

## 中間層免震建物の地震応答

## SEISMIC RESPONSE OF MID-STORY ISOLATED BUILDINGS

小倉桂治\*, 高山正春\*\*, 辻田 修\*\*\*, 木村雄一\*\*\*\*, 和田 章\*\*\*\*\*

Keiji OGURA, Masaharu TAKAYAMA, Osamu TSUJITA,

Yuichi KIMURA and Akira WADA

As arise great demands for maintenance of functions and protection of properties, recently many base isolated buildings have been constructed. Depending on the geometrical shape and occupancy type of buildings, mid-story isolation system is more suitable than conventional base isolation system for some buildings. Therefore, it is necessary to shed light on the seismic behavior for buildings with the mid-story isolation system.

For the mid-story isolated buildings, nonlinear time history analyses as well as modal analyses with equivalent linear model were carried out. As the results, it is concluded that the mid-story isolation system is effective in reducing the seismic response and if the effect of higher modes related to the location of isolation devices can be properly evaluated, the proposed system is considered to be one of the efficient choices in the seismic design.

**Keywords :** Mid-story isolation, Base isolation, Seismic response, Equivalent linear method

中間層免震, 基礎免震, 地震応答, 等価線形化手法

## 1 はじめに

阪神・淡路大震災以後、免震構法の適用が増大している。これは、建物に対する要求が、大地震時の人命保護にとどまらず機能保持や財産保護にまで高まってきたことに加え、想定した以上の過大入力に対する構造安全の確保にまで至っているためと考えられる。同じ目的により、既存建物の耐震改修にも免震構法の適用が図られている。

免震構法はその初期において、ベースアイソレーションの名の通り基礎下に免震層を設置することを原則とした。しかし建物の機能や形態を考えると基礎免震が必ずしも適さない場合も多く有り、そのことが免震構法の採用に一つの障害となっている。既存建物の耐震改修においては、そのような場合がより多い。以上の状況に中間層に免震を施すことの意義があり、中間層免震の地震時挙動の把握の必要性がある。

基礎免震はアイソレートつまり水平動に関して地盤と建物を絶縁するという考え方であった。その究極は絶対制振である。その後、現実に採りえる部材・方策を鑑みれば、免震は絶縁の概念ではなく、免震層を含めた架構全体を一つの振動系として捉える方がより実情把握に有効であるという考え方に定着した。そしてその流れは免震構造の設計を地震エネルギー吸収の観点で整合をとり、「免震構造

設計指針」<sup>1)</sup>にその成果を結実した。

本研究はその考え方の延長にある。つまり、中間層免震も地震エネルギー吸収の観点では、基礎免震の延長であり、基礎免震～中間層免震～TMD(マスダンパー方式による減衰システム)にいたる耐震対策を同一概念で捉えるべきものとする。

中間層に免震を施した建物の設計例は少なく、従ってその挙動把握は十分に行われているとは言えない。筆者等は湯河原研修センター改修工事において中間層免震構法を実施適用し、その実用性を確認した。<sup>2),3)</sup>本研究はその設計行為に先立って行った予備的検討に若干の解析を加えて、免震部材挿入位置と免震効果の関係を、設計的な有用性を求める立場から考察したものである。これにより、耐震設計における対策の選択肢をより豊かに適切にすることを意図するものである。

## 2 本研究の進め方

構造物の振動応答は入力地震動特性、質量とその分布、剛性・耐力とその分布、減衰性能とその分布に依存する。

本研究は、まず、特定の建物モデルに対して、免震部材挿入位置をパラメータとした時刻歴応答解析を行い挿入位置の地震応答に与える影響を分析する。

\* 大成建設設計本部 副本部長  
\*\* 大成建設設計本部構造設計部 室長・工修

\*\*\* 大成建設技術研究所 室長・博士(工学)  
\*\*\*\* 大成建設設計本部構造設計部 係長・工修

\*\*\*\*\* 東京工業大学建築物理研究センター 教授・工博

Deputy General Manager, Design and Proposal Division, Taisei Corporation  
Manager, Structural Engineering Dept., Design and Proposal Division, Taisei Corporation, M. Eng.  
Manager, Technology Research Center, Taisei Corporation, Dr. Eng.  
Structural Engineering Dept., Design and Proposal Division, Taisei Corporation, M. Eng.  
Prof., Structural Engineering Research Center, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

次に、降伏耐力をパラメータとする時刻歴応答解析を行い、免震層の降伏耐力が地震応答に与える影響を把握し、上記解析に降伏耐力に関する一般性を加える。

さらに、構造体の固有周期、復元力特性および入力地震動の影響を把握するため、それぞれに関する解析モデルを設定し、時刻歴応答解析によりその影響を評価する。

以上の時刻歴地震応答解析によるパラメータスタディを施しても、本テーマの一般性の把握には十分でない。そこで、包絡的挙動把握に近づけることを意図し、等価線形化手法による応答把握を行って、中間層免震建物の動的挙動の一般性の確認を試みる。ここでは、等価剛性、等価減衰および速度応答スペクトルに関して既往の知見に則った扱いによる、等価線形化手法を用いた応答把握を行い、その結果を時刻歴応答と比較検討することにより、応答性状の把握を補強する。

### 3 解析モデルおよび地震応答解析

対象建物として 16 層の鉄骨造建物を想定し、1 次固有周期が 2 秒となる免震を施さないモデル(非免震モデル)を設定する。この非免震モデルの基礎、4 層、8 層および 12 層位置を免震層とした 4 つの免震モデルを設定し、固有値解析と地震応答解析を行い、応答性状を把握する。

#### 3.1 解析モデル

非免震の解析モデルは 16 質点等価せん断モデルとし、構造特性を以下の条件により設定する。

- ・ 1 次固有周期 2.0 秒
- ・ 各層重量 1000tf (ただし、ペント重量等を想定し最上層 2000tf、基礎 1500tf)
- ・ 階高 4 m
- ・  $A_i$  分布のせん断力で各層の層間変形が同一となる剛性分布
- ・ 免震層以外の復元力は弾性

各層重量および剛性を表 1 に示す。

免震モデルとして図 1 に示すような基礎、4 層、8 層、12 層位置に免震部材を挿入した 4 つのモデルを考える。免震部材の復元力を以下のように設定する。

表 1 16 質点等価せん断モデル

| 層  | $W_i(t)$ | $\Sigma W_i(t)$ | $\alpha_i$ | $A_i$ | $Q_i(C_0=1.0)$ | $K(t/cm)$ |
|----|----------|-----------------|------------|-------|----------------|-----------|
| 16 | 2000     | 2000            | 0.12       | 2.60  | 5198           | 452.0     |
| 15 | 1000     | 3000            | 0.18       | 2.26  | 6778           | 589.5     |
| 14 | 1000     | 4000            | 0.24       | 2.04  | 8174           | 710.9     |
| 13 | 1000     | 5000            | 0.29       | 1.89  | 9428           | 820.0     |
| 12 | 1000     | 6000            | 0.35       | 1.76  | 10561          | 918.5     |
| 11 | 1000     | 7000            | 0.41       | 1.66  | 11586          | 1007.7    |
| 10 | 1000     | 8000            | 0.47       | 1.56  | 12513          | 1088.2    |
| 9  | 1000     | 9000            | 0.53       | 1.48  | 13345          | 1160.7    |
| 8  | 1000     | 10000           | 0.59       | 1.41  | 14089          | 1225.3    |
| 7  | 1000     | 11000           | 0.65       | 1.34  | 14747          | 1282.6    |
| 6  | 1000     | 12000           | 0.71       | 1.28  | 15321          | 1332.5    |
| 5  | 1000     | 13000           | 0.76       | 1.22  | 15814          | 1375.4    |
| 4  | 1000     | 14000           | 0.82       | 1.16  | 16227          | 1411.3    |
| 3  | 1000     | 15000           | 0.88       | 1.10  | 16562          | 1440.4    |
| 2  | 1000     | 16000           | 0.94       | 1.05  | 16819          | 1462.8    |
| 1  | 1000     | 17000           | 1.00       | 1.00  | 17000          | 1478.5    |
| 基礎 | 1500     | 18500           |            |       |                |           |

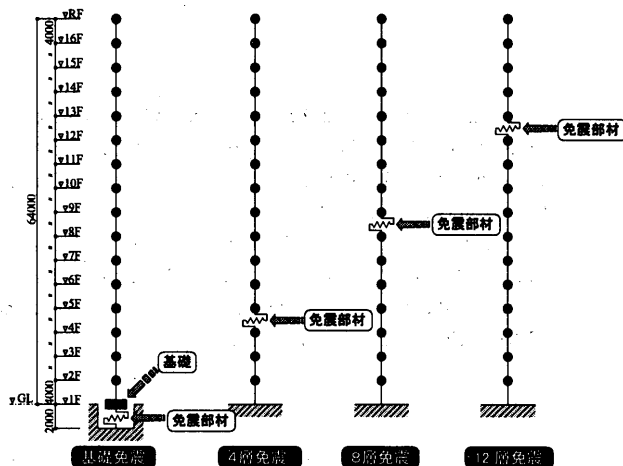


図 1 解析モデル

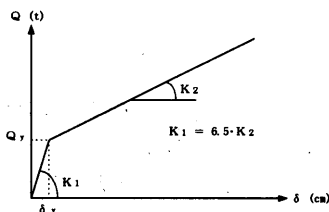


図 2 免震部材の復元力

表 2 免震支承の復元力

|       | $K_2$ (t/cm) | $K_1$ (t/cm) | $Q_y$ (t) | $\delta_y$ (cm) | $K_2/K_1$ |
|-------|--------------|--------------|-----------|-----------------|-----------|
| 基礎免震  | 82.81        | 538.2        | 1110.0    | 2.062           | 0.1538    |
| 4層免震  | 62.66        | 407.3        | 840.0     | 2.062           | 0.1538    |
| 8層免震  | 44.76        | 290.9        | 600.0     | 2.062           | 0.1538    |
| 12層免震 | 26.86        | 174.6        | 360.0     | 2.062           | 0.1538    |

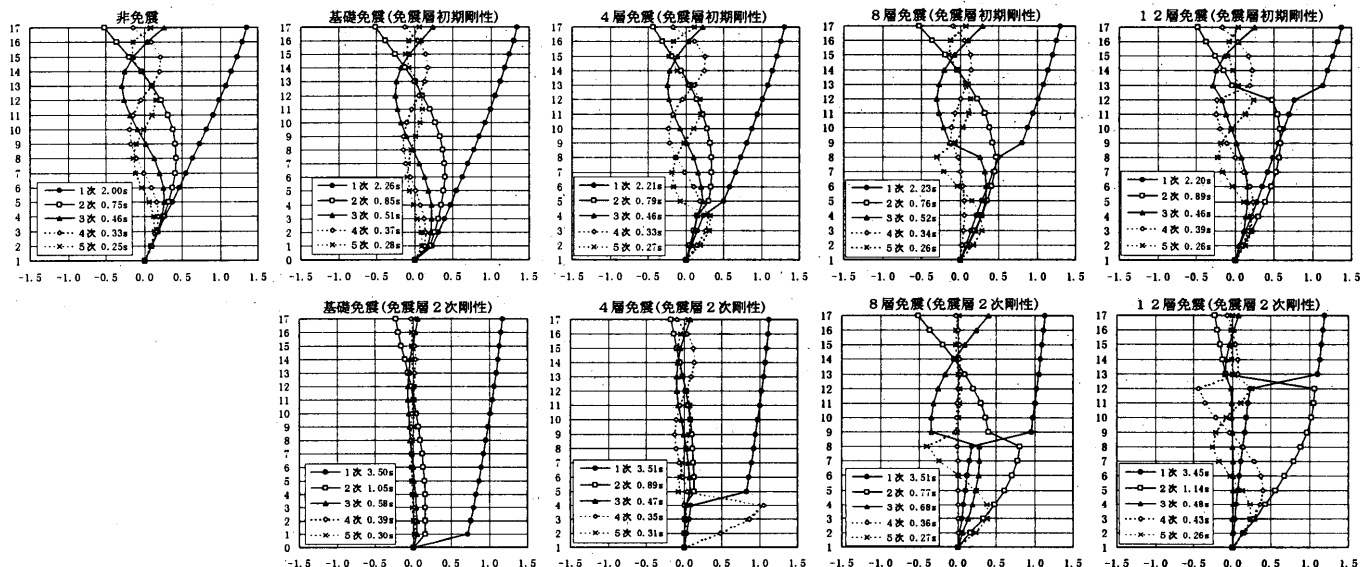


図 3 固有モード

- ・免震層上部を剛体としたときの降伏後剛性(2次剛性 $K_2$ )による固有周期(免震周期)が3.0秒になるように免震層剛性を設定
- ・初期剛性( $K_1$ )は降伏後剛性の6.5倍
- ・降伏せん断力は免震層上部の重量の6%
- ・復元力特性はNormal Bi-linear型

免震層の復元力特性を図2に、各定数を表2に示す。

### 3.2 固有値解析

免震層の剛性を初期剛性および2次剛性とした場合の固有値解析を行い、その結果を刺激関数として図3に示す。

固有値解析結果から以下のことがわかる。

- ・免震層の2次剛性による固有値では、免震層上部は免震層が大きく変形する1次モードが支配的になる。
- ・しかし、非免震の2次以降のモードで変形しない位置を免震層とした場合(8層免震)は、免震層上部の2次モード以降の刺激関数が大きくなることもある。

### 3.3 地震応答解析

非免震モデルと4つの免震モデルについて以下の条件で地震応答解析を行う。

- ・入力地震動 BCJ-L2(建築センター波レベル2 最大加速度355.7gal、最大速度57.4kine)
- ・免震層以外の減衰は免震層上部構造と免震層下部構造それぞれの最下部を固定とした1次固有周期に対して2%の剛性比例型減衰、免震層の粘性減衰は0%

時刻歴応答解析結果を図4~8に、入力エネルギー量を表3に示す。図4と図8には免震層下部のみの時刻歴応答解析結果を点線で示す。これらから以下のことがわかる。

- ・どの層を免震しても応答せん断力低減効果がある。
- ・どのモデルでも総入力エネルギーはほぼ同じである。
- ・どの層を免震しても免震層の吸収エネルギーはほぼ同じである。
- ・免震層の変形は上層を免震層にしたときほど大きい。これは同じエネルギーを吸収するためには、降伏耐力の小さい免震部材は変形が大きくなるためと考えられる。
- ・OTMはどの層を免震しても低減する。
- ・免震層下部の加速度応答は大きい。
- ・8層免震は免震層上部の応答が他の免震に比べ大きい。これは、固有値解析の項で述べたように2次以降のモードも卓越するためと考えられる。6.3で考察を加える。
- ・どの免震の場合でも免震層下部の応答は下部単独の応答よりもせん断力の低下の傾向がみられる。

表3 入力エネルギー量

|       | 総入力エネルギー<br>(t·cm) | $V_E$<br>(cm/s) | 免震層の吸収エネルギー<br>(t·cm) | 免震層の割合 |
|-------|--------------------|-----------------|-----------------------|--------|
| 非免震   | 590106             | 261             | -                     | -      |
| 基礎免震  | 563998             | 244             | 443835                | 0.79   |
| 4層免震  | 511120             | 243             | 396206                | 0.78   |
| 8層免震  | 554735             | 253             | 408791                | 0.74   |
| 12層免震 | 569048             | 256             | 439323                | 0.77   |

### 4 免震層の降伏耐力の影響

免震層の降伏耐力が応答性状に与える影響を知るため、パラメータスタディを行い、その結果について考察する。

非免震のi層の最大応答せん断力( $Q_{0,i}$ )を基準として、その層

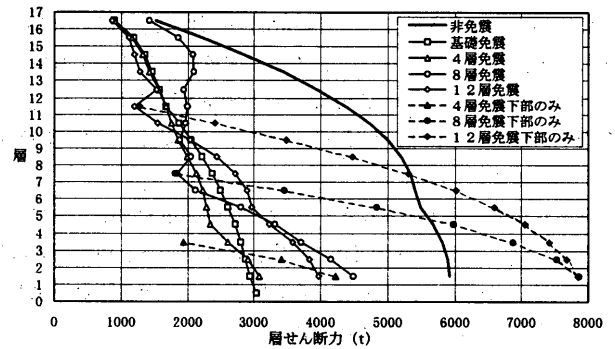


図4 応答解析結果(最大層せん断力)

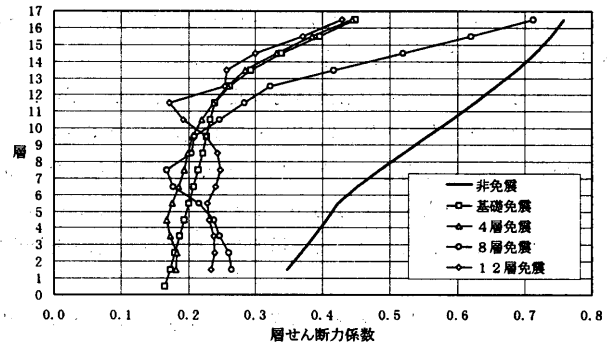


図5 応答解析結果(層せん断力係数)

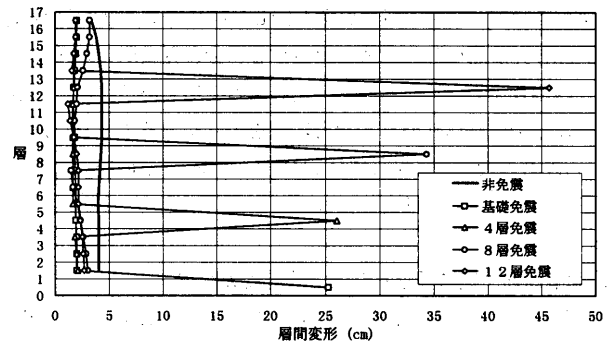


図6 応答解析結果(最大層間変形)

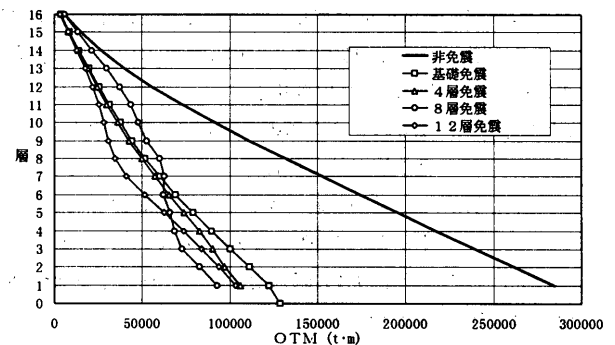


図7 応答解析結果(最大転倒モーメント)

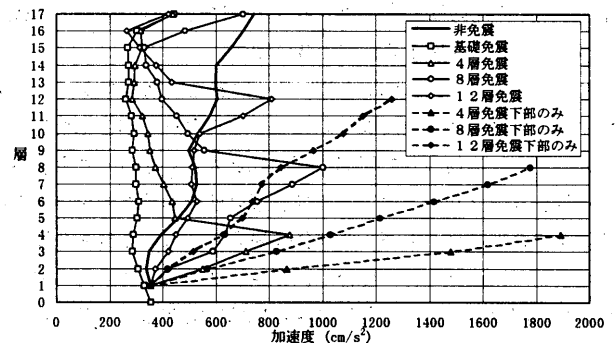


図8 応答解析結果(最大加速度)

を免震層としたときの免震層の降伏耐力の比( $Q_{yi}/Q_{oi}$ )を約0.04~1.0の間で変化させる。 $Q_{oi}$ の値は非免震モデルの応答解析結果より、基礎免震が6000t( $C=0.32$ : $C$ はせん断力係数)、4層免震が5675t( $C=0.41$ )、8層免震が5200t( $C=0.52$ )、12層免震が3950t( $C=0.66$ )とする。

解析結果の総入力エネルギーに対する免震層での吸収エネルギーの割合( $E_{免震層}/E_{ALL}$ )を図9に示す。この図から、免震層の降伏せん断力が小さいほど、免震層での吸収エネルギーの割合が増加するが、その割合には限度があることがわかる。

図10に免震層の変形、免震層直上層のせん断力係数及び1層のせん断力係数を縦軸、 $Q_{yi}/Q_{oi}$ を横軸として各免震毎に整理した結果を示す。この図から、以下のことがわかる。

- ・どの層を免震した場合でも免震層の変形は $Q_{yi}/Q_{oi}$ が0.3~1.0の範囲はほぼ一定であり、0.1以下では急激に大きくなる。
- ・どの層を免震した場合でも免震層直上層のせん断力係数は $Q_{yi}/Q_{oi}$ が小さいほど小さくなるが、0.1以下では逆に大きくなる。
- ・1層のせん断力係数は免震層上層のせん断力係数と同様な傾向がある。

以上のことから、どの層を免震層とした場合でも、免震層の降伏耐力( $Q_{yi}/Q_{oi}$ )で整理すると、免震層での吸収エネルギーの割合、免震層の変形及びせん断力係数が同じ傾向にあることがわかる。

実際に免震層の降伏耐力を設定する場合、免震層での吸収エネルギーの割合を大きくすること、免震層の変形をある程度におさえること及び免震層以外のせん断力係数を小さくすることを目的とすれば、外力の大きさに対して $Q_{yi}/Q_{oi}$ が0.2~0.4の範囲に安定した適正域があることが推定される。

### 5 固有周期、構造種別及び入力地震動の影響

非免震モデルが鉄骨造建物で1次固有周期が2.0秒の場合について解析を行ってきたが、固有周期、構造種別及び入力地震動が異なる場合についてもモデルを設定し、解析を行う。条件は以下の通りである。免震層、重量及び階高は3.1のモデルと同じとし、免震層以外の剛性と復元力のみを変化させる。

- ・1次固有周期 1.0秒と3.0秒の2種類の鉄骨造建物  
免震層以外は弾性
- ・1次固有周期 1.3秒の鉄筋コンクリート造建物  
トリリニア(武田モデル)の復元力(図1-1)
- ・地震動として JMA KOBE(兵庫県南部地震神戸海洋気象台 NS成分 最大加速度818.8gal)を追加

以上のモデルを設定し、パラメータスタディした結果の総入力エネルギー( $V_E$ 換算)、総入力エネルギーに対する免震層での吸収エネルギーの割合を図12、図13に示す。

BCJ-L2の場合は総入力エネルギーは安定した値である。総入力エネルギーに対する免震層での吸収エネルギーの割合は構造種別が鉄骨の場合、建物の固有周期が短いほど大きくなる。また、構造種別が鉄筋コンクリートの場合は免震層以外でも履歴減衰があるので免震層での吸収エネルギーの割合は鉄骨造に比べて小さくなる。

地震動が JMA KOBE の場合は、非免震において総入力エネルギーが大きい場合があるが、免震の場合はほぼ安定している。総入力エネルギーに対する免震層のエネルギーの割合は BCJ-L2 に比べると

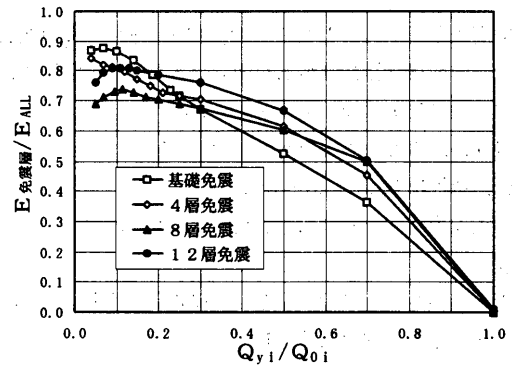


図9 免震層での吸収エネルギーの割合

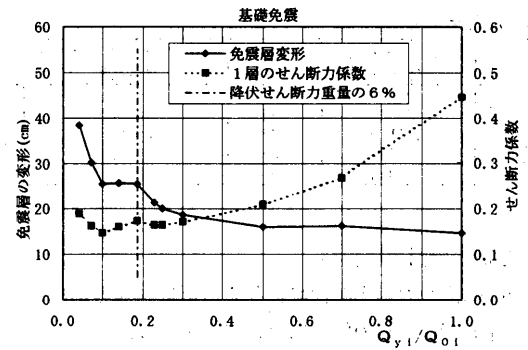
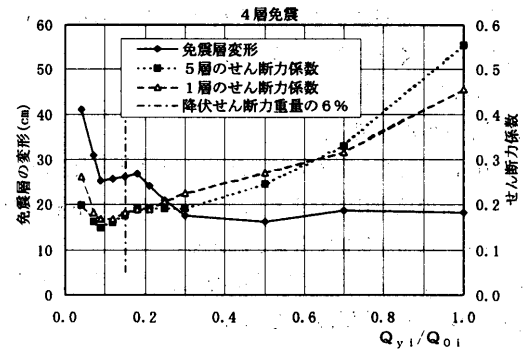
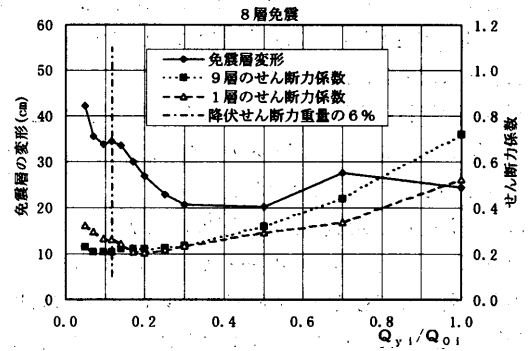
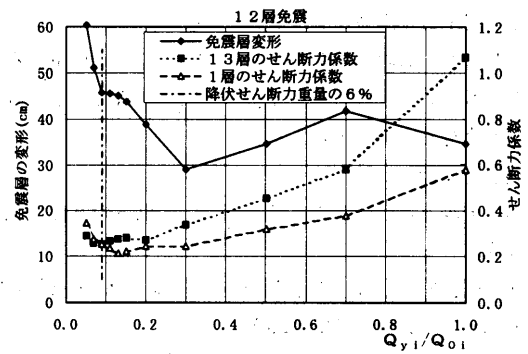


図10 免震層の降伏耐力を変化させた場合の応答解析結果

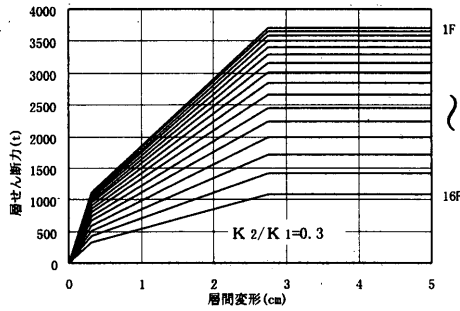


図 1.1 鉄筋コンクリート造建物の復元力

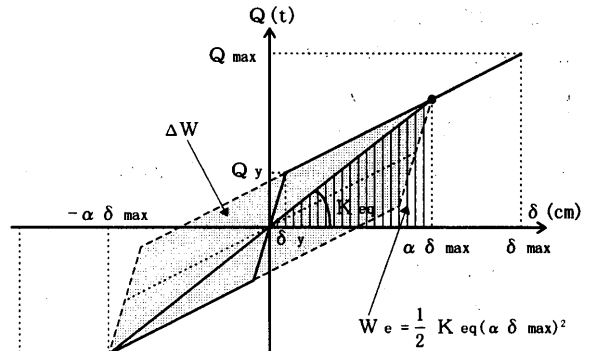


図 1.4 免震層の等価剛性と等価減衰の求め方

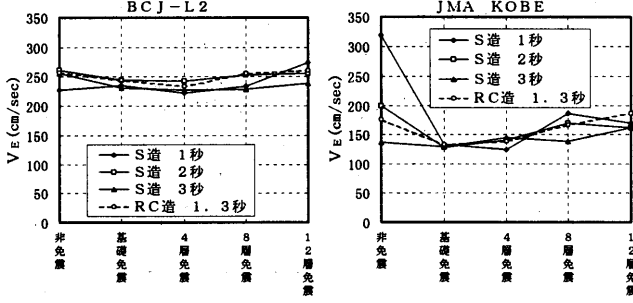


図 1.2 総入力エネルギー (VE換算)

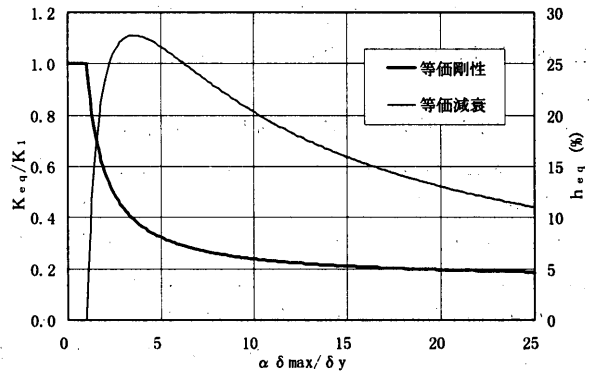


図 1.5 免震層の等価剛性と等価減衰

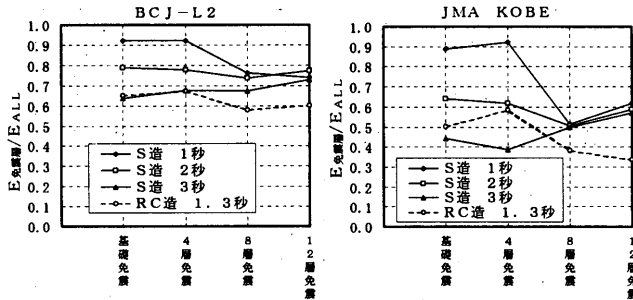


図 1.3 免震層での吸収エネルギーの割合

図 1.5 に免震部材の等価剛性と等価減衰を示す。図の横軸は変形を降伏変形 ( $\delta_y=2.062\text{cm}$ ) で除して無次元化し、同様に縦軸の等価剛性は等価剛性 ( $K_{eq}$ ) を初期剛性 ( $K_1$ ) で除して無次元化してある。等価剛性は降伏変形の 5 倍程度以上では変形の増加に対して安定した値になる。等価減衰は降伏変形の約 3 倍をピークにして、変形の増加に対して徐々に小さくなる傾向にある。

小さくなる。これは JMA KOBE のスペクトル特性の影響で、2 次、3 次モードの入力エネルギーが大きく、免震層が変形する 1 次モードの入力エネルギーが相対的に小さくなるためと考える。

以上より、固有周期、構造種別及び入力地震動が異なる場合でも、中間層免震の応答性状と基礎免震の応答性状には基本的には大きな差異がないことがわかる。

## 6 等価線形化手法を用いた応答の定性的把握

等価線形化手法によって中間層免震の応答せん断力の把握を試みる。免震層以外は弾性と仮定し、免震層のみ等価剛性と等価減衰を用いる。

### 6.1 免震部材の等価剛性と等価減衰

免震部材の復元力特性は Normal Bi-linear 型を用いている。図 1.4 に示すように最大変形を  $\delta_{max}$  とし、 $\alpha \delta_{max}$  の変形振幅で定常振動すると仮定して等価剛性と等価減衰を求める。

等価剛性 ( $K_{eq}$ ) として復元力-変位平面上の点と原点を結ぶ直線の勾配を用いる。

等価減衰 ( $h_{eq}$ ) は定常振動したときの履歴ループの 1 サイクル分の面積 ( $\Delta W$ ) と等価ポテンシャルエネルギー ( $W_e$ ) から (1) 式によって求める。<sup>4)</sup>

$$h_{eq} = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{\Delta W}{W_e} \quad (1)$$

### 6.2 応答把握の手順

以下に等価線形化手法による応答把握の手順を示す。

- ① 免震層の最大応答値を仮定する。
- ② 免震層最大変形より、等価剛性と等価減衰を求める。このとき、最大変形と定常振幅の比 ( $\alpha$ ) は 65% を用いることにする。
- ③ 免震層の等価剛性を用いて固有値解析を行い、1 次～5 次の固有値および固有モードを求める。
- ④ 固有モード (刺激関数) を用いて、ひずみエネルギーで重みづけした各次の等価減衰 ( $h_m$ ) を求める。このとき、免震層は免震層が大きく変形する 1 次モードのみ②で求めた等価減衰を用いる。
- ⑤ 入力地震動の各次の 5% 速度応答スペクトル ( $S_{v5\%}$ ) を求める。
- ⑥ 各次の等価減衰に対する速度応答スペクトルを求める。<sup>5)</sup>  
( $1+3h+1.2\sqrt{h}$  を用いて換算する。)

$$S_v(T_m, h_m) = \frac{1+3h_m+1.2\sqrt{h_m}}{1+3 \times 0.05+1.2\sqrt{0.05}} S_v(T_m, 0.05) \quad (2)$$

$S_v(T_m, h_m)$ : 周期  $T_m$ 、減衰定数  $h_m$  の速度応答スペクトル

- ⑦ 各次のせん断力を求める。

i 層の m 次のせん断力  $Q_{im}$  は (3) 式となる。

$$Q_{im} = \beta_m (u_{im} - u_{i-1,m}) K_i S_v(T_m, h_m) / \omega_m \quad (3)$$

$\beta_m$ : m次の刺激係数

$u_{im}$ : m次の i 層の固有ベクトル

$K_i$ : i 層の剛性 (t/cm)

$\omega_m$ : m次の固有円振動数

⑧各次のせん断力から SRSS (Square Root of Square Sum.) で応答せん断力を求める。

i 層のせん断力  $Q_i$  は(4)式となる。

$$Q_i = \sqrt{\sum_{m=1}^5 (Q_{im})^2} \quad (4)$$

⑨求められた免震層の応答せん断力と仮定した最大変形での免震層のせん断力を比較する。

⑩免震層のせん断力が仮定値と大きく違う場合は、①に戻り⑨を参考にして免震層の最大応答値に関する仮定値を変更する。

以上を繰り返すことにより、応答を把握する。

### 6.3 検討結果

入力地震動 (BCJ-L2) の減衰定数 5% の速度応答スペクトルを図 16 に示す。免震部材の最大変形は時刻歴応答解析結果の値を用いた。計算結果を図 17 に示す。

計算結果と時刻歴応答解析結果を比較すると、どの層を免震した場合も時刻歴応答解析結果を精度よく表現できていることがわかる。8 層免震の免震層上部の応答が他の免震に比べて大きくなる特徴があることも把握できている。従って、中間層免震の応答は等価線形化手法を使った本手法で把握可能である。

### 7. まとめ

中間層免震の基本応答性状を時刻歴応答解析及び等価線形化手法により明らかにし、つぎの事柄に設計上の知見を見出した。

- ・中間層免震による、層せん断力、転倒モーメントおよび層間変形の低減効果は設計的に有効であり耐震設計の選択肢の一つになり得る。免震はアイソレートの概念よりも、エネルギー吸収機構として捉える方が実態を適切に把握出来る。
- ・基礎・中間層免震において、免震装置の降伏耐力と応答低減効果関係を把握できた。これによると降伏耐力の適正範囲がある程度安定した広がりを持っている。このことは想定入力以上の過大入力に対しての安全余裕度の設定に有効であると考えられる。
- ・基礎免震に比べて、中間層免震では応答低減効果に免震部材設置位置に関係した高次モードの影響がある。実施適用に当たってはその影響を適正に評価する必要がある。
- ・中間層免震では、免震層下部構造の加速度低減効果は期待できない。本構法を採用するに当たってはそのことに対する設計的配慮が必要となる。
- ・今回検討を行っていない上下動の影響、免震層下部構造と上部構造の減衰の設定については今後の検討課題と考える。

#### 参考文献

- 1) 日本建築学会：免震構造設計指針，1989 年
- 2) 小倉桂治，前澤澄夫，高山正春，辻田修，木村雄一，溝淵知己：中間層免震の採用による耐震改修 その 1～2，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.615～618，平成 9 年 9 月
- 3) 小倉桂治，前澤澄夫，辻田修，小林淳，中田宜男：中間階および基礎における免震レトロフィット工事—構造設計—，日本建築学会技術報告集 第 5 号，pp.37～41，平成 9 年 12 月
- 4) 柴田明徳：最新耐震構造解析，森北出版，昭和 56 年
- 5) 秋山宏：建築物の耐震極限設計，東京大学出版会、第 2 版 昭和 53 年

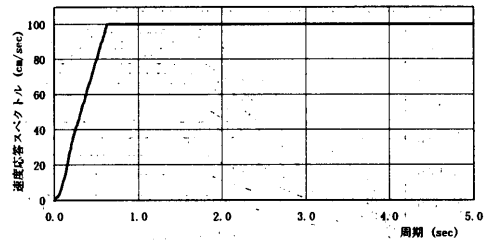


図 16 減衰定数 5% の速度応答スペクトル (BCJ-L2) (ターゲットスペクトル)

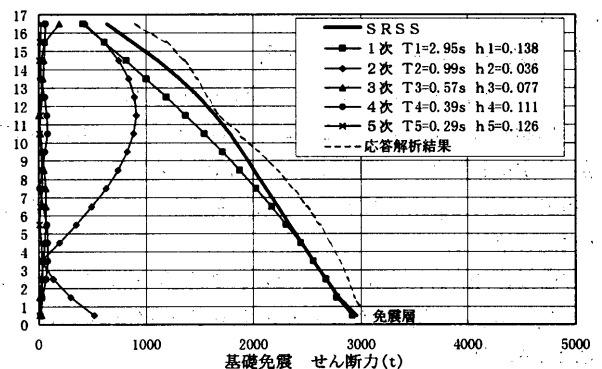
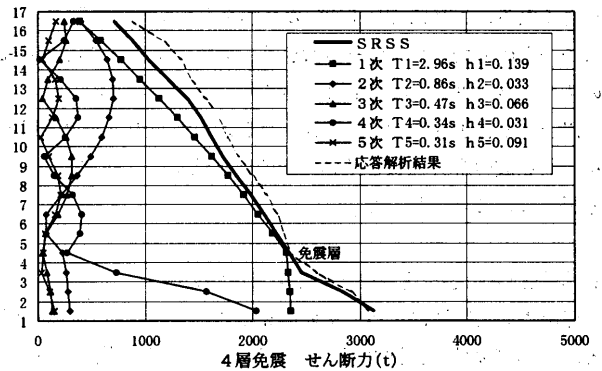
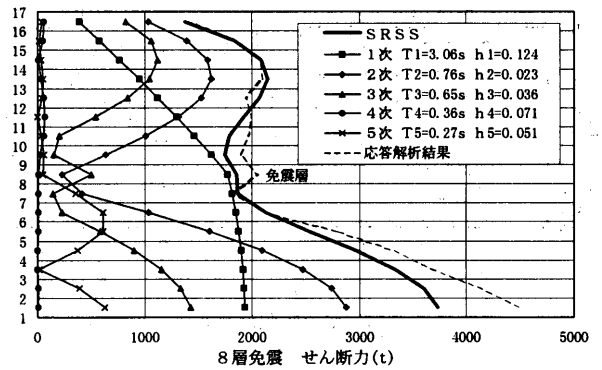
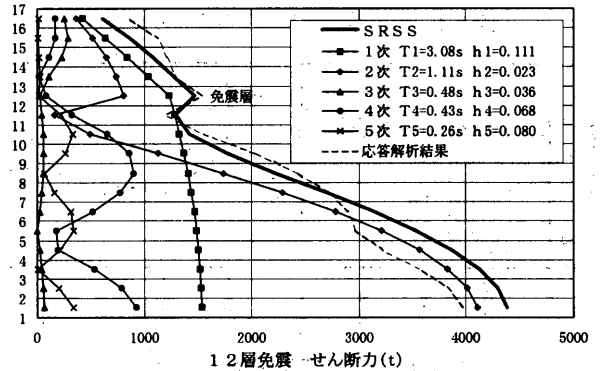


図 17 応答把握結果

(1998年5月10日原稿受理, 1998年9月18日採用決定)