

# 論文 長周期成分の周期帯がかさ上げされた模擬地震動に対する RC 造超高層建築物の応答性状

御木 敦司\*1・田中 修平\*1・斉藤 大樹\*2

**要旨**：南海トラフ巨大地震対策として、長周期地震動に対する超高層建築物の安全性の検討が必要とされている。RC 造超高層建築物を対象とした既往の研究から、大変形時の安全性の解析的検討には、梁部材の復元力特性にスラブ効果やスリップ挙動を適切に考慮する必要があることが指摘されている。本研究では、告示スペクトルの長周期成分の周期帯をかさ上げた模擬地震動を作成し、階数の異なる 4 棟の RC 造超高層建築物の地震応答解析から、かさ上げされた長周期成分が建物の応答性状に与える影響を考察する。

**キーワード**：長周期地震動, 地震応答解析, RC 造超高層建築物

## 1. はじめに

2011 年に発生した東北地方太平洋沖地震では、震源から遠く離れた都市圏の超高層建築物において、長周期地震動による大振幅の揺れが観測された。現在問題とされている南海トラフ巨大地震では、さらに大きなエネルギーを持つ長周期地震動が超高層建築物に作用し、塑性化を伴う大振幅の揺れが繰り返し発生することが懸念される。しかし、そうした荷重条件における超高層建築物の限界性能は未解明の部分が多い。そこで、長周期地震動に対する RC 造超高層建築物の安全性を検討するため、平成 24 年に E ディフェンスを用いた縮小 20 層 RC 造建物試験体の震動台実験が行われた<sup>1)</sup>。実験では、東北地方太平洋沖地震の観測波と南海トラフ連動型地震の想定波を入力し、概ね終局耐力に達するまでの加振が行われている。筆者らは、独自に開発した立体骨組の地震応答プログラム STERA\_3D<sup>2)</sup>を用いて振動台実験のシミュレーション解析を行い、大変形時の挙動の再現には、梁の曲げ剛性や耐力に影響を及ぼすスラブ効果や、梁部材の荷重・変形関係に見られる逆 S 字型のスリップの履歴形状を適切に考慮する必要があることを明らかにした<sup>3)</sup>。

平成 27 年 12 月には、国土交通省から「南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動に関する報告<sup>4)</sup>」が公表された。その中では、超高層建築物や免震建築物の耐震設計に、長周期地震動を考慮した設計用地震動による構造計算を求めている。さらに、既存の超高層建築物や免震建築物についても、長周期地震動に対する安全性の再検証と必要な補強を要請している。対策試案では、考慮すべき長周期地震動として、告示波の擬似速度応答スペクトルの長周期成分をかさ上げた水準が示されている。一般に長周期地震動は、その地域の堆積層の厚さに応じて特定の周期成分が卓越することが知られている。国土交通省の試案では、かさ上げする周期帯が比較的広

く設定されているが、かさ上げする周期帯と建築物の固有周期の関係により、応答が増大することが予想される。

そこで、本研究では、告示スペクトルを基本とし、かさ上げする周期帯を変更した模擬地震動を作成し、階数の異なる 4 棟の RC 造超高層建物モデルについて地震応答解析を行うことで、かさ上げされた長周期成分が建物の応答性状に与える影響を考察する。

## 2. 解析モデルの概要

### 2.1 建物概要

本研究では、参考文献<sup>5)6)</sup>を参考にして階数の異なる 4 棟の RC 造超高層建物モデルを作成した。各部材断面は、靱性保証型設計指針<sup>7)</sup>に準拠したものとしており、現在の RC 造超高層建築物で採用されているクライテリアを満足する断面が設定されている。各モデルの伏図及び軸組図を図-1 に示す。また、建物の諸元を表-1 に示す。

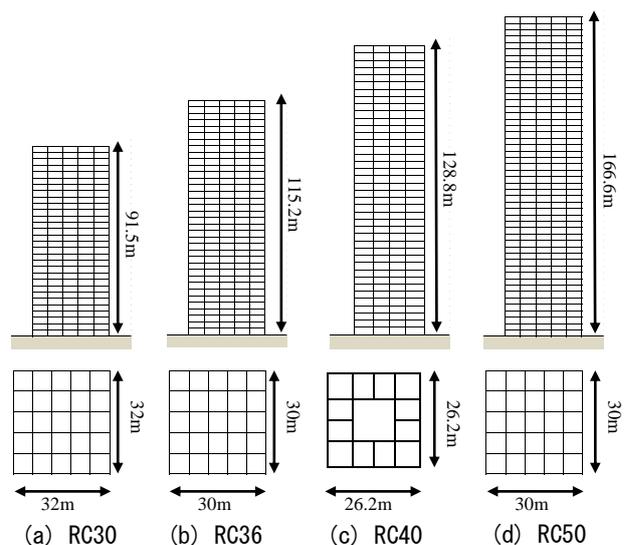


図-1 伏図及び軸組図

\*1 豊橋技術科学大学 建築・都市システム学系 修士 (学生会員)

\*2 豊橋技術科学大学 建築・都市システム学系 教授 博士 (工学) (正会員)

## 2.2 解析モデル

時刻歴応答解析には、筆者らが開発した地震応答解析プログラム STERA\_3D<sup>2)</sup>を用いた。1F 柱脚は固定とし、全層に剛床仮定を適用し、パネルゾーンの剛域の長さはフェースから柱せいの 1/4 だけ中に入った位置で設定した。柱部材は、軸力と曲げの非線形相互作用を考慮するため、両材端の断面に 5 つの非線形バネを有する MS モデル(Mult-Spring Model)を使用した。梁部材は、両材端に弾塑性曲げバネ及び部材中央に水平 2 方向の弾塑性せん断バネを有する部材モデルを使用した。層質量は、各節点に同等に分布させた。なお、地震応答解析は、外側 1 構面を対象とし、その固有周期は立体骨組モデルと一致させた。減衰定数は、1 次モードに対し、3%とし、粘性減衰マトリクスは、瞬間剛性比例型とした。表-2 に建物モデルの固有周期を示す。

## 2.3 梁部材の復元力特性

梁部材の曲げに対する復元力特性には、図-2 に示すような正負非対称の剛性劣化 4 折れ線モデルを用いた。この復元力特性は、 $k_y$  : 降伏時剛性、 $k_r$  : 除荷時戻り剛性、 $k_s$  : スリップ剛性、 $k_p$  : 降伏後剛性からなり、式(1)に示すように  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\eta$  の 3 つのパラメータにより形状をコントロールする。

$$k_r = \left( \frac{M_y}{R_y} \right) \left| \frac{R_y}{R_m} \right|^\alpha \quad k_s = \left( \frac{M_y}{R_m - R_y} \right) \left| \frac{R_y}{R_m} \right|^\beta \quad k_p = \eta \cdot \left( \frac{M_y}{R_y} \right) \quad (1)$$

また、復元力特性の降伏曲げモーメントは平面保持を仮定した略算式を用い、降伏点剛性低下率には、菅野式を用いた。スラブ引張側の降伏曲げモーメント  $M_y$  の値はスラブ寄与率  $\eta_s$  によって変化するものとし、曲げ耐力を算出する際の有効スラブ幅  $S$  はスパン長  $L$  に  $\eta_s$  を乗ずることによって算出した。すなわち、 $\eta_s=0.5$  とした時は、スラブ全幅を考慮した状態となる。

本研究では、スリップ剛性やスラブ寄与率を設計に使用されている標準的な数値 ( $\alpha=0.5$ 、 $\beta=0.0$ 、 $\eta=0.01$ 、 $\eta_s=0.1$ ) に設定したモデルを標準モデルと呼ぶ。また、参考文献<sup>3)</sup>より、E ディフェンスを用いた縮小 20 層 RC 造建物試験体の震動実験で得られた履歴ループに形状が適合するように値を設定したモデル ( $\alpha=0.3$ 、 $\beta=0.8$ 、 $\eta=0.05$ 、 $\eta_s=0.5$ ) を改良モデルと呼ぶ。標準モデルと改良モデルの力-変形関係のループの比較を図-3 に示す。

## 3. 入力地震動

### 3.1 模擬地震動の作成方法

模擬地震動の作成方法は、参考文献<sup>5),8)</sup>に従い、位相特性には、ランダム位相と東海東南海地震動の名古屋 3 の丸波 EW 成分(略称 C-SAN-EW)の位相を用いた。要素

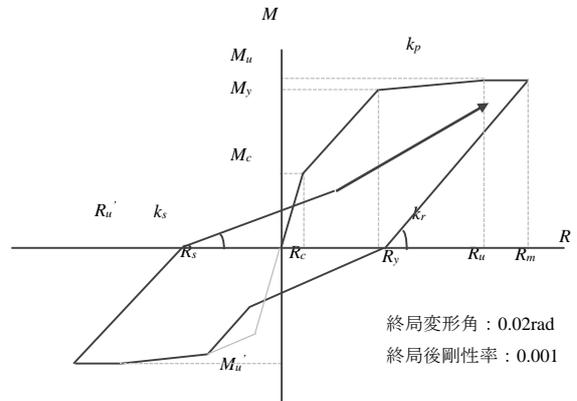
波形のスペクトルには告示スペクトルと長周期成分のみを模擬したスペクトルを用い、合成波形のスペクトルには告示スペクトルに長周期成分を付加したスペクトルを用いた。以下に作成手順を示す。

表-1 解析対象建物諸元

モデル名	RC30	RC36	RC40	RC50
建物高さ(m)	91.5	114.7	128.8	166.6
平面プラン	5×5スパン	5×5スパン	4×4スパン	5×5スパン
	32m×32m	30m×30m	26.2m×26.2m	30m×30m
スラブ厚	150mm			
スラブ筋	SD395(D13), ダブル配筋 ピッチ200mm			

表-2 建物モデルの初期固有周期

固有周期(s)	RC30	RC36	RC40	RC50
1次モード <sup>*</sup>	1.720	2.006	2.722	3.253
2次モード <sup>*</sup>	0.577	0.680	0.871	0.958



$M_y$ : 降伏荷重	$R_y$ : 降伏変位	$k_r$ : 除荷時剛性
$M_m$ : 最大荷重	$R_m$ : 最大変位	$k_s$ : スリップ剛性
		$k_p$ : 降伏後剛性

図-2 梁部材弾塑性曲げバネ復元力特性

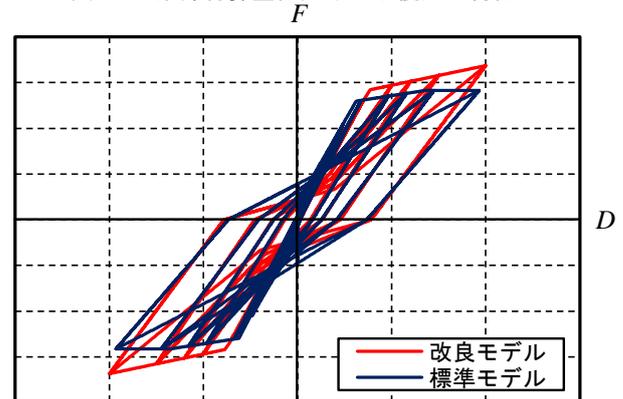


図-3 力-変形関係履歴ループ比較

表-3 梁の復元力特性諸元

解析モデル	改良モデル	標準モデル
$\alpha$	0.3	0.5
$\beta$	0.8	0
$\eta_s$	0.5	0.1
$\eta$	0.05	

- (1) ランダム位相を用いて、告示スペクトル(図-4(A))に適合させた要素波を作成する。
- (2) C-SAN-EW の位相を用いて、長周期成分のみを模擬したスペクトル(図-4(B))に適合させた要素波を作成する。
- (3) (1)と(2)で作成した波形を足し合わせる。
- (4) (3)で作成した波形の位相を用いて、告示スペクトルに長周期成分を付加したスペクトル(図-4(C))に適合させた合成波を作成し、これをかさ上げ模擬地震動とする。

### 3.2 かさ上げ高さの設定

本研究では、かさ上げ地震動のピーク高さを工学的基盤の応答スペクトルの最大値である 81.4kine を 1.5 倍したピークを持つ波(Lw 系とする)と 2.0 倍したピークを持つ波(Hw 系とする)の 2 系統の波を作成した。

### 3.3 中心周期とピークの設定

参考文献<sup>5),8)</sup>を参考に、図-4 に示すように、ピーク幅を 1.5 秒とし、その両端にスロープ部を設けて、かさ上げ周期帯とした。かさ上げ周期帯の中心(以下中心周期とする)を 2.0 秒から 8.0 秒まで、0.5 秒刻みで変更した波形を Lw 系と Hw 系でそれぞれ 13 波ずつ作成した。以後、かさ上げ高さ 1.5 倍の波形を”Lw+中心周期”，かさ上げ高さ 2.0 倍の波形を”Hw+中心周期”と表記する。例として図-5 に Hw3.5 の応答スペクトルと加速度波形を示す。

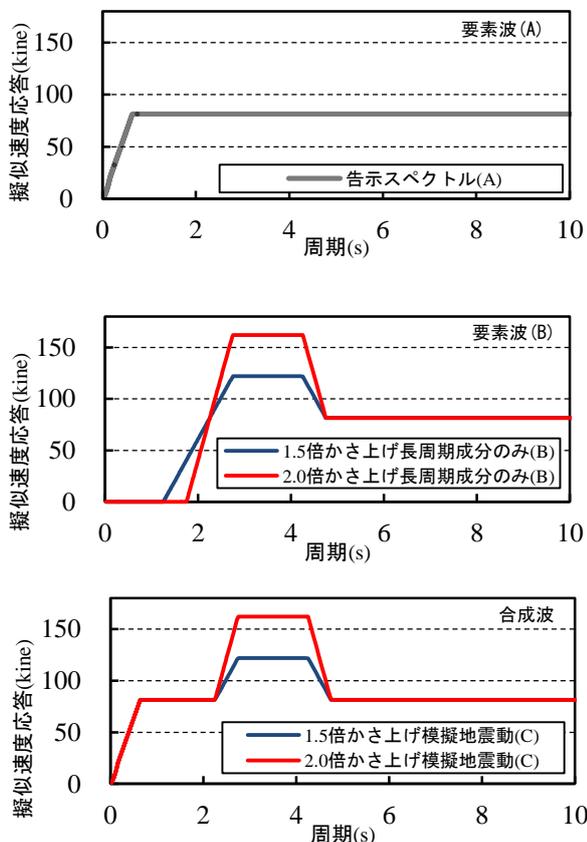


図-4 波形作成に用いる擬似速度応答スペクトル

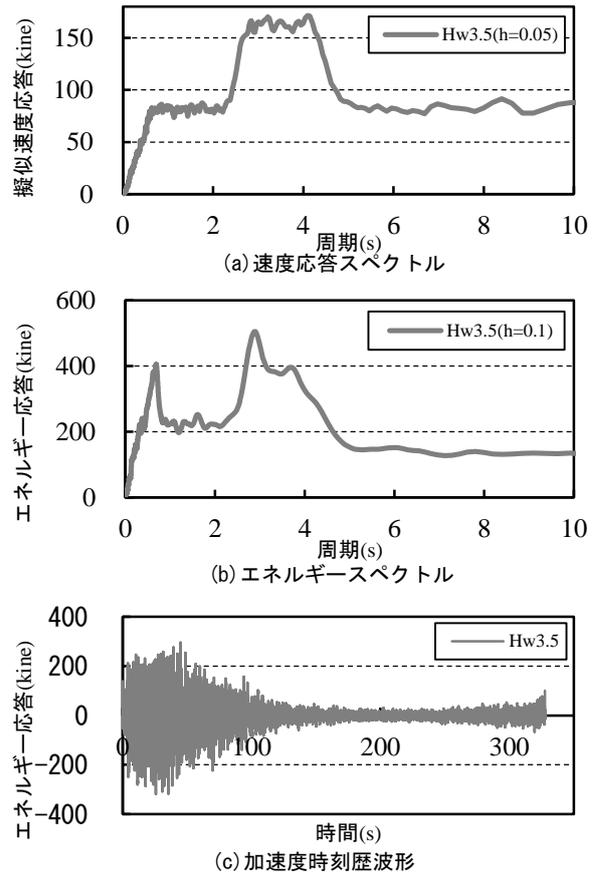


図-5 作成波形一例 (Hw3.5)

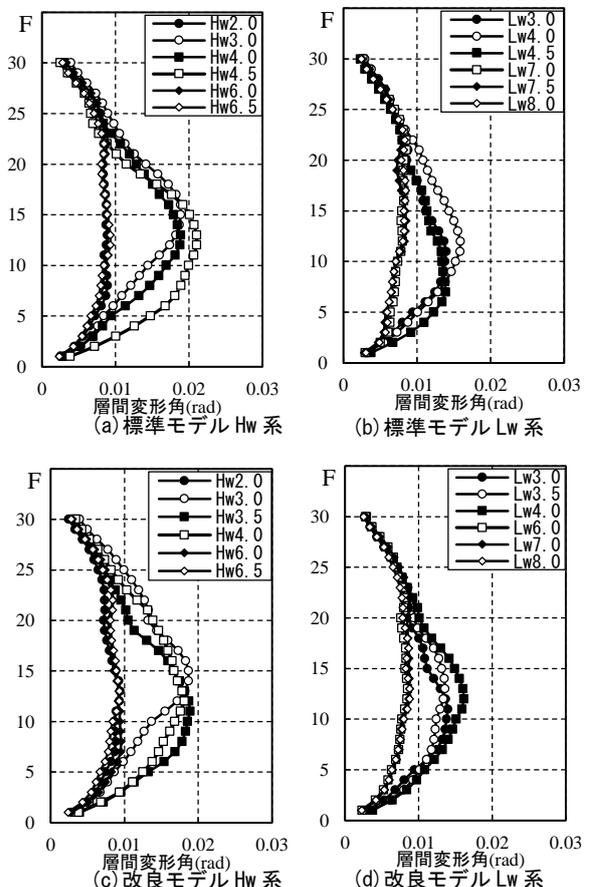
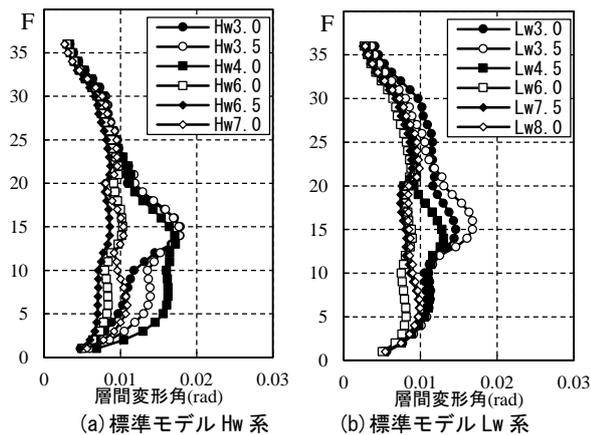
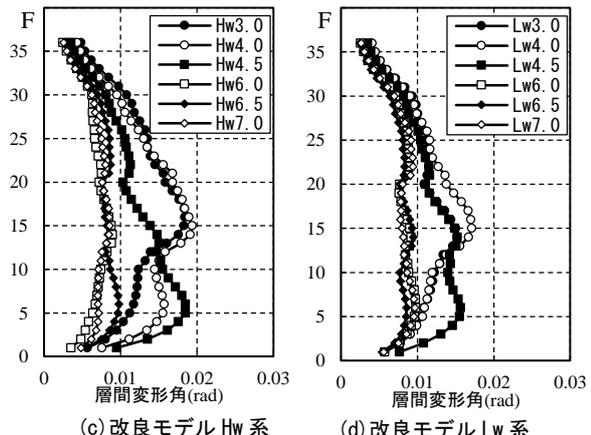


図-6 RC30 の各層の最大層間変形



(a) 標準モデル Hw 系

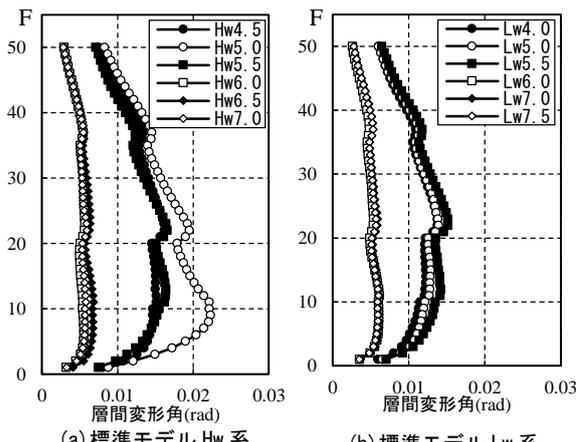
(b) 標準モデル Lw 系



(c) 改良モデル Hw 系

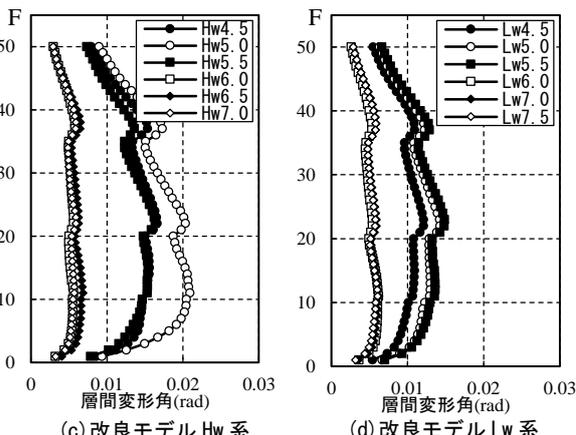
(d) 改良モデル Lw 系

図-7 RC36 の各層の最大層間変形



(a) 標準モデル Hw 系

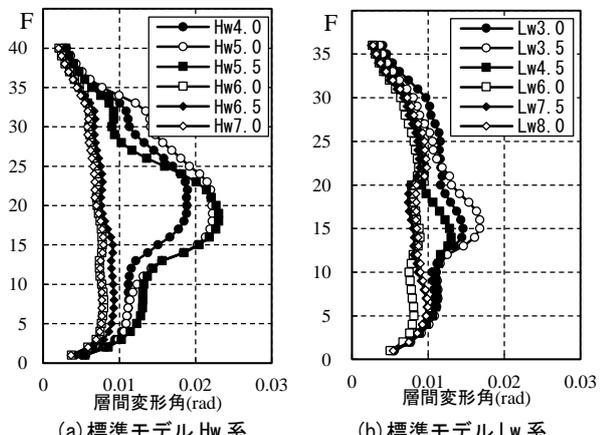
(b) 標準モデル Lw 系



(c) 改良モデル Hw 系

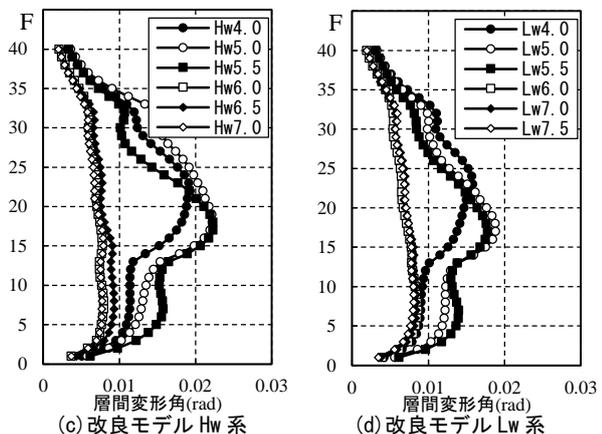
(d) 改良モデル Lw 系

図-9 RC50 の各層の層間変形角



(a) 標準モデル Hw 系

(b) 標準モデル Lw 系



(c) 改良モデル Hw 系

(d) 改良モデル Lw 系

図-8 RC40 の各層の最大層間変形

## 4. 解析結果

### 4.1 各層の最大層間変形角

図-6 から図-9 に、4 棟の RC 造超高層建物モデルにかさ上げ地震動を入力して得られた各層の最大層間変形角の分布を示す。それぞれの図において、梁部材の復元力特性に標準モデルを用いた場合の結果を (a), (b) に、改良モデルを用いた場合の結果を (c), (d) に示す。また、かさ上げ高さが異なる Hw 系と Lw 系の地震動による解析結果を分けて示している。なお、図には 13 波中最大層間変形角の上位 3 波と下位 3 波について示す。

### 4.2 標準モデルと改良モデルの応答性状の比較

標準モデルの応答が大きくなる場合と改良モデルの応答が大きくなる場合が確認できる。例として、図-6 の RC30 の場合、標準モデルに Hw 系の波形を入力した場合(図-6 (a))の方が、改良モデルに Hw 系の波形を入力した場合(図-6 (b))よりも応答が大きくなっている。逆に、図-7 の RC36 の場合は、改良モデルに Hw 系の波形を入力した場合(図-7 (b))の方が、標準モデルに Hw 系の波形を入力した場合(図-7 (a))よりも応答が大きくなっている。標準モデルの応答が大きくなる原因として、スラブ寄与率の違いにより、梁の曲げ耐力が改良モデルと比べ標準モデルの方が小さいことが考えられる。一方、改良モデルの応答が大きくなる原因としては、大振幅の

揺れが継続した際に梁部材の履歴特性が逆形状のループになることにより、標準モデルに比べ改良モデルのエネルギー吸収量が小さくなるためと考えられる。

### 4.3 Hw系とLw系の応答性状の比較

建物の高さ、復元力特性の違いに関わらず、どの建物モデルについても、Hw系の応答はLw系を上回っており、図-8のRC40の中層部や図-9のRC50の下層部では最大層間変形角が1/50を超えるケースも見られる。一方、同じHw系でもかさ上げ周期によっては1/100を下回るケースもあり、最大層間変形角とかさ上げ周期の位置には関係があることが分かる。

### 4.4 建物固有周期とかさ上げ中心周期の関係

それぞれのモデルでの、最大の層間変形角とかさ上げ中心周期の関係を示したものを図-10に示す。図-10より、それぞれのモデルに応じてある特定のかさ上げ周

期のときに応答が増大していること、かさ上げ周期が2.0秒や6.0秒以上のときには応答が小さいことが分かる。

図-11には、かさ上げ周期と解析後の建物の固有周期の関係を示す。縦軸には、建物初期固有周期 $T_b$ と解析後建物固有周期 $T_a$ の比を示している。かさ上げ周期によらず、解析後の固有周期は、概ね初期固有周期の1.5倍から2.0倍に伸びていることが分かる。いくつかのケースについて、擬似速度応答スペクトルと建物の固有周期の関係をみる。応答が大きくなったRC30の改良モデルHw4.5入力時のケース(図-12(a))やRC40の改良モデルHw5.0入力時のケース(図-12(b))では、初期固有周期がかさ上げ周期帯よりも小さく、解析終了後の固有周期がかさ上げ周期帯の中心付近にあることが分かる。一方、応答が小さくなったRC30の改良モデルHw2.0入力時のケース(図-12(c))では、初期固有周期がかさ上

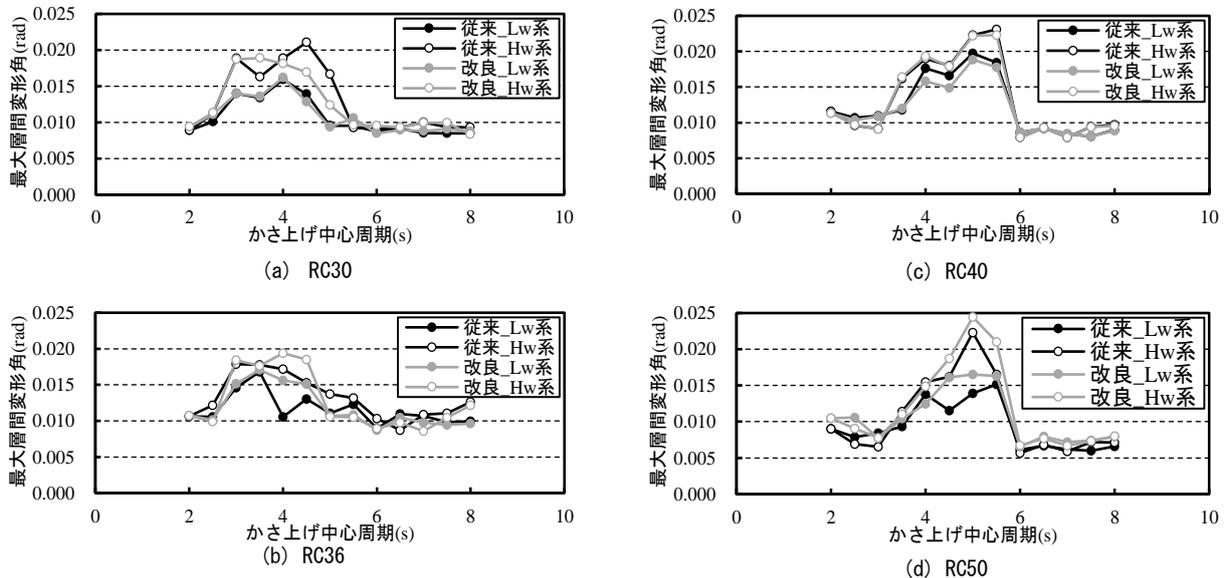


図-10 最大層間変形角とかさ上げ中心周期

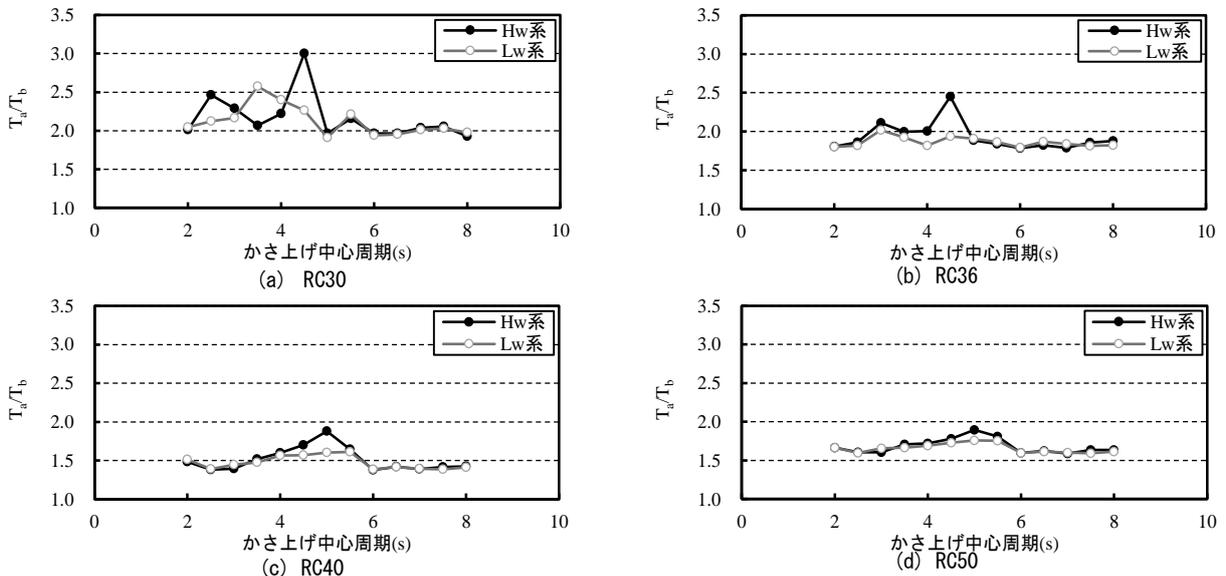


図-11 固有周期の変化とかさ上げ中心周期

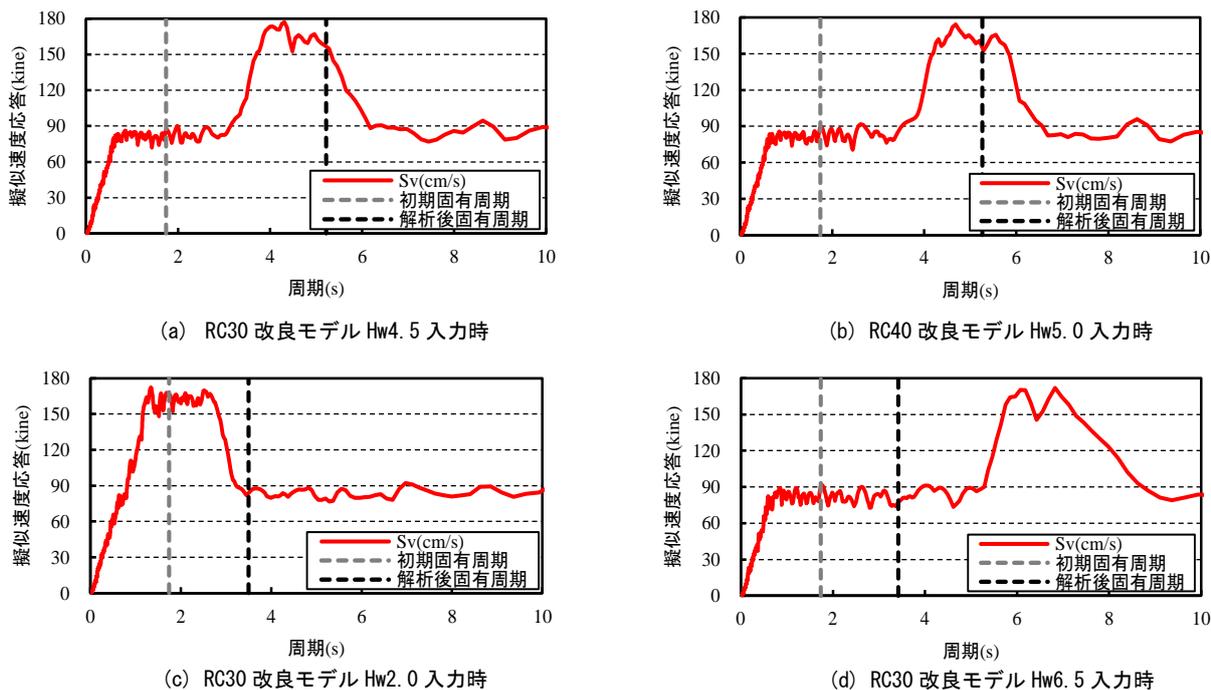


図-12 擬似速度応答スペクトルと固有周期の関係

げ中心周期付近にあり、解析終了後の固有周期がかさ上げ周期帯よりも大きいことが分かる。同じく応答が小さかった RC30 の改良モデル Hw6.5 入力時のケース (図-12 (d)) では、逆に初期固有周期と解析終了後の固有周期がかさ上げ周期帯よりも小さくなっている。すなわち、初期固有周期と解析後固有周期の間にかさ上げ周期帯がある場合には応答が大きくなることを確認できる。このことは、RC 造超高層建築物の設計において、塑性化によって建物が長周期化することを考慮して、設計用入力地震動の応答スペクトルを参照することの必要性を示唆していると考えられる。

## 5 まとめ

本研究では、告示スペクトルを基本とし、長周期成分の周期帯をかさ上げた模擬地震動を作成し、階数の異なる 4 棟の RC 造超高層建物モデルについて地震応答解析を行った。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) かさ上げ模擬地震動の擬似速度応答スペクトルを建築基準法告示に定められている高さの 2.0 倍に設定した Hw 波形を入力した場合、全てのモデルにおいて最大の層間変形角は概ね 1/50 程度となる。
- (2) 塑性化を伴う大振幅の揺れが継続する場合には、梁の復元力特性にスラブ効果やスリップ挙動を適切に考慮する必要がある。
- (3) 初期固有周期と解析後固有周期の間にかさ上げ周期帯がある場合には応答が大きくなる傾向があることから、塑性化によって建物が長周期化すること

を考慮して、設計用入力地震動を参照することが重要である。

## 参考文献

- 1) 杉本訓祥ほか: 縮小 20 層 RC 造建物試験体の震動実験, コンクリート工学会年次論文集, vol35, No.2, pp.325-330, 2013.7
- 2) 斉藤大樹: STERA3D Technical Manual Version4.2, <http://www.rc.ace.tut.ac.jp/saito/software.html>
- 3) 田中修平, 斉藤大樹, 加藤博人, 杉本訓祥: E ディフェンス震動台実験に基づく超高層 RC 造建築物の地震応答解析, コンクリート年次論文集, vol.37 No2, pp.61-66, 2015.7
- 4) 南海トラフ巨大地震モデル検討会 首都直下地震モデル検討会: 南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動に関する報告, [http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/pdf/jishinnankai20151217\\_01.pdf](http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/pdf/jishinnankai20151217_01.pdf)
- 5) 日本建築学会: 長周期地震動対策に関する公開研究会集, pp.73-82, 2008.3
- 6) 出水俊彦ほか: 長周期地震動を受ける RC 造超高層建築物の構造性能, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.499-504, 2009.8
- 7) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, 1999.9
- 8) 日本建築学会: 長周期地震動と超高層建物の対応策, pp.84-94.2013.10