3.3 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

3.3.3 災害時重要施設の高機能設備性能評価と機能損失判定　（課題 c③）

(1) 業務の内容

(a) 業務の目的

本委託業務では、サブプロジェクト(c)のうち、「③ 災害時重要施設の高機能設備性能評価と機能損失判定」として、災害時にも継続的な運用が期待される地域医療の中核病院等を対象に、地震直後にその機能損失度を定量的に評価する手法を提案し、無用な混乱を回避し安全かつ効率的な管理者の被災後運用判断を支援する仕組みに関する研究開発を行う。具体的には、高機能設備を付した病院建物に対する大型振動台実験を実施し、建物崩壊余裕度、病院機能の低下要因の特定、高機能設備個別の性能評価、施設の機能損失に関する定量的判定法を提案する。

(b) ２０２０年度業務目的

2020(令和 2)年 11 月にＥ－ディフェンスにて大型振動台実験を実施する。各居室への医療機器の配置計画を最終決定し、試験体を製作する。また数値解析により試験体の応答を予測し、その結果に基づいて実験計画、計測計画、ならびに加振計画の最終案を策定する。さらに、構造部材、非構造部材や高機能設備の被災度を評価するシステムについて性能を評価する。

(c) 担当者

所属機関	役職	氏名
京都大学　防災研究所	准教授	倉田　真宏
防災科学技術研究所	主任研究員	河又　洋介
京都工芸繊維大学　工芸科学研究科	教授	金尾　伊織
京都大学　医学部附属病院	教授	大鶴　繁
九州大学　人間環境学研究院	准教授	松尾　真太郎
京都大学　工学研究科	准教授	藤田　皓平
京都大学　医学部附属病院	講師	趙　晃済
京都工芸繊維大学　工芸科学研究科	助教	小島　紘太郎
京都大学　医学部附属病院	技師長	相田　伸二
京都大学　医学部附属病院	医員	堤　貴彦
京都大学　防災研究所	研究員	Giuseppe Marzano
京都大学　防災研究所	研究員	Jiantao Huang
京都大学　防災研究所	研究員	Jasmine Gipson

(2) ２０２０年度の成果

(a) 業務の要約

- 2020 年 12 月にＥ－ディフェンスにて実施した大型振動台実験について、昨年度に

作成した施工図に基づき、実大鋼構造骨組を製作した。非構造部材の配置を最終決定し、施工図を作成した。施工図に基づき、骨組内に非構造部材・機器を施工した。

- 医療関係者や医療機器メーカーとの協議の上、各居室への医療機器の配置計画を最終決定した。レイアウト図を作成し、非構造部材を施工した試験体内に医療機器を設置した。
- 数値解析により試験体の応答を予測し、その結果に基づいて実験計画、計測計画、加振計画の最終案を策定した。
- 実験で得られた応答結果について、分析を開始した。事前に構築した数値解析モデルを用いて、応答結果と解析結果を比較した。
- 実験データを分析し、非構造部材や高機能設備の被災度を評価した。
- 医療機器の被害を分析し、事業継続性を評価した。
- モニタリングシステムで得られたデータを分析し、システムの性能を評価した。

(b) 業務の成果

1) 振動台実験用試験体

a) 試験体の設計と製作

2020 年 12 月に兵庫県耐震工学研究センター（E－ディフェンス）において、病院施設の実大震動台実験を実施した。試験体の平面図および軸組図を図 1、図 2 に示す。図 1 に示すように、耐震構造と免震構造の鋼骨組が渡り廊下で繋がれた試験体を用いた。平面の大きさは、耐震建物が 7m×10m、免震建物が 5m×6m で、短辺方向と長辺方向に加振した。階高（床スラブ天端間の距離）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。試験体の総重量は耐震建物が約 3,200kN、免震建物は約 2,000kN であった。梁断面および柱断面を表 1、表 2 にまとめる。スラブは、フラットデッキおよびサイノスデッキを用いて施工し、スラブ厚は、免震棟 R 階は 610 mm、それ以外は 150 mm とした。また、免震棟 1 階および 2 階の渡り廊下が接続されている反対側には、重量のバランスをとるための増打壁を設けた。免震装置は球面すべり支承を、基礎とベースプレートを固定する柱脚部はハイベース工法を採用した。耐震棟と免震棟は、渡り廊下で繋がれており、接続部にはエキスパンションジョイントを設置した。

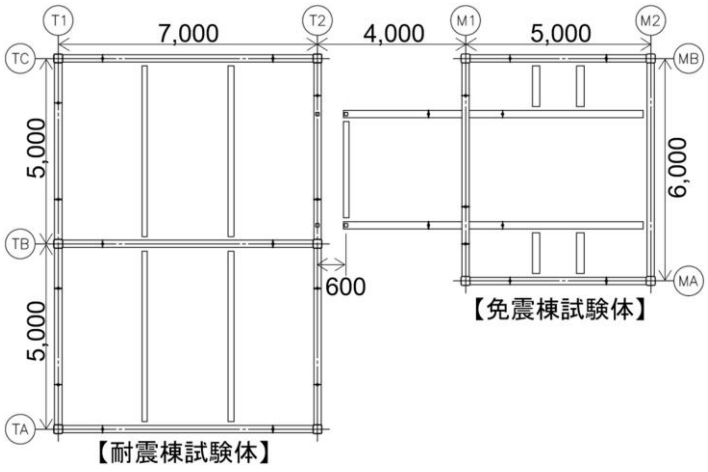


図 1　平面図（単位：mm）

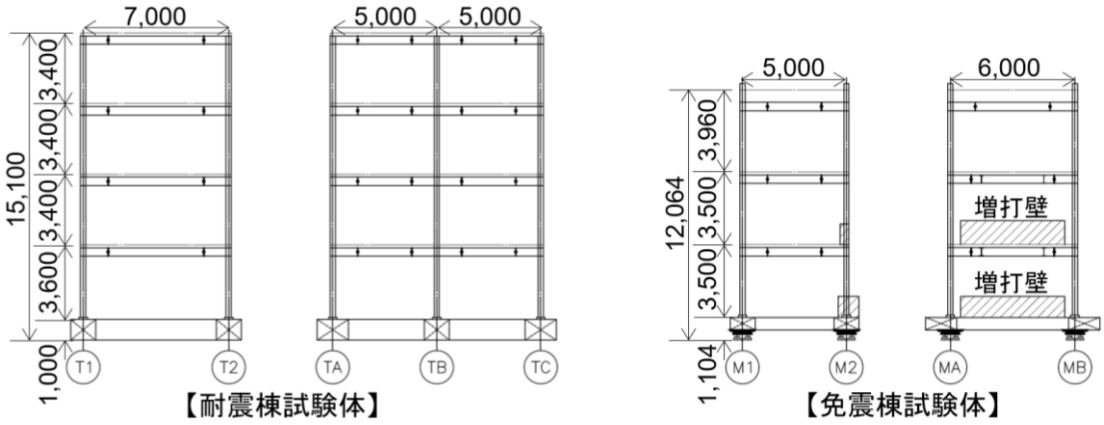


図 2　軸組図（単位：mm）

表 1　梁断面

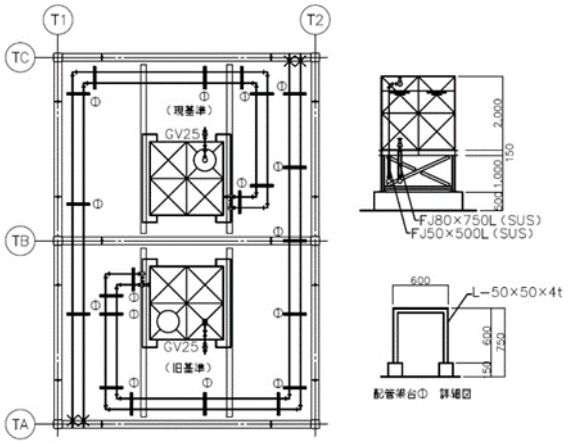
試験体	断面
耐震試験体　1F, 2F, 4F, RF	H－400×200×8×13
耐震試験体　3F	BH－400×150×6×19
免震試験体　1~3F	H－400×200×8×13

表 2　柱断面

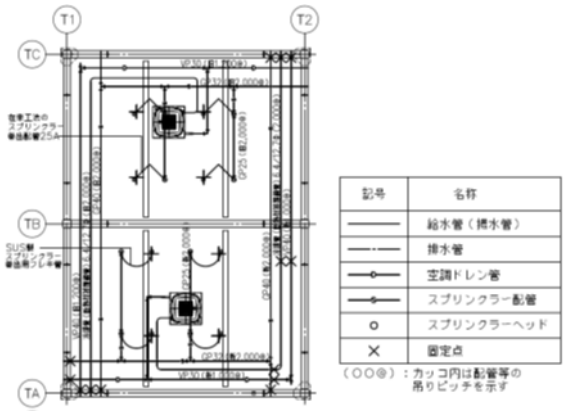
試験体	断面
耐震試験体　1～4F	□－250×250×16
免震試験体　1~3F	□－250×250×9

試験体内部には、病院機能を模擬するため、設備配管、間仕切壁、天井を配置した。設備配管として、吊り配管を耐震棟 3 階と 4 階に、高架水槽および置き配管を耐震棟 R 階に設置した（図 3)。また、間仕切壁と吊り天井は、耐震棟 2 階、3 階、4 階および免震棟 2 階に施工した（図 4)。3F は手術室を形成するために、間仕切壁の内側にユニット型の内壁を設置し、また天井はクリーンルームに用いられる材料とした。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。

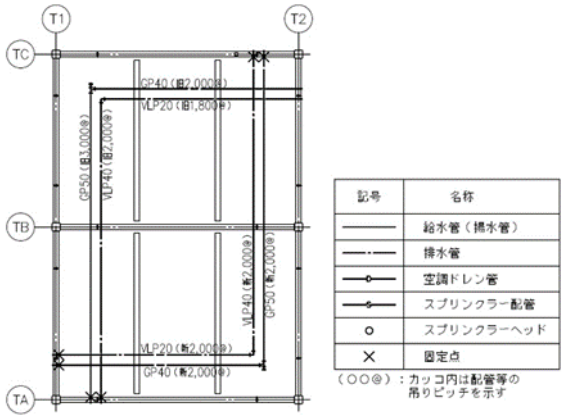
医療機器の配置図を図 5 に示す。各部屋は、手術室や NICU などを再現し、医師、臨床工学技士、看護師、医療メーカーと協議の上、各部屋に一般的に存在する機器を配置した。機器は展示用や廃棄予定の備品を各地の医療施設から収集した。種類の異なる床材を敷設した。一部の医療機器に加速度計を設置して、その挙動を計測するとともに、多数のカメラを設置して、各部屋の状況を撮影した。



(a) 耐震棟 R 階高架水槽・置き配管

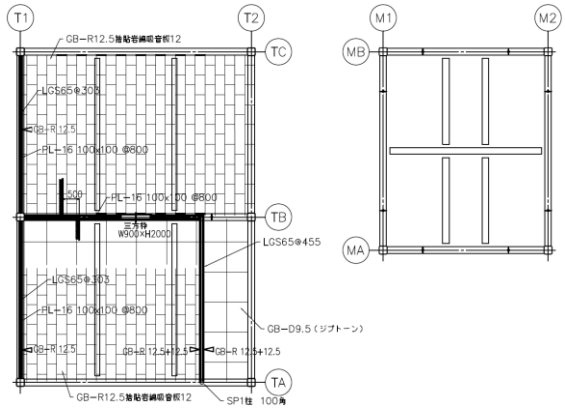


(b) 耐震棟 4 階天井配管

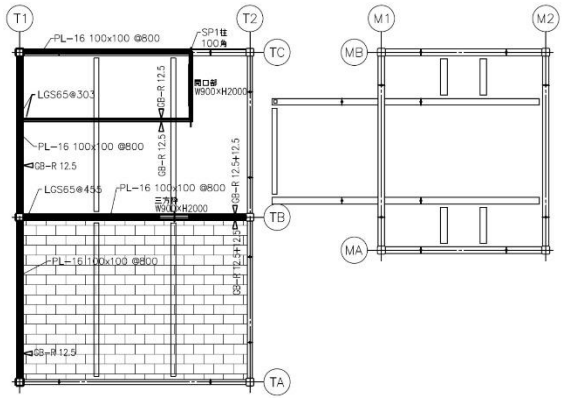


(c) 耐震棟 3 階天井配管

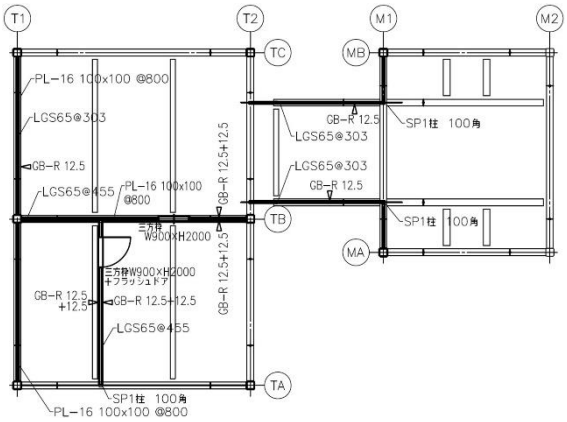
図 3　設備配管図



(a) 4 階間仕切壁・天井



(b) 3 階間仕切壁・天井



(c) 2 階間仕切壁

図 4　間仕切壁・天井図

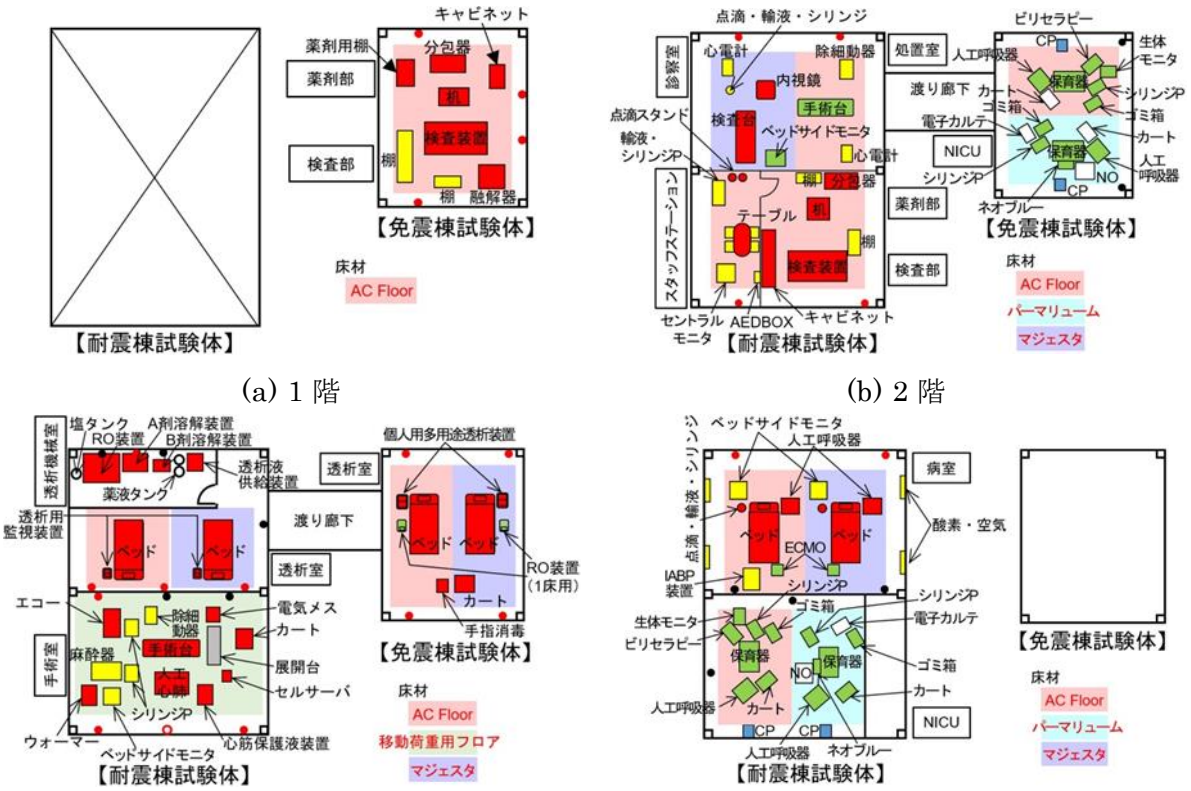


図 5　医療機器配置図

試験体の製作状況を写真 1 に示す。屋外で鉄骨を建て込み（写真 1a)、スラブを打設（写真 1b)、天井配管や間仕切壁および天井の下地を設置した（写真 1c)。その後、試験体を屋内に移動、仮置きして（写真 1d および 1e)、間仕切壁や天井を施工した。医療機器を試験体内に搬入した後、試験体を震動台上に設置、固定した（写真 1f)。医療機器のレイアウト調整と並行して、計測機器やカメラの設置、接続、配線作業を行った。

(a) 鉄骨の建込み

(b) スラブコンクリートの打設

(c) 天井配管，間仕切壁・天井下地

(d) キャリアによる試験体の移動

(e) 試験体の吊り上げ

(f) 震動台上に設置された試験体

写真 1　試験体製作・移動・設置

b) 加振計画

E－ディフェンス震動台を用いて試験体に入力した地震動を表 3 に示す。加振試験は 3 日間にかけて実施した。1 日目は、超高層建物用入力波のレベル 1（弾性限界）およびレベル 2 相当の地震動を用いて、耐震棟および免震棟試験体の耐震性および機能性を調査、検証した。2 日目は、長周期地震動・基整促波を試験体に入力し、上記に加えて、免震棟試体の応答を確認した。3 日目は、レベル 2 相当の地震動を再入力して、耐震棟試験体の基礎とベースプレートを締結するアンカーボルトを破断し、加振実験を終了した。

表 3　入力地震動一覧

加振日	ID	加振波	備考
1 日目 12 月 1 日		特性把握ランダム波	
	1	JMA 神戸波 X 軸 16%	超高層建物用入力波のレベル 1 相当
		特性把握ランダム波	
	2	JMA 神戸波 Y 軸 16%	超高層建物用入力波のレベル 1 相当
		特性把握ランダム波	

	3	OS2 波 Y 軸 20%	
		特性把握ランダム波	
	4	JMA 神戸波 X 軸 50%	超高層建物用入力波のレベル 2 相当
2 日目 12 月 4 日		特性把握ランダム波	
	5	OS2 波 XY 軸 50%	
		特性把握ランダム波	
3 日目 12 月 8 日		特性把握ランダム波	
	7	JMA 神戸波 XY 軸 50%, Z 軸 100%	
		特性把握ランダム波	

c) 計測計画

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。

2) 実験結果の概要

a) 目視による室内の被害確認

耐震棟建物は 1 次設計レベルの入力では、ほぼ無損傷であった。保有水平耐力限界レベルの入力で構造部材の一部（2 階梁端部と柱脚）に損傷は見られたが、応急危険度判定の結果は、目立った損傷が無い調査済み（調査済み、注意、危険のうち）と判定された。長周期地震動の入力により、2F と 3F の床スラブに合成梁の変形に伴う曲げひび割れが多く生じた。非構造部材では、間仕切壁のコーナー部で石こうボードの割れが見られ、目地部にずれが生じた。またドアの周りでもボードに変形が生じ、2 階では鋼製枠が変形してドアが閉まらなくなった。最大加震で、前日までの入力で塑性化後に増し締めした柱脚のアンカーボルトが 2 か所で破断したため、応急危険度判定の結果が危険と判定され、加震を終了した。免震棟建物では、免震装置が正常に動作し、建物内の医療機器や什器は無被害であった。

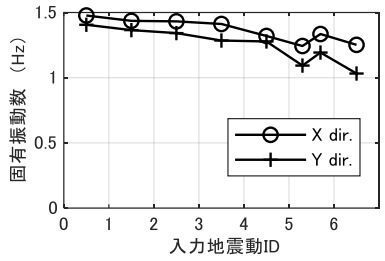
図 6 に耐震棟試験体内の病室の様子を示す。2 次設計レベルの直下地震の加震を終えた時点である。耐震棟建物内では、3 階および 4 階に設置した重心の高い医療機器（人工心肺装置、除細動器、点滴台など）が転倒するとともに、医療機器の多くが大きく移動し、互いに衝突する、壁に激突するなどした。ベッドに設置したマネキンには挿管チューブや回路を設置したが、実験後の様子を観察した医療関係者から、チューブが抜ける等、医療行為に支障をきたす可能性が指摘された。長周期地震動では病室内の様子は一変し、多くの医療機器が転倒する事態となった。医療関係者の目視では、診療行為の継続は困難であると結論付けられた。

図 6　病室の様子

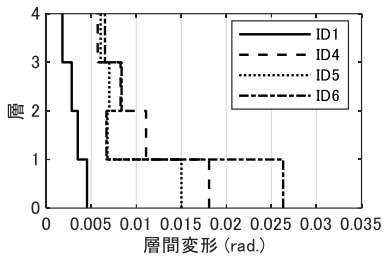
b) 全体応答

図 7 に耐震棟試験体の全体挙動を示す。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 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 方向のベースシアー係数は 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 5m/s^2、最終加震では約 20m/s^2 に到達した。

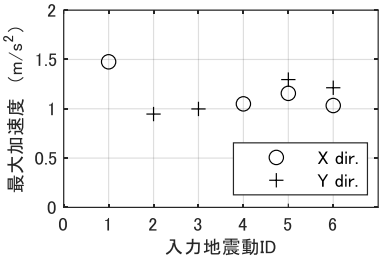
図 8 に免震棟の全体挙動を示す。頂部最大加速度は免震の効果により耐震棟に比べて大きく低減し、1～1.5m/s^2 程度であった。1 回目の加震が若干大きくなったが、初動時に免震装置に若干の固着があったためと考えられる。免震層は 1 次設計レベルの入力ではほとんど動いていない。長周期地震動 ID5 で水平 2 方向に 150mm 滑動した。



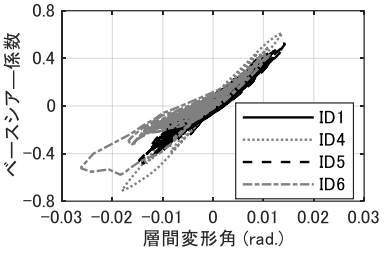
（a）固有振動数



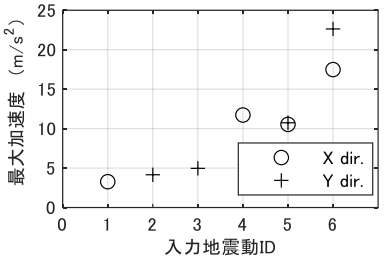
（b）X 方向の最大層間変形角



（a）頂部最大加速度

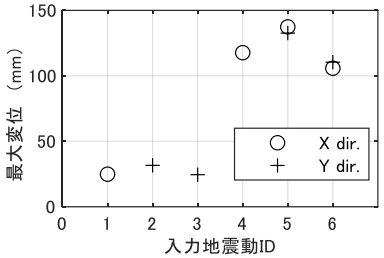


（c）X 方向のベースシアー係数



（d）頂部最大加速度

図 7　耐震棟の挙動



（b）免震層の最大変位

図 8　免震棟の挙動

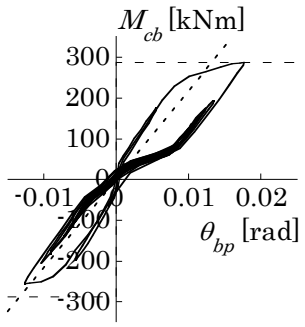
c）耐震骨組試験体の構造部材の挙動

加振初日の最終地震波 JMA 神戸 NS X 方向 50%に対する耐震骨組試験体の主要構造部材の挙動について以下にまとめる。他の加振時の挙動については現在データ整理中である。

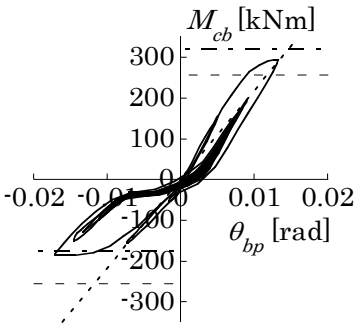
柱脚には露出型柱脚を採用し、アンカーボルト先行降伏型の設計としている。ベースプレートを 4 本のアンカーボルト（M30、HAB）により固定している。各階柱梁接合部は通しダイアフラム形式を基本とし、ノンスカラップ工法を採用している。4F の隅柱と梁の接合部のみ外ダイアフラム形式を採用している。隅柱の接合部は梁端降伏型、側柱の接合部はパネル降伏型となり、外ダイアフラム接合部は梁よりも強く設計されている。

図 9 に柱 C3、C5 の柱脚モーメントーベースプレート回転角関係を示す。いずれの柱脚もアンカーボルトの降伏に起因する明瞭なスリップ性状を示し、隅柱 C5 では転倒モーメントによる軸力変動の影響で挙動の非対称性が明瞭に現れた。弾性回転剛性計算値（斜め破線）は実験挙動と概ね対応し、曲げ耐力に関しては、軸力が軽減される場合には最小軸力に対する計算値（一点鎖線）と概ね合致し、軸力が付加される場合には軸力変動を無視した計算値（水平破線）とほぼ対応した。

2F 梁 B5 と柱 C5 の接合部における梁端モーメントー梁回転角関係を図 10 に示す。図の第一象限は合成梁が正曲げを受ける状態に相当し、破線は材料試験に基づく純鉄骨梁の全塑性モーメント計算値 M_p である。図 10 より 2F 梁 B5 は負曲げ時に M_p にほぼ到達し履歴も非線形性を示した。なお、梁端フランジに貼付した歪ゲージより M_p 付近での歪の急増を確認した。その他 3F、4F の梁については弾性に留まっていることも別途確認した。その他、接合部パネルについても一部の挙動を確認し、想定通り 2F 柱 C3 のパネルには塑性化が確認できた。隅柱 C1、C5 には各パネル中心に 3 軸歪ゲージを貼付しており、それらの結果からは弾性であることを別途確認した。

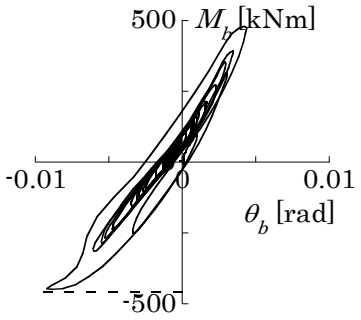


(a) 柱 C3



(b) 柱 C5

図 9 柱脚モーメントー回転角関係



（2F、B5-C5 接合部）

図 10 梁端モーメントー回転角関係

d) 数値解析との比較

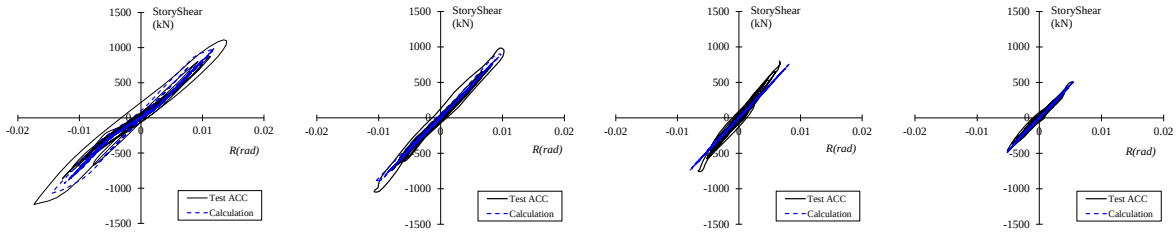
地震応答解析には、立体骨組モデルを用いた。表 4 に数値解析により得られた固有周期および固有振動数を示す。実測値 X 方向 0.67s、Y 方向 0.71s と概ね良い対応がみられた。復元力特性は、1 階露出柱脚はスリップ型モデル、柱頭は正規バイリニア、それ以外の柱はファイバーモデルとし、梁端はすべて正規バイリニアとした。減衰は瞬間剛性比例型とし、1 次固有振動に対して減衰定数を 2%とした。

表 4 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
	(s)	(Hz)	(s)	(Hz)
1	0.681	1.469	0.737	1.357
2	0.221	4.528	0.234	4.266
3	0.130	7.702	0.134	7.464

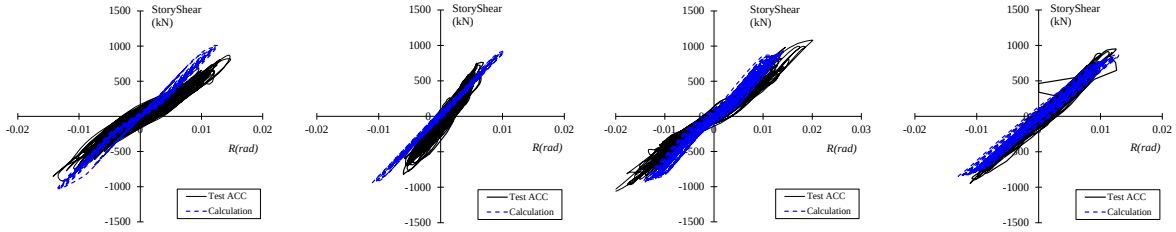
図 11 に JMA 神戸波 50% X 方向加振、図 12 に OS2 波 50%XY 方向加振の層せん断力ー層間変形角関係を示す。実験結果の層せん断力は加速度計から算出し、層間変形角は課題 5 の研究チームにより光学式層間変位センサーで計測された変位を用いる。数値解析では中地震時については床スラブの合成効果による剛性増大と、大地震時については露出柱脚の繰返しによるスリップ型の履歴特性を考慮することにより実験挙動を良い精度で再現できた。

免震棟の地震応答解析には、1 方向加振においては質点系モデル、2 方向加振については立体架構モデルを用いた。切片荷重 Q_d を算出する際の軸力は試験体設置時の実測値を用い、球面すべり支承の製造ばらつきによる補正係数は、標準ケース・ハードケースの 2 種類、摩擦係数は速度依存性を考慮したものを採用した。上部構造の減衰定数は 1%とした。実験結果と設計諸元を用いた地震応答解析結果を比較した。図 13 に JMA 神戸 50% X 方向加振時の挙動を示す。すべり出し時には摩擦係数が安定せず、免震層の層せん断力は解析結果に対して増大したが、上部構造に与える影響はなかった。免震層の最大変形量や上部構造の応答としては、設計諸元を用いた解析結果と実験結果で高い整合性を確認できた。



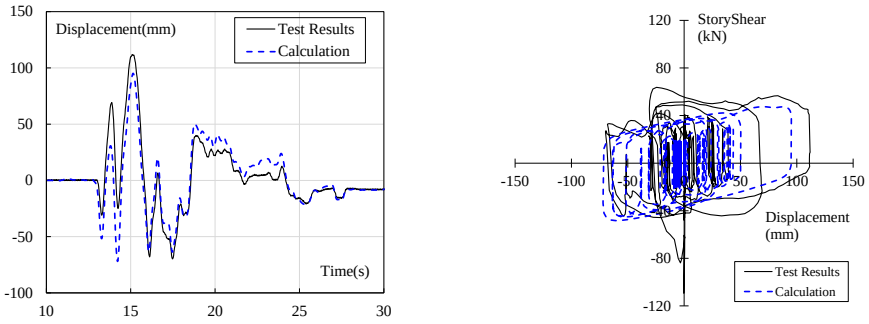
(a) 1 層 X 方向　(b) 2 層 X 方向　(c) 3 層 X 方向　(d) 4 層 X 方向

図 11 JMA 神戸波 50% X 方向加振



(a) 1 層 X 方向　(b) 2 層 X 方向　(c) 1 層 Y 方向　(d) 2 層 Y 方向

図 12 OS2 50% XY 方向加振



(a) 免震層変位時刻歴　(b)免震層層せん断力-変位関係

図 13 JMA 神戸 50% X 方向加振（解析：ばらつき標準ケース）

3) 医療機器における事業継続性判定

a) 医療機器

免震棟及び耐震棟の診療施設には、一般的に各診療で使用される実際の医療機器を配置した（表 5)。各医療機器のキャスターロックについては、通常医療現場で行われていると想定される方法を対角ロック・片面ロック・3 点ロック・オールロック・オールフリーから選択して固定した。対称的な 2 種類の床材を使用しているフロアについては、機器の配置について対称的になるよう配置した。医療機器・医療材料を収納する棚・キャビネットについては、一般的な病院施設で使用される L 字金具を使用し固定を行った。

b) 医療材料

配置した医療機器において、人工呼吸器・人工心肺装置・透析装置・体外式膜型人工肺（以下、ECMO）などの生命維持装置について、実際に患者と接続する回路を装着した（図 14)。

表 5　診療施設と生命維持装置の配置

	免震棟	耐震棟			
1 階	薬剤・検査室	医療ガスマニホールドシステム			
生命維持装置					
2 階	NICU	スタッフステーション	薬剤・検査室	診察室	処置室
生命維持装置	保育器　人工呼吸器				
3 階	透析室	手術室	透析室		透析機械室
生命維持装置	透析装置	麻酔器　人工心肺装置	透析装置		
4 階	NICU	コロナ重症患者病室			
生命維持装置	保育器　人工呼吸器	人工呼吸器　ECMO　IABP			

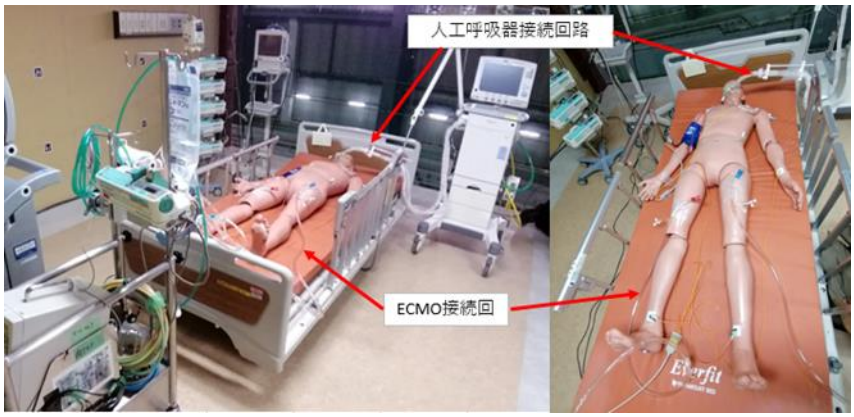


図 14　生命維持装置の接続回路（ECMO・人工呼吸器）

図 15　位置マーキング

c）事業継続性の観察結果

医療機器については、キャスターの位置をマーキングし、医療機の移動距離を測定した（図 15）。保育器を除く生命維持装置については、600mm 以上の移動又は転倒は、接続回路の外れる危険があり治療継続の限界と判定した。保育器については、転倒した場合にのみ治療継続の限界と判定した。

免震棟の生命維持装置の移動はなく、治療継続の限界はなかった。耐震棟では、保育器を除く接続回路が必要な生命維持装置について、600mm 以上の移動又は転倒が発生した（表 6）。このことから診療施設で重要となる手術室・透析室・NICU・コロナ重症患者病室において、治療継続の限界が考えられる。耐震棟 2 階の薬剤・検査室に設置した医療材料を収納するキャビネットの L 字金具の接続が、2 日目の加振において固定が外れ 3 日目の加振にてキャビネットが転倒し、医療従事者の生命にも影響を与えると可能性があると考えられる。

回路接続が必要な生命維持装置においては、実際の地震が発生した場合に生命維持装置の移動距離により、患者が接続回路から外れ治療継続が困難になると予測される。今回の加振実験の結果において、耐震棟での生命維持装置を使用した治療継続は限界があると判

断された。今後は耐震建物において、治療継続の限界をいかに回避するか検証する必要がある。回避する手段については、床材の種類、医療機器架台の設計条件、医療機器別のキャスターロック方法、患者接続回路への工夫などが考えられる。今後は、棚・キャビネットの固定方法については､医療従事者の安全を考慮した､固定方法を検討する必要がある。

表 6 生命維持装置最大移動距離

	階	診療施設	床材*	医療機器	キャスター**	1 日目 JMA 神戸 50%	2 日目 OS2 50%XY	3 日目 JMA 神戸 50%XY 100%Z	治療継続限界
免震棟	2	NICU	P	人工呼吸器	AL	0	0	0	
			P	保育器	DL	0	0	0	
			A	人工呼吸器	AL	0	-	0	
	3	透析室	A	透析装置	F	0	0	0	
			M	透析装置	F	0	0	0	
耐震棟	3	手術室	S	麻酔器	AL	**76**	**133**	**90**	○
			S	人工心肺装置	FL	48	**110**	45	○
		透析室	A	透析装置	F	57	**140**	**97**	○
			M	透析装置	F	48	**104**	18	○
		NICU	A	人工呼吸器	AL	**62**	**120**	**89**	○
			A	保育器	DL	60	189	87	
	4	コロナ重症患者病室	P	人工呼吸器	AL	**転倒**	**120**	46	○
			A	人工呼吸器	FL	**102**	**転倒**	**270**	○
			A	ECMO	AL	40	**転倒**	**転倒**	○
			A	IABP	AL	19	**転倒**	58	○
			M	人工呼吸器	FL	**97**	**転倒**	**80**	○
			M	ECMO	DL	8	38	**転倒**	○

*P:パーマリューム，A: AC Floor, S: 移動荷重用フロア, M: マジェスタ

**AL: オールロック, DL: 対角ロック, FL: 前面ロック, F: オールフリー

4) 非構造部材の損傷

被災後の機能維持確保を目指した耐震性能評価基準を整備する目的で病院施設を想定した鉄骨造試験体の実大振動台実験において、以下のデータ収集に努めた。

① 3，4F 壁の地震時挙動と損傷

② 3，4F の吊り配管および RF の置き配管の地震時挙動と損傷

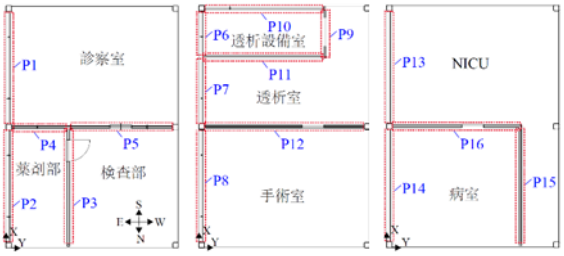
③ 高架水槽の地震時挙動と損傷

a) 間仕切り壁の挙動と損傷の様子

図 16 に耐震棟 2～4 階の間仕切り壁の配置を示す。間仕切り壁の損傷は、(i) 石膏ダストまたは石膏片の落下、(ii)パネル端部の皺、(iii)固定具の損傷、(iv)パネルのひび割れ、(v)

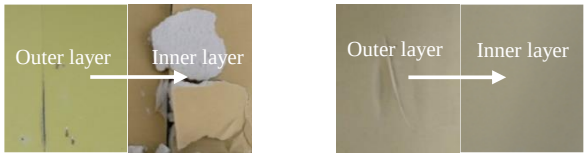
パネル内部のひび割れ、(vi)パネル端部の破損、(vii)構造部材との衝突による壁の破損、(viii)二つのパネルのずれ、(ix)衝突によるへこみ、(x)ドアフレームとの分離、(xi)構造体との分離、に分類できる。図 17 に上記の損傷の様子を示し、図 18 に試験終了後に取り外した二層パネル間仕切り壁の内側および外側の損傷を示す。

1 日目の加振終了後、主に 2 階の間仕切り壁に損傷を確認した。2 日目以降の加振では、3、4 階の間仕切り壁に医療器具等の衝突によるへこみを確認した。単層パネル間仕切り壁において、コーナー部分の破損が発生した。固定具の損傷は単層パネル間仕切り壁で観測されており、二層パネルの間仕切り壁では、固定具の損傷は内側のパネルのみで観測された。また、二層パネルの間仕切り壁において圧縮を受ける部分においては、内側のパネルが外側パネルと比較してより損傷が大きかった。図 19 に、間仕切り壁のせん断変形と最大層間変形の関係を、加振ケースごとに示す。最大層間変形角が 0.29%を超えると、いくつかの間仕切り壁のコーナーにて損傷が確認できた。壁両端の固定度が間仕切り壁の変形に大きく影響し、両端が固定された間仕切り壁（Group A）には変形がほとんどなく、両端とも構造体で固定されていない間仕切り壁（Group C）は純せん断変形を示し、変形量は層間変形に近い値となった。



(a) 2nd floor plan (b) 3rd floor plan (c) 4th floor plan

図 16 間仕切り壁の配置



(a) Compression of partition walls (b) Impact by equipment

図 17 二層パネルの損傷

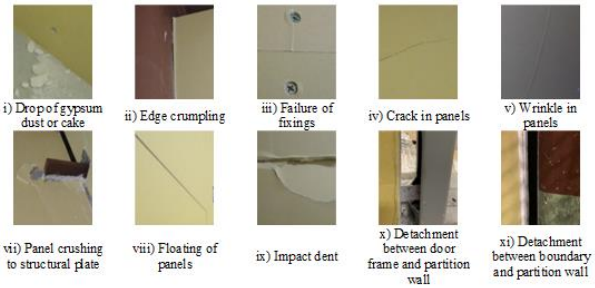


図 18 間仕切り壁の損傷

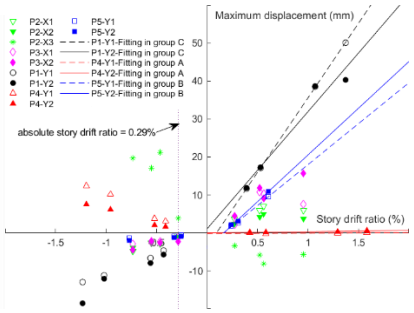


図 19 間仕切り壁最大変形と最大層間変形

b) 吊り配管および置き配管・高架水槽の地震時挙動と損傷の様子

図 20 に配管と高架水槽の配置を示す。屋上階には、東北地方太平洋沖地震前後の基準を比較する目的で、2 基の高架水槽と水槽に接続される置き配管を対称に配置した。4 階天井には消火管、スプリンクラー、給水管、冷媒管、3 階天井には給水管および排水管を配置し、吊り材の間隔が異なる配管を対称に配置した。

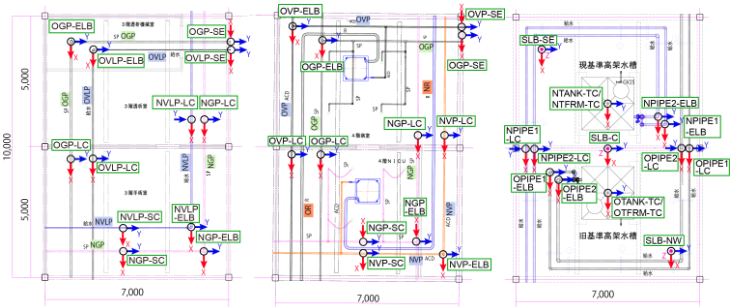
図 21 に、3 階と 4 階の配管の吊り材の変形、配管の通っている壁の損傷、冷媒管の変形を示す。図中の楕円で囲った部分は吊り材の変形や壁の損傷が確認された部分を表す。JMA 神戸 50%X 方向加振後、現基準、旧基準ともに 3 階の配管の吊り材は全体的に南北

方向（X 方向）に変形していた。4 階の配管の吊り材の変形も確認できたが、3 階と 4 階共に、配管そのもの変形や損傷は確認されなかった。

高架水槽と屋上配管の損傷の概要を図 22 に示す。現基準水槽は、北東部のタンクと架台の間に 6 mm の浮き上がりが確認できた。旧基準水槽は、架台脚部のベースプレートが北方向にずれていた。どちらの高架水槽もその他の損傷は確認されず、試験終了後の満水試験も亀裂等による水漏れは確認されず、貯水機能は確保されたままであった。

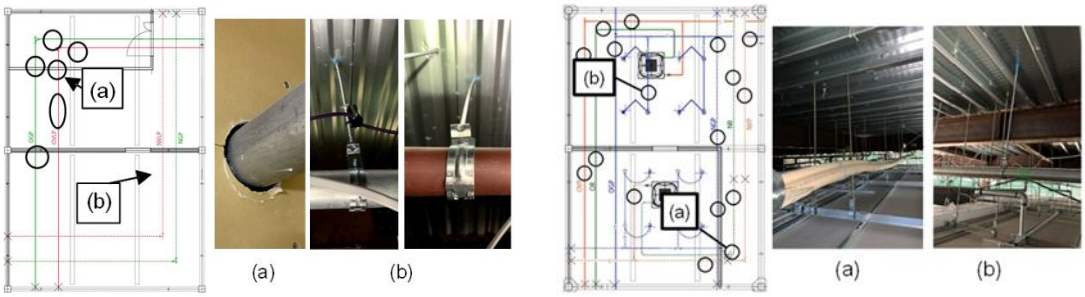
高架水槽に接続する配管についても、配管そのものには損傷は見られなかった。配管とその架台は一体になって振動しており、縦方向のフレキシブル管は南北方向に曲がっていた。図 22 中に、矢印で加振終了時の配管の移動方向を示している。また、配管架台脚下に敷いていたゴム板が架台脚部下から外れて、付近に散乱していた。

病院施設を想定した鉄骨建物の振動台実験行い、壁、配管と高架水槽の損傷観察及び加速度応答をはじめとしたデータ収集を行った。屋上の置き配管が大きく移動していることや配管と壁の衝突の痕跡などは確認されたものの、設備配管と高架水槽は旧基準、現基準共に機能維持が困難になるほどの損傷は確認されなかった。



(a) 3 階天井　(b) 4 階天井　(c) 屋上階

図 20 高架水槽と配管配置



(a) 3 階　(b) 4 階

図 21　配管の損傷

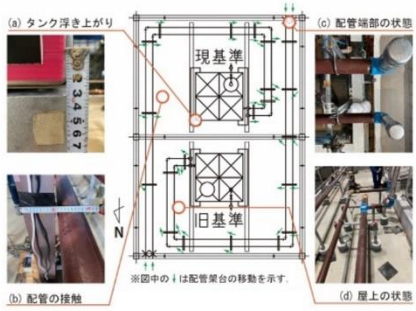


図 22　水槽・R 階配管損傷

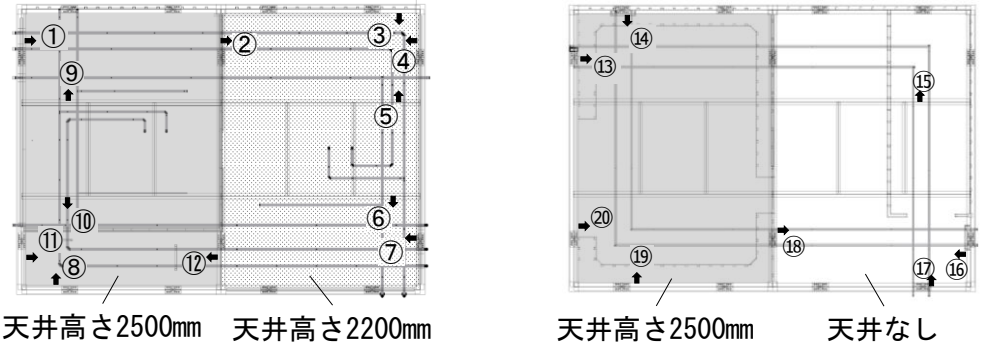
5) モニタリング

自律型センサーを用いて構築したモニタリングシステムについて報告する。

a) 赤外線カメラ付き自律型画像計測

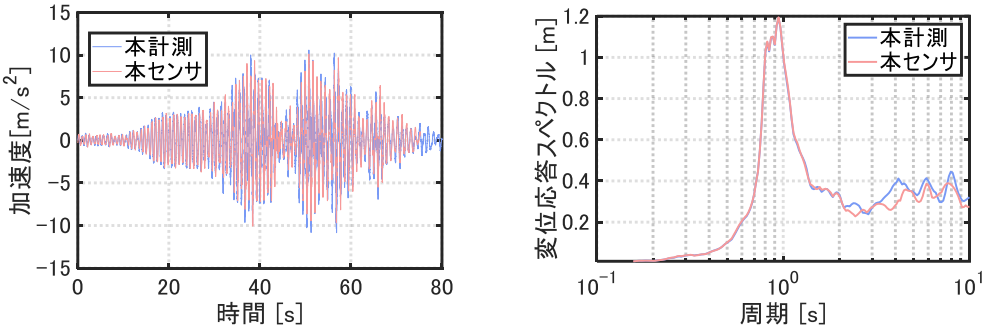
耐震棟 3 階及び 4 階の天井裏に赤外線カメラを搭載した自律型計測ユニットを図 23 に示すように配置した。モニタリングの対象としたのは、天井裏の設備配管や天井吊り材などの非構造部材であり、配管の固定部など変形や損傷が生じる可能性がある位置や配管を長手方向に見通す位置など、合計で 20 カ所の計測位置を選定した。本計測ユニットには、MEMS 加速度として MPU9250 を搭載しており、加速度値が指定した閾値を超えた際に、映像及び画像データの収集を開始する。本加振実験では、ホワイトノイズ加振を除く全ての加振ケースについて、自動的に画像計測・収集が開始されたことが確認された。図 24(a)及び図 24(b)では、本計測ユニット（計測位置①）により得られた加速度と本計測で得られた屋上スラブの加速度について、時刻歴と変位応答スペクトルをそれぞれ比較したもので、概ね対応していることが確認できる。

加振前後の画像比較により、加振による損傷の有無や程度の同定を行った。差分解析の手順としては、加振前後の画像のレンズの歪み補正を行い 2)、それぞれの画像をグレースケール化し、同じ座標上での画素値の差分をとる。求めた差分を設定した閾値によって二値化し、差分面積を画像全体に対する割合として求める。この手法では、光や検知対象外の物体の影響が大きいため、今後の課題となる。差分面積割合に特徴がみられたケースとして、加振前・加振後と差分画像の一例を図 25 に示す。また、図 26 及び図 27 では、20 カ所の計測位置について、2 日目と 3 日目の加振前後の差分面積割合をグラフで示す。加振レベルと差分面積割合には相関がみられ、差分面積割合から加振レベルの予測に利用できると考えられる。



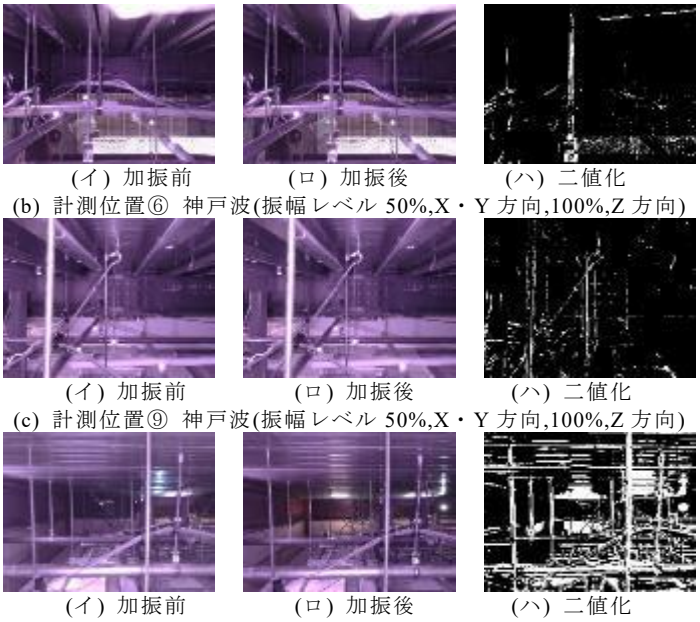
(a) 耐震棟 4 階　　(b)耐震棟 3 階

図 23 計測ユニットの設置位置



(a)　時刻歴　　(b)　変位応答スペクトル

図 24　計測ユニットにより得られた加速度時刻歴



(イ) 加振前　(ロ) 加振後　(ハ) 二値化
(b) 計測位置⑥ 神戸波(振幅レベル 50%,X・Y 方向,100%,Z 方向)

(イ) 加振前　(ロ) 加振後　(ハ) 二値化
(c) 計測位置⑨ 神戸波(振幅レベル 50%,X・Y 方向,100%,Z 方向)

(イ) 加振前　(ロ) 加振後　(ハ) 二値化
(d) 計測位置⑬ 神戸波(振幅レベル 50%,X・Y 方向,100%,Z 方向)

図 25　差分解析による加振前後の変化

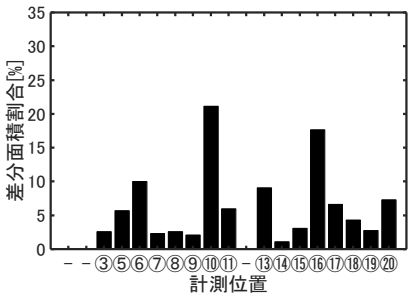


図 26 JMA 神戸波(50%, X 方向)

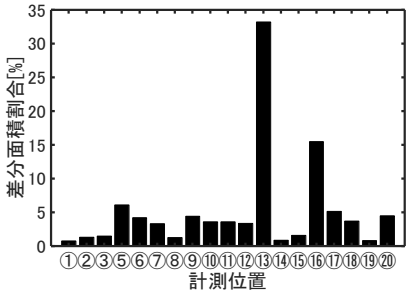
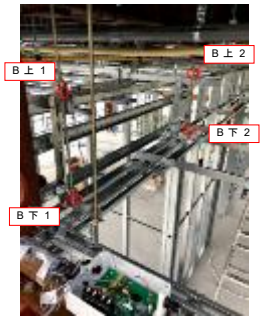


図 27 JMA 神戸波
(50%, X・Y 方向, 100%, Z 方向)

b) Sigfox 通信形式の無線ひずみセンサー

図 28 にひずみゲージの取り付け位置を示す。また、図 29 では加振前後における各ゲージの変化の一例を示す。表 7 は、試験直前と全加振終了後のひずみ値の一覧と差分を示す。図 30 に示すように加振前後におけるひずみの変化が観測した（±5~10μ ε の残留ひずみ)。表 7 より、試験直前のデータに対して、全試験期間後すべてのゲージで残留ひずみを示した。吊り天井の健全度を長期的にモニタリング可能と言える。

今後は、吊り天井を継続使用した場合に次の震度 5 で崩落する等の目安を設けるためのデータを、小規模天井モデルによる台上加振、FEM 解析により取得し、吊り天井の残存耐震性能評価を行い、健全度を定量化する必要がある。



(a) 天井段差部

(b) エアコン周辺

図 28　ゲージ貼付け部

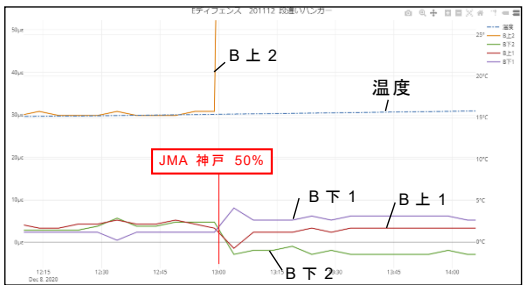


図 29　加振前後での各ゲージの変化部分抜粋

表 7 加振直前と全加振終了後のひずみ変化

	エアコン周辺				天井段差部			
時間	A1	A2	A3	A4	B上1	B下1	B上2	B下2
2020/12/1 10時	-65	-1	1	-3	-2	-6	NA	9
2020/12/8 20時	-71	-4	33	3	8	3	NA	-4
差分	6	3	-32	-6	-10	-9	–	13

c) Sigfox 無線通信形式の無線傾斜センサー

医療機器及び高架水槽架台に無線傾斜センサーを図 30 に示すよう配置した。本センサーは、バッテリー内蔵で数年稼働し、Sigfox 通信を行う小型 IoT センサーであり、2 度以上の傾斜および 2G 以上の衝撃を検知すると異常をメールで通知する。本実験では、本センサーにより対象設備の破壊、変形、転倒等の検知を行い、地震による設備被害状況を広域に安価に即時把握するために活用可能かどうかを検証する。

表 8 及び表 9 では、加振全期間における傾斜及び衝撃の検知結果の一覧を示す。傾斜の検知に関しては、3 日目の加振により、④医療機器と⑦キャビネットが転倒した場合の傾斜は、正しく計測でき、1 分以内に通知された。しかしながら、2 日目の加振では、長周期長時間地震動によって試験体の揺れが継続することから加振中の加速度の変化を捉えてしまい、傾斜を誤検知した。傾斜検知の検知後は 1 分後に再度姿勢の計測を行う機能を搭載しており、この計測値をもとに傾斜検知が地震波によるものかどうかを判断することで傾斜検知をキャンセルすることが可能であることも確認できた。

1 日目の加振では、④医療機器と⑤天井配管以外は衝撃の検知はされなかった。一方、2 日目および 3 日目の加振では、多くのセンサーで衝撃を検知しており、強い地震波を受けた場合は衝撃センサーで検知できることがわかった。③手術台と④医療機器では衝撃を検知しなかったが、装置の脚部にキャスターが搭載されており、これによって衝撃が緩和された可能性がある。

本センサーの傾斜および衝撃検知の機能により、地震の際の局所的な影響（転倒や破壊）、衝撃による影響（損傷や内部被害）を検知可能であることが実証できた。

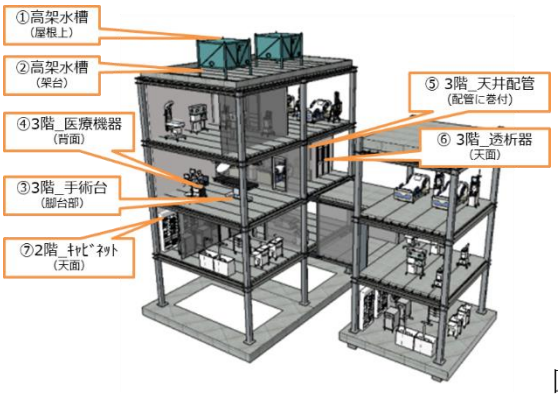


図 30 傾斜センサー配置箇所

表 8 傾斜検知結果

日時	入力波	①高架水槽 (屋根上)	②高架水槽 (架台)	③3F手術台 (脚台部)	④医療機器 (背面)	⑤3F天井配管	⑥3F透析装置 (天面)	⑦2Fｷｬﾋﾞﾈｯﾄ (天面)
1日目	JMA神戸波 16%(X軸)	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし
2日目	OS-2波 50%(XY軸)	13:32[誤検知] 傾斜7度を検知	13:32[誤検知] 傾斜102度を検知	13:12[誤検知] 傾斜74度を検知	13:32[誤検知] 傾斜53度を検知	13:32[誤検知] 傾斜101度を検知	変化なし	変化なし
3日目	JMA神戸波 50%(XY軸), 100%(Z軸)	変化なし	変化なし	変化なし	13:04 傾斜88度を検知	変化なし	変化なし	13:04 傾斜90度を検知

表 9 衝撃検知結果

日時	入力波	①高架水槽 (屋根上)	②高架水槽 (架台)	③3F手術台 (脚台部)	④医療機器 (背面)	⑤3F天井配管	⑥3F透析装置 (天面)	⑦2Fｷｬﾋﾞﾈｯﾄ (天面)
1日目	JMA神戸波 16%(X軸)	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし
2日目	OS-2波 50%(XY軸)	13:32 衝撃を検知	13:32 衝撃を検知	変化なし	変化なし	13:32 衝撃を検知	変化なし	13:32 衝撃を検知
3日目	JMA神戸波 50%(XY軸), 100%(Z軸)	13:04 衝撃を検知	13:04 衝撃を検知	変化なし	変化なし	13:04 衝撃を検知	13:04 衝撃を検知	変化なし

(c) 結論ならびに今後の課題

- Ｅーディフェンスにおける病院鉄骨建物の大型振動台実験にむけて、構造部材・非構造部材・設備機器の施工図を作成し、試験体を製作した。各居室への医療機器の配置計画を最終決定し、試験体内に医療施設の診療科を再現した。
- 数値解析により試験体の応答を予測し、その結果に基づいて実験計画、計測計画、加振計画の最終案を策定した。2020(令和 2)年 12 月に加振実験を実施した。
- 実験の流れと実験結果の概要を報告した。免震建物では、免震装置が正常に動作し、建物内の医療機器や什器は無被害であった。耐震建物では、保有水平耐力限界レベルの入力で構造部材の一部（2 階梁端部と柱脚）に損傷は見られたが、応急危険度判定の結果は、目立った損傷が無い調査済み（調査済み、注意、危険のうち）と判定された。最大加震、前日までの加振で塑性化後に増し締めした柱脚のアンカーボルトが 2 か所で破断したため、応急危険度判定の結果が危険と判定され、加震を終

了した。倒壊はしなかったが医療関係者の目視では、診療行為の継続は困難であると結論付けられた。

- 回路接続が必要な生命維持装置においては、実際の地震が発生した場合に生命維持装置の移動距離により、患者が接続回路から外れ治療継続が困難になると予測される。耐震棟での生命維持装置を使用した治療継続は限界があると判断された。今後は耐震建物において、治療継続の限界をいかに回避するか検証する必要がある。回避する手段については、床材の種類、医療機器架台の設計条件、医療機器別のキャスターロック方法、患者接続回路への工夫などが考えられる。
- 非構造部材では、間仕切壁のコーナー部で石こうボードの割れが見られ、目地部にずれが生じた。またドアの周りでもボードに変形が生じ、2 階では鋼製枠が変形してドアが閉まらなくなった。屋上の置き配管が大きく移動していることや配管と壁の衝突の痕跡などは確認されたものの、設備配管と高架水槽は旧基準、現基準共に機能維持が困難になるほどの損傷は確認されなかった。
- 耐震棟 3 階及び 4 階の天井裏に加速度をトリガーとした赤外線カメラ付き自律型画像計測ユニットを設置し、加振前後・加振中の設備配管や天井面の画像データを自動収集した。加振前後の画像比較により、損傷の有無や程度の同定を行った。天井裏吊り材に無線ひずみセンサーを設置し、吊り材の応力変化をモニタリングした。試験直前のデータに対して、全試験期間後すべてのゲージで残留ひずみを示した。医療機器及び高架水槽架台に無線傾斜センサーを設置し、機器の転倒や残留変形をモニタリングした。傾斜および衝撃検知の機能により、地震の際の局所的な影響（転倒や破壊）、衝撃による影響（損傷や内部被害）を検知可能であることが実証できた。
- 今後の課題として、Ｅ－ディフェンス実験のデータ分析を進め、構造被害と崩壊余裕度の関係、非構造部材・設備機器・医療機器の被害と事業継続性限界までの余裕度を定量化する。崩壊余裕度や事業継続性限界を被災後に評価するために有用な手法をまとめる。実験で確認された被害が大きい非構造部材や機器については、被害を低減する対策技術を特定する。

(d) 引用文献

なし

(e) 学会等発表実績

1)学会等における口頭・ポスター発表

発表成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表した場所（学会等名）	発表時期	国内・外の別
Integrated Complex Structural / Non-Structural Assessment on Steel Hospital Building、ポスター	Masahiro Kurata, Yohsuke Kawamata, Jasmine Gipson, Lori Kanao, Shigeru Otsuru, Shintaro Matsuo, Kohei Fujita, Shinji Aida, Takahiko Tsutsumi, Kosai Cho, Kotaro Kojima, Megan Boston	QuakeCORE Annual Meeting	2020年9月	国外
モード曲げモーメントを利用した鉄骨柱脚の固定度評価その１：アルゴリズムの開発、ポスター	小林岳人、倉田真宏、Huang Jiantao、青木拓哉、伊藤 倫夫	日本建築学会学術講演発表会（関東）	2020年9月	国内
モード曲げモーメントを利用した鉄骨柱脚の固定度評価その１：LPWA型無線センサーによる動ひずみ計測、ポスター	倉田真宏、小林岳人	日本建築学会学術講演発表会（関東）	2020年9月	国内
腐食配管の繰返し曲げ実験による変形能力の評価、ポスター	金尾伊織、高岡剛規、小島紘太郎、倉田真宏	日本建築学会学術講演発表会（関東）	2020年9月	国内
設備配管の損傷評価、ポスター	高岡剛規、金尾伊織、小島紘太郎、倉田真宏	日本建築学会学術講演発表会（関東）	2020年9月	国内
球面すべり支承を用いた低層免震建物の挙動、ポスター	赤澤資貴、佐分利和宏、 倉田真宏、松尾真太朗、河又洋介、山崎伸介	日本建築学会学術講演発表会（関東）	2020年9月	国内
強地震時における高架水槽の挙動特性(その１）実大振動台実験とその損傷記録、ポスター	八木詠都、久保慶祐、髙岡剛規、小島紘太郎、金尾伊織、倉田真宏	日本建築学会学術講演発表会（関東）	2020年9月	国内
強地震時における高架水槽の挙動特性(その２）時刻歴応答と伝達関数、ポスター	久保慶祐、八木詠都、髙岡剛規、小島紘太郎、金尾伊織、倉田真宏	日本建築学会学術講演発表会（関東）	2020年9月	国内

2)学会誌・雑誌等における論文掲載

・ 査読付き

掲載論文（論文題目）	発表者氏名	発表した場所（雑誌等名）	発表時期	国内・外の別
Seismic evaluation of two-elevation ceiling system by shake table tests	Qi, L., Kurata, M., Ikeda, Y., Kunitomo, K., Takaoka, M.	Earthquake Engineering and Structural Dynamics	2020 年 11 月	国外

・ 査読なし

掲載論文（論文題目）	発表者氏名	発表した場所（雑誌等名）	発表時期	国内・外の別
Seismic Evaluation of Japanese Two-Elevation Integrated Ceiling System	Liangje Qi, Keichiro Kunitomo, Masahiro Kurata, Yoshiki Ikeda	Proceedings of 17th World Conference in Earthquake Engineering (WCEE)	Proceedings のみ 2020 年 9 月発刊 (会議は 2021 年 9 月に延期)	国外

3)マスコミ等における報道・掲載

報道・掲載された成果（記事タイトル）	発表者氏名	発表した場所（新聞名・TV 名）	発表時期	国内・外の別
大地震想定の世界初の実験 病院の機能維持できるか？		NHK 神戸 ＜ニュース＞	2020 年 12 月 4 日	国内
地震想定､病院揺らし実験 機器転倒で医療継続困難		共同通信＜地方紙と共同通信のよんななニュース＞	2020 年 12 月 4 日	国内
地震災害 病院機能は？		テレビ大阪＜やさしいニュース 2＞	2020 年 12 月 4 日	国内
災害拠点の病院は地震がきても大丈夫？南海トラフ地震を想定した実験		テレビ大阪＜テレビ大阪ニュース＞	2020 年 12 月 4 日	国内
地震時の病院機能を検証 兵庫・三木で耐震実験		産経新聞＜速報ニュース（電子）＞	2020 年 12 月 4 日	国内
E―ディフェンスで病院揺らす実験		神戸新聞＜朝刊 28 面＞	2020 年 12 月 5 日	国内
地震時の病院機能検証 兵庫で耐震実験		産経新聞＜朝刊 28 面＞	2020 年 12 月 5 日	国内
大地震で病院はどうなる？三木市の施設で公開実験		サンテレビ＜テレビニュース＞	2020 年 12 月 7 日	国内

震度６程度の揺れを“地域の拠点病院”想定した建物に加える実験 Ｅ－ディフェンス		MBS 毎日放送＜MBC ニュース＞	2020 年 12 月 5 日	国内
大規模地震の病院再現 京大など損傷調べる公開実験		毎日新聞＜京都朝刊 25 面）＞	2020 年 12 月 13 日	国内
大規模地震の病院再現 京大など損傷調べる公開実験		毎日新聞＜神戸朝刊 25 面）＞	2020 年 12 月 13 日	国内
巨大地震と“未治療死”～阪神・淡路から 26 年 災害医療はいま～		NHK スペシャル	2021 年 1 月 17 日	国内

(f) 特許出願，ソフトウエア開発，仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウエア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) ２０２１年度業務計画案

2020（令和 2）年 12 月に実施したＥ－ディフェンスでの実大病院の実験結果の分析を進め、非構造部材や高機能設備の被災度を迅速に評価するシステムについて、有効なセンシング手法や情報伝達の仕組みを整理する。

また、実験で確認された被害が大きい非構造部材や機器については、被害を提言する対策技術を提案し、有用性を部材要素実験や数値解析により検証する。

5 年間の取り組みについて、医療現場での利用を意識して、最終成果をとりまとめる。