

論文 免震・制振構造による超高層 RC 造住宅の地震時室内被害の低減

中込 雄介*¹・濱田 聡*²・秋田 知芳*³・和泉 信之*⁴

要旨: 超高層 RC 造住宅の耐震設計では、家具の転倒などの室内被害については通常検討されないことが多い。そのため、本研究では免震・制振構造による超高層 RC 造住宅の地震時室内被害を推定し、耐震構造に対する低減効果を考察する。一般的な耐震構造の他に、免震・制振構造を採用した 30 階建 RC 造住宅を対象に時刻歴応答解析を行い、家具の転倒率や滑り量などを算出して地震時室内被害の発生状況を評価した。その結果、耐震構造に比べて免震構造では室内被害を大幅に低減できるが、制振構造では制振部材の設置数に住宅計画上の制約がある場合に、低減効果が限定されることが分かった。

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, 室内被害, 免震構造, 制振構造

1. はじめに

通常の超高層鉄筋コンクリート造(以下、RC 造)住宅の耐震設計では、骨組に関する耐震安全判定基準を設けているが、地震時の家具の転倒や滑りなど、室内安全性に関する明確な設計要件は規定されていない。しかし、近年、大規模な地震の発生が危惧されており、耐震安全性と共に、地震時の室内安全性の検討が求められている。

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応答値から室内被害を推定し、その被害を低減する方法を研究している。既に、超高層 RC 造住宅を対象として、入力地震動の大きさをパラメータとした時刻歴応答解析を行い、その応答値から家具の転倒・滑り被害の発生傾向について報告した¹⁾。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ことを指摘した。次に、粘性系ダンパーと履歴系ダンパーを用いた制振補強について、その補強量に応じた室内被害の低減効果を考察した。その結果、相当量の制振補強を行うことで低減効果が得られ、内部粘性減衰の設定が被害推定結果に与える影響を抑制できることを示した²⁾。

そこで室内被害の低減方法に関する研究をさらに進めるため、本研究では免震・制振構造による超高層 RC 造住宅の地震時室内被害を推定し、耐震構造に対する低減効果を考察する。30 階建 RC 造住宅を対象として一般的な耐震構造の他に、免震構造および制振構造を採用した構造計画を行い、時刻歴地震応答解析により室内応答値を算出する。この応答値から、既往の簡易推定法^{3),4)}を用いて家具の転倒率や滑り量などを算出し、耐震・免震・制振構造における地震時室内被害の発生状況を比較検討する。また、耐震構造の室内被害評価に大きな影響を与える内部粘性減衰の設定や地震波の違いが室内被害の推定結果に与える影響を考察する。

2. 室内安全評価

2.1 家具の被害推定

(1) 家具の転倒率

地震時における家具の転倒率 R を既往の簡易推定法³⁾により次式から算出する。

$$R = \alpha \cdot \Phi((\ln A_{\max} - \lambda)/\zeta) \quad (1)$$

$$e^{\lambda} = \begin{cases} B/H \cdot g(1+B/H) & F_e \leq F'_b \\ 10B/\sqrt{H}(1+B/H)^{2.5} \cdot 2\pi F_e & F_e > F'_b \end{cases} \quad (2)$$

$$F_e = A_{\max}/(2\pi V_{\max}) \quad (3)$$

$$F'_b = 15.6/\sqrt{H}(1+B/H)^{-1.5} \quad (4)$$

R は式(1)より関数 Φ に滑りの影響を表す係数 α を乗じて算出する。 Φ は床応答最大加速度 A_{\max} の対数正規分布であり、 λ は平均値、 ζ は標準偏差である。 α と ζ は文献 3)を参考に $\alpha=0.8$ 、 $\zeta=0.5$ として設定する。 λ は床応答の等価振動数 F_e と対象家具の等価振動数 F'_b の大小を比較し、式(2)より家具の幅 B と高さ H 、重力加速度 g から算出する。 F_e は式(3)より A_{\max} と床応答最大速度 V_{\max} から算出し、 F'_b は式(4)より家具の幅と高さから算出する。

(2) 家具の滑り量

地震時における家具の滑り量 δ_s は文献 4)に示される推定式から算出する。

$$\delta_s = 0.035\mu^{-0.3}F_e^{-0.5}(V_{\max} - V_S) \quad (5)$$

$$V_S = \mu g / 2\pi F_e \quad (6)$$

ここで、 μ は床と家具の摩擦係数であり、 V_S は家具が滑り始める速度で式(6)より算出する。

2.2 室内被害の低減効果の定義

免震・制振構造の転倒率または滑り量を、耐震構造の転倒率または滑り量で除した値を室内被害の低減効果として評価する。例えば、耐震構造の転倒率が 80%、免震構造の転倒率が 40%となる場合、低減効果は 50%となる。

*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)

2.3 仕上げ材被害

仕上げ材は、層間変形角が 1/150 より大きいときに被害が生じるとされている⁵⁾。しかし、文献 6)によると、層間変形角が 1/300 を超えたと推定される超高層建築物において内装材に亀裂などの損傷が生じているため、本研究では、この 2 つの値を仕上げ材被害発生の指標として設定し、層間変形角の値を評価する。

3. 解析計画

3.1 解析モデル

(1) 耐震モデル

本研究では、2000 年以降に建設された耐震構造の既存超高層 RC 造建築物の設計時の性能評価シートから構造特性を分析して作成した、30 階建立体フレームモデル⁷⁾を耐震モデルとして用い、X 方向について解析を行う(表 1)。柱・梁の曲げ剛性のスケルトンカーブは、トリリニア型とし、復元力特性は TAKEDA モデル(除荷時剛性低下指数 0.4)とする(図 1)。せん断剛性は、柱・梁ともに弾性とする。柱の軸剛性のスケルトンカーブは、圧縮側をバイリニア型、引張側をトリリニア型とし、復元力特性は原点指向型とする。なお、柱の曲げ-軸力相関関係を考慮する。柱梁接合部の変形は、せん断のみを考慮し、弾性とする。床は剛床仮定とし、基礎はピン支持とする。弾性 1 次固有周期は、約 1.90 秒である。

(2) 免震モデル

免震モデルは、基礎免震として弾性すべり支承 7 基、天然ゴム系積層ゴム 28 基、オイルダンパー 4 基を免震層に配置した構造計画とする。弾性すべり支承は完全弾塑性型、積層ゴムはリニア型、オイルダンパーはバイリニア型の Maxwell モデルとして設定する。免震装置の履歴特性を図 2 (a), (b), (c) に示す。レベル 2 (大地震) 応答時の等価 1 次固有周期は、概ね 3.91~4.72 秒である。

(3) 制振モデル

制振モデルは、耐震モデルを基本として、粘性系ダンパーと履歴系ダンパーを、変形抑制の観点から、それぞれ 2 階から 26 階に 4 基ずつ配置した構造計画とする。粘性系ダンパーには、バイリニア型の Maxwell モデルとしたオイルダンパーを採用する。履歴系ダンパーには、低降伏点鋼を用いたアンボンドブレースと制振間柱の 2 種類を採用する。アンボンドブレースは、バイリニア型の軸ばねとして設定する。制振間柱は、低降伏点鋼パネルを、標準トリリニア型のせん断ばねとして設定する。制振装置の履歴特性を図 2 (d), (e), (f) に示す。レベル 2 (大地震) 応答時の制振装置の累積エネルギー吸収率(制振装置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)を表 2 に示す。弾性 1 次固有周期は、約 1.90 秒(オイルダンパー 4 基)、約 1.83 秒(ア

ンボンドブレース 4 基)、約 1.78 秒(制振間柱 4 基)である。また、図 3 に示すように、住宅計画に制約が生じるが、制振効果を増すためオイルダンパーを 12 基設置したモデルの解析を行う。

3.2 内部粘性減衰の設定

設計時には、内部粘性減衰は瞬間剛性比例型減衰とし、耐震構造や制振構造では 1 次減衰定数 $h_1=3\%$ 、免震構造では $h_1=2\%$ (以下、設計減衰)が慣用的に用いられている。なお、本研究では、 h_1 を 1% から 3% まで変えて設定

表 1 解析対象建築物の諸元

方向	建物高さ (m)	階数	基準階高 (m)	柱芯面積 (m ²)	柱支配面積 (m ²)	スパン長 (m)	スパン数
X	94.6	30	3.1	936	39.0	6	6
Y						6.5	4
方向	塔状比	F _c ^{※1} (N/mm ²)	主筋強度 ^{※2} (N/mm ²)	平均重量 ^{※3} (kN/m ²)		T1 (sec)	C _B
X	2.63	54	490	14.3[11.4]		1.90	0.090
Y	3.64					2.03	

※1: 使用コンクリートの中での設計基準強度 F_c の最大値
 ※2: 使用主筋の中での最大値 ※3: 基準階重量を柱芯面積 (バルコニー含まず) で除した値 ([]内はバルコニーを含んだ面積で除した値)
 T1: 1 次固有周期 C_B: 設計用ベースシア係数

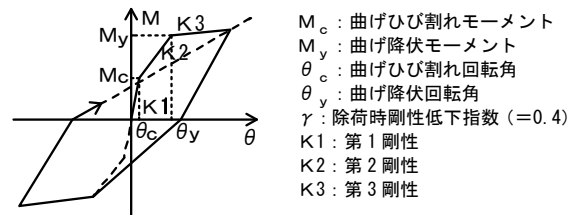


図 1 TAKEDA モデル

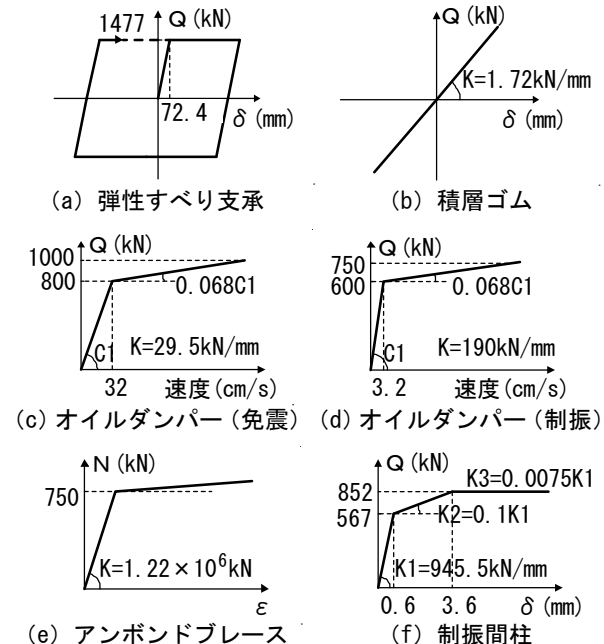


図 2 免震・制振装置の履歴特性

表 2 制振装置の累積エネルギー吸収率

制振モデル	制振装置(4基)の累積エネルギー吸収率(%)	制振装置(12基)の累積エネルギー吸収率(%)
オイルダンパー	33.5	58.0
アンボンドブレース	23.5	—
制振間柱	6.4	—

し、免震構造や制振構造における減衰の設定が室内被害の推定結果に及ぼす影響を考察する。

3.3 解析方法

本研究では、非線形時刻歴応答解析を行う。検討用地震動（表-3）は、レベル2（大地震）相当の模擬波（BCJ-L2）、告示波（CODE BCJ-L2、東京都内の第2種地盤を想定）、既往波3波（El Centro NS, Hachinohe NS, Taft EW、最大速度を50cm/sとして設定）とし、これらを基準に入力地震動の倍率を0.2刻みで1.0倍まで変化させる。解析ケースは、内部粘性減衰、家具の種類、ダンパーの設置数、入力地震動および入力倍率をパラメータとして設定する。家具は転倒検討用と滑り検討用として2種類ずつ設定する（表-4）。

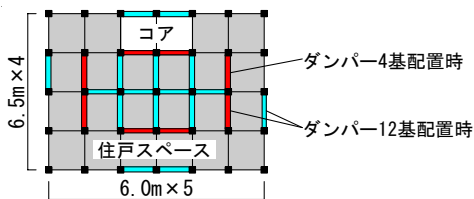


図-3 基準階略平面図とダンパーの配置

表-3 検討用地震動

波形名称	最大加速度 (cm/s ²)	最大速度 (cm/s)	継続時間 (s)
BCJ-L2	356	57	120
CODE BCJ-L2	330	54	120
El Centro NS	509	50	54
Hachinohe NS	332	50	51
Taft EW	503	50	54

表-4 室内家具の諸元

家具	種類	詳細	B/H	μ	F_b' (Hz)
転倒検討用	A	書棚	0.18	0.3	0.91
	B	和ダンス	0.27	0.3	0.81
滑り検討用	C	テレビ台(キャスター有)	0.4	0.05	-
	D	テレビ台(キャスター無)	0.4	0.2	-

4. 解析結果

4.1 床応答加速度と床等価振動数

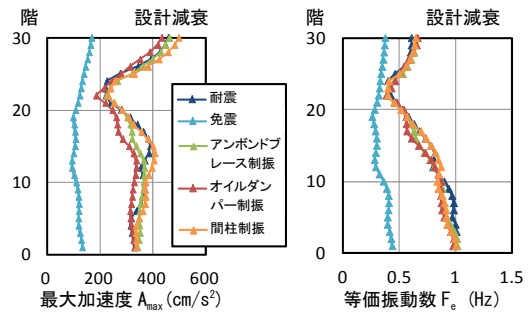
設計減衰における CODE BCJ-L2 入力倍率 1.0（大地震相当）での各階床の最大加速度値 (A_{max}) と等価振動数 (F_e) を図-4 (a) に示す。 A_{max} は、耐震構造に比べて免震構造では 40~75% と大幅に減少しており、高次モードの影響による上層階の応答のばらつきも抑制している。オイルダンパー制振では、中層階を中心に最大 25% 減少し、アンボンドブレース制振も、同様に最大 15% 減少している。しかし、間柱制振では、 A_{max} は耐震構造と差があまり見られない。また、 F_e は、耐震構造や制振構造では上層階で 0.5 程度、下層階で 1.0 程度と下層階で大きくなる傾向がある。一方、免震構造では、高さ方向による差は小さく、全層で 0.3~0.45 程度である。

図-4 (b) に CODE BCJ-L2 入力倍率 0.6（中地震相当）での設計減衰における各階床の最大加速度値 (A_{max})

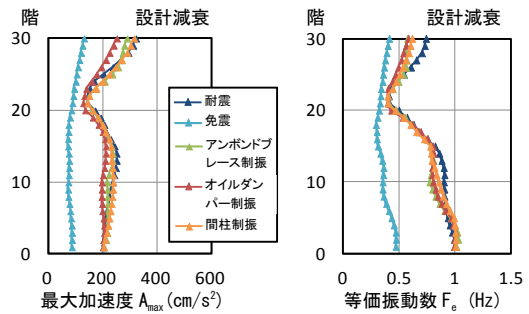
と等価振動数 (F_e) を示す。入力倍率 1.0 の値と比較すると、 A_{max} は、オイルダンパー制振を中心に高次モードの影響が小さくなっている。一方、 F_e はどのモデルにおいても入力倍率 1.0 の値と差が見られない。

4.2 家具の転倒率曲線

家具の転倒率曲線を図-5 に示す。転倒率 (R) は、床応答の F_e が対象家具の等価振動数 (F_b) 以下となる場合、床の A_{max} に依存し、 F_e が F_b より大きい場合、床の応答最大速度 (V_{max}) に依存する。この転倒率曲線から床応答値に対する各家具の転倒率を算出する。

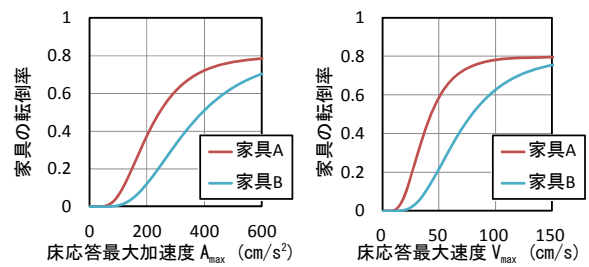


(a) CODE BCJ-L2 入力倍率 1.0



(b) CODE BCJ-L2 入力倍率 0.6

図-4 最大加速度と等価振動数



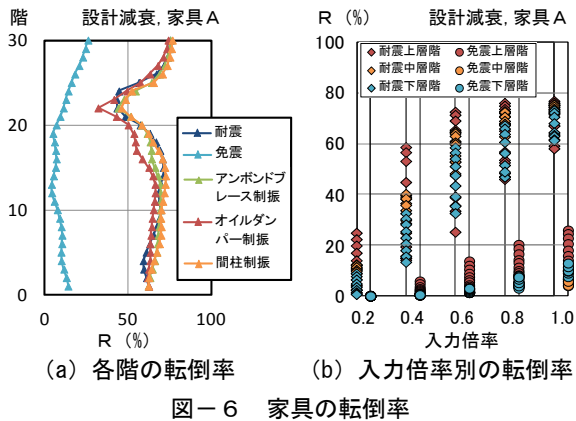
(a) $F_e \leq F_b'$ の転倒率曲線 (b) $F_e > F_b'$ の転倒率曲線

図-5 転倒率曲線

4.3 耐震・免震・制振モデルにおける家具の転倒率

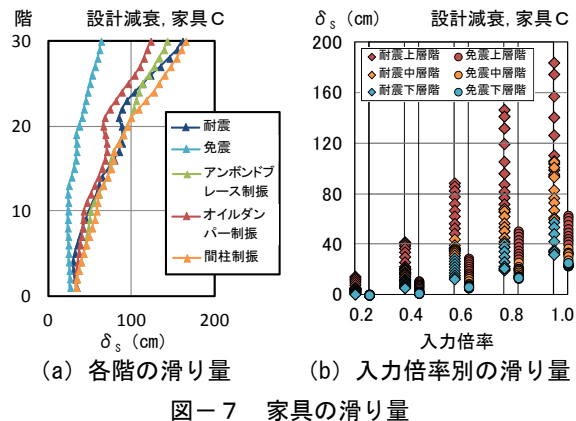
家具 A について設計減衰における CODE BCJ-L2 入力倍率 1.0 での各階の転倒率を図-6 (a) に示す。耐震構造の転倒率は 45%~75% であるのに対して、免震構造では 5~25% であり、割合にして 70~90% 減少している。また、高次モードの影響も抑制している。一方、オイルダンパー制振では、転倒率は最大 20% 減少しているが、履歴系ダンパーによる制振では、転倒率は耐震構造と差があまり見られない。

CODE BCJ-L2 の入力倍率をパラメータとした、上層・中層・下層階別の耐震構造と免震構造の転倒率を、図-6 (b) に示す。入力倍率 0.4~0.6 (中地震相当) において、耐震構造では、転倒率が大きく上昇して各階のばらつきが最も大きくなるが、免震構造では、転倒率は 15% 以下であり、そのばらつきも抑制させている。また、入力倍率 1.0 (大地震相当) において、耐震構造では全階で転倒率が大きくなるが、免震構造では入力倍率 0.2 の耐震構造の転倒率と同程度にまで抑えることができる。



4.4 耐震・免震・制振モデルにおける家具の滑り量

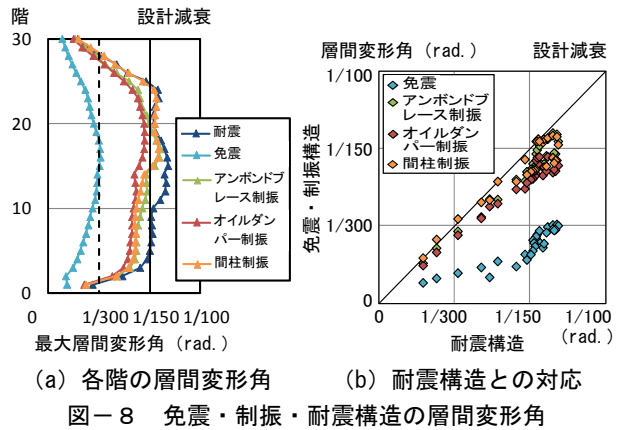
家具 C について設計減衰における CODE BCJ-L2 入力倍率 1.0 での各階の滑り量を図-7 (a) に、上層・中層・下層階別の耐震構造と免震構造の滑り量を図-7 (b) に示す。どのモデルにおいても、階数が高くなるに従い、滑り量が増加する傾向がある。耐震構造と各モデルの滑り量を比べると、滑り量は免震構造では上層、中層階で 30~65% 程度減少しており、オイルダンパー制振も同様に上層、中層階において 10~25% 程度減少している。



4.5 層間変形角と仕上げ材被害

設計減衰における CODE BCJ-L2 入力倍率 1.0 (大地震相当) での最大層間変形角と、各階の最大層間変形角について耐震構造と免震・制振構造の対応を図-8 に示す。耐震構造では、層間変形角が 1/150 以上となる階が大半

を占め、仕上げ材被害が発生する可能性が極めて高い。一方で、免震構造では耐震構造と比べて 55~75% 減少しており、ほぼ 1/300 の値を下回っているため、仕上げ材被害は発生しにくい。また、オイルダンパー制振では最大 25% 減少して、全階で 1/150 の値を下回っている。アンボンドブレース制振や間柱制振では、耐震構造において層間変形角が大きい中層階で最大 20% 減少している。

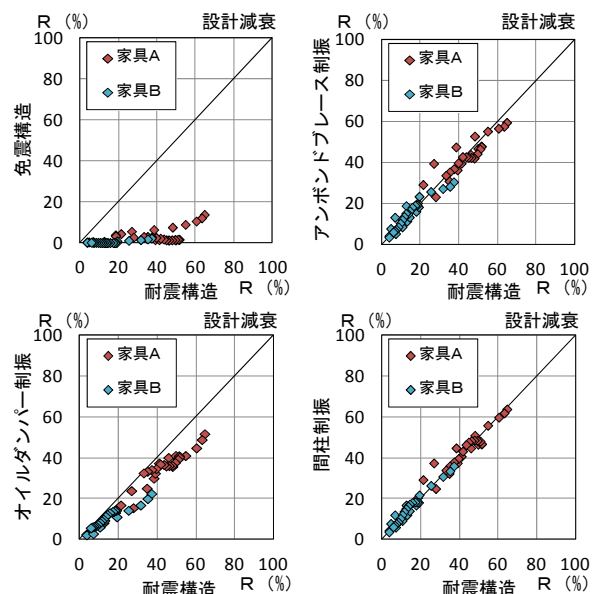


5. 考察

5.1 免震・制振構造による室内被害の低減効果

(1) 家具転倒率の低減効果

設計減衰における CODE BCJ-L2 入力倍率 0.6 (中地震相当) での各階の家具転倒率について、耐震構造と免震・制振構造の対応を図-9 に示す。免震構造では、耐震構造の家具転倒率を 80~95% 低減しており、そのばらつきも大きく抑制している。オイルダンパー制振においても耐震構造の家具転倒率を最大 40% 低減し、さらにダンパーを 12 基設置した場合、最大 70% の低減効果が得られる (図-10)。履歴系ダンパーによる制振においては、耐震構造とほぼ同様であり、低減効果は見られない。



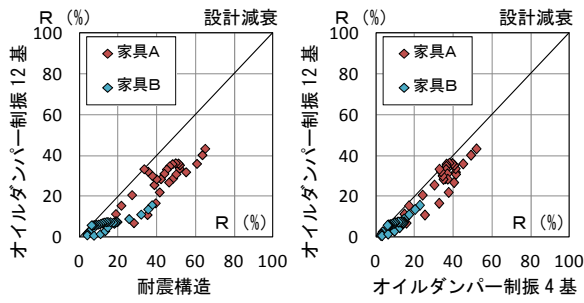


図-10 ダンパー設置数と転倒率の対応

(2) 家具滑り量の低減効果

設計減衰における CODE BCJ-L2 入力倍率 0.6 (中地震相当) での各階の家具滑り量について、耐震構造と免震・制振構造の対応を図-11 に示す。免震構造では、耐震構造の家具滑り量を 50~70%低減できる。しかし、家具 C では、免震構造の滑り量も大きい階がある。これは、図-7 (b) に示すように、免震構造においても、上層階で滑り量が多い傾向があるためである。オイルダンパー制振では、耐震構造の家具滑り量を最大 20%低減しているのに対して、ダンパーを 12 基設置した場合は、最大 45%の低減効果が得られる (図-12)。

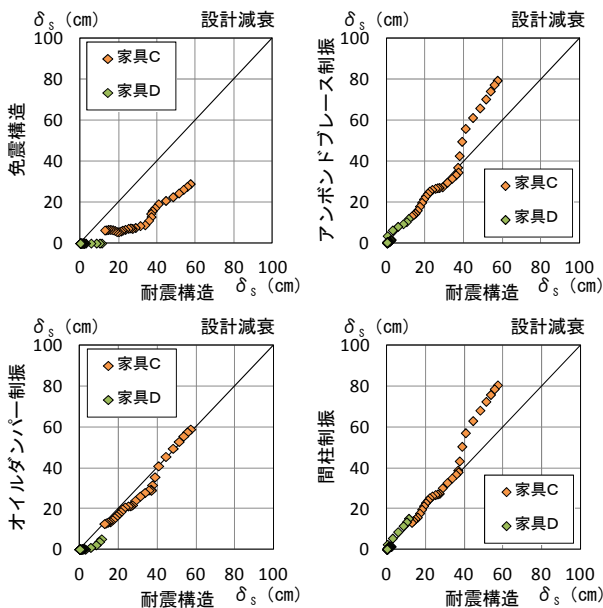


図-11 免震・制振・耐震構造の家具滑り量

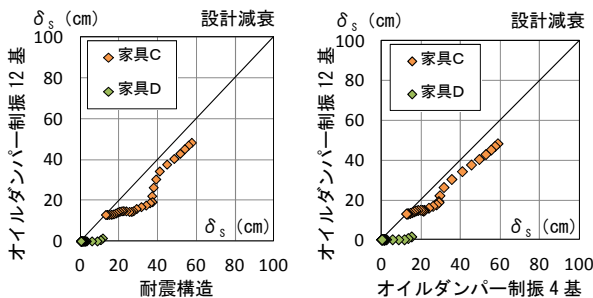


図-12 ダンパー設置数と滑り量の対応

5.2 地震動強さの違いによる被害推定への影響

設計減衰における各階の家具転倒率 (家具 A) と家具滑り量 (家具 C) について、大地震動 (CODE BCJ-L2 入力倍率 1.0) と中地震動 (CODE BCJ-L2 入力倍率 0.6) の値を比較する (図-13, 14)。比較対象は、低減効果が得られた免震構造とオイルダンパー制振とする。免震構造では、家具転倒率は大地震動に対して 5~30%、中地震動に対して 2~15%と小さく、各階のばらつきも小さい。家具滑り量も概ね小さい値ではあるが、大地震動に対して一部の上層階で滑りが生じやすい。オイルダンパー制振では、家具転倒率は大地震動で 35~75%、中地震動で 15~50%であり、耐震構造に比べて 20%程度小さいが、転倒が生じやすい。家具滑り量についても、大地震動に対して耐震構造より 20%程度小さいが、中地震動に対してはあまり差が見られず、滑りが生じやすい。

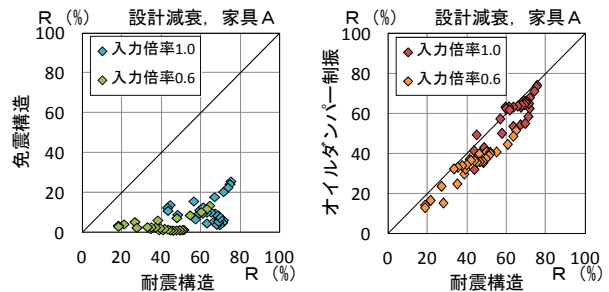


図-13 地震動入力倍率の違いによる転倒率の変化

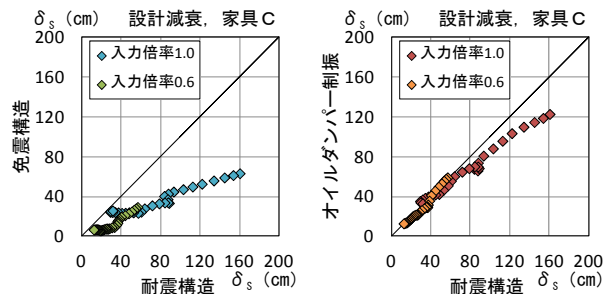


図-14 地震動入力倍率の違いによる滑り量の変化

5.3 内部粘性減衰の設定による被害推定への影響

中地震動 (CODE BCJ-L2 入力倍率 0.4, 0.6) での各階の家具転倒率 (家具 A) と家具滑り量 (家具 C) について、瞬間剛性比例型減衰 $h1=1\%$ と $h1=3\%$ の値を比較する (図-15, 16)。減衰の違いによる家具転倒率の差は、入力倍率 0.6 では、耐震構造で最大 20%、免震構造で最大 7%、制振構造で最大 15%であり、転倒率が小さい免震構造では減衰の設定による影響も小さい。

一方、家具滑り量においては、耐震構造では、入力倍率 0.4 と 0.6 で減衰の違いによる影響が大きく異なる。転倒率同様、滑り量が少ない免震構造では減衰の設定による影響もほとんど見られない。制振構造では、特に入力倍率 0.6 におけるオイルダンパー制振で影響が小さい。

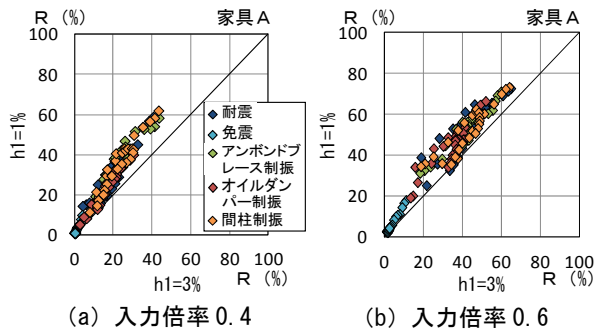


図-15 内部粘性減衰の設定による転倒率の変化

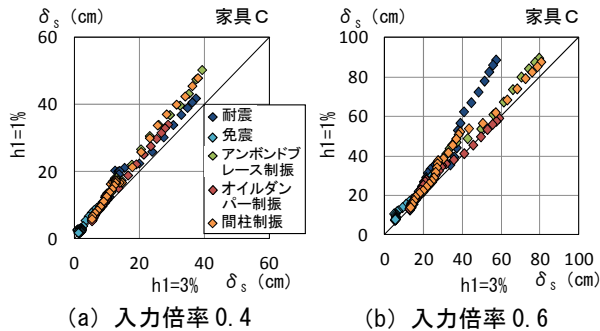


図-16 内部粘性減衰の設定による滑り量の変化

5.4 地震波の違いによる被害推定への影響

瞬間剛性比例型減衰 $h1=1\%$ の各階の家具転倒率 (家具 A) と家具滑り量 (家具 C) について、地震波別 (入力倍率 0.6) の耐震構造と免震構造における比較を図-17 に示す。耐震構造において、家具滑り量は地震波毎に大きく異なり、Hachinohe 波で最大 175cm, Taft 波で最大 58cm と 3 倍程度差が生じている。一方で、免震構造では、家具転倒率は CODE BCJ 波において 15~20% となり、他の地震波と比べて若干増加しているが、転倒率の値自体が小さいため、地震波の違いによる影響も小さいといえる。家具滑り量も同様に、耐震構造と比べて地震波の違いによる影響を抑制している。

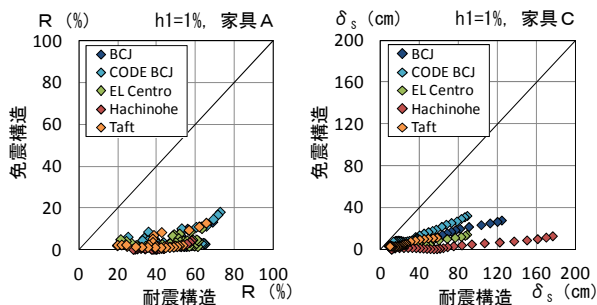


図-17 地震波による転倒率と滑り量の変化

6. まとめ

耐震・免震・制振構造による 30 階建 RC 造住宅の時刻歴応答解析により室内被害を推定した。本解析の範囲内であるが、得られた知見を以下に示す。

- (1) 免震構造では、耐震構造に比べて中地震相当の家具の転倒率を 80~95% 程度、滑り量を 50~70% 程度低減できるので、室内被害を大幅に抑制できる。
 - (2) オイルダンパー制振では、ダンパーを 4 基設置した場合に、耐震構造に比べて中地震相当の家具の転倒率を最大 40%、滑り量を最大 20% 低減できる。
 - (3) 制振構造では、制振部材の設置数に住宅計画上の制約がある場合には室内被害の低減効果が限定される。
 - (4) 耐震・制振構造では中地震以上の地震動に対して室内被害が発生しやすい。免震構造では室内被害は発生しにくい、家具の滑りには注意が必要である。
 - (5) 免震構造は、内部粘性減衰の設定による室内被害推定結果への影響が耐震構造に比べて小さい。
 - (6) 免震構造は、地震波の違いによる室内被害推定結果への影響が耐震構造に比べて小さい。
- 今後、長周期地震動に対する超高層 RC 造住宅の室内被害について研究する予定である。

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。また、千葉大学和泉・秋田研究室の卒論生の福岡徳菜美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, 佐藤綾子, 秋田知芳, 和泉信之: 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) 佐藤綾子, 濱田聡, 秋田知芳, 和泉信之: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.2, pp.829-834, 2013.7
- 3) 金子美香: 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, 2003.9
- 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, 2003.1
- 6) 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
- 7) 秋田知芳, 栗本耕太郎, 五百井壮, 和泉信之: 既存超高層鉄筋コンクリート造建築物の構造特性と骨組モデル, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.2, pp.925-930, 2011.7