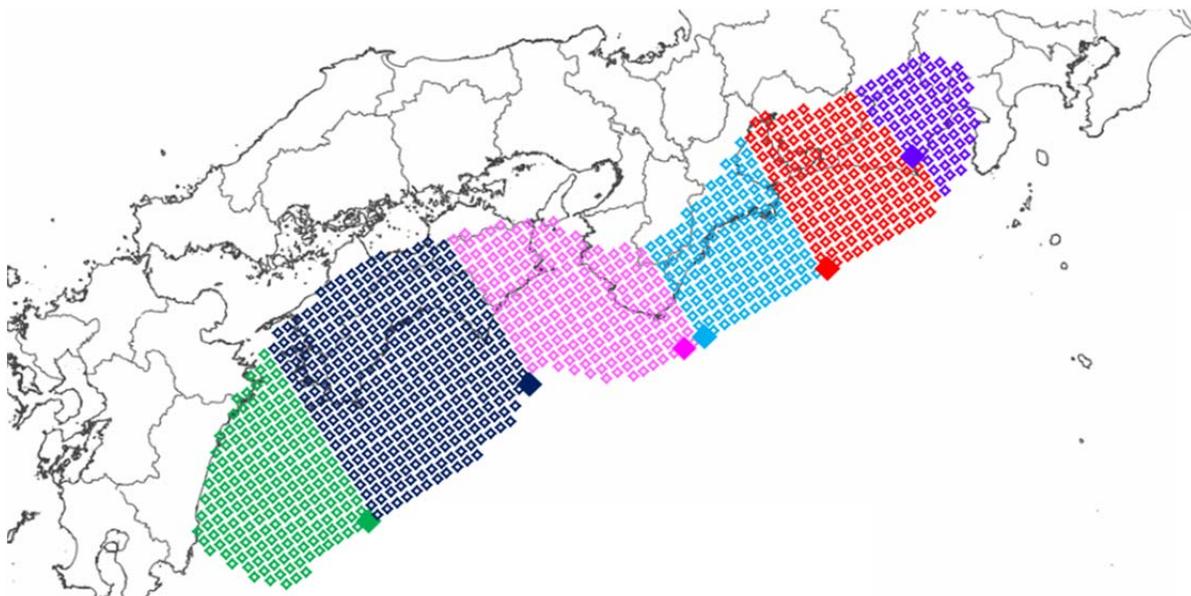
## ■ 基整促波の作成方法（計算例）

前述のとおり基整促波とよばれる設計用長周期地震動とは（1）の①②③のいずれかとされていますが、①と②は公開されている波形または公開されている応答スペクトルに適合する波形であり、本質的に同じ特性を有するものと言えます（①の波形は②の応答スペクトルを目標に作成されている）。

ここでは（1）の③に規定された基整促波を取り上げ、内閣府（2012）の南海トラフ沿いの巨大地震の断層モデル（Mw9.0）に対する愛知県津島（AIC003）における設計用長周期地震動の作成手順を示します。

### 1. 基整促波の方法（「観測データに基づく設計用長周期地震動の作成について」<sup>1</sup>の別紙<sup>2</sup>）に準じて各震源断層からの建設サイトにおける擬似速度応答スペクトルを計算する

内閣府（2012）の南海トラフ沿いの巨大地震の断層モデル（Mw9.0）は、日向灘域、南海域、東海域、駿河湾域の4連動地震を引き起こすものとして、図2に示すような6セグメントモデルおよび各諸元が示されており<sup>2</sup>、今回の計算に用いたモデルとなります。



(a) 4連動6セグメント震源モデル

	$M_0$ [dyne · cm]	$M_w$	破壊時間差 [s]	参考文献	参考文献中での $M_0$ と $M_w$
日向灘域	$4.3 \times 10^{28}$	8.4	114.7	内閣府(2012)	同じ
南海域 西断層	$5.0 \times 10^{28}$	8.4	50.3	内閣府(2012)	$1.26 \times 10^{29}$ (Mw8.7)
南海域 東断層	$5.0 \times 10^{28}$	8.4	0.0	内閣府(2012)	$7.77 \times 10^{28}$ (Mw8.5)
東海域 西断層	$3.97 \times 10^{28}$	8.3	7.4	内閣府(2012)	同じ
東海域 東断層	$4.31 \times 10^{28}$	8.4	51.8	内閣府(2012)	同じ
駿河湾域	$1.2 \times 10^{28}$	8.0	94.4	内閣府(2012)	同じ
全体	$2.77 \times 10^{29}$	8.9		内閣府(2012)	$3.4 \times 10^{29}$ (Mw9.0)

(b) 内閣府（2012）に基づく4連動6セグメント（Mw9.0）モデル

図2 建築研究資料 No.147<sup>2</sup>)に示されている南海トラフ巨大地震の震源モデル

一方、建設サイトを愛知県津島（AIC003）とし、その緯度経度（35.1770, 136.7412）より求まる各セグメントの断層最短距離  $R$  とモーメントマグニチュード  $M_w$ 、および観測データに基づく全国共通の係数やサイト係数などを適切に選択することで、6つの震源断層による長周期地震動の加速度応答スペクトルがそれぞれ求まり、円振動数 $\omega$ で除して擬似速度応答スペクトルを得ます。

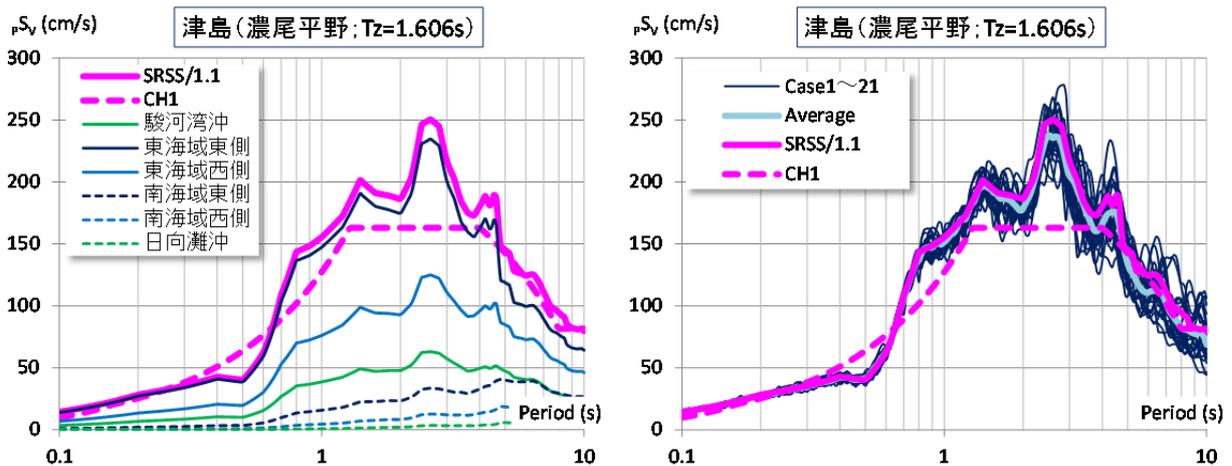
本計算では、愛知県津島（AIC003）を含む1kmメッシュの3次元速度構造モデルから求まる地震基盤上面から工学的基盤上面までの堆積層伝播時間  $T_z=1.606$  秒とそれを濃尾平野に適用してサイト係数を設定することとし、『SS21/正弦波合成法による地震波作成プログラム』より各セグメントによる擬似速度応答スペクトルを求めます。それぞれの結果を図3(a)に示します。

## 2. 各セグメントによる擬似速度応答スペクトルの二乗和平方根（SRSS） $\div 1.1$ を計算し、基整促波の目標応答スペクトルとして策定する

長周期通知に従い、前作業で得られた各セグメントによる擬似速度応答スペクトルの二乗和平方根（SRSS）を1.1で除し、これらの平均的なものとして基整促波の目標応答スペクトルとします。

各セグメントによる擬似速度応答スペクトルは『SS21/正弦波合成法による地震波作成プログラム』より計算値が出力されます。本結果を図3(a)に示します。

また図3(b)には、後述の手順3で作成する21ケースの長周期地震動の擬似速度応答スペクトルの平均も合わせて示しています。SRSS $\div 1.1$ は21ケースの平均にほぼ対応していることがわかります（文献<sup>2)</sup>においても同様の結果が示されています）。



(a) 各セグメントによる擬似速度応答スペクトルとそれらのSRSS $\div 1.1$ 、およびCH1  
 (b) 21ケース作成した長周期地震動のそれぞれの擬似速度応答スペクトルとそれらの平均、および(a)のSRSS $\div 1.1$ とCH1

図3 各セグメントによる擬似速度応答スペクトルとそれらのSRSS $\div 1.1$  など

CH1は長周期通知による愛知県津島が含まれる区域の平均として示された基整促波の応答スペクトルで前述の(1)の②によるもの、また  $T_z=1.606$ s は3次元速度構造モデルから求まる堆積層伝播時間である。なお、応答スペクトルは工学的基盤でのものである

### 3. 各セグメントからの長周期地震動を作成し、これらの破壊時間差を考慮して合成する 4 連動長周期地震動を、位相スペクトル生成時に異なる乱数を与えて 21 ケース作成する

愛知県津島 (AIC003) の緯度経度より求まる各セグメントの震源距離  $X$  と地震モーメント  $M_0$  および諸係数より、長周期通知別紙が示す方法で群遅延時間の平均値と標準偏差が計算でき、これにある正規乱数を与えることで位相スペクトルが得られます。各セグメントの目標応答スペクトル (手順 1 で得た) と位相スペクトルから長周期地震動が正弦波合成法により計算できます。

続けて、各セグメントの破壊時間差を考慮して合成する (足し合わせる) ことで 4 連動長周期地震動を得ることができます。ここで各セグメントの破壊時間差は図 2 に示した文献<sup>2)</sup>が参考になります。

しかし、元々ある乱数パターンで作成されたものであることに加えて、このように単純に各セグメントからの長周期地震動を合成した波形には、振幅が干渉することによるばらつきが大きく含まれています。前述の長周期通知 (1) の③においても「適切に位相を設定」することを規定しており、その具体的方法として長周期通知別紙<sup>1)</sup>に以下の記述があります。

#### (2) 作成時刻歴のばらつきの考慮

(略) そのようなケースに対処する方法として、巨大地震に対応する地震動を複数作成し、それらの平均的なスペクトル特性を求め、時刻歴の作成において、位相はこれらの作成波形の中から平均的な最大速度振幅をもたらす位相特性を用いることとしている。(参考文献においては、具体的には 21 サンプル波形の平均スペクトルと、最大速度が中央値をとるケースの位相を用いた波形を再計算に用いている。)

本計算例においても、「適切」な位相スペクトルを策定するために (平均的な応答スペクトルは手順 2. で策定済み)、群遅延時間から位相スペクトルを生成するときを与える正規乱数を不規則に与えた 21 ケースの 4 連動長周期地震動を作成することとします。

これらは 21 ケースの乱数パターンを与えて計算することで得られますが、ここでは各セグメントからの長周期地震動を合成する際、単純に足し合わせた結果と隣り合うセグメントによる地震動波形の符号を入れ替えて足し合わせた結果の差異もばらつきのひとつと考え、11 ケースの乱数パターンを与えることで計 21 ケース (1~10 ケースは 2 種類の足し合わせを行い、11 ケース目は単純和のみ) の 4 連動長周期地震動を作成することとします。2 種類の足し合わせを併用した波形合成も『SS21/正弦波合成法による地震波作成プログラム』で計算します。結果の一部を図 4 に示します。

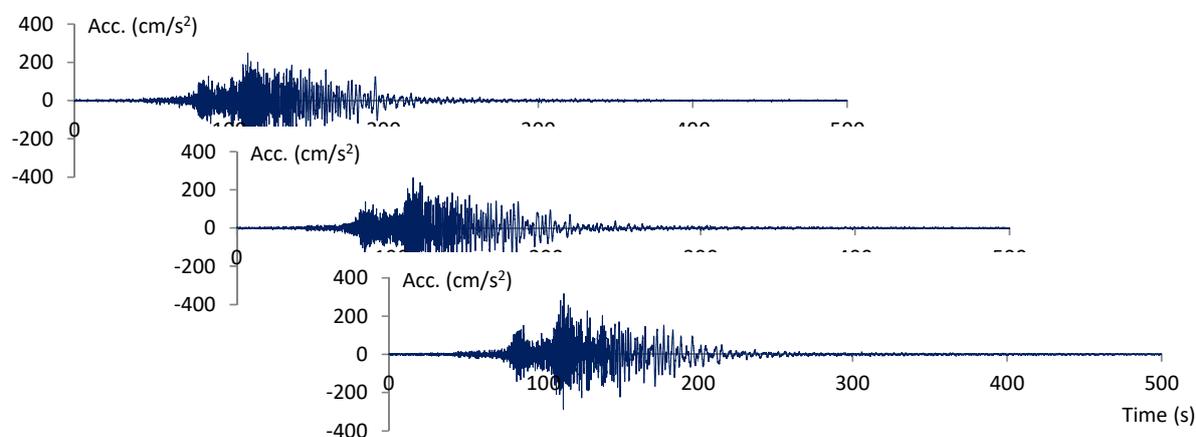


図 4 4 連動長周期地震動の加速度波形 (21 ケースのうち 1~3 ケース)

#### 4. 基整促波の位相を与える波形として、21 ケースのうち最大速度振幅が中央値を示すケースの加速度波形を選択する

まず、手順 3 で求めた 21 ケースの 4 連動長周期地震動の加速度波形を速度波形に積分します。今の場合、正弦波合成法で計算された加速度波形の基線は 0 になっているため、積分には簡便な台形公式を用いることができます。求めた 4 連動長周期地震動の速度波形の一部を図 5 に示します。

次に、21 ケースの 4 連動長周期地震動の最大速度が中央値（すなわち 11 番目）を示すケースを調べます。今回の計算での各ケースの最大速度とその順位を表 2 に示します。その結果、計算された 21 ケースの 4 連動長周期地震動のうち、最大速度が中央値を示すのは 4 ケース目の地震動（図 6）であることがわかりました。

したがって、基整促波の位相を与える波形には 4 ケース目の加速度波形を選択することになります。

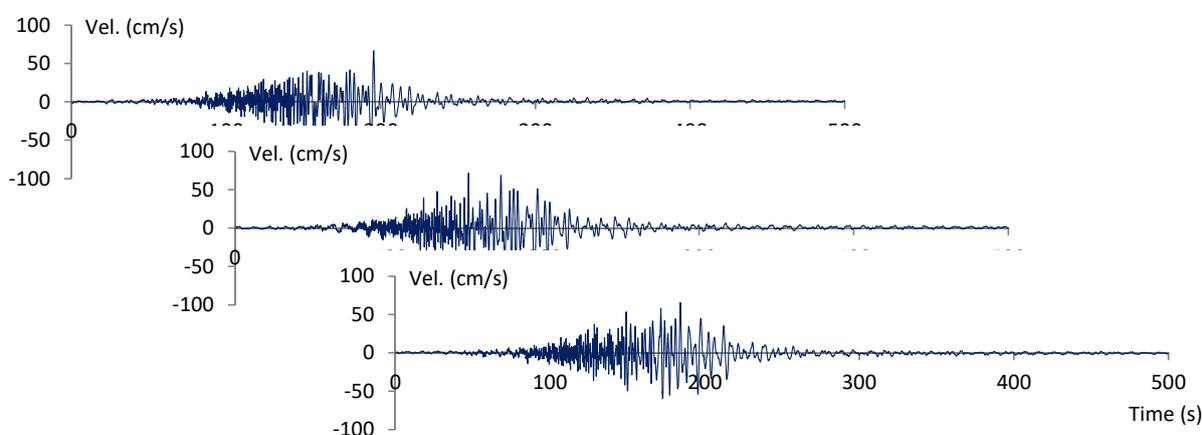


図 5 4 連動長周期地震動の速度波形（21 ケースのうち 1～3 ケース）

表 2 21 ケースの最大速度と順位

ケース番号	最大速度 (cm/s)	順位		ケース番号	最大速度 (cm/s)	順位		ケース番号	最大速度 (cm/s)	順位
1	66.85	5		8	65.12	9		15	67.00	4
2	71.63	3		9	60.39	13		16	52.51	19
3	65.71	8		10	52.54	18		17	60.10	14
4	63.82	11	←	11	52.48	20		18	57.44	16
5	82.76	1		12	66.24	7		19	66.45	6
6	59.76	15		13	55.33	17		20	51.92	21
7	61.46	12		14	64.70	10		21	73.43	2

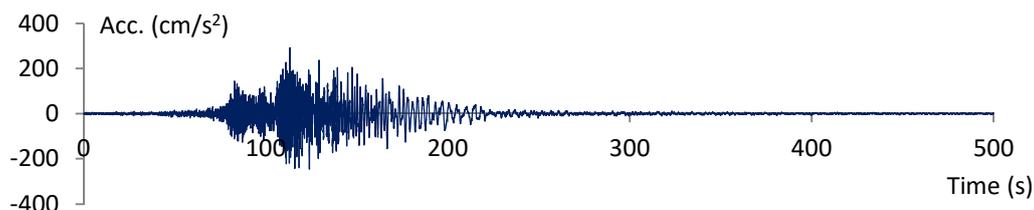


図 6 基整促波の位相を与える加速度波形（Case4）

## 5. 目標応答スペクトルと位相を与える波形を設定し、正弦波合成法により基整促波を計算する

手順2で策定した基整促波の目標応答スペクトルと手順4で選択した位相を与える加速度波形より、正弦波合成法によって、内閣府（2012）の南海トラフ沿いの巨大地震の断層モデル（Mw9.0）に対する愛知県津島（AIC003）における基整促波を計算します。

本地震動の計算にも『SS21/正弦波合成法による地震波作成プログラム』を用います。

計算結果として基整促波を図7に、応答スペクトルを図8に、波形合成の適合度を表3に示します。

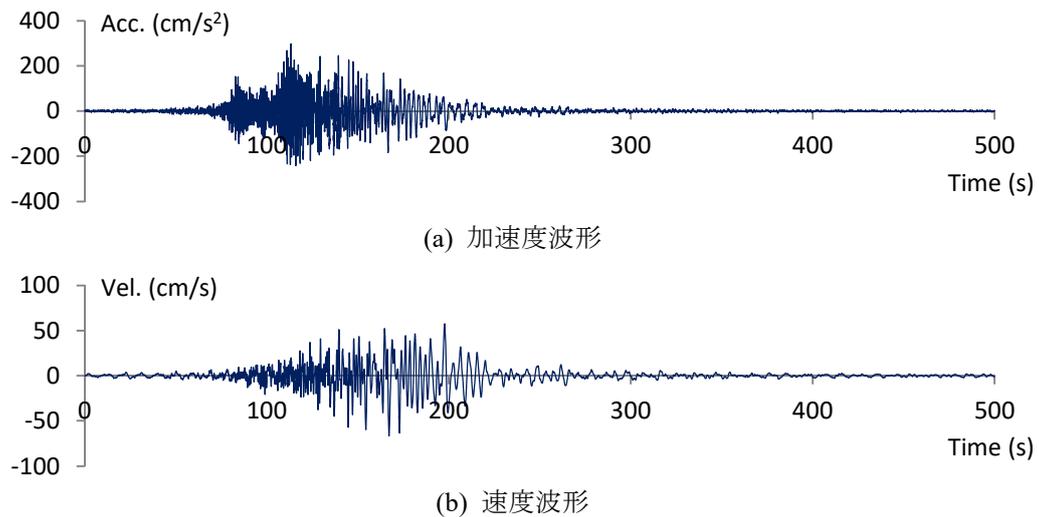


図7 愛知県津島（AIC003）における基整促波

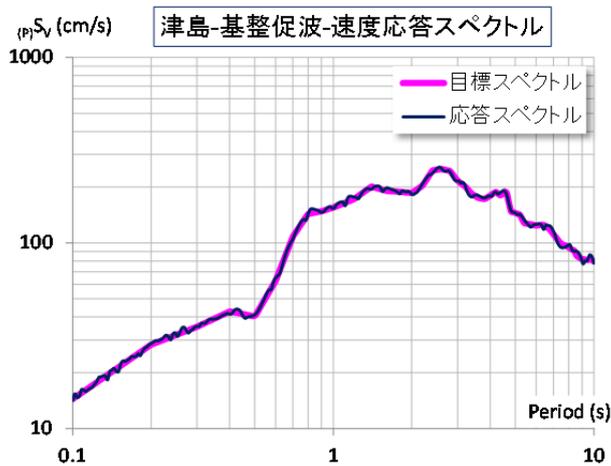


図8 速度応答スペクトル（目標スペクトルと応答スペクトル）

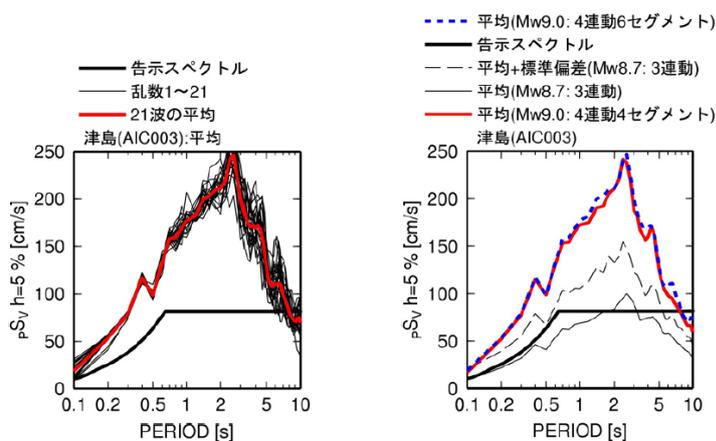
表3 基整促波の正弦波合成時の適合値と判定（判定値は文献<sup>3)</sup>による）

適合判定項目	適合値	判定値（判定）
最小スペクトル比 $\varepsilon_{\min}$	0.9384	$\geq 0.85$ (OK)
スペクトル強度比 $SI_{\text{ratio}}$	1.0037	$\geq 1.00$ (OK)
変動係数 $v$	0.0258	$\leq 0.05$ (OK)
平均値の誤差 $ 1-\varepsilon_{\text{ave}} $	0.0051	$\leq 0.02$ (OK)

## ■作成した基整促波の検証（既往文献との結果比較）

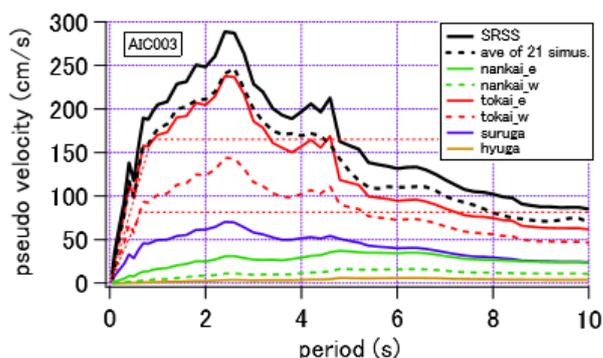
図9は、文献<sup>2)</sup>における内閣府（2012）の南海トラフ沿いの巨大地震の断層モデル（Mw9.0）に対する愛知県津島（AIC003）での擬似速度応答スペクトルによる検討結果です。

図9(a)左図の、乱数パターン異なる21ケースの4連動長周期地震動による擬似速度応答スペクトルとその平均は、図3(b)で示した本計算結果とよく一致していることがわかります。また、図9(b)は各セグメントによる擬似速度応答スペクトルおよびその平均とSRSS(1.1で除していない)が示され、文献<sup>2)</sup>ではSRSSは平均をやや過大評価すると述べられています。図3(b)ではSRSS÷1.1がほぼ平均に対応していることを確認しており、図9(b)も本計算結果の図3(a)によく一致していることがわかります。以上より、本基整促波の計算（作成）方法は妥当であるものと判断できます。



(a) 21波とその平均(4連動6セグメントモデル) (b) 異なる震源モデルの比較

(a) 津島（AIC003）での4連動6セグメントモデル（Mw9.0）の21波とその平均波など



(b) 4連動6セグメントモデルによる擬似速度応答スペクトルと各セグメントからの擬似速度応答スペクトルとそのSRSS

図9 建築研究資料 No.147 での津島（AIC003）の応答スペクトルによる検討

### 参考文献

- 1) 国土交通省住宅局建築指導課：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、国住指第1111号ほか、2016.6
- 2) 大川出，佐藤智美，佐藤俊明，藤堂正喜，北村春幸，鳥井信吾，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－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－，建築研究所 建築研究資料 No.147，2013.9
- 3) 国土交通省住宅局建築指導課ほか：2001年版限界耐力計算法の計算例とその解説，工学図書，2001.3