

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 21 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤（B）

研究期間：平成 21 年度 ～ 平成 23 年度

課題番号：21360271

研究課題名（和文）変位計測に基づく健全度診断システムの構築と実建物の加振実験による検証

研究課題名（英文）Building diagnosis based on interstory drift displacement sensing and its effectiveness examination through real building experiments

研究代表者

西谷 章（NISHITANI AKIRA）

早稲田大学理工学術院・教授

研究者番号：70156074

研究成果の概要（和文）：本研究は、新たな概念による層間変位計測センサーの使用を前提とした、健全度診断システムの構築を目指すものである。開発したセンサー、構築した診断システムの有効性確認さらなる改良を目的として、実建物加振実験を実施し検証を行った。

研究成果の概要（英文）：This research has proposed a building diagnosis scheme based on the direct sensing of interstory drift displacements. The proposed scheme has been examined by experiments using real buildings.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
2010年度	6,800,000	2,040,000	8,840,000
2011年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
総計	11,700,000	3,510,000	15,210,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学・建築構造・材料

キーワード：構造ヘルスマモニタリング、層間変形、層間変位計、健全度診断、診断アルゴリズム、損傷箇所、実建物加振実験

## 1. 研究開始当初の背景

1989年、わが国において、世界初のアクティブ振動制御技術が、強風時・小地震時の建築構造物の応答低減に適用された。以来、我が国は、現在50前後の建物へのアクティブ・セミアクティブ振動制御適用実績をもち、世界を大きくリードしてきている。この建物の実現は、制御技術のみならず、計測や情報通信などの先端技術を導入して、建築土木構造物の高度化を目指す研究開発への引き金となり、現在、高度化に向けたさまざまな試みが行われるようになってきている。

このような構造物の高度化を目指す技術は、Smart Structures Technology (SST)と総称さ

れ、構造工学における新たな領域を形成しようとしている。事実、アジア太平洋地域の研究機関によるSST研究のためのネットワークANCrisSSTも形成されている。

SSTの中心となっているのが、センサー技術にもとづくスマートヘルスマモニタリングである。現在、計測センサー技術は、銀行の現金自動受払機の静脈認証、スイカなど、いわゆるスマートカード内の情報読取りをはじめとして、私たち日常生活の様々な局面に急速に活用され始めており、現代社会に不可欠なものとなろうとしている。このような中であって、近年では、センサー設置により、日常時、あるいは非常時のさまざまな外乱に

対する構造物の応答を計測し、得られたデータを解析して、経年変化等による建築土木構造物の劣化から地震後の損傷有無の判定・検出に至るまでを行おうとする動きが活発化している。これが、「構造ヘルスマonitoring」である。この分野の研究はいま、国内外を問わず広く注目されるようになってきている。

また同時に、9.11のニューヨーク世界貿易センタービル崩壊の教訓や、昨今の橋梁落下事故、さらに3.11の原子力発電所事故の発生もあって、いったん機能不全や機能停止に陥ったときあるいは崩壊したときの影響が甚大な高層建物・橋・原子力施設など巨大構造物を対象とする健全度判定システムの確立も求められている。このような要求に対応して、米国科学財団(NSF)もセンシングやモニタリング研究の推進に急速に力を入れ始めており、維持管理技術・防災技術の高度化、さらには将来的には応答制御機能をも結合した自己診断・自己応答制御構造物への発展も期待されている。

## 2. 研究の目的

これまで構造健全性診断に用いられてきた構造同定手法の多くは、解析精度の限界から、固有周期あるいは層剛性などマクロな評価が中心であった。この評価では構成部材レベルでの損傷部位の特定は不可能である。

一方、RC構造物の剥離、亀裂進展などの内部欠陥調査のための、サーモグラフィ法、超音波法、アコースティックエミッション法などの、ミクロな評価を主体とする非破壊検査(NDE)も提案されている。しかし、この方法では事後評価とならざるを得ず、地震発生時にリアルタイムな損傷評価を行うことは難しい。

このような背景から、既存のマクロ的でもミクロ的でもない、新たな計測手段とそれに基づく損傷評価の枠組みが求められている。

層間変位は構造物の損傷度を直接評価できる最も本質的な量であり、建築基準法でも設計で想定する地震時層間変位に制限を付けている。ただし、最近の当分野の国際学会では「正確な層間変位計測は必要不可欠ではあるが、センサー設置部の局所回転の問題のため実現が困難」という認識もある。しかしながら、本研究が独自に提案している、センサー設置部の局所回転の影響を除去できる変位計測技術によって、層間変位の履歴を地震中に正確に計測することが可能となり、ブレイクスルーをもたらすことができる。

## 3. 研究の方法

本研究では、建築構造物の安全性の維持と向上を目的に、急速に技術革新のすすむ計測技術と構造工学を統合した構造モニタリン

グシステムの確立を目指して、研究を進めた。

平成21年度(2009)実施の実建物の加振実験を通して、当時既に試作器を作成していた層間変位計測センサーの有効性および問題点を把握し、センサーの改良点の抽出を行い、あわせて健全度診断アルゴリズムの構築に向けて基礎データを収集した。これに基づき、センサーの改良に着手し、目的とするシステム構築のための方法論や枠組みの検証を行った。

平成22年度(2010)は、設置部の回転の影響を除去可能なセンサーの開発を行い、立体フレームモデルのプッシュオーバー解析と連携させた、建物の構成部材レベルでの損傷部位の特定と損傷度を明らかにするシステムを構築した。合わせて、診断システムの簡易版として、質点系モデルをベースとする各層履歴の推定から損傷層を把握するシステムの構築も行っている。なお、平成22年度実施予定の取り壊し予定の建物を用いた加振実験は、予定していた建物の取り壊し延期に伴い、平成23年度に繰り越した。

平成23年度(2011)には、回転の影響を除去したセンサーの改良、立体モデルによる診断システムの構築、質点系モデルによる層履歴からの診断システムの構築を完了し、スケルトン状態となった建物の加振実験を実施した。

以上のように、実験を通して、さまざまな技術的課題の検討を行いながら、研究をすすめた。

本研究で開発した層間変位センサーによる構造ヘルスマonitoringシステムは、建築構造物の安全を正確・迅速に評価でき、地震直後の応急判定、早期復旧、事業継続を強力にサポートするとともに、安全性の定量的評価に基づいた建築構造物の長期継続利用に寄与するはずである。

## 4. 研究の成果

### (1) センサーの開発

本研究に先立ち、完成させていた層間変位を直接計測する光学センサー(以下、層間変位センサー)の試作器の概要を図1に示す。

図に示すように、計測対象となる建物層間において、一方に光源を、他方に受光部を設置する。両者の相対変位(層間変位)を直接計測する。装置の設計条件を適切に設定することで、中小地震時の微小変位から大地震時の変位まで計測可能であり、適用性の高い小型の計測システムの構築が可能となる。

このセンサーを用いた平成21年度の加振実験において、当時例の無いレベルの信頼性(0.1mm以下の変位計測精度)で非接触型の層間変位計測を達成した。しかしながら、センサー設置部の局所的な回転により、大きな変位計測誤差が生じるという問題点も把握

された。

この解決のため、誤差発生メカニズムを分析し、5自由度のセンサーを新たに構築し、層間変位だけでなく局所回転角度や建物の鉛直方向軸回りのねじれ回転角も同時に計測可能な、層間変位計を開発した。

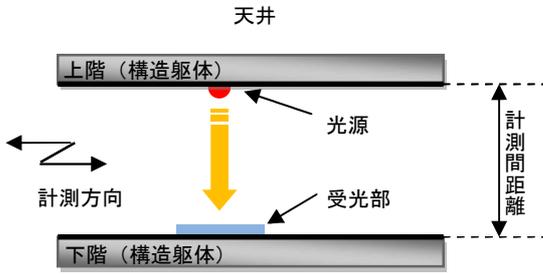


図1. 変位計測の概念図

図2のように、半導体位置検出素子(PSD)とレンズを組み合わせたユニットを床に、変位計測ターゲットとしてLED光源を天井に配置することで基本変位計測システムが構成されるが、センサーユニット自身の回転による誤差を除去するために、2台の変位計をそれぞれX方向およびY方向に角度 $\alpha$ で斜めの方向に配置する。3台のPSD変位計からの5つの出力を演算することによって、2方向の層間変位、2方向のセンサー設置部の角度成分、鉛直方向のねじれ角度をそれぞれ分解して5自由度の出力を可能にした(図3)。

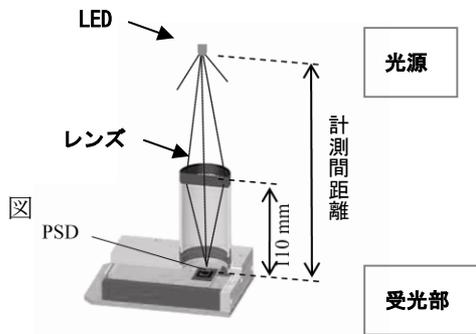


図2. PSDセンサーの構成



図3. 5自由度層間変位センサーの構成

## (2) 健全性診断アルゴリズムの開発

計測データから、構造物の損傷箇所の特長、損傷程度の定量的評価、さらには破壊状況の推定等が可能となる健全性診断アルゴリズムを構築した。

これまでの健全性診断には、いわゆる構造同定手法も用いられてきているが、解析精度には現状では限界があり、繰り返しになるが、固有周期、層剛性などマクロな動特性の評価にとどまっていることが多い。

本研究では、このような課題を解決し将来の実用に供するシステム構築を目指した。建物を構成する部材ごとに詳細にモデル化した立体フレームモデルを対象に、想定される損傷パターンをデータベース化したものと実際に計測された層間変位情報とから、部材の損傷位置や損傷程度をリアルタイムに導き出す新たな基本アルゴリズムを構築した。こうしたアプローチを採ることにより、建物を構成する部材の損傷位置、損傷度を、これまでにない高い精度で、推定・評価することが可能となった。

また、立体モデルを利用しない簡易な損傷判定手法として、層間変位データのみを用いて、荷重—変位関係の履歴を描く手法も開発した。この方法では、層間変位データと、それらのデータの2回微分をもとに得られる層せん断力に対応する量を用いて履歴を描く。得られた履歴の「かたち」から、視覚的にも損傷具合を判定しやすいという利点がある。加速度計測データから履歴を求める際には、2回の積分が必要となるが、積分誤差や残留変形が正しく計算できないという問題があった。しかし、層間変位センサーにより、損傷度を判断するうえで最も直接的な指標となる層間変位を正確に履歴に反映できることは、本手法を用いるうえで大きな利点である。

## (3) 実大建物実験

上述したように、平成21年度に、層間変位センサーを鹿島建設技術研究所の可変剛性建物(写真1)に複数取り付け、加振実験を行った。この実験では、従来難しかった残留変位の実測にも成功し、変位計の有用性を示した。



写真1. 可変剛性建物

上述したように、この実験において、センサー設置部の局所的な回転によって、20%近い誤差の発生が明らかとなった。この実験結果を受けて、5自由度の層間変位センサーを試作し、このセンサーの性能検証、正確な層間変位計測に基づく建築構造物のヘルスマニタリングのための枠組み構築に向けて、屋上に加振器を設置して、鹿島建設技術研究所の解体予定の2層鉄筋コンクリート造実建物（写真2）の強制加振実験を行った。開発した5自由度層間変位センサーと、従来のPSDセンサーを建物の要所に多点配置し、特に層間変位と局所的な回転角度の分離計測を行った。建物の計測装置設置準備と加振機設置については鹿島建設先端メカトロニクスグループの支援を得た。



写真2. 鹿島建設技術研究所 8号館増築棟

層間変位センサーの計測特性把握のため、加振は建物短辺方向（NS方向）に、定常波加振を行った。最大加振レベルは層間変位振幅レベルで最大数mm程度を想定した範囲で設定した。加振開始時の正確な建物固有振動数を把握するため、第1次加振は固有振動数付近（4.7Hz～6.3Hz）で定常波加振を行った。各加振実験では、1.0Hzから最大振動数まで振動数を漸増させ、最大振動数で1分間定常加振を行った後、急速停止させている。

計測値のリファレンスとして、1FからRFに、NS方向・EW方向・UD方向それぞれに速度計を配置し、1F、2Fは床上、RFは床下（梁側面に治具で固定）に設置した。各階の計測速度を積分・層間差分をとることで得られるデータを参考として用いた。

本実験のPSDセンサーで計測した層間変位データは、リファレンスに使用した速度計によるデータと、設置位置傾斜分を補正することにより、ほぼ一致することを確認した。今回の実験で加振した建物は地下のない建物であったため、ロッキングによる回転が生じることが懸念されたが、建物の回転による効果は少なかった。また、計測位置が梁の端部（北側）の場合と梁中央とでは、中央部の方が誤差が大きくみられ、梁のたわみやねじれの影響が端部に比べ大きく出ること

も確認された。

建築は重要な社会資本でもあり、また限りある地球資源の有効活用の観点からも、構造物の長寿命化に向けて、維持管理・健全度診断・被害時の修復を目的とした計測、モニタリング技術の確立が望まれている。このような現状を踏まえ、本研究グループは、構造、計測、情報、通信、ナノなどの先端技術を真に融合した研究が推進されるべきであるとの認識に立つて、異分野協働による研究を行った。このような試みはほとんど他に類を見ない。実建物の加振実験による検証を行いながら、新たな概念による層間変位計測センサーの開発・改良、センサー使用を前提とした健全度診断システムの構築を行った。

## 5. 主な発表論文等

（下線は、研究代表者、研究分担者）

〔雑誌論文〕（計6件）

- ①I.Matsuya, Y.Nitta (5番目), M.Takahashi (6番目), S.Miura (7番目), A.Nishitani (13番目), I.Ohdomari (14番目) 他8名, Development of lateral-displacement sensor for real-time detection of structural damage, IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 査読有, 6(3), 2011, pp.266-272
- ②松谷巖, 高橋元一 (6番目), 三浦悟 (7番目), 仁田佳宏 (11番目), 西谷章 (14番目), 大泊巖 (15番目) 他9名, 光位置検出素子を利用した非接触型相対変位計測システム, 日本建築学会技術報告集, 査読有, 第16巻, 第33号, 日本建築学会, 2010, pp.469-472
- ③畑田朋彦, 高橋元一 (2番目), 仁田佳宏 (6番目), 西谷章 (7番目) 他3名, 起振機加振試験による非接触型センサを利用した実建物の層間変位計測, 日本建築学会構造系論文集, 査読有, 第75巻, 第653号, 日本建築学会, 2010, pp.1257-1264
- ④I.Matsuya, M.Takahashi (7番目), Y.Nitta (9番目), A.Nishitani (12番目), I.Ohdomari (13番目) 他8名, Measuring relative-story displacement and local inclination angle using multiple position-sensitive detectors, Sensors, 査読有, (10), 2010, pp.9687-9697
- ⑤K.Kanekawa, M.Takahashi (5番目), S.Miura (6番目), Y.Nitta (10番目), A.Nishitani (13番目), I.Ohdomari (14番目) 他8名, An experimental study on relative displacement sensing using phototransistor array for building structures, IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 査読有, 5(2), 2010, pp.251-255

〔学会発表〕(計 19 件)

- ① I.Matsuya, M.Takahashi (7 番目), Y.Nitta (9 番目), A.Nishitani (12 番目), I.Ohdomari (13 番目) 他 8 名, Relative-story displacement sensor for measuring five-degree-of-freedom movement of building layers, Proceedings of SPIE Smart Structures/NDE 2011, 79810C, San Diego, USA, 2011.7
- ② I.Matsuya, Y.Nitta (6 番目), A.Nishitani (9 番目), I.Ohdomari (10 番目) 他 6 名, An optical lateral-displacement sensor for measuring the inter-story of a building, Proceedings of the Fifth World Conference on Structural Control and Monitoring (5WCSCM), Tokyo, Japan, USB, Paper No.236, 2010.7
- ③ K.Kanekawa, Y.Nitta (5 番目), A.Nishitani (7 番目), I.Ohdomari (9 番目), M.Takahashi (11 番目) 他 6 名, An experimental study on relative displacement direct sensing in real-time using phototransistor array for building structures, Proceedings of the Fifth World Conference on Structural Control and Monitoring (5WCSCM), Tokyo, Japan, USB, Paper No.216, 2010.7
- ④ T.Hatada, M.Takahashi (2 番目), Y.Nitta (7 番目), A.Nishitani (8 番目) 他 4 名, Measurement of actual building motions on forced vibration test by noncontact-type relative story displacement sensors, Proceedings of the Fifth World Conference on Structural Control and Monitoring (5WCSCM), Tokyo, Japan, USB, Paper No.078, 2010.7
- ⑤ I.Matsuya, M.Takahashi (5 番目), Y.Nitta (11 番目), A.Nishitani (14 番目), I.Ohdomari (15 番目) 他 10 名, Development of noncontact-type relative story displacement monitoring system, Proceedings of the Fifth International Workshop on Advanced Smart Materials and Smart Structures Technology (ANCRiSST2009), Boston, USA, pp.161-166, 2009.7
- ⑥ K.Kanekawa, M.Takahashi (5 番目), Y.Nitta (10 番目), A.Nishitani (13 番目), I.Ohdomari (14 番目) 他 9 名, An experimental study on inter-story displacement measurement using phototransistor array, Proceedings of the Fifth International Workshop on Advanced Smart Materials and Smart Structures Technology (ANCRiSST2009), Boston, USA, pp.550-555, 2009.7

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 1 件)

名称: 変位計測装置

発明者: 松谷巖 他 (大泊、西谷、仁田、三浦、高橋を含む)

権利者: 早稲田大学・鹿島建設

種類: 特許

番号: 特願 2010-101740

出願年月日: 2010 年 4 月 27 日

国内外の別: 国内

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

西谷 章 (NISHITANI AKIRA)

早稲田大学理工学術院・教授

研究者番号: 70156074

### (2) 研究分担者

大泊 巖 (ODOMARI IWAO)

早稲田大学名誉教授

研究者番号: 30063720

仁田 佳宏 (NITTA YOSHIHIRO)

足利工業大学・准教授

研究者番号: 10318834

三浦 悟 (MIURA SATORU)

鹿島建設技術研究所

研究者番号: 20374027

高橋 元一 (TAKAHASHI MOTOICHI)

鹿島建設技術研究所

研究者番号: 80416700

(H21-22 年度)