

免震建物の微振動特性に関する研究

Dynamic Characteristics of Seismically Isolated Structures in Microtremor

山上 聡* 安井健治* 山田高之** 川井伸泰***

要旨

近年の地震被害を受け、製造施設や研究施設等の機能維持を図るために免震化を検討する機会が増えている。しかし、免震構造は、1) 地盤との相互作用が少なく地下へ逸散減衰が期待できない、2) 免震層による微振動の増幅特性が明らかでない等、常時の微振動による嫌振機器への影響が懸念されている。そこで、本研究では、免震建物の微振動特性を把握し予測評価技術と対策構法を確立する目的で、免震建物および免震装置における微振動特性の実測を行った。その結果、免震建物の微振動レベルにおける振動数は設計時の1.4~2.7倍程度であり、免震装置単体においては、微振動レベルにおいても $h=0.02$ 程度の減衰を有することがわかった。また、地盤振動の入力損失効果については山原の式において基礎長さに短辺方向の長さを用いることで、いずれの方向も精度良く評価できることがわかった。

キーワード：免震建物、微振動計測、RD法、入力損失フィルター

1. まえがき

近年の地震被害を受け、製造施設や研究施設等の機能維持を図るために免震化を検討する機会が増えている。しかし、精密機器等にとって免震構造は、1) 地盤との相互作用が少なく地下への逸散減衰が期待できない、2) 免震層による微振動の増幅特性が明らかでない等、常時の微振動による嫌振機器への影響が懸念されている。一方、免震建物における微振動特性を実測した例¹⁾は多くない。

本研究では、免震建物の微振動特性を把握し、予測評価技術と対策構法を確立する目的で、免震建物および免震装置における微振動特性の実測を行い、それらの計測結果から次の特性について評価・検討を行った(図-1)。

- i. 耐圧盤と免震層上部の計測結果から、免震建物の微振動レベルにおける振動特性
- ii. 基礎に固定された免震装置単体の計測結果から免

- iii. 地表面と耐圧盤の計測結果から、地盤振動の入力損失効果の特性

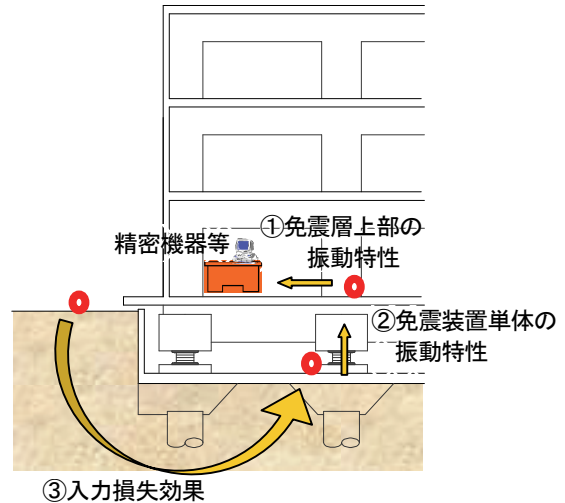


図-1 特性評価のイメージ

表-1 計測を行った建物概要

建物名称	A棟	B棟	C棟	D棟	E棟
構造/階数	RC造/4階	RC造/5階	WRPC造/2~5階	S造/3階	RC造/38階
建築面積	348 m ²	2,086 m ²	899 m ²	2,599 m ²	1,761 m ²
延べ床面積	1,330 m ²	7,998 m ²	2,937 m ²	5,224 m ²	37,412 m ²
免震装置	標準積層ゴム 25基 鋼棒ダンパー 12基	標準積層ゴム 35基 鉛入り積層ゴム 12基 鋼棒ダンパー 10基	高減衰積層ゴム 25基	鉛入り積層ゴム 27基 標準積層ゴム 14基	鉛入り積層ゴム 40基 標準積層ゴム 2基

*技術研究所 **技術本部建築部 ***東京支社建築設計部

以降これらの結果を順に報告する。

2. 測定概要

2.1 測定建物概要

微振動測定の対象とした建物の諸元を表-1に示す。免震建物の微振動応答特性を明らかにするために、免震装置の種類や建物規模および平面形状の異なる建物を選んだ。

A棟は既存の建物（1985 年竣工）であるが、今回の計測以外に竣工時に鋼棒ダンパーが有る場合と無い場合での微振動計測も行った。免震層上部における応答はA、B、C棟で計測した。免震装置の単体試験は施工中のD、E棟で行った。入力損失効果の検証は全棟で行った。

2.2 微振動測定方法

微振動計測にはサーボ型速度計を使用した。サンプリング周波数は100Hz または 200Hz、計測時間は 600 秒を標準とし3回以上計測した。なお、新設建物であるB、C、D棟については竣工直前に実施し、計測に際しては比較的風が弱く、建物内での作業をしていない時間帯を選んで実施した。測定位置は、地表面、耐圧盤上、1階床を対象とした。D、E棟で実施した免震装置の単体試験においては、基礎に固定された免震装置の上下で計測した。

3. 免震建物の微震動特性

3.1 耐圧盤と1階床の測定結果

免震装置の異なる、A、B、C棟の水平方向の計測結果について検討した。

a. 時刻歴波形

各建物で計測した速度波形（X方向：長辺方向）を図-2に示す。いずれの建物においても免震層上部に当たる1階床の速度レベルは、 4×10^{-3} cm/s $\sim 8 \times 10^{-3}$ cm/s 程度であった。

b. フーリエ・スペクトル比

微振動レベルにおける免震建物の応答特性を調べるため各建物における耐圧盤速度記録と1階床速度記録のフーリエ・スペクトル比を図-3に示す。スペクトル比の算定にあたっては、Parzen Windowを施した。

A棟：固有振動数は 1.0Hz でありスペクトル比は約 40 倍であった。スペクトル比を応答倍率とし応答倍率=1/2h として略算すると h=0.0125 程度と評価される。これはこの建物で用いられている標準積層ゴムと鋼棒ダンパーによる減衰と考えられる。

B棟：固有振動数は 2.37Hz、フーリエ・スペクトル比は8倍程度であった。スペクトル比から略算すると h=0.06 程度と評価される。鉛入り積層ゴムは、標準積層ゴムと鋼棒ダンパーの組合せに比べ

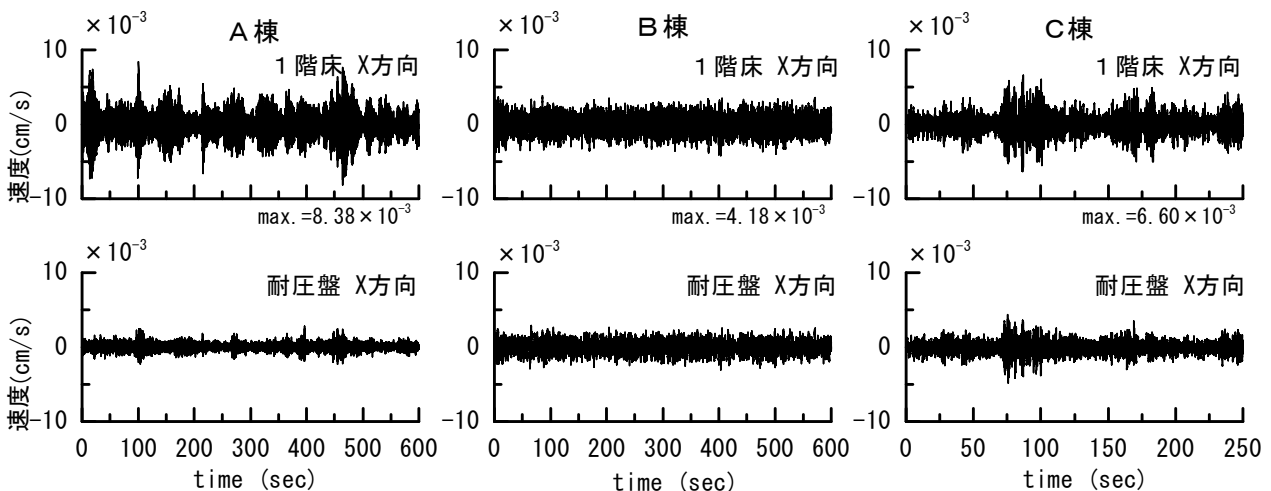


図-2 時刻歴波形

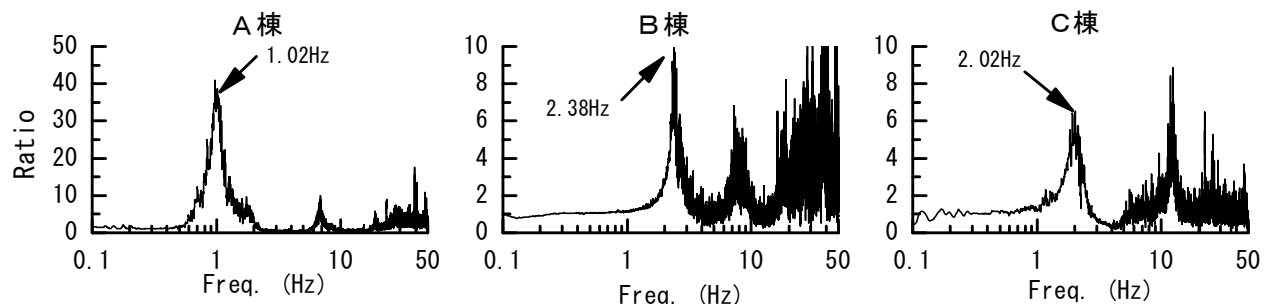


図-3 フーリエスペクトル比（1階床/耐圧盤）

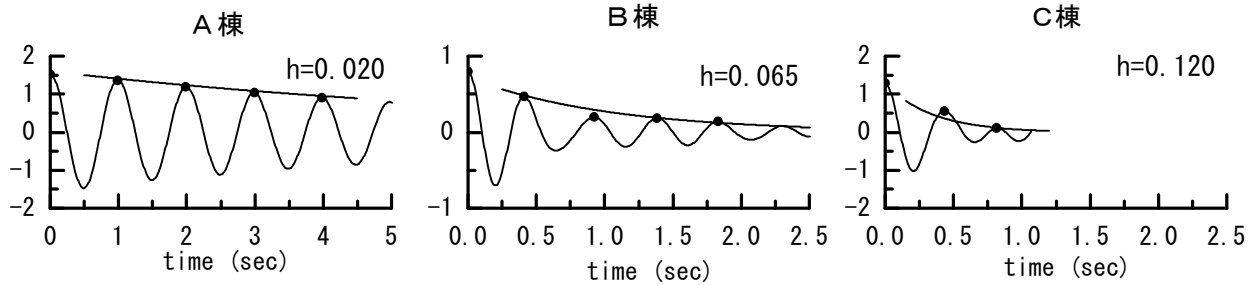


図-4 RD法を用いた評価（1階床）

表-2 実建物の微振動計測結果と設計振動数の比較

免震装置	A棟		B棟	C棟
	標準積層ゴム	標準積層ゴム 鋼棒ダンパー	標準積層ゴム 鉛入り積層ゴム U型鋼棒ダンパー	高減衰積層ゴム
設計振動数 (Hz)	0.47	0.70	0.86	0.75
計測振動数 (Hz)	0.68	0.98	2.37	2.00
計測/設計比	1.45	1.4	2.74	2.67

て、微小振幅レベルから減衰性能を有することが推測される。

C棟：固有振動数は 2.0Hz、スペクトル比は5倍程度であった。スペクトル比から略算すると $h=0.10$ 程度と評価される。高減衰積層ゴムは微小振幅レベルから減衰性能を有することが分る。

c. RD法による減衰性能評価

免震層の減衰特性を調べるためにRD法²⁾を用いて評価した。RD法により求めた自由振動波形を図-4に示す。

A棟：RD法による減衰定数は $h=0.020$ であった。

B棟：RD法による減衰定数は $h=0.065$ であった。

C棟：RD法による減衰定数は $h=0.120$ であった。

いずれの場合も、スペクトル比から略算した減衰評価とよくあっている。

3.2 設計振動数との比較

免震建物の微振動計測結果と設計振動数の比較を表

-2に示す。計測結果は竣工時のものを用いており、A棟では鋼棒ダンパーが有る状態と無い状態で計測されている。また、設計振動数を算出する際の免震層の剛性は各免震装置の設計剛性（標準積層ゴムは $\gamma=100\%$ 時の剛性、鉛入りおよび高減衰積層ゴムは $\gamma=100\%$ 時の一次剛性、鋼棒ダンパーは初期剛性）におけるものを用い、建物質量は計測時の実状に見合った質量に補正した。表-2から、微振動レベルでの計測振動数と設計振動数の比は建物により異なり、免震建物の微振動レベルでの特性を一概には評価できないことがわかる。この要因には、設備配管等の影響のほか、免震装置により微振動レベルの特性が異なることが考えられる。

そこで、免震装置単体を対象に実施した微振動計測および自由振動試験を行い、微振動レベルにおける免震装置単体の剛性を評価する。

4. 免震装置単体の微振動特性

表-3 単体試験に用いた免震装置の諸元

		天然ゴム系積層ゴム		鉛プラグ入り積層ゴム			
		RB650	RB700	LRB600	LRB650	LRB1200	LRB1300
せん断弾性率 (G)	N/mm ²	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39
ゴム外形	mm	650	700	600	650	1200	1300
ゴム内径 (鉛プラグ径)	mm	70	70	(130)	(140)	(240)	(260)
ゴム層厚×層数	mm×層	4.2×38	4.5×36	4.0×40	4.2×38	8.0×30	8.7×30
ゴム総厚	mm	159.6	162.0	160.0	159.6	240.0	261.0
1次形状係数		34.5	35.0	37.5	38.7	37.5	37.4
2次形状係数		4.1	4.3	3.8	4.1	5.0	5.0
鉛直剛性 Kv	10 ³ kN/m	2214.0	2565.0	2207.0	2655.0	5890.0	6347.0
水平剛性 Kh (設計剛性)	10 ³ kN/m	0.795	0.910	9.090	10.700	24.100	25.920
上部質量	kg	467.8	540.1	422.1	462.2	1236.2	1310.2
積層ゴム本体質量	kg	359.1	483.4	354.3	402.6	1273.5	1966.6

4.1 単体試験概要

単体試験に用いた各免震装置の諸元を表-3に示す。試験を行ったのは標準積層ゴム2体（RB650、700）、鉛入り積層ゴム4体（LRB600、650、1200、1300）の計6体である。

建設中の免震建物において、基礎上に固定された免震装置を対象に、微振動計測（基礎上と免震装置頂部）と、免震装置の頭部をゴムハンマーで軽く叩いて加振した自由振動計測を行った（写真-1）。

4.2 微振動計測結果

微振動測定から得られた免震装置の上下でのスペクトル比の一例を図-5に示す。標準積層ゴム（RB650）の1次固有振動数は7.4Hz、鉛入り積層ゴム（LRB650）は56Hzであった。鉛入り積層ゴムは、鉛コアの剛性の寄与によりかなり高い振動数となっている。

また、応答倍率から概略評価すると、標準積層ゴムの減衰定数は $h=0.02$ 程度、鉛入り積層ゴムの減衰定数は $h=0.03$ 程度と推定される。鉛入り積層ゴムは、微振動レベルにおいても減衰性能を発揮していると見なせる。

4.3 自由振動計測結果

積層ゴム支承頂部を打撃した際の自由振動波形とそのフーリエ・スペクトルの一例を図-6に示す。

自由振動の卓越振動数は、標準積層ゴム（RB650）では7.3Hz、鉛入り積層ゴム（LRB650）は55Hzであり、微動計測結果と良く一致している。自由振動波形から対数減衰率で算出した減衰定数は、標準積層ゴムは $h=0.02$ 程度、鉛入り積層ゴムでは $h=0.024$ 程度であった。鉛入り積層ゴムは地震時に想定される減衰性能（等価粘性減衰係数 $heq=0.25$ 程度）には及ばないものの、微振動のレベルにおいても標準積層ゴム以上の減衰性能を発揮することが確認された。

4.4 微振動時の剛性評価

計測で得られた免震装置単体の固有振動数から、微振動レベルでの免震装置の剛性（計測剛性）を算出し設計剛性と比較した。

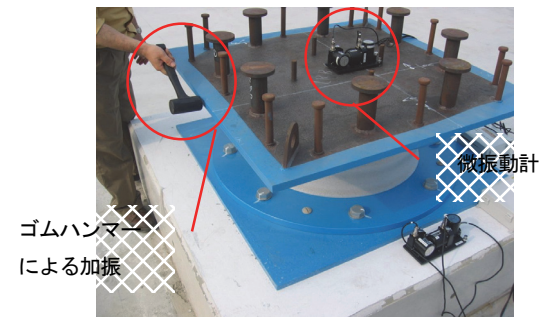


写真-1 単体試験状況

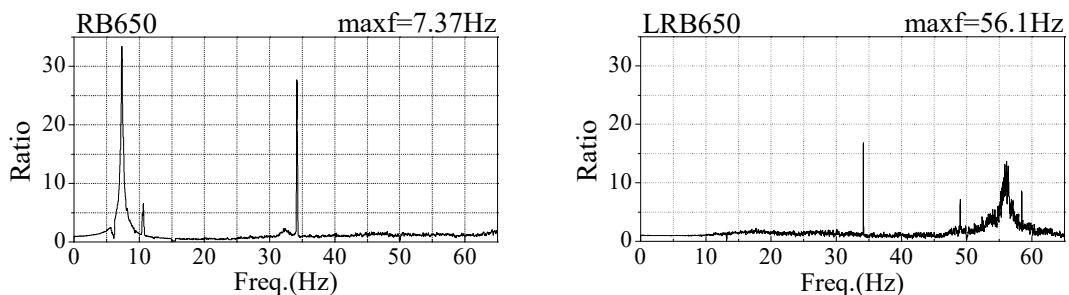


図-5 常時微動の計測結果

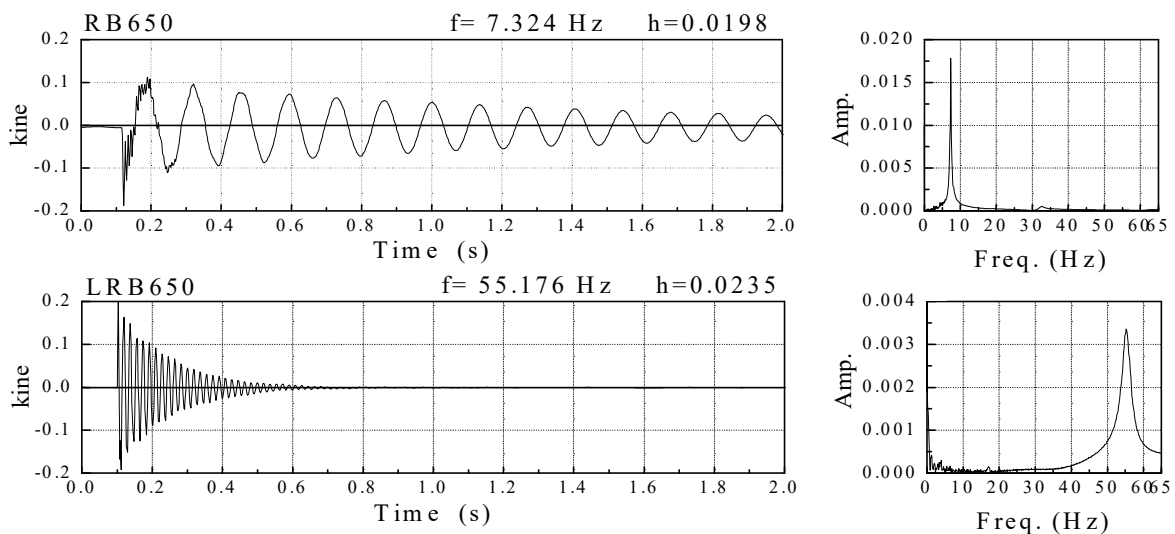


図-6 自由振動の計測結果

表－4 計測結果と剛性比

	天然ゴム系積層ゴム		鉛プラグ入り積層ゴム			
	RB650	RB700	LRB600	LRB650	LRB1200	LRB1300
有効質量 N	5757.5	6871.6	5249.0	5844.2	16275.1	19264.3
設計剛性 10 ³ kN/m	0.795	0.910	9.09	10.70	24.10	25.92
計測振動数(平均) Hz	7.39	7.20	49.39	55.66	42.00	40.00
計測剛性 10 ³ kN/m	1.264	1.434	51.99	72.90	115.57	124.08
剛性比(計測/設計)	1.59	1.58	5.72	6.81	4.80	4.79
面積比(Ap/Ar)			0.049	0.049	0.042	0.042

注 Ap：鉛プラグ断面積 Ar：積層ゴム断面積

計測剛性 (K_k) は、計測振動数 (f) をもとに

$$K_k = (2\pi f)^2 M \quad (1)$$

によって算出した。このとき、積層ゴム本体はせん断変形するとして全質量の 1/3 を有効質量と仮定し、積層ゴム上部のフランジプレートとスタッド類は剛体として、両者の合計を質量 (M) とした。

計測振動数から上記によって算出した剛性を、設計剛性と比較して表－4 に示す。ここでの設計剛性は、標準積層ゴムは 100%歪み時の等価剛性、鉛入り積層ゴムは 100%歪み時の解析用復元力モデルの第 1 剛性(接線剛性の 13 倍)である。

微振動レベルにおける免震装置単体の水平剛性は、標準積層ゴムは設計剛性の 1.6 倍程度、鉛入り積層ゴムにおいては 4.8~6.8 倍となった。標準積層ゴムの剛性は振幅による影響が小さく、設計剛性に対する比率は装置の大きさによらずほぼ一定である。一方、鉛入り積層ゴムは微小な振幅レベルでは剛性が高く、設計モデルの剛性とは大きく異なることが分かった。また、鉛入り積層ゴムはサイズにより剛性比に差異が見られる。これは、免震装置の積層ゴム断面積における鉛プラグ断面積の割合が、影響していると考えられ、鉛プラグの占める割合が低くなるほど剛性倍率も低くなる傾向がある。

5. 入力損失効果の検証

免震建物の微振動レベルを設計段階で予測評価するためには、事前に計測が可能な地表面の微振動データか

ら基礎への実効入力を適切に評価する必要がある。地盤と基礎との間の動的相互作用により、構造物に対する振動入力には小さくなること(入力損失効果)が知られている³⁾。そこで、この入力損失効果を適切に反映した伝達関数(入力損失フィルター)が得られれば、地表面の計測値にこれに乗じることで、構造物の基礎に対する振動入力を予測評価することが可能となる。

ここでは、地表面から耐圧盤への微振動レベルでの入力損失効果を検証するため、表－1 に示した 5 棟の建物を対象に地表から耐圧盤への伝達特性の検討を行った。表－5 に計測を行った建物の基礎形状(耐圧盤)の概要を示す。各建物の規模と耐圧盤の形状の比較並びに耐圧盤底の深さと、P S 検層から得られた耐圧盤底面でのせん断波速度 V_s を示してある。表に示すように基礎形状は長辺と短辺の長さの比がさまざまなものとなっている。

5.1 微振動計測

計測器には前述と同様に、微振動を長周期成分まで精度良く計測するためにサーボ型速度計を用いた。

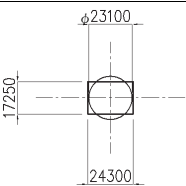
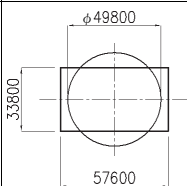
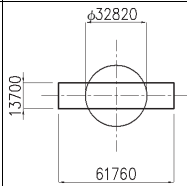
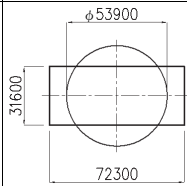
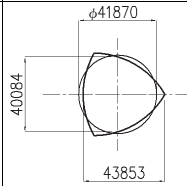
各計測は、サンプリング周波数 100Hz または 200Hz、計測時間 5 分または 10 分間を目安として実施している。

計測器の方向については建物軸にあわせるものとし長辺方向を X 軸、短辺方向を Y 軸、上下方向を Z 軸とした。

5.2 入力損失フィルターの検討

伝達関数の特性評価は各計測記録において地表計測点(入力)と耐圧盤計測点(出力)における速度記録のフーリエスペクトルから求めた。このときの伝達関数を算出するにあたり Hanning Window によるスペクトルの平滑化

表－5 入力損失フィルターの検証を行った建物の概要

建物名称	A 棟	B 棟	C 棟	D 棟	E 棟
建築面積	348 m ²	2,086 m ²	899 m ²	2,599 m ²	1,761 m ²
寸法比較(mm) 円は等価面積を示す					
基礎深さ(mm)	1300	2700	2300	1700	5700
Vs (m/sec)	168	270	50	270	230

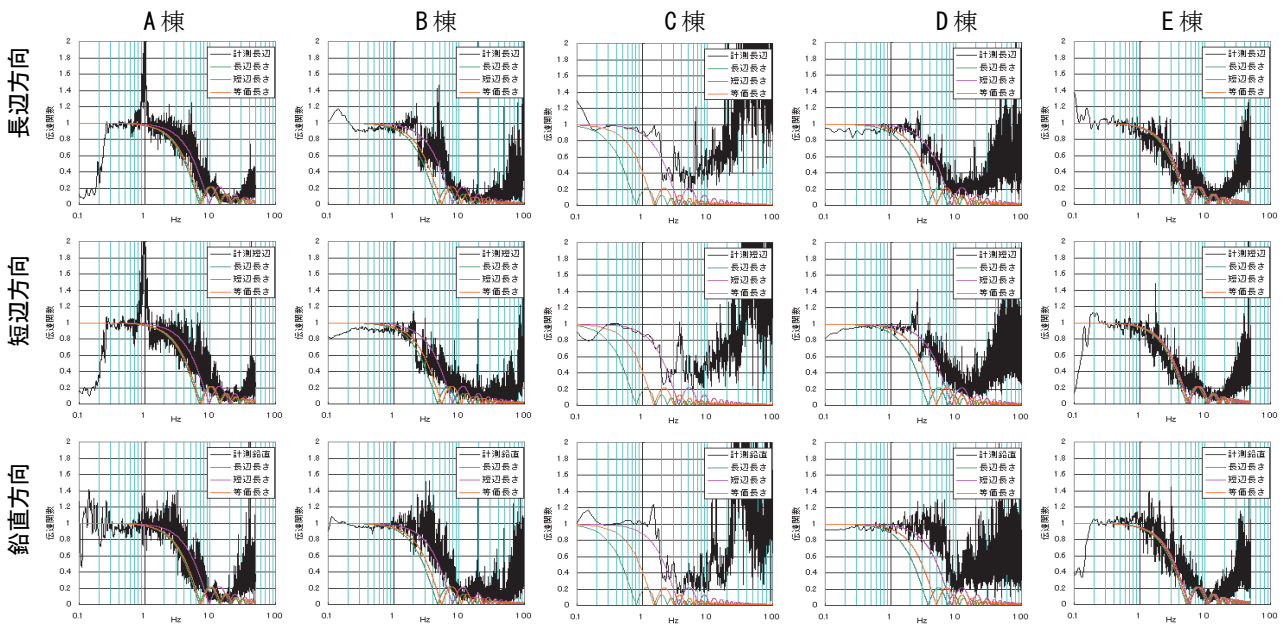


図-7 入力損失フィルターの評価

を行った。

計測から得られた伝達関数と入力損失フィルターの評価式を図-7に示す。図中、評価式は山原の式⁴⁾

$$\eta(f) = \left| \frac{2V_s \sin \frac{B\omega}{2V_s}}{B\omega} \right| \quad (2)$$

※ B : 基礎長さ、 V_s : 地盤せん断波速度

を参考にし、基礎長さ B については、耐圧盤の長辺長さ・短辺長さ・等価面積の直径のそれぞれとした場合の値を併記した。鉛直方向については様々な提案式が出されているが、ここでは水平方向と同じ係数を用いた評価式を適応してみた。

今回の5棟の計測結果においては、長辺方向・短辺方向とも基礎の短辺長さをを用いた値が最も精度良く評価できるといった結果であった。また、鉛直方向についても水平方向と同様に、短辺長さと V_s をを用いた式で精度良く評価できた。

実用性を考慮すると、入力損失フィルターは式(2)の各ピークを包絡した曲線とすることが望ましいと考えられる。

6. まとめ

実際の免震建物において微振動測定を実施し以下のことが分った。

- i. 微振動時の固有振動数は設計で想定する値より高く、標準積層ゴム仕様で1.4倍程度、鉛入り積層ゴムまたは高減衰積層ゴム仕様では2.7倍程度となる
- ii. 標準積層ゴム、鋼棒製ダンパーの微振動レベルにおける減衰性能は小さい
- iii. 鉛入り積層ゴム、高減衰積層ゴムは微振動レベルにおいても減衰性能を発揮する

iv. スペクトル比から略算した減衰評価とRD法による減衰評価はよく対応した

v. 積層ゴム単体の微振動計測および自由振動試験の結果、微振動レベルにおける標準積層ゴムの剛性は設計剛性の1.6倍、鉛入り積層ゴムでは4.8~6.8倍であった

vi. 地表面から基礎底面への入力損失フィルターは、山原の式において基礎長さに短辺方向の長さを用いることで、いずれの方向も精度良く評価できる

7. あとがき

今後も計測を増やしデータを蓄積することで、免震建物における微振動の入力から応答までの特性を把握し、建物レベルでの予測評価精度の向上に繋げたい。

本研究に際しては東京大学生産技術研究所藤田隆史教授に終始助言をいただいた。記して謝意を表す。

【参考文献】

- 1) 江利川俊明、藤田隆史、北村春幸、安田正志、古江慶祐、「免震建物の常時微動性状 その1 免震建物の常時微動測定」、建築学会大会梗概集 D-1、pp. 311-312、2000.9
- 2) 田村幸雄、佐々木淳、塚越治夫、「RD法による構造物のランダム振動時の減衰評価」、日本建築学会構造系論文集、第454号、pp. 29-38、1993.12
- 3) 山原 浩、「地震時の地動と地震波の入力損失(第1報)」、建築学会論文報告集 165号、pp. 61-66、1969.11
- 4) 土質工学会、「土と構造物の動的相互作用」、土質基礎工学ライブラリー9、p. 141