

免震建物の地震観測

－2011 年東北地方太平洋沖地震における免震建物の地震応答－

Seismic Observation of Base Isolated Buildings

- Earthquake Response of Base-Isolated Building on 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake -

上 寛樹* 安井健治* 山上 聡*

要 旨

当社では日本初の実用免震建物である技術研究所管理棟をはじめ、全国 14 棟の建物で地震観測を実施している。2011 年東北地方太平洋沖地震においては、強震域における記録も含めて計 11 棟の免震建物で有効な観測記録を得ることができた。その結果、強震域での十分な免震効果を確認すると共に、長周期地震動が免震建物の応答に及ぼす影響を把握した。また、免震建物の設計における地震応答解析モデルの妥当性を確認した。

キーワード：東北地方太平洋沖地震、免震、地震観測、長周期地震動

1. まえがき

兵庫県南部地震以降、免震建物が全国に急速に普及したが、強震域における免震建物の実観測記録はあまり得られていない。免震建物で地震時の応答を観測することは、免震効果の実証はもちろん、免震構法の維持管理と耐久性・信頼性の確保、設計へのフィードバック、また免震構法のさらなる普及のための PR など、様々な点で免震技術の発展に大きく寄与するものである。

当社では、日本で最初の実用免震建物である技術研究所管理棟（以下、技研と称す）をはじめ、図-1に示す全国 14 棟（うち 1 棟は非免震超高層建物）で地震・風観測を実施している。2011 年東北地方太平洋沖地震（以下、本地震と称する）では、震度 6 弱の強震域における記録を含め、計 11 棟の免震建物で有効な観測記録を得ることができた。

本報では、得られた観測記録を基に、本地震における免震建物の応答低減効果について、長周期地震動による影響を含めて検証した。また、観測記録を用いた地震応答解析により、免震建物の設計における解析モデルの妥当性確認を行った。

2. 観測結果

2.1 観測建物の免震効果について

有効な記録の得られた 12 棟について、建物諸元、計測震度、および最大加速度応答値の一覧を表-1に示す。



○数字付は今回有効な観測データが得られた免震建物

図-1 当社の地震観測網

計測震度 5 弱以上を記録した建物（A ビル、技研、東京本社、E ビル）においては免震層下部の加速度に対し、免震層上部では 2/3 程度以下に低減する効果が見られた。

図-2に観測建物のうち、最も震源に近い A ビルにおける応答加速度波形、および免震層の相対水平変位履歴を示す。なお、変位は東西・南北各方向の加速度波形

* 技術研究所

表-1 建物諸元、計測震度、および最大加速度応答値一覧

建物名称 【所在地】	震央 距離 (km)	構造/階数 <竣工年>	主な免震装置	震度		最大加速度 (cm/s ²)			免震効果 応答倍率 上部/下部	備考
				気象庁 発表	観測値 ()内は 計測震度	方向 (X):長辺 (Y):短辺	免震層 下部	免震層 上部		
① Aビル 【仙台市】	173	S造/9F <2006>	LRB・RB	6弱	5強 (5.3)	南北(X) 東西(Y)	299 231	151 121	0.51 0.52	
② 技術研究所管理棟 【つくば市】	332	RC造/4F <1986>	RB 鋼棒ダンパー オイルダンパー	6弱	5強 (5.0)	南北(Y) 東西(X)	270 201	148 136	0.55 0.68	オイルダンパーは南北のみ →セミアクティブ制御 (フルキブル免震)
③ Bマンション 【新潟市】	334	RC造/24F <2009>	HRB オイルダンパー	4	4 (3.6)	南北(Y) 東西(X)	29 30	35 30	1.2 1.0	超高層免震
④ 東京本社ビル 【港区】	389	SRC造/9F <2007改修>	HRB オイルダンパー	5弱	5弱 (4.5)	南北(X) 東西(Y)	76 94	61 62	0.80 0.66	免震フロア (1階柱頭免震)
⑤ Cマンション 【川崎市】	403	RC造/14F <1998>	LRB	4	4 (4.4)	南北(Y) 東西(X)	78 96	80 72	1.03 0.75	
⑥ Dマンション 【立川市】	407	RC造/17F <2003>	LRB 金属転がり支承	4	4 (4.4)	南北(Y) 東西(X)	66 69	90 79	1.36 1.14	FRS (フラットレールシステム)
⑦ Eビル 【八王子市】	412	RC造/2F <1996>	偏心ローラー支承 粘性ダンパー	5弱	—	南北(Y) 東西(X)	151 138	33 40	0.22 0.29	
⑧ Fマンション 【浜松市】	598	RC造/6F <1990>	RB 鋼棒ダンパー	3	3 (2.5)	南北(Y) 東西(X)	8 6	18 15	2.3 2.5	
⑨ Gマンション 【豊田市】	612	RC造/14F <2007>	LRB・RB	3	3 (3.3)	南北(Y) 東西(X)	13 16	21 22	1.62 1.38	1階柱頭免震
⑩ Hマンション 【大阪市】	762	RC造/43F <2007>	RB・SSR オイルダンパー 粘性ダンパー	3	3 (2.9)	南北(Y) 東西(X)	10 10	15 17	1.5 1.7	超高層免震 粘性ダンパーは風対策
⑪ Iマンション 【芦屋市】	773	RC造/6F <1996>	RB 鋼棒ダンパー 鉛ダンパー	2	2 (2.3)	南北(Y) 東西(X)	5 6	9 9	1.8 1.5	

【免震装置凡例】RB：天然積層ゴム LRB：鉛入り積層ゴム HRB：高減衰積層ゴム SSR：弾性すべり支承

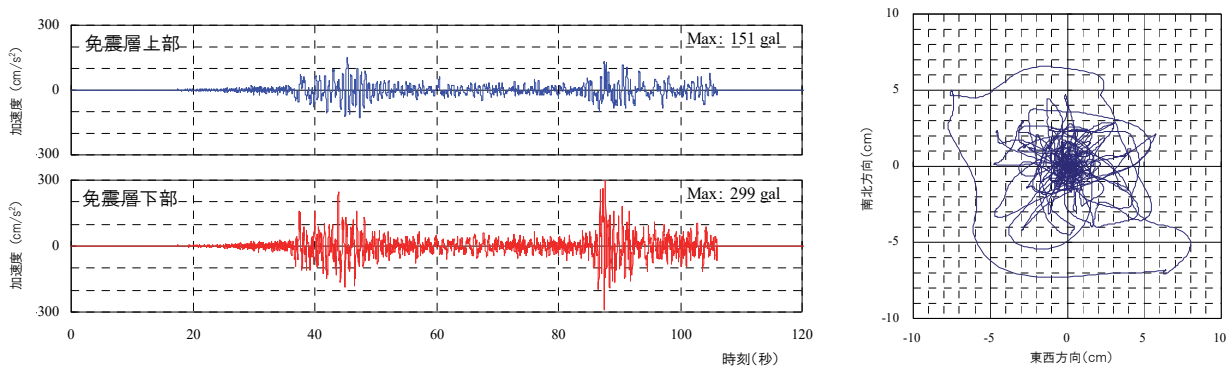


図-2 Aビルにおける応答加速度波形（左）と免震層の相対水平変位履歴（右）

において、0.1Hz以下の成分をカットし、加速度を積分することにより算出した。免震層の相対水平変位は最大約10cmを記録し、加速度をほぼ半減する効果が得られた。なお、本建物で使用している免震支承は鉛入り積層ゴムであるが、鉛プラグは塑性域に入っている。

免震装置に偏心ローラー支承¹⁾を用いているEビルでは、免震層上部における加速度が免震層下部の約1/4と、大きな低減効果が得られた。

一方、震源から遠い建物では免震層上部で1~2.5倍程度に増幅した。これは地震の入力レベルが小さい

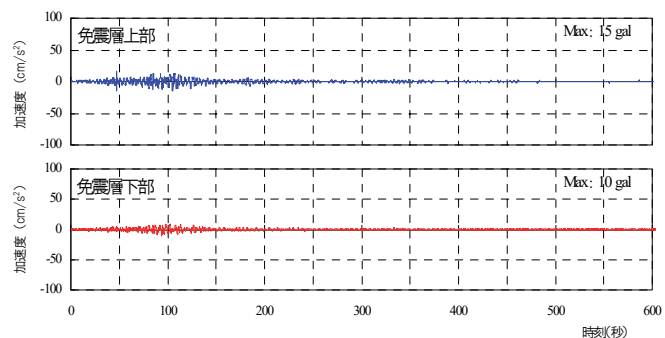


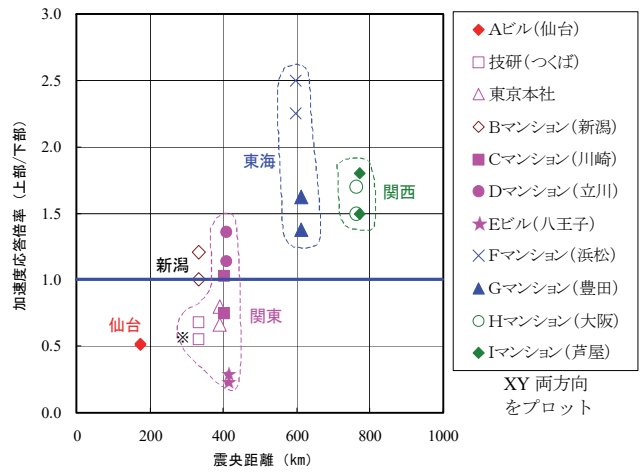
図-3 Hマンション（大阪）における応答加速度波形

ため免震装置の応答変位が小さく、免震層で建物を長周期化することにより地震入力を低減するという免震効果を十分に発揮できなかったことに加え、次節で述べる地震動の長周期成分の影響によるものと考えられる。なお、いずれの建物においても継続使用上問題となる被害は発生しておらず、免震建物の地震に対する優れた安全性と機能維持性能を確認した。

2.2 長周期地震動の影響について

a. 観測記録から得られた長周期地震動

大地震が発生した際に生じる様々な周期の揺れのうち、短周期成分の揺れは早期に減衰するが、長周期成分の揺れはあまり減衰することなく遠方まで伝わる性質を持っている。長周期地震動とは、この長周期成分の揺れが関東平野などをはじめとした厚い堆積層を持つ平野部に入力した際に、地盤周期（4～8秒程度）と一致する周期の揺れが増幅され、長時間継続する現象である。本地震においても、震源から750km以上離れた大阪平野において最大震度3の揺れが長時間記録された。図-3にHマンションにおける応答加速度波形を示す。主要動の後、レベルは小さいものの、数分にわたって揺れが継続し、300秒以降においても上階部の揺れが励起されている現象が認められる。



【主となるダンパー】

- ◆ ◆ ◆ ◆ ◆ : 鉛または鉛入り積層ゴム
- △ ◇ ○ : オイルダンパー
- × : 鋼棒ダンパー ※技研の東西方向は鋼棒ダンパー

図-4 震央距離と免震効果の関係

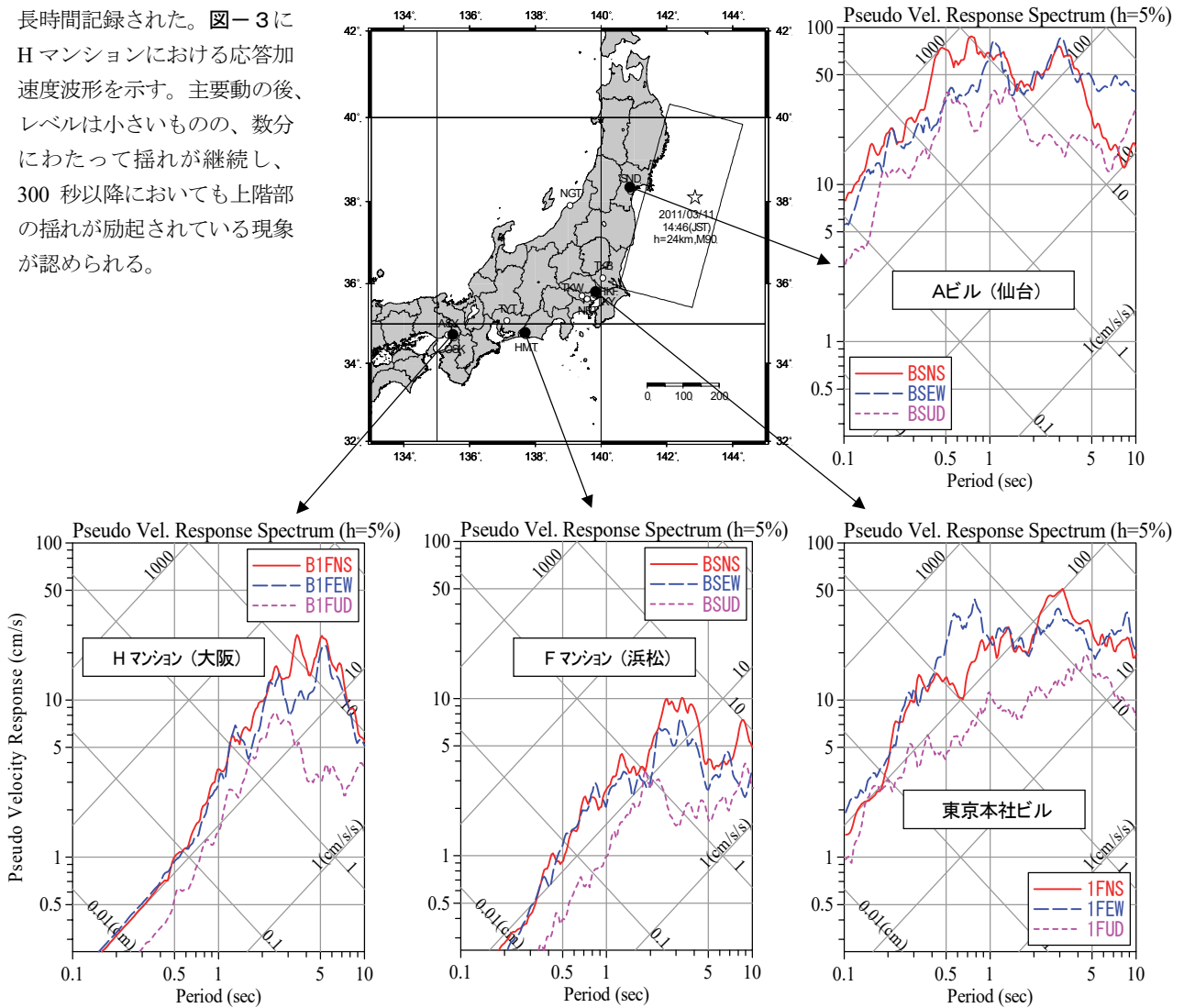
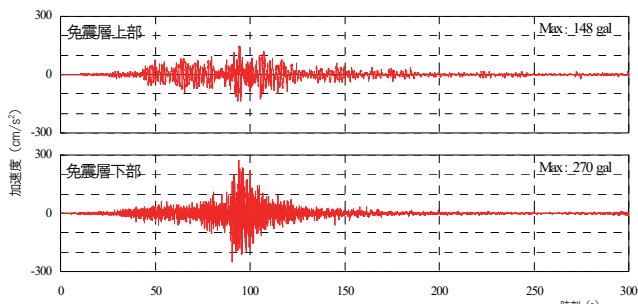
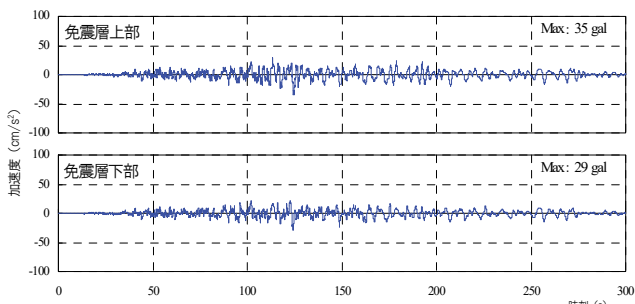


図-5 震央距離の異なる観測点における応答スペクトルの比較（免震層下部）



(1) 技研 (つくば: 震央距離 332km)



(2) Bマンション (新潟: 震央距離 334km)

図-6 つくばと新潟における入力地震動の比較

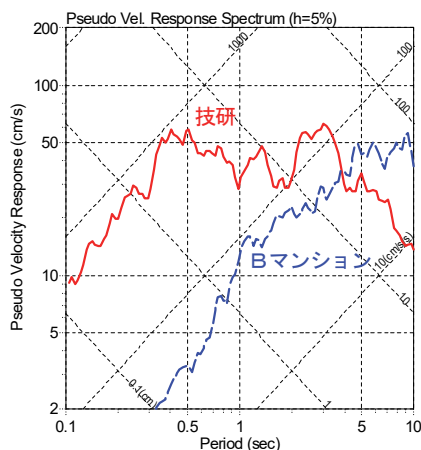


図-7 つくばと新潟における応答スペクトルの比較 (免震層下部)

b. 震源からの距離と応答の関係

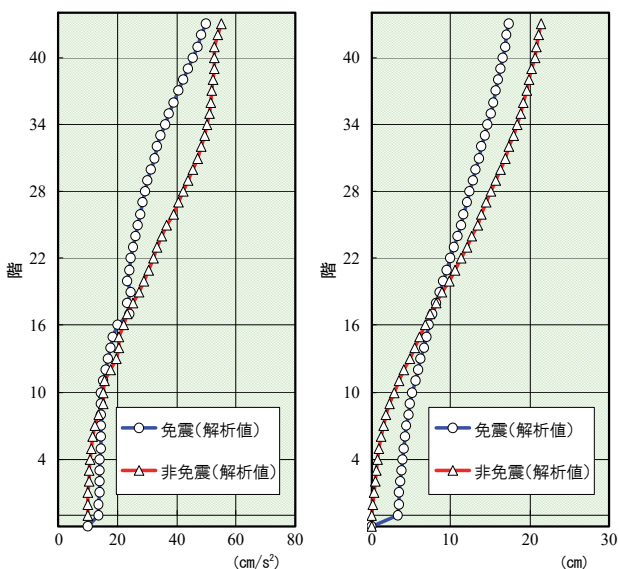
観測建物の震央距離と免震効果 (免震層上下の応答倍率) の関係を図-4に示す。

前節で述べたように、震央距離が大きいくほど応答倍率が高く、概ね 300km を超えると免震による加速度の低減効果を発揮しにくくなっている。これは距離が大きくなるほど地震動の短周期成分は減衰してレベルが小さくなるのに対し、長周期成分はあまり減衰しないため、一般的な免震建物の 1 次固有周期である 2~4 秒付近での上部構造の応答が大きくなったことによる。図-5に仙台、東京、浜松、大阪での観測建物の免震層下部における応答スペクトルを示す。図中 NS は南北、EW は東西、UD は鉛直の各方向を示している。震源からの距離が大きくなるほど長周期成分が卓越していることが分かる。天王寺では浜松よりも遠距離にもかかわらず、特に周期 4~6 秒付近の応答が浜松よりも大きくなっており、大阪平野の深い堆積地盤による増幅特性が表れている。

図-6に震央距離が同等である技研 (つくば) と B マンション (新潟) における応答加速度波形を、また、図-7に両建物の免震層下部における応答スペクトルの比較を示す。震央距離はいずれも約 330km で、5 分以

上継続して揺れが記録されている。しかし、応答スペクトルには明確な違いが見られ、B マンションでは短周期成分に比べて長周期成分のレベルが大きいのに対し、技研では広い周期帯にわたって強い揺れが含まれていることがわかる。これは最初の破壊点からの距離は遠いものの、破壊域が茨城沖まで達しているため、関東地方では短周期成分のレベルも大きくなったものと推測される。技研では、応答加速度の最大値は短周期の揺れで記録されたもので、その結果、免震による加速度低減効果がよく表れたものと考えられる。

図-4において、やはり震央距離が同等である東京本社ビルと D マンションとの免震効果に違いが見られる。これは、前述した震源域との距離差による短周期成分の違いに加え、使用している免震装置の特性の違いが表れたものと考えられる。D マンションでは、初期剛性が高く小変形域で性能を発揮しづらい鉛入り積層ゴムを使用しているのに対し、東京本社ビルでは小変形から性



(1) 最大応答加速度 (2) 最大応答水平変位

図-8 長周期地震動に対する免震建物と非免震建物の応答の違い (H マンションの地震応答解析結果)

能を発揮する高減衰積層ゴムとオイルダンパーを使用している。同様に、東海地方において震央距離が同等である 2 建物の比較では、G マンションに対して F マンションの応答倍率が大きい、これはダンパーに鋼棒ダンパーのみを使用した初期の免震建物であるため、鉛入り積層ゴムを使用している G マンションより小変形域での減衰性能が劣ることによるものと考えられる。

c. 長周期地震動に対する免震建物の安全性について

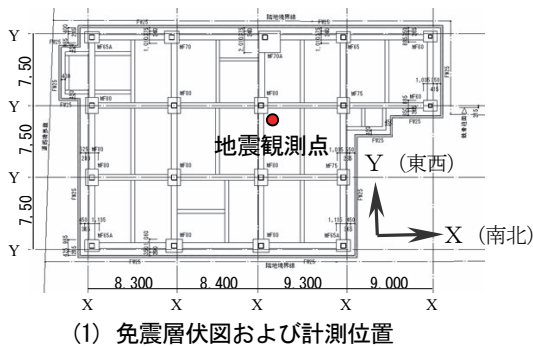
H マンションの解析モデルを用い、免震建物と非免震建物の地震応答解析を行い、応答の違いを調べた。免震建物の振動モデルは設計時のものを用い、各層の質量を質点に集約した等価せん断ばねモデルとし、非免震建物は同モデルの免震層を固定したものとした。入力地震動は、本地震で同建物の免震層下部において観測された加速度波形を用いた。図-8 に、最大応答加速度、および応答水平変位の分布を示す。下層階においては非免震建物に比べて免震建物の応答が大きいが、上層階では逆に免震建物の応答が小さくなっている。このことは、長周期地震動に対し、免震建物においては免震層直上階での応答を低減するには至らないものの、変位が大きくなる免震層に十分な減衰を与えることで、効率よく地震エネルギーを吸収し、上部建物の共振による揺れの増幅を

抑制できることを示している。

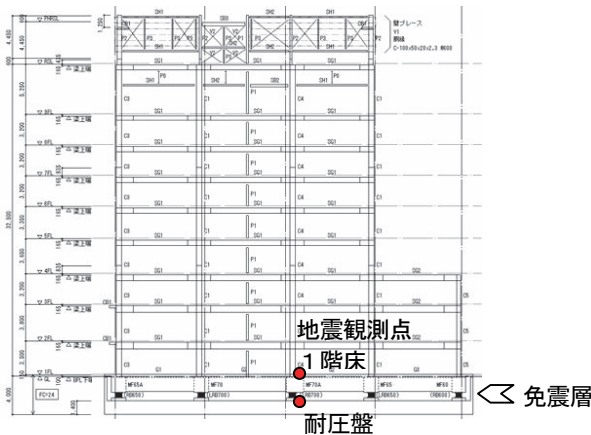
なお、長周期地震動の影響で免震層上部の応答が増幅した建物においても、いずれも揺れのレベルは小さく、構造体は無被害であった。ただし、近い将来に発生が予測されている東海地震、東南海地震、南海地震、あるいはそれら複数の連動地震においては、本地震とは震源や地震動の伝播経路が異なるため、今回観測された長周期地震動とは特性が異なるものと予想される。したがって、本地震を以って、長周期地震動に対し、超高層建物や免震建物などの長周期構造物の安全性が担保されたと断定することはできない。本観測によって得られた知見や各機関の研究成果の活用、関連規準、および法令整備に注視し、建物の地震安全性確保に反映していく必要がある。

3. 免震建物の設計における地震応答解析モデルの検証

設計時に設定した地震応答解析モデルを検証するため、A ビルについて、本地震での観測波形を入力地震動とした時刻歴応答解析を行った。図-9 に建物の免震層伏図、および軸組図を示す。本建物は、鉄骨造地上 9 階建（延べ面積 5,893.35 m²、2006 年竣工）で、「免震建築物及び免震材料に関する技術基準（平成 12 年建設省告示第

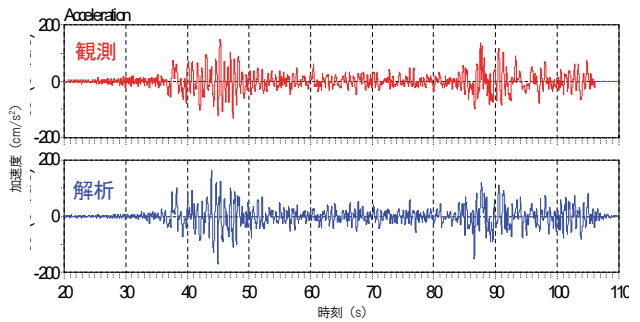


(1) 免震層伏図および計測位置

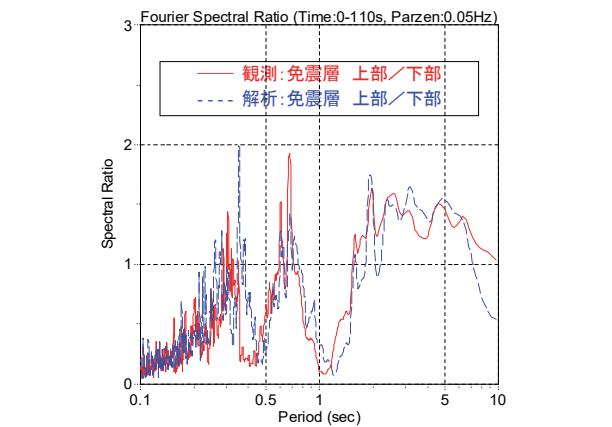


(2) Y4 通 軸組図

図-9 A ビルの建物概要



(1) 免震層上部 (1 階床) の応答加速度波形



(2) 免震層下部と上部 (1 階床) のフーリエスペクトル比

図-10 A ビルにおける観測記録と解析の比較

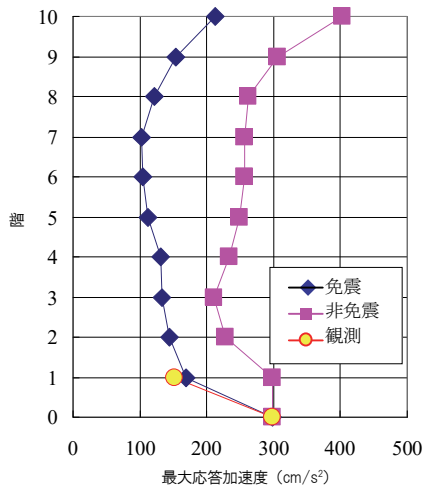


図-11 非免震と免震の応答比較

2009、2010 号)、いわゆる免震告示設計法に基づき設計された基礎免震建物である。免震装置は角形鉛入り積層ゴムおよび天然ゴム系角形標準積層ゴムを併用している。設計時の 1 次固有周期は積層ゴム水平変形 20cm 時 (ゴムのせん断ひずみ $\gamma = 100\%$) で 2.82 秒となっている。解析モデルは設計資料を基に多質点系の等価せん断ばねモデルを作成した。上部構造各層の質量は設計質量を用い、水平剛性は静的荷重増分解析における層せん断力と水平変位の関係から算出した。免震層のモデル化は、既報告²⁾における鉛入り積層ゴムの解析モデルに準じて履歴特性を定めた。また、上部構造の減衰定数は 0.02 とした。

1 階床応答加速度波形を図-10(1)に、入力地震動と 1 階床応答のフーリエスペクトル比を図-10(2)に、観測記録と解析結果を比較して示す。解析による加速度波形は観測波形と良く一致している。またスペクトル比についても、免震性能に関わる 1~3 秒程度の領域においては概ね良い対応を示しており、解析モデルは妥当であったと考えられる。

このモデルを用いて免震層を固定して非免震構造と仮定した場合の解析を行い、免震構造の応答と比較した。各層の最大応答加速度を図-11 に示す。免震構造の応答加速度は、各層とも非免震とした場合の 1/2 程度以下となっており、本地震において高い免震効果が発揮されていることが確認できた。

4. まとめ

2011 年東北地方太平洋沖地震における免震建物の地震観測より得られた結果を以下にまとめる。

- i. 震源に近い強震域においては、優れた免震効果を発揮した

- ii. 震源から 400km 程度以上離れた建物では長周期成分が卓越するため、十分な加速度低減効果は得られず、特に初期の免震建物では応答倍率が大きい
- iii. 長周期地震動に対しては、免震層直上での応答低減効果は得られないが、免震層で大きな減衰を与えることで、上階部の応答を抑制できる
- iv. いずれの免震建物にも地震後の継続使用の妨げとなる被害は生じておらず、免震建物の優れた安全性が確かめられた
- v. 観測記録を用いた地震応答解析により、免震建物の設計における解析モデルの妥当性を確認できた

5. あとがき

東北地方太平洋沖地震は過去にない地震規模の大きさであったため、広範囲の建物で貴重な観測記録が得られた。いずれの免震建物においても構造被害はなく、地震後も直ちに継続使用しており、免震建物の優れた地震安全性が実証された。今後さらに各建物での検討を進め、免震効果の把握と設計の検証を行い、今後の免震建物設計に有用な資料となるよう整備していきたい。

長周期地震動については、近年、超高層建物や免震建物への影響に関し、官民学の諸機関において検討がなされ、成果も報告されてきている。それらの一つとして、国土交通省から平成 22 年 12 月に建築物を対象とした対策試案³⁾が公表された。しかし、本地震を踏まえ、それら成果の再検証が必定であると考えられ、法令化も含めて今後の動向に注視する必要がある。

【参考文献】

- 1) 長岡 徹、安部 勇、他、「偏心ローラー支承の実建物への適用 (その 1) ~ (その 3)」、日本建築学会学術講演梗概集、B-2、1997.9
- 2) 山田高之、川井伸泰、安井健治、「2003 年十勝沖地震における高層免震建物の地震応答」、日本建築学会学術講演梗概集、B-2、2004.9
- 3) 国土交通省、「超高層建築物等における長周期地震動への対策試案について」、2010.12.21