3.2 長周期地震動による被害軽減対策の研究開発

3.2.1 実規模実験の実施

(1)業務の内容

(a) 業務の目的

首都圏で長周期地震動が発生した場合、多大な被害の発生が想定される高層建物を対象 にし、その耐震性能評価および被害軽減を目的として、長周期地震動が高層建物にもたら す被害を国民に明らかにする。また、本実規模実験で検証される実践的な応答低減手法に 関する研究成果を建築関連団体と連携し指針を取りまとめるとともに、各種業界と本研究 成果を共有し、安心・安全な高層建物の広い普及を最終目標とする。

(b) 平成 23 年度業務目的

長周期地震動を受ける高層建物の地震時応答に関わる定量的評価、損傷評価・応答低減 技術および機能保持・避難性・室内安全性に関わる研究開発を進め、安心・安全な高層建 物の広い普及のための基礎データを得る。

- ・地震時の高層建物における上層階と下層階で体感される揺れの性質と建物内の家具・什器や設備等の被害の様相の違いを明らかにし、高層建物の機能維持・避難性・室内安全性を検証・確認するE-ディフェンス実規模実験の実験計画と実験を実施する。
- ・震動実験において、震動特性把握や機能維持等を確保するための方策が適切かつ有効に 評価できるよう実験のパラメーターを設定する。また、サブプロジェクト①から提供される地震動情報をもとに実験で採用する入力地震動を作成する。
- ・建物試験体や設備等の揺れによる応答量に関するデータを取得し、高層建物の地震時から地震後の機能維持性等を評価する。また、建物利用者等へ地震時の建物の室内被害・ 機器被害状況をわかりやすく提示するために、震動実験で揺れている最中の室内外の映 像等を取得する。
- ・人体ダミーを用いて人体で体感される振動や、什器などの衝突力を計測し、地震による 建物の揺れ及び家具・什器や設備等の被害が建物内居住者に与える影響を評価する。

所属機関	役職	氏名		メールアドレス
独立行政法人防災科学技術研究所	研究員	吉澤	睦博	yszwmthr@bosai.go.jp
兵庫耐震工学研究センター	主任研究員	長江	拓也	
	客員研究員	福山	國夫	
	センター長	梶原	浩一	
	チームリーダー	井上	貴仁	
東京理科大学	教授	北村	春幸	
建築研究所	上席研究員	斉藤	大樹	
名古屋大学	教授	福和	伸夫	

(c) 担当者

(2) 平成 23 年度の成果

(a) 業務の要約

長周期地震動を受ける高層建物の地震時応答による建物機能保持・避難性・室内安全性 に関わる基礎データを得るために、30階相当の高層建物の揺れを再現する試験体を作成し E-ディフェンスを用いた震動実験を行った。試験体は4階相当の低層建物の揺れも再現 できる工夫を施し、建物の固有周期の違いによる室内被害の違いを再現することで、より 包括的な室内被害の基礎データを得た。

平成23年度実験では、平成23年東北地方太平洋沖地震に関して首都圏で観測された地 震動を用いて、首都直下地震で備えるべき長周期地震動特性を考慮した地震動に対する建 物内の被害様相を再現した。また平成7年兵庫県南部地震の神戸海洋気象台(JMA神戸) での観測記録による実験も行い、短周期地震動が卓越する場合の建物内の被害様相の再現 も行った。以上により、以下の基礎データが得られた。

- ・1つの試験体で高層建物における上層階と下層階の揺れを同時に再現する世界初の実験 を行い、構造体の床応答に関するデータを入手した。また試験体内にモデル化した高層 建物のオフィスおよび住宅の家具什器、天井・間仕切り壁等の非構造部材、および空調 設備機器の応答データを入手した。
- ・試験体の固有周期を、高層建物をモデル化する場合には3秒~4秒の長周期を再現し、 低層建物をモデル化する場合には0.5秒~0.6秒の短周期を再現することで、建物の揺 れに対する室内被害のより包括的な基礎データを入手した。
- ・空調設備や電気設備を稼働した状態で震動実験を行ない、大地震時における建築設備の 機能維持を確認した。またスプリンクラー等の消防用の非常用設備を試験体にモデル化 し、実験前後で機能損失が発生しないことを確認した。
- ・デジタルカメラ等を高密度に試験体内外に設置し、家具・什器の移動・転倒、および天井・間仕切り壁等の損傷に関する映像データを取得した。建物の上層階と下層階の揺れの違いによる室内被害の違いや、家具の転倒防止の有無による室内被害の違いに関する映像データを取得し、建物利用者への啓発資料となる技術資料を作成した。
- ・衝突実験用の人体ダミーを室内に2体設置し、立位の場合とキャスター付き椅子に着座した場合とをモデル化し、家具等の衝突が人体に与える影響に関するデータを取得し、 交通事故などの衝突の評価で用いる傷害指標との比較を行った。

(b) 業務の成果

1) 試験体の構造体

a)構造概要

試験体の概要を図 1 に示す。試験体は高層建物のオフィスビルの室内被害を再現するために、鉄骨フレームで約 20m×10m の平面広さを用意し、オフィス空間や居室等を忠実に再現した。高層建物の揺れを再現する場合には、試験体の構造架構を連結する縮約層を積層ゴムにより作成した。低層建物の揺れを再現する場合には、縮約層の梁の中間を鋼材プレートで連結して積層ゴムの剛性が効かない構造とした。

試験体の立面図を図 2 に、梁伏図を図 3 に、軸組図を図 4 に、部材リストを表 1 に示 す。試験体高さは約 15m、試験体重量は約 650ton である。

高層建物の揺れを再現する場合には高さ100~120m級の高層建物を想定し、1次固有周期で3~4秒を再現するように設計した。振動台上の積層ゴムを用いた下層用の応答増幅層を設け、鋼構造架構(図1の実験室1)を載せる。構造架構には6階相当の揺れが生じる。 さらにその上に積層ゴムを4段重ねる中層高層用の応答増幅層を配す。そして、試験体上部には27~28階相当の揺れが生じる2層の鋼構造架構(図1の実験室2および3)を載せる。また応答増幅層の縮約層に非線形特性を擬似的に与えるために鋼製U型ダンパーと積層ゴムを直列につないだ塑性化装置¹⁾を設けた。

低層建物の揺れを再現する場合には、応答増幅層に設けたせん断柱(C2、C3)を鋼材プレートで連結する。これにより1次固有周期で約0.5~0.6秒を再現できる。

図 5に試験体の構造体の施工状況の写真を示す。



(a) 高層建物モデル



- (b) 低層建物モデル
- 図 1 試験体の概要





図 3 梁伏せ図



(3) 2階



(4) 2m 階

図 3 梁伏せ図



(5) 3 階



(6) 3m 階

図 3 梁伏せ図







(1)柱リスト

階	C 1	C2	C3
P1			
4			
3m		$\text{H-400} \times 200 \times 8 \times 13$	$\text{H-400}\!\times\!200\!\times\!8\!\times\!13$
3		$\text{H-400} \times 200 \times 8 \times 13$	$\text{H-400} \times 200 \times 8 \times 13$
2m		$\text{H-}500\!\times\!200\!\times\!10\!\times\!16$	$\text{H-500} \times 200 \times 10 \times 16$
2		$\text{H-}500\!\times\!200\!\times\!10\!\times\!16$	$\text{H-}500\!\times\!200\!\times\!10\!\times\!16$
1	$\Box -400 \times 25$ (BCP 325)		
В		$\text{H-}582\!\times\!300\!\times\!12\!\times\!17$	$\text{H-}582\!\times\!300\!\times\!12\!\times\!17$

階	C4	C5	C6
P1			H-125×125×6.5×9 (SS400)
4			$\begin{array}{c} \text{H-194} \times 150 \times 6 \times 9 \\ \text{(SS400)} \end{array}$
3m			
3			
2m			
2			
1	$\begin{array}{c} \text{H-200} \times 200 \times 8 \times 12 \\ (\text{SS400}) \end{array}$	H-200×200×8×12 (SS400)	
В			

(2)間柱リスト

符号	部材	備考
P10	$\text{H-100} \times 100 \times 6 \times 8 (\text{SS400})$	外壁面
P12	$H-125 \times 125 \times 6.5 \times 9 (SS400)$	外壁面

(3)大梁リスト

		G方向(長辺方向)	
階	cG1 • cG2	G1	G2
PR		H−100×100×6×8 (SS400)	
スタット゛コネクタ			
P1		H−125×125×6.5×9 (SS400)	
スタット、コネクタ		16 \ @ 300	
4	先端)H-396×199×7×11 基部)BH-396×200×9×19	$\text{H-}390\!\times300\!\times10\!\times16$	$\mathrm{H}\text{-}600 \times 200 \times 11 \times 17$
スタット、コネクタ	19 <i>\phi</i> @ 300	19φ@300ダブル	19 ¢ @ 200
3m		$\text{H-}300\!\times300\!\times10\!\times15$	
スタット゛コネクタ			
3	先端)H-596×199×10×15 基部)BH-590×200×12×19	$\text{H-588} \times 300 \times 12 \times 20$	$\text{H-}440 \times 300 \times 11 \times 18$
スタット゛コネクタ	19 <i>\phi</i> @ 300	19φ@300ダブル	19 φ @ 300 ダブル
2m		$\text{H-}300\!\times300\!\times10\!\times15$	
スタット、コネクタ			
2	$\mathrm{H}396\times199\times7\times11$	$\text{H-}390\!\times300\!\times10\!\times16$	$\text{H-400} \times 200 \times 8 \times 13$
スタット、コネクタ	19 <i>\phi</i> @ 300	19φ@300ダブル	19 ø @ 300
1	$H-\overline{396\times199\times7\times11}$	$H-390\times300\times10\times16$	$\mathrm{H-}390\!\times 300\!\times\!10\!\times 16$
スタット、コネクタ	19 <i>\phi</i> @ 300	19φ@300ダブル	19φ@300ダブル

B方向 (短辺方向)

階	cB1	B1	B2	B3
DD				$H-100 \times 100 \times 6 \times 8$
ΓK				(SS\$00)
スタット゛コネクタ				
P1		$\text{H-}396\!\times\!199\!\times\!7\!\times\!11$		$H-125 \times 125 \times 6.5 \times 9$
スタット、コネクタ		19 & @ 300		16 & @ 300
//// =////	生態) PU-206×1500×16×10	15 φ 8 5 6 6		$H_{-206} \times 100 \times 7 \times 11$
4	五端) BH-396×1500×16×19 基部) BH-396×400×12×19	$\text{H-}390\!\times\!300\!\times\!10\!\times\!16$		(SS\$00)
スタット゛コネクタ		19φ@300ダブル		19 ø @ 300
3m		$\text{H-}300\!\times300\!\times10\!\times15$		
スタット゛コネクタ				
3		$\text{H-}582\!\times300\!\times12\!\times17$	$\mathrm{H}\text{-}440\!\times300\times\!11\!\times18$	
スタット、コネクタ		19φ@300ダブル	19φ@300ダブル	
2m		$\text{H-}300\!\times\!300\!\times\!10\!\times\!15$		
スタット゛コネクタ				
2	$BH-396\times400\times32\times25$	端部)BH-396×300×16×25 中央)H-390×300×10×16	$\mathrm{H}\text{-}400\times200\times8\times13$	
スタット、コネクタ		19φ@300ダブル	19 ø @ 300	
1		$\text{H-}390\!\times\!300\!\times\!10\!\times\!16$	$\text{H-}390\!\times\!300\!\times\!10\!\times\!16$	
スタット゛コネクタ		19φ@300ダブル	19φ@300ダブル	

(4)小梁リスト

符号	部材	スタッドコネクタ
cg10,g10	$\text{H-}100\!\times\!100\!\times\!6\!\times\!8$	
cg12	$\operatorname{H-125\times60\times6\times8}$	16 φ @300
g12	$\operatorname{H-1}25 \times 60 \times 6 \times 8$	19φ@600
cg19,g19	$\text{H-198}{\times}99{\times}4.5{\times}7$	16 ¢ @ 300
cg24, g24	$\operatorname{H-248} \times 124 \times 5 \times 8$	16 φ @ 300
g29	$\text{H-298}\!\times\!149\!\times\!5.5\!\times\!8$	16 ¢ @ 300
g30	$H-300 \times 150 \times 6.5 \times 9$	16 ¢ @ 300
g39	$\text{H-}390\!\times\!199\!\times\!7\!\times\!11(\text{SN490})$	19 φ @ 300
g44	H-446 \times 199 \times 8 \times 12 (SN490)	19 ¢ @ 300
g49	$H-496\times199\times9\times14(\mathrm{SN}490)$	19 ¢ @ 300
g175	H-175×175×7.5×11	
g300	H-300×305×15×15(SN490)	

(5)ブレースリスト

符号	部材	備考
V1	H-250 \times 255 \times 14 \times 14 (SN490)	剛接合
V2	2[-200×90×8×13.5	ピン接合
V3	$2L -60 \times 60 \times 5$	壁ブレース
V4	M-16 ターンバックル	壁ブレース

(6)積層ゴム支承リスト

化比	反敌	位墨	本体ゴム					
四	泊你	卫王臣	せん断剛性率(N/mm2)	外径(mm)	厚さ(mm)	数量	総厚(mm)	(kN/m)
	R1	L FR	0. 39	500	3.75	33	124	630
3	R2	上权	0.59	600	4.5	30	135	1260
	R1, R2	下段	0.44	600	4.5	26	117	1090
	R1, R2	上段	0.39	500	3.75	33	124	630
2	R1, R2	下四	0.44	600	4.5	30	135	1260
	Rd		0.44	600	4.5	26	117	1090
	R1		0.44	1000	7.5	38	285	1210
В	R2	下段	0.29	1000	7.5	38	285	800
	Rd		0.59	800	6	15	90	3290

※限界歪みは全て 400%

(7)U型ダンパーリスト

階	本数	板厚 (mm)	降伏せん断力 (kN)	初期剛性 (kN/m)	2次剛性 (kN/m)	弹性限度範囲 (mm)	限界変形 (mm)
2	4	40	232	8320	144	27.9	750
В	4	45	304	9600	160	31.7	850



(1) 試験体全景 長辺方向



(2) 試験体全景 短辺方向

(3) 2階~3階の積層ゴム





(5) 高層建物モデル時の2階~2m階~3階



(6) 低層建物モデル時の2階~2m階~3階

図 5 試験体の構造体の施工状況

2) 試験体の室内空間

a)概要

高層のオフィスビルの長周期地震動に対する、地震時の建物機能維持(空調設備、消防 設備)、地震時の人の安全確保(天井、壁、家具什器)に関する知見を入手するために、説 明力の高い高層建物空間をモデル化した震動実験を行う。そのために試験体の室内に実際 の天井、空調設備機器、室内家具をモデル化した。

b) 天井のモデル化

高層のオフィスビルの室内空間を再現するために、天井は高層建物で採用されることの 多いシステム天井を用いてモデル化した。図 6 にシステム天井の種類を示す²⁾。試験体で はラインタイプ(ラインタイプ、ライン長尺タイプ)、グリッドタイプをモデル化した。 地震被害調査結果によるシステム天井の地震時の被害は、壁・柱際での天井の破損や落下、 間仕切り壁、天井カセット式空調機などの周辺での天井の破損や落下の発生が多いことが 報告されている³⁾。これまでのE-ディフェンス実験では室内の平面積や天井ふところ高 さを大きくとった実験を行っておらず、被害事例のうち後者の間仕切り壁や空調機などの 影響をモデル化した実験が行われていない。平成 23 年度実験では、この点に留意した試験 体のモデル化を行った。図 7 に天井伏せ図を示す。

天井の軽量鉄骨下地には、高層建物モデルの場合には振れ止めのブレースを配置し⁴⁾、 低層建物モデルの場合にはブレースを撤去した状況で実験を行った。図8にブレース配置 を示す。図9に天井の施工状況の写真を示す。







(a) 1 階部分(実験室 1)



(b) 4 階部分(実験室 2)

※ (1):グリッドタイプ (2):ラインタイプ (3):ライン長尺タイプ

図 7 天井伏せ図

83







(1) 1階·天井

(2) 1階・天井 グリッド部分



(3) 1階・天井 ライン部分



写真撮影位置



(4) 天井下地の振れ止めブレース

(5) 間仕切り壁の施工状況



c)建築設備のモデル化

表 2 に試験体にモデル化した建築設備の一覧を、図 10 に空調設備の施工図を、図 11 にスプリンクラー設備の施工図を、図 12 に設備関係の施工状況の写真を示す。スプリン クラーの横引き配管は、高層階の揺れを再現する4階の配管に対して角形鋼管(□-125mm ×125mm×3.2mm、長さ420mm)による振れ止め防止を設置した。

表	2	設置した建築設備の一覧

記号	名称	台数	設置階	備考
AHU1	床置縦形空調機	1	1	重量300kg
D1	パッケージ形空調機 天井隠蔽形室内機	2	1,4	重量36kg
D2	パッケージ形空調機 600角カセット形室内機	2	1,4	重量18kg
D3	パッケージ形空調機 950角カセット形室内機	2	1,4	重量22kg
DR1	ファンコイルユニット 天井隠蔽形	3	4	重量50kg
S1	ファンコイルユニット 天井隠蔽形	1	1	重量18kg
FE	床置形排気ファン	1	1	重量140kg,防振スプリング付
E1	天井付き排煙口	1	1	500mm角 耐火キャンバス接続
E2	天井付き排煙口	1	1	500mm角 鉄板ダクト接続
STF1	クロス形システム天井用吹出口	6	1,4	$592 \mathrm{mm} imes 170 \mathrm{mm}$
STF2	クロス形システム天井用吹出口	6	1,4	約375mm×160mm
STF3	ライン形システム天井用吹出口	12	1,4	約600mm×160mm
SH	閉鎖形化粧カバー付スプリンクラーヘッド	20	1,4	80L用
SHH	閉鎖形化粧カバー付スプリンクラーヘッド	2	1,4	30L用
Ν	スプリンクラー巻出し管 SUS製	5	1,4	25A×2m用
\	スプリンクラー巻出し管 SUS製	5	1,4	25A×3m用
	スプリンクラー巻出し管 樹脂管	2	1	25A×2m用
	スプリンクラー巻出し管 樹脂管	3	1	25A×3m用
	天井空調設備スプリング	12	4	#6用
	防振スリムハンガー	4	1	#300用
$ \rangle$	防振スリムハンガー	24	4	室内機用
\\	排煙口用 耐火キャンバス継手	1	1	$600 \times 600 \times 300 (L)$



(b) 4 階部分(実験室 2)

図 10 空調設備機器の施工図



(b) 4 階部分(実験室 2)

図 11 スプリンクラー設備機器の施工図







(2) 1階・排煙機



(3) 4階·天井隠蔽型空調機



(4)グリッド天井部分での配管



(5) 1階部分のスプリンクラー配管



(6) 4階・振れ止め付きのスプリンクラー配管

図 12 設備機器の施工状況

d)家具什器のモデル化

図 13 に試験体に設置した家具什器の平面配置図を、表 3 にその一覧を示す。表 4 は屋 上階に設置したサーバールームのラックの一覧を示す。図 14 に施工状況の写真を示す。



(a) 1階・実験室1の家具配置



(b) 4 階・実験室2の家具配置

図 13 家具の配置図



(c) 屋上階・実験室3の家具配置



図 13 家具の配置図

表 3 設置した家具の一覧

(a) 1 階部分

番号・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
1 ソファ 900*1700*400*800 2 ローテーブル 600*900*335 3 PC台 600*400*1345 4 ソファ 900*1700*400*800 5 TV台 800*600*750 6 TV 770*90*540 7 棚 600*300*1750 8 食器棚 880*440*1740 9 キッチン 550*1655*800 10 食器棚 880*440*1740 11 冷蔵庫 590*610*1600 12 棚 600*300*1750 13 ダイニングテーブル 810*1350*700 14 椅子 1 580*480*405*720 椅子 3 580*480*405*720 椅子 4 580*480*405*720 椅子 5 580*480*405*720 椅子 4 580*480*405*720 15 PC台 600*400*1345 16 コピー機 650*650*1000 17 ソファ 700*600*900 18 ソファ 700*600*900 19 ソファ 700*600*900 20 ソファ 700*600*900 21 デーブル 600*1200*400 </td
2 ローテーブル 600*900*335 3 PC台 600*400*1345 4 ソファ 900*1700*400*800 5 TV台 800*600*750 6 TV 770*90*540 7 棚 600*300*1750 8 食器棚 880*440*1740 9 キッチン 550*1655*800 10 食器棚 880*440*1740 11 冷蔵庫 590*610*1600 12 棚 600*300*1750 13 ダイニングテーブル 810*1350*700 14 椅子 1 580*480*405*720 椅子 3 580*480*405*720 埼子 4 580*480*405*720 埼子 5 PC台 600*400*1345 16 コピー機 650*650*1000 17 ソファ 700*600*900 18 ソファ 700*600*900 19 ソファ 700*600*900 20 ソファ 700*600*900 21 デーブル 600*1200*400
3 PC台 600*400*1345 4 ソファ 900*1700*400*800 5 TV台 800*600*750 6 TV 70*90*540 7 棚 600*300*1750 8 食器棚 880*440*1740 9 キッチン 550*1655*800 10 食器棚 880*440*1740 11 冷蔵庫 590*610*1600 12 棚 600*300*1750 13 ダイニングテーブル 810*1350*700 14 椅子 1 580*480*405*720 荷子 3 580*480*405*720 荷子 4 580*480*405*720 15 PC台 600*400*1345 16 コピー機 650*650*1000 17 ソファ 700*600*900 18 ソファ 700*600*900 19 ソファ 700*600*900 20 ソファ 700*600*900
4ソファ900*1700*400*8005TV台800*600*7506TV770*90*5407棚600*300*17508食器棚880*440*17409キッチン550*1655*80010食器棚880*440*174011冷蔵庫590*610*160012棚600*300*175013ダイニングテーブル810*1350*70014椅子 1580*480*405*72015PC台580*480*405*72015PC台600*400*134516コピー機650*650*100017ソファ700*600*90018ソファ700*600*90019ソファ700*600*90020ソファ700*600*90021テーブル600*1200*400
5 TV台 800*600*750 6 TV 770*90*540 7 棚 600*300*1750 8 食器棚 80*440*1740 9 キッチン 550*1655*800 10 食器棚 80*440*1740 9 キッチン 550*1655*800 10 食器棚 80*440*1740 11 冷蔵庫 590*610*1600 12 棚 600*300*1750 13 ダイニングテーブル 810*1350*700 14 椅子 1 580*480*405*720 椅子 2 580*480*405*720 椅子 3 580*480*405*720 椅子 4 580*480*405*720 15 PC台 600*400*1345 16 コピー機 650*650*1000 17 ソファ 700*600*900 18 ソファ 700*600*900 19 ソファ 700*600*900 20 ソファ 700*600*900 21 デーブル 600*1200*400
6 TV 770*90*540 7 棚 600*300*1750 8 食器棚 880*440*1740 9 キッチン 550*1655*800 10 食器棚 880*440*1740 11 冷蔵庫 590*610*1600 11 冷蔵庫 590*610*1600 12 棚 600*300*1750 13 ダイニングテーブル 810*1350*700 14 椅子 1 580*480*405*720 椅子 3 580*480*405*720 椅子 4 580*480*405*720 埼子 5 PC台 600*400*1345 16 コピー機 650*650*1000 17 ソファ 700*600*900 18 ソファ 700*600*900 19 ソファ 700*600*900 20 ソファ 700*600*900 21 デーブル 600*1200*400
7 棚 600*300*1750 8 食器棚 880*440*1740 9 キッチン 550*1655*800 10 食器棚 880*440*1740 11 冷蔵庫 590*610*1600 12 棚 600*300*1750 13 ダイニングテーブル 810*1350*700 14 椅子 1 580*480*405*720 椅子 2 580*480*405*720 椅子 3 580*480*405*720 15 PC台 600*400*1345 16 コピー機 650*650*1000 17 ソファ 700*600*900 18 ソファ 700*600*900 19 ソファ 700*600*900 20 ソファ 700*600*900 21 デーブル 600*1200*400
8 食器棚 880*440*1740 9 キッチン 550*1655*800 10 食器棚 880*440*1740 11 冷蔵庫 590*610*1600 12 棚 600*300*1750 13 ダイニングテーブル 810*1350*700 14 椅子 1 580*480*405*720 店 ち80*480*405*720 647 3 方 PC台 600*400*1345 16 コピー機 650*650*1000 17 ソファ 700*600*900 18 ソファ 700*600*900 19 ソファ 700*600*900 20 ソファ 700*600*900 21 デーブル 600*1200*400
9 キッチン 550*1655*800 10 食器棚 880*440*1740 11 冷蔵庫 590*610*1600 12 棚 600*300*1750 13 ダイニングテーブル 810*1350*700 14 椅子 1 580*480*405*720 椅子 3 580*480*405*720 椅子 4 580*480*405*720 15 PC台 600*400*1345 16 コピー機 650*650*1000 17 ソファ 700*600*900 18 ソファ 700*600*900 19 ソファ 700*600*900 20 ソファ 700*600*900 21 デーブル 600*1200*400
10 食器棚 880*440*1740 11 冷蔵庫 590*610*1600 12 棚 600*300*1750 13 ダイニングテーブル 810*1350*700 14 椅子 1 580*480*405*720 清子 2 580*480*405*720 椅子 3 580*480*405*720 椅子 4 580*480*405*720 15 PC台 600*400*1345 16 コピー機 17 ソファ 700*600*900 18 ソファ 700*600*900 19 ソファ 700*600*900 20 ソファ 700*600*900 21 デーブル
11 冷蔵庫 590*610*1600 12 棚 600*300*1750 13 ダイニングテーブル 810*1350*700 14 椅子 1 580*480*405*720 14 椅子 2 580*480*405*720 15 PC台 580*480*405*720 16 コピー機 650*650*1000 17 ソファ 700*600*900 18 ソファ 700*600*900 19 ソファ 700*600*900 20 ソファ 700*600*900 21 デーブル 600*1200*400
12 棚 600*300*1750 13 ダイニングテーブル 810*1350*700 14 椅子 1 580*480*405*720 14 椅子 2 580*480*405*720 15 月2 580*480*405*720 15 PC台 600*400*1345 16 コピー機 650*650*1000 17 ソファ 700*600*900 18 ソファ 700*600*900 19 ソファ 700*600*900 20 ソファ 700*600*900 21 デーブル 600*1200*400
13 ダイニングテーブル 810*1350*700 14 椅子 1 580*480*405*720 14 椅子 2 580*480*405*720 15 月子 4 580*480*405*720 15 PC台 600*400*1345 16 コピー機 650*650*1000 17 ソファ 700*600*900 18 ソファ 700*600*900 19 ソファ 700*600*900 20 ソファ 700*600*900 21 テーブル 600*1200*400
14 持子 1 580*480*405*720 椅子 2 580*480*405*720 椅子 3 580*480*405*720 椅子 4 580*480*405*720 15 PC台 600*400*1345 16 コピー機 700*600*900 18 ソファ 700*600*900 19 ソファ 700*600*900 20 ソファ 700*600*900 21 デーブル
椅子 2 580*480*405*720 椅子 3 580*480*405*720 椅子 4 580*480*405*720 15 PC台 600*400*1345 16 コピー機 650*650*1000 17 ソファ 700*600*900 18 ソファ 700*600*900 19 ソファ 20 ソファ 700*600*900 21 デーブル
椅子 3580*480*405*720椅子 4580*480*405*72015PC台600*400*134516コピー機650*650*100017ソファ700*600*90018ソファ700*600*90019ソファ700*600*90020ソファ700*600*90021テーブル600*1200*400
椅子 4 580*480*405*720 15 PC台 600*400*1345 16 コピー機 650*650*1000 17 ソファ 700*600*900 18 ソファ 700*600*900 19 ソファ 700*600*900 20 ソファ 700*600*900 21 テーブル 600*1200*400
15 PC台 600*400*1345 16 コピー機 650*650*1000 17 ソファ 700*600*900 18 ソファ 700*600*900 19 ソファ 700*600*900 20 ソファ 700*600*900 21 テーブル 600*1200*400
16 ⊐ピー機 650*650*1000 17 ソファ 700*600*900 18 ソファ 700*600*900 19 ソファ 700*600*900 20 ソファ 700*600*900 21 テーブル 600*1200*400
17 ソファ 700*600*900 18 ソファ 700*600*900 19 ソファ 700*600*900 20 ソファ 700*600*900 21 テーブル 600*1200*400
18 ソファ 700*600*900 19 ソファ 700*600*900 20 ソファ 700*600*900 21 テーブル 600*1200*400
19 ソファ 700*600*900 20 ソファ 700*600*900 21 テーブル 600*1200*400
20 ソファ 700*600*900 21 テーブル 600*1200*400
21 テーブル 600*1200*400
21 7 272 000012000400
23 ワゴン 390*900*650
24 ワゴン 390*900*650
25 机 4200*1400*720
26 ワゴン 390*580*650
27 ワゴン 390*580*650
28 ワゴン 390*580*650
29 ワゴン 390*580*650
30 椅子(キャスター付) 500*520*450*920
31 椅子(キャスター付) 500*520*450*920
32 椅子(キャスター付) 500*520*450*920
33 椅子(キャスター付) 500*520*450*920
34 椅子(キャスター付) 500*520*450*920
35 椅子(キャスター付) 500*520*450*920

家具	夕九	サイズ		
番号	石竹	W*D*H*SH		
36	プリンタ	380*390*280		
37	ノートPC	330*270*40		
38	ノートPC	330*270*40		
39	棚	450*900*1200		
40	棚	1800*450*2150		
41	ホワイトボード	500*600*1700		
42	テーブル	1200*1200*720		
43	椅子(キャスター付)	480*480*450*850		
44	椅子(キャスター付)	480*480*450*850		
45	椅子(キャスター付)	480*480*450*850		
46	椅子(キャスター付)	480*480*450*850		
47	机	450*1650*1000		
48	椅子	280*380*680		
49	椅子	280*380*680		
50	コピー機	600*600*1080		
51	ホワイトボード	560*1290*1800		
52 机(キャスター解除)		450*1800*720		
53	机(キャスター解除)	450*1800*720		
54	椅子	420*440*430*800		
55	椅子	420*440*430*800		
56	椅子	420*440*430*800		
57	椅子	420*440*430*800		
58	椅子	420*440*430*800		
59	椅子	420*440*430*800		
71	棚	450*2700*1100		
72	棚	1800*900*1100		
73	棚	1800*900*1100		
74	棚	1800*450*2150		
75	プリンタ	380*390*280		
76	ノートPC	330*270*40		
77	ノートPC	330*270*40		
78	ノートPC	330*270*40		
81	机	1200*1600*		
82	椅子(キャスター付)	500*520*450*920		
83	モニター	345*60*280		
84	タワー	90*330*310		

※ハッチをかけた家具は転倒防止対策を施工

表 3 設置した家具の一覧

(b) 4 階部分

家具	夕社	サイズ		
番号	石朴	W*D*H*SH		
1	ソファ	900*1700*400*800		
2	ローテーブル	600*900*335		
3	PC台	600*400*1345		
4	ソファ	900*1700*400*800		
5	TV台	800*600*750		
6	TV	770*90*540		
7	棚	600*300*1750		
8	食器棚	900*450*1810		
9	キッチン	550*1655*800		
10	食器棚	900*450*1810		
11	冷蔵庫	590*610*1600		
12	棚	600*300*1750		
13	ダイニングテーブル	810*1355*690		
14	椅子	580*480*405*720		
	椅子 2	580*480*405*720		
	椅子 3	580*480*405*720		
	椅子 4	580*480*405*720		
15	PC台	600*400*1345		
16	コピー機	650*650*1000		
17	役員室棚	450*600*1800		
18	台	450*450*700		
19	ソファ	700*680*380*720		
20	ソファ	700*680*380*720		
21	ソファ	700*1560*380*720		
22	ガラステーブル	630*1200*400		
23	ワゴン	390*900*650		
24	ワゴン	390*900*650		
25	机	4200*1400*720		
26	ワゴン	390*580*650		
27	ワゴン	390*580*650		
28	ワゴン	390*580*650		
29	ワゴン	390*580*650		
30	椅子(キャスター付)	500*520*450*920		
31	椅子(キャスター付)	500*520*450*920		
32	椅子(キャスター付)	500*520*450*920		
33	椅子(キャスター付)	500*520*450*920		
34	椅子(キャスター付)	500*520*450*920		
35	椅子(キャスター付)	500*520*450*920		
36	プリンタ	380*390*280		
37	ノートPC	330*270*40		
38	ノートPC	330*270*40		
39	棚	450*900*1200		
40	棚	1800*450*2150		
41	ホワイトボード	500*600*1700		

家具	夕社	サイズ		
番号	白朳	W*D*H*SH		
42	テーブル	900*900*570		
43	椅子	530*450*480*790		
44	椅子	530*450*480*790		
45	椅子	530*450*480*790		
46	机(キャスター解放)	450*1800*720		
47	机(キャスター固定)	450*1800*720		
48	机(キャスター固定)	450*1800*720		
49	机(キャスター解放)	450*1800*720		
50	椅子	420*440*430*800		
51	椅子	420*440*430*800		
52	椅子	420*440*430*800		
53	椅子	420*440*430*800		
54	椅子	420*440*430*800		
55	椅子	420*440*430*800		
56	椅子	420*440*430*800		
57	椅子	420*440*430*800		
58	椅子	420*440*430*800		
59	椅子	420*440*430*800		
60	椅子	420*440*430*800		
61 椅子		420*440*430*800		
62	棚	350*1000*1985		
63	テーブル	1200*1200*720		
64	椅子(キャスター付)	480*480*450*850		
65	椅子(キャスター付)	480*480*450*850		
66	椅子(キャスター付)	480*480*450*850		
67	椅子(キャスター付)	480*480*450*850		
68	椅子	390*450*700*870		
69	椅子	390*450*700*870		
70	コピー機	600*600*1080		
71	棚	450*2700*1100		
72	棚	1800*900*1100		
73	棚	1800*900*1100		
74	棚	1800*450*2150		
75	プリンタ	380*390*280		
76	ノートPC	330*270*40		
77	ノートPC	330*270*40		
78	ノートPC	330*270*40		
79	TV	770*90*540		
80	TV台	900*350*350		
81	机	1900*1800*720		
82	椅子(キャスター付)	500*520*450*920		
83	モニター	345*60*280		
84	タワー	90*330*310		
А	ホワイトボード	1700*630*1960		

※ハッチをかけた家具は転倒防止対策を施工

表 3 設置した家具の一覧

(c) 屋上階部分

家具	夕社	サイズ		
番号	石砂	W*D*H*SH		
1	オープン棚	355*800*1400		
2	机	450*1650*1000		
3	椅子 1	280*370*680		
	椅子 2	280*370*680		
4	机	1800*900*720		
5	椅子 1	420*430*440		
	椅子 2	420*430*440		
	椅子 3	420*430*440		
	椅子 4	420*430*440		
	椅子 5	420*430*440		
	椅子 6	420*430*440		
6	TV台	570*900*1130		
7	TV	120*1250*735		
8	パーテーション	2460*70*2150		
9	棚1	450*800*1200		
10	棚2	798*450*1207		
11	棚3	798*450*1207		
12	机	1590*695*700		
13	ハードディスク	200*500*430		
14	ディスプレイ	450*60*480		
15	椅子	470*470*860		
16	机	1590*695*700		
17	ハードディスク	190*440*420		
18	ディスプレイ	420*60*410		
19	椅子	470*470*860		
20	机	1590*695*700		
21	ハードディスク	190*440*420		
22	ディスプレイ	420*60*410		
23	椅子	470*470*860		
24	机	1590*695*700		
25	ハードディスク	200*500*430		
26	ディスプレイ	420*60*410		
27	椅子	470*470*860		
28	棚2	798*450*1207		
29	棚1	450*800*1200		
30	コピー機	580*670*1230		
31	机	795*695*690		
32	プリンター	510*480*270		
33	棚5	798*450*1207		
34	棚3	798*450*1207		
35	机	795*695*690		
36	プリンター	470*485*305		
37	パーテーション	400*50*1625		
38	金庫	545*570*900		
39	コピー機	580*670*1230		
40	机	1190*800*700		

家具	夕敌	サイズ		
番号	11 1小	W*D*H*SH		
41	ノートPC	305*270*260		
42	椅子	470*470*860		
43	机	800*1400*700		
44	ハードディスク	450*190*420		
45	ディスプレイ	160*420*400		
46	椅子	530*570*470*930		
47	机	1190*800*700		
48	ノートPC	365*270*285		
49	椅子	470*470*860		
50	台	420*600*640		
51	棚3	798*450*1207		
52	棚2	800*450*1180		
53	棚4	800*450*1180		
54	棚4	800*450*1180		
55	パーテーション	2500*40*1620		
56	観葉植物	320*320*1800		
57	テーブル	750*750*700		
58	椅子	400*400*440		
59	椅子	400*400*440		
60	テーブル	750*750*700		
61	椅子	400*400*440		
62	椅子	400*400*440		
63	棚1	450*800*1200		
64	棚1	450*800*1200		
65	TV	110*740*440		
66	オープン棚	355*800*1400		
67	観葉植物	320*320*1800		
68	観葉植物	320*320*1800		
69	移動書架	2740*970*1800		
70	書棚	900*450*1800		
71	書棚	900*450*1800		
72	書棚	900*450*1800		
73	書棚	900*450*1800		
74	机	1000*700*600		
75	机	1000*700*600		
76	机	1000*700*600		
77	机	1000*700*600		
78	机	1000*700*600		
79	机	1000*700*600		
80	机	1300*850*600		
81	机	1300*850*600		

※ハッチをかけた家具は転倒防止対策を施工

試験体	二重床	ラック種別	総質量	固定方法	頂部連結	試驗目的
() (2) (3)	A ゾーン アルミ製 専用二重床	耐震ラック	500kg	 ・ラックと専用二重床の間 ボルト固定 ・専用二重床と建物床の間 M12 あと施工アンカー固定 	あり	ラック頂部連結がある場合のラック耐震性能の把握
4		空調機	445kg		_	空調機の耐震性能および床下配管の挙動の把握
(5)		耐震ラック	500kg			ラック頂部連結がない場合のラック耐震性能の把握
6		オープンラック	300kg			オープンラックの耐震性能の把握
(7) (8) (9)	B ゾーン 鋼製架台	耐震ラック	500kg	 ・ラックと鋼製架台の間 ボルト固定 ・鋼製架台と建物床の間 M12 あと施工アンカー固定 	あり	ラック頂部連結がある場合のラック耐震性能の把握
10		耐震ラック	500kg	 ・ラックと建物床の間 ターンバックルによる固定 		ラック(ターンバックルによる固定)および FA 床の耐震性 能の把握
0	B, Cゾーン 耐震型 FA 床 (水平震度 1.06 相当 支持脚自立方式)	耐震ラック	500kg	 ・ラックとFA床パネルの間 ボルト固定 ・FA床と建物床の間 接着剤固定 		ラック(床パネルへの固定)および FA 床の耐震性能の把握
13		標準ラック	300kg	 ・ラックとFA床パネルの間 非固定 ・FA床と連物床の間 接着剤固定 		固定されていないラックの挙動の把握
	D ゾーン 耐震型 FA 床 (接着・劣化)	標準ラック	300kg	 ・ラックとFA床パネルの間 2形の金物による固定 ・FA床と建物床の間 非固定 		FA 床の接着強度が経年劣化で失われた場合の挙動の把握
12	C ゾーン 鋼製架台+免震台	標準ラック	300kg	 ・ラックと免震台と鋼製架台の間 ボルト固定 ・鋼製架台と建物床の間 M12 あと施工アンカー固定 	-	免震台が許容変形を超えた場合の限界性能の把握

表 4 サーバールームに設置したラックの一覧





(1) 1階・オフィス部分



(2) 4階・オフィス部分



(3) 1階·住宅部分



(4) 4階・住宅部分



(5) 屋上階·全景

(6) 屋上階

図 14 家具・什器の施工状況

3)入力地震動

入力地震動は 1995 年兵庫県南部地震の JMA 神戸観測記録と、首都圏地震観測 MeSO-net において、平成 23 年東北地方太平洋沖地震で観測された地震動を用いた。MeSO-net は東 京大学地震研究所が首都圏内に約 400 地点設置した高密度な地震観測網である。本実験で は MeSO-net の西新宿観測点における記録を用いた。MeSO-net の地震計は地下 20m に設置 されており、表層 20m 分の地盤の増幅特性が含まれていない。そのため地表面における観 測記録と比較すると、表層部分で励起される高振動数成分が減衰しており、地表面での観 測記録よりもやや小さめの記録となっている。今回の実験対象は高層建物であり、一般に 高層建物は地下階を有するため地中深くに支持されていることが多い。そこで実験では高 層建物の地下階に MeSO-net の観測記録が入力されて上層階に伝達することを想定し、観測 記録をそのまま用いた。

また東北地方太平洋沖地震の本震記録は、巨大津波を発生させたマグニチュード9.0の 地震としては長周期成分が大きく励起しなかったと言われている。そこで本震記録に加え て本震の約30分後に、茨城県沖で発生したM7.7の余震記録を入力地震動として用いた。 余震記録には首都圏での長周期地震動特性が含まれているため、余震記録をスカラー倍し て、首都圏で想定される直下地震に備える検討用地震動と考えた。ここでは想定東京湾北 部地震レベルの速度振幅を持つことを想定して、余震記録を330%倍した。本震と余震の震 央位置と最大加速度分布を図15に示す。入力に用いた地震動の加速度時刻歴波形を図16 に、速度時刻歴波形を図17に示す。なお実験ではNS成分を短辺方向(X)に、EW成分を 長辺方向(Y)に入力した。



K-NET NIED

K-NET NIED

(a)本震(b) 15:15 発生の余震図 15 2011 年東北地方太平洋沖地震の震央位置と最大加速度分布





図 16 入力地震動の加速度時刻歴波形





入力地震動の速度応答スペクトルを図 18 に示す。図 18 には建設省告示 1461 号での地震 力の疑似速度応答スペクトルを併記した。本震記録は告示スペクトルの稀な地震レベルで あり、余震記録の 330%は、3~6 秒では告示スペクトルの極めて稀な地震を上回る地震力で ある。図 19 は入力地震動の最大加速度と最大速度の相関を、これまでの大地震の観測記 録のものに追記したものである。過去の地震記録の被害程度と比較すると、入力地震動レ ベルは大被害に至るレベルでは無い。



図 18 入力地震動の速度応答スペクトル (h=0.05)



4) 計測

試験体の構造躯体および室内の建築設備機器、家具什器の挙動把握のため約400点のセンサーの設置し計測を行った。計測点の内訳を表5に、センサー仕様の概要を図20に示す。また、建物利用者への地震時の建物の室内被害状況を解りやすく提示するための映像収録を目的に、約50台のビデオカメラを設置し、実験中の試験体の外部および室内状況の観測を行った。

	加速度計	変位計	速度計	合計
構造躯体	66	40	11	117
天井	78	38		116
建築設備	93	12		105
家具什器	78			78
人体ダミー	12			12

表 5 計測機器の内訳



図 20 センサーの概要

a) 震動台加速度および試験体応答加速度計測計画

図 21~図 25 に試験体の応答加速度計測のためのセンサー配置を示す。図 26 に試験体 内部に設置した人体ダミーの設置状況を示す。人体ダミーは頭部および胸部にそれぞれ 3 方向の加速度センサーが設置されている。

なお、データのサンプリングは 200Hz を基本としたが、人体ダミーの加速度センサーは 衝撃力を観測するために 2000Hz のサンプリングとした。


図 21 構造体の加速度計測計画



図 21 構造体の加速度計測



図 21 構造体の加速度計測



図 22 設備機器の加速度計測計画



図 23 スプリンクラー配管の加速度計測計画







図 24 家具什器の加速度計測計画



図 25 天井の加速度計測計画



(a) 4 階



(b) 屋上階

図 26 人体ダミーの設置風景

b) 試験体応答変位計測計画

図 27~図 29 に試験体の応答変位計測のためのセンサー配置を示す。なお、データのサ ンプリングは 200Hz とした。



図 27 縮約層の相対変位計測計画



ワイヤ間距離一覧表		
計測点名称	距離[mm]	
01X	1500	
02X	1500	
03Y	1500	
04Y	1500	
05X	1500	
06X	1500	
07Y	1500	
08Y	1500	
09X	1500	
10X	1500	
11Y	1500	
12Y	1500	



(b) 2 階~3 階間



図 27 縮約層の相対変位計測計画





図 29 天井の相対変位計測計画

c) 試験体応答速度計測計画

図 30 に試験体の応答速度計測のためのセンサー配置を示す。計測機器の個数の制約から屋上階の計測のみ、水平2方向成分とした。なお、データのサンプリングは200Hz とした。



図 30 構造体の速度計測計画



図 30 構造体の速度計測計画

d) 実験映像取得計画

図 31 に試験体内部に設置した CCD カメラと、試験体外周に設置した移動カメラの設置 位置の概要を示す。また、図 32 にハイビジョンカメラの設置位置の概要を示す。



図 31 試験体内外部の映像計測計画



(a) 1 階部分



(b) 4 階部分

図 32 試験体の映像計測計画(ハイビジョンカメラ)



(c) 屋上階部分



(d) ハイビジョンカメラの設置例(1階部分⑥)

図 32 試験体の映像計測計画(ハイビジョンカメラ)

5) 実験結果

実験は高層建物モデルの加振を2日間、低層建物の加振を1日間実施した。実施内容の 一覧を表 6に示す。以降では高層建物の実験から西新宿余震330%を入力した場合、低層建 物の実験からJMA神戸75%を入力した場合の結果を中心に述べる。

加振日	試験体種類	入力地震動	
2011年10月4日	高層モデル	JMA神戸25%	H-1
		西新宿本震50%	H-2
		西新宿本震100%	H-3
		西新宿余震150%	H-4
2011年10月7日		西新宿余震75%	H-2
		西新宿余震330%	H-6
2011年10月12日	低層モデル	西新宿余震330%	L-1
		JMA神戸25%	L-2
		JMA神戸50%	L-3
		JMA神戸75%	L-4

表 6 実施した実験の一覧

a)加速度計測結果

図 33~図 39 に高層建物モデルに西新宿余震 330%を入力した場合の応答加速度時刻歴、 速度時刻歴を示す。図 40~図 46 に低層建物モデルに JMA 神戸 75%を入力した場合の応答 加速度時刻歴、速度時刻歴を示す。構造躯体、空調設備、スプリンクラー横引き配管、家 具、天井面、および衝突実験用人体ダミーに設置したセンサーの記録を示した。人体ダミ ーの加速度記録は 500Hz のローパスフィルター処理を施したが、その他の記録は無処理の データである。



(2) Y 方向

図 33 西新宿余震 330%入力時の構造躯体の加速度時刻歴(高層モデル)





西新宿余震 330%入力時の構造躯体の加速度時刻歴(高層モデル) 図 33



(3) Z 方向

図 34 西新宿余震 330%入力時の構造躯体の速度時刻歴(高層モデル)







図 35 西新宿余震 330%入力時の空調設備の加速度時刻歴(高層モデル)





図 35 西新宿余震 330%入力時の空調設備の加速度時刻歴(高層モデル)







図 36 西新宿余震 330%入力時のスプリンクラー横引き管の加速度時刻歴(高層モデル)







図 36 西新宿余震 330%入力時のスプリンクラー横引き管の加速度時刻歴(高層モデル)







図 37 西新宿余震 330%入力時の家具の加速度時刻歴(高層モデル)







図 37 西新宿余震 330%入力時の家具の加速度時刻歴(高層モデル)







図 38 西新宿余震 330%入力時の天井の加速度時刻歴(高層モデル)







図 38 西新宿余震 330%入力時の天井の加速度時刻歴(高層モデル)



(b) 実験室2(27階/30階建て相当)





(2) Y方向

図 40 JMA 神戸 75%入力時の構造躯体の加速度時刻歴(低層モデル)





図 40 JMA 神戸 75%入力時の構造躯体の加速度時刻歴(低層モデル)









(3) Z 方向









図 42 JMA 神戸 75%入力時の空調設備の加速度時刻歴(低層モデル)






図 42 JMA 神戸 75%入力時の空調設備の加速度時刻歴(低層モデル)







図 43 JMA 神戸 75%入力時のスプリンクラー横引き管の加速度時刻歴(低層モデル)







図 43 JMA 神戸 75%入力時のスプリンクラー横引き管の加速度時刻歴(低層モデル)







図 44 JMA 神戸 75%入力時の家具の加速度時刻歴(低層モデル)







図 44 JMA 神戸 75%入力時の家具の加速度時刻歴(低層モデル)







図 45 JMA 神戸 75%入力時の天井の加速度時刻歴(低層モデル)







図 45 JMA 神戸 75%入力時の天井の加速度時刻歴(低層モデル)



(b) 実験室2(3階/4階建て相当)

図 46 JMA 神戸 75%入力時の人体ダミーの加速度時刻歴(低層モデル)

b)映像データによる試験体の応答状況

図 47~図 49 に、試験体内に設置したビデオ映像による室内被害の状況を、図 50 に最 終加振であった低層モデル・JMA 神戸 75%入力後の室内被害調査結果を示す。

図 47 は高層モデルの西新宿余震 330%入力時の室内状況と、低層モデルの JMA 神戸 75%入 力時の室内状況の違いを比較したものである。実験室2を比較すると高層モデルではキャ スター付家具が動き回ったが、バンド固定などの対策で十分に移動を防止していることが 確認された。一方、低層モデルでは激しい揺れによる家具の転倒やシステム天井の天井ボ ードの落下が確認された。住宅部分を見ると、高層モデルでは書棚や食器棚に施した転倒 防止対策が有効に働いていることが解る。一方、低層モデルでは転倒防止対策ごと壁から 剥がれてしまっている。

図 48 は高層モデルの西新宿余震 330%入力時の加振前後の室内状況の比較で、上層階と 下層階のオフィス部分で示している。上層階ではキャスター付のオフィス家具は大きく移 動したが、下層階ではキャスター付の家具もほとんど移動していないことが解る。

図 49 は低層モデルの JMA 神戸 75%入力時の加振前後の室内状況の比較で、上層階と下層階 のオフィス部分で示している。下層階・上層階ともにシステム天井の天井ボードの落下が 見られる。書棚を見ると上層階では無対策の書棚は転倒、対策済みの書棚も内容物が散乱 している。一方で下層階の書棚では無対策の書棚でも移動した程度で済んでいる。

高密度に撮影したビデオ映像データにより、建物の上層階と下層階とでの地震時の室内 被害の違いが、高層モデルの場合も低層モデルの場合も細かに確認された。

図 50 は、実験の最終加振であった低層モデルの JMA 神戸 75%入力後の、室内被害調査結 果の写真である。実験室 2 では書棚に転倒防止対策を施したものでも内容物の飛び出しが 発生した。しかし最終的な転倒には至っておらず、所定の減災効果が確認された。また実 験室 1・2 ともに天井ボードが落下、システム天井内に設置した消防設備であるスプリンク ラーヘッドや空調設備の吹き出し口で天井面との動きの違いによる損傷が発生した。しか しながらスプリンクラーヘッドの外れや、空調設備の吹き出し口が落下することはなく、 それぞれの建築設備は実験後も所定の機能を確保していることが確認された。なお、スプ リンクラーヘッドの一部では天井ボードとの衝突によりヘッド部分に残留変形などが発生 したが、実験後に実施した耐圧試験(日本消防検定協会の検定細則に準拠)では空気の漏 れは起こらず、スプリンクラーヘッドの所定の機能を保持していることを確認した。

147





(a) 実験室2 オフィス部











(c) 実験室3 オフィス部





(d) 実験室3 真上から

(1)超高層モデル 西新宿余震330%入力

- (2)低層モデル JMA神戸75%入力
- 図 47 高層モデルと低層モデルの室内被害状況の差



(1) 加振前



(2) 加振100秒後



1階・オフィス部分

4階・オフィス部分

NIED



加振前

加振100秒後

4階・住宅部分

図 48 高層モデル 西新宿余震 330%入力時の室内状況



(1) 加振前



(2) 加振20秒後



(3) 加振25秒後



1階・オフィス部分(4) 加振終了時
4階・オフィス部分図 49 低層モデル JMA 神戸 75%入力時の室内状況



(1) 実験室1・オフィス部



(2) 実験室2・オフィス部



(3) 実験室2・オフィス部



(4)実験室2・オフィス部 ライン天井



(5) 実験室1のスプリンクラーヘッド



(6) 実験室1のスプリンクラーの金属巻出し管

図 50 低層モデル JMA 神戸 75%入力後の室内被害調査

c) 観測データと室内被害に関する考察

図 51 および図 52 に構造躯体で観測された加速度記録のフーリエスペクトル(Parzen ウィンドウによる平滑化、バンド幅 0.1Hz)比から求めた伝達関数を示す。図 51 は高層モ デルの結果で、1 次固有周期によるピークが 3.2~3.3 秒付近に見られ、設計時の 1 次固有 周期 3~4 秒を再現することができた。高層階の実験室 2 と低層階の実験室 1 とを比較する と、実験室 2 では 3.2~3.3 秒の 1 次固有周期成分が大きく伝達しているのに対し、実験室 1 では 3 次の 0.8 秒付近の伝達の方が大きい。高層建物の階数位置の違いによる建物振動 特性の違いにより体感される揺れの違いが再現されている。なお図 52 は低層モデルの結 果であり、1 次固有周期は 0.6~0.8 秒付近に見られる。

図 53 と図 54 に最大応答値分布を、図 55 に最大層間変形角を示す。最大応答値分布の 速度と変位は加速度記録の 0.2Hz 以下の低振動数領域を遮断したフーリエ積分より求めた 値である。また層間変形角は図 34 および図 41 の速度記録の 0.2Hz 以下の低振動数領域を 遮断したフーリエ積分より求めた変位から算出した。高層モデルでの最大層間変形角は 1//500~1/150 の範囲と小さいが、低層モデルの場合は実験室 2 の Y 方向で 1/50 程度、実 験室 1 の Y 方向で 1/65 程度の大きな層間変形が発生した。

表 7 は構造躯体の床応答加速度から算出した計測震度の値である。本来、震度階は地表 面で観測された加速度をもとに算出する値であり、建物の床応答加速度に適用するもので はないが、室内被害程度と比較する指標の可能性として算出した。実験で得られた映像デ ータや実験後の被災調査と比較すると、全体として計測震度の値の大きさと被害の大きさ とは整合的な結果となった。

図 56 は床応答の見かけの卓越振動数をもとに家具の転倒評価 ⁵⁾をしたものであり、転倒の可能性を洋服ダンス(奥行/高さ=0.33)、書棚(奥行/高さ=0.18)について図中に示した。高層モデルの西新宿余震 330%入力時の床応答では実験室 2 でやや転倒の可能性が高いと判断され、低層モデルの JMA 神戸 75%入力時の床応答では、実験室 1・2 とも転倒の可能性が高いと判断される。実験で得られた映像データや実験後の家具調査の結果は概ね整合的な結果となった。

室内被災度の評価指標の構築のために、既存の計測震度や転倒評価手法の適用性を実験 後の調査結果と比較し検証した。本実験の試験体で発生する層間変形角は実際のプロトタ イプの建物で発生する値を再現していないため、室内被害を過小評価している可能性があ る。層間変形の影響も考慮した室内被害を予測する指標の構築のためには、地震後の被害 調査の結果やE-ディフェンスでこれまで実施されたその他の実験結果などを踏まえてい くことが必要である。

図 57 は天井面と躯体の水平方向加速度の最大値の相関で、横軸に躯体の最大加速度を、 縦軸に天井面に設置した加速度計の観測値の最大値を、ライン天井部分とグリッド天井部 分とで平均して示した。天井面で観測された加速度記録の波形(図 38、図 45)には、天 井ボードと天井ボードを支える下地材との衝突によるパルス状の成分が観測されていたた め、パルス成分を除去する目的で 20~25Hz の台形型のローパスフィルタ処理をして最大値 を求めた。図 57(a)の高層モデルでは、実験室1・2の天井面とも、躯体の床応答加速度に 対する倍率でみると、システム天井のタイプの違いによる差は小さく、ほぼ応答倍率は1.0 となった。これは天井下地に設置した振れ止めのブレースが有効に働いたためと考えられる。また 250 (cm/s²)を超える床応答加速度に対してはグリッド天井の応答倍率がやや大きくなる傾向がみられるが、グリッド天井・ライン天井ともに天井ボードの落下等は発生しなかった。

一方、天井下地に設置した振れ止めブレースを撤去した低層モデルの実験結果(図 57(b))では、躯体の床応答加速度に対する倍率でみると、システム天井のタイプの違いに よる差は小さく、500(cm/s²)を超える床応答加速度に対しては、応答倍率が1.5~2.0倍程 度となった。実験後の観察によると、JMA 神戸 75%入力時(図 57(b)の赤印)には実験室1 および2ともに、ライン天井部分の点検口周辺の天井ボードの落下が発生した。グリッド 天井では天井ボードの落下はほとんど無かったが、上下方向に天井ボードが跳ね上がった 影響による落下が数枚発生した。これらのシステム天井の天井ボードの落下のメカニズム について、今回、入手されたデータを踏まえ、ボードの落下限界の加速度等について整理 して地震時の室内での安全確保に役立てていくことが考えられる。

図 58 および図 59 は、天井内の吊り式の空調設備と躯体の水平方向加速度の最大値の関係である。横軸に躯体の最大加速度を、縦軸に空調機器の最大加速度を、空調機の吊りボルトに振れ止めブレースを設置した機器と設置しない機器とでまとめて平均をとって整理した。空調機を稼働した状態で実験を行ったため、空調機の加速度記録には稼働に伴う高振動数成分が載っている。そこで空調設備で観測された加速度記録の波形には 20~25Hz の台形型のローパスフィルタ処理をして最大値を求めた。

図 58 の高層モデルでは、実験室2の空調設備は振れ止めの有無によらず躯体の床応答 加速度に対する空調機の応答倍率はほぼ1.0であったが、実験室1の空調設備(振れ止め の無し)は約2倍程度の応答倍率となっている。これは設備機器の固有周期と建物の揺れ の高次の固有周期の影響であると考えられる。建物の床応答に、設備機器の固有周期成分 が卓越していると設備機器の応答倍率が増大するからである。一般に揺れが小さいと考え られる高層建物の低層階であっても、空調機の振れ止め等の耐震対策は有効に作用すると 考えられる。

図 59の低層モデルでは、実験室 1・2の設備機器はともに加速度の応答倍率は 2.0 程度 となった。実験室 2の振れ止めを設置した機器では、応答倍率は 1.5 程度と振れ止めによ る効果が表れている。

なお、実験時には高層モデル、低層モデルとも、全ての空調設備を稼働した状態で加振 を行ったが、空調機器の停止や、実験後に機器の稼働が正常でなくなる等の状況は発生せ ず、所定の機能維持を確保した。また一部の設備機器では実験後に試験体から取り外し、 工場での精密検査を実施した。空調機器(表 2 の D1、D2、D3)の工場検査ではファンモー ターの回転数や空調機外板の振動レベルに実験前後に変化は無く、製品の機能不良につな がる変化は無かった。排煙ファン(表 2 の FE)の工場検査では、出荷前と実験後とで、フ ァンの羽根車のバランスのずれ等に若干の差はあったものの、排煙ファンとしての機能に 影響を与える大きな差異は無かった。

表 8 は人体ダミーに設置した頭部の加速度センサーの記録から、最大加速度値(3 成分のベクトル合成の最大値)と交通外傷のバイオメカニクスで頭部衝撃基準として最も広く

利用されている HIC⁶⁾(Head Injury Criterion)を算出した結果である。ここでは HIC の 計算時間間隔を 36ms とした結果である。高層モデルの実験室 3 ではキャスター付の椅子に 座った人体ダミーが移動し、背後のショートキャビネットに頭部をぶつけた際に 18.7G の 衝撃が発生した。また低層モデルの実験室 2 では、立位の人体ダミーに書棚が直撃して 57.3G の衝撃が発生した。しかし HIC の値で観測加速度を評価すると、その値は非常に小 さく、HIC のリスクカーブ(傷害確率曲線)と比較しても、軽症の場合でもその傷害確率 は非常に小さい。

図 60 は人体ダミーへの家具の転倒による衝撃を評価するために行った実験映像の一部 である。同じ位置から家具をリリースして転倒させ人体ダミーの頭部に衝突させたもので、 ヘルメット着用の有無で衝突現象を比較した。人体ダミーの頭部に設置した加速度計の記 録によると、家具の衝突直後(一次衝突)よりも、一次衝突の影響により床面にぶつかっ た場合(二次衝突)の方が、最大加速度やHICの値が大きい場合があることが解った。(図 60 では、ヘルメットの無しの場合には床面への二次衝突の直前で高速度カメラによる計測 が終了している。実験時にはこの写真の後に床面への二次衝突が発生した。)ただし、こ れらの値はヘルメット着用によりともに低減されている。

地震時の人の室内安全性には、家具等の一次衝突に加えて、一次衝突によってバランス を崩し床面に頭部をぶつける二次衝突による影響も無視できない大きさである。また床面 への頭部の衝突は、地震の揺れによりバランスを失って転倒する場合にも発生しうる。地 震時の人の安全性確保、さらには安全な避難行動のためにはヘルメットの着用などによる 頭部保護が有効であることが、改めて示唆される。



(a) X 方向



図 51 床応答加速度のフーリエ振幅比による伝達関数(高層建物モデル)



(a) X 方向



図 52 床応答加速度のフーリエ振幅比による伝達関数(低層建物モデル)







図 54 低層建物モデルの最大応答値分布



(b) 低層建物モデル JMA 神戸 75%入力時

図 55 実験時に発生した最大層間変形角

表 7 床応答加速度から算出した計測震度の値

	震動台(1階相当)		1階(6階相当)		4階(27階相当)	
JMA神戸25%	5.2	震度5強	5.6	震度6弱相当	5.1	震度5強相当
本震100%	4.4	震度4	4.9	震度5弱相当	5.0	震度5弱相当
余震330%	4.8	震度5弱	5.3	震度5強相当	5.5	震度6弱相当

(b) 低層建物モデル

	震動台(1階相当)		1階(1階相当)		4階(3階相当)	
余震330%	4.9	震度5弱	4.9	震度5弱相当	5.3	震度5強相当
JMA神戸25%	5.2	震度5強	5.3	震度5強相当	5.9	震度6弱相当
JMA神戸75%	6.2	震度6強	6.2	震度6強相当	6.8	震度7相当







(b) 低層建物モデル(赤印は JMA 神戸 75%入力時)

図 56 家具の転倒可能性評価



(a)高層建物モデル



(b)低層建物モデル(赤印はJMA神戸75%入力時)

図 57 天井の最大応答加速度と構造体の最大応答加速度分布



(a) 実験室2(27階/30階建て相当)



振れ止め無し

⁽b) 実験室1(6階/30階建て相当)

図 58 設備機器の最大応答加速度と構造体の最大応答加速度分布(高層建物モデル)



(a) 実験室2(3階/4階建て相当)



振れ止め無し

⁽b) 実験室1(1階/4階建て相当)

図 59 設備機器の最大応答加速度と構造体の最大応答加速度分布(低層建物モデル)

表	8	人体ダ	Ξ	ーの加速度計の最大値と	HIC
---	---	-----	---	-------------	-----

入力地震動	タイプ	実験室2(詞	式験体4階)	実験室3(試験体屋上階)		
		最大 加速度(G)	HIC36	最大 加速度(G)	HIC36	
西新宿余震330%	超高層	22.4	0.036	18.7	15	
JMA神戸75%	低層	57.3	6	4.6	1.4	

※HIC36 は下式で t_2 - t_1 =36ms とした場合の値

$$HIC = \max_{TS \le t_1 \le t_2 \le TE} \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \alpha dt \right]^{2.5} (t_2 - t_1)$$
$$\alpha = \sqrt{\alpha_x^2 + \alpha_y^2 + \alpha_z^2}$$
$$TE - TS = 36ms$$



(参考図) HICのリスクカーブ



1次衝突(最大加速度26.1G、HIC=8)



1次衝突(最大加速度11.8G、HIC=4)



1次衝突



1次衝突



2次衝突直前(最大加速度40.0G、HIC=18) (1)ヘルメット無しの場合



2次衝突(最大加速度10.8G、HIC=4) (2)ヘルメット着用時

図 60 着座した人体ダミーへの家具衝突実験の事例

(c) 結論ならびに今後の課題

1つの試験体で高層建物における上層階と下層階の揺れを同時に再現する世界初の実 験を行い、構造体の床応答に関するデータを入手し、同時に試験体内にモデル化した高層 建物のオフィスおよび住宅の家具什器、天井・間仕切り壁等の非構造部材、および空調設 備機器の応答データおよび室内被害の映像データを入手した。高密度なデータ取得により オフィスや住宅の地震時の室内被害様相を明らかにするとともに、家具や天井下地、空調 設備などに施した転倒防止対策等の有効性を検証した。また室内被害の指標の構築に向け て、既存に提案されている被害指標(計測震度、転倒加速度、頭部傷害確率曲線)と実験 結果との適合性を検討した。

平成23年度の実規模実験では、表9に示す数多くの機関から実験協力を頂いた。ここ に記して謝意を表す。平成23年度実験は、平成23年に3月に発生した東日本大震災をう けて、建物の地震時室内被害の減災・防災のための啓発資料を社会に発信しようという、 これらの協力機関の思いが結集した成果である。本実験データは、これらの実験協力機関 と連携して以下の点に着目した整理を進め、技術資料として発表していく予定である。

東日本大震災等の被害調査結果と連携した実験結果の提示

②試験体に施工した対策技術による減災効果の定量評価

③本実験で評価していない構造骨組の変形(建物の層間変形等)が室内被害に与える影響を考慮した実験結果の評価

④建物の室内被害モニタリングシステム構築を指向した実験結果の提示

表 9 実験協力機関 一覧

長周期WG: 建設会社(大林、鹿島、清水、大成、竹中)					
建築研究所、東京理科大学、名古屋大学					
非構造部材WG:ロックウール工業会、岡村製作所					
設備機器WG:空研工業、新晃工業、テラル、特許機器、					
テクノフレックス、ダイキン工業、暖冷工業、					
千住スプリンクラー、三井化学産資、アサヒ産業					
情報機器WG:NTTファシリティーズ					
家具什器WG:岡村製作所、北川工業、サガワ、プロセブン					
千葉大学					
消防WG: 総務省消防庁、日本火災報知機工業会、					
日本照明器具工業会、日本消火装置工業会					
防災センターWG:セコム、三菱電機					
モニタリングWG:東京測振、白山工業、京都大学、名古屋大学					

(d) 引用文献

- 長江拓也、鐘育霖、島田侑、福山國夫、梶原浩一、井上貴仁、中島正愛、斉藤大樹、北 村春幸、福和伸夫、日高桃子:超高層建物の耐震性能を検証する実架構実験システムの 構築 - E - ディフェンス震動台実験-、日本建築学会構造系論文集 No. 640、1163-1171、 2009.07
- ロックウール工業会:阪神大震災 システム天井被害状況調査及び原因と対策案報告書、 1995.03
- 3) ロックウール工業会:システム天井構成部材の強度基準 解説、2011.09
- 4) ロックウール工業会:システム天井 新耐震基準、2011.09
- 5) 日本建築学会:非構造部材の耐震設計指針・同解説および耐震設計施工要領、2003.01
- 6) 自動車技術会:工学技術者と医療従事者のためのインパクトバイオメカニクス、2006.11

(e) 学会等発表実績

学会等における口頭・ポスター発表

発表成果(発表題目、口	発表者氏名	発表場所	発表時期	国際・国
頭・ポスター発表の別)		(学会等名)		内の別
地震時のオフィスの機能	吉澤睦博	第16回震災対策技	2012年2月	国内
損失と室内安全性 2011		術展		
年 E-ディフェンス実験				
(口頭)				
E-ディフェンスによる	吉澤睦博、長江	日本建築学会(シ	2012年3月	国内
オフィス建物の地震時機	拓也、福山國夫、	ンポジウム)東日		
能損失に関する実験的研	井上貴仁、梶原	本大震災からの教		
究 (口頭)	浩一斉藤大樹、	訓、これからの新		
	福和伸夫、北村	しい国つくり		
	春幸、中島正愛			

学会誌・雑誌等における論文掲載

なし

マスコミ等における報道・掲載

報道・掲載された成果	対応者氏名	報道・掲載機関	発表時期	国際・国
(記事タイトル)		(新聞名・T V 名)		内の別
長周期地震動実験 高	吉澤 睦博	日経新聞	2011年10月8日	国内
層ほど家具転倒				
首都襲う"長周期地震	吉澤 睦博	テレビ朝日	2011年10月27日	国内
動"徹底検証				
対策を急げ"長周期地	吉澤 睦博	NHK大阪	2012年1月30日	国内
震動"				

(f) 特許出願、ソフトウエア開発、仕様・標準等の策定

なし