

RC構造物の振動特性把握と耐震補強効果確認

塩尻弘雄¹・アブリカム・アブドラ²・李春吉²

¹正会員 工博 日本大学教授 理工学部土木工学科 (〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台1-8)

²工修 日本大学理工系研究科土木工学専攻 (〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台1-8)

日本大学船橋キャンパスに於いては、RC 4階建て校舎に対して、順次、耐震改修が行われつつある。それら校舎の、補強前後で、振動特性の把握と、耐震補強効果の検証を行う予定である。ここでは、すでに補強の終わった2校舎と、補強着手が確定した1校舎について、起振実験、常時微動観測等を行って、振動特性を把握した結果について述べる。起振実験については、FFTにより、伝達関数を求め、SN比の小さい常時微動については、動的特性を精度高く得るため、FFT、AR、ARMA、ERA等の手法について比較検討し、結局ARMA法でデータ解析をおこなった。また、起振実験結果と常時微動観測結果を比較して、常時微動観測結果の信頼性を明らかにした。観測による補強前後の振動特性の差、および、その数値シミュレーションにより、耐震補強効果を確認した。

Key Words, vibration test, microtremor, data processing, retrofitting

1. はじめに

③③ 阪神大震災以降、既存の土木・建築構造物の耐震性評価や耐震補強が注目されている。合理的な耐震補強法の確立のため、構造物の耐震補強前後の動特性を把握し比較することは、非常に有意義であると思われる。日本大学船橋キャンパスに於いては、RC 4階建ての複数の校舎に対して、順次、耐震改修が行われつつある。その船橋校舎2号館、3号館において補強前後で起振機を用いて振動実験を行い、8号館において補強前に常時微動観測を行った。ここでは、それらの実験結果と、シミュレーション等について述べる。

2. 対象構造

(1) 船橋2号館

2号館は、1965年に竣工したRC造地下1階地上4階建ての建物である。阪神大震災後、耐震安全性確保のため耐震補強を好ましいとされ、1997年耐震補強が行われた。補強工事はつぎの4点について行われた。¹⁾ (図1参照)

- ① 地下及び1階の柱のせん断補強筋(帯筋)の増加
- ② 鉄骨ブレースによる強度補強
- ③ 鉄筋コンクリート壁の増設
- ④ スリット・アンカー・ドライエリアの補強

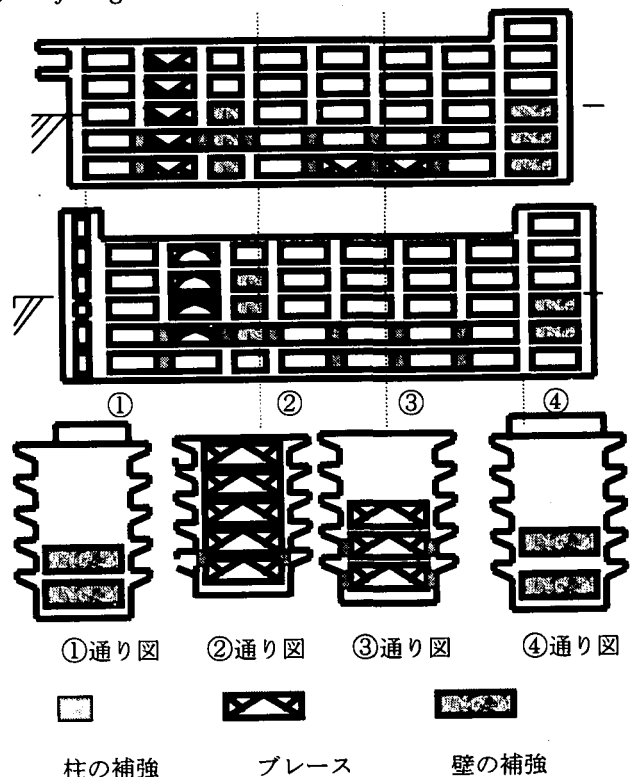
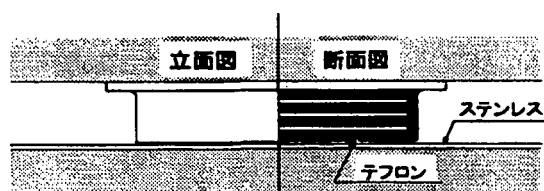


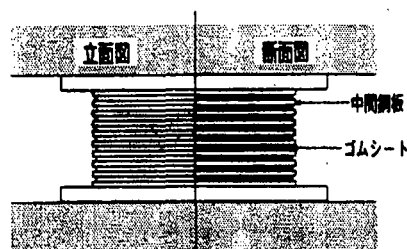
図1 2号館耐震補強

(2) 船橋3号館

船橋3号館は、2号館と同じ設計で、同時期に建設された。この校舎では、1998年、工事中も使用が可能との理由で、地階の柱頭に免震装置(図2参照)を設置する免震補強が行われた。なお、関連して、免震装置を設置する柱断面の増強と、一部補強がなされた。



弾性すべり支承



積層ゴム支承

図2 使用された免震装置

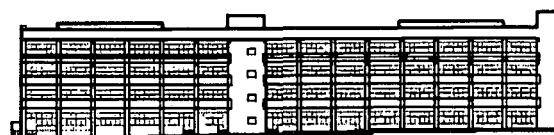
(3) 船橋8号館

船橋8号館は1968年に建築された4階建てのRC構造である(図3参照)。2001年より、一部建て替えと、残りの部分の制震方式による補強が予定されている。

3. 実験方法

2号館及び3号館に関しては、最大起振力1 t fの油圧式起振機を屋上の中央、及び東側に設置し、0.5 Hz～20 Hzの範囲で、定常加振およびスイープ加振を行った。中央においては水平短軸方向・長軸方向の2方向の加振を行い、東側では水平短軸方向の加振を行った。計測は、加速度計と速度計を用い、サンプリング周波数を100 Hz、ローパスフィルターを30 Hzに設定してデジタル収録を行った。加振条件と計測時間を表1に、起振機の設置点と計測点の配置を図4に示す。

8号館に関しては、補強前の振動特性を明らかにするため常時微動観測を行った。計測は、速度計で多点同時計測(12点36成分)を行った。速度計の設置位置を図5に記す。図の☆が計測点を示しており、各点で上下方向・水平方向(南北・東西方向)の3方向を同時に計測した。速度計が上下8台(8成分)、水平8台(8成分)しかなかったため、6ケース(屋上3点、3階3点、1階3点、西側3点、中央3点、東側3点)に分けて計測した。各ケースとも30 Hzのローパスフィルターをとおり、サンプリング間隔10 msecで10分間計測を行っ

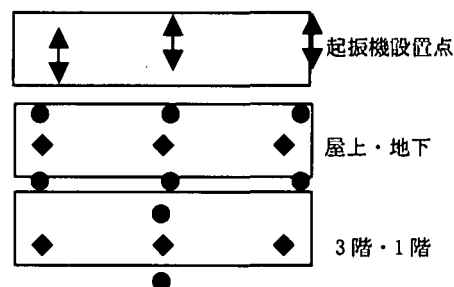


(短辺12m, 長辺93m, 高さ14.5m)

図3 船橋8号館

表1 加振条件と計測時間

	振動数範囲	加速度	計測時間
振動数	0.5～2 Hz	0.1 G	30 s
増加率	1.5～5 Hz	0.3 G	30 s
一定	4～15 Hz	1 G	60 s
	10～20 Hz	2.5 G	120 s
振動数	0.5～2 Hz	0.1 G	30 s
増加率	1.5～5 Hz	0.3 G	30 s
/振動	4～15 Hz	1 G	60 s
数一定	10～20 Hz	2.5 G	120 s



● 鉛直加速度計 ◆ 水平(短軸)速度計

図4 起振機設置点と計測点

た。

4. 解析方法

起振実験結果に関しては、センサーから得られたデータと起振機の並進運動する質量に取り付けた加速度計から得られた起振機信号を校正したのち、機振機信号を入力、各センサーからの信号を出力として、FFTにより伝達関数を求め、得られた伝達関数から固有振動数を読み取り、振動モードを求めた。常時微動観測値に関しては、SN比が小さいため、FFT法、ARモデル、ARMAモデル、ERA法²⁾によりデータ処理を行い比較検討した。

5. 実験結果

2号館の起振実験結果の解析により得られた伝達関数の例として、屋上中央部において短軸方向に起振した場合の屋上中央部のコンプライアンスを図6に示す。また、伝達関数を読み取る事により得られた固有振動数の比較を表2に、モード形状の比較を

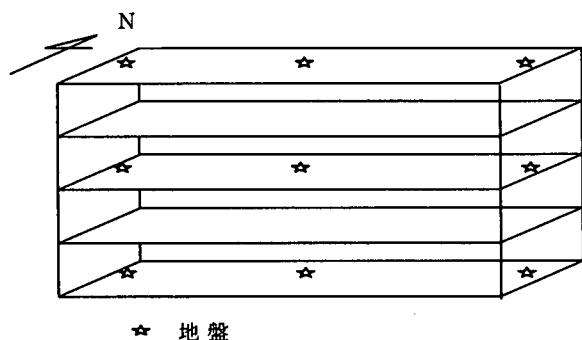


図5 センサ設置位置

図7、8に示す。短軸方向の応答については補強により応答変位が抑制されていること、固有周期が高くなっている事が解り、建物の剛性が高くなっているといえる。また、モード形状の違いから、特に地下及び1階部分の短軸方向の剛性が上がっていることが認められる。

3号館の、補強前後の固有振動数の比較を表-3に示す。免震の採用のため、補強後に固有振動数は減少している。

常時微動の解析に先立ち、FFT、AR、ERAを既知のデータに適用して適用性を検討した。図9のような建物モデルにランダム波を加え、時間増分 $\Delta t = 0.01$ 秒で計算した各層の応答加速度をデータとして、動特性の推定を行った。なお、用いたデータは以下のとおり。

$$M_1 = 1.0t, M_2 = 2.0t, M_3 = 1.0t, k_1 = k_2 = k_3$$

$$= 1580 \text{ KN/cm}, c_1 = c_2 = c_3 = 2.0 \text{ KN} \cdot \text{s/cm}$$

ランダム波を三階を加え、(白色ガウス雑音)、データ数10000で計算した。

各方法で解析した結果を表4に示す。ERA法とARモデルは理論値とほぼ同じ同定結果を得ることが出来た。AR、ERA法では、固有振動数、減衰は自動的に計算される。ERA法は精度が高いが、自由振動データを用いる必要があり、ランダムな応答データからは、RD法³⁾により自由振動波形を算出する必要があり、かなりな長時間のデータを必要とし手間がかかる。AR法はランダム応答データをそのまま扱え、精度もそれほど悪くない。

8号館の常時微動のデータ処理に、FFT法、ARモデル、ARMAモデルを適用した結果によるモード定数を表5に記し、FFT法、ARモデルにより算出した屋上NS方向の速度のパワースペクトルを図10に記す。図11にはモード形を示した。いずれも、手法によりやや差はあるが、概ね一致している。ARMA法では、モードパラメータ、モード形が、自動的に計算されるので、便利といえる。なお、図12に示す建物の数値モデルを用いて解析を行ったところ、1次固有振動数は3.22Hzと、ほぼ計測値と一致した。

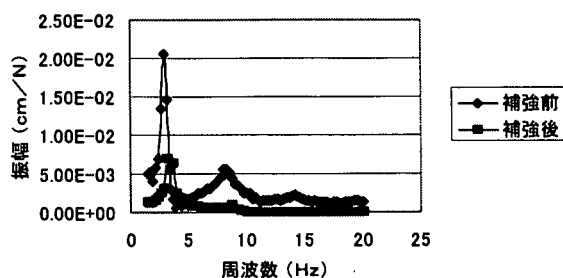


図6 屋上中央部のコンプライアンス

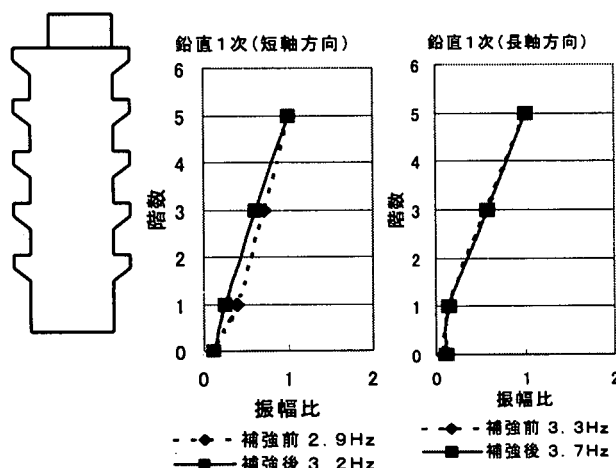


図7 モード図(2号館:鉛直方向)

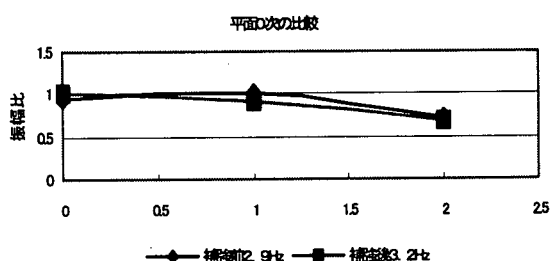
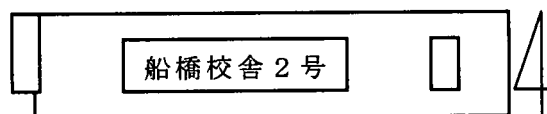


図8 モード図(2号館:水平方向)

表2 固有振動数の比較(2号館)

	補強前	補強後
短軸方向		
1次(鉛直1次、平面0次)	2.9Hz	3.2Hz
2次(鉛直1次、平面1次)	3.4Hz	3.8Hz
3次(鉛直1次、平面2次)	8.3Hz	8.8Hz
長軸方向1次	3.3Hz	3.7Hz

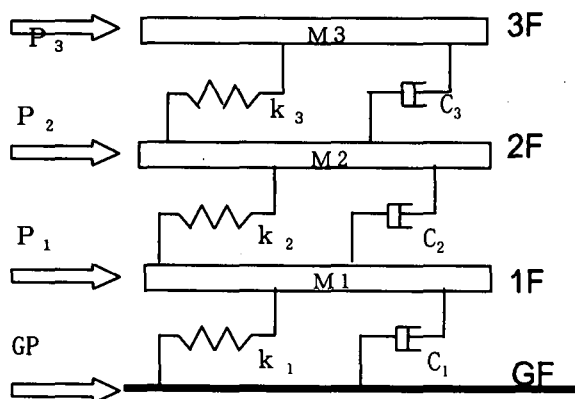


図9 数値モデル

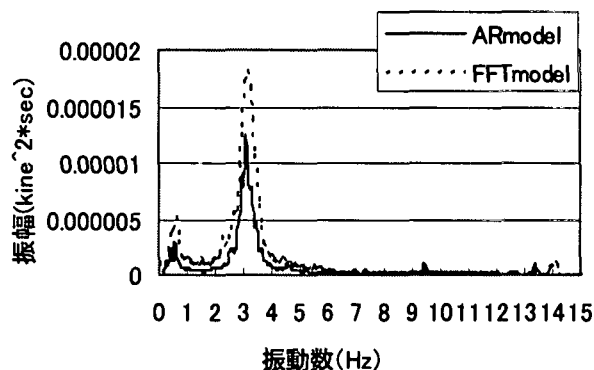


図10 屋上NS方向のパワースペクトル

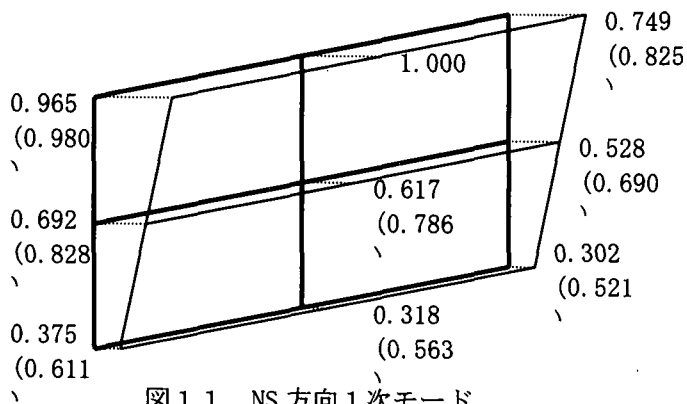


図11 NS方向1次モード

構造スケール 0 20m

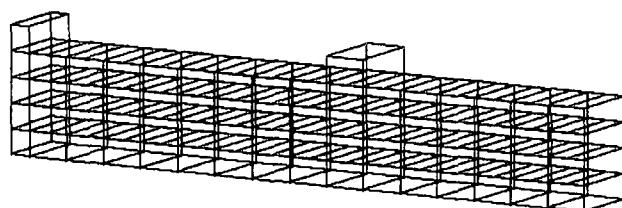


図12 8号館数値モデル

表3 固有振動数の比較

	モード	補強前	補強後
長軸	1次	3.0(Hz)	2.1(Hz)
	2次	3.8(Hz)	7.5(Hz)
	3次	9.6(Hz)	9.6(Hz)
短軸	1次	2.7(Hz)	1.8(Hz)
	2次	7.7(Hz)	2.6(Hz)
	3次	—	7.3(Hz)

表4 固有振動数の比較

解析方法	f 1 (Hz)	f 2 (Hz)	f 3 (Hz)
理論値	2.41	7.49	9.91
ERA	2.41	7.49	9.91
AR	2.41	7.51	9.95

表5 モード定数 (8号館)

解析方法	f1 (Hz)	減衰比	f2(Hz)	減衰比
EW	FFT	3.191	0.090	9.375
	AR	3.238	0.083	9.375
	ARMA	3.382	0.125	8.585
NS	FFT	3.171	0.031	9.375
	AR	3.153	0.070	9.375
	ARMA	3.064	0.070	9.379

(f1:1次固有振動数、f2:2次固有振動数)

5. まとめ

耐震補強が行われた、もしくは、予定されているRC建物に、起振実験と、常時微動観測を行い、耐震補強効果を確認すると共に、データ処理法の適用性の検討をおこなった。

耐震補強前後で振動特性には、補強方法に応じた明確な差が認められ、振動特性により補強効果の確認が可能と考えられる。

SN比の小さい常時微動観測においては、観測時間がある程度とれば、いずれの手法でもほぼ妥当な結果が得られる。

謝辞：

この研究の一部は、学術フロンティア「環境・防災都市に関する研究」の一環としてその予算を用いてなされました。

参考文献

- Shiojiri, H., Tanaka, K. and Kitajima, K.: EFFECT OF RETROFITTING OF RC BUILDING, *Proc. of the Civil and Environmental Engineering Conference*, Vol.3, 11-18, (1999.11)
- Juang J.N, and Papa, R.S.: An Eigensystem Realization Algorithm For Modal Parameter Identification and Modal Reduction, *J. Guidance* Vol18, No5, pp620-627, 1985
- Ibrahim, S.R.: Random Decrement Technique for Modal Identification of Structures, *J. Spacecraft*, Vol14, No11, pp696-701, 1977