

論文 超高層鉄筋コンクリート造建築物の地震応答と室内被害推定

新井 一樹*1・佐藤 綾子*2・秋田 知芳*3・和泉 信之*4

要旨: 超高層 RC 造建築物の耐震設計では、骨組に関する耐震安全性判定基準が設けられているが、家具の転倒等の室内被害を引き起こす応答値については設計基準という形では設けられていない。本研究では、超高層 RC 造建築物の時刻歴応答解析を行い、地震時室内応答値を評価して室内被害を推定する。時刻歴応答解析では、建物高さが異なる超高層 RC 造住宅を対象に、内部粘性減衰の評価に着目し、入力地震動の大きさをパラメータとして室内応答値を評価する。その際、地震応答値から家具の転倒や滑り、仕上げ材の損傷などの室内被害の発生状況について検討し、今後の課題を考察する。

キーワード: 超高層建築物, 鉄筋コンクリート造, 耐震設計, 静的非線形解析, 時刻歴応答解析

1. はじめに

日本では、超高層鉄筋コンクリート造 (RC 造) 建築物が数多く建設されてきた。これらの既存超高層 RC 造建築物の耐震設計では、層間変形角や層塑性率などに関する骨組の耐震安全性判定基準を設けてきた。しかし、一部の免震構造を除き、耐震設計には家具の転倒や移動などを引き起こす室内応答値に関しては、判定基準という形では設けられてこなかった。

最近、巨大地震の発生が危惧され、長周期地震動などに対する超高層建築物の安全性が注目されてきた。既存超高層 RC 造建築物の用途は集合住宅が主であるため、居室における家具の転倒や移動による室内安全性の検討が求められている。さらに、2011 年 3 月に発生した東北地方太平洋沖地震により、首都圏や阪神圏などの超高層建築物が長い時間揺れたため、既存超高層 RC 造建築物に関する室内安全性の評価が急務となっている。

超高層建築物の地震時応答評価では、高次の減衰評価が重要であることが指摘されており、著者らは超高層 RC 造建築物の骨組応答値について研究してきた^{1), 2)}。

本研究は、超高層 RC 造建築物の地震時室内安全性判定基準を設ける第一歩として、既存超高層 RC 造建築物の地震時室内応答値を評価し、室内被害の発生状況を推定して判定基準に関する課題を考察するものである。

本論文では、建物高さが異なる超高層 RC 造建築物を対象として入力地震動の大きさをパラメータとして時刻歴応答解析を行う。その際、内部粘性減衰の評価に着目して室内応答値を考察する。最大応答値を用いて家具の転倒や移動などによる家具の被害発生を検討する。さらに、最大層間変形角から外装材や内装材の損傷被害の発生を検討する。

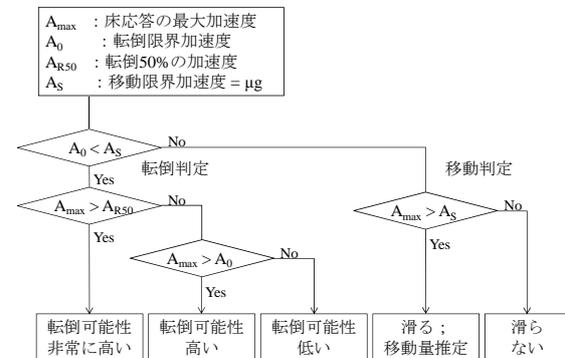
2. 室内安全評価

2.1 家具の被害推定

(1) 家具の被害推定法

本研究では、地震時における家具の転倒や滑りなどの被害の発生については既往の簡易推定法^{3), 4)} (図-1) により評価することとする。

家具は、床の最大応答加速度 (A_{max}) が転倒限界加速度 (A_0) より大きい場合に転倒の可能性が高いとする。家具の滑りは、 A_{max} が滑り開始加速度 (A_S) より大きい場合に生じるものとする。なお、家具の転倒率が 50% の加速度 (A_{R50}) 及び家具の滑り量 (δ_S) は、文献 3) に示す下式により算定する。



$$A_{R50} = \frac{b}{h} g \cdot \left(1 + \frac{b}{h}\right)$$

$$\delta_S = 0.035 \mu^{-0.3} F_e^{-0.5} (V_f - V_s)^{1.56}$$

ここで、記号は文献 3) による。
 b : 家具の幅, h : 家具の高さ, g : 重力加速度 (cm/s^2),
 μ : 摩擦係数, F_e : 等価振動数 (Hz),
 V_f : 床応答の最大速度 (cm/s), V_s : 家具が滑り始める速度 (cm/s)

図-1 家具被害の簡易推定の流れ

*1 千葉大学 大学院工学研究科建築・都市科学専攻博士前期課程 (学生会員)
 *2 千葉大学 工学部建築学科 (非会員)
 *3 千葉大学 大学院工学研究科建築・都市科学専攻助教 博 (工) (正会員)
 *4 千葉大学 大学院工学研究科建築・都市科学専攻教授 博 (工) (正会員)

(2) 家具転倒被害階率

超高層建築物における家具の転倒被害の発生率を示す指標として家具転倒被害階率を用いる。

家具転倒被害階率は、全階の内、床応答加速度 (A_f) が家具転倒率 50%の加速度 (A_{R50}) の値より大きい階が占める比率とする。

(3) 家具滑り被害階率

家具の滑り被害の発生率を示す指標として家具滑り被害階率を用いる。

家具滑り被害階率は、全階の内、滑り量 (δ_s) が限界滑り量 (δ_0) 以上となる階が占める比率とする。ここでは限界滑り量は、キャスター有の家具では 100cm, キャスター無の家具では 20cm とする。

2.2 仕上げ材の被害推定

仕上げ材の損傷被害の発生率を示す指標として、仕上げ材被害階率を用いる。

仕上げ材被害階率は、全階の内、層間変形角 (R) が損傷度 1 の値より大きい階が占める比率とする(表-1)。ここでは、損傷度 1 の R は文献 5) による。

3. 検討計画

3.1 解析対象建築物

建物高さのほぼ上下限となる、20 階建、36 階建、54 階建の超高層 RC 造建築物¹⁾とする(表-2)。

3.2 解析ケース

解析ケースは、階数、減衰タイプ、減衰定数、家具の種類、入力地震動の強さをパラメータとして設定する。家具は転倒検討用及び滑り検討用の各 2 種類とする(表-3)。なお、家具には転倒防止対策は取っていないものとする。

減衰は瞬間剛性比例型減衰またはレイリー型減衰とし、1 次減衰定数 ($h1$) は 1% と 3% に設定する。なお、超高層 RC 造建築物の耐震設計で慣用的に用いられている減衰(設計減衰)は瞬間剛性比例型減衰 ($h1=3\%$) である。

20 階建モデルの解析ケースの例及び解析ケース名称の表示例を表-4 に示す。

3.3 解析方法

解析モデルは、超高層 RC 造建築物の構造設計で多く採用されている等価曲げせん断モデルとする。曲げばねは弾性とし、せん断ばねは弾塑性ばねとする。せん断ばねのスケルトンカーブは、部材の弾塑性性状を考慮した立体フレーム非線形解析結果からトリリニア型に置換する。せん断ばねの履歴特性は、TAKEDA モデル(図-2)(除荷時剛性低下指数 0.4)とする。

検討用地震動(表-5)は、レベル 2 (大地震動)相当の告示波(CODE BCJ-L2 波, 東京都内の第 2 種地盤を

想定)を基準として、地震動の入力強さは倍率(0.2~1.0 倍)を変えて設定する。

表-1 外装材及び内装材の被害推定

		種類	指標	損傷度1
仕上げ材	外装材	カーテンウォール, ALC	層間変形角	$R > 1/150$
	内装材	ALC, 軽量間仕切壁		

表-2 解析対象建築物の諸元

名称	20F	36F	54F
階数	20	36	54
軒高(m)	61.75	114.6	174.2
dCb	0.125	0.075	0.055
T1(秒)	1.32	2.27	3.49
$Q_c / \sum W$	0.055	0.033	0.026
$Q_y / \sum W$	0.248	0.145	0.098
k2/k1	0.221	0.269	0.240
k3/k1	0.002	0.021	0.015

注) dCb: 許容応力度設計用ベースシア係数, T1: 1 次固有周期, Q_c, Q_y : 1 階層せん断力の第 1 折点, $\sum W$: 建物全重量, k1, k2, k3: 1 階の第 1 剛性, 第 2 剛性, 第 3 剛性

表-3 室内家具の諸元

種類	詳細	b/h	μ	A_0	A_{R50}	A_S	F_b
A	転倒家具1	0.18	0.30	176	208	-	1.17
	書棚						
B	転倒家具2	0.27	0.30	265	336	-	1.15
	和ダンス						
C	滑り家具1	0.4	0.05	-	-	49	-
	キャスター有						
D	滑り家具2	0.4	0.20	-	-	196	-
	キャスター無						

注) b/h: 家具の幅を高さと除した値, μ : 摩擦係数, F_b : 家具の振動数 (Hz), A_0, A_{R50}, A_S の単位は cm/s^2

表-4 20 階建モデルの解析ケース

減衰	h1	A	B	C	D
瞬間剛性比例型	1%	20瞬 1A	20瞬 1B	20瞬 1C	20瞬 1D
	3%	20瞬 3A	20瞬 3B	20瞬 3C	20瞬 3D
レイリー型	1%	20レ 1A	20レ 1B	20レ 1C	20レ 1D
	3%	20レ 3A	20レ 3B	20レ 3C	20レ 3D

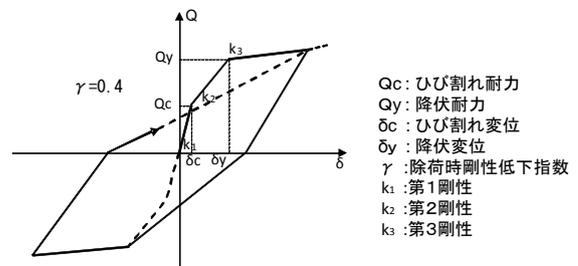
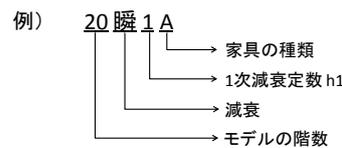


図-2 TAKEDA モデル

表-5 検討用地震動

波形名称	最大加速度	最大速度	継続時間
	cm/s^2	cm/s	s
CODE BCJ-L2	330	54	120

4. 地震応答と室内被害

4.1 設計減衰による建築物の応答値と室内被害

(1) 床応答値と床等価振動数

各階床の最大加速度値 (A_f) 及び等価振動数 (F_e) を図-3に示す。最大加速度は、上層階で大きい傾向があるが、入力が大きくなると下層階でも大きくなる。また、床の等価振動数は、下層階で1.0程度であり、上層階では小さくなる傾向がある。

(2) 家具の被害

最上階における家具の転倒可能性の検討例を図-4、滑り可能性の検討例を図-5に示す。

家具の転倒では、20階床の A_f は0.6倍以上の入力により家具Aの A_{R50} を超えているが、54階床の A_f は家具Aの A_{R50} 程度以下である。キャスター付きの家具Cは滑りが生じ、キャスター無しの家具Dは20階床では0.6倍入力以上により滑りが発生している。

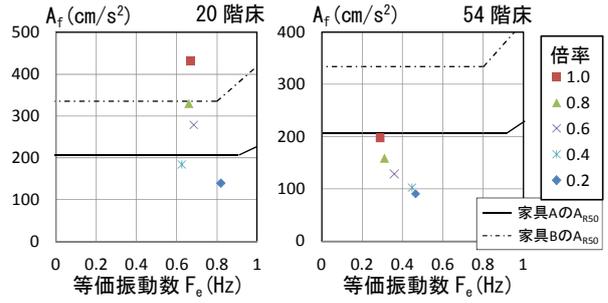


図-4 家具の転倒可能性

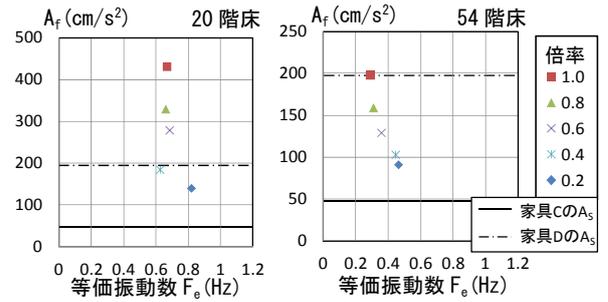


図-5 家具の滑り可能性

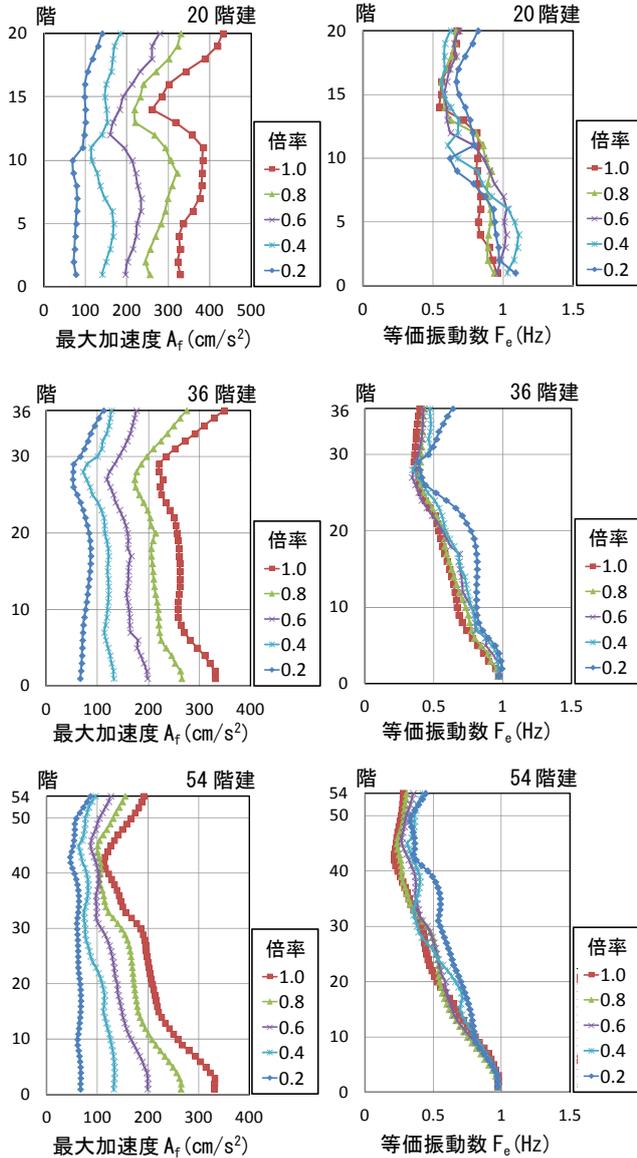


図-3 床の最大加速度と等価振動数

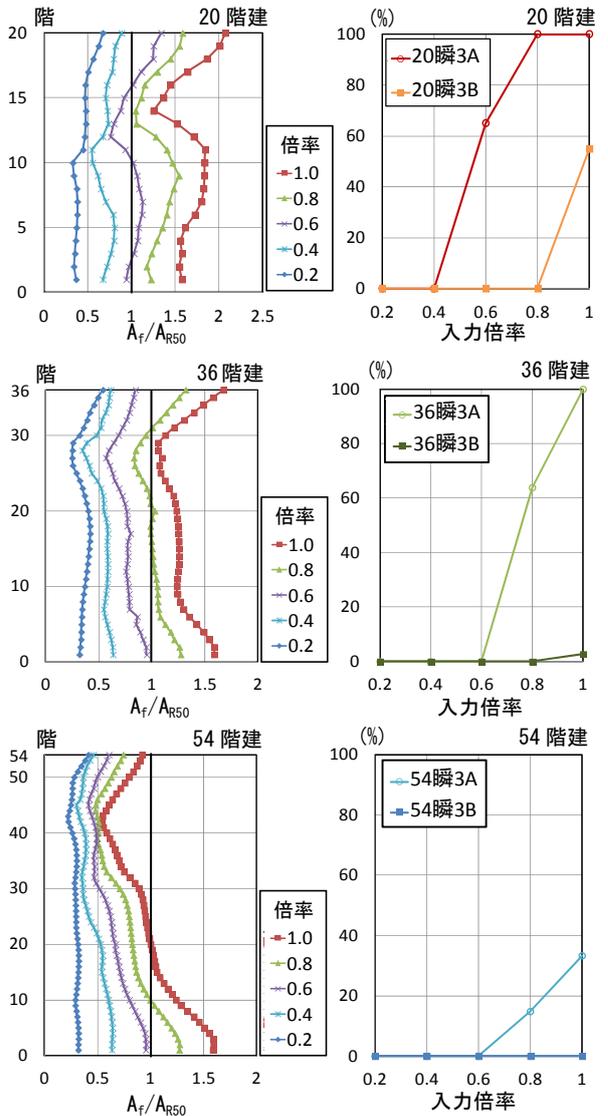


図-6 家具Aの転倒被害推定

図-7 家具の転倒被害率

(3) 家具の転倒被害

家具 A の転倒被害推定を図-6に、家具の転倒被害階率と入力倍率の関係を図-7に示す。

転倒被害階率は、入力倍率 0.4 以下では 0 であり、家具の転倒被害が発生する可能性は小さい、入力倍率が增大するに伴い、家具 A の転倒被害階率は増大するが、家具 B の転倒被害階率はあまり増大しない。

(4) 家具の滑り被害

家具 C の滑り被害推定を図-8に、家具の滑り被害階率と入力倍率の関係を図-9に示す。

家具の滑り被害階率は、入力倍率 0.6 以下では 0 であり、家具の滑り被害が発生する可能性は小さい。また、上層階で家具の滑り量が大きくなっている。

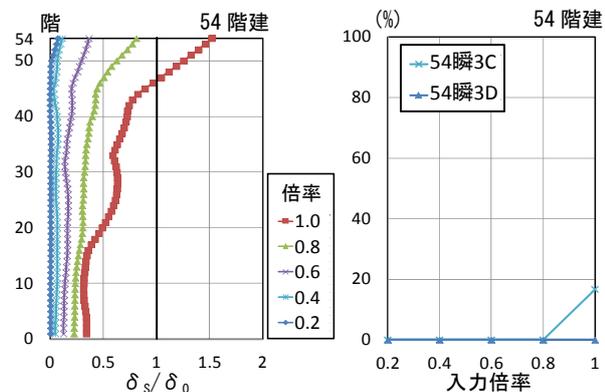
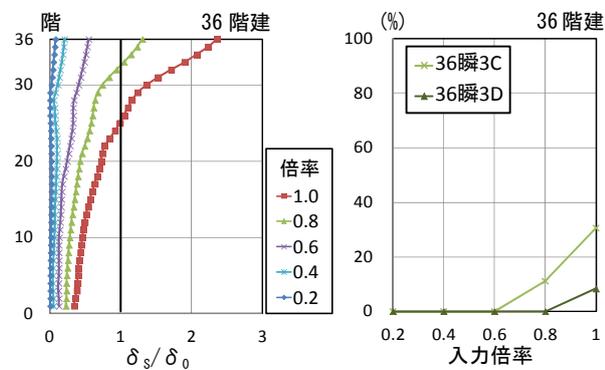
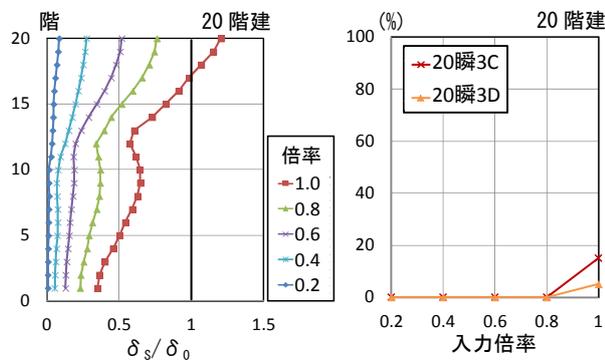


図-8 家具 C の滑り被害推定

図-9 家具の滑り被害階率

(5) 仕上げ材の被害

各階の最大層間変形角と仕上げ材の被害階率を図-10に示す。層間変形角は中間階で比較的大きく、入力倍率の増大に伴い、その傾向が強くなる。仕上げ材の被害階率は、入力倍率 0.6 以下では 0 であり、仕上げ材の被害が発生する可能性は小さい。

4.2 減衰の設定が異なる建築物の応答値と室内被害

(1) 床最大応答値

瞬間剛性比例型減衰 (h1=3%) 及びレイリー型減衰 (h1=1%) について各階の最大加速度値と層間変形角を図-11に示す。最大加速度の高さ方向分布は瞬間剛性比例型の場合、中間層でやや小さくなる傾向があるが、レイリー型の場合、中間層や上層において増大する傾向がある。また、層間変形角はレイリー型の場合、上層階で大きくなっていることがわかる。

(2) 家具の転倒被害

瞬間剛性比例型減衰及びレイリー型減衰の家具の転倒被害階率を図-12に示す。

20階建では、入力倍率が 0.2 より大きい場合、家具の転倒被害が発生する可能性がある。一方、54階建では入力倍率が 0.4 以下までは家具の転倒被害階率は 0 である。レイリー型減衰では、瞬間剛性比例型減衰に比べて家具の転倒被害階率が大幅に増加することがわかる。

(3) 家具の滑り被害

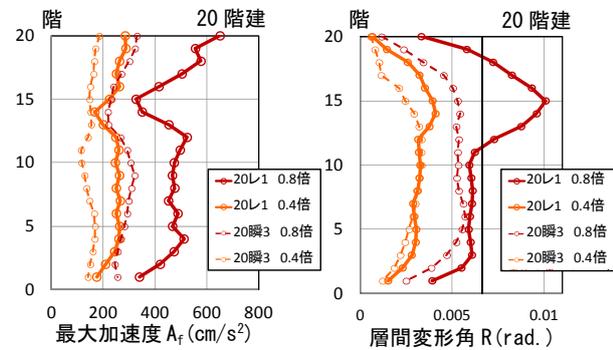
瞬間剛性比例型減衰及びレイリー型減衰の家具の滑り被害階率を図-13に示す。

家具の滑り被害階率は、レイリー型減衰では瞬間剛性比例型減衰よりやや大きい、入力倍率 0.6 以下では 0 であり、家具の滑り被害が発生する可能性は小さい。

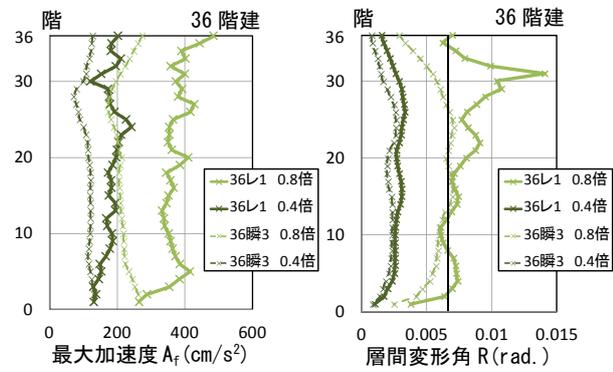
(4) 仕上げ材の被害

瞬間剛性比例型減衰及びレイリー型減衰の仕上げ材の被害階率を図-14に示す。

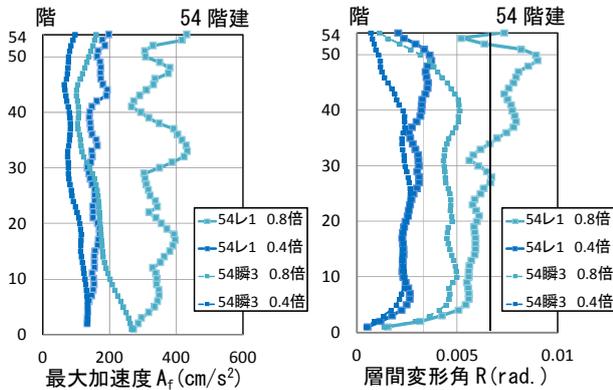
仕上げ材の被害階率は、瞬間剛性比例型減衰では入力倍率 0.6 以下、レイリー型減衰では、入力倍率 0.4 以下では 0 である。入力倍率 0.4 以下では減衰に関わらず、仕上げ材の被害が発生する可能性は小さい。



(a) 20階建モデル

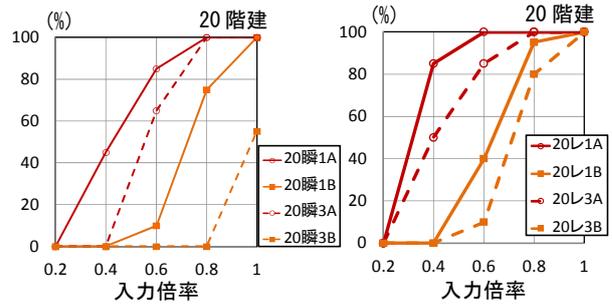


(b) 36階建モデル



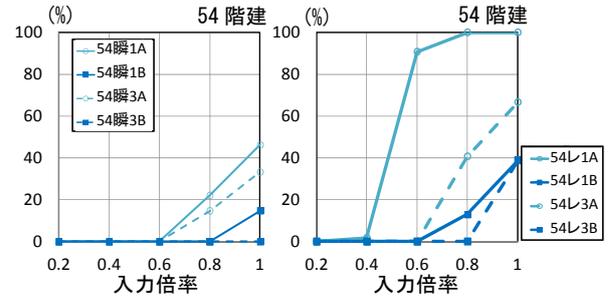
(c) 54階建モデル

図-11 床最大応答値



(a) 瞬間剛性比例型 (20階建)

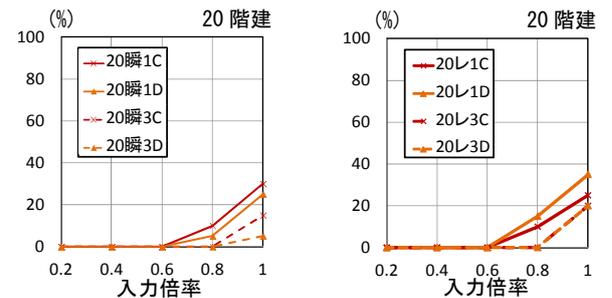
(b) レイリー型 (20階建)



(c) 瞬間剛性比例型 (54階建)

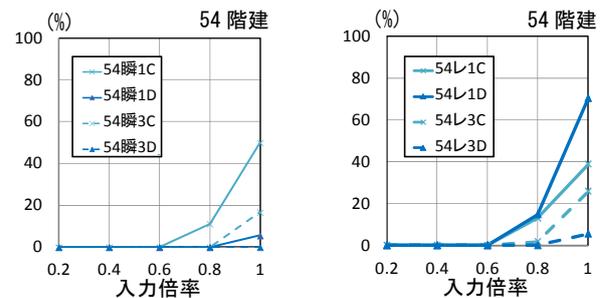
(d) レイリー型 (54階建)

図-12 家具の転倒被害階率



(a) 瞬間剛性比例型 (20階建)

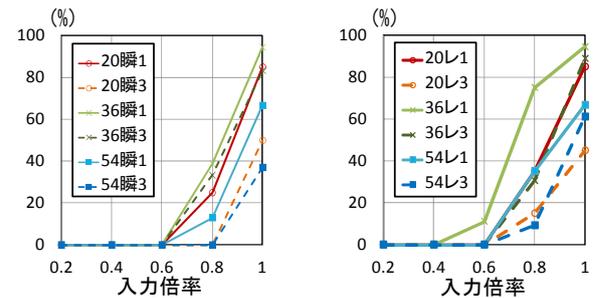
(b) レイリー型 (20階建)



(c) 瞬間剛性比例型 (54階建)

(d) レイリー型 (54階建)

図-13 家具の滑り被害階率



(a) 瞬間剛性比例型減衰

(b) レイリー型減衰

図-14 仕上げ材の被害階率

5. 室内応答値による被害推定の考察

5.1 室内応答値による家具の被害推定

家具の転倒被害と滑り被害について被害階率と入力倍率の関係を図-15(a), (b)に示す。

家具の転倒被害は、比較的高さの低い超高層建築物において発生しやすく、階数による違いが大きいことがわかる。また、家具の滑りによる被害は階数による大きな違いは見られない。高次モードの減衰が小さいレイリー型の減衰では、家具の転倒被害の発生階が著しく増大することがわかる。

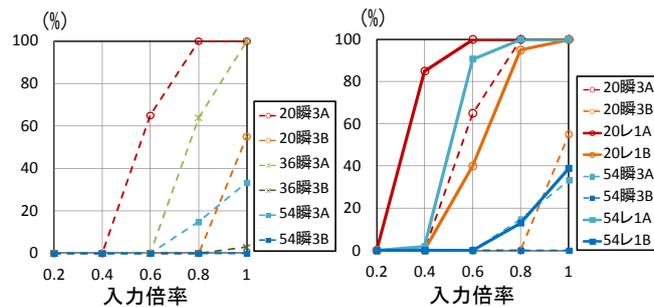
5.2 層間変形角による仕上げ材の被害推定

仕上げ材の被害階率と入力倍率の関係を図-15(c)に示す。

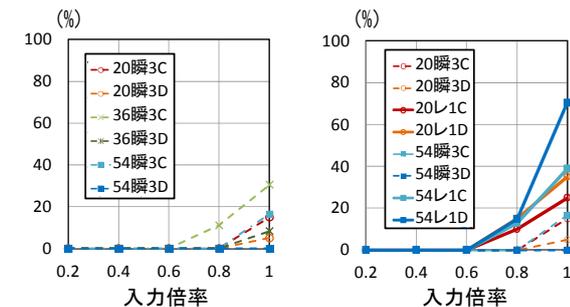
仕上げ材の被害階率は、家具の被害階率と同様に、レイリー型の減衰では、増大することがわかる。

5.3 最大室内被害推定

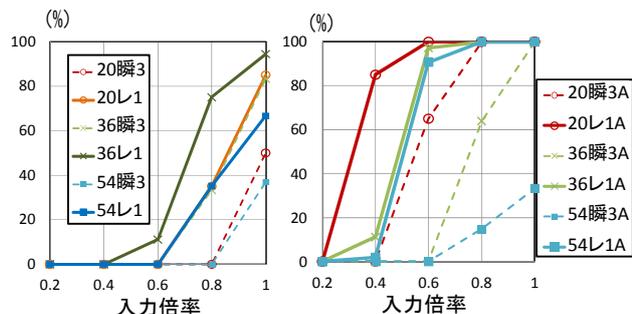
家具及び仕上げ材の被害階率の最大値を室内被害階率として図-15(d)に示す。



(a) 室内の転倒被害階率



(b) 室内の滑り被害階率



(c) 仕上げ材の被害階率 (d) 室内被害階率

図-15 室内被害の推定

室内被害階率は、被害が発生する階の比率を示すが、階数の小さい超高層建築物で大きい傾向がある。階数の多い超高層建築物では、減衰の設定が室内被害階率に及ぼす影響が大きいことがわかる。

6. まとめ

超高層 RC 造建築物を対象に入力の大きさをパラメータとして時刻歴応答解析を行い、最大応答値を用いて室内被害を推定した。その結果、本解析の範囲内であるが、以下の知見を得た。

- (1) 床の応答加速度は上層階が大きく、床の等価振動数は上層階が小さい傾向がある。
- (2) 層間変形角は中間層が大きく、上下階が中間階に比べて小さい傾向がある。
- (3) 家具の転倒被害は、上層階で生じ易く仕上げ材の損傷は中間階で生じ易い傾向がある。また、家具の滑り量は上層階で大きい。
- (4) 設計減衰（瞬間剛性比例型減衰， $h_1=3\%$ ）の場合、中地震相当（0.2~0.4倍）の入力では、家具や仕上げ材の被害は比較的小さいと推定できる。
- (5) 高次モードの減衰を小さく評価した場合、家具の転倒被害が大きくなり、室内被害は増大する傾向が顕著である。

今後、室内被害判定基準を検討する上で、内部粘性減衰の設定が最も重要な課題である。

謝辞

本研究は、国土交通省建設技術研究開発「地震時の超高層建物の室内安全対策技術の開発」の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) 和泉信之ほか：超高層 RC 造住宅の内部粘性減衰と地震応答の評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.29, No.3, pp.1015-1020, 2007
- 2) 和泉信之ほか：内部粘性減衰の違いによる超高層 RC 造骨組の地震応答の変動，コンクリート工学年次論文集，Vol.31, No.2, pp.883-888, 2009
- 3) 金子美香ほか：地震時における家具転倒率の簡易推定法の提案，日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2 分冊，pp.61-62, 2003
- 4) 日本建築学会：長周期地震動対策に関する公開研究集会，pp.187-236, 2011
- 5) 日本建築学会：非構造部材の耐震設計施工指針・同解説および耐震設計施工要領，322pp., 2003