

建設技術研究開発費補助金 総合研究報告書

- (1) 課 題 名：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
- (2) 研 究 期 間：平成 30 年度
- (3) 交 付 申 請 者 名：日比野 陽（広島大学・准教授）
- (4) 研 究 代 表 者 名：日比野 陽（広島大学・准教授）
- (5) 共 同 研 究 者 名：勅使川原 正臣（名古屋大学・教授）  
五十田 博（京都大学・教授）  
椋山 健二（芝浦工業大学・教授）  
楠 浩一（東京大学・教授）  
荒木 正之（株式会社 aLab・代表取締役）
- (6) 補助金交付総額：7,984,000 円

(7) 技術研究開発の目的

構造物の被災度を判定する方法は被災度区分判定により実施することが多い。しかしながら、現行の被災度区分判定では、判定を技術者の目視に頼っているため、判定に時間を要する。また、技術者の技量により判定がばらつくことも多い。特に高層の建築物や大きな建築物、都市部の被災地域すべての建築物の被災度を判定しようとする場合、目視による判定では膨大な時間を要する。また、現行の被災度区分判定では予め建築物の性能を想定しておく必要があることや、主に構造の被害によって建築物の被災度を判定しているため、実建築物の性能が想定と異なる場合にその判定の意味がなくなってしまうこと、被災度が軽微でも非構造部材の損傷等により継続使用性が失われ建築物の使用ができず避難者が出ることもあり得る。

近年では、情報技術を活用した構造物のヘルスマモニタリングが盛んに研究されており、センサーによって遠隔から建築物の健全性や被災度を判定しようとする試みが行われている。ヘルスマモニタリングの一つとして建築物の強震観測はこれまでも実施されてきた。ただし、用いられる加速度計は地表面の地震動のように広い周波数帯域の震動を非常に正確に計測可能な極めて高価な強震計であり、高価であることが導入の課題となっている。加えて、建築物の損傷を分析する既往の研究ではいずれも建築物の性能評価として定量的でないことや簡便さに欠ける（コストがかかる、設置が容易でない、モデル化を必要とする、手間がかかる、判定に時間を要する）ことから普及と実用化には程遠い。

海外においてもヘルスマモニタリングに関する研究は多数あるが、簡便かつ定量的に耐震性能（強度や変形）を評価できるものは存在しない。また、地震を受ける地域も限られており、日本のように耐震性能の評価に対して積極的に活用しようとするものは多くない。上記で示したように、建築構造部材の損傷度に加えて、建築非構造部材の損傷度を地震後瞬時に自動的に判定することが可能になれば、正確な建築物の被災度や継続使用性の判定が可能になると考えられる。

そこで本研究では都市防災への活用を目指した建築物の瞬時耐震性能評価技術を確立するため、次の開発を行うことを目的とした。

- ①建築構造部材の損傷度把握技術の開発

- ②建築非構造部材の損傷度把握技術の開発
- ③建築物の瞬時継続使用性判定技術の開発
- ④地域内建築物の被災状況把握技術の開発

(8) 技術研究開発の内容と成果

1. 建築構造物の損傷度判定技術の開発

1.1 研究概要

本研究開発では建築物の応答周波数帯域にターゲットを絞り、かつ残余耐震性能を判定する上で必要な精度を有する安価なセンサーを建築物内に設置し、加速度計から得られるデータを元に建築物構造部材の地震時の性能と損傷度の判定を瞬時にかつ自動的に行う技術を開発する。既存の技術では判定に時間を要し、かつ人間による操作・判断が必要でありことから、判定精度が一定で無いことや、バラツキがあることが課題となっていたが、本技術開発では瞬時にかつ一定の判定基準で高精度な判定を実現する。

本研究開発では、建築物の損傷度の基準を被災度区分判定法<sup>1)</sup>に示されている「無被害」、「小破」、「中破」、「大破」、「倒壊」とすることとし、建築物の安全限界変形は耐震診断手法<sup>2)</sup>による終局の靱性指標  $F_u$  値を基に定義することとし、建築構造物の損傷度の判定技術の開発を行った。前年度までの開発において、大地震時の建築物の損傷度の判定を性能曲線によって推定できることを明らかにしており、研究による技術が十分な適用性を有していることを示した。そこで、本年度は開発した技術の精度の向上と適用範囲を検証するための実証実験を実施した。実証実験は構造形式の異なる種々の建築物に設置した加速度センサーで得られた地震時のデータにおいて、前年度までに開発した損傷度の判定技術を適用した。

本研究開発で適用性を検証した建築物は、高層建築物(免震・非免震)、高層鉄塔建築物、木質建築物であり、次節以降でそれぞれの建築物への適用性の検証結果を示す。

1.2 構造物の損傷度判定技術

本研究で前年度までに開発した技術は、建築物の残余耐震性能評価に特化しており、建築物内に複数設置した加速度センサーから得られるデータを元に、建築物構造部材の地震時の性能と損傷度の判定を瞬時にかつ自動的に行うものである。

建築物の損傷度の基準は被災度区分判定<sup>1)</sup>と同様(0~V)とし、建築物の安全限界変形は耐震診断手法<sup>2)</sup>を基に定義する。建築物の性能曲線は加速度記録から代表加速度および代表変位を算出し、図 1.1 に示すように、最大応答点までを3折れ線で近似する。最大応答点以降の応答変形のモード形は最大応答点での応答変形のモード形を保持するとして外挿する。各階の層せん断力-層間変形関係も図 1.2 に示すように外挿し、いずれかの層が最初に設定した安全限界変形に到達した時点(図中では 1F)を安全限界点とし、その時の各層の変形量を用いて安全限界点での代表変位を求める。さらに、余震に対する最大応答点は図 1.3 に示す等価線形化法を用いて算出する。最大余震に対する要求曲線は本震と同一と仮定し、モデル化により定義した降伏点(第2折れ点とし、図中の(A)点)以降は低減して求める。建築物の損傷度はモデル化した折れ線と安全限界点により図 1.4 に示すように定義する。

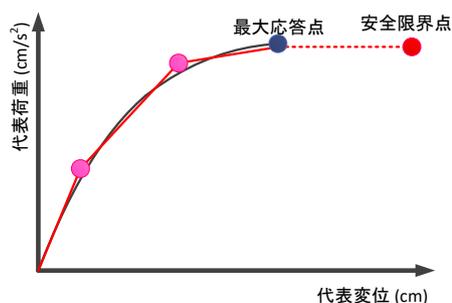


図 1.1 骨格曲線のモデル化

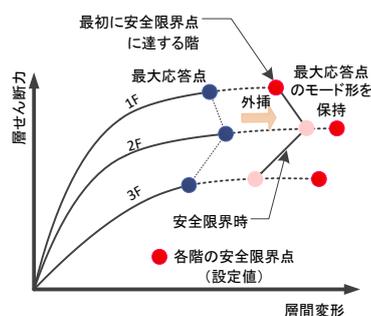


図 1.2 安全限界点の推定

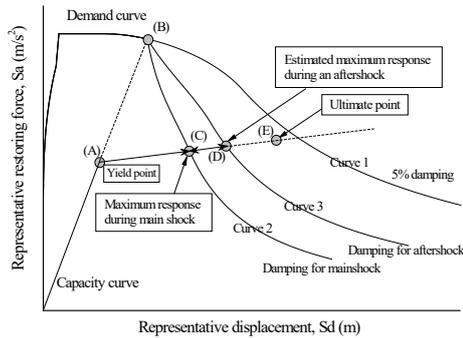


図 1.3 余震での応答点の算出

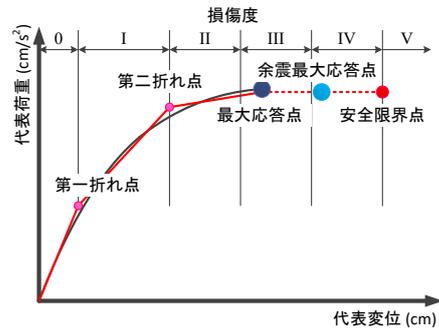


図 1.4 建築物の損傷度

### 1.3 高層建築物への適用

#### 1.3.1 免震高層集合住宅

免震高層建築物に対する損傷度判定技術の適用性を検証するため、加速度センサーを設置した免震高層集合住宅に本研究で開発したシステムを導入し、各種地震波に対する検証を行った。対象とした建築物は、東京都品川区にある免震高層集合住宅である。表 1.1 に建築物の概要を示す。

表 1.1 建築物の概要と加速度センサー設置位置

所在地	東京都品川区
建築年月	2012年8月
構造	鉄筋コンクリート構造 中間層免震（3階床梁下に免震装置「オイルダンパー、高減衰ゴム系積層ゴム支承」を設置）
建築物高さ	最高部 101.65m、軒高 96.05m
階数	地上 28 階、塔屋 1 階、地下 2 階
基礎構造	場所打ちコンクリート杭（拡底杭）
建築面積	2,258m <sup>3</sup>
延床面積	33,166m <sup>3</sup>
用途	共同住宅（3～28 階）、店舗（1～2 階）
加速度センサー	地下 2 階（免震層下）3 階、9 階、28 階

対象建築物は鉄筋コンクリート構造 28 階建てであり、基礎に免震層を有する。2016 年に加速度センサーを 10 台設置している。図 1.5 に加速度センサーの配置図を示す。加速度センサーは LAN や PLC などを使って記録サーバーと接続されており、免震層、3 階、9 階、28 階に設置されている。最下層および 28 階には建築物の隅角部に 3 台設置されており、ねじれ変形等も観測できるようになっている。加速度センサーが設置されて以降これまでに多数の地震が発生しており、加速度が計測されている。中でも、特に震度の大きかった地震波を用いて、本研究で開発した技術を適用した。観測された地震波 4 波の詳細を表 1.2 に示す。各地震波を E1～E4 とする。なお、地震波の詳細は気象庁<sup>3)</sup>より取得した。

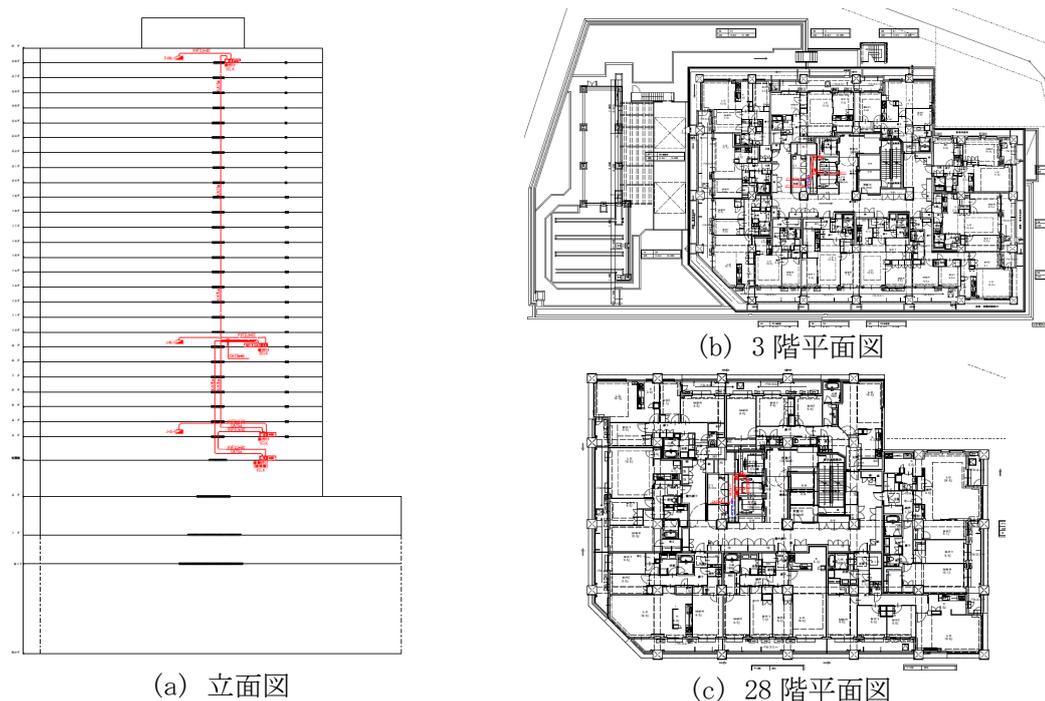


図 1.5 加速度センサーの配置図

表 1.2 地震波の詳細

記号	日付	震央地名	深さ[km]	マグニチュード	最大震度
E1	2016/05/16	茨城県南部	42	5.5	5弱
E2	2016/09/07	茨城県南部	50	4.9	4
E3	2018/01/05	茨城県沖	41	4.5	3
E4	2019/01/18	茨城県南部	54	5.3	3

対象建築物で観測された各地震波の加速度記録を図 1.6~1.9 に示す。各図とも上から NS 方向、EW 方向、UD 方向の加速度記録を示しており、各方向において、下から免震層、3 階、9 階、28 階の加速度記録である。図よりいずれの地震波においても、UD 方向の上階で加速度が増幅されていることがわかる。一方で、水平方向においては増幅が小さいことがわかる。いずれの地震波においても対象建築物の損傷はなく無被害（損傷度 0）であった。

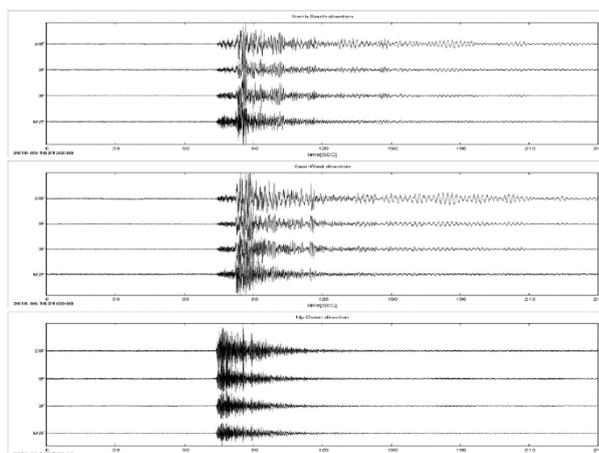


図 1.6 加速度記録（地震波 E1）

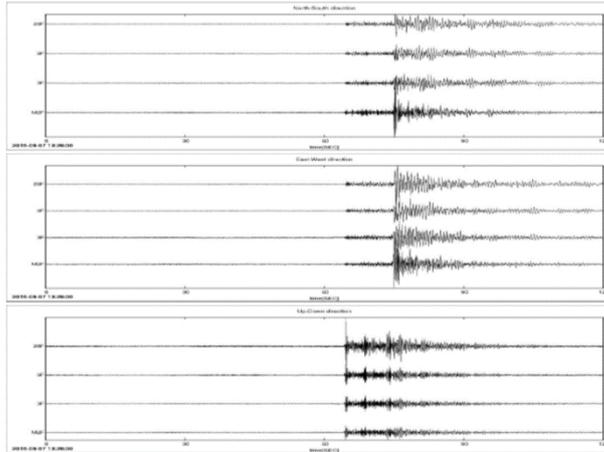


図 1.7 加速度記録 (地震波 E2)

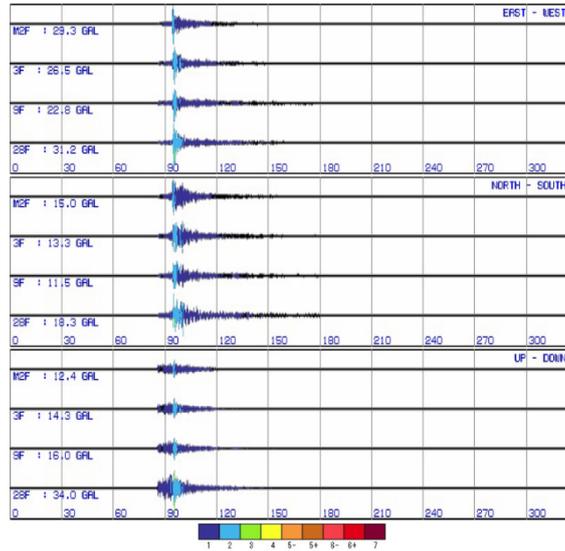


図 1.8 加速度記録 (地震波 E3)

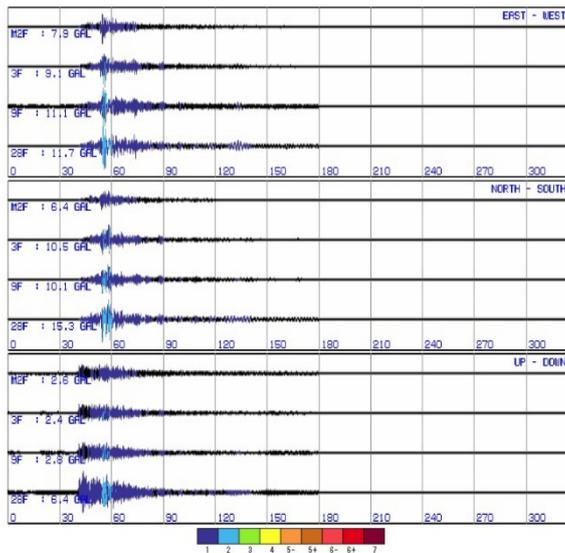
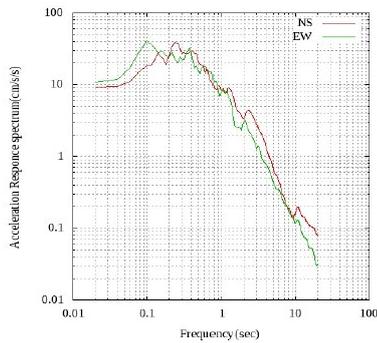


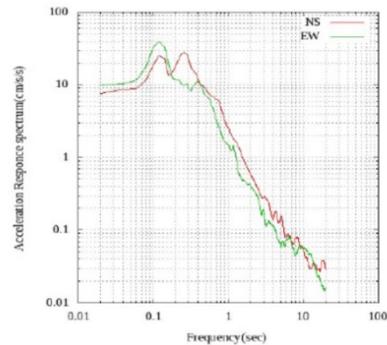
図 1.9 加速度記録 (地震波 E4)

図 1.10 に地震波 E1、E2 の加速度応答スペクトルを示す。赤線が NS 方向、緑線が EW 方向を表す。いずれも 0.1 秒～0.5 秒付近にピークがあることがわかる。

図 1.11～1.14 に各地震波における性能曲線を示す。灰色線が性能曲線であり、図 1.11 および 1.12 における青線、図 1.13、図 1.14 の黒線が性能曲線から得られた骨格曲線である。いずれの骨格曲線も正しく描けていることがわかる。また、図 1.13 および 1.14 における赤線は、骨格曲線からモデル化した折れ線である。いずれの地震波においても、弾性範囲に留まっていたことから直線で描かれており、損傷度は 0 と判定された。いずれも自動計算で得られており、開発した判定手法によって損傷度が判定できているといえる。したがって、本研究で開発した手法によって、免震高層建築物において、損傷度を自動的に判定することが可能であるといえる。



(a) 地震波 E1



(b) 地震波 E2

図 1.10 加速度応答スペクトル

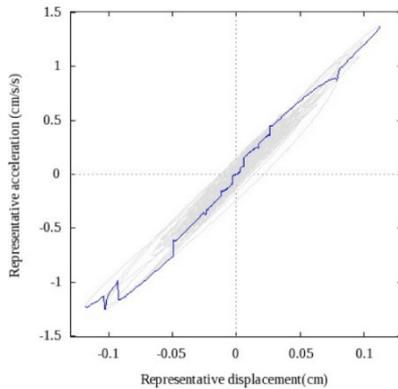


図 1.11 性能曲線 (地震波 E1)

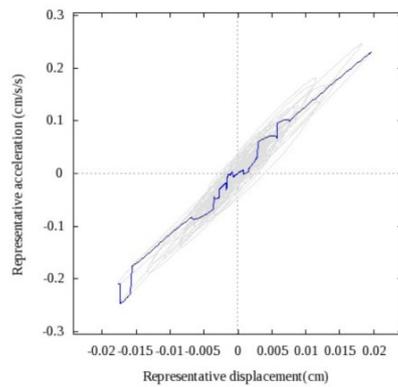


図 1.12 性能曲線 (地震波 E2)

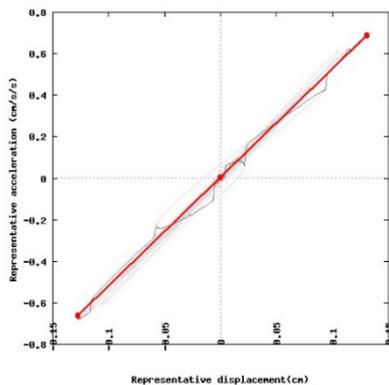


図 1.13 性能曲線 (地震波 E3)

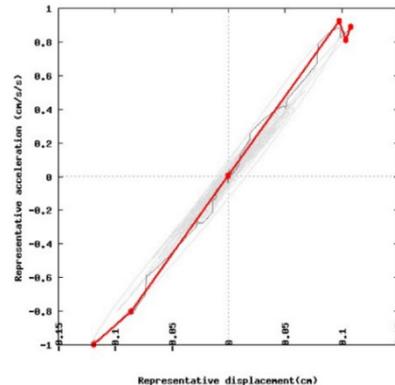


図 1.14 性能曲線 (地震波 E4)

### 1.3.2 高層集合住宅

免震高層建築物への損傷度判定の適用性検証に続いて、非免震高層建築物への適用性を検証するため、加速度センサーを設置した神奈川県川崎市の高層集合住宅にシステムを導入し、損傷度の判定を検証した。建築物の諸元を表 1.3 に、建築物の外観を写真 1.1 に、基準階の平面図を図 1.15 に示す。建築物は 30 階建ての鉄筋コンクリート造集合住宅である。建築物は 6×6 スパンの正方形の平面であり、ほぼ整形である。建築物中心にエレベーターホールのあるコア型の平面形状となっている。

表 1.3 建築物の諸元

住所	神奈川県川崎市
用途	マンション
竣工年	1987 年
建築面積	948.51m <sup>2</sup>
延床面積	24,400.17m <sup>2</sup>
基準階面積	813.13m <sup>2</sup>
階数	地上 30 階 塔屋 2 階
高さ	建築物高さ：87.95m、最高高さ：97.65m、1 階階高：4.00m 基準階階高：2.85m
基礎構造	地下連続壁＋拡底場所打ち杭
構造種別	基礎、柱、梁、床：鉄筋コンクリート、外壁：ALC 板、内壁（戸境壁）：スチールファイバーコンクリート



写真 1.1 対象建築物外観

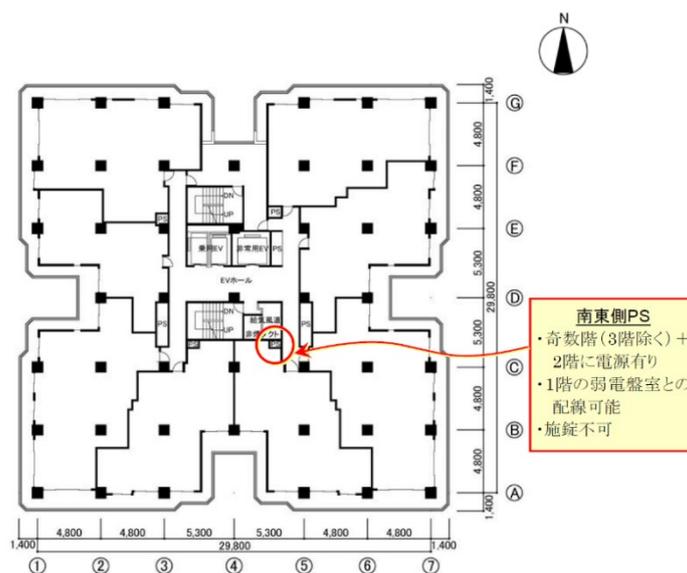


図 1.15 基準階平面図

図 1.16 に加速度センサーの設置位置およびセンサーの設置状況を示す。加速度センサーは 1, 5, 11, 15, 21, 25, 30 階に設置されており、PS を通して LAN によって接続されている。サーバーは 1 階に設置されており、インターネットと接続されている。

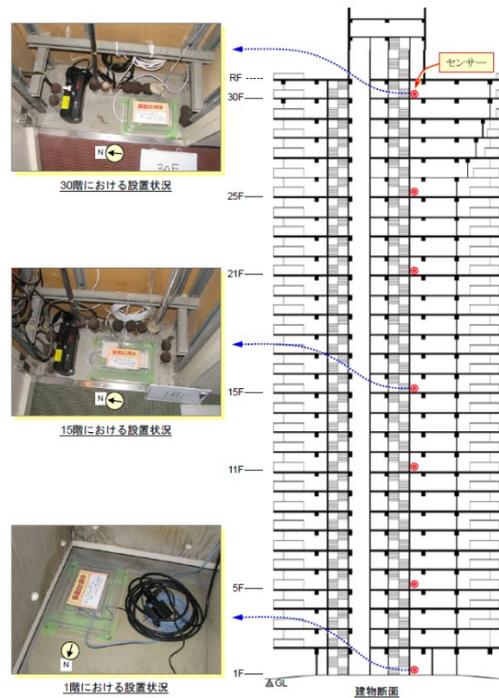


図 1.16 建築物断面におけるセンサーの設置位置と設置状況

対象建築物はこれまで多数の地震波を観測しているが、特に震度の大きかった 2 波について本研究の技術を適用して検証した。表 1.4 に地震波の詳細を示す。いずれも気象庁<sup>3)</sup>の情報を参照した。対象建築物で観測された各地震波の加速度記録を図 1.17、1.18 に示す。上から NS 方向、EW 方向、UD 方向の加速度記録を示しており、各方向において、下から 1 階、5 階、11 階、21 階、25 階、30 階の加速度記録である。図より UD 方向において、上階で加速度が増幅されていることがわかる。一方で、水平方向においては増幅が小さいことがわかる。いずれの地震波においても対象建築物の損傷はなく無被害（損傷度 0）であった。

表 1.4 地震波の詳細

記号	日付	震央地名	深さ [km]	マグニチュード	最大深度
E5	2018/01/06	東京湾	71	4.7	4
E6	2018/07/07	千葉県東方沖	57	6.0	5 弱

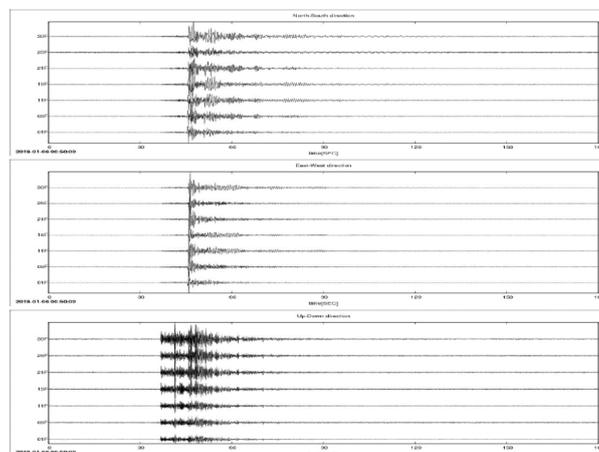


図 1.17 加速度波形（地震波 E5）

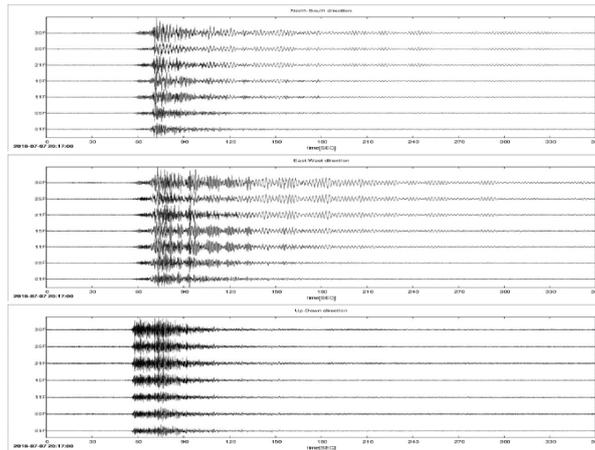
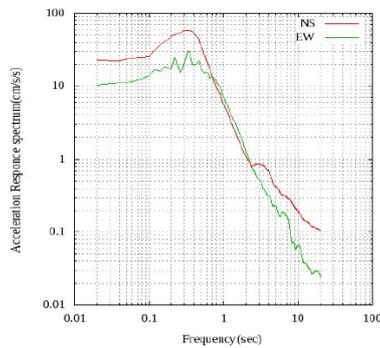
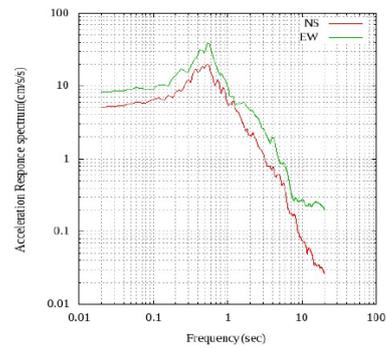


図 1.18 加速度波形 (地震波 E6)

図 1.19 に加速度応答スペクトルを示す。赤線が NS 方向、緑線が EW 方向を表す。いずれの地震波も周期 0.5 秒付近の周期が卓越していることがわかる。図 1.20、1.21 に各地震波で計算された性能曲線を示す。灰色線が性能曲線、青線が性能曲線の骨格曲線を表す。いずれも弾性範囲ではあるが、良好に骨格曲線が得られている。損傷度判定のためのモデル化は行っていないが、弾性範囲において骨格曲線が得られていることから、モデル化も可能であり、損傷度の判定が可能であると考えられる。したがって、非免震高層建築物においても本研究開発で開発した技術が適用できるといえる。



(a) 地震波 E5



(b) 地震波 E6

図 1.19 加速度応答スペクトル

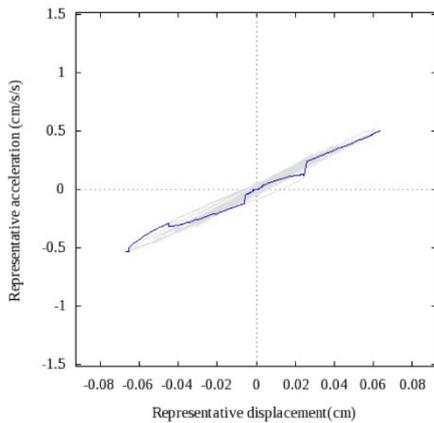


図 1.20 性能曲線 (地震波 E5)

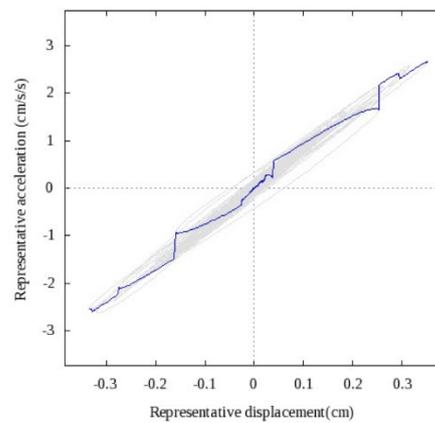


図 1.21 性能曲線 (地震波 E6)

## 1.4 塔状構造物への適用

### 1.4.1 はじめに

国土交通省中継所通信鉄塔は、日本各地に存在し、高さ 60m 程度のものもある。その形式は、シリンダー型やトラス型など多様である。例えば、シリンダー型の羽沢中継局鉄塔は、高さ 58m、シリンダーの幅は基部で 3.8m である。細長比はおよそ 15 に及ぶ。このような極めて細長い構造物においても、本研究で開発した損傷度の判定が可能であるか検証を行った。

本研究の適用性の検証は羽沢中継局および小名木中継局の 2 つの鉄塔を対象とし、すでに設置されている加速度センサーのデータを元に骨格曲線の計算が可能であるかを考察した。

### 1.4.2 計測概要

羽沢中継局は、図 1.22 に示すように高さ 58m のシリンダー型鉄塔である。この鉄塔は図に示すように、4 つの高さレベルに加速度センサーを設置している。写真 1.2 に鉄塔の全景と加速度センサー設置状況を示す。加速度センサーは、サンプリング周波数は 100Hz、分解能は 24bit、最大計測加速度は 2450gal、ノイズ $\pm 0.1\text{gal/sec}$  の 3 方向加速度計 (ITK-002 : alab 社製) である。観測は、鉄塔内に設置したサーバー (Mac Mini) で制御を行い、データの蓄積もサーバーで行っている。計測は 24 時間常時観測・保存しており、携帯電話網を用いてインターネットに接続し、外部からはインターネット経由でアクセスする。観測システムは 2015 年 1 月 8 日に設置され、以降、2016 年 2 月 4 日まで設置されていた。

小名木中継局は地上高さ 63m (地表面からは 64.1m)、総重量は 80.32ton のシリンダー型鉄塔である。加速度センサー (ioLAM-01) を鉄塔基部、頂部、および中間部の 3 点にそれぞれ一台ずつ設置している。写真 1.3 に鉄塔の外観を、写真 1.4 に設置した加速度センサーを示す。解析により求めた周期は基礎固定ばねで 2.83sec、柱脚のロックングと基礎・杭のスウェーばねを考慮したモデルで 3.00sec であり、超高層建築物に匹敵する。



写真 1.2 羽沢中継局鉄塔の全景と加速度センサー設置状況

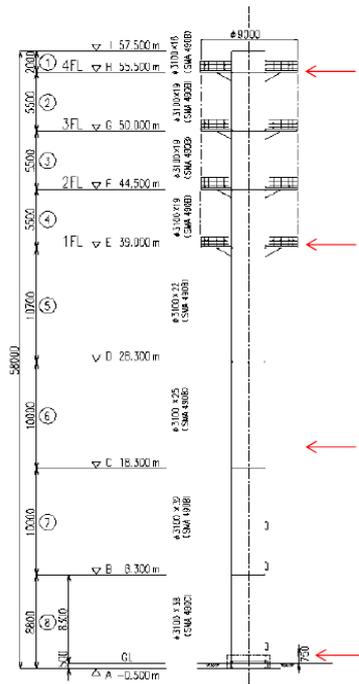


図 1.22 羽沢中継局の構造詳細



写真 1.3 小名木中継局の全景

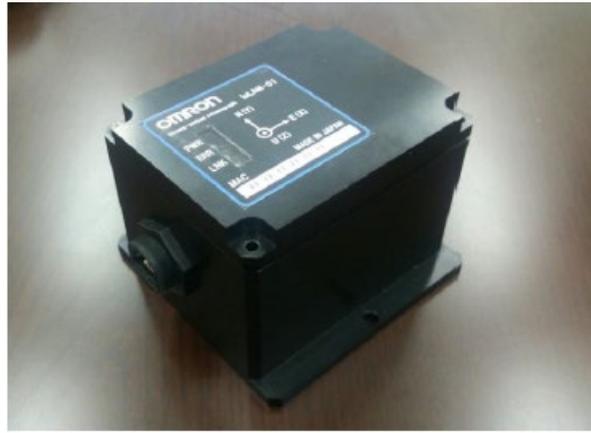


写真 1.4 加速度センサー (ioLAM-01)

### 1.4.3 観測記録

#### ・羽沢中継局

計測された 26 地震波の計測震度相当値、およびフィッティングで得られた卓越振動数(F)、減衰定数、卓越振動数の誤差 (F 誤差)、および減衰定数の誤差を表 1.5 に示す。ここで、フィッティングとは、卓越振動数を推定するために用いた手法であり、伝達関数の理論式と計測した伝達関数が一致する条件から、卓越振動数と減衰定数を推定するものである。

1 自由度系での伝達関数の理論式は、式(1.1)のようになる。ここで、固有周波数  $F_1$ 、周波数  $x$  である。

$$F(x) = \frac{1+4\zeta^2\left(\frac{x}{F_1}\right)^2}{\sqrt{\left\{1-\left(\frac{x}{F_1}\right)^2\right\}^2+4\zeta^2\left(\frac{x}{F_1}\right)^2}} \quad (1.1)$$

実際に加速度応答倍率が最大となる点は式(1.1)の微分形が 0 となる点であり、 $\frac{\omega}{\omega} =$

$\sqrt{\frac{2}{1+\sqrt{1+8h^2}}} \approx 1$ である。ここで、 $\omega$ ：調和外力の各振動数、 $\bar{\omega}$ ：系の固有各振動数である。

多質点系における伝達関数を用いた卓越振動数・減衰の推定については、FFTを用いた実測データによる伝達関数は、多質点系に対応したものとなる。つまり、観測波のFFTによる伝達関数には既に多質点系による影響が含まれている。

それに対して、式(1.1)による伝達関数の理論式には多質点系による影響は含まれていない。しかし、実際の建築物は多層にわたることが多く、得られたデータの伝達関数を見ても分かるとおり、高次の周波数が存在する。N次までの調和振動を考えた場合、伝達関数の理論式は、次式のようになる。この式を用いてフィッティングを試みた。

$$\left| \frac{\ddot{x}+\dot{y}}{\dot{y}} \right| = \{f(x)_i\} = \left[ \sum_{s=1}^N s u_i s \beta \sqrt{\frac{1+4 s^{\dot{h}} \left(\frac{x}{F_s}\right)^2}{\left\{1-\left(\frac{x}{F_s}\right)^2\right\}^2+4 s^{\dot{h}} \left(\frac{x}{F_s}\right)^2}} \right]_i \quad (1.2)$$

フィッティングには非線形最小 2 乗近似法である Levenberg-Marquardt 法を用いた。この方法で、式(1.2)に表した、F、h、 $u_\beta$ を推定した。この際、各方向の卓越モードは1次モードのみに注目し、その他のモードは無視した。つまり、高次モードのすそ野部分の影響は考慮していない。フィッティングは、鉄塔の対称性を考慮して、EW 方向のみとした。フィッティングを行う周波数領域は0~2Hzとした。しかし、Levenberg-Marquardt 法では収束域がそれほど広くなく、そのため、各初期値を適切に仮定しなければならない。そこで、各パラメータの初期値は事前の解析結果などを参考に卓越振動数は、1.0Hz、減衰定数は5%とした。

表 1.5 より、計測震度相当値で3を上回るものが3波、4を上回るものが1波あった。卓越振動数の推移を図 1.23 に、計測震度相当値と卓越振動数の関係を図 1.24 に示す。卓越振動数はおよそ 0.56~0.66Hz 程度にばらついている。計測震度相当値が大きいほど、卓越振動数が高くなっていることが分かる。これは、計測震度相当値の小さな地震波では、相対的に誤差の影響が大きくなっていることが一因と考えられる。

図 1.25 に減衰定数の推移を示す。減衰定数はフィッティングによる誤差が多く、5%~10%程度にばらついており、一部 20%に近いものもある。しかし、データのほとんどは、5%弱のグループと 9%前後のグループに二分される。図 1.26 に計測震度相当値と減衰定数の関係を示す。計測震度相当値が小さいと、推定された減衰定数が大きくばらついていることが分かる。計測震度相当値 3 以上を見ると、観測数は少ないものの、減衰定数は2~4%程度と推察される。

表 1.5 観測された地震の計測振動相当値と卓越振動数および減衰定数

番号	日付	時間	計測震度相当値	F	減衰定数 h	F 誤差	減衰誤差
1	2015/1/30	20:32:18	1.21	0.61018	0.0457	0.00132	0.00217
2	2015/2/7	15:19:31	1.43	0.56838	0.08629	0.00329	0.00587
3	2015/2/17	8:09:26	0.97	0.62269	0.04563	0.00141	0.00228
4	2015/2/23	17:00:34	2.33	0.55795	0.09113	0.00385	0.007
5	2015/3/23	21:40:57	0.91	0.59338	0.07269	0.00417	0.0071
6	2015/3/24	13:54:01	1.11	0.5617	0.10331	0.00343	0.0062
7	2015/5/3	15:54:28	1.4	0.61591	0.04144	0.000968	0.00158
8	2015/5/3	23:31:02	1.47	0.54383	0.07484	0.00245	0.00455
9	2015/5/8	16:51:29	1.33	0.6267	0.03935	0.00113	0.00179
10	2015/5/13	6:14:49	2.05	0.62723	0.04026	0.00138	0.00222
11	2015/5/25	14:28:27	3.56	0.6226	0.04592	0.00122	0.00196
12	2015/5/30	1:07:14	1.79	0.61513	0.05711	0.00138	0.00226
13	2015/5/30	20:25:04	3.49	0.65713	0.01956	0.000465	0.000707
14	2015/5/30	20:29:27	0.84	0.61763	0.03947	0.00119	0.00192
15	2015/5/30	20:29:52	0.75	0.59883	0.09666	0.00553	0.00937
16	2015/5/31	3:51:42	0.98	0.5767	0.08214	0.00321	0.00558
17	2015/6/9	5:44:40	1.14	0.54128	0.0694	0.00319	0.00595
18	2015/6/18	8:40:08	1.33	0.62742	0.19372	0.00734	0.01208
19	2015/7/10	1:15:41	1.37	0.55221	0.08316	0.00345	0.00633
20	2015/9/8	20:23:20	0.91	0.57126	0.08038	0.00329	0.00578
21	2015/9/12	5:49:17	4.05	0.60096	0.0448	0.00153	0.00254
22	2015/10/21	15:05:54	1.4	0.57809	0.126	0.00258	0.00454
23	2015/10/24	13:14:22	1.68	0.62286	0.04664	0.00117	0.00187
24	2015/10/25	17:15:46	2.01	0.54619	0.0849	0.00339	0.00629
25	2015/12/26	23:21:06	1.63	0.56585	0.10032	0.0039	0.007
26	2016/1/18	9:57:28	1.29	0.61655	0.0773	0.00154	0.0025

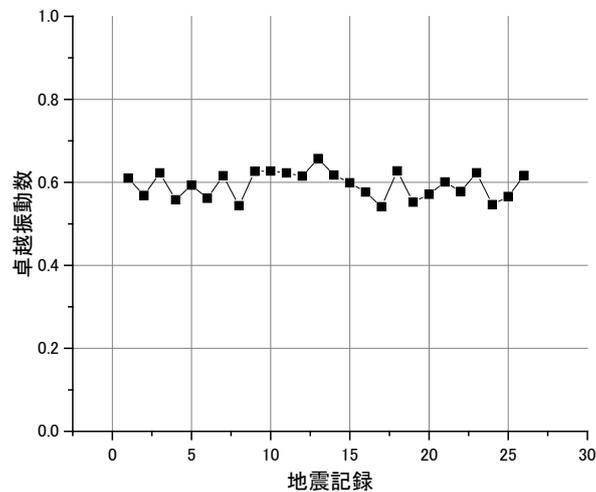


図 1.23 卓越振動数の推移

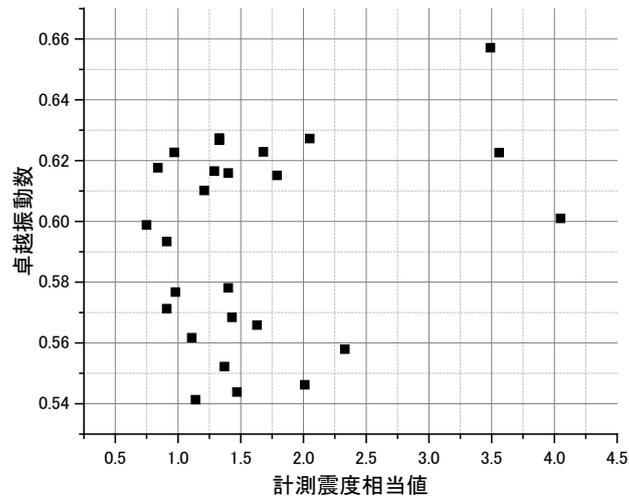


図 1.24 計測震度相当値と卓越振動数の関係

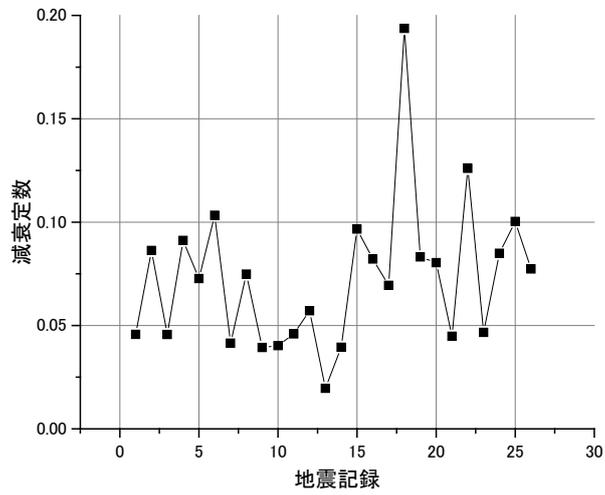


図 1.25 減衰定数の推移

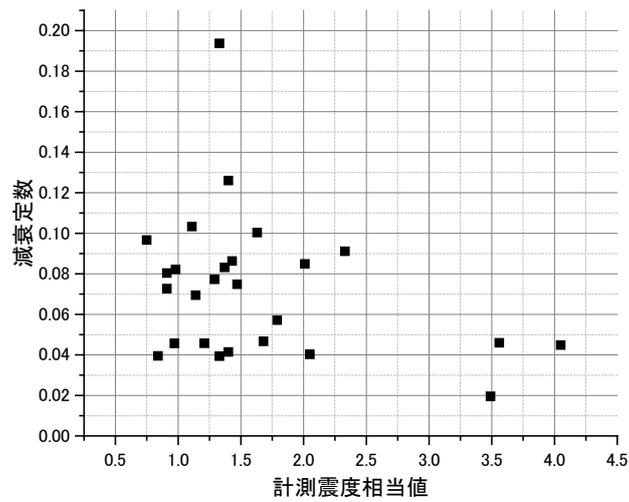


図 1.26 計測震度相当値と減衰定数の関係

・小名木中継局

計測された最大 (Max)、最小 (Min)、および絶対値での最大地動加速度 (最大値) の一覧を表 1.6 に示す。計測された最大の地震は地震 (No. 6、EW -37.8gal、NS -23.7 gal) である。この時の東京都江戸川区の震度は 3 であった。計測記録のうち、No. 1、No. 6、および No. 12 の EW 方向および NS 方向の伝達関数をそれぞれ、図 1.27 および図 1.28 に示す。いずれの方向においても卓越振動数は地震動によらずほぼ一定であり、0.40Hz (2.50sec) であった。铁塔基部からの伝達関数であるため、比較対象は基礎固定ばねでの解析結果(2.83sec) であるが、比較的良好に対応していると言える。

表 1.6 計測された PGA 一覧

地震		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
EW	Max	0.44	3.01	6.34	1.42	2.11	16.44	3.70	2.61	2.46	1.46	2.04	1.82
	Min	-0.45	-2.48	-7.90	-1.75	-2.37	-37.80	-2.98	-2.51	-2.54	-1.39	-1.70	-1.32
	最大値	0.45	3.01	7.90	1.75	2.37	37.80	3.70	2.61	2.54	1.46	2.04	1.82
NS	Max	0.67	2.33	9.28	2.33	2.93	19.52	6.86	2.60	2.81	2.21	2.45	1.34
	Min	-0.71	-3.60	-9.53	-2.29	-2.06	-23.70	-4.62	-2.64	-2.16	-2.38	-2.55	-1.36
	最大値	0.71	3.60	9.53	2.33	2.93	23.70	6.86	2.64	2.81	2.38	2.55	1.36

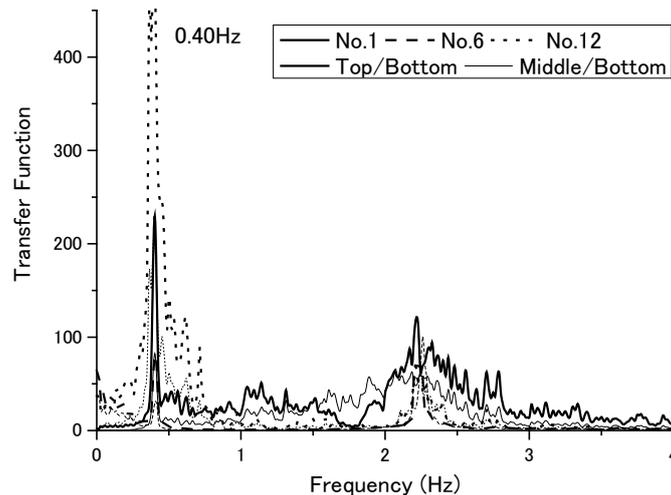


図 1.27 伝達関数 (EW 方向)

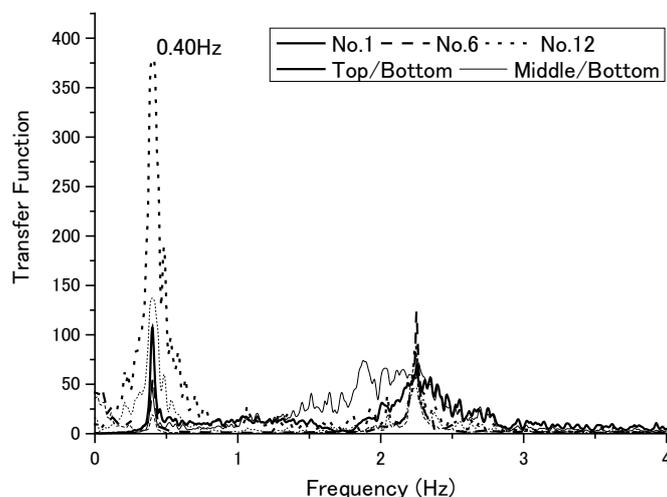


図 1.28 伝達関数 (NS 方向)

#### 1.4.4 性能曲線

図 1.29～1.32 に算出した性能曲線の骨格曲線を示す。Wavelet 変換の Nyquist 周波数と鉄塔の卓越周期を考慮して主要成分の抽出を行った。図から、鉄塔は弾性範囲にあること、およびその傾きは卓越振動数  $F$  に対応する角振動数  $\omega (=2\pi f)$  を用いた  $\omega^2$  と概ね一致することが分かる（羽沢中継局では 0.56～0.66Hz、小名木中継局では、0.4Hz）。本研究では開発した損傷度判定技術を高層鉄塔に適用し、その精度について検証を行った結果、いずれも弾性範囲ではあったものの、性能曲線および骨格曲線を得られたことから、本研究の損傷度の判定に用いるモデル化も可能であり、損傷度の判定が可能であるといえる。

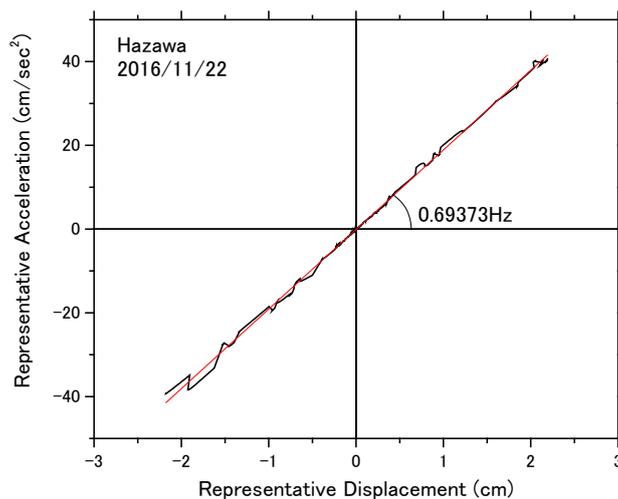


図 1.29 性能曲線（羽沢中継局：2016 年 11 月 22 日）

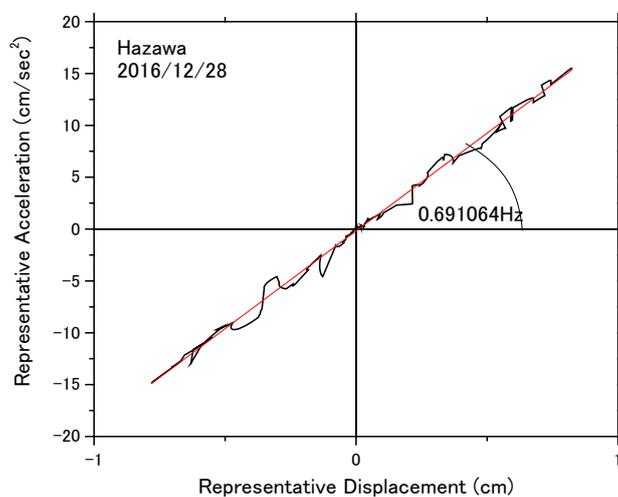


図 1.30 性能曲線（羽沢中継局：2016 年 12 月 28 日）

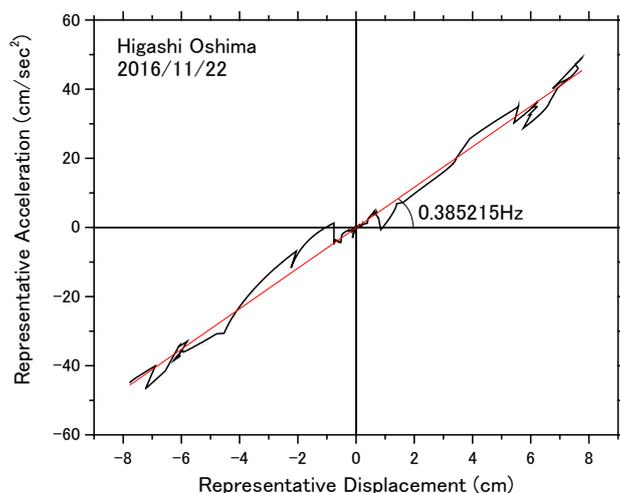


図 1.31 性能曲線（小名木中継局：2016年11月22日）

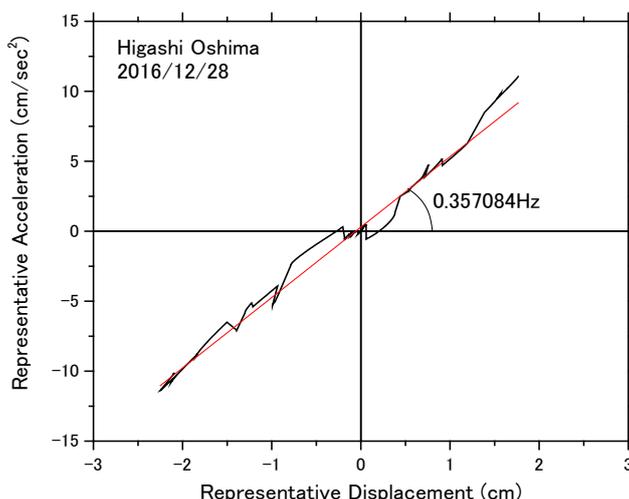


図 1.32 性能曲線（小名木中継局：2016年12月28日）

### 1.5 木質建築物への適用

木質建築物における加速度センサーを用いた応答性能把握の適用性を木質建築物の振動台実験によって検討した。

#### ・試験体概要

図 1.33 に試験体全景、表 1.7 に試験体概要、図 1.34 に 2 階平面図と軸組図を示す。本試験体は CLT コア及び在来軸組によって構成される 2 層実大架構であり、地震時に受ける水平力は中央の CLT 壁パネルが負担する。

本実験では、1 階中央 CLT 耐震壁脚部における基礎鉄骨架台との接合に用いた引張接合金物を 2 個使いとした仕様（以下、2 本仕様）、内側のナットを緩め、外側の 1 本のみが軸力を負担する仕様（以下、1 本仕様）、両側のナットを緩め、引張接合金物による壁のモーメント抵抗性能をなくした仕様（以下、ボルトなし仕様）の 3 種類の仕様を用いた。

本試験体は建築基準法に準拠した構造計算を行い、保有する設計性能を確認した。構造計算ルートは、平成 28 年国交告第 611 号第八に準拠した CLT パネル工法による保有水平耐力計算（ルート 3）とし、CLT 設計施工マニュアルに準拠した解析モデルで構造計算を行った。本試験体の荷重は過去実験を参考に敷鉄板等の錘により調整し、加振による錘の滑りを防止するため、木材やボルトを用いて CLT 床パネルに固定した。また、本実験の応答に影響を与えない範囲で倒壊防止フレームやワイヤーロープ等により安全対策を施した。

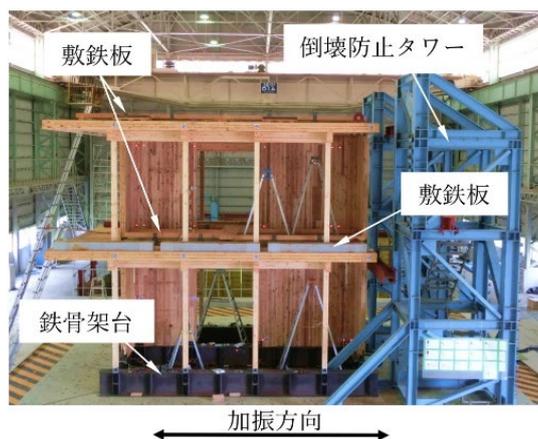


図 1.33 試験体全景

表 1.7 試験体概要

階数	2	屋根・床	杉 Mx60-5-7 t=210mm
階高	3m	壁・垂壁	杉 Mx60-5-5 t=120mm
最高高さ	6.588m	柱	欧州アカマツ E95-F315 120mm 角
平面形状	7.56m×5.60m	梁	欧州アカマツ E105-F300 120×240
延べ床面積	84.672 m <sup>2</sup>	引張金物	M20 (SNR400B)

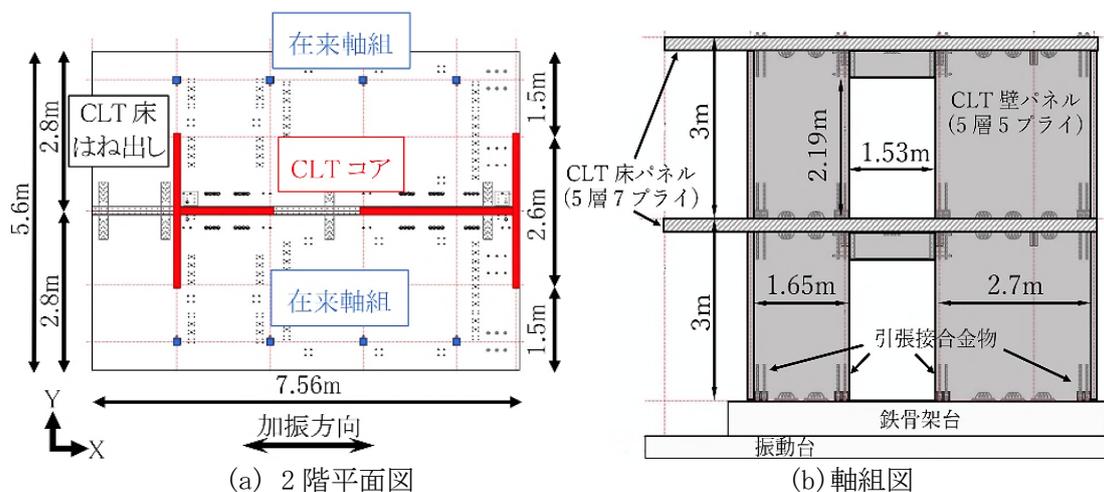


図 1.34 試験体の詳細図面

・計測計画および入力地震波

各階床レベル・錘の加速度、各階層間変形、各階床レベルの相対水平変位、2階中央壁-床接合部の相対鉛直変位、1階壁-基礎接合部の変位及び軸力を計測するため、加速度センサー、変位計、ロードセルを適宜設置した。図 1.35～1.37 に加速度センサーの配置図を示す。また、本実験で使用した主要な入力波形一覧を表 1.8 に示す。実験ではこれに加え順次ステップ波及びランダム波を入力し試験体の振動特性を把握した。

BSL 波は限界耐力計算告示による第 2 種地盤の加速度増幅率に基づく加速度応答スペクトルに適合するように作成された人工地震動である。BSL の入力倍率は既往の実験と同じものを使用した。前回の試験体の階数が 3 であったことから限界耐力計算告示第 4 に規定さ

れる係数  $p$  を考慮し、稀地震時相当として 18%、極稀地震時相当として 90%、その 1.5 倍の 135% に設定した。JMA 神戸波については 1995 年兵庫県南部地震で観測された地震波の NS 方向のみを入力した。

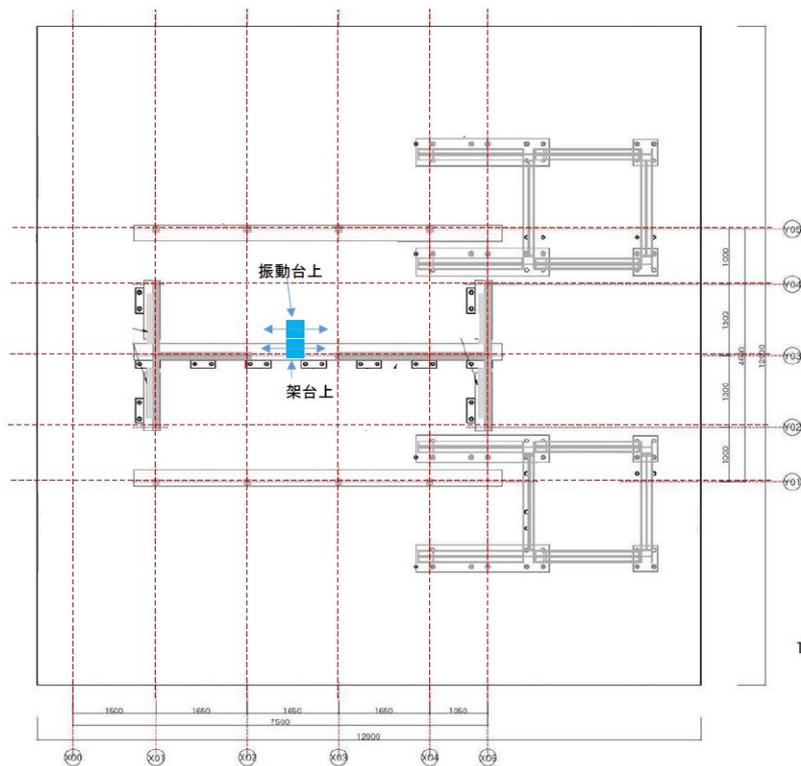


図 1.35 加速度計配置図(1階)

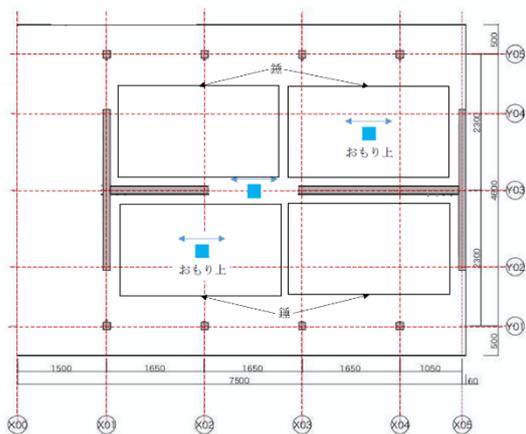


図 1.36 加速度計配置図(2階)

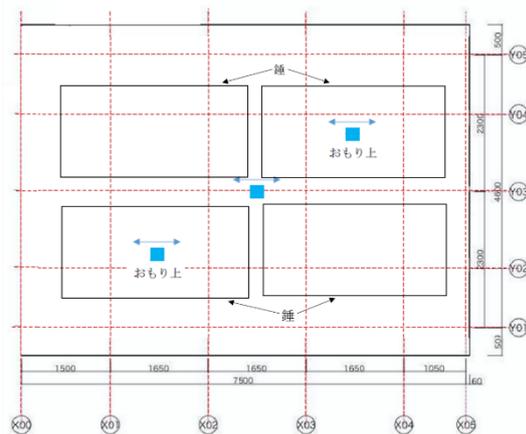


図 1.37 加速度計配置図(R階)

表 1.8 主要入力波形一覧

入力地震波	最大 加速度 (gal)	試験体			備考
		2本 仕様	1本 仕様	ボルト無し 仕様	
BSL(18%)	91	○	○	○	告示波(稀)
BSL(90%)	455	○	○	○	告示波(極稀)
BSL(135%)	682	○	○	○	告示波(極稀の1.5倍)
JMA 神戸 NS(70%)	572	○	×	×	兵庫県南部地震 1995年(0.7倍)
JMA 神戸 NS(100%)	818	○	○	×	兵庫県南部地震 1995年
JMA 神戸 NS(110%)	899	×	○	×	兵庫県南部地震 1995年(1.1倍)

\*○…入力した地震波、×…入力しなかった地震波

加速度記録を2階積分して求めた層間変位の精度を図1.38~1.41に示す。変位計で対角計測した層間変位を実測値とし、解析によって求めた層間変位と比較した。図より、地震の規模に問わず、変形を追跡できていることが確認できる。また図1.41のように、変位計計測で永久変位の発生等による基線ずれが生じ得るが、加速度記録を用いた解析では、そのような場合においても変形を追跡が可能である(一方で、永久変位の追跡の実現も一つの課題である)。また、図1.41ではロッキング挙動により、解析値が過大となっている。このような場合には、解析値からロッキングの影響を取り除く必要がある。

いずれの変位も加速度から得られた解析値と概ね一致しており、木質建築物においても性能曲線の推定が可能であると推察される。性能曲線からモデル化が可能になることから、本研究の技術によって、木質建築物の損傷度の判定も可能になるといえる。

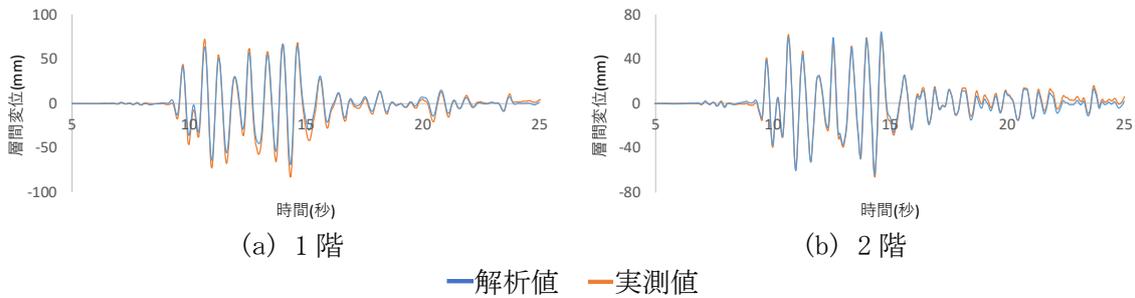


図 1.38 113-JMA 神戸 100%入力時

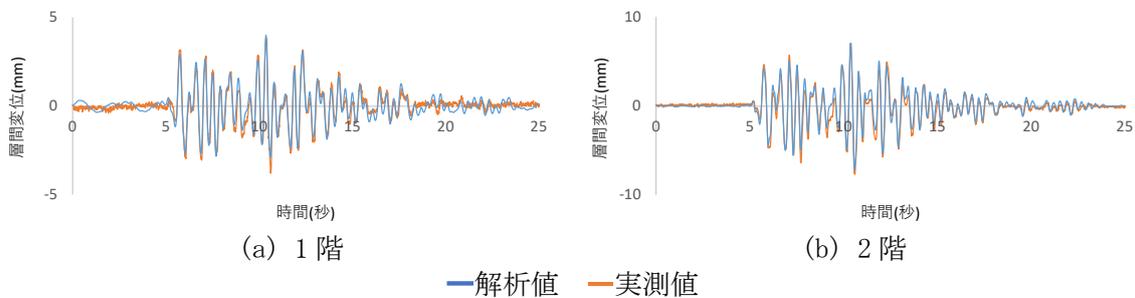


図 1.39 204-BSL18%入力時

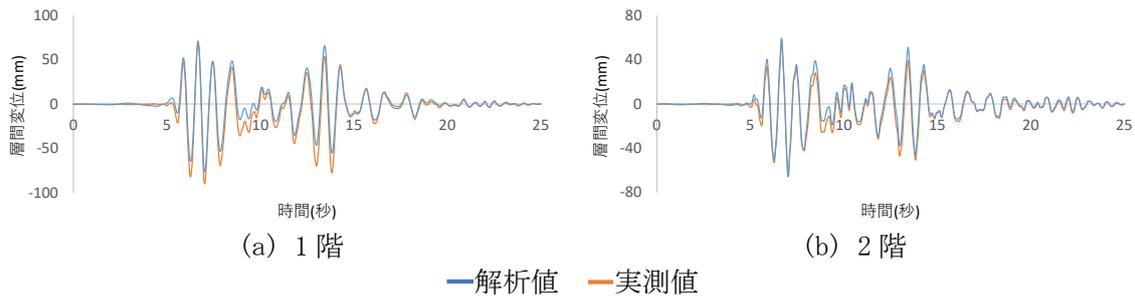


図 1.40 211-BSL90%入力時

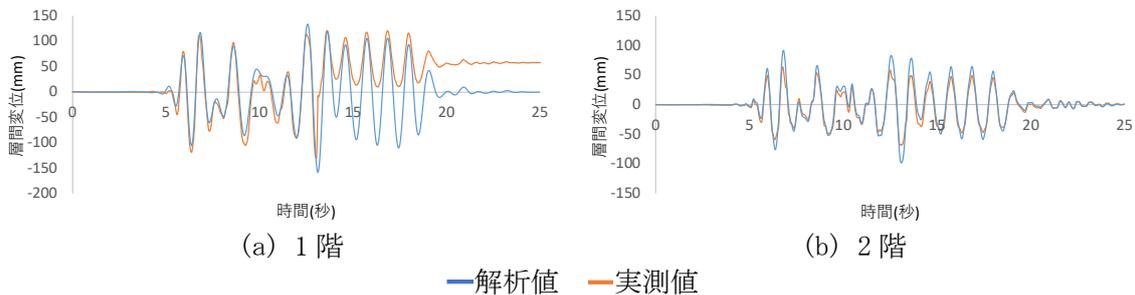


図 1.41 308-BSL135% (柱脚ボルト無し) 入力時

## 1.6 まとめ

免震高層建築物、非免震構造建築物、塔状構造物、木質建築物に対して、本研究で開発を行った構造物の損傷度判定技術を適用した。免震高層建築物において損傷度の判定も行った結果、実際の状況（無被害）と一致する判定結果が得られた。いずれにおいても性能曲線とその骨格曲線を自動で計算することが可能であった。本研究で開発した損傷度判定技術の適用性が検証されたが、建築物の回転変形や地盤の影響など、地震動レベルに依存することも考えられるため、他の構造形式を含めて、今後さらに検証していく必要がある。

## 2. 建築非構造部材の損傷度把握技術の開発

### 2.1 概要

本研究開発では、建築物内に設置した安価な CCD カメラにより、天井材や窓枠等の非構造部材の損傷を検知する技術の開発を行った。

地震発生時には、建築物の倒壊や中間階の圧壊等の被害が懸念され、早急に当該建築物の安全を確認した上で、建築物内での待機・建築物からの退避を判断する必要がある。本来、応急危険度判定士など建築の専門家による判定が必要であるが、大規模地震のように被害が広範囲に渡る災害発生時には専門家が短時間に全ての被害の状況を判断することが困難なため、緊急かつ応急的に建築物の被害状況を判断する方策の検討が求められてきた。地震時の非構造部材の損傷は、構造部材と異なり、加速度センサーによって計測された加速度により検知することが困難であり、目視か他のセンサーを用いる必要がある。これは、損傷のパターンが一定でないことにも起因する。

そこで本研究では、昨年度の研究において、非構造部材の損傷を検知する技術として、株式会社 Spectee のディープラーニングを用いた画像解析技術の適用を試みた。検知対象は天井材とし、学習素材を使用して判定を行った。無被害や天井材のずれは良好に判定できたものの、天井の色や模様、梁の有無など、学習素材と異なる天井については素材不足のため正確な判定ができなかった。精度向上のため、より多くの学習素材を収集して学習させることも考えられたが、本年度は、他の画像解析技術を適用した天井材の損傷の検知技術の開発を行った。

## 2.2 画像解析技術

### 2.2.1 背景

現在、様々な場所に防犯カメラが設置され、事件や事故の予防、状況確認などの目的で利用されている。非構造部材の損傷をカメラによって撮影された画像を元に検知するシステムを開発するにあたり、一から新しい仕組みを構築するよりも、こうした既設のカメラの映像を利用することで早期の普及につながると考えられる。

そこで、本研究では防犯カメラのような決められた条件に基づいて設置されたカメラの画像を想定して、事象（地震等）の前後の差分を検証することで実際の災害時の天井材の損傷の程度を自動で検知する技術を検討した。画像解析には Spectee 社が有する AI による画像認識技術を応用する。Spectee 社の技術はインターネット上の画像を解析してニュース速報に活用する技術として、報道機関において採用されている。

### 2.2.2 地震被害の検知手法について

大地震が発生し建築物が被災した場合、外観上大きな損傷が無くても天井部材などの非構造物の損傷が激しい場合、建築物内に侵入することは大変危険である。行政は被災した多くの建築物の被災度合を早期に検証して分類を行い、被災度合が大きな建造物には人が立ち入らないようするといった処置を行わなければならないが、一つ一つの建造物を人の手で確認していくのは膨大な時間を要する。しかしながら、例えば、被害の大きさを大まかにでも早期に知り、被害が比較的大きな建築物だけを人の手で確認しに行くことができれば効率的であり、そのような判定をリモートで行うことができれば迅速な被害判定に非常に有効である。

本実験では、上記の問題解決を目指し、なるべく迅速に天井被害を検知する目的のため、天井の映像を監視し、被害発生時にその前後の映像（画像）の差分量を数値化することで被害を判定する手段に活用することを目指し、その方法について検討を行った。

図 2.1 は、天井の被災状況をシミュレーションしたイメージ（加工画像）である。一般的には、地震を受けた建築物の天井は壁などと接している比較的大きな力がかかりやすい部分や、空調など重量物が吊るされている部分などが損傷し、その後損傷が広がり、最終的に天井全体の崩落などへ繋がっていくような、段階を経た損傷が生じると考えられる。そこで本研究では、損傷の初期の段階か後期の段階（危険）かを判定することを目指した。図 2.1 は①の状態から②の状態、③の状態へと変化する過程であり、①の状態を元の状態とすると、徐々に画面の変化が大きくなっていく。この状況（映像、画像）の差分量と被災量とは関連性があると推察できる。そこで、上記の推察から、様々な被災状況について、その被災前と被災後との画像の変異を数値化することを検討した。



図 2.1 地震による天井被害のイメージ（例）

### 2.2.3 差分画像の抽出と数値化

本研究では、天井を撮影する監視カメラの映像をトリガ信号をきっかけにその時点の映像フレームを画像として保存し、前回のトリガ信号のタイミングにおける取得画像と比較するシステムを考えた。各画像は画素の集合として構成され、それぞれの画素の輝度値が変化した部分を求め、この輝度値が変化した画素を1、変化のなかった画素を0とした2値の画像として保存した例が図2.2である。画像Aと画像Bの画素の差分値を次式で求める。

$$\Delta(x, y) = |A(x, y) - B(x, y)| \quad (2.1)$$

$\Delta(x, y)$ を二値化したものが差分画像となる。この差分画像を利用することにより、地震前後の差分量を求めることができる。

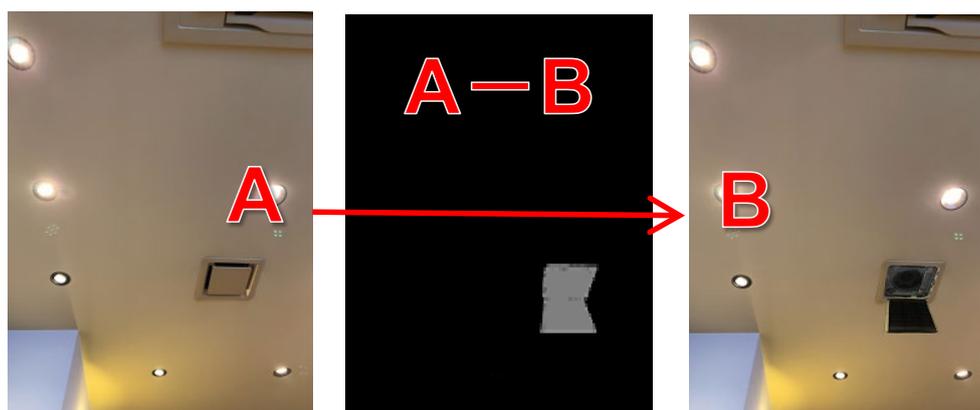


図 2.2 輝度の差分をプロットしたイメージ (例)

前述の差分画像は、「同じ部分」と「異なる部分」を1画素1ビットで表現した2値の画像であり、「地震被害規模の大小」の判定材料とするために、画像中の「異なる部分」を取り出して、数値化する必要がある。異なる部分の画素  $a_i$  のそれぞれに対して、閾値 (threshold) に対して大きいか小さいかで次式で判定した。

$$a_i = \begin{cases} 1 & (\Delta(x, y) \geq \text{threshold}) \\ 0 & (\Delta(x, y) < \text{threshold}) \end{cases} \quad (2.2)$$

誤差率として、求めた画素  $a_i$  を用いて画像の差分率を百分率として次式で求める。

$$\frac{\sum a_i}{a_{ALL}} \times 100 \quad (2.3)$$

ここに、 $a_{ALL}$  : 元の画像の画素数

実験として、短時間に撮影した複数画像の差分を利用するため、上記差分判定の閾値は0かそれ以外 (全く同じ輝度値か、そうでないか) で判定することにしたが、窓からの採光の変化などで被害はゼロでも差分が出ることも考えられるため、今後の閾値の設定のための検証が必要である。

## 2.3 判定実験

### 2.3.1 実験準備

実験を行うにあたり、本来であれば実際の地震で破損した天井の画像を活用できれば理想である。しかしながら、地震被害にあった (被災後の) 画像や、被害前の (通常の) 天井の画像は手に入るものの、地震被害の前後の判定に用いる同じ場所における地震前後の画像を収集することは困難である。そこで本研究では、実験のため被災前後の画像を実際の地震被害を想定したサンプル画像として作成し、実験用の素材とした。

図 2.3 に実験の処理フローを記載する。

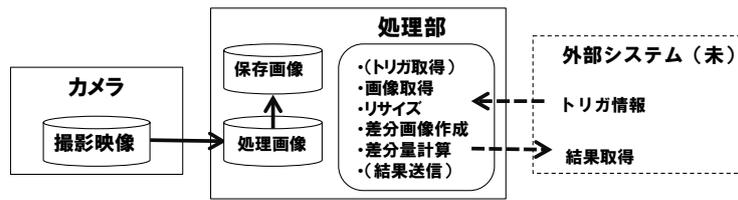


図 2.3 処理の流れ

処理フローは、以下のような流れである。

- (1) 地震被害の前後を想定した、比較対象 2 枚の画像を読み込む。
- (2) リサイズする。
- (3) 画像の差分を計算する。
- (4) 画像のヒストグラムを計算する。(差分画像は差異がない部分は黒色、差異がある部分は灰色となる。)
- (5) 画像全体の画素数と、差異がある灰色部分のヒストグラムから、差分量を計算する。

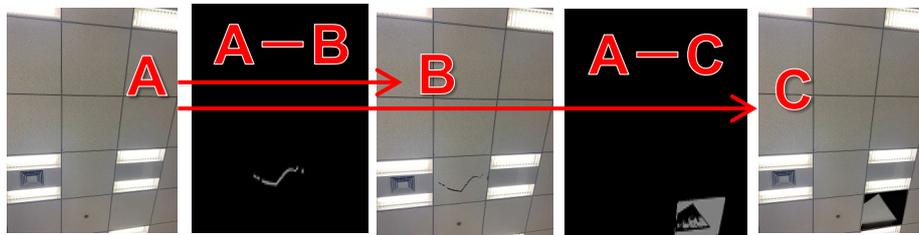
### 2.3.2 判定作業

判定を行う素材として、以下のような特徴的な画像パターンを用意し、差分画像を調査した。判定は損傷の大きさに応じて A から B、A から C について検証を行った。

- ① 一般的なオフィス天井のひび割れ、パネルずれ
- ② 一般的なオフィス天井のひび割れ、パネル落下
- ③ 一般的なオフィス天井の空調パネル外れ、空調落下
- ④ 一般的なオフィス天井の空調外れかけ、空調落下
- ⑤ 家庭の天井のパネル破損
- ⑥ 時計の映り込み
- ⑦ 時計の映り込みと蛍光灯の消灯

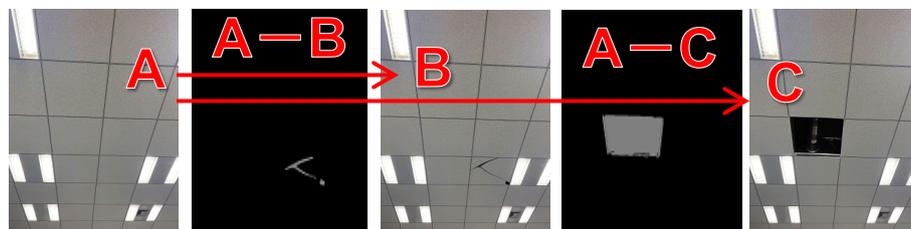
各画像の判定結果を以下に示す。

- ① 一般的なオフィス天井のひび割れ、パネルずれ



(結果) ひび割れ、パネルのずれに対して、差分を検知した。

- ② 一般的なオフィス天井のひび割れ、パネル落下



(結果) ひび割れ、および落下したパネル部分について、差分を検知した。

③ 一般的なオフィス天井の空調パネル外れ、空調落下



(結果) パネル外れ、および空調の落下部分について、差分を検知した。

④ 一般的なオフィス天井の空調外れかけ、空調落下



(結果) 空調の位置ずれ、空調の落下部分の差分を検知した。

⑤ 家庭の天井のパネル破損



(結果) パネルの破損部分の差分を検知した。

⑥ 時計の映り込み



(結果) 時計の針の進行について、差分を検知した。

⑦ 時計の映り込みと蛍光灯の消灯



(結果) 時計の針の進行、蛍光灯の消灯に対して、差分を検知した。

以上の実験から、想定した画像の差分を得ることができたといえる。

2.3.3 差分画像の数値化

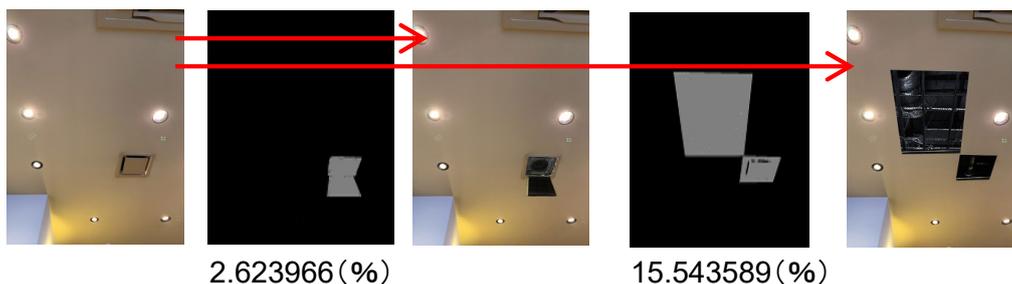
差分画像の数値化の検証を行うため、改めて複数の条件の画像について、それぞれ被害小、被害大を想定した差分画像を用意し、その差分画像の作成とその差分の数値化を行った。

① 床も映り込んだオフィス



(結果) 天井のみの画像と異なり、手前に映り込んでいる物体が動くことで大きな差分として数値に表れた。

② 天井のみ



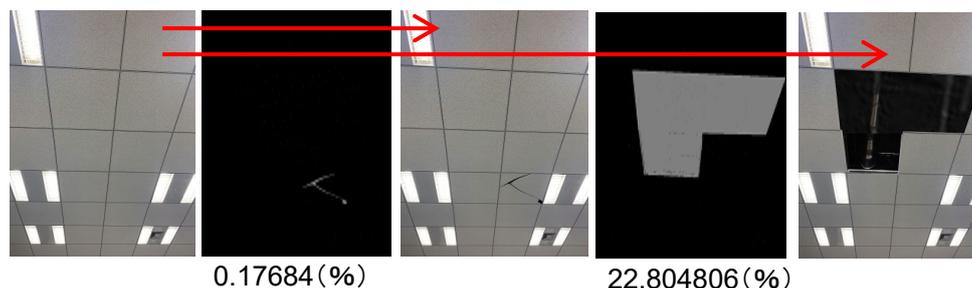
(結果) 重量物(空調機器)の損害による落下は一般的に単なる天井パネルの落下より危険であると考えられるが、カメラからの距離によって、相対的に映り込みの大きさが異なるため、遠い位置にある空調機器の場合はその被害の程度が差分としては小さく表現されてしまう。

③ 棚の上部が映り込んだ天井



(結果) 棚の上部の変異が映り込むことで、天井の損傷にしては大きな数値が検知された。

④ 天井のみ(2)



(結果) 天井の部材に入ったひび割れは、ひび割れた部分が落下の可能性があるにも関わらず画像としての差分が少ないため、数値は比較的小さくなった。

⑤ 時計の映り込み



(結果) 時計の針の変異も検知したが、その割合としては小さなものであり、無視できる範囲と考えられる。

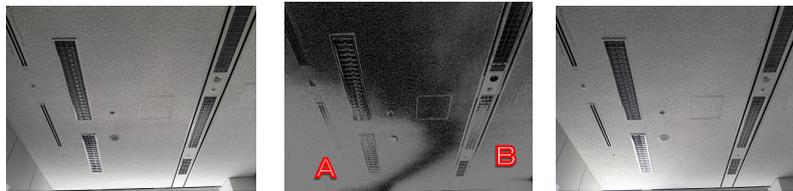
2.3.4 検知に支障が出る条件について

地震の被害を検知する目的に対して、問題となりそうな条件について考察し、その条件の画像について差分を検証した。

① 窓からの光成分の変化

風が強い天気の良い日に太陽が雲で隠れる場面で、部屋に差し込む光の明るさが短時間で変化するような場合。

(1) 窓の外の障害物の移動などで、窓からの光の左半分が明るくなった場合



60.203009(%)

(結果) 明るさが変わった(明るくなった)ため、カメラの自動調光の機能が働き、絞りが小さくなって全体的に暗くする方向に絞りが働いた。その結果、外からの光が強く当たった部分(図のAの部分)は明るい方に差分が出て、逆に右側(図のBの部分)は暗い方に差分が出た。見た目はそれほど差は大きく無いが、数値としては60%という比較的大きな差分になった。

(2) 雲が晴れた状況で、窓からの光が全面的に明るくなった場合



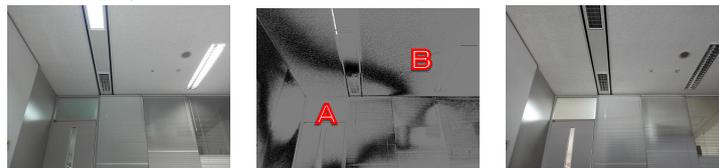
55.505424(%)

(結果) 全体的に明るくなったため、上記同様絞りが全体的に暗くなる方向で働いた。よって、図の手前の部分は差分があまり検知されていないが、奥の方(図のAの部分)については窓からの光が絞りの補正を超えて明るく出ており、差分として現れた。

② 蛍光灯などの照明の影響

大きく映り込んだ蛍光灯などが、地震によって割れたり、停電することで消灯したような場合である。

(1) ケース 1：通路側の蛍光灯が停電して消えた場合



79.063432(%)

(結果) 上記①のケースと同様、蛍光灯が消えた部分（左側の手前と右側、図の B の部分）が暗く差分が出ているが、蛍光灯が消えたことにより全体的に暗くなったのでカメラの絞りが開く方向になったため、蛍光灯が無い図の左奥の部分（図の A の部分）は逆に明るく映ってしまい、明るい側に差分が出たため、79%という大きな差分数値となった。

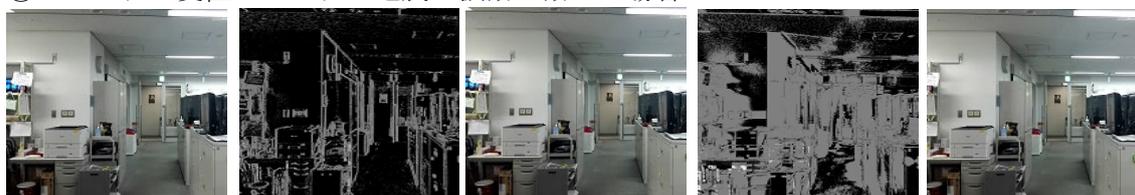
(2) ケース 2：窓側の蛍光灯が停電して消えた場合（窓にはブラインド有り）



86.765124(%)

(結果) 蛍光灯が消えたために蛍光灯がある部分（図の手前側と蛍光灯の光が映り込む左側、図の B の部分）は暗い方向で差分が出たが、蛍光灯の消灯によりカメラの絞りが開いてしまい、外の光の影響が強い部分（図の奥、A の部分）は逆に明るい方向で差分が出たことにより、86%という大きな差分となった。

③ カメラの変位：カメラが地震の振動で動いた場合



23.506776(%)

61.649838(%)

(結果) 光の影響がないため、単純にカメラが振動で動いてしまった分の移動量に影響を受けて差分が出ている。そのため、誤差率は小さな移動の場合で 23%となり、少し大きな移動の場合には 61%になった。

### 2.3.5 考察

本研究で実施した検証実験の結果、採光環境によって検知に支障が出ることがわかった。いずれも画像の解析技術を駆使することで解決が可能である可能性があるが、今回の検証実験では実用化できる段階には至らなかった。今後は、どのような方法で対処が可能かを検討する必要があるといえる。以下に、検知が困難であった状況に対する対処方法を示す。

#### 1) 窓からの光成分の変化について

光の原因や方向（明るい方向、暗い方向）の変動などが、その地点の状況によって様々であるため、一律に考慮することが難しい。よって、地震の前後の短い時間間隔での画像比較を行うことで、この成分がなるべく少なくなる条件で判定する必要がある。

#### 2) 蛍光灯の消灯による変化について

蛍光灯の光のような輝度が高い部分の消灯による変異については、その部分をマスクして判定に利用しないといった方法が考えられるが、窓なのか蛍光灯なのかを自動で判別することが困難である。また、停電によって非常灯が点くなど、逆に明るくなるパターンも考えられるため単純ではない。例えば、蛍光灯などの人工的な明かりの周波数成分をカットす

るような赤外線カメラのようなものを利用して撮影するといった方法が考えられる。

### 3) 天井以外の対象物の転倒などによる変化について

天井が損傷する程度の大きな地震が発生した場合、本棚やテレビなど床面に置いてある倒れやすい物で地震による転倒対策を行っていない場合、天井の損傷より先にそれらが倒れ、画面の差分として大きく出る可能性が考えられる。この問題を完全に回避するには、天井のみが写るようにカメラを設置する必要があるが、一般的な防犯カメラの映像を利用するような場合は困難である。考えられるシステム上の回避策として、例えば深度情報を取得できるカメラを用い、倒壊が考えられる物の距離の物体をマスクして無視するといったことも考えられる。

### 4) カメラが動くことによる変化について

カメラが動いてしまう変化は、少しの移動で大きな差分数値の変化が出るということもあり、注意が必要である。画像のパターンを縦横のベクトルで比較し、カメラの変動部分の差分を消すといった方法も考えられるが、変動が大きな場合や、縦横ではなく回転方向に移動することも考えられるため困難である。まずはカメラをしっかりと固定し、振動によって変動しないようにすることが必要である。

### 5) 検知能力（適用範囲）についての考察

今回行った実験では、一般のスマートフォンでの4K画角、フルHD画角、SD画角といった複数サイズの撮影画像を使って検証を行った。本実験の目的を考えると、画像の中の細かい部分を詳細に比較する目的ではないため、SD画角程度の画角があれば十分活用ができるようであった。また、レンズの画角や被写体との距離については、あまり広角だと様々なものが映り込むため例えば窓からの外光の影響や手前のオフィス家具等の影響が問題となることが考えられる。さらに、遠距離の被写体を望遠で撮影する場合も、カメラの地震等によるブレによって取り付け部分が弱いとカメラが動いてしまい、大きな差分になってしまう恐れがあるので注意を要する。

## 2.4 今後の展開

今後は、実用化に近づけていくために、今回の実験で明らかになった問題点の回避策の検討や全体的なシステムとしての構築作業が必要となる。全体的なシステムの構築作業は、本実験で検証を行った「被害検知」の部分に、外部システムから取得する地震発生のタイミング情報を受け取る部分と、検知した被害の状況をデータとして外部システムへ提供する部分を別途開発、組み合わせることで、全体的な地震時の「非構造物劣化診断システム」を構築する。更に、そのシステムが実際の地震発生時にどのような動作をするかを実験室あるいは実際の現場にて検証を行うことが必要であるといえる。

## 3. 建築物の瞬時継続使用性判定技術の開発

### 3.1 研究概要

本研究では構造部材の損傷度と非構造部材の損傷度から建築物の継続使用性を判定する技術を開発することを目的としている。前年度においては、構造部材の損傷度と非構造部材の損傷度のマトリックスによって、建築物の継続使用性を判定することを提案した。本年度においては、非構造部材の損傷度の取扱におけるモデルケースによる検証と、建築物の安全性を判断するための継続使用性判定方法について考察を行った。

### 3.2 非構造部材の損傷度評価

非構造部材は天井や非構造壁など様々であり、各部材の損傷度を求めることは困難であり、損傷度評価方法は未だ確立されていない。また、建築物の継続使用性に影響する非構造部材は天井材や窓であり、これらの損傷度を判定することが重要であると言える。

そこで本研究では、天井材の損傷度の判定方法についてモデルケースを使った考察を行った。居室の用途（人口密度）ごとに仮定した損傷度判定方法によって検討を行った。損傷度は構造部材と同様に0～Vとし、各居室の被災者数により損傷度を区分することとする。表3.1に損傷度の大きさと天井材の被災面積、人口密度の関係について示す。表3.1に

るように、損傷度は人口密度が大きく、また天井材の被災面積が大きい場合に大きくなることが予想される。さらに、本研究では表 3.2 のように損傷度を定義した。損傷度は被災者数によって定義され、居室内の被災面積と人口密度から被災者数を計算し、損傷度を算出した場合のシミュレーションを行った。

表 3.1 損傷度の大きさ

		天井材の被災面積	
		大	小
人口密度	大	損傷度大	損傷度中
	小	損傷度中	損傷度小

表 3.2 損傷度の定義

		被災者数
損傷度	0	0~0.2 人
	I	0.2~0.4 人
	II	0.4~0.6 人
	III	0.6~0.8 人
	IV	0.8~1.0 人
	V	1.0 人以上

### 3.3 モデルケース

本研究で行った損傷度判定のモデルケースを表 3.3 に示す。居室には小学校の教室、事務室、レストラン、映画館の 4 ケースを検討した。所要面積と人口密度および、天井面積については建築設計資料集成<sup>4)</sup>を参考にして求めた。

表 3.3 モデルケース

室	所要面積 (m <sup>2</sup> /人)	人口密度 (人/m <sup>2</sup> )	天井面積(m <sup>2</sup> )
小学校の教室	1.0	1.0	85.5
事務室	6.0	0.17	143
レストラン	0.8	1.25	40
映画館	0.4	2.5	500

図 3.1 に天井の被災面積 (割合) と損傷度の関係を示す。左側が被災面積を与えた場合であり、右側が被災面積割合を与えた場合である。いずれの居室においても、被災面積が大きくなるにしたがって、損傷度が大きくなる。ただし、損傷度の大きさは、人口密度や居室の天井面積によって異なる傾向を示す。人口密度が大きい居室では、わずかな被災面積 (割合) であっても損傷度は大きくなる。

表 3.4 に天井面積の 1% に被害が生じた場合の損傷度を示す。天井面積の 1% であっても人口密度や天井面積の大きさによって損傷度が大きく異なることがわかる。人口密度が小さい事務室では損傷度が I となるのに対して、人口密度が大きい映画館では損傷度 V となる。したがって、天井材の被害を画像解析などで把握する場合には、天井材の被害面積を割合か面積によって判定する場合においては、その設定条件によって損傷度が大きく異なる場合があるため注意が必要である。一方で、損傷度は想定被災人数ではなく、わずかでも損傷の恐れがある場合には損傷度が V であるとして注意を促すことが必要であるとの指摘もあり、天井材の損傷度を 0 か V の 2 値とすることも安全確保するための判断として必要であるといえる。

### 3.4 建築物の継続使用性判定

本研究では、天井材を含む非構造部材の損傷度が I 以上に相当する場合には損傷度 V として判定することが望ましいとして、表 3.5 の被災度判定表を示す。被災度は 0（継続使用性あり）～V（継続使用性なし）で表され、V が最も被災した状況であり、継続使用性がない状態であると判断される。表 3.5 では非構造部材の損傷度は 0 か V であり、V に該当する場合においては、構造部材の損傷度が 0 であっても建築物の被災度として V と判定される。この判定方法は条件によっては極めて安全側の評価を与えるが、非構造部材の損傷度判定方法が未だ確立されていないことも考慮した結果である。

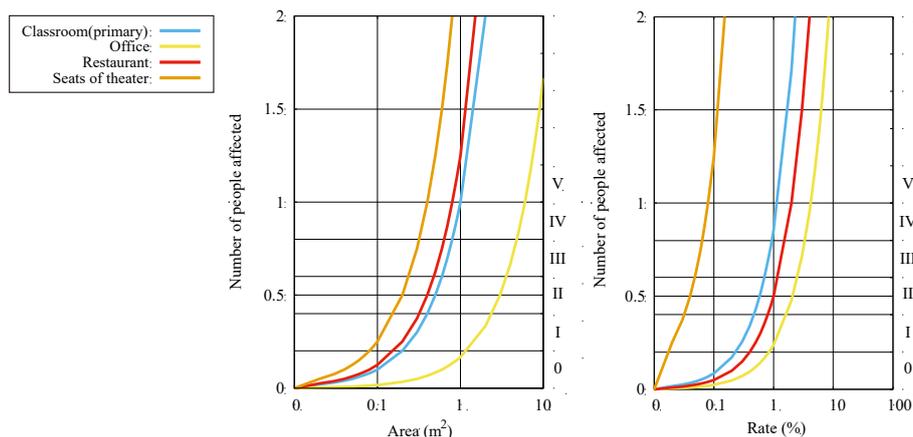


図 3.1 天井の被災面積（割合）と損傷度

表 3.4 天井面積の 1%に被害が生じた場合

室	被災人数	損傷度
小学校の教室	0.86	IV
事務室	0.24	I
レストラン	0.5	II
映画館	12.5	V

表 3.5 被災度判定

		非構造部材の損傷度	
		0	V
構造部材の損傷度	0	0	V
	I	I	V
	II	II	V
	III	III	V
	IV	IV	V
	V	V	V

### 4. 地域内建築物の被災状況把握技術の開発

本研究では地域内にある複数の建築物の被災度・継続使用性判定を地震後瞬時に収集し、地域内の建築物の被災状況を把握できるシステムの開発を行うことを目的としている。昨年度においてはシステムの設計を行っており、構造部材と非構造部材の損傷度から建築物の被災度を判定し、各建築物の結果を集約して表示するシステムとすることとした。本年度では、システムを実装し、実際の被災状況を表示する実証実験を実施した。

本研究で開発するシステムの構成図を図 4.1 に示す。個別の建築物内には構造部材と非

構造部材の損傷度から被災度を判定するサーバーが設置されている。データは24時間連続観測することとし、インターネットが切断されても継続的な判定が可能となっている。建築物の外部には個別建築物の被災情報を集約するサーバーが設置され、インターネットでデータのやり取りを行う。通常時は震度のみを送信している。震度であるため通信量は少ない。また、センサーが止まったかどうかの検知に使用している。地震時においては、指定以上の震度を検知すると波形データを回収し、データが揃ったら集約サーバーでも被災度判定を行うシステムとなっている。

図 4.2 にシステムフローを示す。建築物ごとに加速度と非構造部材の被災前画像が常に一定の時間間隔で収集されており、地震の検知によって、以下のような処理を開始する。

- 1) 加速度の変化によって地震が発生したと判断されたとき、地震発生時の加速度記録から構造物の損傷度を判定する。
- 2) 地震検知と同時に非構造部材の判定のためのトリガが送信され、非構造部材の被災後の画像を収集する。
- 3) 非構造部材の画像は被災前後で比較され、非構造部材の損傷度が判定される。
- 4) 構造部材と非構造部材の損傷度判定の後、それぞれの損傷度から建築物の被災度が判定される。
- 5) 外部のサーバーにおいて各建築物の被災度が収集され、被災状況の一覧として表示される。

図 4.3 に被災状況の一覧の表示画面を示す。被災状況は地図上とリストに表示され、地図上の建築物はそれぞれの被災度が色分けされたアイコンによって表示される。被災度が 0～II の場合においては緑色で、被災度が III～V の場合においては赤色で表示される。図は開発中の表示例であり、被災度が III～V の建築物がある地域に集中している例となっている。このような状況が地震後に瞬時に把握できれば、行政機関や建築物の所有者にとって、災害復旧のための極めて重要な情報となるといえる。

さらに、各建築物の被災状況はレポートとして表示することが可能であり、レポートによって被災状況の詳細を確認することが可能になる。図 4.4 は性能曲線から求めた各層の最大変形であり、どの層で変形が大きいのか数値で確認することができる。図の例では1階の変形が最も大きくなっていることが示されている。また、この最大変形からどの層で限界変形に達する危険性があるのかを推定し図 3.5 のように示す。図の例では今後の地震によって、2階が最も早く限界変形に達する危険性があることを示している。

以上のように、本研究では各建築物の安全性を瞬時に判定し、継続使用性を一元的に把握できるシステムを構築した。

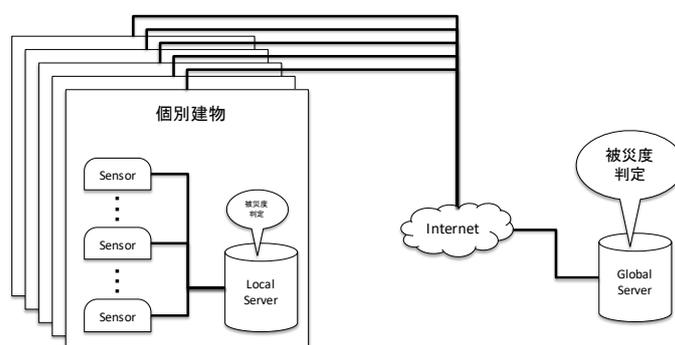


図 4.1 システム構成図

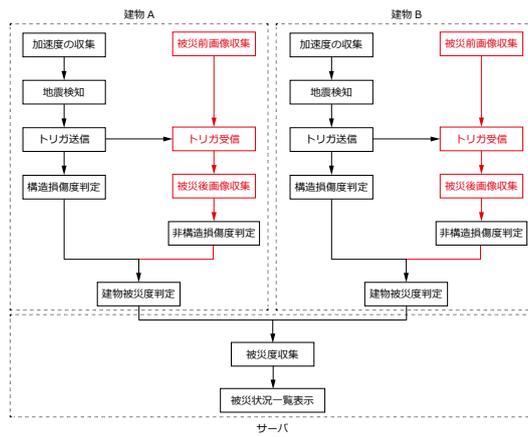


図 4.2 システムフロー

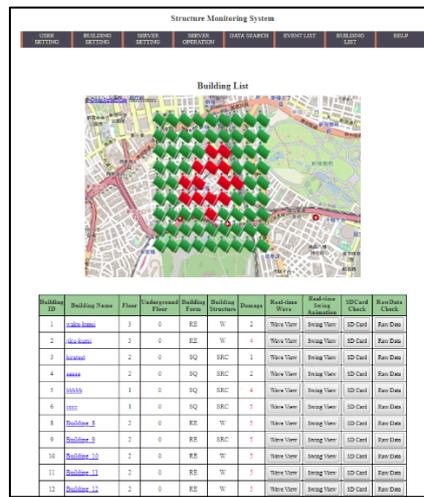


図 4.3 被災状況一覧の表示画面

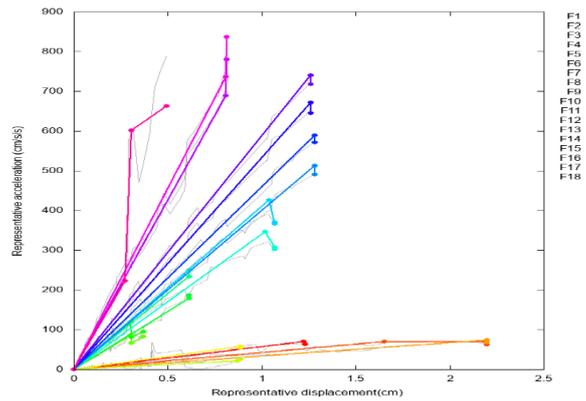


図 4.4 各層の最大変形

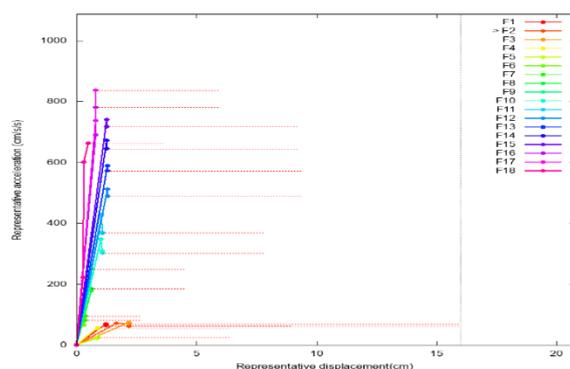


図 4.5 限界変形に達する層

・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) 日本建築防災協会：2017年改訂版既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準・改修設計指針・同解説、2017
- 3) 気象庁ホームページ：<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>
- 4) 日本建築学会：第3版コンパクト建築設計資料集成、2005

(3) 成果の刊行に関する一覧表

刊行書籍 又は 雑誌名 (巻号数、論文名)	刊行年月日	刊行・発行元	原著者
Structural Control Health Monitoring (Vol. 25, Issue 12, e2267, wavelet transform - based capacity curve estimation approach using seismic response data)	H30.10.5	Wiley Online Library	Haoran Pan, Koichi Kusunoki
建設機械施工 (Vol. 70, No. 12, 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)	H30.12.25	日本建設機械施工協会	日比野陽
Journal of Earthquake Engineering (Capacity Curve Estimation for High-Rise Buildings Using Limited Number of Sensors)	R01.04.02	Taylor and Francis Online	Haoran Pan, Koichi Kusunoki
建設機械 (Vol. 55, No. 6, 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)	R01.06.01	日本工業出版	日比野陽
Proceedings of 5th Pacific Timber Engineering Conference (Experimental Seismic Behavior of a Two-Story Cross-Laminated Timber Structure without Tensile Anchor)	R01.07.10	PTEC 2019	Hiroshi Isoda et al.

(4) 成果による知的財産権の出願・取得状況

知的財産権の内容	知的財産権の種類・番号	出願年月日	取得年月日	権利者
なし				

(5) 成果の実用化<sup>※</sup>の見通し ※論文発表や現場試行ではなく実業務での社会実装

本研究開発の技術において、非構造部材の損傷度判定技術の開発が未だ途上であるため、今後も開発を継続していく必要があるが、昨年度と本年度の研究によって実用化の目処が立ってきており、試行実験と検証を行っていく必要がある。現在、構造部材の損傷度の判定によって建築物の被災度を判定し、かつ複数の建築物の判定結果を収集するシステムとして実用上問題ないレベルになっており、本研究で開発したシステムの実装にあたっては、当初は構造物の損傷度判定技術のみを用いて行うことも検討している。しかしながら、実用化のフィールドが未だ開発できていない。引き続き、実用化の環境づくりとして行政機関や建設会社にセンサーの設置の働きかけやニーズの調査を行い、本研究開発のシステムの実用化を図りたい。

(12) その他

なし。