

RC 造耐震壁付きフレーム建物の三次元震動台実験による
非接触型センサを用いた層間変位計測システムの実験分析Property Analysis of Relative Story Displacement Measurement System
Using Noncontact-type Sensors in Three-dimensional Shaking Table Tests on RC Wall-framing Building

畑 田 朋 彦 片 村 立 太

要 約

本論文では、建物の層間変位計測システムとして、非接触型の光学式変位計測装置である PSD センサの適用性を評価する。PSD センサは、光源と受光部からなる計測ユニットで構成され、地震時の層間変位の直接計測が可能である。今回、立体挙動を示す建物における PSD センサの層間変位計測の実験分析により把握することを目的に、E-ディフェンスで行われた縮小 6 層 RC 造耐震壁付きフレーム建物の震動台実験において PSD センサによる層間変位計測を実施した。そして、計測された層間変位データを建物の FEM 解析モデルを用いて分析した。その結果、PSD センサを用いた層間変位計測システムの実用上の課題および基本特性を把握し、実適用に対する知見を得た。

目 次

- I. はじめに
- II. 層間変位センサの概要
- III. 実験の概要
- IV. 計測結果の検討
- V. おわりに

I. はじめに

新潟県中越沖地震や東北地方太平洋沖地震、平成 28 年熊本地震などを契機として、建物の被害の有無やその程度に関する正確な情報が求められるようになってきている。このような情報は、地震後の速やかな建物安全性評価はもちろん、企業の事業継続計画 (BCP) 策定にとっても重要であり、迅速で的確な建物損傷評価への期待は大きい¹⁾。このような状況のもと、建物の安全性評価および損傷検出に関して、様々な構造ヘルスマonitoring技術が提案されており^{2),3)}、これらの技術は、兵庫県南部地震後の建物の特性評価⁴⁾や東北地方太平洋沖地震における東北大学での建物応答の実測⁵⁾などに適用されている。

これまでの構造ヘルスマonitoringは、絶対加速度計測やひずみ計測に基づいて損傷を評価しているものがほとんどであるが^{例えば6)}、建物の安全性および損傷度の評価において、建物の変位情報は、より直接的かつ明瞭な指標となりうる。特に、地震時の層間変位は、建物の耐震設計においても重要な指標であり⁷⁾、層間変位を直接的に計測できれば、より詳細で的確な建物の損傷評価法の確立に道が開かれる可能性は大きい。

筆者らは、地震時の建物層間変位の高精度かつ簡便な計測を目的として、光位置検出素子 (Position Sensitive Detector) を用いた非

接触型の光学式変位計測装置である PSD センサを開発し、試験によりその基本特性を確認するとともに⁸⁾、実建物の 1 次元起振機加振試験を通して、PSD センサの実使用環境下における層間変位計測の特性と適用性について報告した⁹⁾。また、計測された層間変位記録を用いて建物の部材レベルの損傷を評価する実用手法を提案し、その妥当性について検討してきた¹⁰⁾。

本論文では、これまで検討していない立体挙動を示す建物における PSD センサの層間変位計測の特性を実験分析により把握することを目的に、独立行政法人・防災科学技術研究所・兵庫耐震工学研究センターの 3 次元大型震動台実験施設 (E-ディフェンス) で行われた縮小 6 層 RC 造耐震壁付きフレーム建物の震動台実験^{11),12)}において PSD センサによる 2 方向層間変位計測を実施した。そして、計測された層間変位データを建物の FEM 解析モデルを用いて分析することで、PSD センサを用いた層間変位計測システムの実用上の課題について考察し、その基本特性を報告する。

II. 層間変位センサの概要

ここで層間変位センサとして適用する PSD センサは、非接触型の光学式センサであり、光源と受光部からなる計測ユニットで構成される。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し、受光部に光が当たる位置を検出することにより両者の相対変位 (層間変位) を直接計測するものである。本方式では、ビデオカメラ方式での画像計測に見られるような計測データの複雑な処理などは不要であり、層間変位を直接計測することができる。また、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となり、建物に対して適用性の高い小型の 2 次元層間変位計測システムの構築が可能である。

キーワード: モニタリング, 層間変位, 光学式変位計, E-ディフェンス, 有限要素法

Keywords: monitoring, relative story displacement, optical displacement sensor, E-defense, finite element method

PSD センサは、光源に LED (発光ダイオード)、受光部に PSD (光位置検出素子) とレンズを組み合わせた変位計測装置として構成される。装置構成の模式図を Fig.1 に示す。本センサは、LED 光源からの拡散光を、レンズによって PSD 受光部に集光することで、実際の光源の動きを縮小して計測しており、レンズの詳細な設計が必要であるが受光部サイズのコンパクト化を図ることができる。

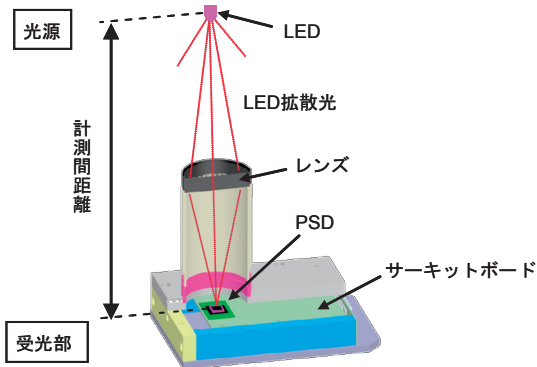


Fig.1 PSD センサの構成
(Schematic Diagram of PSD Sensor)

Ⅲ. 実験の概要 ^{11), 12)}

1. 建物試験体

試験体の外観を Photo 1 に、試験体の概要を Fig. 2 に示す。

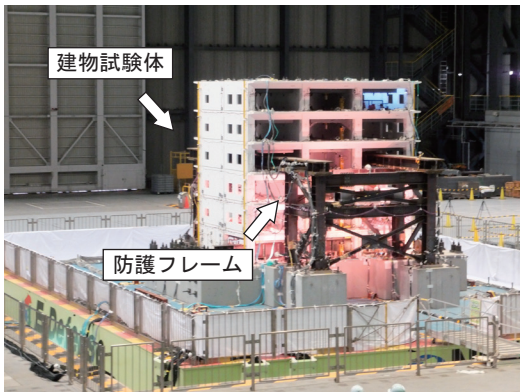
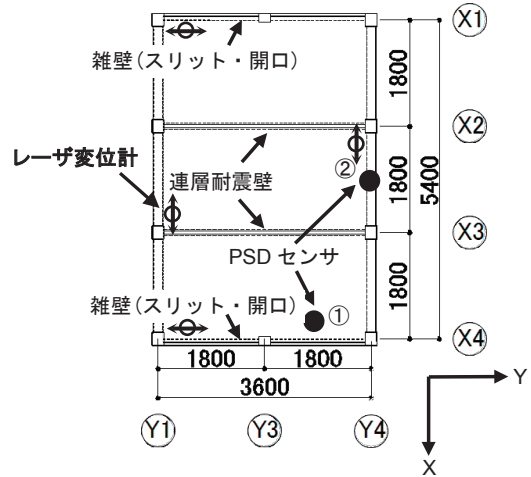
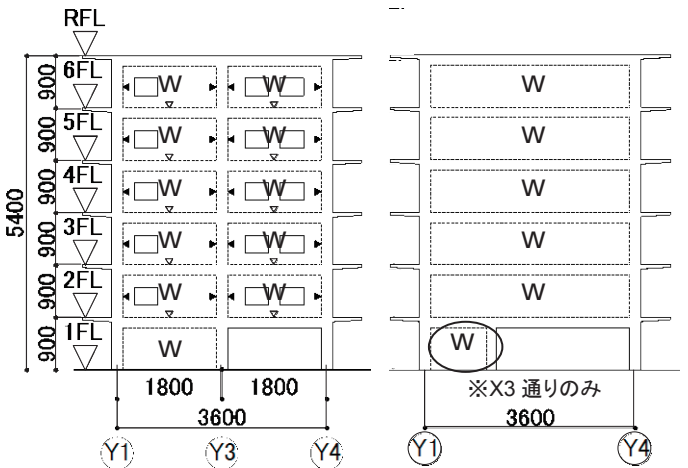


Photo 1 試験体の外観
(Perspective View of Test Specimen)

建物試験体は縮尺 30%, 張間方向を連層耐震壁を含むフレーム構造, 桁行方向を純ラーメン構造とした RC 造 6 層建物である。高さは 5.4m, 平面寸法は 3.6m(1.8m×2 スパン)×5.4m(1.8m×3 スパン), 試験体重量は 1837kN となっている。PSD センサ(2方向計測)の設置箇所は、建物全層(1~6 層)の各層 2 か所ずつ(計 12 台)とした。そして、平面位置は、X4 通り Y3-Y4 間の梁の中央内側位置(床下光源, 設置位置①と称す)と、Y4 通り X2-X3 間の梁の中央位置(梁下光源, 設置位置②と称す)とした。また、PSD センサによる計測結果と比較するための参照として、レーザー変位計(1 方向計測)を建物各階に設置した。

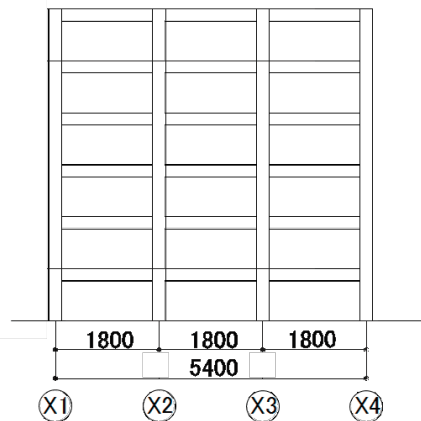


(a) 梁伏図



(b) 軸組図 (X1, X4 通り)

(c) 軸組図 (X2, X3 通り)



(d) 軸組図 (Y1, Y4 通り)

Fig.2 試験体概要
(Outline of Test Specimen)

2. 層間変位計測システム

PSD センサの仕様を Table 1 に示す。ここでは、中小地震時から大地震時まで一般的な建物の層間変位の計測を考慮して製作された装置を、本実験用に調整して用いた。

Table 1 PSD センサの仕様および計測条件
(Specifications of PSD Sensors)

	設置位置① (1~6階)	設置位置② (1~5階)	設置位置② (6階)
計測距離 ^{※1}	815mm	660mm	690mm
計測範囲	±17.9mm	±21.6mm	±22.8mm
計測精度	0.1mm	0.1mm	0.1mm
周波数範囲	静的~25Hz	静的~25Hz	静的~25Hz

※1 PSD受光部接地面からLED光源接地面までの距離

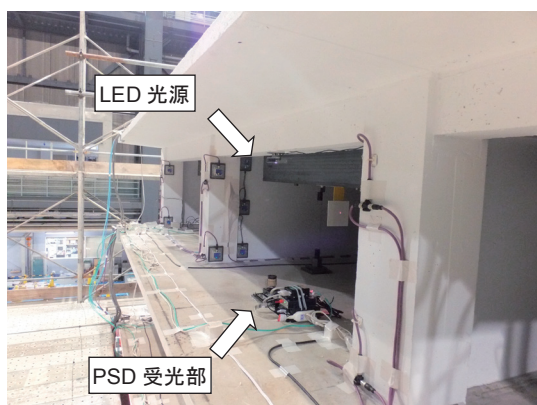
本実験で用いた PSD センサは、受光部、LED 光源、AD 変換ユニット、共通電源、LAN 変換インターフェースから構成され、センサの取付けは、Photo 2 に示すように、上部 LED 光源は上層階のスラブ・梁下固定とし、その他のユニットは下層階のスラブ上に固定した。センサ信号については、各階に設置した A/D 変換ユニットによる 50Hz サンプルングを行い、シリアル通信により 1 台のパソコンで記録した。なお、各階の A/D 変換ユニットに共通のトリガ信号を送ることで、各センサ間の計測データの同期を図った。



(a) 受光ユニット



(b) LED 光源



(c) 設置状況

Photo 2 センサの設置概要
(Arrangement Overview of Sensor Units)

3. 入力地震波

実験では、加振波形として 1995 年兵庫県南部地震時の観測波を採用し、建物試験体の縮尺を考慮して時間軸を $1/\sqrt{3.33}$ にした波形としてレベルを変えた複数ケースの 3 軸加振（水平 2 方向・上下方向）を行った。

ここでは、それらのレベルの異なる加振ケースのうち、柱・梁・壁主筋の降伏が認められた JMA 神戸記録の 70%加振時の計測結果について報告する。

IV. 計測結果の検討

1. 計測結果

非接触型の光学式センサである PSD センサによる計測層間変位には、PSD センサの受光部側のセンサ設置位置における部材の変形などによる局部回転による変位成分が含まれることが確認されている^{9), 10), 13)}。Fig.3 は、その一例として、梁の構面内曲げに起因するセンサ受光部の構面内回転による影響を表している。立体振動時には、このほかに、構面直交方向の変位計測において、この受光部は構面の直交方向の水平変形による梁の材軸回りの回転に伴う構面外の傾きによる影響を受けることが予想される。ここでは、それらのセンサの特徴を考慮しながら、検討を進める。

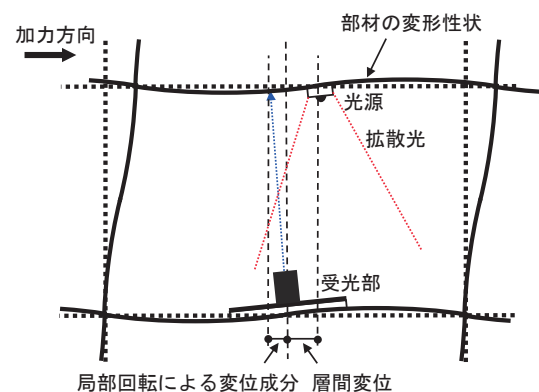


Fig.3 センサ設置位置の梁の面内曲げ変形による局部回転の影響
(Local Rotation Effect by Beam Deflection on Measurement Accuracy)

計測層間変位時刻歴を Fig. 4 に示す。ここでは、各階の床上に固定した治具上に設置したレーザ変位計（建物外周部に各方向 2 か所設置）による計測結果の平均を、PSD センサによる計測結果と比較するための参照値として示す。

まず、第 1 層の PSD センサ(設置位置①)による計測結果が、建物全体のねじれ応答の影響¹⁴⁾により若干小さくなっているものの、レーザ変位計による計測結果と概ね同様の計測結果が得られていることがわかる。

次に、第 3 層の PSD センサによる層間変位計測結果を見ると、本結果には下部の PSD センサの受光部側のセンサ設置位置における局部回転による変位成分が含まれており、建物全体のねじれ応答と合わせてその影響を認めることができる。特に、設置位置②に配した PSD センサの短辺 (Y) 方向の計測結果に顕著に認められ、層間変位計測結果の最大値はレーザ変位計による計測結果の約 60%程度となっている。

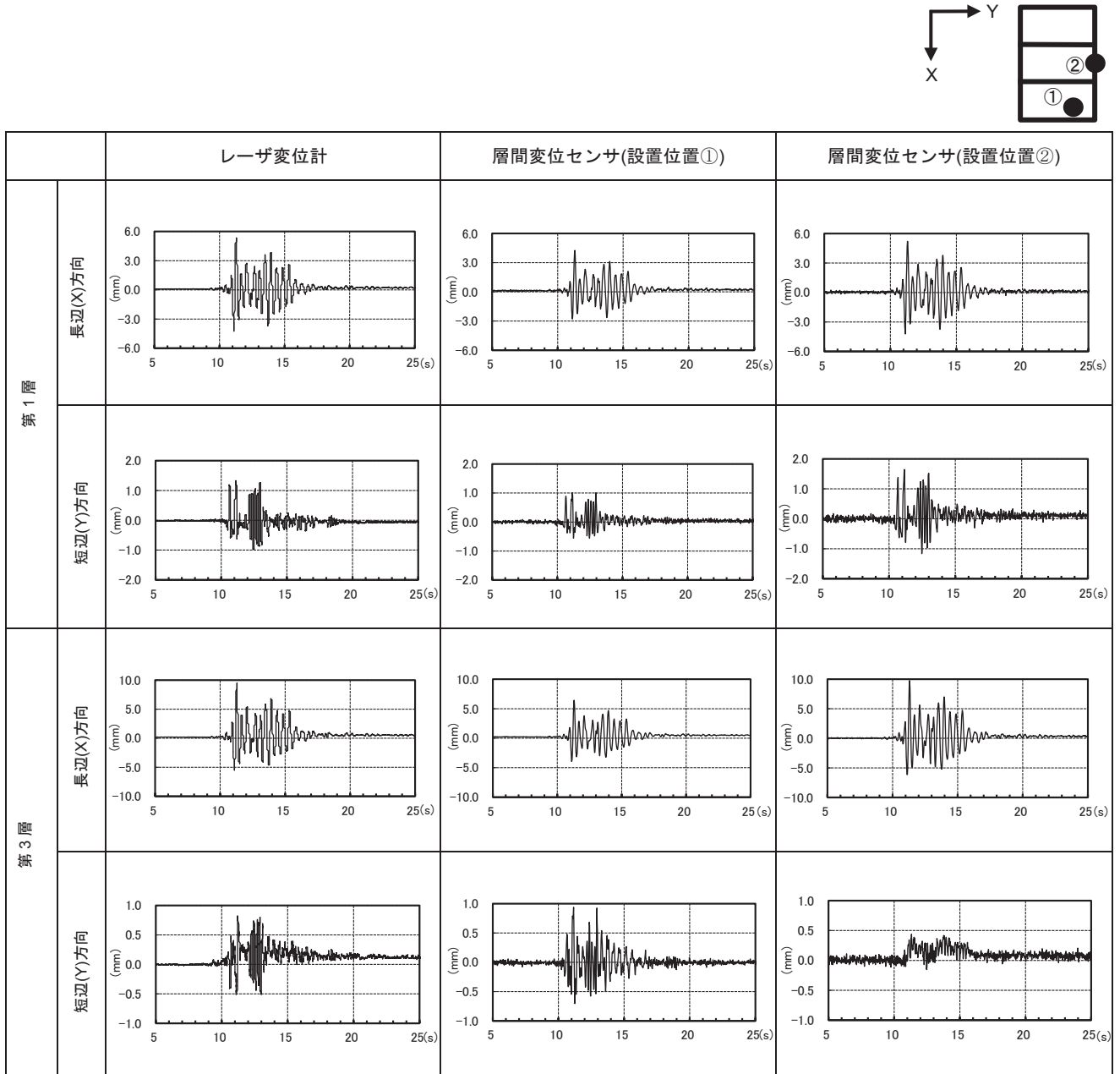


Fig.4 計測層間変位
(Measured Relative Story Displacements)

2. 結果の分析

計測結果について、3次元非線形 FEM 解析¹⁴⁾により、PSD 受光部の設置位置における局部回転が層間変位計測に与える影響について検討する。FEM 解析モデルの外観を Fig.5 に示す。解析では、主筋をロッド要素、耐震壁およびバルコニーをシェル要素、スラブを 2 層のソリッド要素とし、各材料に非線形構成則を設定して建物全体をモデル化し、1 次モード形による静的漸増変位载荷を行った。

解析結果を Fig.6 に示す。Fig.6 は、PSD センサによる第 3 層の計測層間変位に含まれる局部回転の影響を評価するため、FEM 解析から得られた、PSD 受光部のセンサ設置位置における局部回転による水平変位成分と層間変位の和 (PSD センサによる計測値に相当)

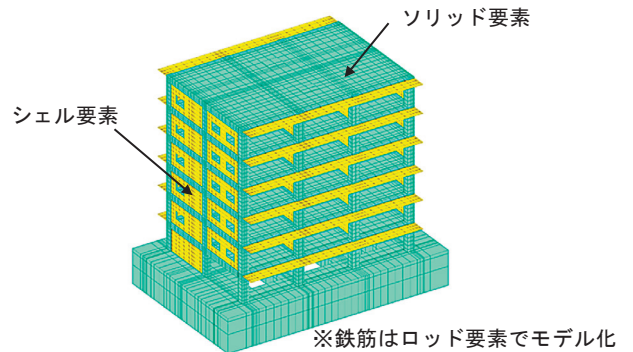


Fig.5 FEM 解析モデル
(FEM Analytical Model)

の層間変位に対する比率（ここでは計測比と定義する）を、層間変位量を変数（横軸）として示したものである。本図では、計測比 1.0 が局部回転の影響がない状態を示している。本解析結果から、第 3 層の設置位置②に配したセンサの短辺 (Y) 方向の計測比に着目すると、その値が 0.6 以下となっており、これが前節 IV.1 で認められた PSD センサによる計測結果がレーザ変位計の約 60%程度となった要因と推察される。これは、Fig.7 の模式図に示すような、短辺 (Y) 方向に配された耐震壁による建物各層の全体曲げ変形に伴う壁直交梁の材軸回りの回転による影響が、短辺 (Y) 方向の計測層間変位に表れたものと考えられる。

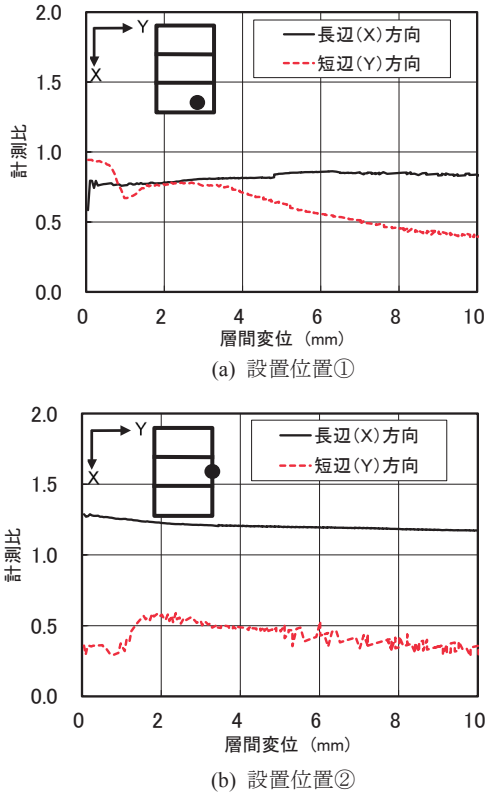


Fig.6 FEM 解析による第 3 層のセンサ設置位置の局部回転の計測に与える影響

(FEM Analysis of Local Rotation Effect on Measurement Accuracy of the 3rd Story)

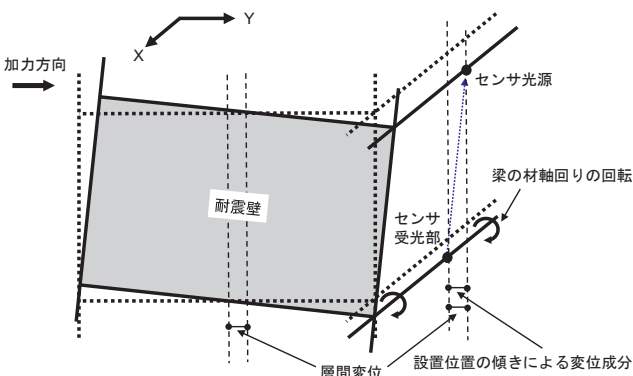


Fig.7 センサ設置位置の梁の材軸回りの回転の影響

(Local Rotation Effect by Beam Torsion on Measurement Accuracy)

V. おわりに

本論文では、立体挙動を示す建物における PSD センサの層間変位計測の特性を実計測により把握することを目的に、E-ディフェンスで行われた縮小 6 層 RC 造耐震壁付きフレーム建物の震動台実験において PSD センサによる層間変位計測を実施した。そして、計測された層間変位データを建物の FEM 解析モデルを用いて分析した。

本実験で得られた PSD センサの層間変位計測データから、特に、第 3 層の梁下 (設置位置②) に配したセンサの短辺 (Y) 方向の計測結果が実際の層間変位に比べてかなり小さくなることが確認された。FEM 解析結果より、これは、試験体の短辺 (Y) 方向に配された耐震壁による建物各層の全体曲げ変形に伴う壁直交梁の材軸回りの回転による影響が大きく表れたものと考えられる。

非接触型の光学式センサである PSD センサを用いた層間変位計測システムの実適用において、このような PSD 受光部のセンサ設置位置における局部回転の影響を考慮することは重要であり、センサ設置位置の局部回転の影響を取り除く対処法^{10), 15)}の導入の必要性を強調するとともに、本論文で得られた結果はセンサ設置位置を検討際の知見となるものである。

謝 辞

本研究は、平成 27 年度文部科学省委託研究「都市の脆弱性が引き起こす激甚災害の軽減化プロジェクト ②都市機能の維持・回復に関する調査研究」の一部である。また、早稲田大学理工学術院・大泊巖、西谷章、庄子習一、谷井孝至、金川清各氏および足利工業大学・仁田佳宏氏、長岡技術科学大学・松谷巖氏のご指導、並びに鹿島建設技術研究所の森川博司氏のご協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Takahashi, M., Nasu, T. and Kobori, T. ; Proposal for Real-time Disaster Mitigation System with Structural Control Systems, Proceedings of the Structural Health Monitoring and Intelligent Infrastructure, Vol.2, 2003.11, pp.953-961.
- 2) 仁田佳宏, 西谷章; 各層を単位とするサブシステムの同定に基づく剛性のヘルスマonitoring, 建築学会構造系論文集, 第 68 巻, 第 573 号, 2003.11, pp.75-79.
- 3) 杉浦雄大, 矢口友貴, 西谷章, 仁田佳宏; MEMS センサによる多層建築物の損傷検出, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, 2008.9, pp.235-236.
- 4) 南方俊一, 大橋吉雄, 大南亮一, 坂元義隆; 兵庫県南部地震における神戸クリスタルタワービルの耐震性について, 日本建築学会技術報告集, 第 1 号, 1995.12, pp.147-152.
- 5) 飯山かほり, 栗田哲, 源栄正人, 千葉一樹, 櫻田佑太, 三辻和也; 2011 年東北地方太平洋沖地震で損傷した鉄筋コンクリート造 3 階建て建物のモード特性と損傷階の推定, 日本地震工学会論文集, 第 12 巻, 第 5 号(特集号), 2012.11, pp.207-224.
- 6) 尾野勝, 金澤健司, 飯野夏輝, 佐藤大樹, 北村春幸, 長江拓也; 実大震動台実験における高層鉄骨造建物の地震損傷検知, 日本建築学会構造系論文集, 第 76 巻, 第 662 号, 2011.4, pp.775-783.
- 7) 建築物の構造関係技術基準解説書編集委員会編; 2007 年版建築

- 物の構造関係技術基準解説書, 全国官報販売協同組合, 2007.
- 8) Matsuya, I., Tomishi, R., Sato, M., Kanekawa, K., Nitta, Y., Takahashi, M., Miura, S., Suzuki, Y., Hatada, T., Katamura, R., Tanii, T., Shoji, S., Nishitani, A. and Ohdomari, I. ; Development of Lateral Displacement Sensor for Real-time Detection of Structural Damage, IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, Vol.6, No.3, 2011.5, pp.266-272.
- 9) 畑田朋彦, 高橋元一, 鈴木康嗣, 松谷巖, 金川清, 仁田佳宏, 西谷章; 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, 第 75 巻, 第 653 号, 2010.7, pp.1257-1264.
- 10) 畑田朋彦, 片村立太, 萩原一, 高橋元一, 仁田佳宏, 西谷章; 層間変位計測に基づいた損傷評価法の実大建物震動台実験データを用いた検証, 日本建築学会構造系論文集, 第 78 巻, 第 686 号, 2013.4, pp.703-711.
- 11) 勝俣英雄, 増田安彦, 杉本訓祥, 米澤健次, 西村勝尚, 三浦耕太, 西山峰広, 真田靖士, 松森泰造; 縮小 6 層 RC 造耐震壁フレーム建物試験体の振動台実験 (計画概要) その 8 RC 造建物の崩壊余裕度定量化に関する研究開発, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, 2015.9, pp.339-340.
- 12) 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, B-2, 2016.8, pp.999-1000.
- 13) Katamura, R., Hatada, T., Hagiwara H., Suzuki, Y., Nitta Y. and Nishitani A. ; Experimental verification on measurement error correction method for noncontact-type relative displacement sensor, Proceedings of the 9th International Workshop on Advanced Smart Materials and Smart Structures Technology, 2013.
- 14) 森川博司; ブラインド解析による鉄筋コンクリート造柱梁接合部の 3 次元 FEM 解析法の構築, 鹿島技術研究所年報, 第 60 号, 2012.9, pp.79-84.
- 15) Matsuya, I., Katamura, R., Sato, M., Iba, M., Kondo, H., Kanekawa, K., Takahashi, M., Hatada, T., Nitta, Y., Tanii, T., Shoji, S., Nishitani, A. and Ohdomari, I; Measuring Relative-Story Displacement and Local Inclination Angle Using Multiple Position-Sensitive Detectors, Sensors, Vol.10, No.11, 2010.11, pp.9687-9697.

Property Analysis of Relative Story Displacement Measurement System Using Noncontact-type Sensors in Three-dimensional Shaking Table Tests on RC Wall-framing Building

Tomohiko Hatada and Ryuta Katamura

This study concerns the property analysis of a relative story displacement measurement system using noncontact-type sensors in shaking table tests on an RC wall-framing building. The system uses noncontact-type optical displacement position-sensitive detectors (PSDs) consisting of a light source and a sensing unit. The PSDs are installed between adjacent pairs of floors and can directly measure relative story displacements during earthquakes. To analyze the basic properties of the system in three-dimensionally excited buildings during earthquakes, relative story displacements were measured using PSDs in an E-Defense shaking table test on a 6-story RC wall-framing building. The basic properties are discussed by analyzing the measurement records from sensors using FEM analysis. The results show the effectiveness of the system and identify the issues to be improved for its application to structural health monitoring systems.