

論文 制振補強による超高層 RC 造建築物の地震時室内被害の低減効果

佐藤 綾子*¹・濱田 聡*²・秋田 知芳*³・和泉 信之*⁴

要旨: 超高層 RC 造建築物の一般的な耐震設計では、家具の転倒などの室内被害については検討されないことが多く、その推定方法や被害判定の基準値が求められている。そのため、著者らは超高層 RC 造建築物の時刻歴応答解析による室内応答値から室内被害を推定する方法を研究している。本研究では、建物高さが異なる超高層 RC 造住宅を対象として、制振部材の補強量に応じた室内応答値を評価し、地震時室内被害の低減効果を考察する。制振部材は粘性系ダンパーと履歴系ダンパーの 2 種類を設定する。その結果、制振補強により室内応答値に対する内部粘性減衰の影響が抑制され、地震時室内被害を低減できることが分かった。

キーワード: 超高層建築物, 鉄筋コンクリート造, 時刻歴応答解析, 地震時応答, 室内被害, 制振補強

1. はじめに

超高層鉄筋コンクリート造（以下、RC 造）建築物の耐震設計では、骨組に関する耐震安全判定基準を設けているが、一部の免震構造を除き、地震時の家具の転倒や滑りなどの室内被害判定の基準は設けられていない。

しかし、近年巨大地震の発生が危惧され、超高層建築物の安全性が注目されている。既存超高層 RC 造の用途は集合住宅が主であるため、耐震安全性とともに地震時の居室における家具の転倒や滑りといった室内安全性に対する検討が求められている。実際、2011 年に発生した東北地方太平洋沖地震では、超高層 RC 造住宅において家具の転倒や滑りなどの被害が生じている。そのため、著者らは超高層 RC 造建築物の時刻歴応答解析による室内応答値から室内被害を推定する方法を研究している。既往の文献¹⁾では、建物高さが異なる超高層 RC 造住宅を対象とし、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った。その応答値から家具の転倒被害や滑り量の生じ易さを評価して室内被害の発生傾向について報告した。その際、内部粘性減衰の設定が被害推定結果に大きく影響するということを指摘した。なお、超高層 RC 造住宅の室内被害推定に用いる内部粘性減衰については、地震観測結果などを用いて現在研究中であり、その設定方法について一般的な結論は得られていない。

本研究では、室内被害対策の観点から既存建築物にも適用可能な制振部材を用いて、超高層 RC 造建築物の室内被害を低減する方法について検討する。制振部材は粘性系ダンパーと履歴系ダンパーの 2 種類を設定する。対象建築物は、既往の研究¹⁾と同様に建物高さが異なる超高層 RC 造住宅とする。

地震時室内被害の評価は、最大応答値を用いて、既往の研究¹⁾と同様に被害推定法²⁾に基づき室内被害を推定

するとともに、新たに重み付けをした 3 段階の指標値を用いて評価を行う。この被害推定法は、既往の研究³⁾において過去の地震時室内被害の発生割合と概ね良く対応する結果が得られている。また、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推定する。

2. 室内安全評価

2.1 家具の被害推定

(1) 家具の被害推定方法

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を評価する方法として、既往の簡易推定法^{2),3)}を用いる（図-1）。

転倒と滑りは、転倒限界加速度 (A_0) と滑り開始加速度 (A_S) の内、小さい方の現象が先行して生じる。 A_0 の方が小さい場合には、家具の転倒が生じ、床応答加速度 (A_{max}) と A_0 及び転倒率 50% の加速度 (A_{R50}) の大小関係から、転倒可能性の高低を判断する。

また、 A_S の方が小さく、 A_{max} が A_S より大きい場合に家具の滑りが生じるものとし、その家具の滑り量 (δ_S) がその家具の限界滑り量 (δ_0) 以上となる場合に滑り被害が生じるとする。なお、 A_{R50} 、 A_0 と δ_S は、文献 2) に示す式（図-1）により算定する。

仕上げ材の損傷は、層間変形角 (R) が損傷度 1 の値以上のときに被害が生じる⁴⁾（表-1）とされるが、2011 年の東北地方太平洋沖地震によるクロス切れの実状を考慮し⁵⁾、限界層間変形角 (R_1 , R_2) を 1/150 と 1/300 の 2 段階で設定し、層間変形角が限界層間変形角以上の場合に被害が生じるとする。

(2) 家具転倒被害指標値

超高層建築物における家具の転倒被害の発生を示す指標値を定義する。最大加速度と等価振動数の値で 0, 0.5,

*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 大学院工学研究科 建築・都市科学専攻 博士後期課程 (戸田建設) (正会員)

*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)

1.0の3段階に点数化する。

(3) 家具滑り被害指標値

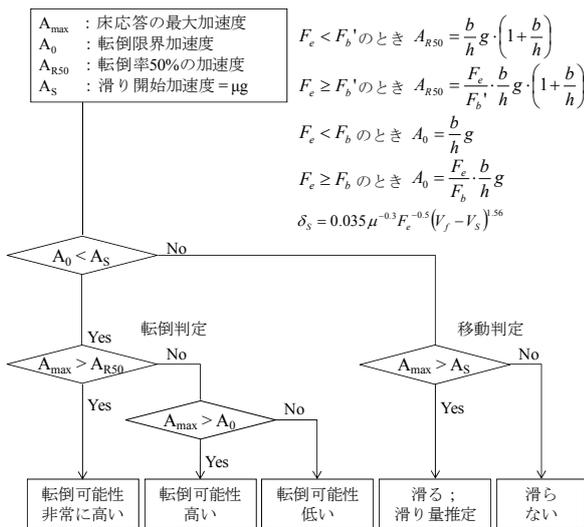
超高層建築物における家具の滑り被害の発生を示す指標値を定義する。限界滑り量 (δ_1, δ_2) を設定し、指標値を 0, 0.5, 1.0 の3段階に点数化する。限界滑り量 (δ_1, δ_2) は、それぞれキャスター有の家具では 100cm と 50cm, キャスター無の家具では 20cm と 10cm と設定する。

2.2 仕上げ材被害指標値

超高層建築物における仕上げ材の損傷被害を示す指標値を定義する。層間変形角が R_1 以上のとき 1.0, R_2 以上のとき 0.5, 以外を 0 として3段階で点数化する。

2.3 室内被害の発生率

室内被害の推定は2階以上の住戸階で行い、被害発生率は対象階の指標値の合計を対象階数で除した値とする。20階建では、住戸階数は19階であり、住戸階の指標値の合計の最大値は19、被害発生率は100%となる。なお、各階の指標値は図-1に示す家具の転倒判定のグレードに合わせて3段階としている。



ここで、記号は文献2)による。
 b : 家具の幅 (cm), h : 家具の高さ (cm), g : 重力加速度 (cm/s^2),
 μ : 摩擦係数, F_e : 等価振動数 (Hz),
 A_{R50} : 家具の転倒率 50% の加速度 (cm/s^2), A_0 : 家具の転倒限界加速度 (cm/s^2)
 A_S : 滑り開始加速度 (cm/s^2), δ_s : 家具の滑り量 (cm)
 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

表-1 外装材およ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		

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⁶⁾とする(表-2)。

3.2 内部粘性減衰の設定

現状では一般的な結論が得られていないため、骨組の耐震設計に慣用的に用いられている瞬間剛性比例型減衰(1次減衰定数 $h1=3\%$, 設計減衰)の他に、高次モードの減衰が小さいレイリー型減衰 ($h1=h2=1\%$) を用いる。また、常時微動観測結果などでは内部粘性減衰は剛性比例型減衰に比べて小さい傾向が得られているため、レイリー型減衰では、 $h1$ を 1% として設計減衰に比べて低次モードから高次モードまで減衰を小さく設定する。

3.3 制振部材の設定

本研究においては、粘性系ダンパーと履歴系ダンパーの2種類に対して、各層に配置する制振部材の個数をパラメータとして設定し、地下階とPHを除く各層に配置する。なお、各層における室内被害の低減効果を評価するため、各層のダンパーは同一の個数とする。粘性系ダンパーはオイルダンパーを想定したMaxwellモデルとし、その諸元を図-2に示す。履歴系ダンパーは低降伏点鋼パネルを想定したせん断ばねとして、その諸元を図-3に示す。履歴法則は標準トリリニア型とする。なお、ダンパーは制振効率の良い層間ダンパーとして扱い、取付け部および骨組の付加変形は無視したため、実際の補強計画については別途検討が必要である。

表-2 解析対象建築物の諸元⁶⁾

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
Qc/ΣW	0.055	0.033	0.026
Qy/ΣW	0.248	0.145	0.098
k_2/k_1	0.221	0.269	0.240
k_3/k_1	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, Qc, Qy: 1階層せん断力の第1折点, 第2折点, ΣW: 建物全重量, k_1, k_2, k_3 : 1階の第1剛性, 第2剛性, 第3剛性

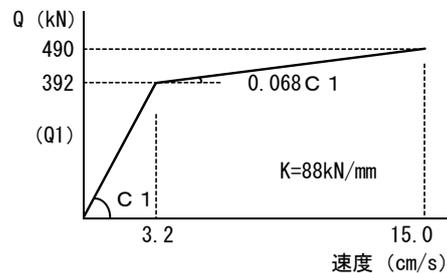


図-2 粘性系ダンパーの諸元

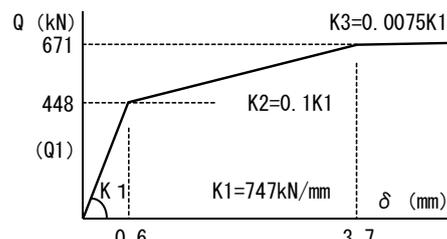


図-3 履歴系ダンパーの諸元

3.4 解析ケース

解析ケースは、階数、内部粘性減衰、家具の種類、制振部材、入力地震動の強さをパラメータとして設定する。家具は転倒検討用として転倒限界加速度が異なる、プロポーションの違うものを2種類、滑り検討用は摩擦係数の異なるキャスター有とキャスター無の2種類を設定する(表-3)。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。

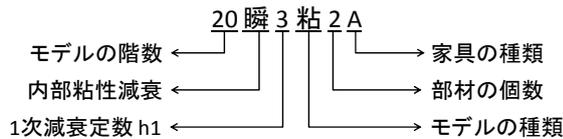
表-3 室内家具の諸元

種類	詳細	b/h	μ	A_0	A_{R50}	A_s	F_b	F_b'
A	転倒家具1 書棚	0.18	0.30	176	208	-	1.17	0.91
B	転倒家具2 和ダンス	0.27	0.30	265	336	-	1.15	0.81
C	滑り家具1 キャスター有	0.4	0.05	-	-	49	-	-
D	滑り家具2 キャスター無	0.4	0.20	-	-	196	-	-

注) b/h: 家具の幅を高さで除した値, 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階建モデル解析ケース

減衰・h1	制振種類	各層に配置する個数			
		2個	4個	8個	16個
瞬間剛性比例型・3%	粘性系	20瞬3粘2	20瞬3粘4	20瞬3粘8	20瞬3粘16
	履歴系	20瞬3履2	20瞬3履4	20瞬3履8	-
レイリー型・1%	粘性系	20レ1粘2	20レ1粘4	20レ1粘8	20レ1粘16
	履歴系	20レ1履2	20レ1履4	20レ1履8	-



注) モデルの種類: (基本・粘性系・履歴系)

3.5 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型モデルとする。曲げばねは弾性、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(除荷時剛性低下指数 0.4) (図-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を0.2刻みで1.0倍まで変化させる。

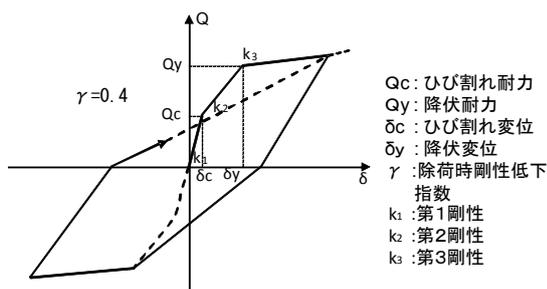


図-4 TAKEDA モデル

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 基本モデル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

20階基本モデル(設計減衰)の各階床の最大加速度値(A_f)と各階の最大層間変形角(R)を図-5に示す。最大加速度は、上層階で大きい傾向がある。層間変形角は中間層で比較的大きくなっている。

(2) 家具の転倒被害

20階基本モデルの家具転倒被害発生率を図-6(a)に示す。家具転倒被害発生率は、設計減衰の入力倍率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。家具Bの家具転倒被害発生率は家具Aに比べて小さい。家具転倒被害発生率は、減衰の設定により大きく異なり、レイリー型減衰では設計減衰に比べて家具転倒被害発生率が高い。

(3) 家具の滑り被害

20階基本モデルの家具滑り被害発生率を図-6(b)に示す。家具滑り被害発生率は、入力倍率0.6以下では比較的小さい値であり家具の滑り被害が発生する可能性は小さい。家具C、家具Dとも入力倍率0.8での家具滑り被害発生率は減衰の設定により大きく異なっている。

(4) 仕上げ材の被害

20階基本モデルの仕上げ材被害発生率を図-6(c)に示す。仕上げ材被害発生率は、入力倍率0.4以下では概ね0であり、被害が発生する可能性は小さい。

(5) 高さ方向の被害傾向

20階基本モデルにおける上層、中層、低層それぞれの被害発生率を図-7に示す。家具の転倒被害や滑り被害は上層階や中層階、仕上げ材の被害は中層階や低層階に発生しやすい傾向があり、超高層住宅の地震時室内被害事例の傾向⁷⁾と概ね対応する。

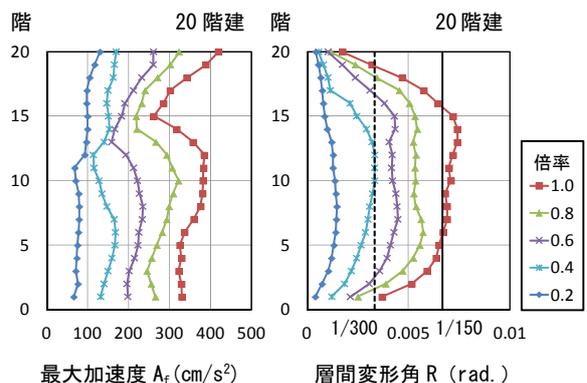


図-5 最大加速度と層間変形角

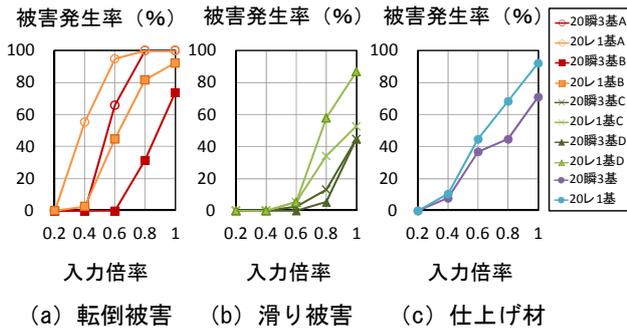


図-6 被害発生率

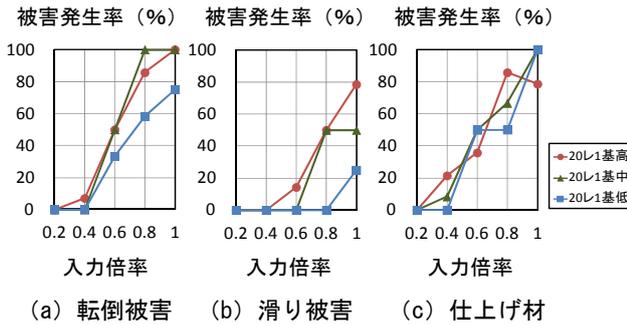


図-7 高さ方向の被害発生率

4.2 粘性系モデルによる建築物の応答値と室内被害

(1) 床最大応答値と等価振動数

20階粘性系モデル（設計減衰）の入力倍率1.0での各階床の最大加速度値（ A_f ）と最大層間変形角（ R ）を図-8に示す。最大加速度は、基本モデルと比べて、ダンパー数の増加に伴い減少し、最大30%程度減少していることが分かる。最大層間変形角は中層階などに低減が見られ、 R_1 を下回っている。

(2) 累積エネルギー吸収率

入力倍率1.0での代表変形角（ R_T ）の低減比と粘性系ダンパーが吸収した累積エネルギー量の入力エネルギー量に対する比率（累積エネルギー吸収率）の関係を図-9に示す。ここで、代表変形角（ R_T ）は重心位置相当の階（建物高さの2/3程度の位置）の水平変位をその高さで除した値とする。各層に配置する制振部材の個数が増加するにつれて、累積エネルギー吸収率は増加し、 R_T も減少していることが分かる。また、レイリー型減衰では、瞬間剛性比例型減衰に比べてダンパーの累積エネルギー量が大きいことが分かる。

(3) 家具の転倒被害

粘性系モデルの家具転倒被害発生率を図-10に示す。家具転倒被害発生率の大きいレイリー型減衰においては、家具転倒被害発生率は基本モデルに比べ小さくなっている。また、入力倍率0.6では、レイリー型（ $h_1=1\%$ ）における家具転倒被害発生率の低減が顕著である。転倒被害の発生しやすい高層階における家具転倒被害発生率は、粘性系ダンパーの数を増やすことで被害が低減している

ことが分かる。

(4) 家具の滑り被害

粘性系モデルの家具滑り被害発生率を図-11に示す。家具滑り被害発生率は、入力倍率0.6以下では概ね0であり、滑り被害が発生する可能性は小さい。また、入力倍率0.8以上においても基本モデルに比べ家具滑り被害発生率は小さくなっており、粘性系ダンパーによる被害低減効果があるといえる。

(5) 仕上げ材の被害

仕上げ材の被害の指標値を図-12に示す。入力倍率0.6以上においても基本モデルに比べ指標値は概ね低減しており、粘性系ダンパーは効果があるといえる。

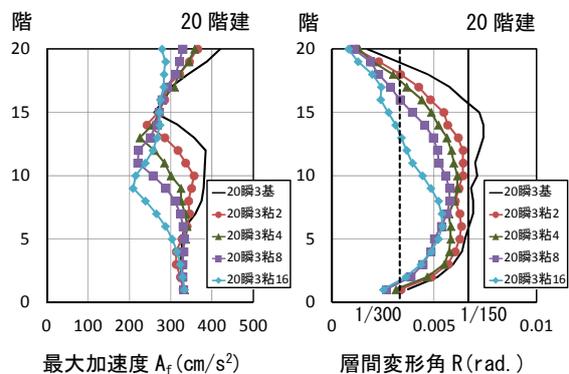


図-8 最大加速度と層間変形角

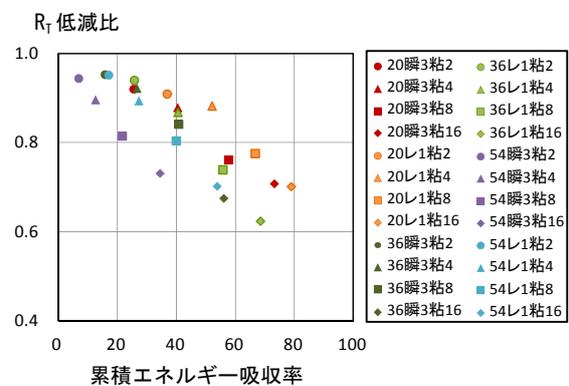


図-9 R_1 低減比—累積エネルギー吸収率

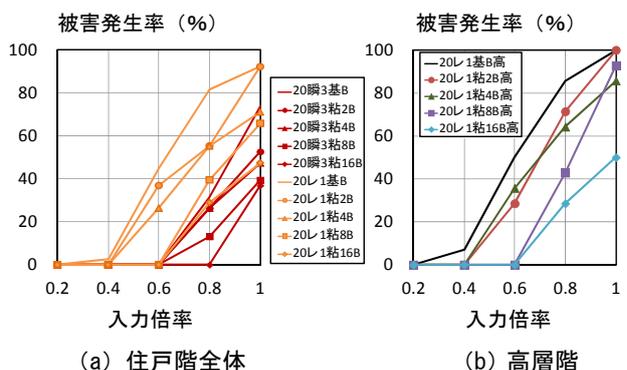
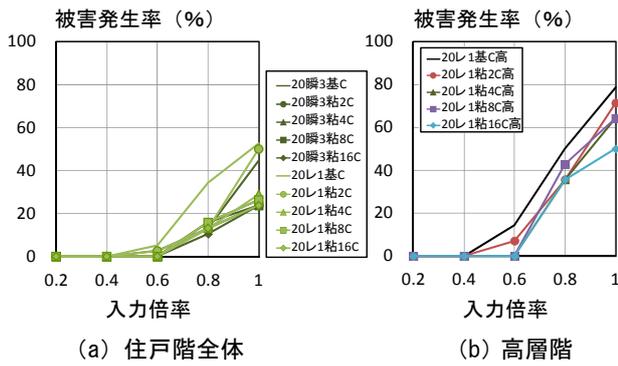
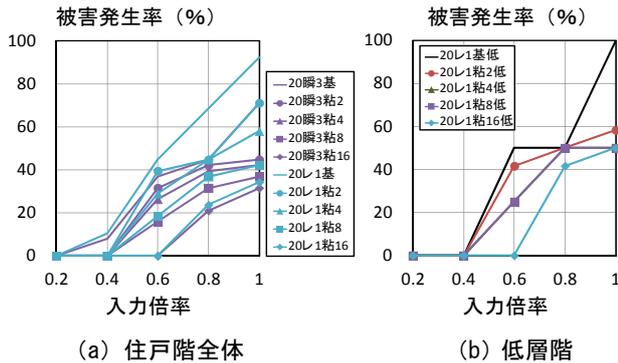


図-10 家具転倒被害発生率



(a) 住戸階全体 (b) 高層階
図-1-1 家具滑り被害発生率



(a) 住戸階全体 (b) 低層階
図-1-2 仕上げ材被害発生率

家具滑り被害発生率は、入力倍率 0.6 以下では概ね 0 であり、滑り被害が発生する可能性は小さい。また、入力倍率が増加すると、履歴系ダンパー数を増やすのに伴い、滑り被害発生率はほぼ低減されている。

(5) 仕上げ材の被害

仕上げ材被害発生率を図-1-7に示す。仕上げ材被害発生率は、入力倍率 0.4 以下では概ね 0 であり、仕上げ材の被害が発生する可能性は小さい。

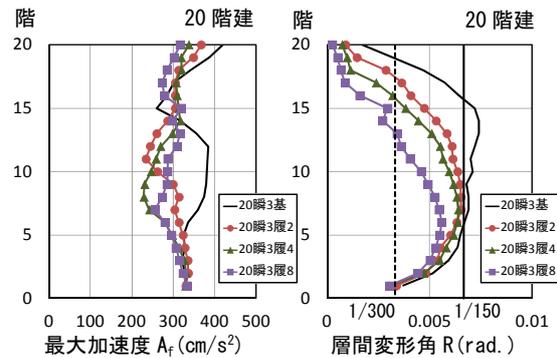


図-1-3 最大加速度と層間変形角

表-6 1次固有周期(履歴モデル)(単位:秒)

	20基	20層2	20層4	20層8	36基	36層2	36層4	36層8	54基	54層2	54層4	54層8
T_1	1.32	1.05	0.90	0.74	2.27	1.90	1.69	1.42	3.49	3.13	2.88	2.52

4.3 履歴系モデル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

20階履歴系モデル(設計減衰)の入力倍率 1.0 での各階床の最大加速度 (A_f) と最大層間変形角 (R) を図-1-3に示す。最大加速度は、基本モデルと比べてダンパー数の増加に伴い減少し、最大 25%程度減少しているが、増加している階がある。層間変形角もダンパー数の増加に伴い大幅に減少している。また、各履歴系モデルの弾性 1 次固有周期(表-6)は、基本モデルに比べて 10~40%程度短くなっている。このため、剛性が增大し、層間変形角が大幅に減少しているが、加速度については逆に増大する階がある。

(2) 累積エネルギー吸収率

入力倍率 1.0 での代表変形角 (R_f) の低減比と履歴系ダンパーの累積エネルギー吸収率の関係を図-1-4に示す。各層に配置する履歴系ダンパーの個数が増加するにつれて、累積エネルギー吸収率は増加し、 R_f も概ね減少していることが分かる。

(3) 家具の転倒被害

履歴系モデルの家具転倒被害発生率を図-1-5に示す。家具転倒被害発生率は、設計減衰の入力倍率 0.4 以下では 0 であり、転倒被害が発生する可能性は小さい。履歴系ダンパーの個数が増加するにつれて、被害が発生しやすい高層階でも被害が低減している。

(4) 家具の滑り被害

履歴系モデルの家具滑り被害発生率を図-1-6に示す。

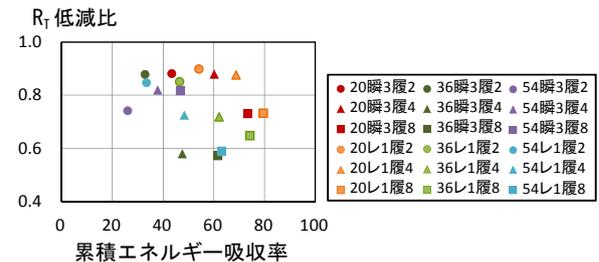


図-1-4 R_f 低減比-累積エネルギー吸収率

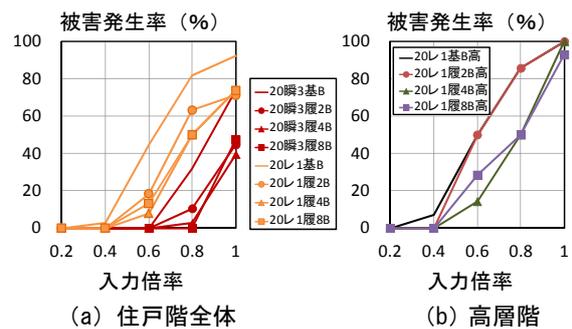


図-1-5 家具転倒被害発生率

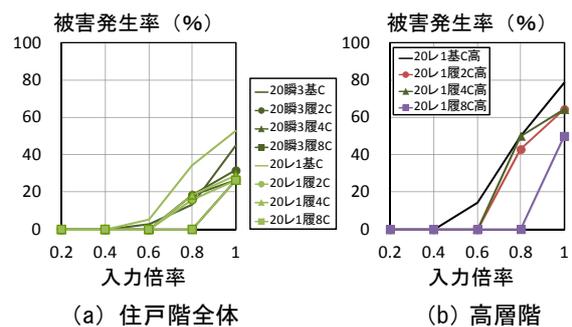


図-1-6 家具滑り被害発生率

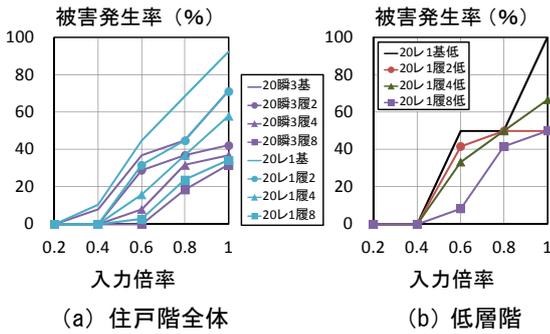


図-17 仕上げ材被害発生率

5. 制振補強による室内被害の低減効果

被害低減効果（被害発生率の差）と入力倍率の関係を図-18に示す。ここでは、レイリー型減衰で累積エネルギー吸収率が概ね60%のダンパーを示す。入力倍率が大きくなるに伴い、被害の低減効果が大きくなるのが分かる。また、家具の転倒被害は、入力倍率が0.8以上と大きい場合には低減効果に限界がある。

被害低減効果と累積エネルギー吸収率の関係を図-19に示す。ここでは、レイリー型減衰で入力倍率が0.6の場合を示す。ダンパーの累積エネルギー吸収率が增大するに伴い、家具転倒や仕上げ材の被害低減効果が大きくなるのが分かる。また、家具の滑り被害には、ダンパーによる被害低減効果に限界が見られる。

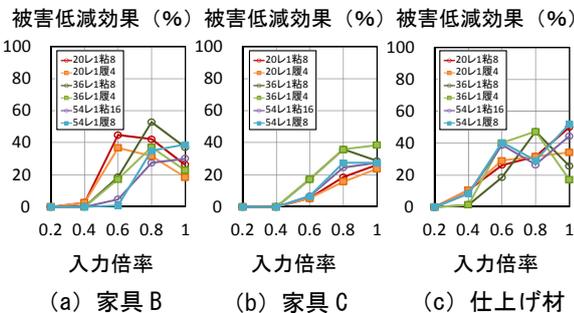


図-18 被害低減効果-入力倍率

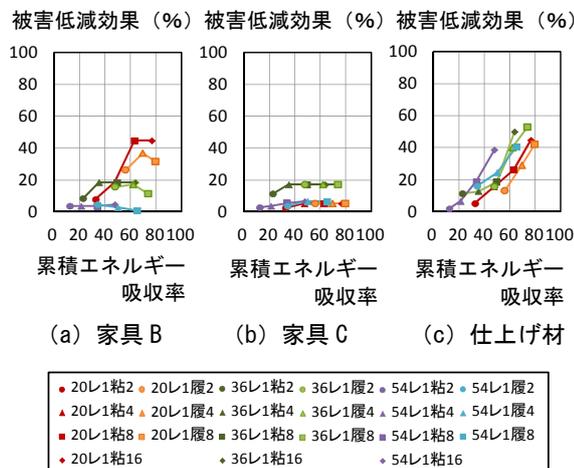


図-19 被害低減効果-累積エネルギー吸収率

6. まとめ

超高層 RC 造の室内被害の低減効果を検討した。その結果、本解析の範囲内であるが、以下の知見を得た。

- (1) 床応答加速度の低減効果には、粘性系ダンパーが有効であり、履歴系ダンパーの効果は粘性系ダンパーに比べて本解析ではやや小さい傾向がある。
- (2) 層間変形角の低減効果には、粘性系ダンパーや履歴系ダンパーとも有効であり、履歴系ダンパーの効果は本解析ではやや大きい傾向がある。
- (3) ダンパーによる室内被害の低減効果は、地震入力が大きくなるに伴い、大きくなる。なお、家具の転倒被害については、地震入力大きい場合には被害低減効果に限界が見られる。
- (4) ダンパーの累積エネルギー吸収率が增大するに伴い、家具転倒や仕上げ材の被害低減効果が大きくなる。なお、家具の滑り被害には、ダンパーによる被害低減効果に限界が見られる。
- (5) ダンパーによる室内被害の低減効果は、内部粘性減衰の設定によらず得られているが、定量的な評価には高次モードの減衰設定が重要である。

なお、内部粘性減衰の設定と実被害との対応や効果的な制振ダンパーの補強計画は今後の課題としたい。

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。また、千葉大学和泉・秋田研究室の卒業生の中込雄介氏の多大な協力に深甚なる謝意を表す。

参考文献

- 1) 新井一樹ほか：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.2，pp.793-798，2012.7
- 2) 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
- 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：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，2003.1
- 5) 山根義康ほか：首都圏に建つ超高層集合住宅における室内被害状況と建物応答との対応，日本地震工学会梗概集，pp.32-33，2012.11
- 6) 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
- 7) 日経 BP 社：日経アーキテクチャ，p.68，2012.3.