

免震建築物の構造設計

Structural Design of Base Isolated Building

大泉 敬実*
Yoshimi Oizumi

小林 孝至**
Takayuki Kobayashi

石田 忠***
Tadashi Ishida

阿世賀 宏****
Hiroshi Asega

要 約

西松式免震構法は、平成元年4月に財団法人日本建築センター免震構造研究委員会の技術評価審査を終了した。この技術評価に基づいた免震建物の実例として西松建設(株)大和寮の内家族寮の実施設計を行い、免震構造評定委員会の個別評定を平成2年4月に完了した。そして同年6月に大臣認定を得て、本建物が構造耐力上充分安全でかつ免震装置の耐久性及び維持管理の面においても適正であることが確認された。今回使用する免震装置は、積層ゴム+リングダンパー方式のものであり、建物の上部構造と基礎構造との間に設置することによって構造物の固有周期を長周期化することと、振動エネルギーの吸収を図ることで、上部構造への地震動の入力を低減化する機能を有している。なお、積層ゴムは、鉄板と薄いゴムシートを加硫接着した互層構造とし、その外周を耐候性に優れた外層ゴムで覆い、上下に積層ゴム固定用フランジ鉄板を取り付けたものである。また、リングダンパーは弾塑性鋼棒ダンパーの一種で母材にステンレス帯鋼を使用し母材の塑性化によるエネルギー吸収能力を利用して地震動の入力を低減させようとするものである。

目 次

- §1. はじめに
- §2. 建物概要
- §3. 構造設計
- §4. 応答挙動からみたその他の検討
- §5. まとめ

§1. はじめに

西松式免震構法は、設計、施工及び維持管理について開発した構法であり、建物の上部構造と基礎構造との間

に設置する免震装置によって構造物の固有周期を長周期化して振動エネルギーの吸収を図り、上部構造への地震入力の低減を目的としている。

また、西松式免震構法の効果としては、人命、建物構造体、居住環境、建物内部の貴重品に対して地震被害を最小限に留める事を想定している。

西松式免震構法の基礎的構成は、標準積層ゴム+リングダンパー方式の免震構法、鉛芯入りの積層ゴムによる免震構法、高減衰積層ゴムによる免震構法の三つのタイプがあるが、その内リングダンパーはMINダンパー(東京大学松下清夫名誉教授、西松建設他により昭和51年に開発し昭和58年に特許取得)を発展改良したものである。

本報告は、積層ゴム+リングダンパー方式の免震構法を用いた建物の構造設計について述べたものである。

*建築設計部構造課係長
**技術研究所構造研究課
***建築設計部構造課長
****技術研究所構造研究課長

§ 2. 建物概要

2-1 建物の概要

本建物は神奈川県大和市に建設される自社の家族寮である。

主体構造は鉄筋コンクリート造8階建の上部構造部、GL-2.28mに設置された基礎構造部および上部構造と

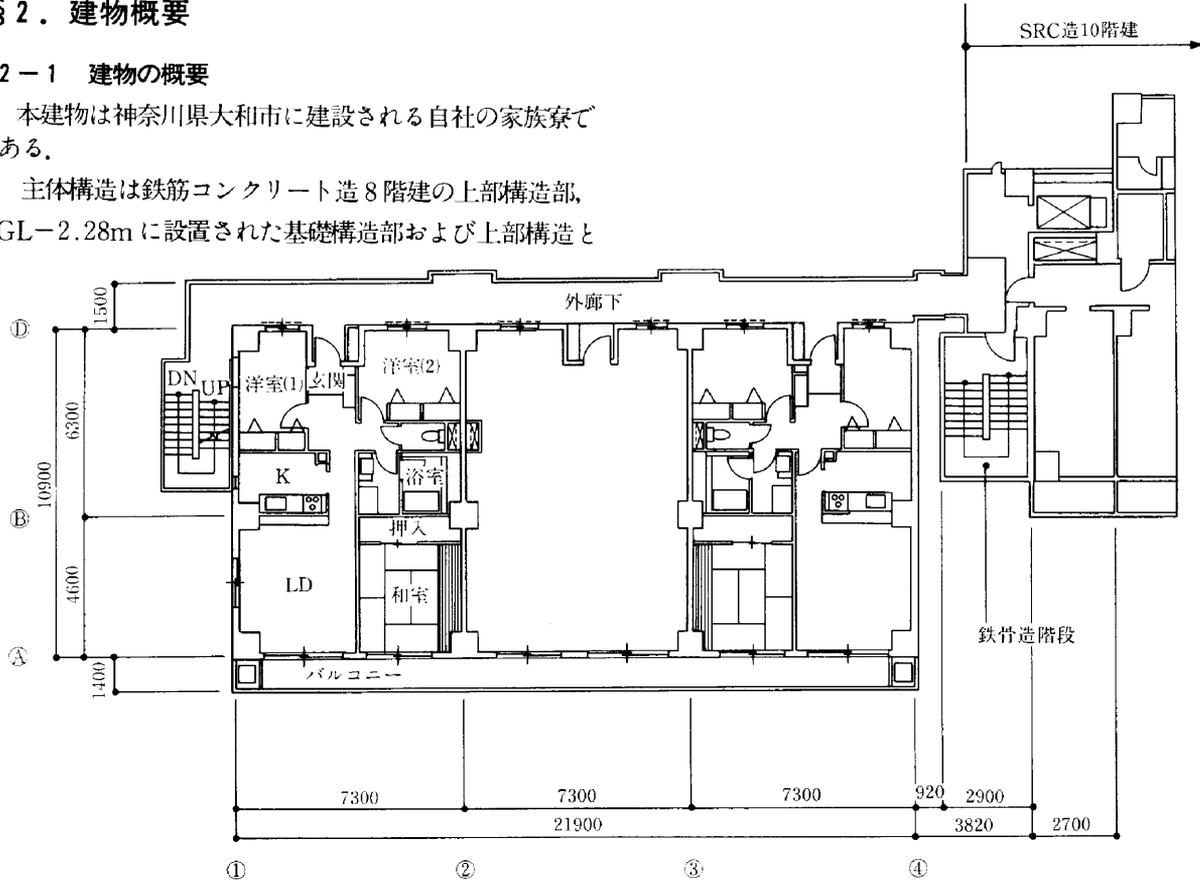


Fig.1 基準階平面図

基礎構造部との間に積層ゴムとリングダンパーを用いた免震装置部よりなる。Fig. 1 に基準階平面図、Fig. 2 に断面図を示す。

上部構造部は高さが23.37mでその平面は短辺方向 (Y 方向) 10.9m、長辺方向 (X 方向) 21.9mの長方形である。また構造は X 方向が純ラーメン構造、Y 方向が耐力壁付ラーメン構造である。免震装置部は積層ゴムとリングダンパーより構成され、Fig. 3 の装置伏図に示すように積層ゴムは妻側柱下に各1個、中柱下に各2個ずつ配置し、リングダンパーは中柱の廻りに4個1組で設置する。

基礎構造部は鉄筋コンクリート造の底版、基礎梁、壁杭により構成される。地盤は基礎下から GL-17.2m までローム層、その下部は N 値50以上の砂礫層でこの砂礫層を支持地盤とし、地下連続壁 (DIA-WIN 工法、BCJ-F416) を壁杭として採用し、建物・免震装置を支持させる。

- 建物名称：西松建設大和寮新築工事 (家族寮)
- 建設地：神奈川県大和市深見西2丁目772-1,2
- 主要用途：家族寮
- 建築主：西松建設株式会社
- 設計者：西松建設株式会社一級建築士事務所

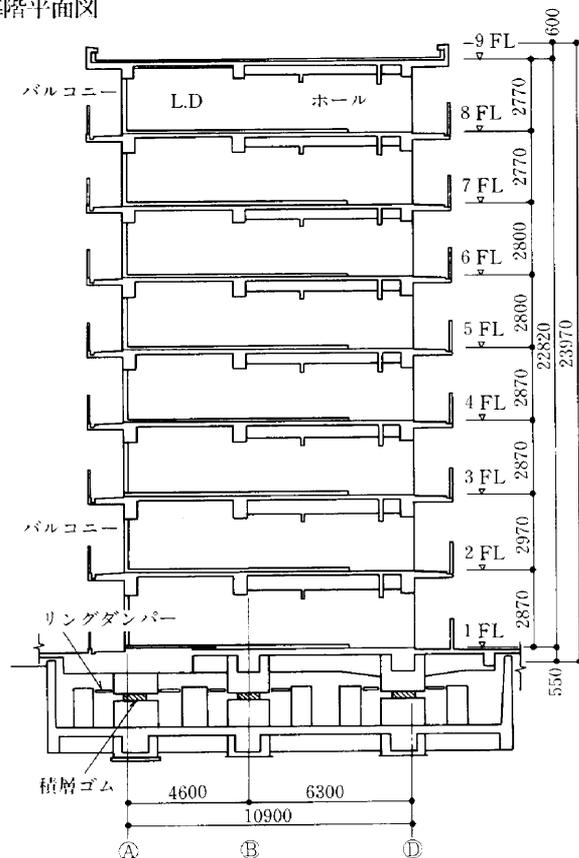


Fig.2 断面図

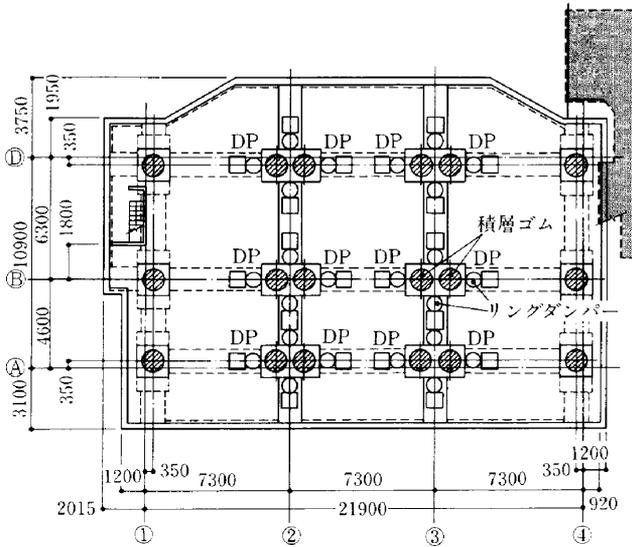


Fig.3 装置伏図

施工者：西松建設株式会社
 建築面積：277.18㎡
 延床面積：1919.0㎡
 構造：鉄筋コンクリート造
 階数：地上8階
 基準階階高：2.77m～2.97m

2-2 免震装置概要

西松式免震構法の建物は基礎部分が二重構造を有し、その二重構造の間に積層ゴムを設置して建物重量を支持し、この積層ゴムとリングダンパーによって地震時の振

動エネルギーを吸収する構造形式の建物で、パッシブ型制振に属するものである。

積層ゴムは鉄板と薄いゴムシートを加硫接着した互層構造をし、その外周を耐候性に優れた外層ゴムで覆い、上下に積層ゴム固定用フランジ鉄板を取り付けたもので、今回採用したゴム部のサイズは直径750mm×高さ260mmのものである。

リングダンパーは弾塑性鋼棒ダンパーの一種で母材にステンレス帯鋼を使用し母材の塑性化によるエネルギー吸収能力を利用して地震入力を低減させようとするものである。またリングダンパーの幅を増減させることにより免震装置の剛性、減衰能力を自由に調整できる構造となっており、本建物に使用するリングダンパーは断面形状が30mm×120mmのステンレス帯鋼をリング状にしたものである。

なお、Fig. 4 に免震装置部詳細図を示す。

§ 3 . 構造設計

3-1 構造設計方針

本建物を設計するに当たっては、敷地地盤での地震規模をレベル1、レベル2と想定し、各々のレベルの地震動に対する本建物の耐震設計目標値を Table 1 のように設定した。そして地震応答解析を行い、上部構造および免震装置の各レベルでの安全性を確認する。

Table 1 入力地震動レベルと耐震設計目標値

	最大速度値	免震装置	上部構造物
レベル1	25cm/s	水平変位15cm以下	層間変形角1/200, 短期許容応力度以内
レベル2*	50cm/s	水平変位22.5cm以下、かつ、浮上りを生じさせない	各層の塑性率が1.0以下

*基礎及び杭はレベル2に対して短期許容応力度以内で設計する。

3-2 構造設計概要

(1) 鉛直荷重に対する設計

鉛直荷重に対する設計は、建築基準法施行令に準拠した。また、免震装置の上下の構造躯体は免震装置取り替え時に作用するジャッキ反力を考慮して設計した。

(2) 地震荷重に対する設計

上部構造の一次設計用せん断力は、リングダンパーの幅をパラメーターとした予備的な地震応答解析の結果を参考にして、X方向では1～8階の層せん

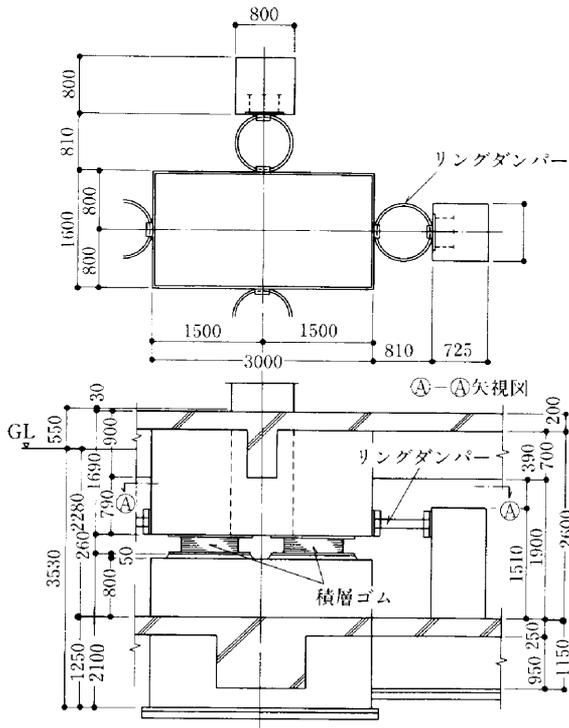


Fig.4 免震装置部詳細図

断力係数を0.15~0.26, Y方向では0.15~0.18と定めて計算し, 建築基準法に準拠して許容応力度設計を行った。

さらに, レベル1 (最大地表面速度25 cm/s) の地震動に対して地震応答解析を行い, 上部構造の最大応答せん断力が一次設計用せん断力を超えないことを確認した。なお, Table 2 に一次設計用せん断力を示す。

Table 2 一次設計用層せん断力

階	各階重量 W (t)	ΣW (tf)	地震力			
			せん断力係数		せん断力(t)	
			X方向	Y方向	X方向	Y方向
8	222.1	222.1	0.26	0.18	57.8	40.0
7	292.0	514.1	0.24	0.17	123.4	87.4
6	305.9	820.0	0.22	0.165	180.4	135.3
5	310.3	1130.3	0.20	0.160	226.1	180.9
4	322.6	1452.9	0.18	0.155	261.5	225.2
3	328.3	1781.2	0.17	0.155	302.8	276.1
2	343.1	2124.3	0.16	0.15	339.9	318.6
1	347.1	2471.4	0.15	0.15	370.7	370.7

(3) 基礎構造部の設計

本建物の基礎はGL-19mの砂礫層を支持層とする壁杭であり, 設計荷重による杭先端換算最大接地圧が長期で235.2tf/m² (2.305MPa), レベル2地震時との組合せで321.6tf/m² (3.146MPa) に対して壁杭の許容鉛直支持力度は長期で250tf/m² (2.450MPa), レベル2地震時との組合せで500tf/m² (4.900MPa) でありいずれも許容値以内に納まっている。また, レベル2地震時でも免震装置が安全に作動できるようにそれを支持する基礎構造部はレベル2地震時の応答せん断力に対して短期許容応力度以内で設計した。

3-3 弾塑性地震応答解析

(1) 解析モデル

解析モデルは, 免震装置下部を固定とし上部構造の各階を1質点とした9質点の等価せん断型質点系モデルとした。免震装置部は, リングダンパーと積層ゴムの水平剛性をスウェイバネに, 積層ゴムの鉛直剛性をロッキングバネにそれぞれモデル化した。Fig. 5 に解析モデル, Table 3 に上部構造の解析諸元を示す。

内部減衰については, 上部構造で減衰定数を0.02とし, 評価方法はひずみエネルギー比例型としたが, 免震装置には考慮しなかった。

復元力特性について, 上部構造のX方向は静的弾塑性解析で求めた荷重-変形関係をトリリニアの

Table 3 応答解析諸元

階	高さ (cm)	重量 (tf)	水平剛性(tf/cm)	
			X方向	Y方向
R	2282	222.1	—	—
8	2005	292.0	505	1505
7	1728	305.9	750	3039
6	1448	310.3	862	4481
5	1168	322.6	1080	5785
4	881	328.3	1280	7300
3	594	343.1	1440	9177
2	297	347.1	1708	11781
1	0	866.1	2500	16400
回転慣性 (tf・cm ²)	—	—	13.55×10 ⁸	3.26×10 ⁸

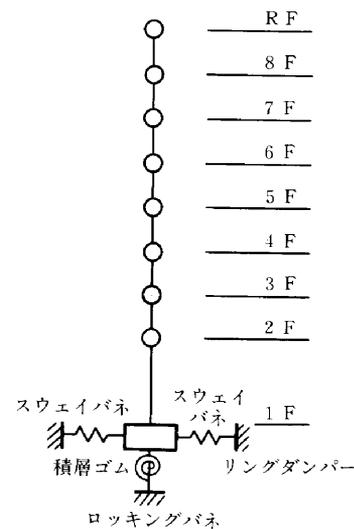


Fig.5 解析モデル

ケルトンカーブにモデル化し, 履歴特性には Degrading-Tri-Linear 型 (修正 Takeda モデル) を採用した。Y方向は弾性とした。

Fig. 6, 7 にスケルトンカーブのモデル化および履歴特性を示す。免震装置部は, 積層ゴムは水平・鉛直とも弾性, リングダンパーには実験¹⁾で得られた荷重-変形関係を骨曲線 (べき関数) と外周曲線 (5次曲線) にあてはめた Fig. 8 に示す復元力特性を用いた。

また, 固有値解析の結果, 上部構造および免震装置を含む系の1次の弾性固有周期はX方向で1.32秒, Y方向で1.28秒となった。

(2) 入力地震動波形

応答計算で用いた入力地震動波形は, EL CENTRO 1940 NS, TAFT 1952 EW, HACHINO-

HE 1968 NS のほかに建設サイトの地域特性を反映した波形として1987.12.17の千葉県東方沖地震の当該建物の建設敷地近傍での観測波形(以降YAMATO 1987と呼ぶ)の4種類とした。それらを設定したレベルに応じて最大速度値を拡幅し入力し

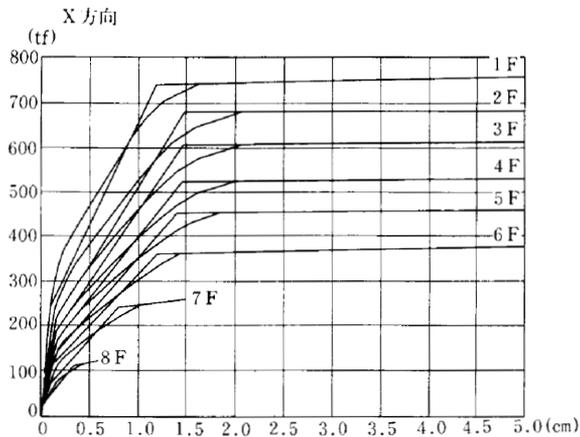


Fig.6 上部構造のスケルトンカーブのモデル化

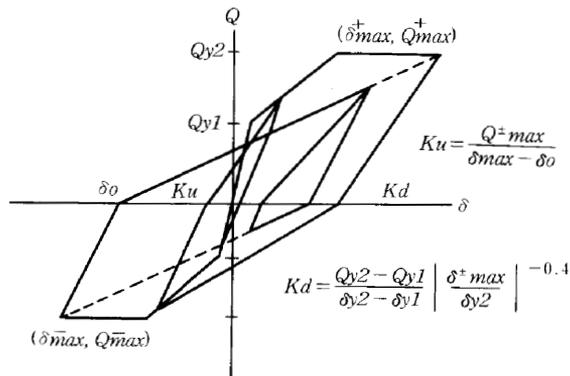


Fig.7 上部構造復元力特性
(Degrading-Tri-linear型(修正Takeda)モデル)

Table 4 入力地震動波形とその最大加速度 (gal)

震動名	方向	レベル1 (25cm/s)	レベル2 (50cm/s)
EL CENTRO NS	X, Y	255.38	510.76
TAFT EW	X, Y	248.38	496.76
HACHINOHE NS	X, Y	165.05	330.11
YAMATO EW	X	361.25	722.50
千葉東方沖 NS	Y	242.66	485.32

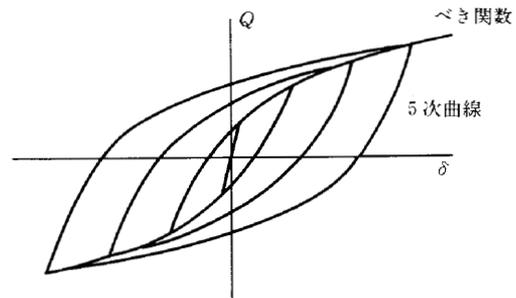


Fig.8 リングダンパーの復元力特性

た。Table 4 に設定レベルの最大速度値を、Fig. 9 にYAMATO 波形の水平成分(NS, EW)を示す。

(3) 応答解析結果

レベル1入力に対しては上部構造の最大応答層間変形角はX方向でYAMATO 1987 EW に対し3Fで1/630, Y方向でTAFT 1952 EW に対し4Fで1/10100と性能評価基準値1/200を下回り, 免震装置部の最大変形もX方向でYAMATO 1987 EW に対し8.4 cm, Y方向でTAFT 1952 EW に対し7.9cmと基準値15 cmを下回った。

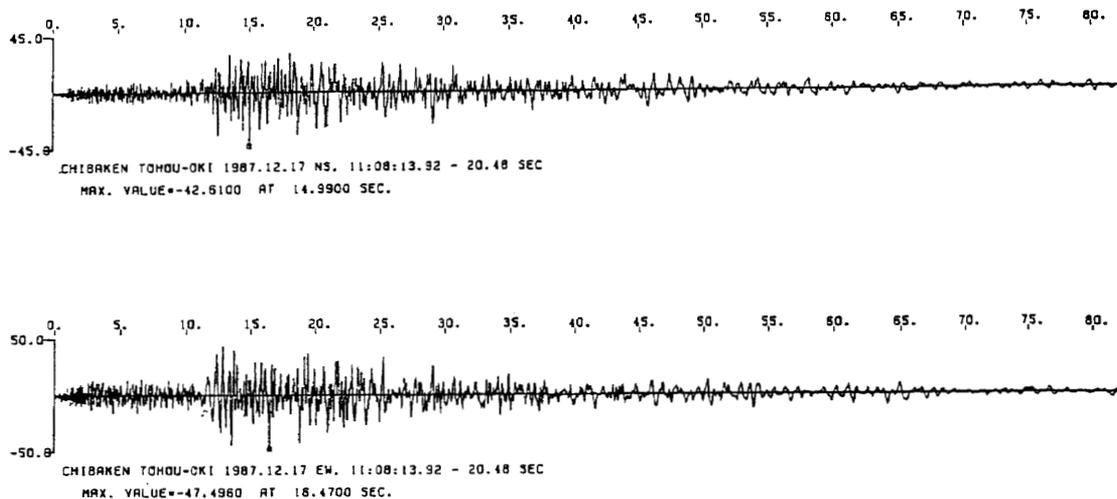


Fig.9 YAMATO波形

レベル2入力に対しては、免震装置部の最大変形はX方向でYAMATO 1987 EWに対し18.6cm、Y方向でTAFT 1952 EWに対し18.1cmと基準値22.5cmを下回り、さらにX方向の各階の塑性率についても基準値の1.0をすべて下回った。

また、基準値以外でも最大応答加速度がレベル1、2とも入力加速度の最大値以下となり免震効果が確認できたこと、また基礎回転による積層ゴムの浮き上がりが発生しないことやリングダンパーの耐久性を吸収エネルギーの面で実験値(240,000t・m(2,352MJ))¹⁾と比較検討し、免震効果や安全性能が確認できた。

Fig. 10, 11 にレベル1での層間変形角, 水平変位の最大応答値を, また Fig. 12 にはレベル2での水平変位の最大応答値を示す. さらに Table 5 にはレベル2での塑性率, Table 6 にはリングダンパーのエネルギー吸収量をそれぞれ示す.

Table 5 塑性率(レベル2)

入力地震波		X 方 向			
		エルセントロ	タフト	ハチノヘ	千葉 EW
塑 性 率	8 F	0.44	0.80	0.36	0.77
	7 F	0.44	0.78	0.35	0.77
	6 F	0.42	0.72	0.28	0.79
	5 F	0.47	0.75	0.32	0.83
	4 F	0.51	0.78	0.35	0.79
	3 F	0.55	0.80	0.39	0.82
	2 F	0.55	0.77	0.40	0.77
	1 F	0.56	0.76	0.43	0.74

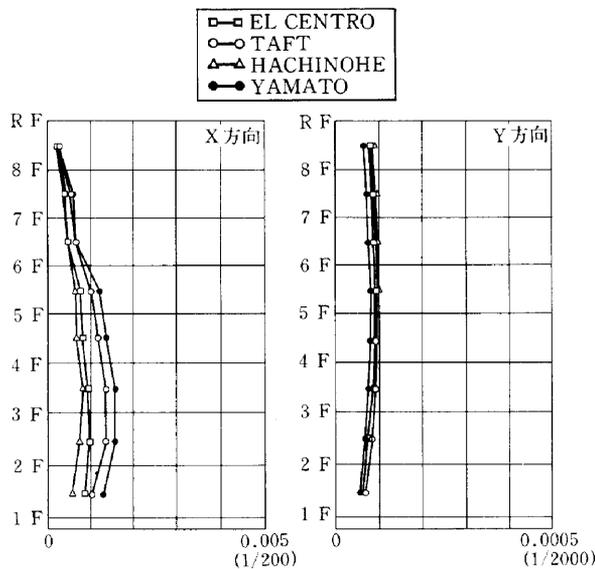


Fig.10 最大層間変形角(レベル1)

Table 6 各地震動による累積エネルギー

地震動名称	EL CENTRO NS		TAFT NS		HACHINOHE NS		千葉東方沖	
	X	Y	X	Y	X	Y	EW X	NS Y
25cm/s	5802	7090	7090	11012	3883	4760	27353	11868
50cm/s	21285	28132	28132	16339	15870	19134	101167	52398

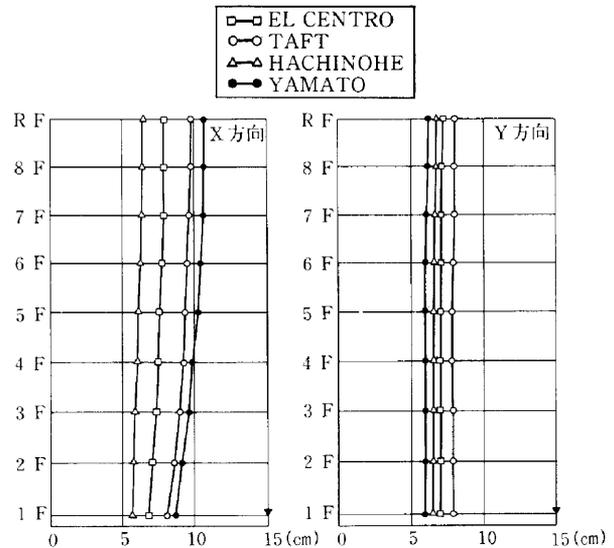


Fig.11 最大応答水平変位

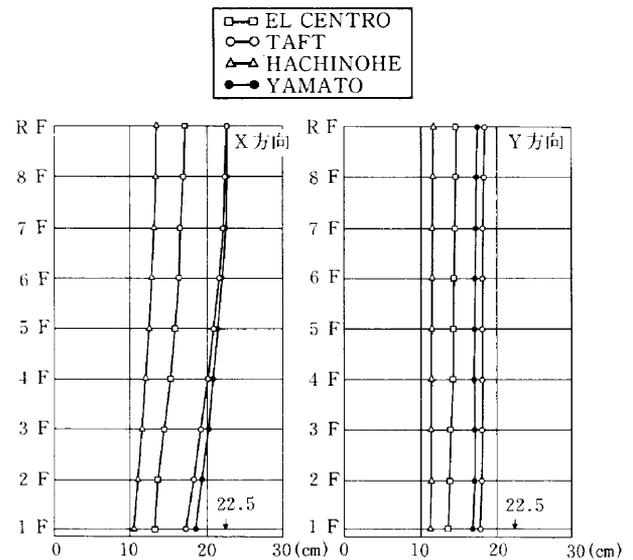


Fig.12 最大応答水平変位(レベル2)

§ 4 応答挙動からみたその他の検討

4-1 上下動による転倒

本建物が8階建と比較的スレンダーな形状のため、レベル2クラスの水平動と上下動を同時に受けたときの挙動を把握することを目的として応答計算を行なった。

方法としては水平方向モデルとここで新たに考えた鉛直方向モデルに、水平方向はレベル2の水平地震動、鉛直方向はその地震の水平動の最大速度値の1/2を上下動の最大速度値とし²⁾、それぞれ応答計算を行った。そのあと水平方向と鉛直方向の応答時刻歴結果を加え合わせることでその挙動を検討した。Fig. 13 に鉛直解析モデルを、Table 7 に解析諸元を示す。

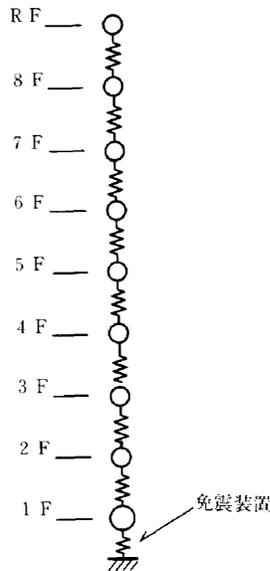


Fig.13 鉛直モデル

Table 7 鉛直モデル諸元

階	高さ (cm)	重量 (tf)	鉛直剛性 (tf/cm)	減衰率
R	2282	222.1	—	—
8	2005	292.0	77801	0.02
7	1728	305.9	77801	0.02
6	1448	310.6	88714	0.02
5	1168	322.6	88714	0.02
4	881	328.3	99854	0.02
3	594	343.1	99854	0.02
2	297	347.1	103690	0.02
1	0	866.1	103690	0.02
ゴム	—	—	34650	0.042

その結果、積層ゴムに引っ張り力が生じず、建物の転倒が起こらないことを確認した。Fig. 14 にもっともクリティカルであったEL CENTRO 1940 NSに対するY方向の計算結果を示す。

4-2 安全余裕度

入力レベルの限界を把握するために入力地震動波形の最大速度値を5 cm/s刻みで拡幅して応答性状を把握し、その限界値を検討した。Table 8 に解析ケースを示す。検討項目は、上部構造物の最大応答せん断力と崩壊時せん断力(静的弾塑性解析の結果)の比較、免震装置部の変位(許容変位は30 cm)、基礎

Table 8 入力地震動波形とその強さ (gal)

	55cm/s	60cm/s	65cm/s	70cm/s	75cm/s	
エルセントロ	561.8	612.9	664.0	715.1	766.1	
タフト	546.4	596.1	645.8	695.5	745.1	
八戸	363.1	396.1	429.1	462.2	495.2	
千葉沖	EW	794.8	867.0	939.3	1011.5	1083.8
	NS	533.9	582.4	630.9	679.4	728.0

部の回転により生じる積層ゴムの引き抜き力の有無、そしてリングダンパーの累積吸収エネルギーの4項目である。

その結果、上記項目を満足した最大速度値は60cm/sであることが確認され、安全性は十分であると判断した。

4-3 材料のばらつき・劣化

免震装置の積層ゴム、リングダンパーは受け入れ時に検査は行いが、それぞれ製品間の性能に許容範囲内でばらつきが存在する。さらに経年による劣化も考えなくてはならない。そこで、積層ゴムに製品間のばらつき、劣化を考慮し、リングダンパーは劣化が生じたと考えられる時点での取り替えを前提にしている。製品間のばらつきだけを考慮して検討を行った。Table 9 に解析ケースを示す。

入力レベルはレベル2相当とし、性能評価基準値でばらつき・劣化の影響について検討した。その結果、すべての組合せで基準値を満足し、免震装置部の材料のばらつき・劣化が免震性能に与える影響はないと判断した。

Table 9 解析ケース

	解析No.	C 1	C 2	C 3	C 4	C 5	C 6	C 7	C 8
積層ゴム	鉛直剛性	+15%				-15%			
	水平剛性	+15%		-15%		+15%		-15%	
リングダンパー		+10%	-10%	+10%	-10%	+10%	-10%	+10%	-10%

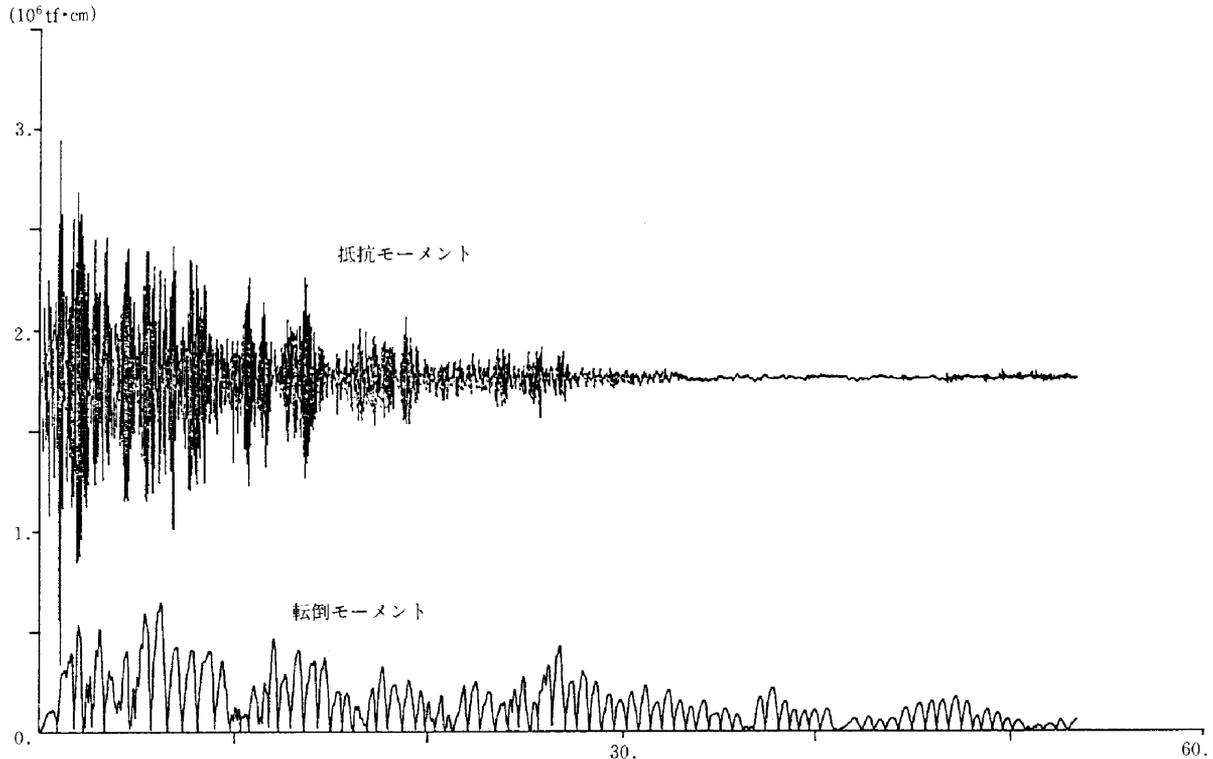


Fig.14 転倒モーメント抵抗モーメントの時刻歴
(エルセントロ、Y方向 再検討)

4-4 中小地震

本免震構造は、主に大地震を対象としているが、中小地震に対しては居住性ならびに免震装置のメンテナンス面での検討が必要である。すなわち小さな地震に対して不快感・恐怖感が生じないことやリングダンパーが塑性化してその都度取り替えることのないことの確認が必要である。そこで中地震を気象庁震度階IV相当、小地震を震度階III相当以下の地震と考え、その地震に対しての居住性を非免震構造物と比較することで確認し、またメンテナンス面での検討はリングダンパーの塑性化の程度や履歴吸収エネルギーから検討した。

免震効果については中小地震に対して概ね良好な免震効果がみられ、特に気象庁震度階IV相当の中地震でその効果が顕著であることを確認した。また、そのときのリングダンパーの変形は弾性域を超えている(2.5cmに対し最大で3cm)ものの補修可能な範囲であり、吸収エネルギーの点からも十分安全であることが確認できた。

なお、4-1～4-4で使用した解析モデルと入力地震動波形等は3-3 弾塑性地震応答解析のものと同じである。

以上のような地震応答計算により、様々な角度か

らの地震に対する挙動の確認ができ、本免震構造物は地震に対する安全性とともに、免震効果も十分発揮できることが確認できた。

§5 まとめ

本建物は平成3年8月に着工し約15ヶ月間で完成する予定である。また、竣工後は建物に強震計を設置して地震観測を行うこととしており、免震建物の有益な資料の蓄積が可能となると思われる。

おわりに、本建物の設計に当たり東北大学工学部建築学科の和泉正哲教授に多大な御指導を頂き、ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 長谷部廣行ほか：西松式免震構法の開発(その2) 構造実験, 西松建設技報 Vol.12, pp.36～42, 1989.
- 2) 渡部丹, 藤堂正喜：設計用模擬地震動に関する研究—その1：模擬地震動の既往の数学モデルと地震動の最大値—, 日本建築学会論文報告集, 第303号, pp.41～51, 1980年5月.