

## 免震構造設計ノート Ver.1.6.2

CERA建築構造設計 代表 世良 信次

免震建物は、1983年に初めて建設されて以来、評定審査を受けた物件で2000棟以上、確認申請のみによる物件を含めるとその2倍以上とも推定されている。平成12年建設省告示第2009号の施行以来、免震構造を設計することも割りと容易に設計ができるようになったが、建築技術者の大半は免震構造を十分に理解されているとは思えない。RC構造やS構造は、大学の教程になっており、大学の建築部門を卒業した学生に知識の無い者はいない。もちろん、そのレベルは、さまざまであるが、免震構造は、皆無に近いのが現状であろうと思われる。1年ほど前に、「免震構造にしたいのですが、設計できますか?」という電話を受けた。話を聞くと、「今度我が家を新築したいのだけど、新聞やテレビで地震の話をよく聞き免震構造にしたい。」という話であった。はじめ戸建住宅の経験のないことから住宅メーカーや大手設計事務所に相談することを勧めたが、たらい回しになったようで受けることとした。早速、依頼者と会い詳しい話を聞くことになった。いろいろ免震構造の特徴を説明した。その結果、経済性も考慮し告示による計算法を用いる構造設計業務を受けた。その後設計を始めほぼ1年間かけて鉄骨3階建ての免震建物が完成した。設計期間は2ヶ月ほどであったが、確認申請にてこづった。免震に関する告示が施行されて2年が過ぎていたが、審査の経験がない市の建築課は、見れないということで審査が進まなくなつた。“見れないものを見れる”といわれるよりましな話であるが、設計手順が大きく変更になる。そこで、説明を十分に行き理解が高まり審査が2ヶ月ほどで完了した。

近年、免震建築物は、阪神大震災、新潟県中越地震、福岡県西方沖地震、十勝沖地震などの巨大地震においてその効果が確認されている。しかし、そのほとんどは、免震技術を固有技術として保有する限られた設計機関で集中的に設計されたものになっているのが現状である。

このような状況を考慮し、本テキストは、多くの建築技術者に免震構造の設計方法を紹介し、免震建築の設計知識レベルを少しでも高めることを目的としている。なお、本文は、筆者の経験を元に設計ポイントを交えて編集したものであり、法規だけでは判断できない部分が多くあり、読者の経験を交えて理解し活用して頂きたい。

**注意:**本テキストは、掲載資料に出典が不明なものがあり、非買品としています。業務上の転載は禁止させて頂きます。また、本セミナーは、営利目的ではありません。セミナー時間外での質疑、対応はしておりません。

## 目 次

### 第1話 免震建築の特徴を周知しよう

- 1-1. 免震適用の長所と短所
- 1-2. 免震建築の歴史に見る免震のしくみ
- 1-3. 振動理論による免震のしくみ
- 1-4. 免震部材の種類と特性
- 1-5. 免震層の位置と構造的特長
- 1-6. 免震構造と非免震構造との比較
- 1-7. 免震建築の設計基準
- 1-8. 免震建築の現状と社会的評価

### 第2話 まず設計基本条件を確認しよう

- 2-1. 免震建物にする目的と要求性能を考える
- 2-2. 計画地域・敷地を確認する
- 2-3. 地盤調査と想定地震の調査
- 2-4. 地盤周期特性を予測する

### 第3話 基本設計に入る

- 3-1. 敷地と建物配置を調整する
- 3-2. 建物構造種別を設定する
- 3-3. 建物平面計画を調整する
- 3-4. 建物断面計画を調整する
- 3-5. 設備の収まりを調整する
- 3-6. 免震部材の取替えを想定する
- 3-7. 上部構造の仮定荷重と仮定断面を設定する
- 3-8. 解析フレームモデルの作成と予備1次設計

## 第4話 免震層を設計しよう

- 4-1. 免震部材の選定と配置を設計する
- 4-2. 免震部材の基本性能・限界性能を確認する
- 4-3. 免震層の復元力特性を確認する
- 4-4. 免震周期を確認する
- 4-5. 免震層の変動性能を確認する
- 4-6. 免震層のねじれ特性を確認する
- 4-7. 免震層の履歴特性も確認する

## 第5話 地震・風応答を予測しよう

- 5-1. 地震波の応答スペクトルから推定する
- 5-2. 簡易包絡法による応答予測から推定する
- 5-3. 耐風性能・暴風時の挙動を想定する
- 5-4. 免震部材を再設計する

## 第6話 目標耐震性能を設定しよう

- 6-1. 免震建物の耐震性能とは？
- 6-2. 設計地震動を設定する
- 6-3. 上部構造の目標耐震性能レベルを設定する
- 6-4. 免震層・免震部材の目標耐震性能レベルを設定する
- 6-5. 下部構造の目標耐震性能レベルを設定する

## 第7話 設計手続きを決定しよう

- 7-1. 設計計算ルートを選定する
- 7-2. 設計フローを作成する
- 7-3. 設計工程表を作成する

## 第8話 地震応答解析をしよう

- 8-1. 上部構造の振動解析モデルを作成する
- 8-2. 地震波入力による時刻歴解析を行う
- 8-3. 告示計算法による応答スペクトル解析を行う
- 8-4. 告示計算法による応答結果の再評価を行う

## 第9話 上部構造を設計しよう

9-1. 設計層せん断力係数を決定する

9-2. 1次設計のポイント

9-3. 浮き上りの程度を確認する

9-4. 保有耐力を確認する

## 第10話 免震部材の変形と付加応力を確認しよう

10-1. 免震部材の変形・部材せん断力・支持荷重を算定する

10-2. 免震部材の取り付け部に作用する応力を算定する

10-3. 免震部材の取り付け部のアンカーを設計する

## 第11話 下部構造を設計しよう

11-1. 免震構造に必要とされる基礎構造を考える

11-2. 上部構造から伝達される力を算定する

11-3. 免震層外壁(擁壁)を設計する

11-4. 基礎構造の設計水平力を算定する

## 第12話 目標耐震性能の確認を行う

12-1. 上部構造の安全性を確認する

12-2. 免震部材の安全性を確認する

12-3. 免震層の安全性を確認する

12-4. 下部構造の安全性を確認する

12-5. 耐風性能・暴風時の挙動を確認する

12-6. 免震層の残留変形を確認する

## 第13話 製品・施工管理計画、維持管理計画をたてる

13-1. 製品・施工管理が必要とされる理由

13-2. 製品・施工管理計画書をつくる

13-3. 維持管理が必要とされる理由

13-4. 維持管理計画書をつくる

## 第14話 設計図書をまとめよう

- 14-1. 告示計算法による場合の目次と概要
- 14-2. 時刻歴計算法による場合の目次と概要
- 14-3. 免震部材の特記仕様書の作成

## 付録

- 付-1. 免震構造の歴史
- 付-2. 設計例の紹介
  - RC 造共同住宅(基礎免震)
  - 付-3. アンカーボルトの設計計算例
  - 付-4. 免震部材特記仕様書例 (昭和電線ディバイスの例)
  - 付-5. 工学的基盤の厚さと傾斜角の検討例
  - 付-6. 免震コミュニケーションズ(ホームページ)

## 参考文献 (以下、社団法人日本免震構造協会はJSSIと略す)

(2009.051.6 改)

1. 「免震構造設計指針」 (社)日本建築学会
2. 「免震構造入門」 1995.9 JSSI
3. 「考え方・進め方免震建築」 2005.7 JSSI
4. 「はじめての免震建築」 2000.9 JSSI
5. 「免震用積層ゴムハンドブック」 2000.1 (社)日本ゴム協会
6. 「免震建築物の技術基準解説及び計算例とその解説」平成 13 年 5 月国土交通省住宅局建築指導課ほか
7. 「免震建築物の技術基準解説及び計算例とその解説(平成 16 年改正告示の追加分—戸建て免震住宅を中心として—)」 平成 17 年 10 月 国土交通省国土技術政策総合研究所ほか
8. 「改正建築基準法の免震関係規定の技術的背景」 平成 13 年 8 月 (独)建築研究所ほか
9. 「免震建築の設計とディテール」 1999.12 JSSI
10. 「JSSI 免震構造施工標準 2005」 2005.7 JSSI
11. 「JSSI 時刻歴応答解析による免震建築物の設計基準・同マニュアル及び設計例」 2005.11 JSSI
12. 「免震建物の維持管理基準」 2007.8 JSSI
13. 「免震部材のエネルギー吸収性能評価に関する現状と課題」 平成 19 年(財)日本建築センター
14. 「免震材料認定に伴う実大試験資料調査に基づく積層ゴムの限界性能とすべり・転がり支承の摩擦特性の現状」 平成 15 年 8 月 JSSI、日本ゴム工業会
15. 「免震構造入門」 1995 JSSI
16. 「免震積層ゴム入門」 1997 JSSI
17. 「免震部材標準品リスト」 2005 JSSI
18. 「建物と地盤の動的相互作用を考慮した応答解析と耐震設計」 2006 (社)日本建築学会
19. 「4秒免震への道 免震構造設計マニュアル」 高山峯夫ほか著 理工図書
20. 「性能設計のための建築振動解析入門」 北村春幸著 彰国社
21. 「第5回技術報告会概要集」 2009.4 JSSI

## 関係基準

- S-1. 「平 12 建告 2009 免震建築物の構造方法に関する安全上必要な技術的基準を定める等の件」
- S-2. 「平 12 建告 1446 建築物の基礎、主要構造部等に使用する建築材料並びにこれらの建築材料が適合すべき日本工業規格又は日本農林規格及び品質に関する技術基準を定める件、別表第2第九号建築材料」
- S-3. 「平 16 国交告 1160 (平 12 建告 2009 の改正)」

## 第1話 免震建築の特徴を周知しよう

免震構造は、形状的には従来の耐震構造物に免震部材を設置する階(以後、層と呼ぶ)を設ける点が最大の相違点であり特徴です。ここではまず、この免震層を中心に長所と短所を認識し、免震構造を採用する場合の特徴を理解することが重要です。

### 1-1. 免震適用の長所と短所

最も大きな長所は、図 1-1.1 に示すように大地震時に建物の被害を著しく低減することが可能となることです。従来の耐震建物では、建物の損傷を防ぐ構造にするためには、柱・梁を意匠デザインの必要以上に大きく・丈夫にすることになり、建物の応答加速度は上昇し、収容物に被害を与えることになります。しかし、免震構造では、免震層など一定の要素を追加することで、意匠デザインを著しく変えることなく、デザインを反映した形状においても必要とされる耐震性能を保有することが可能となります。ただし、可能ということは、免震構造においてもその性能には、大きな幅があり、その位置の設定が設計行為となり、それによって異なった性能となります。その低減の幅を、損傷・破壊の程度で区分するとつぎのようになります。

- ① 建物に全く損傷が無く、家具、調度備品の転倒損傷もない性能。
- ② 建物に全く損傷はないが、家具、調度備品の転倒損傷は避けられない性能。
- ③ 建物にひび、クラックなどの損傷は生じるが、継続使用は可能とする性能
- ④ 部分的な破壊は許容するが、建物の崩壊は防ぐ性能。

この設計行為と区分については、設計地震動の設定によって異なり、また、設計地震動と実際に発生する地震の特性や規模によって被害の結論が異なります。免震の性能は、設定地震動と相対的に説明される性格のものです。

#### 在来構造と免震構造の設計性能の違い（その1：地震の大きさと部材応力）

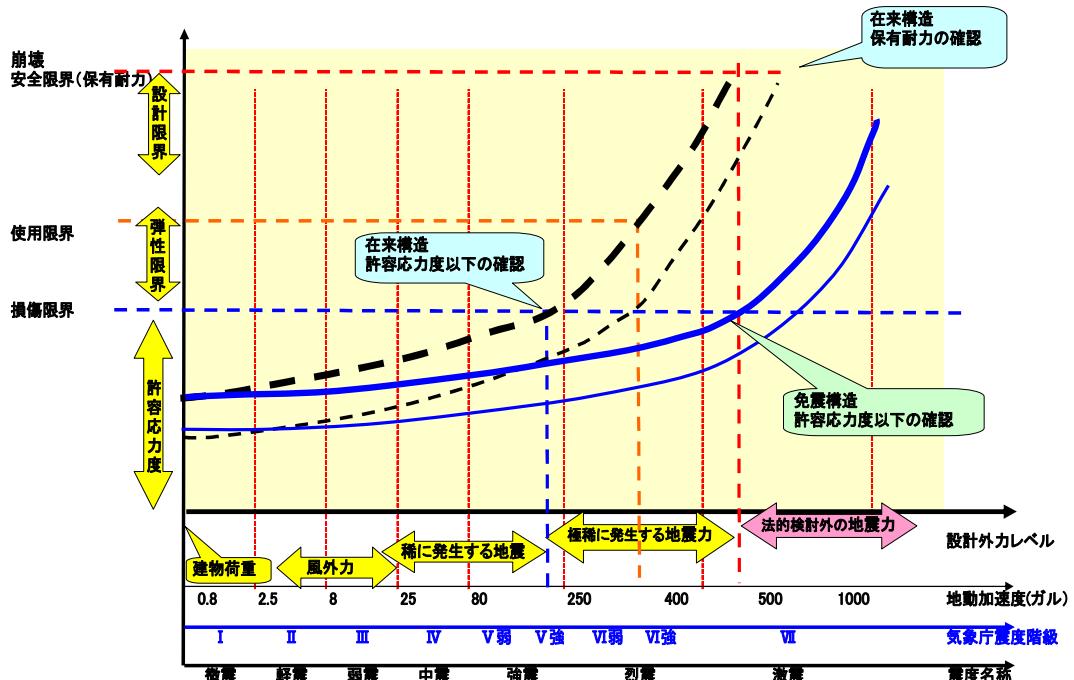


図 1-1.1a 大地震時の耐震性能概要比較

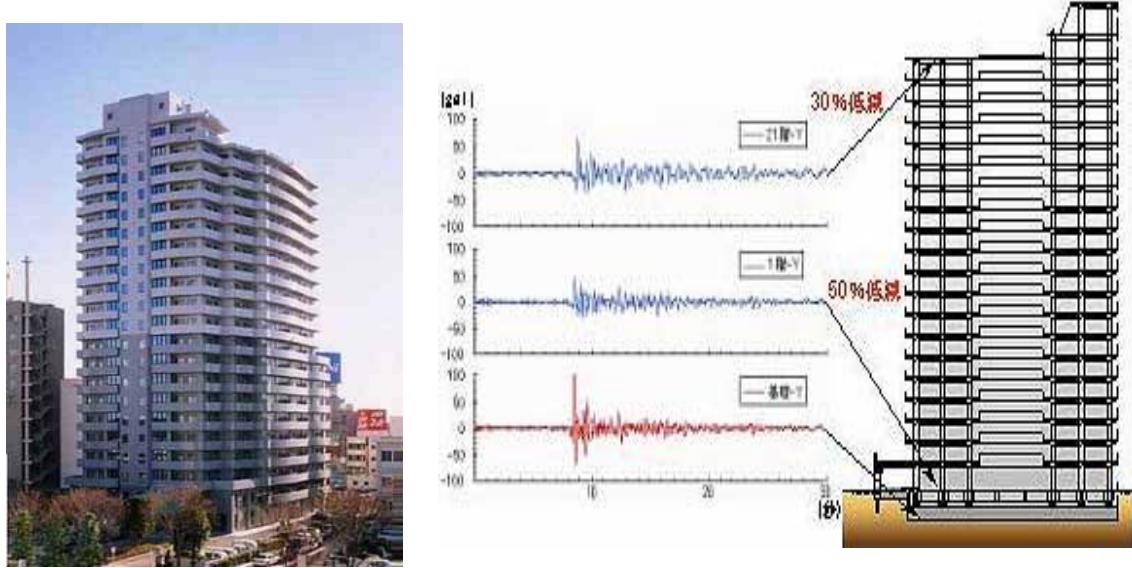


図 1-1.1b 実地震観測による応答加速度の低減(出典:建設会社ホームページより)

一方、短所は、免震層を設けることがもっとも大きなものです。一般に、免震層には各柱に積層ゴム支承を配置し、ダンパー部材が分散して設置されます。免震層は、これらの免震部材を取り付けるためにコンクリートの基礎(フーチング)とこれを結ぶ大梁とスラブが設けられます。主に耐震構造に比べ、この層の部材費と工事費が追加になります。その他、項目で列挙すると以下のようない点があります。

- ①免震層で水平に可動するため、図 1-1.2 のように敷地が建物外壁からある程度は離れていること。
- ②設備配管(給水、排水、ガス、電気など)が図 1-1.3 のように免震層を貫通して公共の幹線と接続するため、免震層で可動するジョイント部材が必要となる。
- ③免震部材、設備ジョイントの維持管理が必要となる。

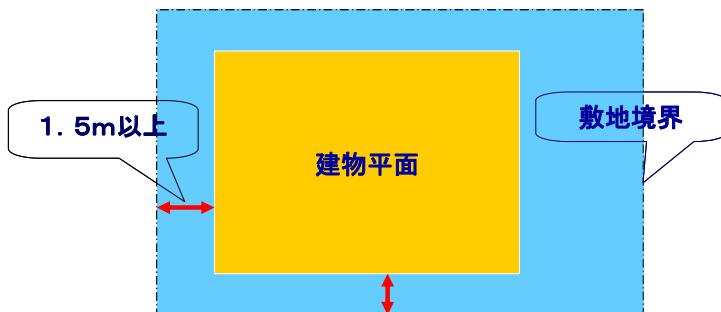


図 1-1.2 建物位置と敷地境界

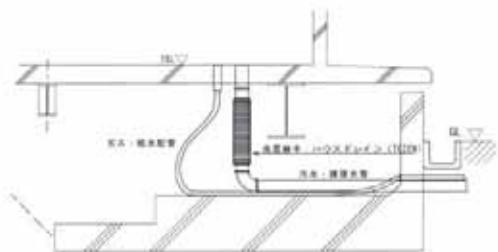


図 1-1.3 免震層(戸建て住宅)の設備配管・配線例

免震構造には、このような長所と短所があり、建物の規模、構造種別、用途、基本計画によってその違いが大きく生じます。図 1-1.4 は、建物の規模による統計的な免震化によるイニシャルコストの増加分を評価したものです。このイニシャルコストの増加分を低減できる計画要因の例として以下のものがあります。

- ①免震層の設置レベルを中間階にする。これにより、図 1-1.5 のように建物の外壁位置を境界線に近づけられます。
- ②鉄骨鉄筋コンクリート(SRC)造とする必要な高層建物を鉄筋コンクリート(RC)造とすることができます。更に、耐震性能は免震化で向上が可能です。
- ③柱の割付スパンを広げ、高荷重支持免震部材を採用することで、免震部材の基数を減らすことができます。更に、免震部材の支持荷重が増加することで耐震性能の向上が可能です。
- ④地震時の層間変形を低減できることから、壁にスリット材の設置を減らせます。また壁を耐力壁として評価し易く、耐震性能が向上させることができます。
- ⑤耐震性能の向上から耐震構造の計画で必要とされるコンクリート強度を低下させることができます。

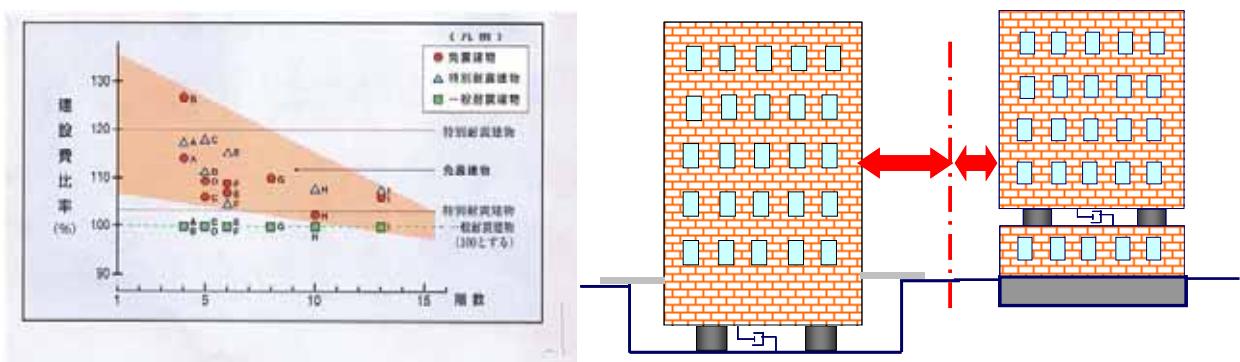


図 1-1.4 免震建築のイニシャルコスト

(出典:日建ハウジング リーフレット)

また、イニシャルコストの増加分に反して、ランニングコストを考慮すると、維持管理費の増加はあるものの、以下のような事項に対する価値が高く評価されています。

- ①地震後の建物機能の保持(病院、消防署、諸官庁、交通機関、通信機関、ライフライン管理棟、住空間、生産工場、店舗、など、図 1-1.6 には免震構造を採用している建物用途の分類を示す。)
- ②耐久年数の間、損傷・倒壊に対する危機感の低減
- ③保険料の低減(免震保険)

このような免震建築の特徴とその計画の方針は、設計に係わる関係者がすべて周知しておくことが、さらにイニシャルコストを低下させる設計行為となります。

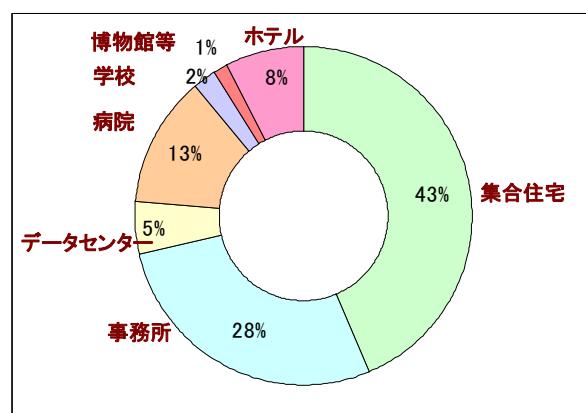


図 1-1.6 免震構造を採用している建物用途の分類(JSSI パンフレットより)

## 1-2. 免震建築の歴史に見る免震のしくみ

免震建築は、耐震構造の後に開発されたと受け止められていますが、免震構造の歴史を見ますとそうでもないことがわかります。地震の多い国や地域では、古くから地震に耐えられる方法を建物の構造に求めてきました。原理は、簡単で、建物と地盤を分離することを考えています。

[図 1-2.1](#) には米国で最も古い絶縁基礎システム(基礎と建物の間に蟻石を敷き詰めたもの)が 1909 年に提案されています。日本では、京都の三十三間堂の基礎に砂と粘土の互層からなる版築構法が採用されています。その後、1891 年の濃尾地震、1923 年の関東地震を経験して [図 1-2.2](#) のようなベアリングを用いた「建築物耐震装置」(1924 年、鬼頭、山下の案)など多くの免震機構が提案されています。

1930 年の柔剛論争(剛理論: 佐野利器、柔理論: 真島健三郎)の結果、1950 年の建築基準法に剛理論が採用され、免震構造の考え方は、消えてしまった。

現在使用されている積層ゴムの開発は、1950 年ごろ英國のマレーシアゴム研究協会を中心に進み、1963 年のユーゴスラビア地震後、1969 年小学校(ハインリッヒ・ペスタロッチ)に適用された。1971 年米国のサンフェルナンド地震(M7.0)以降、米国 ERRC で実大建物実験(図 1-2.3)が行われる。1977 年～1985 年にかけてフランスで原子力発電所に採用され、日本に大きな影響を与えた。1983 年日本で第 1 号の免震住宅(図 1-2.4)が実現した。この設計が免震構造の評定 1 号となり、これを機に多くの免震建物が設計されている。

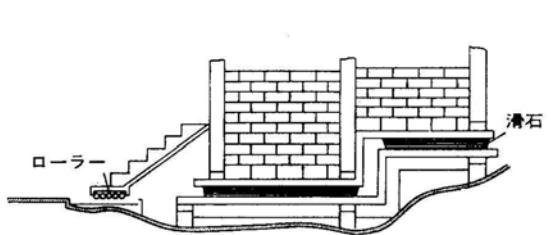


図 1-2.1 最も古い絶縁基礎システム 1909 年

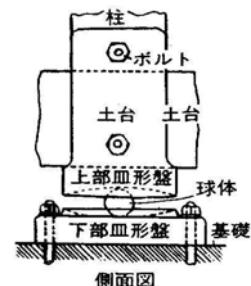


図 1-2.2 「建築物耐震装置」(1924 年、鬼頭、山下案)

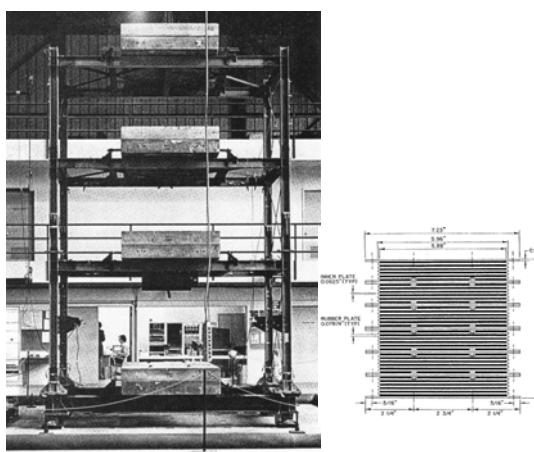


図 1-2.3 米国 ERRC の実大建物実験  
(1977～1985)



図 1-2.4 1983 年日本で第 1 号の免震住宅

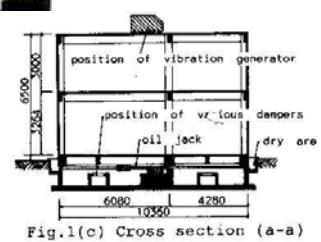
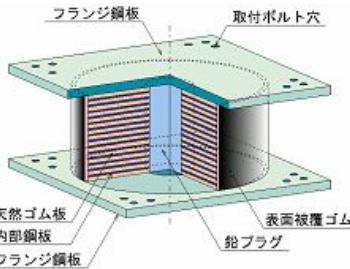


Fig.1(c) Cross section (a-a)

このように、歴史に見る免震構造のしくみは、地盤と建物の間に「滑らせるもの」、「転がせるもの」を設置することから始まっている。積層ゴムの誕生は、大きな荷重を支持し、水平方向の剛性をできるだけ低減し、元の位置に戻る機構を求めた結果であった。現在は、振動理論から効果的な免震機構として適切な減衰を与えるダンパー装置が追加されている。また、摩擦係数の少ないすべり支承、転がり支承が開発され組み合わせて使用されている。表 1-2.1 には、近年実用化されている主な免震部材を示す。

表 1-2.1 近年実用化されている主な免震部材

		 天然ゴム板 内部鋼板 フランジ鋼板 取付ボルト穴 表面被覆ゴム 鉛プラグ
天然ゴム系積層ゴム支承	高減衰ゴム系積層ゴム支承	鉛プラグ入り積層ゴム支承 錫プラグ入り積層ゴム支承
		
	高摩擦・低摩擦弹性すべり支承	転がり支承
		
鉛ダンパー	鋼材ダンパー	オイルダンパー

このような免震部材の品質と性能向上にともない、設計技術が確立され、現在は、住宅から超高層ビルに至るまで免震構造が採用されています。以下にいくつかの多々もの事例を紹介します。

住宅の例



中高層マンションの例



病院建築の例



学校の例



レトロ建築の例



合同庁舎建物の例



### 1-3. 振動理論による免震のしくみ

建物の地震応答を最も簡単に表現したものが、地震波の応答スペクトルです。建物を1質点でモデル化し、減衰をパラメータとして応答値を周期軸で表現したものです。建物を1質点にモデル化するためには、建物の1次周期  $T_1$  を算定し、建物の地震時全荷重を  $W$  とすると等価な水平剛性  $K_e$  が下式から算定されます。

$$K_e = (2\pi/T_1)^2 \times W/G \quad , G: \text{重力加速度 } 980 \text{ cm/s}^2$$

また、減衰定数  $h$  (%) は、RC構造で3%程度、S構造で1%程度とされていますが、一般に応答スペクトルでは地盤の逸散も考慮し5%で評価されています。

応答成分には、加速度、速度、変位とあり、1質点系のモデルでは、周期軸において以下の関係がなりたち、応答変位スペクトル ( $S_d$ ) を求めると、擬似速度スペクトル ( $S_v$ )、擬似加速度スペクトル ( $S_a$ ) が求められます。

$$S_a = \omega^2 \cdot S_d, \quad S_v = \omega \cdot S_d$$

図 1-3.1 に代表的な観測地震波3波の基準加速度 (980cm/s<sup>2</sup>) の応答スペクトルを示す。

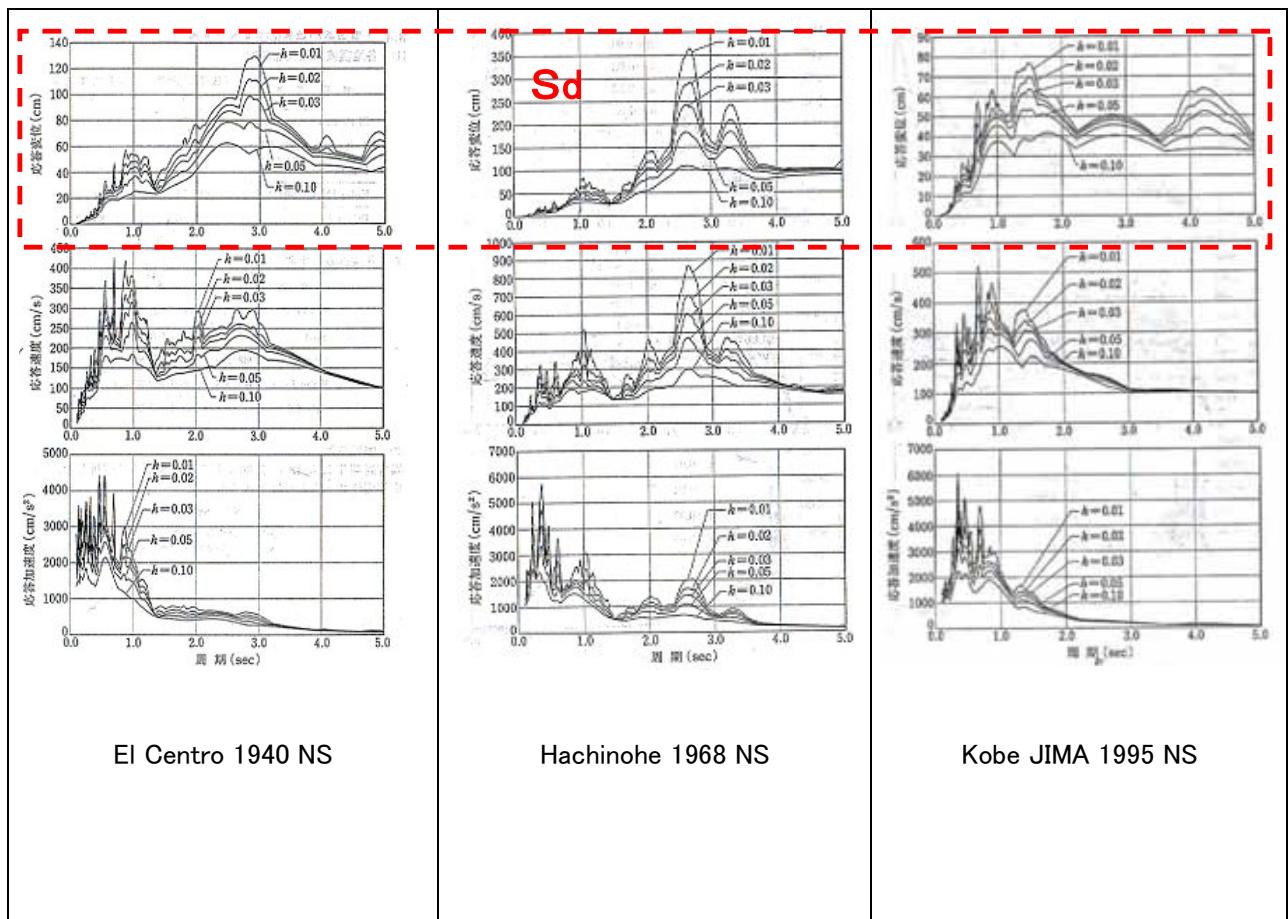


図 1-3.1 観測地震波3波の基準加速度 (980cm/s<sup>2</sup>) の応答スペクトル

(出典: 建築構造ポケットブック)

これらの応答スペクトルの周期域で見た応答特性は、

- ①長周期になるほど応答加速度は低下する傾向がある
- ②長周期になるほど応答変位は増加する傾向がある
- ③減衰定数が大きいほど加速度・変形・速度は低下する傾向がある

ということが解ります。

この特性を一般化した模擬地震波にBCJ-L2(日本建築センター)があり、基準加速度( $980\text{cm/s}^2$ )の応答スペクトルを図1-3.2に示します。

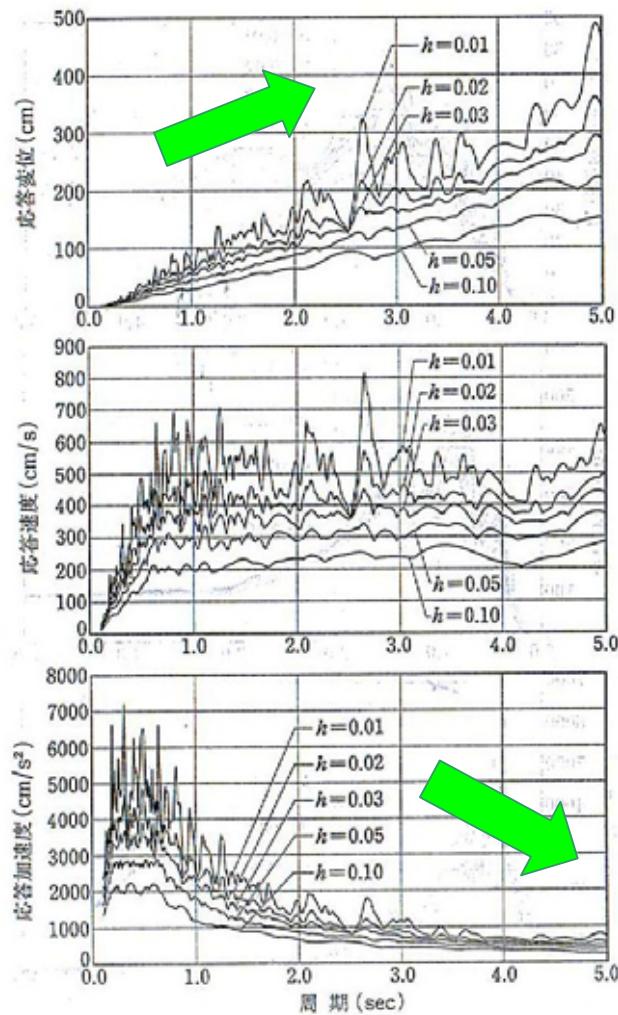


図1-3.2 模擬地震波BCJ-L2の基準加速度( $980\text{cm/s}^2$ )の応答スペクトル

(出典:建築構造ポケットブック)

免震化により固有周期が2秒から4秒程度に長くなると、建物の応答は、長周期域の応答特性を示します。また、加速度は著しく低下し、建物はゆっくりと大きな変形をします。剛体に近い挙動となり、物理的に1質点系に近づくことになります。すなわち、これらの応答スペクトルが、建物の地震応答を予測していることになります。この特性の3つ目に減衰の効果がありますが、免震構造は免震層にダンパーを設けることで減衰性能を自由に設定できます。一般に免震部材で減衰定数を10%~20%程度にすることが可能で減衰によってさらに応答レベルは下がることが理解されます。

#### 1-4. 免震部材の種類と特性を調べよう

免震部材は、平成12年建設省告示第1446号により建物の種類、規模、設計ルートに関係なく大臣認定を取得することが使用条件になりました。認定事項は、免震建物を設計するために必要とされる性能が設定されています。それらの事項は、免震部材の種類によって異なりますが、[表1-4.1](#)に主な一般事項を示します。認定評価を受けるために、実大免震部材を用いて性能試験が行われます。さらに、製造、製作、品質において常に誤差が伴い、また、経年による劣化があるため、その誤差を表示し保証することが認定条件となっています。例として[表1-4.2](#)には天然ゴム系積層ゴムの認定性能リストを示す。

このような性能リストに認定性能事項がまとめられていますが、この表では、性能変化の最大、最小、限界値などの過程が読み取れ難いため、評価概要書(別表、別添)を併せて確認しておくことが重要です。

表1-4.1 主な認定性能事項

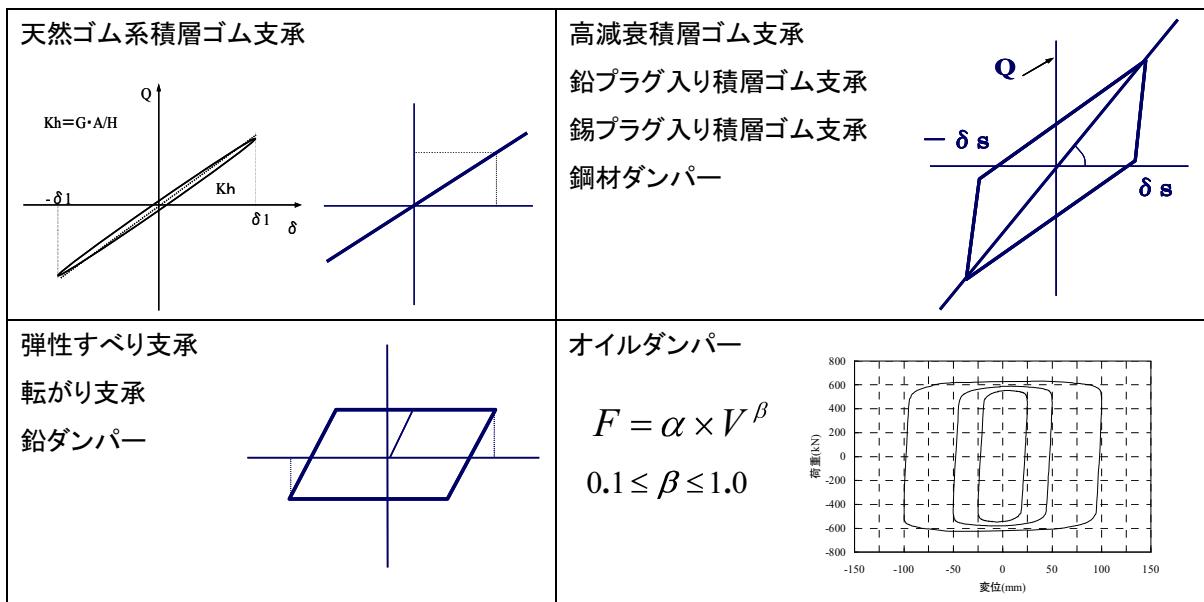
認定事項	詳細性能事項	主適用免震部材の種類
<b>1. 形状、構成</b> (図化表示など)	・サイズ、取り付け状態・方法 ・素材の材質、規格、強度	全種部材
<b>2. 限界性能</b> (試験結果と限界性能曲線の表示)	・座屈・破断限界の鉛直荷重と水平変形 ・支持限界荷重(面圧) ・変形限界	積層ゴム支承ほか 鉛ブレーキ入り積層ゴムほか 高減衰積層ゴム 鋼材ダンパー すべり支承、転がり支承 オイルダンパーほか
<b>3. 基本性能</b> (試験結果とグラフ表示)	・鉛直剛性、水平剛性、 ・1次、2次水平剛性、切片荷重 ・等価水平剛性、等価減衰 ・摩擦係数、降伏荷重、 ・減衰係数、リリーフ荷重	積層ゴム系支承ほか 鉛ブレーキ入り積層ゴムほか 鋼材ダンパー 高減衰積層ゴム すべり支承、転がり支承 オイルダンパーほか
<b>4. 変動・依存性能</b> (試験結果とグラフ表示)	・製造誤差 ・経年変化率(60年相当) ・繰り返し変化率(40回/3回) ・温度変化率(40°C/20°C, 0°C/20°C) ・せん断ひずみ依存性(100%を基準) ・面圧依存性 ・速度依存性	全種部材 積層ゴム系支承ほか 全種部材 全種部材 積層ゴム系支承ほか 積層ゴム系支承、すべり支承 オイルダンパー、すべり支承ほか

表 1-4.2 天然ゴム系積層ゴムの性能リスト(例)

昭和電線電纜式天然ゴム系積層ゴムアイソレータ (3/26) G0.39 S2=5.1																	
項目	R40-500-3.75×26	R40-600-4.5×26	R40-700-5.3×26	R40-800-6×26	R40-900-6.8×26	R40-1000-7.5×26	R40-1100-8.3×26	R40-1200-9×26	R40-1300-9.8×26								
各部の形状、寸法及び寸法精度	せん断弾性率 (N/mm <sup>2</sup> )	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39								
	ゴム外径 (mm)	500	600	700	800	900	1000	1100	1200								
	ゴム内径 (mm)	20	30	35	40	45	50	55	60								
	ゴム一層厚 (mm)	3.75	4.50	5.30	6.00	6.80	7.50	8.30	9.00								
	ゴム層数 (-)	26	26	26	26	26	26	26	26								
	ゴム総厚 (mm)	97.5	117.0	137.8	156.0	176.8	195.0	215.8	234.0								
	1次形状係数 (-)	32.0	31.7	31.4	31.7	31.4	31.1	31.0	31.5								
	2次形状係数 (-)	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1								
	内部鋼板厚さ (mm)	3.2	3.2	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5								
	フランジ外径 (mm)	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500								
	フランジ厚さ (mm)	25	25	25	30	32	34	36	38								
	製品高さ (mm)	251.5	281.0	334.3	362.5	399.3	436.0	473.0	479.3								
限界性能	限界ひずみ 面圧=0 (%)	400	400	400	400	400	400	400	400								
	基準面圧 (%)	400	400	400	400	400	400	400	400								
荷重履歴 <sup>1)</sup> (kN)																	
鉛直性能	圧縮限界強度 <sup>2)</sup> ( $\gamma_0, \sigma_0$ ) ( $N/mm^2$ )	(0.60)	(0.60)	(0.60)	(0.60)	(0.60)	(0.60)	(0.60)	(0.60)								
	( $\gamma_1, \sigma_1$ ) ( $N/mm^2$ )	(30.60)	(30.60)	(30.60)	(30.60)	(30.60)	(30.60)	(30.60)	(30.60)								
	( $\gamma_2, \sigma_2$ ) ( $N/mm^2$ )	(400.30)	(400.30)	(400.30)	(400.30)	(400.30)	(400.30)	(400.30)	(400.30)								
	鉛直剛性 $K_v$ ( $10^3 kN/m$ )	2070	2450	2810	3280	3630	4090	4450	4910								
水平性能	基準面圧 ( $N/mm^2$ )	15	15	15	15	15	15	15	15								
	引張限界強度 せん断ひずみ100% ( $N/mm^2$ )	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0								
製造ばらつき	等価剛性 $K_h$ ( $10^3 kN/m$ )	0.79	0.95	1.09	1.26	1.41	1.58	1.72	1.84								
	規定ひずみ (%)	100															
K <sub>h</sub> のばらつき (%)																	
水平性能の変化率	経年変化率 <sup>3)</sup> $K_h$ (60年)/(初値) (%)	±10以下															
	(-10)/(20) (%)	+10以下															
	(0)/(20) (%)	+5以下															
	(30)/(20) (%)	-5以上															
	(40)/(20) (%)	-5以上															
ひずみ依存性 <sup>4)</sup>	Kh (50)/(100) (%)	+15以下															
	(200)/(100) (%)	-10以上															
クリープひずみの変化率 20°C × 60年相当 (%)																	
1):図2参照 2):図3参照 3):経年変化率 初期値に対する60年相当 4):20°C基準10°C刻み 5):100%ひずみ基準																	

また、数値解析で扱うために、特に各免震部材の基本水平性能は復元力曲線で表現されます。表 1-4.3 には天然ゴム系積層ゴム支承、鉛プラグ入り積層ゴム支承、高減衰積層ゴム支承、鉛ダンパー、鋼材ダンパー、すべり支承、オイルダンパーの一般的な復元力曲線を示しています。一般に1点の折れ点を持つバイ・リニア型、2点の折れ点を持つトリ・リニア型の復元力曲線としてモデル化されます。応答解析ではこの履歴特性を時刻歴で刻々の数値として取り扱い算定します。よって、モデル化の精度や特性が地震応答に大きく左右します。

表 1-4.3 代表的な免震部材の復元力曲線



## 1-5. 免震層の位置と構造的特長

1-1 節の [図 1-1.5](#) で免震層の位置によって境界までの必要距離が変わる話をしましたが、免震層の位置は一般に基礎上部になる場合と中間の階に設ける場合があり、その特徴から免震形態の総称として「基礎免震」、「中間階免震」などといいます。ここでは、その特徴をやや詳しく紹介します。

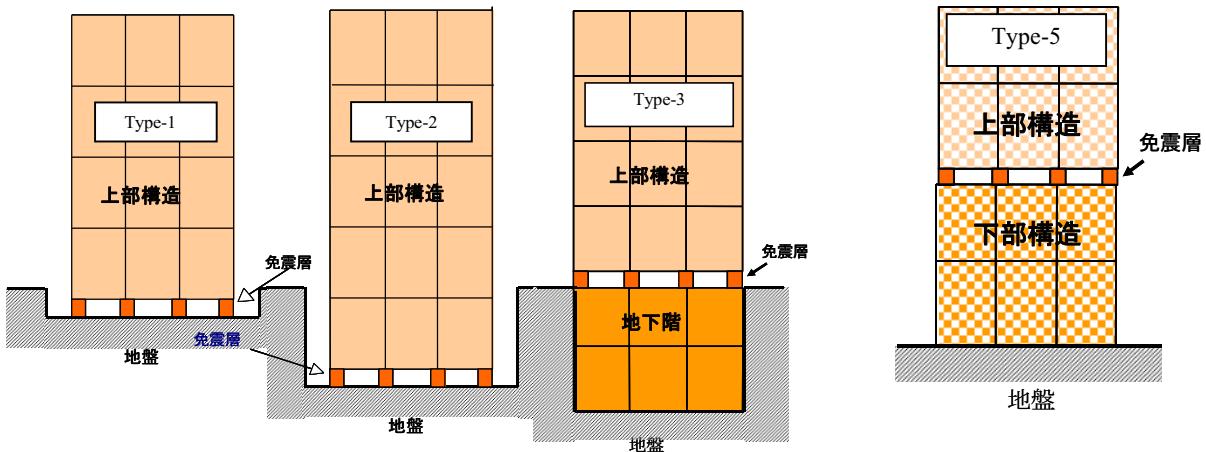


図 1-5.1 「基礎免震:Type-1,Type-2」、「中間階免震 Type-3,Type-5」のイメージ図(出典、参考文献 No6)

**(1)基礎免震 :**基礎構造の直上に免震層を設けるもので、免震層はGLより下になる。このため免震部材に対する耐火処置が免除されています。

( 従来の耐震構造に比べ )

- ① 免震層の高さ分だけ深く掘削が必要になる。
- ② 免震層のサイドは擁壁によって土留めが必要となる。
- ③ 拥壁と上部構造外壁間は、雨水、小動物の侵入防止、歩行者の落下防止から犬走りスラブを設けて塞ぐ必要がある。また、地震時に移動した場合、可動できるように設計変形量は障害物と接触しない計画とする。一般に、花壇・植栽、ゴミ置き場、境界塀、自転車置き場などが多い。

なお、免震層の限界水平変形量は、擁壁と上部構造のフーチング部とのクリアランス、または免震部材の限界変形などで決まる。

**(2)中間階免震:**基礎免震以外の上部構造階に免震層を設けるもので、免震層はGLより上になる。このため免震部材は柱の一部として評価され、耐火処置が必要となる。また設計ルートとして告示による設計は適用されず、大臣認定を取得する地震応答解析による設計となります。

( 従来の耐震構造に比べ )

- ① 免震層の高さ分だけ建物の高さが高くなる。
- ② 免震層のサイドに壁は構造上必要ではないが、防水上設ける場合が多くなる。
- ③ 免震層を貫通するEVシャフト、階段室、PSなどには耐火目地を施した水平スリットを設ける必要がある。また、水平変形時のクリアランスとEVシャフトは可撓性が必要となる。

なお、免震層の限界水平変形量は、外壁と境界線までの距離、または免震部材の限界変形で決まる。

**(3)地下階の中間階免震:**免震層は、地下階の中間にあるが、免震層はGLより下になる。このため免震部材に対する耐火処置が免除されています。

( 従来の耐震構造に比べ )

基礎免震と同じ特徴を有する。

## 1-6. 免震構造と非免震構造との比較

一般に免震構造の耐震性能は、加速度応答スペクトルで見ると非免震構造の周期が1秒近辺になる場合、減衰性能による効果も含めて考慮すると、最大応答加速度が4分の1から5分の1程度に低減します。層せん断力は、崩壊層のない建物であれば、同程度の低下が期待されます。[図 1-6.1](#) は、付録2の建物の振動解析モデルで免震層を付けた極稀に発生する地震に対する応答結果と免震層の無い基礎固定条件の応答結果を示す。解析モデルによって異なるが、この結果では  $1/6 \sim 1/4$  程度に低減している。

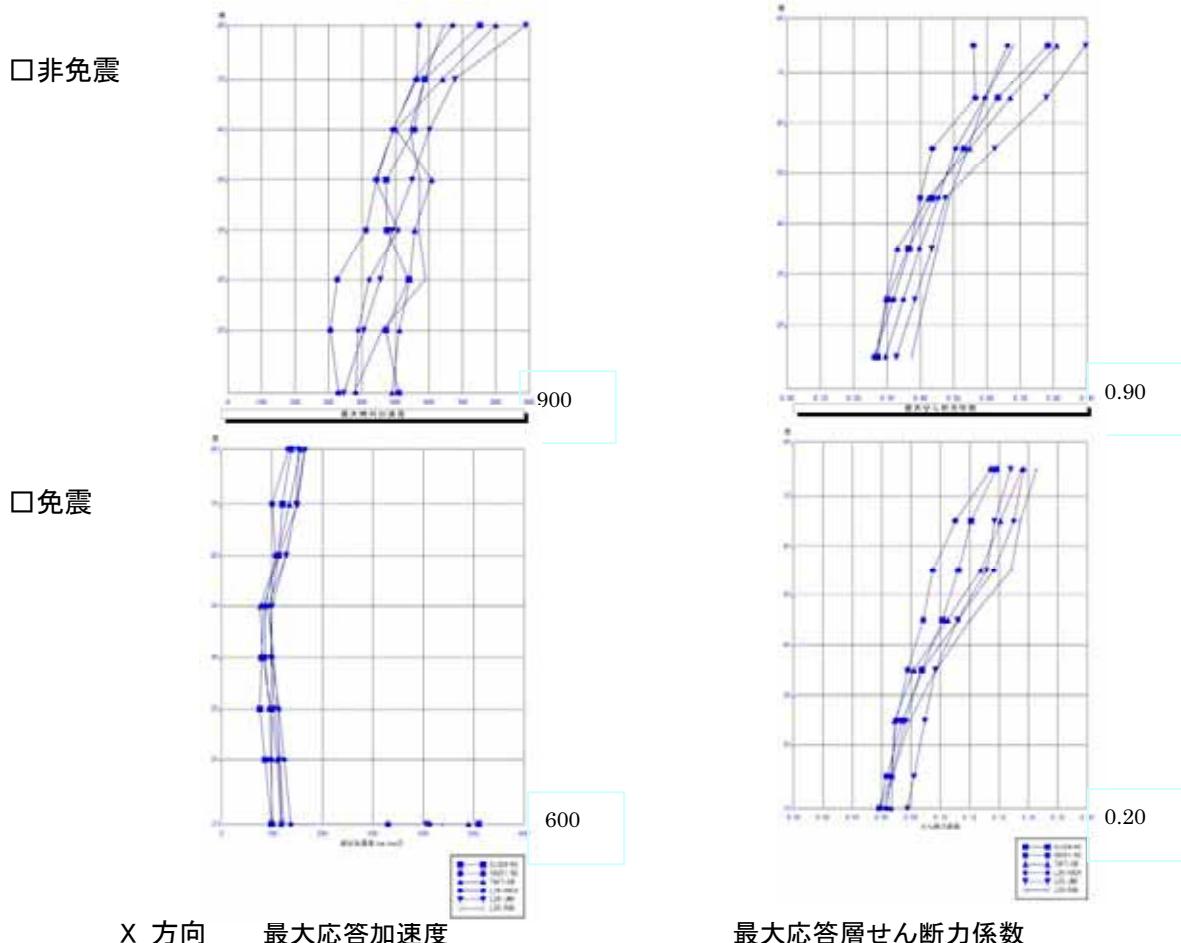


図 1-6.1 極稀に発生する地震時、同じ建物モデルで免震層の有無による応答結果比較

また、[図 1-6.2](#) は、中越地震時の某免震建物の厨房棚の様子を示していますが、食器の落下が全くなかったことを聞いたときのものです。このような免震構造の実地震による効果が数多く報告されています。



図 1-6.2 中越地震直後、免震構造の某専門学校の厨房棚の様子(出典:JSSI MENSHEIN)

## 1-7. 免震建築の設計基準

免震建築は、歴史で紹介した1983年の第1号免震住宅から現在まで2000棟以上となり、その性能が評価されてきた。平成12年建設省告示第2009号「免震建築物の構造方法に関する安全上必要な技術的基準を定める件」および同告示第1446号による免震材料の大蔵認定により、従来の評定審査を必須条件としていた建物が告示2009号の条件を満たせば、確認申請で建築できるようになりました。また、平成16年国土交通省告示第1160号の追加により、戸建住宅の暴風時の変形制御装置に関する緩和でさらに設計が容易になりました。以下に、告示2009号の主設計条件をフロー図で示します。

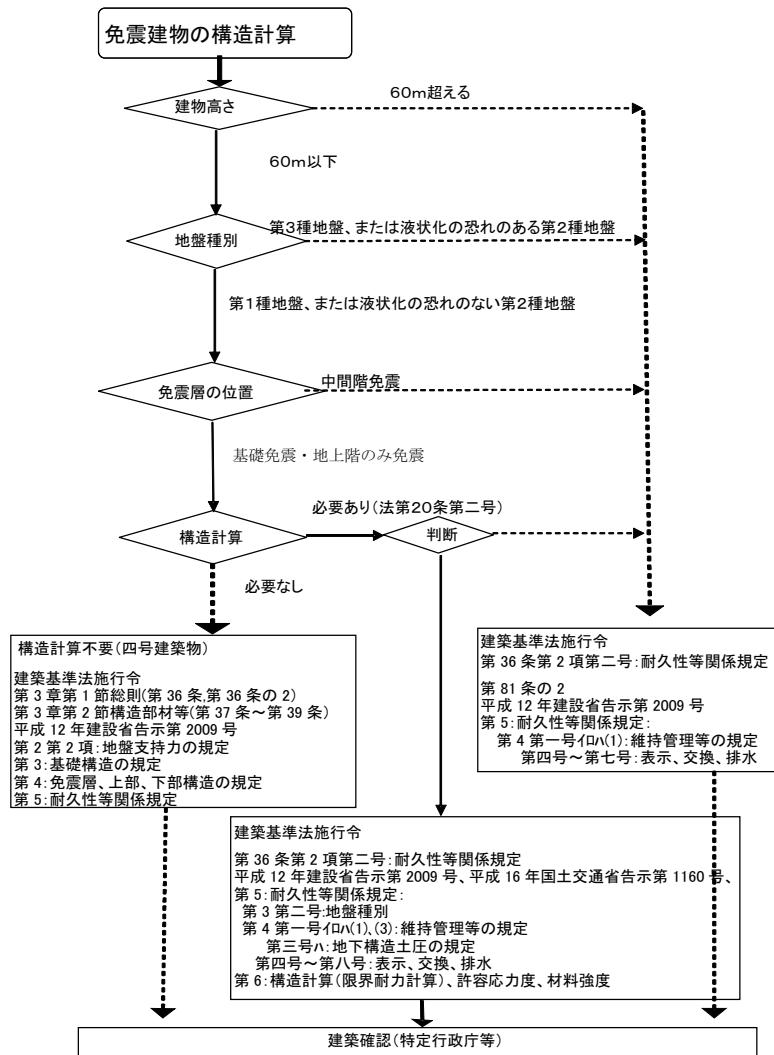


図 1-7.1 告示2009号の主設計条件フロー(出典:文献 No6)

なお、特殊建築物である免震建築物に関する耐久性等関係規定が告示2009号第5で規定されています。

その概要は下記の事項で、これらは、設計ルートに関係なく免震建築物に適用されます。

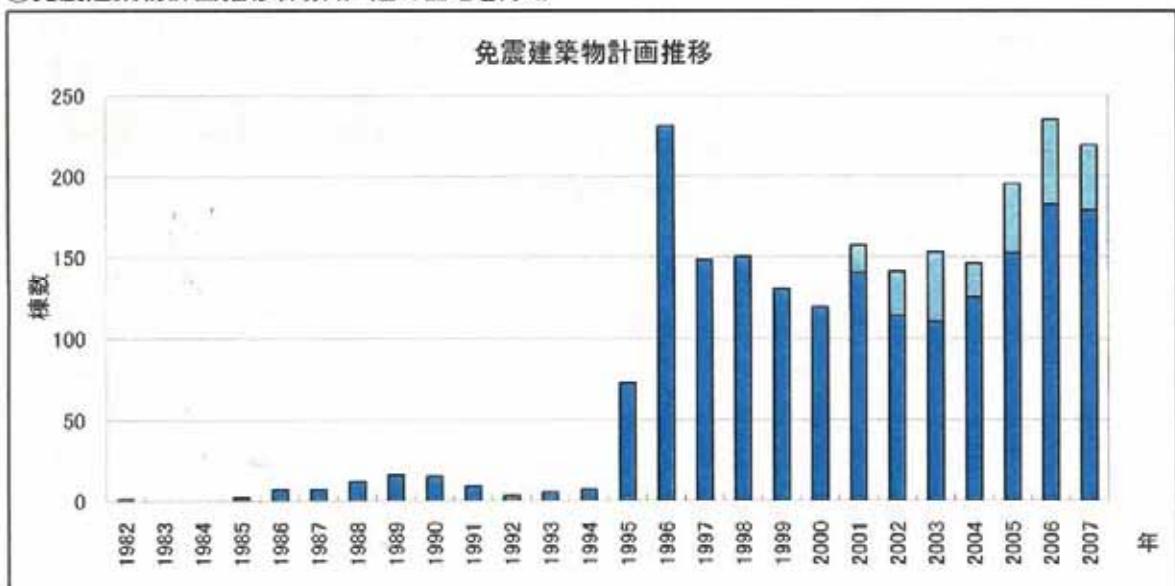
- ①免震層は免震部材、建築設備の点検が容易にできる空間、配置とする。
- ②建物周辺に安全上支障のある空間を生じないものとする。
- ③出入り口に免震建築物であることその他必要な事項を表示する。
- ④積雪時に変位を妨げないような措置を講じる。
- ⑤必要に応じて免震材料の交換を行うことができる構造とする。
- ⑥免震層に浸水する場合は、底盤に排水口を設けて免震材料が冠水しないように講じる。

## 1-8. 免震建築の現状と社会的評価

認定を受けた免震建築物が日本に誕生して25年が過ぎました。当初は法律の枠外であったため、その開発に尽力された多田英之先生(元福岡大学教授)には敬意がつきません。[図 1-8.1](#) にはこの25年間の住宅建築を除く免震建築の設計棟数を表しています。1995年の兵庫県南部地震以降の増加が著しくなっています。兵庫県三田市にあった郵政省の電算センターなどで免震性能が実証されたことが大きな要因となっています。その後、2004年の新潟県中越地震、2005年3月の福岡沖地震、7月千葉県北西部地震、8月の宮城沖地震、2007年7月新潟県中越沖地震、2008年の四川大地震など大きな地震による被害に比例するように免震建築が増加しています。特に、災害時に建物の機能が重視される病院、消防署、官庁舎、電話通信設備の免震化は著しく、経費より機能が優先されています。また、2007年7月新潟県中越沖地震に注目された工場の生産ラインの継続性の欠如が大きな経済的損失を与える事実を反省し、部品工場の免震化が増えています。

政府の中央防災会議は、[図 1-8.2](#) に示す2005年3月に「30年内に震度6弱以上の地震が発生する確率を示した全国地震動予想地図」を公開しました。これを元に各行政も積極的に震災対策を検討し、その対策として免震建築が評価されています。

①免震建築物計画推移棟数(戸建て住宅を除く)



2007 年 評定物件 179 件, 告示申請 40 件

[図 1-8.1](#) 25年間の住宅建築を除く免震建築の設計棟数の推移

(出典 JSSI 免震データ集積の資料 2009 年 6 月より )

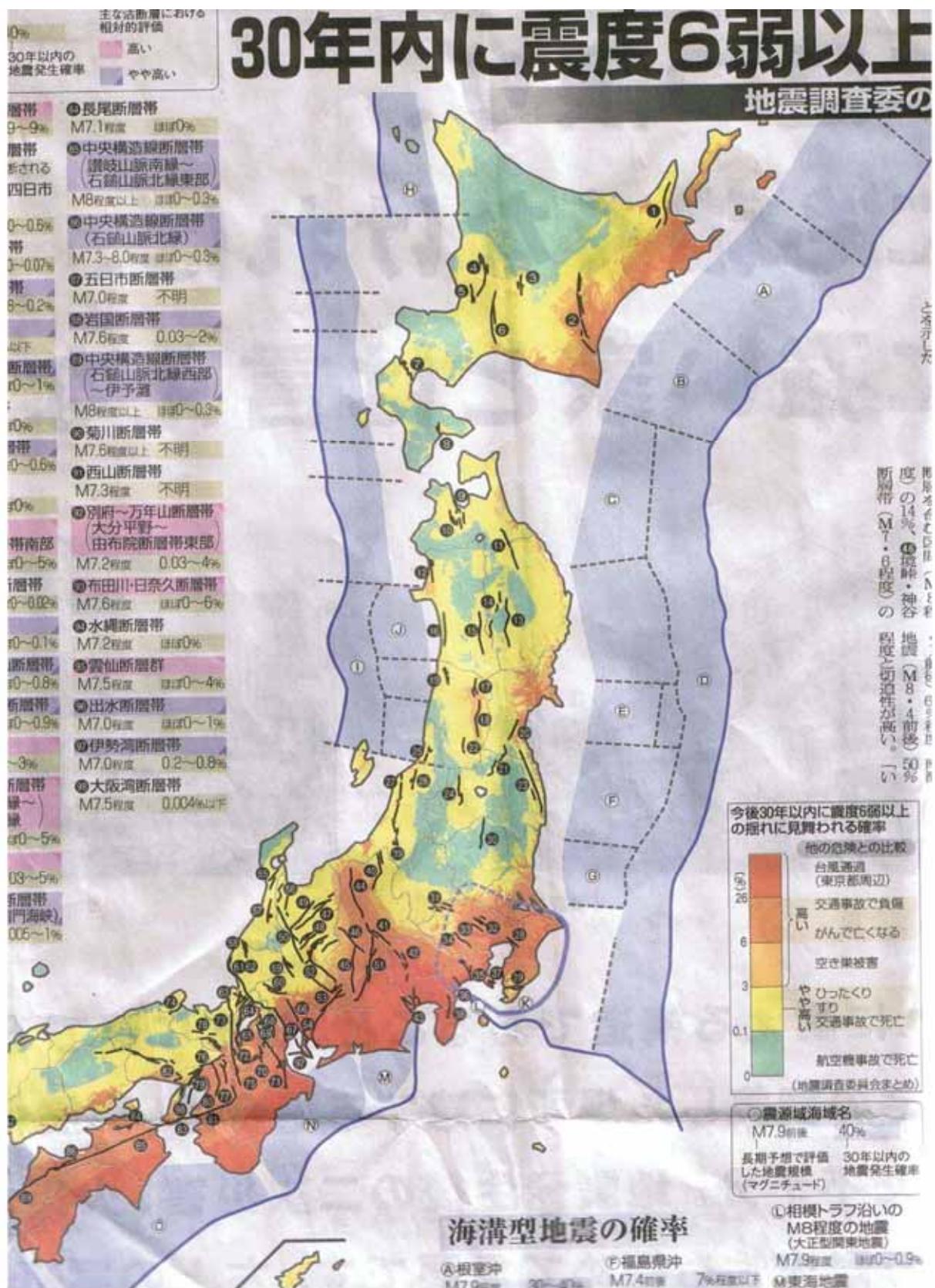


図 1-8.2 全国地震動予想地図 (2005 年 3 月 朝日新聞)

## 第2話 まず設計基本条件を確認しよう

ここでは、免震構造建物を設計するにあたり必要基本条件を確認します。免震構造に期待される性能は、基準法で決められた地震動に対して耐えられるだけではなく、社会的役割の期待に応える必要があることを考慮すると、「建物の機能維持」といえます。それを前提に以下の事項を確認します。

### 2-1. 免震建物にする目的と要求性能を考える

まずは、免震建物にする目的を明確にしておくことが最も重要です。その価値観が周知されていないと性能よりも価格を重視した設計となり、1-1 節で記した免震建物の性能を低下させるものとなります。

基本的には、施主の要望に併せて建物の重要度、社会的役割を考慮して提案することが求められますが、免震建物に期待される性能目標は、「機能維持」ができること、「機能維持」と思われていることを考慮する必要があります。

### 2-2. 計画地域・敷地条件を確認する

免震建物は高性能の構造機構から出来ています。その性能を常時発揮するためには、免震層の特性を理解しその条件に適した計画地域・敷地であることを確認します。即ち、免震層は地震時においても水平状態を維持し、水平変形量を確保することです。

よって、以下のような状況になっていないかを確認し、免震性能が発揮される障害にならないことを確認します。

確認条件	対策の確認事項
①傾斜地になっていないか？	・水平で剛強な基礎を構築できるか。
②埋め立て地盤、軟弱地盤でないか？	・地盤改良が可能か、支持地盤が適当な深さにあるか。
③隣地間隔がある程度確保できるかどうか？	・建物配置、規模の基本計画の調整が可能か。
④隣地状況・用途はどうなっているか？	・崖、山、河川などの距離によって基礎の変形に影響しないか。
⑤建物の密集度は、どの程度か？	・敷地境界を越えている樹木、塀などが障害にならないか。
⑥前面道路・歩道幅は、どのようにになっているか？	・免震層が変形したとき犬走りスラブがはみ出さないか。 ・歩行者が犬走りの上を通行する可能性があるか。
⑦鉄道や車両専用道路などが隣接していないか？。	・免震部材による著しい除振効果は期待できません。別の防振対策も検討が必要です。

## 2-3. 地盤調査と想定地震の調査

(2009.05.16 改)

告示2009号による設計では、第3種地盤、または200ガル程度の地表加速度で液状化の可能性ある第2種地盤上での設計はできません。地震動が長周期化し、想定以上の応答変位を生じたり、地盤沈下で建物が傾斜する恐れがあるためです。これらの条件には、地盤改良を行うことで対応が可能です。また、地盤の増幅特性(Gs)を算定するためには工学的基盤(地盤のS波速度 Vs>400m/s)が調査可能深さに存在し、その深さの5倍の範囲の領域にほぼ水平に工学的基盤が分布していることを確認する必要があります。付録6に、「工学的基盤の厚さと傾斜角の調査報告例」を示します。適切な地盤調査データ入手しまとめことで作成します。⑤国土地盤検索サイトを利用すると便利です。この条件を確認できない場合は、「2007年版建築物の構造関係技術基準解説」P441にそのほかの確認方法などが説明されています。

地震応答解析による設計の場合は、一般に告示波とサイト波を作成します。告示波は、工学的基盤を確認し、平成12年建設省告示第1461号に従って基盤地震動を作成します。つぎに、工学的基盤上部の表層地盤の自由振動解析を行い、基礎底レベルの応答加速度波を入力地震動とします。

よって、地盤地質調査では、

- ①工学的基盤を確認するためのPS検層
- ②地層構成、地下水位を確認する基本サンプル試験
- ③各地層の密度、G-γ関係を求める3軸せん断試験など室内試験
- ④直接基礎となる場合は、基礎底以深の圧密試験
- ⑤常時微動測定：地盤モデルの検証

などの検査を行います。

サイト波の作成は、法的に必須条件ではありませんが、計画地の近辺(半径20km程度)に活断層がある場合に、その断層の破壊による地震波を検討します。また、太平洋側の地域では、海洋プレートのずれによる南海地震、東南海地震、東海地震、南関東地震などの影響が大きいとされる場合は、これらの地震を模擬した地震動をサイト波として選択します。

しかし、一般に、これらのサイト波を作成するには、高度な理論と地震基盤までの数千メートルの深部構造のデータ調査が必要となるため、公開されている地震波を採用することが経済的です。

地震動の調査では、下記の地震専門機関や各行政都市防災課のホームページから情報を集めます。

①中央防災会議 <http://www.bousai.go.jp/> :予想地震に対する防災対策など

②地震ハザードステイション J-SHIS <http://www.j-shis.bosai.go.jp/>

:活断層・海洋地震によるハザード分布、主要断層による予想地震動データなどが取得できます。

③気象庁/防災情報 <http://tenki.jp/> :日々の地震記録を確認できます。

④地震調査研究推進本部 [http://www.jishin.go.jp/main/p\\_eqwave.htm](http://www.jishin.go.jp/main/p_eqwave.htm)

:F-NET, K-NET, Kik-NET, Hi-NET の収集観測地震波を取得できます。

⑤ 国土地盤検索サイト <http://www.kunijiban.pwri.go.jp/>

:このサイトは国土交通省・独立行政法人土木研究所・港湾空港技術研究所が共同で運営し、土木研究所が管理する、国土地盤情報検索サイト “KuniJiban”です。このサイトでは、国土交通省の道路・河川事業等の地質・土質調査成果であるボーリング柱状図や土質試験結果を検索し閲覧することができます。

## 2-4. 地盤周期特性を予測する

免震建物の性能は、1-3 節「振動理論による免震のしくみ」で説明しましたように周期特性に左右されます。一般に、免震層の剛性と建物重量による免震周期に比べ、上部構造の剛性が大きく、固有周期が短ければ短いほど免震効果として上部構造の加速度応答が少なくなります。この関係は免震層下部の構造に対しても同様で、基礎構造だけでなく地盤の周期が短いほど免震構造の応答は少なくなります。即ち、免震層の水平方向の柔らかい特性は、上下構造が剛なほど有効であるということです。

このため、地盤調査による常時微動測定の結果やPS検層、それらの結果を用いた重複反射理論による表層地盤の固有周期を確認します。ただし、これらは微小ひずみの領域であるため、地震時の地盤ひずみが大きくなった場合の固有周期を地層のせん断剛性Gとひずみγ関係を用いて確認することが必要です。この確認の過程で地盤の増幅率Gsをもとめることができます。設計入力地震波の設定に用いられます。

### [計算モデル]

表 2-4.1 に地盤調査結果による地層モデルを示す。地盤調査で求めたG-γ関係はそれを使用し、測定の難しい砂質層は、参考文献 18 のものや各行政が提供するものを採用する。図 2-4.1 には採用した地層のG-γ関係をします。この地層の増幅率Gsの算定式とその結果を以下に示す。

表 2-4.1 地盤調査結果による地層モデル

層	地層年代	土質	層厚 d(m)	4.00 m		注) 不用データは、クリアーで消す						
				深度 H(m)	平均N値 N	密度 ρ (t/m³)	年代係数 Yg	土質係数 St	換算 Vs(m/s)	手入力 Vs(m/s)	せん断剛性 G0(kN/m²)	
1	沖積層	粘土	3.00	5.5	3	1.93	1.000	1.000	117	150	43425	
2	沖積層	粘土	3.00	8.5	10	1.93	1.000	1.000	156	210	85113	
3	沖積層	粘土	3.00	11.5	6	1.93	1.000	1.000	152	210	85113	
4	洪積層	細砂	4.00	15.0	7	1.95	1.303	1.086	233	320	199680	
5	洪積層	細砂	3.00	18.5	11	1.95	1.303	1.086	262	360	252720	
6	洪積層	細砂	3.00	21.5	11	1.95	1.303	1.086	270	360	252720	
7	洪積層	細砂	3.00	24.5	13	1.95	1.303	1.086	285	360	252720	
8	洪積層	細砂	1.50	26.8	50	1.95	1.303	1.086	365	360	252720	
9	洪積層	粘土	2.00	28.5	17	1.95	1.303	1.000	283	360	252720	
10	洪積層	細砂	2.00	30.5	40	2.00	1.303	1.086	361	270	145800	
11	工学的基盤	砂礫	10.00	31.5	60	2.00	1.303	1.153	414	460	423200	
12												
13												
14												
15												
16												
17												
18							ここに、換算Vs = 68.79N <sup>0.171</sup> ·H <sup>0.199</sup> ·Yg·St 、 G0 = ρ · Vs <sup>2</sup>					
19												
20												

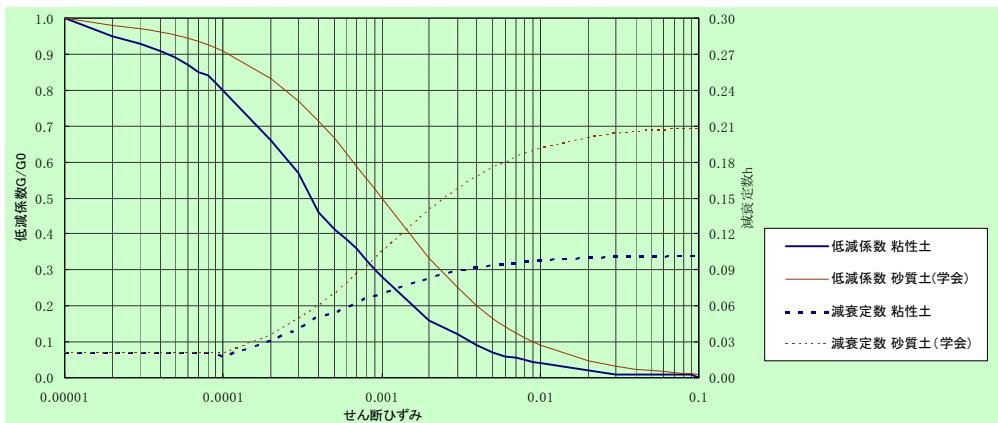


図 2-4.1 採用した地層のG-γ関係(参考文献 18)

(増幅率Gsの算定式) 建告平12第1457号第7

一般に免震構造の検討周期域  $1.2T_1 < T_s$  (この領域では、 $G_{s2}$ は影響しない)

$$Gs = (G_{s1}-1)/((1/1.2T_s - 0.1)xT_s) + G_{s1} - (G_{s1}-1)/((1/1.2T_1 - 0.1)x1.2T_1)$$

ここに、 $T_s$  : 建物の安全限界固有周期(sec)、(設計限界変位時の固有周期)

$$T_1 : 表層地盤の1次卓越周期(sec) = 4(\sum H_i)^2 / \sum (\sqrt{(G_i/\rho_i)} \times H_i)$$

$G_{s1}$  : 表層地盤の1次卓越周期に対する増幅率

$$= 1/(1.57h + \alpha)$$

$h$  : 地震時の地表地盤によるエネルギー吸収の程度を表す値

$$\alpha : 表層地盤の波動インピーダンス比 = \sum (\sqrt{(G_i/\rho_i)} \cdot H_i) \times \sum (\rho_i \cdot H_i) / (\sum H_i)^2 \times (1/(\rho_B \cdot V_B))$$

### (算定結果)

ここで表層地盤の1次卓越周期は、地盤のG- $\gamma$ 特性を考慮してストラド法によって算定します。

■地域係数 Z =	1.00 <--告示計算参照								
■地盤種別の判定									
地盤種別と地盤周期の対応									
昭和55年建設省告示第1793号より									
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>地盤周期 <math>T_g</math>(秒)</th> <th>地盤種別</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><math>T_g \leq 0.2</math></td><td>第1種地盤</td></tr> <tr> <td><math>0.2 &lt; T_g \leq 0.75</math></td><td>第2種地盤</td></tr> <tr> <td><math>0.75 &lt; T_g</math></td><td>第3種地盤</td></tr> </tbody> </table>	地盤周期 $T_g$ (秒)	地盤種別	$T_g \leq 0.2$	第1種地盤	$0.2 < T_g \leq 0.75$	第2種地盤	$0.75 < T_g$	第3種地盤
地盤周期 $T_g$ (秒)	地盤種別								
$T_g \leq 0.2$	第1種地盤								
$0.2 < T_g \leq 0.75$	第2種地盤								
$0.75 < T_g$	第3種地盤								
収斂計算1回目の一次卓越周期	$T_1=T_g = 0.343$ 秒 より								
	地盤種別								
	_____ 第2種地盤 _____								
	OK								
表層地盤の一次卓越周期	$T_1 = 0.394$ 秒 → 大地震時								
表層地盤の二次卓越周期	$T_2 (=T_1/3) = 0.131$ 秒								
波動インピーダンス比	$\alpha = 0.553$								
地盤の減衰定数	$h = 0.027$ 最小制限値(1.2)								
一次卓越周期に対する増幅率	$G_{s1} = 1.676$								
二次卓越周期に対する増幅率	$G_{s2} = 1.465$								

ここで、免震層の設計限界固有周期  $T_s$  は、想定値を設定し、免震層がほぼ設計できた時点で補正する。(ここでは、 $T_s=4.0sec$ と仮定します)

	標準性能	+変動	-変動	最小制限値(1.23)
$T_s =$	4.165	3.690	4.524	
$G_s =$	1.047	1.057	1.041	< 1.23
最小制限値	1.230	1.230	1.230	

### 【参考】

#### 地盤種別の判定

#### 微震動時一次固有周期

略算式 (日本建築学会『建築物荷重指針』より)

$$T_g = \sqrt{32 \sum [d_i \cdot (H_{i-1} + H_i) / 2 / V_{si}^2]} = 0.292 \text{ s}$$

$$T_g = 4ha / V_{sa} = 0.377 \text{ s}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} ha = \sum d_i = 27.5 \\ \sum d_i \times V_{si} = 8030.0 \\ V_{sa} = \sum d_i \times V_{si} / \sum d_i = 292 \end{array} \right.$$

参考文献 18. 建物と地盤の動的相互作用を考慮した応答解析と耐震設計 2006 (社)日本建築学会

## 第3話 基本設計に入る

第2話の事前確認事項と対策を反映させるように敷地を設計範囲として建物の配置、構造方法、平面計画、断面計画を行っていきます。以下は、この設計過程のポイントについて実建物モデル(付録2:7階RC造共同住宅(基礎免震)の計算モデル)を用いて説明を行います。

ただし、最も重要なことは、構造設計者が意匠設計者と綿密なコミュニケーションを行うことであるとは間違いないようです。

### 3-1. 敷地と建物配置を調整する

敷地に配置された計画平面図を見て水平クリアランスの確保の点から建物配置を調整します。ここでは、免震層の位置の第1案として“基礎免震”を計画します。

一般に図3-1.1に示すような箇所の水平クリアランスが確保できない場合が多くあります。また、応答解析前に水平クリアランスを設定することは難しいのですが、経験的に建物規模によって下記の値を想定します。最終的には精算結果、余裕があれば、設定値を縮めて計算を整合させます。

- ① 戸建住宅 : 35cm~50cm程度
- ② 低層ビル : 45cm~55cm程度
- ③ 中高層ビル : 50cm~60cm程度 [計算モデル]
- ④ 超高層ビル : 55cm~70cm程度

なお、この値から施工誤差5cmを引いた値を、以降の設計において免震部材の限界水平変形と仮定します。

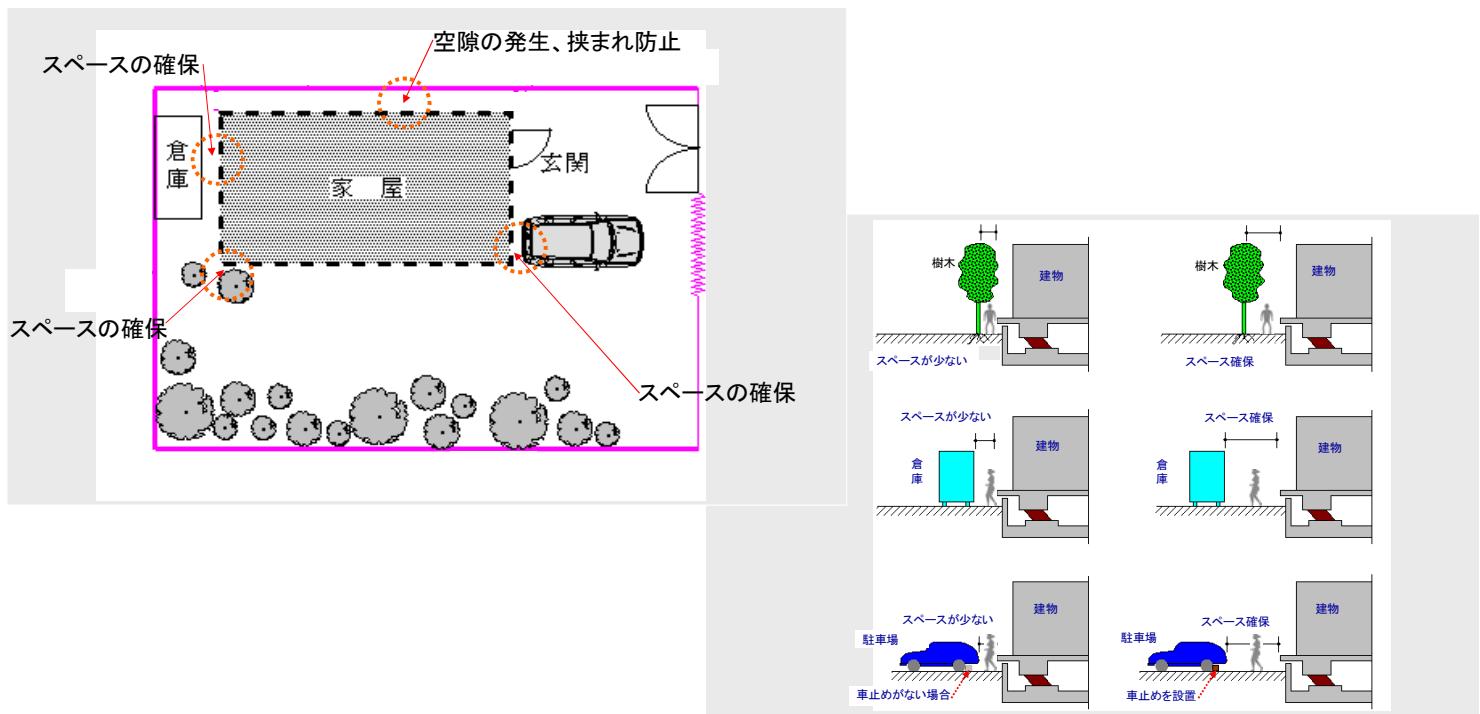


図3-1.1 水平クリアランスの確保が難しい箇所(出典:参考文献No.7)

告示1160号では“必要なクリアランス”が図3-1.2のように規定されています。告示2009号による設計計算ではこの基準を満たす必要がありますが、時刻歴解析では、解析結果に基づいた設定ができます。ただし、この基準の考え方を安全対策の基本として設定します。

① 免震層の水平クリアランス	$\geq$ (地震応答変位 + 10cm)
② 免震ピットを塞ぐ犬走りスラブの長さ	$\geq$ (地震応答変位 + 10cm)
③ 周囲の構造物等	$\geq$ (地震応答変位 + 10cm)
ただし、周囲の構造物等と建物壁面間が通路として使用される場合	
③-1:免震建物として建物の変形を周知した人の通行の場合	$\geq$ (地震応答変位 + 20cm)
③-2:一般の人の通行の場合	$\geq$ (地震応答変位 + 80cm)

ここで、構造物等とは、塀、大きな植栽、プランタン、ゴミ置き場、自転車置き場などの障害物を含めます。

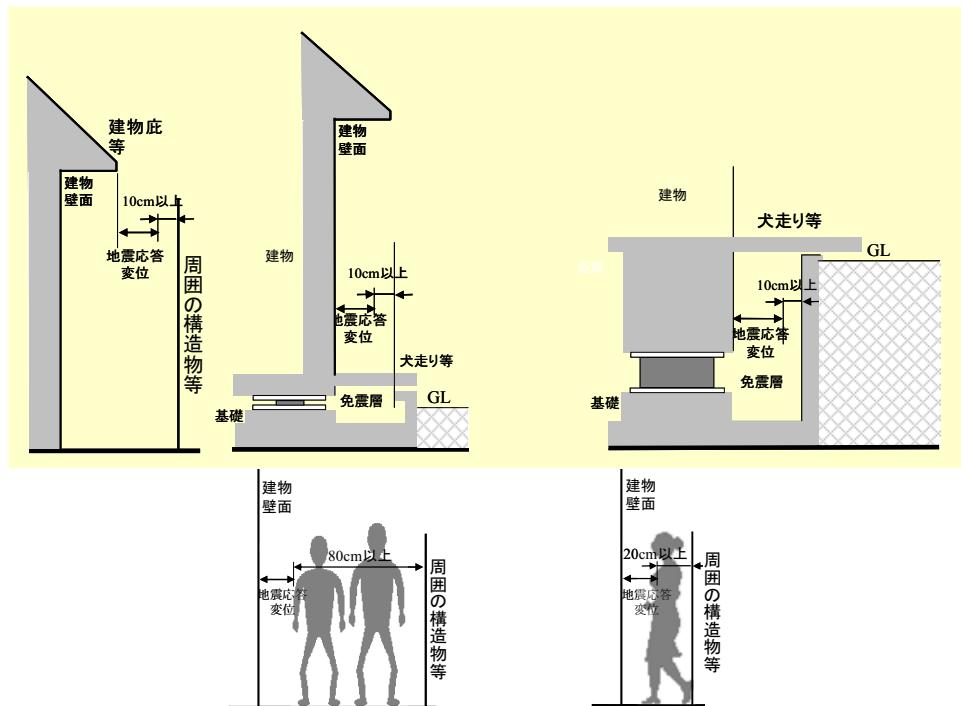


図 3-1.2 告示1160号の“必要なクリアランス”(出典: 参考文献7のP11)

ここで、「周知した人の通行」の明快な定義は、ありませんが、少なくとも居住者や使用者に対して建物の周辺やエントランスに図 3-1.2 のような「免震建物である説明図」を掲示することで適応できているとすることもできます。

#### 記載文章例

「このたてものは地震のときに横にゆっくり動いて地震の衝撃をかわす免震建築物です。」

建築主: \*\*建物株式会社

設計者: 株式会社\*\*\*設計

建設年: 200\*年\*\*月

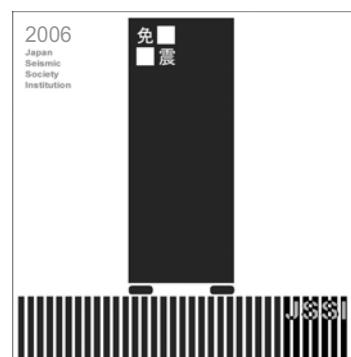


図 3-1.2 「免震建物である説明図」(告示 2009 号 第 5 耐久性関係規定による)

### 3-2. 建物構造種別を設定する

建物の構造種別は、建物の用途と構造特性や価格が一般的に関連付けられ、結果として用途が主要因になっています。例えば、以下の例です。

- ①共同住宅、病院（耐久性、遮音性、防振性）：鉄筋コンクリート(RC)造、鉄筋鉄骨コンクリート(SRC)造
- ②戸建住宅（経済性、加工性）：木造、RC造、鉄骨(S)造
- ③工場、倉庫（機能性（ロングスパン）、経済性）：S造、RC造
- ④超高層共同住宅（高強度、施工性、耐久性、遮音・防振性）：S造、RC造、PC造(RC)、SRC造
- ⑤超高層商業ビル（高強度、施工性、耐久性、遮音・防振性）：S造

免震構造とする場合は、以下の2点などを選定条件と考えます。

**■免震性能を高めるために“高い剛性”を確保する。**

**■免震性能を生かした経済性を有効にする。**

即ち、

■RC造とする場合：耐力壁を適切に設けます。構造スリットをむやみに設けない。

■S造とする場合：水平ブレースを適切に設けます。

■SRC造とする場合：高強度コンクリートを採用してRC造を検討します。

### 3-3. 建物平面計画を調整する

つぎに建物平面計画を以下の点で調整します。平面計画では、免震部材を1柱1基の配置を基本として、配置が出来る位置、免震部材の基数を少なく経済的に、また免震層の偏心を少なくすること基本条件として設定します。また、維持管理スペースが確保できるように考慮する。

#### ①免震部材数とスパンの調整：

選定した上部架構の構造種別で一般的に可能なスパンより免震効果を期待しやや大きくする。

建物の形状によっては、柱が2m、3m程度に近接する場合は、免震部材の配置を考慮し、1本柱にまとめる。不可能な場合は、フーチングを1つにまとめ免震部材を1基とする。

ただし、免震部材の価格は、一般的に同荷重を1基で支持するより小さいサイズ2基用いるほうが安価となります。変形性能が著しく低下するため、大き目の免震部材を用いた設計の方が戻りのない安全設計となる。

#### ②浮き上がりの調整：

平面上で柱スパンが他のスパンより短い柱や耐力壁の外側柱には、地震時に引き抜き力が発生し易くなります。積層ゴム支承は、引き抜き耐力が、 $-1.0\text{N/mm}^2$  のものが大半で、これ以上の引き抜き力を負担することはできません。その理由は、気泡の発生による水平剛性変化と破断耐力の低下にあります。引き抜き力は、免震層の各部材性能のバランスにおいても生じないように計画すべきです。

よって、部分的な短スパンや部分的な耐力壁の配置を避けるべきです。

### ③免震層の性能と偏心 :

地震応答性能を高めることを目標とすると、一般に免震部材の数を少なく、部材径を小さくする方が効果的ですが、免震層の偏心の調整を優先する必要があります。偏心率は、各免震部材の支持荷重（長期荷重）と免震部材の等価水平剛性を用いて免震層の重心と剛心を計算し求めます。

偏心率が大きくなると加振方向に対し直交方向の振れが増幅し、簡易な2次元の串団子モデルによる応答解析結果よりかなり大きな応答になります。よって、3次元の立体解析でねじれ成分を考慮した解析で設計すれば結論が得られますが、配置計画で調整できれば、無駄な労力や経費を省くことが可能です。配置の基本は、(支持荷重/免震部材の水平剛性)の比を各部材一定にすることです。

免震層の偏心率を完全にゼロとすることは不可能ですが、一般に3%以下にすることが立体解析をしないための条件とされています。この3%は、極く稀に発生する地震時を対象にしていますが、小変形から大変形時の免震層の状態においても確認し、想定する変形範囲で揺れないことが重要です。

告示2009号では、偏心率の上限を3%としており、この条件を満たさない場合は、免震層の応答変位を10%割り増しするルールとなっています。

### ④免震部材とEV位置、PS位置の調整:

免震部材は、図 3-3.1 に一般的な免震部材の上下フーチングの収まりを示します。積層ゴムでは、フーチング形状は取り付けベースプレートの左右に 10~15cm 程度へり空きをとった大きさになります。

EVシャフトが柱に近接する場合、地震時に、免震部材がEVシャフトと衝突し、変形できなくなります。

また、上部フーチング内部にシャフトが欠きこまれ、免震部材のアンカーボルトが定着できない場合があります。この場合の対策は以下の方法等を選択します。

(対策) A: シャフトを移動する。平面計画を変更する。

B: 免震部材のレベルを下げる。

C: 柱を丘柱として免震部材配置を行わない。偏心調整、浮き上がり調整を確認する。

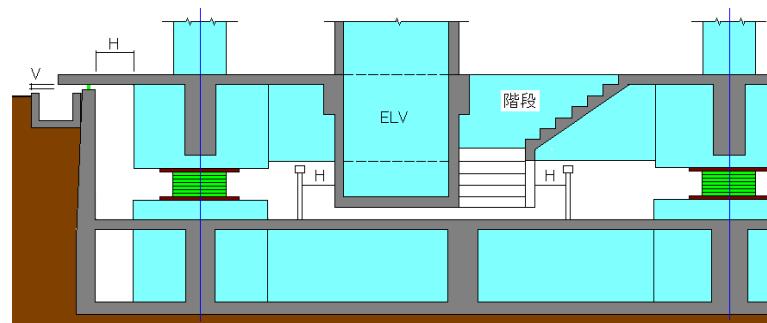


図 3-3.1 一般的な免震部材の上下フーチングの収まり(出典:文献9)

## ⑤水平クリアランス :

前掲 3-1 で敷地境界と建物位置の関係における水平クリアランスについて説明しましたが、免震層では上部構造部に定着する建築部材と下部構造に定着する建築部材が変形時に相互に障害物にならないようにする必要があります。例えば、以下の関係もチェックします。

■積層ゴム上部と別置きダンパーの下部の衝突

■積層ゴム・別置きダンパーと設備配管の下部の衝突

■設備配管上部と別の設備配管の下部の衝突

水平クリアランスの量は、地震応答による変形量に余裕量を加算した値を基に決定されます。また、免震部材の変形性能は、それ以上であることが解析結果を保証する条件となります。

よって、以下の①、②の関係が必要で、③の関係も“予期せぬ地震”に対して望まれるものです。

- ①免震部材の限界水平変形量 > 解析の最大応答変位
- ②障害物との水平クリアランス > 解析の最大応答変位
- ③ 障害物との水平クリアランス > 免震部材の限界水平変形量

## ⑥地震時の歩行者の安全性と EXP の詳細:

基礎免震の場合、擁壁と外壁間のクリアランスは、犬走りスラブで多い地震時に開口が生じない重なりサイズを設けます。しかし、隣地境界をスラブ先端が越える設計は変形を保証できない意味で認められていません。(日本建築センターの評価審査による) その場合、図 3-3.2 のような“すり出し式”、“押し出し式”的EXPプレートを設置する場合があります。

また、このEXP方式は、犬走りスラブによる段差をなくし、フリーアクセスを計画する場合に用いられます。ただし、この場合、可動時に歩行者に接触したり、地震後に隙間が生じ放置されないような配慮が必要です。

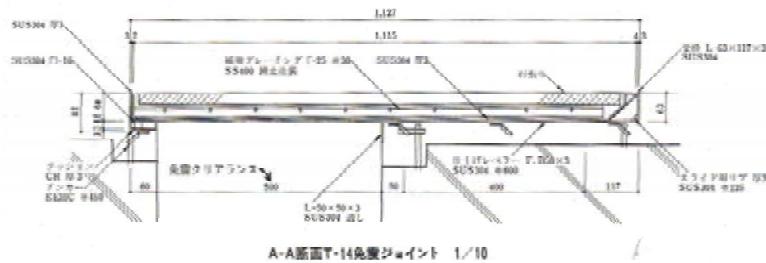


図 3-3.2 “すり出し式”、“押し出し式”的EXPプレート例(出典:参考文献 9 )

## ⑦維持管理のスペースを確保する:

大地震、暴風、常時の異常環境(火災など)に対して免震部材に損傷が生じていないか定期的または臨時にメンテナンスを行うことが義務付けられています。その詳細は第 13 話で述べます。免震層は、免震部材以外に設備管(給水、排水、ガス)、電気線が横引きに配置されます。さらに各配管を支持する架台や吊り材が混在します。その検査のためには、個々の免震部材に近づき目視検査、測定検査ができるように、動線とスペースを確保する必要があります。これらの条件に関して法律による詳細な規定はありませんが、JS SIの維持管理基(参考文献 No.12)が参考にされています。また、万一、著しい損傷を受けた場合は、取替える必要があり、1階床に取り替え用のマシンハッチを計画しておく配慮が必要です。

### 3-4. 建物断面計画を調整する

また、同様に建物断面計画を以下の点で調整します。断面・立面計画においても免震部材を1柱1基の配置を前提とし、以下の基本事項を考慮しながら①～⑥項目に関する設計を行います。

- ・免震性能の確保：水平変形を考慮したレベル、寄りを確保して配置し、引き抜きの発生抑える。
- ・経済性、付加応力の低減：免震層の高さをなるべく少なくする。
- ・維持管理を前提とする：免震部材のメンテナンスを行うスペースを確保する。

#### ① 建物高さと免震部材の引き抜きの調整

免震構造の設計で最も避けたい問題点が、免震部材に著しい引抜力が生じることです。前節で説明しましたように多くの積層ゴムの引き抜き耐力は、 $-1.0\text{N/mm}^2$ までとされています。告示2009号では、安全性を高める意味で積層ゴムの引き抜き耐力は認められていません。圧縮応力がゼロまでの使用が許容されています。

この現象は、耐力壁による支点反力の影響や短スパンによる転倒反力などが影響します。立面上には、転倒モーメントによる支点反力の影響が原因となります。連層耐力壁のスパンでは水平力が集中し、更に厳しくなります。

一般に建物の短辺Dと高さHの比率(アスペクト比 H/D)は、純フレーム構造においても5程度が限界となります。図3-4.1には、4質点に簡易モデル化し、層せん断力係数を免震構造と想定した仮定値で設定した建物の転倒モーメントと釣り合いから 反力Vの引き抜き限界となるアスペクト比を概算しています。

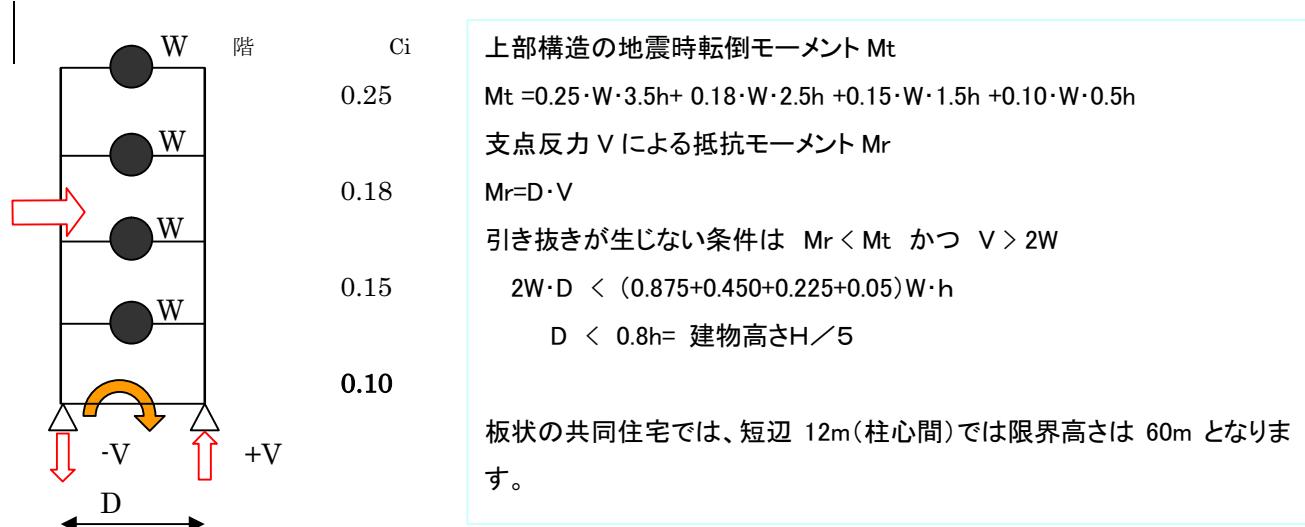


図3-4.1 4質点簡易モデルによる転倒モーメントの釣り合いから求めた引き抜き限界となるアスペクト比

この引き抜きに対する対策としては、上部構造の調整と免震部材の調整があります。

#### (構造による対策)

- A. 耐力壁を除き、スパンDを大きくし、アスペクト比を4程度とする。
- B. 直交スパンを広げるなど長期支持荷重を増加させる。
- C. 建物高さを低くする。

#### (免震部材による対策)

- A. 積層ゴムを大きくし、引き抜き面圧を下げる。
- B. 引き抜き応力を負担しないすべり支承などを使用する。ただし、瞬時に浮き上がるため応答に与える影響や偏心の変動を確認する必要がある。
- C. 引き抜き耐力のある直動転がり支承などを使用する。

#### (設計性能による対策)

- A. 免震層の免震性能を向上させ、地震時の設計層せん断力を低くする。
- B. フレーム解析モデルにおいて免震部材の鉛直剛性を評価する。

### ② 免震層の位置の調整

一般に、免震層の位置は1階床下と基礎の間に設けます。その特徴は、前掲「1-5. 免震層の位置と構造的特長」で説明しています。“基礎免震”以外に“中間階免震”を選定する理由は以下のような場合です。

- 平面的には建物と敷地境界の距離が少なく、調整が難しい場合。
- 立面・断面的には、地盤の掘削量を減らしたいという経済性、犬走りスラブやEXPプレートをなくしたいというデザイン性を優先する場合
- 一般階と1階の用途がことなり、重要度がことなる場合の対応を考慮する場合。

例えば、共同住宅の中高層マンションの1階が駐車場や店舗になっている場合など

### ③ 鉛直クリアランスの調整

免震層が変形できる条件には、水平クリアランスの確保と鉛直クリアランスが必要です。その量は、上部構造と下部構造が接触しない量でよい訳ですが、一般には50mm程度(施工時)が必要としています。

この鉛直クリアランスがもっと少なくなりがちな部位は、以下のようないどころで注意が必要です。

- A. 免震層の擁壁天端と犬走りスラブ底の間隔
- B. 入り口の階段と地盤の間隔
- C. 免震部の底スラブと非免震建物の底スラブの交差部分の間隔
- D. EVシャフトの底スラブと耐圧スラブ間隔
- E. 中間階免震とした場合の免震層外壁、階段・設備・EVシャフトの水平スリット幅

また、この量は、下記の要素量から算定しています。

$$\begin{aligned} \text{鉛直クリアランス}[50\text{mm}] &> \text{基本クリアランス}[10\text{mm}] + \text{上部荷重による収縮}[3 \sim 5\text{mm}] \\ &+ \text{クリープ収縮}[2\% \cdot 4 \sim 5\text{mm}] + \text{施工誤差}[10\text{mm}] + \text{変形によるダイビング}[3 \sim 5\text{mm}] \\ &= [\text{計: } 30\text{mm} \sim 35\text{mm}] \end{aligned}$$

#### ④ 免震層の高さを想定し調整する

免震層の高さは、基礎免震、中間階免震の区別なく、図 3-4.2 に免震層の断面例を示すように以下の部位の高さから決定されます。詳細設計前では下記の推定高さを用い、免震層の高さを想定し、掘削量や建物高さを決め他の部位の設計を進めます。精算後余力があれば縮めます。

$$[\text{免震部材の高さ } H_o] = [\text{上部フーチング高さサイズ} : (= \text{上部梁せい } h_1 + \text{上部アンカ一定着長さ } h_2)] \\ + [\text{免震部材の高さ } h_3] + [\text{下部アンカ一定着長さ } h_4]$$

例 RC造の場合：

- ・低層共同住宅  $H = [h_1: 1,000] + [h_2: 200] + [h_3: 400] + [h_4: 200] = 1,800 \sim \text{mm}$
- ・中層、高層共同住宅  $H = [h_1: 1,500] + [h_2: 200] + [h_3: 500] + [h_4: 200] = 2,400 \sim \text{mm}$
- ・超高層共同住宅  $H = [h_1: 2,000] + [h_2: 200] + [h_3: 600] + [h_4: 200] = 3,000 \sim \text{mm}$

#### [ 計算モデル ] :

なお、免震部材の高さは、積層ゴムを想定しています。2次形状係数5程度、アンカープレート厚 30mm 程度とします。また、上部の梁せいは、スパン、幅、および材料強度で変更調整を行います。

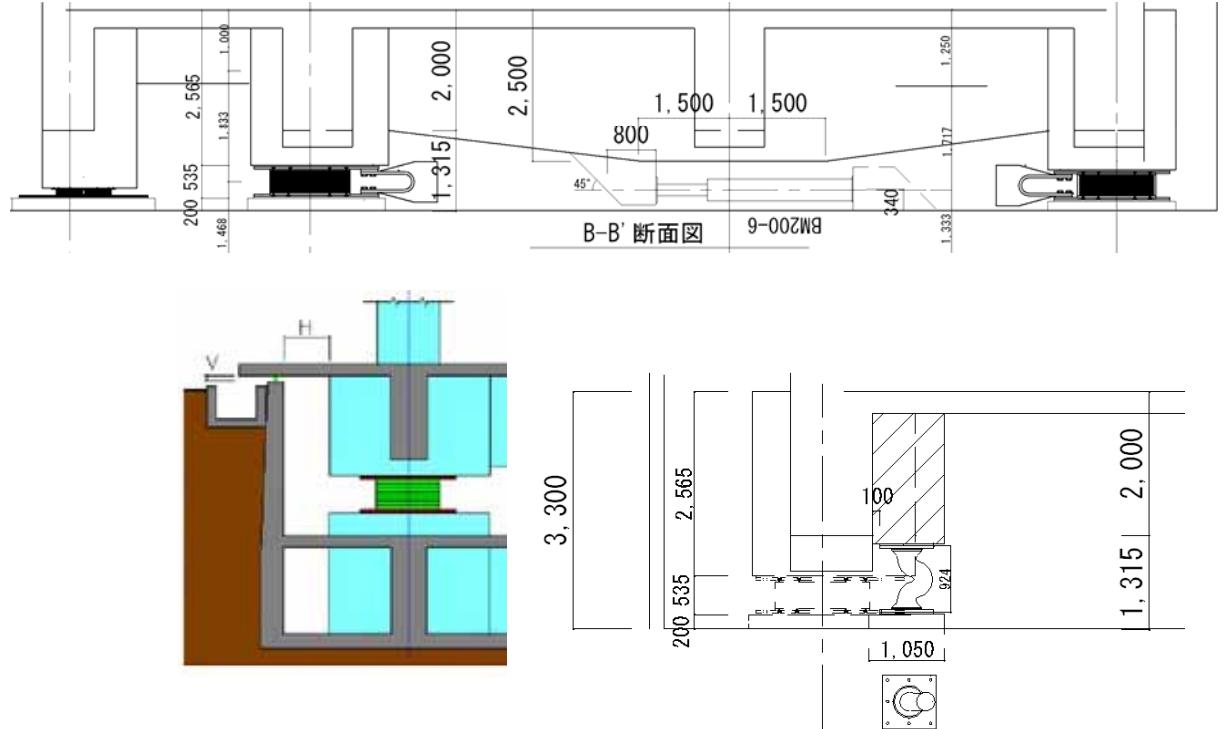


図 3-4.2 免震層の高さの構成例

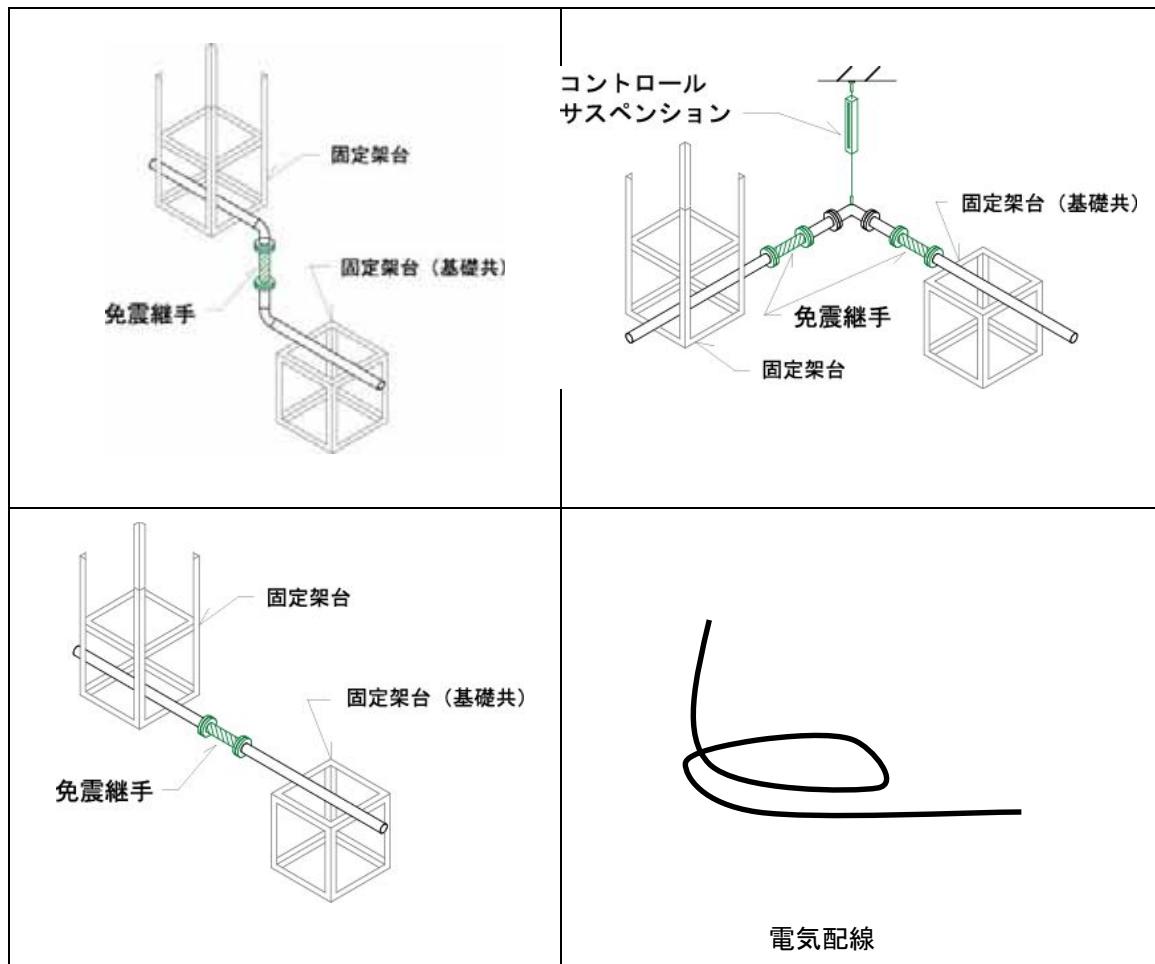
### 3-5. 設備の收まりを調整する

道路に埋設されているライフライン(ガス、水道、下水、電気など)の設備の計画に関して上部、下部構造部では従来の建物と特に変わることはありませんが、免震層は特有な計画が必要です。一般に擁壁を貫通して引き込まれ、免震層でパイプシャフト直下まで配置され上部構造に立ち上げられますが、免震層の変形には追従できるようにします。表 3-5.1、表 3-5.2 は、各設備のフレキシブルジョイント(免震継手)の例を示します。

表 3-5.1 免震継手の種類例

配管種別	配管材料	変位方向	変位吸収量	● 継手長さ	継手材質
給水管	ライニング鋼管(VB)	水平	600mm	● 1600mm	ゴム
排水管	鋳鉄管、塩ビ管	水平	600mm	● 1500mm	ゴム
消火管(連結送水管)	配管用炭素鋼鋼管	水平	600mm	● 2000mm	メタル
ガス管	配管用炭素鋼鋼管	水平	600mm	● 2200mm	SCH80

表 3-5.2 各設備のフレキシブルジョイントの例



### 3-6. 免震部材のメンテナンスと取替えを想定する

免震部材の耐久性は、劣化促進試験等で60年以上といわれています。ただし、この劣化促進試験は通常の室内での生活気温や湿度を条件としています。著しく異なる環境下では、耐久性が異なります。また、不慮の火災、洪水では、損傷を受けることが想定されます。

維持管理では通常・定期・臨時の3段階の点検を行い、この様な状況に早期対応することが必要です。

その結果、規定した損傷が発見された場合は、取替えることになります。一般に取り替えるためには、免震部材の周辺に上部荷重を支持する仮設架構と揚重するジャッキ設備を設けます。アンカーボルトは、取替えを想定した袋ナット・ボルトを使用しており、取り替えが可能になっています。

取り外した免震部材は正常なものと取り替えるわけですが、搬入・搬出を考慮しておかなければ、不要に取り壊し、取り外し部分が増え、取替え経費以上の経費が掛かりことになります。

少なくとも外部から免震部材を運搬するための経路の想定をしておく必要があります。なお、維持管理用の点検口は必須のものです。

### 3-7. 上部構造の仮定荷重と仮定断面を設定する

前掲の3-1節、3-2節、3-3節、3-4節までに建物配置、平面形状、構造種別、免震層の位置を想定できた状態とし、ここでは、従来の耐震構造の設計方法に沿って、上部構造の仮定断面を設定します。

- ①スパン割りは、構造種別、平面プラン、免震層の位置、外壁からの寄りなどを考慮し設定します。従来の耐震構造と同程度の断面形状とするのであれば、スパンはやや大きくすることが可能です。
- ②固定荷重、積載荷重は従来通りですが、免震部材上部にフーチングが必要になることや、基礎部の荷重として免震部材重量が追加されます。
- ③長期荷重に対しては、従来の通り余裕のある断面サイズ、配筋構成としておきます。
- ④短期荷重の内、断面は地震荷重で決定されます。一般に暴風時の荷重は、地震荷重の20から30%になります。

免震部材やその配置の設計には、上部構造の荷重が明確になっている必要がありますが、上部構造の設計には免震層の性能が明確になることが必要です。“荷重が先か？”それとも“免震部材が先か？”ということです。作業を進めるためにはどちらかに仮定を設ける必要があります。

計算作業の流れから行きますと、フレームモデルがある程度できた状態で、そのモデルによる地震力に対する確認を行う段階にあり、地震荷重を先行して仮定します。

経験的に、下記の分類による設定が考えられます。これは、設計者それぞれが今後習得すべき値です。この想定設計層せん断力係数分布は、図3-7.1のようなになります。

なお、この地震力は、極稀に発生する地震を想定しており、断面を保有耐力状態で設計することも可能ですが、2-1節で要求性能を考えたとおり、機能維持を保証する短期許容応力以内とします。

低層建築	: $C_o=0.15$ 程度 増分 0.02/階、搭屋 0.03~0.05/階
中高層建築	: $C_o=0.12$ 程度 増分 0.01~0.015/階、搭屋 0.05~0.075/階
超高層建築	: $C_o=0.10$ 程度 増分 0.005~0.0075/階、搭屋 0.05~0.10/階

[計算モデル]

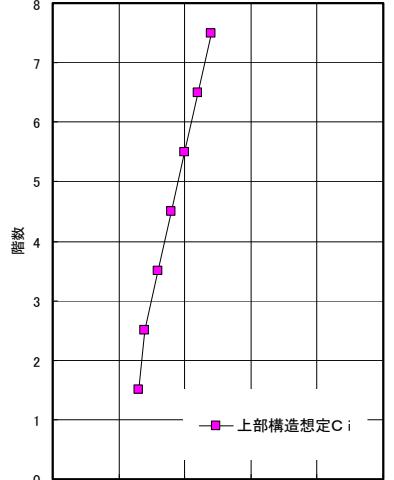


図3-7.1 想定設計層せん断力係数分布

### 3-8. 解析フレームモデルの作成と予備1次設計

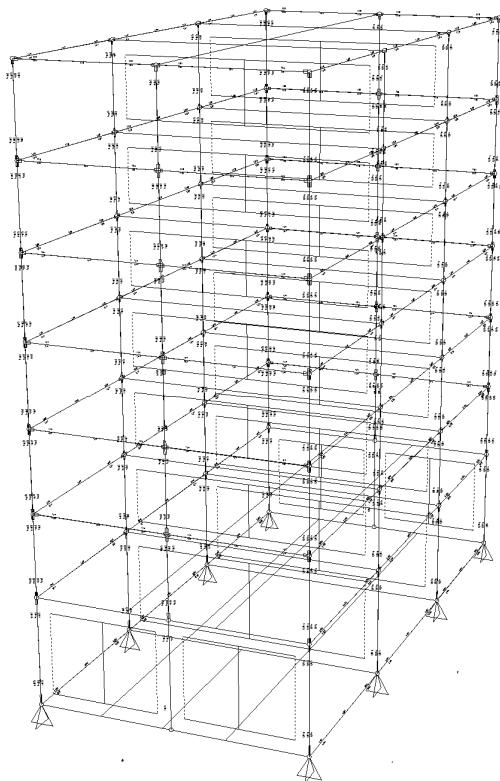
#### ① 解析フレームモデルの作成

上部構造のフレームの仮定断面、各種荷重の設定ができると解析用フレームモデルを作成します。低層建築では手計算も可能ですが、ここでは、一貫計算ソフトまたはフレーム解析ソフトの使用を想定します。

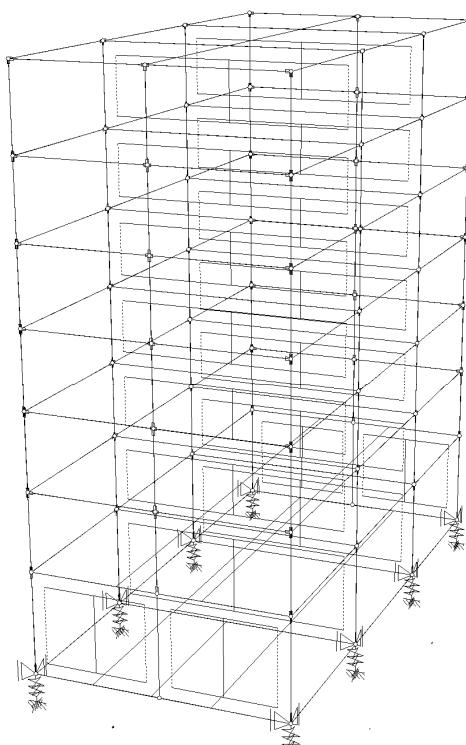
免震構造とした場合は、図 3-8.1 にフレーム図を示すように免震支持点はピン支持とします。常識的なことですが、積層ゴムやすべり支承は地震時に変形しますが、すべてをローラー支承にしますと不安定構造となり解析できません。

なお、地震時に免震部材の鉛直剛性を考慮できるモデルでは、引き抜き力の緩和になります。

[告示計算モデル]



(長期荷重用解析フレーム)



(地震時荷重用解析フレーム)

図 3-8.1 免震部材を設けた解析フレーム図

## ②予備1次設計

よって、地震時においても免震支承部は、変形していないと考えて地震力に対して応力解析をします。実際には変形を伴い、免震部材の中心が変位します。その際に免震部材の水平せん断力と鉛直荷重の重心のずれによる付加モーメントが免震部材を接続する上下部材に発生します。これを図 3-8.2 のように外力として作用させることで変形している状態を近似します。鋼材・鉛ダンパー、オイルダンパーの反力も同様です。

なお、この外力は接続する梁部材の応力に付加される方向で作用することに注意が必要です。また、上部フーチングの重量を仮定し付加荷重として支持荷重に加算します。また、免震部材の設計では、免震部材の荷重は、性能試験を支持荷重で行っており追加する必要はありません。ただし、下部の基礎構造の設計では加算する必要があります。

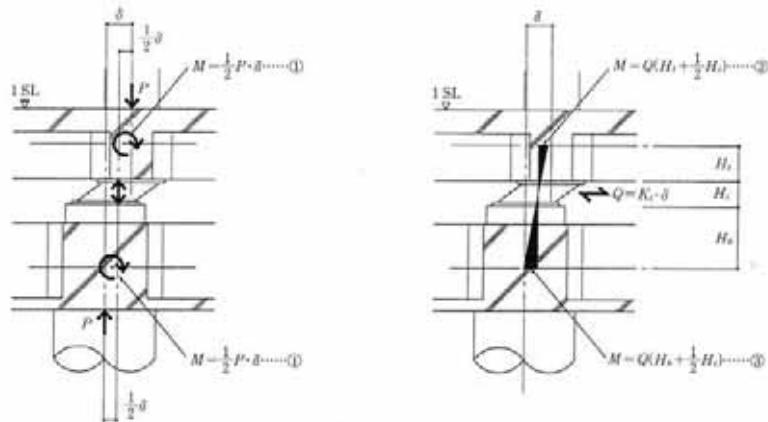


図 3-8.2 地震時の変形状態を近似した付加外力

(出典:「4秒免震への道 免震構造設計マニュアル」高山峯夫ほか著 理工図書)

## ③荷重分布と層剛性分布を調整する。

一般に、地震応答解析の応答は、高さ方向の荷重(固定荷重、積載荷重)分布と層剛性分布が比例的であれば安定した応答になります。剛性率はこの問題をある程度考慮したものですが、重量分布は考慮されていません。重量分布は、固有モードに現れ、高次モードの影響が高くなります。時刻歴解析では、上部構造の応答分布を求めて設計するため、重量分布の特性も考慮した対応になりますが、告示計算にはその規定はありません。層間変形角(1/300 以下)の規定はその対策の1つですが、あくまでも応答の乱れを予想しない層せん断力分布による静的解析によるものです。

告示計算により設計層せん断力を設定する場合、特に壁、プレースの配置においてこの点を留意する必要があります。このあたりの設計ポイントは、参考文献19で説明されており、参照願います。