

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

(1) 業務の内容

(a) 業務の目的

京都大学による本委託業務では、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) 平成 29 年度業務目的

研究 4 年目の Eーディフェンスによる大型振動台実験に向けて、試験体の設計および各種計測システムの開発に着手する。更に、病院施設の高機能設備や非構造部材の耐震度合を評価するため、個別の要素実験を実施する。

(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	准教授	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	助教	藤田 皓平
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	Konstantinos Skalomenos
京都大学 防災研究所	研究員	張 雷

(2) 平成 29 年度の成果

(a) 業務の要約

- ・研究 4 年目の Eーディフェンスによる大型振動台実験に向けて、試験体の設計および各種計測システムの開発に着手した。
- ・病院施設の高機能設備や非構造部材の耐震度合を評価するため、個別の要素実験を実施した。

(b) 業務の成果

1) 試験体骨組の試設計

a) 建物概要と設計方針

試験体の耐震設計は、官庁施設の総合耐震・対津波計画基準の耐震安全性の分類 I 類相当として、大地震動後、構造体の補修をすることなく建築物を使用できることを目標とする。目標に応じた耐力の割り増しとして、建築基準法施行令（昭和 25 年政令第 338 号）第 82 条の 3 に規定する構造計算により安全さを確かめ、同条第二号に規定する式で計算した数値に 1.5 を乗じて得た数値を各階の必要保有水平耐力とする。部材の設計は許容応力度設計を行う。変形に対しては使用上の支障が起らないことを平 12 建告 1459 号に準じて検証する。柱梁耐力比 1.5 以上、柱・梁の部材ランクは FA ランクとする。なお、対象とする病院建物は 5 層鋼骨組と想定し試設計を実施するが、実際の実験では下部 3 層のみを製作し、上部 2 層は錘に置き換える予定である。

b) 耐震棟の設計

代表伏図、軸組図を図 1、代表断面を表 1 に示す、荷重条件を表 2 に示す。

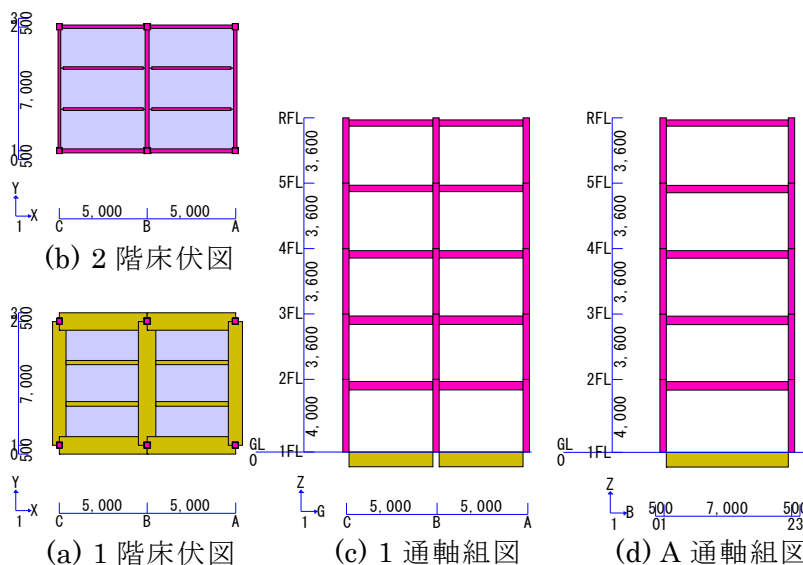


図 1 耐震建物 代表伏図、軸組図

表 1 代表断面

部位	最大断面 (mm)	鋼材種別
柱	□-350×350×16	BCP325
小梁	H-300×150×6.5×9	SS400
大梁	H-450×200×9×14	SN490
基礎梁	B1000×D800	RC 梁
スラブ	t=150	RC スラブ

表 2 荷重条件

	仕上荷重		積載荷重	
	単位	値	単位	値
病室	ビニ床シート	100	床版	1,800
	コン直押	230	小梁	1,550
	間仕切り	300	大梁	1,300
	外壁	300	地震	600
	天井・配管等	200		
	その他	200		
	合計		1,330	

c) 免震棟の設計

代表伏図、軸組図を図 2 に示す、代表断面を表 3、荷重条件を表 4 に示す。

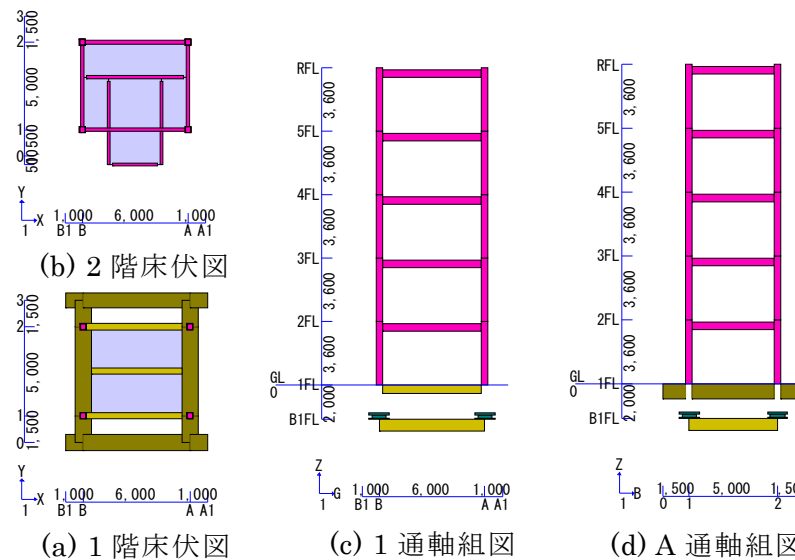


図 2 免震建物 代表伏図、軸組図

表 3 代表断面

部位	最大断面 (mm)	鋼材種別
柱	□-350×350×16	BCP325
小梁	H-350×175×7×11	SS400
跳出小梁	H-300×150×6.5×9	SS400
大梁	H-450×200×9×14	SN490
基礎梁	B900×D800	RC 梁
スラブ	t=150	RC スラブ

表 4 荷重条件

	仕上荷重		積載荷重	
	単位	値	単位	値
病室	ビニ床シート	100	床版	1,800
	コン直押	230	小梁	1,550
	間仕切り	300	大梁	1,300
	外壁	300	地震	600
	天井・配管等	200		
	その他	200		
	合計		1,330	

2) 試験体骨組の予備解析

a) 解析モデルの概要

(株)竹中工務店開発の構造設計システム BRAIN-III ver.1.7.01 を用い、立体弾塑性解析を行った。

b) 保有水平耐力の検定

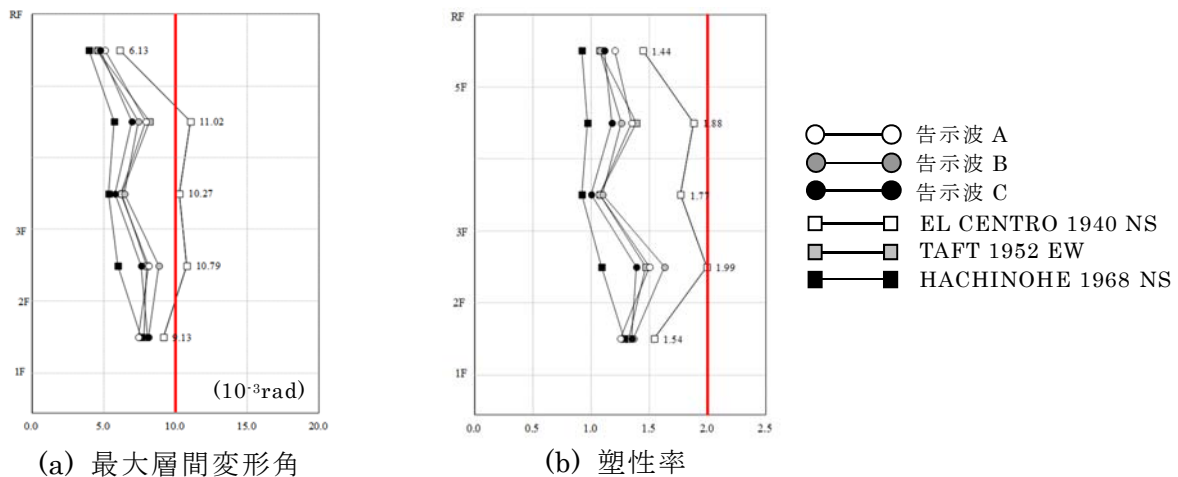
表 5 に耐震建物の保有水平耐力一覧表を示す。必要保有水平耐力の 1.5 倍以上の耐力を確保している。

表 5 耐震建物 保有水平耐力表

ケース	階	階種別	構造種別	Fe	Fs	Fes	Ds	基準保有耐力 Qd(kN)	必要保有耐力 Qun(kN)	保有耐力 Qu(kN)	Qu/Qun	判定	保有耐力決定事由 ステップ数	柱・梁パネル 耐力比	崩壊形 の判定
+X	5	一般	S造	1.0	1.0	1.0	0.25	956.1	239.0	609.2	2.55	OK	指定層間変形角 26ステップ	2.76	全体
	4							1469.9	367.5	936.7	2.55	OK		2.09	全体
	3							1897.4	474.3	1209.0	2.55	OK		1.96	全体
	2							2247.6	561.9	1432.2	2.55	OK		1.94	全体
	1							2520.1	630.0	1605.8	2.55	OK		-	全体
+Y	5	一般	S造	1.0	1.0	1.0	0.25	956.1	239.0	466.4	1.95	OK	指定層間変形角 22ステップ	2.09	全体
	4							1469.9	367.5	717.0	1.95	OK		2.4	全体
	3							1897.4	474.3	925.5	1.95	OK		2.15	全体
	2							2247.6	561.9	1096.4	1.95	OK		2.13	全体
	1							2520.1	630.0	1229.3	1.95	OK		-	全体

c) 地震応答解析結果

図 3 及び図 4 に耐震建物と免震建物のレベル 2 地震動時の最大層間変形角と塑性率をそれぞれ示す。耐震建物の最大層間変形角は 1/100 程度、塑性率は 2 程度、免震建物の最大層間変形角は 1/400 程度、塑性率は 0.9 程度である。



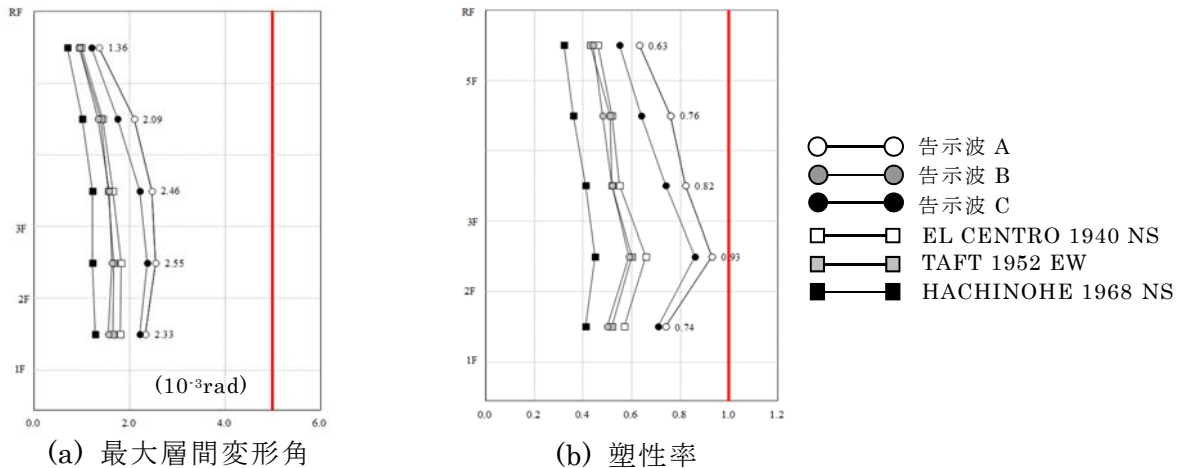


図 4 免震建物

3) Eーディフェンス実験計画

a) 試験体の詳細設計・施工計画に関連する項目のリストアップ

Eーディフェンス実験で用いる試験体は、その特異性を考慮して、詳細設計や施工計画の策定を行う。試験体の詳細設計・施工計画に際して検討が必要となる項目は、以下の通りである。今後の実験計画次第で、検討項目が追加される可能性があることに注意する。

- ・ 震動台の仕様（サイズ：20m×15m、最大重量：12MN）
- ・ Eーディフェンス保有の 900t キャリアーを用いた試験体の運搬
- ・ Eーディフェンス実験棟の 400t 天井クレーンを用いた試験体の吊り上げ
- ・ Eーディフェンス震動台への試験体の締結固定
- ・ 試験体が完全崩壊することを想定した、試験装置の損傷防止
- ・ 縮約もしくは縮小試験体を製作する場合、重量を追加するための錘の設置

b) 資機材の再利用

Eーディフェンスが保有する資機材（例：倒壊防止フレーム、錘として利用可能な鋼板、鉄骨の下部架台）や、先行して実施される課題 1 と 2 の実験で製作・購入された資機材（例：吊り治具・RC 製の下部架台）の再利用を優先的に検討する。

c) 計測および加振方針の検討

災害時重要施設の高機能設備の性能評価と機能損出判定や、構造物の応答評価や健全度判定を行うため、多数の計測機器を設置する。振動台実験や実構造物の応答計測で用いられている従来型の計測機器（例：加速度計、変位計、ひずみゲージ、ロードセル、ビデオカメラ）を主として、多種多様な計測機器の導入を検討する。要素試験や事前解析の結果を基に、合理的な計測計画を策定する。

入力地震動は、主に事前解析の結果を基に選定する。事前解析の結果に比べて、振動台実験における設備や試験体の応答・損傷程度が小さくなる可能性等を考慮し、レベルや振動数特性の異なる複数の地震動を用意する。また、選定した地震動の波形検討を行い、Eーディフェンスで再現可能かどうかの検討を行う。再現不可の場合は、追加地震動を選定する。

4) 計測システムの開発

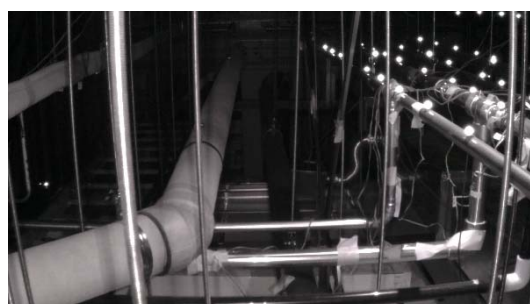
a) モニタリングシステムの検討

重要医療施設における非構造部材を含む耐震余裕度の定量化に向けて、天井裏の設備配管等を対象としたモニタリングシステムの開発に着手した。天井裏の設備配管等は、多数の吊り材で固定されており、ケーブルラック・空調ダクト・消火/給水/排水/医療ガス等の配管系統などが混在している。モニタリング対象物が多岐にわたり、広範な範囲をカバーする必要があることからコンピュータビジョンによる画像モニタリング手法を検討した。画像データの一時保存やデータの送信、簡易なポスト処理等を行うために小型サーバを設け、暗所撮影に対応した赤外線カメラによる画像計測を計画した。図5には、後述する要素実験として共用部天井・配管の振動台実験において実際に撮影したデータの一部を示す。同図はいずれも振動台実験の期間中の夜間に撮影しており、暗所においても配管のエッジが明瞭に得られることを確認した。今後は、非構造部材の損傷として地震直後の残留変形の検出方法を検討し、画像モニタリングによるセンシング技術の開発を行う。

また京都大学医学部附属病院に MEMS 型地震計を 2 台設置し、病院内での建物振動観測に関する課題を検討した。病院内には通常電源と非常用電源があり、後者は地震時にも非常用発電施設により 3 日間程度は電源を確保できるようになっている。また院内の有線 LAN は 2 系統に分かれており、通常の通信用と個人情報が含まれる電子カルテシステム用に分かれている。地震計については、非常用電源と通常通信 LAN の使用が許された。



(a) 横菅集中部見下ろし



(b) 横菅集中部西側からの俯瞰

図5 配管等の非構造部材を対象とした画像モニタリング

5) 非構造部材・重要設備に関する検討

a) 非構造部材に関する既往の研究

建物構造躯体の被害は少なくとも、非構造部材の損傷により事業再開が困難となる事例が数多く報告されている。現在、特定天井の耐震化が進められているが、事業継続・早期再開するためには、特に、水関係のシステムの復旧に時間を要することが示されている。病院の被害調査では、スプリンクラーの破損により室内が水浸しになり、使用不可能な例が報告されている。配管設備を対象とした研究が進められているが、配管の振動特性に関しては十分に示されているとは言えない。

b) 病院施設における特殊性と地震対策における課題

病院施設は、機能継続、早期復旧が極めて不可欠な施設である。京都大学附属病院を参

考に、一般的な建物と異なる点をまとめる。

- ① 透析、ICU（集中治療室）、NICU（新生児集中治療室）、手術室などの特殊な部屋があり、天井吊の機材、特殊照明がある。可動装置が多いが、耐震対策は徹底されていない。
- ② ICU、NICU では、給排水・電気の他、医療ガスは生命線で、早期復旧が必須である。考えられる地震対策の課題を下記にまとめる。

- ① 衛生システム（給排水管、受水槽など）の破損が復旧日数に大きな影響を与えることから、衛生システムの耐震性向上が課題となる可能性がある。
- ② 天井吊の機材、可動式装置の耐震対策の検討が必要である。なお、医療ガスは柔軟性の高い銅管のため地震被害の報告はないが、今後、確認する必要がある。



図 6 医療ガス機械室の様子

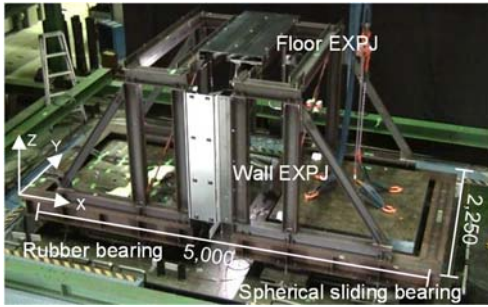
c) 病院施設における地震対策における課題

重要医療施設における重要設備として、今年度は過去の振動台実験に関する資料の収集に努めた。例えば、過去に京都大学で実施された高度管理医療機器である定置型保育器の実験では、震災時のロッキング・転倒や衝突の際には新生児に危害を及ぼす可能性が指摘されていた。保育器内部に新生児と重量が同じである、教育用の人形を実際の臨床現場と同じ方法で実験した結果では、内部のやわらかいクッションに囲まれた教育用の新生児は、全例においてうつ伏せになかったが、別の実験では、新生児がうつ伏せになるケースが報告されており、実験における医療現場の再現性が重要である。次年度以降に E-ディフェンス実験で試験体内部に設置する医療機器について、その種類や設置方法について検討を進め、医療機器別の迅速な耐震性評価や地震対策に関する提案を目標とする。

6) 要素実験

a) エクспанションジョイントの振動台実験

災害時に拠点となる大型病院では建物同士が渡り廊下によって連結されることが多く、地震や風に対する棟間の相対変位応答を許容するためにエクспанションジョイント（EXPJ）が設置されている。過去の地震では EXPJ の損傷が多数報告されているが、EXPJ を含む非構造部材の多くは機械系の部材であり、塑性化を考慮して設計される構造部材とは設計時の考え方が異なる。そこで、京都大学防災研究所の所有する振動台を用いて EXPJ の損傷メカニズムを評価した。床と壁用 EXPJ について、設計可動量まで損傷しないことを振動台実験で確認されている A ランク相当と、手動などで設計可動量まで損傷しないことが確認されている B ランク相当を対象に実験した。実験では、図 7a に示すように異なる固有周期を持つ 2 つの鋼骨組間に EXPJ を設置し、地震動と正弦波により相対変位を励起した。図 7b に損傷状態（DS）を示す。DS1 は軽微な損傷で、部品交換は必要なものの継続使用可能である。DS2 は部材交換が必要だが機能を維持する。DS3 は EXPJ としての機能を損失している。今回の実験では、DS1 と DS3 のみが観察された。それぞれの損傷状態に至った相対変位応答比（2 つの鋼骨組の相対変位を設計可動量で除したもの）を付記している。A ランクでは、設計可動量を超えても機能損失に至らなかったが、B ランク相当では、設計可動量内で軽微な損傷があり、設計可動量を超えるとすぐに機能損失に至った。



EXPJ	損傷状態 (DS)	相対変位応答比
A-床	DS1: カバープレートの離脱	193%
A-壁	DS1-A: バネの変形	109%–132%
	DS1-B: ビスの破損	116%
B-床	DS1: ビスの破損	55%
	DS3: 床の離脱	127%
B-壁	DS1: ゴムシートの離脱	擦れによる
	DS3: 壁の脱落	101%–109%

(a) 試験装置と試験体

(b) 観察された損傷状態

図7 エクスパンションジョイントの振動台実験

b) 共用部天井・配管の振動台実験

京都大学防災研究所において共用廊下を再現した振動台実験を行った。剛な骨組に長さ8mの給水管、給湯管、排水管、医療ガス管、消火管、冷媒管、空調ダクト、ケーブルラックを配置した。また中央部に3×4mの天井を配置し、天井裏配管等と天井吊り材などの干渉を観察した。入力波はJMA神戸、益城、上町とし、実大実験で建物3階に配管・天井が取り付けくことを考慮し、振動解析で得られた床応答波、原波、正弦波を与えた。主な加振履歴を表6、実験結果、実験の様子を図8に示す。

- ① 配管端部を完全拘束した状態：4階床レベルの床応答波、原波では、配管、天井の目立った損傷はなかった。試験体の振動数に合わせた正弦波では、天井のクリップが広範囲で外れたが、10g以上の加速度を計測した給湯管に損傷はなかった。
- ② 天井施工不良+配管端部の拘束を軽度にした状態：ダクトと天井の接合位置などに損傷は見られたものの、天井が脱落するような被害はなかった。
- ③ 天井施工不良+配管端部を自由にした状態：ダクトと天井の接合位置などに損傷は見られたものの、配管、天井の目立った損傷はなかった。
- ④ 天井施工不良+簡易なブレースを取り付けた旧耐震天井仕様+配管端部を自由にした状態：耐震性が期待できない簡易なブレースによって、上下振動が抑えられ、正弦波を加えても天井クリップの落下はわずかであった。簡易なブレースでも天井の損傷を軽減できる可能性を示した。

表 6 加振履歴

試験体条件	入力波	
配管端部拘束	①ランダム波(y,z 方向)	20gal
	②JMA, 益城, 上町(4FL)	10%
	③JMA4F ④益城 4FL	50,40%
	⑥JMA 原波 ⑦益城原波	50%
	⑧JMA 原波 ⑨益城原波	75%
	⑩JMA 原波	100%
	⑪築館原波	40%
	⑫Sin 波 (y=8,9,z=16.5Hz)	1000gal
天井施工不良配管端部軽拘束	①ランダム波(y,z 方向)	20gal
	②JMA, 益城, 上町(4FL)	10%
	③JMA4FL④益城 4FL	50,40%
	⑤JMA 原波⑥益城原波	50%
	⑦⑧JMA 原波	75,100%
天井施工不良配管端部自由	JMA4FL	50%
	①ランダム波(y,z 方向)	50gal
	②-④JMA 原波	50,75,100%
	⑤Sin 波 (y 方向) 1.73Hz	500,600,700,800gal
天井施工不良配管端部自由旧天井仕様	①ランダム波(y,z 方向)	50gal
	②-④JMA 原波	50,75,100%
	Sin 波(y=10Hz)	500,800gal
	Sin 波 (y=10Hz,z=16.5Hz)	500,800,1000gal

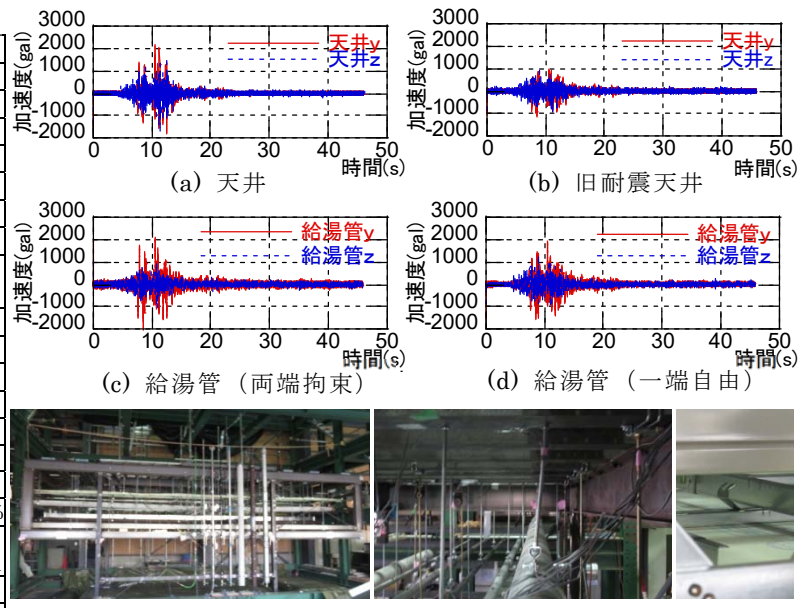


図 8 実験の様子および JMA 原波 100%入力時の天井・給湯管の加速度応答

(c) 結論ならびに今後の課題

- ・研究 4 年目の E-ディフェンスによる大型振動台実験に向けて、耐震棟と免震棟からなる試験体を試設計した。災害時に対応を求められる重要施設として、通常の建物の 1.5 倍の耐力を要件とし、数値解析により試験体の地震時応答を評価した。
- ・非構造部材の損傷評価手法の提案に向けて、主に振動計測および画像分析の手法について検討を開始した。
- ・非構造部材の耐震度合を評価するため、渡り廊下に用いられるエクспанションジョイントと共用廊下部の天井裏配管と天井の要素実験を実施し、設計レベルと設計超レベルの振動に対する損傷状態を評価した。
- ・今後は、試設計の結果をもとに細部の設計方針を固めて試験体の本設計を開始するとともに、非構造部材の損傷把握手法を引き続き検討する。また E-ディフェンスで評価対象とする医療重要設備について、医療機関や医療メーカーと連携を密にとり選定を進める。

(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

なし

2) 学会誌・雑誌等における論文掲載

なし

3) マスコミ等における報道・掲載

なし

(f) 特許出願，ソフトウェア開発，仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成 30 年度業務計画案

- ・平成 29 年度に実施した試設計および予備解析結果を検証し、試験体の梁や柱などの主要部材の選定を進める。また柱梁接合部や柱脚部について、部材接合部の接合方法や詳細について検討する。その一部については、要素実験により終局性能を把握する。
- ・詳細な数値解析モデルを構築し、試験体の終局挙動を予測する。試験体骨組の地震応答解析結果に基づき、重要設備や医療機器などにかかる加速度や変位を算定する。
- ・数値解析結果に基づき、加振計画（案）および計測計画（案）を作成する。また倒壊防止フレームなど E-ディフェンス実験時の安全対策を検討する。
- ・E-ディフェンスで評価対象とする医療重要設備について、医療機関や医療メーカーと協力して、機械の種類を選定する。試験体の各部屋について、部屋の使用目的を定めて、医療機器および什器などのレイアウト（案）を作成する。
- ・試験体に設置する非構造部材・重要設備の検討においては、平成 29 年度は、病院の廊下を再現した配管・天井について予備実験を実施した。正しく施工された新しい配管は地震時に大きな損傷が無いことを確認したが、実際の地震被害では消火管などの破損が報告されていることから、老朽化した配管等の性能について文献調査および実験や解析等により検討する。
- ・天井裏や配管の損傷をモニタリングするためのシステムについて、平成 29 年度に検証したシステムに関して分析して改良を進め、E-ディフェンス実験時に適用可能なシステムの構築を進める。