

室内被害を考慮した実大振動台実験に基づく
医療施設の耐震設計手法の提案

2025 年

赤澤資貴

目次

1. 序論	1
1.1 はじめに	1
1.2 既往の研究	2
1.2.1 病院の地震被害と震度および地動最大速度との関係	2
1.2.2 医療機器の地震時挙動	4
1.2.3 医療施設における免震構造の普及	8
1.2.4 性能設計手法	14
1.3 本論の目的	17
1.4 論文の構成	17
第1章の参考文献	18
2. 医療施設の実大震動台実験試験体の設計と結果概要	23
2.1 はじめに	23
2.2 試験体の設計	23
2.2.1 全体概要	23
2.2.2 構造体の設計方針	32
2.2.3 試験体概要	32
2.2.4 試験体の荷重条件と地震荷重表	33
2.2.5 許容応力度設計	34
2.2.6 耐震試験体の保有水平耐力設計	36
2.2.7 医療機器の設置	37
2.3 計測計画	40
2.4 加振計画	41
2.5 試験体の事前地震応答解析	42
2.6 震動台実験による結果	48
2.7 実験後の耐震試験体の数値応答解析と実験結果の比較	51
	54
2.8 応答値の推定精度	54
2.8.1 固有周期と骨格曲線	54
2.8.2 最大応答変位	56
2.8.3 大地震動の損傷状況	57
2.9 まとめ	57
第2章の参考文献	58

3. 医療機器の地震時挙動	61
3.1 はじめに	61
3.2 キャスター付き台車による床材の要素実験の分析	61
3.3 振動台実験における最大床応答	64
3.4 機器の動き出しについて	67
3.5 移動量と加振継続時間について	68
3.6 機器の転倒について	68
3.7 各室の医療行為継続性の分析	69
3.8 まとめ	74
第3章の参考文献	75
 4. 球面すべり支承を用いた免震構造の挙動	77
4.1 はじめに	77
4.2 低摩擦球面すべり支承の特性	77
4.2.1 設計において考慮する不確定性	77
4.2.2 LF-SSB の要素実験	79
4.3 応答予測と不確定性の影響	82
4.3.1 応答スペクトル法による応答予測	82
4.3.2 数値解析モデル	83
4.3.3 速度依存性の影響	84
4.3.4 静止摩擦係数の影響	86
4.3.5 面圧依存性の影響	89
4.4 摩擦係数による影響	91
4.5 まとめ	94
第4章の参考文献	95
 5. 室内被害を考慮した中低層の医療施設の簡易性能設計手法	97
5.1 はじめに	97
5.2 実験による被害程度と被害評価指標とする床応答値	97
5.2.1 被害ランクと予測指標	97
5.2.2 被害ランクと予測指標の関係	98
5.2.3 室内医療機器の被害評価手法の提案	102
5.3 数値解析による被害評価手法の妥当性の検討	103
5.3.1 入力波の応答スペクトル	103
5.3.2 多質点系せん断型モデル	104
5.3.3 応答解析結果	106

5.4	構造体の耐震等級を変数とした検証.....	107
5.4.1	入力地震動と固有値解析結果.....	108
5.4.2	レベル1地震動時の構造体の損傷と室内被害レベル.....	109
5.4.3	レベル2地震動時の構造体の損傷と室内被害レベル.....	110
5.4.4	レベル2告示波の室内被害程度.....	113
5.5	免震構造の室内被害ランク.....	116
5.6	まとめ.....	117
第5章の参考文献.....		117
6.	結論	119
発表論文リスト.....		123
謝辞.....		125

1. 序論

1.1 はじめに

近年、2016 年熊本地震、2024 年能登半島地震など震度 7 を計測する巨大地震が頻発し、災害時にも事業継続を求められる医療機関や官庁施設などに大きな被害が出ている。南海トラフ沿いの巨大連動地震により広域で長周期長時間地震動が高い確率で発生することが危惧されているなか^{1.1)}、災害時に拠点となる建築物の事業継続性の確保は喫緊の課題となっている。2016 年熊本地震における役所等の災害拠点建築物の被害を受けて整備された「防災拠点等となる建築物に係る機能継続ガイドライン」^{1.2)}では、構造躯体、非構造部材、建築設備などについて、災害拠点建築物が持つべき安全性及び機能性の目標を定め、その確保を図ることを掲げている。災害拠点建築物の対象は、「大地震時に地域防災計画や組織の BCP に基づき防災拠点として機能継続することが期待される建築物であり、庁舎、避難所、病院等」とされている。中でも病院施設の医療機器は重心が高いことや、移動させることが前提となるためキャスターを有する機器が多い上に室内に密に配置されるなど、オフィスや住宅などの一般什器と地震時の挙動や室内被害が異なる。しかしながら、病院施設の機能維持に重要な役割を担う医療機器について、耐震性に関する目標性能などの記載はない。

2016 年熊本地震では熊本県内の災害拠点病院に指定されている熊本市市民病院も機能を停止し、それ以外にも 9 か所の病院が入院患者を大規模に退避させる病院避難^{1.3)}を余儀なくされた。室内の被害についても、透析液供給装置などの医療機器の転倒^{1.4)}が報告されており、また NICU（新生児集中治療室）では前震後に新生児ベッドの転倒・移動を恐れて上部のみを床におろして被害を防いだ事例^{1.5)}もあった。2017 年 11 月に韓国東海部で起きた浦項地震では、新生児保育器の移動を看護師たちが必死に抑えて被害を防いだ^{1.6)}。また、ECMO（体外式膜型人工肺）、人工心肺装置、人工呼吸器などの生命維持管理装置は、転倒や衝突に加えて、移動量が大きい場合にも患者に接続している回路が外れて治療が停止する危険性がある^{1.7)}。患者の生命に係わる機器については、転倒や衝突が生じた場合には専門技師による動作確認が必要である。装置が故障した場合は手動で回路を動かすことになり、医療従事者への負担が増大し、事故の危険性が高まる。

地震に対する医療施設の被害率については、アンケート調査に基づき病院の地震被害と震度との関係を定量的に評価した報告^{1.8)}がある。また、大阪北部地震時の病院建物・設備に対する被害をアンケート調査した研究^{1.9)}では、被害と地震動の関係を地表最大加速度（PGA）と地表最大速度（PGV）の観点から定量的に評価している。しかし、医療施設の事業継続性を考慮した性能設計に必要となる、建物の構造特性や床応答に応じた医療機器や病室内の被害評価の予測手法は提案されていない。

1.2 既往の研究

本研究と関連のある既往の研究や学協会のガイドラインについてまとめる。具体的には、アンケート調査に基づき病院被害と震度および地動最大速度との関係を示した研究、医療機器や非構造部材に関する実験研究、海外で一般的に用いられており日本にも中低層建物に普及しつつある球面すべり支承に関する研究、中低層建物の躯体に対する耐震性能グレード、を紹介する。

1.2.1 病院の地震被害と震度および地動最大速度との関係

(アンケート調査による病院の地震被害と震度との関係)

郭らの研究^{1.8)}では、2003年宮城県沖の地震、宮城県北部の地震および十勝沖地震で震度4以上を記録した地域の病院と一般建物の被害状況をアンケートにより調査し、地

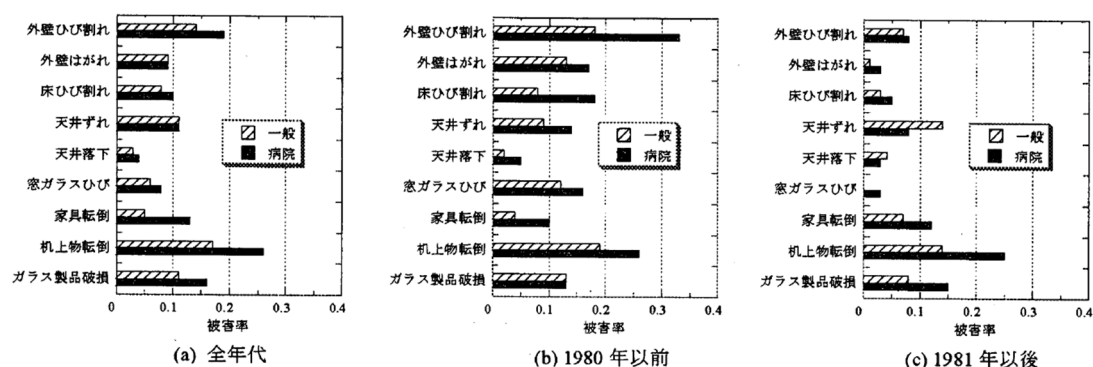


図 1.1 病院と一般施設に発生した建物の被害の比較^{1.8)}

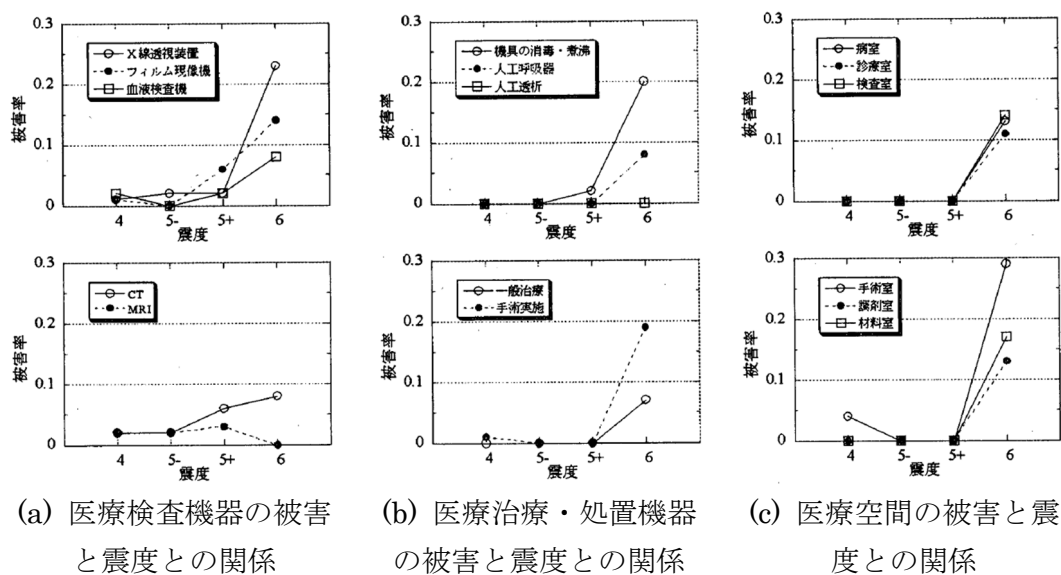


図 1.2 医療機器・空間の被害と震度との関係^{1.8)}

震被害と震度との関係を整理している。建物棟数は、病院 228 棟、一般施設 267 棟であった。対象建物は RC 造建物であり、6 階以下の中低層建物が主である。建築年代、構造種別、規模などの建物基本情報に関する質問と、地震被害に関して非構造部材を含む建物の外部・内部、生活機能と設備、医療機能の 3 つに分けて、地震による被害・不具合の有無の回答を収集している。図 1.1 に示すように病院は一般施設よりも建物被害が発生しやすく、特に古い病院での被害率が高い。また、室内の家具・什器の転倒・散乱被害は、新・旧病院の被害率に顕著な差は見られなかった。医療機能については医療機器と医療空間に分け、それぞれ医療機器を検査、治療・処置、投薬、その他（ナースコールの使用、カルテ作成など）に分類し、医療空間を病室、診察室、検査室、手術室、調剤室、材料室に分類して被害を調査した。図 1.2 に示すように医療機器については震度 5 強までは概ね機能維持ができており被害率は 5% 程度であり、震度 6 で被害率が急増している。ただし、震度 4 程度でも電気停止など生活機能の被害や設備被害などにより、震度 4 程度から機能損失する場合もある。医療空間は震度 5 強までは概ね使用でき、震度 6 地域の病院で構造的な被害が見られ医療空間が使用不能となっている。

(病院の地震被害と地表最大速度 (PGV) との関係)

石原らの研究^{1.9)}では、想定する地震に対しての医療機能への影響評価手法を構築することを目的とし、大阪北部地震時の病院の建物・設備に対する被害（構造部材・非構造部材・建築設備など・ライフライン）のアンケート調査を実施し、図 1.3 に示すように地震動の関係を分析している。また、その結果をもとに京都市内の病院を対象に地震被害想定で構築された地震動に対して病院施設が受ける被害を推定している。地震動の

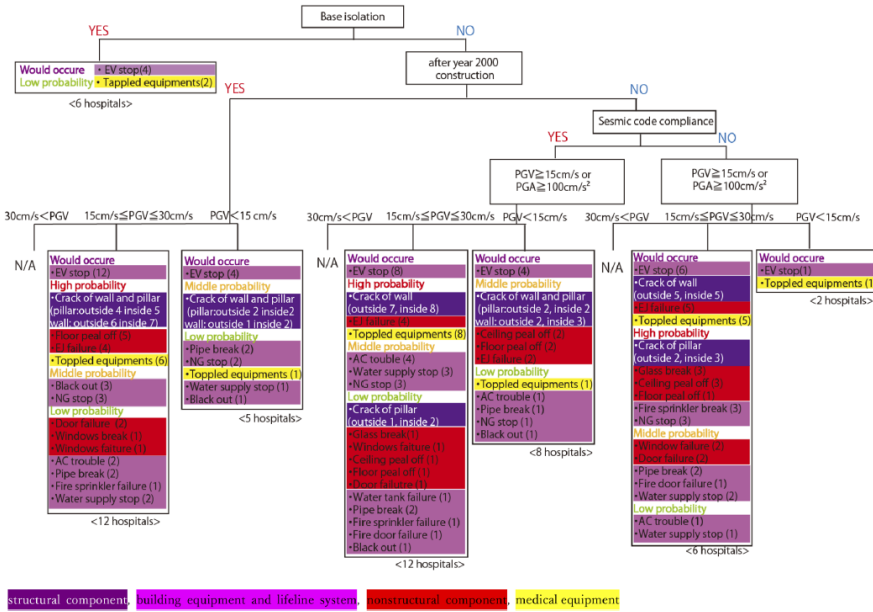


図 1.3 最大地動速度による病院被害の分類^{1.9)}

指標として建物の被害と相関性が高い地表最大速度（*PGV*）を採用している。*PGV*が15cm/s以上になると、壁や柱のひび割れや家具・什器の転倒が50%程度の施設で発生している。免震構造の病院については、エレベーター停止と家具・什器転倒以外の被害はない。南海トラフでは京都のように震源から大きく離れた地域においても、大阪北部地震以上の揺れが想定され、建築構造的な被害が発生しなくても医療機能の継続という観点から大きな問題となるような影響が発生しうる。

これらの研究を踏まえて、さらに検討すべき課題を下記に挙げられる。

- ・ 建物特性に応じて床応答は異なるため、震度や地表最大速度といった地震動の強さに加えて、建物の特性を考慮した被害評価手法を確立すべきである。
- ・ 兵庫県南部地震また以降の頻度高く発生する震度7クラスの地震を契機とし、医療施設の免震化も進んでいる。また、免震建物でも設計時期が初期と現在では固有周期が異なる上に^{1.10)}、想定する地震動レベルに応じて特性が異なるため、被害ランクの想定には建物の特性と地震動レベルを考慮する必要がある。

1.2.2 医療機器の地震時挙動

地震時に医療施設機能の維持・事業継続性を確保するためには、一般什器および医療機器の室内被害抑制に配慮した設計が必要である。

一般的な什器については、什器の形状によって最大加速度または最大速度と転倒の関係を評価する手法が提案されている^{1.11)}。実大実験によりオフィスビルの室内被害を評価した研究^{1.12)}では、什器に転倒対策が施された場合でも収納物が飛び出し危害を及ぼすことや構造躯体の振動特性を考慮した対策が必要であることを確認している。一般の家具・什器とは異なり、医療機器の多くは高額で、複数の患者で共用しているため、位置調整や移動を容易にするためにキャスターを有し、かつ医療従事者の作業性に配慮して重心が高い。そのため地震時に衝突や転倒による被害が多数報告されている^{1.13, 1.14)}。

「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」^{1.15)}では、医療機器の設計施工要領に関する記載がある。兵庫県南部地震における病院に生じた機能障害およびその要因について整理し、医療機器の地震被害、耐震目標と地震対策をまとめている。

（室内被害を評価するための振動台実験）

吉澤の研究^{1.12)}では、建物の地震時性能に対する社会ニーズが、人命の安全はもとより地震後の建物の機能維持へと変わりつつある背景を踏まえ、地震時の室内被害の軽減に着目し、構造躯体、非構造部材、建築設備、家具什器による被害、及びそれらの相互干渉によって生じる被害のメカニズムを実験や被害調査より示し、地震後にも機能維持できる室内空間を設計するための事項を明らかにしている。図1.4に試験体の全景と内部の写真を示す。また建物の機能維持に関しては、当然のことながら人命の確保から地



(2) 施工状況

図 1.4 試験体の全景写真 ^{1.12)}

震後の生理機能維持までを対象とした検討も求められることから、地震時に建物利用者の安全確保のために提供できる情報についても分析を加えた。得られた知見を以下に示す。

- 1) 室内被害を評価する情報として気象庁震度に着目し、建物上層階の計測震度は下層階の計測震度からの増分で評価できることを見出した。また緊急地震速報に建物内の震度と長周期地震動による揺れ予測を適用して、上層階と下層階の揺れが顕著に異なる高層建物に対し、緊急地震速報情報をより合理的に利用できることを示した。
- 2) オフィスビルの用途を想定した非構造部材、建築設備、消防設備、家具什器を配置した実大規模の振動台実験結果から、個々の耐震対策によって、極めて稀な地震レベルの揺れに対しても室内被害を大幅に軽減できることを確認した。また観測した床応答加速度から算出した計測震度による被害レベルと実験による室内被害を比較し、低層建物の場合は両者の対応がよいこと、高層建物の上層階では、長周期地震動成分が卓越する入力の場合は、計測震度は室内被害を過小評価する傾向にあることを明らかにした。
- 3) 構造被害は軽微であるものの、非構造部材・建築設備の損傷により建物機能が長期

間にわたって低下した事例を取り上げ、その被災直後から復旧工事の過程を詳細に分析し、吊り式の建築設備の地震時応答が、非構造部材の損傷や復旧工事費用に大きな影響を与えることを実証した。

(医療機器の耐震性に関する振動台実験)

水野らの研究^{1.16)}では、医療機器の地震時挙動と耐震性を明らかにするため、代表的な医療機器の実物・模型の振動台加振実験を行うものである。

東北大学建設系建物を病院とみため、入力地震動に 1978 年宮城県沖地震東北大学建設系建物の 1 階・9 階の強震記録 (NS) を採用し、可能な限り波形を忠実に再現する方針とした。振動台の性能上時に再現することが不可能であるため、試験体は、実物と模型 (長さの相似比 1/2, 7, 1/3 の 2 種) を用いた。試験体として用いた医療機器は、1) 未熟児用保育器, 2) NICU 用未熟児用保育器, 3) 新生児用ベット (コット), 4) 成人用ベット, 5) ICU 用成人用ベット, 6) 床頭台・オーバーベットテーブル, 7) 車イス, 8) その他, である。キャスターのあるものについては、その条件を変えて実験を行った。床は、振動台上に合板 (厚 24 mm) を張り、長尺塩ビ仕上げの 1 種とした。以下に知見を示す。

- ・ 実験を行った中では、保育器類が最も耐震的に不利である。
- ・ 保育器のキャスターをフリーにした場合は、転倒に対して有利となるが、移動量がかなり大きくなる。
- ・ 保育器は通常 4 個のキャスターのうち 2 個をロックする。前面ロックよりも対角ロックの方が、転倒に対して有利となる。保育器自体の鉛直軸まわりの回転でエネルギーを吸収するためと考えられる。看護婦の日常の操作の上からは前面ロックの方が使いやすいが、今後対角ロックを推奨すべきである。
- ・ 宮城県沖地震の東北大学建設系建物を大地震時の病院建物と想定すると、キャスター条件と設置階によっては保育器類に転倒を生ずる。

人見らの研究^{1.17)}では、地震時における医療機器のロッキング・転倒対策の検討を目的として、振動台実験と数値解析を行った。図 1.5 に示すように新生児用ベッドと透析液供給装置に正弦波や地震時の床応答を入力し、機器のロッキング・転倒の有無を調べた。実験結果を再現できる医療機器の解析モデルを作成し、地震動の不確定性を考慮した数値解析により、 b/h (b : 幅, h : 高さ) の目標値を検討した。以下に得られた知見を示す。

- ・ 振動台実験により、新生児用ベッドに正弦波を入力しロッキング・転倒の有無を調べた。キャスターがフリーや 2 点对角ロックとした条件ではロッキング・転倒は発生しなかった。全てロックした場合は重心幅高さ比 b/h が小さいほどロッキング・転倒しやすかった。
- ・ 振動台実験により、透析液供給装置に地震波を入力しロッキング・転倒の有無を調

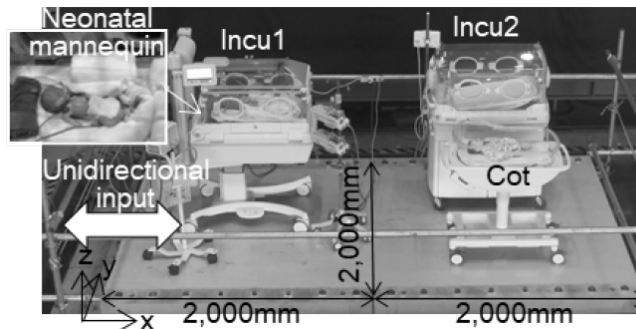


図 1.5 振動台実験の様子^{1.17)}

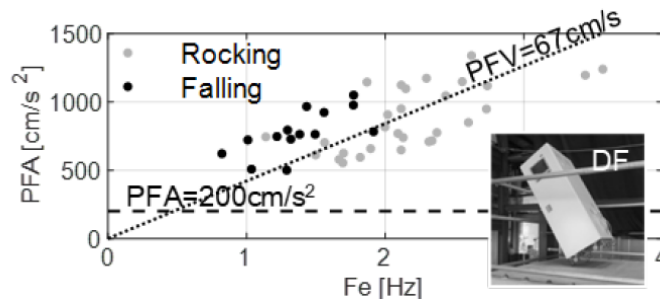


図 1.6 DF のロッキングや転倒被害と入力波の関係^{1.17)}

べた。図 1.6 に示すように入力波の等価振動数が 2.0 Hz 未満の範囲で最大床応答速度 PFV が大きくなると転倒し始めた。

- ・ 数値解析により、地震動のばらつきを考慮した医療機器のロッキング・転倒に関する被害関数を求めた。 b/h を大きくするほどロッキング・転倒の発生確率を確実に低減することができる。建物の耐震設計で考慮する、極稀な地震（再現期間 500 年程度）による建物の振動応答として $PFV = 80\text{cm/s}$ を考慮した場合においても、 b/h を 0.4 以上とした場合には転倒確率を非常に小さくできる。

（医療施設の機能保持性能を検証するための実大震動台実験）

佐藤らの研究では、既存医療施設の多くを占める耐震構造と、近年急増している免震構造の両方の機能保持性能と限界性能の定量的評価をしている。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、世界で最初の大規模免震構造物実験である。地震動として直下型地震である短周期地震動（想定関東地震）と長周期地震動（想定新東海地震）を用いた。試験体は免震周期が 2.5 秒程度と 2000 年以前の免震構造に主な固有周期となっている。表 1.1, 1.2 に短周期地震動と長周期地震動の各試験体の室内被害を示す。耐震構造では、長周期地震動を入力した場合はそれほど被害は発生しなかったが、短周期地震動を入力した場合は著しい機能低下が確認された。長周期地震動を入力した場合、地震動の卓越周期と免震周期が近接している

表 1.1 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

表 1.2 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	蓋の損傷及び溢水

場合は、キャスター機器の移動量が大きくなり致命的な被害が確認された。免震構造の医療機器の変位が大きいものはキャスターがフリーになっている。

医療施設の室内被害を評価した既往研究の課題を以下に示す。佐藤らは固有周期が 2.5 秒程度である初期の免震建物を対象としているが、現在は免震建物の設計固有周期は長周期化して 4 秒を超えることが一般的であり^{1.10)}、床応答加速度はより低減されている。免震装置のラインナップも増え、現在は中低層建物を中心に球面すべり支承も普及している。また医療施設を想定した室内状況として、医療機器の設置状況や接続状況も実際の現場とはやや異なっており、複数機器を配置した実大試験体での振動台実験による室内被害評価がない。

1.2.3 医療施設における免震構造の普及

兵庫県南部地震での被害を契機に免震建物の数は着実に増加し、医療施設は免震構造の適用率が高まっている^{1.18)}。2016 年の熊本地震（Mj7.3）では、震度 6 弱以上 5 弱未満の地域に立地する病院が避難を余儀なくされ、入院医療が中断し、地域医療に大きな影響を与えた^{1.19)}。震度の小さい熊本大学医学部附属病院でも、耐震診断を受けた建物では什器や実験室などに被害が出たが、免震構造の建物では影響はなかった。2023 年のカフラマンマラシュ地震では、免震構造の病院が災害対応の拠点となった^{1.20)}。トルコでは 2013 年以降、高地震地域の 100 床以上の病院には免震構造が義務付けられている。このような被害報告を受け、医療業界において免震構造の採用が進んでいる。

病院の所有者や医療従事者は、地震時において免震構造の建物は優れた耐震性能を発揮し、建物使用への影響はほとんどないと期待している。しかし、このような過信は、免震病院における地震対策に関する誤った判断につながる。1.2.2 節で紹介した佐藤らの研究では、免震初期を模擬した実物大の建物として、天然積層ゴムと鋼製ダンパーを用いた免震建物と、高減衰積層ゴムと固有周期約 2.5 秒の免震建物の 2 種類の免震建物

に医療機器を配置し、地震被害に対する医療機器の脆弱性を定量的に評価した^{1.21)}。この研究では、短周期地震動に対しては非常に高い医療機能の保持が観察されたが、長周期地震動に対してはキャスター装置の大規模な移動と致命的な損傷が観察された^{1.21~26)}。この研究結果は、免震建物の特性と建物内什器・機器の損傷予測との関係を引き続き検討すべきことを示唆している^{1.27~31)}。

免震支承として、積層ゴム支承系、鉛プラグ入りゴム支承系、高減衰ゴム系支承系などのゴム系支承や球面すべり支承を含む鋼製系支承などがある。免震支承は上部構造を鉛直方向に支持しながらも、水平方向には極めて低い剛性により長周期化し、地震時の応答低減を図る。しかし、中低層建物の場合には質量が小さく、ゴム系であれば長周期化のため積層ゴムの直径を小さくすると免震ゴムに座屈が生じるために免震化が困難な場合がある。一方、球面すべり支承であれば、建物重量に左右されることなく固有周期を長周期化することができる。球面すべり支承 (Friction Pendulum Bearing : FPB, Friction Pendulum System : FPS, または Spherical Sliding Bearing : SSB) は、軽量な中低層建物や体育館の屋根、軽量施設の免震構造として日本で普及しつつある。FPB は、球面すべり板の上にテフロン加工を施したスライダーを設置して滑らせる免震システムである^{1.32)}。球面の曲率半径によって免震層の固有周期を調整できる。積層ゴム支承では、低軸力での変形性能と長周期化を実現することが困難であったが、FPB では支持重量に依存しない免震建物の長周期化を実現している。FPB は、振り子運動を利用した復元機構と、摩擦力を利用した履歴系の減衰機構を有している。日本国内での限られた用途に比べ、FPB の研究と応用は、極大地震動に対する応答評価を含め、海外では長い歴史がある^{1.33)}。

(球面すべり支承の開発の歴史)

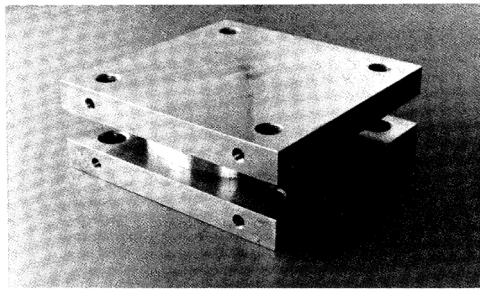
球面すべり支承は 1990 年代に Zayas らによって提案・実用化された免震システムである^{1.32)}。従来の免震システムと比較して強度、汎用性、設置の簡便性が向上すると同時に固有の性能上の利点を有する。よく知られた振り子運動の工学的原理に基づいており、長寿命で環境劣化に強い材料で構成されている。本節では摩擦面が 1 面の single FP (FPS)、2 面の double FP (DCFP)、4 面の triple FP (TFP) のそれぞれの特長と、日本において普及しつつある double FP の SSB に関する研究について示す。

球面すべり支承を考案した Zayas は、1 面の FPS について技術的性能を評価するための包括的な研究・試験プログラムの結果をまとめている^{1.32)}。図 1.7 に、FPS のスチール接続部の写真と断面図を示す。図 1.8 に FPS のコンセプトである振り子運動を実現する方法を示す。支持された構造体は、小振幅の振り子運動として地震動に対して応答する。摩擦減衰が地震のエネルギーを吸収する。その結果、シンプルで予測可能な安定した地震応答が得られる。凹面が上向きでも下向きでも、連結部の動作は同じである。固有周期は、凹面の曲率半径 r の選択によって制御される。FPS 接続部に支持された剛

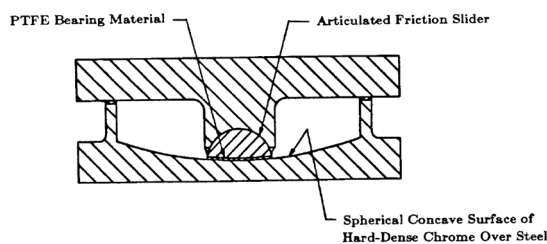
体質量の固有振動周期 T は，次式の振り子の方程式(1.1)から決定される，

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{r}{g}} \quad (1.1)$$

ここで g は重力加速度である．この振り子周期は，FPS アイソレータ上を滑動する質量の周期であり，FPS 上に支持された比較的剛性の高い構造物の振動の免震固有周期である．



(a) FPS の写真



(b) FPS の断面図

図 1.7 FPS^{1.32)}

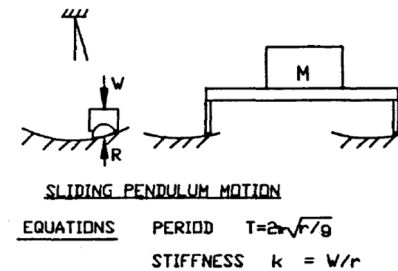
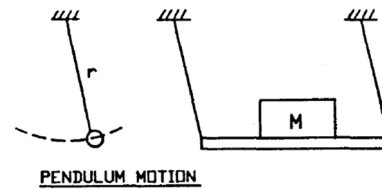


Fig. 2 Basic Principles

図 1.8 FPS の原理^{1.32)}

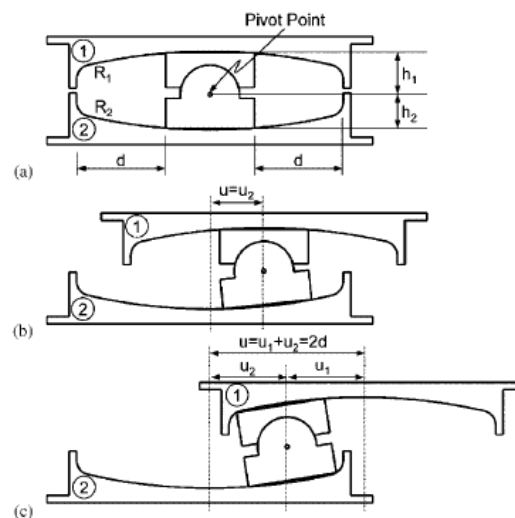


図 1.9 Section through centre of DCFP bearing at various stages of motion.

1.34)

FPS のアプローチは、多様な耐荷重を持つコンパクトな免震装置の建設を可能にする。建物模型の振動台試験により、重力と形状を利用した復元力により、効果的で汎用性の高い免震システムが実現できることが実証した。個々の FPS の要素実験では、支承がその変位範囲を通して完全な強度と安定性を保持することが実証した。非線形の時刻歴応答解析により FPS 免震構造物は、断層近傍の直下型地震動、長周期地震

動，激しい鉛直地震動を含む厳しい地震動を受けた際に，優れた地震応答を有することを示した．また偏心構造物や不規則構造物のねじれ運動は大幅に低減できることを示した．応答スペクトルにより適切に設計された構造物の場合，地震荷重は 1/8 以下に低減できることを示した．

2 面球面すべり支承 (DCFP) は，従来の FPS を応用したものである^{1,34)}．DCFP の主な利点は，図 1.9 に示すように同じ平面寸法の従来の FPS に比べて，大幅に大きな変位に対応できることである．さらに，曲率半径や摩擦係数の異なるすべり面を使用できるため，設計者は性能を最適化するための組み合わせを選定することができる．DCFP は，2 つの凹面の曲率半径の和に等しい有効曲率半径と，各滑り界面の摩擦係数の平均に等しい摩擦を持つ従来の FPS とよく似た挙動を示す．各表面の変位は大きさが等しく，全変位の半分に等しく，DCFP を採用する第一の利点は，コンパクト化によるコスト削減である．DCFP は，従来の FPS と比較して，荷重-変位関係に影響するパラメータの数が多く，設計者が調整することができる．摩擦係数の異なる凹面を採用することで，剛塑性のバイリニア履歴型が得られることを示した．さらに，可動変位の異なる上部と下部の凹面プレートを使用することにより，剛塑性のトリリニア履歴型も可能である．

さらに Fenz らの研究では，図 1.10 に示すように内部振り子・2 段目振り子下面・2 段目振り子上面の 3 つのすべり機構を有する TFP の動作原理と力-変位関係を開発した^{1,35,36)}．この軸受は完全に受動的なデバイスでありながら，可変剛性及び可変減衰であ

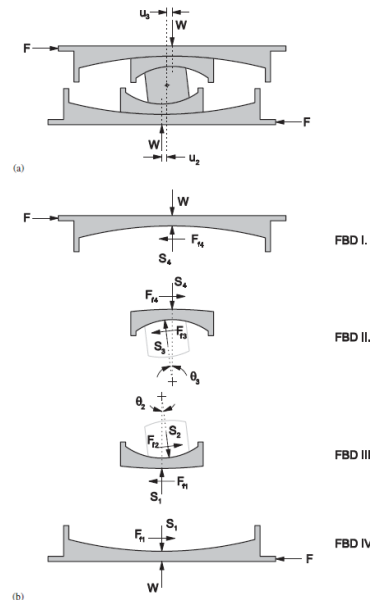


図 1.10 Displaced shape (a) and free body diagrams (b) of the triple FP bearing during sliding regime I. Sliding occurs on surfaces 2 and 3 only; motion has not yet been initiated on surfaces 1 and 4. ^{1,35)}

る。可変挙動の主な利点は、免震システムを複数の性能目標や複数のレベルの地盤の揺れに対して個別に最適化することができることである。内部構造は様々な凹面で構成されており、動作の過程で滑りが発生する可能性のある面の様々な組み合わせによって挙動を設計することができる。図 1.10 に示すように滑り面が変化すると、剛性と摩擦もそれに応じて変化する。各摺動面の有効曲率半径、摩擦係数、および可動変位に基づいて、任意の時点でのどの面が摺動するかを決定するための方法を示している。適切に構成された場合、これらの軸受は、変位が増加するにつれて理想的に変化する剛性と減衰を寄与する。

(国内における球面すべり支承の研究開発)

竹内らの研究では、上下のコンケイブプレートプレートの曲率と摩擦係数が同じで、かつスライダーに関節を有しない DCFP タイプに対し、偏心や浮き上がりに伴う SSB 付架構の縮小振動台実験を実施し、その応答性上の分析を行った^{1.37)}。以下に得られたその知見を示す。

- ・ 基準面圧の約 1/10 の低面圧下において摩擦係数が高面圧の基準値より倍程度大きくなり、速度の上昇による摩擦係数の増加もより顕著になる特性が確認された。
- ・ 重量を偏心させた場合の最大捩れ応答値は重量均等と同等程度に留まり、捩れ応答の増幅はあまり見られなかった。
- ・ 浮き上がりが生じた際、支承部ではスライダーの空走が確認され、残留変位が大きくなる傾向が見られたが、水平応答履歴に対する影響はあまり見られなかった。
- ・ 摩擦係数を評価するにあたり、低面圧および温度上昇が少ない影響を補正関数で表すことで、実験結果の再現精度をたかめることができた。さらに摩擦係数の速度依存性を粘性項で表現し、バイリニア型の弾塑性要素と粘性要素を組み合わせた履歴モデルを提案し、実験結果を概ね再現できることを示した。

同じく竹内らの研究により、SSB の水平二方向応答特性が検証されている^{1.38)}。また上部構造に与える影響を時刻歴応答解析により、二方向入力応答はその直交方向成分としての一方向入力応答に比べ、変位が最大 2 倍程度に増大すること、一方向入力下で上層部での応答加速度が増幅する場合でも、二方向入力下で直交方向の入力が加わることで履歴形状の変化により応答加速度が低減すること、が指摘されている。

球面すべり支承は米国を中心に、さまざまなタイプが開発されているが、日本で主に用いられてる球面すべり支承に関しては研究論文が少ない。特に近年、地震力低減を目的に低摩擦タイプ（摩擦係数 0.013 程度）の SSB の採用が増加傾向であるが、知見は限られている。上部構造を実大とし、什器・医療機器などを設置した実験がなく、球面すべり支承が室内被害に与える影響を調査した研究はない。

1.2.4 性能設計手法

性能限界と地震動レベルの組み合わせを施主と設計者との合議により選択することが可能な性能設計を求められている。米国では 1994 年のノースリッジ地震を契機に Federal Emergency Management Agency (FEMA) などにより Performance-Based Seismic Design (PBSD, 性能耐震設計法) の研究がすすめられている^{1.39)}。一方で日本では、限界耐力計算が性能設計法として存在しているが活用されている事例は少ない。また他にも日本建築構造技術者協会（以下 JSCA）では、建築主と構造設計者との対話を実践していくために性能設計メニューを提案しているが、医療施設に特化した性能設計手法は存在しない。ここでは、参考として中低層建物を対象とした JSCA 性能設計説明書 2021 年版【耐震性能編（簡易法）】について紹介する。

（耐震性能グレード【簡易法】の判定基準値）

JSCA 性能設計説明書 2021 年版【耐震性能編（簡易法）】^{1.39)}は、高さ 20m 未満の低層建物を含めた高さ 31m 以下までの中低層建物、すなわち許容応力度等計算および保有水平耐力計算で構造設計を行うのが一般的な建物を対象に、静的な設計結果を基に大地震時の変形を想定して耐震性能グレードの判定を行うことを目的としてまとめている。説明書の適用範囲となる建物は以下としている。

- ・ RC 造または S 造の高さ 31m 以下の中低層建物
- ・ 耐震構造なお、制振構造および免震構造は適用範囲外とする。
- ・ 剛性率が 0.60 以上の建物ただし、RC 造ルート 1 の建物に対しては剛性率の制限を除外する。
- ・ 偏心率が 0.15 以下の建物ただし、RC 造ルート 1 の建物に対しては偏心率を 0.3 以下とする。
- ・ 地盤種別が第一種地盤または第二種地盤であること。
- ・ 地盤の液状化の可能性が低いこと

中低層 RC 造建物に対する耐震性能グレード【簡易法】の判定基準値を表 1.3，中低層 S 造建物に対する耐震性能グレード【簡易法】の判定基準値を表 1.4 に示す。本説明書による耐震性能グレードの判定は、地震時の変形による躯体に対する被害の程度のみで評価している。

表 1.3 中低層 RC 造建物の判定基準値 ^{1.39)}

耐震性能 グレード	極めて稀に発生する 地震動における 被害の程度	RC造建物の判定基準値 [かつ]		性能保有水平耐力(pQ_u)時の 層間変形角	
		Q _e 時の層間変形角 【Re】 (弾性剛性)	性能D _s 【pD _s 】	フレーム構造	壁 フレーム構造
特 級	軽微な被害	1/2000	0.60	1/150	1/225
上 級	小 破	1/1000	0.45	1/75	1/100
基準級	中 破 (～大破)	1/500	0.30	1/50	1/75
特 級	軽微な被害	RC造ルートIの建物 壁式鉄筋コンクリート造建物		—	

- ・ Q_e時の層間変形角は、コンクリートのひび割れを考慮しない弾性剛性での値とする。
- ・ 柱および梁の部材種別は、FAまたはFBIに限定する。(RCルートIの建物、壁式鉄筋コンクリート造建物は対象外)

表 1.4 中低層 S 造建物の判定基準値 ^{1.39)}

耐震性能 グレード	極めて稀に発生する 地震動における 被害の程度	S造建物の判定基準値 [かつ]		性能保有水平耐力(pQ_u)時の 層間変形角	
		Q _e 時の層間変形角 【Re】 (弾性剛性)	性能D _s 【pD _s 】	フレーム構造	ブレース付 フレーム構造
特 級	軽微な被害	1/750	0.75	1/150	
上 級	小 破	1/500	0.50	1/75	
基準級	中 破 (～大破)	1/200	0.25	1/50	

- ・ Q_e時の層間変形角は、弾性剛性での値とする。
- ・ 柱および梁の部材種別は、FAまたはFBIに限定する。
- ・ ブレース付ラーメン構造に用いるブレース材は、座屈拘束ブレースで部材種別をBAIに限定する。

(判定基準値と復元力特性の関係)

中低層 RC 造建物の判定基準値と復元力特性の関係を図 1.11 に示す。標準的イメージの復元力特性としてひび割れ耐力を性能保有水平耐力の 0.4～0.6 倍、二次勾配を初期剛性の 0.25 倍としたトリリニアとしている。図 1.11 に示すように、特級は高い初期剛性と耐力を求められており壁フレーム構造が必須と考えられる。また、上級はフレーム構造でも設計可能と思われるが相当大的な部材剛性および耐力を必要とすると考えられる。なお、建築基準法による規定では一次設計用層せん断力 (Q_e) 時の層間変形角は 1/200 以下であるが、スラブの協力幅や鉄筋などの剛性に関係する条件を考慮して、基準級における弾性剛性による Q_e 時の層間変形角を 1/500 に設定する。

中低層 S 造建物の判定基準値と復元力特性の関係を図 1.12 に示す。フレーム構造は判定基準値が折れ点となるバイリニアの復元力特性とし、ブレース付フレーム構造は標準的イメージの復元力特性として性能保有水平耐力の 0.5 倍でブレースが先行降伏し、二次勾配を初期剛性の 0.6 倍としたトリリニアとしている。フレーム構造は耐力を高めて地震エネルギーを吸収するタイプであり、ブレース付フレーム構造では初期剛性を

高めて地震エネルギーを吸収するタイプであるが、いずれも履歴特性が安定していることから、耐震性能グレードの判定は、フレーム構造、BRB 付フレーム構造の区別はない。鉄骨造の場合、現実的にはフレーム構造では剛性が小さく、特級とするためにはBRB 付フレーム構造とする必要がある。

また JSCA 性能設計説明書 2021 年版では、同中低層の耐震建物を対象に静的な設計結果を基に大地震時の変形を想定して耐震性能グレードの判定を行う判定基準値を提案しており、その妥当性を示している。しかしながら、躯体に対する被害の程度のみを評価し、室内被害は対象外としている。

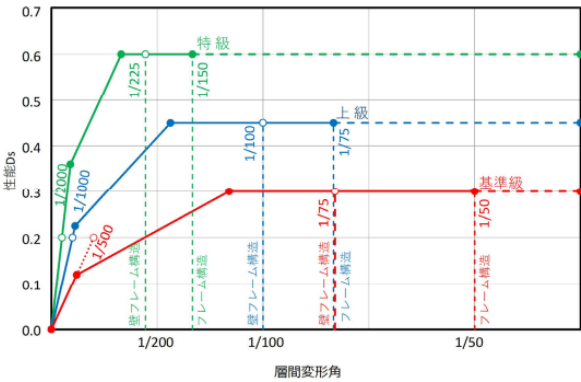


図 1.11 中低層 RC 造建物の判定基準値と復元力特性の関係（標準的イメージ）
1.39)

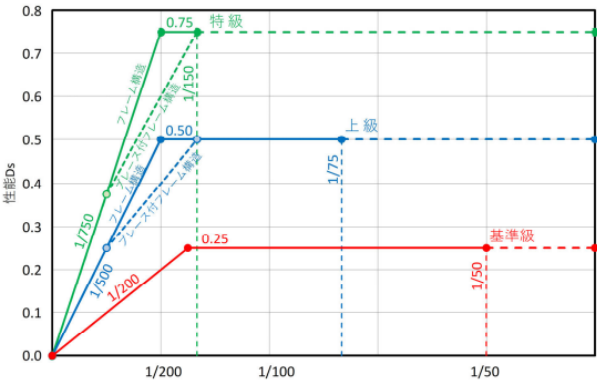


図 2.4 中低層 S 造建物の判定基準と復元力特性の関係
(標準的イメージ)

図 1.12 中低層 S 造建物の判定基準値と復元力特性の関係（標準的イメージ）^{1.39)}

1.3 本論の目的

これら医療施設に関する現状を踏まえて、本論文では室内被害を考慮した医療施設の耐震設計手法を提案するために、以下の情報を提供する。本論では室内被害を医療施設室内の医療機器及び什器の移動や転倒により医療行為の継続性を阻害する事象とし、主にキャスター付き医療機器等が複数存在する居室を想定している。

1. 地震動と機器の転倒や移動量との関係について、要素実験及び実大病院建物の振動台実験で得られた結果とその分析を報告する。医療機器の管理区分などを考慮して、転倒や衝突、回路のはずれなどによる医療継続性への影響を分析する。
2. 免震装置の要素実験と E-ディフェンス実験施設における実大病院建物の振動台実験により、面圧、速度、静止摩擦係数が低摩擦球面すべり支承の性能に及ぼす影響を調べる。
3. 機器単体の詳細な挙動や損傷を評価対象とせず、室としての被害程度を大きく分類し、それを予測するための各床応答値の指標と被害程度の相関性を実大実験により検証し、医療施設の被害評価の予測手法を提案する。

1.4 論文の構成

本論文は第 1 章から第 6 章で構成されている。第 6 章を除く各章の内容は下記のとおりである。

第 1 章では、序論と既往の研究として、医療施設の被害や球面すべり支承に関する既往の研究について詳細に示し、そこから得られた知見と課題点についてまとめる。

第 2 章では、要素実験および実大震動台実験の、試験体・加振計画・計測計画・結果など実験の概要について述べる。要素実験では、床材を変数にしたキャスター付き台車の引張試験を実施し、キャスターの固定条件と床材の特性ごとに移動量に影響する係数を評価した。また、震動台実験では、臨床工学技士や医療機器メーカー、看護師による事前調査に基づき建物内の居室に医療現場でのレイアウトを再現し、医療機器の地震時挙動と被害状況に関するデータを獲得した。

第 3 章では、震動台実験における医療機器の挙動を分析し、医療機器の管理区分などを考慮して、転倒や衝突、回路のはずれなどによる医療継続性への影響を整理した。

第 4 章では、免震構造としてすべり支承の挙動を分析した。免震装置の出荷前動的試験では、製造上のばらつき、速度依存性、面圧依存性を確認するためのデータセットが得た。実大免震試験体は、断層近傍地震および長周期地震動を入力地震動として用いて実験した。設計用の数値解析モデルを用いて、設計式を用いた応答予測精度を検討し、低面圧条件下での挙動を正確に予測するための設計上の留意点を挙げた。すべり係数が室内医療機器の挙動に及ぼす影響について考察した。

第 5 章では、室内被害を考慮した中低層の医療施設の簡易性能設計手法を提案している。先ず、第 4 章での振動台実験結果の分析に基づき、建物床応答に対して病室として

の被害程度を 4 段階に分類するフローを提案した。耐震性能グレードに応じて耐力や剛性が異なる特級, 上級, 基準級の建物に対して, 提案する室内被害ランクを用いた評価フローに基づいて医療機器の被害評価を行い, 耐震等級と医療機器の被害との関係を整理する。

第 1 章の参考文献

- 1.1) Cabinet Office Website: nankaitorafujishinbosaitakusaku (Nankai Trough earthquake disaster prevention measures) http://www.bousai.go.jp/jish_nankai_sukai/ (in Japanese) 内閣府: 南海トラフ地震防災対策
- 1.2) MLIT (Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism), Housing Bureau: Bouosaikyoten Tou Tonaru Kenchikubutsu ni Kakaru Kinou Keizoku Gaidorain (Guideline for Functionality Continuation for Buildings Serving as Disaster Bases) 防災拠点などとなる建築物に係る機能継続ガイドライン, 国土交通省住宅局, <https://www.mlit.go.jp/common/001292547.pdf>, May, 2020
- 1.3) M. Shimoto et al.: Hospital Evacuation Implications After the 2016 Kumamoto Earthquake. Published online by Cambridge University Press: 13 April 2022 (DOI: 10.1017/dmp.2022.25)
- 1.4) Kurata, M. et al.: Hearing and Analysis of Hospital Evacuation after the 2016 Kumamoto Earthquake. 16th European Conference on Earthquake Engineering, Thessaloniki, Greece, 25 2018
- 1.5) 5th Shuusanki Iryou Taisei no Arikata ni Kansuru Kentoukai: Heisei 28 nen Kumamoto Jishin: Kumamoto Shimin Byouin kara no Houkoku. (5th Study Group on Perinatal Medical System: 2016 Kumamoto Earthquake Report from Kumamoto Municipal Hospital (<https://www.mhlw.go.jp/file/05-Shingikai-10801000-Iseikyoku-Soumuka/0000129282.pdf>) (in Japanese) 第 5 回周産期医療体制のあり方に関する検討会: 平成 28 年熊本地震 熊本市民病院からの報告.
- 1.6) Infant unit nurses in south Korea reaction when the earthquake hit the hospital 浦項地震 www.youtube.com/watch?v=8LYJ0-gqqqo
- 1.7) Pharmaceuticals and Medical Device Agency: PMDA Iryouanzenjyohou (Medical Safety Information) (in Japanese), No. 62, Mar., 2022 医薬品医療機器総合機構, PMDA 医療安全情報, No.62 2022 年 3 月
- 1.8) K-C. Kuo, Y. Hayashi, H. Kambara: Relationship between damages of hospital facilities and seismic intensity based on questionnaire survey, J. Struct Constr.

- Eng., AIJ Vol. 69 No. 586, 63-69, Dec., 2004(in Japanese) 郭 耕杖, 林 康裕, 神原 浩: アンケート調査に基づく病院の地震被害と震度との関係, 日本建築学会構造系論文集, pp.63-69, 2004.12 (DOI: https://doi.org/10.3130/aijs.69.63_6)
- 1.9) Y. Ishihara, N. Maki, M. Kurata, K. Cho, S. Ohtsuru: An Attempt to Evaluate the Impact of Earthquake Disasters on Medical Functions: An Analysis of the Impact of the Northern Osaka Earthquake, J. J. Disast. Med., JADMVol.27 No.3 (in Japanese) 石原 由菜, 牧 紀男, 倉田 真宏, 趙 晃済, 大鶴 繁: 地震災害時の医療機能に対する影響評価の試み—大阪北部地震の影響分析から—, 日本災害医学会雑誌, pp.195-200, 2022.12 (DOI: https://doi.org/10.51028/jjdisatmed.27.3_195)
- 1.10) 北村 春幸, 東野 さやか, 竹中 康雄, 田村 和夫: 長周期地震動による既存免震建物の耐震性能評価, 日本建築学会技術報告集, 巻 22 号, p. 127-132, 2005.12 (https://doi.org/10.3130/aijt.11.127_2)
- 1.11) M. Kaneko, Y. Hayashi: Overturning criteria and horizontal displacements of rigid bodies to earthquake excitations, J. Struct Constr. Eng., AIJ Vol. 43B, Mar., 1997 (in Japanese) 金子美香, 林康裕: 地震時の剛体の転倒限界と移動量に関する検討, 構造工学論文集, Vol.43B, pp.451-458, 1997 年 3 月
- 1.12) M. Yoshizawa, K. Fukuyama, T. Inoue, K.Kajiwara: Study on interior damage of office building by large-scale shaking table test, J. Struct Constr. Eng., AIJ Vol. 81 No. 730, 2013-2023, Dec., 2016 (in Japanese) 吉澤 睦博, 福山 國夫, 井上 貴仁, 梶原 浩一: 大規模振動実験によるオフィスの室内被害に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, pp.2013-2023, 2016.12 (DOI:<https://doi.org/10.3130/aijs.81.2013>)
- 1.13) C., Tashiro: Jishin ni taishite Kikai ha Kouaru bekida-Ishi no Tachiba kara- (Instruments should be like this against earthquakes -from the standpoint of a doctor-), Journal of Medical Device, 67(2), pp. 55-61, 1997(in Japanese) 太城 力良: 地震に対して器械はこうあるべきだ—医師の立場から—, 医科器械学, 67(2), pp. 55-61, 1997(DOI: https://doi.org/10.4286/ikakikaigaku.67.2_55)
- 1.14) C. Tanaka, S. Yamada: Jishin ni taishite Kikai ha Kouaru bekida -Kangoshi no Tachiba kara- (Instruments should be like this for earthquakes -from the standpoint of a nurse-), Journal of Medical Device, 67(2), pp. 62-66, 1997 (in Japanese) 田中千鶴見, 山田鈴子: 地震に対して器械はこうあるべきだ—看護婦の立場から—, 医科器械学, 67(2), pp. 62-66, 1997 (DOI: https://doi.org/10.4286/ikakikaigaku.67.2_62)
- 1.15) Recommendations for Aseismic Design and Construction of Nonstructural Elements, Architectural Institute of Japan, 2003.01 (in Japanese) 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, 日本建築学会, 2003.01

- 1.16) H. Mizuno, M. Iiba, N. Yamaguchi, H. Okano: Iryokiki no taishinsei ni kansuru shindodaijikken (Shaking Table Tests on Seismic Resistance of Medical Equipment) (in Japanese), Report of the Building Research Institute, No. 108, 1986 水野二十一, 飯場正紀, 山口修由, 岡野 創: 医療機器の耐震性に関する振動台実験, 建築研究報告, No. 108, 1986.
- 1.17) M. Hitomi, M. Kurata, S. Aida, M. Shimoto, K. Cho, S. Ohtsuru: Medical Equipment Seismic Performance Evaluation for Preventing Rocking and Falling, Transactions of the Japanese Society for Medical and Biological Engineering, 60 (6), 139-148, 2022 (in Japanese). 人見真由, 倉田真宏, 相田伸二, 下戸 学, 趙晃済, 大鶴 繁: 地震時における医療機器のロッキング・転倒に関する危険性評価, 生体医工学誌, 60 (6), 139-148, 2022, (DOI: <https://doi.org/10.11239/jsmbe.60.139>)
- 1.18) (社)日本免震構造協会: MENSIN, No.28, pp.33-75, 2005.5
- 1.19) Achour N, Miyajima M. Post-earthquake hospital functionality evaluation: The case of Kumamoto Earthquake 2016. Earthquake Spectra, 2020, 36(4):1670–1694.
- 1.20) M. Kurata, C. Yenidogan, H. Fukui, Y. Hisada, K. Kobayashi, T. Nagae: Hospital Damage and Functional Impact Survey after the 2023 Kahramanmaras Tutkey Earthquake Sequence, Proceedings of 18 World Conference on Earthquake Engineering, Milan, Italy, 2024.7
- 1.21) Sato E et al. FULL-SCALE SHAKING TABLE TESTS FOR ASSESSMENT OF FUNCTIONALITY IN MEDICAL FACILITY Evaluation of safety and functionality in city facility during earthquake, J. Struct Constr. Eng., AIJ Vol. 75 No. 650, 771-780, Apr., 2010 (in Japanese) 佐藤栄児ほか7名: 医療施設の機能保持性能を検証するための実大震動台実験 震災時における都市施設の安全性・機能性評価, 日本建築学会構造系論文集, pp.771-780, 2010.4 (DOI: <https://doi.org/10.3130/aijs.75.771>)
- 1.22) Kawabe H, Kaname K, Irikura K. Damage prediction of long-period structures during subduction earthquakes-Part 1: long-period ground motion prediction in the Osaka basin for future Nankai Earthquakes, The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, October 2008.
- 1.23) Nakagawa Y, Kaname K, Kawabe H, Irikura K. Damage prediction of long-period structures during subduction earthquakes-Part 2: long-period ground motion prediction in the Osaka basin for future Nankai Earthquakes, The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, October 2008.

- 1.24) Chung Y, Nagae T, Fukuyama K, Kajiwaru K, Inoue T, Hitaka T, Nakashima M. Seismic resistance capacity of high-rise buildings subjected to long-period ground motions–E-Defense shaking table test, The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, October 2008.
- 1.25) Chung Y, Nagae T, Hitaka T, Nakashima M. Seismic resistance capacity of high-rise buildings subjected to long-period ground motions: E-Defense shaking table test. *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, 2010, 136(6):637–644.
- 1.26) The Architectural Institute of Japan (AIJ): Structural response and performance for long period seismic ground motions, 2007 (in Japanese).
- 1.27) Quaglini V, Dubini P, Poggi C. Experimental assessment of sliding materials for seismic isolation systems. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2012, 10:717–740.
- 1.28) Lomiento G, Bonessio N, Benzoni G. Friction Model for Sliding Bearings under Seismic Excitation. *Journal of Earthquake Engineering*, 2013, 17:1162–1191.
- 1.29) Quaglini V, Bocciarelli M, Gandelli E, Dubini P. Numerical Assessment of Frictional Heating in Sliding Bearings for Seismic Isolation. *Journal of Earthquake Engineering*, 2014, 18:1198–1216.
- 1.30) Kumar M, Whittaker AS, Constantinou MC. Characterizing friction in sliding isolation bearings. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2015, 44:1409–1425.
- 1.31) Bianco V, Bernardini D, Mollaioli F, Monti G. Modeling of the temperature rises in multiple friction pendulum bearings by means of thermomechanical rheological elements. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2018, 19:171–185.
- 1.32) Zayas VA, Low SS, Mahin SA. A simple pendulum technique for achieving seismic isolation. *Earthquake Spectra*, 1990, 6(2):317–334.
- 1.33) Bao Y, Becker TC, Hamaguchi H. Failure of double friction pendulum bearings under pulse-type motions. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2017, 46:715–732. doi: 10.1002/eqe.2827.
- 1.34) Daniel M. Fenz, Michael, C. Constantinou. Behaviour of the double concave Friction Pendulum bearing. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2006; 35:1403–1424 doi: 10.1002/eqe.589
- 1.35) Daniel M. Fenz, Michael, C. Constantinou. Spherical sliding isolation bearings with adaptive behavior: Theory. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2008; 37:163–183. doi: 10.1002/eqe.751.

- 1.36) Daniel M. Fenz, Michael, C. Constantinou. Spherical sliding isolation bearings with adaptive behavior: Experimental verification. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2008; 37:185–205. doi: 10.1002/eqe.750.
- 1.37) Takeuchi, T., Nakamura, H., Uchida, M., Yoshida, M. and Matsui, R.:Response Characteristics of Spherical Sliding Bearings and Superstructure subject to Bidirectional Ground Motions, *Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)*, Vol. 82, No. 739, pp.1339-1347, 2017.9 (in Japanese), 竹内 徹, 内田 正颯, 松井 良太, 二方向地震入力を受ける球面すべり支承および上部構造の応答特性, 日本建築学会構造系論文集, 第 82 巻, 第 739 号, pp.1339-1347, 2017.9
- 1.38) Takeuchi, T., Nakamura, H., Uchida, M., Yoshida, M. and Matsui, R.:Shaking Table Tests on Spherical Sliding Bearings Taking Eccentricity and Uplift into Account, *Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)*, Vol. 80, No. 715, pp.1385-1392, 2015.9 (in Japanese), 竹内 徹, 中村秀司, 内田 正颯, 吉田道保, 松井 良太, 偏心および浮き上がりを考慮した球面すべり支承の振動台実験, 日本建築学会構造系論文集, 第 80 巻, 第 715 号, pp.1385-1392, 2015.9
- 1.39) 柴田明德：米国と日本における建物の耐震性能評価手法, 耐震工学研究会, 2014 年 12 月 20 日
- 1.40) JSCA (JAPAN STRUCTURAL CONSULTANTS ASSOCIATION): JSCA Performance Design Manual 2021 [Seismic Performance (Simplified Method)], 2023.3 (in Japanese)JSCA 性能設計説明書 2021 年版【耐震性能編 (簡易法)】, 一般社団法人日本建築構造技術者協会, 2023.3

2. 医療施設の実大震動台実験試験体の設計と結果概要

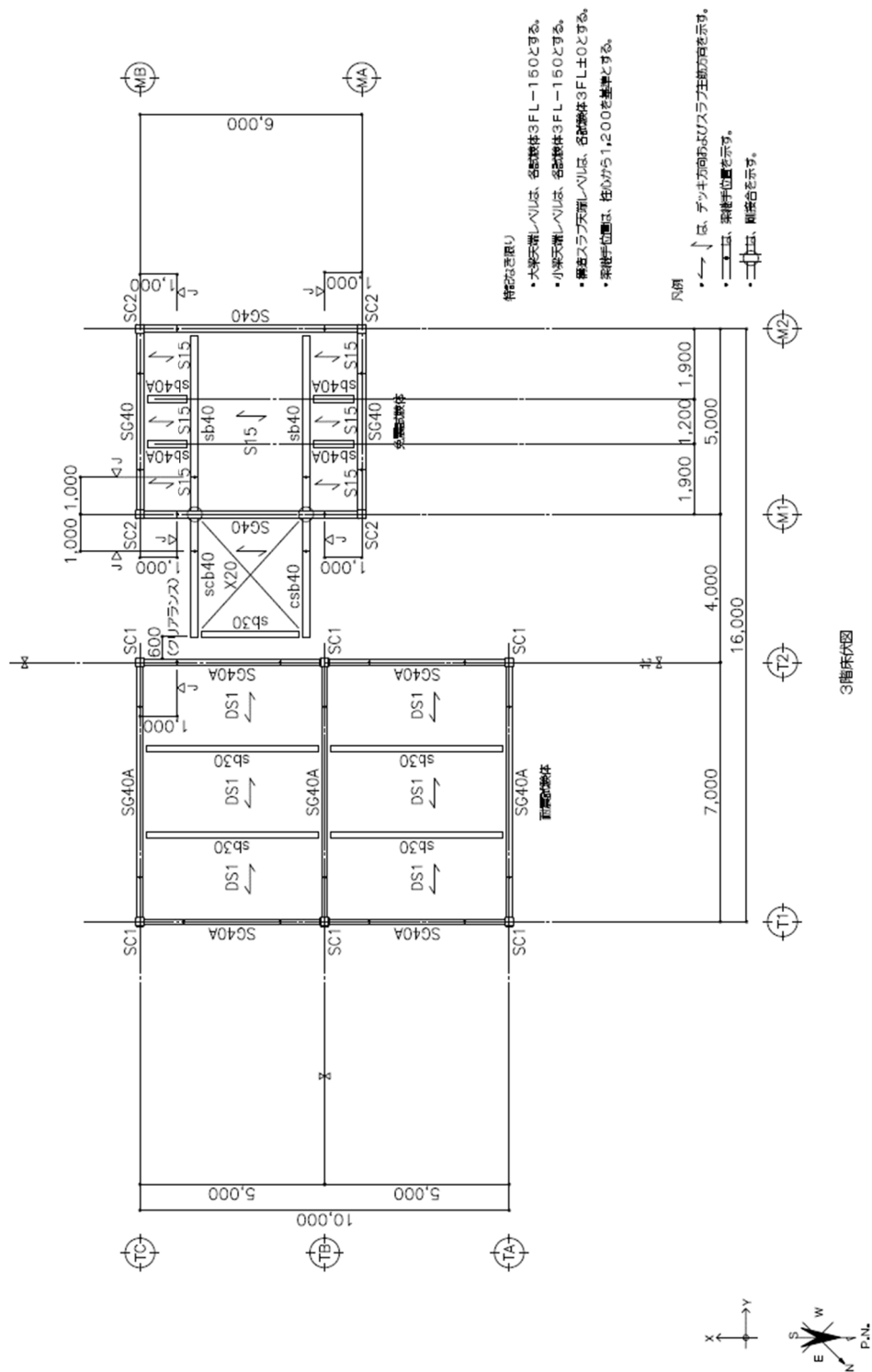
2.1 はじめに

本章では医療施設を対象とした実大震動台実験の試験体と加振計画、実験の事前数値解析による予測と事後の数値解析による実験結果の追従性について述べる。本研究では実大震動台実験の事前に球面すべり支承の要素実験を実施しているが、球面すべり支承の要素実験については4章で述べる。また、事後の数値解析による実験結果の追従性については本章では耐震試験体のみを述べ、免震試験体については3章で述べる。

2.2 試験体の設計

2.2.1 全体概要

図 2.1～2.5 に各階伏図、図 2.6 に軸組図、図 2.7 に試験体全図、表 2.1, 2.2 に各試験体の代表断面を示す。実大震動台実験は図 2.1 に示すように X 方向 15m, Y 方向 20m の震動台上に耐震試験体と免震試験体の 2 体を併設した。両試験体間は図 2.2 に示すように渡り廊下とエクспанションジョイントを用いて接続して、ジョイント部には 600mm のクリアランスを設けている。図 2.8 に柱脚の仕様を示す。一般的な鉄骨造露出柱脚の設計においても既製品を用いることが多いことから、露出柱脚にはセンクシアによるハイベース NEO 工法 (EB 型式)^{2.1)} を用いた。



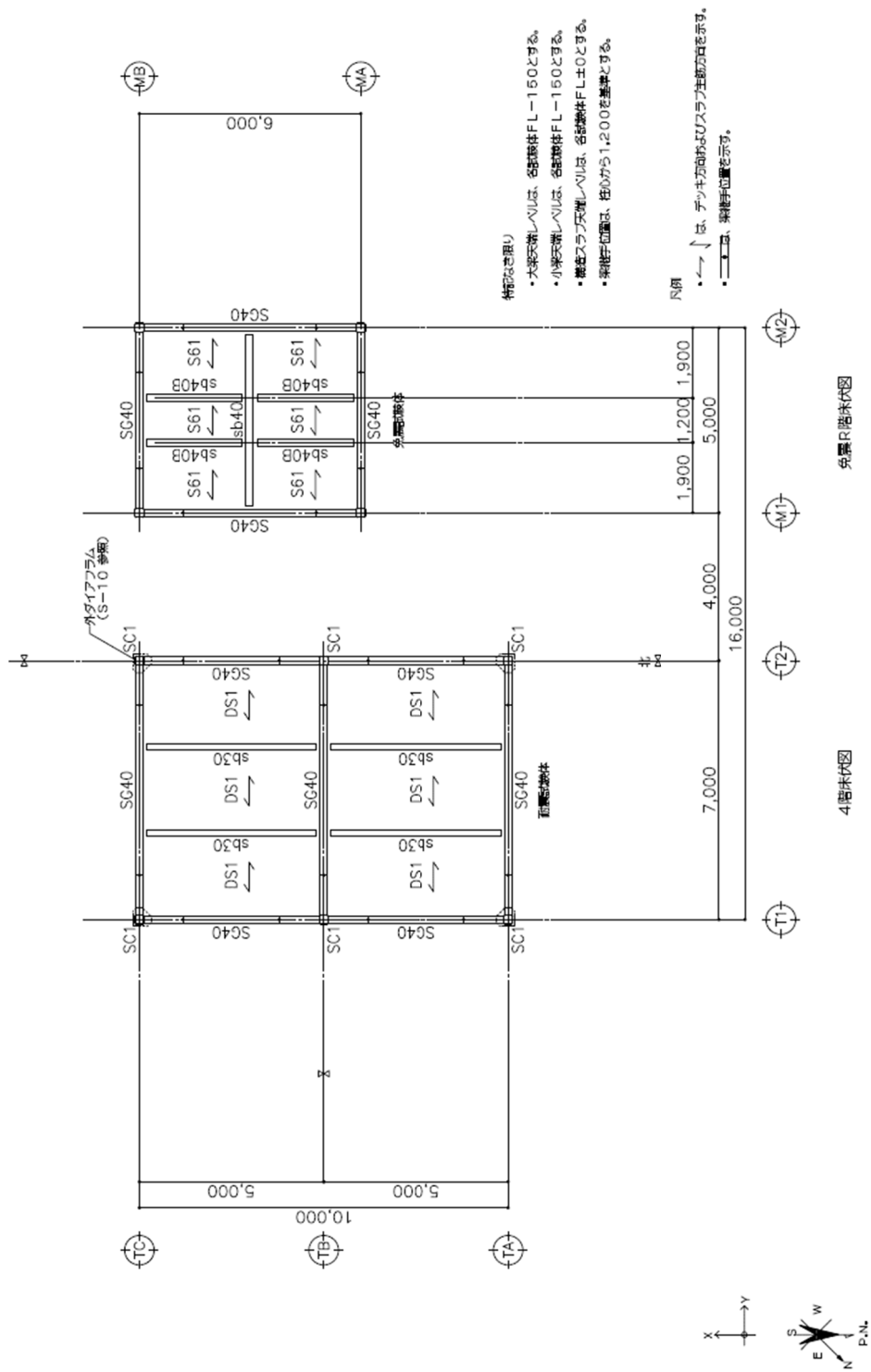
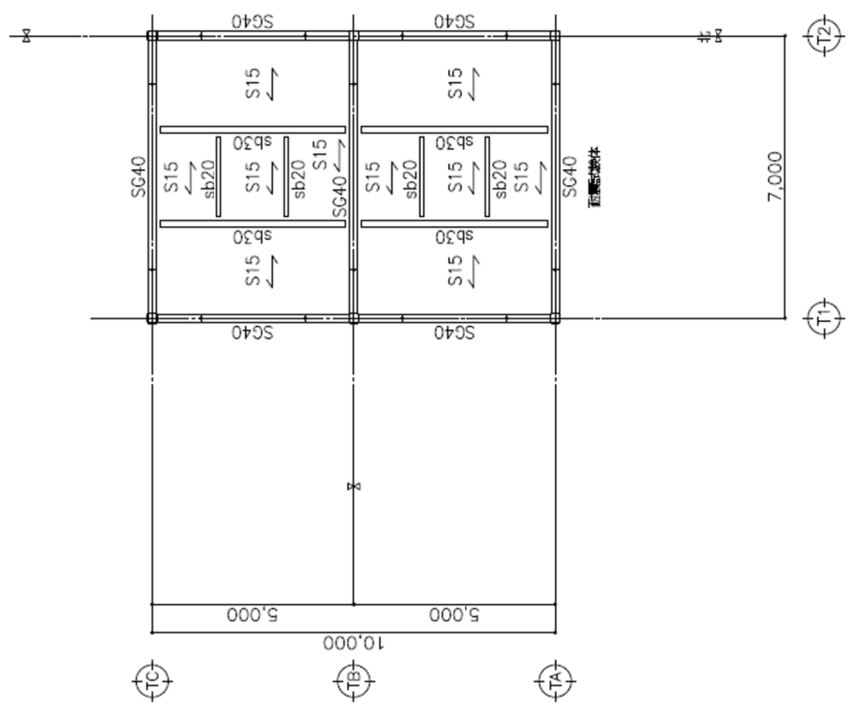


図 2.4 4 階床伏図 (免震 R 階床伏図)



耐震R階床伏図

図 2.5 R 階床伏図

- 特記なき限り
- 大梁支離レベルは、T-RFL-150とする。
 - 小梁支離レベルは、T-RFL-150とする。
 - 鋼造スラブ支離レベルは、T-RFL±0とする。
 - 梁床位置は、柱心から1,200を基準とする。

- 凡例
- 〓 は、スラブ主筋方向を示す。
 - 〓 は、梁床位置を示す。

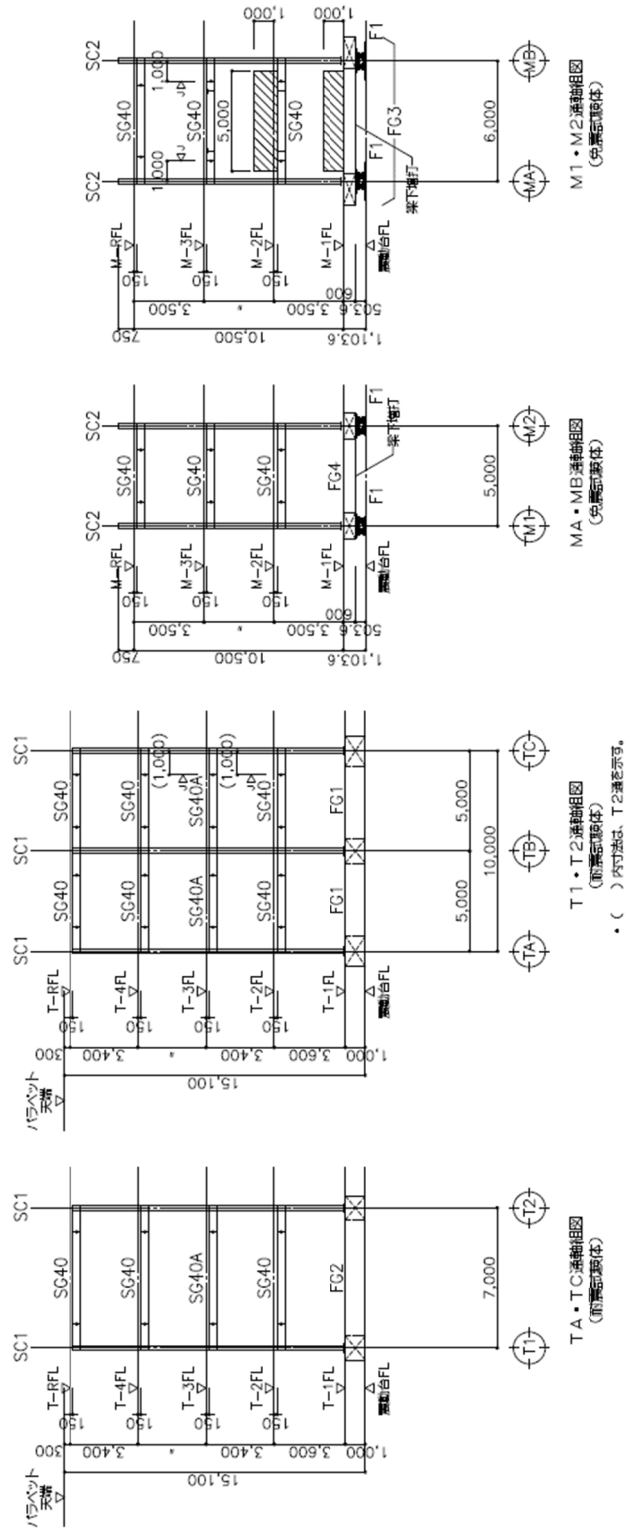
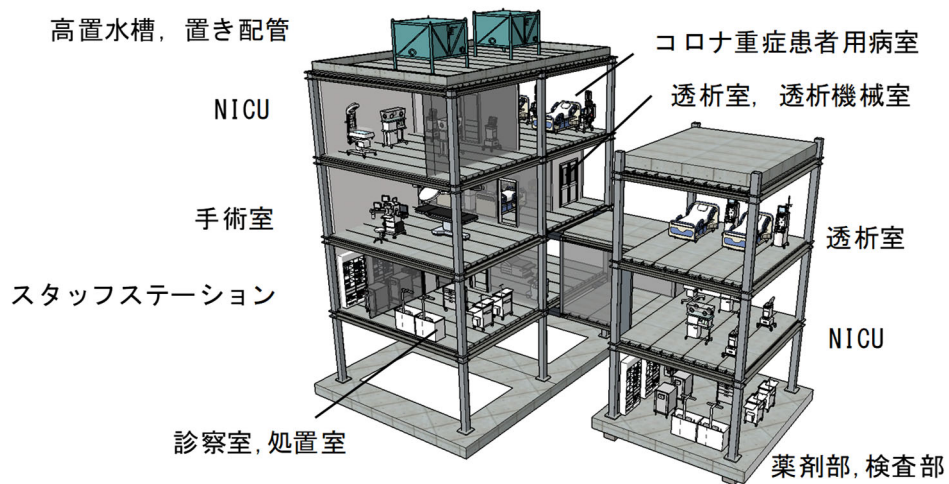


図 2.6 軸組図



(a) 概要図



(b) 全景写真

図 2.7 試験体全体図

表 2.1 耐震建物 代表断面

部位	断面 (mm)	鋼材種別
柱	□-250×250×16	BCR295
大梁	H-400×200×8×13	SN490B
小梁	H-300×150×6.5×9	SS400
基礎梁	B1,200×D1,000	RC 梁
スラブ	t=150	RC スラブ

表 2.2 免震建物 代表断面

部位	断面 (mm)	鋼材種別
柱	□-250×250×9	BCR295
大梁	H-400×200×8×13	SN490B
小梁	H-400×200×8×13	SS400
基礎梁	B1,300×D600	RC 梁

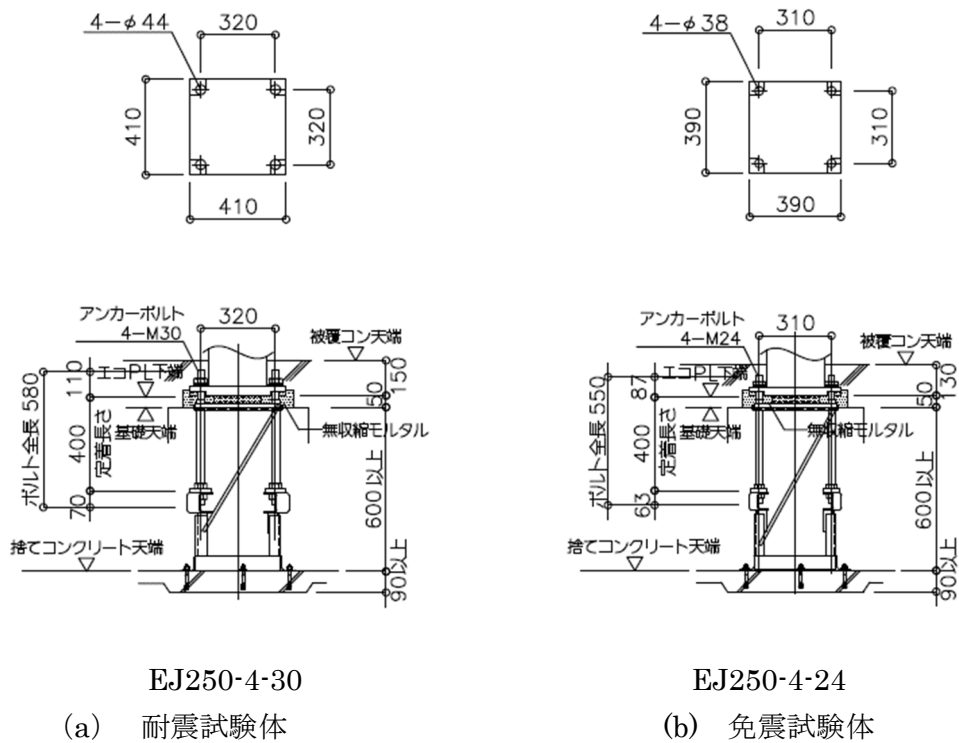


図 2.8 柱脚の仕様

2.2.2 構造体の設計方針

耐震試験体と免震試験体の構造体の設計方針を以下に示す．試験体の設計にあたり許容応力度設計および保有水平耐力計算は一貫構造設計システム BRAIN-Ⅲ^{2.2)}を用いた．

(a) 耐震試験体

本試験体の耐震設計は、「官庁施設の総合耐震・対津波計画基準」^{2.3)}の耐震安全性の分類Ⅰ類相当として、大地震動後、構造体を補修せず建築物を使用できることを目標する．具体的には、1次設計用地震力に対して許容応力度設計を行い、層間変形角 1/200 以下とした．また、2次設計は保有水平耐力が必要保有水平耐力の 1.5 倍以上有していることを確認し、全体崩壊形のメカニズムを形成するよう「冷間成形角形鋼管設計・施工マニュアル」^{2.4)}の部材耐力比の規定を満足させた．架構は 4 階建てのラーメン構造で、柱は冷間成形角形鋼管、梁は H 形鋼とした．柱脚は露出型形式とし、アンカーボルト先行降伏型の設計とした．

(b) 免震試験体

免震試験体は予備応答解析によりレベル 2 地震動相当の地震力として、ベースシア係数 $C_0=0.2$ の A_i 分布に対して短期許容応力度以下となるように設計した．

2.2.3 試験体概要

平面は、耐震建物を 7m×10m、免震建物を 5m×6m とした．階高は、一般的な病院建物を参考に、耐震建物の 1 階部分は 3.6m、2 階以上は 3.4m、免震建物は 3.5m とした．

(a) 耐震試験体

柱は FA ランクの角形鋼管 (BCR295) を、2F、4F、RF の梁は、FA ランクの H 形鋼 (SN490) を使用した．3F の梁は、梁端ウェブ補剛工法^{2.5)}を採用した．柱脚は、ハイベースを用いた柱脚ヒンジ仕様とし、柱形を小さく、根切りを浅くした．床スラブはデッキ形式とし、2F と 4F はフラットデッキ^{2.6)}、3F にはサイノスデッキ^{2.7)}を用いた．なお、デッキには施工手順と性能を確認するために複数の仕様を用いているが、試験体の構造性能には影響を及ぼさないため、ここでは詳細の記述を控える．

この骨組に対して (2.1) 式で定義される「はりパネル複合型崩壊に対応した柱の耐力比」 γ_k を計算すると X・Y 方向とも各層 1.11 となり、全体崩壊形と判断される．

$$\gamma_k = \frac{\sum M_{pcj}}{\sum [\min(1.5M_{pbj}, 1.3M_{ppj})]} \quad (2.1)$$

ここで M_{pcj} , M_{pbj} , M_{ppj} はそれぞれ k 階の第 j 節点における上下柱の全塑性モーメントの和, 左右梁の全塑性モーメントの和, 柱梁接合部パネルの全塑性モーメントであり, Σ は k 階内の各節点の和を表す. ここで鉄骨梁は完全合成梁として必要な頭付スタッドを打設し, 剛性はスラブを考慮した完全合成梁として, 耐力はスラブを無視した鉄骨梁断面のみを考慮する.

(b) 免震試験体

免震骨組には球面滑り支承を採用し, 支承が滑動したときに上部構造の固有周期が 4 秒程度になるように設計した. 試験体の応答と球面すべり支承の詳細については 3 章で述べる. 渡り廊下部には免震対応のエキスパンションジョイントを設置した.

2.2.4 試験体の荷重条件と地震荷重表

設計に用いた病室の荷重条件を表 2.3 に示す. 積載荷重には建築基準法施工令 85 条の病室を採用し, 試験体内に設置する医療機器が当該積載荷重以下であることを確認した. また, 耐震試験体屋上には高架水槽 (110 kN) を設置したため別途積載荷重を設定した.

表 2.3 荷重条件 (単位: kN/m²)

	仕上荷重		積載荷重	
屋上 (耐震 試験体)	押えコン t80	1,840	床版	2,700
	モル・防水	450	小梁	2,600
	天井・配管	200	大梁	2,450
	水勾配打ち増し	230	地震	600
	外壁	300		
	合計	3,020		
屋上 (免震 試験体)	押えコン t400 (鍾)	9,600	床版	1,800
	モル・防水	450	小梁	1,550
	天井・配管	200	大梁	1,300
	水勾配打ち増し	230	地震	600
	外壁	300		
	合計	10,780		
病室	ビニル床シート	100	床版	1,800
	コンクリート直押え	230	小梁	1,550
	間仕切り	300	大梁	1,300
	外壁	300	地震	600
	天井・配管など	200		
	その他	200		
	合計	1,330		

表 2.4, 表 2.5 に各試験体の地震荷重表を示す. 耐震試験体, 免震試験体とも 1 階と

屋上を除く一般階の平均重量は鉄骨造としては標準的な 7kN/m^2 程度となっている。屋上階は耐震試験体は水槽を設置し、免震試験体は免震装置の面圧をできるだけ大きくするために錘を設置していることから平均重量が大きくなっている。屋上には機械を設置することが多いことから高さ方向の重量分布においても一般的な設計と同等と考える。設計時の試験体重量は耐震試験体で $4,020\text{kN}$ 、免震試験体で $2,080\text{kN}$ であった。

表 2.4 耐震試験体地震荷重表

階	積載荷重 (kN)	固定荷重 (kN)	各階重量 (kN)	合計重量 (kN)	平均重量 (kN/m ²)	Ai 分布	層せん断力係数 C	層せん断力 Q (kN)
R	154	580	734	-	10.0	-	-	-
4	44	430	474	734	6.5	1.51	0.30	221
3	44	424	468	1,208	6.4	1.29	0.26	311
2	44	431	475	1,676	6.5	1.13	0.23	379
1	55	1,812	1,867	2,151	20.5	1.00	0.20	430

表 2.5 免震試験体地震荷重表

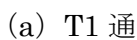
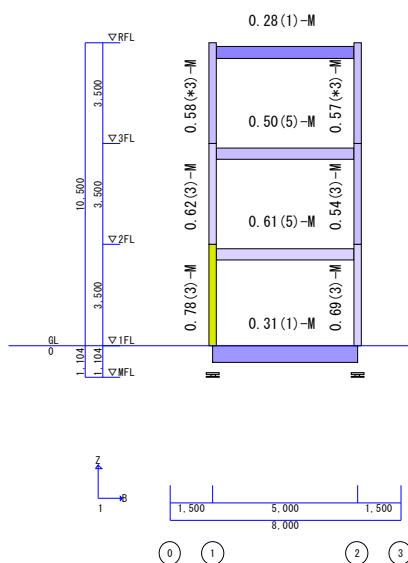
階	積載荷重(kN)	固定荷重(kN)	各階重量(kN)	合計重量 (kN)	平均重量 (kN/m ²)	Ai 分布	層せん断力係数 C	層せん断力 Q(kN)
R	19	490	510	-	15.8	-	-	-
3	26	203	229	510	5.3	1.575	0.263	134
2	26	305	331	738	7.7	1.428	0.233	172
1	30	980	1,009	1,069	20.5	1.285	0.2	214

2.2.5 許容応力度設計

各試験体各部材の許容応力度設計時の応力度を許容応力度で除したものを示した断面検定比図を図 2.9、図 2.10 に示す。

耐震試験体の T1 通りは長辺方向で震動台の X 方向を向いており、TA 通りは短辺方向で震動台の Y 方向を向いている。耐震試験体の地震力は 1 次設計時相当としてベースシアー係数 $C_0=0.2$ の A_i 分布とした。

免震試験体はレベル 2 地震時相当としてベースシアー係数 $C_0=0.2$ の A_i 分布とした。最大検定比は耐震試験体の柱は 1 階の中柱で 0.71、大梁は 2 階の Y 方向で 0.7 であり、免震試験体の柱は 1 階 M1 通の柱で 0.78、大梁は 2 階 M1 通で 0.68 であった。

[illegible]

35

2.2.6 耐震試験体の保有水平耐力設計

設計に際して、試験体の静的増分解析を実施し、保有水平耐力とそのときの骨組の状態を調査した。この解析の主な条件は下記のとおりである。

- ① 外力分布は A_i 分布による
- ② 鋼材の降伏点は基準強度（規格下限値の 1.1 倍）とする
- ③ 材料特性は歪硬化係数 1/100 のバイリニア型とする
- ④ 柱梁接合部パネルは考慮しない
- ⑤ 露出柱脚は弾性回転剛性は考慮し、軸曲げとせん断について **Bi-Linear** 特性を持つ。軸曲げはメーカーの設定した $N\text{-}M$ 相関降伏面を補完した耐力曲線を有し、2 軸曲げの相関関係を考慮する。
- ⑥ 梁の曲げ耐力には床スラブの合成効果を無視する
- ⑦ はりの曲げ剛性は、長期荷重・水平荷重モデル別に、RC 規準に従ってスラブ有効幅を考慮する、

得られた保有水平耐力を表 2.6 に、保有水平耐力時のヒンジ図を図 2.11 に示す。各層の保有水平耐力は要求体力を十分に上回っている。保有水平耐力時には、中柱については柱頭と柱脚にヒンジが形成されており、側柱については梁端部にヒンジが形成されている。一般に柱脚が柱に対して先行降伏し保有耐力接合の条件を満足しない場合は 1 階の D_s 値を 0.05 程度割増すなどの措置をとる。しかしながら、本実験で採用したハイベース NEO 工法ではベースプレートとアンカーボルトの終局耐震性能が充分に発揮されるベースプレート形状にすることで、柱脚の吸収エネルギーを向上させており、1 階の保有水平耐力が必要保有水平耐力の 1.1 倍以上である場合、当該割増が不要となっている（BCJ 評定-ST0059）^{2.1)}。

表 2.6 耐震試験体の保有水平耐力

層	X					Y				
	D_s	Q_{ud} (kN)	Q_{un} (kN)	Q_u (kN)	$Q_{u'}$ Q_{un}	D_s	Q_{ud} (kN)	Q_{un} (kN)	Q_u (kN)	$Q_{u'}$ Q_{un}
4	0.25	1,105	276	511	1.85	0.25	1,105	276	464	1.68
3	0.25	1,553	388	717	1.85	0.25	1,553	388	652	1.68
2	0.25	1,895	474	875	1.85	0.25	1,895	474	796	1.68
1	0.25	2,151	645	994	1.85	0.25	2,151	645	903	1.68

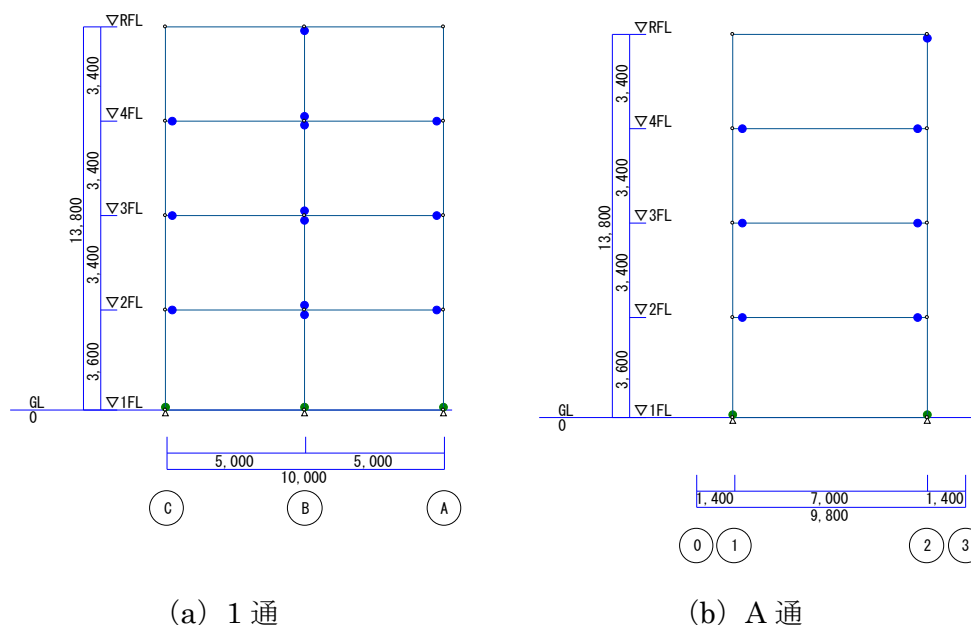


図 2.11 耐震試験体の保有水平耐力時のヒンジ状態

2.2.7 医療機器の設置

各棟の居室のレイアウト図 2.12 に示す．生命維持装置を要する部屋として，NICU，手術室，コロナ重症患者用病室，透析医療室を，事業継続を求められる部署として，診察室，処置室，検査部，薬剤部，スタッフステーションを再現し，医療機器や什器を配置した．

居室や部署のレイアウトは，医療従事者と協議の上，各部屋に一般的に必要なとされる機器を配置した．機器は展示用や廃棄予定の備品を医療施設から収集した．キャスター固定時の摩擦係数やフリー時の転がり摩擦係数が機器の移動や転倒に与える影響を確認するため，病室の床材として一般的に用いられている特性の異なる床材として AC28，MJ20，パーマリューム（MJ20 と同等），移動荷重用フロア（クリンセフと同等）を用いた．色がない部分はコンクリート床になる．本稿では，患者を載せる機器（分類①）とその他の医療機器（分類②）で分類した．

表 2.7 に着目した主要な医療機器， B （キャスターの幅）/ H （重心高さ）の推定値，厚労省の指定する管理クラス分類，キャスターの固定状況を示す．ただし，実験時に計測できなかった B/H は，類似の機器を用いた． B/H は分類①と比較して分類②の方が小さく転倒しやすい傾向がある．医療機器のクラス分類は，機能の停止が人体に与えるリスクに応じて「高度管理医療機器（リスクが高いもの）」「管理医療機器（リスクが低いもの）」「一般用医薬品（リスクが極めて低いもの）」の 3 つに分類されている．キャスターはいずれもロックとした．

表 2.7 主要な医療機器

分類	種類	B/H ^{※8}	クラス	固定状況
①患者を載せる機器	保育器 ^{※1}	0.55	◎	対角ロック
	インファントウォーマ ^{※2}	0.55	◎	対角ロック
	新生児ベッド	0.78	△	対角ロック
	ベッド	3.86	△	ロック/フリー ^{※7}
	手術台	0.69	△	全点ロック
	検査台	1.64	△	ロック/フリー ^{※7}
②その他の機器	点滴スタンド	0.43	△	一部ロック
	ベッドサイドモニタ ^{※3}	0.45	◎	前面ロック
	人工呼吸器 ^{※4}	0.61	◎	前面ロック
	IABP ^{※5}	0.56	◎	全点ロック
	ECMO ^{※6}	0.49	◎	全点ロック

(クラス分類：◎高度管理医療機器，○管理医療機器，△一般医療機器)

※1 未熟児を保護して育てる医療機器であり，容器内の湿度と温度を一定に保つことで未熟児が生存できる環境を作り出す機器

※2 NICU での集中看護・処置から新生児の蘇生までトータルにサポートする多機能な開放型保育器

※3 心電図や血圧，体温，血中に含まれている酸素量などを観察する機器

※4 肺への空気の出入りを補助するための機器．通常は，合成樹脂製のチューブを鼻または口から気管に挿入する．数日以上必要な場合は，首の前側を小さく切開して(気管切開)，気管に直接チューブを通すこともある．

※5 大動脈内バルーンポンピングの通称，心臓の拍動に合わせて，バルーンの収縮と拡張を繰り返すことで心臓を補助する圧補助循環装置

※6 膜型人工肺の通称，人工肺とポンプを用いた体外循環回路による治療装置

※7 加振途中にロックが外れてフリーとなるケースが多かった．

※8 推定値を示す．

2.3 計測計画

非構造部材を含む試験体の各部位に、加速度計、変位計、ひずみゲージを設置して、加振中の試験体応答を計測した。

計測対象が非常に多いため、計測箇所を絞ることになった。耐震棟の構造部材については、東側構面と北側構面のみを計測した。柱に設置したひずみゲージから構面内の曲げモーメント分布を推定することとした。また、柱脚については、アンカーボルトの軸ひずみ、接触型の変位計を用いてベースプレートの回転角を計測した。1層の柱は、ワイヤー式の変位計を用いて部材端回転角を計測した。梁は屋上階を除いて、ワイヤー式の変位計により端部の回転角を計測した。

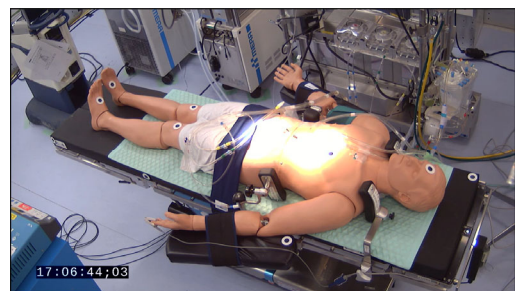
医療機器は多数のカメラを設置して、写真2.1に示すように各部屋の状況を撮影した。



(a) 耐震4階 コロナ病室



(b) 耐震4階 NICU



(c) 耐震3階 手術室



(d) 耐震2階 診察室



(e) 免震3階 透析室



(f) 免震2階 NICU

写真 2.1 試験体内部の医療機器の設置状況

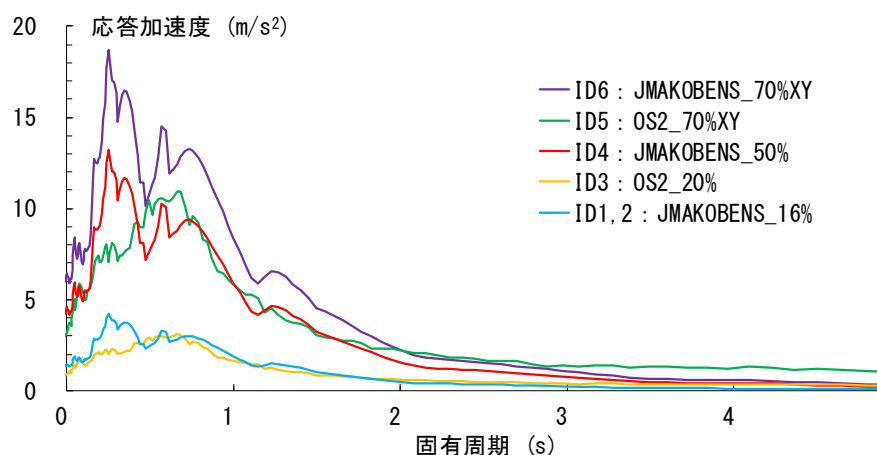
2.4 加振計画

2020 年 12 月初めに、3 日間に渡り加振した。首都直下地震を想定した地震動として JMA 神戸 NS 波^{2.8)}を、南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動対策用として、建物立地に 2 種地盤を想定した地震動 (OS2)^{2.9)}を採用した。OS2 については第 2 種地盤を想定して、工学的基盤波から非線形解析により地表波を求めた。

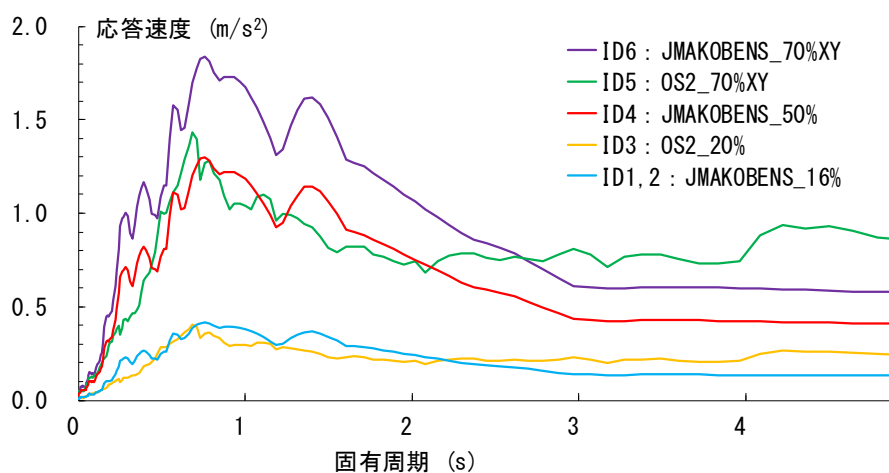
各入力ケースに用いた入力地震動のレベルとそれらの弾性応答スペクトルを表 2.8 と

表 2.8 入力地震動

ID	地震波	参考レベル
1	JMA 神戸 NS X 方向 16%	弾性限界
2	JMA 神戸 NS Y 方向 16%	弾性限界
3	OS-2 Y 方向 20%	長周期小振幅
4	JMA 神戸 NS X 方向 50%	2 次設計
5	OS-2 XY 方向 70%	長周期大振幅
6	JMA 神戸 NS XY 方向 70%, UD Z 方向 100%	設計超



(a) 加速度応答スペクトル



(b) 速度応答スペクトル

図 2.13 応答スペクトル

図 2.13 に示す．地震動レベルを段階的にあげていき，ID1,2 は 1 次設計地震相当として加速度応答スペクトルで $C_d=0.2$ 程度，構造体としては弾性限界に相当する．ID3 は ID1,2 と加速度と速度は同程度の長時間地震動，ID4 は 2 次設計地震相当として加速度応答スペクトルで $C_d=1.0$ 程度とした．ID5 は応答加速度や速度は ID4 と同程度の長周期長時間地震動，ID6 は $C_d=1.0$ を上回る設計で想定するレベル超地震動として設定した．ID5,6 は OS-2, JMA 神戸 NS をそれぞれ X,Y 方向に 50% 入力とした合成として，45 度方向へ 70% を入力したことを示す．

2.5 試験体の事前地震応答解析

試験体挙動の事前予測を目的に ID1～5 の地震動に対して応答解析を行った．耐震試験体と免震試験体のモデルはいずれも多質点系等価せん断型モデルとし，弾塑性復元力

表 2.9 耐震試験体の固有周期と固有振動数（事前解析）

次数	X 方向		Y 方向	
	固有周期	固有振動数	固有周期	固有振動数
	(sec)	(Hz)	(sec)	(Hz)
1	0.81	1.23	0.86	1.16
2	0.27	3.74	0.28	3.54
3	0.17	5.98	0.18	5.64

表 2.10 免震試験体の固有周期と固有振動数（免震層固定時）

次数	X 方向		Y 方向	
	固有周期	固有振動数	固有周期	固有振動数
	(sec)	(Hz)	(sec)	(Hz)
1	0.78	1.29	0.76	1.29
2	0.26	3.82	0.26	3.83

表 2.11 免震試験体の固有周期と固有振動数（免震層 100mm 変位時）

次数	X 方向		Y 方向	
	固有周期	固有振動数	固有周期	固有振動数
	(sec)	(Hz)	(sec)	(Hz)
1	4.01	0.25	4.01	0.25
2	0.57	1.75	0.57	1.75

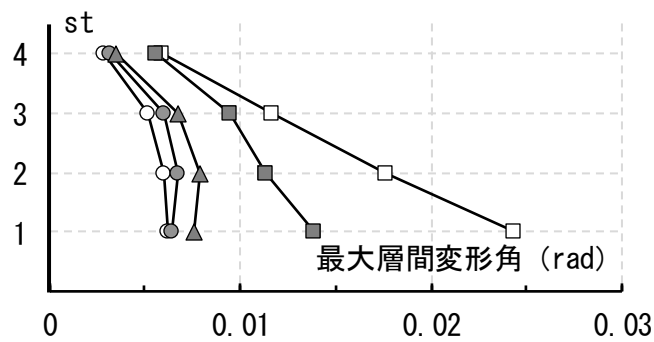
表 2.12 免震試験体の固有周期と固有振動数（免震層 200mm 変位時）

次数	X 方向		Y 方向	
	固有周期	固有振動数	固有周期	固有振動数
	(sec)	(Hz)	(sec)	(Hz)
1	4.12	0.24	4.12	0.24
2	0.57	1.75	0.57	1.75

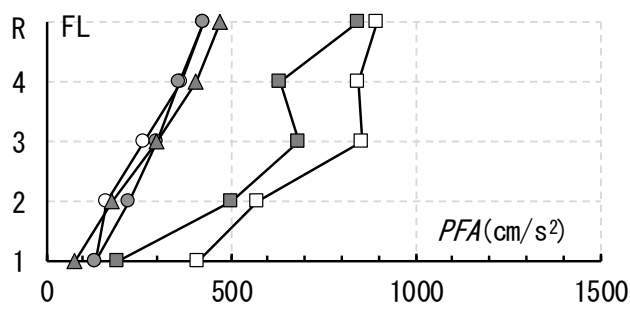
特性は、S系トリリニア型スケルトンカーブ、減衰は瞬間剛性比例型とし、1次固有振動数に対して減衰定数 $h=2\%$ とした。質点系モデルの簡易応答解析であるため、地震動は一方向入力とし、実験では2方向入力となるID5については最大地動加速度を $1/\sqrt{2}$ 倍してX方向にのみ入力した。免震試験体は、球面すべり支承の摩擦係数のばらつきとして温度依存性、面圧依存性、速度依存性に加えて製造ばらつき ± 0.007 を考慮する（温度依存性、面圧依存性、速度依存性の詳細については3章で述べる）。表2.9～2.12に各試験体の固有値解析結果を示す。免震試験体は球面すべり支承の変位により固有周期が変化するので免震層固定時と100mm変位時、200mm変位時を示す。数値解析は弾塑性解析システム HyperSD^{2.10)} を用いた。

図2.14に耐震試験体の最大応答値として、最大最大層間変形角、最大床応答加速度 (*PFA*)、最大層せん断力係数、最大塑性率を示す。ID1,2は最大層間変形角が0.006rad程度、最大層せん断力係数は0.025程度、塑性率は1以下と弾性範囲に留まり1次設計地震動で想定する範囲内の挙動となった。ID3以降は塑性化し、2次設計地震動相当の地震動としたID4では最大層間変形角0.025rad、層の最大塑性率は3.3であった。超高層建物のレベル2地震動の標準的なクライテリアである最大層間変形角0.01rad、層の最大塑性率2を大きく上回る挙動となり、また「官庁施設の総合耐震・対津波計画基準」^{2.3)}の耐震安全性の分類I類相当の設計に対しても応答値が大きい。*PFA*に着目するとID4で850cm/s²程度、ID5の700cm/s²程度なり、ID5では実験では2方向入力となるため*PFA*を $\sqrt{2}$ 倍すると概ね1G相当（G：重力加速度）となった。既往の研究^{2.11)}での家具群の地震時挙動シミュレーションによる床応答加速度と室内被害の様相の対応を参照すると、いずれも大きな被害が生じると予想される。

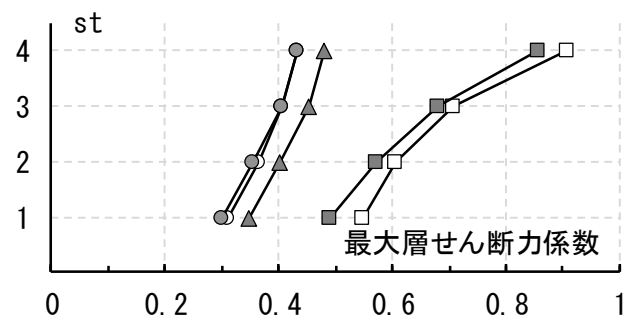
同様に図2.15～2.17に免震試験体の最大応答値を示す。1階の最大層せん断力係数はハードケースの場合で0.1程度であり弾性域に留まり、*PFA*は100cm/s²程度であり、構造体、室内被害とも無損傷であることが予想される。一方で免震層変位に着目すると、摩擦係数のばらつきの程度によりソフトケースとハードケースでは4倍程度ことなるため、免震装置の挙動を追従するには、摩擦係数のばらつきの大きさを精度良く評価することが重要と考えられる。



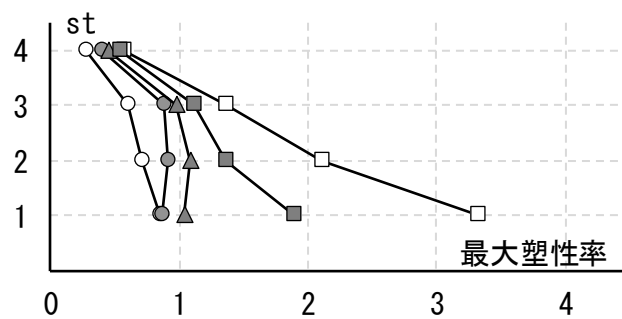
(a) 最大層間変形角



(b) PFA



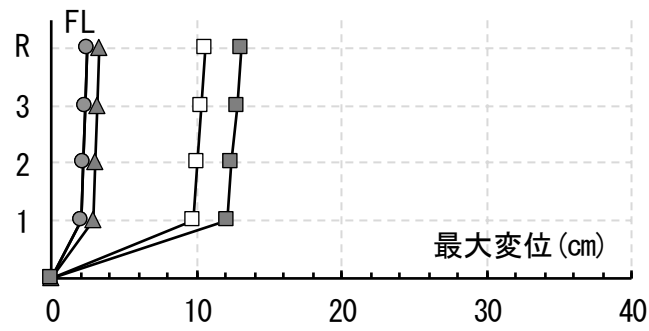
(c) 最大層せん断力係数



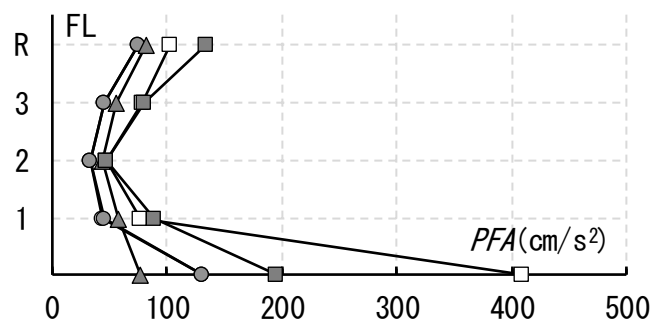
(d) 層の最大塑性率

○ : ID1, ● : ID2, ▲ : ID3, □ : ID4, ■ : ID5

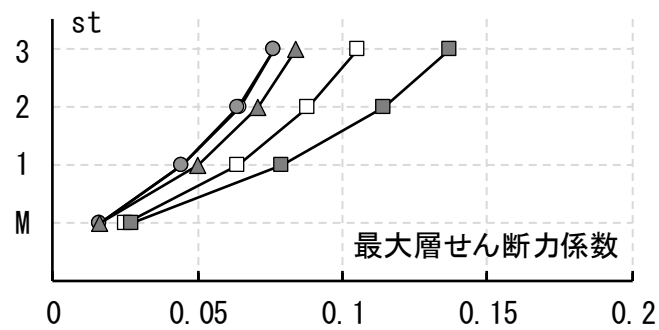
図 2.14 耐震試験体の事前応答解析結果



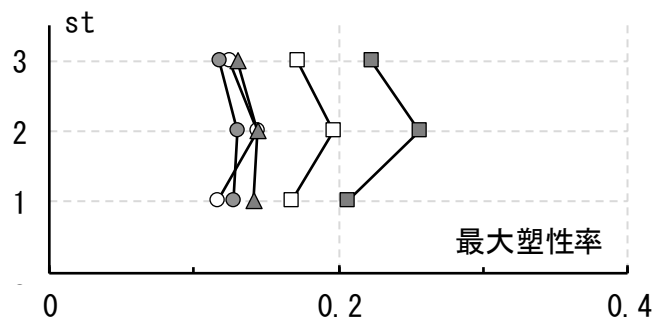
(a) 最大層間変位



(b) PFA

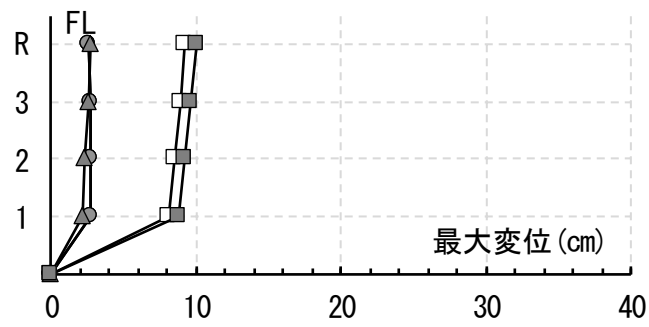


(c) 最大層せん断力係数

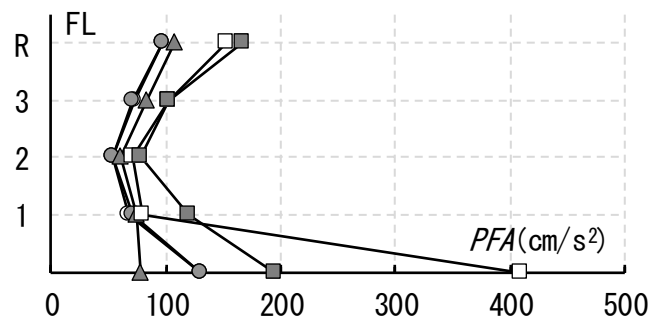


(d) 層の最大塑性率

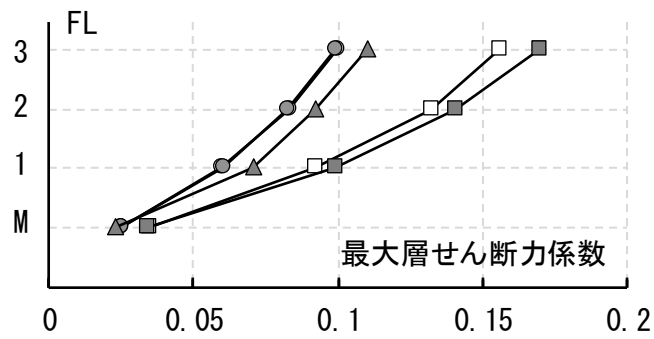
○ : ID1, ● : ID2, ▲ : ID3, □ : ID4, ■ : ID5
 図 2.15 免震試験体の事前応答解析結果 (標準ケース)



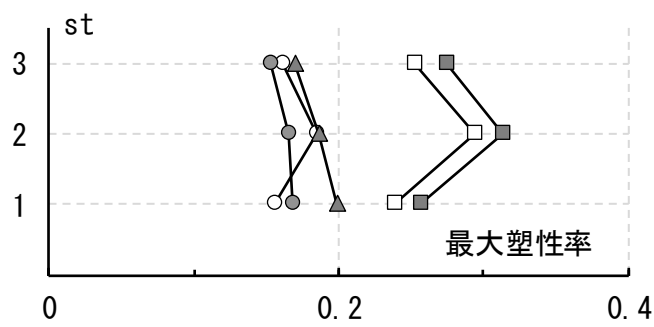
(a) 最大層間変位



(b) PFA



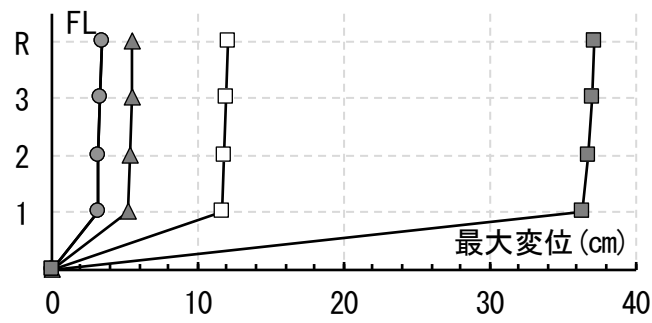
(c) 最大層せん断力係数



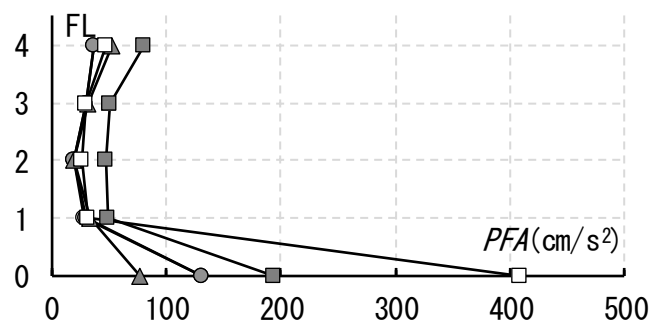
(d) 層の最大塑性率

○ : ID1, ● : ID2, ▲ : ID3, □ : ID4, ■ : ID5

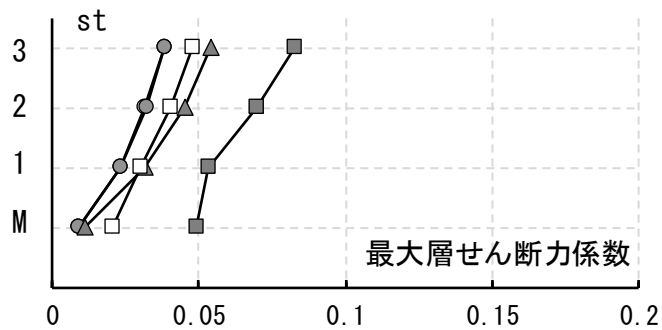
図 2.16 免震試験体の事前応答解析結果 (ハードケース)



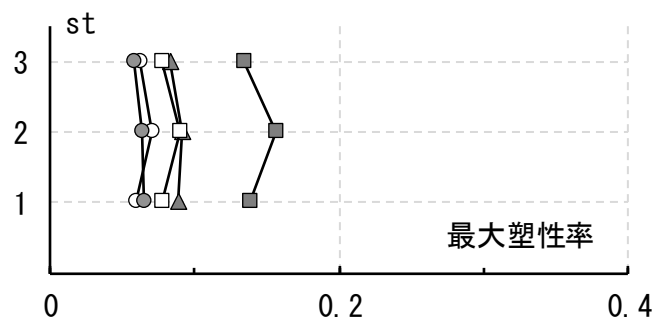
(a) 最大変位



(b) PFA



(c) 最大層せん断力係数



(d) 層の最大塑性率

○ : ID1, ● : ID2, ▲ : ID3, □ : ID4, ■ : ID5
図 2.17 免震試験体の事前応答解析結果 (ソフトケース)

2.6 震動台実験による結果

実験時に測定した総重量は，耐震試験体が約 3,200kN，免震試験体は約 2,000kN であった．設計時の想定重量よりも耐震棟は 800kN 程度小さかった．これは実際に施した仕上げ重量や設置した機器重量が設計荷重よりも小さかったと考えられる．

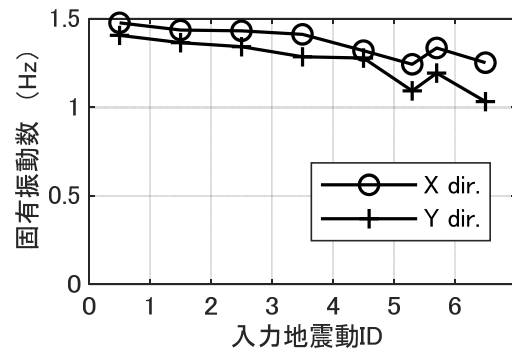
震動台実験で計測された各試験体の最大応答値を以下にまとめる．

(a) 耐震試験体

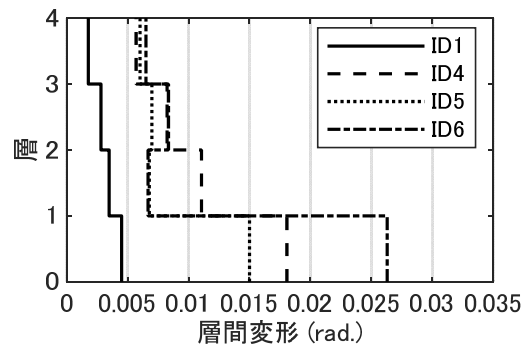
図 2.18 に耐震棟試験体の全体挙動を，表 2.13 に *PFA* と *PFV* について示す．長周期地震動 ID5 の入力後は，アンカーボルトの増し締め前後で，固有振動数を計測した．固有振動数は入力とともに減少し，特に ID5 の長周期地震動で大きく低下した．繰り返し入力による床スラブのひび割れや柱脚部のモルタルの圧壊，アンカーボルトの塑性変形が影響したと考えられる．X 方向の最大層間変形角は，ID1 で 1 次設計限界の 0.005rad を下回った．2 次設計レベルの 1 方向加震 (ID4) でアンカーボルトが降伏し 0.018rad に到達し，最終加震で 0.026rad となった．なお，層間変形角は床スラブ天端と梁下フランジ間の変位を 2 点間の距離で除した．Y 方向の層間変形角は X 方向よりも 2 割程度大きく，最終加振 (ID6) では 0.032rad となった．X 方向のベースシア係数は 0.4 程度で塑性化の兆候を示し，ID4 のときに最大で 0.7 程度であった．最終加震ではアンカーボルトの破断の影響で，X 方向と Y 方向ともに耐力が 2 割程度低下した．頂部最大加速度は，弾性限界レベルの加震で約 500cm/s²，最終加震では約 2,000m/s² に到達した．室内の最大加速度は弾性限界レベルで約 300cm/s²，最終加震では 1G (G: 重力加速度) 程度となった．室内の最大速度は弾性限界レベルで約 50cm/s，最終加震では約 160cm/s となった．

(b) 免震試験体

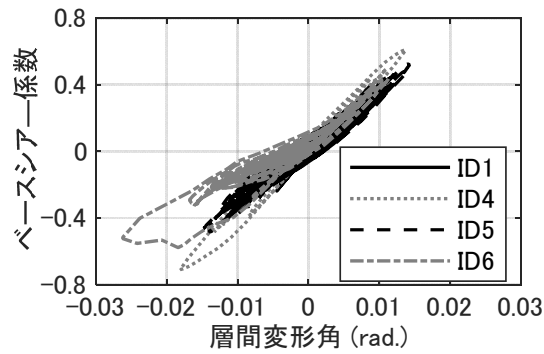
図 2.19 に免震棟の全体挙動を示す．頂部最大加速度は免震の効果により耐震棟に比べて大きく低減し，100～150cm/s² 程度であった．室内の *PFA* は ID5 が最大となり，150cm/s² 程度，*PFV* は 30cm/s 程度であった．1 回目の加震が若干大きくなったが，初動時に免震装置に若干の固着があったためと考えられる．免震層は 1 次設計レベルの入力ではほとんど動いていない．長周期地震動 ID5 で水平 2 方向に 150mm 程度滑動した．



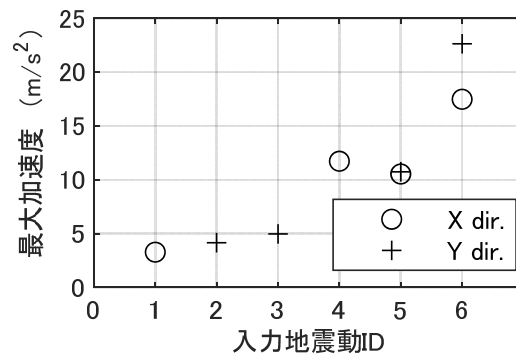
(a) 固有振動数 ^{2.12)}



(b) X 方向の最大層間変形角 ^{2.12)}



(c) X 方向のベースシア係数 ^{2.12)}

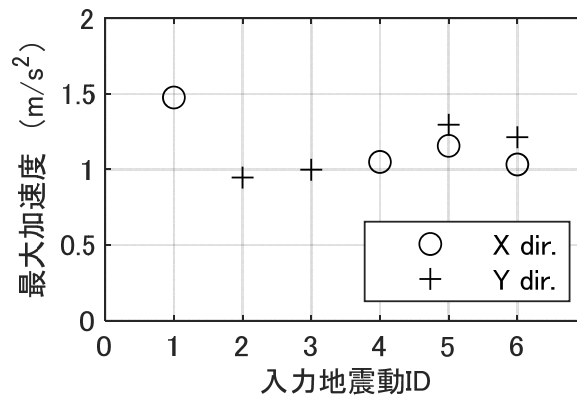


(d) 頂部最大加速度 ^{2.12)}

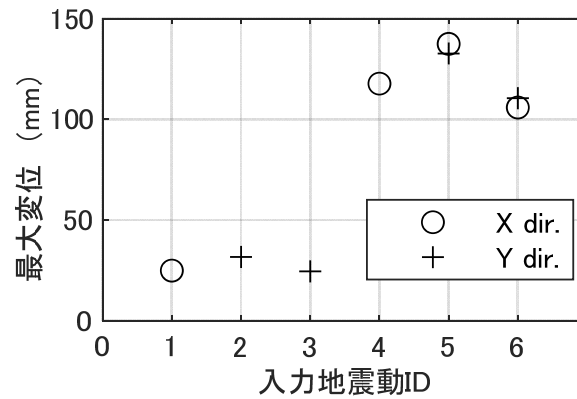
図 2.18 耐震棟の挙動

表2.13 耐震試験体の $PFA \cdot PFV$

Floor acceleration (unit: cm/s^2)						
ID	1	2	3	4	5	6
4 th Floor	283	354	440	855	979	1161
3 rd Floor	249	280	395	799	839	1060
2 nd Floor	176	180	244	406	572	878
1 st Floor	120	136	74	357	283	529
Floor velocity (unit: cm/s)						
4 th Floor	38	46	53	116	134	158
3 rd Floor	28	34	40	96	121	131
2 nd Floor	20	22	24	63	85	106
1 st Floor	15	15	10	46	32	66



(a) 頂部最大加速度 ^{2.12)}



(b) 免震層の最大変位 ^{2.12)}

図 2.19 免震棟の挙動

表2.14 免震試験体のPFA・PFV・免震層の最大変位

Floor acceleration (unit: cm/s ²)						
ID	1	2	3	4	5	6
3 rd Floor	95.6	90.7	82.7	89.3	172	130
2 nd Floor	79.3	66.3	52.5	91.7	114	115
1 st Floor	79.8	63.7	46.0	79.8	131	101
Table	120	136	74.5	357	283	529
Floor velocity (unit: cm/s)						
3 rd Floor	10.0	10.9	10.9	16.8	25.9	19.5
2 nd Floor	9.58	10.0	8.08	17.6	24.4	19.0
1 st Floor	9.41	9.45	9.17	15.3	24.6	17.2
Table	14.9	15.0	10.1	45.9	31.5	63.2
Base isolation layer response displacement (unit: cm)						
1 st Floor	2.48	3.16	2.83	11.2	18.6	15.2

2.7 実験後の耐震試験体の数値応答解析と実験結果の比較

設計時の仕上げ荷重を 0 とすると総重量が 3200kN 程度となったことから、設計用仕上げ荷重を 0 として積載荷重のみ考慮したモデルで数値解析を再度実施し、数値解析の実験結果の追従性を検討した。数値解析モデルは立体モデルとし、地震動の 2 方向入力も考慮した。数値解析には汎用構造解析ソフトウェア SNAP^{2.13)} を用いた。

表 2.15 に数値解析により得られた固有周期および固有振動数を示す。実測値 X 方向 0.67s, Y 方向 0.71s と概ね良い対応がみられた。復元力特性は、1 階露出柱脚は XY 方向それぞれにスリップ型モデル、柱頭は正規トリリニアの曲げばねを用い、それ以外の柱はファイバーモデルとし、梁端はすべて正規バイリニアの曲げばねとした。図 2.20 に露出柱脚のトリリニアスリップ型モデルの履歴特性を示す。各折れ点は軸力依存性があるため、本数値解析モデルでは簡易的に軸力が 0 の場合の実験結果の履歴特性にフィッティングさせたものを全柱共通で用いた。減衰は瞬間剛性比例型とし、1 次固有振動に対して $h=2\%$ とした。図 2.21 に JMAKOB 波 16% X 方向加振、図 2.22 に JMAKOB 波 50% X 方向加振、図 2.23 に OS2 波 50% XY 方向加振の層せん断力－層間変形角関係を示す。実験結果の層せん断力は加速度計から算出されたものを用いる。ID4 で実験と同じく 1 階柱脚が塑性ヒンジが発生し、併せて 2 階 A, C 通端の梁端部にも塑性ヒンジが発生した。ID5 では、ID4 の塑性ヒンジ位置に加えて、2 階 Y 方向の梁端部にも塑性ヒンジが発生した。剛性、耐力、最大変形において解析結果と実験結果で概ね良い対応がみられた。

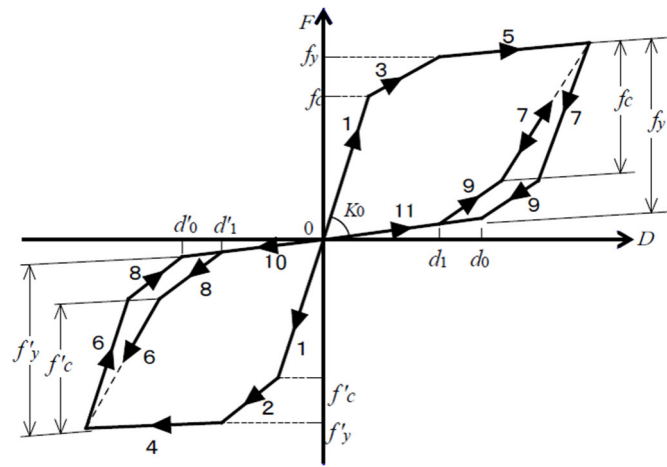
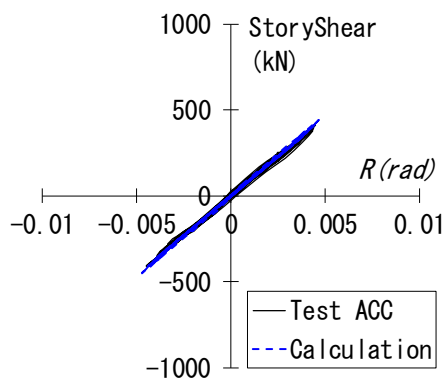


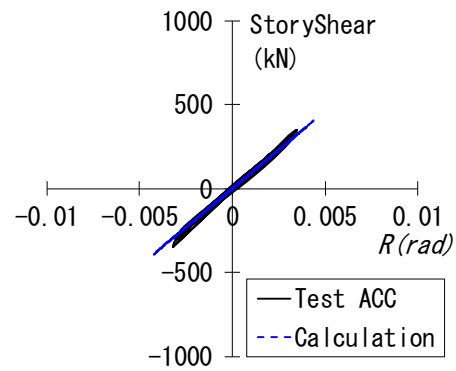
図 2.20 露出柱脚のスリップ型の履歴特性

表 2.15 耐震試験体の固有周期と固有振動数

次数	X 方向		Y 方向	
	固有周期	固有振動数	固有周期	固有振動数
	(sec)	(Hz)	(sec)	(Hz)
1	0.68	1.47	0.737	1.36
2	0.22	4.53	0.234	4.266
3	0.13	7.70	0.134	7.464



(a) 1 層

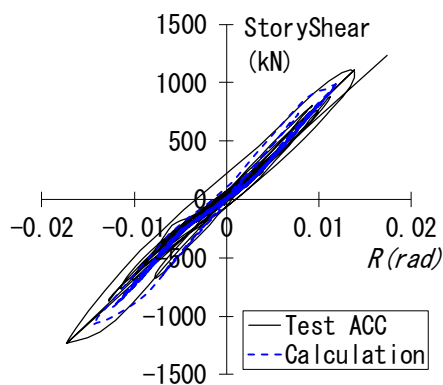


(b) 2 層

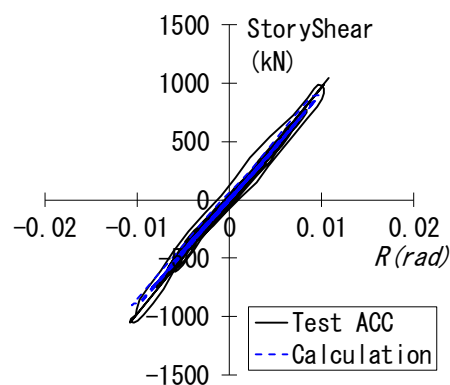
図 2.21 JMAKOBE 16% X 方向加振

最大層間変形角について実験前の事前解析と比較すると、ID1, 4 は事前数値解析の

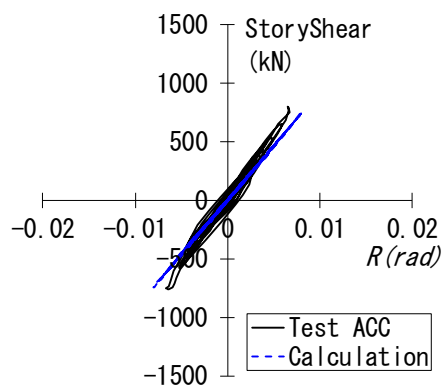
方が実験結果より 20%程度大きくなり, ID5 の X 方向は実験結果の方が 30%程度大きくなった. これらは ID1,4 は設計時と試験体では重量の違いとそれによる固有周期の違い, ID5 については試験体塑性化により固有周期の違いと 2 方向加振による影響が考えられる.



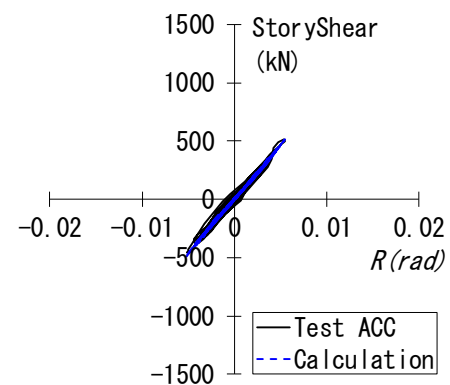
(a) 1 層



(b) 2 層



(c) 3 層



(d) 4 層

図 2.22 JMAKOBÉ 50% X 方向加振

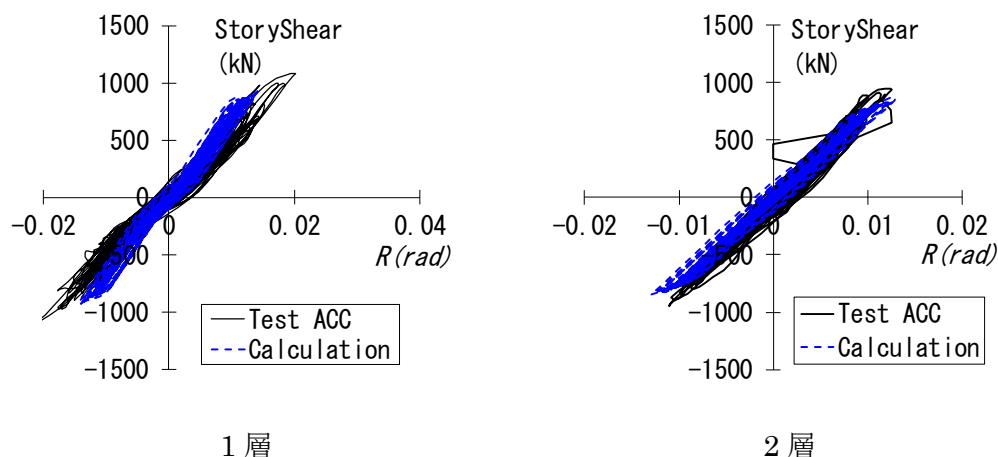


図 2.23 OS-2 XY 方向 70%向加振

2.8 応答値の推定精度

設計で想定した固有周期や最大耐力，簡易的な推定式や静的解析結果を用いた大地震時の最大変形，ならびに損傷について，実大振動台実験との比較し，簡易評価法の妥当性を検証する．

2.8.1 固有周期と骨格曲線

表 2.16 に構造種別と高さのみをパラメータとする建築基準法の告示式による試験体の固有周期と，固有値解析，実験結果による 1 次固有周期を示す．実在建築物の固有周期に関する実測値と告示式を比較した場合，S 造においても実測値は基準式よりも短くなる傾向^{2.14)}があるが，告示式と実験結果を比較すると，実験結果により得られた固有周期の方が告示式よりも 1.7 倍程度長くなった．これは純ラーメン構造でかつ露出柱脚であることが考えられる．固有値解析結果と実験結果は概ね対応が見られた．次に，2.2.6 に示す解析モデルを用いた静的増分解析結果と実験結果を比較する．45 度方向の増分解析結果は一貫構造設計システム BRAIN-Ⅲ^{2.2)}を用い，X，Y 各構面の層せん断力 Q ，層間変形角 R を示す．柱，ベースプレートは 2 軸曲げの影響を考慮した．全 5 加振の内，比較対象とするのは 2 次設計レベル相当として JMAKOBE 50%X 方向加振と，長周期大振幅の 2 方向挙動として OS-2 XY 方向 70% 方向加振とする．

図 2.24～2.26 に 1 層と 2 層の実験結果と静的増分解析結果の層せん断力・層間変形関係角（図中赤線）を重ね合わせたグラフを示す。JMAKOBÉ 50%X 方向加振では 1, 2 層とも明確に最大耐力にまで達していないが、1 層については負方向で塑性化が顕著となり、実験結果と静的増分解析結果で降伏点や最大耐力は概ね対応を確認した。OS-2 XY 方向 70% 方向加振において X 方向の変形の小さい領域において静的増分解析結果と異なるのは、前加振で露出柱脚のアンカーボルトが塑性化したためであると考えられる。最大耐力は、Y 方向 1 層で増分解析結果に比べて実験結果では大きな耐力を確認した。実験結果および静的増分解析結果のいずれも露出柱脚が先行降伏することから、露出柱脚の 2 軸曲げに対するモデル化の影響と考えられる。最大耐力は、Y 方向 1 層で増分解析結果に比べて実験結果では大きな耐力を確認した。実験結果および静的増分解析結果のいずれも露出柱脚が先行降伏することから、露出柱脚の 2 軸曲げに対するモデル化の影響と考えられる。

表 2.16 1 次固有周期（単位；秒）

告示式	固有値解析		実験結果	
	X 方向	Y 方向	X 方向	Y 方向
0.41	0.68	0.74	0.67	0.71

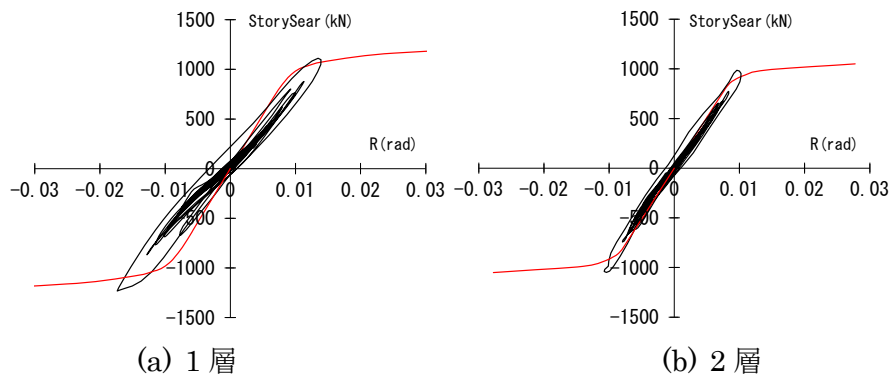


図 2.24 JMAKOB50%X 方向加振

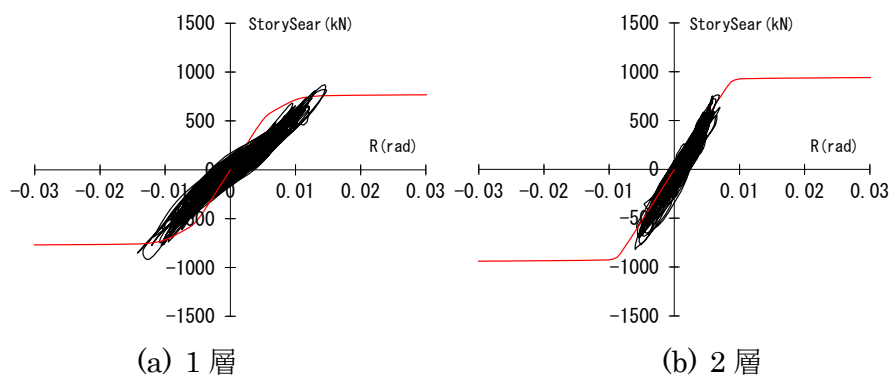


図 2.25 OS-2 XY 方向 70%加振 X 構面

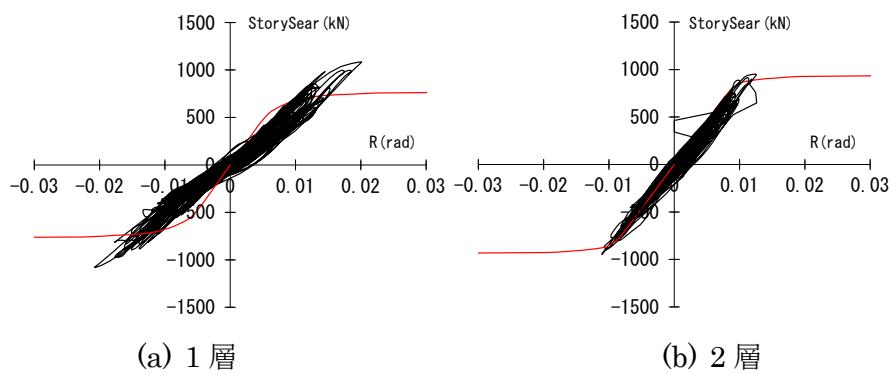


図 2.26 OS-2 XY 方向 70%加振 Y 構面

2.8.2 最大応答変位

最大応答変位については、エネルギー一定則により中地震時の水平方向の層間変形と保有水平耐力の余力を考慮して、構造特性係数を補正した下式 (2.2) による推定値と実験値を比較する。

$$\gamma_p = \frac{C_{op}}{2 \cdot C_{oe}} \cdot \left(D'_s + \frac{1}{D'_s} \right) \cdot \gamma_e \quad (2.2)$$

γ_p :大地震動時における建築物の最大層間変形角, C_{op} :大地震動時の標準せん断力係数 (1.0 以上), C_{oe} :中地震動時の標準せん断力係数 (0.2 以上), γ_e :中地震動時における建物の地上部分に生じる水平方向の層間変形角, D'_s :保有水平耐力の余力を考慮し, 構造特性係数を補正した係数 $D'_s = D \cdot Q_u / Q_{un}$, 本試験体の $\gamma_e = 0.003(\text{rad})$, $D'_s = 0.6$ より, $\gamma_p = 0.017(\text{rad})$ より, 図 2.24(a)の最大変形角 $\gamma_{max} = 0.017(\text{rad})$ と一致した.

2.8.3 大地震動の損傷状況

本試験体は耐震安全性の分類 I 類^{2.3)}相当として, 大地震動後, 構造体を補修せず建築物を使用できることを目標として設計した. 一方, 中低層建物の耐震性能グレードの判定を目的とした JSCA 性能設計説明書【耐震性能編 (簡易法)】^{2.15)}では, 基準級相当となり, 極めて稀に発生する地震時の被害の程度として中破 (～大破) が予測される. 表 2.17 に加振後の主な損傷状況を示す. JMAKOB50%X 方向加振では補修の必要性はないが, それより大きな加振では補修が必要な損傷を確認した. 損傷を予測するには, 想定する地震力の大きさとその必要性能をより明確に定義する必要があると考える.

表 2.17 加振後の主な損傷状況

入力地震動	損傷状況
JMAKOB50%X	アンカーボルトにわずかな伸びを確認
OS-2 XY 方向 70%	BPL 下のモルタルが損傷, アンカーボルトに顕著な伸びを確認
JMAKOB50%XYZ	アンカーボルトが破断

2.9 まとめ

本章では E ディフェンスで実施した病院建物試験体の震動台実験の試験体の設計方針, 事前数値応答解析結果, 実験結果の概要, 実験後の数値応答解析, 簡易評価方法の推定値の精度について述べた. 耐震試験体は, 「官庁施設の総合耐震・対津波計画基準」^{2.2)}の耐震安全性の分類 I 類相当として, 大地震動後, 構造体を補修せず建築物を使用できることを目標として設計した. 免震試験体は免震装置に米国では一般的であり, 日本でも中低層建物を中心に普及が拡大している球面すべり支承を用いた. 耐震試験体と免震試験体には, 医療従事者と協議の上で, 一般的に必要なとされる医療機器を設置した. 以下にその要点をまとめる.

- 耐震試験体は 1 次設計時相当の地震力では弾性範囲留まり, 2 次設計時相当の地震力では, 最大層間変形角で 0.018rad に達した. 事前数値解析では想定していた仕上

げ荷重が試験体より大きく固有周期が異なり、2 割程度変形が大きくなった。

- 実験後の数値解析により剛性、耐力、最大変形において実験との対応が見られた。
- 簡易法による推定においても、1 方向入力における初期剛性や最大変形においては一致した。一方 2 方向入力については、露出柱脚における 2 軸曲げに対するモデル化に課題があることを確認した。損傷状況の予測においては精度良く予測した性能設計が現段階においては難しいことを確認した。

第 2 章の参考文献

- 2.1) センクシア株式会社：ハイベース工法総合カタログ
- 2.2) 株式会社竹中工務店 HP：
<https://www.takenaka.co.jp/solution/needs/earthquake/service29/index.html>
- 2.3) 国土交通省大臣官房官庁営繕部：官庁施設の総合耐震・対津波計画基準（平成 25 年制定）
- 2.4) 一般社団法人日本建築センター：2018 年版 冷間成形角形鋼管設計・施工マニュアル
- 2.5) 日本製鉄株式会社 HP：
<https://www.nipponsteel.com/product/construction/handbook/pdf/3-24.pdf>
- 2.6) フラット工業会 HP：<https://www.flatdeck.jp/flatdeck/>
- 2.7) 日鉄建材株式会社 HP：<https://www.ns-kenzai.co.jp/a2cynos.html>
- 2.8) 国土交通省気象庁：強震波形（平成 7 年(1995 年)兵庫県南部地震）
https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/kyoshin/jishin/hyogo_nanbu/index.html
- 2.9) MLIT (Ministry of Infrastructure, Transport and Tourism, Housing Bureau), Building Guidance Division: Chokosokenchikubutsuto ni okeru nankaitorafu zoi no kyodaijishin niyoru choshukijishindo heno taisa など it suiteite (Countermeasures against Long-period Ground Motions Caused by a Large Earthquake along the Nankai Trough in High-rise Buildings, kokujushi Vol. 1111, June, 2016 (in Japanese) 国土交通省住宅局建築指導課：超高層建築物などにおける南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動への対策について、国住指第 1111 号ほか，2016.6
- 2.10) 株式会社竹中工務店 HP：
<https://www.takenaka.co.jp/solution/needs/earthquake/service30/index.html>
- 2.11) 正月俊行，翠川三郎：長周期地震動による超高層住宅での家具群の地震時挙動シミュレーション，日本地震工学会論文集第，2015 年 15 巻 6 号 p. 6_1-

6_11(DOI: https://doi.org/10.5610/jaee.15.6_1)

- 2.12) M. Kurata et al, Holistic Seismic Assessment of Critical Buildings with Due Consideration of Non-Structural Component and Equipment, Research Materials of Disaster Prevention Research Institute, 2022.7 (in Japanese) 倉田 真宏ほか 11 名, 災害時重要施設の高機能設備性能評価と機能損失判定, 防災科学技術研究所研究資料, 2022.7(DOI: <https://doi.org/10.24732/NIED.00003477>)
- 2.13) 株式会社構造システム HP :
<https://www.kozo.co.jp/program/kozo/snap/index.html>
- 2.14) 日本建築学会：建築物の減衰と振動, 2020 年 12 月
- 2.15) JSCA (JAPAN STRUCTURAL CONSULTANTS ASSOCIATION): JSCA Performance Design Manual 2021 [Seismic Performance (Simplified Method)], 2023.3 (in Japanese)JSCA 性能設計説明書 2021 年版【耐震性能編 (簡易法)】, 一般社団法人日本建築構造技術者協会, 2023.3

3. 医療機器の地震時挙動

3.1 はじめに

本章では、地震動と機器の転倒や移動量との関係について、キャスターの摩擦係数と転がり摩擦係数を評価した要素実験の結果を整理し、第2章で説明した実大病院試験体の振動台実験で獲得した医療機器の挙動と床応答の関係について考察する。過去に修士論文研究の一環として京都大学で実施された要素実験^{3.1)}では、床材などを変数にしたキャスター付き台車の引張試験を実施し、医療機器の移動量に影響する摩擦係数を評価している。振動台実験結果の分析では、特に医療機器の管理区分などを考慮して、転倒や衝突、回路のはずれなどによる医療継続性への影響を分析した。

3.2 キャスター付き台車による床材の要素実験の分析

キャスター付き医療機器の移動量に対する機器重量、キャスターの種類、床材材質の影響を調査するため、市川ら^{3.1)}は図3.1に示す試験装置を製作して摩擦係数の同定に関する要素実験が実施した。床材を貼ったRCスラブに医療用キャスターで支持された台車を載せており、台車には、1枚30kgの鉄板錘を6枚積載できる。左側の鉄骨架台に固定した電動ウインチを用いて台車を静止状態からワイヤで引っ張り、引張荷重と変位を計測した。床材メーカーと協議の上、病院施設で使用されるシート材として、表3.1に示す6種類の材料を用いた。実験に使用された医療機器用のキャスターは、許容荷重が約100kg、直径が125mmの単輪（32mm幅の車輪1つ）と双輪（18mm幅の車輪2つで全幅は70mm）である。台車を設置すると同時にキャスターが床材にめり込んだが、最も柔らかいTAS58でも90分後にはレーザー変位計で計測した台車の沈み込み量が一定となり、沈み込み量が一定になった後に引張実験を実施している。

一例として、キャスターをフリーにした単輪の台車をTAS58上で15分静止させた後に試験した結果を図3.2に再掲する。引張荷重はワイヤに作用した軸力で、ロードセルを用いて計測している。キャスターの初期角度を変数とし、進行方向に対して0度（順向き）、90度（直交向き）、180度（逆向き）で実験を繰り返している。順向きの場合、最初のピーク荷重で沈み込みを抜け出すが、ウインチの巻き速度よりも台車の速度が大きい場合にはワイヤが弛むため引張荷重が小さくなる。速度が一定となりピーク値が安定した状態で転がり摩擦係数を評価した。また、最初のピーク値から転がり摩擦係数を引いた値を沈み込み係数と定義した。直交向きの場合、第1ピークでキャスターが鉛直軸回りに回転し、第2ピークで沈み込みを抜け出す。第2ピークは順向きの第1ピーク値とほぼ等しかった。逆向きの場合、第1ピーク値までは順向きと同様に引張方向に変位しピーク値も同様となっているが、その後、各キャスターが回転して台車が直交方向に変位したため、引張方向のピーク荷重は一定となった後に再び増大している。

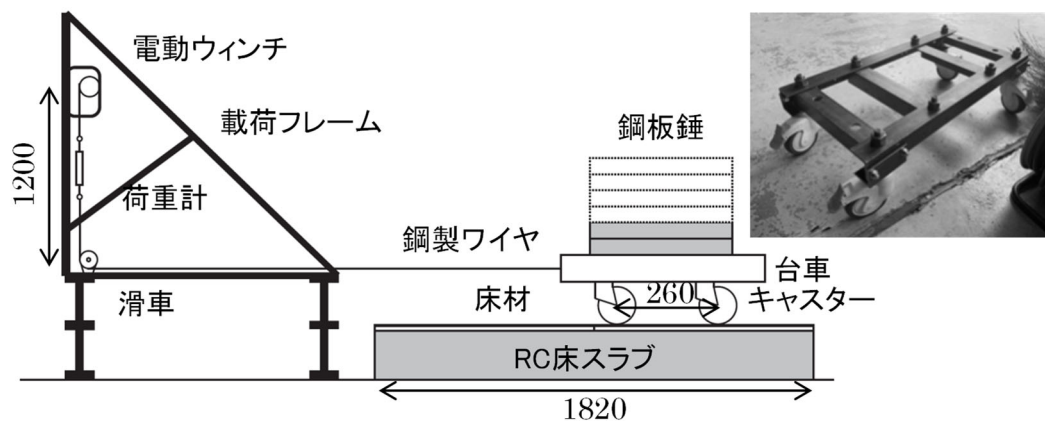


図 3.1 床材に載せたキャスター付き台車の引張実験^{3.1)}

表 3.1 床材の種類^{3.1)}

床材	材料	厚さ (mm)	特徴
AC60	発泡複層床ビニルシート	6.0	分厚い，衝撃吸収性
TAS58	AC28 の下に弾力性のある発泡シート	5.8	分厚い，衝撃吸収性
AC28	発泡複層床ビニルシート	2.8	やや厚い，衝撃吸収性
MJ20	複層ビニル床シート	2.0	最も一般的，耐久性あり
MF20	単層ビニル床シート	2.0	耐動荷重性
CL20	複層ビニル床シート	2.0	防滑性

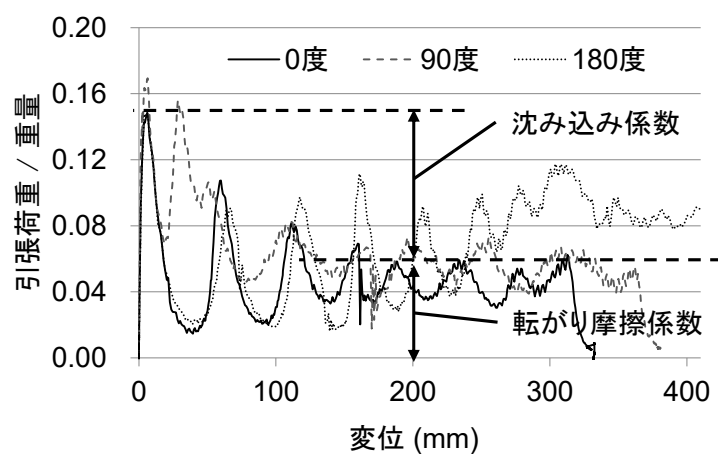


図 3.2 結果の例と各係数の定義（単輪，TAS58，15 分静止後）^{3.1)}

文献 3.1)に報告のある 6 種類の床材と 2 種類のキャスターの組み合わせで 90 分静止後に順向きで試験について、データを分析した結果を表 3.2 にまとめる。キャスターフリーの条件で得られた転がり摩擦係数と沈み込み係数、およびロックの条件で得られた床材と車輪の摩擦係数と沈み込み係数を記載している。各係数の算定では、計測荷重を台車重量で除した無次元量を用いている。各係数に対する台車の重量の影響は小さかったため、台車重量が 196kg の場合のみを記載する。なお、報告によれば 76kg 以下では電動インチの巻き速度を台車の速度が超過する時間が長く、試験結果は安定していない。

転がり摩擦係数は、厚く柔らかい床材の方が大きくなった。病室等で最も一般的に使用される MJ20 を基準にすると、手術室などで使用される硬い MF20 で約半分、高齢者施設などで転倒時の事故を軽減されるために用いられるやや柔らかい AC28 で 2 倍、最も柔らかい AC60 や TAS58 では 3 倍以上の差がある。単輪と双輪の比較では、最も柔らかい床材以外では顕著な差はなかった。沈み込み係数は柔らかい床の方が大きく、AC60 では 0.26、MJ20 では 0.14 と 2 倍程度の差があった。転がり摩擦係数に比べると床材間の差は小さいが、分厚い床材や防滑性のある床材で摩擦係数がやや高くなった。沈み込み量は台車重量に依存するが、参考までに表中に記載する。

3.4 節で分析結果を報告する振動台実験では、AC28 と MJ20 を使用している。単輪でキャスターをフリーとした場合には、AC28 と MJ20 の転がり摩擦係数はそれぞれ 0.038 と 0.017 で約 2 倍の開きがあり、沈み込み係数はそれぞれ 0.16 と 0.14 で約 1 割の差がある。キャスターをロックした場合では、AC28 と MJ20 の摩擦係数はそれぞれ 0.29 と 0.23 で約 2 割の差があり、沈み込み係数は 0.10 と 0.11 と大小が逆転している。医療機器に地震による加速度が作用した場合では、キャスターがフリーの場合には AC28 で約 0.20G (G は重力加速度)、MJ20 で約 0.16G で医療機器が動き出し、ロックされている場合にはそれぞれ 0.39G と 0.34G で医療機器が動き出す。

表 3.2 引張試験結果 (台車重量 196kg, 90 分静止後)

床材	キャスターフリー		沈み込み 係数, 単輪	キャスターロック		沈み込み量 (mm)
	転がり摩擦係数			摩擦係数 単輪	沈み込み 係数, 単輪	
	単輪	双輪				
AC60	0.076	0.041	0.26	0.31	0.13	3.97
TAS58	0.051	0.036	0.19	0.26	0.13	2.73
AC28	0.038	0.031	0.16	0.29	0.10	0.44
MJ20	0.017	0.016	0.14	0.23	0.11	0.07
MF20	0.009	0.006	0.10	0.23	0.08	0.08
CL20	0.020	0.018	0.15	0.26	0.13	0.11

3.3 振動台実験における最大床応答

第 2 章で説明した実大病院試験体の振動台実験で計測された床応答加速度を分析する。耐震試験体と免震試験体の X・Y 各方向の最大床応答加速度を表 3.3 と表 3.4 に示す。ただし、XY 方向はベクトル最大の床応答加速度である。耐震試験体では、最大床応答加速度は ID6 の 4 階で 1G を上回り 1,200cm/s² 程度となったが、免震試験体ではいずれの加振でも 200cm/s² 以下となり、最大で ID5 の 3 階で 170 cm/s² 程度であった。3.2 節よりキャスターロックの摩擦係数が 0.2 程度であることより、耐震試験体では ID、2 でも 3,4 階では医療機器に移動が生じ、免震試験体ではいずれの加振においても医療機器に移動が生じないことが予想される。

図 3.3 に ID3 および ID4 の振動台上および耐震試験体 3, 4 階と免震試験体 2, 3 階の床加速度応答スペクトルを示す。医療機器の固有周期自体は機器の諸元で大きく変わるが、人見ら^{3.2)}の研究によれば周期 0.5 秒以上の入力特に機器の転倒を引き起こす可能性が高い。耐震試験体の床加速度応答スペクトルでは、0.5 秒超の領域に大きな入力成分が確認される。耐震試験体では ID3 と ID4 とともに 1 階床に比べて応答が増幅され、特に建物の固有周期に近い 0.8 秒程度が大きくなっている。応答加速度のピーク値は ID3 で 4 階は 1 階の 12 倍程度、ID4 で 4 階は 1 階の 4 倍程度の加速度応答となり、ID4 に比べて ID3 の方がピーク値の増幅率は大きくなった。その結果、最大床応答加速度は、ID3 は ID4 の半分程度となり、床加速度応答スペクトルの最大値の比較では ID3 は ID4 の 80% 程度となった。免震試験体では ID4 では 2, 3 階ともすべての周期

表 3.3 耐震試験体の最大床応答加速度（単位：cm/s²）

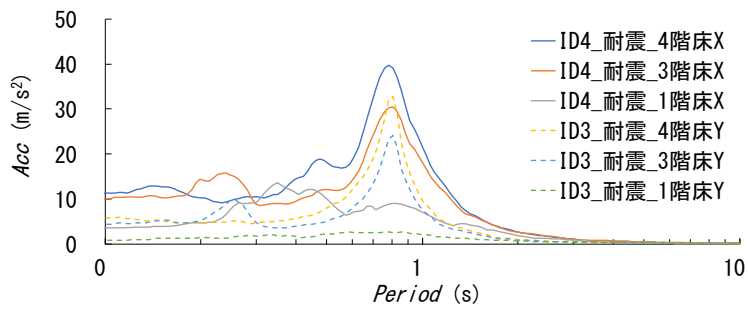
階	ID 1 (X)	ID 2 (Y)	ID 3 (Y)	ID 4 (X)	ID 5 (XY)	ID 6 (XY)
4	283	354	440	855	979	1161
3	249	280	395	799	839	1060
2	176	180	244	406	572	878
1	120	136	74	357	283	529

表 3.4 免震試験体の最大床応答加速度（単位：cm/s²）

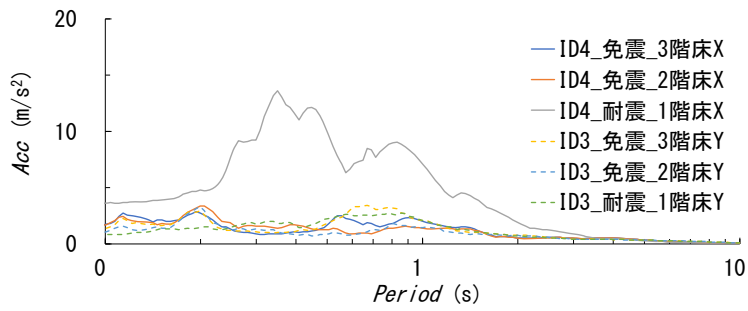
階	ID 1 (X)	ID 2 (Y)	ID 3 (Y)	ID 4 (X)	ID 5 (XY)	ID 6 (XY)
3	96	91	83	89	172	130
2	79	66	52	92	114	115
1	80	64	46	80	131	101

帯で振動台上の床応答に対して応答が低減されているのとともにスペクトルが平滑化されている。一方、ID3では、2階床では応答が低減されているのに対し、3階床の応答は振動台上の床応答と同程度である。これらより、2、3階の振動台に対する床応答加速度の低減率からID4の方がID3にくらべて免震効果が大きいことが分かる。

得られた床応答加速度からエネルギースペクトルを求めると（図3.4）、耐震試験体、免震試験体ともそれぞれ1次の固有周期でピーク値となった。耐震試験体のID3のピーク値はID4の1.75倍程度、免震試験体のID3のピーク値はID4の4倍程度となっている。ID4よりもID3の継続時間が長く、入力エネルギーが大きくなったため被害が大きくなった。

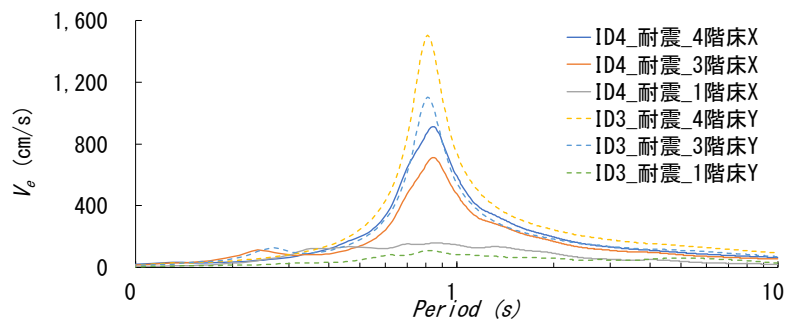


(a) 耐震棟

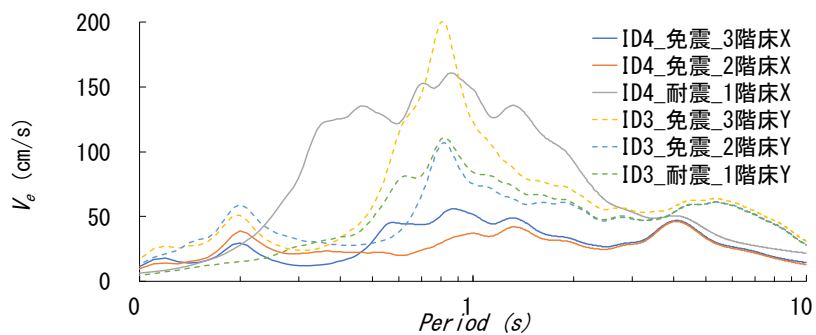


(b) 免震棟

図 3.3 床加速度応答スペクトル



(a) 耐震棟



(b) 免震棟

図 3.4 エネルギースペクトル

3.4 機器の動き出しについて

実験で録画した居室内の動画の分析^{3.3)}と各加振後に測定した残留変位から医療機器の最大方向の最大移動量を推定した。最大床応答加速度と機器の移動量の関係を分類①, ②に分けて図 3.5 に示す。分類の定義は 2.2.7 項に記載のように本稿では患者を載せる機器（分類①）とその他の医療機器（分類②）で分類した。分類①の機器は最大床応答 400cm/s²程度まで、分類②の機器は 150cm/s²程度まではほとんど移動しなかった。これらの床応答加速度を重力加速度で割った値（0.41 と 0.15）は、3.2 節で説明した要素実験で得られたキャスター固定での摩擦係数と沈み込み係数の合計値（0.35～0.45）およびキャスターフリーでの転がり摩擦係数と沈み込み係数の合計値（0.15～0.16）と良く対応する。分類①の機器では、最大移動量と最大床応答加速度の相関は高くない。対角ロックの機器は回転しながら移動した。ベッドと検査台は、経年劣化などの影響でロックが緩い場合があり、加振中にロックが外れ大きく移動した。分類②の機器では応答

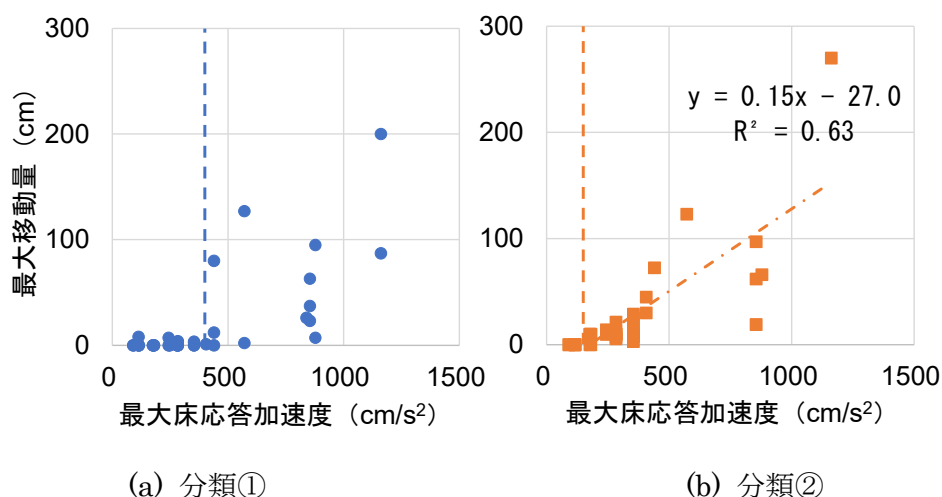


図 3.5 最大床応答加速度と機器の移動量の関係

表 3.5 床材と移動量の関係（単位：cm）

機器	固定条件	床材	ID1	ID 2	ID 3	ID 4
ECMO	全点ロック	AC28	10	9	転倒	24
		MJ20	20	29	転倒	43
ベッドサイドモニタ	前面ロック	AC28	10	19	—※2	19
		MJ20	21	25	—※2	転倒
ベッド	ロック/フリー※1	AC20	4	3	12	23
		MJ28	3	3	35	37

※1 加振途中にロックが外れてフリーとなるケースが多かった。

※2 カメラアングルでのフレームアウトした場合を示す。

加速度が小さい領域で移動量と相関が高い一方で、応答加速度が大きい領域では相関は高くない。前面ロックではロッキング挙動を伴ってフリーの場合と同様に移動量が大きくなった。参考までに、分類②の移動量を床加速度応答から予測する際の近似式を図中に示す。

床材の影響を確認するため、表 3.5 に同一階で異なる床材に同じ機器を配置した ECMO、ベッドサイドモニタ、ベッドの挙動をまとめる。MJ20 に比べて転がり摩擦係数と摩擦係数が大きい AC28 上に設置された機器の移動量が小さくなる傾向が確認された。ID5 と ID6 は転倒や衝突が多いため表に含めない。

3.5 移動量と加振継続時間について

医療機器の移動量と床応答継続時間の関係性を評価するために、図 3.6 に応答加速度の 2 乗を時間積分したものに $\pi/2G$ (G は重力加速度) を乗じた Arias Intensity (IA) と機器の移動量の相関関係を示す。分類①では、 IA が 10m/s 以上で急激に最大移動量が増えている。分類②では、 IA が小さい領域から最大移動量が増え始めて、10m/s 以上で急激に増加する。これは BH が分類①と比較して分類②の方が小さいことが原因と考えられる。が参考にとどまるが、機器の最大移動量と IA の関係を対数線形回帰した場合の近似式を図中に示す。ここでは、衝突や転倒が起きる前までのデータを使用しているため、 IA が 50 m/s を超えた ID5 の結果は含めていない。 IA が小さい領域から最大移動量が増え始める分類②の方が回帰モデルとの相関が高い。ただし、ばらつきが大きいので、床応答から最大移動量を予測式としては誤差が大きく参考程度に留まる。

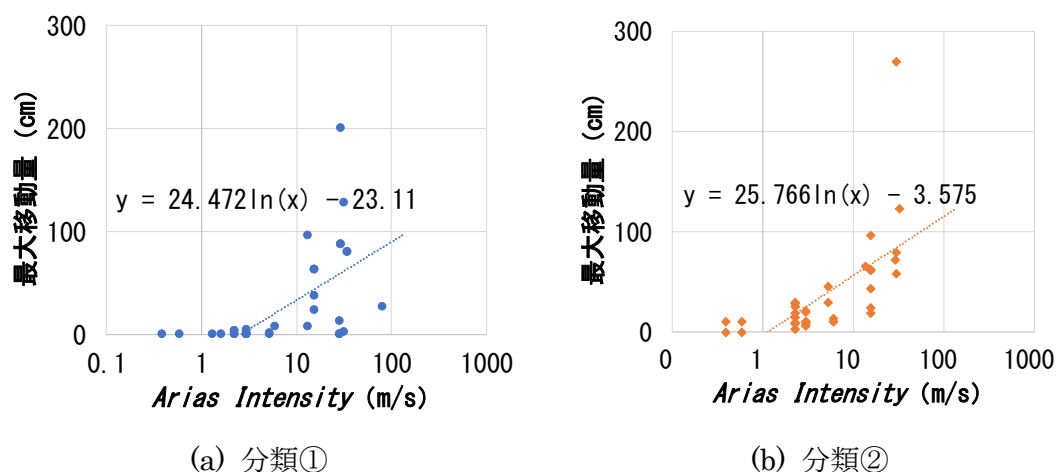


図 3.6 Arias Intensity と機器の移動量の関係

3.6 機器の転倒について

転倒はすべて耐震試験体で、点滴スタンド、ベッドサイドモニタ、人工呼吸器、IABP、

表 3.6 転倒が生じた医療機器

機器	B/H	階	床材	ID	A_{max}	I_A	V_{max}	転倒
点滴スタンド	0.43	4	AC28	3	440	29	53	ii
IABP	0.56	4	AC28	3	440	29	53	i
ECMO	0.49	4	AC28	3	440	29	53	i
ECMO	0.49	4	MJ20	6	1224	29	166	i
点滴スタンド	0.43	2	MJ20	4	406	5	63	i
ベッドサイドモニタ	0.45	4	AC28	6	1224	29	166	ii

ECMO に生じた。いずれも分類 B②であり、キャストの間隔 (B) を機器の重心高さ (H) で除した指標 B/H と転倒との相関を確認した。転倒は、i) 機器単独、ii) 壁や機器との接触によるバランスの喪失、iii) 壁がない場所で床を踏み外したバランスの喪失がある。iii) は実際には起こりえない。表 3.6 に i), ii) の転倒が生じた医療機器の床材、最大床応答加速度、速度、 I_A 、転倒の種類を示す。床材の種類によらず、加速度 400cm/s^2 以上、速度 50cm/s 以上で転倒が見られた。ベッドサイドモニタは単体では転倒しなかったが、壁との接触により転倒した。これらの機器の B/H は人見らにより報告^{3.2)}されている転倒被害が増加する B/H が 0.4 に近くやや不安定である。

3.7 各室の医療行為継続性の分析

試験体内に再現された診療室の中で、特に災害時に影響を大きいと考えられる患者が利用する、1) コロナ重症患者病室、2) NICU、3) 手術室について、医療行為の継続性を分析する。各室の各加振の挙動を表 3.7 に示す。加振後の状況から、患者に接続された回路が外れたり、高度管理医療機器が転倒や接触を起こしたりした。医療行為の継続が難しい室をグレー色で示す。

免震試験体は、すべての加振において最大床応答加速度は 200cm/s^2 以下であり、いずれの医療機器もほとんど移動することなく、加振中も患者は安全で、加振後に治療の継続が可能であった。

耐震試験体は、コロナ重症患者病室は ID2 までは分類②の医療機器に多少の移動が生じるものの復旧は容易な程度であった。床応答加速度が 400cm/s^2 を超え、継続時間が長い ID3 では B/H の小さい IABP や ECMO が転倒し (写真 3.1)、点滴スタンドが壁と衝突し転倒が生じた (写真 3.2)。ベッド自体の移動量はわずかながらもベッドサイドモニタや人工呼吸器も 1m 程度移動し、機器の復旧に要する時間がかかる。XY 合成の床応答加速度が 980cm/s^2 を超える長時間地震動 ID5 では、ID3 と同様に機器の転倒に加え、ベッド自体も MJ 仕上げの上では 80cm 程度移動した。XY 合成の床応答加速度が約 $1,200\text{cm/s}^2$ の ID6 では、周囲の医療機器の多くが転倒や 1m 以上の移動量とな

り、MJ20 上のベッドはロックが解除され一瞬にして 2m 程度移動した。ECMO が急に転倒し、ECMO 回路の固定が外れる可能性が指摘された。また一瞬のベッドの移動より、ECMO のカニューレが抜去され、ECMO が停止する危険がある。

NICU では ID2 加振まで保育器も周辺機器も大きな移動はなかった。最大床応答加速度 440cm/s^2 程度の長時間地震動 ID3 加振で、インファントウォーマは 1m 程度、保育器も 60cm 程度移動した。保育器自体の移動量の大きさに加え、人工呼吸器が 1m 程度人形の脚側へ移動したために、保育器では人工呼吸器回路が挿管チューブと外れた（写真 3.3）。インファントウォーマでは人工呼吸器回路の余長がなくなり、挿管チューブが固定されているため、新生児の口を引っ張った。ID4 加振では、インファントウォーマ側の人工呼吸器が転倒し、人工呼吸器回路が機器の接続口から外れた。また、ID3 まではほとんど動かなかった新生児ベッドも ID4 からは大きく移動し、ベッド同士の激しい衝突を確認した。ベッド内の新生児に危険を及ぼす可能性がある。インファントウォーマ、保育器、新生児ベッドでは、 B/H が小さいものほど移動量が大きくなった。

手術室は ID2 までは最大床応答加速度 300cm/s^2 以下であり、人工心肺装置やシリンジポンプなどがわずかに移動する程度であった。最大床応答加速度 400cm/s^2 程度に達した長時間地震動 ID3 では、人工心肺装置や電気メスは手術台に接触し、シリンジスタンドは人工心肺装置に、麻酔器は壁に接触するなど、機器同士や周囲の非構造部材との接触が多くみられた。ID4 加振では人工心肺装置が手術台に激しく衝突した。シリンジスタンドは移動し、輸液回路を引っ張った。XY 合成の床応答加速度 850cm/s^2 程度の長時間地震動 ID5 加振では、手術台周りのほとんどの機器が大きく移動し、機器の電源コード同士が絡まり、機器が電源コードを引っ張った。XY 合成の床応答加速度が $1,100\text{cm/s}^2$ 程度の ID6 加振では、心筋保護液装置が人工心肺装置との衝突により転倒した（写真 3.4）。

生命維持に必要な機器が停止した場合は手で動かすことになり、手を止めると患者が死亡するリスクのある高度管理医療機器でも、人工呼吸器や IABP、ECMO は B/H が小さいため転倒が生じやすく、地震時の患者へのリスクが高い。転倒が生じなくとも壁や医療機器同士の接触がいずれの室でも確認された。このような被害が高度管理医療機器に生じると、継続使用が難しく、移動についても対策の必要性が認められた。また、移動は患者へ接続した回路の脱落にもつながる。

首都直下地震 JMA 神戸と長周期地震動 OS2 の地震動の特性に応じた被害の影響を検討するため 4 階の ID3 と ID4 の床応答を比較すると、 PFA と PFV は ID3 にくらべて ID4 が約 2 倍になっているが、 IA は ID3 が ID4 の約 2 倍になっており、医療行為の継続使用が難しいと判定された部屋も多くなっている。4 階の ID5 と ID6 も同様に PFA と PFV は ID6 の方が ID5 よりも大きいが IA に関しては ID5 の方が 5 倍程度大きくなっており、医療行為の継続使用が難しいと判定された部屋も多くなっている。以上より、継続時間による影響が医療行為の継続使用に与える影響が大きいと考えられる。

表 3.7-1 主要な室における医療機器の挙動と医療行為継続性
(単位 A_{max} : cm/s², V_{max} : cm/s, I_A : m/s)

ID	耐震試験体		
	コロナ重症患者病室 (4F)	NICU (4F)	手術室 (3F)
1	$A_{max}=283$, • 周辺機器が 10cm 程度移動した. • 治療に影響はない.	$V_{max}=38$, $I_A=3$ • 周辺機器が 10cm 程度移動した. • 治療に影響はない.	$A_{max}=249$, $V_{max}=28$, $I_A=2$ • 周辺機器が 10cm 程度移動した. • 治療に影響はない.
	$A_{max}=354$, • 周辺機器が 30cm 程度移動した (回路の外れや挿管チューブの抜けは生じない.) • 振動中は治療を中断する必要がある.	$V_{max}=46$, $I_A=2$ • 周辺機器が 10cm 程度移動した. • 治療に影響はない.	$A_{max}=280$, $V_{max}=34$, $I_A=1$ • 周辺機器が 10cm 程度移動した. • 治療に影響はない.
3	$A_{max}=440$, $V_{max}=53$, $I_A=29$ • IABP と ECMO が転倒し (写真 1), 点滴スタンドが壁と接触し転倒した (写真 2). • 人工呼吸器は 1m 程度移動した. • 機器復旧に要する時間は長い.	$V_{max}=53$, $I_A=29$ • 保育器も周辺機器も 1m 程度移動した. • 保育器の人工呼吸器の回路が外れた (写真 3) ため, 治療に影響がないか確認が必要となる. • 機器の損傷はなく復旧には時間はかからないため, 確認後に治療が再開できる.	$A_{max}=395$, $V_{max}=40$, $I_A=16$ • 機器同士や壁との接触が生じた. • ゆっくりとした移動のため, スタッフにより機器の移動を抑えられる. • 機器の位置を戻す必要はあるが, 治療は継続できる.
4	$A_{max}=855$, $V_{max}=116$, $I_A=15$ • ECMO がベッドと接触するも血液回路は抜けない. • 人工呼吸器が大きく移動し, 呼吸器回路が外れる可能性がある. • 医療機器の転倒はなく, 治療は継続できる.	$V_{max}=116$, $I_A=15$ • 保育器が 60cm 程度移動し, 引っ張られた輸液チューブが外れる可能性がある. • インフュージョンポンプは 1m 程度移動し, 人工呼吸器は転倒したため, 呼吸器側回路の接続が外れた. • 新生児ベッド同士が接触した. • 復旧に時間はかからないが, 一旦中断して動作確認が必要である.	$A_{max}=799$, $V_{max}=96$, $I_A=10$ • 人工心肺と手術台が激しく接触した. • シリンジポンプがホースを引っ張る. • 機器が多く, 移動によりコードやホースを引っ張る. • 実際には人工心肺とベッドの間には術者があり, 術者が挟まれて怪我をする可能性がある.

表 3.7-2 主要な室における医療機器の挙動と医療行為継続性

(単位 A_{max} : cm/s², V_{max} : cm/s, I_A : m/s)

ID	耐震試験体		
	コロナ重症患者病室 (4F)	NICU (4F)	手術室 (3F)
5	$A_{max}=979$, $V_{max}=143$, $I_A=133$ • IABP, ECMO が転倒した. • 重要な機器が正常動作するかの確認が必要となり, 一時的に医療行為を中断せざるをえない. • 機器の転倒によりスタッフ, 患者が負傷する可能性がある. • 復旧時間は, 重要な機器と接続回路の損傷により異なる.	• 保育器や周辺機器が 1~2m 移動した. • 重要な機器の転倒は無く, 装置自体の損傷は少ない. • 新生児ベッドが一斉に大きく動き, 壁に衝突し新生児に衝撃を与えた. • 保育器と人工呼吸器の相対変位が大きく呼吸器側で回路が外れた. インフュージョンポンプも大きく移動し, 強く引っ張られた呼吸器回路と挿管チューブの抜けがないか確認が必要である. • 一時的に医療行為を中断せざるをえない.	$A_{max}=839$, $V_{max}=127$, $I_A=81$ • 人工心肺がベッドの足側へ 1m 移動. 回路の固定が外れて, 人工心肺のカニューレ (管) が外れる可能性がある. • 麻酔器やベッドサイドモニター, シリンジポンプやスタンドがガスホース, 電源コードに絡まりながら移動し, シリンジポンプやスタンドの転倒により, 薬剤投与は一旦中断となる. • 人工心肺装置の回路に問題が無ければ, 確認のうえ, 短時間で手術は再開できる.
6	$A_{max}=1161$, $V_{max}=166$, $I_A=29$ • 多くの医療機器が 1m を超えて移動した. • ECMO が勢いよく転倒したため, 回路の固定が外れる可能性がある. • 人工肺が床に衝突したため, 人工肺破損の可能性はある. • 全装置の動作確認が必要である. • 人工呼吸器は移動量も大きく, 回路接続部の外れや挿管チューブが抜けてしまう可能性あり. ECMO のカニューレ (管) の抜け, 挿管チューブの抜けが同時に発生した場合, 患者は非常に危険な状態となる.	• 保育器, 周辺機器は 1m 程度移動するも方向が同じであったため, 回路の外れや挿管チューブの外れは少ない. • 点滴スタンドとベッドサイドモニターが転倒した. • 人工呼吸器, 保育器と大きく移動したが, 両方同じ方向に移動したため, 回路の外れや挿管チューブの抜けは発生しなかった. • 人工呼吸器, インフュージョンポンプの転倒もなく呼吸器の損傷も無いため, 治療は継続できる.	$A_{max}=1060$, $V_{max}=146$, $I_A=21$ • 人工心肺装置と手術台が衝突し, 心筋保護液装置が転倒した (写真 4). • 外科医が人工心肺装置と手術台に挟まれる可能性があるため, 手術は一旦中断する必要がある. • 心筋保護液装置が転倒したので, 装置の点検が必要となる. 装置が損傷して作動しなければ, 手術の進行に大きな影響を与える.



写真 3.1 IABP・ECMO 転倒



写真 3.2 点滴スタンド転倒



写真 3.3 保育器

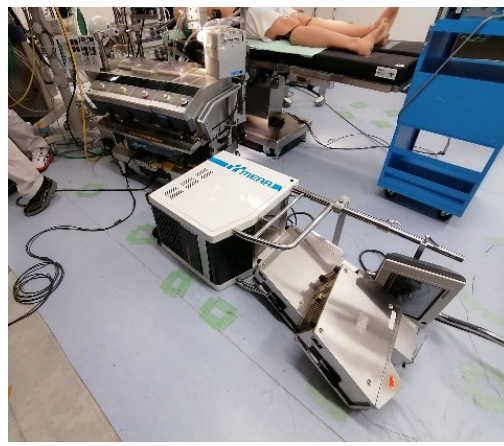


写真 3.4 手術室

3.8 まとめ

地震時の医療機器の挙動について実験から明らかになった知見を以下にまとめる。

- (1) 過去に実施されたキャスター付き台車の引張試験から、振動台実験で使用する床材について、転がり摩擦係数、沈み込み係数、摩擦係数を整理した。床材に厚みがあり柔らかい場合には、転がり摩擦係数は2倍程度異なった。病院での作業効率を考えると厚さの限度があるが、やわらかく厚みのある床を採用することで、沈み込み係数や転がり摩擦係数を増やし地震時の移動量を低減できる可能性がある。
- (2) 振動台実験でキャスターがロックされた医療機器が動き出した加速度の約 400cm/s^2 は、要素実験で得られた摩擦係数と沈み込み係数を足した値と良く対応した。重心の高い機器では、キャスターのロックが外れた機器や、前面ロックでロッキングが生じた機器が多く、約 150cm/s^2 で動き出した。転がり摩擦係数と沈み込み係数を足した値と高い相関を示した。
- (3) 振動台実験では、直下型地震動より最大床応答加速度が小さかった長周期長時間地震動で、病院室内の被害が相当大きくなった。床加速度応答スペクトルのピーク値は同等で、エネルギースペクトルのピーク値は長周期長時間地震動の方が大きくなっており、室内被害の低減を目標とした設計では注意を要する。
- (4) 機器の転倒はキャスター幅を重心高さで除した比 (B/H) の小さい機器に生じやすい。機器単独または、壁や機器との接触によりバランスを崩して転倒するが、床材の種類によらず、加速度 400cm/s^2 以上、速度 50cm/s 以上で確認された。
- (5) 患者を載せる機器 (分類①) とその他の医療機器 (分類②) の移動量について、床応答加速度および継続時間の影響を考慮した Arias Intensity (IA) との相関を評価した。分類①では、 IA が 10m/s 以上で急激に最大移動量が増えている。分類②では、 IA が小さい領域から最大移動量が増え始めて、 10m/s 以上で急激に増加する。これは B/H が分類①と比較して分類②の方が小さいことが原因と考えられる。設計時の参考として、機器の最大移動量と IA の関係を対数線形回帰した場合の近似式を提示した。 IA が小さい領域から最大移動量が増え始める分類②の方が回帰モデルとの相関が高い。ただし、ばらつきが大きいので、床応答から最大移動量を予測式としては誤差が大きく参考程度に留まる。
- (6) コロナ重症患者病室、NICU、手術室における医療行為の継続性を分析した。転倒しなくても移動により壁や医療機器同士衝突により、高度管理医療機器などは継続使用が難しくなる。床応答加速度を低減することや機器の B/H を大きくすることを大地震時の医療継続性対策として検討していく必要がある。

第3章の参考文献

- 3.1) 市川諒：キャスター付き医療機器の地震時移動量推定における初期状態の影響評価，令和元年度京都大学大学院工学研究科建築学専攻修士論文
- 3.2) M. Hitomi, M. Kurata, S. Aida, M. Shimoto, K. Cho, S. Ohtsuru: Medical Equipment Seismic Performance Evaluation for Preventing Rocking and Falling, Transactions of the Japanese Society for Medical and Biological Engineering, 60 (6), 139-148, 2022 (in Japanese). 人見真由, 倉田真宏, 相田伸二, 下戸 学, 趙晃済, 大鶴 繁：地震時における医療機器のロッキング・転倒に関する危険性評価，生体医工学誌，60 (6), 139-148, 2022, (DOI: <https://doi.org/10.11239/jsmbe.60.139>)
- 3.3) GIPSON, J. et al.: Earthquake Response of Critical Equipment in a COVID-19 Room, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Structure II, pp. 973-974, 202

4. 球面すべり支承を用いた免震構造の挙動

4.1 はじめに

近年、免震建物の加速度応答をさらに低減するために、低摩擦係数の球面すべり支承 (LF-SSB: Low-Friction Spherical Sliding Bearing) の採用が日本で増加している。従来の滑り支承 (SSB: Spherical Sliding Bearing) は、すべり材料としてポリテトラフルオロエチレン二重織布を使用し、鏡面仕上げのステンレス鋼すべり板を使用している。LF-SSB は、すべり材料に潤滑剤を含浸させることで 0.013 のすべり摩擦係数を実現している。一般に、すべり支承は速度と面圧に依存性があり^{4.1)}、すべり摩擦係数が低い場合には、低面圧および低速度下でのすべり摩擦係数の変動がより顕著になる^{4.2)}。また、すべり出し時の静摩擦係数は一般的にすべり摩擦係数よりも大きい^{4.3, 4.4)}。これらの変動が上部構造と室内に設置される家具・什器・機器などの応答に与える影響は十分に調査されておらず、実物大の LF-SSB で免震された建物の振動台試験データも存在しない。

本章では、LF-SSB の要素試験と E-ディフェンス施設での LF-SSB で免震された実物大病院試験体の振動台実験を通じて、面圧、速度、静摩擦係数が免震性能に与える影響を検討した。要素試験では、製造のばらつき、速度依存性、面圧依存性を確認するためのデータセットを得た。通常の出荷前試験に加えて動的試験を実施した。振動台実験では、断層近傍の直下型地震動と長周期地震動を入力地震動として用いて、地震動の特性が免震性能に与える影響を調査した。さらに、すべり摩擦係数が病院室内に設置された医療機器の挙動に与える影響についてまとめた。

4.2 低摩擦球面すべり支承の特性

4.2.1 設計において考慮する不確定性

本研究で検討対象とした LF-SSB の概略図を図 4.1(a)に示す。一般的に、すべり支承はスライダーと呼ばれる移動体の上下に凹状の球面摺動板を配置したものである。スライダーの上下面には摺動材料としてポリテトラフルオロエチレン二重織布 (PTFE 材)

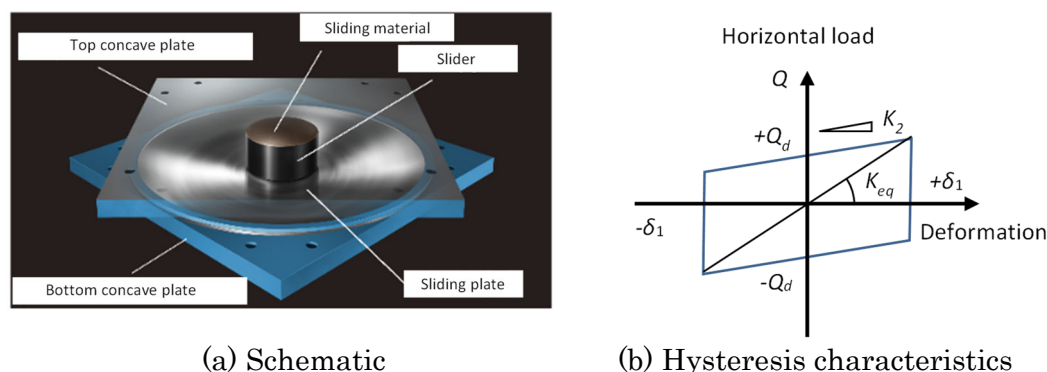


図 4.1 Low-Friction Spherical Sliding Bearing (friction pendulum)

が使用されている．LF-SSB では，PTFE 材に潤滑剤を含浸させ，公称摩擦係数 0.013 の低摩擦仕様としている．履歴特性は，図 4.1(b)に示す完全バイリニア型に近似される^{4.2)}．切片荷重 Q_d でスライダーがすべり始め，固有周期はすべり面の曲率で制御される水平二次剛性 K_2 に依存する．免震装置の見かけ上の固有周期は等価剛性 K_{eq} に依存し， K_{eq} はすべり変位に依存する．

LF-SSB の設計では，製造上のばらつきや，速度，繰り返し，面圧の依存性による不確定性を考慮する必要がある．製造メーカーが提供する設計式により切片荷重 Q_d と水平二次剛性 K_2 を計算する．

$$Q_d = \tau_q \cdot \mu \cdot P_V \quad (4.1)$$

τ_q ：製造ばらつき・面圧・速度・繰り返しによる変動係数

μ ：摩擦係数

P_V ：鉛直荷重

$$K_2 = \frac{P}{2 \cdot R_s} \quad (4.2)$$

K_2 ：水平二次剛性

P_V ：鉛直荷重

R_s ：すべり板球面半径

変動係数 τ_q は，面圧依存性 X ，速度依存性 γ ，および繰り返し依存性 C の積によって計算される．これらの依存性に関する式は，製造メーカーの実験データに基づいて，それぞれ式(4.3)～(4.5)に規定されている．

$$X = 20 \cdot \sigma^{-0.9} + 0.5 \quad (4.3)$$

$$\gamma = 1.03 - 0.55 \cdot 1.5^{-0.018V} \quad (4.4)$$

$$C = -0.05 \quad (4.5)$$

ここで σ は 面圧，そして V は速度とする．LF-SSB の標準面圧は 60MPa で，メーカー推奨の最小面圧は 30MPa である．面圧依存式によると，面圧がメーカー推奨の最小面圧の場合， Q_d は標準値から 43% 増加する^{4.3)}．また，すべり速度が 100mm/s から 400mm/s に増加すると，速度依存性の式(4.4)により Q_d は 33.5% 増加する．

4.2.2 LF-SSB の要素実験

4.2.2(a) 载荷試験機

LF-SSB は出荷前に認定により定められた方法で試験が実施される。試験には鉛直荷重下で水平荷重を与えることのできる 2 軸载荷試験機を用いる。本試験機には静的ジャッキと動的アクチュエーターが実装されており、静的ジャッキは一定の鉛直荷重として最大 22,000kN、最大水平荷重 2,000kN、動的アクチュエーターとして最大鉛直荷重 2000kN、最大水平荷重 ± 200 kN、最大速度 400mm/s の载荷が可能である。

4.2.2(b) 载荷条件

LF-SSB の認定载荷では、面圧 60MPa、载荷最大速度 20mm/s の定振幅正弦波の準静的载荷を 4 サイクル繰返す。本実験では準静的载荷に加えて、定圧および速度依存性を評価するために動的载荷も実施した。図 4.2 に载荷試験装置、表 4.1 に荷重条件をまとめる。選択した面圧は 30MPa と 60MPa、最大速度は 20mm/s と 400mm/s である。鉛直力は凹状の球面摺動板上を摺動させるため初期位置に対して $\pm 5\%$ 程度の変動が生じる。荷重振幅は、最大速度 20mm/s で ± 50 mm、最大速度 400mm/s で ± 200 mm とした。振動台実験に使用する 4 つのすべり支承に対して、各条件における载荷を 4 サイクル繰返した。

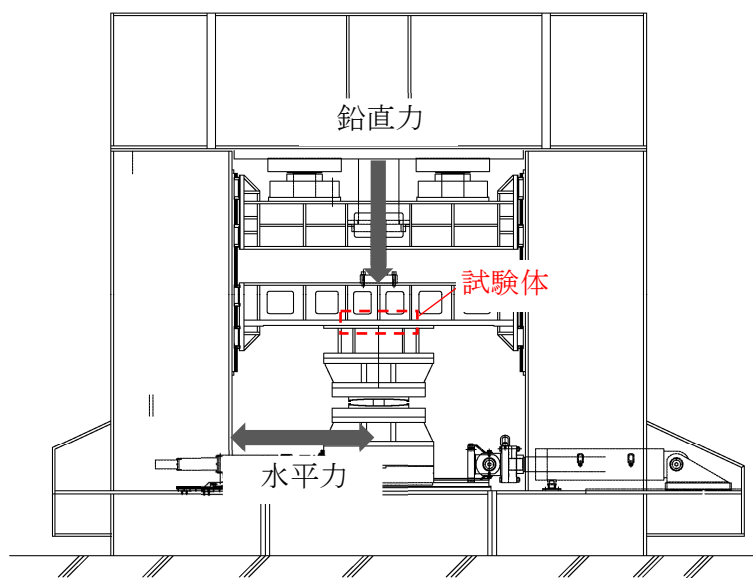


図 4.2 载荷試験装置

表 4.1 载荷試験条件

試験方法	制御波	軸力	試験速度	振幅
定振幅繰返し载荷	正弦波	60MPa	20 mm/s	±50mm
		30MPa, 60MPa	400 mm/s	±200mm

標準化された手順に従って、3 サイクル目の履歴挙動を評価し、摩擦係数を求めた。表 4.2 に試験結果を示す。400mm/s、標準面圧 60MPa の動的荷重条件下で、4 つのすべり支承の平均摩擦係数は 0.0106 であった。結果は公称値+0.013%に対して-18.4%であった。荷重速度が標準的な準静的荷重条件である 20mm/s まで低下した場合、4 つのすべり支承の平均摩擦係数は 0.0126 であった。この結果は、400mm/s での平均摩数 0.0106 の 1.19 倍であった。

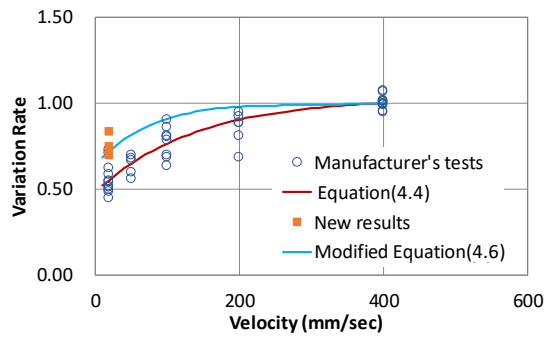
また図 4.3 に LF-SSB の製造メーカーが過去に行った実験と、依存関係式を用いて得られた予測値とのプロット結果を示す。図 4.3(a)では、速度依存式(4.4)を用いて予測した値よりも 34.6%大きい。また、面圧を 30MPa まで下げると、平均摩擦係数は 0.0179 となり、60MPa (0.0106) の 1.69 倍となった。また図 4.3(b)に示すように、面圧依存式(4.3)による予測値より 17.8%大きい結果となった。

低速荷重下での摩擦係数は、推奨される設計式による予測と比較して大幅に増加した。そこで、本研究では、新しい速度依存式 (4.6) γ を本要素実験結果の回帰分析によりを提案する。図 4.3(a)に示すように、実験結果をより精度よく模擬できている。

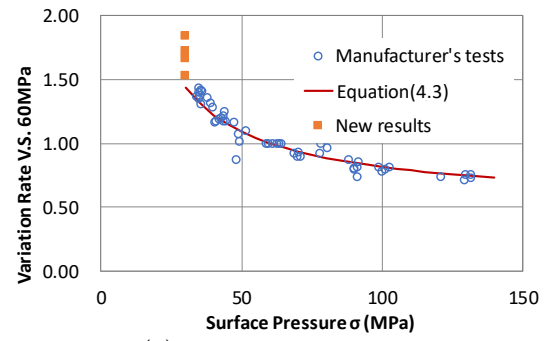
$$\gamma' = (1.03 - 0.55 \cdot 1.5^{-0.018V}) \cdot \left(\frac{0.336}{400^2} \cdot (V - 400)^2 + 1 \right) \quad (4.6)$$

表 4.2 Isolation unit testing results of LF-SSB

No.	Contact pressure	Temp.	Velocity	Friction Coeff. (F.C.) corrected for 20 °C, 400 mm/s, 60 MPa	F.C. variation from design value	Average
	P (MPa)	T (°C)	V (mm/s)	μ	%	Ave (μ)
60_400_1	60	21.3	400	0.0111	-14.3	0.0106
60_400_2	60	21.8	400	0.0116	-10.5	
60_400_3	60	21.9	400	0.0101	-22.4	
60_400_4	60	21.6	400	0.0096	-26.5	
60_20_1	60	21.0	20	0.0125	-3.7	0.0126
60_20_2	60	21.3	20	0.0132	1.3	
60_20_3	60	21.5	20	0.0121	-7.3	
60_20_4	60	21.3	20	0.0128	-1.6	
30_400_1	30	20.8	400	0.0171	31.5	0.0179
30_400_2	30	21.4	400	0.0200	54.1	
30_400_3	30	21.5	400	0.0186	43.0	
30_400_4	30	21.3	400	0.0160	22.7	



(a) Loading velocity



(b) Contact pressure

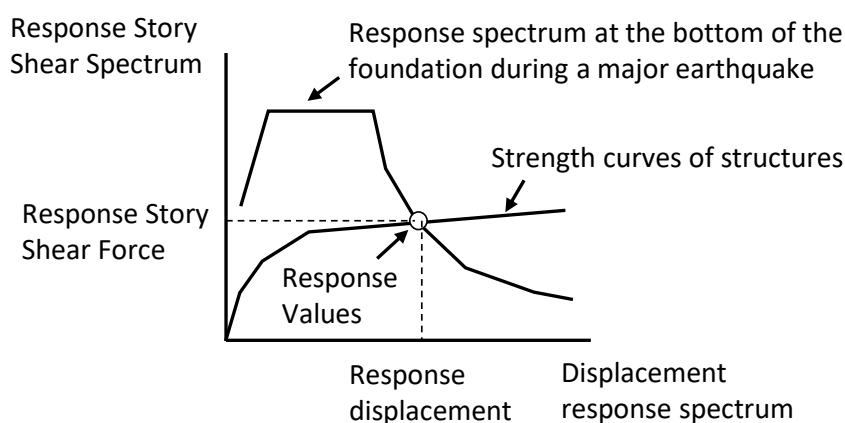
☒ 4.3 Change in coefficient of friction owing to contact pressure and loading velocity

4.3 応答予測と不確定性の影響

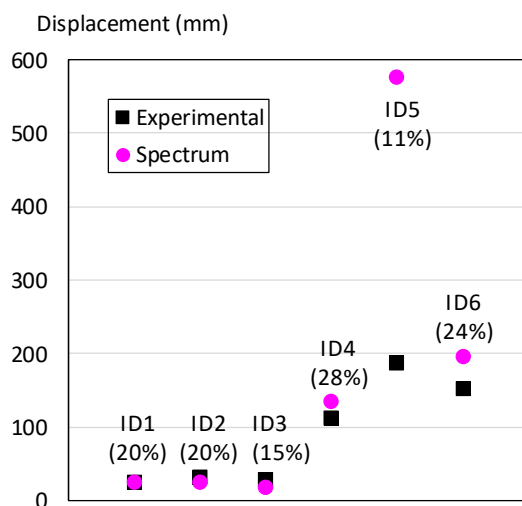
4.3.1 応答スペクトル法による応答予測

応答スペクトル法は, 入力地震動の応答スペクトルを用いて簡便に建物の応答を予測する代表的な方法である^{4.6)}. 免震建物への適用についても, 指針や規基準に規定がり, 免震層の履歴特性に応じて最大応答を推定できる^{4.7)}. しかし, その適用範囲は限られており, 高さ 60m 以上の建物や中間免震構造には適用されない. さらに, 長周期地震動に対する予測精度は検証されていない.

応答スペクトル法による応答評価の考え方について説明する. この方法は等価線形化法に基づく応答スペクトルを用いるもので, その概念を図 4.4 (a) に示す. 縦軸は応答加速度と質量の積, 横軸は応答変位を表す. 構造物に作用する地震力と変位の応答値を



(a) Conceptual diagram



各 ID の下の () は等価減衰比 H_{eq} を示す

(b) Response spectrum method and experimental results

図 4.4 Prediction using the response spectrum method

ある周期における応答スペクトルとして、構造物の層せん断力と変位の関係を性能スペクトルとして図示している. この 2 つのスペクトルを重ね合わせて得られる交点を応答値と用いる. 応答スペクトルの作成には応答変位における免震層の等価減衰比 H_{eq} を用いているため, 真の応答値を求めるためには収束計算が必要となる. また免震建物の履歴特性は, 免震装置の要素実験による製造ばらつきと面圧依存性を切片荷重に考慮して推定される.

図 4.4(b)は, ID1~6 の実験結果と, 地震動レベルが中地震以上と仮定した場合の応答スペクトル法による応答予測値との比較である. 今回の計算では, 等価減衰比 H_{eq} は 11~28%であった. 球面すべり支承の履歴特性には, 免震装置の要素実験で得られた製造ばらつきと面圧依存性を考慮している. JMA 神戸地震動に対する予測値は, ID1,2,4,6 の実験結果と概ね良く対応している. しかし, 長周期地震動に対しては, ID3 では良い一致が見られたが, ID5 では実験結果と比較して応答スペクトル法が応答を過大に評価した. ID5 について応答スペクトル法による応答が過大評価した理由としては, 片岡らによる研究^{4.8)}で示すように減衰補正係数が特定の周期帯で減衰による応答スペクトルの低減を過小評価することが原因に挙げられる.

4.3.2 数値解析モデル

地震応答解析には, 図 4.5(a)に示す 3 次元骨組モデルを基本とした. また, 免震建物の設計で一般的に用いられる集中質量モデルである多自由度 (MDOF) モデル (図 4.5(b)) も用いて, 3 次元骨組モデルで考慮した変動軸力や 2 方向作用力が応答に与える影響を調査した. 長期荷重時に免震装置に作用する軸力は, 実験値と数値解析値を同等とした数値解析には汎用の構造解析ソフト「SNAP^{4.9)}」を使用した.

球面すべり支承は, 日本の設計実務で一般的に使用されているマルチシアスプリングモデルを用いてモデル化した. マルチシアスプリングモデルは, 多方向からのせん断応

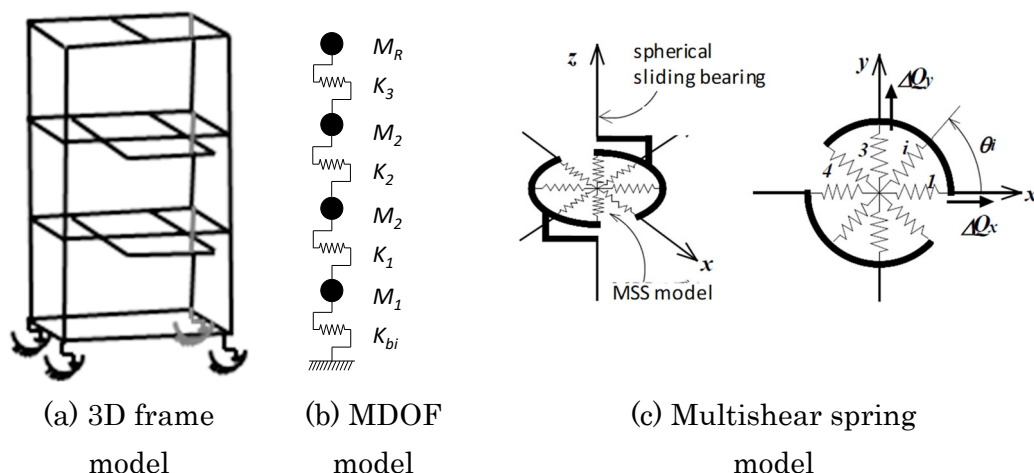


図 4.5 Numerical analysis model

力を受ける柱部材の挙動を模擬する。このモデルは、柱の中央部に等角的に配置された複数のバネから構成されている（図 4.5 (c)）。それぞれのバネは、各方向のせん断変形とせん断力を負担する。本研究では、マルチシアスプリングモデルのせん断バネを x 軸と y 軸を含む 8 方向に配置している。

本研究では、4.2 節で述べたように、E-Defense 施設での振動台実験に先立って LF-SSB の要素実験を実施した。そのため、数値解析における免震試験体のモデル化では、以下のように要素実験の結果を考慮した：

- 1) 製造ばらつきによる摩擦係数の変動については、要素実験結果の平均値とカタログ値の比率を切片荷重 Q_d に乗じた。
- 2) 面圧依存性による摩擦係数の変動については、要素実験の結果から、30 MPa/60 MPa の変動係数がメーカーのカタログ値より 1.178 倍高かったため、この値を Q_d に乗じた。
- 3) 速度依存性による摩擦係数の変動に関しては、メーカーが実施した要素実験の結果から、200 mm/s 以下でも変動が大きいことが示された。本研究で実施した 20 mm/s の载荷条件下での要素実験では、文献 (4.2) と比較して +33.6% の変動があった。低速度での挙動への影響を確認するため、メーカー推奨の式(4.4)と要素実験に基づいて修正した式(4.6)の 2 つのモデルを使用した。

数値解析を通じて、免震層の変位と系の固有周期の関係を検証した。中～大地震に対する 100～400 mm の応答変位では、系の等価固有周期は 4.0～5.0 秒であった。小地震に対する小さな応答変位では、系の等価固有周期は 4.0 秒未満であった。

4.3.3 速度依存性の影響

図 4.3 に示すように、LF-SSB の切片荷重は低速度範囲で速度とともに変動する。そのため、変位と層せん断力応答を正確に予測するには、低速度での速度依存性を適切に評価することが不可欠である。本項では、数値解析と実験結果がどの程度一致するかを検討する。

数値解析では、まず要素実験に基づいて修正した式(4.6)と、メーカーが推奨する速度依存性の式(4.4)を比較した。式(4.4)による計算値は、ID2, ID4, ID5 についてそれぞれ式(4.6)の 1.24 倍, 1.08 倍, 1.19 倍であった。計算には、4.3.4 項で述べる主な摺動期間中の平均速度を用いた。

図 4.6 は、提案した式(4.6)を用いた ID2, ID4, ID5 の免震層の実験結果と数値解析結果の履歴特性を示している。最大速度が約 400 mm/s の ID4 の場合、最大応答の挙動に関して実験結果と数値解析結果の間に大きな差はなく、実験結果を正確に評価できた。最大速度が約 300 mm/s の ID5 のような低速度の場合、2 つの式間で最大応答変位の差が顕著である。さらに、要素実験に基づいて修正した式(4.6)を用いることで、実験

結果と数値解析結果がよく一致し、提案した数値解析モデルの妥当性が確認された。

ID4 と ID5 の場合、初期動作時に実験結果では静摩擦係数の影響により免震層のせん断力が大きな値を示したが、数値解析ではこれを考慮していないため、すべり開始のタイミングに差異が確認された。

ID2 のような小さな入力加速度の場合、初期動作に対する静摩擦係数の影響が大きい
ため、両式を用いた最大応答変位の予測は実験結果と異なった。図 4.7 は、総重量で正
規化した層せん断力の時刻歴応答に対する静摩擦係数の影響を示している。14 秒以降
の層せん断力/総重量に着目すると、要素実験で修正した式(4.6)が試験結果と良く一致
した。したがって、低面圧および低速度下での挙動を評価する際には、速度依存式とし
て摩擦係数の増加を考慮する必要がある。

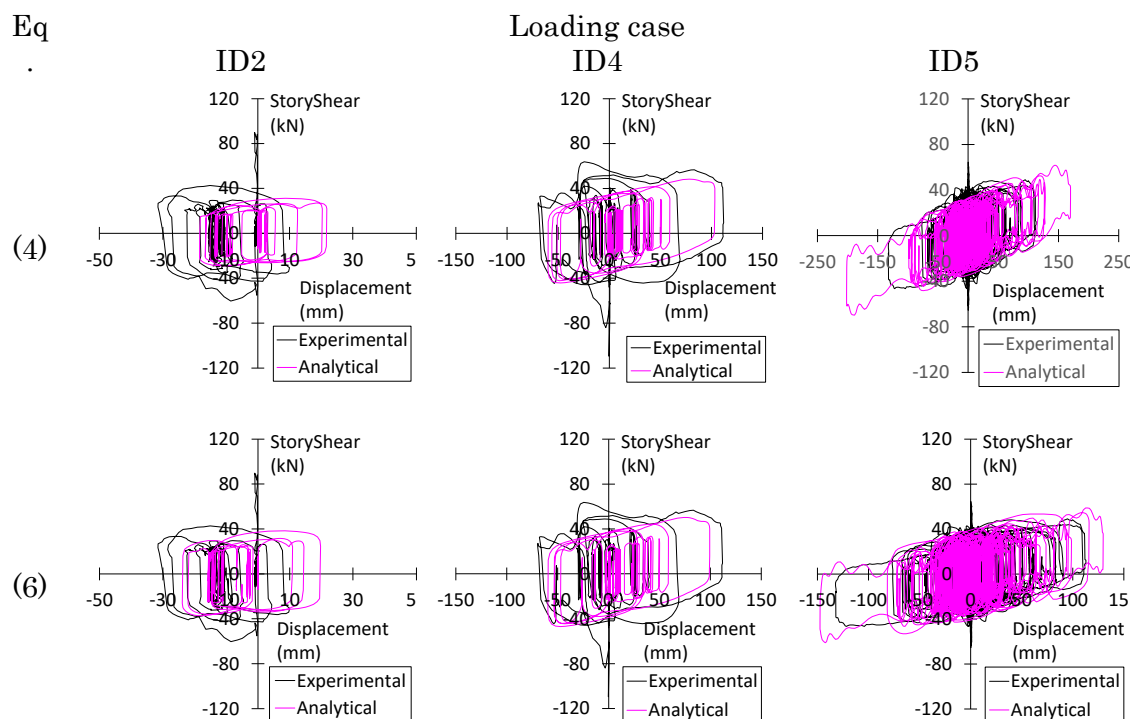


図4.6 Hysteresis characteristics of the base isolation layer

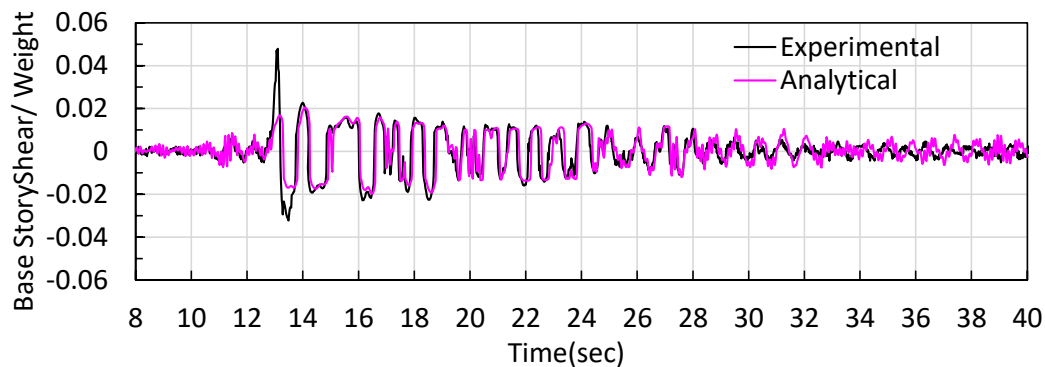


図 4.7 Time-history response of story shear force/total weight (ID2)

4.3.4 静止摩擦係数の影響

4.3.4(a) 静止摩擦係数の大きさ

静摩擦係数は動摩擦係数より大きい。しかし、その影響は初期動作に限定されるため、最大応答への影響は小さいと考えられている。そのため、定量的な評価は行われず、現行の設計では考慮されていない。そこで、振動台実験の各加振の応答に対する静摩擦係数の影響を調査した。具体的には、静摩擦係数の大きさ、免震層の時間変位と移動量に対する静摩擦係数の影響、残留変位に対する静摩擦係数の影響、上部構造の挙動に対する静摩擦係数の影響を調べた。

すべり開始前の免震層の最大せん断力を総重量で除した値として静摩擦係数 μ_s を求めた。図 4.8 は、各加振に対する静摩擦係数の大きさを示している。横軸は各加振ケース番号を、縦軸は静摩擦係数 μ_s を公称動摩擦係数 $\mu_0 = 0.013$ で除した値を示している。静摩擦係数は動摩擦係数の 1.9 倍から 4.5 倍高く、その平均値 $\mu_s = 0.042$ は表 4.2 に記載されている要素実験結果 0.0179 の 2.3 倍であった。

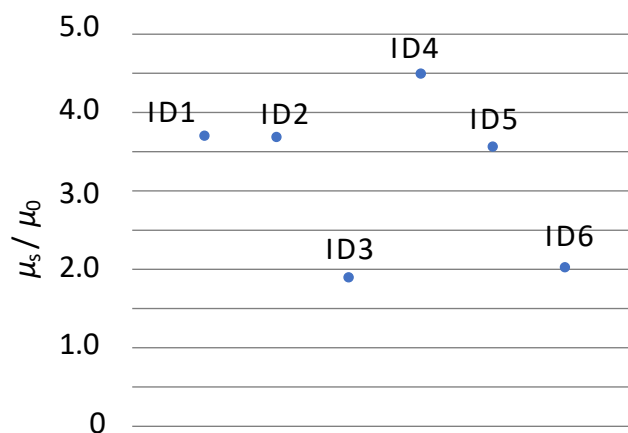
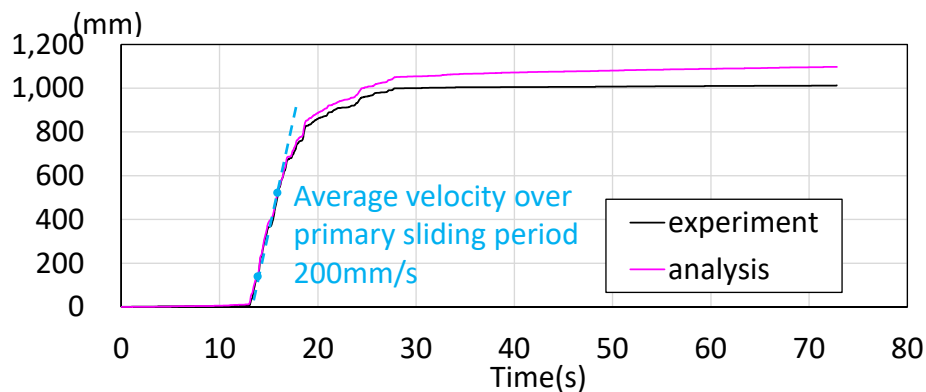


図 4.8 Amplification of static friction coefficient

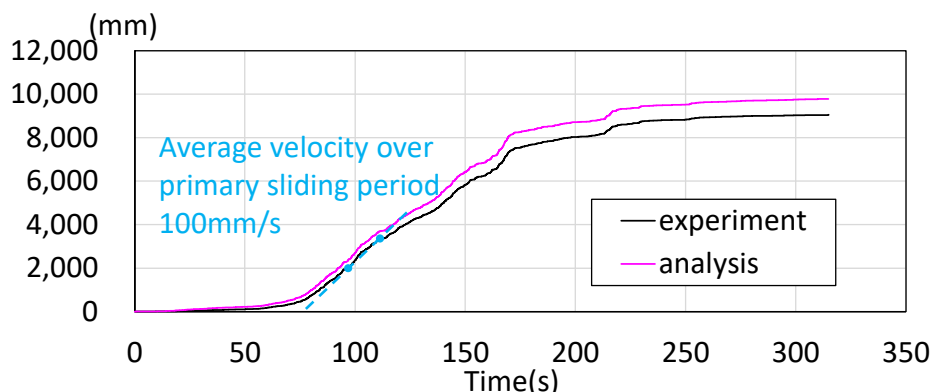
4.3.4(b) 累積移動量に与える影響

図 4.9 は, ID4 と ID5 それぞれについて, 実験と数値解析における累積すべり距離を比較している. ID4 では, 数値解析と実験結果の累積すべり距離の差は 84 mm で, 総すべり距離 1,096 mm の約 8%であった. ID5 では, その差は 733 mm で, 総すべり距離 9,779 mm の約 8%であった. 4.3.3 項で述べたように, 数値解析が静摩擦係数の影響を考慮していないため, すべり開始のタイミングが実験結果と異なっていた可能性がある. しかし, すべり開始のタイミングの差異は, 移動量にはほとんど影響を与えなかった.

また, これらのプロットは主な摺動期間中の平均速度に関して興味深い事実を示している. ID4 と ID5 の平均摺動速度はそれぞれ 200 mm/s と 100 mm/s であり, JMAKOBEX は OS2 の速度は 2 倍になっている. 図 2.13(b)に示す速度スペクトルでは, 0.8 秒から 2.8 秒の固有周期範囲において, JMAKOBEX が OS2 よりも大きいことに対応している.



(a) ID4 (JMAKOBEX50%)



(b) ID5 (OS2XY50%)

図 4.9 Travel accommodation

4.3.4(c) 残留変形に与える影響

日本では，日本免震構造協会の維持管理設計指針^{4.10)}において，許容残留変位を 50 mm と規定している．設計では，入力地震動終了後も地震応答解析を継続し，自由振動下で残留変位を評価する．

各加振ケースにおける免震装置の残留変位を図 4.10 に示す．横軸は加振ケース番号を，縦軸は免震装置の残留変位を表している．実験結果と数値解析結果の両方において，残留変位はいずれのケースでも 50 mm 未満であった．さらに，実験と数値解析の両方で，ID1 (JMAKOBEX16%) の残留変位が最大であった．しかし，同じ入力加速度で入力方向が異なる ID2 (JMAKOBEX16%) では，ほとんど残留変位が生じなかった．

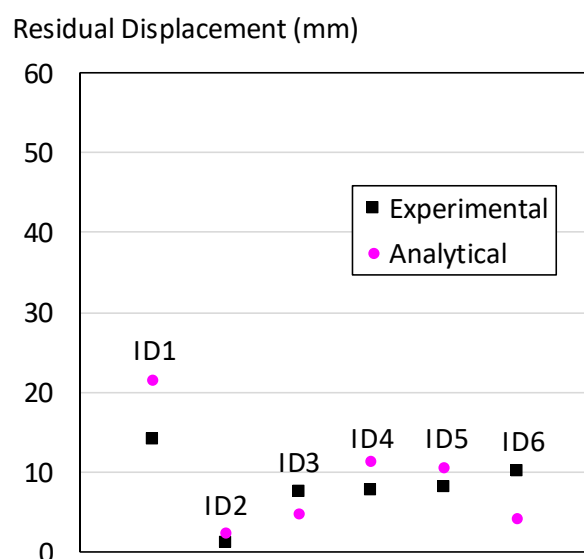


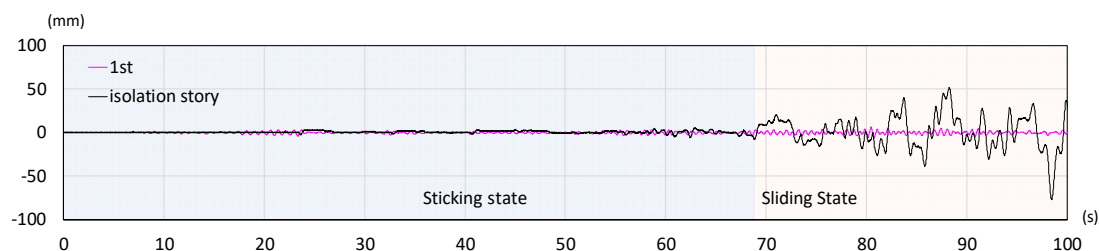
図 4.10 Residual Displacement

4.3.4(d) 上部構造に与える影響

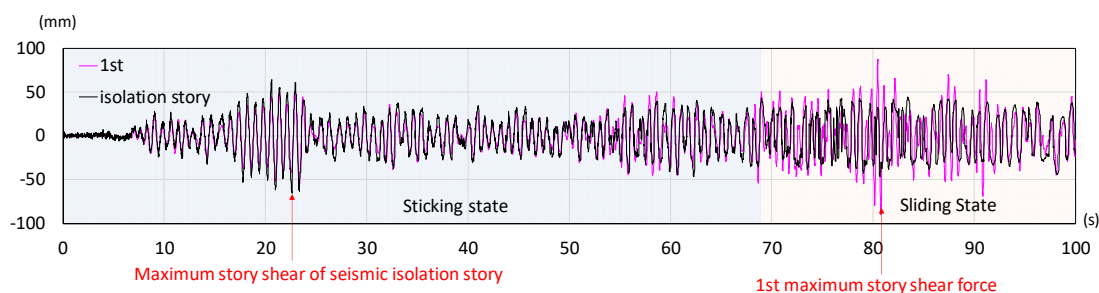
ID5 の Y 方向における免震層と 1 階の時刻歴変位および層せん断力応答を図 4.11 に示す．変位の時刻歴において計測開始から 69 秒時点で免震層がすべり始めた．69 秒までの層せん断力の時刻歴応答に示されているように，球面すべり支承がすべり始めるまで，振動台と 1 階は同じ加速度を受けている．そのため，振動台の加速度に応じて 1 階と 2 階の両方で層せん断力が増加する．69 秒以降の撓動している間は，免震層と 1 層の挙動が異なるため，1 階の質量が免震層と 1 層の層せん断力に相互に影響し，1 層の層せん断力が免震層よりも大きくなる．したがって，免震層は静摩擦係数の影響により，すべり開始前の約 23 秒で最大値に達した．

一方，1 階は静摩擦係数の影響を受けず，すべり中の約 81 秒で最大せん断力に達した．応答スペクトルに関しては，OS2_50%の加速度応答スペクトル（図 2.13(a)）は，

固有周期 4～6 秒の範囲で最大加速度が約 0.1G（G：重力加速度）であった．図 4.8 に示すこの免震装置の要素実験での最大静摩擦係数は $\mu_{smax}=0.059$ である．したがって，上部構造に作用する最大せん断力に対する静摩擦係数の影響は，設計せん断力と比較して小さいと考えられる．



(a) Base isolation layer displacement



(b) Story shear force

図 4.11 ID5-Y Directional time history (experimental results)

4.3.5 面圧依存性の影響

本項では，数値解析と実験結果を用いて，変動軸力と鉛直動入力が免震層の挙動に与える影響を調査する．なお，試験体のアスペクト比は約 2.0 であった．数値シミュレーションには，設計で一般的に用いられる多自由度 (MDOF) モデルを採用した．考慮した入力地震動は，震度 5 強程度の極稀に発生する大地震を想定した設計レベル地震動を用いた ID4 と ID5，並びに設計レベルを超える地震動で鉛直動を含む ID6 とする．

4.3.5(a) 変動軸力の影響

表 4.3 は，免震システム ID4, ID5, ID6 の変動軸力を示している．変動軸力は，ID4 では長期軸力の約 15%，ID5 では約 30% であった．鉛直動を考慮した ID6 の場合，約 60% の変動軸力が生じており，変動軸力と鉛直動の大きさが小さいことを示している．図 4.12 の ID4 方向入力に対する変動軸力を無視した MDOF モデルの実験結果と

数値解析結果の比較から，層せん断力，変位，速度がすべてよく一致しており，一方向入力に対しては変動軸力の影響は無視できることが分かる．

表 4.3 Varying axial force of seismic isolation materials

	Loading											
	ID4				ID5				ID6			
SSB No. Varying axial force ratio	No.1	No.2	No.3	No.4	No.1	No.2	No.3	No.4	No.1	No.2	No.3	No.4
	0.15	0.14	0.17	0.12	0.34	0.09	0.10	0.34	0.63	0.60	0.55	0.66

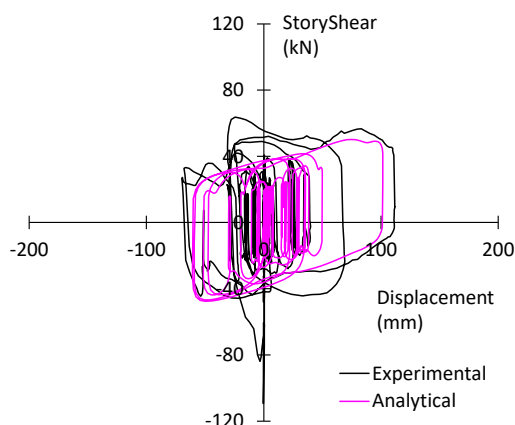


図 4.12 Hysteresis characteristics of base isolation (ID4)

4.3.5(b) 45 度方向の影響

ID5 方向入力に対して変動軸力を無視した MDOF モデルの数値解析結果と実験結果を図 4.13 (a)と(b)に比較する．(a)では，X 方向の振動台加速度を一方向入力として使用した．(b)では，XY45 度入力を考慮するために入力加速度を $\sqrt{2}$ 倍し，応答を $\sqrt{2}$ で除して各方向の応答を得た．球面すべり支承の等価水平剛性は絶対変位の増加に伴い減少するため，(a)の一方向入力では応答変位を過小評価しているが，(b)では実験とよく一致している．球面すべり支承はすべり始めるまで無限大の剛性を持ち，摺動中は動摩擦係数に対応する低い剛性を示す．つまり，等価固有振動数は変位に応じて時々刻々と変動し，変位による非線形性が応答に影響を与えるほど強いことを意味している．

ID6 の入力時に変動軸力と鉛直動を無視した MDOF モデルの数値解析結果と実験結果を図 4.13(c)と(d)に比較する．(c)と(d)の両方で応答がよく一致している．これらの結果は，球面すべり支承を用いた低層免震建物の挙動が，変動軸力と鉛直動の影響を無視した MDOF モデルでよく予測できることを示唆している．

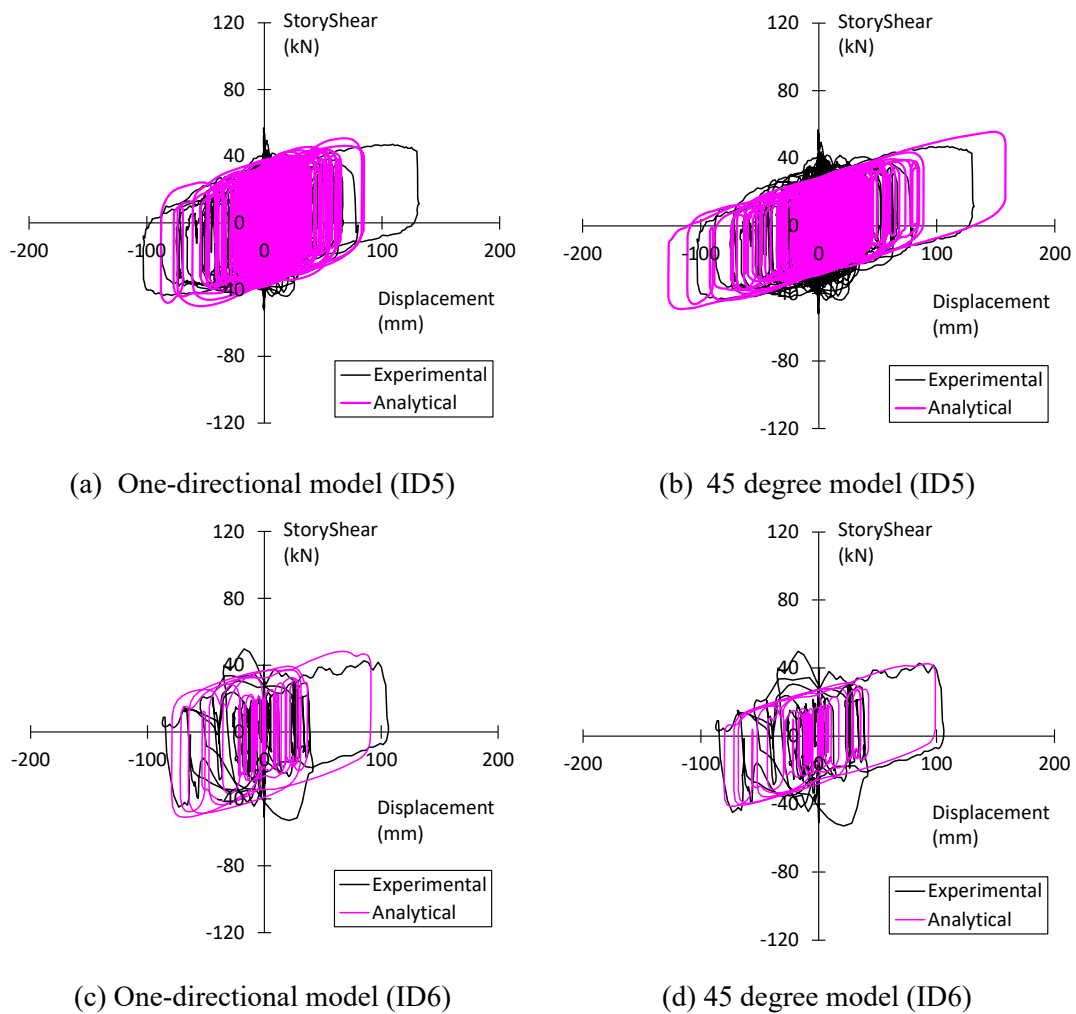


図4.13 Comparison of simulation results against X-axis projected responses

4.4 摩擦係数による影響

低摩擦係数と中程度の摩擦係数を持つSSBの固有値解析結果を図4.14に示す。等価固有周期は、免震層の割線剛性を用いて計算した。中程度の摩擦係数での等価固有周期は、応答変位15 cm以下では3.0秒未満である。これは、小変位領域で剛性が高く、加速度が増加しやすいことを示している。したがって、実際の設計では、低摩擦の球面すべり支承を使用して加速度を抑制し、U字型ダンパー^{4.11)}のような初期剛性の低いダンパーを用いてエネルギーを吸収して変位を低減することが効果的と考えられる。

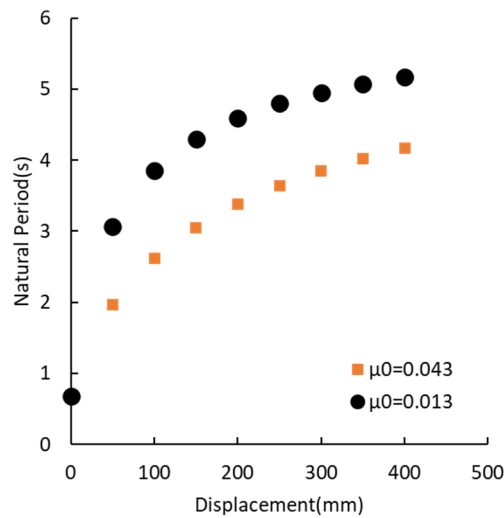


図 4.14 Relationship between seismic isolation displacement and equivalent natural period

動摩擦係数 0.013 の場合，実験結果[表 2.14]では，すべての低摩擦球面すべり支承で最大床応答加速度は 200 cm/s^2 未満，最大床応答速度は 30 cm/s 未満であった．表 4.4 は，SSB で利用可能な動摩擦係数 0.043 の場合の数値解析結果を示している．摩擦係数が増加すると免震層の変位は減少したが，加速度と速度は増加し，ID6 入力地震動に対して最大床応答加速度は約 350 cm/s^2 ，最大床応答速度は約 70 cm/s となった．なお，45°加振時の最大応答加速度，速度，変位は，入力加速度を $\sqrt{2}$ 倍した質点系モデルを用いて示している．

耐震試験体（図 2.1～2.7）では，加速度 350 cm/s^2 ，速度 50 cm/s でベッド周辺の医療機器が約 30 cm 移動し，振動中の治療中断の必要性が確認された．また，図 4.15 に示すように，加速度 400 cm/s^2 ，速度 60 cm/s で点滴スタンドが転倒した．したがって，すべての支承が中程度の摩擦係数を持つ場合，低摩擦支承とは異なり，機能障害が生じる可能性があり，低摩擦球面すべり支承による室内医療機器の損傷低減効果が確認できる．

表 4.4 Maximum responses, $\mu_0 = 0.043$

Peak floor acceleration (PFA, unit: cm/s^2)						
ID	1	2	3	4	5	6
3 rd Floor	186	176	179	312	297	362
2 nd Floor	119	126	138	253	272	289
1 st Floor	110	117	78	197	153	217
Table	120	136	74.5	357	283	529
Peak floor velocity (PFV, unit: cm/s)						
3 rd Floor	14.6	15.1	13.1	46.0	32.8	64.3
2 nd Floor	12.3	13.5	8.4	47.9	30.7	67.0
1 st Floor	11.1	12.3	6.8	40.0	31.9	57.7
Table	14.9	15.0	10.1	45.9	31.5	63.2
Base isolation layer response displacement (unit: cm)						
1 st Floor	1.47	1.83	2.00	6.52	9.43	13.9



(a) Base-isolated

(PFA = 92 cm/s^2 , PFV = 17 cm/s)

(b) Fixed-base

(PFA = 400 cm/s^2 , PFV = 60 cm/s)

図 4.15 ID4 加振後の写真

床加速度スペクトルと床加速度のエネルギースペクトルを図 4.16 に示す. 低摩擦係数の場合, 加速度スペクトルに顕著なピークはないが, エネルギースペクトルは第一次固有周期でピークを示した. 長周期・長時間地震動 (ID3) と短周期パルス型地震動 (ID4) の差は, エネルギースペクトルでより顕著になった. 地表から床応答への増幅率は, ID4 よりも ID3 の方が大きい. 結果として, ID4 の最大床応答加速度が大きくても, 床加速度応答スペクトルとエネルギースペクトルのピーク値は ID3 の方が大きくなる. 次に, 中摩擦係数の場合, 短周期範囲のピークが顕著になる. 特に, 長時間地震動の影響は, 短周期領域と建物の固有周期の両方でエネルギースペクトルに大きく現れる. 本論の第 3 章で示した通り, 医療機器の変位は地震動の継続時間, つまり床のエネルギースペクトルに大きく依存する. したがって, 中程度の摩擦係数と長周期・長時間地震動の場合,

病室内の被害がかなり大きくなる可能性がある。

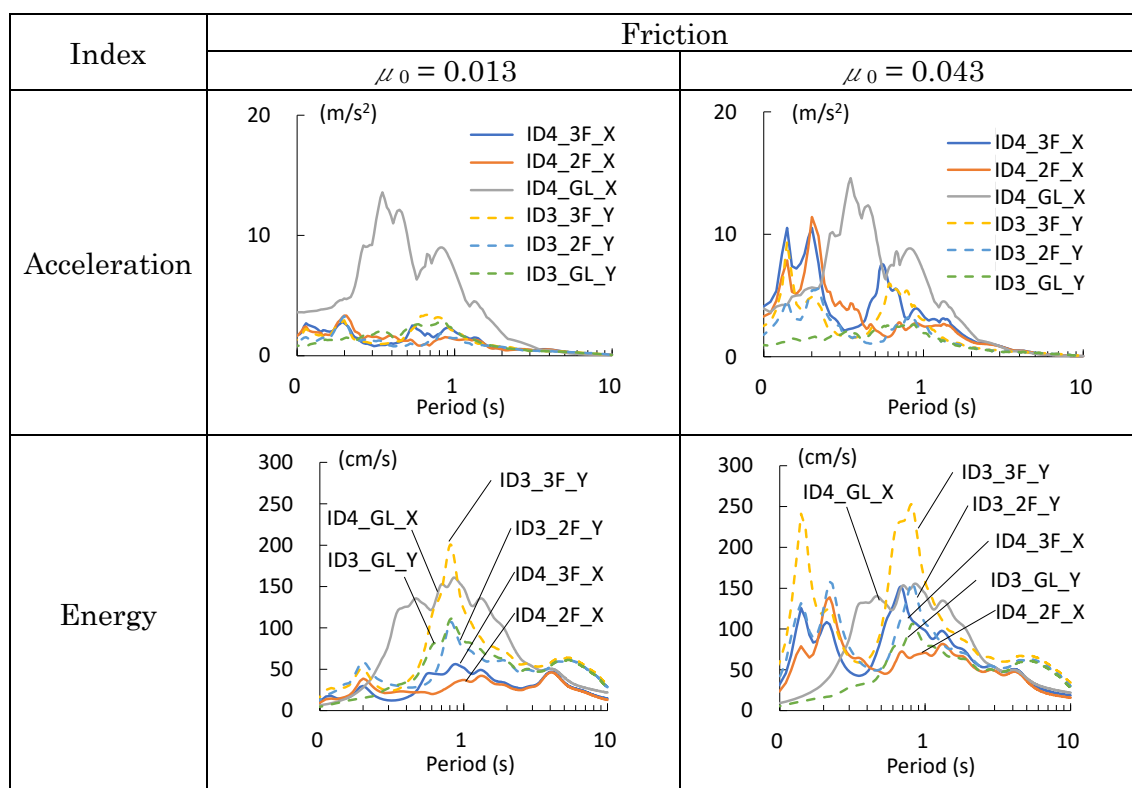


図 4.16 Floor response spectrum

4.5 まとめ

本研究では、低摩擦係数を有する球面すべり支承の要素実験、同支承を用いた免震病院建物試験体の実大震動台実験の結果、並びに設計実務で使用する簡易法および数値解析による予測結果を報告した。また、予測精度の高いシミュレーション方法と、病院の機能障害を軽減するための望ましい免震装置の性能について述べた。主な知見は以下の通りである。

1. 応答スペクトル法は、長周期・長時間地震動に対する実験での最大変位を過大評価した。比較的短周期のパルスを持つ近傍地震動に対しては、一般的に良好な応答を示した。
2. 感度分析では、低摩擦すべり支承の動摩擦係数の速度依存式は、低面圧および低速条件下で修正が必要であった。軸力変動と上下動の影響は、全体的な応答に関して影響が小さかった。
3. 振動台実験で同定された静摩擦係数は、動摩擦係数の 1.9～4.5 倍であり、その平均値は要素実験結果 0.0179（速度 400 mm/s 時）の約 2.3 倍であった。しかし、残留変位、移動量、上部構造の最大せん断力への影響は小さかった。この結果は、静

止摩擦係数を無視した現在の設計プロセスを支持するものである。

4. 動摩擦係数 0.013 の低摩擦球面すべり支承は、加速度と速度を大幅に低減し、実験において内部医療機器の損傷を抑制した。摩擦係数 0.043 の場合、長周期・長時間地震動に対してエネルギー床応答スペクトルが大幅に増加した。この増加は、医療機器が変位する病室内で機能障害を引き起こす可能性がある。
5. 実際の設計では、加速度を抑制し、U 字型ダンパーなどの初期剛性の低いダンパーを用いてエネルギーを吸収し、変位を低減するために、低摩擦球面すべり支承を使用することが効果的と考えられる。また、床加速度と免震層変位の目標値を達成するために、低摩擦支承と中程度の摩擦支承を組み合わせることも一般的である。

第 4 章の参考文献

- 4.1) Constantinou M, Mokha A, Reinhorn A. Teflon Bearings in Base Isolation II: Modeling. Journal of Structural Engineering, 1990, 116(2).
- 4.2) Nishimoto K, Wakita N, Hasegawa H, Nakamura S. Full-scale Performance Verification Test of Spherical Surface Sliding Bearing (SSB) Low Friction Type (AIJ), 2017 (in Japanese).
- 4.3) Barone S, Calvi GM, Pavese A. Experimental dynamic response of spherical friction-based isolation devices. Journal of Earthquake Engineering, 2019, 23(9).
- 4.4) Konishi Y, et al. A Study on the Response Characteristics of a Seismic Isolated Building with Spherical Sliding Bearing (SSB) in the Wind Direction (AIJ), 2020 (in Japanese).
- 4.5) NIPPON STEEL ENGINEERING, NS-SSB Catalog
- 4.6) Building Research Institute: Kaiseikenchikukijyunhou no menshinkankeikitei no gijyutsutekihaikai (Technical Background of Regulations Related Seismic Isolation in Revised Building Standards Law), 2001.8 (in Japanese)
- 4.7) Commentary on Structural Regulations of the Building Standard Law of Japan Editorial Committee: 2020nenban Kenchikubutsu no Kouzoukankeigijyutsukijyunkaisetsusho, 2020, 11
- 4.8) 片岡祐人, 他: 応答スペクトル法による免震建物の地震応答予測に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), 2017 年 8 月
- 4.9) 株式会社構造システム HP: <https://www.kozo.co.jp/program/kozo/snap/index.html>
- 4.10) The Japan Society of Seismic Isolation: Maintenance standards for seismically isolated buildings, 2018 (in Japanese).
- 4.11) 日鉄エンジニアリング株式会社 免震 NSU ダンパー®カタログ

5. 室内被害を考慮した中低層の医療施設の簡易性能設計手法

5.1 はじめに

本研究では、病院の居室や部署としての被害程度を大きく分類し、それを予測するための各床応答値の指標と被害程度の相関性を実大実験により検証する。また設計や被害予測時に床応答値の指標に基づいて医療施設の被害評価の予測手法を提案する。さらに、日本建築構造技術者協会（JSCA）がまとめた構造体の性能設計手法^{5.1)}に準拠して設計した特級、上級、基準級の建物に対して、提案する室内被害ランクを用いた評価フローに基づいて医療機器の被害評価を行い、耐震等級と医療機器の被害との関係を整理する。

5.2 実験による被害程度と被害評価指標とする床応答値

5.2.1 被害ランクと予測指標

医療従事者と協議し、実験結果から各室の被害ランクを表 5.1 の A～D の 4 段階とした。ランク A、B はいずれも無被害で機器に移動が生じるかどうかで区別し、ランク C、D は機器の移動により被害が生じ、医療行為の継続性の可否で区別している。なお、 B/H は機器を支持するキャスターの間隔（ B ）を機器の重心高さ（ H ）で除した指標である。例えば、 B/H が 0.4 以下の場合に転倒確率は大きくなる^{5.2)}。

医療施設の室内被害評価には、機器同士の衝突を考えると、機器の転倒に加えて移動量の評価も重要となる。そこで、被害ランクとの相関性を検討する床応答として、①最大加速度（ PPA ）や②最大速度（ PFV ）に加えて、地震継続時間を考慮した指標として、機器単体の挙動を評価した前報で相関が高かった③Arias Intensity（以下 IA 、応答加速度の 2 乗を時間積分したものに $\pi/2G$ （ G は重力加速度）を乗じた指標）に加えて、④床応答加速度が 150cm/s^2 を超えた時間の床加速度応答累積値（以下 $CA150$ ）を採用する。なお、床応答加速度 150cm/s^2 は、3.4 節において、キャスターロックがフリーであったり、重心の高い機器でロッキングが生じたりキャスターロックが外れたりするこ

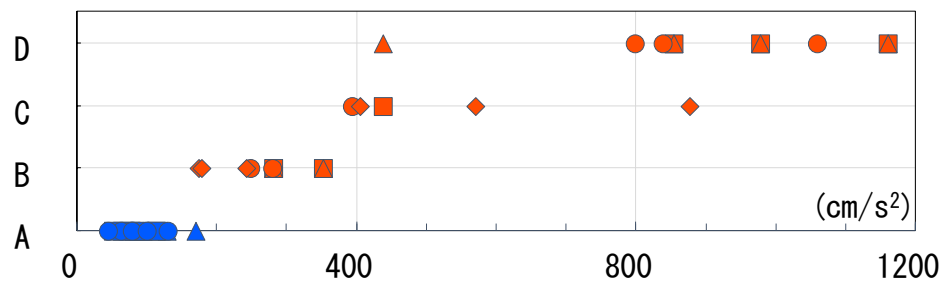
表 5.1 医療施設の室としての被害ランク

被害ランク	加振後の室の状態
A	ほとんどの機器に移動なし
B	機器に移動が生じるが転倒や機器同士の接触はなく、地震後の医療行為に影響なし
C	B/H が小さい医療機器の一部に転倒や機器同士の接触が生じるが医療行為は継続可能
D	多くの機器が転倒や衝突により、医療行為の継続が不可となる可能性あり

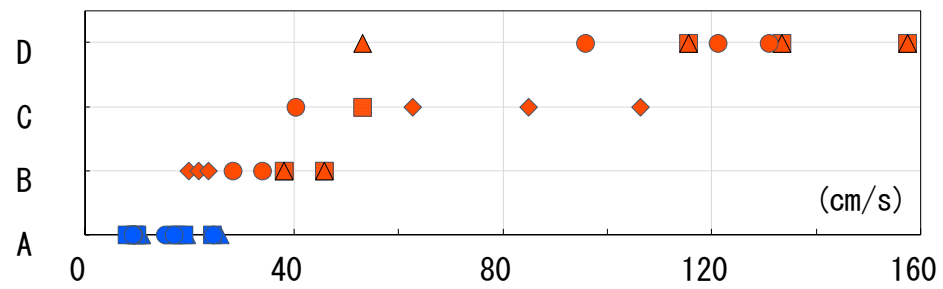
とで移動量が大きくなることが確認された閾値である。

5.2.2 被害ランクと予測指標の関係

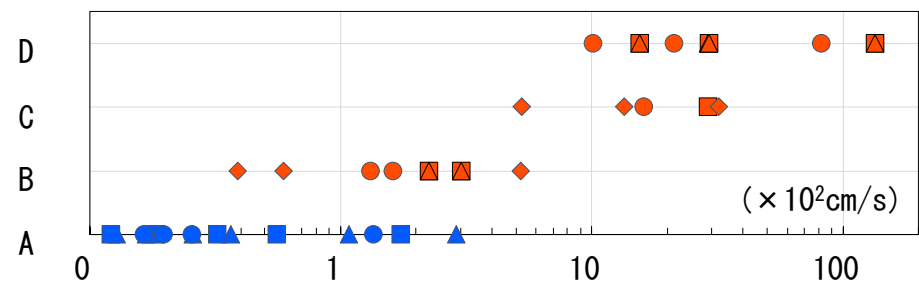
図 5.1 に、各加振の被害ランクと各床応答値の相関を示す。赤マークは耐震試験体、青マークは免震試験体を示す。IA および CA150 は横軸を対数目盛としているため、応答値が 0 のものは便宜上 0.1 としている。応答は 2 方向同時入力の場合 (ID5) は 2 方向合成のもの、3 方向同時入力 (ID6) の場合は、XY2 方向合成のものを示す。ID6 の Z 方向の PFA は耐震試験体、免震試験体ともに振動台から 1.5 倍程度増幅された 0.5g 程度であった。免震構造の医療施設を対象とした既往の研究^{5.3)}においても絶対鉛直加速度が 2g を超えない限り深刻な悪影響を及ぼさないことが示されている。そのため中低層建物においては、ロングスパン梁を有する鉄骨造などで地震時に 2g を超える上下動が生じる可能性がない場合においては上下動の影響ないと考える。PFA は 150cm/s^2 以下ではランク A で加振中も医療行為は可能であり、 150cm/s^2 を超えるとランク B、 400cm/s^2 を超えるとランク C または D となり、C と D を同一グループとすると応答と被害に明確な階段状の相関関係があった。NICU やコロナ病室、手術室のように機器が密に配置されている室では、診察室のように機器が少ない室と比べて同一加速度でもランク D となり易い傾向を確認した。PFV は 20cm/s を超えるとランク B が増えるが、ランク A との境界は明確でない。IA は耐震試験体では 100cm/s を超えるとランク B となり、 5m/s を超えるとランク C～D と被害が大きくなる一方で、免震試験体では IA が 300cm/s 程度でもランク A であった。CA150 は $300\text{cm/s}^2\cdot\text{s}$ まではランク B、それ以上では移動量の増加により機器同士の接触が激しくなり、接触による転倒が生じてランク C となる。 $700\text{cm/s}^2\cdot\text{s}$ を超えると被害ランク D も増えた。いずれの指標も応答が大きくなるとともに被害が大きくなる傾向は確認できた。各被害ランクのオーバーラップが少ないという観点で見ると、瞬間最大の指標では加速度、累積指標としては CA150 では被害ランクとの相関性が高い。



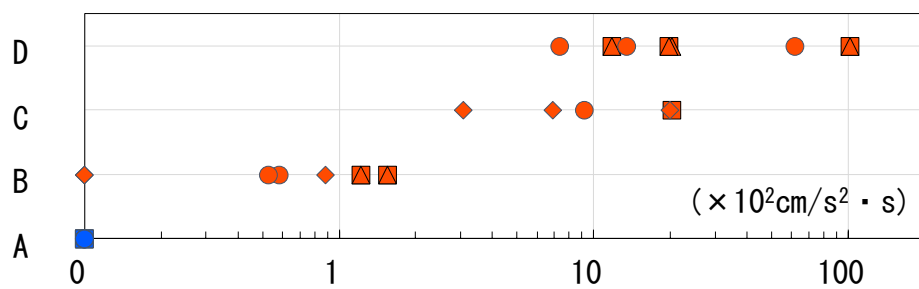
(a) *PFA*



(b) *PFV*



(c) *IA*



(d) *CA150*

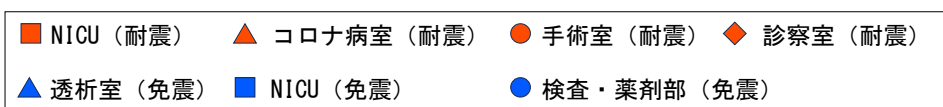


図 5.1 被害ランクと床応答値の相関

PFA と *CA150*, 被害ランクの相関を図 5.2 に示す. 図内の主要な箇所を写真 5.1 の ①～⑩に示す. 写真①, ②はいずれも *PFA* が 400cm/s^2 程度であり, ①では機器同士が衝突する程度であった一方, ②では機器の移動量が大きく, 点滴スタンドは壁に衝突し転倒が生じた. ③は, ②よりも *PFA* がさらに大きい, 機器が散在している診察室であるため, 比較的被害は小さく, 床応答値だけでなく室の機器設置状況も被害に影響することを確認した. ⑤, ⑥は 800cm/s^2 程度であり, ⑥は *CA150* が小さいため移動量は小さいが転倒した機器は多く, ⑤は転倒した機器が多いうえに機器の移動も大きくなっていた. ⑧, ⑩はそれぞれ *PFA* と *CA150* が最も大きいポイントである. 両者において, キャスターが固定されていたベッドなどを含めてまで多くの機器が移動して室内被害が甚大となっていた.

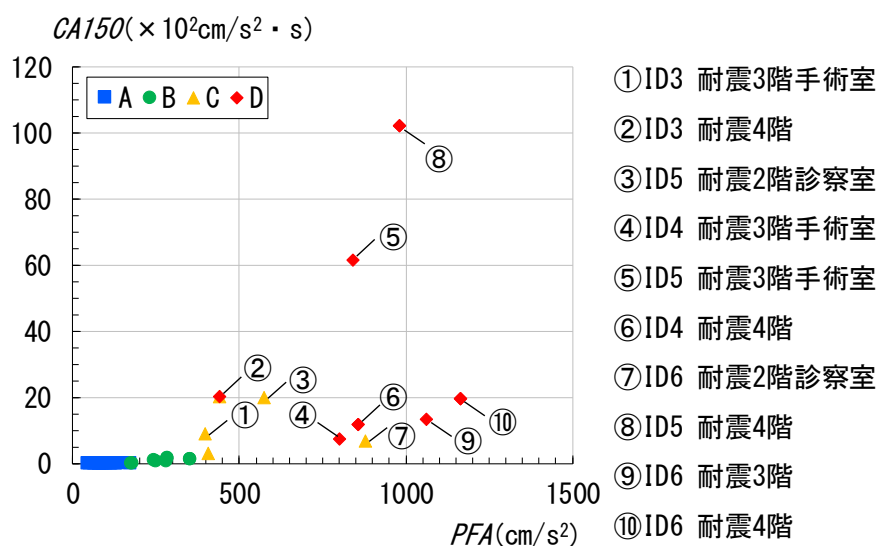
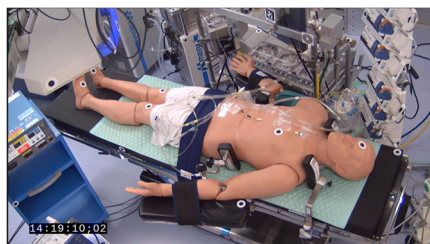


図 5.2 PFA—CA150 図



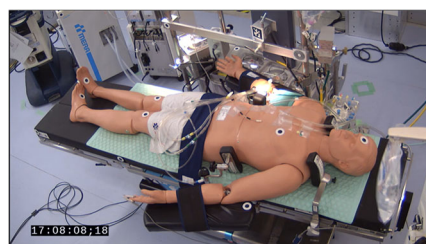
写真①



写真②



写真③



写真④



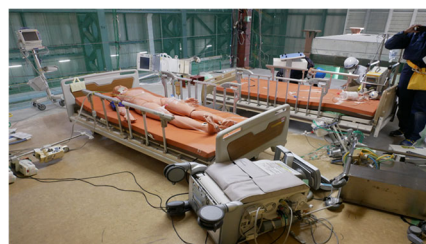
写真⑤



写真⑥



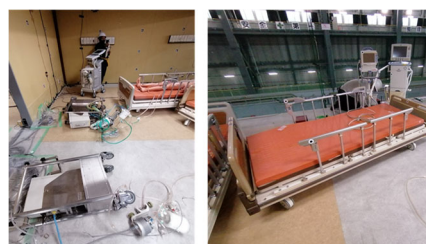
写真⑦



写真⑧



写真⑨



写真⑩

写真 5.1 図 5.2 と対応する室内被害

転倒可能性の評価として、各加振の PFA , PFV と等価振動数 $F_e (=PFA \div PFV \div 2\pi)$ の関係と被害ランクを図 5.3 に示す。図内には被害ランク B と C, C と D を分ける閾値として $Vreq_{fB}=50\text{cm/s}$, $Vreq_{fC}=100\text{cm/s}$ を記入した。これは機器単体の評価 7) において転倒が $PFV 50\text{cm/s}$ 以上で転倒が見られたことと対応する。

以上の検討より、被害程度を予測するには、 PFA , PFV , $CA150$ の各値を総合的に判断する必要がある。

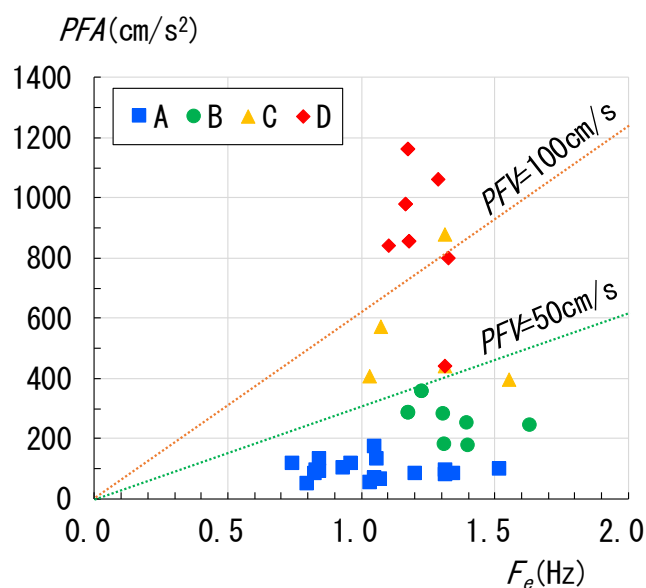
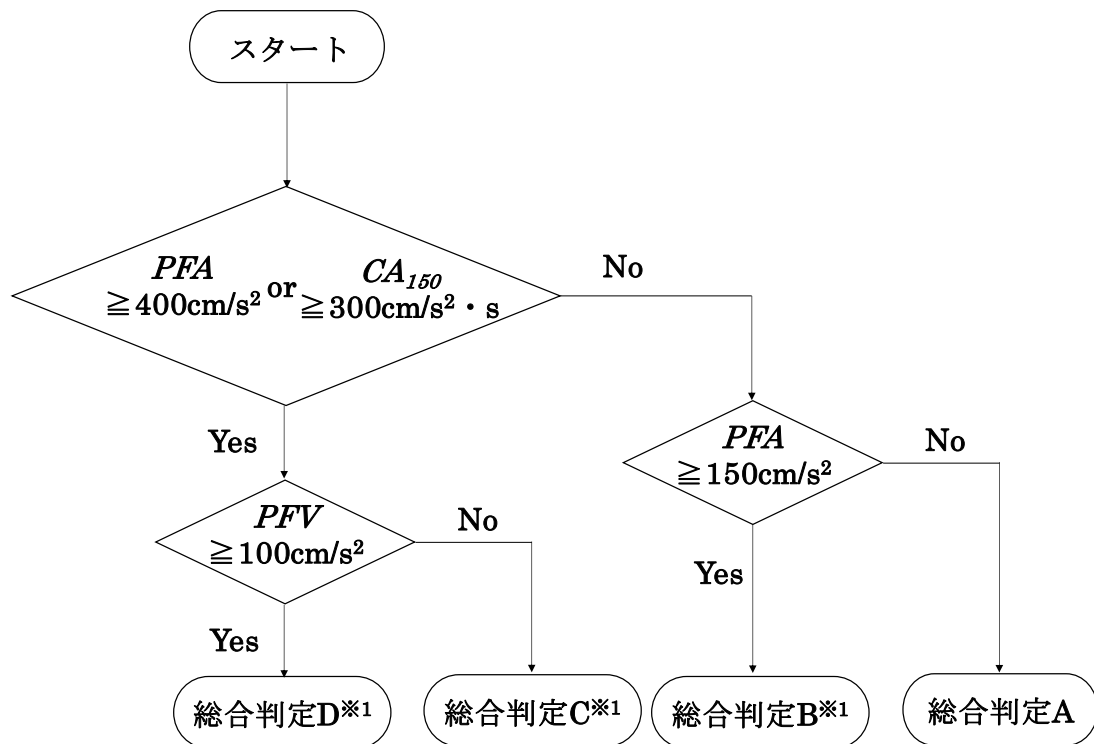


図 5.3 PFA —等価固有振動数

5.2.3 室内医療機器の被害評価手法の提案

5.2.2 項の検討を踏まえて、中低層医療施設の各室の室内被害ランクを評価するフローを図 5.4 に提案する。適用範囲は中低層建物とし、ロングスパンを有する鉄骨造など評価対象とする室が地震時に $2g$ を超える上下動が生じる可能性がある場合は除く。また 2.2.7 項に記載しているが設置する医療機器にキャスターを有する場合は 2 点以上ロックすることを想定している。機器が動き出す PFA の 150cm/s^2 , 転倒が生じ始める PFA の 400cm/s^2 , 移動により機器同士が衝突し転倒が増える $CA150$ の $300\text{cm/s}^2 \cdot \text{s}$ を閾値とした。ランク C と D の判定については、設置機器の種類や配置状況に応じて異なるため条件に応じて判定することを基本とするが、 PFV が 100cm/s を超えるような場合にはランク D とする。ただし、被害ランク B~D の場合においても、機器が移動および転倒しない措置や床免震など特別な対策が施されている場合はこの限りではないものとする。



※1機器に移動や転倒に対して特別な対策が
施されている場合はこの限りではない

図 5.4 中低層医療施設の室内被害ランク評価手法

5.3 数値解析による被害評価手法の妥当性の検討

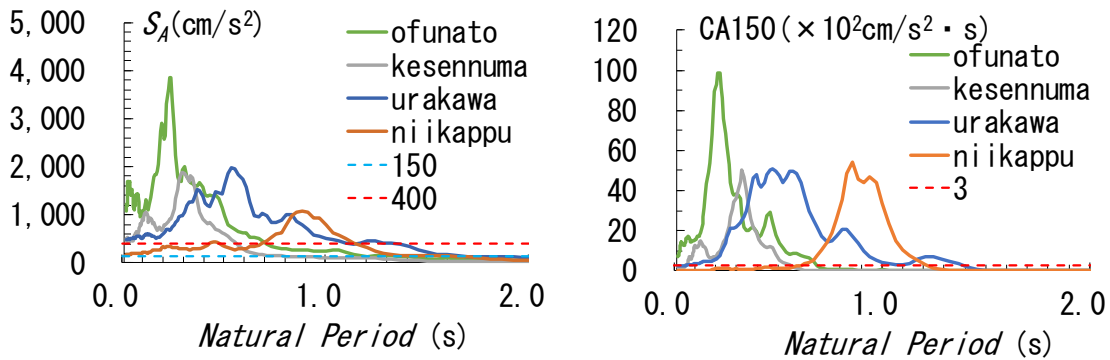
宮城県沖の地震、宮城県北部の地震及び十勝沖地震による病院の被害状況と震度との関係が定量的に評価した研究^{5.4)}では、震度 6 弱では医療機器および医療空間の被害率が急増するものの、震度 5 強までは概ね機能維持ができていたことが確認されている。ここでの被害率の計算は医療機器の場合は当該機器が使用できなかった割合、医療空間は病室や診療室など当該室が使用できなかった割合を示す。そこで、宮城県沖の地震、宮城県北部の地震及び十勝沖地震の震度 5 強及び震度 6 弱が観測された地震動を用いて、加速度応答スペクトルおよび $CA150$ の応答スペクトルならびに質点系モデルの応答解析により求めた PFA と $CA150$ を利用して、5.2.3 項で提案した室内被害評価フローの妥当性を検証する。

5.3.1 入力波の応答スペクトル

応答解析で使用する地震波として、表 5.2 に示す宮城県沖の地震、宮城県北部の地震及び十勝沖地震の震度 5 強以上の観測波の中で、最大地動加速度に一方向性の強い、宮城県沖の地震の大船渡市大船渡町、気仙沼市赤岩、十勝沖地震の浦河町潮見、新冠町北

表 5.2 検討に用いた観測波

地震名	観測点名_方向	震度	最大加速度 (cm/s ²)
宮城県沖の地震	大船渡市大船渡町_EW	6 弱	1,105
	気仙沼市赤岩_NS	5 強	452
十勝沖地震	浦河町潮見_EW	6 弱	493
	新冠町北星町_NS	5 強	183



(a) 加速度応答スペクトル (b) $CA150$ スペクトル

図 5.5 応答スペクトル ($h=5\%$)

星町の記録を用いた^{5.5)}。図 5.5 に検討用対象地震波の応答スペクトルとして加速度応答スペクトルと $CA150$ の応答スペクトルを示す。ピーク値はいずれも室内被害評価の閾値である PFA の 400cm/s^2 、 $CA150$ の $300\text{cm/s}^2 \cdot \text{s}$ を大きく上回っているが、震度 5 強の 2 波については短周期の領域において、閾値を下回っている領域も多くなっている。

5.3.2 多質点系せん断型モデル

多質点系せん断型モデルを用いた 1 方向の応答解析により、 PFA と $CA150$ を求める。中低層建物を検討対象とし、4, 6, 8 層の鉄骨造（以下 S 造）および鉄筋コンクリート造（以下 RC 造）のモデルを準備した。多質点系モデルは、S 造、RC 造ともに階高 4m、建物重量は S 造 8kN/m^2 、RC 造 12kN/m^2 とする。各階の層間変形角は A_i 分布の外力に対して一定であると仮定する。

履歴特性、内部粘性減衰の考え方は、JSCA 性能設計説明書 2021 年版【耐震性能編（簡易法）】^{5.1)} の耐震性能グレード基準級のモデルに準拠する。S 造と RC 造のフレーム構造の多質点系せん断型モデルの骨格曲線を図 5.6 に実線で示す。同図には次章で用いる上級、特級の骨格曲線も併せて示す。また S 造の破線は 5.4.4 節で述べる座屈拘束

ブレースを有するラーメン架構の場合を示す．S 造多質点系モデルの各層の履歴特性はバイリニア型とし，2 次剛性を初期剛性の 0.001 倍，また最大耐力は性能 Ds 値 0.25 としている．RC 造多質点系モデルの各層の履歴特性は Takeda 型とし，2 次剛性を初期剛性の 0.25 倍，3 次剛性を初期剛性の 0.001 倍，また，最大耐力は性能 Ds 値 0.3 としている．最大耐力に対して第 1 折れ点は 1/2.5 としている．内部減衰は，限界耐力計算^{5,6)}におけるスウェイ・ロッキングを考慮しない場合の内部減衰に準拠し，かつ動的相互作用による減衰を考慮して S 造建物，RC 造建物ともに一律 5% としている．数値解析には弾塑性解析システム HyperSD を用いた．

4，6，8 層の S 造および RC 造の基準級の各モデルの固有周期を表 5.3 と表 5.4 に示す．なお，次章で用いる上級，特級のモデルの固有値解析結果も表 5.3 と表 5.4 に併せ

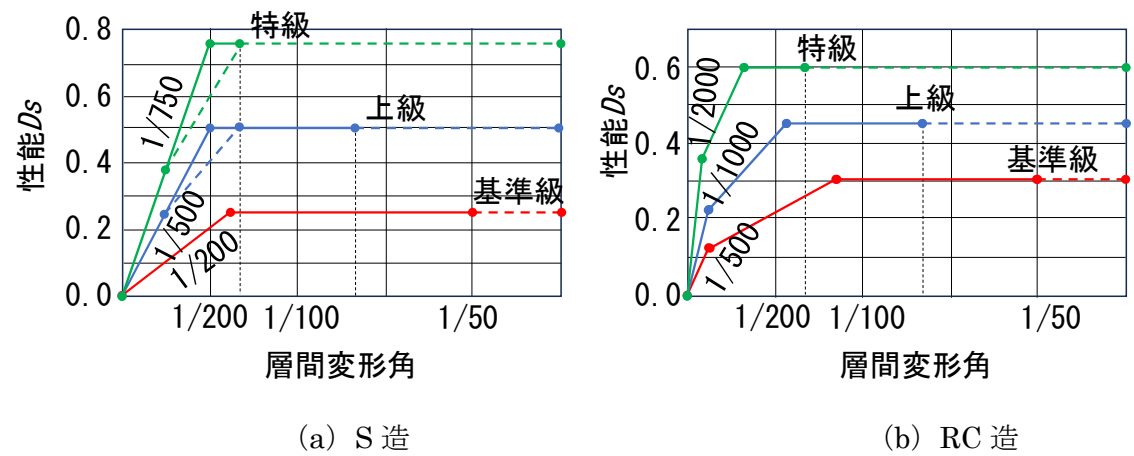


図 5.6 骨格曲線

表 5.3 S 造固有周期（秒）

	4 層		6 層		8 層	
	1st	2nd	1st	2nd	1st	2nd
基準	1.01	0.40	1.18	0.47	1.34	0.52
上級	0.64	0.26	0.75	0.30	0.85	0.33
特級	0.52	0.21	0.61	0.24	0.69	0.27

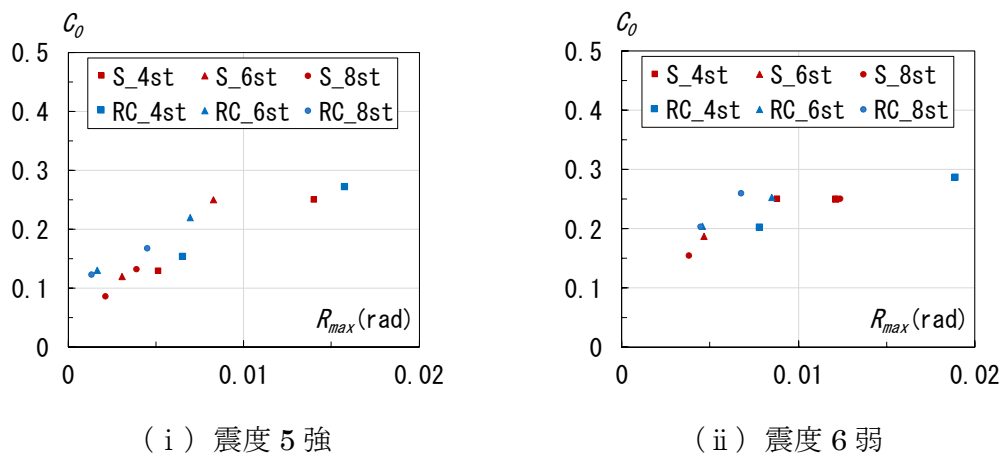
表 5.4 RC 造固有周期（秒）

	4 層		6 層		8 層	
	1st	2nd	1st	2nd	1st	2nd
基準	0.65	0.26	0.76	0.30	0.86	0.34
上級	0.46	0.19	0.54	0.21	0.60	0.24
特級	0.32	0.13	0.38	0.15	0.43	0.17

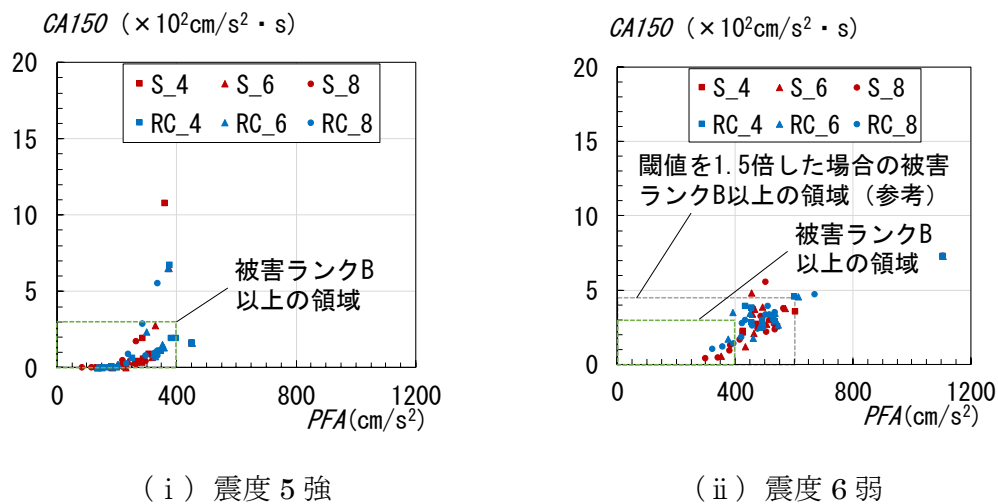
て示している。

5.3.3 応答解析結果

観測波を各モデルに入力して得られた応答解析結果のうち，最大層間変形角 R_{max} とベースシア係数 C_0 の相関関係および屋上を除く各階の PFA と $CA150$ の相関関係を図 5.7 に示す。 R_{max} は各モデルで最も大きな階の最大層間変形角とする。震度 5 強相当の地震動を入力した場合では，70%程度が層せん断力係数 0.2 以下となった結果になった。対して，震度 6 弱相当の地震動を入力した場合では，80%以上が層せん断力係数 0.2 を上回っている。 PFA と $CA150$ の相関関係に着目すると震度 5 強では 80%程度が第 3 章で提案した被害ランクのランク B の閾値以下となっているのに対し，震度 6 弱では 20%程度しかランク B の閾値以下となっていない。これは過去の地震被害調査結果⁸⁾で報告されている「医療機器及び医療空間の使用不能ともに，被害率は震度 5 強までは 5%以下で，震度 6 から急増している傾向」と対応している。一方で，被害率の程度については，被害調査報告結果を数値解析が上回っているが，その理由として，被害の評価基準が異なっていること，本解析モデルと実状の建物の相違，入力された地震波や相互作用の詳細な影響などを考慮できていないことが挙げられる。参考までに閾値を 1.5 倍として， PFA を 600cm/s^2 ， $CA150$ を 4.5 とすると，震度 6 弱でも 80%程度が被害ランク B までに収まっており，調査結果の震度 6 の被害率が 10～30%程度であったこととも対応することから，本提案手法は本研究で比較した室内被害のアンケート結果よりも被害が大なる方に評価された。ただし，解析手法等にも左右されるため一概に安全側の評価になるとは限らない。また，震度 6 弱よりも震度 5 強の方が一部で $CA150$ が大



(a) R_{max} — C_0 図



(b) PFA — $CA150$ 図

図 5.7 観測波の応答解析結果

きくなっているが、これは新冠町北星町 NS 波における建物最上階の応答であり、固有周期 1 秒前後の $CA150$ 応答スペクトルが大きな値を示していることと対応している。

5.4 構造体の耐震等級を変数とした検証

耐震性能グレードと減衰定数を変数とし、入力地震動として告示波、南海トラフ沿いの巨大地震による長時間地震動対策用とした基盤促波 OS215)、首都直下地震を想定した地震動とした JMA 神戸波 NS 波を用いて医療施設の室内被害を予測する。告示波の表層地盤増幅は、一般的な地盤として第 2 種地盤を想定して考慮した。耐震性能グレードには 5.3 節で述べた JSCA の提案する基準級、上級、特級を採用する。

5.4.1 入力地震動と固有値解析結果

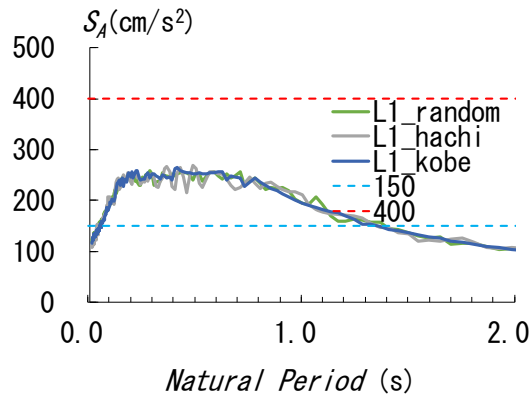
入力地震動を表 5.5, 5.6 に示す. 入力は 1 方向のみとする. これらの地震動について, 減衰定数を 5%とした場合の加速度応答スペクトルと *CA150* 応答スペクトルを図 5.8 に示す. 震度 5 弱のレベル 1 告示波では閾値である *PFA* の 400cm/s^2 , *CA150* の $300\text{cm/s}^2\cdot\text{s}$ を下回っている. 一方で震度 6 弱であるレベル 2 告示波は, 宮城県沖の地震や十勝沖地震などの観測地震動とは異なり, やや短周期領域では応答加速度が大きくなるように設定されているため, 低層建物のように短周期建物ではいずれの周期でもランク B の閾値である *PFA* で 400cm/s^2 , *CA150* で $300\text{cm/s}^2\cdot\text{s}$ を上回っている. そのためレベル 2 告示波に対して, 医療施設の室内被害をランク B 以下に抑えるような耐震建物を設計することは難しいことが示唆される.

表 5.5 レベル 1 検討用入力地震動

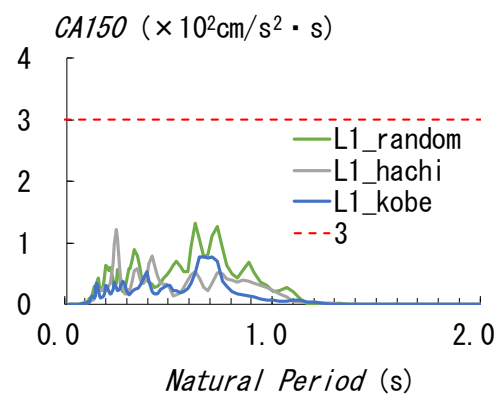
地震波	最大地動加速度 (cm/s^2)
告示波 (八戸位相)	111
告示波 (神戸位相)	121
告示波 (ランダム位相)	119

表 5.6 レベル 2 検討用入力地震動・参考地震動

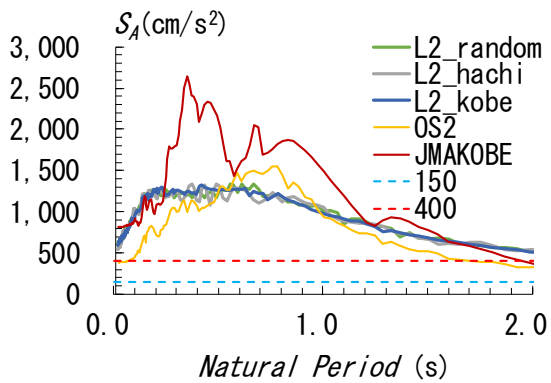
地震波	最大地動加速度 (cm/s^2)
告示波 (八戸位相)	556
告示波 (神戸位相)	603
告示波 (ランダム位相)	620
OS2	390
JMA KOBE NS	818



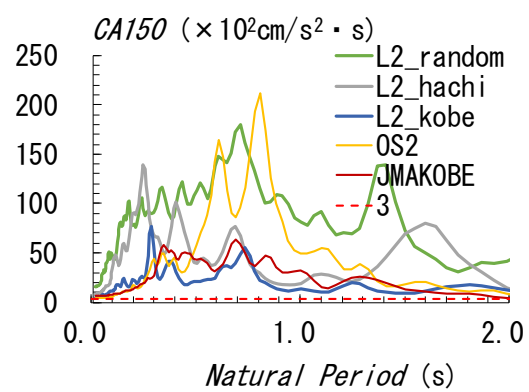
(a) 加速度応答スペクトル (L1)



(b) *CA150* スペクトル (L1)



(c) 加速度応答スペクトル (L2)



(d) *CA150* スペクトル (L2)

図 5.8 応答スペクトル ($h=5\%$)

5.4.2 レベル 1 地震動時の構造体の損傷と室内被害レベル

応答解析結果としてレベル 1 告示波の中で最も *CA150* 応答スペクトルの大きいランダム位相の基準級の場合の各階の塑性率と *PFA* を図 5.9 に示す。基準級のいずれのモデルおよび階においても塑性化することはない最大塑性率は 0.7 程度、*PFA* は最大でも 250cm/s^2 以下、*CA150* は $0.500\text{cm/s}^2 \cdot \text{s}$ 程度で、室内被害ランクの閾値である 400cm/s^2 かつ $300\text{cm/s}^2 \cdot \text{s}$ 以下となっており、被害ランク B までに収まっている。

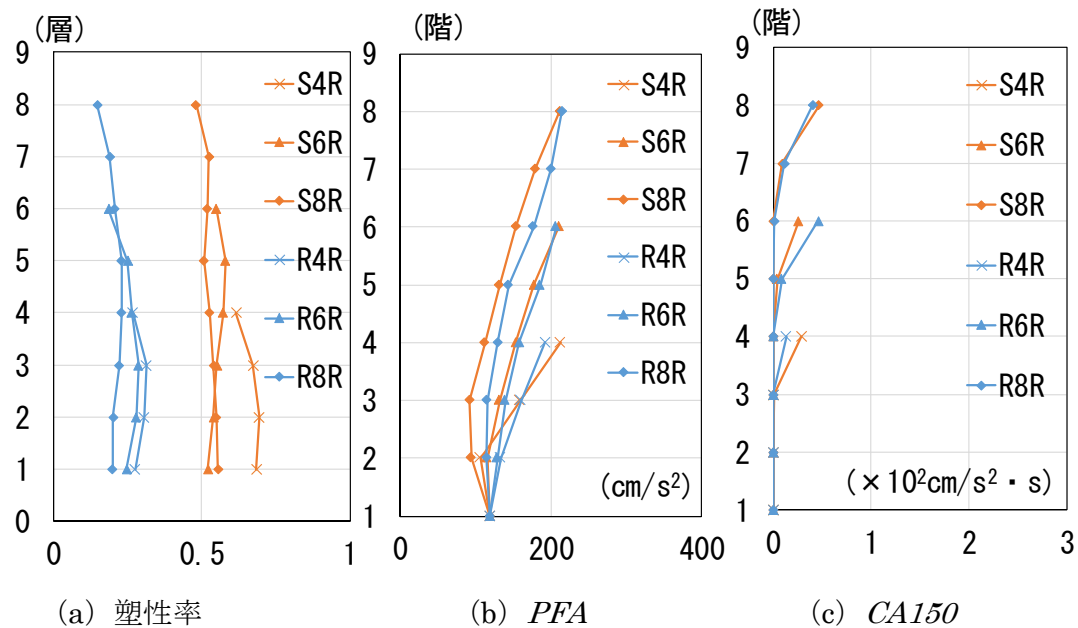
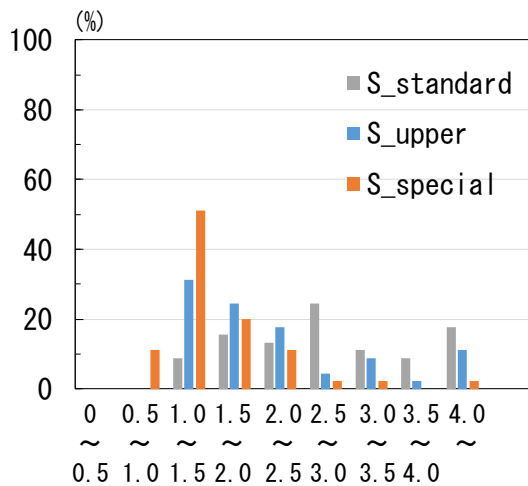


図 5.9 レベル 1 地震動の応答解析結果

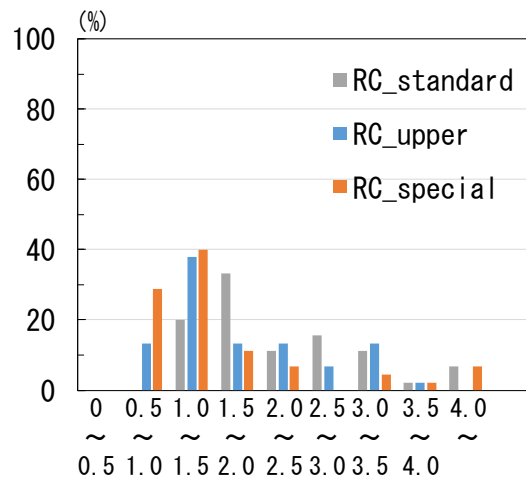
5.4.3 レベル 2 地震動時の構造体の損傷と室内被害レベル

5.2.2 項で提案したフローでは被害レベルを判定する指標の一つとして PFA の 400cm/s^2 を採用している。例え PFA が小さく室内被害が小さくても、構造体としての損傷が大きければ医療行為の継続は難しい。耐震性能グレードを変数とした場合の塑性率と PFA の傾向を把握するため、レベル 2 告示波の応答解析結果として、構造種別、耐震性能グレードごとの塑性率、 PFA のヒストグラムを図 5.10 に示す。ここでは、5.3.2 項と同様に減衰定数 5% とした。

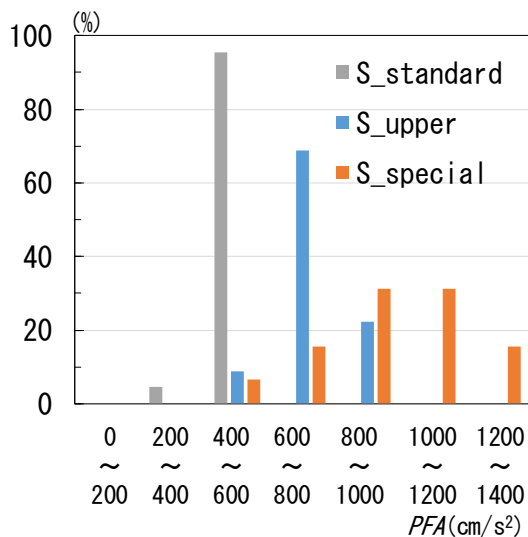
構造種別に関わらず耐震性能グレードを上げることで、塑性率が小さくなる傾向から構造体被害としての抑制効果が確認できる。一方で、耐震性能グレードを上げることで室内被害と相関性の高い PFA については増大し、構造種別に関わらず基準級では 90% 程度は PFA が 600cm/s^2 以下であったが、特級にすることで 80% 以上は 600cm/s^2 を超えている。また、 PFA が比較的小さい基準級においても 400cm/s^2 以下は 5% 以下であり、ほとんどの階において室内被害レベル C 以下となっている。



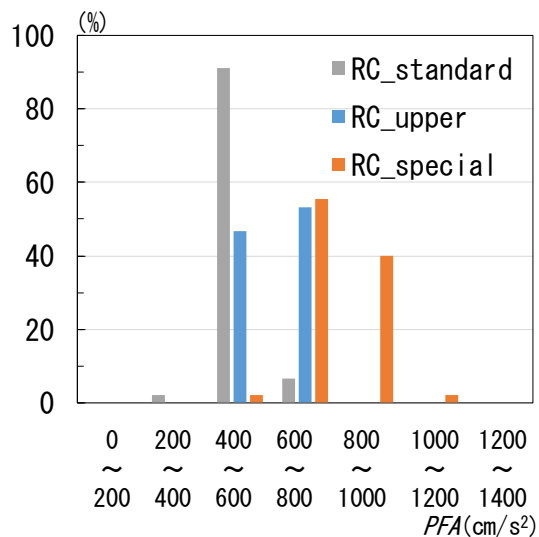
(a) S 造塑性率



(b) RC 造塑性率



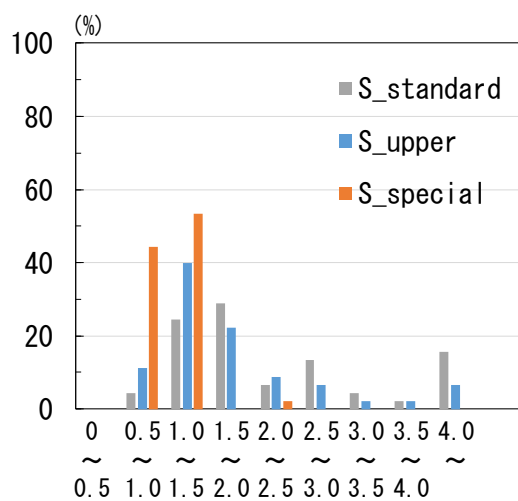
(c) S 造 PFA



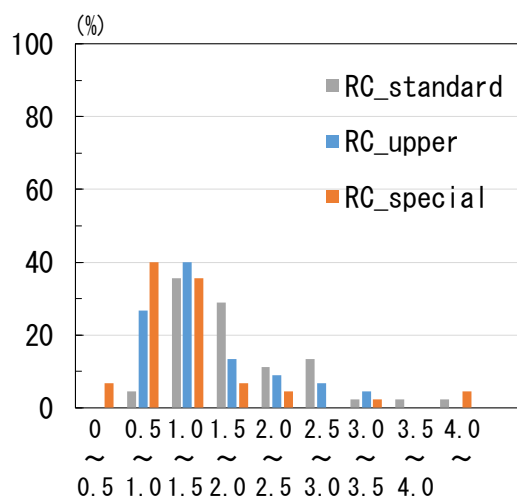
(d) RC 造 PFA

図 5.10 レベル 2 地震動応答の解析結果 ($h=5\%$)

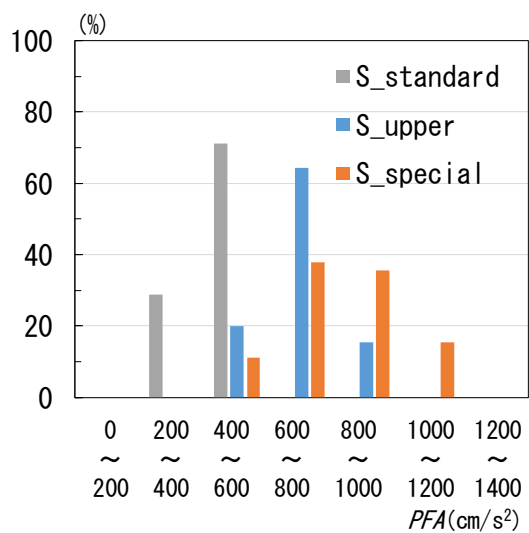
減衰定数を 10%として、ダンパーなどを付与した制振構造を簡易に表現したモデルについて、各耐震性能グレードの応答解析結果を図 5.11 にヒストグラムで示す。減衰を付与することで、塑性率および PFA は小さくなっており、構造体被害だけでなく室内被害の抑制効果がある。しかしながら、 PFA が最も小さいのは基準級で、上級、特級になるにつれて PFA は大きくなっている。比較的 PFA が小さい基準級においても 400cm/s^2 以下は 20%程度に留まっており、設計要件として室内を無被害にすることは難しい。



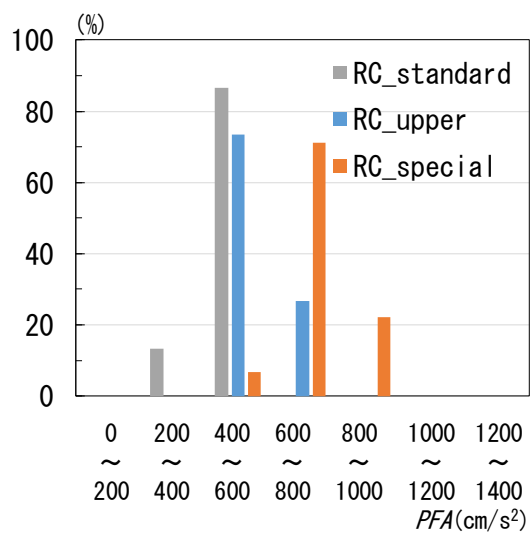
(a) S造塑性率



(b) RC造塑性率



(c) S造 PFA



(d) RC造 PFA

図 5.11 レベル 2 地震動の応答解析結果 ($h=10\%$)

5.4.4 レベル 2 告示波の室内被害程度

耐震性のグレードが室内被害に与える影響を把握するため、図 5.12 に S 造純ラーメン架構の場合、S 造で座屈拘束ブレースを有するラーメン架構の場合、RC 造の場合の PFA 、 PFV と等価振動数 F_e の関係を示す。ここで PFV は PFA と 1 次固有振動数から求めた疑似最大速度応答とする。座屈拘束ブレースを有する架構において、BRB1 は 2 次剛性を 1 次剛性の 0.6 倍にした場合、BRB2 は 2 次剛性を 1 次剛性の 0.45 倍にした場合である。

S 造純ラーメン架構の場合は耐震性能グレードを向上させても PFV が大きく、転倒のリスクは変わらない。一方で、座屈拘束ブレースを有する架構のようなトリリニアモ

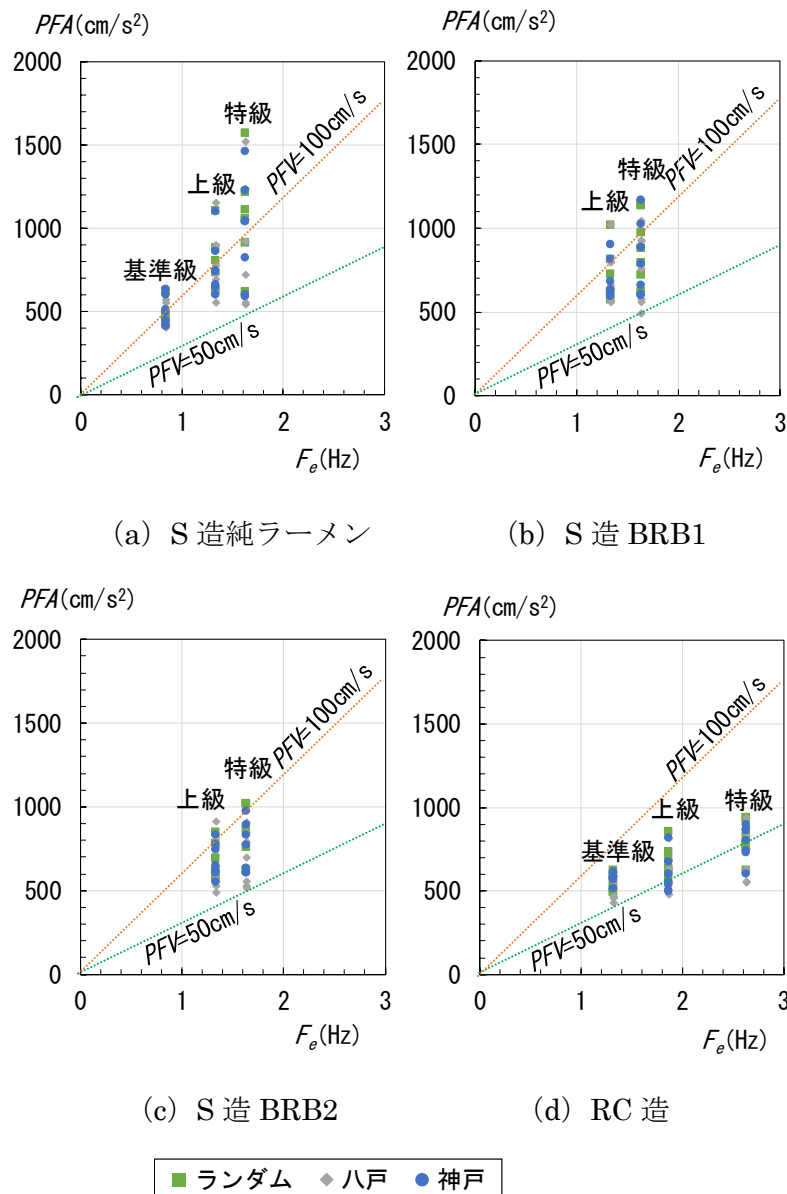


図 5.12 PFA —等価固有振動数

デルにすると、耐震性能グレードを向上させるとともに転倒リスクを低減する。また、1 次剛性に対して 2 次剛性の比率が低いほど転倒リスクを低減する効果が高まっている。RC 造の場合はひび割れを考慮した Takeda 型となるため耐震性能グレードを向上させると転倒リスクが下がる効果がある。これらより耐力が増大すると定性的には等価剛性が増大するため被害が大きくなると考えられる。そのため耐力を小さくするか、耐力を増大する場合は 2 次剛性が小さくなるような構造計画上の配慮により等価剛性を小さくする配慮が必要と考える。

移動量の評価として減衰定数 5%のモデルにおいて応答が相対的に小さい基準級 RC 造のモデルと応答が相対的に大きい特級 S 造純ラーメン架構の *PFA*, *CA150* に着目する。図 5.13 に基準級 RC 造および特級 S 造のレベル 2 告示波に加えて参考用地震動として OS2, JMAKOBEN S の *PFA* と *CA150* の相関図を示す。告示波の基準級 RC 造の床応答はいずれも *PFA* は 400cm/s^2 , *CA150* は $300\text{cm/s}^2\cdot\text{s}$ を超えており、平均値は *PFA* 500cm/s^2 程度, *CA150* は $1000\text{cm/s}^2\cdot\text{s}$ 程度である。これは図 5.3 内の点①, ②, ③付近であり、コロナ重傷患者病室のように医療機器が多いと機器同士接触したり、転倒が生じたり医療行為の継続が難しいレベルの被害となる可能性がある。告示波の特級 S 造床応答の平均値は *PFA* は 900cm/s^2 程度, *CA150* は $4000\text{cm/s}^2\cdot\text{s}$ 程度であり、応答値は上層部ほど大きく、最大で *PFA* は 1200cm/s^2 程度, *CA150* は $16000\text{cm/s}^2\cdot\text{s}$ 程度となり、実大実験結果の近傍の点として図 5.3 内の点⑧, 点⑩と比較するとベッドを含めて室内機器の移動量は大きく、甚大な室内被害レベルになる可能性がある。また地震波の特性として、八戸位相、神戸位相と比較してランダム位相は *PFA* に大きな差異は見られないが、*CA150* が大きく、長周期長時間地震動と同等であるため、室内被害の評価を適切に行うには地震動の位相についても慎重に考慮する必要がある。

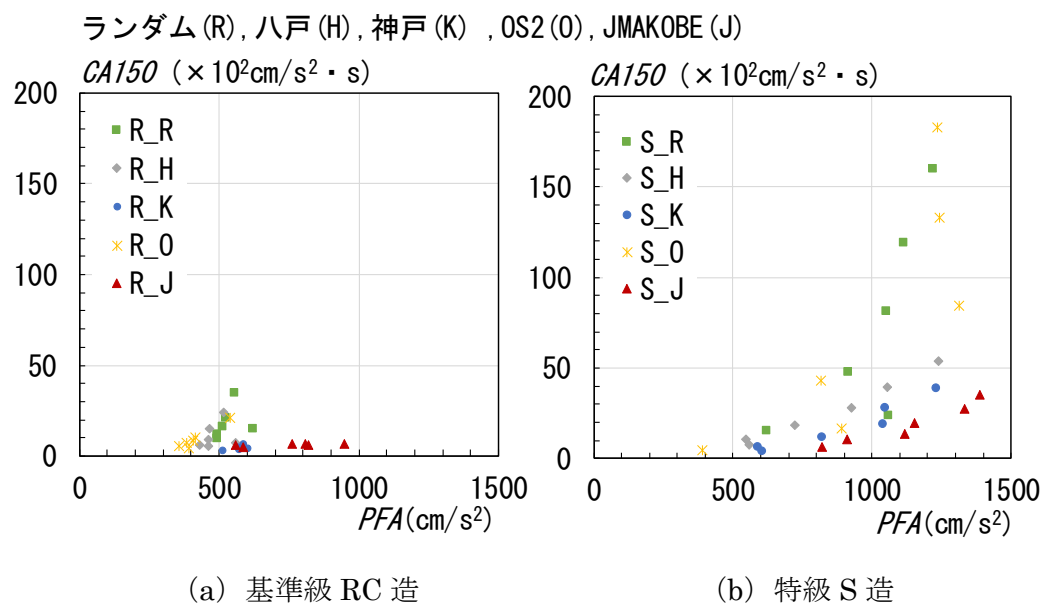
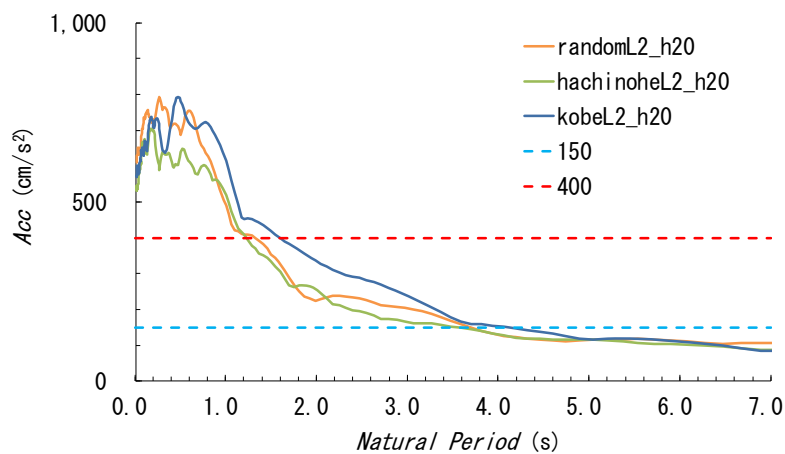


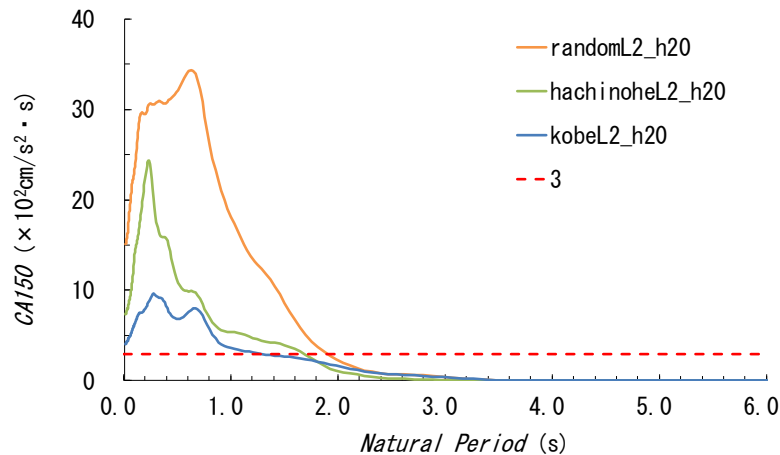
図 5.13 $PFA-CA150$ 図

5.5 免震構造の室内被害ランク

応答スペクトルを用いて簡易的に免震構造建物の室内被害について検討する．減衰定数 h は免震構造に対応させて 20% としている．図 5.14 に告示波（乱数位相・神戸位相・八戸位相）の加速度応答スペクトルと $CA150$ スペクトルを示す．北村らのビルディングレターによる調査^{5,7)}によると，1995 年～99 年といった比較的固有周期が短い免震建物でもほとんどがレベル 2 の最大変位時の固有周期が 2.5 秒以上になっていることから，免震構造においては被害ランク B 以上となり，近年の固有周期が 4 秒を上回る免震建物においては被害ランクが A になる．



(a) 加速度応答スペクトル



(b) $CA150$ スペクトル

図 5.14 応答スペクトル

5.6 まとめ

医療施設の実大振動台実験結果をもとに中低層の医療施設の室内被害ランクを医療従事者と協議し、4段階の被害ランクおよびその工学的評価手法を提案した。まず、過去の地震被害調査結果との照合により提案手法の妥当性を確認した。次に、提案した被害評価手法を用い、JSCA 性能設計説明書の耐震性能グレードと減衰定数を変数とした建物の地震応答解析を行い、構造特性と医療施設の室内被害との関係を検討した。以下に得られた知見を示す。

- ・ 中低層の医療施設の室内被害ランクには、最大床応答加速度、医療機器が動き出す 150cm/s^2 を超える加速度の継続時間である *CA150* と相関が見られた。最大床応答加速度が 400cm/s^2 、最大床応答速度が 100cm/s を超えると多くの機器が転倒や衝突により、医療行為の継続が不可となる可能性が高い。また被害が大きく被害ランクが C または D となる場合には、最大床応答速度を閾値として分類できる可能性を示した。室内被害を評価するには三つの指標を総合的に考慮して判断する必要がある。
- ・ 建築基準法を満足する標準的な建物モデルと過去の地震動による数値解析結果と提案した設計手法により求めた被害ランク C または D となる割合と、過去の地震被害に関する調査結果を照合すると、震度 6 弱から被害率が急増している傾向については対応していた。一方で被害ランク C または D となる割合の大きさについては数値解析結果の方が大きく、その理由としては、被害の評価基準が異なっていること、相互作用の詳細な影響を考慮できていないことが挙げられる。
- ・ 中低層の耐震建物および制振建物では、レベル 1 地震動では構造体、室内被害ともにほぼ無被害に抑えることができる。一方レベル 2 地震動では、耐震性能グレードを上げることで構造体の被害を抑制することはできるが、医療施設の室内被害を抑制することは容易ではない。座屈拘束ブレースのように強度を確保しながらも早期に剛性が低下するトリリニア型の履歴を有する、あるいは鉄筋コンクリート造のようにひび割れにより剛性低下するような機構とすることで転倒防止につなげることができる。しかしながら、室内を無被害に抑えることは困難であり、医療機器側で地震対策を施し、一定の割合の機器が故障することを想定した事業継続性計画を策定する必要がある。

第 5 章の参考文献

- 5.1) JSCA (JAPAN STRUCTURAL CONSULTANTS ASSOCIATION): JSCA Performance Design Manual 2021 [Seismic Performance (Simplified Method) , 2023.3 (in Japanese)JSCA 性能設計説明書 2021 年版【耐震性能編（簡易法）】，一般社団法人日本建築構造技術者協会，2023.3

- 5.2) M. Hitomi, M. Kurata, S. Aida, M. Shimoto, K. Cho, S. Ohtsuru: Medical Equipment Seismic Performance Evaluation for Preventing Rocking and Falling, Transactions of the Japanese Society for Medical and Biological Engineering, 60 (6), 139-148, 2022 (in Japanese). 人見真由, 倉田真宏, 相田伸二, 下戸 学, 趙晃濟, 大鶴 繁: 地震時における医療機器のロッキング・転倒に関する危険性評価, 生体医工学誌, 60 (6), 139-148, 2022, (DOI: <https://doi.org/10.11239/jsmbe.60.139>)
- 5.3) S.Furukawa et al: Full-scale shaking table test of a base-isolated medical facility subjected to vertical motions, Earthquake Engng Struct. Dyn. 2013; 42:1931–1949, (DOI: 10.1002/eqe.2305)
- 5.4) K-C. Kuo, Y. Hayashi, H. Kambara: Relationship between damages of hospital facilities and seismic intensity based on questionnaire survey, J. Struct Constr. Eng., AIJ Vol. 69 No. 586, 63-69, Dec., 2004(in Japanese) 郭 耕杖, 林 康裕, 神原 浩: アンケート調査に基づく病院の地震被害と震度との関係, 日本建築学会構造系論文集, pp.63-69, 2004.12 (DOI: https://doi.org/10.3130/aijs.69.63_6)
- 5.5) Japan Meteorological Agency Website : kyoshinkansokudeta (Strong-motion earthquake observation data) <https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/kyoshin/jishin/index.html> (in Japanese) 気象庁: 強震観測データ
- 5.6) 2001 edition of the Limit Strength Calculation Method with Examples of Calculations and Commentary, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, eds. Housing Bureau, Construction Guidance Division, pp40-41, 2001,3 (in Japanese) 2001 年版 限界耐力計算法の計算例とその解説, 国土交通省住宅局建築指導課ほか編, pp40-41, 2001,3
- 5.7) 北村春幸, 東野さやか, 竹中康雄, 田村和夫: 長周期地震動による既存免震建物の耐震性能評価, 日本建築学会技術報告集 第 22 号, 127-132, 2005 年 12 月

6. 結論

近年、2016 年熊本地震、2024 年能登半島地震など震度 7 を計測する巨大地震が頻発し、災害時にも事業継続を求められる医療機関や官庁施設などに大きな被害が出ている。南海トラフ沿いの巨大連動地震により広域で長周期長時間地震動が高い確率で発生することが危惧されているなか、災害時に拠点となる建築物の事業継続性の確保は喫緊の課題となっている。

地震時において医療器施設の機能維持・事業継続性を確保するためには、建物の構造特性や床応答に応じた医療機器や病室内の被害評価の予測手法およびその予測手法を活用した一般什器および医療機器の室内被害抑制に配慮した設計が必要不可欠である。

これら医療施設に関する現状を踏まえて、本論文では室内被害を考慮した医療施設の耐震設計手法を提案するために、以下の情報を提供した。

- (1) 地震動と機器の転倒や移動量との関係について、要素実験及び実大病院建物の振動台実験で得られた結果とその分析を報告する。医療機器の管理区分などを考慮して、転倒や衝突、回路のはずれなどによる医療継続性への影響を分析する。
- (2) 免震装置の要素実験と E-ディフェンス実験施設における実大病院建物の振動台実験により、面圧、速度、静止摩擦係数が低摩擦球面すべり支承の性能に及ぼす影響を調べる。
- (3) 機器単体の詳細な挙動や損傷を評価対象とせず、室としての被害程度を大きく分類し、それを予測するための各床応答値の指標と被害程度の相関性を実大実験により検証し、医療施設の被害評価の予測手法を提案する。

それぞれより得られた知見を以下にまとめる。

医療施設の実大震動台実験試験体の設計と結果概要

E ディフェンスで実施した病院建物試験体の震動台実験の試験体の設計方針、事前数値応答解析結果、実験結果の概要、実験後の数値応答解析、簡易評価方法の推定値の精度について述べた。耐震試験体は、「官庁施設の総合耐震・対津波計画基準」の耐震安全性の分類 I 類相当として、大地震動後、構造体を補修せず建築物を使用できることを目標として設計した。免震試験体は免震装置に米国では一般的であり、日本でも中低層建物を中心に普及が拡大している球面すべり支承を用いた。耐震試験体と免震試験体には、医療従事者と協議の上で、一般的に必要なとされる医療機器を設置した。

耐震試験体は 1 次設計時相当の地震力では弾性範囲留まり、2 次設計時相当の地震力では、最大層間変形角で 0.018rad に達した。事前数値解析では想定していた仕上げ荷重が試験体より大きく固有周期が異なり、2 割程度変形が大きくなった。

実験後の数値解析により剛性、耐力、最大変形において実験との対応が見られた。

簡易法による推定においても、1方向入力における初期剛性や最大変形においては一致した。一方2方向入力については、露出柱脚における2軸曲げに対するモデル化に課題があることを確認した。損傷状況の予測においては精度良く予測した性能設計が現段階においては難しいことを確認した。

震動台実験における医療機器の地震時挙動

過去に実施されたキャスター付き台車の引張試験から、振動台実験で使用する床材について、転がり摩擦係数、沈み込み係数、摩擦係数を整理した。床材に厚みがあり柔らかい場合には、転がり摩擦係数は2倍程度異なった。病院での作業効率を考えると厚さの限度があるが、やわらかく厚みのある床を採用することで、沈み込み係数や転がり摩擦係数を増やし地震時の移動量を低減できる可能性がある。

振動台実験でキャスターがロックされた医療機器が動き出した加速度の約 400cm/s^2 は、要素実験で得られた摩擦係数と沈み込み係数を足した値と良く対応した。重心の高い機器では、キャスターのロックが外れた機器や、前面ロックでロッキングが生じた機器が多く、約 150cm/s^2 で動き出した。転がり摩擦係数と沈み込み係数を足した値と高い相関を示した。

振動台実験では、直下型地震動より最大床応答加速度が小さかった長周期長時間地震動で、病院室内の被害が相当大きくなった。床加速度応答スペクトルのピーク値は同等で、エネルギースペクトルのピーク値は長周期長時間地震動の方が大きくなっており、室内被害の低減を目標とした設計では注意を要する。

機器の転倒はキャスター幅を重心高さで除した比 (B/H) の小さい機器に生じやすい。機器単独または、壁や機器との接触によりバランスを崩して転倒するが、床材の種類によらず、加速度 400cm/s^2 以上、速度 50cm/s 以上で確認された。

患者を載せる機器 (分類①) とその他の医療機器 (分類②) の移動量について、床応答加速度および継続時間の影響を考慮した Arias Intensity (IA) との相関を評価した。分類①では、 IA が 10m/s 以上で急激に最大移動量が増えている。分類②では、 IA が小さい領域から最大移動量が増え始めて、 10m/s 以上で急激に増加する。これは B/H が分類①と比較して分類②の方が小さいことが原因と考えられる。設計時の参考として、機器の最大移動量と IA の関係を対数線形回帰した場合の近似式を提示した。 IA が小さい領域から最大移動量が増え始める分類②の方が回帰モデルとの相関が高い。ただし、ばらつきが大きいため、床応答から最大移動量を予測式としては誤差が大きく参考程度に留まる。

コロナ重症患者病室、NICU、手術室における医療行為の継続性を分析した。転倒しなくても移動により壁や医療機器同士衝突により、高度管理医療機器などは継続使用が

難しくなる。床応答加速度を低減することや機器の B/H を大きくすることを大地震時の医療継続性対策として検討していく必要がある。

球面すべり支承を用いた免震構造の挙動

応答スペクトル法は、長周期・長時間地震動に対する実験での最大変位を過大評価した。比較的短周期のパルスを持つ近傍地震動に対しては、一般的に良好な応答を示した。

感度分析では、低摩擦すべり支承の動摩擦係数の速度依存式は、低面圧および低速条件下で修正が必要であった。軸力変動と上下動の影響は、全体的な応答に関して影響が小さかった。

振動台実験で同定された静摩擦係数は、動摩擦係数の 1.9～4.5 倍であり、その平均値は要素実験結果 0.0179（速度 400 mm/s 時）の約 2.3 倍であった。しかし、残留変位、移動量、上部構造の最大せん断力への影響は小さかった。この結果は、静止摩擦係数を無視した現在の設計プロセスを支持するものである。

動摩擦係数 0.013 の低摩擦球面すべり支承は、加速度と速度を大幅に低減し、実験において内部医療機器の損傷を抑制した。摩擦係数 0.043 の場合、長周期・長時間地震動に対してエネルギー床応答スペクトルが大幅に増加した。この増加は、医療機器が変位する病室内で機能障害を引き起こす可能性がある。

実際の設計では、加速度を抑制し、U 字型ダンパーなどの初期剛性の低いダンパーを用いてエネルギーを吸収し、変位を低減するために、低摩擦球面すべり支承を使用することが効果的と考えられる。また、床加速度と免震層変位の目標値を達成するために、低摩擦支承と中程度の摩擦支承を組み合わせることも一般的である。

室内被害を考慮した中低層の医療施設の簡易性能設計手法

医療施設の実大振動台実験結果をもとに中低層の医療施設の室内被害ランクを医療従事者と協議し、4 段階の被害ランクおよびその工学的評価手法を提案した。まず、過去の地震被害調査結果との照合により提案手法の妥当性を確認した。次に、提案した被害評価手法を用い、JSCA 性能設計説明書の耐震性能グレードと減衰定数を変数とした建物の地震応答解析を行い、構造特性と医療施設の室内被害との関係を検討した。

中低層の医療施設の室内被害ランクには、最大床応答加速度、医療機器が動き出す 150cm/s^2 を超える加速度の継続時間である $CA150$ と相関が見られた。最大床応答加速度が 400cm/s^2 、最大床応答速度が 100cm/s を超えると多くの機器が転倒や衝突により、医療行為の継続が不可となる可能性が高い。また被害が大きく被害ランクが C または D となる場合には、最大床応答速度を閾値として分類できる可能性を示した。室内被害

を評価するには三つの指標を総合的に考慮して判断する必要がある。

建築基準法を満足する標準的な建物モデルと過去の地震動による数値解析結果と提案した設計手法により求めた被害ランク C または D となる割合と、過去の地震被害に関する調査結果を照合すると、震度 6 弱から被害率が急増している傾向については対応していた。一方で被害ランク C または D となる割合の大きさについては数値解析結果の方が大きく、その理由としては、被害の評価基準が異なっていること、相互作用の詳細な影響を考慮できていないことが挙げられる。

中低層の耐震建物および制振建物では、レベル 1 地震動では構造体、室内被害ともにほぼ無被害に抑えることができる。一方レベル 2 地震動では、耐震性能グレードを上げることで構造体の被害を抑制することはできるが、医療施設の室内被害を抑制することは容易ではない。座屈拘束ブレースのように強度を確保しながらも早期に剛性が低下するトリリニア型の履歴を有する、あるいは鉄筋コンクリート造のようにひび割れにより剛性低下するような機構とすることで転倒防止につなげることができる。しかしながら、室内を無被害に抑えることは困難であり、医療機器側で地震対策を施し、一定の割合の機器が故障することを想定した事業継続性計画を策定する必要がある。

以上、本研究では、室内被害を考慮した医療施設の耐震設計手法を提案するために、実大震動台実験により地震時の医療機器の挙動と事業継続性の相関を分析し、被害評価の予測手法を提案することで、医療機器の室内被害抑制に配慮した設計に必要な情報を提供した。

発表論文リスト

審査論文：

1. M. Kurata, M. Akazawa, S. Aida, K. Cho, Y. Kawamata, K. Saburi, S. Ohtsuru: Seismic Behavior of Medical Equipment in Earthquake-Resistant- and Seismically-Isolated Buildings at E-Defense Shaking Table Tests, J. Struct Constr. Eng., AIJ Vol. 88 No. 809, 1116-1123, Jul., 2023 (in Japanese) 倉田真宏, 赤澤 資貴, 相田 伸二, 趙 晃済, 河又 洋介, 佐分利 和宏, 大鶴 繁: E-ディフェンス震動台実験における耐震・免震建物に設置された医療機器の地震時挙動, 日本建築学会構造系論文集, pp.1116-1123, 2023.7 (DOI: <https://doi.org/10.3130/aijs.88.1116>)
2. M. Akazawa, M. Kurata, S. Yamazaki, Y. Kawamata, S. Matsuo: Test and sensitivity analysis of base-isolated steel frame with low-friction spherical sliding bearings, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Oct., 2024; doi.org/10.1002/eqe.4249
3. (2025 年 3 月掲載予定) M. Akazawa, M. Kurata, S. Aida, K. Cho: RELATIONSHIP OF STRUCTURAL PROPERTIES AND ROOM DAMAGE RANK AT LOW- TO-MID-RISE MEDICAL FACILITIES, J. Struct Constr. Eng. (in Japanese) 赤澤 資貴, 倉田 真宏, 相田 伸二, 趙 晃済: 中低層医療施設の構造特性と室内被害ランクとの関係性, 日本建築学会構造系論文集

会議論文：

1. M. Kurata, Y. Kawamata, M. Akazawa, I. Kanao, S. Ohtsuru, S. Matsuo, K. Fujita, K. Cho, K. Kojima, S. Aida, T. Tsutsumi, K. Saburi: LARGE-SCALE TESTING FOR SEISMIC DAMAGE AND FUNCTIONAL DISORDER ASSESSMENT OF HOSPITAL SYSTEM, The 18th World Conference on Earthquake Engineering (WCEE2024), MILAN, Italy, June 30th to July 5th, 2024.
2. Kurata, M., Kawamata, Y., Kanao, I., Ohtsuru, S., Fujita, K., Matsuo, S., Kojima, K., Cho, K., Tsutsumi, T., Aida, S., Akazawa, M., Saburi, K., Nishitani, A. "2020 E-Defense Test for Integrated Structural, Nonstructural and Functionality Assessment of Medical Facilities," 12th National Conference on Earthquake Engineering, EERI, Salt Lake City, 2022.6

本論文に関する口頭発表：

1. 赤澤資貴, 佐分利和宏, 倉田真宏, 松尾真太郎, 河又洋介: 低層重要建物の設計検討と終局状態, 日本建築学会術講演梗概集, Vol.2019-07, pp. 1233-1234

2. 赤澤資貴, 佐分利和宏, 倉田真宏, 松尾真太郎, 河又洋介, 山崎伸介: 球面すべり支承を用いた低層免震建物の挙動, 日本建築学会術講演梗概集, Vol.2020-9, pp. 613-614
3. 赤澤資貴, 佐分利和宏, 倉田真宏, 山崎伸介, 松尾真太郎, 河又洋介: 球面すべり支承を用いた3層免震建屋のE-ディフェンス震動台実験 Part1 設計概要と全体挙動, 日本建築学会術講演梗概集, Vol.2021-7, pp. 455-456
4. 山崎伸介, 倉田真宏, 赤澤資貴, 佐分利和宏, 松尾真太郎, 河又洋介: 球面すべり支承を用いた3層免震建屋のE-ディフェンス震動台実験 Part2 球面すべり支承の動的性能, 日本建築学会術講演梗概集, Vol.2021-7, pp. 457-458
5. 佐分利和宏, 赤澤資貴, 倉田真宏, 松尾真太郎, 河又洋介: 露出型柱脚を用いた4層鉄骨造耐震骨組のE-ディフェンス震動台実験 その1 骨組全体の挙動, 日本建築学会術講演梗概集, Vol.2021-7, pp. 1157-1158
6. 松尾真太郎, 倉田真宏, 佐分利和宏, 赤澤資貴, 河又洋介: 露出型柱脚を用いた4層鉄骨造耐震骨組のE-ディフェンス震動台実験 その2 構造部材の挙動, 日本建築学会術講演梗概集, Vol.2021-7, pp. 1157-1158
7. 赤澤資貴, 倉田真宏, 趙晃斉, 堤貴彦, 相田伸二, 大鶴繁, 河又洋介, 佐分利和宏: E-ディフェンス震動台実験による耐震建物に設置された中大地震時の医療機器の挙動, 日本建築学会術講演梗概集, Vol.2022-07, pp. 199-200
8. 赤澤資貴, 倉田真宏, 松尾真太郎, 河又洋介, 佐分利和宏: 露出型柱脚を用いた4層鉄骨造耐震骨組のE-ディフェンス震動台実験 その3 静的解析による予測と実験結果との比較, 日本建築学会術講演梗概集, Vol.2023-07, pp. 911-912
9. 赤澤資貴, 倉田真宏, 趙晃斉, 相田伸二, 河又洋介: E-ディフェンス震動台実験による医療施設における床応答値と医療機器の被害程度の比較, 日本建築学会術講演梗概集, Vol.2024-07, pp. 211-212

その他の近年の主な業績

1. 松岡祐一, 吹田啓一郎, 山田哲, 島田侑子, 赤澤資貴, 松宮智央: 実大4層鉄骨造建物の震動台実験における外装材の耐震性能評価, 日本建築学会構造系論文集, pp.1353-1361, 2009.7 (DOI: <https://doi.org/10.3130/aijs.74.1353>)
2. 島田侑子, 赤澤資貴, 伊藤陽介, 松岡祐一, 山田哲, 吹田啓一郎: 鋼構造小型立体骨組の崩壊挙動に関する振動台実験, 日本建築学会構造系論文集, pp.125-132, 2007.10 (DOI: https://doi.org/10.3130/aijs.72.125_3)
3. 吹田啓一郎, 赤澤資貴, 山田祥平: 1969年に建設された隅肉溶接による既存鉄骨骨組の耐震性能, 日本建築学会構造系論文集, pp.215-222, 2007.2 (DOI: https://doi.org/10.3130/aijs.72.215_1)
4. Otsuki, Y., Kurata, M., Skalomenos, K.A., Ikeda, Y., Akazawa, M. "Fragility

Function Development and Seismic Loss Assessment of Expansion Joints,”
Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 48(9), pp. 1007-1029,
<https://doi.org/10.1002/eqe.3171>, 2019.7.10

5. 2007 年 日本建築学会 優秀卒業論文賞 (1969 年に建設された既存鉄骨建物が現
有する耐震性能の検証)
6. 2018 年 日本建築協会 青年技術者賞
7. 2022 年 日本免震構造協会賞作品賞 (深江竹友寮)
8. 2022 年 日本コンクリート工学会 コンクリート工学会賞作品賞 (龍谷大学深草
キャンパス成就館)

謝辞

筆者は 2008 年に京都大学大学院を修了した後、竹中工務店設計部構造設計部門にて
構造設計に従事しました。2020 年 12 月に実施された鉄骨造病院施設の Eーディフェ
ンス震動台実験の試験体設計として 2017 年度より SWG メンバーとして参画させてい
ただき、2022 年より京都大学大学院工学研究科博士後期課程の学生として研究活動
を行ってきました。本論文は、多数の方々の御支援、御指導のもと、この間に行った研究
の成果をまとめたものです。

倉田真宏先生 (京都大学防災研究所准教授) には、Eーディフェンス震動台実験とい
う貴重な実験に設計者として参画させていただいた上に、学生として学びの機会を与
えていただき、研究へのアプローチから論文の書き方まで手取り足取り丁寧にご指導い
ただきました。先生の深い専門知識に加えて、国内のみならず海外とも常に繋がり、情報
をキャッチされる広い視野とコミュニケーション力からは強い刺激と「技術者としてこ
うありたい」と思える、新たな道への挑戦の動機をいただきました。先生のもとで学べ
た経験はかけがえのないものであり、改めて感謝の意を表すと同時に、いただいた経験
や知識を社会に還元できるような人間になりたいと考えております。

池田芳樹先生 (京都大学防災研究所教授) には、研究に対しての視点や考え方につい
て多大なるご助言をいただいたとともに、博士号取得に対する姿勢やその重みを教えて
いただきました。ここに深く感謝の意を表わします。

西山峰広先生 (京都大学教授)、聲高裕治先生 (京都大学教授) には、論文審査を通
じて貴重なご意見をいただきました。ここに深く感謝の意を表わします。

E ディフェンスでの震動台実験は、河又洋介氏 (防災科学技術研究所)、金尾伊織先
生 (京都工芸繊維大学教授)、大鶴繁先生 (京都大学教授)、藤田皓平先生 (京都大学准
教授)、松尾真太郎先生 (九州大学准教授)、小島紘太郎先生 (京都工芸繊維大学准教授)、
趙晃齊先生 (京都医療センター)、堤貴彦先生 (京都大学特定病院助教)、相田伸二先生
(京都大学医学部附属病院)、佐分利和宏氏 (竹中工務店) 及びその研究室の方々の御

指導・御協力を得て行いました。皆様のおかげで新たな気付きや知見を得ることができ、博士論文としてまとめることができたこと強く感じております。ここに深く感謝の意を表します。

日鉄エンジニアリングの山崎様助言には球面すべり支承の挙動の分析にあたって多大なご指導，ご支援をいただきました。謹んで厚く御礼を申し上げます。

実大震動台実験は、「首都圏を中心としたレジリエンス総合力向上プロジェクト サブ I 非構造部材を含む構造物の崩壊余裕度に関するデータ収集・整備」と JSPS 科研費 No.21H04598 の助成を受けて実施しました。実大試験体の設計製作では、日本製鉄、日鉄建材、日鉄エンジニアリング、センクシア、新高製作所、セントラルユニ、日機装、田島ルーフィング、森松工業、内藤設計事務所、OKUJU の各社にご協力いただきました。京大病院、宇治徳洲会病院、西陣病院、佼成病院、大垣市民病院の医療関係者、京都大学と京都工芸繊維大学の学生諸君や技術職員の皆さまには多大なご協力をいただきました。ここに深く感謝の意を表します。

最後に、池田・倉田研究室の方々には、研究および実験の遂行に対してご協力いただくとともに、大変お世話になりました。皆様方のご協力に深く感謝いたします。