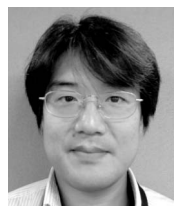
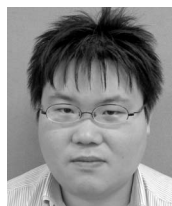


阿佐ヶ谷プロジェクト



高橋 治
構造計画研究所



會田 裕昌
同



富澤 徹弥
同



須原 淳二
清水建設



松本良一郎
同



露木 保男
カヤバシステム マシナリー

1 はじめに

従来の免震構造は、一般に水平方向の地震波のみに対して有効なものであった。その理由としては、建物の損傷は上下動よりも水平動が支配的であると考えられてきたことが挙げられる。しかし、2008年の岩手・宮城内陸地震により、震源に最も近いKiK-net観測点IWTH25（一関西）の地表の上下成分において、4000gal近い極めて大きな加速度が観測¹⁾されるなど、近年の全国的な強震観測網の整備と観測センサーの精度向上に伴い、上下動はこれまで考えられてきたより大きな地動の存在が明らかとなった。このような設計時の想定を超える地震を受けた場合に、ロングスパンの梁をもつ建物等に有害な損傷が発生してしまう可能性も高まっている。このような構造安全性の他にも、拠点医療施設では医療機器の散乱を防いで地震直後から即座に医療活動を行うため、また、危険物を扱う研究所や半導体製造施設に代表される高価な製造設備を有する工場など、建物内部の資産保全の観点からも上下免震の実現が期待されている。

しかしながら、上下免震装置は建物を常時支えながら、地震時には上下方向へ自由に運動することになる。各柱下で上下運動を自由に行えることは建物重心位置の移動や地震時転倒モーメントによるロッキング振動が起り易くなることでもある。そのため、これらを抑制して、建物を水平に保ちながら上下方向に運動させる仕組みが必要とされる。さらに、建物の重量配分は内部の利用状況によって日々変化しているため、この変化に対し建物を常に水平に保ち続けることも求められる。



図1 建物外観

以上を踏まえて、本稿では水平・上下方向に対して有効な3次元免震装置の開発とその装置を用いた建物設計例^{7)~9)}を紹介する。

2 建物概要および構造計画

3次元免震を適用した建物は、地上3階、最高部高さ9.0mの共同住宅である(図1)。基準階の平面形状は、X方向2.7mおよび7.2mの3スパン、Y方向4.5mの3スパンで構成されている(図2)。建物には1階床梁下と基礎の間に3次元免震装置を設置している。免震材料には、水平方向に対しては天然ゴム系積層ゴム支承と水平方向用オイルダンパー、上下方向に対しては空気ばねとスライダーおよびロッキング抑制付オイルダンパースystemを採用している。クリアランスは水平方向60cm、鉛直方向10cmとしている。表1に水平・上下方向の各設計クライテリアを示す。

所在地：東京都杉並区阿佐ヶ谷南

竣工：平成22年末

用途：共同住宅

延床面積：506.42m²

階数：3階

建物高さ：9.00m

構造形式：RC造

免震部材：3次元免震装置（高減衰積層ゴム支承＋空気ばね＋スライダー（せん断力伝達用鋼棒））

ロッキング抑制付オイルダンパーシステム

水平方向用オイルダンパー

表1(1) 水平方向設計クライテリア

		レベル1	レベル2
入力地震動		水平方向のみ	水平上下方向同時
上部構造	応力	短期許容応力度以内	短期許容応力度以内
	層間変形（ロッキング角含まず）	1/400以内	1/200以内
	層間変位	15cm（ $\gamma=100\%$ ）以内	30cm（ $\gamma=200\%$ ）以内
免震層	せん断歪み	安定変形以内	性能保証変形以内
	引張応力	引張力を生じない	引張力を生じない
	相対回転角	1/50以内	1/50以内
	スライダー	応力	0.8Mp以内 (Mp:全塑性モーメント)
		ブッシュ面圧	49N/mm ² 以内

表1(2) 上下方向設計クライテリア

		レベル1	レベル2
入力地震動		—	水平上下方向同時
上部構造	床応答	—	300
	—	建物傾き	1/250以内
上下方向免震装置	空気ばね	上下変位(mm)	±85
	—	内圧(MPa)	2
	スライダー	軸応力	短期許容応力度以内
	—	ストローク(mm)	±85
ロッキング抑制装置	オイルダンパー	最大減衰力(kN)	500
	—	ストローク(mm)	±85

3 免震装置概要

(1) 3次元免震装置

免震装置は一般の免震で用いられる天然ゴム系積層ゴム支承の下に鉄骨架台を組み、これらを空気ばねで支える構造である。また、空気ばねがせん断力を負担し過ぎないように、上下方向に摺動しながら建物のせん断力を基礎へ伝えるスライダー（せん断力伝達装置）を配している。このように水平方向と上下方向とで装置を独立させることによって、免震層における解析の明快さを確保するとともに、各支点下で水平方向・上下方向それぞれに装置を選定できる組合せの自由度を得る事ができる。なお、空気ばねは長期時においては自動レベリング装置により支点の位置が所定より高ければ空気を抜き、低ければコンプレッサーにより空気を入れ、常に一定の高さを保つ機構を備えている。

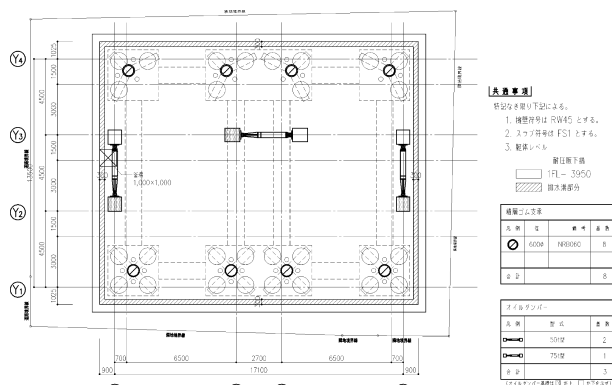


図2(1) 免震装置配置図

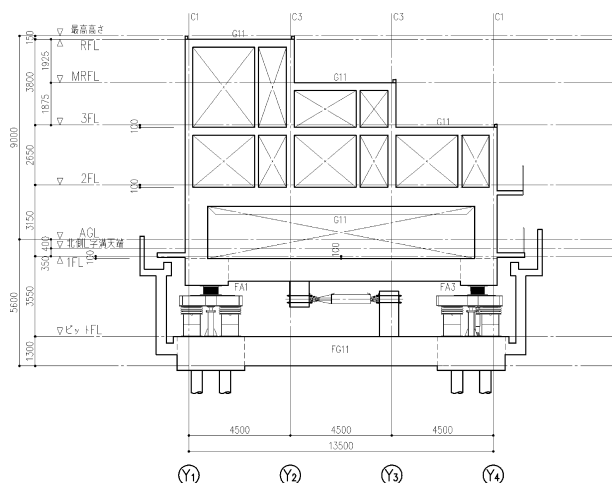


図2(2) 軸組図

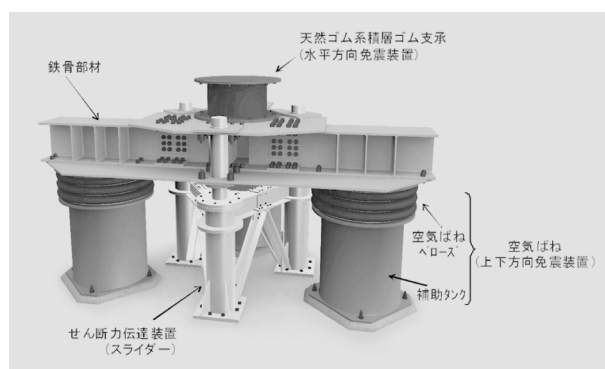


図3 3次元免震装置の構造

(2) ロッキング抑制付オイルダンパーシステム

本建物のように各支点が上下に自由に動く場合、建物が地震力等によるロッキング運動に対して抵抗できなくなる。そこで図4に示すように2本のオイル

ダンパーを、配管により建物の対角線上にたすき掛けにして繋ぎ、ダンパー間をオイルが行き来できるようにすることで、上下動成分に対しては配管抵抗による適度な減衰で上下方向のエネルギーを吸収し、ロッキング動成分に対してはダンパー絞りによる過大な減衰でロッキング動を抑制する。これらは油圧を用いた機械的な仕組みで実現できるパッシブな装置であるため、電気トラブルによる故障や誤動作の心配がなく高い信頼性を確保することができる。

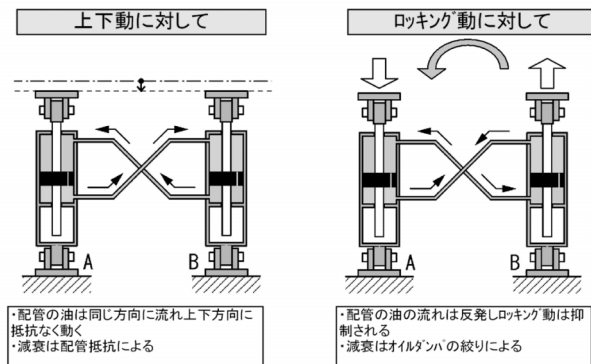


図4 ロッキング抑制付オイルダンパースステムの仕組み

4 振動解析概要

解析モデルは各装置の実大試験により得られたデータを踏まえて立体時刻歴解析用のモデルを作成した。各柱下に3次元免震装置モデルを配置した立体モデルとした。図5に示すように各装置を構成する積層ゴム、鉄骨架台、スライダーおよび空気ばねをそれぞれモデル化している。ここで、空気ばね、スライダーは3体、もしくは4体を個別にモデル化し、実装置と同様の位置関係で配置した。ロッキング抑制付オイルダンパースステムは実建物同様に対角の柱を結ぶように2組配置している。

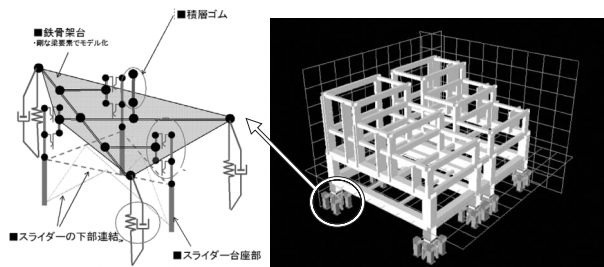
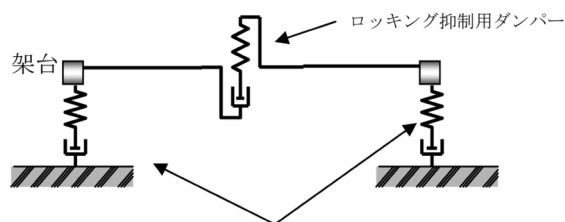


図5 3次元免震装置のモデル



上下方向用オイルダンパー（速度二乗に比例する配管抵抗）

図6 ロッキング抑制付オイルダンパースステムのモデル図

表2 固有値解析結果

	X	Y	Z
基礎固定	0.196秒	0.248秒	0.164秒
免震時	2.982秒	2.948秒	1.284秒

表3 各装置のモデル化方針

要素	内容
積層ゴム	水平・回転連成考慮 Haringx 理論に回転剛性の水平変位依存性を考慮
空気ばね リカフス	剛性：線形 減衰：速度2乗比例型
スライダー	完全弾塑性型、摩擦係数一定、ブッシュの位置の変動考慮
ロッキング抑制装置	上下 ・Maxwell 型 ・剛性：線形、減衰：速度2乗比例型 ロッキング ・Maxwell 型 ・剛性：線形、減衰：リリーフ型
水平ダンパー	・Maxwell 型 ・剛性：線形、減衰：リリーフ型

表4(1) 水平方向入力地震動一覧

地震動	継続時間 (秒)	入力最大加速度(cm/s ²)*1	
		レベル1	レベル2
EL CENTRO 1940 NS	50	255 (25)	510 (50)
TAFT EW 1952 EW	50	248 (25)	496 (50)
HACHINOHE 1968 NS	35	168 (25)	330 (50)
告示波 (神戸位相)	120	146 (13.0)	693 (71.1)
告示波 (八戸位相)	120	135 (11.8)	703 (82.2)
告示波 (ELCENTRO位相)	54	149 (12.1)	686 (76.7)
SITE波 (想定関東地震)	119	-	557 (72.1)

*1 () 内は最大速度(cm/s)

表4(2) 上下方向入力地震動一覧

地震動	継続時間 (秒)	入力最大加速度(cm/s ²)*1	
		レベル1	レベル2
EL CENTRO 1940 UD	50	—	307 (15.8)
TAFT 1952 UD	50	—	290 (19.1)
HACHINOHE 1968 UD	25	—	166 (15.1)
模擬地震動 (神戸位相)	120	—	238 (32.4)
模擬地震動 (八戸位相)	120	—	282 (30.8)
模擬地震動 (ELCENTRO位相)	54	—	292 (36.3)
SITE波 (想定関東地震)	119	—	228 (25.1)

*1 () 内は最大速度(cm/s)

図7に水平・上下方向同時入力地震波応答解析における上下方向成分の応答解析結果を示す。なお、上下方向最大応答加速度には水平免震のみの場合および基礎固定時の解析結果も併せて記載している。水平免震のみ・耐震の上下方向最大応答加速度は、建物頂部で著しく加速度が増幅しており、これはロングスパン梁の上下振幅による影響と考えられる。このような場合においても、上下免震を行った場合では床の応答加速度は各階で一様となっている。

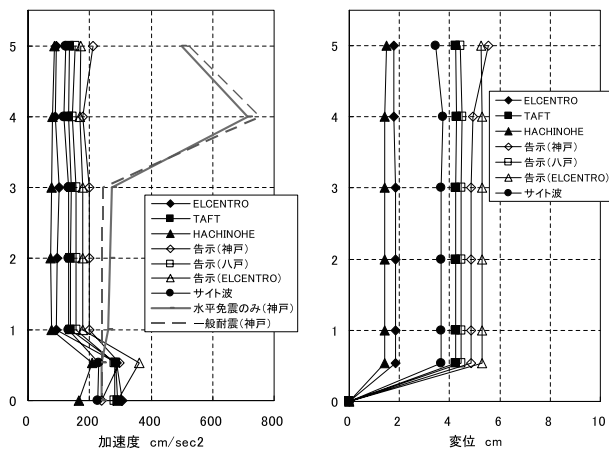


図7 上下方向最大応答値

また、ロッキング抑制付オイルダンパーの効果検証として、建物対角の2点を結ぶ各支点の上下の時刻歴変位を図8に示す。ロッキング抑制付オイルダンパーを取り付けた2点間は位相をほぼ同一にしながら互いに追従して動き、建物が水平を維持しながら上下方向に変位していることが確認できる。なお、建物のロッキング角はY方向最大で1/570となっている。

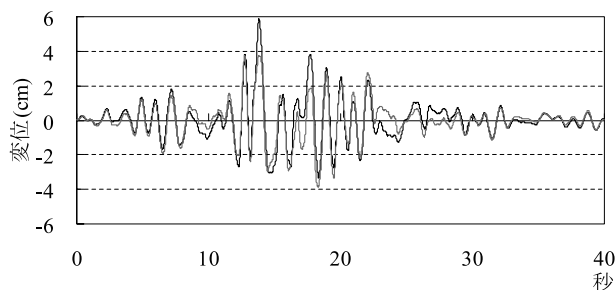


図8 建物対角2点間の上下変位時刻歴（告示波：神戸位相）

5 おわりに

3次元免震装置の開発と建物への適用例について、建物の概要と設計方針およびこれらを踏まえた建物地震応答解析について紹介した。今回使用した免震装置は、水平力によって摩擦力が変動するスライダの煩わしさがあるものの、基本的には単純なバネやダッシュポッドで構成されており、要求性能に見合ったシステムを実現できたと言える。今後、実建物によるデータ収集も行い、より高性能な装置の開発が進むことが期待される。

【謝辞】

本建物の構造設計にあたっては藤田隆史・東京大学生産技術研究所教授の指導の下、(株)構造計画研究所・清水建設(株)・(株)カヤバシステムマシナリーにより行われており、また、本建物の装置開発にあたっては、日本原子力発電(株)が経済産業省から受託して設けた3次元免震委員会(委員長：藤田隆史・東京大学生産技術研究所教授)の指導により、日本原子力研究開発機構(旧核燃料サイクル開発機構)と民間各社の技術協力^{2)~6)}を得て実施した「発電用新型炉技術検証試験」¹⁾の成果の一部を活用しました。ここに記して謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 青井真、森川信之：2008年岩手・宮城内陸地震のKiK-net—関西に於ける4gの強震記録、日本地震工学会誌、No.9 Jan.2009, pp.20~24, 2009.1
- 2) 蔭山満ほか：発電用新型炉へ適用する3次元免震システムの研究、(単独ローリングシール型：その1)、2002 Dynamics and Design Conference：機械力学・計測制御講演論文集2002 (abstract) pp.240 20020913
- 3) 梅木克彦ほか：発電用新型炉へ適用する3次元免震システムの研究、(単独ローリングシール型：その2)、2004 Dynamics and Design Conference：機械力学・計測制御講演論文集2004 pp."105-1"-"105-4" 20040927
- 4) 柏崎昭宏ほか：発電用新型炉へ適用する3次元免震システムの研究(油圧機構：その1)、日本機械学会、Dynamics and Design Conference 2002, 講演論文No612
- 5) 島田貴弘ほか：発電用新型炉へ適用する3次元免震システムの研究(油圧機構を用いた3次元免震システム：その2)、日本機械学会、Dynamics and Design Conference 2004, 講演論文No103
- 6) 須原淳二ほか：発電用新型炉へ適用する3次元免震システムの研究 建屋全体3次元免震システムの開発、日本建築学会、構造工学論文集Vol.52B, 2006, pp207-pp220
- 7) 高橋治、須原淳二、露木保男、會田裕昌他：3次元免震建物の開発(その1)~(その4)、2008建築学会大会梗概、B-2、構造II、振動、原子カプラント 2008, 435-442, 20080720
- 8) 高橋治ほか：3次元免震建物の開発(その5)~(その12)、2009建築学会大会梗概
- 9) O. Takahashi and J. Suhara: Construction of Civil Building Using Three Dimensional Seismic Isolation System (Part1~Part2), 14th World Conference on Earthquake Engineering, 05 Structural engineering: New structures and systems, October 12-17, 2008, Beijing, China
- 10) 国枝正春：空気ばね車両の上下振動の理論と実験、鉄道技術研究報告、第6号、車両編第3号、1958.4
- 11) 日本原子力発電株式会社：発電用新型炉技術検証試験事業報告書その2 3次元免震技術検証試験、pp.3.2.2-52~53. 2003.4