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

3.3.2 災害拠点建物の安全度即時評価および継続使用性即時判定（課題 c②）

(1) 業務の内容

(a) 業務の目的

・「②災害拠点建物の安全度即時評価および継続使用性即時判定」として、行政庁舎や体育館など、災害時拠点となる既設の建物内に少数のセンサを設置し、地震後速やかに建物安全性、崩壊余裕度、および継続使用の可否等を判定するシステムの構築を目指す研究開発を行う。具体的には、構造躯体のみならず設備・非構造部材をも再現した実物建物を大型振動台実験により損傷させ、センサによって検知した建物の揺れのデータをもとに、躯体から設備・非構造部材までの損傷レベルを即時に評価する技術、および崩壊余裕度の定量的評価に基づく施設の継続使用性判定手法を提案する。

(b) ２０２０年度業務目的

2019(平成 31)年度に実施した実大３階建て鉄筋コンクリート造建物の振動台実験結果を用いて、解析モデルの精度について検討するとともに、建物の損傷検知システムを検証し、既往の損傷評価方法との関係を整理する。更に、入力地震動レベルと非構造部材の損傷の関係を整理し、災害拠点の継続利用性を判断する上での基礎資料をまとめる。それらの成果を論文として発表する。

(c) 担当者

所属機関	役職	氏名
東京大学地震研究所	教授	楠　浩一
東京大学大学院新領域創成科学研究科	教授	清家　剛
名古屋大学大学院 環境学研究科	准教授	日比野　陽
建築研究所構造研究グループ	主任研究員	向井　智久
大阪大学大学院工学研究科	教授	真田　靖士
広島大学大学院工学研究科	教授	大久保　孝昭
広島大学大学院工学研究科	助教	寺本　篤史
豊橋科学技術大学建築・都市システム学系	助教	林　和宏
大林組技術研究所	所長	勝俣　英雄
大林組技術研究所構造技術研究部	副部長	米澤　健次
防災科学技術研究所地震減災実験研究部門	主任研究員	中村　いずみ
東京大学地震研究所	特任研究員	Trevor Zhiqing Yeow
東京大学地震研究所	大学院生	八木 尚太朗
東京大学地震研究所	大学院生	キム キョンジン
東京大学地震研究所	大学院生	木下　俊輝

(2) ２０２０年度の成果

(a) 業務の要約

以下の項目を実施した。

1) 解析モデルの精度検討
2) 建物の損傷検知システムの検証
3) 既往の損傷評価方法との関係の整理
4) 入力地震動レベルと非構造部材の損傷の関係の整理と基礎資料のまとめ

(b) 業務の成果

1) 解析モデルの精度検討

2019 年の E-Defense 実験で観測された加速度と層間変位の記録を使用して、試験体の非線形時刻歴解析の精度を確認した。 2019 年日本建築学会大会で発表した、以前に作成した数値モデルから、(i) 最新の材料試験結果、(ii) ホワイトノイズデータの分析から得られた減衰定数の低下、および (iii) 基礎で計測された加速度を入力地震動とするように更新した。実験結果と数値解析の比較を、1%の減衰定数を使用した場合について図 1 に示す。一般に、最大の代表変位は、特に負の方向で一致しており、全体的な応答は類似している。この検討結果、特にベースシアと 1 階変位の実験結果について、Journal of Earth Engineering の論文に掲載され、ホワイトノイズデータから得られた減衰定数に関する検討は 2020 年日本建築学会大会に掲載された。

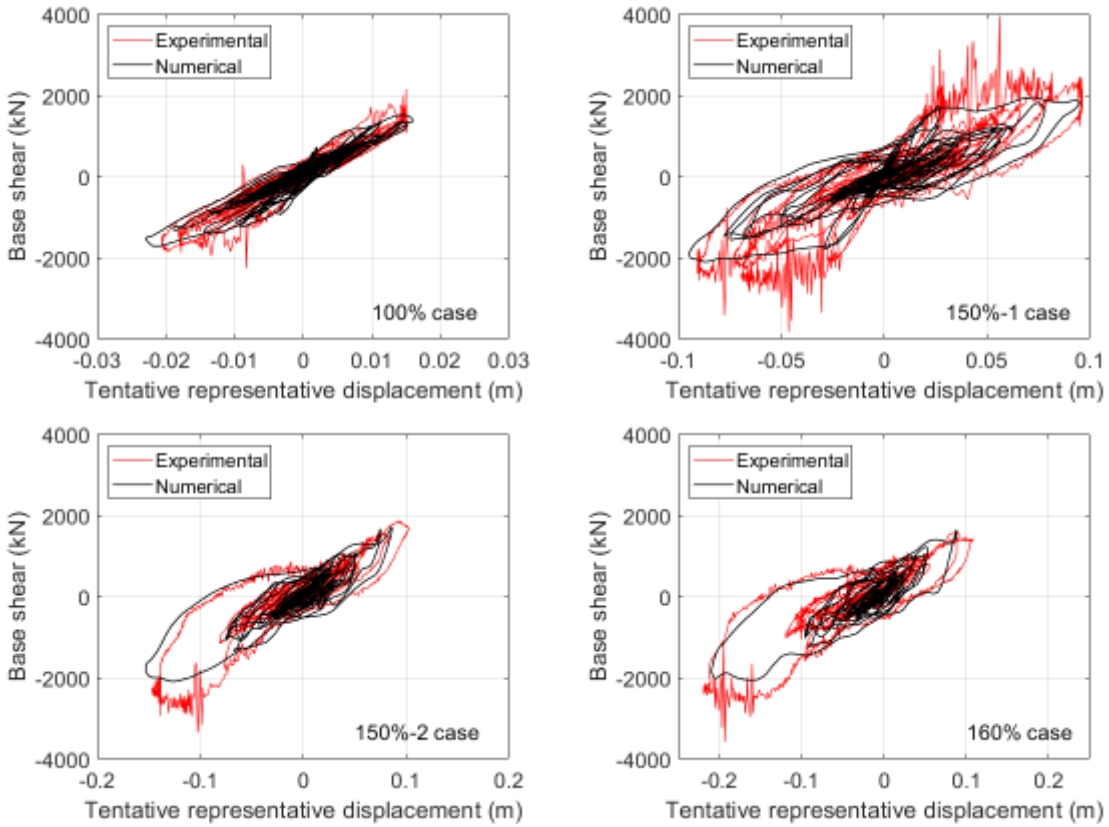

図 1　実験結果と解析結果の比較

2) 建物の損傷検知システムの検証

損傷検知システムに関しては、既往の目視に依る被災度区分に対応させるため、軽微：コンクリートにひび割れが発生しているものの、極めて限定的な状態、小破：損傷は確実に発生しているが、余震に対する倒壊の余裕度が十分にある状態、中破：余震に対する倒壊の余裕度が十分にない状態、大破：本震と同じ地震が再度発生した場合は、建物が倒壊に至る危険性が高い状態、倒壊：既に安全限界状態を超えている状態と基準を設定した。また、この基準を用いて、余震に対する最大応答変形予測値を基に、各被災度の区分の領域算出方法を定義した。安全限界時塑性率が 5 の場合の例を図 2 に示す。また、図 3 に示すように、本手法を昨年度の E-Defense 実験に適用し、150%一回目の入力結果から、 2 回目の入力では倒壊の領域に至ることを正しく推定できることを確認した。この成果は文献 1)に発表した。

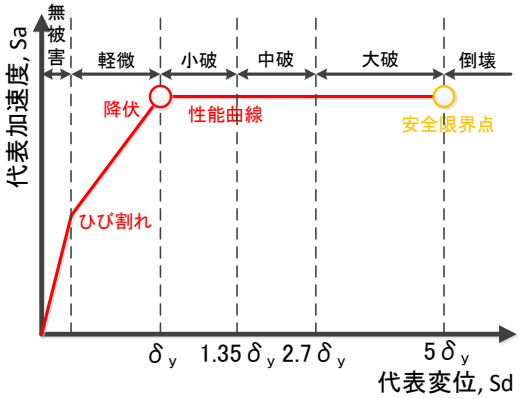

図 2　各被災度の領域

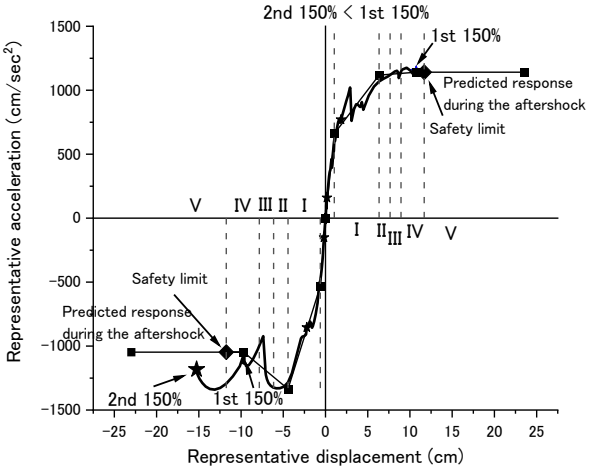

図 3　E-Defense 実験での適用

3) 既往の損傷評価方法との関係の整理

2)では、提案する損傷評価方法は、既往の被災度区分判定法と対応可能であることを確認した。そこで次に、地震保険による損害算定と被災度区分判定の関係について、柱の損傷度を乱数によって発生させることにより、数値的に検討した。図 4 に、被災度 R と部分的被害による損害認定結果（損害割合の合計）D の関係を示す。ここで、R は 0～1 の数値で、建物の残存耐震性能率を表し、R が小さいほど被害が大きい。一方 D は 0～100 の数値で、損害の率を表し、D が大きいほど被害が大きい。図 3 から、両者にはおおむね線形関係があることが分かる。なお、図中の丸で囲んだ部分は大きく線形関係から外れているが、これは、被害の程度 IV が 50%を超えると全損とし、その損害率は 50 で頭打ちとなるためである。この結果から、提案する損傷評価方法は地震保険による損害算定にも利用可能であることが分かる。この成果は文献 1)に発表した。

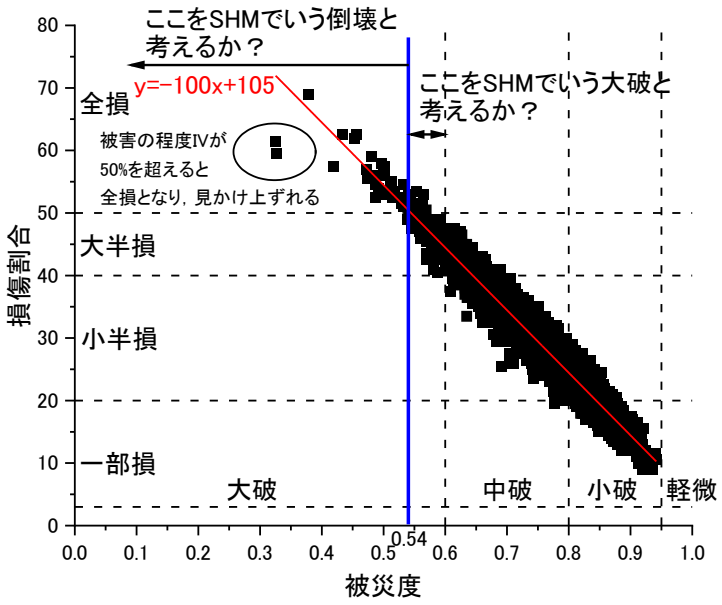

図４　被災度と損害割合の関係

4）入力地震動レベルと非構造部材の損傷の関係の整理と基礎資料のまとめ

非構造部材を試験体に取り付け、入力地震動レベルと非構造部材に生じた損傷の関係の整理を行った。取り付けた非構造部材は吊り天井、窓、タイルであり、それぞれ複数種類のものを取り付けることで、種類ごとの耐震性の違いを確認できるようにした。損傷の確認は 100%入力後、1 回目の 150%入力後、160%入力後に目視により行った。吊り天井については、試験体の 2 階に在来構法による天井を、試験体の 3 階には耐震性を考慮して設計された耐震天井を取り付けた。窓については、試験体の 2 階に 790×1,440mm のはめ殺し窓と引き違い窓を、3 階には 1,650×1,440mm の大判のはめ殺し窓と引き違い窓を取り付けた。タイルについては、試験体の室外側でエリアを分け、それぞれセメントモルタルで躯体に張り付ける方法と、弾性接着剤で張り付ける方法（半乾式工法）でタイルを取り付けた。

各非構造部材に確認された損傷を表 1 に示す。吊り天井に深刻な損傷は確認されなかったが、実際の地震でも確認される損傷が 100%入力時より確認された。はめ殺し窓は 160%入力後にガラスが割れた。引き違い窓には深刻な損傷は確認されなかったが、クレセント錠が機能しなくなった。セメントモルタルで張られたタイルは 160%入力時に剥落したが、弾性接着剤で張られたタイルは剥離のみにとどまった。これらの整理結果を基礎資料として考察を加えてまとめ、Journal of Earthquake Engineering に投稿した。

表１　各非構造部材に確認された損傷

		目視観察結果		
	階	100%入力後	1回目の150%入力後	160%入力後
応答加速度	RF	1.10	1.82	1.63
	3F	0.93	1.38	1.40
	2F	0.69	1.07	1.08
層間変形角	3F	1/833	1/127	1/58
	2F	1/333	1/69	1/29
耐震天井の損傷	3F	－	－	－
在来構法による天井の損傷	2F	梁と天井の間に隙間が生じる	梁と天井間の隙間の増大	梁と天井間の隙間の増大 点検口周囲のボードの変形
はめ殺し窓の損傷	3F	モルタルひび割れ	シーリング材の切れ サッシの変形 サッシ接合部に隙間が生じる モルタルひび割れの増加	シーリング材の切れの進行 ガラス角部と対角線上にひび割れ モルタルひび割れの増加と破片の落下 サッシの変形の進行と隙間の増大
	2F	モルタルひび割れ	シーリング材の切れ サッシの変形 サッシ接合部に隙間が生じる モルタルひび割れの増加	シーリング材の切れの進行 ガラス角部にひび割れ モルタルひび割れの増加と破片の落下 サッシの変形の進行と隙間の増大
引き違い窓の損傷	3F	モルタルひび割れ	モルタルひび割れの増加	モルタルひび割れの増加 サッシの接合部に隙間が生じる クレセント錠の解錠（変形） サッシの変形
	2F	モルタルひび割れ	モルタルひび割れの増加	モルタルひび割れの増加 サッシの接合部に隙間が生じる クレセント錠の解錠（変形、部品脱落） サッシの変形
セメントモルタルで張られたタイルの損傷	3F	タイルの剥離	タイルの剥離の増加 ひび割れ（主にタイル）	タイルの剥離の増加 ひび割れ（主にタイル）の増加 タイルの剥落
	2F	タイルの剥離	タイルの剥離の増加 ひび割れ（主にタイル）	タイルの剥離の増加 ひび割れ（主にタイル）の増加 タイルの剥落
	1F	タイルの剥離	タイルの剥離の増加 ひび割れ（主にタイル）	タイルの剥離の増加 ひび割れ（主にタイル）の増加 タイルの剥落
弾性接着剤で張られたタイルの損傷	3F	タイルの剥離	タイルの剥離の増加 ひび割れ（主にタイル目地）	タイルの剥離の増加 ひび割れ（主にタイル目地）の増加
	2F	タイルの剥離	タイルの剥離の増加 ひび割れ（主にタイル目地）	タイルの剥離の増加 ひび割れ（主にタイル目地）の増加
	1F	タイルの剥離	タイルの剥離の増加 ひび割れ（主にタイル目地）	タイルの剥離の増加 ひび割れ（主にタイル目地）の増加

(c) 結論ならびに今後の課題

2019（平成31）年度に実施した実大３階建て鉄筋コンクリート造建物の振動台実験結果を用いて、解析モデルの精度について検討するとともに、建物の損傷検知システムを検証し、既往の損傷評価方法との関係を整理した。更に、入力地震動レベルと非構造部材の損傷の関係を整理し、災害拠点の継続利用性を判断する上での基礎資料をまとめた。それらの成果を論文として発表した。

今後は、更に同様に損傷検知システムの検討、既往の評価方法との関係整理、入力レベルと非構造被害の関係の検討を進める。併せて、損傷検知システムの精度検証のための鉄骨フレームを用いた振動台実験を実施するとともに、実建物の観測システムのこれまでの知見を反映した更新と新しい建物への設置を行う。

(d) 引用文献

1) 楠　浩一：加速度記録により求めた R/C 造建物の性能曲線による被災度評価法に関する研究，日本建築学会構造系論文集，第 85 巻 第 774 号, pp.1055-1065, 2020.8

(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
災害拠点建物の安全度即時評価および継続使用性即時判定　(その 23) 外装タイルの剥離検知に関する予備実験及び振動台実験概要,ポスター	川口莉穂・大久保孝昭・寺本篤史・早野博幸・関根麻里子・楠 浩一	日本建築学会大会学術講演梗概集(講演会は中止のため全てポスター発表)	2020 年 9 月	国内
災害拠点建物の安全度即時評価および継続使用性即時判定　(その 24) 光ファイバセンサを用いた外装タイルの剥離検知および構造部材の損傷モニタリング,ポスター	関根麻里子・早野博幸・寺本篤史・大久保孝昭・川口莉穂・楠 浩一	日本建築学会大会学術講演梗概集(講演会は中止のため全てポスター発表)	2020 年 9 月	国内
災害拠点建物の安全性即時評価および継続使用性即時判定　(その 25) 打診音解析による外装タイル壁の剥離検知技術の検討,ポスター	北村成寿・大久保孝昭・寺本篤史・川口莉穂・楠浩一	日本建築学会大会学術講演梗概集(講演会は中止のため全てポスター発表)	2020 年 9 月	国内
災害拠点建物の安全度即時評価および継続使用性即時判定　その 20 実験および天井・窓の概要,ポスター	清家剛・八木尚太朗・都築澪・楠浩一・中村いずみ・中川椋太郎・渡邊千加	日本建築学会大会学術講演梗概集(講演会は中止のため全てポスター発表)	2020 年 9 月	国内
災害拠点建物の安全度即時評価および継続使用性即時判定　その 21 天井の損傷および挙動,ポスター	渡邊千加・八木尚太朗・清家剛・都築澪・楠浩一・中村いずみ・荻原健二・中川椋太郎	日本建築学会大会学術講演梗概集(講演会は中止のため全てポスター発表)	2020 年 9 月	国内
災害拠点建物の安全度即時評価および継続使用性即時判定　その 22　窓の損傷および挙動,ポスター	都築澪・八木尚太朗・清家剛・楠浩一・中村いずみ・小林健二・中川椋太郎・渡邊千加	日本建築学会大会学術講演梗概集(講演会は中止のため全てポスター発表)	2020 年 9 月	国内
常時微動計測に基づく RC 造建物の振動特性,ポスター	井出 彩葉・楠 浩一	日本建築学会大会学術講演梗概集(講演会は中止のため全てポスター発表)	2020 年 9 月	国内
災害拠点建物の安全度即時評価および継続使用性即時判定　その 3　試験体変更概要および実験結果概要,ポスター	深井 悟・楠 浩一	日本建築学会大会学術講演梗概集(講演会は中止のため全てポスター発表)	2020 年 9 月	国内
A new safety evaluation system and the continuous functionality of buildings with post-disaster functions following earthquakes (Part 4 - Dynamic identification of the test specimen）,ポスター	グラネロ ガブリエル・ヤオ トレボー・楠 浩一	日本建築学会大会学術講演梗概集(講演会は中止のため全てポスター発表)	2020 年 9 月	国内
A new safety evaluation system and the continuous functionality of buildings with post-disaster functions following earthquakes Part 5 – verification of peak total floor acceleration using CWT,ポスター	ヤオ トレボー・楠 浩一	日本建築学会大会学術講演梗概集(講演会は中止のため全てポスター発表)	2020 年 9 月	国内
災害拠点建物の安全度即時評価および継続使用性即時判定　その 6　振動台実験に対する非線形 FEM 解析,ポスター	米澤 健次・水越 一晃・勝俣 英雄・楠 浩一*	日本建築学会大会学術講演梗概集(講演会は中止のため全てポスター発表)	2020 年 9 月	国内
災害拠点建物の安全度即時評価および継続使用性即時判定　その 7　性能曲線を用いた応答評価,ポスター	楠 浩一・中村いずみ	日本建築学会大会学術講演梗概集(講演会は中止のため全てポスター発表)	2020 年 9 月	国内

災害拠点建物の安全度即時評価および継続使用性即時判定 (その 8) 袖壁付柱の曲げ解析,ポスター	張 政・百家 祐生・尹 ロク現・真田 靖士・楠 浩一・日比野 陽・向井 智久	日本建築学会大会学術講演梗概集(講演会は中止のため全てポスター発表)	2020 年 9 月	国内
災害拠点建物の安全度即時評価および継続使用性即時判定 その 9：構造部材の損傷性状, ポスター	日比野 陽・楠 浩一・中村 いずみ	日本建築学会大会学術講演梗概集(講演会は中止のため全てポスター発表)	2020 年 9 月	国内
A New Safety Evaluation System and the Continuous Functionality of Buildings with Post-disaster Functions Following Earthquakes Part 10: Effect of reinforcement detailing on seismic performance of isolated non-structural walls,ポスター	Walid AHMAD SAFI・Yo HIBINO・Koichi KUSUNOKI	日本建築学会大会学術講演梗概集(講演会は中止のため全てポスター発表)	2020 年 9 月	国内
災害拠点建物の安全度即時評価および継続使用性即時判定 その 11 置き基礎設備配管の実験計画,ポスター	田辺 恵一・向井 智久・木村 剛・神原 浩・林 一宏・水谷 国男・込山 治良・坪井 淳一・楠 浩一・中村 いずみ	日本建築学会大会学術講演梗概集(講演会は中止のため全てポスター発表)	2020 年 9 月	国内
災害拠点建物の安全度即時評価および継続使用性即時判定 その 12 置き基礎配管に関する実験結果概要,ポスター	水谷 国男・向井 智久・渡邊 秀和・木村 剛・神原 浩・林 一宏・田辺 恵一・込山 治良・楠 浩一・中村 いずみ	日本建築学会大会学術講演梗概集(講演会は中止のため全てポスター発表)	2020 年 9 月	国内
災害拠点建物の安全度即時評価および継続使用性即時判定 その 13 置き基礎配管に関する実験結果考察,ポスター	林 一宏・向井 智久・渡邊 秀和・木村 剛・田辺 恵一・神原 浩・水谷 国男・込山 治良・楠 浩一・中村 いずみ	日本建築学会大会学術講演梗概集(講演会は中止のため全てポスター発表)	2020 年 9 月	国内
災害拠点建物の安全度即時評価および継続使用性即時判定 その 14 置き基礎配管に関する解析検討,ポスター	込山 治良・向井 智久・渡邊 秀和・木村 剛・神原 浩・林 一宏・水谷 国男・田辺 恵一・楠 浩一・中村 いずみ	日本建築学会大会学術講演梗概集(講演会は中止のため全てポスター発表)	2020 年 9 月	国内
災害拠点建物の安全度即時評価および継続使用性即時判定 その 15 置き基礎設備配管実験で得られた知見とまとめ, ポスター	木村 剛・向井 智久・渡邊 秀和・田辺 恵一・神原 浩・林 一宏・水谷 国男・込山 治良・楠 浩一・中村 いずみ	日本建築学会大会学術講演梗概集(講演会は中止のため全てポスター発表)	2020 年 9 月	国内
災害拠点建物の安全度即時評価および継続使用性即時判定 その 16 レーザースキャナーを用いた損傷評価のための計測計画,ポスター	向井 智久・村山 盛行・根本 直行・硲崎 賢一・渡邊 秀和・南部 禎士・楠 浩一・中村 いずみ	日本建築学会大会学術講演梗概集(講演会は中止のため全てポスター発表)	2020 年 9 月	国内
災害拠点建物の安全度即時評価および継続使用性即時判定 その 17 レーザースキャナーを用いた損傷評価のための計測結果,ポスター	根本 直行・向井 智久・硲崎 賢一・村山 盛行・渡邊 秀和・南部 禎士・楠 浩一・中村 いずみ	日本建築学会大会学術講演梗概集(講演会は中止のため全てポスター発表)	2020 年 9 月	国内
災害拠点建物の安全度即時評価および継続使用性即時判定 その 18 レーザースキャナーによる計測データを用いた損傷評価手法と結果, ポスター	硲崎 賢一・根本 直行・向井 智久・村山 盛行・楠 浩一・中村 いずみ	日本建築学会大会学術講演梗概集(講演会は中止のため全てポスター発表)	2020 年 9 月	国内
災害拠点建物の安全度即時評価および継続使用性即時判定 その 19 高解像度カメラを用いた計測計画および結果, ポスター	雨谷 周也・向井 智久・南部 禎士・楠 浩一・中村 いずみ	日本建築学会大会学術講演梗概集(講演会は中止のため全てポスター発表)	2020 年 9 月	国内
鉄筋コンクリート造建物の加振試験, ポスター（口頭発表動画）	中村いずみ	令和 2 年度防災科学技術研究所成果発表会（ポスター研究発表集及び動画）	2021 年 2 月	国内

2)学会誌・雑誌等における論文掲載

・ 査読付き

掲載した論文（発表題目）	発表者氏名	発表した場所（学会誌・雑誌等名）	発表した時期	国内・外の別
INITIAL DAMAGE OBSERVATIONS FROM AN E-DEFENSE SHAKE-TABLE TEST OF A BUILDING WITH POST-DISASTER FUNCTIONS	Trevor Zhiqing YEOW, Koichi KUSUNOKI, Izumi NAKAMURA and Yo HIBINO	Proceedings of the 2020 Japan Concrete Institute Annual Convention, Hiroshima, Japan, paper 2124	2020年7月	国内
THE 2019 TOKYO METROPOLITAN RESILIENCE PROJECT E-DEFENSE TEST OF A 3-STORY DISASTER MANAGEMENT CENTER	Trevor Zhiqing YEOW, Koichi KUSUNOKI, Izumi NAKAMURA, Yo HIBINO, Takaaki OHKUBO, Tsuyoshi SEIKE, Shotaro YAGI, Tomohisa MUKAI, Paolo CALVI, Mohammen MOUSTAFA and Satoru FUKAI:	Proceedings of the 17th World Conference on Earthquake Engineering, Sendai, Japan, paper 2i-0020	Proceedingsのみ2020年9月発刊（会議は2021年9月に延期）	国外
RESPONSE PREDICTION OF TYPICAL JAPANESE RC BUILDINGS CONSIDERING PARAMETRIC UNCERTAINTY	Trevor Zhiqing YEOW, Koichi KUSUNOKI and Haoran PAN	Proceedings of the 17th World Conference on Earthquake Engineering, Sendai, Japan, paper 2b-0059	Proceedingsのみ2020年9月発刊（会議は2021年9月に延期）	国外
E-DEFENSE SHAKE-TABLE TEST OF A BUILDING DESIGNED FOR POST-DISASTER FUNCTIONALITY	Trevor Zhiqing YEOW, Koichi KUSUNOKI, Izumi NAKAMURA, Yo HIBINO, Satoru FUKAI and Walid Ahmad SAFI	Journal of Earthquake Engineering	2021年2月	国外
加速度記録により求めたR/C造建物の性能曲線による被災度評価法に関する研究	楠　浩一	日本建築学会構造系論文集，第85巻第774号，pp.1055-1065	2020年8月	国内
置き基礎を用いた屋上配管の耐震性に関する実大実験（第1報）実験計画	田辺恵一,向井智久，木村剛，神原浩，林一宏，水谷国男，込山治良，坪井淳一，楠浩一，中村いずみ	空気調和・衛生工学会講演論文集	2020年9月	国内
置き基礎を用いた屋上配管の耐震性に関する実大実験（第2報）実験結果	水谷国男,向井智久，木村剛，神原浩，林一宏，田辺恵一，込山治良，渡邊秀和，楠浩一，中村いずみ	空気調和・衛生工学会講演論文集	2020年9月	国内
置き基礎を用いた屋上配管の耐震性に関する実大実験（第3報）解析検討	込山治良，向井智久，木村剛，神原浩，林一宏，水谷国男,田辺恵一，渡邊秀和，楠浩一，中村いずみ	空気調和・衛生工学会講演論文集	2020年9月	国内
置き基礎を用いた屋上配管の耐震性に関する実大実験（第4報）知見とまとめ	木村剛，向井智久，神原浩，田辺恵一,林一宏，水谷国男，込山治良，坪井淳一，楠浩一，中村いずみ	空気調和・衛生工学会講演論文集	2020年9月	国内
損傷抑制を目的とした壁縦筋を定着しない袖壁付柱：壁縦筋の定着の有無と袖壁端部の拘束筋量が袖壁付柱の耐震限界性能に与える影響	張政，真田靖士，尹ロク現，楠浩一，日比野陽，向井智久	構造工学論文集，Vol.67B	2021年3月	国内

・ 査読なし

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

2019(平成31)年度に実施した実大３階建て鉄筋コンクリート造建物の振動台実験結果を用いて、2020(令和２)年度に引き続き解析モデルの精度について検討するとともに、建物の損傷検知システムを検証し、既往の損傷評価方法との関係、入力地震動レベルと非構造部材の損傷の関係を整理し、災害拠点の継続利用性を判断する上での基礎資料をまとめる。それらの成果を論文として発表する。更に損傷検知システムの精度検証のため鉄骨フレームを用いた振動台実験を実施する。令和２年度までの研究成果を基に、建物の安全性判断と継続使用性即時判定を行うシステムの改良とシステム導入建物の保守作業を実施するとともに、実建物への試験設置を進め、５年間のプロジェクトの成果を具体的な実観測で活用する。