

論文 RC造建物の継続的常時微動測定および時刻歴応答解析に基づいた振動特性の検証

埴 龍也*1・船木 尚己*2・菊田 貴恒*2・藤田 智己*3

要旨：本報は、竣工から55年が経過した鉄筋コンクリート造5階建ての建物を対象に、竣工直後から継続的に実施してきた常時微動測定の結果に基づき、振動特性の経年変化について確認することを主な目的としている。本建物は、これまでに多数の大規模地震を経験し、大破の判定を受けるなどの被害を受けてきたものの、その都度、適切な耐震改修を施しながら現在まで使用されている。測定記録から算出した固有振動数の結果は、構造躯体の損傷や補強による耐震性能の変化を概ね再現できていることを確認した。また、時刻歴応答解析を行った結果、耐震補強を施さなかった場合、大きな被害が生じていた可能性が示された。

キーワード：常時微動測定、耐震補強、固有周期、経年変化、時刻歴応答解析

1. はじめに

竣工から時間が経過するほど、材料的な経年劣化や地震による被害を受ける確率が高くなる。結果として建物の保有する耐震性能は低くなる傾向にあることから、継続的な使用を目的として、耐震補強が施されることも多い。耐震補強が施された建物の耐震性能の向上効果は、一般的に構造計算によって確認することになるが、常時微動測定のような実測によって、設計時に計算された補強効果が発揮されているか、また、補強工事が十分な精度で施工されたかを確認できれば、耐震補強に対する信頼性の向上に寄与するものと考えられる。さらに、継続的な測定により耐震性能の経年変化を明らかにすることによって、今後経験するであろう大規模地震に対して、建物の損傷や、それによる人的被害を軽減するための具体的な対策を講じることが可能になると思われる。

このような観点から、阿部ら¹⁾は、仙台市内およびその近郊に建つRC造学校建物を対象に、補強工事前後で常時微動測定を実施し、その結果より補強効果を確認してきた。筆者ら⁴⁾もまた、RC造病院建物を対象に、補強工事前後で常時微動測定を実施し、測定記録より求めた建物の固有周期の変化から耐震補強による効果を確認した。また、構造計算および常時微動測定の結果から算出した層剛性を対比し、補強による耐震性能の向上効果を微動測定によってどの程度の精度で推定できるか検証した。

本報においては、竣工から55年が経過し、数年後に解体が予定されている筆者らが所属する大学の校舎を対象に、常時微動測定を行って得られた結果に基づき、建物の固有振動数を確認するとともに、耐震改修前後の建

物を模擬した立体フレームモデルを用いた時刻歴応答解析により、本建物に施された耐震改修の効果について検証した結果を報告する。

2. 建物および耐震補強の概要

建物全景を写真-1に、建物諸元を表-1に示す。また、代表的な伏図および軸組図をそれぞれ図-1、図-2に示す。本建物は1968年に建設された、地上5階建、地下3階、塔屋2階の鉄筋コンクリート造である。段差15mの崖地に建ち、北面からは地上5階建てに見えるが、南面から見れば地上8階、地上高さ30mの建物である。長辺方向は96m(6m×16スパン)、短辺方向は13.6m(6.8m×2スパン)、北側構面は地下階のほとんどが耐土圧壁で構成されている。基礎はH鋼杭、支持層はGL-10~18mである。1978年宮城県沖地震の際には、北側構面の短柱のせん断破壊(写真-2)や階段室外壁のせん断亀裂、台直しや打ち継ぎ部分の損傷などが多数生じ、大破の判定を受けた。その後の建物の継続的な使用を実現するため、川股らの考案により長辺方向のラーメンに鉄骨ブレース(例えば図-3)を設置するなどの改修が施された。さらに、今後発生する大規模地震に対して建物の継続的使用と学生の安全確保を考慮し、表-2に示すような様々な耐震改修が施されてきた。竣工から現在までに経験した中で最も大きかった2011年東北地方太平洋沖地震では、最上階の長辺方向で820gal、短辺方向で681galを観測した。表-3に示すとおり、その後も比較的大きな地震を何度か経験したものの、これまでに施されてきた耐震改修の効果もあり、これら一連の地震による構造的な被害は生じていない。

*1 東北工業大学 建築学部 建築学科 学部生 (学生会員)

*2 東北工業大学 建築学部 建築学科 教授 博士 (工学) (正会員)

*3 仙台高等専門学校 総合工学科 (建築デザインコース) 准教授 博士 (工学) (正会員)



写真-1 建物全景（南側・奥の建物）

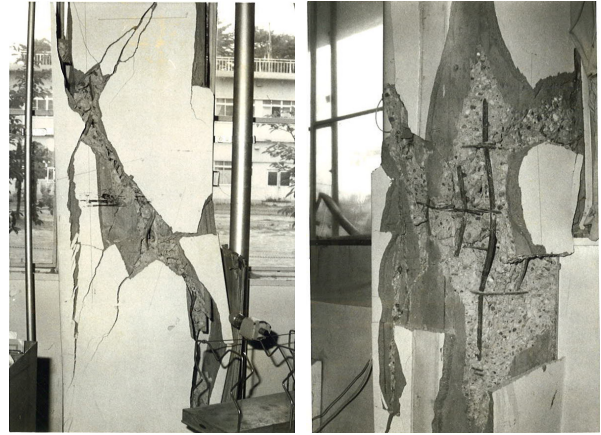


写真-2 北側構面柱の被害（1978年宮城県沖地震）

表-1 建物諸元

項目		概要
建物概要	建築用途	学校
	竣工年	1968年
建築規模	構造種別	鉄筋コンクリート構造 (Fc=18N/mm ²)
	階数	地上5階, 地下3階, 塔屋2階
	階高	3.5m
	長さ	長辺方向: 96m 短辺方向: 13.6m
	軒高	30.0m

表-2 建物に施された耐震改修一覧

No.	施工年	方向	改修の概要
①	1979	長辺	外付け鉄骨ブレース (写真-1)
		短辺	耐震壁の増設
②	2001	—	1階北側構面柱 (写真-3) 炭素繊維巻き補強 (3本)
③	2004	—	地下3階から3階柱 (写真-4) ポリエステル繊維巻き補強 (87カ所)
④	2005	長辺	1階から5階 (写真-5) オイルダンパー設置 (各階6台、合計30台)

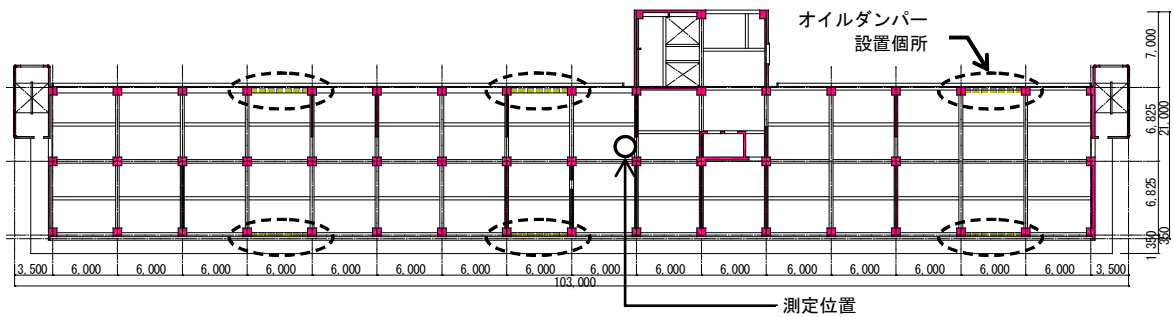


図-1 基準階伏図

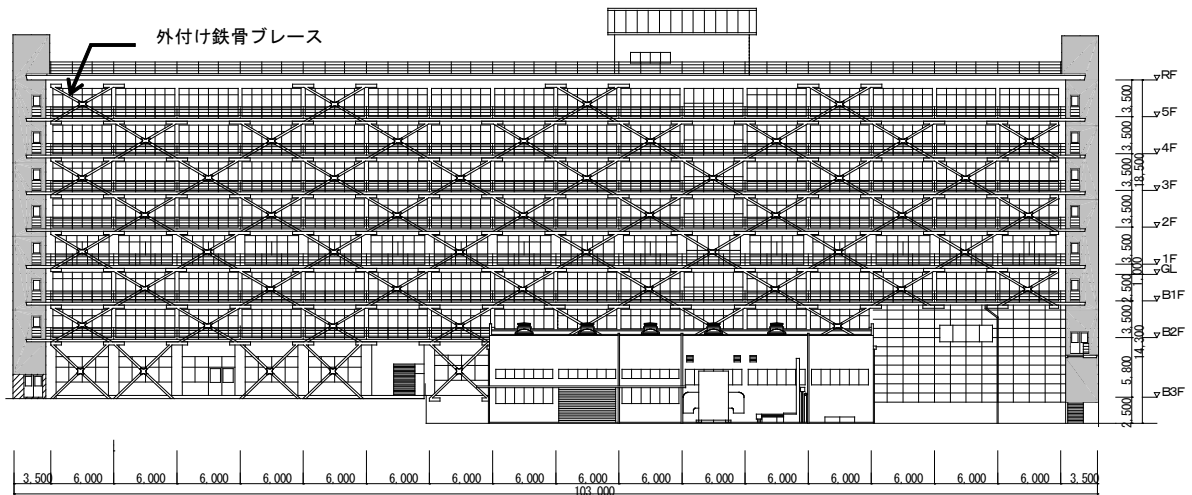


図-2 長辺方向立面図（南面）

3. 常時微動測定

経年による耐震性能の変化と、建物に施された耐震改修の効果を確認することを目的として、建物の竣工直後から定期的に常時微動測定を行い、得られた結果に基づき算出された建物の周期特性の変化から、建物の保有する耐震性能を評価してきた。本論においては、これまでに蓄積してきた結果に、東北地方太平洋沖地震の前後ならびに2021年から2022年にかけて発生した比較的大きな地震の後に実施した測定の結果を追加し、竣工から現在までの固有振動数の変化を再確認した。

常時微動測定は、建物の1階と5階の床の上に微動計を設置し、長辺および短辺の水平変位に関して方向別に測定する方法で行った。微動計の設置場所は、構造計算で求められた剛心に近い図-1に示す“○”の位置とした。微動計は有線の種類速度型換振器で、サンプリング周波数を200Hz、計測時間は5分間とした。測定により得られた時刻歴記録からフーリエスペクトルを算出し、本建物の基本固有振動数を求めた。その際、5分間の測定記録を11個のフレームに分割し、それぞれに得られるフーリエスペクトルの結果を相加平均して算出した。代表的な例として、2023年6月に実施した測定により得られた記録から算出した、1階に対する5階のフーリエスペクトル比を図-3に示す。ここで示す結果は、方向により振幅レベルが異なっていたため、最大値で基準化したものを示している。

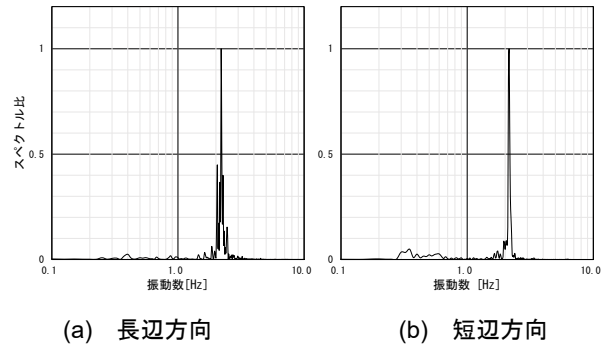


図-3 フーリエスペクトル比（2023年6月実施）

また、竣工からこれまでに得られた建物の1次固有振動数の変遷を表-4および図-4に示す。これらの結果より、1978年宮城県沖地震後における建物の固有振動数は、地震前（竣工直後）と比較して長辺方向は65%、短辺方向は85%にそれぞれ低下している。これは、単純に剛性に換算した場合、竣工直後の剛性に対して長辺方向は42%、短辺方向は72%に低減したことによる。その後、施された鉄骨ブレース等による改修後の固有振動数は、地震後と比較して長辺方向は116%（竣工直後に対しては86%）、短辺方向は133%（竣工直後に対しては98%）に上昇し、竣工直後の剛性に対して長辺方向は74%、短辺方向は96%にまで回復した。

2011年東北地方太平洋沖地震の際、本建物が建つキャンパスに設置されていた地震計（Small-titan¹⁰）で計測震



写真-3 柱の炭素繊維巻き補強
（2001年）



写真-4 柱のポリエステル
繊維巻き補強（2004年）



写真-5 建物に設置された
オイルダンパー（2005年）

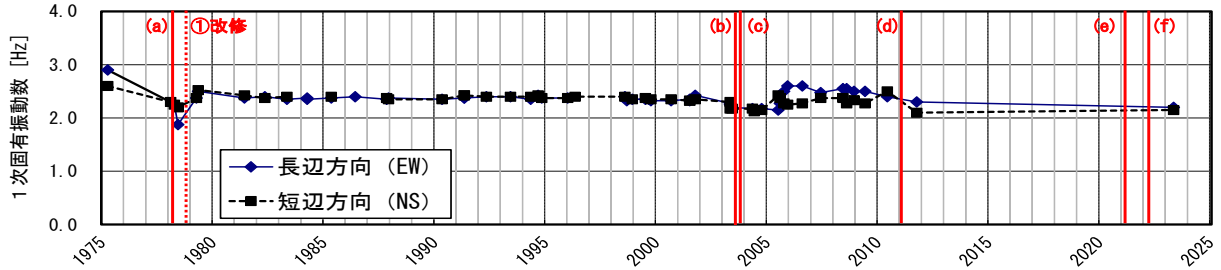
表-3 過去に経験した大規模地震と建物被害の概要

図-4 中の記号	地震名	発生日月日	規模	対称建物の被害概要
(a)	宮城県沖地震	1978年6月12日	M7.2	大破（柱のせん断破壊等）
(b)	宮城県沖の地震	2003年5月26日	M7.0	構造被害なし
(c)	宮城県北部地震	2003年7月26日	M6.1	構造被害なし
(d)	東北地方太平洋沖地震	2011年3月11日	M9.0	構造被害なし 周辺地盤の沈下
(e)	福島県沖の地震 宮城県沖の地震	2021年2月13日 2021年3月20日	M7.1 M7.2	垂れ壁仕上げ材の剥落等
(f)	福島県沖の地震	2022年3月16日	M7.4	間仕切壁仕上げ材の剥落等

表一4 常時微動測定による建物の基本固有振動数（単位：Hz）

	1978年宮城県沖地震		① 改修後	② 改修後	2003年 宮城県沖 地震後	③ 改修後	④ 改修後	2011年東北地方 太平洋沖地震		2023年 5月測定
	地震前	地震後						地震前	地震後	
長辺	2.90	1.88 (0.65)	2.50 (0.86)	2.43 (0.84)	2.20 (0.76)	2.18 (0.75)	2.60 (0.90)	2.58 (0.89)	2.30 (0.79)	2.20 (0.76)
短辺	2.60	2.20 (0.85)	2.55 (0.98)	2.35 (0.90)	2.18 (0.84)	2.18 (0.84)	2.28 (0.88)	2.33 (0.90)	2.10 (0.81)	2.15 (0.83)

※ 表中の（ ）内の数値は、1978年宮城県沖地震前（竣工直後）の固有振動数を基準としたときの比を示している。



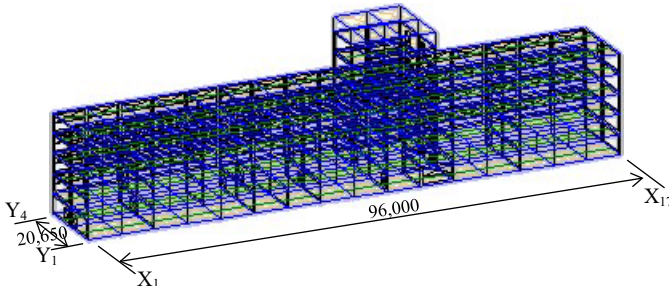
図一4 固有周期の経年変化

度 5.86 を記録し、これまでに経験した中で最も大きな地震動であった。前述のとおり、この地震による大きな構造的被害は生じなかったものの、耐震壁や垂れ壁の仕上げ材の剥落、周辺地盤の沈下、外付け鉄骨ブレースの中央交差部接続プレートの一部が降伏するなどの被害が見られた。それらの影響により建物の剛性が低くなり、地震後の固有振動数が地震前と比較して小さくなったものと思われる。その後、現在に至るまでに、計測震度 5 を上回るような比較的大きな地震を数回経験しているものの、これら一連の地震による構造被害はなく、微動測定により得られた固有振動数の変化と概ね対応する結果となっていることが確認できた。

4. 地震応答解析

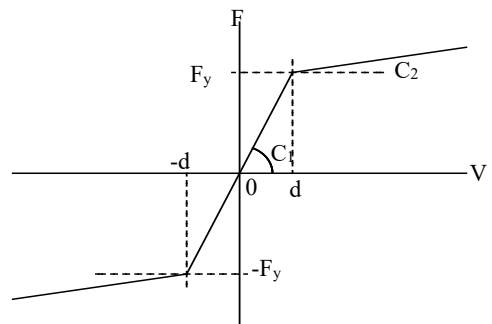
4.1 解析モデルの概要

竣工直後の建物と 1978 年宮城県沖地震後に設置された鉄骨ブレースが付いたもの、鉄骨ブレースとオイルダンパーを併設した建物を想定した 3 つのモデルを対象とする。本報において、これらのモデルの名称をそれぞれ“竣工直後モデル”、“ブレース付モデル”、“ブレース+ダンパー付モデル”とする。これらのモデルによる時刻歴応答解析を行って得られた結果に基づき、本建物に施された耐震改修の効果を確認する。代表的な例として、竣工直後モデルの全景を図一5 に示す。



図一5 解析モデル全景（竣工直後モデル）

RC 造の構造部材は弾塑性型とし、梁の曲げ履歴特性は武田モデル、梁、柱、壁のせん断力の復元力特性は原点指向型モデルを採用した。減衰は瞬間剛性比例型とし、減衰定数を 3% と設定した。コンクリート強度は構造計算書に従い 18.0N/mm² とした。建物の長辺方向の北側と南側構面に組み込まれた鉄骨ブレースは、H-200×200×8×2 の H 型鋼を、フランジ面が建物立面と平行になるように取り付けられ、ブレースの中央交差部分を厚さ 12mm のガセットプレートで接合したものである。プレート部分はパネルを模擬したフレームに置き換えてモデル化した。オイルダンパーについては、実際に組み込まれたダンパーの要素実験の結果に基づき、図一6 および表一5 に示す履歴特性モデルを採用した。また、各モデルの基礎はピン支持とした。



図一6 オイルダンパー復元力特性

表一5 オイルダンパーのパラメータ

最大減衰力	1000kN	ストローク	±80mm
減衰係数 C ₁	25.0kN・s/mm	リリース速度 d	32mm/sec
減衰係数 C ₂	1.70kN・s/mm	リリース減衰力 F _y	800kN

入力地震動の時間刻みについては、採用した構造部材の力学特性が弾塑性モデルであることを考慮して 0.002

秒としている。ここでの解析は、長辺方向（X方向）にEW成分の観測地震波を入力する方法で行った。入力波は、2011年東北地方太平洋沖地震で本建物が建つキャンパス内で観測された波形のうち、対象建物に隣接する建物の1階で観測された波形を採用した。入力波の加速度応答スペクトルを図-7に示す。スペクトルのピークは1.0Hzから2.0Hzの領域に見られ、最大加速度は353.8gal、計測震度は5.70である。

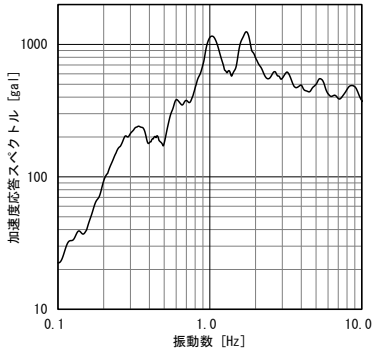


図-7 加速度応答スペクトル (h=5%)

固有値解析を行って得られた長辺方向の1次モードを図-8に示す。“竣工直後モデル”の長辺方向の1次固有周振動数は3.05Hzとなり、1978年宮城県沖地震の前に実施した微動測定の結果から導いた固有振動数(2.90Hz)と概ね近い値を示している。

“ブレース付モデル”および“ブレース+ダンパー付モデル”の固有値解析による1次固有振動数は、それぞれ3.68Hz、3.99Hzとなり、各モデルに対応する微動測定の結果2.50Hz、2.60Hzと比較して1.5倍ほど高い値となることがわかった。計算において補強効果が過剰に評価される結果となった一つの要因として、実建物の躯体に蓄積された損傷やコンクリートの経年劣化等があると考えられる。改修は竣工から10年から30年ほど経過した時点で実施されており、その間にも多くの地震を経験している。前述のとおり、地震による構造躯体の大きな損傷は1978年宮城県沖地震以降生じていないものの、それらの影響を詳細に検証することが必要であると思われる。本報においては、これらの要因を解析モデルのパラメータに反映できていないため、改修された建物を想定したモデルの再構築も含めて今後の検討課題としたい。

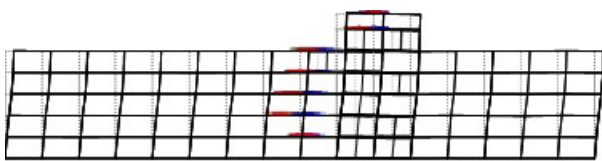
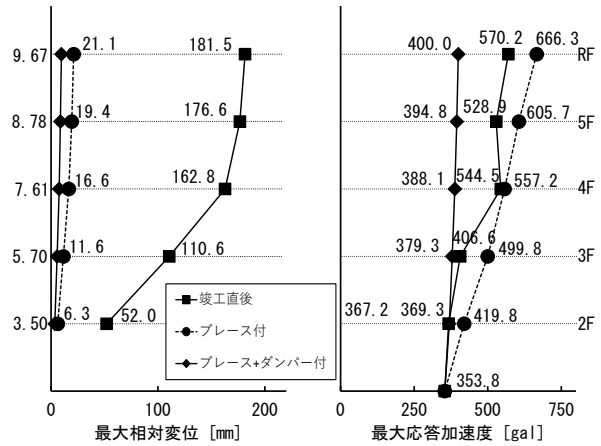


図-8 固有値解析結果 (1次モード: 3.05Hz)

4.2 地震応答解析結果

時刻歴応答解析を行って得られた、各層の最大相対変位と最大応答加速度の結果を図-9に示す。これらの結果、“ブレース+ダンパー付モデル”の相対変位は、“竣工直後モデル”と比較して大幅に小さくなり、例えば最上層については、“竣工直後モデル”に対して“ブレース付モデル”では1/9、“ブレース+ダンパー付モデル”では1/19程度になり、改修による応答変位の大幅な低減効果が得られた結果となった。また、ブレースによる剛性が建物に付加されたことにより、“ブレース付モデル”の応答加速度は“竣工直後モデル”と比較して増加しているものの、“ブレース+ダンパー付モデル”については、ダンパーの効果によって加速度応答も“竣工直後モデル”より小さくなっていることがわかる。



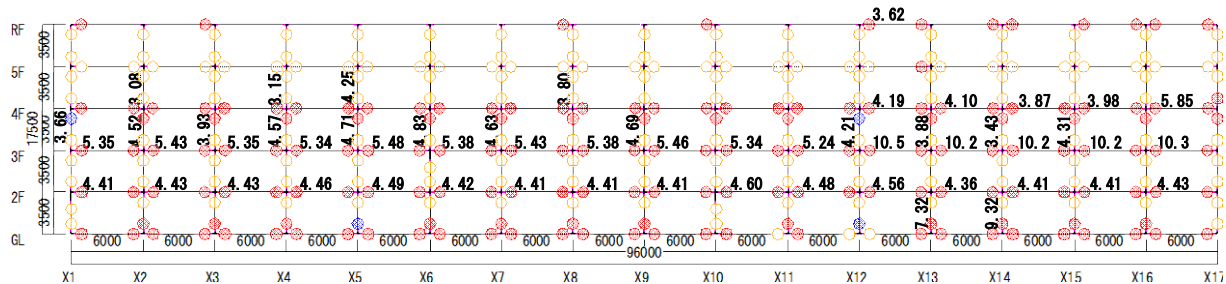
(a) 最大相対変位 (b) 最大応答加速度

図-9 時刻歴応答解析結果

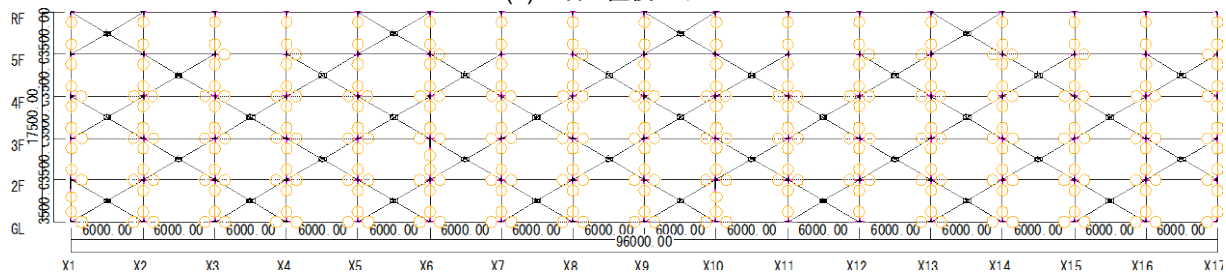
図-10は、各部材の塑性率を示したものである。代表的な例として、南側構面を示している。図中の“○”は曲げびび割れが発生した箇所、“●”は塑性率が1以上となる所である。また、部材両端部の塑性率が3以上となるものについては、図中に数値を示している。これらの結果、竣工直後のモデルは中間層の多くの部材で塑性率が3を超え、場所によっては10を超える部材があり、耐震補強を施さなかった場合、2011年東北地方太平洋沖地震で甚大な被害が生じた可能性が示唆された。それに対し、ブレースやダンパーによる改修が施された建物には塑性率が3を超える部材は生じていないことがわかった。

5. まとめ

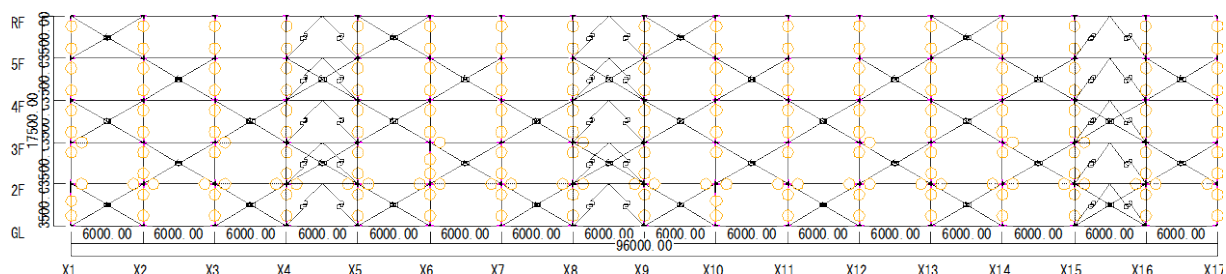
耐震改修が施された5階建て鉄筋コンクリート造建物を対象に、改修による効果と耐震性能の経年変化を確認する目的で継続的に常時微動測定を行ってきた。また、本建物は、建物の継続使用と学生の安全確保を目的に様々な改修が施されてきたことから、時刻歴応答解析に



(a) 竣工直後モデル



(b) ブレース付モデル



(c) ブレース+ダンパー付モデル

図-10 各部材の塑性率 (Y1 通り)

より改修の効果について検証し、以下に示す知見を得た。

- (1) 地震動によって建物に損傷を受けた場合や、改修による建物の振動特性の変化が、常時微動測定により得られた結果と概ね対応していることが確認できた。
- (2) 東北地方太平洋沖地震の観測記録を用いて、竣工直後、外付け鉄骨ブレースによる補強、およびオイルダンパーによる補強が施された建物を模擬した立体フレームによる時刻歴応答解析を行った結果、竣工直後の建物では多くの部材が損傷する結果が示されたのに対して、改修が施された建物には大きな損傷が見られなかったことから、改修が施されていない場合、大きな被害につながっていた可能性があることが示された。

謝辞

立体フレームモデルの作成にあたって、株式会社構造システムの川邊祥一氏に多大な協力を得ました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 阿部良洋, 守研二, 佐藤聡美: 常時微動測定による耐震補強効果の確認事例 (その 3) 一文字型校舎の鉄骨ブレース補強, 日本建築学会東北支部研究報告集, 構造系, 第 66 号, pp.141-144, 2003.6
- 2) 佐藤聡美, 阿部良洋, 守研二: 常時微動測定による

- 耐震補強効果の確認事例 (その 4) バッテリー型校舎の鉄骨ブレース補強, 日本建築学会東北支部研究報告集, 構造系, 第 66 号, pp.145-148, 2003.6
- 3) 守研二, 佐藤聡美, 阿部良洋: 常時微動測定による耐震補強効果の確認事例 (その 5) 学校建物の RC 造壁補強, 日本建築学会東北支部研究報告集, 構造系, 第 66 号, pp.149-152, 2003.6
- 4) 船木尚己, 畑中友, 藤田智己: 耐震補強が施された RC 造建物の継続的常時微動測定に基づいた振動特性の検証, コンクリート工学年次論文集, Vol.44, No.2, pp.235-240, 2022.7
- 5) 川股重也: 東北工大 5 号館の震害修復, 建築技術, No.346, pp.83-95, 1980.6
- 6) 川股重也, 大沼正昭: 鉄筋コンクリート建築物における補修・補強の実施例 - 東北工業大学 5 号館 -, コンクリート工学, Vol.18, No.3, pp.80-83, 1980.3
- 7) 川股重也, 鈴谷二郎, 大沼正昭: 東北工業大学 5 号館の震害と修復 (その 1 被害の概況と柱の補修・耐震壁の増設), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), 2639, pp.1693-1694, 1979.9
- 8) 川股重也, 鈴谷二郎, 大沼正昭: 東北工業大学 5 号館の震害と修復 (その 2 腰壁の絶縁と桁行方向の鉄骨ブレース補強), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), 2640, pp.1695-1696, 1979.9
- 9) 川股重也, 鈴谷二郎, 大沼正昭: 東北工業大学 5 号館の震害と修復 (その 3 鉄骨ブレースの補強効果), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), 2641, pp.1697-1698, 1979.9
- 10) 神山真他: 2011 年東北地方太平洋沖地震における東北工業大学アレー共振観測システム Small-Titan による強震記録について, 2011.4