

都市防災への活用を目的とした建築物の 瞬時被害把握システムの開発

日比野 陽

地震後に被災した建築物の迅速な復旧を行うためには、各建築物の被災度とともに被災地域全体の建築物の被災状況が把握できることが望ましい。本研究では安価な地震計やカメラを用いて地震後の建築物の構造性能や非構造部材の損傷を早期に把握し、建築物の被災状況と継続使用性を判定する技術の開発を行う。さらに、地域内にある建築物の被災情報を収集できるシステムの実用化に向けた開発を行う。地域内にある建築物の継続使用性の評価情報はネットワークを通じて防災拠点などに集約し、地域の被災状況の瞬時把握や住民の安全な避難誘導、迅速な防災計画の策定など、都市防災に活用できる技術として開発する。

キーワード：ヘルスモニタリング、加速度計、被災度、継続使用性、都市防災

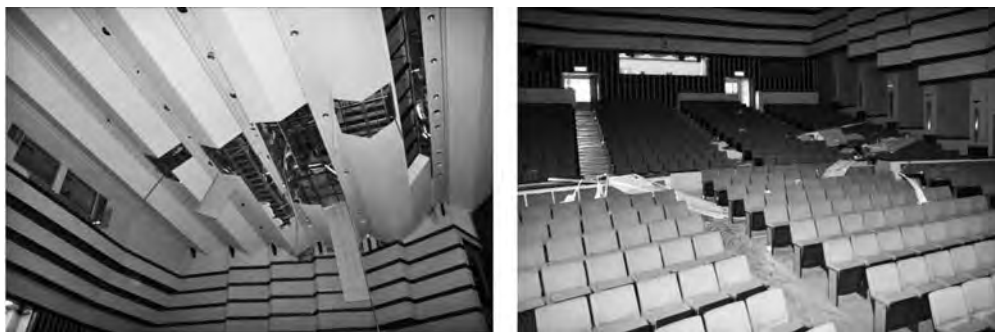
1. はじめに

地震災害後の迅速な被災状況の把握や復旧は都市の防災上非常に重要である。我が国において地震後の建築物の被災状況把握は日本建築防災協会による被災度区分判定基準¹⁾に従って実施されており、過去の地震において、被災度が震後の復旧の要否判断に活用されてきた。被災度区分判定は、主に構造部材の損傷度を技術者が目視によって判定し、その損傷度から建築物の被災度を判定するものである。部材の損傷度の判定は被害が最も大きいと推定される階および方向において実施され、被災度は対象階の部材に対して求められた損傷度や部材性能を考慮し、健全な状態に対して建築物の保有耐力がどの程度低下したかを示す耐震性能残存率から求められる。したがって、被災度の判定作業は被災した地域の大きさや建築物の規模に大きく依存する。例えば2015年の兵庫県南部地震では被災地域に39万5千棟の建築物があり、延べ6000人の技術者によって判定が行われ、3週間の調査を要しており²⁾、被災した建築物が多数ある場合や、高層の建築物の場合においては、調査にかなりの時間を要する。これは震後の迅速な復旧の障害になりかねず、被災状況の把握の省力化と迅速化が極めて重要であるといえる。

建築物の耐震性能は設計時において計算されているものの、施工や材料条件、地震などの災害などによって設計時とは異なることが知られている。近年では、性能評価型設計法の実現や建築物の維持管理の重要性の認識の高まりを受けて、施工後の建築物の性能を評

価しようとする試みが数多く行われている。その中でも、建築物の構造性能をセンサなどによって把握する方法を構造ヘルスモニタリングと呼んでおり、構造性能に関わるデータを計測するだけでなく、データから得られる構造性能に関わる情報を判断・整理するなどの機能を有している。構造ヘルスモニタリングは現在、急速に研究が進められており、我が国においては、例えば、常時微動を用いて建築物の振動特性を把握しようとするもの^{3)~5)}、GPSを用いて建築物の変位を計測するもの⁶⁾、AEセンサを用いて損傷を検知するもの⁷⁾、変位計を使って計測するもの^{8), 9)}、加速度センサを用いるもの^{10)~13)}などがある。国外の研究者によっても加速度計によるデータを用いた構造性能の把握に関する研究が多数行われている^{14), 15)}。これらの技術の普及は新築および既存の建築物の構造性能把握に役立つが、いずれも特殊なシステムの構築が必要であることや費用が高価であること、実装が容易ではないなどの問題から、実用化には至っていない。

一方で、楠らによって提案されている残余耐震性能把握手法¹⁶⁾は、加速度計を用いて地震時の建築物の性能曲線(加速度と変形の関係)を算出することができ、安価な加速度計を使用することや、建築物のモデル化が不要で実装が容易であること、30棟以上の建築物に設置された実績がある^{例えば17)}ことなどの特徴を有しており、実用化に近い。この手法を用いることで前述したような被災度の判定を容易かつ瞬時に実施することができ、被災後の避難と復旧の迅速化が実現できる可能性がある。ただし、2011年の



写真—1 天井の被害

東北太平洋沖地震や2016年の熊本地震においては、構造耐力上重要でない壁や天井材などの非構造部材の損傷（写真—1）が原因で建築物の使用が困難になった建築物も確認されており¹⁸⁾、非構造部材の損傷も無視することができないことが認識されつつある。さらに、被災地では避難所への的確な誘導とともに二次災害の防止などが必要であり、建築物の被災度だけでなく、被災地域全体で建築物の被災状況を把握できることが望ましい。

そこで本研究では、地震後の建築物の構造性能や非構造部材の損傷を早期に把握し、建築物の被災状況と継続使用性を判定するとともに、地域内にある建築物の被災情報を収集できるシステムの実用化に向けた開発を行うことを目的とする。なお、本研究は国土交通省の所掌する建設技術の高度化および国際競争力の強化を目的とした建設技術開発助成制度において、平成29年度および平成30年度政策課題解決型研究開発課題として採択されたものである。したがって、本稿の研究内容は執筆時点における研究状況の報告である。

2. 本研究開発の概要

本研究開発は安価かつ設置が容易なシステムとすることで実用化を目指しており、安価なセンサを用いることを前提としている。本研究開発のメンバーを表—1に示す。本研究開発は次の4つの課題から成っている。

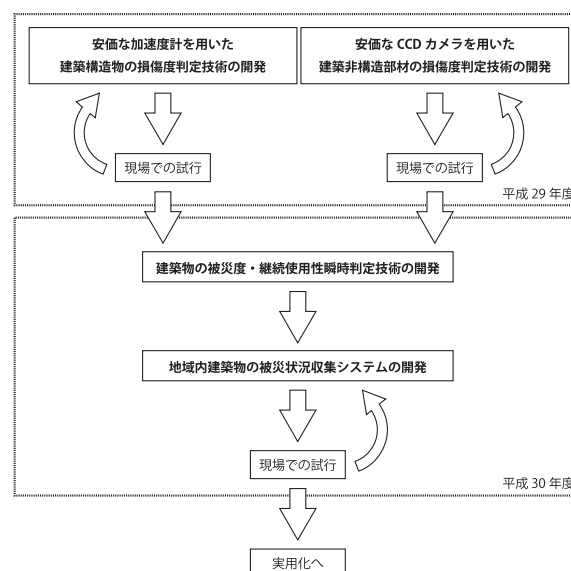
・研究課題

1. 安価な加速度センサを用いた建築構造物の被災

度判定技術の開発

2. 安価な CCD カメラを用いた建築非構造部材の被災度判定技術の開発
3. 建築物の被災度・継続使用性瞬時判定技術の開発
4. 地域内建築物の被災状況収集システムの開発

本研究の開発フローを図—1に示す。研究課題1および2は構造部材および非構造部材の被災度を判定する技術の開発であり、この被災度をもとにして研究課題3では建築物の被災度と継続使用性の判定を行う。研究課題4では研究課題3で判定した各建築物の被災度と継続使用性の結果を収集し、一覧としてまとめる



図—1 研究開発フロー

表—1 研究開発メンバー

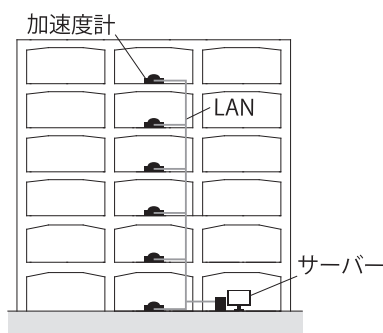
研究代表者	日比野 陽	広島大学 大学院工学研究科 准教授
共同研究者	勅使川原 正臣	名古屋大学 大学院環境学研究科 教授
	五十田 博	京都大学 生存圏研究所 教授
	桃山 健二	芝浦工業大学 建築学部 教授
	楠 浩一	東京大学 地震研究所 教授
	荒木 正之	(株) aLab 代表取締役

ことにより、行政機関や建築物の管理者が防災上活用できるシステムとして開発する。各研究課題の詳細については次章以降で示す。

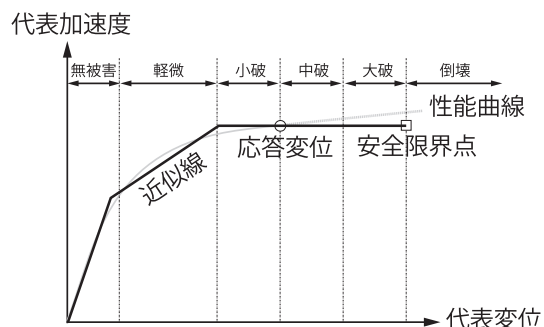
3. 研究課題

(1) 安価な加速度センサを用いた建築構造物の被災度判定技術の開発

本研究課題では、構造部材の被災度を加速度計を用いて把握する技術を開発する。加速度計はネットワーク通信でき、かつ実用上問題ないレベルで加速度が計測できるよう開発されたセンサ¹⁹⁾を用いる。加速度計のデータはLANを用いてサーバーに送られ、サーバーにインストールされたソフトウェアで分析を行う。加速度計は建築物の各階に1台程度設置する(図—2)。被災度は楠らの研究¹⁶⁾で提案される性能曲線をもとに判定する(図—3)。被災度は被災度区分判定基準に示される「無被害」、「軽微」、「小破」、「中破」、「大破」、「倒壊」の6段階で判定する。ただし、建築物の被災度を判定するためには建築物の限界変形が必要であり、加速度計によって算出することが困難であるため、耐震診断基準や限界耐力計算法によって設定された安全限界変形角をもとに安全限界点(図—3参照)を定める。さらに、建築物の1階(基礎)で計測された加速度を入力地震動として要求曲線を作成し、余震に対する安全性を加味する。



図—2 加速度計の設置



図—3 被災度と安全限界点

性能曲線に用いる代表加速度(${}_1\ddot{A}+{}_1\ddot{x}_0$)は、加速度記録からウェーブレット変換を用いて主要振動数成分(1次モードでの振動成分に相当)のみを抽出し、式(1)により算出する。代表変位 ${}_i\Delta$ は、各層の質量比 m_i と加速度の主要振動数成分から式(2)により算出する。性能曲線は正方向、負方向で変位の絶対値が最大値を更新した点を抽出して骨格曲線とする。さらに、骨格曲線を等価な3折れ線(近似線)にモデル化することにより、被災度を推定する(図—3)。被災度は近似線(モデル化した折れ線)と安全限界点により定義され、応答点が第一折れ点より手前(弾性)と判断された場合は0(無被害)とし、応答点が安全限界点を超えた場合はV(倒壊)とする。第一折れ点と第二折れ点の間は被災度Iとし、第二折れ点と安全限界点の間は代表変位の大きさを三等分して被災度II～IVとする。

$$({}_1\ddot{A}+{}_1\ddot{x}_0)=\frac{\sum m_i \cdot {}_1x_i^2}{(\sum m_i \cdot {}_1x_i)^2} \cdot \sum m_i \cdot {}_1\ddot{x}_i+{}_1\ddot{x}_0 \quad (1)$$

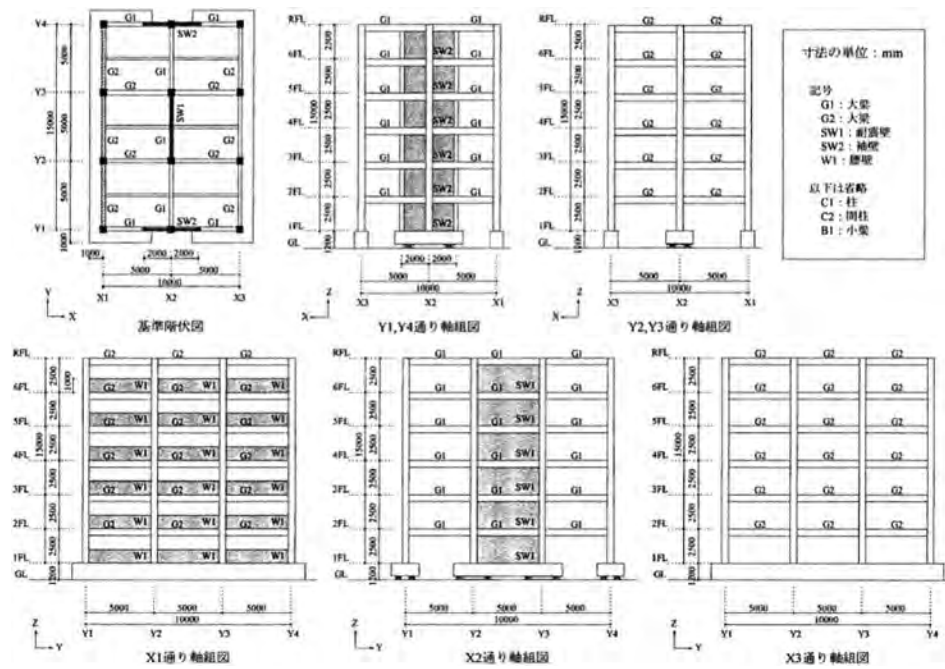
$${}_i\Delta=\frac{\sum m_i \cdot {}_1x_i^2}{\sum m_i \cdot {}_1x_i} \quad (2)$$

ここで、 ${}_1\ddot{A}$:代表加速度の建築物応答成分、 ${}_1\ddot{x}_0$:建築物基部で観測された入力加速度の主要振動数成分、 ${}_1x_i$: i 階の変位の主要振動数成分、 ${}_1\ddot{x}_i$: i 階の加速度の主要振動数成分、 m_i :各層の質量比。

本研究課題で定義した被災度の判定精度を検証するため、過去に行われた6層鉄筋コンクリート造建物(図—4)の振動台実験の結果²⁰⁾を用いて検証した。振動台実験ではひび割れを目視で観察し、被災度¹⁾を判定したものである。表—2は振動台実験の入力地震波の詳細であり、加速度の倍率を5～100%(レベル1～レベル6)とした計6波の神戸JMA波を入力している。図—5にレベル6入力時のX、Y方向の性能曲線の解析結果を示す。丸印は判定された折れ点位置である。観測された性能曲線とモデル化した近似線は概ね対応していることがわかる。表—3に近似線をもとに推定した被災度と実験時のひび割れを目視により判定した被災度の比較を示す。目視によって判定した被災度と解析によって求めた被災度は概ね一致し、本研究課題による技術によって、被災度の推定が可能であることがわかった。

(2) 安価な CCD カメラを用いた建築非構造部材の被災度判定技術の開発

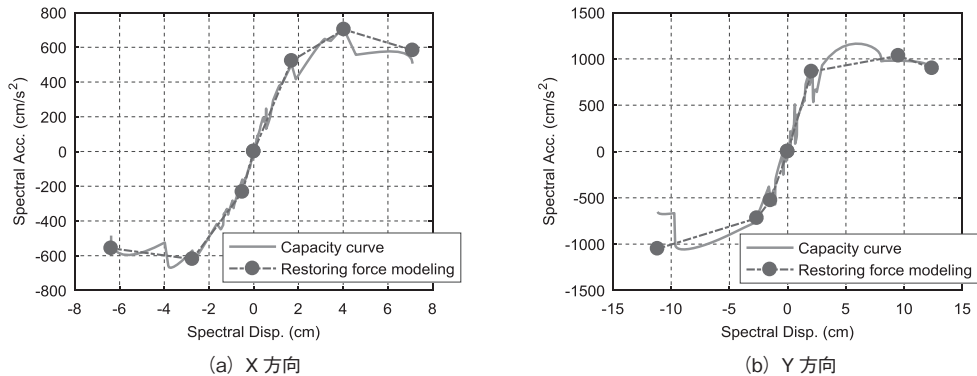
非構造部材は建築物によって仕様が異なることや、損傷が一定でないことから、目視以外の方法による判定は困難である。そこで本研究では安価な CCD カメ



図ー4 試験体の軸組図

表ー2 入力地震波の詳細

レベル	入力地震波	倍率	最大加速度 (m/s ²)			最大速度 (m/s)		
			X 方向	Y 方向	Z 方向	X 方向	Y 方向	Z 方向
1	神戸 JMA 波 (1995)	5%	0.307	0.469	0.191	0.026	0.049	0.018
2		10%	0.785	0.916	0.391	0.053	0.104	0.035
3		25%	1.97	2.99	0.946	0.138	0.259	0.081
4		50%	3.43	4.74	1.86	0.234	0.447	0.145
5		100%	6.30	11.40	3.45	0.381	0.828	0.280
6		60%	3.11	5.40	1.93	0.243	0.628	0.169



図ー5 性能曲線の比較 (レベル6 入力時)

ラにより撮影された画像によって、天井材の被害を人工知能を用いた画像解析技術で判定することにより、地震の直後に非構造部材の被災度を自動的に判定する方法を試みる。技術の開発にあたり、天井材の損傷の検知が可能であるかどうか検証する実験を行った。非構造部材の被災度は、構造部材と同様に被災度0～Vの6段階で評価するのが妥当であると考えられるが、現状では天井材の被災度の分類に関する知見が不足し

ており判定が困難である。そこで、本研究開発では非構造部材の被災度は被害の有無による2段階で評価することとした。

人工知能を用いた画像解析では損傷の状態を機械学習させておいた上で画像を解析させる必要がある。そこで、天井材のずれや落下を再現した「被害あり」の画像と、被害が生じていない「被害なし」の画像を用いて学習を行った。写真ー2は学習に用いた天井材

表—3 被災度判定結果

入力レベル	目視による判定	解析による判定	
		X 方向	Y 方向
1	0	I	I
2	I	I	I
3	I	I	I
4	II	II	I
5	IV	V	V
6	V	V	V

被害の画像の例であり、被害を受けていない天井材を意図的にずらすなどして被害を再現したものである。**写真—2 (a)** は天井材がずれており、比較的軽微な被害を再現しており、**写真—2 (b)** は天井材が落下した、大きな被害を再現した。

検知の対象として、**写真—3** に示す無被害の画像および天井材がずれた画像、天井材が落下している画像を用いた。検知実験ではまず 200 枚の画像（被害有

り写真：139 枚、被害無し写真：86 枚）を学習させて検知の検証を行った。検知の実験は**写真—3** の 3 枚の画像に対して、無被害および被害ありのどちらの画像に近いかの類似性を百分率で判定させたものである。**表—4** より、学習が 200 枚の場合には、無被害や天井材のずれが良好に判定できたものの天井材の落下は誤判定した。原因については学習画像の枚数の不足が原因であると考えられたため、ASEBI²¹⁾ のデータベースにある天井材の画像および、インターネット上から画像約 1000 枚（被害有り写真：537 枚、被害無し写真：462 枚）を収集し、追加学習を行った。その結果、**写真—3** の無被害の天井材および天井材の落下の画像に対しては、ほぼ無被害であると判定できたが、天井材のずれについては 78% 無被害と判定し、200 枚の学習後よりも判定精度が低下した。これは、天井材のずれが小さかったことから、被害がないものとして判定された可能性がある。

さらに、その他のケースでも誤判定する可能性があ



(a) 天井材のずれ



(b) 天井材の落下

写真—2 天井被害検知の学習用画像



(a) 無被害



(b) 被害あり (天井材のずれ)



(c) 被害あり (天井材の落下)

写真—3 検知対象とした写真

表—4 天井材の損傷の検知結果

	学習 200 枚		学習 1000 枚	
	無被害	被害あり	無被害	被害あり
無被害	100%	0%	100%	0%
被害あり (天井材のずれ)	5.2%	93.9%	78.2%	21.8%
被害あり (天井材の落下)	81.7%	18.3%	93%	7%

ると考えられることから、写真—3以外の様々な画像の検知実験を実施した。例えば、写真—4の市松模様の天井の画像²²⁾を判定したケースでは、100%被害ありとの判定であった。また、白色以外の天井材ではすべて無被害と判定した。これは学習させた天井材がすべて白色であったため、白色と異なる天井材の画像を被害があるものと学習した可能性がある。そこで、画像を加工した後に再度判定を行い検証を行った結果、すべての画像ではほぼ100%被害なしとの判定となった。この検証から、天井材の色が異なる場合には、画像を加工することで、検知が可能であることがわかった。ただし、画像を一様に白くするなどの処理は損傷が検知できなくなる可能性につながることもあるため、今後は学習させる画像としてより多様なものを使用し、多様な天井材の検知ができるようにしていく必要があるといえる。



写真—4 市松模様の天井

(3) 建築物の被災度・継続使用性瞬時判定技術の開発

地震後に建築物の使用の可否を判断する際に使用する指標である建築物の被災度¹⁾は地震後の建築物の復旧可能性の検討に役立つ。また、地震後に住民の生活や事業が継続できるか否か（継続使用性）は、建築物の被災度に関連すると考えられる。喜々津ら²³⁾は、2011年東北地方太平洋沖地震で被災した建築物の地震後の継続使用状況を調査し、地震後に建築物を使用できなかった要因についてまとめている。継続使用性を確保するための上部構造、非構造部材の損傷の限界状態についても提案を行っている。本研究開発では前節までの研究課題による構造部材と非構造部材の被災度の判定を踏まえ、継続使用性を構造部材と非構造部材の被災度から判定する。構造部材と非構造部材の被災度を用いて建築物としての被災度を判定するとともに、継続使用性を判定することを目的とする。

表—5は構造部材の被災度と非構造部材の被災度から判定する建築物全体の被災度であり、構造部材の

表—5 建築物の被災度

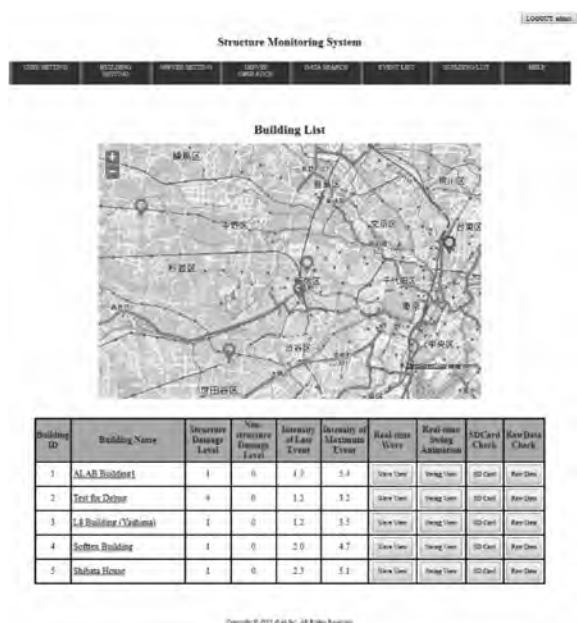
		非構造部材の被災度					
		0	I	II	III	IV	V
構造部材の被災度	0	0	I	II	III	IV	V
	I	I	I	II	III	IV	V
	II	II	II	II	III	IV	V
	III	III	III	III	III	IV	V
	IV	IV	IV	IV	IV	IV	V
	V	V	V	V	V	V	V

被災度と非構造部材の被災度の大きい方の被災度で決定される。継続使用性については、この被災度をもとに決定されるものと思われる。ただし、現状では非構造部材の被災度が2段階でしか評価できないことやその定義が定まっていないことから、過去の地震時の継続使用状況の調査結果²³⁾などを参考に、被災度と継続使用性の判定方法を確立していく必要がある。

(4) 地域内建築物の被災状況収集システムの開発

継続使用性は建築物ごとに判定されるが、地域内にある建築物の判定が集約されることで、都市の防災に役立つ可能性がある。特に建築物の管理者や行政機関が震後に被災状況を把握することで、住民の避難や誘導、復旧などに活用することが可能になる。地震後の速やかな復旧が可能であることは社会基盤の強靱化にもつながると考えられる。

本研究課題では、各建築物の構造・非構造部材の被災度、継続使用性を集約するシステムを開発することを目的とする。開発するシステムは各建築物にあるサーバーで地震（震度）をトリガーとして、地震後数分以内に構造部材と非構造部材の被災度および建築物の被災度、継続使用性を判定し、その結果をインターネットを通じて、集約サーバーに送信する。各建築物の被災状況は集約サーバーのウェブ上で一覧として表示する。図—6は開発中の被災状況集約システムの表示例であり、地震時の建築物の被災度および震度などの情報を示しており、建築物の位置が地図上に表示されるとともに、アイコンの色で被災状況が確認できるものとなっている。さらに、各建築物の部材の被災度と継続使用性の判定結果が一覧で表示される（図—6中下部）。なお本システムは、建築物の被災度の判定技術が確立できていないため、完成には至っていない。今後は各研究課題を進め、各建築物と相互に接続して実証実験を行う。



図一六 地域内建築物の被災状況収集システムの表示例

4. おわりに

本研究開発では、都市防災において活用できるシステムとして、構造部材と非構造部材の被災度の判定や建築物の継続使用性評価、地域内の建築物の被災状況を瞬時かつ自動的に集約できるシステムの開発に取り組んでいる。研究開発では、構造部材の被災度判定が実用上問題ない精度であることを検証した。また、非構造部材の被災度判定の手法では学習素材に依存する誤判定が検証実験により確認した。その他の研究課題においてはシステムの設計を進めており、実証実験を進めていく予定である。研究課題によって研究の進捗には差があるものの、開発は概ね順調に進んでおり、実用化が近いと考えている。ただし、普及には、行政機関や建築物の管理者などの同意や協力を得ることが課題であるといえる。本研究開発が実用化されれば、都市防災への活用はもとより、建築物の動的性状の把握や、被災度と目標性能や損傷限界状態の整理にも発展させることができるものと考えている。さらには、我が国や世界各国の耐震規定の高度化、精緻化にも役立つことが期待される。

J C M A

【参考文献】

- 1) 日本建築防災協会：震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針，2015
- 2) 日本建築センター：平成7年阪神・淡路大震災地震震害調査委員会報告書 一集大成一，1996
- 3) 荒川利治，山本和也：常時微動測定に基づく鉄骨造高層建物の振動特性に関する経年変化および時間変動，日本建築学会技術報告集，Vol.10，No.19，pp.61-66，2004
- 4) 増田博雄，金澤健司，岡田将敏，矢花修一，宮住勝彦：常時微動記録

による低層鉄筋コンクリート造建物の損傷検出実験（その1 損傷に伴う固有振動数の変化の検出），日本建築学会大会学術講演梗概集，構造 II，pp.77-78，2007

- 5) 金澤健司：コンクリート系建物の固有振動数の日変動メカニズムの解明，日本建築学会構造系論文集，Vol.72，No.612，pp.63-71，2007
- 6) ニウシャアリ，今井道男：GPSを用いた隣接した超高層建物の変位測定，日本建築学会技術報告集，Vol.12，No.24，pp.77-82，2006
- 7) 柳瀬 高仁，池ヶ谷 靖，村田 光，多田 健次，中村 充，圓 幸史朗，岡田 耕児，稲垣 文行：RC 構造物を対象とした構造ヘルスマonitoring システムの開発：その 13 縮小 20 層 RC 造建物試験体の震動台実験における AE 損傷指標の検証，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造 II，pp.71-72，2014
- 8) 岡田敬一，白石理人，片岡俊一：変位記憶型センサによる構造モニタリングシステムの開発と実建物への適用と検証，日本建築学会技術報告集，Vol.44，pp.61-66，2014
- 9) 畑田朋彦，片村立太，谷井孝至，仁田佳宏，西谷章：非接触型センサを用いた建物の層間変位計測システム その 10 E-ディフェンス RC 造耐震壁フレーム建物実験による計測特性の検討，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造 II，pp.999-1000，2016
- 10) 中村充，圓幸史朗，新田祐平，柳瀬高仁，池ヶ谷靖，村田光，岡田耕児，稲垣文行：RC 構造物を対象とした構造ヘルスマonitoring システムの開発：その 12 縮小 20 層 RC 造建物試験体の震動台実験における加速度損傷指標の検証，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造 II，pp.69-70，2014
- 11) 飛田潤，福和伸夫，平田悠貴，長江拓也：普及型強震計による高層建物の応答特性と損傷のモニタリング，構造工学論文集，Vol.56B，pp.229-236，2010
- 12) 岡田敬一，白石理人，森井雄史，佐川隆之：少数の加速度センサを用いた地震直後の建物健全性評価法—RC 造 6 層建物の大型振動台実験での検証事例—，コンクリート工学，Vol.55，No.2，pp.138-145，2017
- 13) 加藤貴司，境茂樹，仲野健一：地震後における建物の安全性・使用性判定支援のための構造ヘルスマonitoring システム，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造 II，pp.99-100，2014
- 14) Porter, K.A., J. Mitrani-Reiser, J.L. Beck, and J.Y. Ching: Smarter structures: real-time loss estimation for instrumented buildings, paper NCEE-1236. Proceedings of the 8th National Conference on Earthquake Engineering, San Francisco, Ca, 2006
- 15) Çelebi, M.: Real-Time Monitoring of Drift for occupancy Resumption, Proceedings of the 14WCEE, Beijing, China, 2008
- 16) 楠浩一，日向大樹，服部勇樹，田才晃：加速度計を用いた実構造物の性能曲線算出法に関する研究：多質点系構造物の場合，日本建築学会構造系論文集，Vol.79，No.699，pp.613-620，2014.5
- 17) 楠浩一，日向大樹，服部勇樹，古川直矢，田才晃：リアルタイム残余耐震性能判定装置の開発：その 26 鉄骨 18 層建物をを用いた振動台実験への適用，日本建築学会大会学術講演梗概集 2014，構造 II，pp.79-80，2014.9
- 18) 国土技術政策総合研究所・建築研究所：平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震被害調査報告，建築研究資料，No.136，pp.5.2-1-5.2-13，2012
- 19) 鷹野澄，伊藤貴盛，原徹夫：IT 強震計—その概念と試作—，日本地震学会大会予稿集 2004 年度秋季大会，No.P001，2004.10
- 20) 松森泰造，白井和貴，壁谷澤寿海：大型振動台による鉄筋コンクリート耐震壁フレーム構造の耐震性に関する研究—実大 6 層試験体と 3 次元振動台実験結果の概要—，日本建築学会構造系論文集，Vol.72，No.614，pp.85-90，2007
- 21) ASEBI (E-ディフェンスアーカイブ)：https://www.edgrid.jp/
- 22) 建材ダイジェスト：https://kenzai-digest.com/fashionable-design-ceiling/
- 23) 喜々津 仁密，向井 智久，加藤 博人，平出 務，長谷川 隆，柏 尚稔，谷 昌典，飯場 正紀：建築物の地震後の継続使用に関する阻害要因の分析と要求性能の検討，日本建築学会技術報告集，Vo.23，No.53，pp.331-336，2017

【筆者紹介】

日比野 陽（ひびの よう）
広島大学 大学院工学研究科 建築学専攻
准教授

