

免震建屋における地震観測結果とその解析的検討

森 下 真 行 斉 藤 芳 人
藤 波 健 剛 龍 神 弘 明

要 旨

1992年12月より当社西船橋社宅（免震装置の種類のみ異なる（鉛入り積層ゴム，高減衰積層ゴム）免震棟2棟およびこれらと同一形状，同一寸法の非免震棟）において，地震観測を実施している．¹⁾ ²⁾ 得られた地震観測記録をもとに地震記録の特性，各免震装置の復元力特性³⁾ および免震装置解析モデルの妥当性について検討を行ったので報告する．以下に得られた結果を示す．

- (1) 水平方向に関して免震効果が確認された．特に近距離の地震に対して顕著である．
- (2) 地震観測記録から免震装置の振動特性成分を分離し，免震装置のみの復元力特性を求める方法を示した．これから，各免震装置の初期剛性，弾性限界及び各歪レベルでの減衰定数を確認した．
- (3) 免震装置解析モデルが妥当であることが確認された．さらに高減衰積層ゴム免震棟においては，改良モデルを用いることにより小歪領域においても観測記録とよく対応することが確認された．

キーワード 地震観測／免震／応答倍率／復元力特性／応答解析／解析モデル

目 次

- | | |
|---------------|----------|
| 1. はじめに | 5. 復元力特性 |
| 2. 建物概要 | 6. 応答解析 |
| 3. 観測地震概要 | 7. まとめ |
| 4. 最大加速度の増幅特性 | |

EARTHQUAKE OBSERVATION AND ANALYSES ON BASE ISOLATED BUILDINGS

Tadayuki MORISHITA Yoshihito SAITO
Takeyoshi FUJINAMI Hiroaki RYUJIN

Synopsis:

Earthquake observation has been carried on at two types of base isolated buildings, which are installed lead multi-rubber bearings(LRB) and multi-rubber bearings with high damping(MRB) respectively, and conventional one with same shape and structure. This paper presents the vibration characteristics of these structures and the hysteresis characteristics of the rubber bearings, furthermore it is considered about the comparison result between the response analysis and Earthquake observation.

From these studies, the following results were obtained.

- (1) The base isolated effect was remarkable for the horizontal motion in the case of the near-field earthquake.
- (2) The hysteresis characteristics of the two types of base-isolation systems were clarified. Furthermore, initial stiffness, elastic limits and damping coefficients were verified.
- (3) It became clear that the analytical model of the two types of base-isolation devices was adequate, and the advanced model of MRB was corresponding to the observation record in small strain range.

1. はじめに

当社西船橋免震社宅において、免震装置の力学的特性の違いを把握するために、同一形状、同一寸法で免震装置の種類のみ異なる免震棟2棟（鉛入り積層ゴム免震棟、高減衰積層ゴム免震棟）および非免震棟の計3棟において、地震観測を実施している。¹⁾²⁾

本報告は、現在までに得られた地震観測記録をもとに、
①観測記録の持つ特性
②免震装置の復元力特性
③免震棟設計時に仮定した免震装置モデルの妥当性
について検討したものである。

2. 建物概要

図-1 に免震棟構造概要および地震観測位置を示す。免震棟は、免震装置として鉛入り積層ゴムを用いたLRB棟と、高減衰積層ゴムを用いたMRB棟の2棟からなる。図-1 に示すように基礎スラブで一体化された基礎構造部上に、2棟の免震建屋が設置されている。上部構造部は、地上4階建ての鉄筋コンクリート造であり、軒高11.65m、短辺12.0m、長辺12.4mの整形な建物である。構造形式はX方向が純ラーメン構造、Y方向が耐震壁とラーメンの併用構造となっている（以下、X方向をラーメン方向、Y方向を壁方向と呼ぶこととする）。LRB棟、MRB棟および非免震棟の上部構造は、相互比較を行うために、全て同一形状、同一構造としている。ただし、免震棟と非免震棟は、方向が約90度ずれている。

表-1 に免震装置の諸元を示す。鉛入り積層ゴム(LRB)、高減衰積層ゴム(MRB)ともに総数10基使用している。

本建物では、1992年12月より地震観測を行っている。図-1 上段に免震装置上部（以下、1F）および屋上（以下、RF）における地震検出装置設置位置および観測方向を示す。基礎部（以下、GL）に関しては各免震棟中央3成分のみを観測している。なお、非免震棟でも同様の位置で地震観測を行っている。

3. 観測地震概要

図-2 にLRB棟におけるGLの水平方向最大加速度別に見た地震件数とその累積率を示す。GLの水平方向最大加速度は、ラーメン方向、壁方向のうち大きい方を使用している。なお、図中1gal未満の観測記録がないのは、地震収録装置の起動条件として、GL水平方向最大加速度を1gal以上と設定しているためである。同図より、最大加速度が3gal未満の地震が半数を占めているが、最大加速度が10gal以上の地震も21件（約13%）観測されている。最大加速度が20galを超える地震の諸元を表-2 に示す。地動加速度が最大のものは、1998年8月29日の東京湾地震で、60.4galを記録した。

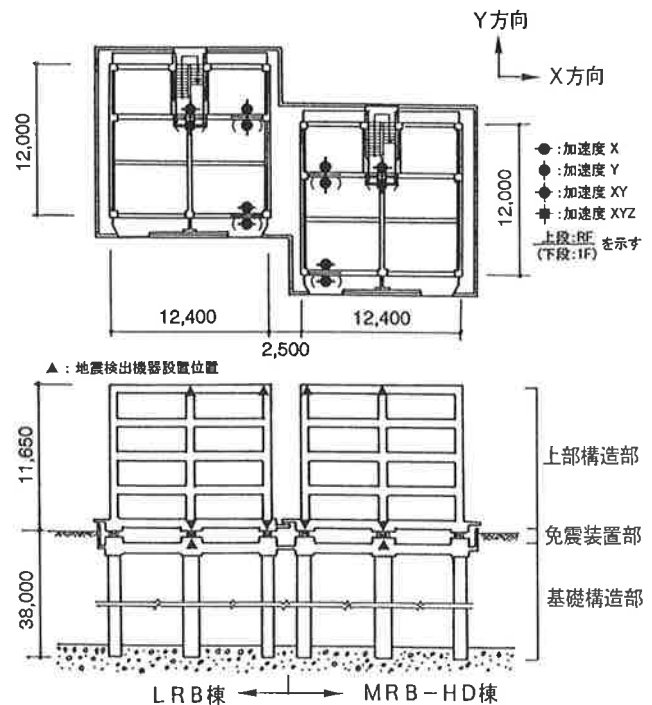


図-1 免震棟構造概要および地震観測位置

表-1 免震装置の諸元

	個数	ゴム径	鉛径 (穴径)	高さ	ゴム層厚	ゴム総数	ゴム層 総厚	内部鋼板 板厚	内部鋼板 総数
LRB	2	50	9	42.5	0.50	40	20.00	0.31	39
	8	55	10	42.5	0.50	40	20.00	0.31	39
MRB	2	80	10	22.4	0.62	21	13.02	0.22	20
	6	65	10	22.2	0.65	20	13.00	0.22	19
	2	79	10	22.5	0.82	16	13.12	0.22	15

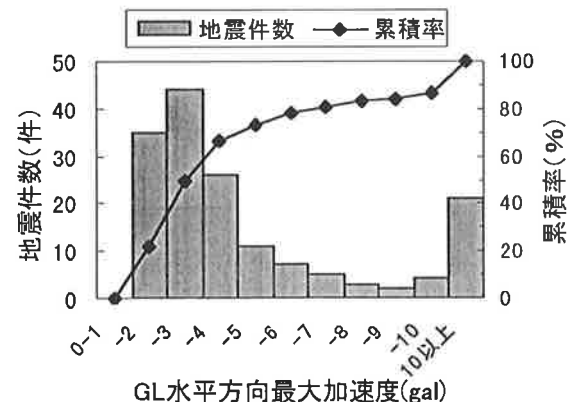


図-2 加速度別地震件数と累積率

表-2 主要観測地震概要

No.	地震発生 年月日	震央位置	震源深さ (Km)	震央距離 (Km)	規模 (M)	地動加速度 (gal)	X	Y	Z
1	1995/3/23	茨城県南西部	58	59	5.1	19.6	24.4	14.3	
2	1997/7/9	千葉県北西部	77	51	4.8	26.0	22.3	7.8	
3	1997/12/7	千葉県北西部	53	43	4.2	20.7	22.4	4.5	
4	1998/8/29	東京湾	67	61	5.1	37.5	60.4	25.8	
5	1998/11/8	千葉県北西部	78	18	4.6	20.1	26.2	9.0	

4. 最大加速度の増幅特性

4.1 水平方向

図-3にラーメン方向に関するGLとRFのフーリエ振幅スペクトルの比（以下、増幅率）を、LRB棟、MRB棟および非免震棟について示す。なお、同図はGL水平方向最大加速度の上位10観測記録に対し0.2Hzの幅で平滑化（以下、Parzen-window）を施した増幅率の相乗平均値である。同図より卓越振動数は、非免震棟で1次4.9Hz、LRB棟で1次2.2Hz、2次8.5Hz、MRB棟で1次2.0Hz、2次8.3Hzである。ここで、免震棟での1次の固有振動数に反映しているのは免震装置の特性であり、2次の固有振動数に反映しているのは建屋自身の1次固有振動数である。

図-4にGL最大加速度とRF最大応答加速度の関係を示す。ここで最大加速度はラーメン方向・壁方向のいずれかが2gal以上を記録した地震を対象とした。図中の倍率とは応答倍率を示しており、GL最大加速度に対するRF最大応答加速度の増幅率を意味している。応答倍率の平均値は、ラーメン方向ではLRB棟1.5、MRB棟1.9、非免震棟では2.7、同じく壁方向ではそれぞれ1.2、1.3、1.6となる。免震棟の方が応答倍率が小さくなることより、中小地震に対してではあるが免震効果が確認できた。また、非免震棟では、壁方向はラーメン方向に比べ建屋剛性が大きくなることから、応答倍率が小さくなっている。この傾向は免震棟においても認められる。

図-5にGL最大加速度と(RF/GL)応答倍率および震央距離の関係を示す。同図はラーメン方向・壁方向を併せて示している。ここでは震央距離による差を明確にするため、近距離地震を震央距離(0~50km)、遠距離地震を震央距離(200km~)とした。免震棟では近距離地震に対しては応答倍率が1.0を下回るものもあり免震効果を示しているが、遠距離地震に対しては応答倍率1.0を下回っておらず免震効果はあまり顕著ではない。これは遠距離の地震では長周期成分が卓越するためである。また、免震建屋の特性として、GL最大加速度が大きくなると応答倍率は小さくなる傾向がある。非免震棟では震央距離およびGL最大加速度による明確な差は認められない。

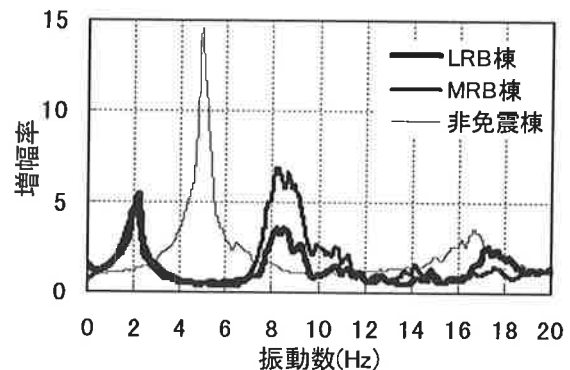


図-3 増幅スペクトル (RF/GL)

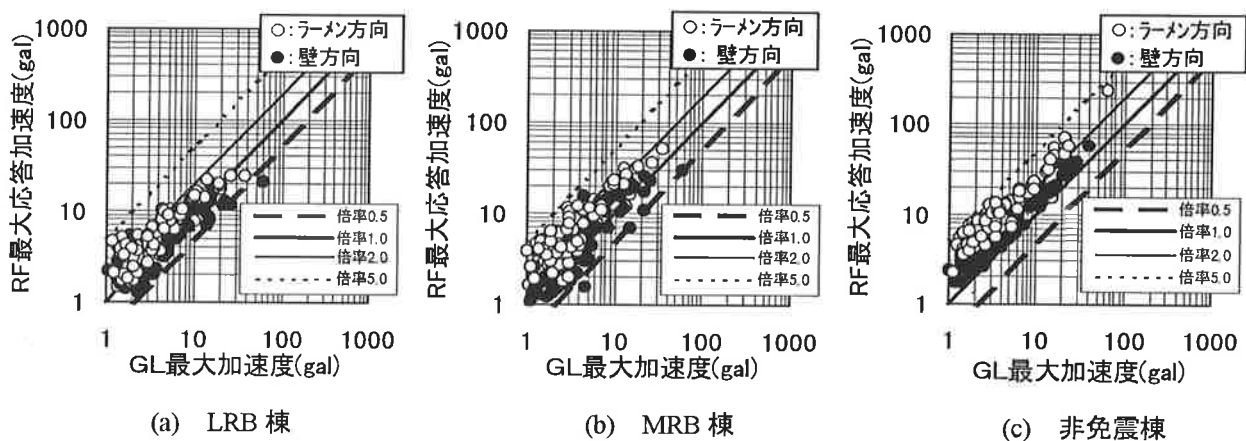


図-4 最大加速度増幅率

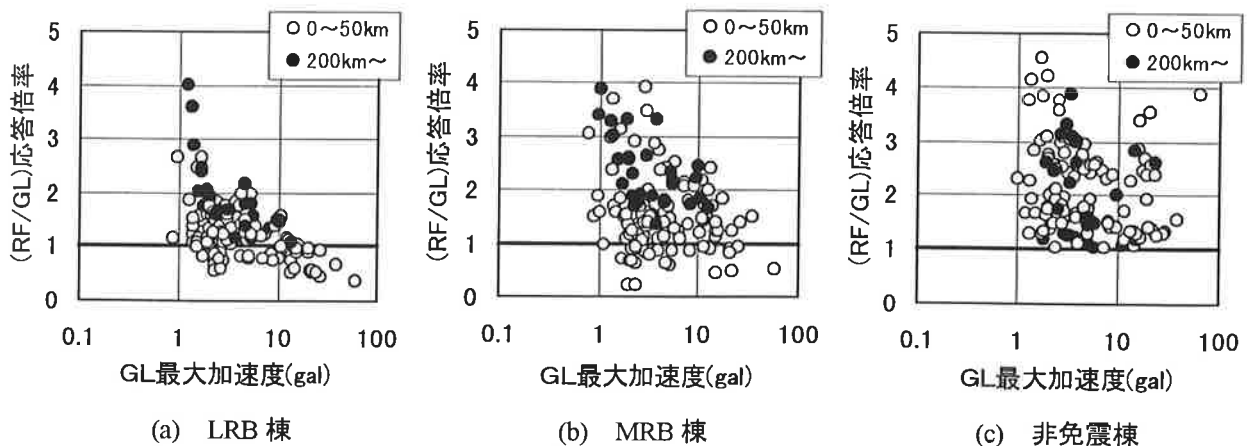


図-5 GL最大加速度と応答倍率および震央距離の関係

4.2 鉛直方向

図-6 に鉛直方向に関する GL と 1F の増幅率を、LRB 棟、MRB 棟について示す。なお、同図は GL 鉛直方向最大加速度の上位 10 観測記録に対し 0.2Hz の Parzen-window を施した増幅率の相乗平均値である。同図より卓越振動数は、LRB 棟で 14.5Hz、MRB 棟で 16.3Hz である。

図-7 に免震棟に関する GL 最大加速度と 1F 最大応答加速度の関係を示す。応答倍率は LRB 棟、MRB 棟ともに 1 ～ 2 倍の値をとっている。各々の平均倍率は、LRB 棟で 1.4 倍、MRB 棟で 1.2 倍である。

図-8 に免震棟に関する GL 最大加速度と (1F/GL) 応答倍率および震央距離の関係を示す。同図より震央距離および GL 最大加速度の違いによる明確な差は認められなかった。LRB 棟は MRB 棟に比べ応答倍率の分布範囲が広がる傾向がみられる。

5. 復元力特性

5.1 検討に用いた観測記録の概要

鉛入り積層ゴム (LRB) 及び高減衰積層ゴム (MRB) それぞれを採用した 2 棟の免震棟で観測された地震観測記録から、各免震装置の復元力特性について検討を行った。

検討に用いた観測記録は表-3 に示す地震で、LRB 棟、MRB 棟の GL 及び 1F で得られた建屋ラーメン方向の加速度記録である。各棟の 1F 建屋ラーメン方向で観測された記録に 0.2Hz の Parzen-window を施したフーリエ振幅スペクトルを図-9, 10 に示す。免震装置の特性を反映している 1 次の固有振動数は LRB 棟で 2.0Hz、MRB 棟で 1.5Hz である。また、8Hz 付近には上部建屋ラーメン方向の 1 次固有振動数が現れている。なお、図-9 において 1 次の固有振動数 (2.0Hz) 付近で山が 2 つに割れているのは、後に示すが、免震装置が弾性限界歪を越えて変形し履歴ループを描いているからである。

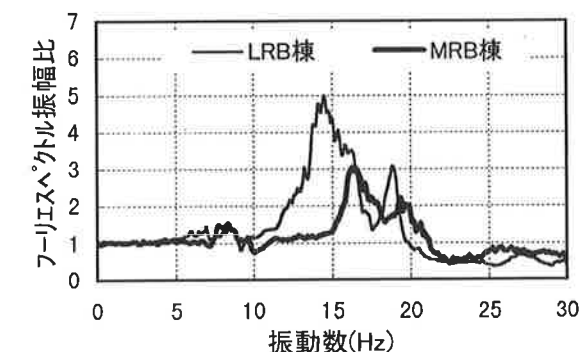


図-6 増幅スペクトル (1F/GL)

表-3 地震概要

日付	震源位置	震源深さ	マグニチュード	千葉震度
1997/7/9	千葉県北西部	77km	4.8	Ⅲ

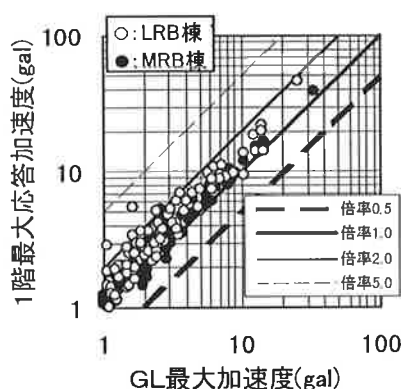
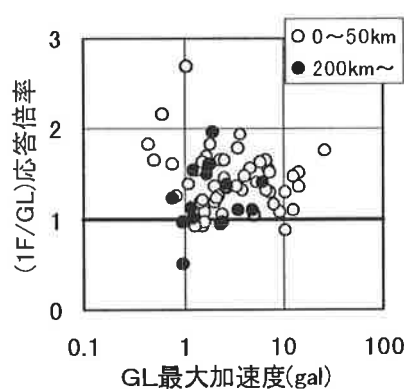
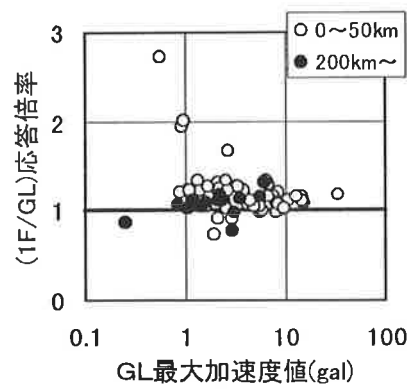


図-7 最大加速度増幅率



(a) LRB 棟



(b) MRB 棟

図-8 GL 最大加速度と応答倍率および震央距離の関係

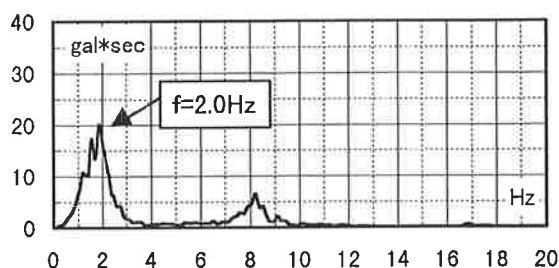


図-9 LRB 棟 1F フーリエ振幅スペクトル

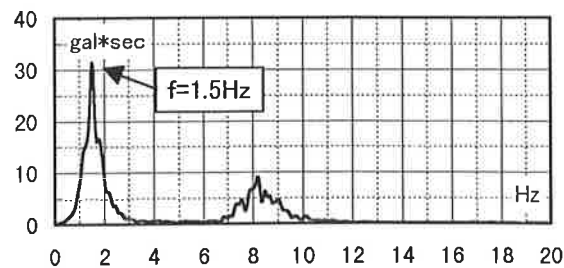


図-10 MRB 棟 1F フーリエ振幅スペクトル

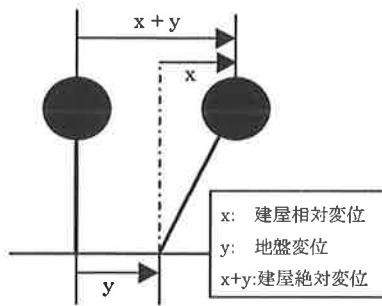


図-11 免震建屋座標関係

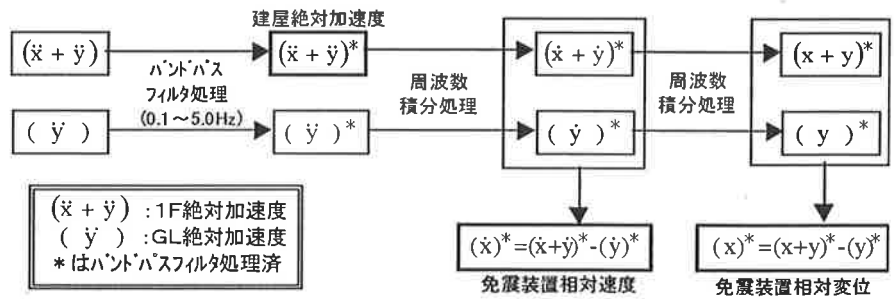


図-12 波形処理概念図

5.2 観測記録の波形処理方法

免震装置の復元力特性（荷重 Q - 変位 D 関係）を地震観測記録から求める方法を以下に示す。図-11 に示すような1自由度系の運動方程式は次式で現される。

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + Q(t) = -m\ddot{y}(t) \quad [1]$$

ここに、 $\ddot{x}(t)$: 建屋相対加速度の時刻歴

$\dot{x}(t)$: 建屋相対速度の時刻歴

$\ddot{y}(t)$: 地盤加速度の時刻歴

m : 免震建屋の質量

c : 免震装置の減衰係数

$Q(t)$: 免震装置の復元力

従って免震装置の復元力 Q 及び相対変位 D は次式となる。

$$Q(t) = -m(\ddot{x}(t) + \ddot{y}(t)) - c\dot{x}(t) \quad [2]$$

$$D(t) = (x(t) + y(t)) - y(t) \quad [3]$$

ここに、 $-m(\ddot{x}(t) + \ddot{y}(t))$: 免震装置の慣性力

$-c\dot{x}(t)$: 免震装置の減衰力

$x(t)$: 建屋相対変位の時刻歴

$y(t)$: 地盤変位の時刻歴

$x(t) + y(t)$: 建屋絶対変位の時刻歴

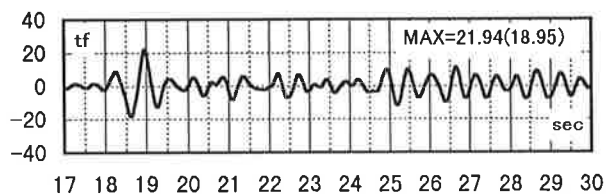
以上から、建屋の絶対加速度、免震装置の相対速度及び相対変位を観測記録から求め、質量 m 及び減衰係数 c を仮定することで、免震装置の復元力特性（荷重 Q - 変位 D 関係）を求めることができる。

当社宅における地震観測では絶対加速度を観測している。絶対加速度記録には図-9, 10に見られたように上部建屋の振動特性成分が含まれている。そこで、ここでは図-12 に示すような波形処理を行う。まず、1F及びGLで観測された絶対加速度波形に0.1～5.0Hzのハント・パスフィルタ（特定周波数成分の抽出）を施し、免震装置の振動特性成分を抽出する。次にこれらに周波数積分を繰り返すことで1F及びGLの絶対速度及び絶対変位波形を求め、これら波形の差を取ることで免震装置の相対速度及び相対変位波形を求める。また、質量 m は設計時の建屋重量 $w = 1037.3$ (tf) から、減衰係数 $c = 2h\omega m$ (h : 減衰定数, ω : 固有円振動数) は $h = 0.02$ を仮定し、免震装置の1次固有振動数 (LRB 棟 2.0Hz, MRB 棟 1.5Hz) から求めた。以上を式 [2], [3] に代入して求めた免震建屋の慣性力、免震装置の減衰力、復元力及び相対変位を図-13, 14に示す。さらに免震装置の復元力特性を図-15, 16に示す。同図にはそれぞれ1Fのフーリエ振幅スペクトルから求めた1次固有振動数に相当する傾きを示してある。

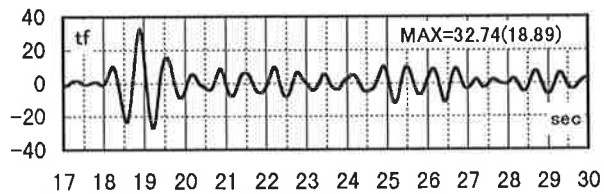
5.3 検討結果

図-13, 14 より免震装置の復元力（同図 c）は免震建屋の慣性力（同図 a）でほぼ決まり、 $h = 0.02$ を仮定した減衰力（同図 b）は殆ど寄与しない。

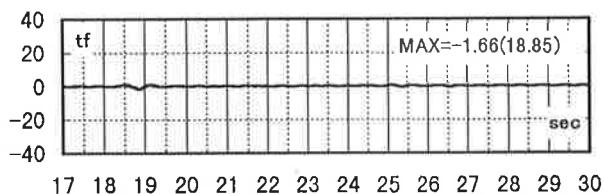
設計時に仮定した各免震装置の復元力特性は、弾性限界歪としてLRB免震装置0.5%, MRB免震装置10%であるのに対し、観測記録から求めた免震装置の復元力特性（図-15, 16）は、LRB免震装置では、ほぼ仮定通りせん断歪レベル0.5%程度で降伏しており、大きな履歴ループを描いている。一方、MRB免震装置では、せん断歪レベル2%程度からやや大きめの履歴ループを描いている。幾つかの歪レベルにおける履歴ループ面積から減衰定数を算定した結果を図-17に示す。また、同図には建屋竣工時に実施した静的加力試験結果^{1) 2)} から求めた減衰定数も示してある。LRB免震装置はせん断歪レベル0.2%程度で $h = 0.10$ を示し、弾性限界歪0.5%まで徐々に大きくなり、塑性域に入る0.5%から大変形時と同程度の $h = 0.25$ となる。また、MRB免震装置は初期剛性内ではあるが、せん断歪レベル2%程度から大変形時と同程度の $h = 0.13$ を示している。



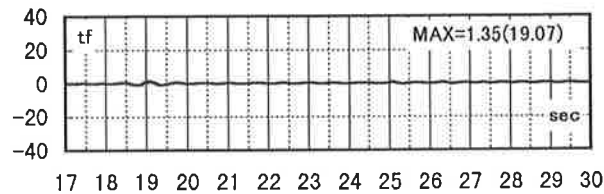
(a) LRB 免震建屋の慣性力



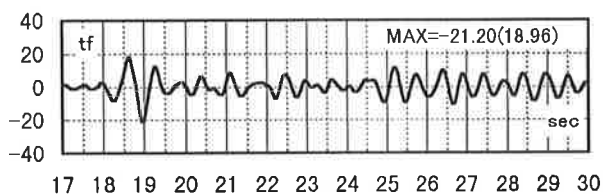
(a) MRB 免震建屋の慣性力



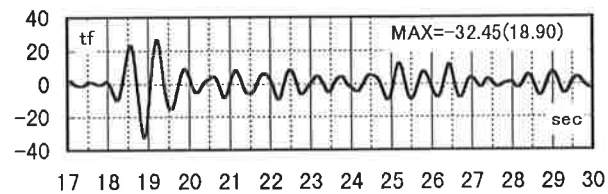
(b) LRB 免震装置の減衰力



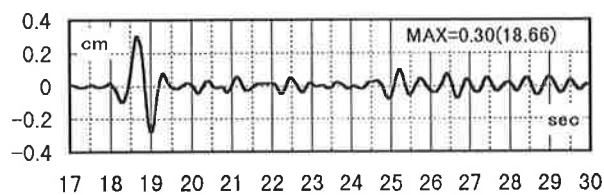
(b) MRB 免震装置の減衰力



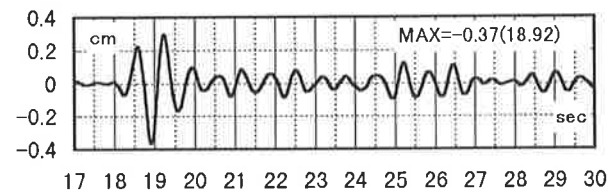
(c) LRB 免震装置の復元力



(c) MRB 免震装置の復元力



(d) LRB 免震装置の相対変位



(d) MRB 免震装置の相対変位

図-13 LRB 棟の慣性力・減衰力・復元力
及び相対変位

図-14 MRB 棟の慣性力・減衰力・復元力
及び相対変位

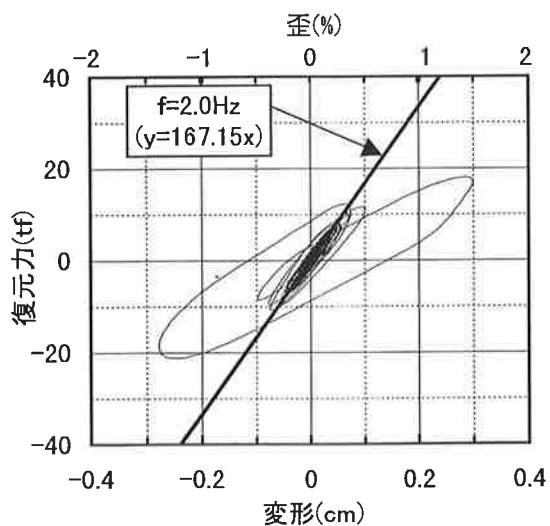


図-15 LRB 免震装置の復元力特性 (観測記録)

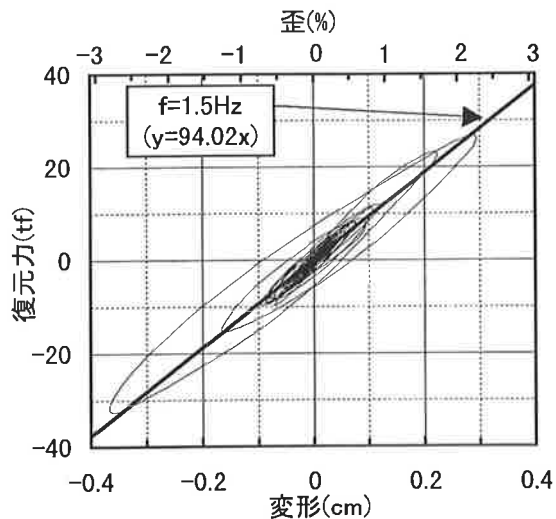


図-16 MRB 免震装置の復元力特性 (観測記録)

6. 応答解析

6.1 解析モデルの概要

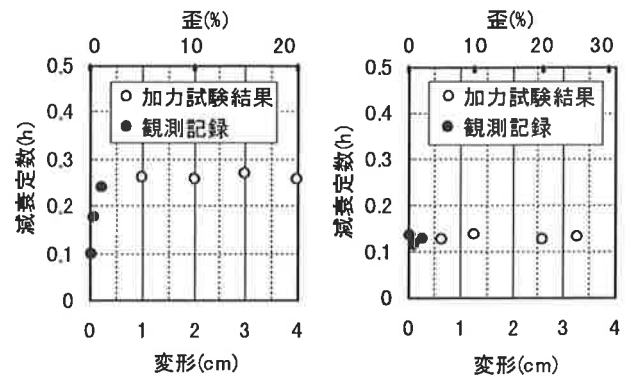
設計時に仮定した各免震装置のモデルについてその妥当性を検証するため免震棟ラーメン方向について応答解析を行った。

図-18に応答解析モデルを示す。解析モデルは免震棟設計時に行った水平方向応答解析に用いたモデルと同一で、免震装置下部を固定とした直列5質点系振動モデルとした。復元力特性について、建屋はせん断バネに、免震装置部はスウェイバネとロッキングバネにモデル化している。入力波は表-3に示した地震における各免震建屋基礎部での観測記録を用いた。応答解析に用いた免震装置部のモデルは、建屋設計時に仮定したモデル（以下、初期モデル）であり、弾性限界歪として、LRB 免震装置 0.5%, MRB 免震装置 10%を仮定している。さらに必要に応じて、小歪領域に対しては検討結果（第5章）を、大歪領域では建屋竣工時の静的加力試験結果をもとに作成したモデル（以下、改良モデル）を用いて応答解析を行った。

6.2 応答解析結果

初期モデルによる解析結果（免震装置の相対変位）と観測記録より求めた免震装置の相対変位および復元力特性（荷重 Q —変位 D 関係）を比較する事により、初期モデルの妥当性を検証した。

初期モデルを用いた場合の解析結果（以下、初期モデル



(a) LRB 免震装置

(b) MRB 免震装置

図-17 免震装置の減衰定数

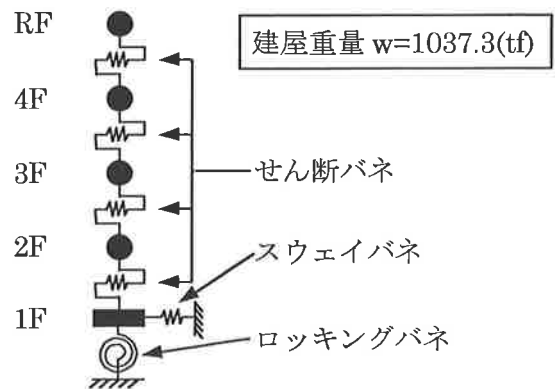


図-18 応答解析モデル

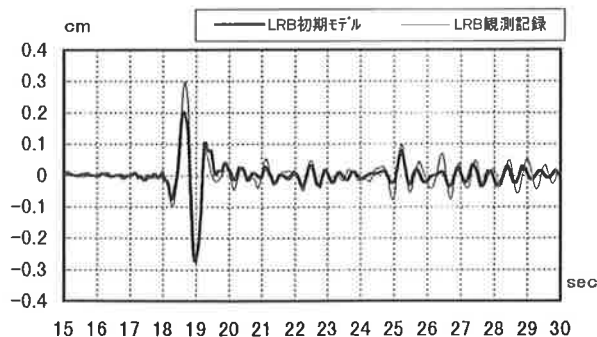


図-19 LRB 免震装置の相対変位（初期モデル）

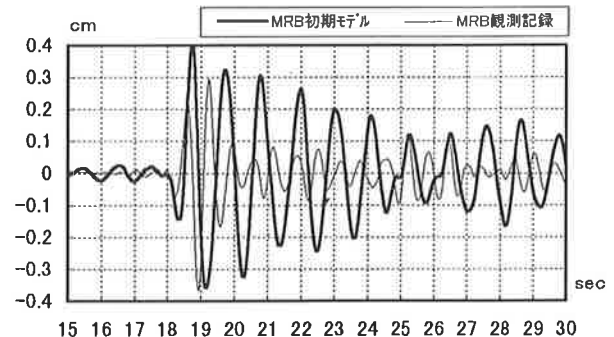


図-20 MRB 免震装置の相対変位（初期モデル）

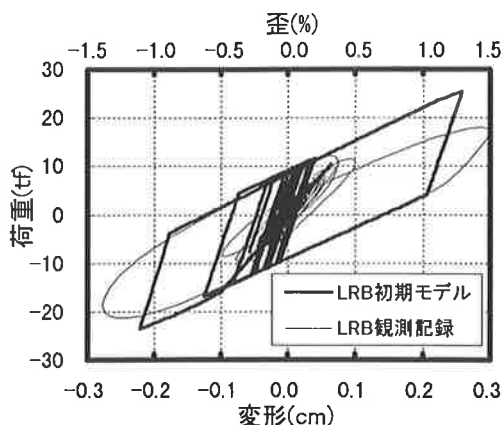


図-21 LRB 免震装置の復元力特性（初期モデル）

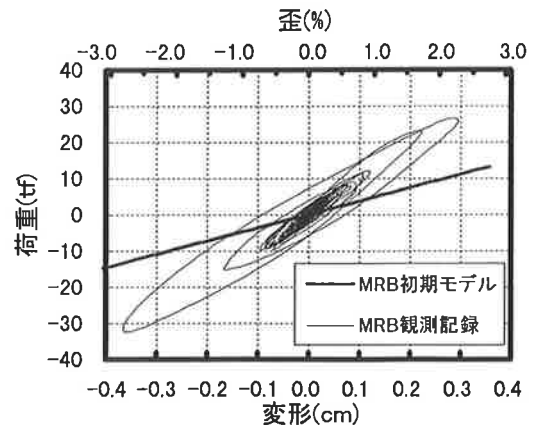


図-22 MRB 免震装置の復元力特性（初期モデル）

解析結果)を、観測記録より求めた免震装置の相対変位(以下、観測記録)とともに図-19、図-20 に、解析結果より求めた復元力特性を観測記録とともに図-21、22 に示す。なお図-21、22 における縦軸(荷重)は、応答解析より求めた免震層の負担せん断力を示しており、観測記録は図-15、16 で示したものと同一のものである。図-19 より LRB 免震装置の初期モデル解析結果は観測記録と良く一致している。また、図-21 より履歴曲線もよく似た傾向を示しており、初期剛性は観測記録とほぼ同等の 2.0Hz を示している。図-20、22 より MRB 免震装置の初期モデル解析結果は観測記録を表現しきれていないことがわかる。これは、解析結果が弾性限界歪(10%歪)以内であり履歴ループを描いていないためである。初期剛性は 0.9Hz(観測記録は約 1.5Hz)を示している。

次に、MRB 免震装置部に改良モデルを用いた場合の解析結果(以下、改良モデル解析結果)および解析結果より求めた復元力特性を、観測記録とともに図-23、24 に示す。図-23、24 より MRB 免震装置の改良モデル解析結果は観測記録とよく対応している。初期剛性も観測記録とほぼ同等の 1.5Hz を示している。

6.3 免震装置モデルの検証

LRB 免震装置において、初期モデル解析結果は観測記録と良く一致することが判明した。すなわち初期モデルは小歪領域における免震装置の特性を良く表現しており、妥当なモデルであるといえる。

MRB 免震装置における初期モデル解析結果は観測記録のような履歴曲線を示していないのに対し、小歪領域から減衰を考慮した改良モデルは観測記録とよく似た履歴曲線を示すことが確認できた。

本報告における対象地震(表-3)は非常に小さく、両免震装置に発生したせん断歪は数%であった。初期モデルの作成にあたっては、特に大歪領域を考慮して行っており、本報告のような小歪領域では観測結果と必ずしも一致するとは限らない。そこで、初期モデルにおいて小歪領域のみ改良することにより、観測記録とよく対応することを確認した。さらに、大歪領域における免震装置の初期モデルについて検証することが重要であり、第5章に示した方法を用いることにより、大歪領域においても初期モデルの検証が可能である。

7. まとめ

鉛入り積層ゴムを用いた LRB 棟、高減衰積層ゴムを用いた MRB 棟および非免震棟の4階建集合住宅において、得られた観測記録をもとに以下の結果が得られた。

- (1) 水平方向に関して免震効果が確認された。特に近距離の地震に対して顕著である。
- (2) 上下方向に関して、GLに対するRFの加速度応答倍率は免震棟では1~2倍になることが確認された。

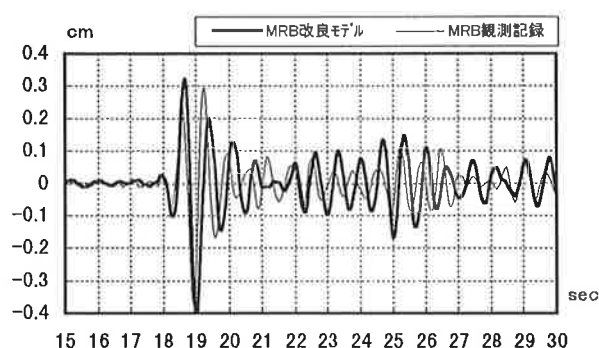


図-23 MRB 免震装置の相対変位(改良モデル)

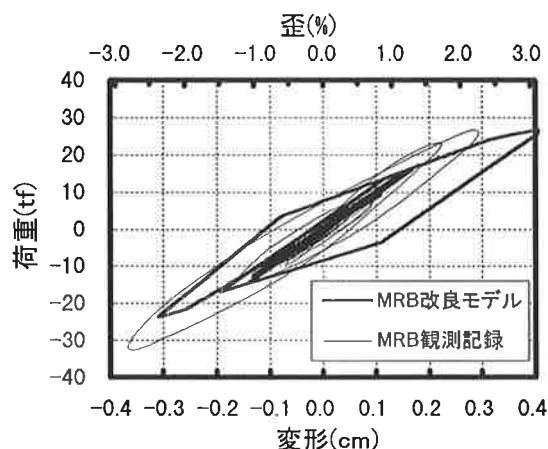


図-24 MRB 免震装置の復元力特性(改良モデル)

(3) 地震観測記録から免震装置の振動特性成分を分離し、波形処理することで免震装置の復元力特性を求める方法を示した。これから、鉛入り積層ゴム及び高減衰積層ゴムそれぞれの免震装置の復元力特性を求め、各装置の初期剛性、弾性限界及び各歪レベルでの減衰定数を確認することができた。

(4) 地震観測記録をもとに免震装置初期モデルの妥当性を検証した。それより、両免震装置ともに妥当なモデルであることが確認された。さらに MRB 棟においては、改良モデルを用いることにより小歪領域においてもよく対応することが確認された。

今後はより大きな地震に対し、検討を行っていく予定である。

参考文献

- 1) 藤波健剛, 上代悟史, 嶋田三朗: 免震建物の静加力試験と地震観測, 前田建設技術研究所報 VOL.34, pp.205-210, 1993 年。
- 2) 細川洋治, 藤波健剛: 2 種類の免震装置を持つ社宅, MENSHEIN, No.5 夏号, pp.11-14, 1994 年
- 3) 斉藤芳人, 森下真行, 藤波健剛, 龍神弘明: 免震建屋における地震観測結果とその解析的検討(その 1)(その 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1999 年(投稿中)