

# 論文 既存超高層鉄筋コンクリート造住宅の地震時室内被害の推定

福岡 穂菜美\*1・濱田 聡\*2・林 達哉\*3・和泉 信之\*4

**要旨:** 2011年東北地方太平洋沖地震では多くの超高層RC造住宅において家具の転倒が発生したが、一般に室内被害は耐震設計で規定されていない。そこで本研究では既存超高層RC造住宅を対象として入力地震動の強さに応じた地震時室内被害の発生率を推定するため、設計年代が異なる骨組モデルを用いて地震入力倍率を連続的に増大して時刻歴応答解析を行い、地震時室内応答値から室内被害発生率を算定した。その結果、設計年代による室内被害発生率の違いの有無を明らかにするとともに、階数や内部粘性減衰の影響を考慮して、上・中・下層階における室内被害の発生率曲線を提示した。

**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, 設計年代

## 1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震では、超高層鉄筋コンクリート造（以下、RC造）住宅において、家具の転倒・滑り、内装材の亀裂などの室内被害が数多く報告されている。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室内安全性に関する規定は設けていないことが多い。また、近年では大都市部での大規模な地震の発生が危惧されているが、既存超高層RC造住宅の地震時室内被害の発生は十分には把握されていないため、室内安全性の検討が急務である。

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する方法を研究している（例えば<sup>1)</sup>）。既往の研究では、建物高さが異なる超高層RC造住宅を対象に時刻歴応答解析を行い、その応答値から家具の転倒や滑りの発生傾向について報告した。その際、被害推定結果には、内部粘性減衰の設定が大きく影響することを示した。さらに既存超高層RC造住宅の地震観測結果の分析から、中地震動に対する室内被害推定では減衰定数は耐震設計で用いる値より小さく設定することが望ましいことを指摘した<sup>2)</sup>。

本研究では、地震時室内被害対策に有用な指標として、入力地震動の強さに応じた地震時室内被害の発生率を推定する。そこで、設計年代が異なる既存超高層RC造骨組モデル<sup>3)</sup>を用いて地震入力倍率を連続的に増大して時刻歴応答解析を行い、地震時室内応答値から既存超高層RC造住宅の室内被害発生率を算定する。その結果から、階数や内部粘性減衰の影響を考慮して、上層階・中層階・下層階における地震時室内被害の発生率曲線を評価する。その際、著者らの既往の研究では室内被害の発生を示す指標値を定義し、3段階で点数化を行ったが、本論では

被害の発生率を連続的に評価するため、指標値の点数化を見直し、新たに0~1.0の範囲で定義する。

## 2. 室内安全評価

### 2.1 室内被害の推定方法

地震時における家具の転倒、滑りの評価は既往の簡易推定法<sup>4),5)</sup>を用いる。

#### (1) 家具の転倒率

家具の転倒率 (R) は、以下の式<sup>4)</sup>より算定する。

$$R(A_f) = \alpha \cdot \Phi\left(\frac{\ln A_f - \lambda}{\zeta}\right) \quad (1)$$

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

$$F_e = A_f / (2\pi V_f) \quad (3)$$

$$F_b = 15.6/\sqrt{H} (1+B/H)^{1.5} \quad (4)$$

ここに  $\Phi$  は平均  $\lambda$ 、標準偏差  $\zeta$  の対数正規分布関数である。文献4)を参考に、係数  $\alpha=0.8$ 、 $\zeta=0.5$  と設定する。また、 $A_f$  は床応答最大加速度、 $g$  は重力加速度、 $F_e$  は床の等価振動数、 $F_b$  は家具の等価振動数、 $B$  は家具の幅、 $H$  は家具の高さ、 $V_f$  は床応答最大速度である。

#### (2) 家具の滑り量

転倒限界加速度 ( $A_0$ ) より滑り開始加速度 ( $A_s$ ) が小さく、 $A_f$  と  $A_s$  の大小関係から滑り可能性がある場合、以下の式<sup>5)</sup>で滑り量  $\delta_s$  を推定する。

$$\delta_s = 0.035\mu^{-0.3} F_e^{-0.5} (V_f - V_s)^{1.56} \quad (5)$$

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

ここに、 $\mu$  は床と家具の摩擦係数、 $V_s$  は家具が滑り始める速度である。

#### (3) 仕上げ材被害

仕上げ材の損傷は、層間変形角が損傷度1の値である1/150より大きいと被害が生じるとされている<sup>6)</sup>が、2011年東北地方太平洋沖地震での超高層住宅における内装材

\*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 工学部建築学科

\*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)

被害状況<sup>7)</sup>から、層間変形角を1/150と1/500の2つの値を設定し、被害発生を評価する。

## 2.2 室内被害指標値

### (1) 転倒被害指標値

家具の転倒可能性を床応答最大加速度と等価振動数の値から指標値を定義する。 $A_f$ が $A_{R50}$ (転倒率50%の加速度)より大きい場合1.0、 $A_0$ より小さい場合0とし、0~1.0で点数化する(図-1(a))。

### (2) 滑り被害指標値

既往の研究<sup>1)</sup>で用いた限界滑り量( $\delta_2$ )に達するまでの滑り量を0~1.0で点数化する(図-1(b))。

### (3) 仕上げ材被害指標値

層間変形角が1/150以上を1.0、1/500以下を0とし、1/500~1/150の範囲を0~1.0で点数化する(図-1(c))。

## 2.3 室内被害の発生率

超高層住宅の多くは1階がエントランスであるため、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。例えば、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となり、被害発生率は100%である。本論では、転倒被害発生率を $D_R$ 、滑り被害発生率を $D_S$ 、仕上げ材被害発生率を $D_N$ と呼ぶ。

## 3. 解析計画

### 3.1 解析対象建築物の骨組モデル

#### (1) 基本モデル

本研究では、既往の研究<sup>3)</sup>で作成した、既存超高層RC造建築物の骨組モデルのX方向について解析を行う。構造技術の進展度により3つの設計年代(第1年代:1971~1989年、第2年代:1990~1999年、第3年代:2000~)について作成されており、基本モデル各3棟、計9棟である(表-1、図-2)。

### (2) 強弱モデル

強弱モデルは基本モデルの梁曲げ耐力の大きさを変えて、保有水平耐力のばらつきを考慮したモデルである。梁の曲げ耐力が基本モデルの1.15倍のモデルを強モデル、0.85倍のモデルを弱モデルとする。

### (3) 剛柔モデル

剛柔モデルは剛性の大きさ(固有周期)を変動させ、コンクリートの材料強度のばらつきと床重量のばらつきなどを考慮したモデルである。基本モデルに対して剛モデルは梁の剛性を1.2倍および層重量を0.8倍し、柔モデルは梁の剛性を0.8倍および層重量を1.2倍する。

### 3.2 等価曲げせん断モデル

等価曲げせん断モデルは、実在の建築物を参考に設定した耐震構造の20階建、28階建、36階建の超高層RC造住宅<sup>8)</sup>(表-2)を対象とした解析モデルである。このモデルは、被害発生曲線と実建築物との対応を検討する際に用いる。

### 3.3 内部粘性減衰の設定

耐震設計では、瞬間剛性比例型減衰の1次減衰定数 $h1=3\%$ (設計減衰)が慣用的に用いられている。ここでは、設計減衰に加え、 $h1$ に1%および2%を設定し、内部粘性減衰の設定による室内被害推定の影響を考察する。

### 3.4 解析方法

立体フレームモデルは、柱・梁部材の弾塑性特性を考

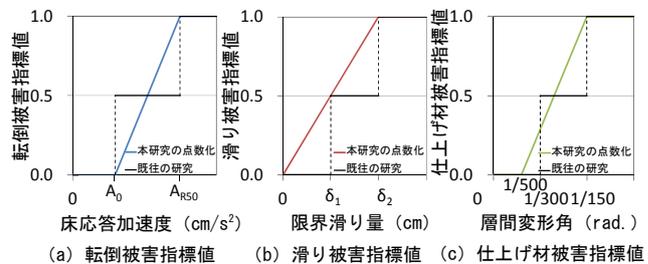


図-1 家具の被害指標

表-1 解析対象建築物(基本モデル)の諸元

設計年代	第1年代						第2年代						第3年代					
	1G20		1G25		1G30		2G20		2G30		2G40		3G20		3G30		3G40	
モデル名	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
建築物高さ(m)	60.75		75.5		90.25		61.7		91.7		121.7		63.6		94.6		125.6	
階数	20		25		30		20		30		40		20		30		40	
基準階階高(m)	2.95		2.95		2.95		3		3		3		3.1		3.1		3.1	
柱芯面積(m <sup>2</sup> )	675		787.5		945		600		900		1050		585		936		1170	
柱支配面積(m <sup>2</sup> )	22.5		22.5		22.5		30.0		30.0		30.0		39.0		39.0		39.0	
スパン長(m)	4.5	5	4.5	5	4.5	5	5	6	5	6	5	6	6	6.5	6	6.5	6	6.5
スパン数	6	5	7	5	7	6	5	4	6	5	7	5	5	3	6	4	6	5
塔状比	2.25	2.43	2.40	3.02	2.87	3.01	2.47	2.57	3.06	3.06	3.48	4.06	2.12	3.26	2.63	3.64	3.49	3.86
$F_c(N/mm^2)$ <sup>※1</sup>	36		36		42		36		48		60		42		54		70	
主筋強度(N/mm <sup>2</sup> ) <sup>※2</sup>	390		390		390		390		490		490		490		490		490	
平均重量(kN/m <sup>2</sup> ) <sup>※3</sup>	14.5[11.2]		14.3[11.3]		14.8[11.9]		15.5[11.8]		14.9[11.9]		14.4[11.7]		15.4[11.6]		14.3[11.4]		13.4[10.9]	
T1(sec)	1.11	1.12	1.36	1.36	1.65	1.66	1.17	1.17	1.71	1.73	2.27	2.35	1.27	1.28	1.79	1.92	2.40	2.45
$C_B$	0.163		0.130		0.113		0.145		0.105		0.074		0.134		0.090		0.068	

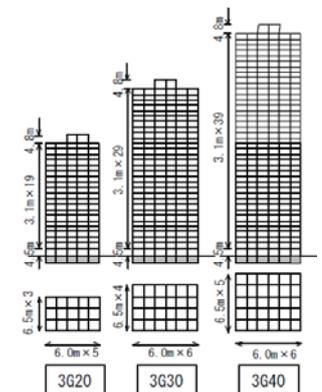


図-2 基本モデルの軸組図

※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)  
 ※4: 本論でのモデル名は(年代)G(階数)(方向)で表記する

慮し、剛床仮定により水平変形を等値する。柱・梁部材の曲げに対する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は梁で0.5、柱で0.4、図-3）とする。等価曲げせん断モデルは、曲げばねは弾性、せん断ばねは弾塑性ばねとし、復元力特性は TAKEDA モデル（除荷時剛性低下指数0.4）とする。検討用地震動を図-4に示す。立体フレームモデルには BCJ-L2 波を、等価曲げせん断モデルには告示波（CODE BCJ-L2 波の第2種地盤にて現法に準拠して作成）を用いる。入力倍率を0.1刻みで1.0倍まで変化させる。検討用家具を表-3に示す。

#### 4. 解析結果

##### 4.1 応答値

基本モデル9棟について床の最大応答加速度（ $A_f$ ）、最大応答速度（ $V_f$ ）および等価振動数（ $F_e$ ）を図-5に示

表-2 実建築物の諸元

名称	20F	28F	36F
階数	20	28	36
軒高(m)	61.75	94.03	114.6
dCb	0.125	0.095	0.075
T1(秒)	1.32	1.99	2.27
$Q_c / \Sigma W$	0.055	0.044	0.033
$Q_y / \Sigma W$	0.248	0.178	0.145
$k_2/k_1$	0.221	0.219	0.269
$k_3/k_1$	0.002	0.012	0.021

注)dCb:許容応力度設計用ベースシア係数, T1:弾性1次固有周期,  $Q_c, Q_y$ :1階層せん断力の第1折点, 第2折点,  $\Sigma W$ :建物全重量,  $k_1, k_2, k_3$ :1階第1剛性, 第2剛性, 第3剛性

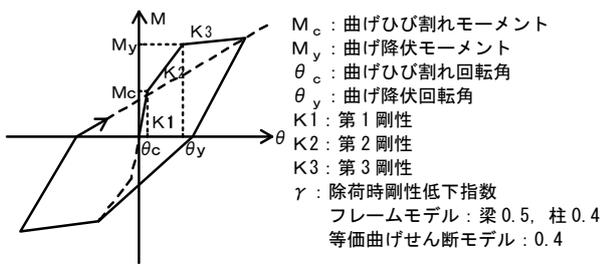
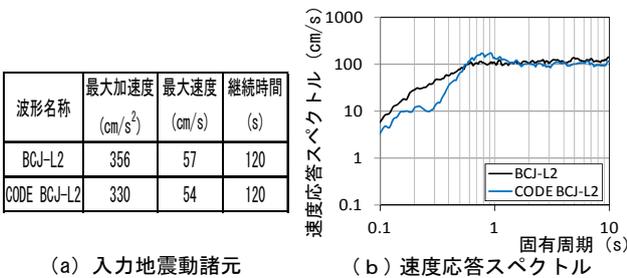


図-3 TAKEDA モデル



(a) 入力地震動諸元

(b) 速度応答スペクトル

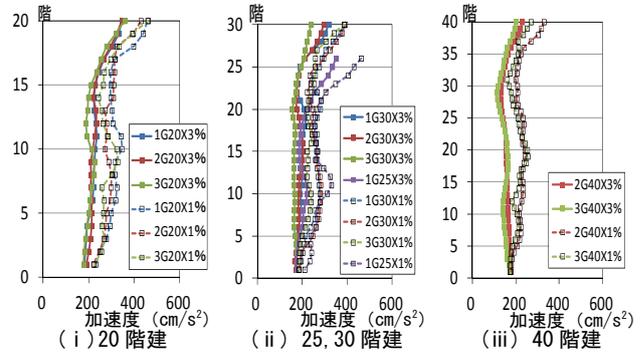
図-4 検討用地震動

表-3 検討用家具の諸元

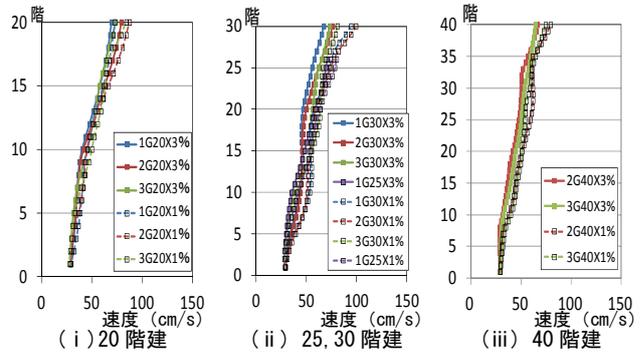
種類	B/H	$\mu$	Fb(Hz)
転倒検討用 家具A(書棚)	0.18	0.3	0.91
滑り検討用 家具C(テレビ台)	0.4	0.05	-

※前述の通り, B:家具の幅, H:家具の高さ,  $\mu$ :床と家具の摩擦係数, Fb:家具の等価振動数

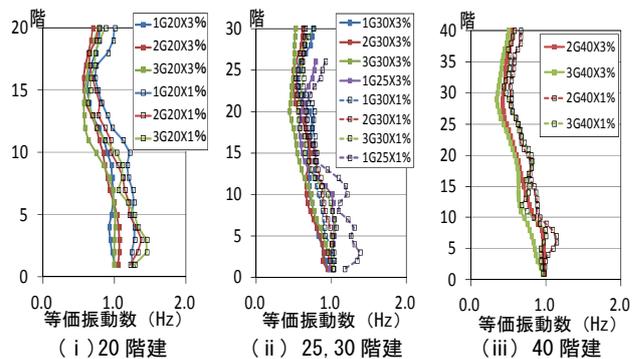
す。入力地震動は BCJ-L2 の入力倍率 0.5（レベル1相当）、1次減衰定数（ $h_1$ ）は1%と3%に設定する。 $A_f$ 、 $V_f$ 、 $F_e$ の値は、いずれの階数の応答値においても、設計年代による差はほとんど見られず、また、 $h_1$ が小さいほど応答値は大きいことが分かる。 $A_f$ は  $h_1=3\%$ の時、20階建では上層階で概ね  $350\text{cm/s}^2$ 、30階建で  $300\text{cm/s}^2$ 、40階建では  $200\text{cm/s}^2$ 程度だが、下層階ではいずれの階数でも  $200\text{cm/s}^2$ であることから、階数が少ない建築物では上層階での床応答加速度が大きく、階数が多い建築物では建物の高さ方向による応答値の差が小さいことが分かる。さらに、減衰の影響は階数が多い40階建に大きい傾向がある。 $V_f$ は階数の多少に関係なく、いずれも上層階で概ね  $70\text{cm/s}$ 、下層階で  $30\text{cm/s}$ 程度である。また、 $h_1$ の違いによる影響は  $A_f$ に比べてあまり見られない。 $F_e$ は20階建、30階建では上層階で概ね  $0.7\sim 0.8\text{Hz}$ 、下層階で



(a) 床の最大応答加速度



(b) 床の最大応答速度



(c) 床の等価振動数

図-5 最大応答値

1.0Hz, 40階建では上層階で0.5Hz, 下層階で1.0Hz程度であり,階数の多少にかかわらず下層階での値が大きい。上層階において,階数が少ない建築物の方が $F_e$ の値が大きいのは(4)式より,階数が多い建築物に比べ $A_f$ が上層階で大きいことと, $V_f$ がいずれもほぼ同等の値をとるためである。下層階においていずれもほぼ同等の値となるのは, $A_f$ ,  $V_f$ ともに応答値の差が小さいためである。

#### 4.2 室内被害推定

##### (1) 構造特性による室内被害推定

3G30Xについて,基本モデルおよび強弱・剛柔モデルの転倒率,滑り量,層間変形角をそれぞれ図-6に示す。入力地震動はBCJ-L2波の入力倍率0.5(レベル1相当), $h1=1\%$ および3%である。転倒率と滑り量は上層階,層間変形角は中層階で値が大きくなる。転倒率に関しては,剛・柔モデルの違いが上層階で見られ,基本モデルと強・弱モデルは概ね一致する。また, $h1$ が小さいほど,中層階の被害推定値が大きくなる。滑り量に関しては,基本モデルと強弱モデルの値の差はほぼ見られないが,剛柔モデルでは基本モデルに比べ,滑り量は小さい。層間変形角に関しては,基本モデルと強弱モデルの差はほぼ見られず,柔モデルでやや変形が大きいことが分かる。剛モデルでは,ほぼ全層で $1/300$ 以内に収まっており,被害発生の可能性は低いと考えられるため,仕上げ材の被害推定に関しては特に,内部粘性減衰の設定とともに,剛性の影響が大きい。

##### (2) 階数の違いによる室内被害推定

基本モデル9棟の転倒率,滑り量,層間変形角をそれぞれ図-7に示す。入力地震動はBCJ-L2波の入力倍率0.5, $h1=3\%$ である。設計年代による推定値の差はほとんど見られない。階数の大小によらず,転倒率と滑り量は上層階で,層間変形角は中層階で最大値をとるが,いずれも階数の小さい20階建が大きい。

### 5. 考察

#### 5.1 室内被害発生率

##### (1) 既往の研究との比較

3G30X ( $h1=3\%$ )の既往の研究<sup>1)</sup>と本研究で用いた室内被害発生率( $D$ )の対応を図-8に示す。3段階に点数化する場合<sup>1)</sup>では,滑り被害や仕上げ材被害を小さく評価する可能性がある。特に,仕上げ材被害については連続的な評価が可能となることが分かる。

##### (2) 1次減衰定数の設定による違い

図-9に,転倒被害発生率( $D_R$ ),滑り被害発生率( $D_S$ ),仕上げ材被害発生率( $D_N$ )の値とともに,それらの平均的な被害発生曲線を示す。1次減衰定数( $h1$ )の値が小さいほど,値が大きくなることが分かる。 $D_R$ に関しては,レベル2相当の入力倍率ではいずれも100%となり $h1$ に

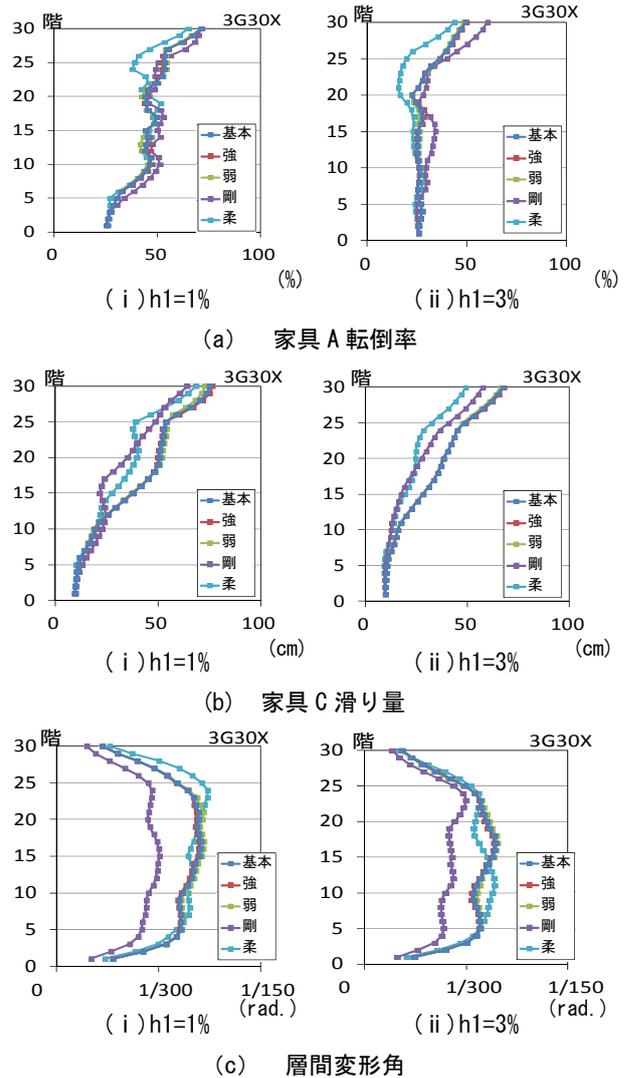


図-6 構造特性の違いによる室内被害の比較

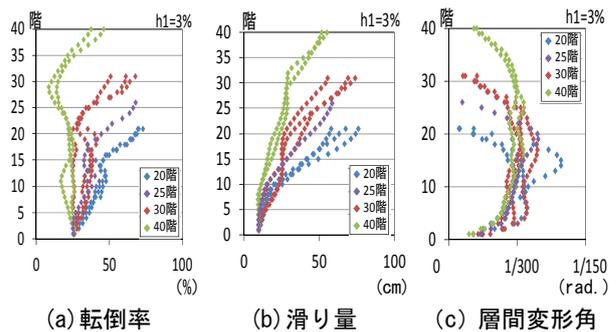


図-7 階数による室内被害の比較

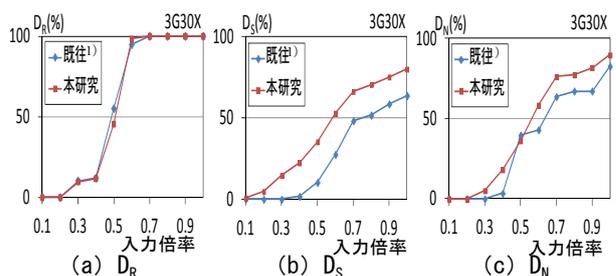


図-8 被害発生率の比較

よる差は生じない。骨組が損傷しないレベル1相当の入力倍率0.5付近での $h_1$ による値の差が特に大きい。設計減衰 ( $h_1=3\%$ ) では $D_R$ を過小に評価する可能性があるため<sup>2)</sup>、これ以降の考察では入力強さにより $h_1$ を変え、入力倍率0.1~0.3では $h_1=1\%$ 、0.4~0.7では2%、0.8~1.0では3%で設定する。なお、被害発生曲線がやや連続的でない点があるのは、その入力倍率において $h_1$ の設定を変えているためである。

### (3) 建物の階数による違い

$D_R$  (図-10) は、階数が少ないほど大きく、入力倍率0.5で80%程度だが、階数が多い場合では、30%程度であり、階数の違いによる $D_R$ の差も入力倍率がレベル1相当の場合に大きくなり、20階建と40階建の建物では転倒被害に大きく差が出る事が分かる。レベル2相当の場合にはどの階数の建物も100%となる。 $D_S$ と $D_N$ についてはどの入力倍率の場合も階数による差はほとんど見られない。

### (4) 上中下層階による違い

建物の上階1/4を上層階、下階1/4を下層階、残りを中間階と呼び、各層における被害の発生傾向(図-11)を考察する。 $D_R$ は上層階で大きく、次いで中間階、下層階となる。入力倍率0.5の場合、上層階では90%ほどだが、下層階では40%未満とレベル1相当における差が大きいことが分かる。 $D_S$ も上層階の値が大きく、入力倍率が大きくなるほど層ごとの $D_S$ の差が広がっており、1.0倍の場合には上層階では100%だが、下層階では50%未満である。仕上げ材被害は中間階で発生しやすく、上層階と下層階との被害発生率の差異は小さい。

## 5.2 被害発生曲線

5.1の結果を踏まえて、入力倍率に応じた $h_1$ の設定と階数および上層階・中間階・下層階の違いを考慮した被害発生曲線を作成する(図-12)。なお、グラフの横軸には、構造設計時のわかりやすさを重視して入力地震動の強さ(入力速度)を用いる。各層の20階建と40階建

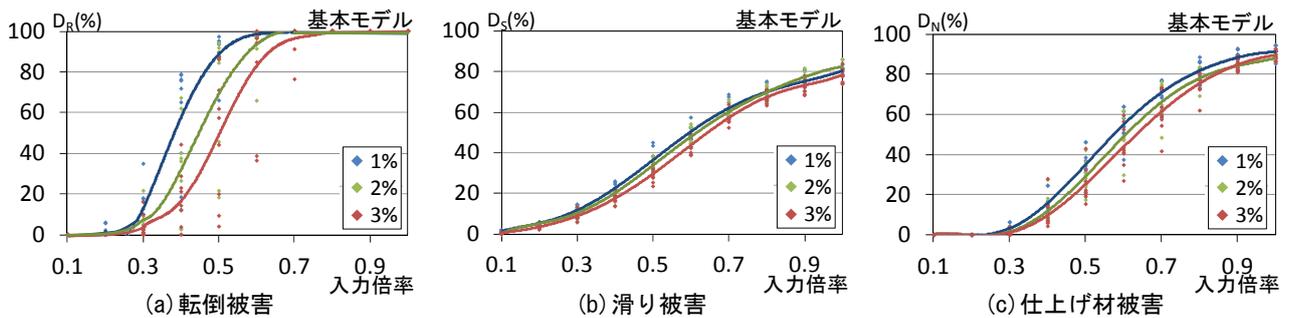


図-9  $h_1$ の違いによる被害発生率の比較

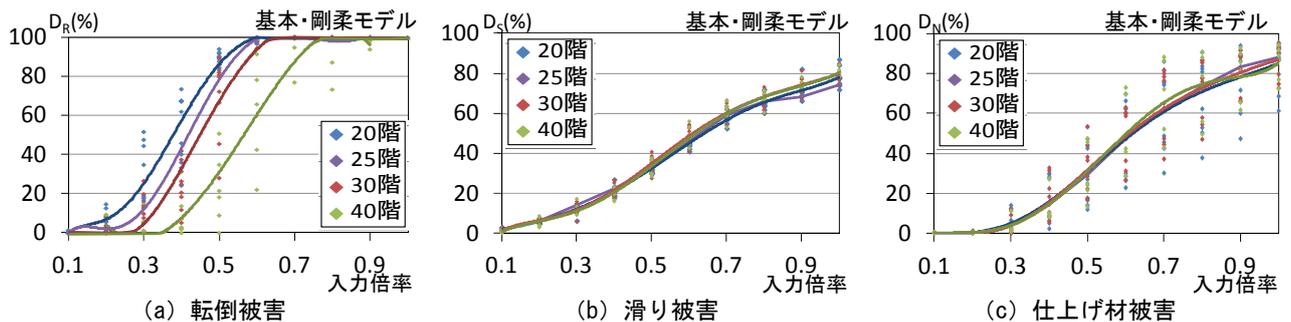


図-10 階数の違いによる被害発生率の比較

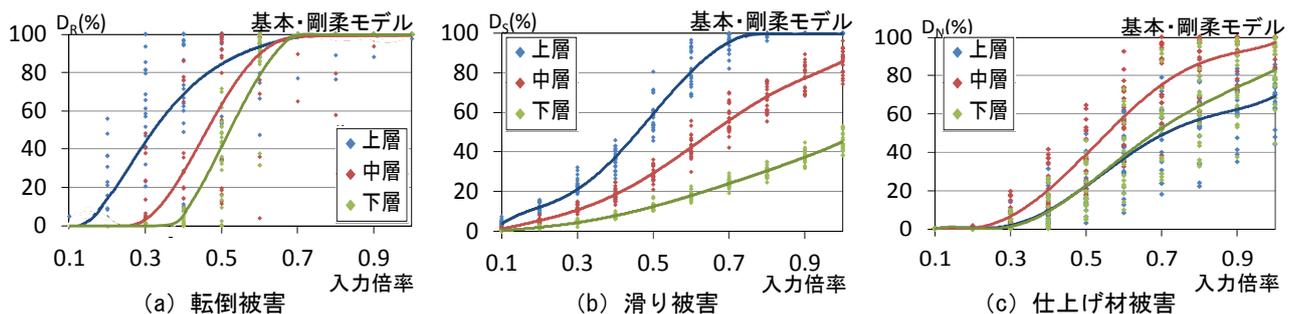


図-11 上中下層による被害発生率の比較

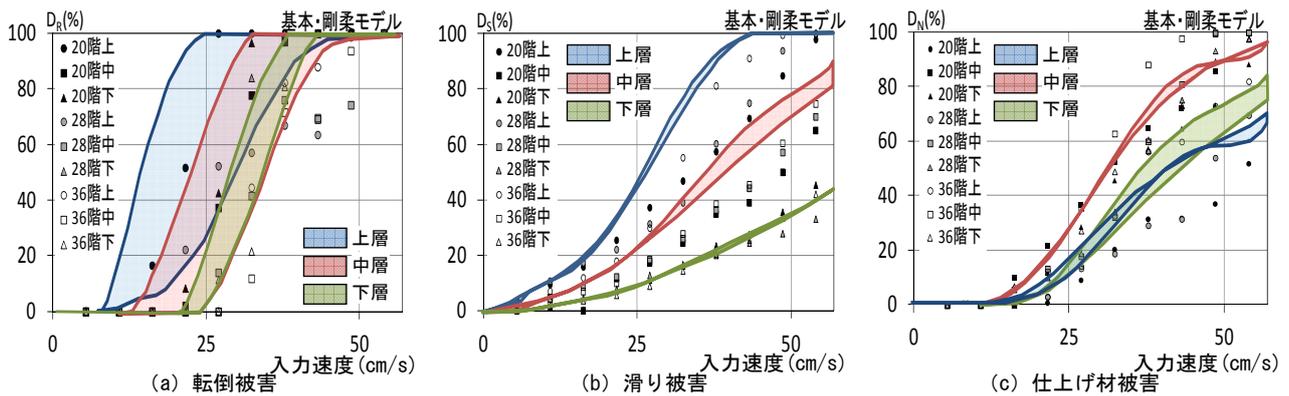


図-1 2 被害発生曲線と実建築物の対応

の被害発生曲線で囲まれた部分を各層の被害発生範囲と推定する。上層階が青色、中層階が赤色、下層階が緑色である。 $D_R$ は上層階での階数の違いによる差が大きく、入力速度値が25cm/sの時、20階建では100%だが、40階建では30%程度である。 $D_S$ 、 $D_N$ はいずれの層でも階数の大小による被害発生率の差異は小さい。次に、作成した被害発生曲線と実建築物との対応を検討する。 $D_R$ に関しては、20階建は各層で色付けた範囲内に収まっており良い対応を示す。28階建は25cm/sの場合では曲線の範囲内に収まるが、入力が大きくなると被害推定は大きめに評価する結果となる。36階建の被害発生率は全層で被害発生曲線の範囲よりも概ね小さめに評価する。 $D_S$ は3棟とも上層階と中層階で安全側の評価となるが、下層階は良い対応を示す。 $D_N$ は20階建と28階建は全層で概ね安全側の評価となる。36階建の被害発生率はレベル1相当の入力では概ね安全側に収まっているが、入力が大きくなると曲線の範囲よりも大きな推定値となる。

## 6. まとめ

設計年代が異なる既存超高層RC造骨組モデルを用いて地震入力倍率を連続的に増大して時刻歴応答解析を行い、室内被害発生率を算定した。その結果、本解析の範囲内であるが、以下の知見を得た。

- (1) 階数や内部粘性減衰の影響を考慮して、入力地震動の強さに応じた上層階・中層階・下層階における地震時室内被害の発生率曲線を評価した。
- (2) 等価振動数は階数の小さい建物では上層階で0.7~0.8Hz、大きい建物では0.5Hz程度となり、下層階ではどの建物も概ね1.0Hz程度である。
- (3) 室内被害発生率は、1次減衰定数( $h_1$ )の値が小さい程、大きくなるので、その設定は重要である。
- (4) 室内被害発生率は、建物高さ(固有周期)による差が大きく、設計年代による違いはあまり見られない。
- (5) 被害指標値の点数化を見直し、新たに0~1.0の範囲で定義したことで被害発生率を連続的に評価できた。

(6) 家具の転倒や滑り被害発生率は、上層階で大きい。

また、仕上げ材の被害発生率は、中層階で大きい。

今後、制振補強効果や長周期地震動による既存超高層RC造住宅の室内被害推定について報告する予定である。

## 謝辞

本研究は科研費「多数回繰返し変形を受ける既存超高層鉄筋コンクリート造住宅の耐震安全性評価及び対策(課題番号25420569)」の助成を受けたものである。また、千葉大学和泉研究室の中込雄介氏の多大な協力に深甚なる謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 佐藤綾子ほか：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
- 2) 濱田聡ほか：超高層RC造住宅の地震時室内被害推定に用いる振動系モデル，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.2，pp.769-774，2014.7
- 3) 秋田知芳ほか：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
- 4) 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
- 5) 日本建築学会：長周期地震動対策に関する公開研究会，pp.187-236，2011
- 6) 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
- 7) 山根義康ほか：東日本大震災時における超高層集合住宅の建物応答推定に基づく室内被害の分析，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.291-292，2013.8
- 8) 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