解体（減築）工事にともなう鉄筋コンクリート造建物の振動特性

VIBRATIONAL CHARACTERISTICS OF REINFORCED CONCRETE BUILDING DURING DEMOLITION WORK (REDUCTION PROCESS)

土田崇仁 — * 1 宿里勝信 — * 2
青木孝義 — * 3

Takahito TSUCHIDA — * 1 Katsunobu YADORI — * 2
Takayoshi AOKI — * 3

キーワード：
減築、常時微動計測、振動特性、耐震補強、等価1自由度系

Keywords:
Reduction process, Microtremor measurement, Vibrational characteristics, Earthquake strengthening, Equivalent single degree of freedom system

In this paper, we present the experimental results of a series of microtremor measurements of a RC building during demolition work (reduction process) in order to clarify their properties in dynamics. The RC building was reduced from 5 stories + 1 story penthouse to 4 stories. We conducted microtremor measurements before, during and after reduction process. Natural frequencies of the RC building were increased in accordance with its reduction process and strengthening works. Based on the equivalent single degree of freedom system, influence of weight reduction and stiffness increment on natural frequencies by reduction process and seismic strengthening is clarified.

1. はじめに

巨大地震の切迫性が指摘されている状況に鑑み、既存建物に対する耐震補強工事が精力的に促進され街の強靱化がはかられている。耐震補強は、強度補強・靱性補強・損傷集中の回避・地震力の低減を主目的とした工法に大別される。そのうち地震力の低減を目的とする工法の一つに、既存建物を有効活用するためのリニューアルを行いながら建物階数を低減して耐震性能を向上させる減築工法があり、従来の耐震壁増設等の補強工法と組合せることにより、より効果的な耐震性の向上が期待される。

本研究では、鉄筋コンクリート造建物（ショッピングセンター）を対象に、解体工事¹⁾（減築）から耐震補強工事終了までの施工段階において実施した長期間の常時微動測定より、構造物の振動性状の変化を把握し^{2), 3)}、減築と耐震補強に伴う重量低減と剛性増加が固有振動数の変化に及ぼす影響を考察する。

2. P建物の減築工事と耐震補強工事

2.1 建物概要および減築計画

対象建物であるP建物は、名古屋市守山区に位置し、昭和46年に建設された鉄筋コンクリート造の地下1階、地上5階、塔屋1階、軒高21.8m、建築面積約2,162m²、延べ面積約12,200m²のショッピングセンターである。建物平面形状は約39m×約57mであり、構造形式はX, Y方向とも耐震壁を含むラーメン構造、基礎形式は直接基礎である。減築後の規模は、地下1階、地上4階、軒高13.1mである。図1～4に4階平面図、南立面図、D通り断面図、8通り軸組図をそれぞれ示す。図1～3における斜線部分が減築部分であり、また図1, 4に減築後に実施する8通りの開口閉鎖による耐震補強工事の位置を示している。なお、図1に示す□付き数字は、図5の常時微

動測定位置を示す。

図1 4階平面図(△印は2, 3階の開口閉鎖部分)

図2 南立面図(斜線部分が減築部分)

¹⁾ ㈱伊藤建築設計事務所 構造総括主任技師
(〒460-0002 名古屋市中区丸の内1-15-15 桜通ビル)
²⁾ 名城大学大学院理工学研究科 准教授・工博
³⁾ 名古屋市立大学大学院芸術工学研究科 教授・工博

¹⁾ Ito Architects & Engineers INC.

²⁾ Assoc. Prof., Graduate School of Science and Technology, Meijo Univ., Dr. Eng.

³⁾ Prof., Graduate School of Design and Architecture, Nagoya City Univ., Dr. Eng.

図3 D通り断面図(斜線部分が減築部分)

図4 8通り軸組図(■部分は開口閉鎖部分)

2.2 既存建物の耐震性能と耐震補強工事

減築前・後の構造耐震指標 (I_s 値) を表 1 に示す。本建物では、X 方向の 1～3 階は減築による重量低減の効果により目標 I_s 値 0.6 を満足しているため、減築により剛性率が悪化する 4 階のみ剛性率改善のために補強壁増設 2 箇所を実施している。一方、Y 方向は減築および耐震補強工事を実施している。Y 方向の 2, 3 階は極短柱の存在により重量低減のみでは目標値を満足できず補強が必要となっている。実施した耐震補強工事として、2, 3 階・8 通りの開口閉鎖 10 箇所 (図 1, 4)、1 階・1 通り増打ち壁 1 箇所と 2 通りの開口閉鎖 1 箇所であり、地下 1 階においては柱鋼板巻き 1 箇所を実施している。また 4 階においては、偏心率改善のため耐震壁を増設している。

表 1 構造耐震指標 (I_s 値) の一覧

X 方向	減築前	補強後	Y 方向	減築前	補強前	補強後
5F	0.46	—	5F	0.90	—	—
4F	0.83	0.67	4F	0.37	0.35	0.66
3F	0.68	1.32	3F	0.31	0.43	0.89
2F	0.65	0.97	2F	0.34	0.41	0.77
1F	0.34	0.92	1F	0.26	0.68	0.71

3. 長期間の常時微動測定

3.1 多点同時測定の計測方法および計測位置

建物の基本的な振動特性である固有振動数と固有モードを推定するため、減築+耐震補強工事の前・後で、多点同時常時微動測定を行った。測定には、加速度計 (S 社製、感度: $203.9 \pm 5\% \text{ mV}/(\text{m/s}^2)$ 、計測範囲: $\pm 29.42 \text{ m/s}^2$ 、周波数応答: DC～400Hz、分解能 $0.000049 \text{ m/s}^2 \text{ rms}$ 以下) と再構成可能組込制御・集録システム (NI 社製、コントローラ cRIO-9012、シャーシ cRIO-9112)、アナログ入力モジュール (N 社製、NI-9239、分解能: 24bit) を用いた。減築工事前の常時微動測定は、加速度計 32 台 (Ch. 1～Ch. 10 は水平 2 成分 (X, Y) と上下 1 成分 (Z) を、Ch. 11 は水平 2 成分 (X, Y)) を使用して平成 26 年 8 月 12 日に実施した。計測位置を図 5 に、計測セットを表

2 の 1～4 に示す。一方、減築+耐震補強工事後の多点同時常時微動測定は、同じく加速度計 32 台を使用して平成 27 年 2 月 1 日に実施した。計測セットは表 2 の 1～3 であり、表中の番号は図 5 に示した計測位置を示している。なお、サンプリング周波数は 100Hz、測定時間は計測セット毎に 45 分～90 分とした。

図5 計測位置

表 2 計測セット

計測 セット	Ch1 3 成分	Ch2 3 成分	Ch3 3 成分	Ch4 3 成分	Ch5 3 成分	Ch6 3 成分	Ch7 3 成分	Ch8 3 成分	Ch9 3 成分	Ch10 3 成分	Ch11 2 成分
1	1	4	2	3	5	6	7	8	9	10	20
2	1	4	11	12	13	14	15	16	17	18	20
3	1	4	21	22	23	24	25	26	27	28	20
4	1	4	19	10	29	30	31	32	33	34	20

※減築前の測定は計測セット 1～4、減築+耐震補強工事後の測定は 1～3 とした。

3.2 長期間の常時微動測定

平成 26 年 8 月 28 日から平成 27 年 2 月 1 日の間、減築+耐震補強工事過程における長期間の常時微動測定を実施した。計測点は、図 5 に示す測点 4 (4 階)、8 (3 階)、14 (2 階)、20 (1 階)、26 (B1 階) の柱頭あるいは上階床梁側面と 32 (B1 階) の柱脚の計 6 ヶ所である。サンプリング周波数 100Hz で、各点とも水平 2 成分 (X, Y) と上下 1 成分 (Z) の計 3 成分を計測した。

3.3 分析方法

本研究では、計測された常時微動波形の時系列データを SSI 法 (Stochastic Subspace Identification, 確率的部分空間同定法) ^{4), 5)} を用いて解析を行い、P 建物の固有振動数 [Hz] と固有モードを推定した。ただし、加速度は微弱であり、電気的ノイズが混入するため、適宜、理想帯域通過デジタルフィルタ (バターワースフィルタ 0.5Hz～40Hz、6 次) を通して整形した波形により分析している。

3.4 減築+耐震補強工事過程における固有振動数の変化

長期測定期間中の午前 2 時頃に測定された加速度波形から求めた X 方向、Y 方向の固有振動数の変化を図 6(a) に、それに対応する計測時の工事状況を (b) に示す。なお、12 月 25 日から 1 月 8 日は、ケーブル断線によるデータ欠測である。微動測定開始から平成 26 年 11 月 16 日までは、一部の階で固定荷重および積載荷重が改修後に増加するため、床と小梁に対する必要な部材補強工事 (A-E) が行わ

れているものの、X、Y両方向で固有振動数の大きな変化はなく、それらの工事は固有振動数に及ぼす影響が少ないことを示している。一方、減築（解体）工事が始まった11月17日以降は、RF床梁、PH解体（F-G）、5階躯体解体（H）、4階躯体解体（I）と減築（解体）工事が進むに従って、固有振動数が顕著に増加している。これは、減築による建物重量の減少の影響（表3）と考えられる。また、1階～3階の一部躯体解体および耐震壁増設工事（J）により、減築前と比較するとX、Y両方向とも固有振動数が大きくなっていることが分かる。

図6 固有振動数の変化と工事状況

表3 減築・耐震補強後の重量の変化（ $\times 10^3 \text{kN}$ ）の比較

	1F	2F	3F	4F	5F
減築前A	110.5	87.1	64.6	42.5	17.7
補強後B	74.2	49.6	25.7	6.3	—
B/A	67.1%	57.0%	39.8%	14.8%	—

3.5 減築工事前・後における振動特性の変化

分析結果を図7、8に示す。図のX、Y、Zはそれぞれ建物の寸法(m)を示しており、減築前後の地下1階+4層の模式化した建物規模と振動モードをそれぞれ示している。

減築前（図7）の1次モードはY方向3.25Hz、2次モードはX方向4.74Hz、3次モードはねじれ5.41Hzである。一方、減築+耐震補強工事後（図8）の1次モードはY方向4.58Hz、2次モードはX方向6.43Hz、3次モードはねじれ9.01Hzである。これより、減築+耐震補強後は、減築前に比べ1次モードY方向で約1.41倍、2次モードX方向で約1.36倍、3次モードねじれで約1.67倍固有振動数が大きくなっており、減築および補強の効果が現れていることが分かる。

4. 固有値解析結果

常時微動測定から得られた固有振動数を解析により確認するため固有値解析を行った。解析モデルは立体骨組モデルとし、壁はブレース置換により、大梁のスラブによる剛性増大率はRC規準⁶⁾によりそれぞれ評価している。また解析は、常時微動測定分析結果との比

図7 振動モード図（減築前）

図8 振動モード図（減築+耐震補強工事後）

較検討から地下1階を固定としたモデルを採用している。解析結果と計測結果を表4に示す。1次(Y方向)、2次(X方向)の固有振動数については減築前・減築+補強後共よい近似値が得られている。

表4 固有値解析結果と計測結果の比較(Hz)

	減築前		減築+補強後	
	解析	計測	解析	計測
1次固有振動数(Y)	3.35	3.25	4.39	4.58
2次固有振動数(X)	4.76	4.74	6.52	6.43
3次固有振動数	5.27	5.41	7.39	9.01

5. 等価1自由度系⁷⁾による減築前・後の固有振動数の変化の検討

本建物における固有振動数の増加の要因として、減築による重量低減とそれに伴う相対的な剛性の増加(減築後の部材断面の変更はないため、減築後は建物規模に対して相対的に大きな部材断面となる)および耐震補強による剛性増加が考えられる。それらの影響を把握するため、限界耐力計算法に示されている縮約法を適用して得られた等価1自由度系を用いて検討する。なお縮約の計算に用いる変位分布は、地下1階を固定とした立体骨組モデルにより算出した値を用いている。

図9に等価1自由度系における有効質量および代表変位と代表せん断力から得られる剛性を用いて計算した固有振動数の関係を示す。図の上段は、減築前のY方向を基準とした重量と剛性の増減比率であり、横軸は有効質量に対する比率を、縦軸は代表変位と代表せん断力から計算される剛性 Q_b/Δ の比率であり、図中の括弧内に質量比および Q_b/Δ の値をそれぞれ示す。また下段は、等価1自由度系を用いて計算した固有振動数であり、図中の丸印は微動測定から得られた値である。

これらの結果から減築前・後の剛性はY方向が小さく、そのため1次固有振動数のモードにはY方向が現れ、測定結果と整合していることが分かる。また減築前に対する補強後の質量減比・剛性増比は、X方向で0.72・1.4倍、Y方向で0.76・1.3倍が得られた。固有

図9 等価1自由度系における質量・剛性と固有振動数の関係

振動数の増加は、X方向では4階以外は補強工事が無く減築のみであることから、重量低減等の減築効果であることが分かる。またY方向では補強前・後の有効質量の低減率がほぼ同じと考えれば、減築前に対して耐震補強工事後の剛性増加1.3倍の内の約6%が補強効果であり、約94%は減築効果であると考えられる。

等価1自由度系から得られた質量減比・剛性増比による減築前・後の固有振動数の増加率は、X、Y方向についてそれぞれ $1/\sqrt{(0.72/1.4)}=1.39$ 倍、 $1/\sqrt{(0.76/1.3)}=1.31$ 倍となり、実測値の1.36および1.41倍に対応している。また図の下段に示したように等価1自由度系を用いて計算した固有振動数の値は、実測値と良い対応を示している。

6. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) 減築から耐震補強工事終了までの施工段階における長期間の常時微動測定から、重量低減と耐震補強工事の効果により建物の固有振動数が増加する傾向を明らかにした。
- 2) 等価1自由度系の解析モデルを用いて、減築および耐震補強による重量減少と剛性増加が固有振動数へ与える影響の程度を示した。
- 3) 減築工法は、重量低減とそれに伴う相対的な剛性増加により固有振動数を増加させることを示した。またその効果の度合いを示し、工法の特徴の一つを明らかにした。

謝辞

P 建物調査および常時微動測定に際して、名城大学大学院理工学研究科宿里研究室の久瀬由依さん、高味えりさん、坂本良祐君、田中達也君、名古屋市立大学芸術工学研究科青木研究室の人見真由さん、名古屋市立大学芸術工学部職員の川上憲司さん、前田建設工業株式会社中部支店P建物RN作業所所長北村浩志氏と作業所の皆様には、多大なるご協力をいただきました。深く感謝申し上げます。なお、本研究は、平成26年度解体工事に係る研究助成金(全国解体工事業団体連合会)の助成およびJSPS科研費16H06363の助成により進められた研究成果の一部である。

参考文献

- 1) 小島安章, 高野真一郎: 解体工事建物と隣接建物における振動実測及び解析的検討: (その1) 振動実測に基づく建屋応答の分析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学I, pp. 333-334, 2014
- 2) 久瀬由衣, 高味えり, 土田崇仁, 坂本良祐, 宿里勝信, 青木孝義, 人見真由: 減築を伴う鉄筋コンクリート造建物の動力学特性について その1. 減築前の建物の振動特性, 日本建築学会東海支部研究報告集, 第53号, pp. 289-292, 2015
- 3) 久瀬由衣, 高味えり, 土田崇仁, 坂本良祐, 宿里勝信, 人見真由, 青木孝義: 減築を伴う鉄筋コンクリート造建物の動力学特性について その2. 3, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), 構造IV, pp. 621-624, 2015
- 4) Peter van Overschee and Bart De Moor, "Subspace Identification for Linear Systems", Kluwer Academic Publishers, 1996
- 5) D. Sabia, T. Aoki, R. Cosentini, R. Lancellotta, "Model Updating to Forecast the Dynamic Behavior of the Ghirlandina Tower in Modena, Italy", Journal of Earthquake Engineering, Vol. 19, Issue 1, pp. 1-24, 2015
- 6) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算標準・同解説, PP. 8-9, 2010
- 7) 倉本洋, 勅使河原正臣, 小鹿紀英, 五十田博: 多層建築物の等価1自由度系縮約法と地震応答予測精度, 日本建築学会構造系論文集, 546号, pp. 79-85, 2001, 8

[2016年10月5日原稿受理 2017年1月6日採用決定]