

地震観測結果に基づく免震構造物の動特性について

森下 真行 ・ 齊藤 芳人 ・ 龍神 弘明

Identification of Dynamical Properties of Building using Earthquake Records

Tadayuki MORISHITA, Yoshihito SAITO, Hiroaki RYUJIN

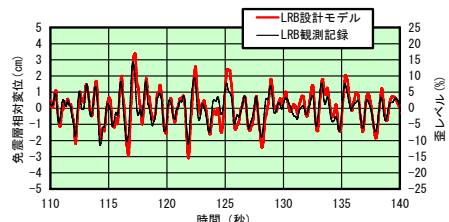


図-1 L R B棟での免震層相対変位の比較

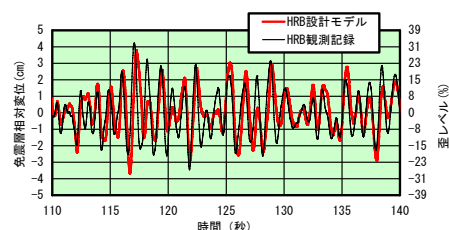


図-2 H R B棟での免震層相対変位の比較

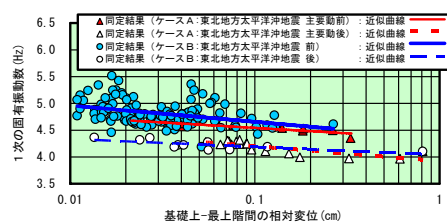


図-3 非免震棟での固有振動数推定結果

研究の目的

当社では、西船橋社宅にて同一形状、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（L R B棟）、高減衰積層ゴム免震棟（H R B棟））および非免震棟1棟の計3棟において、地震時の免震効果を把握することを目的に地震観測を、また居住者の観点から地震時の免震効果を把握することを目的に地震時居住者アンケートを実施してきた。

2011年3月11日には東北地方太平洋沖地震が発生し、建屋竣工以降で最大の地震動を経験した。そこで、建屋動特性の時間変動について、東北地方太平洋沖地震で得られた記録を用いた同一地震内での検討ならびに過去の地震による長期間での検討を行う。次いで、東北地方太平洋沖地震で得られた記録を用いた免震層の復元力特性の推定結果と設計モデルとの比較について述べる。最後に別途実施している地震時居住者アンケートをもとに比較的大きな地震時の室内状況から確認された免震効果について報告する。

技術の説明

1992年12月から2011年3月までの期間に観測した計158地震を検討対象とした。これら地震観測記録に対してARXモデルを用いた同定手法を適用し、建物動特性の時間変動および振幅依存性の把握を試みた。また東北地方太平洋沖地震で得られた記録に対して部分モード合成法を用いた同定手法を適用し、復元力特性の推定ならびに解析結果との比較を通して設計モデルの妥当性について検討を実施した。最後に東北地方太平洋沖地震での居住者アンケートから免震棟と非免震棟での室内の揺れの違いについて言及する。

主な結論

- ・ 動特性の推定を試みた結果、時間変動に伴う固有振動数および減衰定数の振幅依存性が確認された。
- ・ 免震棟で推定された動特性と設計値とを比較した結果、設計値と良く対応することを確認し、L R B棟、H R B棟ともに概ね妥当な設計モデルであることが検証された。
- ・ 比較的大きな地震時の居住者アンケート結果より、非免震棟との室内の揺れ状況比較を通じて免震効果が確認された。

地震観測結果に基づく免震構造物の動特性について

森 下 真 行 齊 藤 芳 人
龍 神 弘 明

要 旨

当社西船橋社宅では免震装置の種類のみ異なる免震棟2棟（鉛入り積層ゴム，高減衰積層ゴム）とこれらと同一形状，同一寸法の非免震棟において，地震観測を実施している．本報では，免震棟2棟および非免震棟において得られた地震観測記録を基に建物動特性について検討を実施した．さらに，免震棟に関しては各免震装置の復元力特性ならびに設計モデルの妥当性についても検証を実施した．以下に得られた結果を示す．

- (1) 動特性の推定を試みた結果，固有振動数および減衰定数の振幅依存性が確認された．
- (2) 免震棟で推定された動特性と設計値とを比較した結果，設計値と良く対応することを確認し，L R B棟，H R B棟ともに概ね妥当な設計モデルであることが検証された．
- (3) 比較的大きな地震の居住者アンケート結果より，非免震棟との室内の揺れ状況比較を通じて免震効果が確認された．

キーワード 地震観測／免震／システム同定／固有振動数／減衰定数／復元力特性／応答解析

目 次

- | | |
|-----------|----------------|
| 1. はじめに | 5. 応答解析 |
| 2. 建物概要 | 6. 地震時居住者アンケート |
| 3. 観測地震概要 | 7. まとめ |
| 4. 動特性の推定 | 8. おわりに |

IDENTIFICATION OF DYNAMICAL PROPERTIES OF BASE ISOLATED BUILDINGS USING EARTHQUAKE RECORDS

Tadayuki MORISHITA Yoshihito SAITO
Hiroaki RYUJIN

Synopsis:

Earthquake observation has been carried on at two types of base isolated buildings, which are installed lead multi-rubber bearings and multi-rubber bearings with high damping respectively, and conventional one with same shape and structure. At the same time, questionnaire survey concerning habitability had been conducted on three buildings. This paper presents the questionnaire survey of these structures.

From these studies, the following results were obtained.

- (1) Through the estimating of dynamics properties, amplitude dependence was confirmed.
 - (2) The analytical model of two types of base-isolation devices was corresponding to the observation record.
 - (3) The base isolated effect was remarkable through the comparison of movement of the furniture.
-

1. はじめに

近年、建築物の健全性を評価する技術いわゆる構造ヘルスマモニタリング（SHM）が注目されている。特に免震建物は地震エネルギーのほとんどを免震層に負担させる構造形式であり、安全性等の観点から免震層の振動性状を把握することは非常に重要である。最近では、免震建物についてもその健全性を評価しようとする試みが積極的に行われている（例えば1）。

当社では、西船橋社宅にて同一形状、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1棟の計3棟において、地震時の免震効果を把握することを目的に地震観測を、また居住者の観点から地震時の免震効果を把握することを目的に地震時居住者アンケートを実施してきた。その成果として、免震建物で実施した静加力試験結果から求めた免震層の復元力特性と設計値との比較²⁾、建屋竣工5年経過時における建屋基本特性の確認、上部構造を剛体と仮定した場合の免震層の復元力特性の推定ならびに推定結果と解析結果との比較による設計モデルの検証³⁾および非免震棟での建屋動特性の時間変動⁴⁾について検討を実施してきた。また地震時居住者アンケート結果を基にして、居住者の観点からも地震時の免震効果⁵⁾を検証してきた。

2011年3月11日には東北地方太平洋沖地震が発生し、建屋竣工以降で最大の地震動を経験した。そこで、まず建屋竣工以降に観測された地震記録をもとに免震効果を確認する。また、建屋動特性の時間変動について、東北地方太平洋沖地震で得られた記録を用いた同一地震内での検討ならびに過去の地震による長期間での検討を行う。次いで、東北地方太平洋沖地震で得られた記録に対して、上部構造の振動モードを考慮した条件での免震層の復元力特性の推定および推定結果と設計モデルとの比較について述べる。最後に別途実施している地震時体感アンケートをもとに比較的大きな地震時の室内状況から確認された免震効果について報告する。

2. 建物概要

地震観測を実施している免震建物の概要および地震観測位置を図-1に示す。基礎スラブで一体化された杭基礎上に、異なる免震装置を有する同一形状、同一構造の2棟の免震建屋が設置されている。それぞれ鉛入り積層ゴム（LRB）および高減衰積層ゴム（HRB）を採用している（以下、鉛入り積層ゴムを用いた免震棟をLRB棟、高減衰積層ゴムを用いた免震棟をHRB棟と呼ぶ）。LRB棟は鉛入り積層ゴム（高さ42.5cm、ゴム径50および55cmの2種類）を総数10基、HRB棟は高減衰積層ゴム（高さ22.2、22.4および22.5cm、ゴム径60、65および79cmの3種類）を総数10基使用しており、各建屋は地上4階、軒高11.65m、長辺12.4m（ラーメン方向：X方向と呼ぶ）、短辺12.0m（壁方向：Y方向と呼ぶ）の

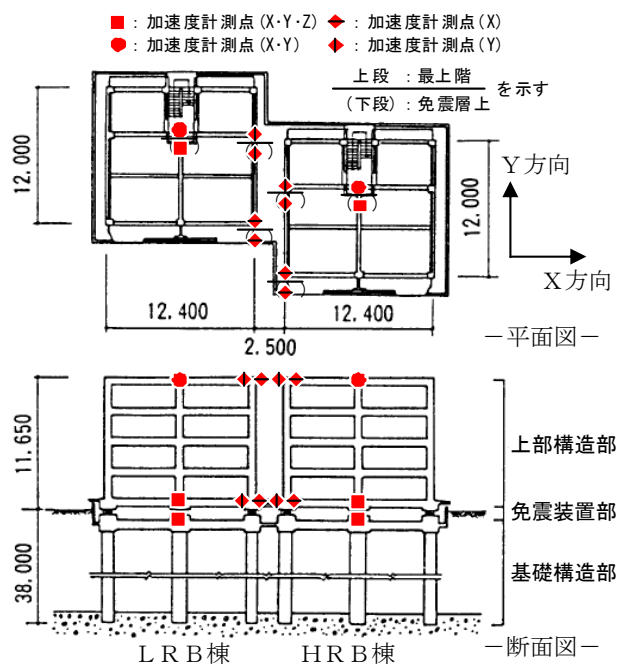


図-1 免震建屋構造概要

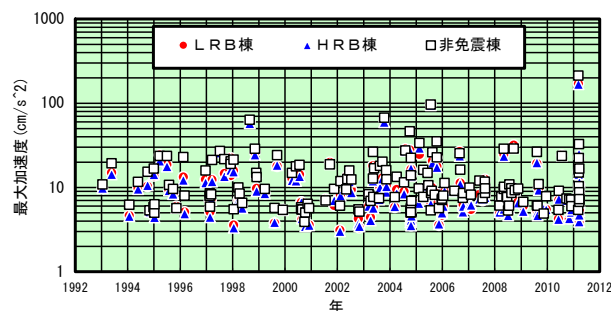


図-2 基礎上での地震観測結果

整形な鉄筋コンクリート造の建物である。これとは別に免震効果を直接求められるように、約40m離れた同一敷地内に免震建物と同一形状、同一寸法の非免震建物が建設されている。なお、免震棟と非免震棟は方向が約75度ずれている。地震観測は、免震棟では最上階、免震層上および基礎（免震層下）の3層で、非免震棟では最上階および基礎（1階）の2層で実施している。

3. 観測地震概要

3.1 対象地震

対象とした地震は1992年12月から2011年3月までの約18年間に基礎（免震棟では免震層下、非免震棟では1階）での水平方向の最大加速度がいずれかの棟で 5cm/sec^2 以上を観測した計158地震とした。図-2に基礎上での地震観測結果（各棟水平方向の加速度最大値の大きい方の値を採用）を示す。基礎上における最大加速度はLRB棟で 3.1cm/sec^2 から 170cm/sec^2 に、同じくHRB棟で 3.0cm/sec^2 から 169cm/sec^2 に、非免震棟で 3.9cm/sec^2 から 212cm/sec^2 に分布している。なお、基礎上観測点で最大加速度を記録した地震は、3棟とも東北地方太平洋沖地震である。

3.2 最大加速度の増幅特性

図-3 に基礎上での最大加速度と最上階での最大応答加速度との関係を示す。なお、基礎上最大加速度に対する最上階最大応答加速度の比を倍率とし、全地震での倍率を平均したもの平均倍率として併記している。X方向での平均倍率は、LRB棟 1.4 倍、HRB棟 1.9 倍、非免震棟 2.7 倍、Y方向は、LRB棟 1.2 倍、HRB棟 1.5 倍、非免震棟 1.5 倍となる。主に中小地震から構成される約

18 年間の地震観測記録から、免震棟でのX方向の平均倍率は非免震棟に比較して大幅に低減されており、免震効果が確認された。Y方向では、平均倍率の比較からは顕著な差は確認できなかった。

図-4 に免震棟上部構造の倍率（最上階／免震層上）を示す。免震棟での上部構造の平均倍率は免震種別および方向によらず 1.0～1.2 倍であり、免震棟の上部構造は剛体運動に近い挙動をしているものと考えられる。

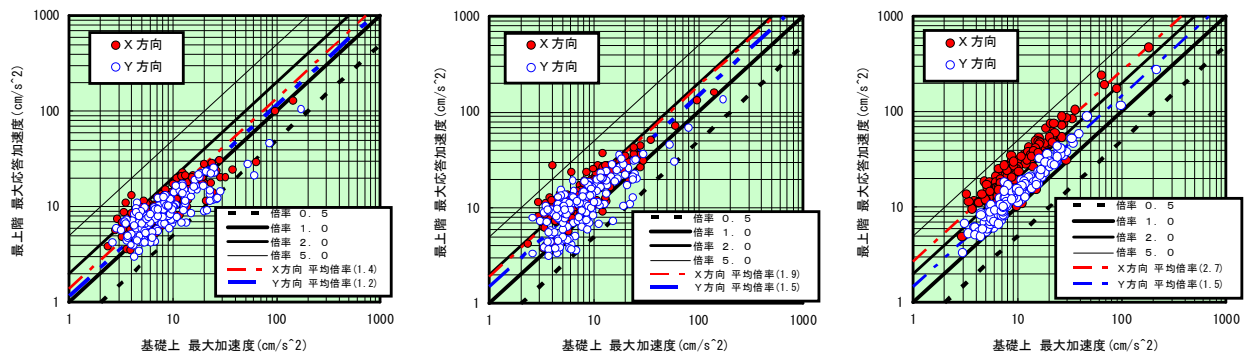


図-3 最大加速度倍率（最上階／基礎上）

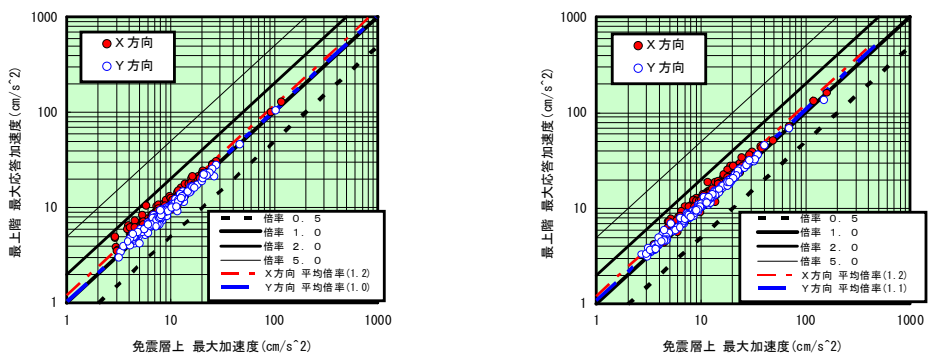


図-4 最大加速度倍率（最上階／免震層上）

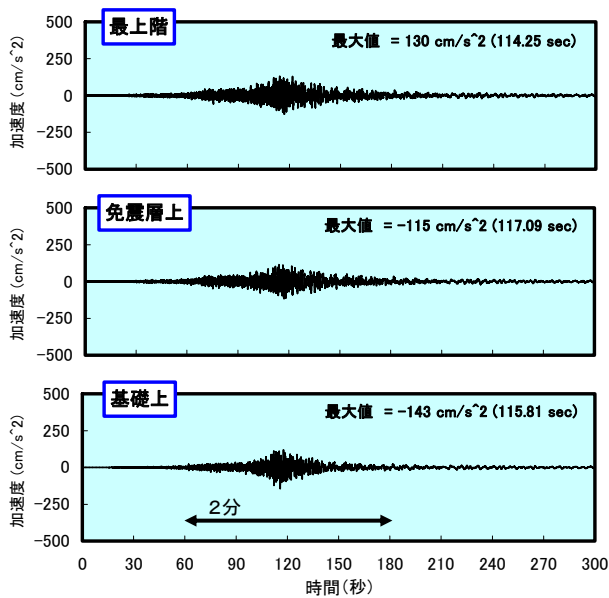
3.3 東北地方太平洋沖地震での観測結果

表-1 に東北地方太平洋沖地震での観測結果を、基礎上に対する倍率とともに示す。基礎上に対する最上階の倍率はLRB棟X方向で 0.91 倍、Y方向で 0.63 倍、HRB棟X方向で 1.19 倍、Y方向で 0.82 倍となり、非免震棟での倍率（X方向 2.71 倍、Y方向 1.32 倍）と比較して両方向とも低減されており、免震効果が確認できる。なお、図-3 で示した平均倍率と比較すると、非免震棟での倍率は同程度であるが、免震棟では大幅に低下している。このことから免震棟では基礎上最大加速度が大きくなるほど免震効果が顕著になると推測できる。また、免震棟上部構造の倍率は、図-4 で示した平均倍率と同程度であることが確認できる。図-5 に非免震棟に比較して倍率の低減が顕著なX方向の観測波形を示す。比較的大きな地震動が2分程度に渡り継続している様子が確認できる。以下、東北地方太平洋沖地震での記録を用いた検討

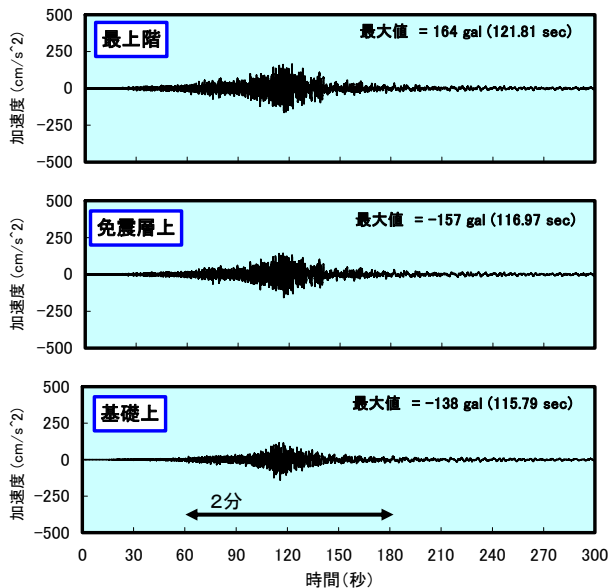
はX方向に限定して実施することとする。図-6 に免震層の相対変位履歴を示す。免震層の相対変位は免震層上下の加速度観測波形に対して 0.2Hz のハイパスフィルターを通過させた後に2階積分し、その差として求めた。免震層での相対変位は、LRB棟で最大 30mm 程度、HRB棟で最大 48mm 程度であった。

表-1 東北地方太平洋沖地震での観測結果

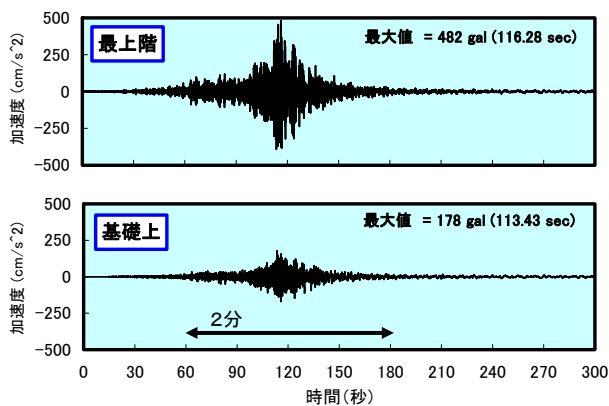
		LRB棟		HRB棟		非免震棟	
		X方向	Y方向	X方向	Y方向	X方向	Y方向
最上階	最大加速度 (cm/s ²)	130	107	164	139	482	280
	基礎上に対する倍率	0.91	0.63	1.19	0.82	2.71	1.32
	免震層上に対する倍率	1.13	1.06	1.04	0.93	—	—
免震層上	最大加速度 (cm/s ²)	115	101	157	149	—	—
	基礎上に対する倍率	0.80	0.59	1.14	0.88	—	—
基礎上	最大加速度 (cm/s ²)	143	170	138	169	178	212



(a) LRB棟

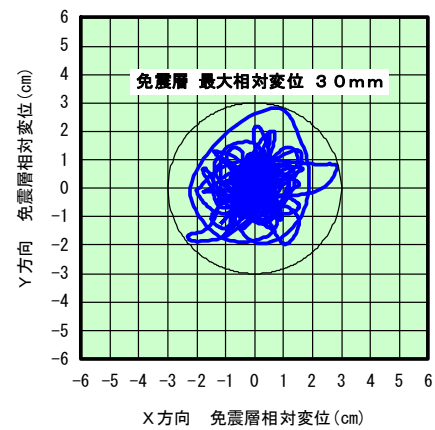


(b) HRB棟

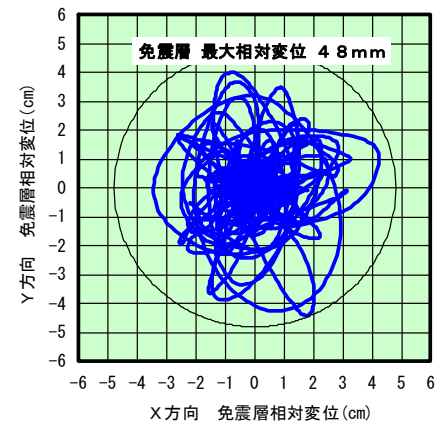


(c) 非免震棟

図-5 東北地方太平洋沖地震での観測波形
(X方向)



(a) LRB棟



(b) HRB棟

図-6 東北地方太平洋沖地震での免震層相対変位

4. 動特性の推定

4.1 基本動特性の検討

4.1.1 検討概要

免震棟および非免震棟での観測記録を用いて固有振動数および減衰定数を推定した。用いた手法は、代表的なパラメータ同定手法であるARXモデルを用いた同定手法とした。システムの方程式は式〔1〕⁶⁾の通りとなる。

$$A(q)y(k) = B(q)u(k) + w(k) \quad [1]$$

ここで、 $A(q)$ と $B(q)$ はシフトオペレータ q の多項式、 $u(k)$ は入力、 $y(k)$ は出力、 $w(k)$ は白色雑音を示す。

非免震棟では、入力に基礎上（1階）での観測波形を、出力に最上階での観測波形をとり、1入力1出力モデルとして式〔1〕を適用し、固有振動数ならびに減衰定数を推定した。免震棟では、入力に基礎上、出力に最上階をとり、免震層を含む建屋全体系の固有振動数ならびに減衰定数を推定した。さらに、上部構造のみの特性を把握する目的で、入力を免震層上、出力を最上階とした同定を行い、上部構造のみの固有振動数を推定した。

図-7に固有振動数の抽出手順を示す。固有振動数および減衰定数の決定は、以下の手順で行う。

- ①. 最も安定する（出現頻度の高い）モード（振動数）を特定する。
- ②. ①で得られたモード（振動数）の中で、最も適合率（観測波形に対する推定波形の再現割合）の高い値を示す次数（最適次数）を選定する。
- ③. ①と②の交点から得られる固有振動数を採用する。
- ④. ③で求めた固有振動数に対応して得られる減衰定数を採用する。

なお、検討は以下の2ケースとする

ケースA：東北地方太平洋沖地震での観測波形（図-5に示すX方向波形）に対して、10.24秒毎に区分けし各区分に対して順次同定を実施。同定条件は10.24秒（512データ）。

ケースB：全158記録に対して、免震層相対変位の最大値発生時刻を中央とする1区間を当該地震記録の代表データとして同定を実施。同定区間長は10.24秒（512データ）とし、ケースA同様にX方向の記録を採用する。

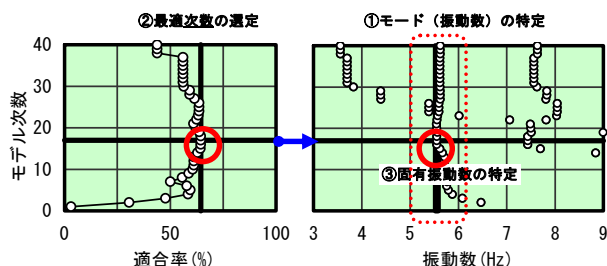


図-7 固有振動数の抽出手順

4.1.2 検討結果

図-8に非免震棟でのケースAに対する固有振動数および減衰定数の同定結果を、同定区間での最上階と基礎との相対変位最大値とともに示す。1次の固有振動数は地震初期に4.7Hz程度であったものが、主要動付近で4Hz程度に低下している。その後、相対変位の減少とともに上昇していく傾向が観察される。ただし、相対変位が小さくなっても固有振動数の上昇は4.3Hz程度までであり、地震発生前の値には戻っていない。

1次の減衰定数はややばらつきが見られるが、相対変位の増減には関係なく2%から4%の値を示す。

図-9に非免震棟での動特性推定結果を、基礎上に対する最上階の相対変位最大値との関係で示す。なおケースAならびにケースBを併せて示しており、ケースAは主要動前後で、ケースBは東北地方太平洋沖地震前後で区分けして示している。ケースAでの比較から図-8で示した主要動前後での固有振動数の変化が明確に確認できる。ケースBについてもばらつきは見られるものの東北地方太平洋沖地震前後で固有振動数が変化している傾向が確認できる。東北地方太平洋沖地震により最大の相対変位を経験した結果、二次部材と躯体との縁切りなどにより見かけ上の剛性が低下したため、このような現象が発生

したものと推測される。なお固有振動数が相対変位の増大に伴い低下する傾向（振幅依存性）は、東北地方太平洋沖地震前後で同様の傾向を示すことが確認できる。

1次の減衰定数は1%から6%の範囲にばらつきを持って分布しており、減衰定数自体を特定することは困難であり、また相対変位との明確な相関関係は確認できない。

図-10に固有振動数の時間変動を示す。全体的には時間の経過とともに固有振動数が低下する様子が観察できる。なお、各時点での最大の揺れが固有振動数の低下に影響を与えている可能性のあることが示されており、引き続き検討を実施していく予定である。

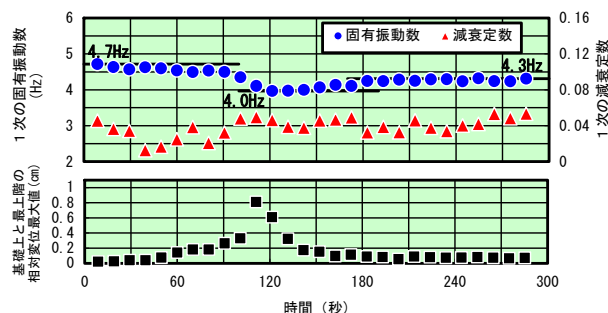
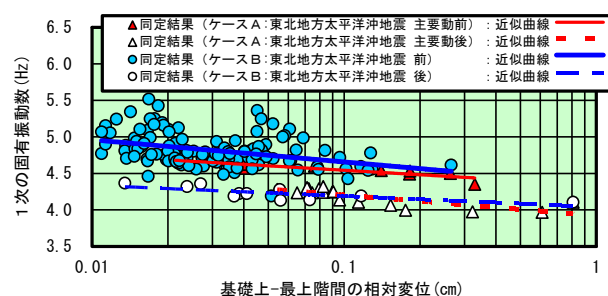
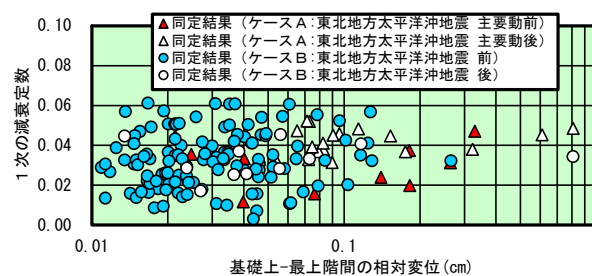


図-8 非免震棟での動特性推定結果【ケースA】



(a) 固有振動数



(b) 減衰定数

図-9 非免震棟での動特性と相対変位との関係

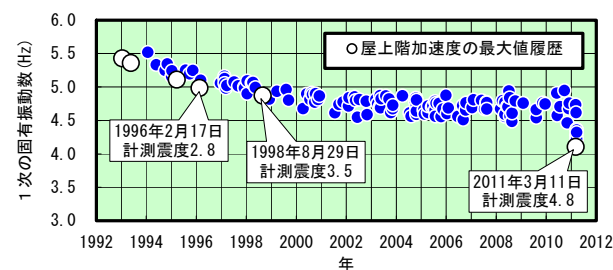
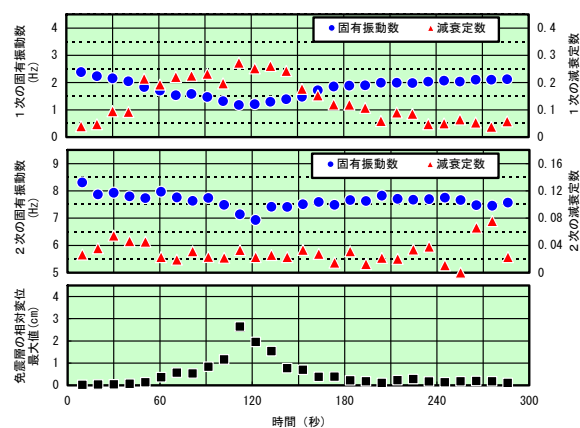


図-10 非免震棟での固有振動数の時間変動

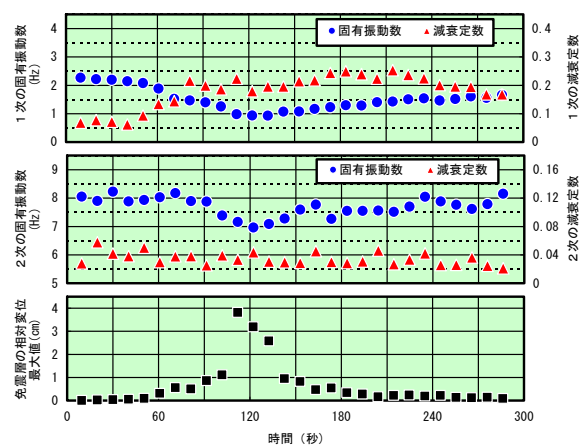
図-11 に各免震棟でのケースAに対する固有振動数および減衰定数の同定結果を、同定区間での最上階と基礎との相対変位最大値とともに示す。LRB棟での主に免震層の特性に依存すると想定される1次のモードについて、免震層相対変位の増大に伴い固有振動数は低下（長周期化）し減衰定数は大きくなる傾向が、主要動後は免震層相対変位の減少に伴い固有振動数および減衰定数ともに地震発生前の値に戻る様子が観察される。主に上部構造の特性に依存すると想定される2次のモードについて、固有振動数は1次モード同様に免震層相対変位の増大に伴い低下し、主要動後は地震発生前の値に戻っていく様子が確認できる。減衰定数は免震層相対変位の増減に関係なくほぼ一定値（2%から4%程度）を示している。HRB棟での1次のモードについて、免震層相対変位の増大に伴い固有振動数は低下し減衰定数は大きくなる傾向を示す。主要動後は地震発生前の値に戻っていく傾向は確認できるものの、免震層相対変位が小さくなくても地震発生前の値に戻っていない点を確認できる。その後の余震記録では固有振動数および減衰定数ともに初期の値に戻っていることを確認しており、高減衰積層ゴムの特性として振動特性の復帰に時間を要する可能性が考えられる。2次のモードは、固有振動数および減衰定数ともにLRB棟と同様の傾向を示す。

図-12 に免震棟上部構造（免震層上を入力、最上階を出力とした推定）でのケースAに対する固有振動数の同定結果を、同定区間での最上階と免震層上との相対変位最大値とともに示す。免震棟の上部構造部のみの固有振動数を推定した結果、LRB棟、HRB棟ともにばらつきは認められるものの5Hz程度に位置している。これは非免震棟での固有振動数推定結果と概ね整合する結果である。なお、非免震棟では相対変位の増減に対応した明確な振幅依存性が認められたが、免震棟上部構造の固有振動数推定結果からは明確な振幅依存性は確認できなかった。免震棟上部構造での相対変形は非免震棟に比較して小さく、振幅依存性を示すだけの変形量がなかったためであると考えられる。

図-13 に免震棟での1次の固有振動数に関する推定結果と設計値との比較を、図-14 に免震棟での1次の減衰定数に関する推定結果と設計値との比較を示す。なお、推定結果はケースAならびにケースB両方を採用し、同定区間での相対変位実効値に対してプロットすることとした。一定の区間に対して推定された固有振動数および減衰定数は、当該区間での等価な値であると考えられる。そこで、相対変位に関しても当該区間での時間平均的な値である実効値を採用することとした。設計上の弾性限界歪はLRB免震装置で0.5%、HRB免震装置で10%と設定されており、推定結果の比較も弾性限界歪以上の領域とした。LRB棟での固有振動数推定結果は、最大で5%歪程度までではあるが設計値および加力試験結果²⁾とよく対

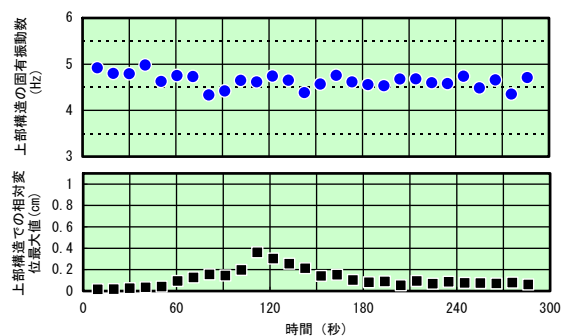


(a) LRB棟

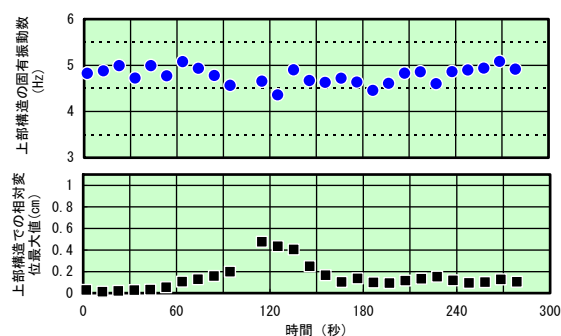


(b) HRB棟

図-11 免震棟での同定結果【ケースA】

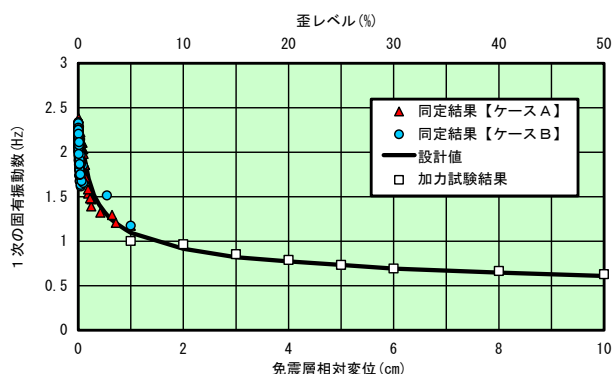


(a) LRB棟

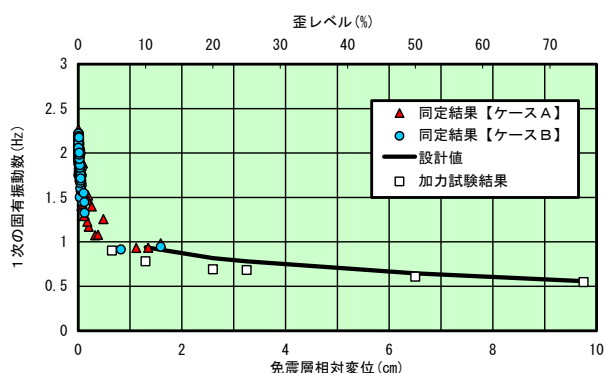


(b) HRB棟

図-12 免震棟上部構造のみの同定結果【ケースA】

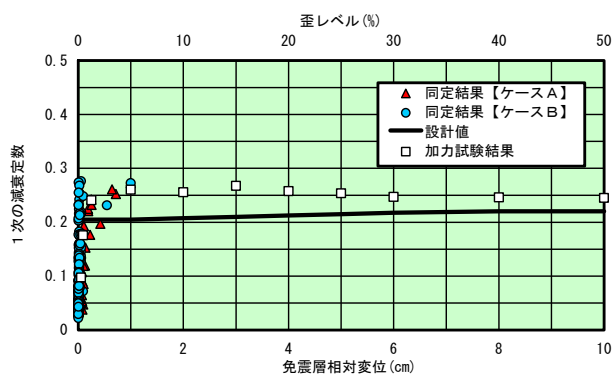


(a) LRB棟

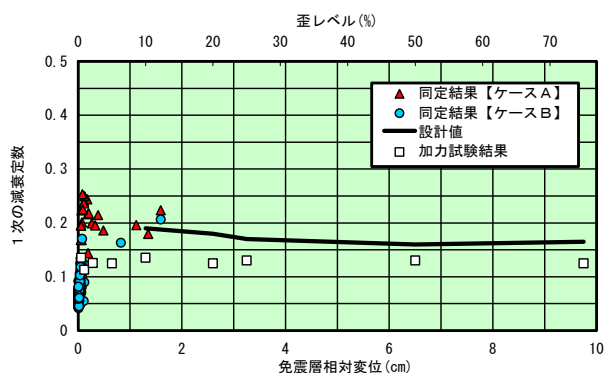


(b) HRB棟

図-13 免震棟の1次固有振動数の設計値との比較



(a) LRB棟



(b) HRB棟

図-14 免震棟の1次減衰定数の設計値との比較

応していることが確認できる。特に数%程度以下の微小歪領域においては免震層相対変位の増大に伴い固有振動数は急激に低下する傾向を示すが、この傾向も推定結果と設計値で良く対応している。

HRB棟での固有振動数推定結果は、免震装置の弾性限界歪(10%)付近で設計値および加力試験結果²⁾とよく対応していることが確認できる。

減衰定数について、LRB棟では歪レベル数%程度以下の微小歪領域ではばらつきが大きいですが、それ以上の歪領域では20%から30%程度の値を示しており、設計値および加力試験結果と良く対応する結果である。

HRB棟に関しても弾性限界歪(10%)付近の領域では15%から25%程度の値を示しており、設計値および加力試験結果と良く対応する結果である。

4.2 復元力特性の検討

4.2.1 検討概要

免震棟での観測記録を用いて免震層の復元力特性を推定した。用いた手法は、上部構造を線形システムで、免震層を非線形システムでモデル化し、両者を部分モード法により合成したハイブリッド運動方程式を用いた同定手法を採用する(詳細は参考文献7)を参照のこと)。

4.2.2 検討結果

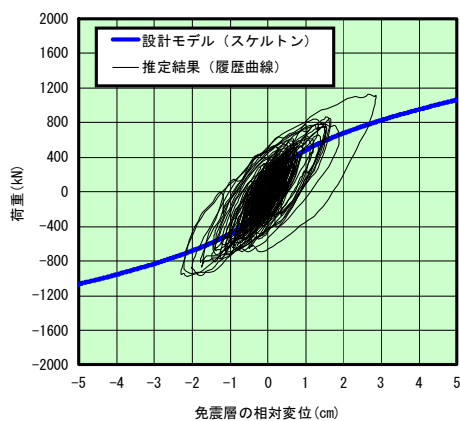
図-15に各免震棟の観測記録より推定された免震層の復元力特性を、設計モデル(スケルトン)とともに示す。両免震棟とも推定された免震層の復元力特性は設計モデルに比較して若干大きな値を示しているが、相対変位の大きな範囲での傾きや設計モデルに沿って履歴ループを描いている点など全体的な傾向は良く表現できている。

5. 応答解析

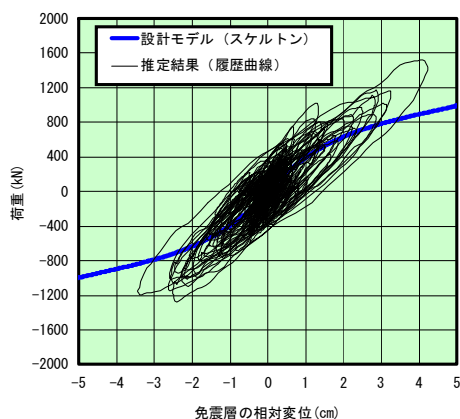
設計時に仮定した各免震層のモデルについて、その妥当性を検証するため、各免震棟X方向について応答解析を実施した。比較は解析結果および観測記録よりそれぞれ求めた免震層相対変位とした。

各免震棟の解析モデルは設計時のモデルとし、免震装置下部を固定とする直列5質点系振動モデルとした。復元力特性は、上部構造はせん断バネで、免震層はスウェーバネとロッキングバネでモデル化している。検討に用いた入力波は東北地方太平洋沖地震にて当該建屋基礎上で得られた記録とした。

図-16に免震層相対変位の比較を示す。観測記録より確認されたLRB免震装置のせん断歪は最大15%程度であり弾性限界歪(0.5%)を超えている。同様に、HRB免震装置のせん断歪は最大30%程度であり弾性限界歪(10%)を超えている。LRB棟およびHRB棟ともに、このような歪領域においても解析モデルは観測記録と良く対応していることが確認できる。

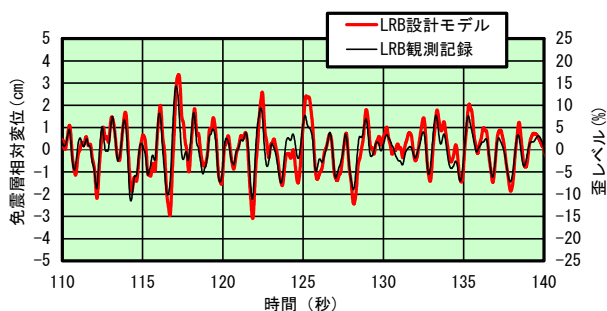


(a) LRB棟

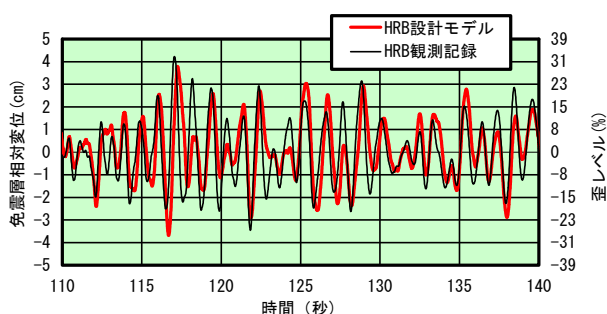


(b) HRB棟

図-15 免震層の復元力特性



(a) LRB棟



(b) HRB棟

図-16 免震層相対変位の比較

6. 地震時居住者アンケート

各免震棟および非免震棟では、地震時の免震効果を居住者の体感からも検証する目的で、地震時居住者アンケートを実施しており、東北地方太平洋沖地震においてもアンケートを実施した。アンケート内容は、「不快に感じたか?」、「気持ち悪くなったか?」、「不安に感じたか?」、「転倒物・落下物・移動物等の有無」の各項目としている。

アンケートでは9室（各棟3室）から回答を得た。アンケート回答者のうち、地震発生時在室数は5室であった。

「不快感」および「不安感」に関しては免震、非免震棟を問わず在室者全員が不快かつ不安に感じたとは回答している。また「気持ち悪さ」に関しては在室者全員が気持ち悪いとは思っていない結果であった。

表-2に「転倒物・落下物・移動物等の有無」に関するアンケート結果を示す。非免震棟の居住者から「皿の割れ」や「本棚の移動」などの回答が寄せられた。これに対して、LRB棟居住者からは「転倒・移動物はない」、 「写真たてが倒れた程度」などの回答が、HRB棟居住者からは「ゴルフバッグ転倒」、「植木転倒」などの回答が寄せられた。なお、免震棟居住者からは非免震棟のような皿の割れや家具の移動に関する回答は無かった。今回の地震では、免震、非免震棟での居住者の体感に差は認められなかったが、特に家具の揺れ方という観点からは地震時の免震効果を確認することが出来た。

表-2 「転倒物・落下物・移動物等の有無」に関するアンケート結果

対象棟	回答階	回答内容
非免震棟	4階	・窓ガラスの音、建物のきしむ音がすごかった ・食器棚の食器が飛び出してきて皿やコップが大量に割れた ・重い本棚が4cm程度移動した
	2階A	・食器棚の上に置いてあった物が床に落下していた
	2階B	・本棚の本が落下、飾っていたものが落下 ・タンスの上に置いていた物が落下 ・壁がミシミシと音がしていた
LRB棟	4階	・ゴルフバッグの転倒
	2階A	・レンジ台の上のカゴが落ちた ・まな板が倒れた ・大きく揺れた割には物が落ちたりしなかった
	2階B	・子供の学習机の引き出しが全部出る ・飾り棚の上の写真たて、食器、植木が倒れる
HRB棟	4階	・揺れただけで特に落下や移動は無い。
	2階	・写真たてが倒れたが、他に何も倒れていなかった
	1階	・家具は倒れなくて、皿も割れていない

7. まとめ

上部構造が同一である免震２棟および非免震棟において得られた地震観測記録の分析を基に以下の知見を得た．

- (1)動特性の推定を試みた結果，時間変動に伴う固有振動数および減衰定数の振幅依存性が確認された．これは，観測記録による建物健全性評価の基礎資料として活用可能である．
- (2)免震棟で推定された動特性と設計値とを比較した結果，設計値と良く対応することを確認し，L R B棟，H R B棟ともに概ね妥当な設計モデルであることが検証された．
- (3)東北地方太平洋沖地震での居住者アンケート結果より，非免震棟との室内の揺れ状況比較を通じて免震効果が確認された．

8. おわりに

比較的大きな揺れを経験した東北地方太平洋沖地震においても免震効果が確認できた．今後は，観測記録より推定された建物動特性と設計値との比較による建物健全性評価などに本報で得られた知見を活用し，免震建物の構造ヘルスマニタリング技術として展開していく予定である．

謝辞：本報告は「構造ヘルスマニタリングプロジェクト研究会」（慶應義塾大学 三田教授主催）で得られた成果をまとめたものである．指導頂いた三田教授，三田研究室の皆様に感謝申し上げます．

参考文献

- 1) Liue XIE : Estimating the restoring force of an isolation layer based on component mode synthesis, 建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp. 231-233, 2008. 9.
- 2) 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 10 月.
- 3) 森下真行, 斉藤芳人, 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, 前田建設技術研究所報, VOL. 40, pp. 37-44, 1999. 9.
- 4) 森下真行, 斉藤芳人, 三田彰 : 地震応答に基づく建築構造物の動特性のシステム同定, 建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp. 123-124, 2010. 9.
- 5) 森下真行, 斉藤芳人, 吉田隆治, 龍神弘明 : 免震建屋における地震時の体感アンケート調査結果, 前田建設技術研究所報, VOL. 48, pp. 4-1~7, 2007.
- 6) 足立修一 : 「MATLAB による制御のためのシステム同定」, 東京電機大学, 2002. 5.
- 7) 森下真行, 三田彰, Zhenhua Xing : 免震装置の異なる隣接建物の履歴特性の同定 (その 1, その 2), 建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp. 679-682, 2009. 8.