

## IoTによる都市・建物の防災・避災・減災の高度化に向けた実用化研究

東京理科大学  
元・東京理科大学  
東京理科大学  
東京理科大学  
東京理科大学  
東京理科大学  
東京理科大学  
東京理科大学  
東京理科大学  
東京理科大学

○伊藤拓海 1\*  
崔彰訓 2\*\*  
山本貴博 3\*\*\*  
中嶋宇史 4\*\*\*\*  
河原尊之 5\*\*\*\*\*  
橋爪洋一郎 6\*\*\*\*\*  
長谷川幹雄 7\*\*\*\*\*

Internet of Things	被災度診断	構造実験
振動台実験	起振機実験	機械学習

### 研究の目的

わが国は、甚大な自然災害を経験し、震災都市・建物の中で、人々の安全・安心を確保するための具体的な方策が求められている。地震発生後、震災建物の調査・診断を行い、補修工事を経て、建物を復旧させる。震災建物の調査・診断は、余震の続く被災地での作業となり危険を伴う。また、対象建物が膨大なため長期化し、復旧・復興の遅れの要因になる。本研究は、IoT コンセプトに基づき、被災状況を検知するシステムを提案する。

IoT コンセプト、すなわち 1) 電源レスでセンシング可能な環境発電、2) AI 解析診断システム、3) 省電力無線通信ネットワーク、により、被災建物の状態を検知する。

本研究課題では、IoT の具体的なデバイスを試作し、実験室での耐震実験、ならびに実地盤上の試験建屋での現地実験を行い、その有効性や適用性を検討する。

### 研究の内容

建物モニタリングのための IoT の要素技術と機器の開発、ならびに実用化に向けた各種実験を行い、システムのアーキテクトとその有効性を検討する。特に、実環境下（日常時、自然災害時・災害後）において、要素技術の相互連携とシステムの動作を実証する。

A) 実験室での耐震実験：建物模型試験体に IoT デバイスを取り付け、耐震実験、または振動台実験を実施し、検出精度、有効性、適用性を検討する。

B) 試験建屋での実地研究：建屋を建設し、IoT デバイスを取り付け、検出精度、有効性、適用性を検討するとともに、実建物の省スペースの利用法を検討する。

C) 社会実装研究：実際の建物に IoT デバイスを設置し、建物使用時の状態検知（人の動作など）や震災時のモニタリングの有効性を検討する。

### 研究の方法

#### (1) 基礎研究 1：耐震実験と IoT デバイスの検証

環境発電とセンシングのセンサーを構造体に設置し、弾塑性応答過程における発電と、力学挙動や弾塑性挙動の検出の有効性・適用性を検討するため、木造壁、鉄骨骨組、鉄骨ブレースの耐震実験を実施した。

#### (2) 基礎研究 2：振動台実験と機械学習による損傷検知法の検証

2 層筋交い構造（X 形筋交い 28 構面）の模型の振動台実験を行い、損傷個所の同定法について検討した。ここでは、筋交いの座屈や接合部の破断による耐力損失を想定し、いずれかの構面の筋交い材 1 組を取り外し、筋交いの損傷を模擬した。筋交いを取り外した状態で振動実験を行った。

#### (3) 実地研究：建屋での現地実験／打撃と起振機による実験と機械学習による状態検知法の検証

実地盤上の実験用建屋に、環境発電とセンシングのセンサーを設置し、各部位の振動を計測し、状態の検知を試みた。耐震壁のボルトの有無、開口部の開閉状態、在室者の数を実験変数とした。実験は、1) 建屋の各所を打撃することによる振動と、2) 起振機を用いて正弦波入力による振動実験を行った。1)の実験は 2017 年 11 月、2)の実験は 2018 年 3 月、10 月に実施した。

#### (4) 機械学習による各種実験結果の状態検知・損傷度評価に関する解析

(1)～(3)の各種実験結果に対し、構造体の状態を検知するため、各種スペクトルの分析をはじめ、機械学習による解析を行った。結果と成果は次節に示す。

### 研究の成果

#### I. 基礎研究 1：構造実験結果に関する損傷度評価

##### (1) 機械学習による木造壁の損傷度評価

木造壁の水平載荷実験において、IoT モニタリングの

ためのセンサーで、応答値や微振動の検出の有効性を確認した。変形レベルごとに建物の常時振動を想定した微振動を与え、得られた応答波形から機械学習（自己符号化器）による損傷度の評価を行った。検討結果より、木造壁の健全な状態と比較して、損傷が進行すると評価誤差が大きくなることから、IoTシステムで常時振動を取得して機械学習させることで、震災後の損傷の有無を判定できる可能性がある。

## (2) 機械学習による鉄骨ブレースの損傷度評価

鉄骨ブレースの水平載荷実験において、ブレース材の損傷レベルごとに撃力を与え、得られた応答波形から機械学習による損傷度の評価を行った。本手法は、ブレース材の座屈や亀裂により復元力が低下すると、骨組力学において不釣り合い力からブレース材に残留軸力が生じることで、ブレース材の固有振動数が変化することを利用したものである。解析結果は、その原理の有効性を示唆するものである。また、この検討により、震災鉄骨建物の余震や地震後使用時の常時微動により、ブレース材の損傷度の検知の可能性がある。

## II 基礎研究 2：振動台実験と機械学習による損傷検知法の検証

筋交い建物模型を用いた振動台実験において、筋交いを取り外した箇所を検知するため、応答波形の機械学習より識別精度の検証を行った。検討結果より、筋交いを取り外した構面の識別が可能であることを示した。筋交い付き架構による木質構造において、地震応答データを取得して機械学習により解析することで、内外装材で覆われた筋交いの損傷の検知が可能である。

## III. 実地研究：試験建屋の撃力実験と起振機実験の結果に関する状態検知の成立性評価

### (1) 撃力による振動波形に関する機械学習による状態検知

試験建屋の東西南北面の耐力壁のボルトを取り外すことで、合成壁の損傷を模擬し、撃力による振動波形の機械学習（ニューラルネット型の分類器）から状態検知の成立性を評価した。検討結果より、震災後に住人が壁を叩いたり、余震により耐力壁が振動することで、そのデータから耐力壁の損傷検知の可能性がある。

### (2) 起振機による振動応答波形に関する機械学習による状態検知

試験建屋の東西南北面の耐力壁のボルトを取り外すことで、合成壁の損傷を模擬し、起振機による振動応答波形の機械学習から状態検知の成立性を評価した。振動応答波形の機械学習による解析結果より、本震・余震等の振動波形から建物の状態検知の可能性がある。

## 新知見

本研究課題で提案する IoT による建物モニタリングの可能性について検討し、以下の知見を得た。

- 1) 建物の地震応答と常時微動を利用し、PVDF による環境発電とセンシングの可能性がある。
- 2) 建物の状態を変数として得られた振動応答データに対し、各種機械学習により建物の状態の検知が可能である。
- 3) IoT のコンセプト、すなわち環境発電、小型センサー、機械学習、小電力無線通信を具現化に向けて、本研究課題の成果により、その可能性を示した。

## 今後の予定

本研究課題の基礎研究、実地研究により、IoT による建物モニタリングの実用化に向けて、多くの成果と具現化の見込みが得られた。今後は、構造実験室での基礎研究をはじめ、試験建屋の起振機実験を継続し、葛飾区公舎・地域センターの社会実装実験を進めていく予定である。

- 1) IoT の環境発電とセンサーのデバイスの高度化、最適化、小型化を進め、構造実験において適用性や有効性の検証を進める。
- 2) 本 IoT システムの実建物での適用性や有効性、ならびに耐久性や実環境への耐性を検証するため、試験建屋での実地研究を継続する。
- 3) 2019 年 4 月より、葛飾区と連携して、同区内公舎や地区センターに本 IoT システムのデバイスを設置し、適用性や有効性の検討を行う予定である。特に、実建物への後付けの可能性や不特定多数が使用する実環境下でのデータの解析など、構造実験室や試験建屋と比較してより複雑な環境下での適用性を検証する予定である。

\* 東京理科大学工学部建築学科  
 \*\* S&P Global (元・東京理科大学工学部建築学科)  
 \*\*\* 東京理科大学工学部教養  
 \*\*\*\* 東京理科大学理学部応用物理学科  
 \*\*\*\*\* 東京理科大学工学部電気工学科  
 \*\*\*\*\* 東京理科大学理学部応用物理学科  
 \*\*\*\*\* 東京理科大学工学部電気工学科

\* Dept. of Archi., Fac. of Eng., Tokyo Univ. of Science  
 \*\* Former Dept. of Archi., Fac. of Eng., Tokyo Univ. of Sci.  
 \*\*\* Dept. of Liberal Arts., Fac. of Eng., Tokyo Univ. of Science  
 \*\*\*\* Dept. of App. Phy., Fac. of Sci., Tokyo Univ. of Science  
 \*\*\*\*\* Dept. of Elect., Fac. of Eng., Tokyo Univ. of Science  
 \*\*\*\*\* Dept. of App. Phy., Fac. of Sci., Tokyo Univ. of Science  
 \*\*\*\*\* Dept. of Elect., Fac. of Eng., Tokyo Univ. of Science