

観測記録に基づく RC 造建物の振動特性と 耐震補強効果に関する調査研究

—広島工業大学本館棟を対象として—

山下 航平*・渡壁 守正**・久保川 淳司***・光井 周平**・黒河 真*

(令和 4 年10月28日受付)

Evaluation of Dynamic Properties and Seismic Resistance of The RC Building Before and After Retrofitting Based on Microtremor Measurements

—Using The Main Office Building in Hiroshima Institute of Technology—

Kohei YAMASHITA, Morimasa WATAKABE, Junji KUBOKAWA,
Shuheji MITSUI and Makoto KUROKAWA

(Received Oct. 28, 2022)

Abstract

In order to verify the seismic reinforcement effect to the RC building quantitatively, Microtremor measurement was carried out for the main building before and after the reinforcement and compared the dynamic characteristics derived from microtremors. As a result, natural frequencies estimated by the microtremor records before the seismic reinforcement are approximately 25~30% bigger than those estimated by these records after the seismic reinforcement. The results show that the reinforcement method significantly increases the stiffness of a RC building. Furthermore, this paper presents the Structural Health Monitoring (SHM) system using Internet of Things (IoT) to improve for the earthquake disaster reduction and maintainability of buildings.

Key Words: Seismic Reinforcement, Dynamic Characteristics, Microtremor Measurement, Structural Health Monitoring System

1. はじめに

耐震補強関連の法律は、度重なる地震の経験から、変化している。大きな変化としては、1981年6月に耐震基準が大きく改正され、新耐震基準が誕生した。1995年に兵庫県南部地震が起こり、その教訓から、同年12月に「建築物の耐震改修の促進に関する法律（耐震改修促進法）」が施行された¹⁾。さらに、より積極的な耐震化の促進を目的として、耐震改修促進法が改正され、病院、店舗、旅館等の不

特定多数の者が利用する建築物及び学校、老人ホーム等の避難弱者が利用する建築物のうち大規模なものなどの所有者は、耐震診断を行うことが定められた²⁾。耐震補強効果は、一般的に構造計算から確認されるが、現場施工精度の影響を考慮することは難しいとされている。2016年の熊本地震では、耐震補強をした建物にもかかわらず被害を受け、本来は避難場所として利用される体育館でも、その役目を果たすことができなかつた事例が報告されている³⁾。同時に地方の耐震補強対策の遅れや耐震補強性能の問題が

* 広島工業大学大学院工学系研究科環境学専攻 大学院生

** 広島工業大学環境学部建築デザイン学科

*** 広島工業大学工学部電気システム工学科

指摘されており、耐震補強の有効性について定量的な検討はほとんどされていない⁴⁾。

本研究では、広島工業大学本館棟の耐震補強改修工事に伴って、常時微動測定を計画しその計測データを基に耐震補強工事前、途中、改修後での振動特性の変化に着目し、耐震補強効果の有効性に関して検討を行う。また、今後の施設の安全管理、保守点検や被害軽減に貢献できるシステムとして、本館棟の振動特性の経時変化を把握できる「建物健全性モニタリングシステム」を構築した。構築したモニタリングシステムの概要についても記述する。

2. 対象建築物及び耐震補強の概要

2.1 耐震補強建物の概要

広島工業大学本館は、鉄筋コンクリート造7階建ての事務所建築であり、架構方式は長辺方向（以下、X方向）、短辺方向（以下、Y方向）とも、一部耐震壁を含むラーメン構造となっている。竣工時期は昭和43年であり、竣工から54年が経過している。建物形状は、平面形状・立面形状とも整形である。延べ面積は2977.23㎡、X方向は24.0m、Y方向は20.0mである。

本建物は、耐震診断の結果、目標値を満たしていない建物であり、平成13年に発生した芸予地震に遭遇している。直接地震による影響であるかは断定できないが、壁には、目視可能な範囲で亀裂が見受けられる。写真1に建物の外観を示す。



写真1 広島工業大学本館の外観

2.2 耐震改修診断結果及び耐震改修計画

広島工業大学では、1981年以前に竣工した研究棟において順次耐震診断を実施しており、本館棟においても平成25年10月と令和3年11月に耐震診断が行われている。本館の耐震補強概要として、令和3年11月に報告された耐震診断

書の「広島工業大学本館棟改修・耐震補強工事 耐震改修報告書」を参考資料として扱う⁵⁾。

耐震診断は大旗連合建築設計株式会社によって実施された。耐震診断内容は、主に現地調査と算定調査である。現地調査は、目視調査により設計図書との照合調査、履歴外観調査、ひび割れ等の損傷状況調査が行われた。またコンクリートコアを採取し、圧縮強度試験及び中性化調査が行われた。算定調査については、「2001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・同解説⁶⁾」を基準に、構造耐震指標 I_s 値及び保有水平耐力指標 q 値より判定された。耐震診断結果は、表1に示すようにX方向の I_s 値が目標耐震判定指標0.70を1～5階で下回り、「想定する地震動に対して所要の耐震性能に疑問あり。」とされ、Y方向についても、 I_s 値が目標耐震判定指標0.70を1～5階で下回り、同様に判定された。また、コンクリート壁の面外方向の転倒は検討結果、所要の耐震性能を満足していないとされた。

耐震改修計画の補強方針は以下とされた。X方向1～5階は、鉄骨ブレース及び増設壁により耐力増強および偏心率の改善を行い、また1階は開口閉塞により耐力補強を行う。またY方向1～5階は、鉄骨ブレースにより耐力補強を行う。改修後の診断結果は、X・Y方向ともに目標耐震判定指標を全階で上回り、「安全（想定する地震動に対して所要の耐震性を確保している）」とされた。

表1 耐震補強前後の I_s 値の比較

階数	X方向		Y方向	
	I_s 値（補修前）	I_s 値（補修後）	I_s 値（補修前）	I_s 値（補修後）
7	1.20	1.13	1.23	1.19
6	0.86	0.73	0.80	0.701
5	0.43	0.75	0.48	0.74
4	0.31	0.73	0.39	0.75
3	0.26	0.84	0.31	0.85
2	0.33	0.72	0.33	0.74
1	0.32	0.74	0.35	0.71

2.3 耐震補強工事概要

耐震補強は、X方向に17基、Y方向に17基の合計34基の鉄骨ブレース補強、またX方向において6箇所の耐震壁増打が行われた。ブレース・耐震壁の設置箇所を示す代表的な軸組図を図1、2、ブレースの施工状況（赤塗りつぶし部分）を写真2、耐震壁の施工状況（黄塗りつぶし部分）を写真3にそれぞれ示す。

3. 常時微動計測の概要

3.1 計測概要及び計測記録

常時微動測定は、補強前、補強途中、補強後の計3回行った。補強前と補強途中では6台の速度センサを用いて

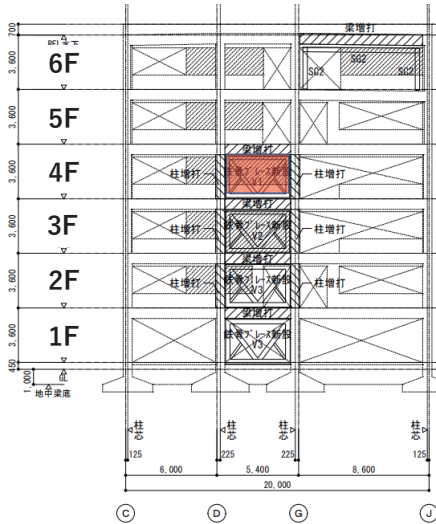


図1 17通り軸組図 (ブレース)



写真2 4階17通り 鉄骨ブレース施工状況

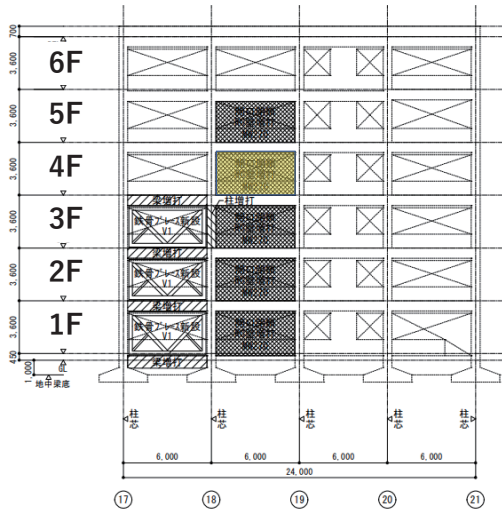


図2 J通り軸組図 (耐震壁)

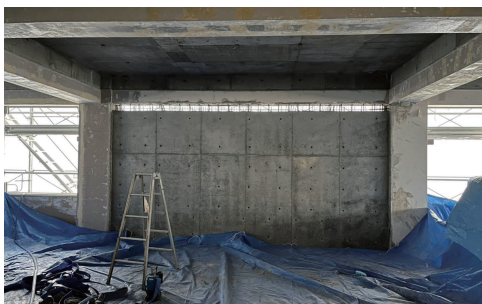


写真3 4階J通り 耐震壁施工状況

測定を行ったが、補強後の測定に関しては、センサに不具合が起こったため、4台のセンサを用いて実施した(表2)。測定内容は、建物のX方向、Y方向の並進2方向と建物1Fでの上下方向の測定、人力加振測定、ねじれ測定である。補強前と補強途中の測定は、1F、3F、5F、屋上の4点とし、1Fにおいて上下方向の測定器を2点に配置した(図3、4)。補強後の測定は計測器が4台であ

表2 建物のセンサ設置位置とチャンネル対応

	ケース	Analog1	Analog2	Analog3	Analog4	Analog5	Analog6	Analog7
耐震補強前	X方向	1F水平	1F上下	1F上下	3F水平	5F水平	RF水平	
	Y方向	1F水平	1F上下	1F上下	3F水平	5F水平	RF水平	
耐震補強後	X方向			1F上下	1F水平		5F水平	RF水平
	Y方向			1F上下	1F水平		5F水平	RF水平

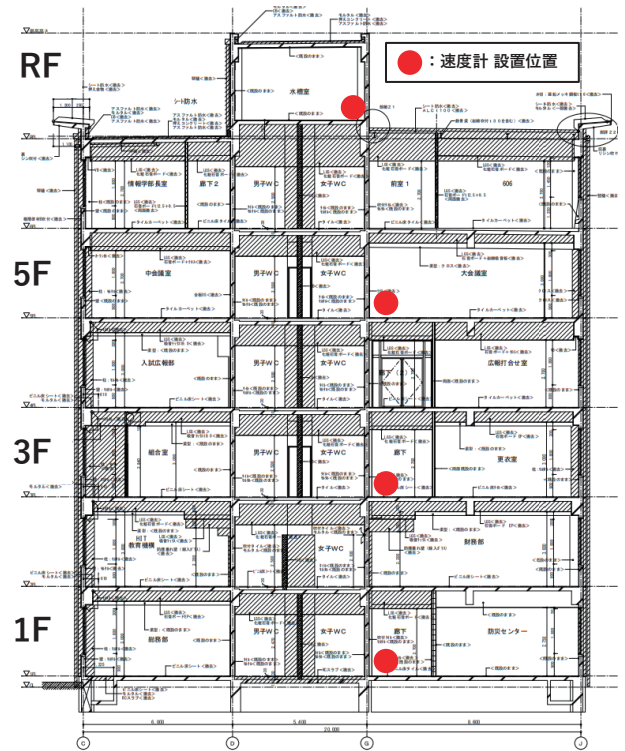


図3 補強前センサ設置位置 (断面図)

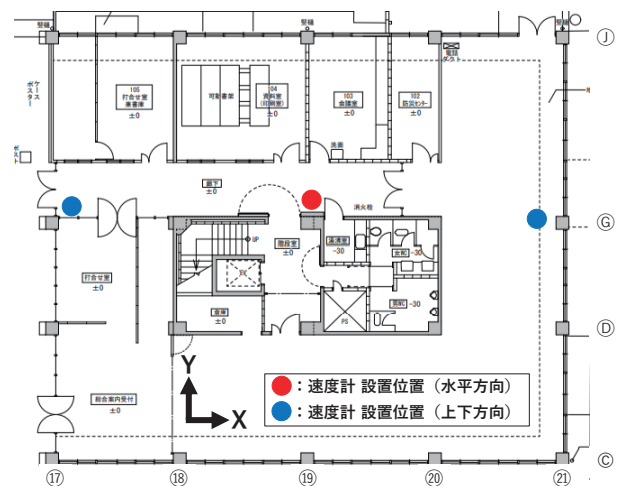


図4 補強前センサ設置位置一例 (1F平面図)

たため、1F、5F、屋上にて実施した。上下方向は補強前、補強途中と同様に実施した。人力加振測定は、並進測定と同箇所にて測定を行い、並進測定にて確認した建物の固有振動数に合わせ、5Fの耐力壁を押すことで実施した。ねじれ測定は、屋上の長辺・短辺の両端にそれぞれ配置している。測定データは、フーリエスペクトル解析とフーリエスペクトル比により建物躯体の固有振動数を推定した。解析にあたっての条件は、サンプリング周波数100Hz、バンドパスフィルタを0.1Hzとした。本報では、紙面上、耐震補強前後の比較によって解析・分析を実施する。

3.2 分析結果による耐震補強前後での建物振動特性

耐震補強前後の記録に関して、一例として耐震改修前の各階の加速度波形及びフーリエスペクトルを図5、6に示す。1階から上階に行くに従って、振幅が大きくなっていることが確認できる。つまり、信頼できる比較的安定した記録である。補強後の記録も同様であった。

微動測定で得られた記録から、各階のフーリエスペクトルを求め、建物の各階と1階間のフーリエスペクトル比に

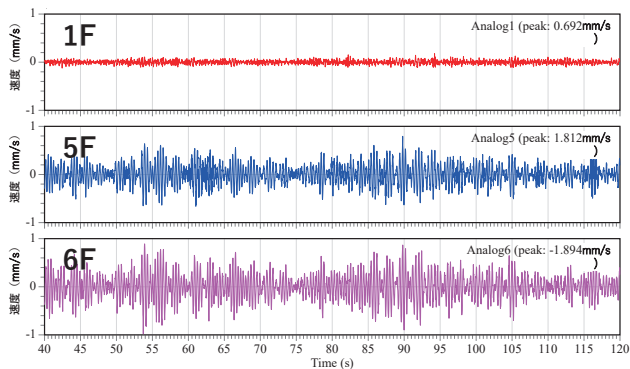


図5 耐震改修前の変位記録波形 (X方向)

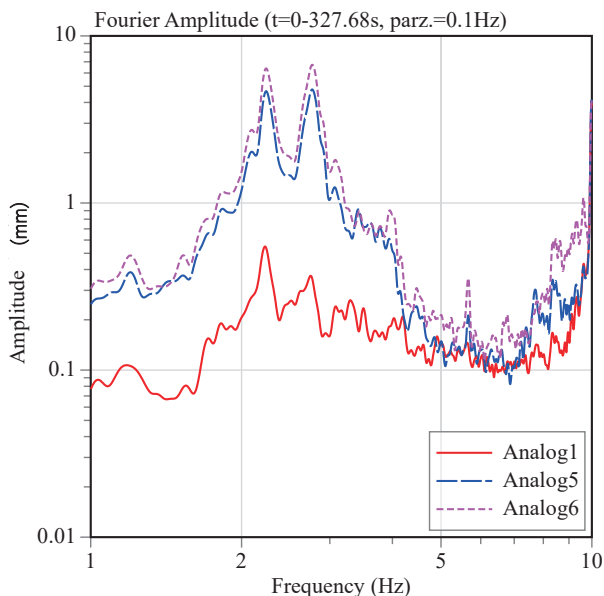


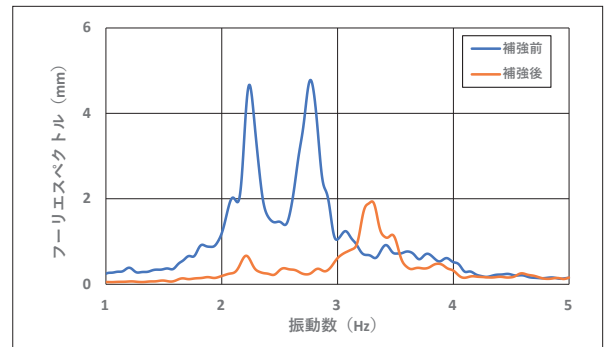
図6 耐震改修前のフーリエスペクトル (X方向)

より伝達特性を求めた。1階と5階の補強前後のフーリエスペクトル及びフーリエスペクトル比をX・Y方向で求めた結果を図7、8にそれぞれ示す。図中の青色の波形が耐震補強前、橙色が耐震補強後の振動特性を示す。これらのスペクトル比より求めたX・Y方向の卓越振動数を耐震補強前後で比較し、表3にそれぞれ示す。

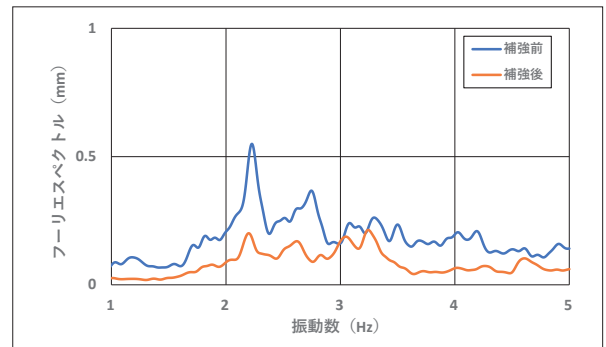
耐震補強前後のX方向の1次固有振動数は、補強前の2.808Hzから補強後では3.492Hzとなり、約24%増大し、Y方向の1次固有振動数は、補強前の2.307Hzから補強後

表3 耐震補強前後の1次固有振動数の比較

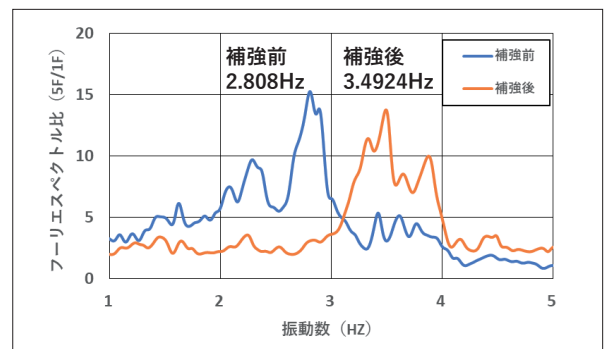
	耐震補強前	耐震補強後	増大率
X方向	2.808Hz	3.492Hz	1.24倍
Y方向	2.307Hz	2.764Hz	1.20倍



(a) 5F フーリエスペクトル



(b) 1F フーリエスペクトル



(c) フーリエスペクトル比 (5F/1F)

図7 X方向

では2.764Hzとなり、約20%増大していることが分かる。

図9は横軸に耐震改修前後の I_s 値、縦軸に1次固有振動数を取り、その関係を示したものである。図中の I_s 値は、耐震補強前から I_s 値=0.70を超えていた5階より上階を除いた1～5階の I_s 値平均を示している(表1参照)。図から I_s 値が耐震改修前に比べ、約5割増加し、X・Y方向で目標耐震判定指標である I_s 値=0.70を上回ったことで、1次固有振動数が大きくなる傾向が確認できる。

人力加振で得られた記録において、減衰が開始した値を基準とし、減衰波形の包絡線を算出することで減衰定数を求めた。耐震補強前後におけるX・Y方向の減衰波形をそれぞれ図10, 11に示す。また耐震補強前後の減衰定数の比較を図12に示す。耐震補強前の減衰定数は、X方向で2.6%、Y方向で2.1%であり、耐震補強後の減衰定数はX

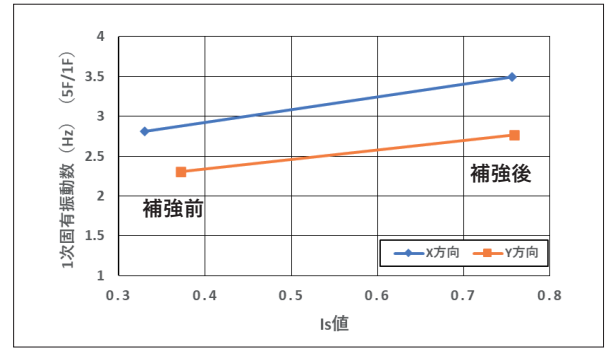
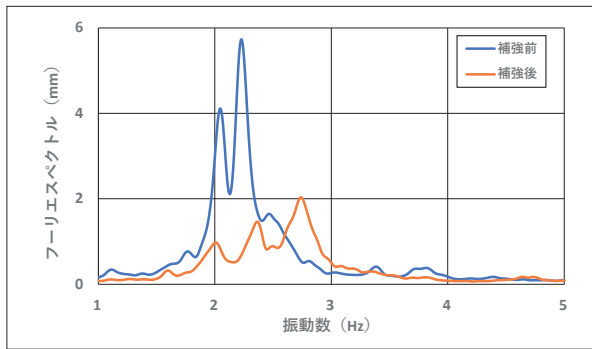
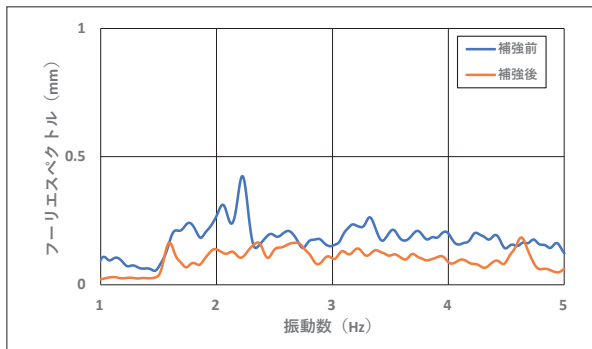


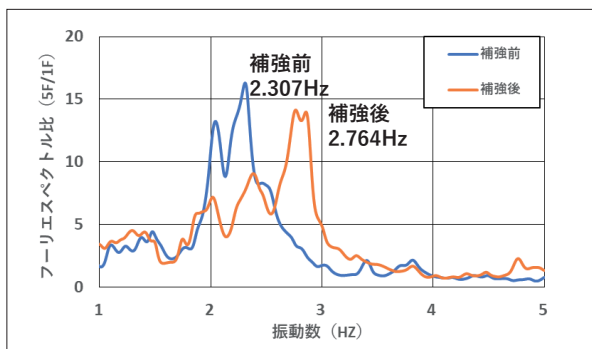
図9 耐震補強前後の I_s 値と1次固有振動数



(a) 5F フーリエスペクトル

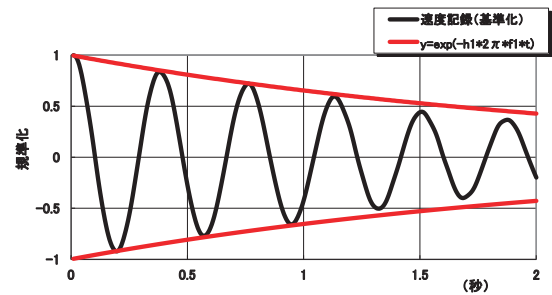


(b) 1F フーリエスペクトル

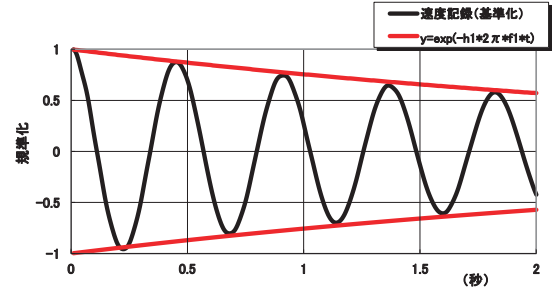


(c) フーリエスペクトル比 (5F/1F)

図8 Y方向

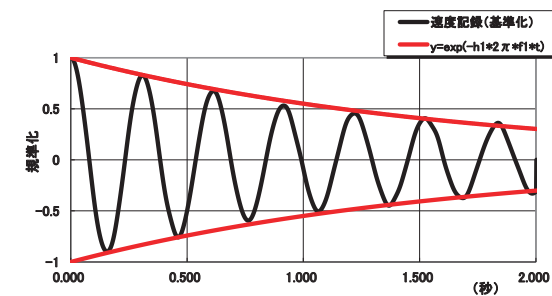


(a) X方向

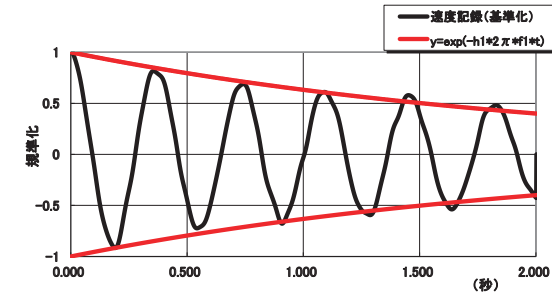


(b) Y方向

図10 耐震補強前の1次減衰定数



(a) X方向



(b) Y方向

図11 耐震補強後の1次減衰定数

方向で2.9%，Y方向で2.6%であった。耐震補強により、両方向で減衰定数が高くなる傾向が見られた。表4に耐震改修前後の1次固有振動数と1次減衰定数の比較を示す。

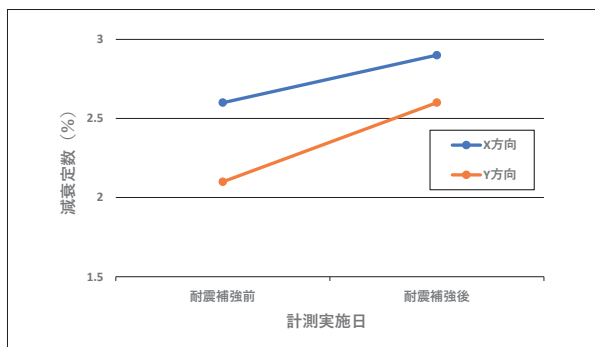


図12 耐震補強前後 減衰定数の比較

表4 耐震補強前後の固有振動数・減衰定数の比較

	ケース	耐震補強前	耐震補強後
1次固有振動数	X方向	2.808Hz	3.492Hz
	Y方向	2.307Hz	2.764Hz
1次減衰定数	X方向	2.6%	2.9%
	Y方向	2.1%	2.6%

4. 建物健全性モニタリングシステム構築

2011年東北地方太平洋沖地震や2016年熊本地震など、数百年に一度と呼ばれるような大震災が日本各地で発生している。現在、南海トラフ地震の今後30年以内発生確率は70～80%と言われている中、地震による人命や資産などの被害を最小限に抑えるため、既に建築物の耐震診断や最適な耐震補強は全国各地で進んでいる。

4.1 MEMS センサを利用した構造ヘルスマニタリング

MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 加速度センサは、微細な加工により半導体のシリコンチップ上に形成された超小型デバイスで、数多くのデジタル機器に組み込まれ、高精度で信頼性の高いセンサなど複雑で高度な役割を果たしており、また消費電力が僅かなことから、デジタル機器の小型化、長期間の動作を可能としている⁷⁾。

本研究ではMEMS 加速度センサとしてテキサスインスツルメンツ社製のADXL355を使用した。本センサはノイズ密度が $2.5\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ で、低ノイズかつ低消費電力という特徴を持つ。加速度は100msのサンプリング間隔でxyz軸方向の3軸同時計測が可能である。

このセンサをaa内蔵するセンサボックスのシステムはRaspberry Piで構成され、センサの計測結果を容易に学内ネットワークを介して仮想サーバ上のWINシステムに送信することができる。WINシステムは多チャンネルの地震波形データを取り扱うための処理システムであり、東京大学地震研究所が定義したWINフォーマット形式のデータを送受信することができる。

学内の仮想サーバではWINサーバが受け取ったデータを可視化する機能がある。また、WINサーバに保存されているデータの必要部分を選択し、パソコン上に転送することができ、データをCSV形式に変換することで、さまざまな解析ソフトウェアで処理することができる。

建物の健全性評価システムは、センサが取得する観測データを分析することで、建物の振動特性を把握し、傾斜角度を読み取り、長期間の経時変化を監視することができる。また大規模な地震発生時には、1次診断として建物に生じる揺れ観測データから健全性を判定し、異常が認められる場合は、2次診断で損傷箇所を推定することが可能となる。MEMSセンサによるデータ収集の概要を図13、本館におけるセンサ設置位置を図14、15にそれぞれ示す。

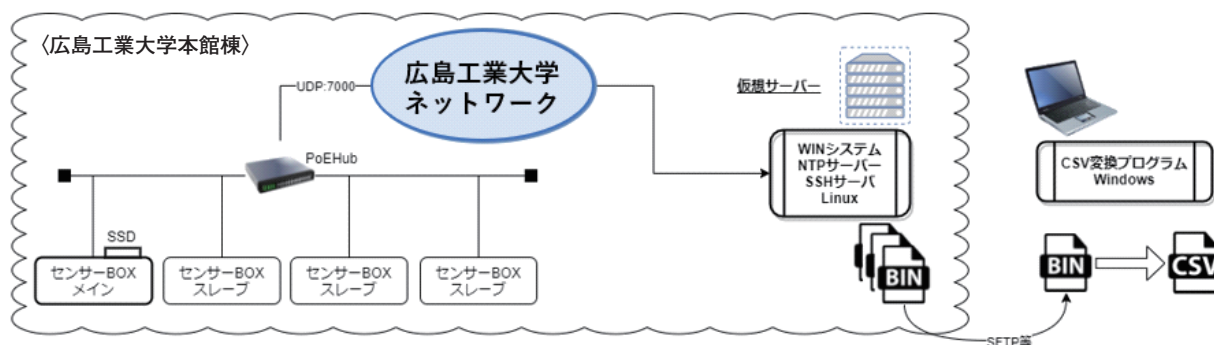


図13 MEMS センサによるデータ収集の概要

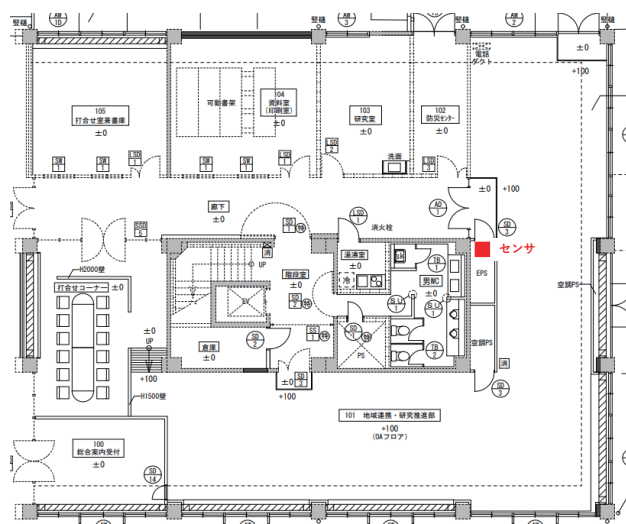


図14 MEMS センサ設置位置一例（1F平面図）

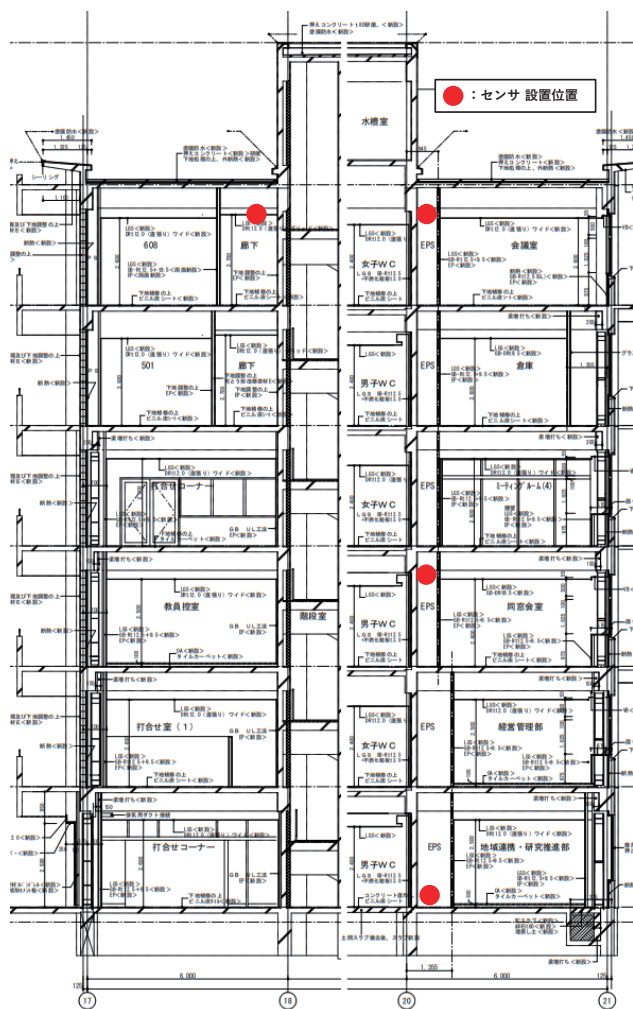


図15 MEMS センサ設置位置（断面図）

4.2 建物健全性モニタリングシステムの概要

構造ヘルスモニタリング（SHM: Structural health monitoring）は、建築物にセンサを設置し、建物の振動観測記録等を蓄積し、様々な分析手法を用いて損傷や劣化状態をリアルタイムに診断・予測する技術である。現在、多くの新築・既存建物に適用されており、構造成能や維持管理に役立てられている。最近では、民間企業において事業継続計画（BCP: Business Continuity Planning）の重要な要素である、地震直後の被災建物の応急危険度判定の代替として建物健全性診断に応用できないか関心が高まってきている。

建物の損傷推定は、一般的に、建物全体から2次部材までの全体から局所の損傷へと段階的に絞り込みながら推定される。今回は、建物の安全性や維持管理に役立てるために必要なデータを取得するために、IoTを活用した簡易なシステム構築を行った。将来観測される実測データを基に、小地震や常時微動により求めた振動特性を蓄積する。事前に蓄積した分析結果を活用することで、大地震や台風など損傷の発生する可能性がある場合に損傷程度を早期に検知し2次被害を軽減できる。また、長期に蓄積された観測データにより経年劣化の把握が確認でき、建物の維持管理など様々な状況を配慮しながら、総合的な損傷推定システムの構築が可能となる。SHMによる建物健全性評価及び維持管理システムイメージを図16に示す。

先に示したSHMシステムを構築することで災害発生後速やかに元の状態に戻す「レジリエンス（回復力）」性を備えたシステムへと展開できる。レジリエンスとしての備えは、リアルタイムな状況対応と早期の復旧対策の仕組みを兼ね備えたシステムが必要となる。このようなリアルタイムなシステムが完成すれば、非常時に人の行動判断をすばやく行う手助けに繋がる。本システムは、非常時だけではなく平常時も使われるシステムであることが重要である。非常時対応のシステムではいざというとき、システムが正常に動作しなかったり、貴重なデータが記録されなかったりする場合がある。そのような事態を避けるため、そのシステム自体が平常時から可動しており、平常時と非常時でシームレスに対応できることが望ましい。将来は、このようなレジリエンスなシステムを実現することが出来ればと考えている。

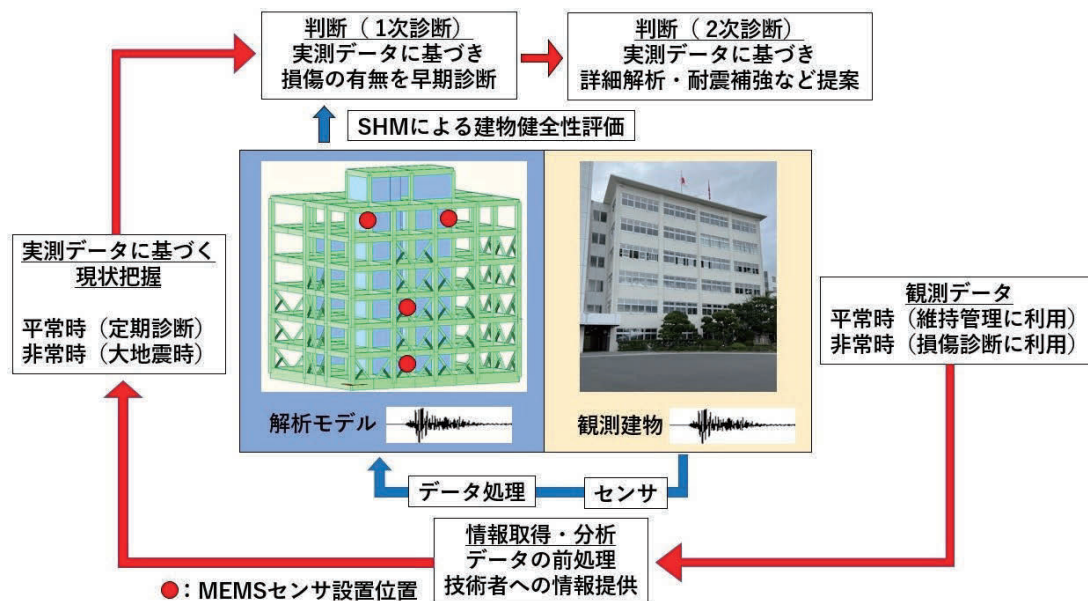


図16 SHMによる建物健全性評価および維持管理システムのイメージ

5. まとめ

耐震補強が施された広島工業大学本館を対象に、耐震補強効果を確認する目的で以下の知見を得た。

- (1) 常時微動測定で得た記録の分析・解析から、耐震補強後の建物の1次固有振動数は、補強前と比較してX方向で約24%、Y方向で約20%増大しており、耐震補強工事の効果を定量的に示すことができた。
- (2) 補強前においてX・Y方向ともに I_0 値の低かった1～5階は、耐震補強工事により耐震性が向上していた。その結果を、各方向の1次固有振動数の比較により確認できた。
- (3) 減衰定数は、耐震補強前に比べ耐震補強後の方が高くなる傾向をX・Y方向ともに確認できた。
- (4) 設計値通り施工がされているかは、耐震補強前後で常時微動測定を実施することで、補強効果がある程度定量的に求めることができ、本館における耐震補強工事は有効であることが確認できた。

今後、「建物健全性モニタリングシステム」を構築することで、地震時の耐震補強効果による地震被害の軽減を定量的に評価すると同時に、劣化や損傷を定期的に診断する役割も果たすことができる。

謝辞

本報告の常時微動測定は、広島工業大学渡壁研究室の4年生と光井研究室の4年生、大学院生及び株式会社フジタ、工事関係者の皆様にご協力を頂いた。建物健全性モニ

タリングシステムの構築には、中外テクノス株式会社にご協力を頂いた。また波形解析の一部には、国立研究開発法人建築研究所のViewWaveソフトを使用した。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 船木尚己, 作間陵, 井上剛志, 小澤昌広: 報告 東北地方太平洋沖地震におけるRC造建物の耐震補強効果の検証, コンクリート工学年次論文集 Vol.34, No. 2, 2012
- 2) 小川富由, 鈴木毅彦: 建築物の耐震改修促進法改正と政策の展開, 地学雑誌116 (3/4) 516-523, 2007
- 3) 矢野貴大, 後藤勝彦, 友清衣利子, 山成實: 熊本地震における学校体育館の避難所利用状況調査と検討 その1 避難所利用の状況, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東北), 2018. 9
- 4) 宝音図, 川瀬博, 松島信一: 微動観測による構造物の耐震補強前後の振動特性とその耐震性評価—宇治キャンパス本館を対象に—, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2010. 9
- 5) 大旗連合建築設計株式会社: 広島工業大学本館棟改修・耐震補強工事 耐震改修報告書, 2021.11
- 6) 日本建築防災協会: 2001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・同解説, 2004. 2
- 7) 小川修一, 三田章 “構造ヘルスマニタリングの実用化に関する研究”. 日本地震工学会論文集, 2009, vol. 9, no. 5, p. 1-15.