

## II-1 震災時における建物の機能保持に関する研究開発

佐藤栄児(防災科学技術研究所)

### 1. はじめに

今後 30 年以内に 70%程度という高い確率で、南関東にマグニチュード7程度の地震が発生すると予測されており<sup>1)</sup>、この種の地震が首都地域に発生した場合、最大で死者数1万人以上、経済被害 100 兆円以上との予想がされています<sup>2)</sup>。また、1995 年に発生した兵庫県南部地震においては、死者 6,434 人、被害総額約 9 兆 9 千億円<sup>3)</sup>でしたが、15 年以上経過した現在でも被害対策が劇的に向上したとは言えません。

このような状況を鑑み、2007 年度から 5 ヶ年間の計画で、文部科学省は「首都直下地震防災・減災特別プロジェクト」を立ち上げ<sup>4)</sup>、筆者らは本プロジェクトのうち「②都市施設の耐震性評価・機能保持に関する研究(1)震災時における建物の機能保持に関する研究開発」の研究課題を推進しました。

本研究課題は、首都直下地震に対する都市施設の被害を軽減し、施設の機能を維持するための防災・減災対策について検討することを主目的としています。都市部に大地震が発生した場合、建物の倒壊を極力防ぐことは重要です。一方、被災後の政治、経済、医療、情報発信等の社会活動の停止は、被害の拡大やその後の復興にも多大な影響を与えるため、これら都市機能を地震発生後も維持・継続させることは非常に重要な課題です<sup>1,5)</sup>。

実際に兵庫県南部地震時には、兵庫県下で地震発生1週間までの患者数は 12 万人を超え、うち入院を要した患者数は約2万人にも及びましたが<sup>6)</sup>、医療施設の総数約 3,100 施設(病院約 220、診療所約 2,920 ただし歯科診療所は除く。)のうち半数以上の約 1,600 施設(病院約 190、診療所約 1,470)が被害を受け<sup>7)</sup>、1,000 を超える医療施設(病院・診療所を含む)が診療不能となり、被害を拡大させました<sup>6)~8)</sup>。

これらの過去の教訓から、本研究課題では救急救命、生命維持の拠点となる医療施設に着目し、施設内の機器およびそれらの複合システムの耐震性を明らかにし、具体的な地震対策方法を示すことをめざしました。

本研究課題では、以下の3つの研究項目に分けて研究を実施しました。

- (i) 医療機器の地震災害に対する脆弱性の定量的評価
- (ii) 既存の耐震構造および免震構造の医療施設の機能保持性能に関する実証検討と限界性能の確認
- (iii) 既往の機能保持技術の医療施設への適用および新たな機能保持技術の検討評価

医療機器および医療設備では、運用上の安全性について JIS 規格<sup>9)</sup>などが存在しますが、地震時における耐震性についてほとんど考慮されておらず、公的な機関からも地震対策の基準および明確な対策方針が示されていません。そこで研究項目(i)では、医療機器およびこれらの複合システムの地震災害に対する脆弱性を定量的に評価することをめざし、平成19年度に中型振動台を用い機器単体での振動実験を実施し、耐震性の検証を行いました<sup>10)~14)</sup>。

研究項目(i)における機器単体耐震実験の結果を踏まえ、様々な医療機器の複合システムおよび医療施設全体としての耐震性評価のため、医療施設を模擬した実大試験体による振動実験を E-ディフェンス(防災科学技術研究所所有:実大三次元震動破壊装置(15m×20m、最大搭載質量 1,200ton の震動試験装置))を用い、研究項目(ii)において実施しました。

研究項目(iii)では、研究項目(ii)での実大実験より明らかになった施設の機能保持のための問題点について整理し、その解決策等を検討しました。さらにより高度な機能保持のための要求に対応する技術検討も実施し、これらの地震対策技術等の実証に関して、E-ディフェンスを用いた実大実験を実施しました。

以上の研究項目で得られた知見をもとに、医療施設を含む重要施設が地震時においてその機能を保持させるための指標となる対策資料へと展開させました。

ここでは、研究項目(ii)(iii)既存構造の医療施設の機能保持性能に関する実証検討と機能保持技術の検討評価として実施した医療施設の実大実験の結果について述べます。

既存の医療施設の多くは耐震構造であり過去の震災でも多くの被害を受け、兵庫県南部地震では 41.7%が施設・設備の損壊が原因で診療機能の低下が発生しています<sup>15)</sup>。そこで耐震構造での医療施設の機能保持性能および機能損傷状況、復旧性能を定量的に評価することは、今後の耐震対策を検討するうえでの基礎データとなります。また、地震災害から施設の構造およびその機能を守る上で有効である免震構造<sup>16)~23)</sup>は、1994 年まではわずか 82 件で、うち病院では 1 例もありませんでしたが、1995 年の兵庫県南部地震を契機に建設が急速に増加し、2000 年までには 700 件を超え、うち医療施設は全体の約 10%を占めています<sup>24)</sup>。このように医療施設において急速に増加している免震構造での機能保持性能および様々な地震動に対する限界性能などについて定量的に評価し、問題点を抽出することは、今後の対策方法を検討するための有効な基礎



図1 試験体全景

データとなります。

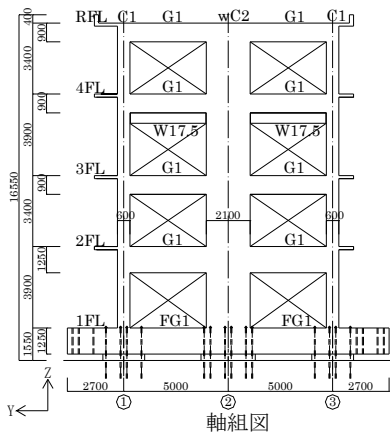
本実大実験は、医療施設の機能保持性能を評価するため実施された初めての大規模構造物振動実験であり、また世界で最初の大規模免震構造物の実験でもあります。耐震構造と免震構造それぞれに対して、直下地震による短周期地震動と、海溝型地震で発生が懸念されている長周期地震動<sup>25)</sup>を用いて振動実験を行い、特に、短周期が卓越する地震動を受ける耐震構造の被害様相と、共振現象が想定される長周期地震動を受ける免震構造の被害様相を明らかにしました。

## 2. 試験体

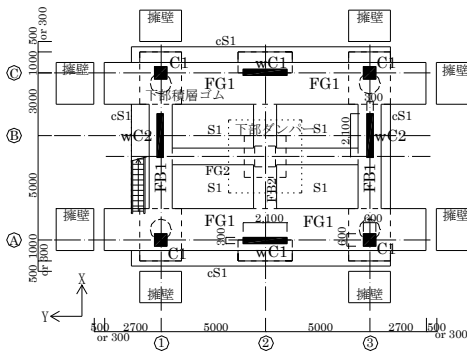
### 2.1 耐震構造

実験に用いた RC 造4階建て試験体を図1に示します。本試験体は、繰り返しの振動実験に耐えられること、地震直後においても機能保持が求められる病院建築であるということ、および官庁施設の総合耐震計画基準<sup>26)</sup>などを考慮し、現行の耐震基準における標準せん断力係数0.2を1.5倍した0.3として設計しました。試験体の軸組図および床伏図を図2に、部材断面リストを表1に示します。試験体の総質量は760tで、スパンは短辺方向(X方向)8m×1スパン、長辺方向(Y方向)5m×2スパン、階高は1、3階を3,900mm、2、4階を3,400mmとしました。3階の階高が大きいのは、この階に設ける手術室に必要な天井高を確保するためです。柱については、建物4隅に600mm×600mmの角柱、各隅柱の間には2,100mm×300mmの壁柱を配置した構造としており、この壁柱により局所階の崩壊を防ぎ耐震性能を高めています。基礎梁が幅2,000mm、成1,250mmと大きいのは、本試験体を震動台へ設置するため実験施設内の天井クレーン2基で揚重する際に試験体のひび割れによるRC架構の剛性低下を極力生じさせないためです。

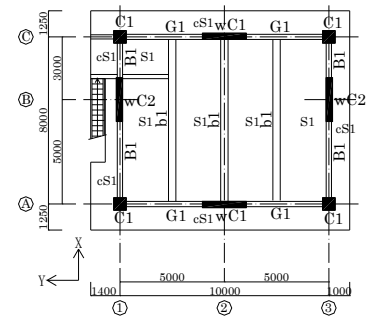
設計した試験体の荷重増分解析の結果を図3に示します。図には最大層間変形角1/100で定義した場合



軸組図

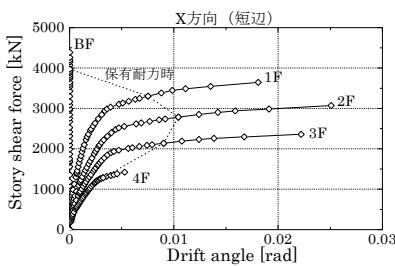


1階床伏図

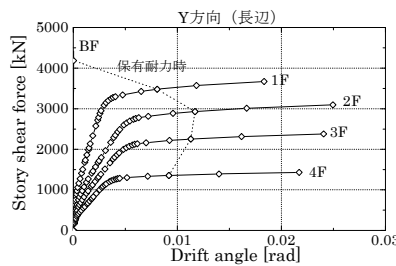


基準階床伏図

図2 試験体図面



(a) X方向(短辺方向)



(b) Y方向(長辺方向)

図3 荷重増分解析結果

表1 部材断面リスト

部材	寸法 [mm]
C1	600×600
wC1	2100×300
wC2	300×2100
G1, B1	(2F)250×1250, (3~RF)250×900
FG1, FB1, FB2	2000×1250
FG2	1250×1250
b1	300×750
S1, cS1	150

表 2 免震装置仕様 (設計値)

項目		仕様	
免震 1	天然 ゴム系 積層ゴム	呼称 (形式)	R30-1000
		ゴム外径 [mm]	1,000
		ゴム総厚 [mm]	285
		水平バネ定数 [kN/m]	810
		鉛直バネ定数 [kN/m]	2200×10 <sup>3</sup>
	免震 2	高減衰 積層ゴム	呼称 (形式)
ゴム外径 [mm]			750
ゴム総厚 [mm]			200
等価水平剛性 *[kN/m]			1,370
等価減衰定数*			0.24
鉛直剛性 [kN/m]			3090×10 <sup>3</sup>

\*200mm 変位での等価剛性・減衰定数

の保有水平耐力もあわせて示していますが、このときの層せん断力係数は0.74～0.83となります。これは、建築基準法で定める最低限の強度である保有水平耐力時の層せん断力係数0.30～0.55を上回っていますが、既存 RC 建造物の耐震診断資料等<sup>27)</sup>によれば、内外壁を有する低層の RC 建造物においてほぼ一般的な値となっています。

耐震構造の実験では、試験体の基礎梁と震動台を、PC 鋼棒 48 本のプレストレス力により接合しました。試験体の設計時の 1 次固有周期は短辺方向 0.23 秒、長辺方向 0.24 秒です。

## 2.2 免震構造

既存の免震支承として積層ゴム支承や滑り支承などがあります<sup>28)</sup>が、本試験体の免震構造では、現在の普及率などを考慮し、以下に示す2種類の免震システムを採用しました。

1つ目の免震システム(以下、「免震1」といいます。)は、天然ゴム系積層ゴムと鋼製ダンパーを組み合わせた免震システムです。天然ゴム系積層ゴムは、免震支承として最も普及率が高く約 30%強を占めています。天然ゴム系積層ゴムとの組み合わせで用いる減衰装置としては、履歴型ダンパーが最も用いられており、ここでは代表例として鋼製ダンパーを採用しました。装置の配置は、天然ゴム系積層ゴムを隅柱直下となる位置に4基、鋼製ダンパーを試験体中央部に1基としました。

2つ目の免震システム(以下、「免震2」といいます。)は、

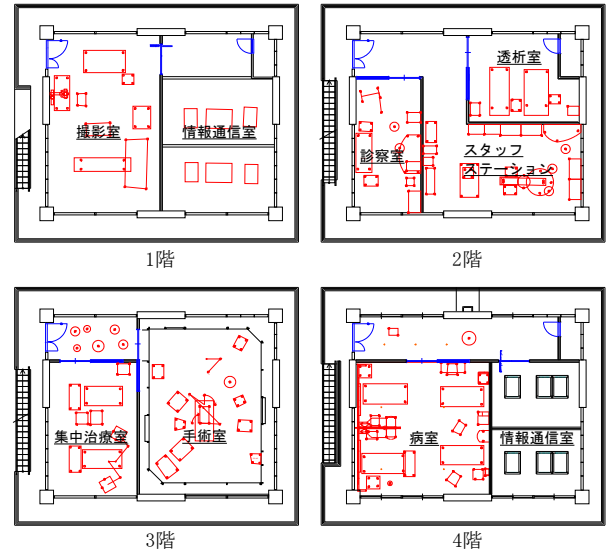


図 4 部屋配置図

高減衰積層ゴムによる免震システムです。高減衰積層ゴムはダンパー機能を積層ゴムの材料自体が有しているため、省スペースで実現できます。同様のダンパー一体型の積層ゴムとして鉛プラグ入りがあり、普及率は、鉛プラグ入りが 30%程度、高減衰が 20%程度となっています。ダンパー一体型の積層ゴムの代表として、環境性も考慮し高減衰積層ゴムを採用しました。高減衰積層ゴムの配置は、免震1の積層ゴムと同じ位置に4基としました。

各システムに用いた免震装置の仕様を表 2 に示します。なお、変位量 30cm での免震周期は、免震1で 2.56 秒、免震2で 2.41 秒です。この値は、免震構造が建設されはじめた頃の免震周期が約 2 秒であったことを考えると、既存の免震構造の周期と同程度となっています。なお、最近の免震周期は約 3～5 秒<sup>28)</sup>となっています。

それぞれの免震システムにおいて、上部構造と基礎の間で過大な変位が発生した場合の対策として、構造体のまわりにストッパーとしての擁壁を各方向に4台ずつ、合計8台設置しました。免震1では上部構造と擁壁のクリアランス(可動範囲)を 50cm とし、免震2においては 30cm としました。免震2でのクリアランスを 30cm にしたのは、免震構造において過大な相対変位が発生し周辺擁壁への衝突を想定した実験を実施するためであり、そのクリアランスの設定は事前の振動応答解析により決定しました。

## 2.3 部屋の配置および機器類

試験体内の各階の部屋の配置を図 4 に、主な部屋の状況および機器・設備等の設置状況を図 5 に示します。1階に撮影室、情報通信室、2階に診察室、スタッフステーション、透析室、3階に集中治療室(ICU)室、手術室、4階に病室、情報通信室を設けました。一般の医療施設では重量がある医療機器を低層階に配置



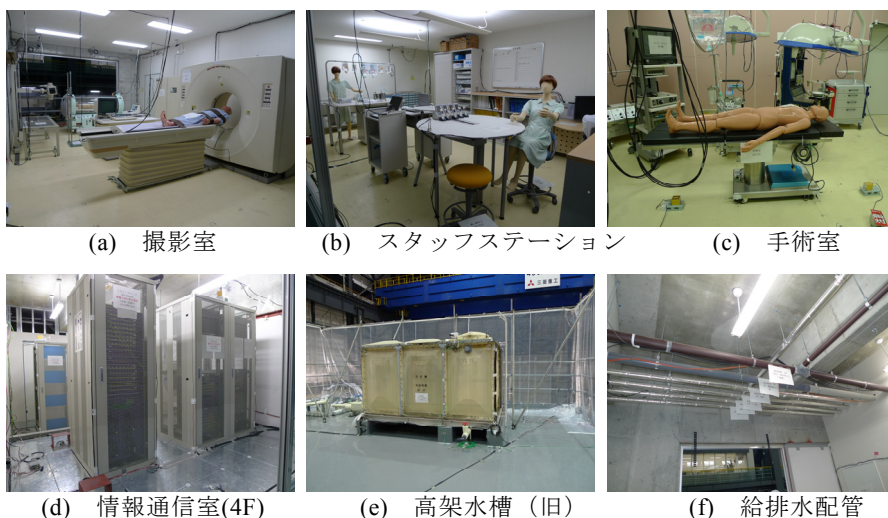


図5 設置状況

表3 入力地震動

構造	入力地震波	方向	レベル	加振順序
耐震	三の丸波	X, Y	100%	8
	横浜波	X, Y	100%	9
	エルセントロ波	X, Y	50cm/s	10
	JMA神戸	X, Y, Z	80%	11
免震1	エルセントロ波	X, Y	50cm/s	1
	JMA神戸	X, Y, Z	80%	2
免震2	三の丸波	X, Y	100%	3
	エルセントロ波	X, Y	50cm/s	4
	JMA神戸	X, Y	80%	5
	JMA神戸	X, Y, Z	80%	6
	三の丸波	X, Y	100%	7

し、また滅菌状態の必要性から手術室やICU室を中層階に配置することが多いです。そのため、本試験体の縦方向の部屋の配置においても、通常の医療施設と同様にしています。

各部屋の内部には稼働可能な医療機器も含め、実際の医療機器を多数設置しました。それらの配置状態および設置条件は、通常の医療施設での使用状況を考慮しました。

給排水設備として配管、屋上に新旧の高架水槽等を設置するとともに、消火設備としてスプリンクラー、消火栓も設置しました。また医療ガス配管も設置しました。

1階と4階に設置した情報通信室は、近年の医療施設では患者のデータ管理のためのサーバー類も普及していることを考慮しています。

なお、高圧酸素治療装置、人工透析装置、情報通信機器、気送管装置に関しては実際に稼働させながら加振実験を行いました。それ以外の撮影装置などは、設置上の問題や様々な制約により稼働させることが困難であったため、地震動による機器類の挙動観察および様々な被害調査を行い、施設の機能保持性能を評価することとしました。

設置した機器の内訳は、直接床に置いただけの機器・棚等が31台、キャスター機器が57台(内43台はキャスターをロック)、アンカーまたは金物等で固定した機器が26台、天井吊り機器が6台、扉類が10台、その他の機器等が約50台です。

### 3. 加振条件

加振実験で用いた入力波を構造別に表3に示し、加振順序も記載します。短周期地震動として、耐震構造および免震構造のそれぞれに、エルセントロ波(1940, Imperial Valley Earthquake)の最大速度を50cm/sに振幅した地震動(以下、エルセントロ波という)、JMA神戸

波(1995、兵庫県南部地震)の最大加速度を80%にした地震動(以下、JMA神戸波80%という)を用いました<sup>29)</sup>。また長周期地震動として三の丸波(想定新東海地震)を用いました<sup>30)</sup>。耐震構造においては、首都直下というプロジェクトの対象地域を考慮し、横浜波(想定関東地震)を用いました<sup>31)</sup>。JMA神戸波を80%レベルとしたのは、耐震構造での実験において構造体の損傷、崩壊を避けるため、事前応答解析により決定しました。また、免震2においては免震構造における鉛直動の影響を評価するため、JMA神戸波を水平2方向のみの加振と水平2方向に鉛直方向を加えた3方向の加振で行いました。

入力方向については、各地震動ともNS成分を試験体の長辺方向(Y方向)にEW成分を短辺方向(X方向)に入力しました。

## 4. 計測

### 4.1 計測項目

構造体について加速度、変位、歪みなどを約170ch、内部設置機器のうち約半数の機器について、主に加速度による応答計測を約530ch、合計約700chの計測を行いました。また、今回の実験では、加振中の内部の状況観察が重要となるため、50台以上のCCDカメラを設置し、動画の記録を行いました。

### 4.2 免震層の変位計測

今回の免震構造の実験は、E-ディフェンスにおける初めての大規模免震構造の振動実験です。免震構造の実験において、免震層の変位量を正確に計測・算出することは重要であるため、ここでは免震層の変位計測について述べます。

今回、免震層の変位量は、各方向に最大で±50cmと大きく、大変位の計測となるため、震動台と試験体間を図6に示すようにワイヤー変位計を配置し計測を行

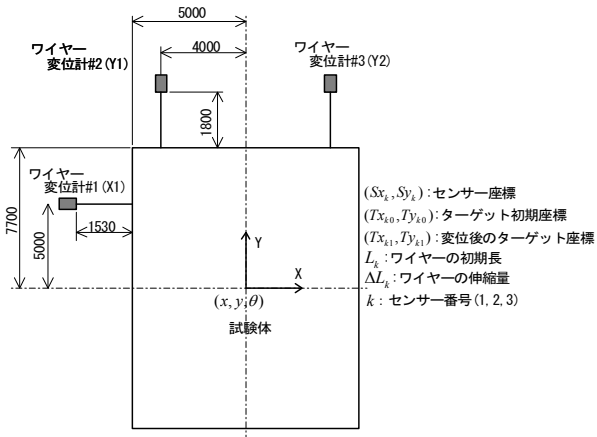


図6 免震層変位計測センサー配置図

いました。計測値であるワイヤー変位計の伸縮量  $\Delta L_k$  を用い、試験体の正確な軸方向の変位  $x$ 、 $y$  や面内の回転量  $\theta$  を導出するために、以下に示す連立方程式を解く必要があります。

$$\begin{bmatrix} Tx_{k1} \\ Ty_{k2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Tx_{k0} \\ Ty_{k0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\Delta L_k = \sqrt{(Tx_{k1} - Sx_k)^2 + (Ty_{k2} - Sy_k)^2} - L_k \quad (2)$$

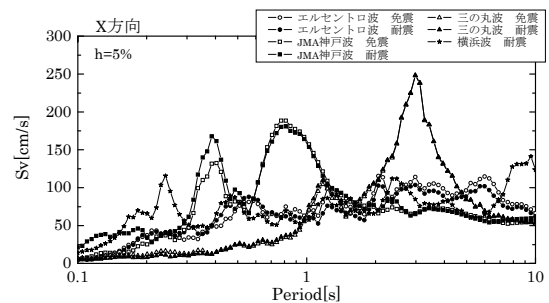
しかし、これは非線形連立方程式となり、通常簡単に解を導出することができません。そのため、今回と同様の方法で計測を行う多くの実験の場合、簡略化のためそれぞれの軸の変位量が小さいとして他軸の干渉を無視し、ワイヤー伸縮量の平均や差分から近似的に  $x$ 、 $y$ 、 $\theta$  を求めます。しかし免震構造での免震層変位計測では、変位計の伸縮方向に対して直角方向に試験体が大きく移動した場合、ワイヤー変位計から出力値が発生するため、この出力値の平均や差分から単純に試験体の変位量を算出すると誤差が大きくなります。例えば、面内の回転がないとして変位量が X、Y 方向ともクリアランスの最大値 50cm になった場合、ワイヤー変位計の

出力値の平均より算出した Y 方向の変位量は約 41cm となり、真値との誤差が 18% 発生し、無視できません<sup>32)</sup>。そこで今回は、式(1)、(2)からなる非線形連立方程式を、ヤコビ行列を用いた Newton 法による数値解法で解き、正確な試験体の変位量  $x$ 、 $y$ 、 $\theta$  を導出することにしました。

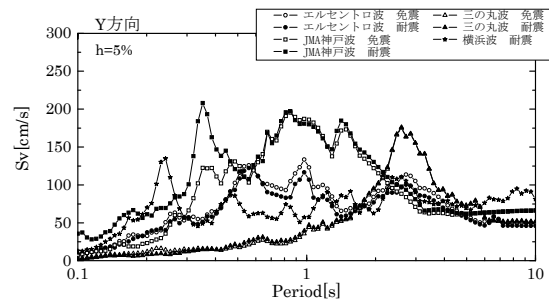
### 5. 既存構造の医療施設の評価

既存構造の医療施設の評価として、耐震および免震構造における実験結果とともに、医療機能に対して特に地震対策を実施していない場合の室内被害と機能保持性について述べます。

実験時に震動台上で計測された入力波の速度応答スペクトルを図7に示します。JMA 神戸波 80% の Y 方向において、耐震構造時に試験体の固有値付近で差がみられますが、それ以外の入力波形では速度応答ス



(a) X 方向

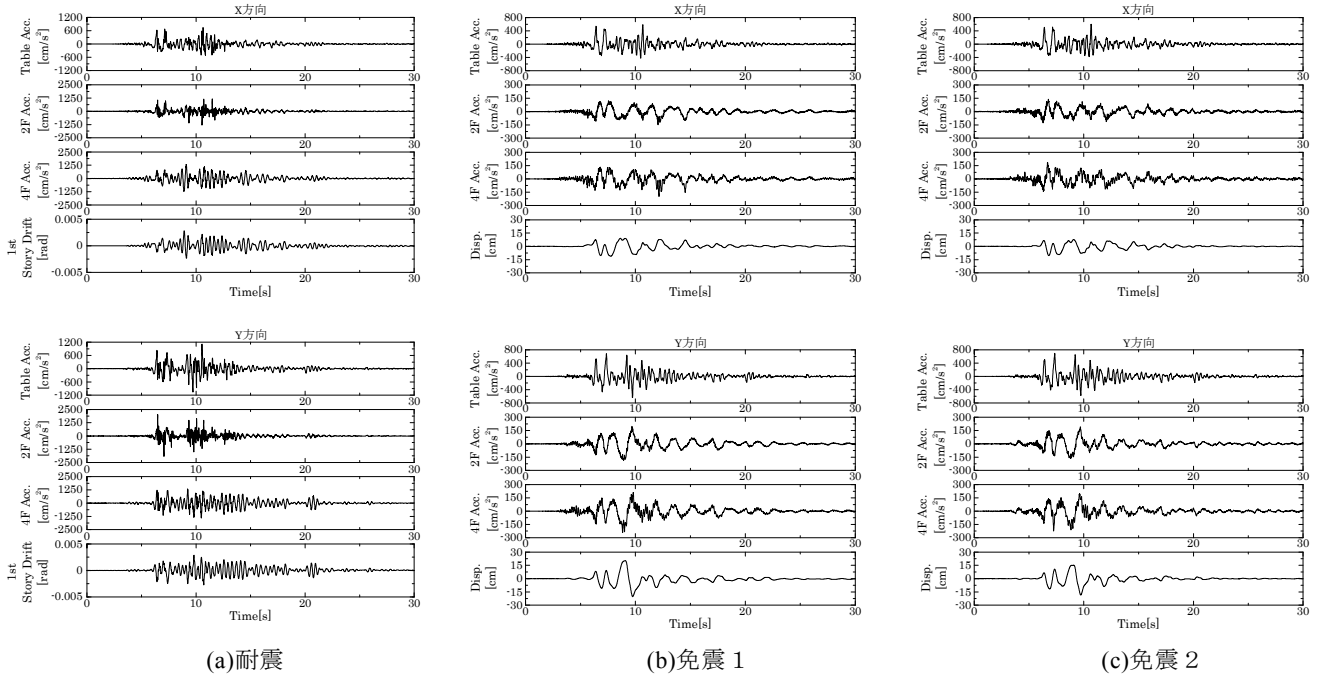


(b) Y 方向

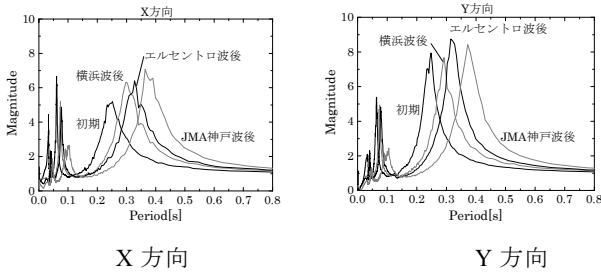
図7 目標波および再現波の速度応答スペクトル

表4 実験結果 (最大応答値)

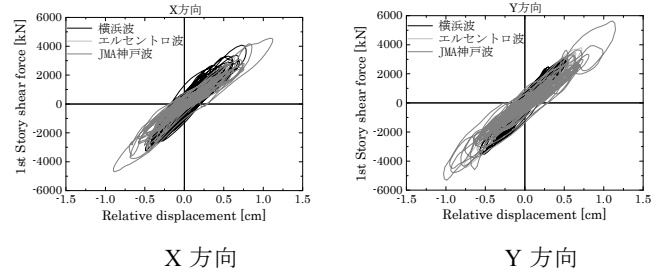
構造	短周期地震動												長周期地震動											
	耐震						免震1						免震2											
地震波	横浜波		エルセントロ波		JMA 神戸波 80%		エルセントロ波		JMA 神戸波 80%		エルセントロ波		JMA 神戸波 80%		三の丸波		三の丸波		三の丸波					
項目	階	X 方向	Y 方向	X 方向	Y 方向	X 方向	Y 方向	X 方向	Y 方向	X 方向	Y 方向	X 方向	Y 方向	X 方向	Y 方向	X 方向	Y 方向	X 方向	Y 方向	X 方向	Y 方向			
最大加速度 (cm/s <sup>2</sup> )	R	1507	1434	1176	1480	1556	1971	1762	177	151	238	261	552	201	166	202	247	711	252	254	233	203	539	197
	4	1144	1113	947	1182	1323	1406	1005	171	159	198	242	548	176	160	186	224	631	217	220	250	211	524	205
	3	916	1040	770	892	1538	2149	909	162	156	127	179	526	151	159	146	184	586	188	165	248	208	507	205
	2	712	726	545	614	1304	2032	599	163	157	150	198	512	150	161	140	194	565	183	151	246	204	541	203
	1	735	654	392	483	1105	1799	528	170	162	170	215	493	150	160	149	199	544	198	143	244	203	603	203
台	666	650	351	438	750	1125	407	425	518	588	680	361	373	553	600	696	361	193	143	209	161	200	162	
最大速度 (cm/s)	台	50.5	45.1	50.3	46.8	61.5	68.1	30.0	53.0	50.7	57.2	68.1	28.8	54.1	51.9	59.2	69.0	29.7	49.4	47.8	48.6	46.9	48.5	47.1
最大変位 (cm)	台	35.2	32.7	33.0	14.1	16.1	15.3	8.0	36.9	15.7	16.4	15.2	7.7	36.9	15.8	16.6	15.6	7.8	20.1	15.8	20.2	15.8	20.2	15.8
最大層間変位 (cm)	4	0.20	0.19	0.25	0.30	0.36	0.59		0.02	0.02	0.02	0.03		0.03	0.03	0.03	0.03		0.03	0.03	0.03	0.03	0.07	0.03
	3	0.43	0.42	0.46	0.57	0.64	0.90		0.03	0.03	0.04	0.05		0.04	0.04	0.04	0.05		0.05	0.04	0.06	0.04	0.13	0.04
	2	0.51	0.45	0.48	0.65	0.70	0.97		0.04	0.04	0.04	0.06		0.04	0.04	0.04	0.06		0.05	0.05	0.07	0.06	0.12	0.05
	1	0.79	0.58	0.62	0.80	1.10	1.13		0.03	0.03	0.05	0.06		0.04	0.04	0.04	0.06		0.07	0.07	0.06	0.07	0.13	0.06
	B	0.09	0.06	0.06	0.07	3.55	4.28		19.46	18.92	11.16	20.41		13.34	15.85	10.38	18.54		0.01	0.01	40.86	33.89	28.61	27.63



(a)耐震 (b)免震1 (c)免震2  
 図8 JMA神戸波80%による応答時刻歴波形 (上図：X方向、下図：Y方向)



X方向 Y方向  
 図9 耐震構造の応答倍率 (固有周期の変化)



X方向 Y方向  
 図10 層間変位と層せん断力の履歴

ベクトルが比較的良好に一致しており、各構造間で比較する上で問題ないと考えています。

### 5.1 短周期地震動に対する結果

耐震および免震1、2での各階の応答加速度と層間変位および入力波の加速度、速度、変位の最大値を表4に示します。また、JMA神戸波80%加振時の耐震および免震1、2の時刻歴波形も図8に示します。耐震での時刻歴波形では、入力加速度、2、4階の応答加速度、1階層間変形角を示し、免震では、入力加速度、2、4階の応答加速度、免震層変位を示します。耐震におけるJMA神戸波80%加振では、免震時と比較し震動台上の最大加速度がかなり大きく計測されているが、これは後述する試験体の震動台上での滑りによる影響と考えられます。

耐震構造において、最上階の応答加速度が、入力加速度より、横浜波で最大約2.3倍、エルセントロ波で最大約3.4倍、JMA神戸波80%で最大2.1倍に増幅され、各階床応答加速度が相当大きなものとなりました。図9に示す各加振前後でのランダム波より求めた試験体の応答倍率から推定される固有周期は、表3に示す

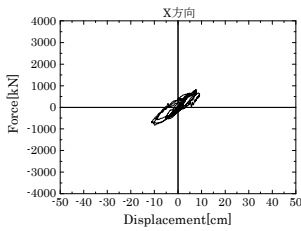
順序で全ての加振を行う事で、初期より約1.5倍に伸びました。また、図10に示す各加振での1階の層間変位と層せん断力の履歴より、全て加振を行った後の剛性は初期剛性の約1/2に低下しており、これは固有周期の変化と一致しています。なお、ここでの層せん断力は各層の応答加速度と各層の質量より算出しています。この剛性低下は、RC造構造物の損傷としては比較的軽微なものといえます。一方、歪みの計測値からは極一部ではあるが鉄筋が塑性化していることが確認されました。加振後の試験体観測でも柱梁端部に複数のクラックはみられましたが、幅0.2mm以下でほとんどがヘアクラックであり、その他の大きな損傷箇所も特にみられませんでした。

ただし、JMA神戸波80%では、加振中に上部構造物と震動台間に最大約4cmの滑りが発生し、試験体基礎固定用PC鋼棒と試験体との衝突が生じたため、計測された応答加速度に瞬間的な高加速度の発生がみられました。PC鋼棒と試験体との衝突時の高加速度を無視すると、滑りにより試験体基礎部の加速度は650cm/s<sup>2</sup>以上になることはありませんでした。事前の検討ではJMA神戸波80%加振時に、1階層間変形角が

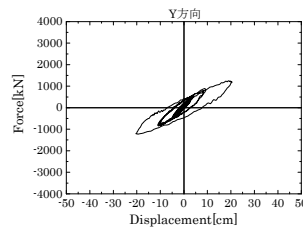




図 11 短周期地震動加振後の室内状況（耐震構造）

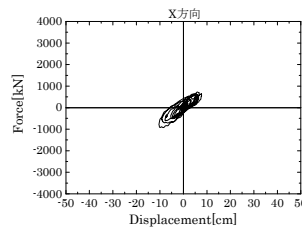


X 方向

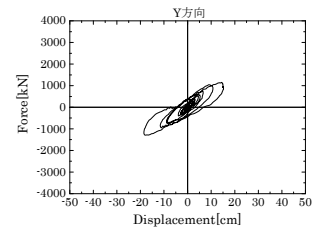


Y 方向

図 12 免震 1 免震層変位と層せん断力の履歴 (JMA 神戸波 80%)



X 方向



Y 方向

図 13 免震 2 免震層変位と層せん断力の履歴 (JMA 神戸波 80%)

約 1/100 に達すると予測していましたが、実験では1階層間変形角が約 1/350 程度でした。変形および構造的な損傷が事前の予測より小さいものとなった原因の一つとして、この滑りにより試験体への入力荷重が想定よりも小さくなったためと考えられます。

耐震構造における室内状況として、床や壁に金物等で固定されていない機器(CT スキャナ撮影部、手術台など)および什器の移動、棚内に納められていた医薬品等の物品の散乱、スライド式扉の脱落、機器の転倒・落下などが確認されました。これらの一部の状況を図 11 に示します。本研究に参加および協力している医療施設に関する研究者等は、このような状況下では、高度な医療行為は当然のことながら通常の医療行為ですら即座に実施することは困難であると判断しました。また大規模地震災害時には放射線機器等による診断を伴う災害医療が多く必要となることが予想され、さらに災害後しばらく経過すると CT スキャナなども利用され始め、こうした精密または重量機器の移動などはユーザーが即座に解決できる問題ではなく使用上の安全も確保できないとも判断しました。なお、今回用いたCTスキャナは撮影部の質量が約 1,700kg であり、アンカー固定をしていないタイプです。以上の実験結果から、耐震構造における短周期地震動については、震災時の機能保持のために抜本的な対策の検討が必要であると

考えられます。

一方、免震構造においては、エルセントロ波では各階の応答加速度をほぼ  $200 \text{ cm/s}^2$  以下に、JMA 神戸波 80%では上層階の一部で  $240 \sim 260 \text{ cm/s}^2$  となっておりますがおおむね  $200 \text{ cm/s}^2$  以下に低減できています。また、図 12、13 に JMA 神戸波 80%での免震1および2の免震層の変位と層せん断力の履歴を示します。なお、ここでは層せん断力は各階の応答加速度と各階の質量より算出しています。最大変位量での等価周期と等価粘性減衰定数を求めると、免震1で 2.26 秒、17.1%、免震2で 2.1 秒、25.4%となり、減衰定数としてはほぼ一般的であるといえます<sup>28)</sup>。これらの免震周期と減衰の違いが、応答加速度と変位の差となったが、免震1、2とも十分に免震効果が発揮されています。

内部の状況に関しても、ほとんど機能的な被害はなく、キャスター付き機器・ベッドでキャスターをロックしていないものが最大で約 1m 移動しているものもありますが、ほとんどが 60cm 程度でした。この移動により他機器等への衝突はみられましたが大きな被害はありませんでした。ロックしてある機器および床に直接置かれた機器などの移動はほとんどみられませんでした。また、高架水槽は、蓋および換気口(ベンチレータ)から水の噴出がみられましたが、水槽本体への被害はほとんどみられませんでした。棚に収められた物品や書籍類の

表 5 短周期地震動による室内被害

構造	耐震構造	免震構造
キャスター機器 (フリー)	70cm 程度の移動	60cm 程度の移動
キャスター機器 (固定)	50cm 以上の移動あり 衝突による転倒	移動なし
置き型機器	モニターの落下	移動なし
重量物の移動	CT 等の数 cm の移動	なし
ベッド (フリー)	1m 程度移動	1m 程度移動
ベッド (固定)	ロックはずれる	移動なし
手術台	移動あり 患者転落しかかる	移動なし 患者問題なし
手術室壁パネル	ダクトパネルの脱落	キャスター機器の衝突
壁ボード	被害なし	被害なし
引き出し	全開、落下なし	多少の開き
棚	物品の散乱	物品の散乱なし
吸引ビン	脱落あり	被害なし
スライド式扉等	扉の脱落	扉の開閉
高架水槽	蓋より溢水	蓋より溢水

散乱もほとんどみられませんでした。以上より、震災後に大きな混乱は生じないと判断できます。

最後に各構造での機能的な被害を表 5 にまとめて示します。なお機器の摩擦係数は、キャスター機器・ベッド(フリー)が約 0.02~0.05、キャスター機器(固定)が約 0.3~0.5、置き型機器・手術台が約 0.5~0.6 です。

## 5.2 長周期地震動に対する結果

長周期地震動を入力した場合の耐震構造とそれぞれの免震構造での各最大応答値を、短周期地震動による結果と同じ表 4 に示します。また、時刻歴波形も短周期地震動の結果と同形式で図 14 に示します。なお、免震2で X 方向の応答加速度が 100 秒付近で大きくなっているのは、擁壁との衝突が発生したためです。

耐震構造では、加振実験前の1次固有周期が、X、Y 方向とも約 0.24 秒であり、三の丸波の卓越周期と構造物の固有周期とが離れているため、応答加速度はそれほど小さくなく最上階で最大 254cm/s<sup>2</sup> で、最大層間変位も 1mm 以下でした。

一方、免震1および2では、最上階の最大床応答加速度は耐震構造に比べ小さいですが、免震の周期と地震動の卓越周期が近接しているため共振現象により、応答加速度が入力加速度より免震1および免震2ともに約 1.2~1.3 倍(ただし免震2では衝突していない方向)に増幅されています。免震層の変位も入力波の変位より免震1で約2倍、免震2で約 1.7 倍と大きくなっています。共振現象により応答の増幅が発生し免震効果があまり発揮されない結果となりました。

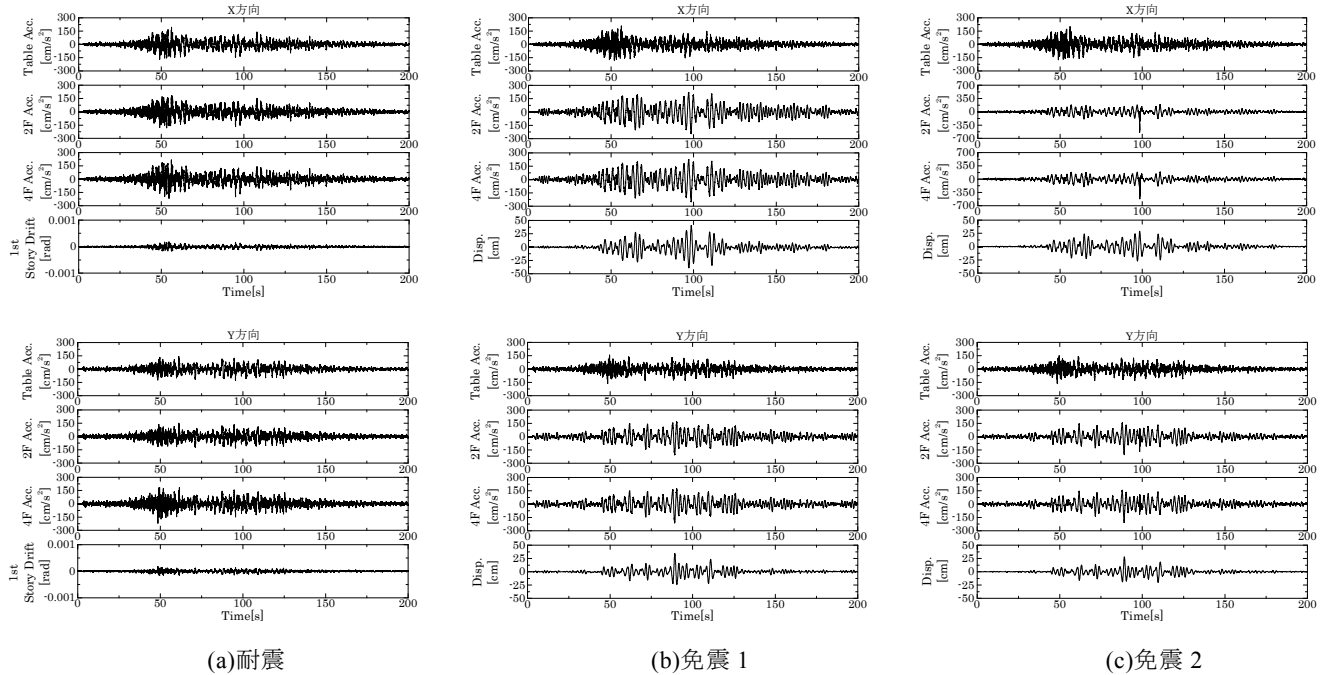


図 14 三の丸波による応答時刻歴波形 (上図: X 方向、下図: Y 方向)

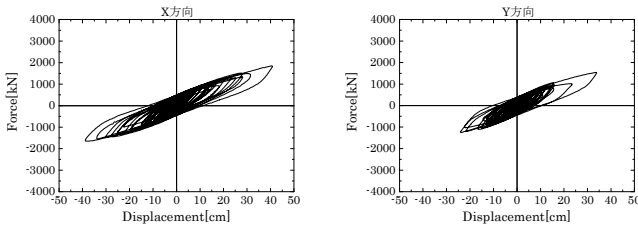


図 15 免震1 免震層変位と層せん断力の履歴 (三の丸波)

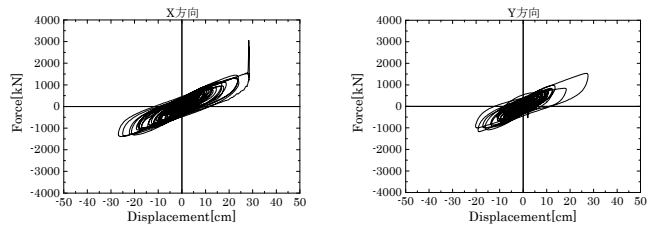


図 16 免震2 免震層変位と層せん断力の履歴 (三の丸波)



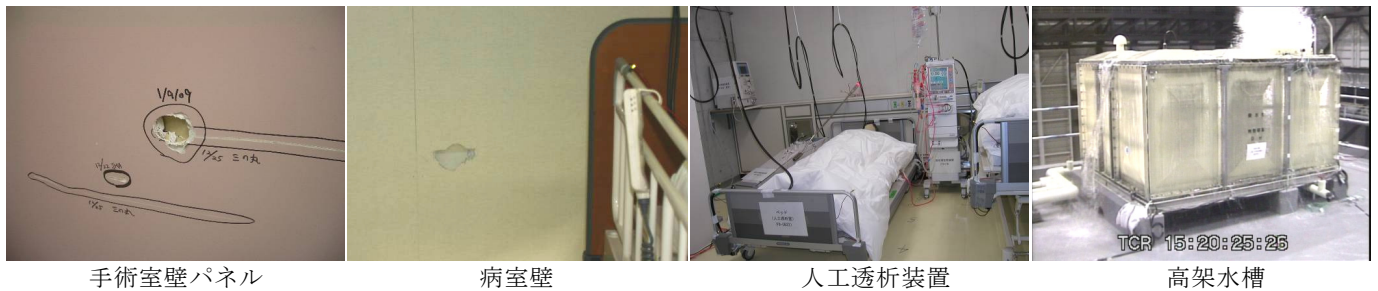


図 17 長周期地震動加振後の室内状況（免震構造）

表 6 長周期地震動による室内被害

構造	耐震構造	免震構造
キャスター機器（フリー）	50cm 程度の移動	最大 3m の移動 多数の衝突
キャスター機器（固定）	移動なし	移動なし
置き型機器	移動なし	移動なし
重量物の移動	なし	なし
ベッド（フリー）	80cm 程度移動	1.5m 程度移動
ベッド（固定）	移動なし	移動なし
手術台	移動なし 患者問題なし	移動なし 患者問題なし
手術室壁パネル	被害なし	機器衝突により損傷
壁ボード	被害なし	機器衝突により損傷
引き出し	多少の開き	全開、落下なし
棚	物品の散乱なし	物品の散乱なし
吸引ビン	被害なし	被害なし
スライド式扉等	扉の開閉	激しい開閉と破損
高架水槽	蓋より溢水	蓋の損傷および溢水

免震1、2の免震層の変位と層せん断力の履歴を図 15、16 に示します。最大変位量での等価周期と等価減衰定数を求めると、免震1は 2.59 秒、14.5%、免震2は 2.43 秒、20.1% であり、減衰定数としては一般的です<sup>28)</sup> が、免震周期が地震動の卓越周期の近傍であることで、応答が増幅する結果となってしまいました。

構造体の被害としては、耐震構造および免震構造ともに若干のへアクラックがみられる程度であり、耐震実験前後での試験体の1次固有周期は、加振前が 0.240 秒、0.237 秒(短辺、長辺)、加振後が 0.244 秒、0.244 秒(短辺、長辺)でした。

内部被害に関しては、耐震構造ではほとんどみられず、キャスター付き機器・ベッドでロックしていないものが約 50~80cm 移動した程度でした。

一方、免震構造での内部被害の状況は、短周期地震動時の結果とは一変し、機能に関わる被害が多くみられました。キャスターなしで直接床においた機器はほとんど移動することなく、たとえ移動したとしても、他の移動した機器の衝突による移動でした。キャスター付き機器でロックをしていない機器の加振後の残留移動量は、耐震時の 2 倍以上となり、多くのものが 1m 以上移動しており、最大で 3m 以上移動しているものや、移動での衝突により転倒した機器もみられました。また、移動した機器が約 50cm/s~90cm/s 以上の速度を持ち、その速度でまわりの影響を受けていない機器などに衝突し損傷する状況が多数みられ、手術室壁パネルと病

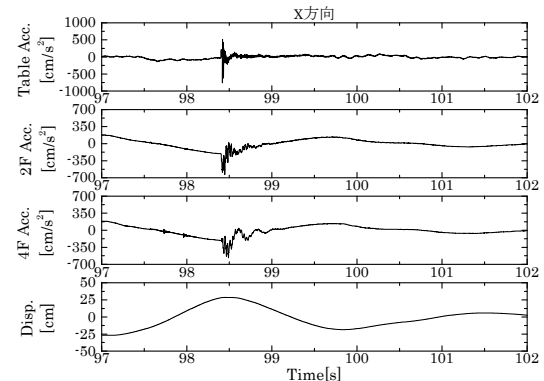


図 18 擁壁衝突時拡大波形（免震2 X方向）

室壁ボードなどの大きな損傷は、100kg 以上の機器が約 80cm/s 以上で衝突したことにより発生しました。スライド式扉は、激しく開閉し、扉の枠およびストッパーなどに約 90cm/s で衝突し、扉、枠、ストッパーの破損などがみられました。ただし、実験後に開閉に支障が起きることはありませんでした。屋上階に設置した新旧の高架水槽がスロッシングの影響により、天板に設けられた蓋およびベンチレーターから水を噴出するとともに、旧水槽に関しては蓋の止め具部分の破損により、蓋が開き大量の水が噴出する状況となりました。水槽の大きさは、旧水槽が長辺 3m、幅 2.5m、新水槽が長辺 3m、幅 2m であり、それぞれ水位を 1m としました。それぞれのスロッシングの周期は既往の算出式<sup>33)</sup>より約 1.6~2.2 秒となり、これが地震動の卓越周期および免震の周期と接近していることと、スロッシングの減衰が低いことからこのような被害が発生したものと思われます。他の入力波および耐震構造でも高架水槽からの溢水はみられましたが、免震構造における長周期地震動の場合が最も大きな被害となりました。長周期地震動に対する免震構造での状況を図 17 に示します。以上の実験結果から、免震構造においても機器・什器に対する何らかの地震対策を今後検討する必要があると考えられます。

最後に、各構造での長周期地震動による機能的な被害を表 6 にまとめて示します。

### 5.3 衝突による影響

免震2においては、X 方向で擁壁と上部構造物の衝

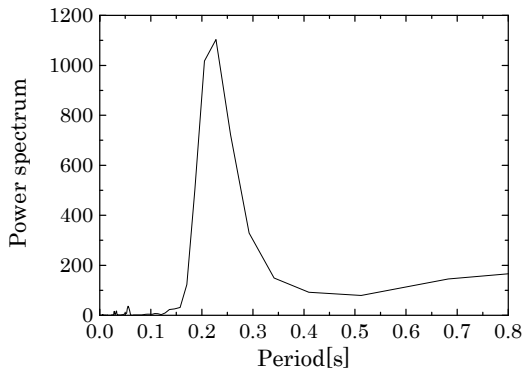


図 19 4 階加速度パワースペクトル  
(衝突時 98~100 秒)

突が発生しました。衝突時における X 方向の時刻歴波形の拡大図を図 18 に示します。この時刻歴波形は衝撃現象を詳細に検証するためハイパスフィルター処理を行っていません。衝突は、X 方向正側で1回のみ発生しました。4 階で応答加速度が  $564\text{cm/s}^2$  となり、衝突がない場合として免震1との比較ではありますが、約 2 倍の加速度が衝突とは逆方向(負方向)に大きく観測されました。時刻歴波形と図 19 に示す衝突前後の2秒間のパワースペクトルより、衝突後に建物の1次固有周期での振動が励起されているのがわかります。また、衝突が発生したときにかなり大きな衝突音も確認されました。しかし、今回の衝突は、免震層相対変位が最大になったときに僅かに接触して生じたものであり、そのときの相対速度は約  $5.9\text{cm/s}$  であったため、上部構造体および擁壁等の大きな破損はみられませんでした。衝突による内部被害として、キャスターなしで直接床に置かれた重量機器(約  $750\text{kg}$ )が数 mm 移動した程度で、今回の場合では、特徴的な被害は確認されませんでした。

#### 5.4 既存構造の医療施設の評価のまとめ

耐震構造での医療施設は、過去の大地震で、甚大な被害を受けており、現在でもそれらの対策技術や指針は明確に示されていません。また、これまでに医療施設を含めた様々な免震構造は、大規模な長周期地震動を経験したことがなく、その被害予想なども明らかにされていないのが現状です。

本研究では、これらの現状を打破し、地震災害時における医療施設の機能保持性能の向上に取り組むものであり、様々な状況における対策技術と対策指標を示すことを最終目標としました。

ここでは、E-ディフェンスを用い医療施設を模擬した実大構造物を耐震構造または免震構造として、それぞれの構造に直下型地震である短周期地震動および海溝型地震である長周期地震動を入力し、施設の機能被害を比較検証した結果を述べました。

耐震構造では、長周期地震動を入力した場合はそれほどの被害は発生しなかったものの、短周期地震動を入力した場合は過去の震災時での甚大な被害と同様に、著しい機能低下が確認されました。

免震構造に対して、短周期地震動を入力した場合、免震効果により非常に高い機能保持性能が実現できることを確認しました。一方、長周期地震動を入力した場合、地震に対し非常に有効である免震構造においても、地震動の卓越周期と免震周期が近接している場合は、想像を超えるキャスター機器の移動などが発生し、それらによる致命的な被害が確認されました。一般に医療機器は、その使用条件などによりキャスターのロックを行わずに使うものも多く、またそもそもキャスターにロック機能が付属していない機器も複数みられます。実験結果から免震構造内の室内機器、家具、設備などにおいても固定などの地震対策について実施する必要があります。

#### 6. 機能保持向上技術に関する評価

機能保持向上技術に関する評価として、医療機能に対して、地震対策を実施した場合の機能保持の向上性について述べます。なお、建物の応答結果はこれまでに述べた結果とほぼ同等の結果が得られているため、ここで改めて述べないこととします。

地震対策を行っていない場合では、耐震構造の医療施設において、物品の落下・散乱、ドアの脱落などの被害に加えて、施設内にある無固定のほぼすべての機器が移動する被害が確認されました。CTをはじめとする高度な医療精密機器の移動や転倒、物品の散乱は大規模災害時にすぐさま必要となる災害医療の実施はおろか、高度な医療行為すら実施できない状況であり、病院の機能を著しく低下させることが明らかになりました。

一方、免震構造の医療施設においては、短周期地震動に対しては免震が非常に効果的に働き、医療施設の機能を十分保持できることが確認できました。しかし、免震構造の医療施設が長周期地震動に遭遇したとき、ロックされていないキャスター付き医療機器の移動により引き起こされる被害が顕著であり、なかでも衝突による手術室の壁の破損がみられ医療施設特有の衛生保持機能が低下する深刻な被害が確認されました。免震構造においても、場合によっては十分な機能保持性能が実現できないことが明らかとなりました。

これらの明らかとなった様々な地震被害を防ぐ対策方法を検討し、それらの対策を施した実大の医療施設の試験体を用い E-ディフェンスによる震動台実験を再度実施しました。

#### 6.1 地震対策

地震時における医療施設の様々な被害を軽減させ

るための対策として、機器類の確実な固定が最も有効な方法と考えられますが、医療現場における様々な状況に対応するため、恒久的な機器類の固定の実施は、現実的でないとも考えられます。そこで、使用状況も考慮し、以下の4つの地震対策を実施し、機能保持性能を向上させます。

### 6.1.1 キャスター機器の簡便・高度な固定対策

医療施設内には、機動性を考慮しベッドやワゴンなど大小さまざまな機器にキャスターが取り付けられています。それらのキャスターの多くはロック機構があり固定可能ですが、なかにはロック機構が存在しないものもあり、またロック機構が不衛生部にあるなどの理由からロックが行われない場合も多くあります。そこで、対策として以下を実施しました。

- ① 常時ロック状態とし、移動時にロックを解除させるフェールセーフ方式
- ② 緊急地震速報など外部信号でロックされる方式

### 6.1.2 機器の壁面等への簡易固定対策

建物側でキャスター機器類を固定しやすい状況にすることで、機器の固定を容易かつ常に実施しやすくなります。壁面や床に機器を簡易に固定する対策として以下を実施しました。

- ① 連結器などで壁面などと、機器を簡易に固定する方式
- ② 壁の手すりなどに機器をベルト等で簡易に固定する方式

### 6.1.3 衝突対策のための壁面の防護

ロック機構の改良が実施されない場合や、運用上必ずしも固定動作が実施されない可能性も考えられます。その場合、壁面の被害を防ぐ必要があり、壁面に保護具を設置する対策をおこないました。この保護具は、手すりや機器の固定具と併用させることができるなど他の利点もあります。

### 6.1.4 免震床・機器免震による対策

病室やスタッフステーションと言った運用の工夫で比較的地震に対して被害を軽減できる部屋と、地震の揺れで不具合を起こすような精密機器が多数存在する検査分析室やサーバー室など他の部屋と比較し地震に対して脆弱な部屋があります。これらの部屋およびその部屋内の機器類に対して、床免震や機器免震技術を用い、致命的な被害の回避を行う対策を実施しました。床免震は、試験体の屋上階に、水平方向のみの2次元床免震を施した部屋と、水平2方向に鉛直方向を加えた3次元床免震を施した部屋を新たに設けました。

また、実施した主な地震対策状況を図20に、試験体への床免震部屋の設置図と詳細図を図21、22に示します。

### 6.2 機能保持性能の結果

実験後の主な室内状況を、図23に示します。

免震構造の場合、キャスター機器の固定や壁面防護などの地震対策を適切に施すことにより、キャスター



(a) フェールセーフ式ロック



(b) ベッドへの機器固定



(c) 機器バンド固定



(d) 機器免震

図20 地震対策状況



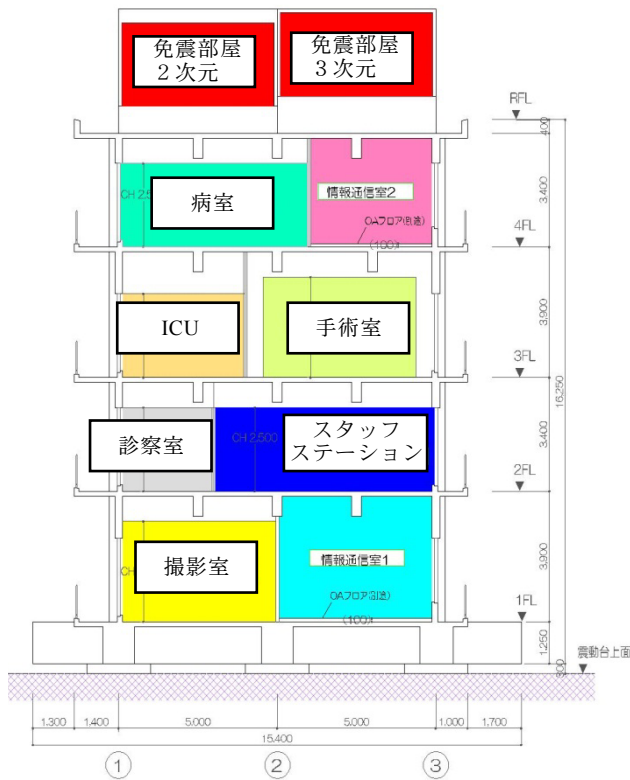
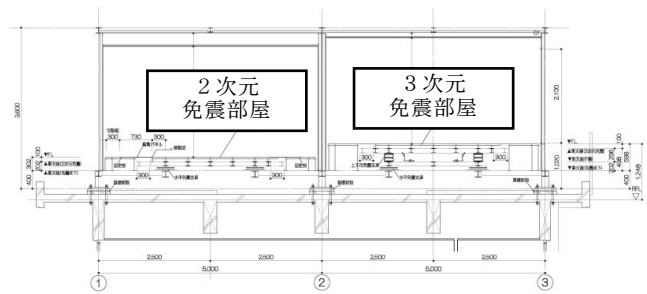


図 21 床免震部屋設置図

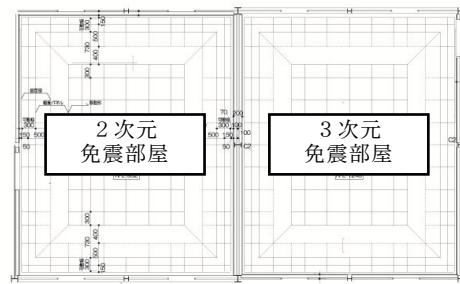
機器の大きな移動により発生した被害を軽減させられることが確認でき、極めて稀に発生する短周期地震動および長周期地震動においても、施設の機能は十分保持されることが確認できました。ただし、設置状況や使用環境によっては、地震対策を必ずしも十分に実施できない場合があります。

手術室内のキャスター付き機器でロック機構がないものは、適切な固定対策が実施できず、また機器によっては専用ワゴンの上部に主要な機器が搭載されているものがあり、機器全体として重心位置も高く不安定で、固定バンドなどで壁や床からある程度の移動を許容する固定方法（バンドに余裕を持たせる方法）での固定では、許容範囲内での移動により速度が増し、拘束限界付近（バンドが突っ張るところ）で急激にブレーキがかかるため、かえって転倒する事例がみられました。これらについては、機器の設計時に地震についても考慮する必要があるものと思われ、今後の課題であります。

一方、耐震構造に関しては、入力地震動の大きさのみで被害様相を評価できませんが、床の応答加速度が約  $500\text{cm/s}^2 \sim 600\text{cm/s}^2$  までであれば、地震対策を施すことにより、機器の移動、転倒、物品の散乱等はほとんどみられず、災害後の医療活動に支障がきたすことがない程度であることが確認されました。そのため、各階の床応答加速度が約  $650\text{cm/s}^2$  以下である JMA 神戸波 Lv1 (最大速度を  $25\text{cm/s}$  に調整した地震動) による加振では、地震対策が有効に働き、ほとんど機能的



(a) 立面図



(b) 平面図

図 22 床免震

に問題となる被害はありませんでした。しかし、同じ加振実験においても床応答加速度が、 $1\text{G}$  を超える階では、そうでない階と比較し、地震対策を施しても対策機器の破損などにより機器の移動、物品の散乱等がみられました。

間仕切壁や手術室の壁パネルについては、いずれの構造および地震動においても、機器等の衝突による損傷はみられず、今回の地震対策が有効であったことが確認されました。

### 6.3 機能保持向上技術に関する評価のまとめ

医療施設の地震時における様々な被害について、それらを防ぐ対策方法を検討し、その対策を施した実大の医療施設を模擬した試験体を用い震動台実験を実施しました。

その結果、免震構造に関しては、今回用いた地震動において、施設の機能保持対策として機器等に適切な地震対策を施せば、地震後においても十分施設の機能を保持できるものと考えられます。

一方、耐震構造に関しては、稀に発生する地震動においては、地震対策を施すことにより機能的に大きな問題となる被害は発生しませんでした。極めて稀に発生する地震動において、機能を健全かつほぼ無損傷に保つためには、まだ多くの課題があるものと思われ

## 7. まとめ

本研究課題では、首都直下地震に対する都市施設の被害を軽減し、施設の機能を維持するための防災・





(a) 免震構造内の手術室



(b) 耐震構造内の手術室

図 23 実験後の室内状況

減災対策について検討することを主目的として、世界で初めてE-ディフェンスによる医療施設の実大震動台実験を実施しました。そこでは、地震時における耐震および免震構造の医療施設の機能保持性能の確認と、機能保持技術の検討を実施し、地震対策の有効性と限界について多くの知見を得ることができました。これらの知見を、広く知っていただくため、地震対策のハンドブック(「病院スタッフのための地震対策ハンドブック あなたの病院機能を守るための身近な対策」)として取りまとめ、広く一般に普及にしていきます。

#### 参考文献

- 1) 地震調査研究推進本部:海溝型地震の長期評価の概要、2012
- 2) 中央防災会議(首都直下地震対策専門調査会):首都直下地震対策専門調査会報告、2005.7
- 3) 兵庫県:阪神・淡路大震災の復旧・復興の状況について、2009.8
- 4) 地震調査研究推進本部:首都直下地震防災・減災特別プロジェクト-その1 想定される直下地震の全体像から減災技術、復興計画までを研究、地震本部ニュース、2008年6月号、pp10-11、2008.6
- 5) 中央防災会議:首都直下地震対策大綱、2005.9
- 6) 薬業時報社大阪支局編集部:災害医療 阪神・淡路大震災の記録 -被災地の命はどう守られたか-、薬業時報社、p.14、1995
- 7) 東京都:阪神・淡路大震災調査報告書-平成7年兵庫県南部地震東京都調査団-、東京都、pp242-249、1995.3
- 8) 阪神・淡路大震災復興本部保健環境部医務課:災害医療についての実態調査結果、1995
- 9) 日本規格協会:JISハンドブック 医療機器I、2009
- 10) 佐藤栄児、中島正愛、井上貴仁、酒井久伸、笈淳夫、小林健一、鎌田崇義:震災時の医療・情報通信施設の機能保持に関する研究-震災時における

建物の機能保持に関する研究開発(その1)-、日本建築学会大会学術講演梗概集、E-1、pp.467-468、2008

- 11) 小林健一、笈淳夫、中山茂樹、山下哲郎、佐藤栄児、井上貴仁、鎌田崇義:震災時における医療施設の重要機器の分類調査-震災時における建物の機能保持に関する研究開発(その2)-、日本建築学会大会学術講演梗概集、E-1、pp.469-470、2008
- 12) 笈淳夫、小林健一、佐藤栄児、酒井久伸、井上貴仁、鎌田崇義、小方康裕:医療施設の機能保持研究のための医療機器単体振動実験-震災時における建物の機能保持に関する研究開発(その3)-、日本建築学会大会学術講演梗概集、E-1、pp.471-472、2008
- 13) 小方康裕、鎌田崇義、佐藤栄児、井上貴仁、酒井久伸、笈淳夫、小林健一:キャスト付き医療機器の地震応答に関する研究-震災時における建物の機能保持に関する研究開発(その4)-、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2、pp.67-68、2008
- 14) 佐藤栄児、酒井久伸、井上貴仁、笈淳夫、小林健一、鎌田崇義、丸山敦士、小方康裕:医療機器および什器の振動台実験(震災時における建物の機能保持に関する研究開発)、日本機械学会機械力学・計測制御部門講演会論文集(CD-ROM)、ROMBUNNO.411、2008
- 15) 阪神・淡路大震災神戸市災害対策本部:阪神・淡路大震災-神戸市の記録1995年-、pp207-208、2006
- 16) 藤田隆史:免震構法の現状と有効性、化学技術誌、オーム社、No29、Vol.2、pp80-86、1991
- 17) 笈淳夫、松田朗、伊藤誠、河口豊、辻野純徳、長澤泰、池田有隣、大場則夫:災害時の病院機能維持のための建築・設備的条件、第45回日本病院学会講演集、pp124-125、1995
- 18) 村山良雄:災害医療と病院設備 震災と病院、病

- 院設備、Vol.44、No.5、pp.583-589、2002
- 19) 上野薫:病院における耐震設計のあり方、病院設備、Vol.46、No.4、pp.255-262、2004
- 20) 鱒沢曜、西村嗣久:既存病院への耐震補強技術の運用、病院設備、Vol.46、No.4、pp.249-254、2004
- 21) 湯浅健司:透析医療における災害対策 IV 災害を迎え撃つ-未来へ(4)究極の対策:ノースリッジ地震に学んだ免震病院、臨床透析、Vol.22、No.11、pp.1571-1577、2006
- 22) 小杉勝一:財団法人 小千谷総合病院(新潟県中越地震)、建築防災、No.368、pp.5-8、2008
- 23) 北川良和:最近の免震・制震技術 最近の免震構造、No.148、pp.5-11、2005
- 24) (社)日本免震構造協会:MENSHIN、No.28、p33-75、2000.5
- 25) (社)土木学会、(社)日本建築学会:海溝型巨大地震による長周期地震動と土木・建築構造物の耐震性向上に関する共同提言、2006.11
- 26) 国土交通省:官庁施設の総合耐震計画基準、1996
- 27) (財)日本建築防災協会:2001 年改訂版 既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準・改修設計指針・同解説、2001
- 28) (社)日本免震構造協会:免震構造入門、オーム出版局、1995
- 29) 気象庁:87 型電磁式強震計波形データ(1993 年～1997年3月)、(財)気象業務支援センター、2002
- 30) 愛知県設計用入力地震動研究協議会:愛知県設計用入力地震動の作成—想定地震による強震動予測—改訂版、2005
- 31) 佐藤俊明、壇一男:関東地震による首都圏の広帯域強震予測、免震構造設計指針、日本建築学会、pp.263-274、2001
- 32) 佐藤栄児、酒井久伸、井上貴仁、福山國夫、梶原浩一、笥淳夫、小林健一、鎌田崇義、古川幸、中島正愛:地震災害時における医療施設の機能保持評価のための震動台実験、日本機械学会機械力学・計測制御部門講演会論文集(CD-ROM)、ROMBUNNO.512、2009
- 33) Robert D. Blevins : FORMULAS FOR NATIONAL FREQUENCY AND MODE SHAPE、pp.337-385、1997