

3.2.7 超高層建物に付随する非構造部材の機能保持と避難性に関する考察

(1) 業務の内容

(a) 業務の目的

前年度実施した E-ディフェンス実験や既往研究をもとに、損傷状態に基づく各機能損失状況を検証する。また、超高層建物の被害が住民生活に与える影響、復旧時間に関する検討を行い、機能回復の観点から対策技術について検討する。

(b) 平成 20 年度業務目的

前年度の E-ディフェンス実験では、E ディフェンス試験体の下層 4 階に立て配管（6 種類の排水管と 2 種類の給水管）を設置して耐震実験を行った。加振後には、配管の接続部等に変形に伴う隙間などが観察されたが、とくに機能に影響する損傷は見られなかった。また、間仕切り壁には、種類の違いによって、その損傷過程に差異が見られたが、損傷自体は軽微なものであった。

一方、超高層の高層階の居室では、長周期地震動によるゆっくりとした大きな揺れでコピー機などのキャスター付きの重量機器が移動し、居住者に危害を及ぼす危険があることが E-ディフェンス実験などで明らかになっている。また、揺れが長時間継続し、地震後の避難行動に影響することも指摘されている。

そこで、本年度は、とくに超高層建物の地震時の揺れが、地震後の避難行動に与える影響について検討する。さらに、キャスター付き機器の地震時移動量の評価法を検討するとともに、回転ダンパーにより移動量を抑制するキャスターを開発して、その効果を振動台実験により確認する。

(c) 担当者

所属機関	役職	氏名
独立行政法人建築研究所	上席研究員	斉藤大樹

(2) 平成 20 年度の成果

(a) 業務の要約

超高層建物の地震時の被害や揺れが、地震後の避難行動や住民生活に与える影響については、すでに実施されている超高層集合住宅の地震対策の現状を、ヒアリング調査等により明らかにし、その問題点を明らかにした。

キャスター付き機器の地震時移動量の評価法については、キャスター付き医療機器を中心に振動台実験を行い、Weibull 分布を用いた応答予測を行った。また、回転ダンパーにより移動量を抑制するキャスターを開発して、その効果を振動台実験により確認した。

(b) 業務の成果

1) 超高層建物の被害が住民生活に与える影響

a) 実態調査

東京都中央区に建つ 37 階建て鉄筋コンクリート造超高層マンション（以下、建物 T と呼ぶ）の自治会長および中央区役所の担当者に、地震対策に関するヒアリング調査を行った。調査には、千葉大学大学院工学研究科の高橋徹研究室の協力を得た。建物 T の自治会長からは、地震で被災した場合に、3～4 日間は自力で生活することを目標としており、水や簡易トイレの備蓄、防災委員の設置などの対策を行っているが、とくに以下の点が問題であることが指摘された。

- マンションの設計時に備蓄品用のスペースが確保されていないため、新たにそうしたスペースを設置することが困難である。
- この超高層マンションに対応した防災マニュアルがない
- 地震により電話が不通になった場合に、被災後の下層と上層との連絡や通信手段がない。
- 地震で大きな揺れが長時間続くときの避難行動の取り方がわからない。
- 超高層マンションの住民間の関係は、低層の古い住宅街と異なり、協力関係の構築が難しい。

また、区役所担当者の話では、中央区は高層住宅防災対策検討委員会の報告書¹⁾を作成し、主にライフライン等に着目し対策を行っているということだった。あるマンションと協力で独自の防災マニュアル作りをしているが、特化したものを作るのに時間がかかり、すべての超高層マンションに共通したものを作るのは難しいという意見を得た。しかし、マンションの構造や住む形態が様々であるとしても超高層建築物に共通する項目はいくつかあげられる。既住の研究でも述べられているように、住民がそれぞれ気遣うこと（家具転倒防止、備蓄品）も重要であるが、設計者や管理者が協力して住民が求めている情報（設備や構造に対する知識・安全性の理解）を与えるべきである。

b) 地震時に想定される被災状況と対策

今日、その発生が懸念されている東海・東南海地震（名古屋三の丸で予想される長周期地震動）と南海地震（大阪で予想される長周期地震動）を建物 T に入力し、どのような応答をするか解析した。東海・東南海地震は長周期成分を持つ地震動となり、震源から離れている超高層建築物にも被害が及ぶのではないかとされている。図 1 および 2 にその解析結果から得られた加速度波形と変位波形を示す。37 階では最大 1.31m という大きな変位が生じるとされ、加速度も 350gal に及ぶ値となることがわかる。建物 T が名古屋・大阪にある想定としての結果ではあるが、高層階になるにつれて相当な横揺れが生じる。

このときに想定される被災状況としては、高層部の室内の住民は、図 3 に示す行動難度の評価曲線²⁾を用いて検証すると、人が行動する上では「かなり乱れ滞りなく行動できない」「乱れるが滞りなく行動できる」の中間レベルになり、避難行動に困難が生じることが予想される。また、室内の家具の状況については、震度 5 弱で移動し始め 6 強でダンスなどの半数が転倒するという既存の研究結果からも、高層になるにつれて室内の家具（食器棚、ダンス）は大きく移動・転倒することが考えられる。

図4は、被災状況のシナリオとともに、室内で生活している住民、そしてそれを統括している自治会等がとるべき行動を時間経過に沿って想定したものである。対策としては、住民による家具の転倒防止・防災訓練の強化や行政の積極的な活動、そして、管理者・設計者は建物や設備等の耐震性などの情報を住民と共有すべきである。緊急地震速報の活用も重要であるが、現状の緊急地震速報は地表の揺れの大きさ（震度）を知らせるもので、建物の上層の揺れの増幅が評価できないため、震度が小さくても建物が共振して上層で大きく揺れる危険性がある点に留意が必要である。また、想定される状況や行動指針をまとめた防災マニュアルの作成が急務である。

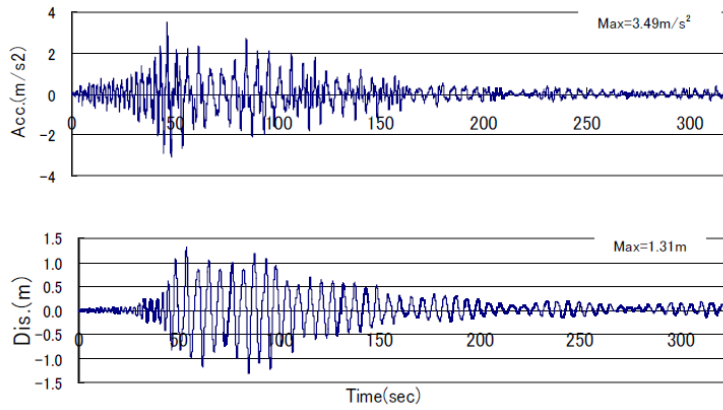


図 1 東海・東南海地震の 37 階の加速度・変位波形

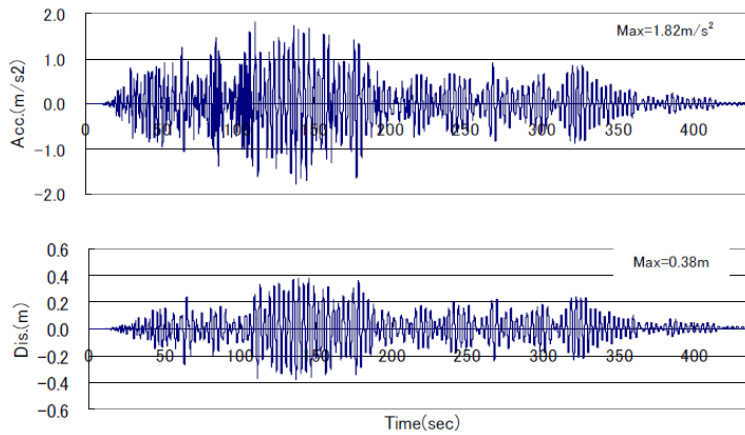


図 2 南海地震の 37 階の加速度・変位波形

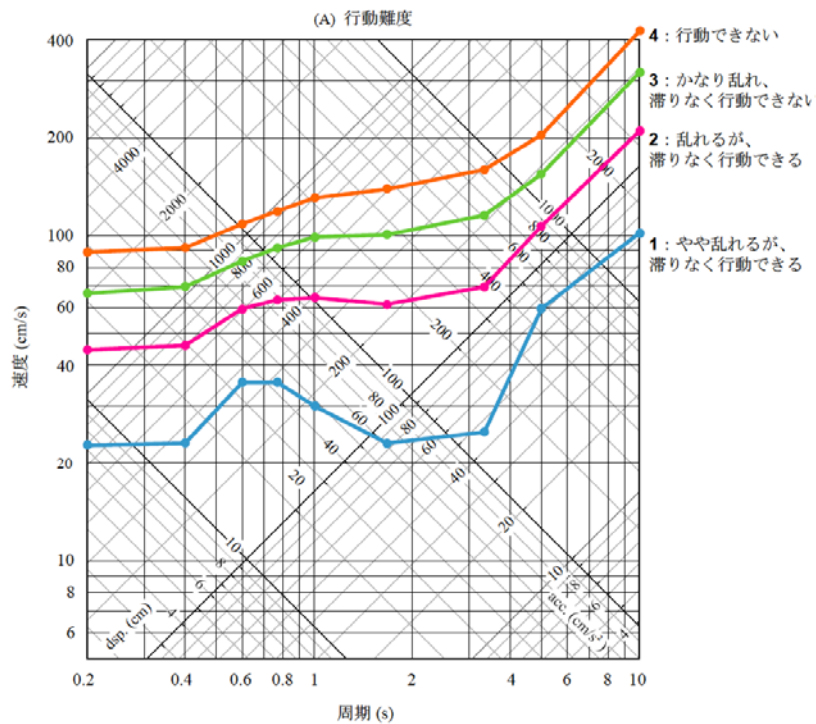


図 3 単調加振の対する行動難度の評価曲線（平均値）²⁾

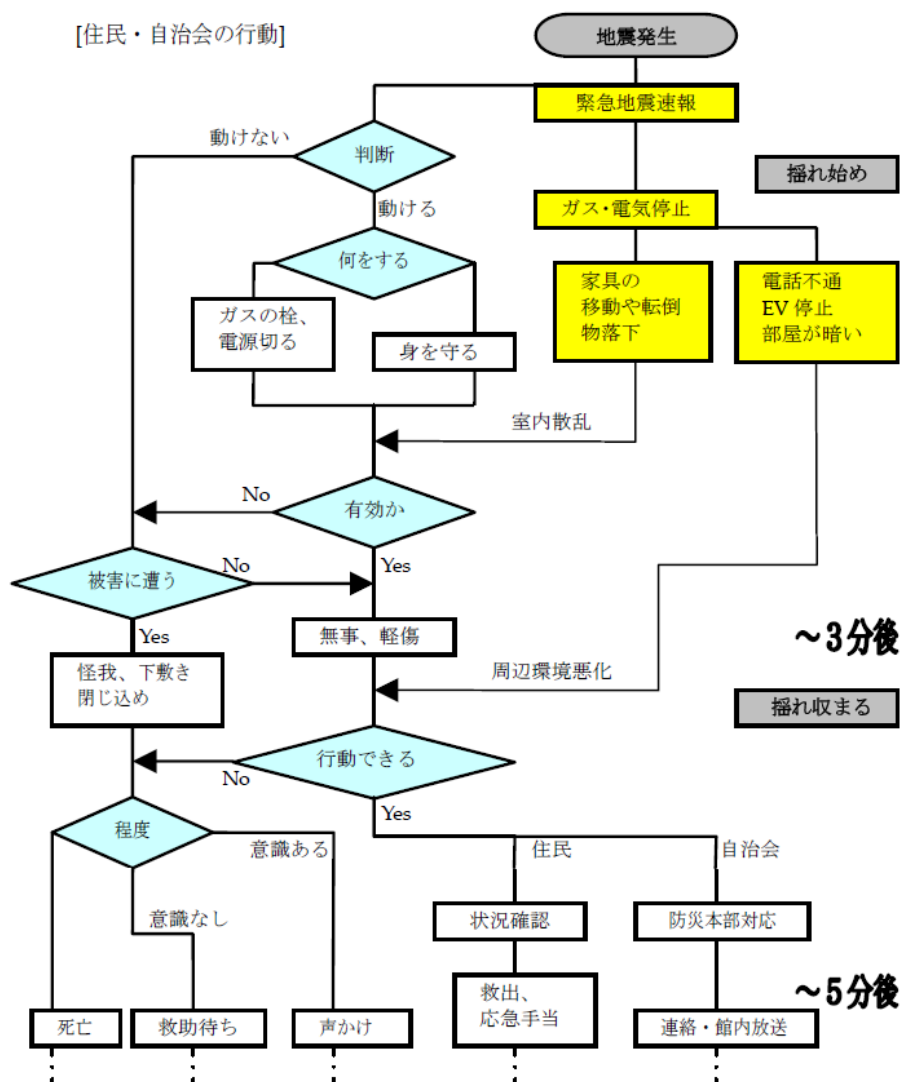


図 4 地震時の超高層マンションにおける被災状況と対策のシナリオ

2) キャスター付き機器の地震時移動量の評価

a) はじめに

今後数十年の間に高い確率で発生が予測されている東海地震、東南海地震、南海地震などにより沖積平野に長周期地震動が発生し、高層建築物に大きな揺れが発生することが懸念されている。このような状況においては強震動による避難行動の難しさに加え、室内の家具が大きく滑り動くことにより避難行動が妨げられ、さらに行動難度が上がることを予想される。このような背景から強震時の室内空間の状態把握は喫緊の課題である。

これまでに、地震時における家具の挙動については金子により転倒率の推定式³⁾、家具の滑り量の簡易評価式^{4)、5)}などが提案されている。通常家具の移動量に関しては文献⁶⁾において検討したことから、ここでは、キャスター付きの医療器具を中心に大振幅の揺れを再現できる大ストローク振動台を用いて実験を行い、Weibull分布を用いて応答値の予測を行った結果について報告する。なお、本研究は千葉大学大学院工学研究科の高橋徹研究室と共同で行われた。

b) 実験概要

建築研究所の中型振動台（2008年8月1,2日）と、大ストローク振動台（2008年10月20～22日）で表1に示すような加振を行った。ただし、器具が振動台から落下するなどの危険性がある場合には実験を中止した。試験体は表2に示す5種類のキャスター付き医療器具であり、積載物の有無の影響も考慮した。計測はモーションキャプチャシステムで行い、以下の解析には実測値を用いた。

表1 加振表（台の最大加速度：理論値（m/s²））

		周期					
		0.5 s	1.0 s	2.0 s	3.0 s	5.0 s	7.0 s
台の振 幅 (中 型 振 動 台)	30 mm	4.74	1.18	0.30	0.13		
	40	6.32					
	50		1.97	0.49	0.22		
	70		2.76	0.69	0.31		
	90		3.55	0.89	0.39		
	110			1.09	0.48		
	130			1.28	0.57		
台の振 幅 (大 ス ト ロ ー ク 振 動 台)	200			1.97	0.88	0.32	0.16
	400			3.95	1.75	0.63	0.32
	600			5.92	2.63	0.95	0.48
	800			7.90	3.51	1.26	0.64
	1,000			9.87	4.39	1.58	0.81
	1,200			11.84	5.26	1.89	0.97
	1,400					2.21	1.13
	1,600					2.53	1.29

表2 実験に用いた器具と各種条件

器具	質量 (kg)	静止摩 擦係数	実験記号	固定箇所	備考
車椅子	17.5	0.0023	K01	0	マネキン (60kg) 載荷
ストレッ チャー	70.0	0.011	S00	0	
			S01	0	マネキン (60kg) 載荷
			S10	1	
			S20	2	
			S21	2	マネキン (60kg) 載荷
金属製ワゴ ン	30.0	0.03	G00	0	
			G10	1	
			G20	2	
洗面器置き	4.3	0.085	W01	0	水を張った洗面器載荷
点滴台	7.0	0.083*	T00	0	*: 中型振動台
		0.095	T01	0	点滴袋 (PET ボトル) 載荷

c) 実験結果と機器の移動量の評価

器具の台に対する相対変位を台の振幅で基準化して図5に示す。加速度が大きくなるとキャスター付き器具は完全免震（器具の絶対位置は変わらず、台のみが動く）となるため

振幅比は1に近づく。図5より、静止摩擦係数の小さな器具（車椅子やストレッチャーなど）ほど振幅比の立ち上がりが早い傾向が読み取れる。そこで、加速度 a (m/s^2)と振幅比の関係を表す関数 $F(a)$ を式(1)のWeibull分布により表す。さらに、積率法を用いてWeibull分布のパラメータ (γ 、 m 、 η) を推定すると図6のようになった。

$$F(a) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{a-\gamma}{\eta}\right)^m\right] \quad (1)$$

図6より、静止摩擦係数 μ とパラメータ γ_E の間には高い相関が認められ、(2)式のように表すことができる。

$$\gamma_E = 6.18 \mu + 0.14 \quad (2)$$

さらに、この推定された γ_E を用いて m と η を(3)式ならびに(4)式のように推定することができる。

$$m = 2.55 \gamma_E - 0.09 \quad (3)$$

$$\eta = 3.48 \gamma_E^{2.76} \quad (4)$$

このようにして推定したWeibull分布の式を実験結果と重ねて描いたのが図5の実線であり、加振周波数に依らずおおむね1つのWeibull分布曲線で振幅比を表すことが可能と言える。この結果を金子の滑り量推定式((5)式)と比較したのが図7である。なお、ここで定義されている滑り量は振幅の2倍になっている。

$$\delta_s = D \mu^{-0.3} F_e^{0.5} (V - V_0)^{1.56} \quad (5)$$

ここに、 μ は摩擦係数、 F_e は入力波の等価振動数、 V は入力波の最大速度(= V_{max})、 V_0 は家具が滑り出す速度である。等価振動数 F_e は、入力波の最大加速度 A_{max} と最大速度 V_{max} から $F_e = A_{max} / (2\pi V_{max})$ より求めた。また、家具が滑り出す速度 V_0 は、家具の降伏時の加速度 μg (g は重力加速度)と等価振動数 F_e から次式により求めた。

$$V_0 = \mu g / (2\pi F_e) \quad (6)$$

また、 $D = 0$ ($V < V_0$)、 $D = 0.02$ ($V \geq V_0$: 平均値)、 $D = 0.035$ ($V \geq V_0$: 平均値 $+\sigma$)である。(5)式の本来の適用範囲が $\mu > 0.1$ なので、 μ が非常に小さい範囲では適合性に無理があり、図7の結果からも今回の推定の方が妥当な推定となっていることがわかった。

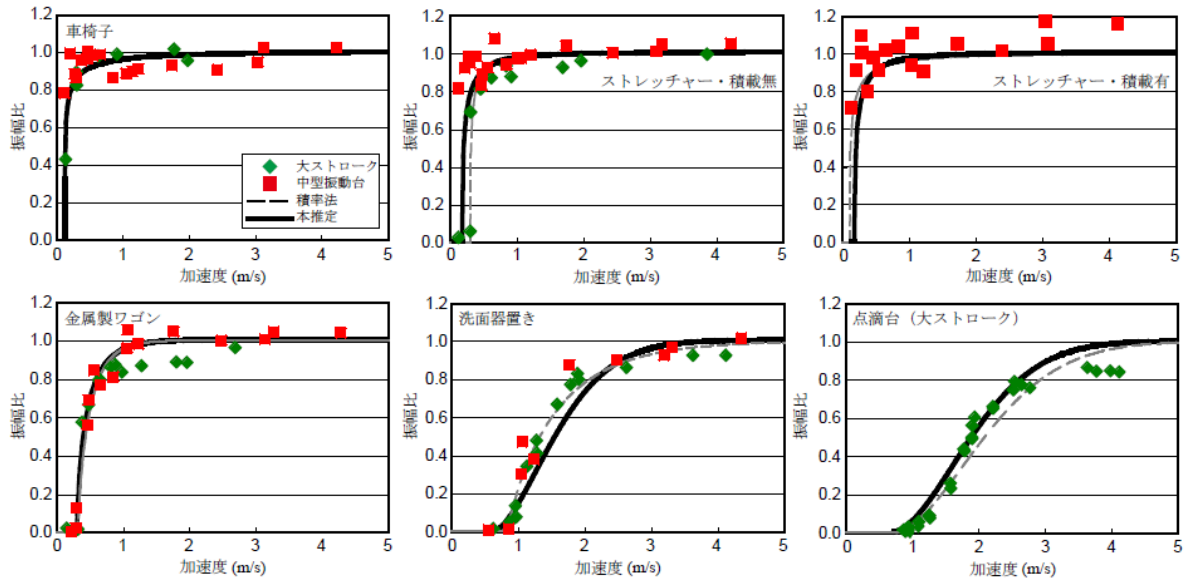


図5 振幅比と加速度の関係並びに Weibull 分布のあてはめ

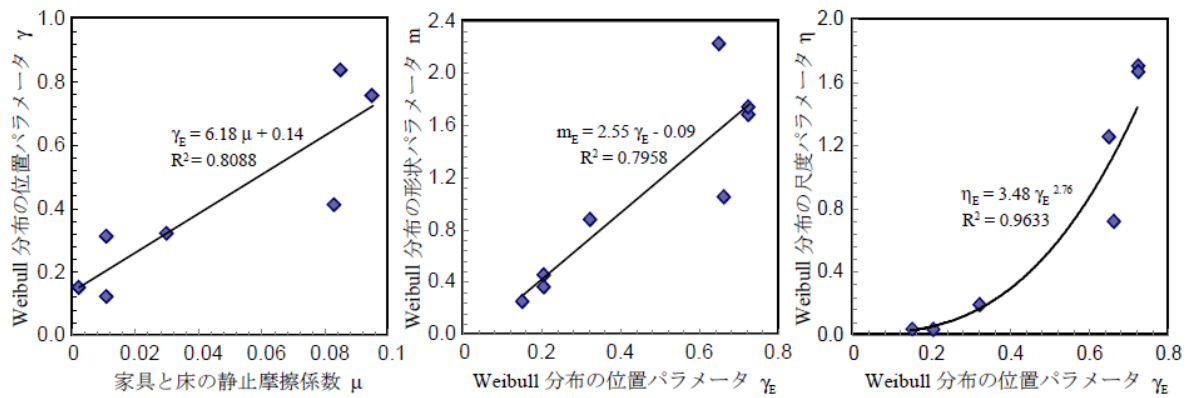


図6 Weibull 分布のパラメータ推定

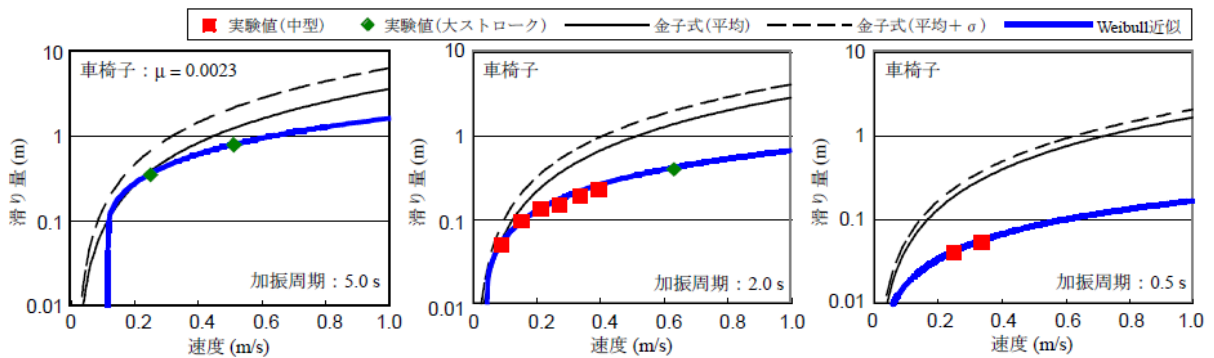


図7 滑り量の推定結果と既往の推定式（金子式）との比較

3) 回転ダンパー付きキャスターによる地震時の機器等の移動制御

a) はじめに

キャスター付きの家具や機器などは、地震時にキャスターが転がることで免震効果が期待でき、キャスターの上のものが飛散しないなどの利点はあるが、揺れの振幅が大きくなると、移動量が増えて衝突・転倒する危険がある。キャスター付きの家具や機器は、住宅ではテレビ台やピアノなど、オフィスではコピー機など、比較的、重量物に多いため、地震時に移動して人にぶつかり怪我を起す危険がある。室内の安全確保の観点から、キャスター付き機器等の対策が急務である。

そこで、本研究では、回転速度に応じて抵抗が大きくなる回転ダンパーをつけたキャスターを開発し、その特性を振動台実験により確かめた。

b) 回転ダンパー付きキャスターの開発

開発されたキャスターは、各種重量物の本体下部に設置された基体部材（図7のA）と、回転自在に設けられたローラ部材（図7のB）とを備えたキャスターに、ローラ部材の回転速度に応じて抵抗が大きくなる特性を有する回転ダンパー（図7のC）を設けたものである。なお、回転ダンパー付きキャスターは、トックベアリング株式会社、ハンマーキャスター株式会社と共同で開発したものである。

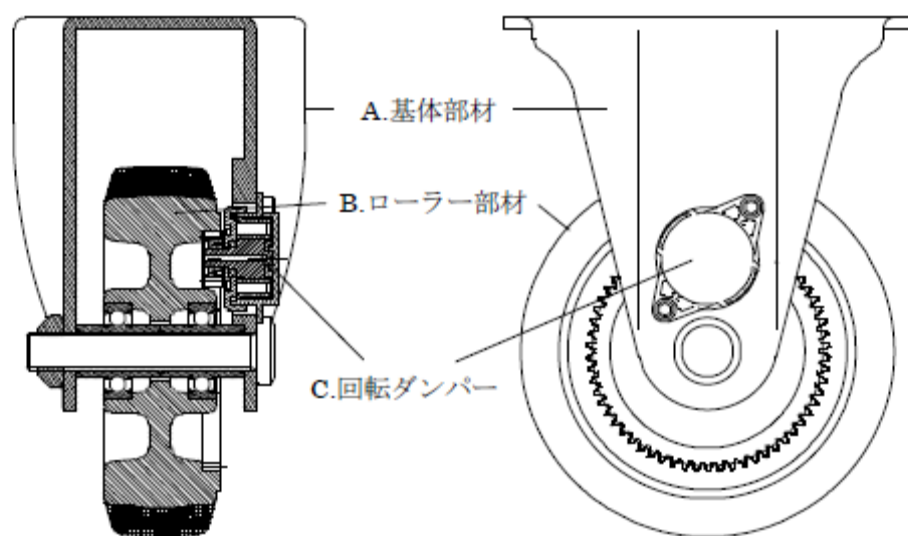


図8 回転ダンパー付きキャスターの構成図

回転ダンパーの回転抵抗力は内部の粘性流体の粘性等を設計することにより、任意に設定することができる。図8は、開発に用いた回転ダンパーの速度依存特性である。図のD300, D600, D900, D1500, D1800 は回転ダンパーの種別を表しており、数値が大きいほど抵抗力が大きい。

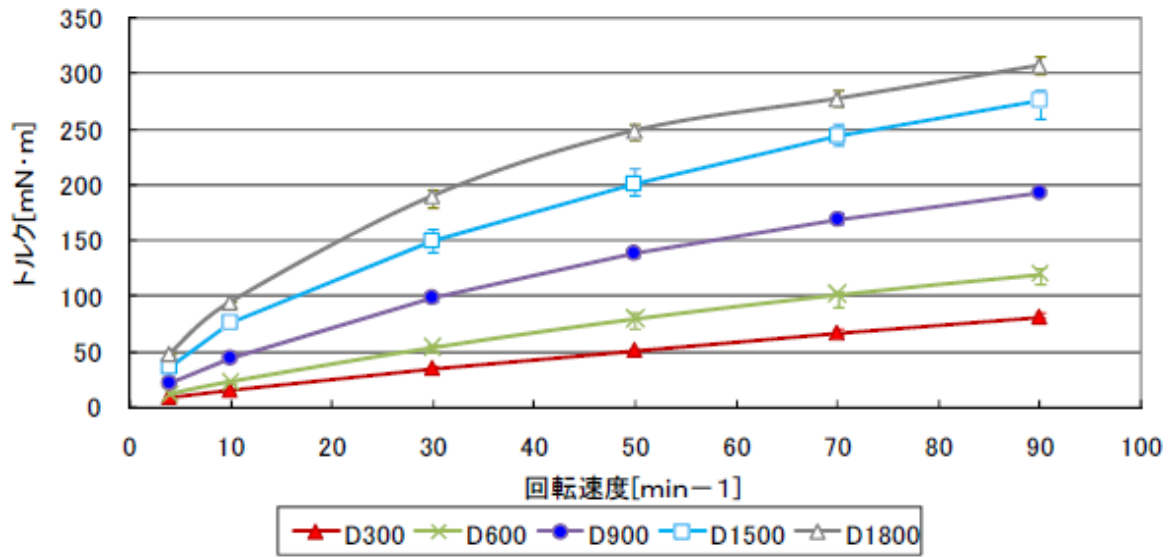


図 9 回転ダンパーの速度依存性

c) キャスター付き試験体の振動台実験

試験体は図 10 に示す回転ダンパー付き固定キャスターを有するステンレス製 4 段ラックであり、総重量は 77kg (本体 37kg、上部 2 段にそれぞれ 20kg の錘) である。試験体の基礎部と最上部には変位測定用モーションキャプチャーのマーカを取り付けている。

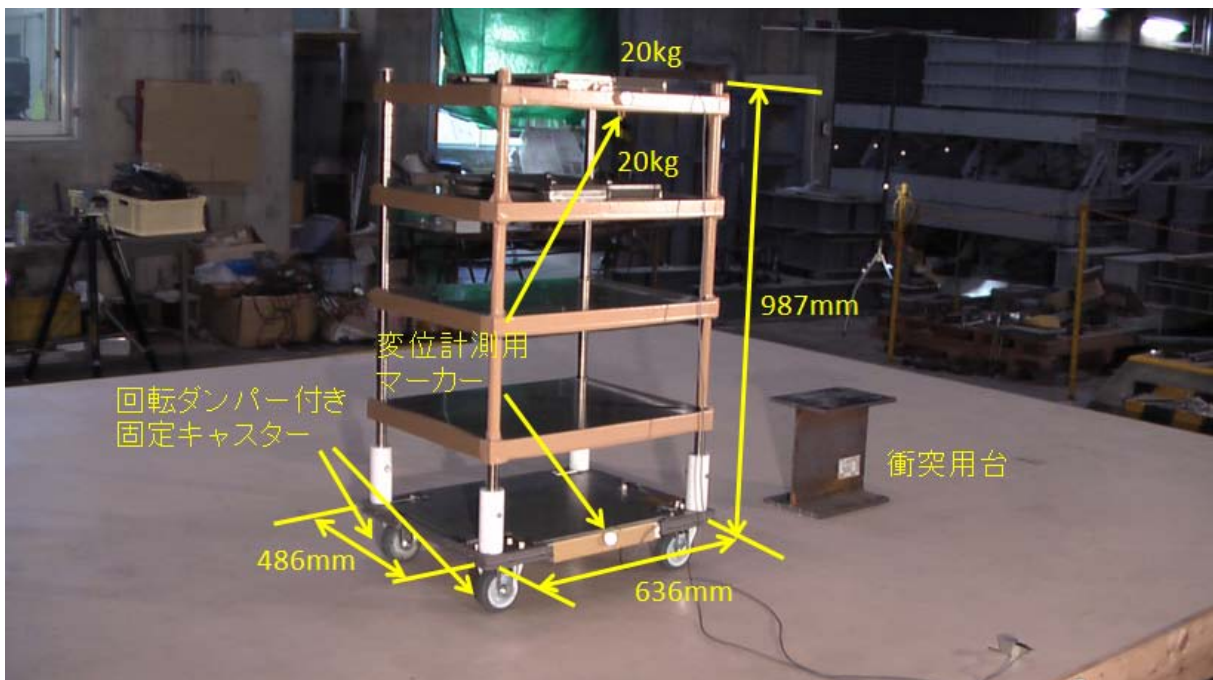


図 10 キャスター付き試験体 (中型振動台)

実験では建築研究所の中型振動台と大ストローク振動台の 2 種類の振動台を用いた。中型振動台では、2Hz から 0.2Hz までの比較的高振動数の揺れと直下型の地震動の揺れを再

現し、大ストローク振動台では 0.5Hz から 0.15Hz の低振動数の揺れと長周期地震動における超高層建物の最上階の揺れを再現した。

4) 中型振動台による加振実験

a) 調和加振に対する移動量

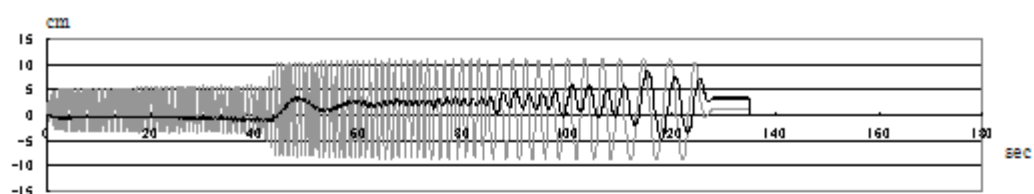
加振条件を表 3 に示す。実験では 2Hz から 0.2Hz まで連続で加振し、それぞれの振動数で定常になった時点で次の振動数の揺れに移行した。また、0.2Hz から 1.2Hz までは調和加振の振幅を 5cm とし、1.2Hz から 10cm に変更している。

実験では、振動台と試験体に取り付けたマーカの座標をモーションキャプチャーにより計測した。計測結果を図 11 に示す。図のうす線が振動台の絶対変位、実線が試験体の絶対変位である。上から順に、キャスターの回転ダンパーの特性に応じて、ダンパーなし (None)、D300～D900 の結果を示す。なお、D1500 では実験中にダンパーが破損したため、計測を中止した。

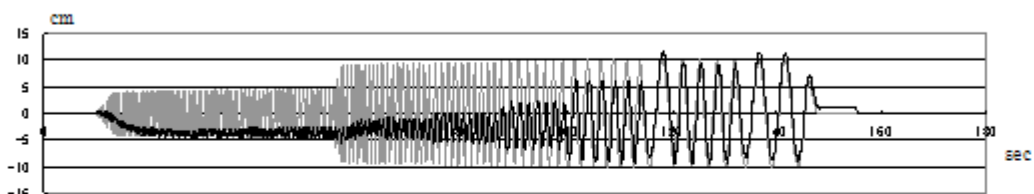
図 11 の計測波形から、各周波数の振動台の絶対変位 (うす線) と試験体の絶対変位 (実線) の比率を求めたものを図 12 に示す。ダンパーを付けないキャスターの場合 (None)、免震効果によって試験体の絶対変位は小さく、比率は 0 に近いが、ダンパーを付けた場合には、揺れの振動数が小さいほど、かつダンパーの抵抗力が大きいほど、比率が 1 に近づくことが分かる。

表 3 調和加振条件

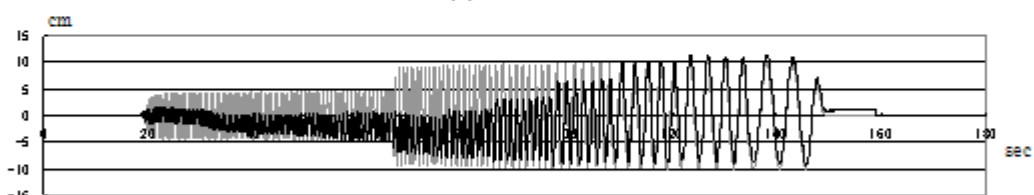
	F(Hz)	D(cm)	V(cm/s)	A(cm/s/s)
1	2	5	62.8	789.6
2	1.8	5	56.5	639.6
3	1.6	5	50.3	505.3
4	1.4	5	44.0	386.9
5	1.2	5	37.7	284.2
6	1.2	10	75.4	568.5
7	1	10	62.8	394.8
8	0.8	10	50.3	252.7
9	0.6	10	37.7	142.1
10	0.4	10	25.1	63.2
11	0.3	10	18.8	35.5
12	0.2	10	12.6	15.8



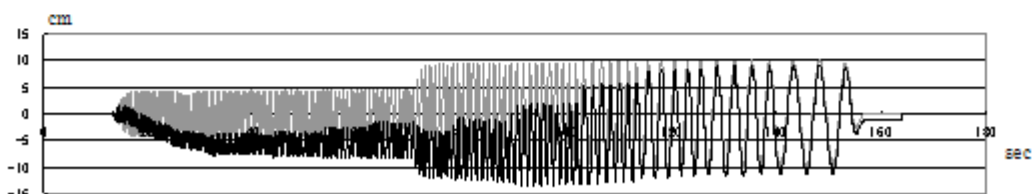
(a) None



(b) D300



(c) D600



(d) D900

図 11 振動台の絶対変位（うす線）と試験体の絶対変位（実線）－調和加振－

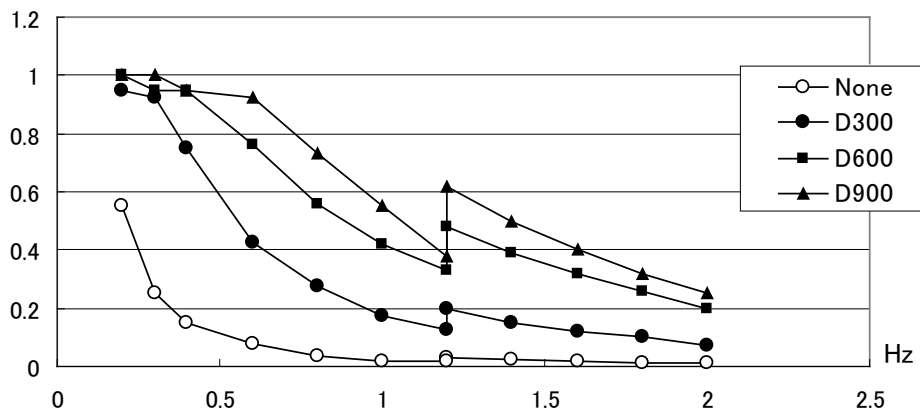


図 12 振動台の絶対変位振幅と試験体の絶対変位振幅の比率

b) ランダム加振に対する移動量

1995年兵庫県南部地震における神戸海洋気象台の加速度記録 NS 成分を 50%に低減した波形（以下、「JMA 神戸波 50%」と呼ぶ）を振動台に入力して、振動台と試験体の動き（絶対変位）を計測した結果を図 13 に示す。

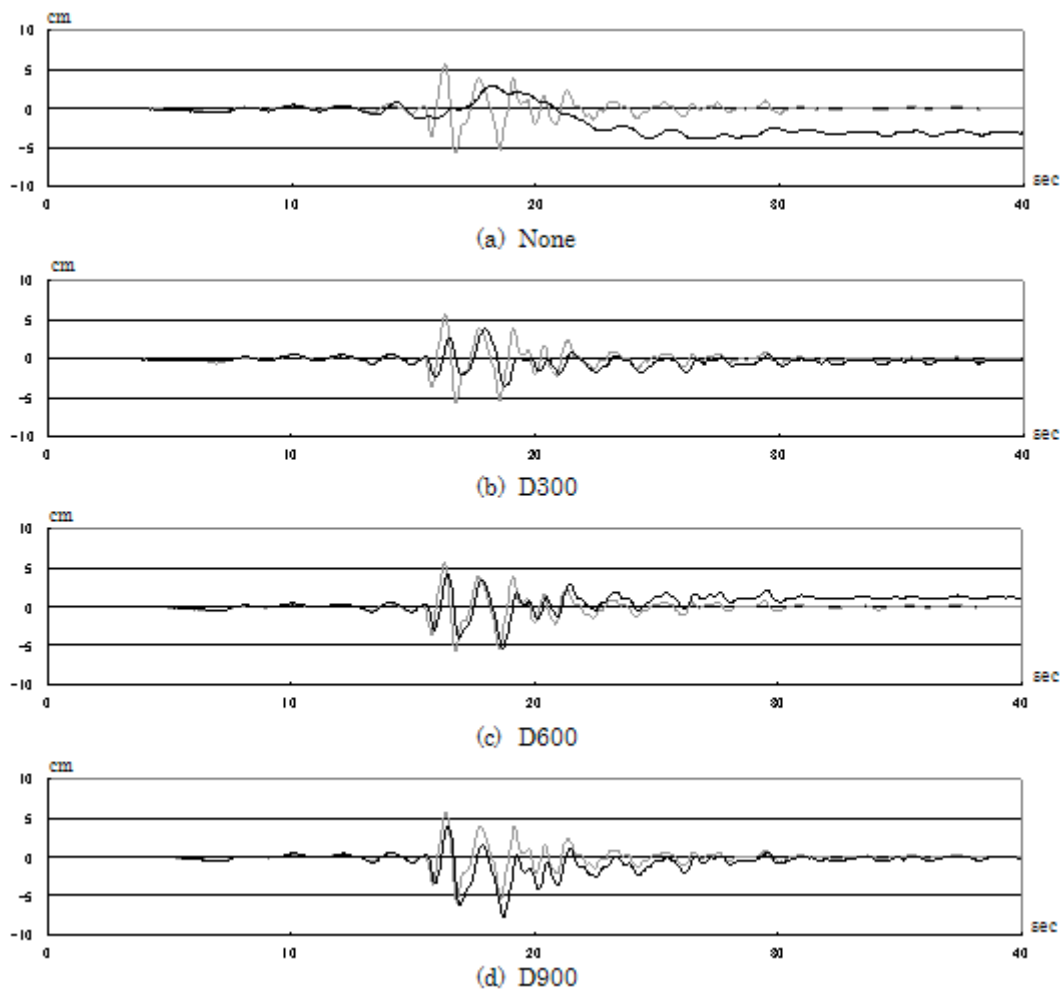


図 13 振動台の絶対変位（うす線）と試験体の絶対変位（実線）ーランダム加振ー

図 13 から、キャスターのみの場合 (None)、試験体の動きは片側に大きくシフトするのに対し、ダンパーを付けた場合には、片側にシフトせず、ほぼ振動台と同じ揺れをしていることがわかる。図 14 は、試験体の絶対加速度波形から、加速度応答スペクトル (粘性減衰 5%) を求めたものである。これより、ダンパーの抵抗力が D300 から D900 へと強くなるにつれて、振動台 (Table) のスペクトルに近くなっていることがわかる。

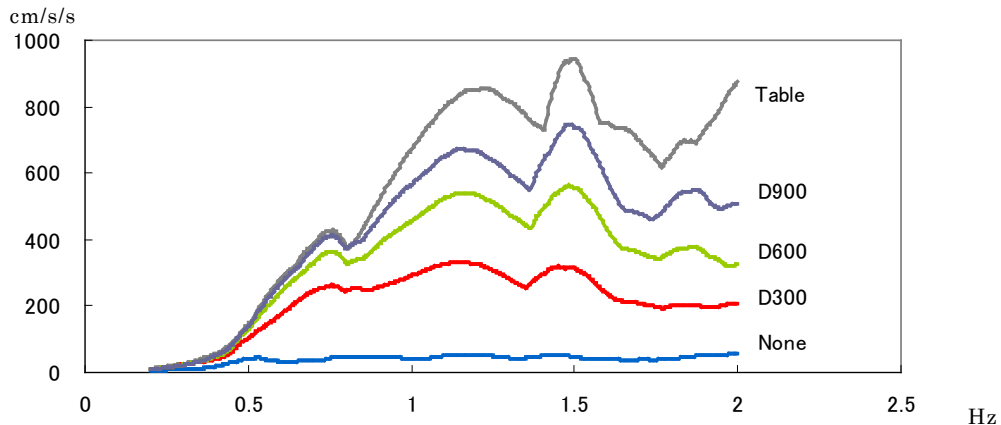


図 14 加速度応答スペクトル (粘性減衰 5%)

c) 衝撃加振に対する移動量

中型振動台に衝突用の鉄骨台 (図 10 参照) を固定し、台から 4cm 離れた位置から試験体を加振して台に衝突させた。加振は振幅 10cm、振動数 1.2Hz の調和加振である。図 15 に、試験体の絶対変位波形を示す。ダンパーがない場合 (None) は、移動量は 1m 近くに達している。衝突による衝撃力はそれぞれ異なると考えられるが、ダンパーを設置することで移動量が抑えられる結果が得られた。

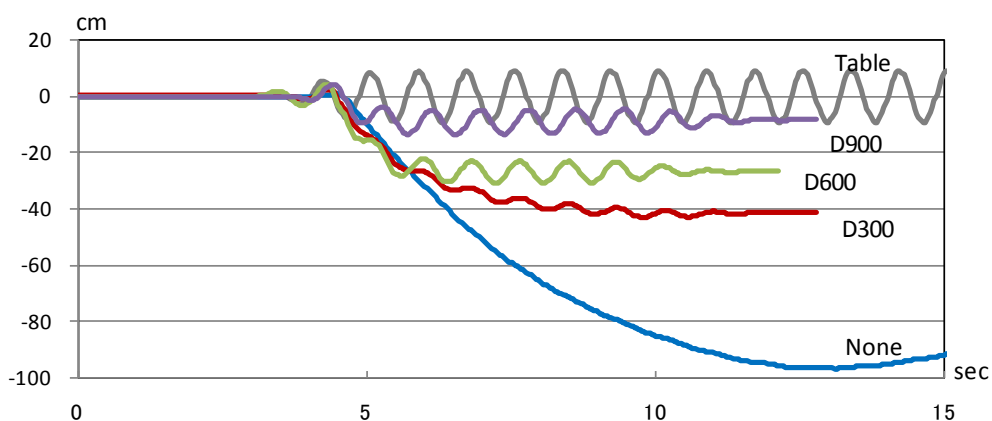


図 15 衝突加振実験における振動台と試験体の絶対変位波形

5) 大ストローク振動台による加振実験

a) 調和加振に対する移動量

大ストローク振動台の実験風景を図 16 に、加振条件を表 4 に示す。すべての周波数で、速度を 100cm/s に揃えている。

実験では、振動台と試験体の最上部と最下部に取り付けたマーカの座標をモーションキャプチャーにより計測した。計測結果を図 17 に示す。ただし、試験体の絶対変位は、最上部と最下部の変位がほとんど一致するため、最下部のみの値を示している。図のうす線が振動台の絶対変位、実線が試験体の絶対変位である。上から順に、キャスターの回転ダンパーの特性に応じて、ダンパーなし (None)、D300~D1500 の結果を示す。

図 17 の計測波形から、各周波数の振動台の絶対変位 (うす線) と試験体の絶対変位 (実線) の比率を求めたものを図 18 に示す。ダンパーを付けないキャスターの場合 (None)、免震効果によって試験体の絶対変位は小さく、比率は 0 に近いが、ダンパーを付けた場合には、揺れの振動数が小さいほど、かつダンパーの抵抗力が大きいほど、比率が 1 に近づくことが分かる。



図 16 大ストローク振動台とキャスター試験体

表 4 調和加振条件

	F(Hz)	D(cm)	V(cm/s)	A(cm/s/s)
1	0.5	31.8	100	314.2
2	0.4	39.8	100	251.3
3	0.3	53.1	100	188.5
4	0.2	79.6	100	125.7
5	0.15	106.1	100	94.2

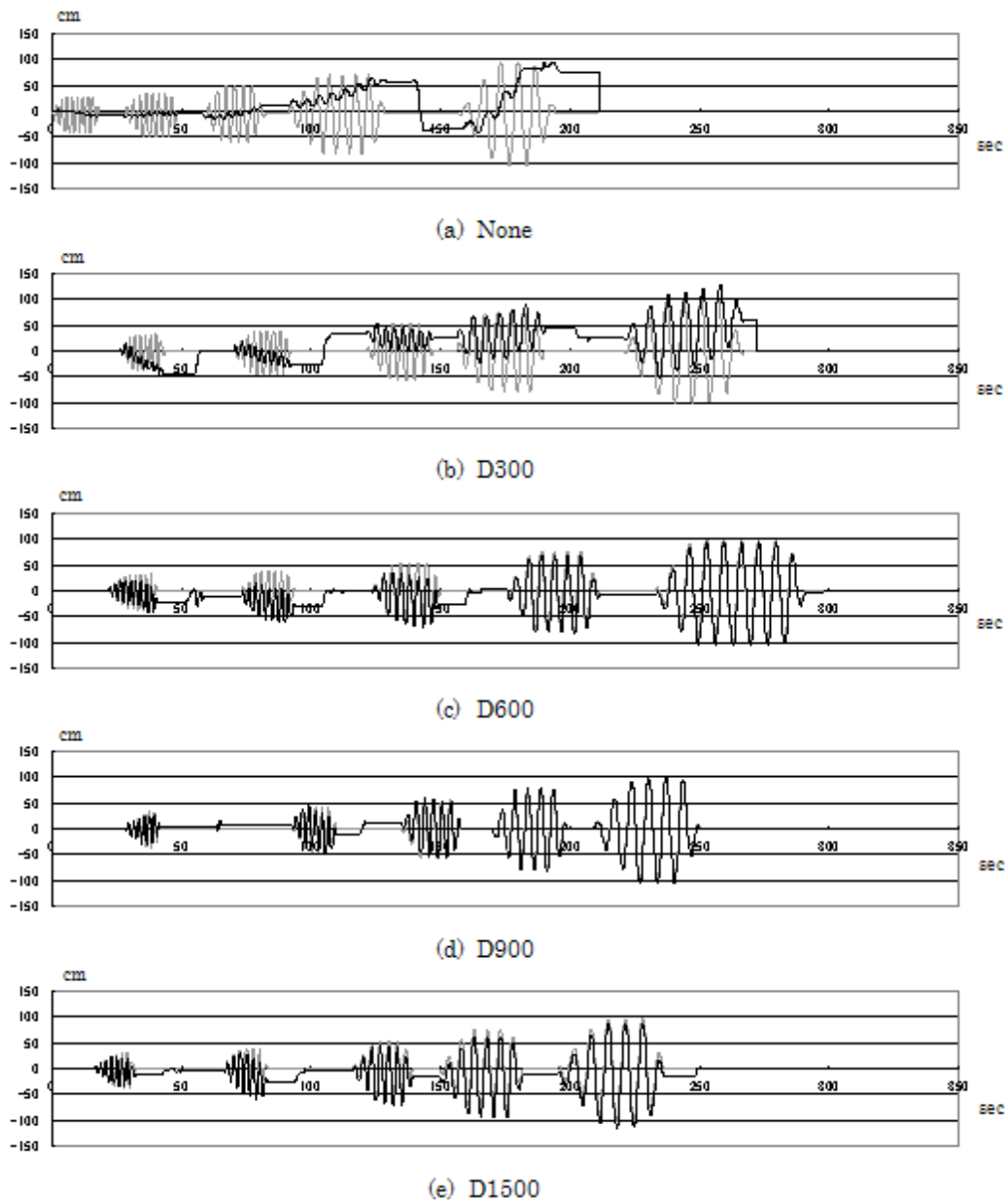


図 17 振動台の絶対変位（うす線）と試験体の絶対変位（実線）－調和加振－

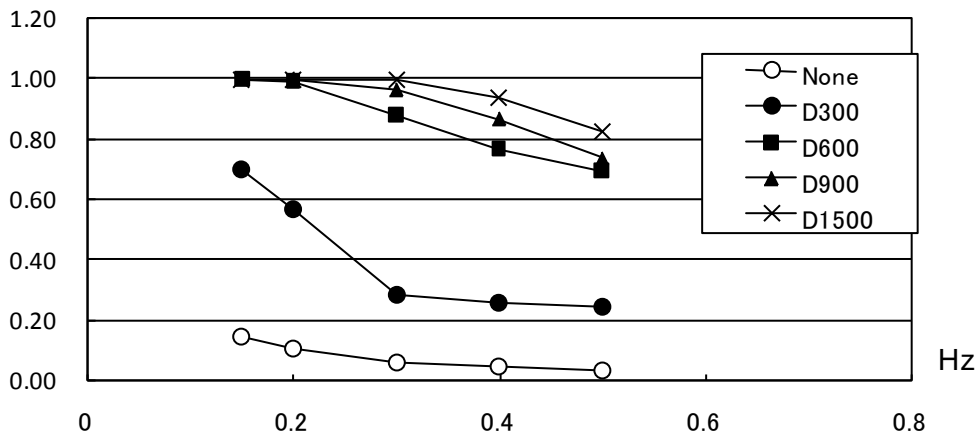


図 18 振動台の絶対変位振幅と試験体の絶対変位振幅の比率

b) ランダム加振に対する移動量

東海・東南海・南海地震が同時発生した場合に東京の新宿に建つ 40 階建て鉄筋コンクリート造超高層マンションの最上階の揺れ⁶⁾（以下「40 階超高層の最上階の揺れ」と呼ぶ）を振動台に入力して、振動台と試験体の動き（絶対変位）を計測した結果を図 19 に示す。キャスターのみの場合（None）には、試験体の動きは片側に大きくシフトするのに対し、ダンパーを付けた場合には、シフトの量が少なく、とくにダンパーの抵抗力が強い場合には、ほぼ振動台と同じ揺れをすることがわかる。

図 20 は、試験体の絶対加速度波形から、加速度応答スペクトル（粘性減衰 5%）を求めたものである。ただし、D900 と D1500 については、D600 とほぼ同じスペクトルになったため、省略している。これより、ダンパーの抵抗力が強くなるにつれて、振動台 (Table) のスペクトルに近くなっていることがわかる。

6) まとめ

長周期地震動により超高層建物の上層部で大きな揺れが発生し、室内のキャスター付き機器等が大きく移動して居住者に危害を及ぼすことが懸念される。本研究で開発した回転ダンパー付きキャスターを用いることで、地震時のキャスター付き機器等の移動量を制御することが可能であることが、振動台実験により明らかになった。

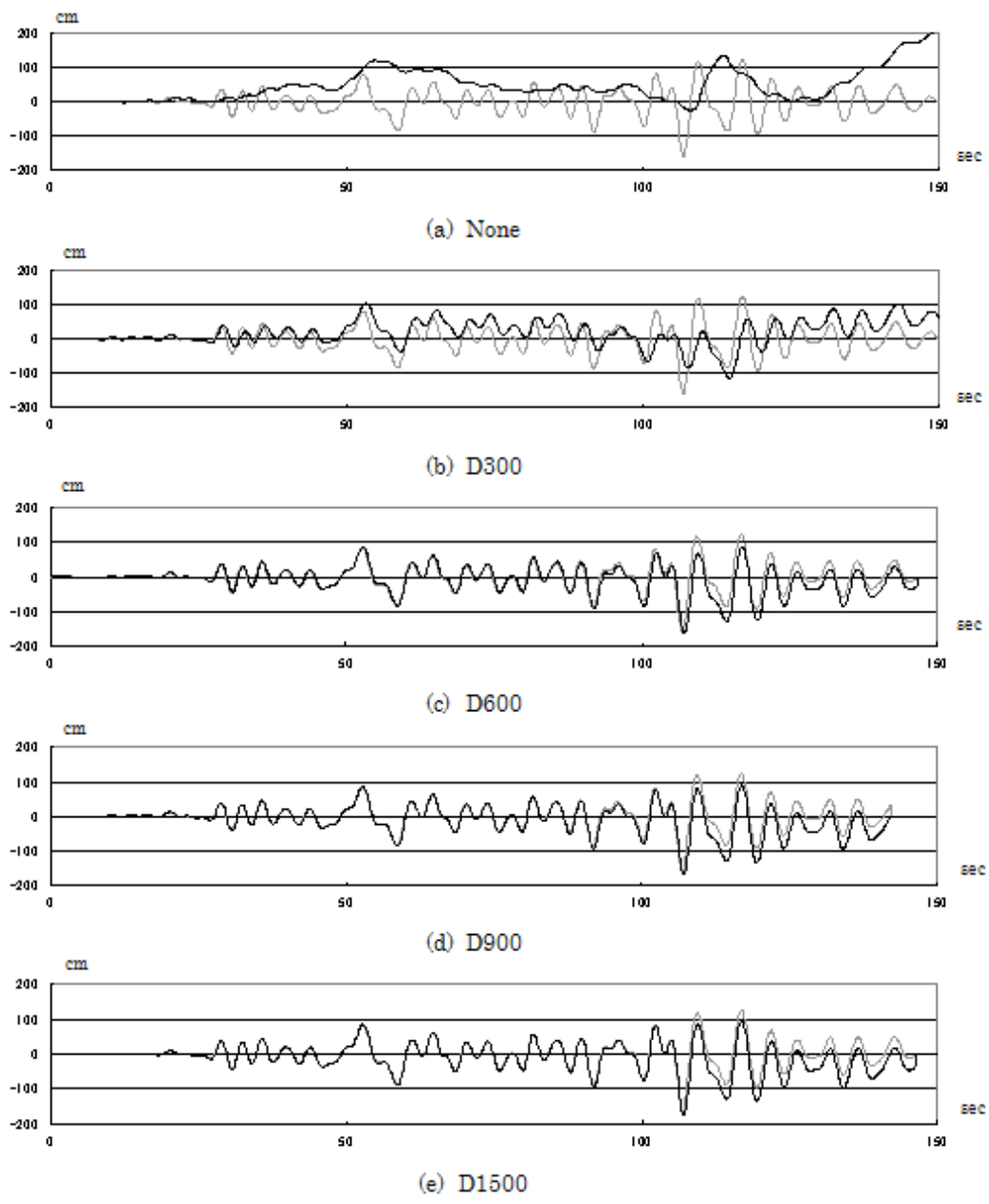


図 19 振動台の絶対変位（うす線）と試験体の絶対変位（実線）ーランダム加振ー

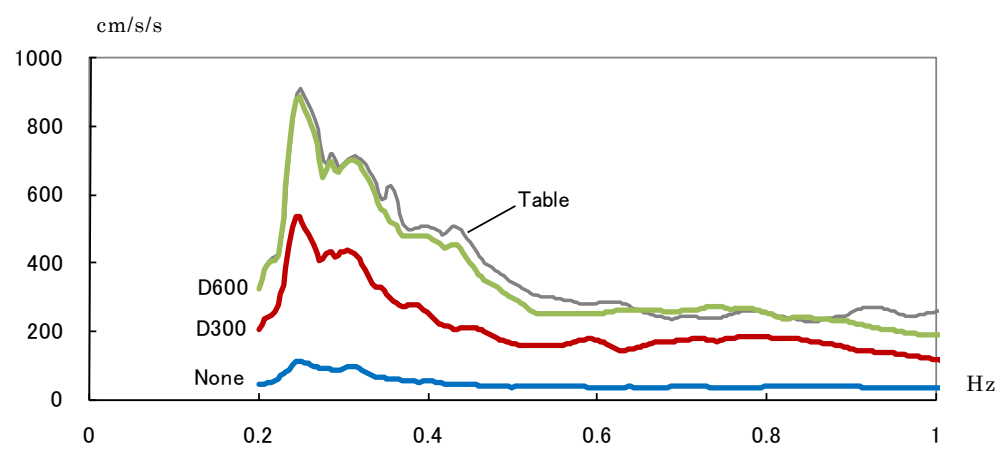


図 20 加速度応答スペクトル（粘性減衰 5%）

(c) 結論ならびに今後の課題

強震時における建築室内での人間の挙動特性をふまえた避難行動の可能性が、建築物の安全性を評価するための重要な因子になるものと考え、強震時に人間が避難行動を取ることができる限界（避難行動限界）となる床応答を振動台実験により定量化する研究を行った。これまで提案してきた地震時の揺れの大きさと避難行動限界の評価曲線において、データ分布にワイブル分布を採用することにより、評価結果が改善されることが明らかになった。

超高層の高層階の居室では、長周期地震動によるゆっくりとした大きな揺れでコピー機などのキャスター付きの重量機器が移動して、居住者に危害を及ぼす危険があることから、キャスター付き機器の地震時の挙動について、振動台実験を行った。回転ダンパー付きキャスターを用いることで、地震時のキャスター付き機器等の移動量を制御することが可能であることが、振動台実験により明らかになった。

(d) 引用文献

- 1) 中央区高層住宅防災対策検討委員会；中央区高層住宅防災対策検討委員会報告書（2006年3月）、中央区区民部防災課発行
- 2) 高橋徹、貞弘雅晴、斉藤大樹、小豆畑達哉、森田高市、野口和也、箕輪親宏；長周期地震動を考慮した人間の避難行動限界評価曲線の提案、日本建築学会大会学術講演梗概集 B2, p497～p498, 2007年
- 3) 金子美香：地震時における家具の転倒率推定方法、日本建築学会構造系論文集、No. 551, pp. 61-68, 2002
- 4) 金子美香：家具の地震時滑り量の簡易評価、日本建築学会技術報告集、pp73-78, 1999
- 5) 金子美香：地震時における家具滑り量の簡易評価：新しい滑り量の推定式を用いて、日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2, pp. 537-538, 1999
- 6) 斉藤大樹、高橋徹、長谷川亮、森田高市、小豆畑達哉、野口和也：長周期地震動に対する超高層建物の室内安全性 建研式大ストローク振動台を用いた家具の移動に関する研究、構造工学論文集 Vol. 54B, pp. 507-512, 2008

(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、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表場所（学会等名）	発表時期	国内・外の別
回転ダンパー付きキャスターによる地震時の機器等の移動制御	斉藤大樹、森田高市、野口和也	2009年度日本建築学会大会（東北）	2009年8月	国内

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
なし

(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

出願番号： 特願 2009-100477
発明の名称： キャスター
整理番号： TOK09P02
出願日： 平成 21 年 4 月 17 日
発明者： 独立行政法人建築研究所 齊藤大樹
ハンマーキャスター株式会社 浜野龍志
トックベアリング株式会社 秋葉潤一郎

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成 21 年度業務計画案

平成 21 年度に実施予定の E-ディフェンス実験において、超高層建物の室内安全性や機能被害に着目した実験を行い、その結果や既往の研究をもとに、超高層の地震時の揺れによる被害が住民生活に与える影響、復旧時間に関する検討を行い、機能回復の観点から対策技術について検討する。