

# 論文 OS1 地域を対象とする高層建築の耐震性能に関する一考察

吉田 浩輝\*1・真田 靖士\*2

**要旨:** 平成 28 年 6 月 24 日に国土交通省住宅局より「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対策について(技術的助言)」が公表された。同助言では耐震設計で地震応答解析を必要としない 60m 以下の高層建築は対象とされていない。そこで、本研究では OS1 地域の 60m 以下の高層建築を対象とし、同助言で示された設計用地震動を用いて地震応答解析を行い、安全限界を定義する一つの性能基準値を満足する必要ベースシア係数の評価を行った。さらに等価線形化法を適用し、本研究で提案する簡易的なベースシア係数算定法の妥当性を確認し、今後の課題を明確にした。

**キーワード:** 鉄筋コンクリート, 長周期地震動, 地震応答解析, 等価線形化法, 性能設計, 安全限界

## 1. はじめに

近い将来、南海トラフを震源とする巨大地震の発生が懸念されている。同地震では、主要な平野(東京, 名古屋, 大阪など)で長周期地震動が増幅し、超高層建築物等の長周期構造物への影響が大きいと考えられている。このような中、平成 28 年 6 月 24 日に国土交通省住宅局より、関東、静岡、中京、関西の計 10 区域を対象とした「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)」<sup>1)</sup>(以下、「長周期地震動対策」)が公表された。この「長周期地震動対策」では、図-1 および図-2 に示すように区域ごとに告示波の 1.0 倍, 1.5 倍, 2.0 倍を基本とする擬似速度応答スペクトルが設定されている。この擬似速度応答スペクトルに適合する設計用長周期地震動を用いて、60m 以上の超高層建築物に対し時刻歴応答解析を行うことが同対策の骨子となっている。結果的に、耐震設計において地震応答解析を行わない 60m 以下の高層建築への対策については触れられていない。また、保有水平耐力計算に及ぼす影響についても考慮されていない。

そこで、本研究では 60m 以下の RC 造高層建物に対して、OS1 地域の長周期地震動を入力して地震応答解析を行い、建物の地震応答に与える影響について検討した。特に、表-1 に示す日本建築構造技術者協会で提案されている性能基準値表<sup>2)</sup>の安全限界値(以下、安全限界)を満足する必要ベースシア係数に着目して分析する。具体的には、解析対象建物として 12 層, 14 層, 16 層の建物を設定し、地震応答解析から安全限界を満足する必要ベースシア係数を同定する。さらに建物の地震応答を一義的に評価できる等価線形化法を適用した必要ベースシア係数の簡易評価法を提案し、応答解析結果との比較を通して評価精度の検討を行った。

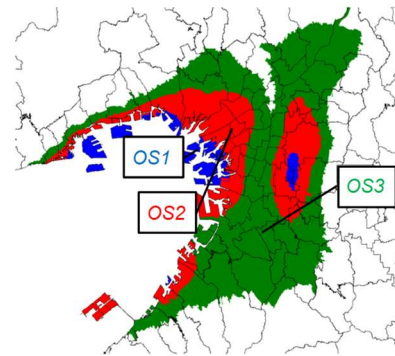


図-1 関西圏における長周期地震動対策区域

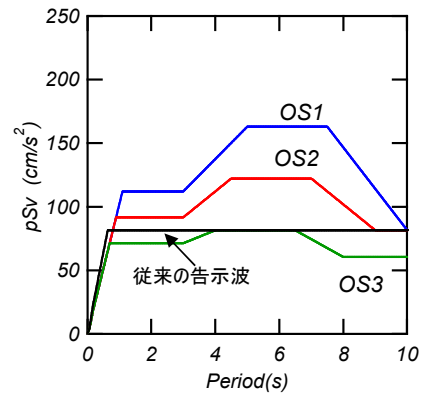


図-2 工学的基盤における擬似速度応答スペクトル

表-1 性能基準値表

対象	性能評価項目	安全限界 余裕度Ⅲ	安全限界 超過領域
建物挙動	層間変形角 R(rad)	1/100~1/75	1/75 以上
	床加速度 a(gal)	500~1000	1000 以上
建物構造	梁端降伏割合(%)	60~100	100
構造部材	部材塑性 $\mu$	3.75~5.0	5.0 以下
建物状態 “目標とする状態”		限定機能確保 中破~大破 中大規模修復	機能確保困難 大破以上 修復困難

\*1 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 (学生会員)

\*2 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 教授・博士(工学) (正会員)



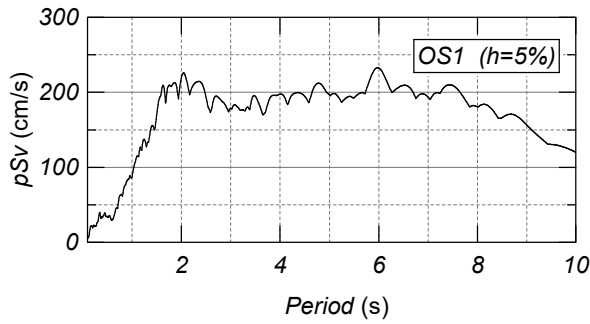


図-5 擬似速度応答スペクトル

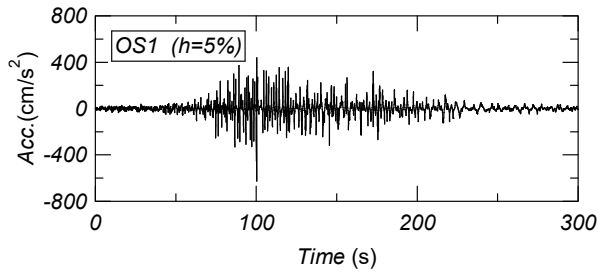


図-6 入力地震波

ひび割れ強度  $M_c$  は降伏強度  $M_y$  の 0.25 倍とした (図-4 参照)。

数値積分法は Newmark- $\beta$  法 ( $\beta=1/4$ ) を用い、粘性減衰は瞬間剛性比例型とし、減衰定数は弾性 1 次モードに対して 5% とした。P- $\Delta$  効果は考慮しない。

### 3.2 検討用入力地震動

本研究で用いる検討用入力地震動は「長周期地震動対策」に基づき OS1 (告示波の 2 倍) 地域で作成された長周期地震波である。この地震波は大阪市内当該区域内の一地点の実際の地盤情報に基づいて作成されたものである。図-5 に当該地震波の擬似速度応答スペクトルを、図-6 に加速度時刻歴をそれぞれ示す。

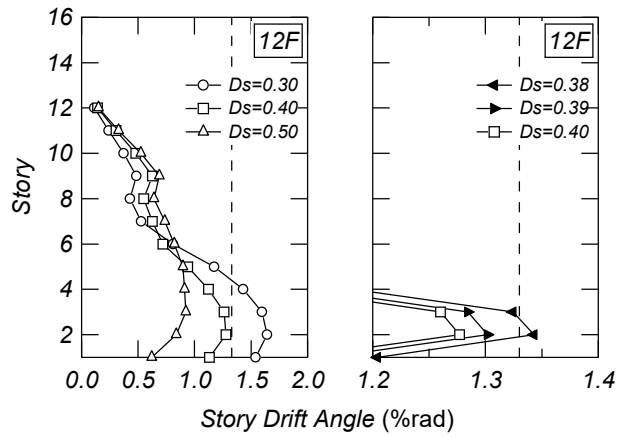
### 3.3 解析結果

$D_s$  を変化させた代表的なモデルの最大応答層間変形角分布を図-7 に示す。同図の左列には  $D_s=0.3, 0.4, 0.5$  のモデルの結果を、右列には最大層間変形角 1/75 付近となる  $D_s$  のモデルの結果を示す。また、併せて層間変形角 1/75 を点線で示す。同図より、全てのモデルにおいて  $D_s$  が大きくなるのにしたが、最大層間変形角が小さくなる傾向が確認された。そして 12 層、14 層、16 層の建物では  $D_s$  が 0.39, 0.42, および 0.51 で最大層間変形角が 1/75 を下回ることが確認された。以上の結果に基づき式 (3) を用いて安全限界 (層間変形角 1/75) に抑制するための必要ベースシア係数を算出し、その結果を表-4 に示す。層数が多くなるほど要求される  $D_s$  および必要ベースシア係数が大きくなることを確認された。

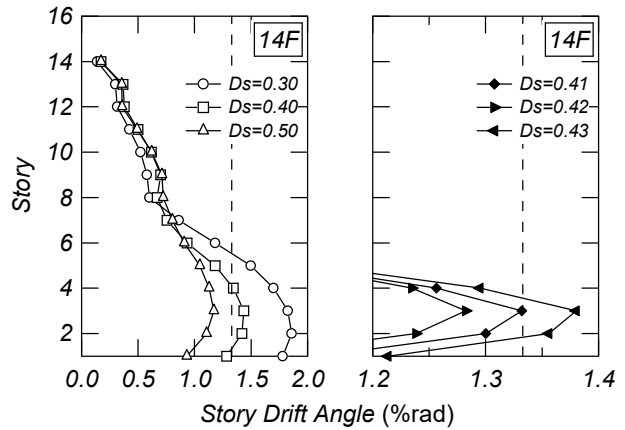
## 4. 必要ベースシア係数の推定

### 4.1 必要ベースシア係数推定の方針

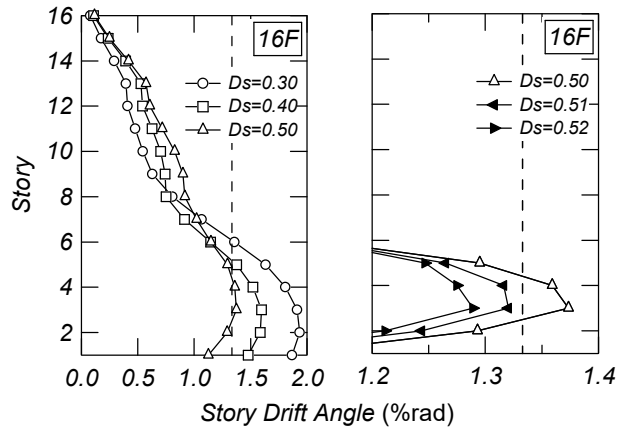
等価線形化法では、多層建築物を等価 1 自由度系に変



(a) 12 層モデル



(b) 14 層モデル



(c) 16 層モデル

図-7 各層モデルの最大応答層間変形角分布

表-4 応答解析による必要ベースシア係数の検討結果

	$D_s$	$C_b$
12 層	0.39	0.377
14 層	0.42	0.386
16 層	0.51	0.434

換し、さらに得られた  $S_a-S_d$  関係 (Capacity Spectrum) をエネルギー的に等価な完全弾塑性型の復元力特性に置換することで検証用地震動 (Demand Spectrum) に対する最大応答値を推定できるとされる。また、その際に得られた応答加速度  $S_a$  から式(4)を用いて有効質量比を考慮して建築物全重量に対するベースシア係数  $C_b^*$  を算出で

きる。

$$C_b^* = \frac{S_a}{g} \times \frac{M_e}{M_t} \quad (4)$$

ここで、 $g$ ：重力加速度、 $M_e$ ：有効質量、 $M_t$ ：建物総重量である。

以上より本研究の将来的な目標は、等価線形化法を用いることで OS1 地域の地震動に対して安全限界（層間変形角 1/75）を満足する必要ベースシア係数を推定することである。地震波は前節の OS1 地域の入力地震波を対象とし、図-8 にその応答加速度—応答変位関係（Demand Spectrum としての  $S_a-S_d$  関係）を示す。Capacity Spectrum は将来的に Pushover 解析を行わずに作成することを想定する。必要ベースシア係数の推定イメージを図-9 に示し、以下に想定する推定手順を示す。

- ① Capacity Spectrum の降伏点割線剛性  $\omega_y^2$  を式(5)、式(6)、式(7)より算定する。

$$T_1 = 0.02H \quad (5)$$

$$\omega_1 = \frac{2\pi}{T_1} \quad (6)$$

$$\omega_y^2 = \omega_1^2 \times \alpha_y \quad (7)$$

ここで、 $H$ ：建物高さ（m）、 $T_1$ ：弾性一次固有周期、 $\alpha_y$ ：降伏点剛性低下率である。

- ② 式(7)による  $\omega_y^2$  の評価結果に基づいて任意の  $S_d$  に対する Transition Curve を評価する。なお、Transition Curve は減衰定数 5%の加速度および変位応答スペクトルに対し式(8)、式(9)から求まる減衰補正係数  $F_h$  を乗じて算定する<sup>5)</sup>。

$$h = 0.25 \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{\mu}} \right) + 0.05 \quad (8)$$

$$F_h = \frac{S(h)}{S(h=0.05)} = \frac{1.5}{1+10h} \quad (9)$$

ここで、 $h$ ：減衰定数、 $\mu$ ：塑性率である。

- ③ 最大層間変形角が 1/75 となる応答変位  $S_d^*$  を式(10)より算定する。

$$S_d^* = H_e \times \left( \frac{1}{75} \times \beta \right) \quad (10)$$

ここで、 $H_e$ ：代表点高さ、 $\beta$ ：代表点高さの最大変形角の最大層間変形角に対する比率である

- ④ ①、③を満たす完全弾塑性復元力特性を有する Capacity Spectrum を図-9 より求め  $S_a$  を読み取り、式(4)より必要ベースシア係数  $C_b^*$  を算定する

#### 4.2 必要ベースシア係数の推定法の試行

上記は将来的に想定する必要ベースシア係数の推定手順であるが、式(7)の  $\alpha_y$ 、式(10)の  $\beta$  については適切な評価方法が明らかではない。そこで本研究では、先述した完全弾塑性型の復元力特性を有する Capacity Spectrum は Pushover 解析の結果を基に作成し、必要ベースシア係

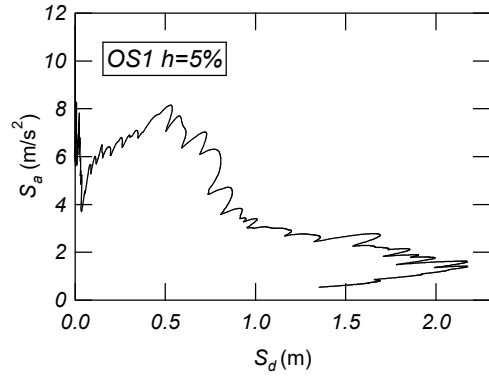


図-8 入力地震波のスペクトル

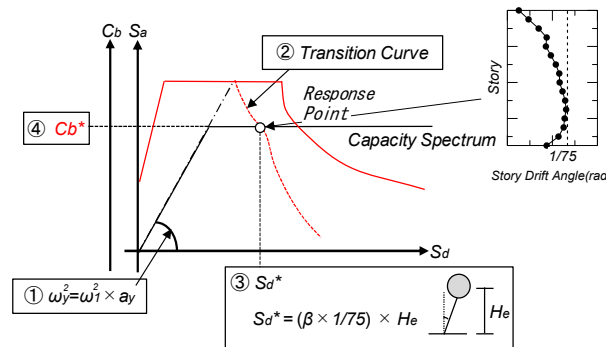


図-9 ベースシア係数推定イメージ

数の推定法を試行する。文献6)を参考に式(11)、式(12)に基づいて2章の各モデルについて等価1自由度系の静的な代表荷重—代表変位 ( $S_a-S_d$ ) 関係である Capacity Spectrum を評価した。なお、Pushover 解析は  $A_i$  分布に基づく外力分布を仮定し、最大層間変形角が 1/20 に至るまで行った。

$$S_a = \frac{\sum_{i=1}^N m_i \delta_i^2}{\left( \sum_{i=1}^N m_i \delta_i \right)^2} Q_B \quad (11)$$

$$S_d = \frac{\sum_{i=1}^N m_i \delta_i^2}{\sum_{i=1}^N P_i \delta_i} S_a \quad (12)$$

ここで、 $m_i$ ： $i$ 層の質量、 $\delta_i$ ： $i$ 層の変位、 $P_i$ ： $i$ 層の作用水平力、 $Q_B$ ：ベースシアである。

さらに、得られた Capacity Spectrum の曲線に囲まれる面積が等価になるように完全弾塑性型の復元力特性に置換した。得られた Capacity Spectrum および入力地震動の応答スペクトルから解析モデルの塑性化を考慮した Transition Curve との交点（以下、応答点）より最大応答を評価した。

上記に基づいて応答加速度の算定を行い、式(4)を用いて最大層間変形角を 1/75 に抑制するための必要ベースシア係数を推定した。

#### 4.3 推定結果

図-10 に各モデルにおいて評価された応答点を○で示す。また、同図において Pushover 解析で層間変形角が 1/75 に初めて到達した Step の代表変位を●で併せて示し

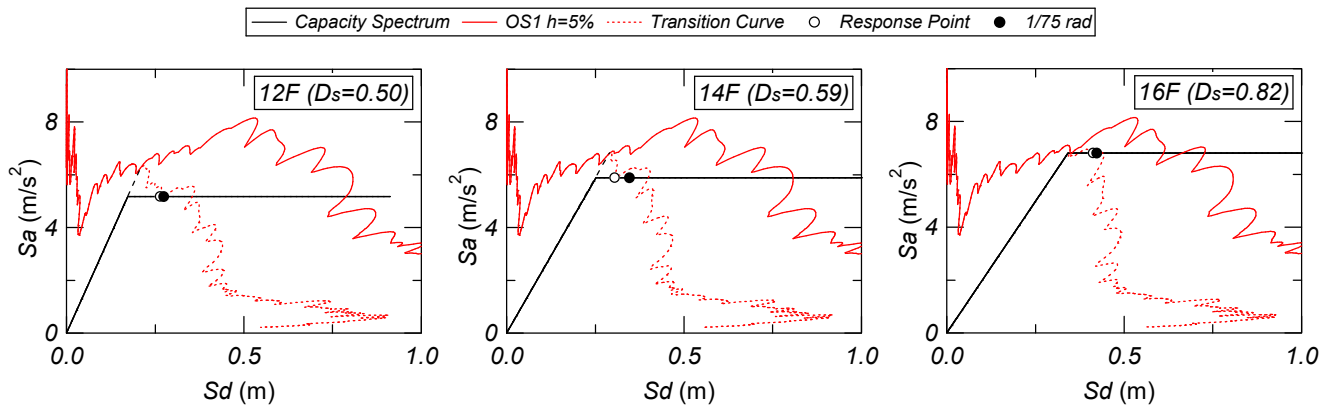


図-10 各層モデルの応答点評価

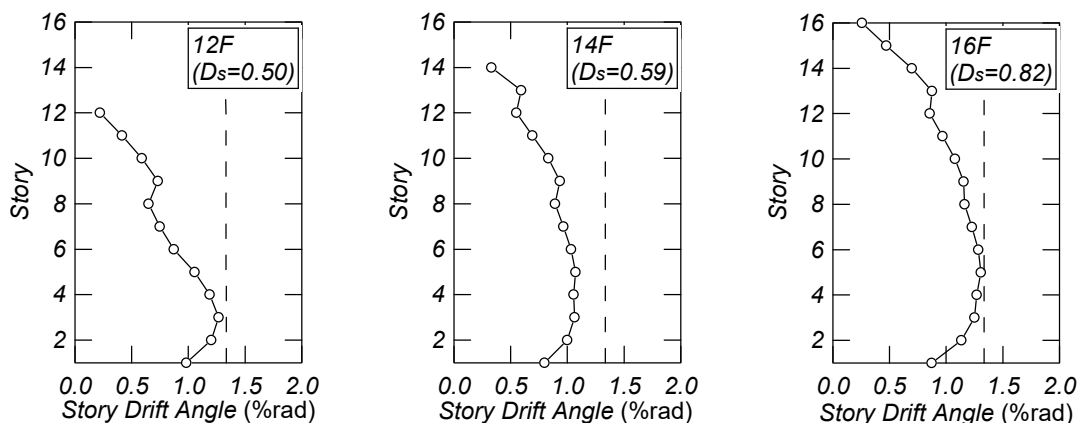


図-11 各層モデルの層間変形角分布

ている。図-11に応答(図-10の○)時の層間変形角分布を、表-5には式(4)より算出された必要ベースシア係数 $C_B^*$ と地震応答解析結果より得られた必要ベースシア係数 $C_B$ の比較を示す。表-6には必要ベースシア係数算定における諸数値を示す。応答点に相当するstepにおいてPushover解析結果での層間変形角が安全限界を上回らない最小の $D_s$ を評価した結果、12層では $D_s=0.50$ 、14層では $0.59$ 、16層では $0.82$ のモデルにおいて初めて安全限界を満足した。以下ではこれらのモデルについて考察する。12層建物では等価線形化法により推定したベースシア係数と地震応答解析結果の比率が1.15、14層では1.24、16層では1.27という結果となった。層数が増えるにつれて等価線形化法による評価結果が地震応答解析結果をより大きく評価する傾向が認められた。これは図-10より層数の多いモデルほどTransition Curveがある加速度の範囲(およそ $2\text{m/s}^2 \leq S_a \leq 6\text{m/s}^2$ の範囲)で(負の)傾きが大きくなり、解析モデルの耐力に関わらず応答変位が一定と評価される傾向が大きいことに起因すると考えられる。結果として安全限界を満足する応答加速度が大きくなり、必要ベースシア係数も大きく評価することが確認された。

#### 4.4 今後の課題

本研究では、Pushover解析結果を用いてCapacity

表-5 必要ベースシア係数推定結果

	$C_B^*$ (推定)	$C_B$ (解析)	$C_B^*/C_B$
12層	0.436	0.377	1.15
14層	0.485	0.386	1.24
16層	0.547	0.434	1.26

表-6 必要ベースシア係数算定時の諸数値

	$S_a$	$M_e/M_t$
12層	5.17	0.830
14層	5.89	0.810
16層	6.80	0.789

表-7 降伏点割線剛性 $\omega_y^2$ の降伏点剛性低下率 $a_y$

	$\omega_y^2$	$\omega_t^2$	$a_y$
12層	29.96	55.95	0.535
14層	23.37	41.10	0.586
16層	19.91	31.47	0.633

表-8  $S_d^*$  (最大層間変形角1/75) と係数 $\beta$

	$H_e$ (m)	$S_d^*$ (m)	$\beta$
12層	28.2	0.274	0.73
14層	33.0	0.346	0.79
16層	38.0	0.422	0.83

Spectrumを設定し、必要ベースシア係数の推定を試行した。4.1節に先述のように、将来的には式(7)より降伏点割線剛性 $\omega_y^2$ および式(10)より安全限界(層間変形角1/75)を考慮した応答点を評価することでPushover解析を行うことなくCapacity Spectrumを設定することができれば、

必要ベースシア係数の評価が可能であり、実務上有益であるとする。そこで、参考として 4.3 節で取り扱ったモデルにおいて結果的に得られた降伏点割線剛性  $\omega_y^2$  と降伏点剛性低下率  $a_y$  の関係を表-7 に示す。また、同様のモデルに対して Pushover 解析で層間変形角が 1/75 となるステップの応答変位  $S_d^*$  と式(10)の  $\beta$  を逆算した結果を表-8 に示す。なお、代表点高さ  $H_e$  は式(13)を用いて評価した。

$$H_e = \frac{\sum_{i=1}^N \delta_i h_i}{\sum_{i=1}^N \delta_i} \quad (13)$$

ここで、 $\delta_i$  :  $i$  層の変位、 $h_i$  :  $i$  層の建物脚部からの高さである。

等価線形化法で解となるモデルにおいて  $\beta$  は 0.73~0.83 の範囲内であることが確認された。一方、地震応答解析で解となるモデルにおいて  $\beta$  は 0.70~0.74 とやや低い値を示す傾向が確認された。これは、地震応答解析では下層に変形が集中したことが原因である。

これら  $a_y$  と  $\beta$  を定量的に評価することが今後の課題として挙げられる。

さらに、本研究では入力地震波を一波のみしか扱わなかったため、今後は複数の入力地震波を取り扱うことにより OS1 地域における Demand Spectrum あるいは Transition Curve の一般的な傾向を把握することも 4.1 節で提案した必要ベースシア係数の推定法の実現性に不可欠と考えている。

## 5. まとめ

本研究では、長周期地震動対策によって指定されている OS1 地域において、同対策で触れられていない 60m 以下の高層建築に着目し、安全限界（層間変形角 1/75）を満足するためのベースシア係数およびこれを簡易的に算定する方法について検討を行った。

層数が異なる 3 通り（12, 14, 16 層）の仮想の建物モデルを設計し、OS1（告示波の 2 倍）地域の地震波を用いて応答解析を行い、安全限界として最大層間変形角 1/75 を満たすための必要ベースシア係数を同定した。その結果、層数が多いモデルほど安全限界を満足する必要ベースシア係数が大きくなる傾向が確認された。

さらに本研究では等価線形化法を用いた必要ベースシア係数の算定法の将来像を示し、その実現可能性を検討した。地震応答解析結果を等価線形化法による推定値

と比較した結果、層数が多いモデルほど、等価線形化法では地震応答解析に比べ必要ベースシア係数をやや過大に評価する傾向が確認された。本解析で設定した 12, 14, 16 層モデルの範囲では、必要ベースシア係数の推定精度は 1.15, 1.24, 1.26 倍過大評価した。これは、Demand Spectrum に塑性化を考慮した Transition Curve において高層のモデルほど変位一定の傾向が強く、高い応答加速度が要求される結果となったことに起因したが、その一般性については今後引き続きの検討を要する。

また今後、Pushover 解析を行うことなく推定法を実現するための課題として、完全弾塑性の復元力特性を有する Capacity Spectrum の降伏点割線剛性（式(7)の  $a_y$ ）および安全限界時の代表点高さにおける応答変位と層間変形の関係（式(10)の  $\beta$ ）を定量的に評価する必要性を指摘し、引き続き検討する計画である。

## 謝辞

本研究は日本建築学会近畿支部 RC 構造部会の活動の一環として実施したものである。本研究で採用した地震動は部会委員からご提供いただいたものである。関係各位に謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 国土交通省住宅局：超高層建築物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），2015.6
- 2) 北村春幸，宮内洋二，浦本弥樹：性能設計における耐震診断基準値に関する研究—JSCA 耐震性能メニューの安全限界値と余裕度レベルの検討—，日本建築学会構造系論文集，No.604，pp.183-191，2006.6
- 3) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，pp.130-131，2010.2
- 4) 株式会社構造システム：任意形状立体フレームの弾塑性解析プログラム SNAP
- 5) 柴田明徳：最新耐震構造解析（第 3 版），森北出版株式会社，pp.325-348，2015.5
- 6) 倉本洋，勅使川原正臣，小鹿紀英，五十田博：多層建築物の等価 1 自由度系縮約法と地震応答予測精度，日本建築学会構造系論文集，No.546，pp.79-85，2001.8