

論文 実測に基づく鉄筋コンクリート造建物の減衰の定量化

壁谷澤 寿成*1・関谷英一*2・曾田五月也*3

要旨：耐震壁および粘弾性ダンパーによる耐震補強が実施された RC 造校舎を対象として常時微動測定を行い、ダンパー設置前後の固有周期、微動の速度振幅、減衰定数を比較した。その結果、粘弾性ダンパーによる補強を実施した構面方向の減衰定数が増大した。本論文では既往の減衰定数同定手法の欠点を補う形で同定し、制振補強による制振効果を検証した。また、粘弾性ダンパーによる計算上の剛性の増加が微動測定によっても評価しうることを確認した。

キーワード：常時微動、減衰定数、RD 法、AR 法

1. はじめに

構造物の減衰定数は、地震や風などの外力に対する建物の応答を推定する上で重要なパラメータである。しかし、鉄骨造建物では 2%、RC 建物では 3%などと慣用的に用いられているが、実測値はばらつきが多いのが実情である。建物本体の減衰能力を正確に把握することは、制御装置等に対する付加的な要求性能を決定する上でも不可欠の問題である。

一方、近年では学校や庁舎等の公共建物について耐震診断・耐震改修が進められつつあるが、未補強のままである場合が少なくない。低層 RC 造建物の耐震改修には、一般的に鉄骨ブレースや耐震壁の増設による強度型の補強が多いが、粘弾性ダンパーやオイルダンパー等の制振装置による補強例も増加しつつある。本論では RC 造の粘弾性ダンパーと耐震壁の増設により補強した 4 階建てと 3 階建ての学校校舎 2 棟を常時微動測定により補強前後の振動性状調査を行い、耐震補強前後の固有振動数および減衰定数を同定し制振補強による建物の制振効果を検証することを目的とするものである。

2. 対象建物および耐震補強の概要

耐震補強を実施した 2 棟の建物は共に福島県

郡山市にある鉄筋コンクリート造の学校校舎で 4 階建て(以下建物 1)と 3 階建て(以下建物 2)である。以下に 2 棟の建物の詳細を記す。

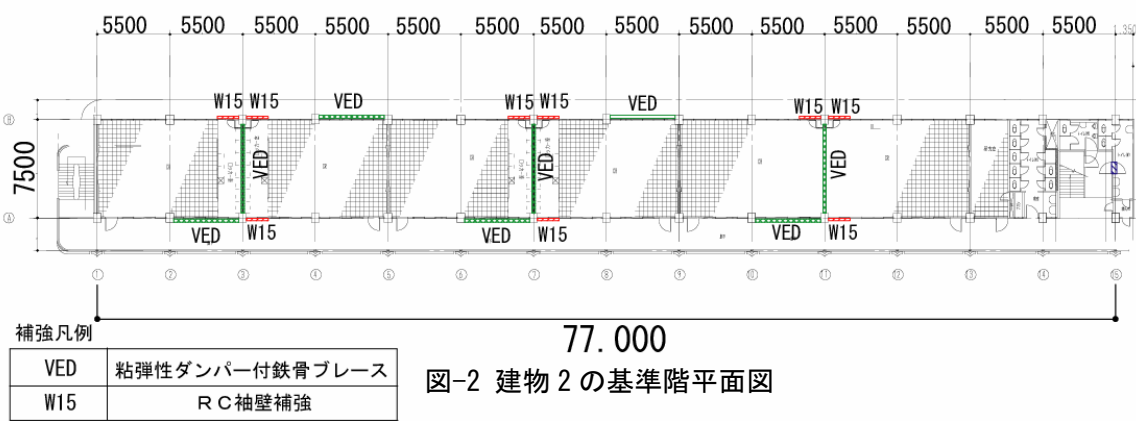
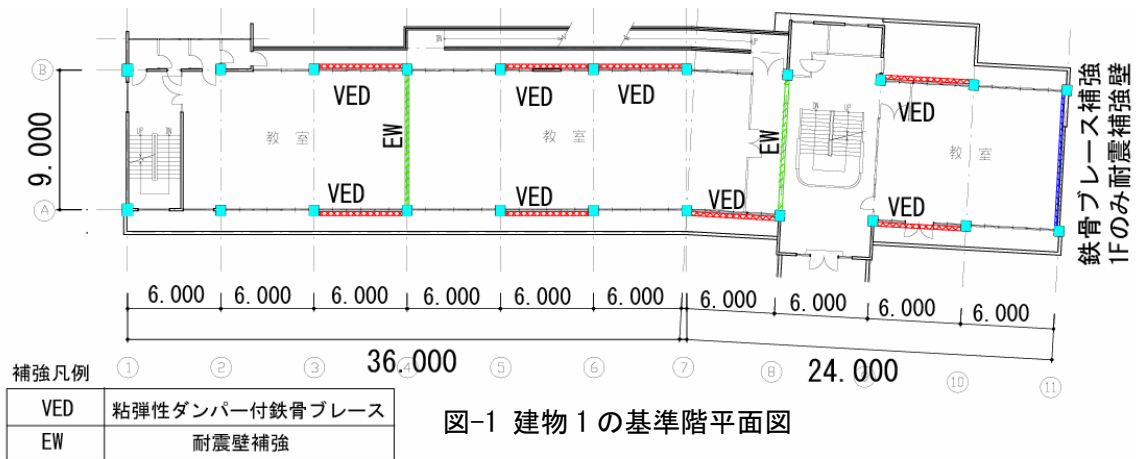
2.1 4 階 RC 造建物 (建物 1)

建物の平面形状は桁行方向に 6m×10 スパン、梁間方向が 9m×1 スパンで高さは 13.7m である。梁間方向は耐震壁の設置により偏心を改善し、強度型補強とした。桁行方向については一部の脆性的な部材の靱性を向上した上で粘弾性ダンパーによる補強とした。粘弾性ダンパーの設置数は 4 階に 8 基、1~3 階には 16 基ずつ設置した。図-1 に 1 階平面図およびダンパーの設置状況を示す。

2.2 3 階 RC 造建物 (建物 2)

建物の平面形状は桁行方向に 5.5m×14 スパン、梁間方向が 7.5m×1 スパンで高さは 12.8m ある。梁間方向は既存のコンクリートブロックを除去し、粘弾性ダンパー付き鉄骨ブレースによる補強とした。桁行方向については一部の粘弾性ダンパーおよび RC の袖壁による補強とした。粘弾性ダンパーは 1 階には梁間方向に 6 基、桁行方向に 8 基、2 階には梁間方向に 6 基、桁行き方向に 8 基設置した。3 階は RC 袖壁補強のみとした。図-2 に 1 階平面図およびダンパーの設置状況を示す。

*1 早稲田大学	理工学研究科建築学専攻	工修(正会員)
*2 (株)鴻池組	東京本店 建築設計部 (構造)	工修
*3 早稲田大学	理工学部建築学科教授	工博



3. 粘弾性ダンパーの概要 ^{1),2)}

表-1 に建物1の、表-2 に建物2の粘弾性ダンパーの形状および設置数を示す。今回の補強に使用した粘弾性ダンパーは一方の端部のボルト孔をルーズホールとし、大地震時には高力ボルト (HTB) が滑り、設定以上の応力が発生しない仕組み (リリース機構) となっている。また、ダンパーの両端部は面外応力が生じないように球面軸受けを設けている。

4. 理論値による建物の固有振動数

表-3 に建物1の、表-4 に建物2の弾性骨組解析により得られた理論値による補強前後の固有振動数を示す。建物1の梁間方向は2.97Hzから5.39Hzに、桁行方向は3.09Hzから3.37Hzに増大した。また、建物2での梁間方向は3.69Hzから3.85Hzに、桁行方向は4.69Hzから5.95Hzに増大した。

表-1 建物1の粘弾性ダンパーの形状

階	設置数	粘弾性体の形状			
		幅 mm	長さ mm	厚さ mm	層数
4	8	280	1300	6	4
3	16	280	1300	6	6
2	16	300	1300	6	6
1	16	325	1200	6	6

表-2 建物2の粘弾性ダンパーの形状

設置方向	階	設置数	粘弾性体の形状			
			幅 mm	長さ mm	厚さ mm	層数
桁行方向 (X方向)	2	8	250	1600	6	4
	1	8	250	1650	6	4
梁間方向 (Y方向)	2	4	270	2200	7	4
	2	2	260	2400	7	4
	1	6	270	2300	7	4

表-3 建物1の補強前後の固有振動数

振動数(Hz)		1次	2次	3次	4次
梁間方向	補強前	2.97	7.72	12.11	16.08
	補強後	5.39	13.59	21.56	29.48
桁行方向	補強前	3.09	8.54	13.05	16.53
	補強後	3.37	9.02	13.99	17.85

表-4 建物2の補強前後の固有振動数

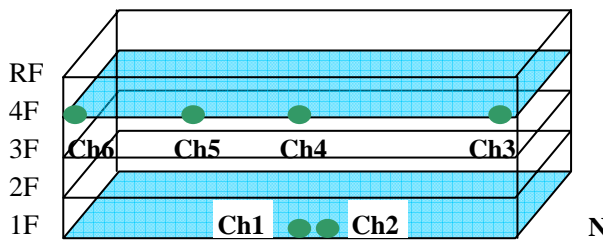
振動数(Hz)		1次	2次	3次
梁間方向	補強前	3.69	9.29	14.08
	補強後	3.85	9.44	14.51
桁行方向	補強前	4.69	11.77	17.01
	補強後	5.95	14.58	21.61

5. 常時微動測定の概要

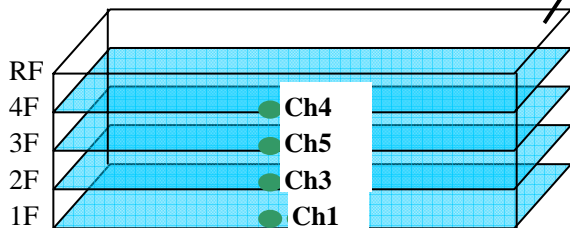
2つの対象建物の耐震補強前後において表-5に示す要領で常時微動測定を行った。微動測定時にダンパーの粘弾性体の温度を測定し、ダンパーの粘弾性体の温度は外気温とほぼ同程度であることを確認した。測定は同じ平面内における同時多点測定(以下パターン1)と各階の同時多点測定(以下パターン2)を行い、それぞれ桁行方

表-5 建物1・建物2の常時微動測定の概要

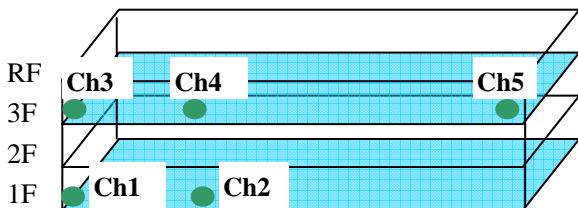
項目	建物1	建物2
計測日(設置前)	2005/2/5	2005/7/10
計測日(設置後)	2005/3/30	2005/9/10
外気温(設置後)	3~4°C	20°C
ダンパー粘弾性体温度	5~6°C	18~20°C
計測時間	600秒	
計測方向	梁間・桁行	
測定箇所	最上階・各階	



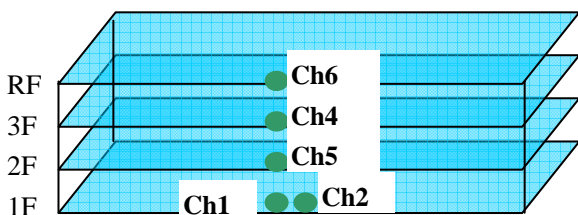
(a) 建物1・4階同時多点測定(パターン1)



(b) 建物1・各階同時多点測定(パターン2)



(c) 建物2・3階同時多点測定(パターン1)



(d) 建物2・各階同時多点測定(パターン2)

図-3 微速度計の配置図

向と梁間方向を計測した。測定には微速度計を使用し、サンプリング周波数は200Hzで、40Hzのローパスフィルタを施した。図-3にパターン1、パターン2の微速度計の配置図を示す。パターン1では微速度計を伝達関数の算出のため1階に2機、4階に4機配置し、パターン2では各階に1機ずつ微速度計を配置した。

6. 減衰定数の同定方法

減衰定数の同定方法はいずれもRD法³⁾でランダム成分を除去し多モード成分を含む自由振動波形をAR法⁴⁾によって分離し評価した。

6.1 RD(Random Decrement)法³⁾

RD法とはランダムな時系列波形のランダム極大値を初期値とした小サンプルを数多く作成し、それらを多数組み合わせることにより時系列波形のランダム成分の和がゼロに近づき、自由振動成分の和のみを得るものである。

6.2 AR(Auto Regressive)法⁴⁾

ある時点の出力が、過去の出力の線形結合として得られるシステムがあるとき、このシステムを表すモデルをARモデル(auto regressive model: 自己回帰モデル)とよぶ。ARモデルは以下の式で表される。ただし、Mは次数とする。

$$y(k+M) = \sum_{i=1}^M a_i y(k-i+M) \quad \dots(1)$$

ARモデルにより得られる根 z_i , z_{i+1} より各次の固有振動数 f_i および減衰定数 h_i が求められる。

$$f_i = \frac{|\log(z_i)|}{2\pi\Delta t} \quad \dots(2)$$

$$h_i = \frac{\text{real}\{\log(z_i)\}}{2\pi f_i \Delta t} \quad \dots(3)$$

7. フーリエ変換による固有振動数の同定

測定された波形について振幅のピークを明確にする目的で、全計測時間を32分割にした区分データを50%ずつずらした波形についてそれぞれフーリエ変換し1階を基準とした伝達関数のアンサンブル平均を算出した。

建物 1 および建物 2 における耐震補強前後の各方向のパターン 2 について各観測点の固有振動数を同定した。図-4、図-5 は建物 1 における補強前後の固有振動数の同定結果である。図-4、図-5 より各方向とも、補強前に比べ補強後の伝達振幅比が低減し、固有振動数が増加していることが確認できる。建物 1 の固有振動数の増加率は梁間方向が 3.15Hz から 4.05Hz に増大し 1.29 倍、桁行方向が 3.68Hz から 5.02Hz に増大し 1.36 倍であった。

図-6、図-7 は建物 2 における補強前後の固有振動数の同定結果である。建物 2 の固有振動数はコンクリートブロックを除去し、粘弾性ダンパーを挿入した梁間方向の振動数は 3.75Hz から 3.85Hz とあまり変化せず、粘弾性ダンパーお

び RC 袖壁補強を施した桁行方向の振動数は 4.30Hz から 5.75Hz に増加していたことが確認された。また、補強前に比べ補強後の伝達振幅比が低減している。表-6 に建物 1、表-7 に建物 2 における各方向の固有振動数の同定結果および固有振動数の増大率を示す。表-6、表-7 より耐震補強後に固有振動数が増大していることから、補強による建物全体の剛性の増加が確認された。図-8 に建物 1 の、図-9 に建物 2 の各方向における固有振動数の理論値と実測値の比較を示す。建物 1 では実測値と理論値にばらつきがあるが建物 2 では固有振動数の増分は計算による増大分の推定値に概ね対応している。このことから建物全体の固有振動数や耐震補強による剛性の増加が微動測定により評価ができることがわかる。

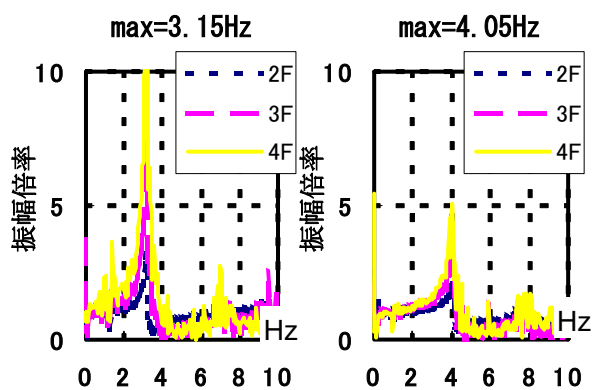


図-4 建物 1・梁間方向の固有振動数

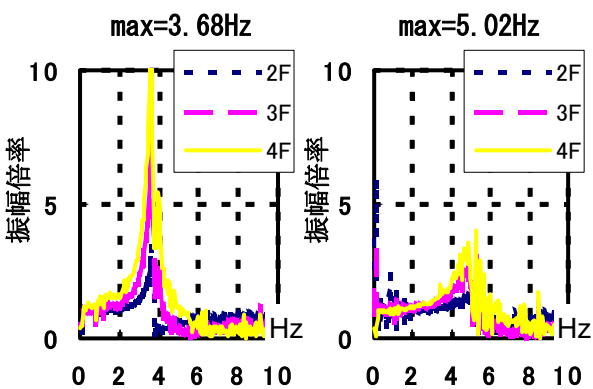


図-5 建物 1・桁行方向の固有振動数

表-6 建物 1・各方向の固有振動の変化

振動数(Hz)	補強前	補強後	増大率(倍)
梁間	3.15	4.05	1.29
桁行	3.68	5.02	1.36

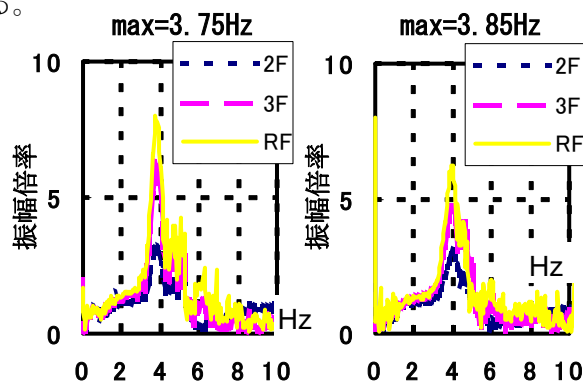


図-6 建物 2・梁間方向の固有振動数

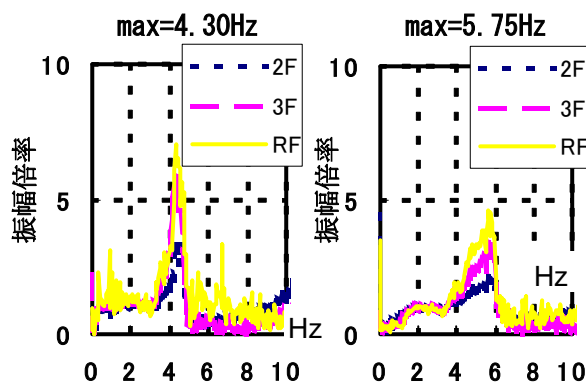


図-7 建物 2・桁行方向の固有振動数

表-7 建物 2・各方向の固有振動の変化

振動数(Hz)	補強前	補強後	増大率(倍)
梁間	3.75	3.85	1.03
桁行	4.3	5.75	1.34

8. RD法およびAR法による減衰定数の同定結果

図-10は建物2におけるRD法により算出された重畳した自由振動波形(図中 RDwave)からAR法によりモードごとに自由振動波形に分離したものである。また、モードごとの複数の自由振動波形を足し合わせた波形(図中 fitwave)と重畳した自由振動波形(図中 RDwave)とを比較したものである。表-8、表-9に分離した波形の中で最も速度振幅の大きい自由振動波形の減衰定数と振動数と振幅を示す。表-6と表-8、表-7と表-9の固有振動数をそれぞれ比較すると、もっとも速度振幅の大きい波形の固有振動数の値が伝達関数による固有振動数から算出された値に近いことが確認できた。建物1について耐震壁補強をした梁間方向の減衰定数は3.68%から3.69%と大きく変化せず、ダンパーを補強した桁行方向の減衰定数は4.34%から5.78%に増大した。また、建物2についてダンパーを補強した梁間方向の減衰定数は2.67%から5.55%に、ダンパーを補強した桁行方向の減衰定数は3.56%から4.43%に各方向とも増大した。

9.結論

本報告では粘弾性ダンパーや耐震壁による補強を実施した2棟のRC造の学校校舎を対象にして常時微動測定により補強前後の振動性状を同定した結果を示した。今回の測定で以下のことが確認された。

- (1) 建物1の梁間方向では耐震壁による補強によって固有振動数が3.15Hzから4.05Hzに増大したが、減衰定数は3.68%から3.69%とほとんど変化していなかった。
- (2) 建物1の桁行方向では粘弾性ダンパーによる制振補強によって固有振動数が3.68Hzから5.02Hzに増大し、減衰定数が4.34%から5.78%に増大した。
- (3) 建物2の梁間方向ではコンクリートブロックを除去し粘弾性ダンパーを挿入した。固有振動数は3.75Hzから3.85Hzとあまり変化しなかったが、減衰定数は2.67%から5.55%に増大した。
- (4) 建物2の桁行方向では粘弾性ダンパーによる制振補強によって固有振動数が4.3Hzから

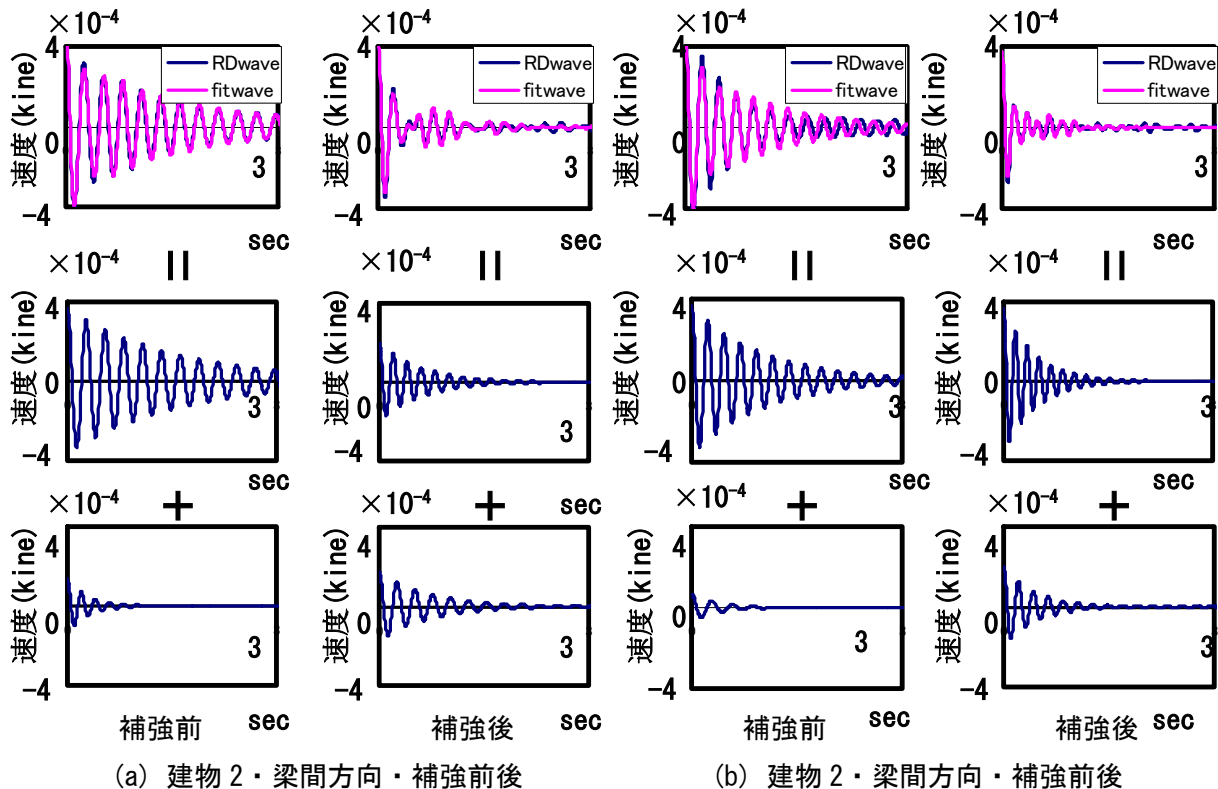


図-10 RD法により抽出した重畳した自由振動波形とAR法により分離した自由振動波形

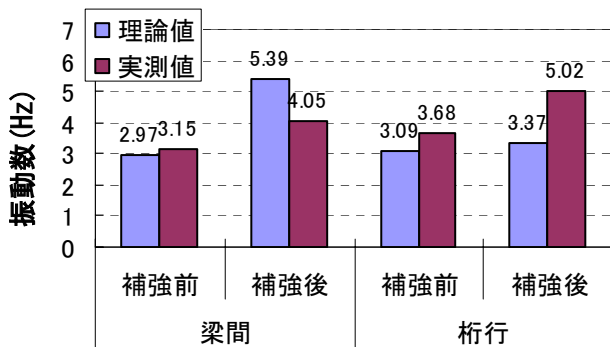


図-8 建物1の各方向における固有振動数の理論値と実測値の比較

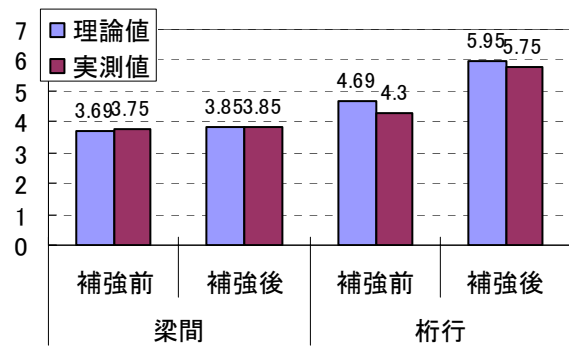


図-9 建物2の各方向における固有振動数の理論値と実測値の比較

表-8 建物1のRD法とAR法によって同定された振動数、減衰定数、速度の振幅

(a) 梁間方向

梁間方向	振動数 Hz	減衰定数 %	振幅 10^{-4} kine
補強前	3.05	3.68	9.32
補強後	3.98	3.69	3.51

(b) 桁行方向

桁行方向	振動数 Hz	減衰定数 %	振幅 10^{-4} kine
補強前	3.43	4.34	6.03
補強後	5.06	5.78	1.05

表-9 建物2のRD法とAR法によって同定された振動数、減衰定数、速度の振幅

(a) 梁間方向

梁間方向	振動数 Hz	減衰定数 %	振幅 10^{-4} kine
補強前	3.70	2.67	3.64
補強後	3.91	5.55	1.75

(b) 桁行方向

桁行方向	振動数 Hz	減衰定数 %	振幅 10^{-4} kine
補強前	4.32	3.56	1.83
補強後	5.86	4.43	0.88

5.75Hzに増大し、減衰定数が3.56%から4.43%に増大した。

- (5) 以上の結果より粘弾性ダンパーの補強により建物全体の減衰定数が増加したことが確認できた。また、固有振動数は実測値と理論値が概ね対応した。
- (6) RD法とAR法を併用することで、重畳した自由振動波形をモード成分ごとに分離して評価することができることを確認した。

謝辞

本研究は2005年度科学研究費基盤研究・B-一般173603276、および私立大学学術研究高度化推進事業(いずれも研究代表者 曾田五月也)の助成を受けて実施した。また微動測定においては曾田研究室の多くの方々に協力いただくとともに耐震補強工事現場の皆様(鴻池組 東北支店)

に数々の便宜をはかっていただきました。記して感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 曾田五月也・和田純一・平田裕一・山中久幸「繰り返し加力実験にもとづく粘弾性ダンパーの力学モデルの構築」日本建築学会構造系論文集, pp.29-36, 1994.3
- 2) 国土交通省住宅局建築指導課(監修)「2001年度改訂版 既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準・同解説」(財)日本建築防災協会 2001.10
- 3) 日本建築学会「建築物の減衰」日本建築学会 pp.83-86, 2000.10
- 4) 北川源二郎「時系列解析」岩波書店 pp.34-46, 2005.2