

地震により建物に投入されたエネルギーを全て吸収しなければならない。また、免震層の最大変形を所定の限度内に収めるために必要な減衰能力・変形能力が要求される。

#### 4.3.3 免震構造の設計

免震建物の地震時性能は免震層（免震部材）の設計に大きく依存している。アイソレータの水平剛性を小さくすればするほど、免震建物の周期が長くなり建物への地震入力も低減され、応答加速度（あるいは層せん断力）は非常に小さくなる。逆に、免震層の応答水平変形は増加する傾向にある。この様に応答加速度と応答変位は相反する性質を示す。しかし、ダンパーの特性（減衰量）を適切に付与することで、応答加速度を低減し、かつ応答変位も適切な範囲内に納めることが可能となる。

通常、免震構造の設計では時刻歴応答解析が実施され、設計された建物の地震応答が検証される。時刻歴応答解析では入力地震動の設定、建物のモデル化、特に免震層（免震部材）のモデル化が重要となる。時刻歴応答解析の他に、エネルギーの釣り合いに基づいた包絡解析法<sup>1)5)</sup>も提案されている。この手法は個々の地震動特性に依存しない大局的な応答予測が可能である。

##### a) 上部構造の設計

積層ゴムアイソレータは基本的に建物の柱下に1体設置する。積層ゴムのサイズは支持荷重と必要な変形能力に基づいて決定される。免震層の変形能力は最小径の積層ゴムで決定されるため、サイズに大きな差異が生じないように、建物の柱配置（柱軸力）などにも配慮した構造計画が重要である。

ダンパーは免震層の応答変位をコントロールし、振動を早期に収束させるために必要である。ダンパーの総量は地震応答解析結果などを参考に決定される。建物の捩れ変形を抑制するために、建物の重心（地震力の作用中心）と免震層の剛心（抵抗力の中心）をできるだけ一致するようにダンパーを配置することが有効である。

免震建物の建築計画では、建物周辺に免震層の応答変位に対応した敷地の余裕が必要となること、建物への出入り口や可動部分のディテール、及び免震層上下階への移動方法などへの配慮が欠かせない。設備計画は、ガス・電気・水道などの配管類が免震層の変形に追従できるディテールとする必要がある。また、免震層を駐車場などとして有効利用する場合には免震部材の防火対策が必要となる。

免震構造では上部構造は強度設計とする。即ち、準静的に作用する水平力に対して上部構造は強度的に耐えればよく、従来の耐震設計で要求されるエネルギー吸収能力（靱性）確保のための制約条件からは解放される。上部構造の設計用せん断力係数は時刻歴応答解析結果などを参考に決定する。在来建物は耐震設計されることにより、地震荷重以外の荷重に対して余剰の耐荷力が付与されることになるが、免震構造では地震荷重以外の荷重が設計を支配することになる。この意味で免震建物においては地震荷重以外の荷重に対する設計にはより慎重でなければならない。

##### b) 包絡解析法

建物下部にアイソレータとダンパーを配置した免震層を有する免震建物を対象とする。アイソレータとダンパーのみが地震エネルギーを吸収するものとし、上部構造は地震エネルギーの吸収を行わないものとする。この時、エネルギーの釣り合い式が次式の様に求められる。

$$W_e(t) + W_p(t) = E(t) \quad (4.3.3)$$

ここで、 $W_e(t)$ はアイソレータの弾性歪みエネルギー、 $W_p(t)$ はダンパーの吸収エネルギー、 $E(t)$ は地震によるエネルギー入力である。(4.3.3)式は免震層が最大変形を示す時刻 $t=t_m$ においても当然成立する。一般に塑性化が十分に進行する系ではエネルギー入力は単調増加を示し、地震終了時( $t=t_0$ )のエネルギー入力量 $E(t_0)$ は $E(t_m) \leq E(t_0)$ となる。従って、(4.3.3)式において $t=t_m$ として免震層の最大変位を予測する時、右辺を $E(t_0)$ で置き換えることは安全側の予測を行うことにつながる。

アイソレータが弾性、ダンパーが完全弾塑性型の復元力特性を有する場合、最大変形を生じるときの吸収エネルギー量はそれぞれ次式で表せる。

$$W_e(t_m) = \frac{1}{2} K_f d_{max}^2, \quad W_p(t_m) = s Q_y \cdot s d_p \quad (4.3.4)$$

ここで、 $K_f$ はアイソレータの水平剛性、 $d_{max}$ は免震層の最大変形、 $s Q_y$ はダンパーの降伏耐力、 $s d_p$ はダンパーの累積塑性変形量。累積塑性変形量と最大変形量の関係は次式でほぼ求めることができる<sup>1)</sup>。

$$s d_p = 8(d_{ave} - s d_y) \quad (4.3.5)$$

ここで、 $d_{ave}$ は正側と負側の最大変形の平均値、 $s d_y$ はダンパーの降伏変位。 $d_{ave}$ に比べ $s d_y$ が十分に小さく、 $d_{ave}$ と $d_{max}$ に大きな差が無ければ、(4.3.5)式は $s d_p = 8d_{max}$ と近似できる。この近似式と(4.3.4)式を(4.3.3)式に代入して整理すれば、免震層のベースシア係数 $a_1$ が次式のように求められる。

$$a_1 = a_f + a_s = \frac{15p^2 d_{max}}{4gT_f^2} + \frac{V_E^2}{16gd_{max}} \quad (4.3.6)$$

ここで、 $a_f = \frac{K_f d_{max}}{Mg} = \frac{4p^2 d_{max}}{gT_f^2}$ 、 $V_E = \sqrt{\frac{2E}{M}}$ 、

$$a_s = \frac{sQ_y}{Mg} = \frac{1}{16g} \left( \frac{V_E^2}{d_{max}} - \frac{4p^2 d_{max}}{T_f^2} \right), \quad T_f = 2p \sqrt{\frac{M}{K_f}}$$

$a_f$  はアイソレータのせん断力係数、 $a_s$  はダンパーの降伏せん断力係数、 $V_E$  は地震によるエネルギー入力等の等価速度、 $T_f$  はアイソレータのみの水平剛性に基づいた周期、 $M$  は建物総質量、 $g$  は重力加速度。同様に、免震層の最大変形量  $d_{max}$  は次式で求められる。

$$d_{max} = \frac{2ga_s T_f^2}{p^2} \left[ -1 + \sqrt{\left( \frac{pV_E}{4ga_s T_f} \right)^2 + 1} \right] \quad (4.3.7)$$

エネルギー入力の等価速度  $V_E$  と周期の関係を示したものがエネルギースペクトルである。文献 1) に示された設計用エネルギースペクトルによれば、免震構造の周期領域では  $V_E$  は一定値を示し、地盤種別ごとに  $V_E = 120, 150, 200, 300 \text{ cm/s}$  が提案されている。図 4.3.4 に  $T_f$  を 4 秒とした時の  $a_1$  と  $d_{max}$  の関係を (4.3.6) 式に基づいて示す。同図よりベースシア係数は免震層の変形に対して極小値をもつような関数となっている。ベースシア係数の極小値をとる変位は周期が伸びる程、 $V_E$  が大きくなる程増加するが、 $V_E = 300 \text{ cm/s}$  においても 40cm 程度の変形を見込んでおけば良いことがわかる。この様に包絡設計法は免震建物の入力と応答の関係を容易に把握することを可能にする。なお、設計された免震建物がどの程度のエネルギー入力に対して設計されているかは、

$$V_E = \sqrt{g(16a_s + a_f)d_{max}} \quad (4.3.8)$$

で検証することができる。

エネルギーの釣り合いによる応答予測の精度を確認するために 1 質点系モデルによる応答解析を実施した。

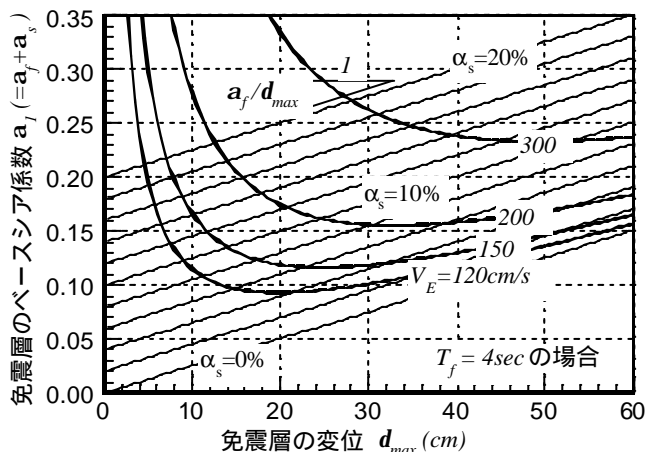


図4.3.4 免震層のベースシア係数と最大変位の関係

解析モデルの周期  $T_f$  は 1~6sec、降伏変位  $d_y$  は 1cm とした。入力地震波は 9 種類で、El Centro(NS), Taft(EW), 八戸(NS) は最大速度を 50cm/s に規準化している。その他の Mexico 地震や Northridge 地震などの観測波は原波形を用いた。なお、総エネルギー入力等の等価速度  $V_E(t_0)$  は周期 3sec 以上ではほぼ一定値を示し、100~300cm/s の範囲にあった。図 4.3.5 には免震層最大変位と (4.3.7) 式による予測値の関係を示す。(4.3.7) 式の適用では  $V_E = V_E(t_0)$  とした。同図より、特に SYLMAR 波 (Northridge 地震) の場合に予測値が小さくなっている以外は、予測値はほぼ安全側の予測になっていることが判る。

#### 4.3.4 免震建物の地震時挙動

設計された免震建物の特性は、免震層の強制変位試験や自由振動試験で確認することができる。また、地震観測により地震時の挙動を直接観測することも行われている。ここでは 1995 年の兵庫県南部地震の際に実際の免震建物 (WEST ビル) で観測された地震記録とシミュレーション<sup>6)</sup> について紹介する。WEST ビルは、基礎と 1 階床下間に免震部材を設置した地上 6 階建の免震建物である。建物概要を表 4.3.1 に示す。耐震性能目標としては、レベル 2 (最大速度 40cm/s) で免震層の最大変形は 25cm 以下、最大加速度は 200gal 以下、上部構造は許容応力度以内としている。本建物の  $a_f = 0.05$ ,  $a_s = 0.03$ ,  $T_f = 3.9$  秒である。

敷地は兵庫県南部地震の震央から約 35km 離れた位置にある。表 4.3.2 に観測された加速度波形の最大値を示す。6 階と基礎上での最大値を比較すると、UD 方向では 1.8 倍に増幅しているものの、NS 方向で 1/3.5 に、EW 方向で 1/3 に加速度が低減しており、高い免震効果が発揮されている。免震層の最大変形は約 10cm 程度で、積層ゴムに異常は認められていない。

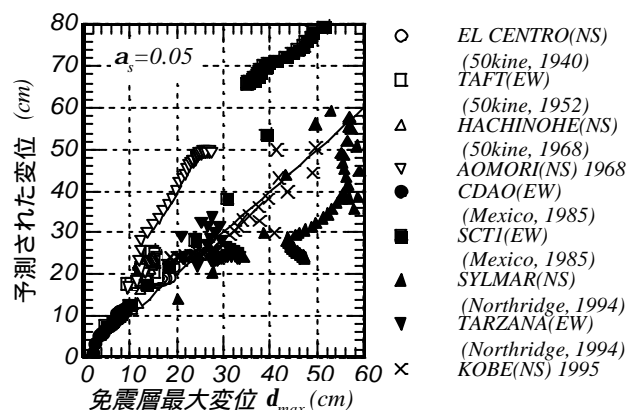


図4.3.5 応答解析での最大変位と予測値との比較

基礎スラブでの観測記録を用いてシミュレーションが行われている。解析モデルは設計時と同様である。ただし、建物が実使用前であったため積載荷重を減じ

て固定荷重に近い荷重とした。水平方向の免震部材のモデル化は修正バイリニア型、上部構造は弾性とし減衰は2%、免震部材の内部減衰も2%とした。また、鉛直方向解析時には観測記録と応答値を対応させるために減衰を10%に変更した。鉛直方向に関しては免震層・上部構造ともに弾性とした。免震建物の鉛直方向の応答に関して文献7)では観測結果に基づいて、地盤との相互作用の影響として免震層の減衰定数に20~30%程度を与えることで観測記録を説明できることが示されている。図4.3.6に6階における観測記録とシミュレーション波形を示す。設計時に使用した比較的単純なモデルでもよく一致していることがわかる。

表 4.3.1 WEST ビルの建物概要

用途	事務所
建物規模	地上6階、塔屋2階 100m×73.8m、軒高28.5m 延べ床面積46823m <sup>2</sup>
地盤種別	第1種地盤
基礎構造	直接基礎（独立フーチング基礎）
上部構造	SRC造+鉄骨ブレース、耐震壁併用
免震部材	鉛プラグ入り：1200（54体） 天然ゴム系：1000（46体） 800（20体） 鋼棒ダンパー：44体 平均面圧：93kg/cm <sup>2</sup>

表 4.3.2 観測された最大加速度(gal)

	NS	EW	UD
6階	75	103	377
1階	57	106	193
基礎	263	300	213

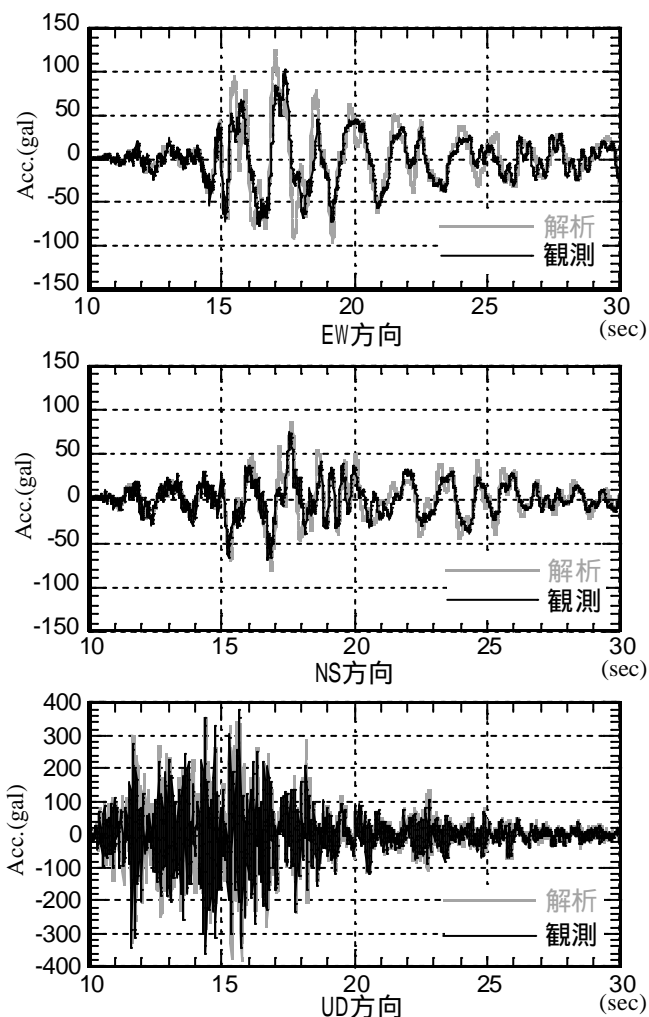


図4.3.6 6階の観測波形とシミュレーション波形

#### 4.3.5 免震構造のこれから

免震建物は、阪神大震災以降、適用件数と適用範囲が拡大してきており、徐々に免震設計技術が普及していることが認められる。従来、免震構造は高層建物や軟弱地盤には不向きであると言われていたが、近年では高層建物（60m以上）や軟弱地盤上の建物への免震構造の採用などが行われつつある。これは、免震部材の性能が向上するとともに限界性能の十分な把握がなされてきた結果である。また、東京・上野の国立西洋美術館（ル・コルビジエ設計）などのような既存建築への耐震補強法（レトロフィット）としても免震構造を利用することが行われている。しかし、免震建物の設計に際しては、在来構造では必要なかった動的応答解析や日本建築センターでの評価を受ける必要があるなど、今後多くの設計者（技術者）が日常的に免震設計に取り組めるような環境整備が急務であろう。

#### 参考文献

- 1) 日本建築学会：免震構造設計指針、1993
- 2) 高山峯夫：免震構造用天然ゴム系積層ゴムアイソレータの限界性能、日本建築学会技術報告集、第1号、1995.12
- 3) 瓜生満、鈴木政美、吉江慶佑ほか：高面圧下における積層ゴムアイソレータの実大実験（その1~その3）、日本建築学会大会学術講演梗概集、1995.8
- 4) 北村春幸、多田英之ほか：高面圧下における積層ゴムアイソレータの基本特性（積層ゴムの構造に基づく比較）、日本建築学会大会学術講演梗概集、1995.8
- 5) 秋山宏：第1層エネルギー集中型柔剛混合構造の地震応答予測、日本建築学会論文報告集、第400号、1989.6
- 6) 山口昭一ほか：兵庫県南部地震での観測記録とシミュレーション、日本建築学会シンポジウム資料「免震構造の研究と設計」1996.10
- 7) 瓜生満ほか：免震構造物の上下動地震応答特性に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、1998.9
- 8) 多田英之監修「4秒免震への道」理工図書、1997