

西松式免震構法の開発（その1） 免震構法の設計法と免震建築物のモデル設計

The Development of Nishimatsu Construction Base Isolation System (Part 1)
A Design Method and Model Study

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

本報告は、西松式免震構法の設計法とその設計法によるモデル設計例を紹介している。同設計法は、地震動のレベルに応じて設定した耐震性能目標値に対し、動的解析による確認のプロセスを経ることで、免震構造物および免震装置の安全性の評価を行っている。定めた耐震性能目標値のうち免震装置に対する値は、免震装置の実験結果を考慮し設定している。

この確認のプロセスに沿って、西松式免震構法の一つである積層ゴムとリングダンパーによるモデル設計例を示した。同モデル設計例で、免震装置を採用した場合と採用しなかった場合の比較検討を行った。その結果免震構造物の最大応答加速度とせん断力は、非免震構造物の30～80％に、また層間変位の最大応答値は10～60％に低減されることがわかった。

目 次

- §1. はじめに
- §2. 積層ゴムとリングダンパー方式免震構法の設計法
- §3. 免震建築物のモデル設計
- §4. おわりに

§1. はじめに

近年において建築物に対する社会的要求は多様化する一方であり、特に建物の高機能化、インテリジェント化に伴って設計の多自由度化が図られている。それらを充

分に加味考慮した上で西松式免震構法の設計法、その施工法および維持管理方法の開発を行った。本免震構法は免震装置を建築物の上部構造と基礎構造との間に設置し、地震時の上部構造への地震入力の低減を図り人命の安全、構造体、居住環境および建物内部の貴重品に対して懸念される地震被害を最小限に留めることを目的として、平成元年4月に(財)日本建築センター免震構造研究委員会の技術審査を終了している。

西松式免震構法は、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。

そのうち、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、西松建設他により開発、昭和58年特許第1137771号）を発展改良したものである。

本報告は積層ゴムとリングダンパー方式の免震構法（Photo 1 参照）の耐震設計法とこの設計法に基づいた

*建築設計部構造課係長
**技術研究部原子力室
***建築設計部構造課課長
****技術研究部原子力室副課長



Photo 1 免震構法

免震建築物のモデル設計について述べたものである。

§ 2. 積層ゴムとリングダンパー方式免震構法の設計法

2-1 免震構法の概要

西松式免震構法の建物は、基礎部分または建物下部が二重構造をもったものとする。

その二重構造の間に積層ゴムとリングダンパーを組み合わせた免震装置を配置する。

免震機能としてはパッシブ型制振に属するものである。

以下に積層ゴム、リングダンパーの特徴を示す。

(1) 積層ゴム

積層ゴムは高鉛直剛性と低水平剛性を有している。主な機能は建物の重量を支持するとともに長周期化を図っている。

また水平剛性は線形挙動のため、地震時の振動エネルギーは吸収しない。

(2) リングダンパー

積層ゴムだけでは地震時の振動エネルギーを吸収することができないので、このリングダンパーを設置する。そうすることにより振動エネルギーを吸収し、二重構造の間に大きな相対変位が生じることを防ぐ。

なお、設置については4個一組みにして方向性をもたせない。

2-2 設計基本方針

(1) 建築設計

建築設計にあたっては以下に示す注意点を考慮して配置、動線および防災などの計画を行う。

- ① 地震時には二重構造間に大きな相対変位が生じる。したがって、二重構造間あるいは隣接構造物と

Table 1 地震動規模と耐震性能評価基準

地震動規模	地表面速度値	免震装置	上部建物
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	最大応答値で各層の 塑性率が1.4以下

衝突しないようにする。

- ② 免震装置の機能を発揮させるため、装置の変形を妨げるような設備・物品・樹木などを配置しない。
- ③ 免震装置の機能維持のため、直射日光・浸水などに注意するほか、万一火災時には直接火に触れないようにする。
- ④ 免震装置の維持管理、検査・補修などを考慮する。

(2) 構造設計

構造設計にあたっては敷地地盤での地震動を選定する。

また、レベル1・レベル2の二つの規模の地震動に対して、定められているクライテリアから上部構造の設計目標値を設定する。そのあと地震応答解析により各レベルでの免震装置、上部構造の安全性を確認する。Table 1に地震動の規模と耐震性能評価基準を示す。

2-3 設計フロー

西松式免震構法の設計フローをFig. 1に示す。このフローに従い、設計・解析をして目標値を満足させていくことにより適正な免震建物の設計が完了する。

以下にそれぞれの大項目について説明する。

(1) 免震構造物の適合性判定

敷地地盤の条件、建物の用途や規模により設計者の工学的判断にて免震構法の採否を決定する。

(2) 設計用入力地震動

耐震設計用の入力地震動は、標準的な地震動および免震構造物が計画されている敷地の特性を充分表現しうるものとする。

標準的な地震動は日本建築センターで公表されている3地震動とする。敷地の特性を表す地震動は、建設予定地またはその近傍で観測されたものとする。

Table 2に入力地震動とその強さを示す。入力地震動はレベルに応じて最大速度の値を基準化して用いる。

(3) 予備応答解析

免震建物の全体系の一次固有周期などをパラメトリックに設定して質点系応答解析を行う。

その応答結果より適切な免震装置の数量、配置の資料

とするとともに上部構造の設計用せん断力係数の検討を行う。

① 解析モデル

上部構造を多質点系等価せん断型に置換する、免

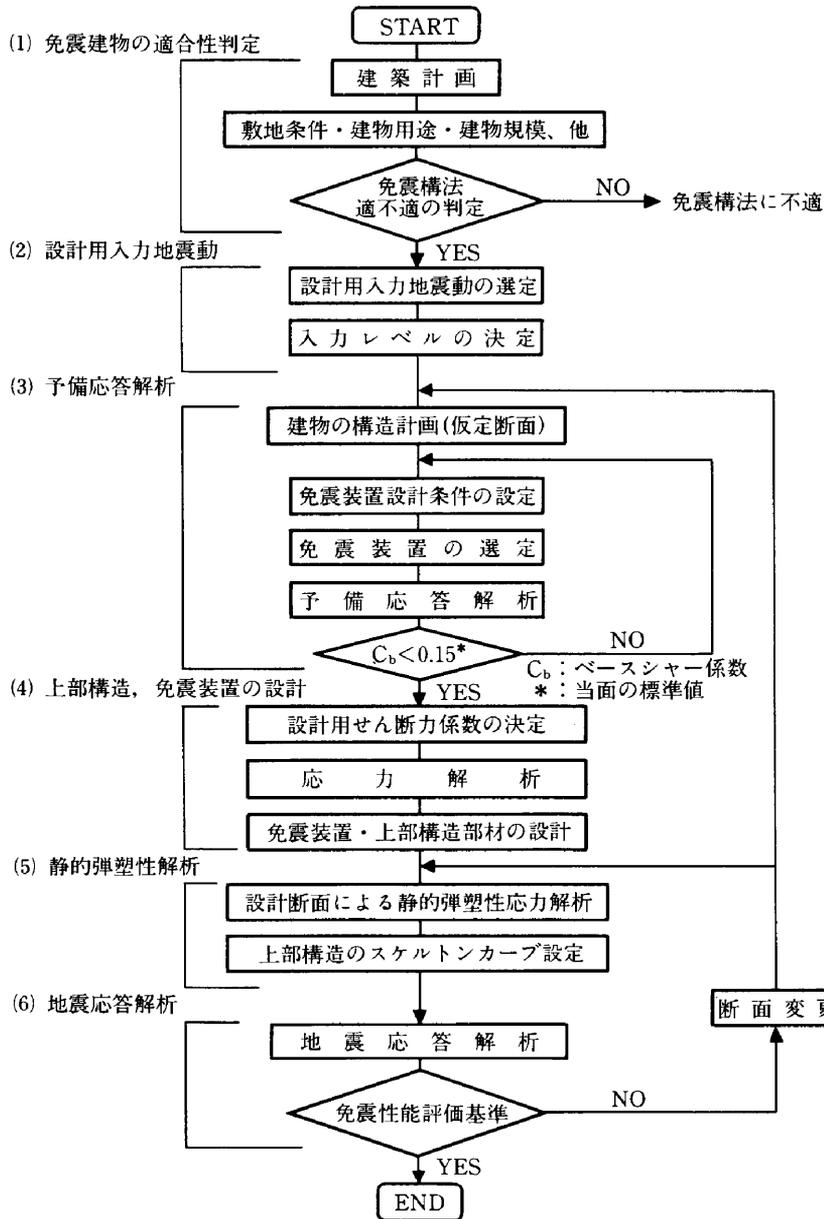


Fig.1 免震建物設計フロー

Table 2 入力地震動波形の各レベルにおける強さ

	入力地震動名	最大加速度 (cm/s ²)	最大速度 (cm/s)	レベル1の 最大加速度 (cm/s ²)	レベル2の 最大加速度 (cm/s ²)
1	EL CENTRO 1940 NS	341.70	33.45	255.38	510.76
2	TAFT 1952 EW	175.95	17.71	248.38	496.78
3	HACHINOHE 1968 NS	225.00	34.08	165.05	330.11
4	免震建物建設予定地またはその近傍での観測地震動				

震装置部分は積層ゴムとリングダンパーの水平剛性をスウェイバネ、積層ゴムの鉛直剛性をロッキングバネでそれぞれ評価する。

② 復元力特性

上部構造と積層ゴムについては線形とする。

リングダンパーの水平バネにのみ、実験で確認された固有の復元力特性を与える。

③ 減衰

上部構造のみに与える。評価方法はひずみエネルギー比例型とし、減衰定数は構造種別に応じた適切な値とする。

④ 入力地震動

標準3地震動を用い、その強さはレベル1とする。

(4) 上部構造・免震装置の設計

① 設計用せん断力係数

前項の予備応答解析から求めた結果を考慮してその分布形を決定する。

② 上部構造

設計用せん断力係数より求まる地震時応力および長期応力を用いて断面算定を行う。

③ 免震装置の設計および配置

積層ゴムは設計用軸力を考慮して配置する。

リングダンパーは予備応答解析結果によりその幅、組数を決定する。

配置は大きなねじれが発生しないようにする。

(5) 静的弾塑性解析

静的弾塑性解析により上部構造の荷重-変形関係を求め、上部構造の変形量と崩壊過程を把握する。

① 解析モデル

上部構造は部材の非線形特性を考慮したモデルとする。その際、免震装置の変位は拘束する。

② 水平外力

荷重増分法の水平外力分布は、予備応答解析結果を考慮して設定する。

③ 保有水平耐力

崩壊過程において、はり・柱部材のせん断破壊をした場合または崩壊メカニズムに達した場合は解析を終了する。

荷重-変形関係はその時点までを有効とし、そのときの層せん断力を保有水平耐力とする。

(6) 地震応答解析

設計された免震構造物を質点系モデルに置換し、弾塑性応答解析を行う。

その解析結果により上部構造および免震装置の応答性状を把握するとともに、耐震性能評価基準と比較するこ

とて構造物の安全性を確認する。

① 解析モデル

予備応答解析のモデル化の手法に準ずる。

② 復元力特性

上部構造の各層の復元力特性は、静的弾塑性解析結果の荷重-変形関係をもとにスケルトンカーブを設定し、構造種別に応じた適切な履歴特性を与えて決定する。

免震装置については予備応答解析での評価法に準ずる。

③ 減衰

予備応答解析の減衰の評価法に準ずる。

④ 入力地震動

標準3地震動と地域特性を考慮した地震動とし、その強さはレベル1、レベル2とする。

§3. 免震建築物のモデル設計

§2. の設計法に従って、免震建築物のモデル設計を行う。

3-1 建物概要および構造計画概要

本免震建築物は、神奈川県大和市に建つ鉄筋コンクリート造4階建の研究施設で、上部構造部と基礎構造部の間に免震装置を設置している。上部構造部は、Fig. 2~3に示すように平面形状21m×28mの長方形で、軒高14.55m、基準階階高3.5mの純ラーメン構造である。基礎構造部は、地中ばり、底盤、くい基礎により構成され、1階柱直下の免震装置を介して、場所打ちコンクリートくいにより建物を支持する。免震装置は、積層ゴムとリングダンパーにより構成され、積層ゴムは1階柱直下に各一個ずつ配置し、リングダンパーは中柱（6本）の回りに設置して、方向性をなくすため4個一組とする。

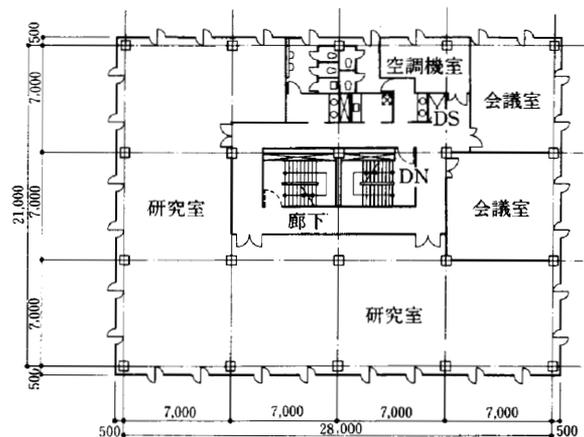


Fig.2 3階平面図

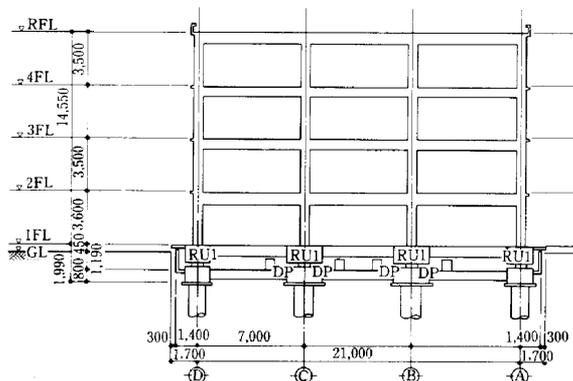


Fig.3 2通り軸組図

Table 3 予備応答解析による層せん断力係数

方向	階	EL CENTRO NS	TAFT EW	HACHINOHE NS	設計用
X 方向	4	0.130	0.154	0.104	0.19
	3	0.125	0.150	0.101	0.18
	2	0.122	0.147	0.096	0.17
	1	0.119	0.143	0.092	0.15
Y 方向	4	0.137	0.155	0.106	0.19
	3	0.131	0.152	0.103	0.18
	2	0.125	0.148	0.098	0.17
	1	0.121	0.143	0.094	0.15

なお、当該敷地地盤は第2種地盤である。

3-2 構造設計概要

(1) 一般事項

本免震建築物の構造設計にあたっては、「レベル1」および「レベル2」の2段階の地震動を考慮する。「レベル1」地震動は建築物の耐用年数中に一度以上受ける可能性の大きい地震動で、「レベル2」地震動は将来において受けることが考えられる最強の地震動である。また「レベル1」、「レベル2」に対応する地震動波形を用いて地震応答解析を行い、Table 1の耐震性能評価基準を満足することを確認する。

なお、使用コンクリートは設計基準強度が $F_0=240 \text{ kgf/cm}^2$ 、使用鉄筋はSD35（鉄筋径D19以上）およびSD30（鉄筋径D16以下）であり、壁はALC板およびアルミパック等を使用し非構造部材とした。

(2) 設計用地震力

積層ゴムおよびリングダンパーの組合せにより変化する建物全体の一次固有周期をパラメーターとして適合固有周期を決定し、そのときの免震装置を用いて上部構造部の設計用地震力を決定するために、予備応答解析を行った。解析モデルは免震装置下部を固定とし、上部構造

を5質点系等価せん断型モデルとし、免震装置部分にはスウェイバネおよびロッキングバネを考慮する。上部構造部のせん断バネおよびロッキングバネは弾性とし復元力特性は考慮しないが、スウェイバネはリングダンパーについてのみ実験から得られた曲線型の復元力特性を考慮する。入力地震動波形はEL CENTRO1940NS, TAFT1952EW, HACHINOHE1968NSの3地震動波形とし、レベル1に相当する大きさを採用する。以上のような予備応答解析の結果による最大応答せん断力の分布を考慮して、設計用地震力はベースシャー係数を0.15とし、Table 3のように層せん断力係数を設定した。

3-3 免震装置の配置

免震装置の配置にあたっては積層ゴムおよびリングダンパーの実験結果と設計用軸力および予備応答解析の結果を考慮して配置する。

(1) 積層ゴムの配置

積層ゴムの配置は設計用長期軸力により積層ゴムが受ける面圧を中柱で 70 kgf/cm^2 、隅柱と側柱で 50 kgf/cm^2 以下となるように配置する。

(2) リングダンパーの配置

リングダンパーは4個一組として予備応答解析結果および施工等を考慮して配置する。

なお、Fig. 4に免震装置の配置およびFig. 5に免震装置の取付詳細を示す。

3-4 地震応答解析概要

(1) 静的弾塑性解析

構造物の層せん断力と変形の関係および崩壊過程を把握するために、上部構造の静的弾塑性解析を行う。この結果から地震応答解析に用いる上部構造の層せん断力と

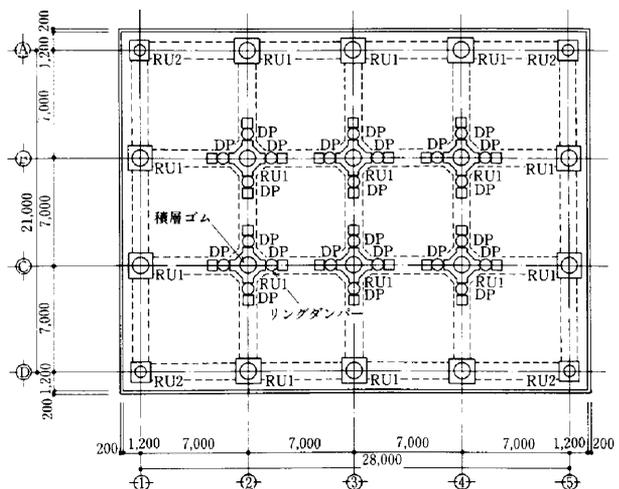


Fig.4 装置伏図

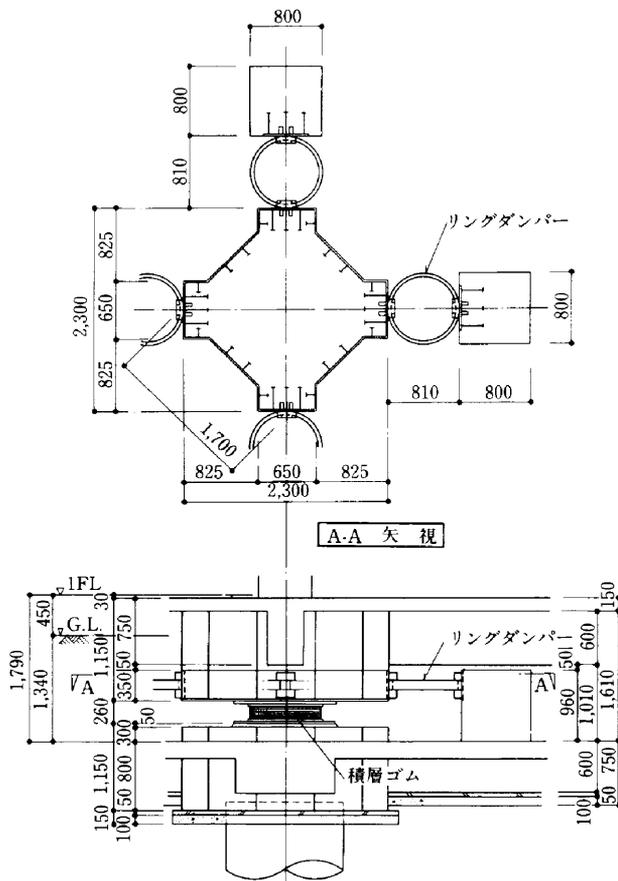


Fig.5 免震装置取付詳細図

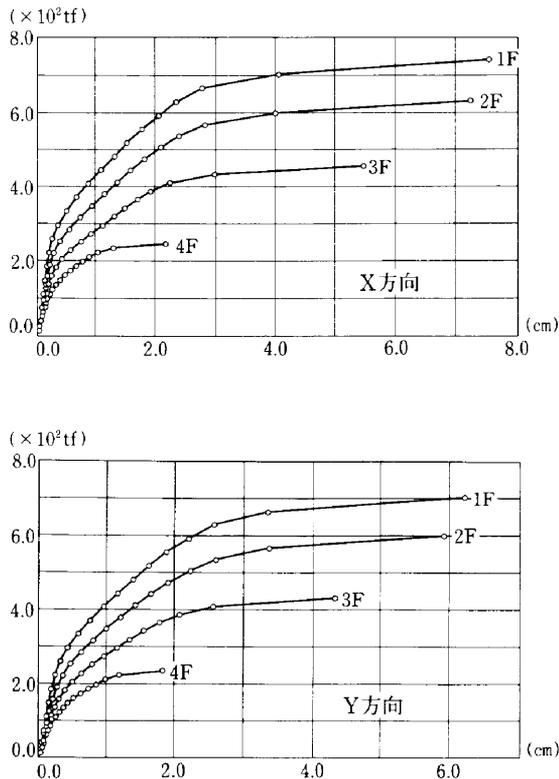


Fig.6 上部構造の層せん断力と層間変形関係

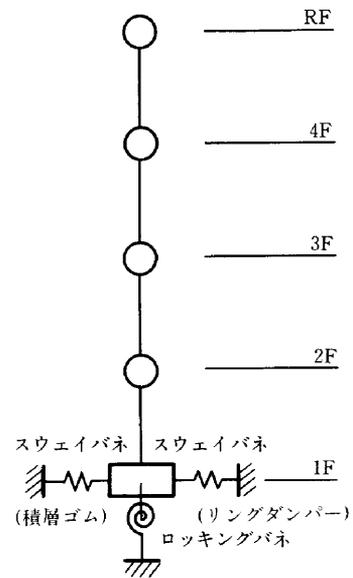


Fig.7 応答解析モデル

Table 4 免震装置の復元力特性

		X 方向	Y 方向
ロックンバネ	弾性剛性	3.09×10^{10} (tf·cm/rad)	1.97×10^{10} (tf·cm/rad)
	復元力特性		
積層ゴム	弾性剛性	29.2 (tf/cm)	
	復元力特性		
スウェイバネ	弾性剛性	45.8 (tf/cm)	
	復元力特性		

層間変形関係を Tri-linear 型として定めた。解析モデルは両方向とも 1 階柱下をピン支持とし、各フレームは剛床の仮程により連結されたモデルとする。また柱はり部材は、曲げせん断剛性をもつ線材とその両端に付く剛塑性回転バネによりモデル化する。外力としては予備応

答解析を参考に設定した設計用せん断力を用いて増分解析を行った。

解析結果としては両方向とも1階の層せん断力係数が約0.3となったとき、崩壊メカニズムを形成している。また Fig. 6 に崩壊に至るまでの層せん断力と層間変形関係を示す。

(2) 質点系弾塑性応答解析

① 解析条件

免震建築物全体の応答性状を把握し、免震装置の最大変形量および上部構造部の層間変形角等が免震性能を満足することを確認するために、質点系弾塑性応答解析を行った。Fig. 7 に示すように、解析モデルは免震装置下部を固定とし、上部構造各階を質点とする等価せん断型質点系モデルとする。免震装置部分はスウェイバネ、ロックンバネにモデル化する。スウェイバネは積層ゴムとリングダンパーから構成されるが、積層ゴムの復元力特性については弾性とし、リングダンパーにのみ復元力特性を考慮する。そのモデルは実験で得られた特性を曲線型にモデル化する。またロックンバネは基礎版の回転中心を版の midpoint と仮定し、積層ゴムの鉛直剛性で評価し弾性とする。Table 4 にロックンバネ、スウェイバネの復元力特性を、Table 5 に応答解析の上部構

造諸元を示す。

上部構造各層の復元力特性は静的弾塑性解析の結果の荷重-変形曲線から Tri-linear 型のスケルトンカーブにモデル化し、両方向とも Fig. 8 に示す Degrading-Tri-linear 型モデルとする。減衰の評価法はひずみエネルギー比例型とし、上部構造へ減衰定数 $h=0.02$ を与える。入力地震動波形は標準的地震動波形と当敷地で観測された昭和62年12月17日の千葉県東方沖地震の記録を建物方向を考慮して入力する。2章で述べた Table 2 に、その地震動波形と強さを示した。

② 固有値解析結果

上部構造および免震装置を含む系と上部構造のみの弾性固有周期および刺激関数を Table 6~7 および Fig. 9~10 に示す。

③ 応答解析結果の検討

レベル1入力に対して、最大応答せん断力は両方向とも設計用層せん断力以下となっており、上部構造の最大応答層間変形角は X 方向で1/625以下、Y 方向で1/526以下となり、いずれも設計の目標値である1/200を下回っている。また免震装置の最大変形は X 方向で8.73cm、Y 方向で8.71cmでありレベル1の評価基準の15cmを下回っている。

レベル2入力に対して、最大応答せん断力は両方向とも保有水平耐力以下におさまっており、免震装置の最大変形も X 方向で15.93cm、Y 方向で18.46cmでありレベル2での評価基準の22.5以下となっている。塑性率においても評価基準の1.4以下となっている。またレベル1、レベル2の入力に対しても基礎回転による積層ゴムの浮き上がりはみられなかった。

Table 5 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	1,410	649.50		
4	1,060	613.58	577.5	536.2
3	710	593.28	626.1	595.1
2	360	609.06	752.4	736.1
1	0	820.27	922.6	906.6
回転慣性 (tf・cm)			5.36×10^8	3.02×10^8

Table 6 固有周期(上部構造のみ) (秒)

	1次	2次	3次	4次
X方向	0.5217	0.1869	0.1251	0.0994
Y方向	0.5301	0.1944	0.1283	0.1009

Table 7 固有周期(免震装置を含む) (秒)

	1次	2次	3次	4次	5次	6次
X方向	1.3974	0.3141	0.1635	0.1186	0.0964	0.0263
Y方向	1.3998	0.3213	0.1673	0.1216	0.0977	0.0246

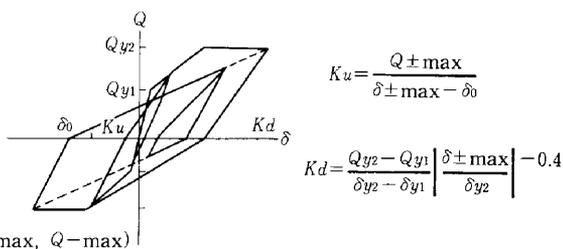


Fig.8 上部構造復元力特性 [Degrading-Tri-linear型(修正Takeda)モデル]

④ 非免震構造との応答比較

免震効果を確認するため、「レベル1」、「レベル2」の入力による非免震構造物の弾塑性応答解析も行い応答量の比較を行った。Fig. 11~16に応答解析結果の比較を示す。以上の結果より免震構造物の加

速度・せん断力の最大応答値は「レベル1」、「レベル2」ともそれぞれ非免震構造物の30~80%に、また層間変位の最大応答値は10~65%に低減されることがわかった。

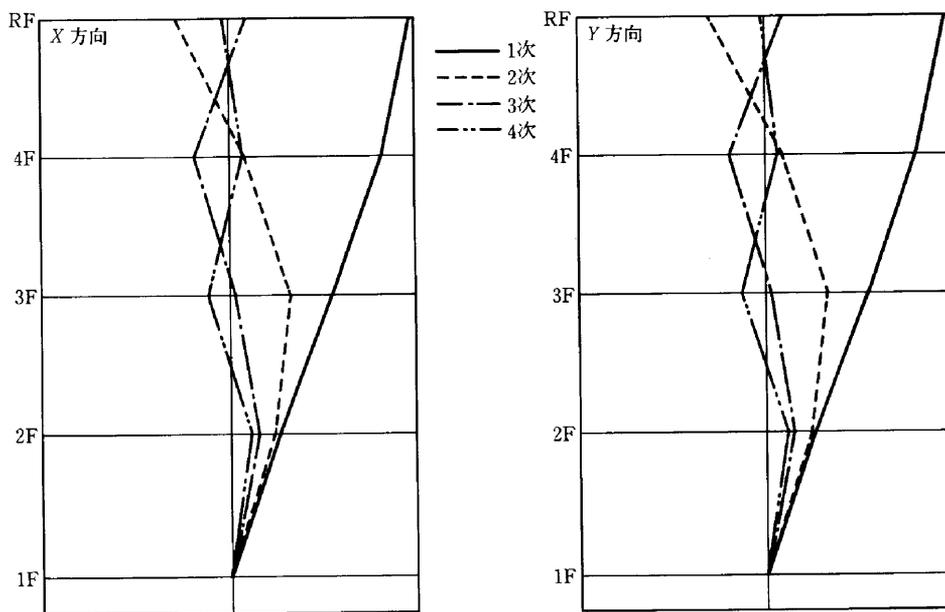


Fig.9 刺激関数(上部構造のみ)

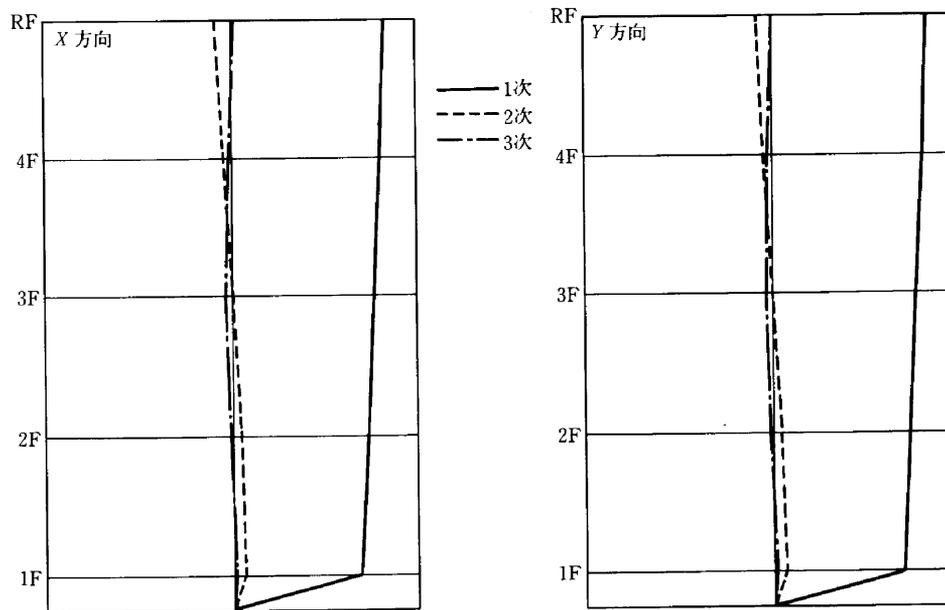
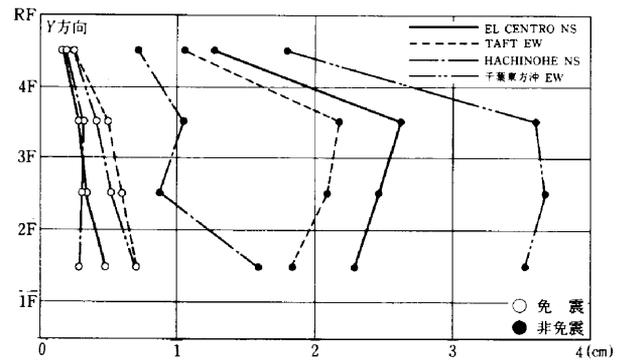
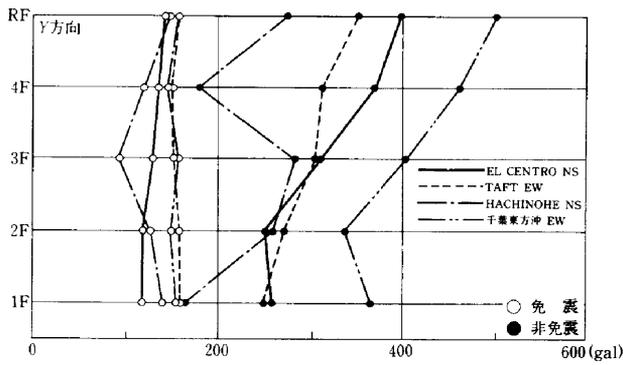
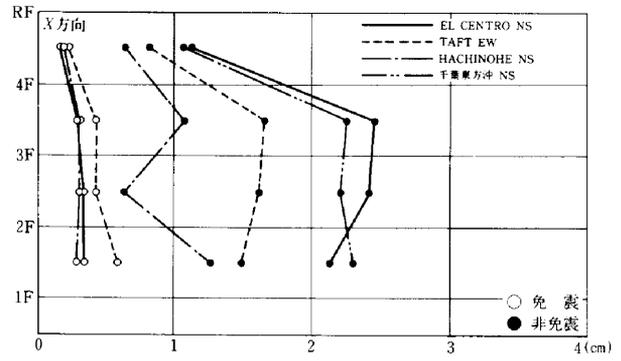
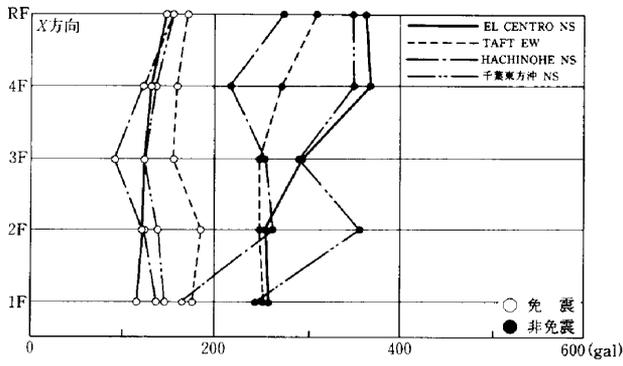


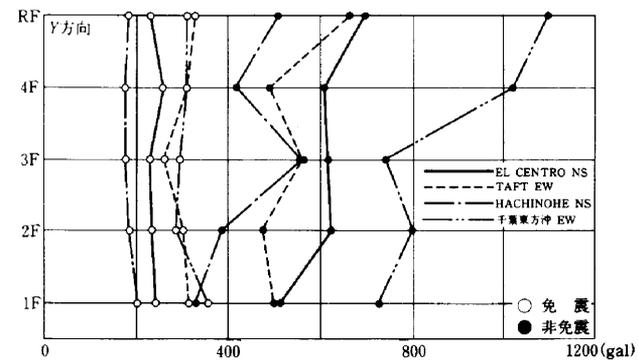
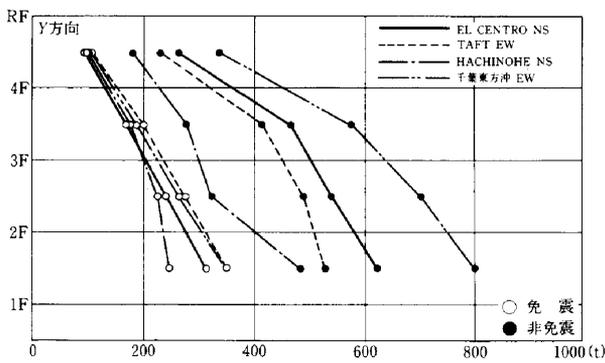
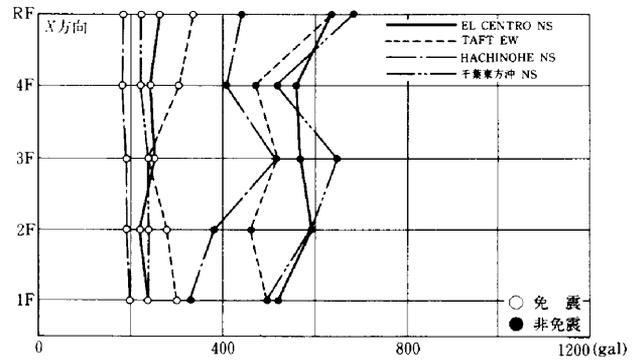
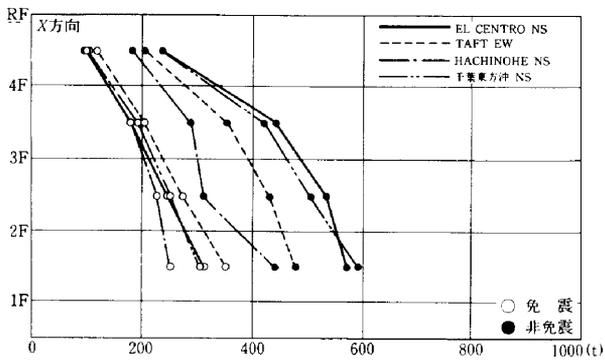
Fig.10 刺激関数(免震装置を含む)(3次まで)



*非免震の1Fの値は入力最大の値をプロットした

Fig.11 最大応答加速度 (レベル1)

Fig.13 最大応答層間変位 (レベル1)



*非免震の1Fの値は入力最大の値をプロットした

Fig.12 最大応答せん断力 (レベル1)

Fig.14 最大応答加速度 (レベル2)

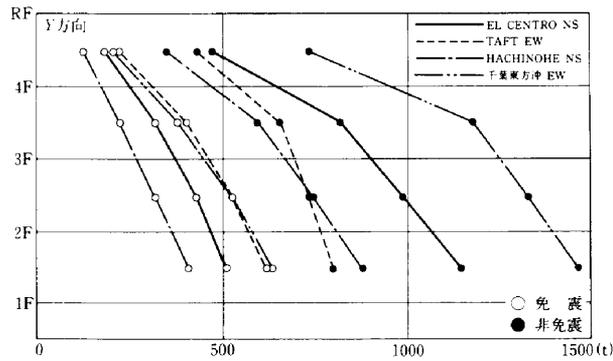
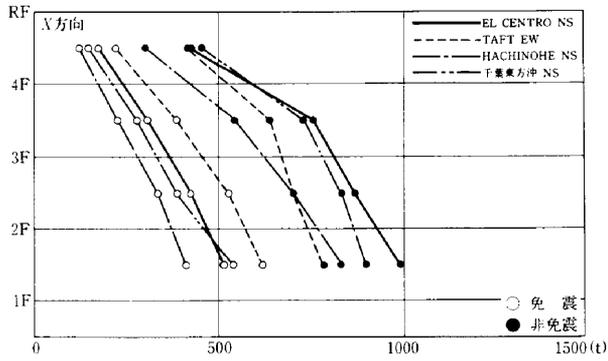


Fig.15 最大応答せん断力(レベル2)

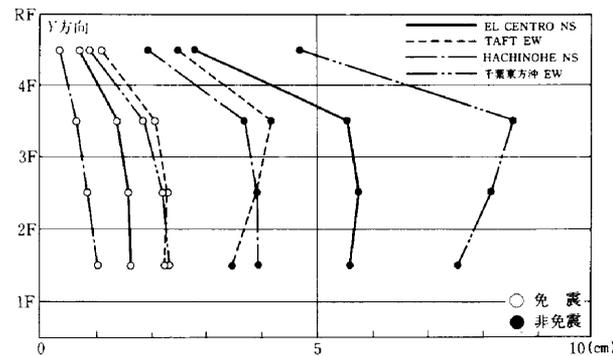
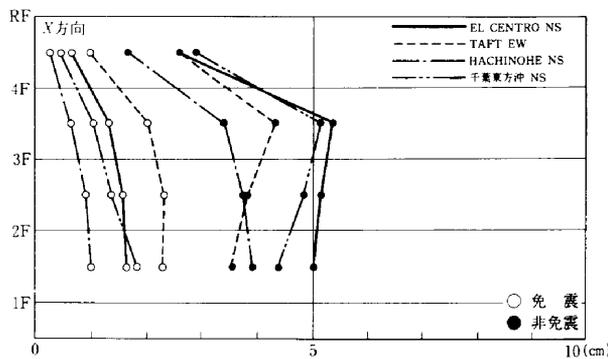


Fig.16 最大応答層間変位(レベル2)

§4. おわりに

西松式免震建物のモデル設計を行った結果、耐震性能評価基準を満足することを確認し、また非免震建物と比較するとその加速度、せん断力および層間変位の最大応答値が65%~80%に低減され、十分な免震効果が期待できることも確認できた。

さらに、立体応答解析による免震建物のねじれの検討、入力地震動波形の最大速度値が75cm/s時の地震応答解析についても検討してあり充分安全であることを確認している。

西松式免震構法の開発にあたり、指導をお願いした東京大学松下清夫名誉教授に深く御礼申し上げます。